



中国自动化学会通讯

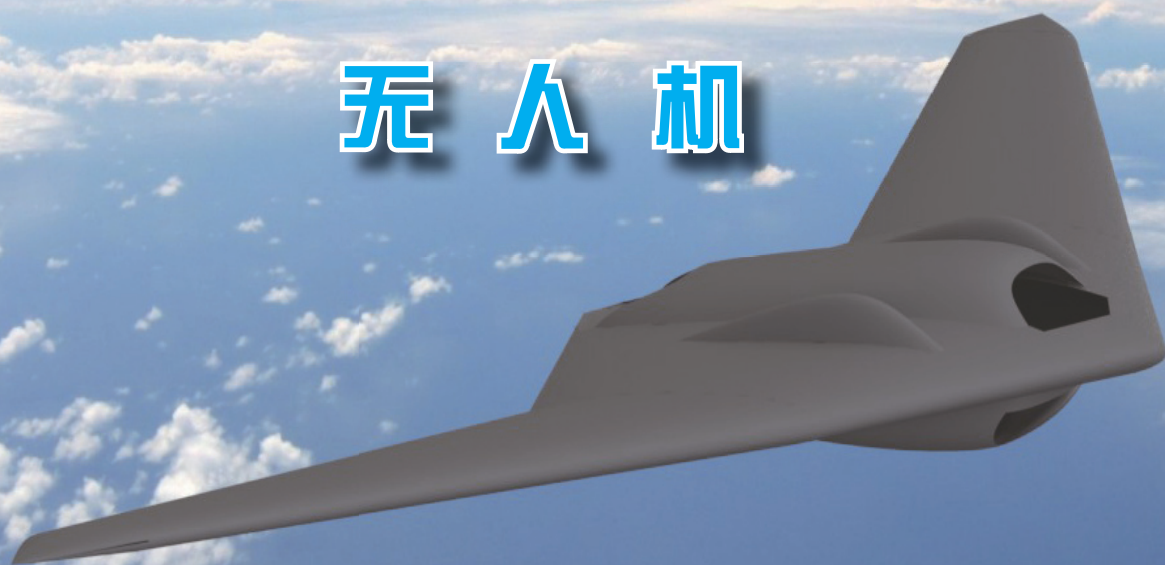
COMMUNICATIONS OF CAA

主办：中国自动化学会

<http://www.caa.org.cn>

E-mail: caa@ia.ac.cn

无人机



ISSN 2151-335X



6 915920 700067

2014年9月

第3期

第35卷 总第176期

Contents



第35卷 第3期 总第176期 2014年9月

www.caa.org.cn

主办单位：中国自动化学会



主编的话

无人机是指一种带动力的、通过无线电遥控或由自身程序控制装置操纵的、利用空气动力承载飞行并可重复使用、执行特定任务的无人驾驶飞行器。无人机由于具有尺寸小、重量轻、结构简单、机动性高、隐蔽性好、成本低廉、适应性强等特点，在军用和民用领域受到了广泛关注。

为促进自动化领域的研究人员了解无人机的最新研究进展，《中国自动化学会通讯》2014年的第三期专刊关注的主题是无人机。本期专刊共包含了5篇优秀的文章，在此向为本专刊贡献稿件的各位专家学者表示衷心的感谢。

清华大学的戴琼海教授等综述了无人机视觉导航的前沿进展，介绍了无人机视觉导航系统的结构，给出了飞行环境的三个表示层次：基于特征点表示的、基于特征点关系表示的、基于飞行环境表示的视觉导航研究。天津大学的鲜斌教授等介绍了视觉系统在无人机导航与控制中的应用，分析了基于光流法、基于单目视觉同步定位与建图法的无人机自主控制研究现状，并对其他基于视觉的自主控制方法进行了展望。中国科学院自动化研究所的易建强研究员等全面分析了高超声速飞行器控制中的各类不确定性和干扰的来源，系统综述了现有的各类高超声速飞行器不确定性和抗干扰控制方法，对不确定性控制的关键研究问题做了总结和展望。南京航空航天大学的姜斌教授等介绍了近年来无人机飞行控制系统容错控制技术的发展状况，总结了现有的无人机容错控制技术在军用和民用等领域的应用情况，展望了无人机容错控制技术的未来研究方向。北京航空航天大学的吴森堂教授等介绍了无人作战飞行器自主编队的发展需求，论述了无人作战飞行器协同制导控制基本概念、原理和方法，给出了协同制导控制系统的主要功能、基本结构及其评价等级，并对协同制导控制理论与技术发展给予了展望和评价。

无人机的发展是目前国际上各个发达国家竞相争夺空间技术的焦点之一，是一个国家民族的综合国力的体现。开展无人机系统相关技术研究具有十分重要的学术价值、战略意义和应用前景。希望这期专刊能够介绍无人机研究领域的最新热点，推动我国在无人机领域的创新和发展。

刷德崇

专题

- 4 无人机视觉导航
- 12 视觉系统在无人机导航与控制中的应用
- 19 高超声速飞行器不确定性控制研究综述
- 29 无人机飞控系统的容错控制技术研究综述
- 40 无人作战飞行器协同制导控制研究综述

专栏

- 51 国际自动控制联合会宪章与附则

新闻

- 83 学会副理事长、东北大学柴天佑院士团队获国际论文奖
- 83 第一届“台达杯”两岸高校自动化设计大赛成功举办
- 84 《自动化学报》入选“第三届中国精品科技期刊”并荣获2013“百种中国杰出学术期刊”称号
- 85 中国自动化学会走进江苏宿迁助力“宿迁智造”
- 86 第八届“三菱电机杯”全国大学生电气与自动化大赛举行

本刊声明

为支持学术争鸣，本刊会登载学术观点彼此相左的不同文章。来稿是否采用并不反映本刊在学术分歧或争论中的立场。每篇文章只反映作者自身的观点，与本刊无涉。

录

Chinese Association of Automation

会员园地

- 87 中国自动化学会第29届青年学术年会暨中国自动化学会第8届青年科学家学术论坛在渤海大学召开
- 87 探讨智能建筑发展新形势——2014华南自动化智能建筑论坛隆重召开
- 88 第33届中国控制会议在南京举行
- 89 2014山东高校IT院长论坛成功举行
- 90 全国第十六届空间及运动控制学术技术学术会议成功召开
- 91 第25届中国过程控制会议在大连召开
- 92 2014年中国国际智能制造与机器人产业发展大会在蓉举办
- 93 四川省自动化与仪器仪表学会、成都自动化研究会机器人技术与应用专业委员会成立

党建强会

- 94 全国学会党务干部学习班在兰考举办



刊名题字：宋 健

编辑：中国自动化学会办公室

地址：北京市海淀区中关村东路95号 邮编：100190

电话：(010)8254 4542 E-mail:caa@ia.ac.cn

传真：(010)6252 2248 http://www.caa.org.cn

中国自动化学会通讯

Communications of CAA

编辑委员会

荣誉主编

戴汝为 中国科学院院士、中国科学院自动化研究所研究员
孙优贤 中国工程院院士、浙江大学教授
郑南宁 CAA理事长、中国工程院院士、西安交通大学教授

主 编

刘德荣 CAA常务理事、中国科学院自动化研究所研究员、
复杂系统管理与控制国家重点实验室副主任

副主编

陈俊龙 CAA常务理事、澳门大学教授
张化光 CAA理事、控制理论专业委员会委员、东北大学教授

专题栏目

主 编

周东华 CAA副理事长、清华大学教授

编 委

蒋昌俊 CAA常务理事、同济大学教授
戴国忠 计算机图形学与人机交互专业委员会主任委员、
中国科学院软件研究所研究员
张丽清 CAA荣誉理事、生物控制论与生物医学工程专业委员会
主任委员、上海交通大学教授

观点栏目

主 编

孙彦广 CAA常务理事、副秘书长、冶金自动化研究设计院教授级高工

编 委

范 铠 CAA理事、仪表与装置专业委员会主任委员、上海
工业自动化仪表研究院教授级高工
陈宗海 CAA理事、系统仿真专业委员会主任委员、中国
科技大学教授
张文生 CAA理事、计算机图形学与人机交互专业委员会
秘书长、中国科学院自动化研究所研究员

新闻栏目

主 编

陈 杰 CAA副理事长、北京理工大学教授

编 委

熊范纶 CAA理事、农业知识工程专业委员会主任委员、
中国科学院合肥物质科学研究院研究员
李艳华 CAA理事、遥测遥感遥控专业委员会主任委员、
中国航天科技集团公司第704研究所研究员
郝 宏 系统复杂性专业委员会秘书长、中国科学院自
动化研究所高级工程师

译文栏目

主 编

刘 民 CAA理事、名词委员会主任委员、清华大学教授

编 委

王庆林 北京理工大学教授

会员栏目

主 编

张 楠 CAA常务理事、常务副秘书长、办公室主任

编 委

孙长银 CAA常务理事、副秘书长
王兆魁 CAA理事、平行控制与管理专业委员会秘书长、
清华大学副教授

无人机视觉导航

李一鹏，季向阳，戴琼海

清华大学自动化系，北京 100084

摘要：本文是关于无人机视觉导航的前沿综述，介绍了无人机视觉导航系统的结构，给出了飞行环境的三个表示层次：基于特征点表示的视觉导航研究，集中于无人机自主悬停、定位和避障等；基于特征点关系表示的视觉导航研究，集中于特定目标识别、匹配和跟踪及无人机自主着陆等；基于飞行环境表示的视觉导航研究，集中于飞行环境三模建模、自主视觉导航等。无人机视觉导航技术的发展，可大大提高无人机的智能化程度并保障其飞行安全。

关键词：无人机，视觉导航，自主避障，自主着陆，自主跟踪，三维建模

1 引言

无人机（UAV, Unmanned Aerial Vehicle）具有零伤亡、费效比低、部署灵活等优点，适合执行高度危险、超长时间类型的飞行任务，在军事和民用方面得到了广泛应用^[1]。在军事方面，无人机擅长执行情报侦察、高空高速突防、精确快速打击等任务；在民用方面，无人机常被用于通信中继、气象探测、灾害监测、地质探测、地图测绘等诸多领域。无人机多次在重大军事和民事行动中得到应用并取得良好效果，是保障国防安全和保证国计民生的中坚力量。

无人机在多个应用领域大有作为的同时，其执行任务时所处的复杂飞行环境又给其飞行安全带来了巨大威胁，造成了多起坠毁事故^[2]。主要原因包括：因电磁干扰等因素造成定位信号（如GPS）缺失和地面控制站通信中断；飞行环境先验地理信息不完整且气候、光照、地形地貌变化迅速；飞行过程中需要机动处置意外情况（如临时

野外着陆）等。缺失定位和控制信号的“盲”状态无人机系统，迫切需要依靠其机载传感器感知飞行环境信息，提升自主导航能力以满足其全天候全天候的飞行需求。

计算机视觉理论及技术的迅速发展使基于视觉传感器的无人机视觉导航（Vision-based Navigation）成为自主导航的首要研究方向。首先，视觉传感器可以提供实时且丰富的飞行环境信息；其次，视觉传感器适用于无人机高动态飞行过程中的环境信息采集，并具有良好的抗干扰性；最后，多数传感器属于被动传感器，利用可见光或红外传感器成像，具有良好的隐蔽性。欧美发达国家的研究机构如NASA约翰逊空间中心^[3]，MIT^[4]、宾夕法尼亚大学^[5]等顶级高校均在大力发展无人机视觉导航研究，并将研究成果融入下一代航空运输系统计划中，如NextGen^[6]、SESAR^[7]等。

全天候全天候复杂环境中的无人机视觉导航系统体现了未来国防及民用发展的重大需求，计

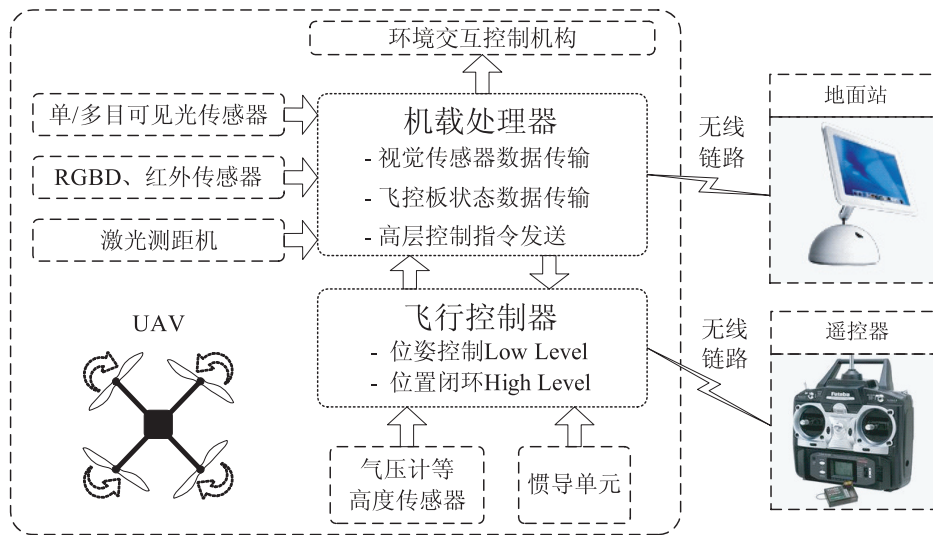


图1 无人机视觉导航系统模块示意图

计算机视觉领域关键技术的突破为其成熟应用提供了重要基础。针对于此，本文着眼于计算机视觉在复杂飞行环境感知方面的应用，从环境信息表示的几个层次出发，介绍其关键技术及典型的无人机视觉导航应用，并展示国际上前沿的研究成果。这些关键技术的突破以及创新成果的综合应用，可有效支持无人机在缺失GPS和地面控制信号等导航信息时依靠视觉信息自主导航，完成全天候全天候的飞行任务并确保其飞行安全。

2 视觉导航系统简述

一个典型的无人机视觉导航系统如图1所示。整个系统分为飞行控制器、机载处理器、传感器组、环境交互控制机构、地面站和遥控器。在无人机进行视觉导航飞行时，传感器组完成环境信息采集，如深度和纹理信息等；机载处理器完成采集数据预处理和与地面站的无线数据传输；地面站与机载处理器构成视觉导航协同处理框架，可完成环境信息三维建模、飞行器自主路径规划等，并生成控制指令；飞行控制器的惯导单元和高度传感器实时测量飞行器的飞行姿态和飞行高

度；机载处理器将相应的导航控制指令传输至飞行控制器，飞行控制器采用PID或自适应控制等控制理论和方法进行飞行器姿态的调整，完成视觉导航飞行动作。

3 飞行环境的表示层次与视觉导航应用

复杂飞行环境的表示是无人机视觉导航的核心关键。从计算机视觉理论的角度来说，自然场景的表示可以分为点、线、面、物体、环境等几个层次。各层次所具有的特征对飞行环境的描述完备性不同，衍生了各种典型的无人机视觉导航应用。视觉导航系统较为复杂且应用类型众多，本文从飞行环境的表示层次及其之间的递进关系角度入手，与视觉导航的典型应用相结合，力图清晰阐述计算机视觉技术与无人机视觉导航具体应用的关联关系。

如图2所示，飞行环境的表示层次可以分为特征点表示、特征点关系表示和飞行环境表示三个层次，各层次中所包含的具体技术对应着无人机视觉导航中的典型应用。

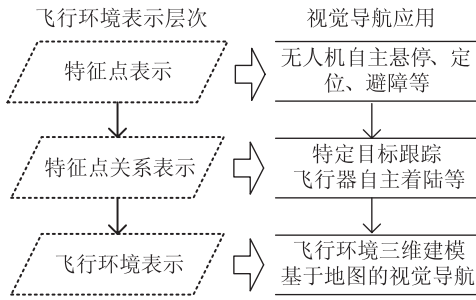


图2 飞行环境表示与视觉导航应用的层次化对应关系

3.1 基于特征点表示的视觉导航

特征点表示的是飞行环境中的基本元素，即构成自然环境中的点。点可以充分表征飞行环境的深度和纹理信息，是最基本的环境信息载体。基于特征点的飞行环境表示，视觉导航系统可以提取飞行环境的稀疏结构，利用特征点匹配估计飞行器位置和姿态的变化，进而实现飞行器的避障和自主定位等功能。

2003年，Gibson首次将光流（Optical Flow）用于对物体运动轨迹的跟踪^[8]，开启了以点为基本元素的视觉导航应用的大门。其基本原理是根据三维空间中点的运动在二维平面投影形成的速度场来判断其运动轨迹并反解传感器的速度变化。传感器采集到的二维图像中 t 时刻点的位置 $(x(t), y(t))^T$ 表示为：

$$\begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{a_0 + a_1 t + a_2 t^2}{1 + c_1 t + c_2 t^2} \\ \frac{b_0 + b_1 t + b_2 t^2}{1 + c_1 t + c_2 t^2} \end{pmatrix} \quad (1)$$

其运动轨迹 p 可由参数向量 $\phi_p = \{a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2, c_0, c_1, c_2\}$ 表示，速度场即为多个运动轨迹的集合 $\Phi = \{\phi_0, \phi_1, \dots, \phi_{N-1}\}$ 。在单位时间内运动微小和光照恒定的假设下，简化为最大后验概率下的优化问题：

$$\Phi_{opt} = \arg \min_{\Phi} E(d | \Phi) + E(\Phi) \quad (2)$$

其中 $E(d | \Phi) = \sum_{\{p\} \in C_1} E_1(d | p)$ ， $E(\Phi) = \sum_{\{p_1, p_2\} \in C_2} E_2(p_1, p_2)$ ， C_1 为 Φ 中轨迹集合， C_2 为描述 Φ 中相邻轨迹关系的集合，能量函数 $E_1(d | p)$ 用以描述图像数据 d 中点的运动轨迹 p ，能量函数 $E_2(p_1, p_2)$ 用以描述轨迹对之间的相关性。

光流法给出了无人机飞行过程中机体与环境之间相对运动矢量的描述方法。基于此，Hugo等人实现了多旋翼飞行器的空中自主悬停^[9]。基于单点的光流法只能提供速度矢量而无法提供距离信息，因而又出现了很多基于多目视觉的光流应用，如巴黎大学的Laurent等人利用多目光流提供的距离信息实现了无人机的自主避障^[10]；更进一步，南加州大学的Stefan等人直接利用光流传感器对无人机的飞行速度估计进行补偿，并结合双目视觉传感器实现无人机在城市上空的自主飞行^[11]。

光流法启发了研究工作者进一步开展利用多个环境特征点信息进行无人机自主定位的研究。其基本原理是首先在环境图像中提取特征点，进而在相邻帧匹配并跟踪同一特征点的位置变化，最后利用多个特征点间的耦合关系反解出相邻帧时间内传感器的位姿变化。一个经典算法是PTAM^[12]（Parallel tracking and mapping），使用单目可见光传感器实现了小范围场景内传感器的自主定位，随后又出现了多个基于单目或多目可见光传感器的自主定位算法^[13-14]。这些极具创新性的工作为由特征点表示的飞行环境中的无人机视觉导航打下了坚实的基础，陆续出现了多个使用这种定位手段的无人机视觉导航研究^[15-16]。

基于特征点表示的视觉导航经过多年发展，已经出现了相关产品。法国派诺特公司于2010年发布的Ar Drone四旋翼飞行器带有光流传感器，能够实现空中自主悬停。但实际飞行过程中环境材质及光照的变化复杂，只有在自然光照充足时才能实现上述功能。由此可见，基于特征点表示的无人机视觉导航应用还需要新的传感器及图像处

理算法的强有力支持。

3.2 基于特征点关系表示的视觉导航

由特征点表示的飞行环境信息属于低维度，在用于自主避障的距离测量和自主定位时面临着巨大的计算压力。实际上，特征点间的相对位置关系隐含了更加丰富的飞行环境信息，如由特征点组成的目标轮廓线、目标匹配模板等。这一层次描述的飞行环境的处理单位不再是点而是描述点之间关系的“线”和“面”特征，所表示的飞行环境信息向更高维度迈进了一步。计算机视觉和计算机图形学提供了多种特征提取算法，使得视觉导航的应用又上升到一个新的台阶，利用目标特征提取与匹配出现了很多典型的视觉导航应用。

最有标志性的视觉导航应用就是基于目标匹配的跟踪。其基本思想是提取目标特征，在前后帧环境信息中搜索并检测该目标是否存在进而完成匹配。根据匹配准则的不同，可以分为基于空间模版匹配^[17]和基于统计信息匹配^[18]两大类。与静态图像的匹配不同，无人机飞行中采集到的环境信息存在着大量平移、旋转和仿射变换，SIFT^[19]算法为高动态视觉导航系统的目标匹配和跟踪提供了重要的支撑。如Thomas等人在SIFT基础上引入SVM，实现了无人机采集视频对车辆的匹配和跟踪^[20]。另一方面，将具有固定位置关系的多个特征点作为整体融入目标跟踪过程中，则可将跟踪看作非线性和非高斯情况下的动态系统状态估计问题，如Isard和Blake用粒子滤波方法成功实现了在复杂环境下对单一目标的轮廓跟踪^[21]。随后，He使用mean shift迭代爬山过程寻找与目标最匹配的位置以实现无人机对某一特定目标的连续跟踪^[22]。同时，借助于活动轮廓模型（active contour model）在图像分割上的优越性能，一些学者将无人机的目标跟踪问题转变成目标轮廓为参数的能量泛函最小化问题^[23]，用活动轮廓做连续的演化形

变并在连续帧中提取目标轮廓^[24]。

无人机视觉自主着陆是另一个重要的应用。美国加州大学伯克利分校的Courtney利用特殊形状的着陆平台中多个特征点的位置关系以降低识别的难度^[25]。其原理为：在透视投影中，已知平面目标的几个点及其之间的几何尺寸，通过对应的像点位置以及它们在图像中的几何尺寸可以解算出无人机坐标系和着陆平台坐标系间的相对位置和姿态。美国南加州大学的工作与之相似，不同之处在于着陆平台选择了H形标志^[26]。SariPaili等人借助GPS完成了组合导航的自主着陆^[27]，基本思路是首先通过GPS引导无人机飞行到着陆平台所在区域，然后使用目标匹配搜索地标并进行自主着陆，简化了图像处理的难度，着陆位置的平均误差较小。国内从事无人机研究的高校包括清华大学、北京航空航天大学、南京航空航天大学和西北工业大学等，也有大量成果公布。

3.3 基于飞行环境表示的视觉导航

基于特征点表示的视觉导航可以实现无人机的自主定位、避障等应用，保证其飞行安全；基于特征点关系表示的视觉导航使无人机具备了对特定目标的识别和跟踪能力，并衍生出自主着陆等典型应用。而基于飞行环境表示的视觉导航，通过传感器采集的环境纹理、深度甚至光谱信息的融合，可以得到对飞行环境更加完备的表示。从飞行器的视角看，飞行环境不仅包括离散的点、线、面和单个目标，更是清晰表示了各目标的关联关系及自身在环境中的相对位置。这是无人机视觉导航的高级层面，可以完成无人机自主定位、飞行环境三维建模及飞行路径规划等，分为基于先验地图的视觉导航和实时生成地图的视觉导航两个方面。

基于先验地图的视觉导航，其基本思路是在无人机飞行过程中识别特征目标，在先验飞行环

境地图中进行搜索和匹配，这类研究主要是飞行器的位置估计和避障。如在室内环境中存在有规则的固定结构，通过图像处理算法提取不变特征，预先建立地图来表示环境。上世纪90年代，Borenstein等人就基于先验地图中的障碍物信息构建势场模型进行路径规划^[28]，并将不确定性加入到先验地图中用以校正传感器误差^[29]。实际上，基于特征点关系表示的视觉导航研究中，利用人为设置的地标点进行导航的研究都可以归于此类。

无人机执行任务时所处的飞行环境复杂，大部分情况下没有任何先验信息，此时基于实时地图生成的视觉导航研究变得更为重要。无人机在完全未知的环境中进行视觉导航时，需要同时完成地图绘制、自主定位和导航，即经典的SLAM问题^[30]（SLAM: Simultaneous Localization and Mapping）。基本原理是先选定环境中的标记点，记下当前时刻自身与标记点的相对位置；移动一段距离后，再次搜寻之前记下的标记点，观察现在和标记点的位置关系，通过与之前的相对位置对比即可计算出自身的位姿变化；将观测到的环境信息在自身坐标系下的坐标转换到世界坐标系下的坐标，即可获得地图。SLAM问题的概率图模型如图3所示。

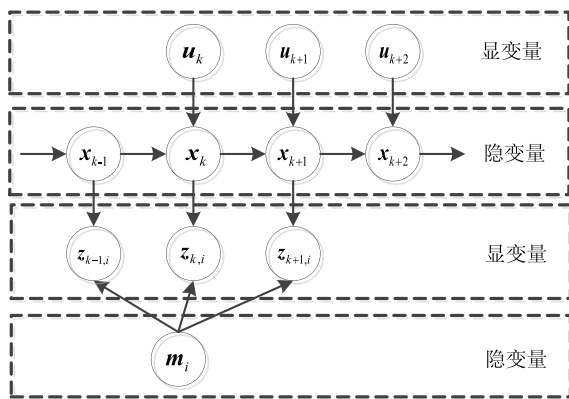


图3 SLAM问题的概率图模型

在 k 时刻， x_k 为无人机的位姿状态向量； u_k 为施加的控制量，其作用为使状态 x_k 转换到状

态 x_{k+1} ； m_i 为第 i 个标记点的坐标； $z_{i,k}$ 为对第 i 个标记点的观测； z_k 为所有标记点的观测。 $\mathbf{X}_{0:k} = \{x_0, x_1, \dots, x_k\}$ 为无人机从时刻0到时刻 k 状态的集合； $\mathbf{U}_{0:k} = \{u_0, u_1, \dots, u_k\}$ 为时刻0到 k 的所有控制输入； $\mathbf{m} = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$ 为标记点的集合； $\mathbf{Z}_{0:k} = \{z_0, z_1, \dots, z_k\}$ 为时刻0到 k 的所有观测。此时SLAM问题的数学表述为：

$$P(x_k, \mathbf{m} | \mathbf{Z}_{0:k}, \mathbf{U}_{0:k}, x_0) \quad (3)$$

即SLAM问题就是要估计 x_k ， \mathbf{m} 在 $\mathbf{Z}_{0:k}$ ， $\mathbf{U}_{0:k}$ 和 x_0 已知情况下的后验概率，一般采用卡尔曼滤波或粒子滤波来进行问题求解。

实际应用中，SLAM问题的解法与所使用的传感器有直接关系，可划分为基于可见光传感器、激光测距机和RGBD传感器三类研究。

可见光传感器仅保留成像平面像素点对应的环境中的点的方向信息，无法直接获取深度，限制了其在SLAM问题上的应用。Andrew在EKF-SLAM算法的基础上增加了对标记点的深度估计^[13]，但计算复杂度较高。Klein提出的PTAM算法将SLAM问题分为Tracking和Mapping两个线程^[12]，同时进行传感器位姿跟踪和地图管理，并使用了基于关键帧的地图管理方法。当判断到新的观测数据比之前的观测有较大变化时，确定该次观测为关键帧并对地图进行更新。该框架大大节省了计算量，且观测发生较大变化对应着传感器视角发生较大变化，有利于估计标记点的三维空间位置。苏黎世联邦理工大学的Achtelik使用PTAM与IMU融合完成了室外环境的自主飞行实验^[31]。

激光测距机可以直接获取测量平面内所有点到测量中心的距离，且精度在毫米级，远远超过使用可见光传感器的效果，对于结构化室内环境的SLAM问题是一个非常好的选择。典型的解决方案是Gmapping算法^[32]，本质是基于Rao-Blackwellized的粒子滤波算法，通过引入最近一次的观测数据，对粒子滤波的建议分布进行高斯估

计,大大提高了观测精度。清华大学自动化系宽带网数字媒体实验室搭建的无人机自主视觉导航系统(如图1所示),使用ICP^[33]算法匹配相邻两次激光扫描数据,获取相邻两帧间的位姿变化,作为Gmapping算法粒子滤波的初始位姿值,将局部范围内无人机的位姿估计与全局定位信息优化相结合,达到了厘米级别的环境建模和定位精度^[34],获得了第23届国际空中机器人大会的冠军。

RGBD传感器包含可见光和深度相机两部分,可以同时采集每个像素点的纹理及对应的深度信息,直接获得飞行环境的三维点云数据。深度信息的同步捕获弥补了可见光相机的先天不足,使得该传感器非常适合于3D环境的SLAM问题。基于RGBD传感器的SLAM代表工作来自于德国慕尼黑工业大学^[35-36]和瑞典皇家理工学院^[37]。这些工作的主要差别在于对相邻两次观测数据间相机位姿变化的估计方法,分为基于特征点匹配和基于ICP的方法。基于特征点匹配的方法首先使用RANSAC算法^[38]获得环境特征点的匹配关系,然后从深度图中读取特征点的深度信息,可直接获得特征点的3D坐标,进而求解两帧间相机的位姿变化。而ICP匹配仅适用于深度图,对所有的测量点进行匹配,获取两帧间相机的位姿变化。基于这些工作,MIT的Bachrach等人融合了RGBD和IMU等传感器构建了非常成熟的无人机视觉导航系统^[39],可以在没有GPS定位信息的情况下实时构建飞行环境的三维模型和自主飞行。更进一步,宾夕法尼亚大学Vijar Kumar教授带领的研究团队使用无人机和地面机器人构建了一套协同建模系统,用于震后损毁建筑物的模型重建^[40]。这些技术的完善和实验系统的构建,充分表明了无人机视觉导航系统在未来国防和国民经济建设方面强大的应用潜力。

4 结论和展望

本文介绍了无人机视觉导航系统的基本结构,复杂飞行环境的三个表示层次及与之对应的视觉导航典型应用,展示了国际上前沿的研究成果。从飞行环境的表示层次入手,可以更好的梳理目前众多的视觉技术在无人机视觉导航应用中所处的位置和重要性。对于自然环境的表示从点、线、面、目标直至上升到整体飞行环境的建模,推动着视觉导航支撑的无人机越来越朝着智能化的方向发展,并可一窥未来无人机视觉导航的研究和发展方向。当无人机不仅能重建复杂飞行环境,并且在引入机器学习、模式识别等理论后能够以近似人的思维理解整个飞行环境时,无疑会使无人机具有更加广阔的应用前景。

参考文献

- [1] Anderson Michael, Iandola Forrest and Keutzer Kurt. UAV Application for DARPA PERFECT, 2014.
- [2] 近十年来美军无人机坠毁超过400架. <http://uav.81tech.com/uav-news/world-uav/7982.html>.
- [3] Herwitz SR, Johnson LF, Dunagan SE, etc. Imaging from an unmanned aerial vehicle: agricultural surveillance and decision support, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2004, 44(1): 49-61.
- [4] Langelaan J W and Roy N. Enabling New Missions for Robotic Aircraft. *Science*, 2009, 326(5960): 1642-1644.
- [5] How Jonathan P, Bethke B, Frank A, etc. Real-time indoor autonomous vehicle test environment, *IEEE Control System Magazine*, 2008, 28(2): 51-64.
- [6] Strohmeier M, Lenders V, Martinovic I, etc. Realities and challenges of NextGen air traffic management: The case of ADS-B. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(5): 111-118.
- [7] Hrabar S. 3D path planning and stereo-based obstacle avoidance for rotorcraft UAVs. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2008: 807-814.
- [8] Gibson David and Spann Michael. Robust optical flow estimation

- based on a sparse motion trajectory set. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2003, 12(4): 431-445.
- [9] Romero Hugo, Salazar Sergio and Lozano Rogelio. Real-time stabilization of an eight-rotor UAV using optical flow. *IEEE Transactions on Robotics*, 2009, 25(4): 809-817.
- [10] Muratet Laurent, Doncieux Stephane and Meyer Jean Arcady. A biomimetic reactive navigation system using the optical flow for a rotary-wing uav in urban environment. *The International Session on Robotics*, 2004.
- [11] Hrabar Stefan, Sukhatme Gaurav, Corke Peter, etc. Combined optic-flow and stereo-based navigation of urban canyons for a UAV. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2005: 3309-3316.
- [12] Klein Georg and Murray David. Parallel tracking and mapping for small AR workspaces, *IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, 2007: 225-234.
- [13] Davison Andrew J, Reid Ian D, Molton Nicholas D, etc. MonoSLAM: Real-time single camera SLAM. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2007, 29(6): 1052-1-67.
- [14] Achtelik Markus, Bachrach Abraham, He Ruijie, etc. Stereo vision and laser odometry for autonomous helicopters in GPS-denied indoor environments. *SPIE Defense, Security, and Sensing*, 2009, 733219.
- [15] Weiss Stephan, Scaramuzza Davide and Siegwart Roland. Monocular-SLAM--based navigation for autonomous micro helicopters in GPS-denied environments. *Journal of Field Robotics*, 2011, 28(6): 854-874.
- [16] Fu Changhong, Olivares-Mendez Miguel, Suarez-Fernandez Ramon, etc. Monocular Visual-Inertial SLAM-Based Collision Avoidance Strategy for Fail-Safe UAV Using Fuzzy Logic Controllers. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2014, 73(1): 513-533.
- [17] C.V.Jiji, Unni Ravi Krishnan. Fusion of multi-spectral and panchromatic images using Non-subsampled Contourlet Transform. *International Conference on Image Processing, Computer Vision and Pattern Recognition*, 2008:608-613.
- [18] Bhanu Bir. Automatic target recognition: State of the art survey. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1986, 4: 364-379.
- [19] D.Lowe. Distinctive image features from scale-invariant key points. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2):91-110.
- [20] Moranduzzo Thomas and Melgani Farid. A SIFT-SVM method for detecting cars in UAV images. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2012: 6868-6871.
- [21] Isard Michael and Blake Andrew. Condensation-conditional density propagation for visual tracking. *International journal of computer vision*, 1998, 29(1): 5-28.
- [22] He Ruijie, Bachrach Abraham, Achtelik Michael, etc. On the design and use of a micro air vehicle to track and avoid adversaries. *The International Journal of Robotics Research*, 2009.
- [23] Ludington Ben, Johnson Eric and Vachtsevanos George. Augmenting UAV autonomy. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2006, 13(3): 63-71.
- [24] Pfister Samuel T and Burdick Joel W. Multi-scale point and line range data algorithms for mapping and localization. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2006: 1159-1166.
- [25] Sharp Courtney S, Shakernia O, Sastry Shankar S. A vision system for landing an unmanned aerial vehicle. *IEEE Conference on Robotics and Automation*, 2001, 2: 1720-1727.
- [26] Srikanth Saripalli, James F Montgomery, Gaurav S Sukhatme. Visually guided landing of an unmanned aerial vehicle. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2003, 19(3): 371-380.
- [27] SariPalli.S. Vision-based autonomous landing of an unmanned aerial vehicle. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2002, 3:2799-2804.
- [28] Borenstein Johann and Koren Yoram. Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1989, 19(5): 1179-1187.
- [29] Borenstein Johann and Koren Yoram. The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots, 1991, 7(3): 278-288.
- [30] Durrant Whyte Hugh and Bailey Tim. Simultaneous localization and mapping: part I. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2006, 13(2): 99-110.
- [31] Achtelik M, Weiss S and Siegwart, R. Onboard IMU and monocular vision based control for MAVs in unknown in and outdoor environments. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2011: 3056-3063.
- [32] Grisetti G, Stachniss C and Burgard W. Improved Techniques for Grid Mapping With Rao-Blackwellized *IEEE Transactions on Particle Filters, Robotics*, 2007, 23(1): 34-46.
- [33] Z. Zhang. Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces. *International Journal of Computer Vision*, 1994, 13(2):

119-152.

[34] <http://media.au.tsinghua.edu.cn/uav/intro.jsp>.

[35] N. Engelhard, F. Endres, J. Hess, J. Sturm and W. Burgard. Real-time 3D visual SLAM with a hand-held RGB-D camera. RGB-D Workshop on 3D Perception in Robotics at the European Robotics Forum, 2011, 180.

[36] F. Endres, J. Hess, N. Engelhard, J. Sturm, D. Cremers, and W. Burgard. An evaluation of the RGB-D SLAM system. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2012: 1691-1696.

[37] VIRGILE H?GMAN. Building a 3D map from RGB-D sensors, Master's thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm,

Sweden.

[38] M.A. Fischler and R.C. Bolles. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. Communications of the ACM, 1981, 24(6): 381-395.

[39] Bachrach Abraham, Prentice Samuel, He Ruijie, etc. Estimation, planning, and mapping for autonomous flight using an RGB-D camera in GPS-denied environments. The International Journal of Robotics Research, 2012, 31(11): 1320-1343.

[40] Michael Nathan, Shen Shaojie, Mohta Kartik, etc. Collaborative mapping of an earthquake-damaged building via ground and aerial robots. Journal of Field Robotics, 2012, 29(5): 832-841.

作者简介

李一鹏 男，1980年生，清华大学自动化系助理研究员。其主要研究方向包括无人机自主视觉导航、复杂网络系统建模与分析、互联网应用协议及用户行为分析等，发表学术论文十余篇。突破无人机视觉导航系统的多项关键技术，申请国家发明专利十余项，授权5项。作为队长带领清华大学自动化系无人机团队获得第23届国际空中机器人大赛冠军。

季向阳 男，1976年生，清华大学自动化系副教授。其主要研究方向为信号/视频处理, 统计分析与机器学习, 图像/视频压缩等，发表SCI/EI学术论文百余篇，获得多项国家/国际授权发明专利，多项关键技术被国家、国际视频压缩标准组织接收。主持/参与国家自然科学基金委、科技部的多项项目。

戴琼海 男，1964年生，清华大学自动化系教授。长期致力于计算光学与显微、光场与计算摄像学、多视图三维重建与立体视频合成视觉及其导航应用、压缩感知与稀疏表示理论及应用、图像（视频）检索及其挖掘等高维视觉信息处理理论和关键技术研究，先后主持完成20余项国家和省部级项目，发表论文200余篇（SCI收录73篇），授权国家发明专利72项。

视觉系统在无人机导航与控制中的应用

张旭, 鲜斌*, 曹美会

天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072

1 引言

无人机 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) 是指一种带动力的、通过无线电遥控设备或自备的程序控制装置来操纵的、利用空气动力承载飞行并可重复使用的无人驾驶飞行器。其在军事及民用等诸多领域的广泛的应用引起了人们的广泛关注。在军事上无人机可以进行侦查、监测及小范围内的攻击等; 在民用上, 可用于航拍、测绘、遥感、农药喷洒、高压输电线路的巡线、森林火灾预防、地震抢险、雾霾消除以及空中物流服务等。而自主飞行能力, 尤其是自主定位、控制与导航能力, 是无人机完成上述任务的必要条件。

无人机的定位问题主要是指利用自身传感器确定无人机在飞行环境中相对于惯性坐标系的位置信息。准确的位置估计是实现无人机避障、轨迹规划以及目标跟踪等复杂飞行任务的前提和基础。现有无人机系统主要依赖全球卫星定位系统 (Global Positioning System, GPS) 进行定位, 然而在一些非开阔环境中, 例如楼群之间、大型建筑物内部等, GPS 信号会受遮挡, 这就使传统的定位方法难以应用。目前常见的不依赖 GPS 信号的无人机自主定位方法主要分为基于激光雷达等距离传感器的定位方法和基于视觉信息的定位方法。其中, 小型激光雷达由于其有

限的作用距离 (通常小于 30 米) 主要用于走廊、楼间等结构化的环境中, 如图1所示, 此外激光雷达的尺寸、重量、成本等因素, 都限制了其在微小无人机上的应用^[1, 2]。



图1 典型激光雷达应用场景-室内结构化环境

而基于视觉的定位方法仅使用摄像头作为外部传感器, 在成本、重量、应用场合上具有很大优势, 如图2所示的复杂环境中, 视觉定位系统可以很好的发挥作用, 随着机载计算能力的快速提高, 基于视觉信息的无人机定位导航与控制研究逐渐成为研究热点。



图2 典型视觉定位应用场景-室外复杂环境

目前应用于无人机的自主视觉定位方法主要有：基于光流法的飞行器速度估计、基于单目视觉同步定位与建图（VSLAM）的位置估计，此外，近年来随着具有深度测量能力相机系统的出现，以kinect为代表的RGB-D相机，以及双目立体相机^[3]等也被应用于无人机的定位上，但其有效工作距离均十分有限，无法在高空或开阔环境下正常工作。下面将对目前一些主流方法进行较为详细的介绍。

2 基于光流法的无人机自主控制研究现状

光流的概念是 Gibson 在 1950 年首先提出来的^[4]。1981 年 Hom 和 Schunck 将速度场和图像灰度信息紧密联系起来，建立了光流基本方程，使得光流技术广泛发展^[5]。光流是指是指图像灰度模式的一种表现运动，可以看作是带有灰度的像素点在图像平面运动产生的瞬时速度场，它依据像素点在图像序列中的变化量和相邻两帧图像之间对应关系来得到物体的运动状态^[6]，如图3所示。

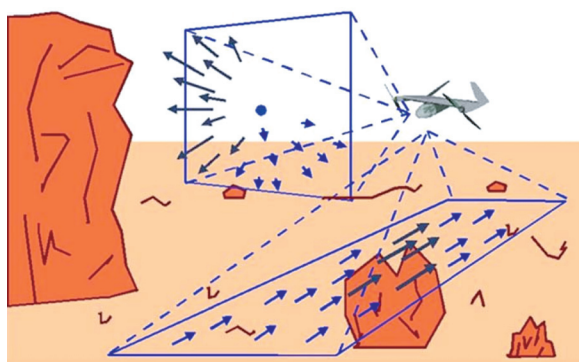


图3 光流示意图

光流法对机载计算能力要求较低，因此最早得到了广泛的研究与应用。通过光流法获得的飞行器速度估计值，可实现飞行器的速度闭环控制。另外，通过对光流场分布的分析，还可以对障碍物进行判断，从而实现避障飞行。

以下科研机构对光流法进行了较为广泛的研究：日本千叶大学的 Kendoul 等人于2007年率先将实时光流视觉系统用于四旋翼无人机的定位与控制系统^[7,8]。其视觉系统主要包括一个向下的摄像头和用于光流计算、光流与惯导数据融合、无人机运动估计的视觉算法，其计算过程采用三层嵌套的卡尔曼滤波技术，实验结果具有较好的鲁棒性。光流法估计的运动信息用于非线性控制器，实现四旋翼无人机的室内外自主起飞、定点悬停、轨迹跟踪、自主降落等复杂飞行任务。实验结果表明，在室外环境下，其基于光流法的位置估计优于GPS信号的测量结果，在室内环境下也达到了良好的飞行效果^[9,10]，其室内实验如图4所示。



图4 日本千叶大学基于光流的无人机室内控制实验

澳大利亚国立大学Mahony等人于2009年采用了基于金字塔的Lucas-Kanade光流计算方法，完成了四旋翼无人机的悬停、地形跟踪和垂直降落等飞行任务^[11-13]，其室内飞行实验如图5所示。其光流数据主要通过机载摄像头和惯性测量单元获得，控制器设计部分采用了PI控制或复杂的非线性高增益控制器，MATLAB仿真及室内飞行实验均取得了良好的效果。

瑞士苏黎世联邦理工大学Zingg等人于2011年实现了基于光流法的四旋翼无人机的避障飞行^[14]。其采用朝前的190°鱼眼摄像头来提取光流信息，光流计算采用金字塔Lucas-Kanade法，特征点提取采用Shi-Tomasi角点检测方法，并将惯性测量单元获



图5 澳大利亚国立大学基于光流的无人机室内控制实验

得的姿态角数据与光流数据相融合，来消除光流旋转分量的影响，实验效果如图6所示。此外，该机构还开发了基于现场可编程门阵（FPGA）的机载视觉处理单元^[15]以及基于新型32位单片机的微型光流测量模块^[16]。

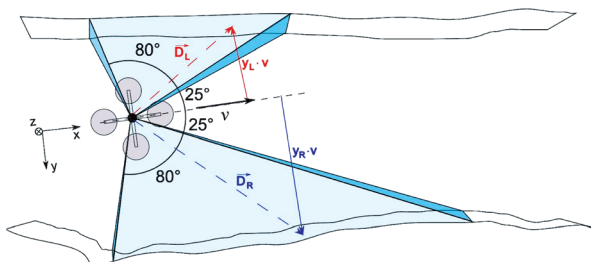


图6 瑞士苏黎世联邦工学院基于光流的无人机室内控制实验

此外，随着高度集成化的光流传感器的出现，成品光流传感器也被用于无人机的定位上，如韩国首尔大学使用 AVAGO 公司的 ADNS-3080 光流传感器获取四旋翼无人机的速度信息，实现了基于光流传感器的室内外四旋翼无人机的悬停控制^[17]。

国内多家研究机构也开展了基于光流的无人机飞行控制研究工作。北航航空航天大学的研究人员自主开发了一种光流传感器，并将其安装到飞行平台上，利用光流法获取飞行器的运动状态，进而实现飞行器的地形跟随与自主着陆功

能^[18]。清华大学采用 ADNS 系列的光流传感器，通过设计鲁棒姿态控制器和PID位置控制器，实现了无人机的定点悬停功能。实验结果表明，其姿态控制误差为 ± 1 ，水平位置误差为 ± 0.3 米，高度控制误差为 ± 0.03 米，取得了较好的姿态及位置控制效果^[19]。

天津大学的鲜斌^[20]等，成功的将光流系统用于100克以内的微纳旋翼无人机上，如图7，实验表明，光流系统可以有效的实现微小型无人机的室内外速度、位置控制。相对于传统的基于GPS信号的控制方法以及基于激光雷达的位置控制，光流系统更加适用于飞行范围较小的微纳无人机。

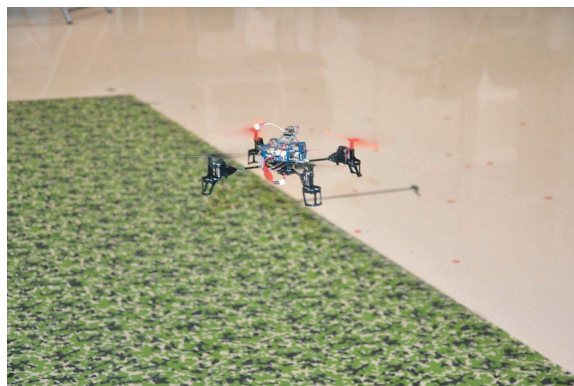


图7 天津大学基于光流的微纳旋翼无人机控制

光流法的主要不足是其估计位置时易受累积误差的影响，因此不适合用于远距离导航中的绝对位置控制，但光流法非常适用于短时间内位置控制及速度控制，因此在商业飞行控制系统中，光流法得到了广泛的应用，在增加了基于光流信息的速度闭环控制后，无人机的手动操控飞行变得大大简化了。

3 基于单目视觉 SLAM 方法的无人机自主控制研究现状

SLAM这一概念最早由Smith、Self和Cheeseman于1988年提出，SLAM问题可以描述为：机器人在未知环境中从一个未知位置开始移动，在移

动过程中根据位置估计和地图进行自身定位，同时在自身定位的基础上建造增量式地图，实现机器人的自主定位和导航^[21]。

早期的单目视觉跟踪算法主要采用基于扩展卡尔曼滤波器等滤波算法，通过获取连续图像序列中的特征点信息来完成时间和测量数据的更新^[22,23]，这种基于滤波器的SLAM方法运算量极大，很难保证位置估计的实时性。2007年，英国牛津大学的Klein和Murray提出了一种不基于滤波器的视觉SLAM算法——并行跟踪与建图法（Parallel Tracking and Mapping, PTAM），使单目SLAM首次成功用于需要实时性较高的于虚拟、增强现实应用中^[24,25]。如图8所示，该方法将整个SLAM过程分成两个独立的线程——跟踪线程和建图线程，这两个线程运行在不同的频率。前者通过对连续两帧图像信息进行特征提取与匹配从而获取摄像机的位置和姿态信息；后者则在机载摄像头获取的图像中选取关键帧，并由这些关键帧建立周围环境的地图信息^[24]。通过将计算量较大的建图过程从定位线程中分离，首次实现了高实时性的单目视觉SLAM算法。

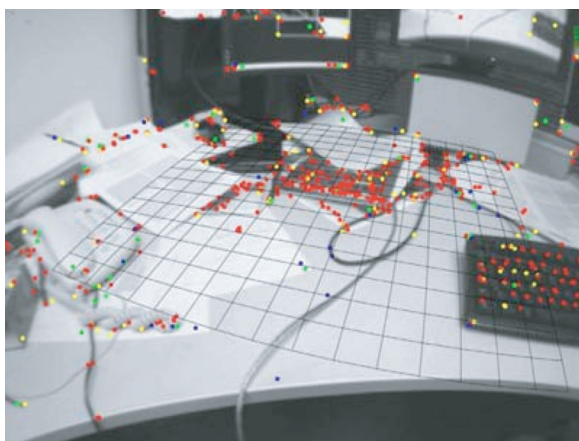


图8 单目视觉SLAM

瑞士苏黎世联邦理工学院的Weiss等人改进了Klein和Murray的单目视觉SLAM算法，并率先将该算法应用于四旋翼无人机上，通过将PTAM算法获得的位置信息与惯性测量单元数据的融合，得

到了精确且高实时性的无人机位置信息，进而实现了各种环境下无人机的精确位置控制^[26-28]。通过对Klein和Murray原有算法的修改，Weiss等人在牺牲地图中关键帧数量的前提下，进一步降低了原算法对计算能力的要求，使用有限的机载计算能力，实现了无人机在未知环境下的不依赖地面站的自主飞行，其长距离飞行实验如图9所示，由于地图中关键帧数量的限制，长距离飞行会产生稍许的累积误差，但对位置的估计精度方面优于传统光流法。



图9 瑞士苏黎世联邦工学院四旋翼无人机长距离飞行实验图

德国慕尼黑工业大学应用单目视觉SLAM实现四旋翼无人机在未知且无GPS信号的环境下的自主定位与导航，其多场景中实验如图10所示^[29,30]。其使用AR. Drone无人机作为硬件飞行平台，整个控制系统主要包括三个部分：单目摄像头用于视觉SLAM，扩展卡尔曼滤波用于数据融合和状态估计，PID控制器来产生控制命令，其视觉SLAM算法计算在地面笔记本电脑上进行。悬停和轨迹跟踪实验表明，其室内平均定位精度为0.049米，室外平均定位精度为0.18米，能够实现精确、鲁棒、长期无漂移的稳定飞行。

美国加州大学河滨分校的研究人员中也使用了视觉SLAM作为位置信息来源，实现无人机的自主定位功能，其实验平台如图11所示，其视觉算法运行在地面站上^[31,32]。

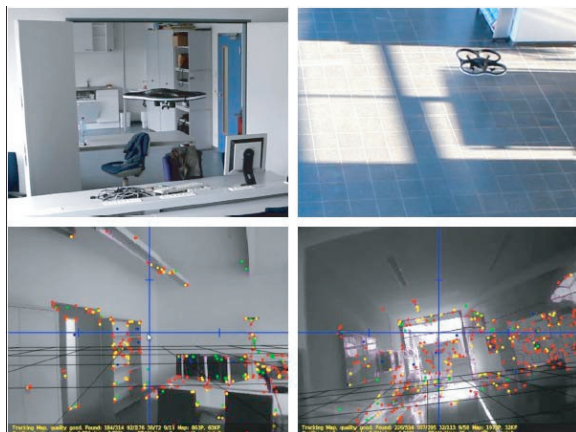


图10 德国慕尼黑工业大学多场景实验图



图11 美国加州大学河滨分校的四旋翼无人机实验平台

单目SLAM方法的主要不足是其对环境特征的要求较高，重复性纹理、低对比纹理环境中，单目SLAM方法的实用性大打折扣，另一方面，其鲁棒性逊于光流法，易于受外界干扰造成特征跟踪丢失与错误，造成极大的位姿估计误差，实际使用时需要和惯性测量器件配合使用以获得可靠且高精度的位姿估计。

4 其他基于视觉的无人机自主控制方法

除了上述两种典型的基于视觉的无人机的自主定位与控制方法以外，国内外科研机构还采用

基于深度相机、立体相机等其他视觉定位方法对四旋翼无人机的自主定位与控制系统进行了广泛的研究。

美国宾夕法尼亚大学的研究人员利用四旋翼无人机机载Microsoft Kinect和激光雷达实现多楼层间的室内建图功能^[33,34]，其四旋翼无人机飞行平台和所建地图如图12所示。

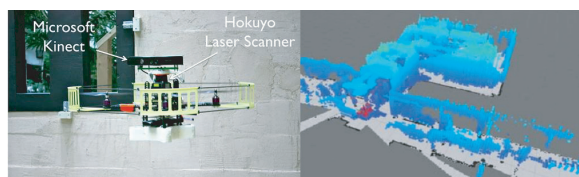


图12 宾夕法尼亚大学四旋翼无人机实验平台及所建地图

美国麻省理工大学的研究人员使用RGB-D深度摄像机用于无GPS环境下的视觉里程计并构建周围环境的地图信息，最后将其应用于四旋翼无人机的自主飞行控制中^[35]，其实验平台如图13所示。实验过程中，其所有的视觉其控制算法均运行在机载处理器及控制器中，避免的无线数据传输引起的干扰，成功实现基于视觉的无人机避障飞行^[36]。

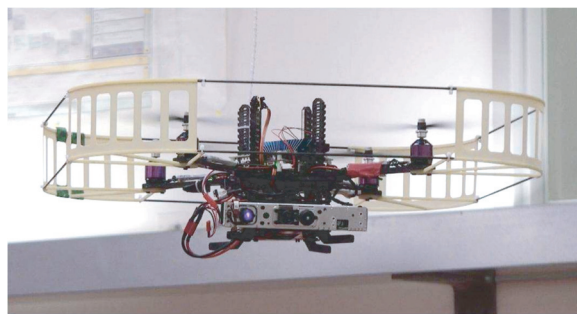


图13 麻省理工大学四旋翼无人机实验平台

瑞士苏黎世联邦理工学院的schauwecker等人^[3]使用具有机载计算能力的立体相机系统实现了室内小空间范围内的自主悬停飞行，其载机如图14所示。

基于深度相机、立体相机的定位方法，其主要不足在于其有限的工作范围，由于深度相机需要主动投射红外标志点到物体上，因此其有效工

作范围仅4~6米，且极易受阳光的干扰。而立体相机受载机尺寸限制，无法加大两个相机间的基线，因此其在远距离场景内的位姿估计误差较大。



图14 Pixhawk及机载立体相机

5 总结

基于视觉信息的定位与导航，对于需要在无GPS信号的复杂环境中作业的无人机来说是一种有效且实用的方法。较之地面移动机器人常用的基于激光雷达的定位方式，视觉定位不依赖于结构化的环境，不限制载体与环境间的相对距离，对于无人机、尤其是需要低空、超低空飞行的旋翼无人机来说，视觉定位具有不可替代的优势。而其对于充足光照的依赖，将随着热成像相机的低成本化，以及新型远距离深度相机的出现，在很大的程度上得到改善。

参考文献

- [1] Grzonka S, Grisetti G, Burgard W. A Fully Autonomous Indoor Quadrotor [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2012, 28 (1): 90-100.
- [2] Dryanovskii I, Valenti R G, Xiao J. An Open-source Navigation System For Micro Aerial Vehicles [J]. Autonomous Robots, 2013, 34 (3): 177-188.
- [3] Schauwecker K, Zell A. On-board Dual-stereo-vision for Autonomous Quadrotor Navigation[C]. In Proceedings of International Conference on Unmanned Aircraft Systems, Grand Hyatt Atlanta, Atlanta, GA, 2013: 333-342.

- [4] 胡庭波, 吴涛, 贺汉根. 基于立体匹配技术的光流场计算方法[J]. 计算机工程与科学, 2006, 28 (10): 50-53.
- [5] 谭熊. 基于光流分析的无人机视频运动目标检测与跟踪 [D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2011.
- [6] 魏伟波, 潘振宽, 李媛媛, 等. 小位移光流计算的中值公式 [J]. 仪器仪表学报, 2011, 32 (10): 2256-2260.
- [7] Kendoul F, Fantoni I, Nonami K. Optic Flow-based Vision System for Autonomous 3D Localization and Control of Small Aerial Vehicles [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2009, 57 (6): 591-602.
- [8] Kendoul F, Fantoni I, Dherbomez G. Three Nested Kalman Filters-based Algorithm for Real-time Estimation of Optical Flow, UAV Motion and Obstacles Detection [C]. In Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Rome, Italy, 2007: 4746-4751.
- [9] Kendoul F, Yu Z, Nonami K. Guidance and Nonlinear Control System for Autonomous Flight of Minirotorcraft Unmanned Aerial Vehicles [J]. Journal of Field Robotics, 2010, 27 (3): 311-334.
- [10] Kendoul F, Nonami K, Fantoni I, et al. An Adaptive Vision-based Autopilot for Mini Flying Machines Guidance, Navigation and Control [J]. Autonomous Robots, 2009, 27 (3): 165-188.
- [11] Herisse B, Hamel T, Mahony R, et al. A Nonlinear Terrain-following Controller for a VTOL Unmanned Aerial Vehicle Using Translational Optical Flow [C]. In Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Kobe, Japan, 2009: 3251-3257.
- [12] Herisse B, Oustrieres S, Hamel T, et al. A General Optical Flow Based Terrain-following Strategy for a VTOL UAV Using Multiple Views [C]. In Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Anchorage, Alaska, USA, 2010: 3341-3348.
- [13] Herisse B, Russotto F-X, Hamel T, et al. Hovering Flight and Vertical Landing Control of a VTOL Unmanned Aerial Vehicle Using Optical Flow [C]. In Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Nice, France, 2008: 801-806.
- [14] Zingg S, Scaramuzza D, Weiss S, et al. MAV Navigation Through Indoor Corridors Using Optical Flow [C]. In Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Anchorage, Alaska, USA, 2010: 3361-3368.
- [15] Honegger D, Greisen P, Meier L, et al. Real-time Velocity Estimation Based on Optical Flow and Disparity Matching [C]. In Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vilamoura, Algarve, Portugal, 2012: 5177-5182.
- [16] Honegger D, Meier L, Tanskanen P, et al. An Open Source and Open Hardware Embedded Metric Optical Flow CMOS Camera for Indoor and Outdoor Applications [C]. In Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Karlsruhe, Germany, 2013:

- 1736-1741.
- [17] Lim H, Lee H, Kim H J. Onboard Flight Control of a Micro Quadrotor Using Single Strap-down Optical Flow Sensor [C]. In Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vilamoura, Algarve, 2012: 495-500.
- [18] 刘小明, 陈万春, 邢晓岚, 等. 光流控制地形跟随与自动着陆 [J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38 (1): 98-105.
- [19] Bai Y, Liu H, Shi Z, et al. Robust Control of Quadrotor Unmanned Air Vehicles [C]. In Proceedings of the 31st Chinese Control Conference, Hefei, China, 2012: 4462-4467.
- [20] Xian B, Liu Y, Zhang X, et al. Hovering control of a nano quadrotor unmanned aerial vehicle using optical flow [C]. In Control Conference (CCC), 2014 33rd Chinese, 2014: 8259-8264.
- [21] 张建伟, 张立伟, 胡颖, 等. 开源机器人操作系统--ROS [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [22] Davison A J. Real-time Simultaneous Localisation and Mapping with a Single Camera [C]. In Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Computer Vision, Washington, DC, USA, 2003: 1403-1410.
- [23] Eade E, Drummond T. Scalable Monocular SLAM [C]. In Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Washington, DC, USA, 2006: 469-476.
- [24] Klein G, Murray D. Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces [C]. In Proceedings of the 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, Nara, Japan, 2007: 225-234.
- [25] Klein G, Murray D. Parallel Tracking and Mapping on a Camera Phone [C]. In Proceedings of the 8th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, Orlando, Florida, USA, 2009: 83-86.
- [26] Weiss S, Scaramuzza D, Siegwart R. Monocular- SLAM-based Navigation For Autonomous Micro Helicopters in GPS-denied Environments [J]. Journal of Field Robotics, 2011, 28 (6): 854-874.
- [27] Weiss S, Achtelik M W, Lynen S, et al. Real-time Onboard Visual-inertial State Estimation and Self-calibration of MAVs in Unknown Environments [C]. In Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, RiverCentre, Saint Paul, Minnesota, USA, 2012: 957-964.
- [28] Weiss S, Achtelik M W, Lynen S, et al. Monocular Vision for Long-term Micro Aerial Vehicle State Estimation: A Compendium [J]. Journal of Field Robotics, 2013, 30 (5): 803-831.
- [29] Engel J, Sturm J, Cremers D. Camera-based Navigation of a Low-cost Quadcopter [C]. In Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vilamoura, Algarve, Portugal, 2012: 2815-2821.
- [30] Engel J, Sturm J, Cremers D. Accurate Figure Flying with a Quadcopter Using Onboard Visual and Inertial Sensing [C]. In Workshop on Visual Control of Mobile Robots at the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vilamoura, Algarve, Portugal, 2012.
- [31] Ghadiok V, Goldin J, Ren W. Autonomous In-door Aerial Gripping Using a Quadrotor [C]. In Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Francisco, CA, USA, 2011: 4645-4651.
- [32] Ghadiok V, Goldin J, Ren W. On the Design and Development of Attitude Stabilization, Vision-based Navigation, and Aerial Gripping for a Low-cost Quadrotor [J]. Autonomous Robots, 2012, 33 (1-2): 41-68.
- [33] Shen S, Michael N, Kumar V. Autonomous Multi-floor Indoor Navigation with a Computationally Constrained MAV [C]. In Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Shanghai, China, 2011: 20-25.
- [34] Shen S, Michael N, Kumar V. Autonomous In-door 3D Exploration with a Micro-aerial Vehicle [C]. In Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Saint Paul, Minnesota, USA, 2012: 9-15.
- [35] Bachrach A, Prentice S, He R, et al. Estimation, Planning, and Mapping for Autonomous Flight Using an RGB-D Camera in GPS-denied Environments [J]. International Journal of Robotics Research, 2012, 31 (11): 1320-1343.
- [36] Ahrens S G. Vision-based Guidance and Control of a Hovering Vehicle in Unknown Environments [D]. Massachusetts: Citeseer, 2008.

作者简介

张旭 男, 天津大学电气与自动化工程学院, 控制科学与工程专业硕士研究生博士研究生, 研究方向为基于视觉的旋翼无人机导航与控制, 微纳无人机系统设计、控制与导航。

鲜斌 男, 天津大学电气与自动化工程学院, 控制科学与工程专业, 教授, 博士生导师, IEEE Senior Member, 主要研究方向包括: 非线性控制理论与应用, 自主无人机系统, 智能机器人系统等。

曹美会 女, 天津大学电气与自动化工程学院, 控制科学与工程专业硕士研究生, 研究方向为基于视觉的四旋翼无人机自主定位与控制。

高超声速飞行器不确定性控制 研究综述

蒲志强, 易建强, 袁如意, 谭湘敏

中国科学院自动化研究所, 北京 100190

摘要: 高超声速飞行器具有飞行速度快、飞行高度高、负载能力强、机动能力强等优点, 拥有巨大的军事和民用价值。不确定性和干扰在高超声速飞行中广泛存在, 给鲁棒飞行控制系统的设计提出了严峻的挑战, 是阻碍高超声速飞行器由理论研究走向实际应用的关键因素。本文全面分析了各类不确定性和干扰的来源, 系统综述了现有文献设计的各类高超声速飞行器不确定性和抗干扰控制方法, 最后对不确定性控制的关键研究问题做了总结和展望。

关键词: 高超声速飞行器, 不确定性, 抗干扰, 控制

1 引言

高超声速 (Hypersonic) 的概念, 是由钱学森先生1946年在《论高超声速相似律》一文中首次提出的^[1]。当气体流动马赫数大于5时, 即可认为是高超声速。而所谓高超声速飞行器 (Hypersonic Vehicle, HSV), 即指飞行马赫数大于5的有翼或无翼飞行器, 包括高超声速运载器、导弹和空天飞机等。20世纪50~60年代载人飞船的成功返回、远程弹道导弹的出现以及X-15试飞器飞行马赫数超越6等事件, 标志着人类开始进入高超声速时代^[2-6]。

高超声速飞行器具有飞行速度快、飞行高度高、负载能力强、机动能力强等优点, 拥有巨大的军事和民用价值。半个多世纪以来, 美国、苏

联/俄罗斯、法国、日本等国家相继开展了一系列的研究计划, 取得了从地面测试到验证飞行等多个层面的成果^[1-6]。美国的研究走在世界的前列, 2004年X-43A的第三次成功试飞创造了接近10马赫的吸气式超燃冲压发动机最快飞行记录, 2013年X-51A的第四次成功试飞创造了大约三分半钟的吸气式超燃冲压发动机最长飞行记录, 近些年陆续推出的“高速打击武器 (HSSW)”、SR-72“黑鸟之子”高超声速侦察机、XS-1太空飞机等计划, 在世界上造成了极大的轰动。我国的研究始于上世纪80年代, 虽起步较晚, 但已取得了从风洞测试到飞行试验的系列研究成果。

不确定性和干扰广泛存在于高超声速飞行中。一方面高超声速飞行的机理复杂, 飞行器周围流场出现薄激波层、粘性干扰、熵层、高温效

基金项目: 此项工作获国家自然科学基金 (61421004, 61273149, 61203003, 61403381, 61304096) 资助。

应等特性,许多机理有待进一步研究;另一方面高超声速飞行器普遍采用超燃冲压发动机和机体/发动机一体化的结构设计,燃烧机理复杂,气动-推力耦合严重,不确定性大;此外,高超声速飞行器较常规飞行器的飞行包线大得多,大包线内自身动力学特性和环境特性变化显著,造成了诸多的不确定性;昂贵的飞行试验使得人们难以获取足够多的地面测试和实际飞行测试数据,从而难以进行不确定性的飞行验证。美国NASA的研究人员在2004年X-43A的第二次和第三次飞行试验前,通过Monte-Carlo仿真进行了大量的不确定性试验(包括数值仿真、硬件在环仿真和飞行器在环仿真),共引入了12大类286个不确定性参数。尽管如此,后期分析表明试验数据与仿真数据仍有较大的出入,很多关键的不确定性因素仍未被事先考虑到^[7,8]。

如Brockett所言,“如果系统、控制或环境中没有不确定性,那么反馈几乎就是不必要的”^[9],这说明了不确定性控制的重要意义。而对于具有广泛不确定性的高超声速飞行器而言,不确定性和抗干扰控制更是一个核心控制问题,是现阶段高超声速鲁棒控制系统设计的关键所在。

2 不确定性的来源与分类

不确定性产生的原因多种多样,从不同的描述角度出发,可有不同的分类方法。例如,按照不确定性与控制输入之间的关系,可分为匹配不确定性和非匹配不确定性;按照不确定性与系统自身结构的关系,可分为结构不确定性和非结构不确定性^[10]。以上两种分类方式是从控制的角度给出的,随控制方法的不同将有不同的表现形式。本文拟从不确定性的物理产生机理出发来进行分类,从而对各种控制方法的应用具有更广的适用度。据此,各种不确定性分类如下:

(1) 机理不确定性。高超声速飞行情况复

杂,由于欠缺实际的飞行数据支撑,研究者们对部分机理还未形成充分的认识。例如,高温高速的机体存在“真实气体效应”(real gas effect)和“粘性效应”(viscous effect),前者使得俯仰力矩系数和舵面负载较理想气体情况下显著增大,后者则使得机体表面压力分布、斜激波及阻力较无粘气流下有较大不同^[11]。

(2) 耦合不确定性。高超声速飞行器采用结构/推进一体化设计,机体和发动机耦合严重。一方面,前体的进气道气流将产生抬头力矩,后体尾喷气流则产生低头力矩,推进系统对气动特性影响严重;另一方面,气动系统的攻角和动压将显著影响燃烧室的动力学特性和尾部剪流层特性。此外,气动/弹性模态间存在交叉耦合,机体的弯曲振荡将直接影响进气道和尾部的气流特性,进而影响推进系统和气动特性;高超飞行器采用的轻质材料使得弹性振荡的频率、阻尼比、弹性振型均存在很大的不确定性。

(3) 参数不确定性。参数不确定性广泛存在,包括结构参数、气动与推进参数、环境参数的不确定性等。质量的非均匀分布和燃料耗散将带来结构参数不确定性,包括质量、惯性矩、重心位置等;大包线飞行存在广泛的气动、推进不确定性,包括各种气动系数、舵面及发动机控制效率等;此外,大气密度、温度等环境参数也存在广泛的不确定性。

(4) 结构不确定性。高超声速飞行将产生机体结构损毁、变形与局部烧蚀,飞行器气动外形存在显著的不确定性。

(5) 其他外部干扰和随机不确定性。高空水平风、垂直风形成随机风干扰;惯性导航系统(INS)、嵌入式大气传感器系统(FADS)等测量单元存在随机测量干扰;整流罩打开、关闭期间以及点火开始、结束期间均存在瞬时的推进系统干扰;高超声速飞行器采用空中挂载发射时存在初始发射条件的散布、弹射活塞性能等不确定

性；多阶段控制系统在系统切换期间存在切换干扰^[7]。

(6) 面向控制的建模误差。对于控制系统设计而言，不确定性还包括面向控制的建模误差。例如，控制对象采用多项式拟合式时存在对象的拟合误差；大量基于平衡点线性化的设计方法存在非线性系统的线性化误差；类似地，轨迹线性化控制方法也存在标称轨迹附近的线性化误差；Back-stepping方法为了保证严格的对象下三角形形式，可能存在模型的近似误差；类似地，动态逆等要求对象具有严格仿射非线性形式的控制方法也可能存在模型的近似误差。

3 不确定性控制方法归纳

在归纳控制方法前，首先对高超声速飞行器的模型进行简单介绍。高超声速飞行器模型多种多样，如锥体加速器模型^[12,13]、升力体模型^[14,15]、乘波体模型^[16-18]，完整的模型动态方程包括6自由度12状态的刚体动态方程和考虑不同阶次弹性振动模态的弹性体动态方程。根据控制问题的不同，可对模型进行分离或简化，如研究纵向运动时仅考虑纵向动态方程，研究刚体运动时仅考虑刚体动态方程，研究姿态控制时仅考虑姿态动态方程等。对于锥体加速器，其12状态刚体运动方程描述如下：

$$\dot{X} = V \cos \gamma \cos \chi \quad (1)$$

$$\dot{Y} = V \cos \gamma \sin \chi \quad (2)$$

$$\dot{H} = V \sin \gamma \quad (3)$$

$$\dot{V} = \frac{1}{m}(-D + Y \sin \beta - mg \sin \gamma + T \cos \alpha \cos \beta) \quad (4)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{mV}(L \cos \mu - mg \cos \gamma - Y \cos \beta \sin \mu + T \cos \alpha \sin \beta \sin \mu + T \sin \alpha \cos \mu) \quad (5)$$

$$\dot{\chi} = \frac{1}{mV \cos \gamma}(L \sin \mu + Y \cos \beta \cos \mu + T \sin \alpha \sin \mu - T \cos \alpha \sin \beta \cos \mu) \quad (6)$$

$$\dot{\alpha} = q - \tan \beta(p \cos \alpha + r \sin \alpha) + \frac{1}{mV \cos \beta} (-L + mg \cos \gamma \cos \mu - T \sin \alpha) \quad (7)$$

$$\dot{\beta} = p \sin \alpha - r \cos \alpha + \frac{1}{mV}(mg \cos \gamma \sin \mu + Y \cos \beta - T \cos \alpha \sin \beta) \quad (8)$$

$$\dot{\mu} = \sec \beta(p \cos \alpha + r \sin \alpha) - \frac{g}{V} \tan \beta \cos \gamma \cos \mu + \frac{L}{mV} (\tan \gamma \sin \mu + \tan \beta) + \frac{1}{mV} \cdot [Y \cos \beta \tan \gamma \cos \mu + T (\sin \alpha \tan \gamma \sin \mu + \sin \alpha \tan \beta - \cos \alpha \sin \beta \tan \gamma \cos \mu)] \quad (9)$$

$$\dot{p} = [\bar{L} + (I_{yy} - I_{zz})qr] / I_{xx} \quad (10)$$

$$\dot{q} = [\bar{M} + (I_{zz} - I_{xx})pr] / I_{yy} \quad (11)$$

$$\dot{r} = [\bar{N} + (I_{xx} - I_{yy})pq] / I_{zz} \quad (12)$$

以上各式中，12状态分别为纵向位移 X 、侧向位移 Y 、高度 H ，速度 V 、航迹倾角 γ 、航迹偏角 χ ，攻角 α 、侧滑角 β 、倾侧角 μ ，滚转角速率 p 、俯仰角速率 q 、偏航角速率 r 。式中， L, D, Y, T 分别为升力、阻力、侧力、推力， $\bar{L}, \bar{M}, \bar{N}$ 为滚转力矩、俯仰力矩、偏航力矩， I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} 为飞行器沿机体三个轴向的惯性矩， m 为飞行器质量， g 为重力加速度。锥体加速器的气动模型可参考[12,13]。更多关于其他高超模型的信息可参考[14-18]。

对于各种高超声速飞行器模型，现有文献针对不同复杂度的不确定性和干扰进行了深入研究，形成了较为完善的理论体系。本文按照控制方法的不同做了大致的分类归纳。值得一提的是，不同方法往往存在交叉应用，同一系统中也往往存在多种控制方法，本文的分类重在突出各种方法在不确定性和干扰抑制问题上解决思路的区别。

3.1 鲁棒控制方法

鲁棒性刻画了被控对象相对环境或对象本身变化的保持能力，鲁棒控制就是在考虑各种不确

定性和干扰的情况下,使不确定的“系统族”具有鲁棒稳定性^[10],典型的控制方法包括 H_2 控制、 H_∞ 控制、 μ 综合等。文献[19]针对锥体加速器模型的传感器噪声和乘性输入参数不确定性,采用 H_∞ 回路整形和DK迭代 μ 综合方法设计了鲁棒控制器,其目的是在跟踪速度和高度的同时使攻角偏差小于 0.5° ,同时使控制能量最优。考虑平衡点处的线性化模型,文献[20]采用混合DGK迭代 μ 综合方法设计了鲁棒控制器,其目的是采用低阶的结构达到高阶控制器的控制效果,文中还提出了统一的线性化不确定性模型,考虑的不确定性包括推进系统的不确定性、执行器控制效率的不确定性和弹性弯曲振荡的不确定性。同样针对线性化的高超声速飞行器纵向模型,文献[21]提出了基于 H_2 和 H_∞ 的优化控制方案。文献[22]针对锥体加速器模型,采用受限 H_∞ 特征结构配置方法研究了长周期模态和短周期模态的耦合干扰问题。文献[23]构建了不确定性和时变参数矩阵,据此设计了基于Lyapunov方法的鲁棒控制器;文献[24]同样做了面向控制的不确定建模,不同的是,控制器是基于一种由鲁棒反馈线性化和minimax LQR相结合的控制方法设计的。

经典的鲁棒控制理论针对的主要是线性化对象,并且表现出明显的保守性。当考虑高超声速飞行器非线性模型时,研究者们引入了随机鲁棒性的概念,假设所有的不确定性都是可参数化的,并由一个参数化随机向量 v 表示,由此非线性模型可表示为:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(x(t), u(t), v) \\ y(t) &= h(x(t), v) \end{aligned} \quad (13)$$

其中 $x(t), y(t), u(t)$ 分别表示模型的状态、输出和控制输入, $f(\cdot)$ 和 $h(\cdot)$ 表示模型的非线性动态。基于非线性模型的随机鲁棒控制方法不仅考虑了模型的非线性动态,还在一定程度上降低了控制系统的保守性,其缺点在于某些时候难以将不确定性

进行参数化,也难以形成可靠的不确定向量 v 。针对非线性模型,文献[25]和[26]将惯性参数、气动参数等28个参数摄动处理为不确定性,在随机意义下对闭环系统进行了38项性能指标的测试,其结果对后续研究产生了深远的影响。

3.2 自适应控制方法

自适应控制的核心是采用在线参数估计器来实时估计被控对象的未知参数,然后利用估计值来设计稳定控制律^[27,28]。由这一基本思想出发,可从不同角度将自适应控制进行不同的分类,例如:从参数估计器与控制律结合的不同方式出发,可分为直接自适应控制和间接自适应控制;从不同的控制结构出发,可分为模型参考自适应控制、自校正自适应控制、自寻优自适应控制等。

早在上世纪50-60年代,自适应控制就被用于X-15的控制律设计中,应用之一便是采用自适应方法设计增益调度控制律,保证全包线范围内的鲁棒控制^[27]。针对锥体加速器的参数不确定性问题,文献[29]在5.6马赫的飞行条件下将模型线性化,然后设计了直接模型参考自适应控制器;文献[30]和文献[31]分别采用单隐层神经网络和自适应滑模控制方法分别构建观测器,用以在线估计模型的不确定性动态。针对X-33爬升段的姿态控制,文献[32]将动态逆和间接自适应方法相结合,自适应部分采用在线辨识器来估计控制矩阵中的参数,再利用估计出的参数设计控制分配算法,该方案不仅能克服参数不确定性影响,还能在舵面出现故障的情况下实现高性能的容错控制。同样针对控制矩阵的摄动,文献[33]也设计了自适应控制器,用以克服气动参数和飞行器重心的不确定性影响。文献[34]将自适应方法与线性二次调节器相结合,同时对控制矩阵和系统矩阵进行估计,并对俯仰力矩系数等参数不确定性情况进行了研究。此外,浸入与不变(I&I)方法在近些年

得到了快速的发展,在对参数不确定性的自适应估计方面体现出了良好的特性^[35,36]。

在弹性体高超声速飞行器的研究中,为了降低刚体与弹性体间的交叉耦合,文献[37]设计陷波滤波器来对控制信号进行滤波,为了使滤波器的中心频率与弹性模态的自然频率相匹配,该方案设计了自适应频率估计器,从而使陷波滤波器具有自适应滤波功能。针对同样的问题,文献[38]基于微分代数谱理论,采用时变带宽算法设计了时变陷波滤波器,在轨迹线性化控制框架下设计了弹性体飞行器控制系统。而对于其他普遍存在的不确定性,文献[39-42]基于Back-stepping设计思想,将飞行器纵向模型分解为多个内外相联的子回路,进而设计了非线性自适应动态逆控制系统。上述研究是直接针对非线性对象展开的,而针对线性对象,文献[43]和文献[44]分别采用自适应LQR、自适应滑模变结构方法设计了纵向控制器。

3.3 基于观测器的控制方法

与自适应方法针对模型的参数不确定性相比,基于观测器的方法针对的是一类更广泛的不确定性,即不仅包括参数不确定性,还包括外加干扰、未建模动态、建模误差等不确定性问题。因此,尽管自适应方法中已经应用了观测器的思想,基于观测器的方法却有更广阔的外延^[45-47]。观测器技术因其丰富的理论体系、明了的设计思想、简单的设计结构而在高超声速飞行器控制中得到广泛的应用。利用观测器对各种不确定性和干扰进行估计和补偿,结合其他控制方法形成闭环稳定的控制系统,这已成为一种广为流行的控制方案。此外,在高超声速情况下,无论采用INS还是FADS传感器系统,攻角、航迹倾角等的测量都是相当困难的,因此观测器技术还可用以重构难以测量的飞行状态,形成输出反馈控制律^[11]。

在国外的研究中,针对锥体加速器的质量、惯性矩、空气密度等参数不确定性和部分飞行状态难以测量的问题,文献[31]采用反馈线性化和滑模控制建立控制系统主框架,然后设计滑模观测器来估计不确定性和难以测量的状态,从而同时解决参数不确定性和输出反馈问题。针对再入飞行,文献[48,49]同样以滑模控制为基础,采用双环控制结构,同时设计具有自适应增益算法的滑模观测器,用以观测再入过程中的不确定性和干扰。此外,针对攻角难以测量的问题,NASA的研究人员采用多种观测器技术试图对攻角进行精确的估计,相关技术在Hyper-X中得到了应用^[50]。

在国内的研究中,文献[51]针对弹性不确定性、气动系数不确定性、环境不确定性、面向控制的建模误差等多项不确定性建立了统一的非线性模型,在轨迹线性化控制的框架下设计观测器对不确定性进行了整体的估计。文献[52]和文献[53]分别采用准连续高阶滑模技术和基于小增益原理的反步法来设计主框架,然后设计观测器来估计实际飞行中难以测量的攻角和航迹倾角。文献[54]将动态逆和非线性干扰观测器相结合,对非匹配不确定性进行了深入的研究,并采用级联系统理论给出了闭环稳定性证明。文献[55]采用RBF神经网络对不确定性进行估计,结合轨迹线性化控制设计了鲁棒控制方案。文献[56]将T-S模糊系统和滑模控制相结合,设计了一个新颖的故障估计器,基于估计量实现了针对执行机构故障的容错控制。与大部分研究所设计的连续控制器不同,文献[57]采用动态逆和神经网络相结合的方法设计了纵向模型的离散控制器。自抗扰控制^[58,59]采用线性或非线性扩张状态观测器进行不确定性估计和补偿,显示出了结构简单、估计高效的优点,在近些年得到了迅速的发展,其在高超声速飞行器控制中的应用可参见文献[60-64]。

3.4 其他控制方法

滑模控制具有对干扰和不确定性的鲁棒性，其应用在前述三类方法介绍中已经得到了广泛的体现。除此之外，文献[65]设计了一种时变滑模面以消除系统设计对不确定性上界的要求，文献[66]提出一种基于RBF神经网络的Terminal滑模控制方案，在存在建模误差、模型干扰及不确定性的情况下对空天飞机再入姿态控制进行了研究。

轨迹线性化控制对于干扰具有本质的指数稳定性，作为NASA先进制导与控制方法研究的备选方案之一，为X-33设计了鲁棒控制系统，并在随后的ITAG&C测试中表现优异^[67,68]。

智能控制方面，文献[69]采用T-S模糊逻辑建立了弹性体飞行器的模型，并设计模糊控制器实现了输出跟踪和响应动态优化；文献[70]则通过将二型模糊与动态逆、非线性状态观测器相结合，设计了二型模糊神经网络（IT2-FNN）控制器，并研究了系统对高斯噪声随机干扰的鲁棒性。

此外，文献[71]采用鲁棒参数化方法对平衡点处的线性系统进行特征结构配置；文献[72]给出了飞行器跟踪误差的特征模型，基于该模型设计了内-外环控制律；文献[73]引入积分反馈来增强系统对不确定性的鲁棒性。

4 不确定性控制关键问题研究展望

针对高超声速飞行器广泛的不确定性，现有文献的研究成果不可谓不丰富，然而正如文献[7]中X-43A的不确定性鲁棒测试所示，当控制算法应用于实际飞行系统时，必然存在更多复杂的问题需要进一步研究。从理论与工程应用相结合的角度出发，高超声速飞行器不确定性和抗干扰控制存在如下三大关键问题尚待研究。

(1) 高超声速飞行的关键机理研究。截至目前，人们对高超声速条件下气-热-结构的交叉耦合以及超燃冲压发动机的气动-弹性耦合等关键机理认识还不够，因此许多控制问题所覆盖的不确定性还不够全面。当考虑更复杂的不确定性影响时，现有控制系统的鲁棒性和控制性能可能受到严峻的挑战。

(2) 建模与控制的一体化设计研究。为了更针对性地设计控制系统，面向控制的建模是十分必要的，现有文献在这方面做了许多尝试^[13,20,51,74]，但还有待优化完善。对于各种干扰和不确定性，如何建立一个有效的不确定性模型，用不确定性模型来指导控制系统设计，进而反过来使闭环系统能覆盖更广泛的不确定性情况，是后续研究的一个关键点。

(3) 不确定性控制的评估准则研究。对于线性系统，现有研究已建立起了成熟的时域和频域评估准则。对于非线性系统，Monte-Carlo方法采用随机意义下的概率统计原理建立起了不确定性测试体系，在工程应用中体现了巨大的价值。然而对于非线性系统，如何以一个普适有效的准则来评估系统的控制性能，仍然是一个复杂的理论问题。

5 总结

本文对高超声速飞行器不确定性及抗干扰控制进行了系统的总结。干扰和不确定性在高超声速系统中广泛存在，是影响系统鲁棒性和控制性能的重要因素。从物理来源与影响机理划分，这些不确定性可分为机理不确定性、耦合不确定性、参数不确定性、结构不确定性、其他外部干扰和随机不确定性、面向控制的建模误差。针对以上不确定性，现有文献进行了广泛的研究，这些控制方法从处理不确定性的思路可分为鲁棒控制方法、自适应控制方法、基于观测器的控制

方法以及以滑模控制、轨迹线性化控制、智能控制为代表的其他控制方法。现有研究尽管已经取得了丰富的成果，但要与实际工程应用相结合，尚需研究许多关键问题，如高超声速飞行中关键机理的进一步研究、建模与控制一体化设计的研究、不确定性控制评估准则的研究等。

参 考 文 献

- [1] J. J. Bertin and R. M. Cummings. Fifty years of hypersonics: where we've been, where we're going. *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 39, no. 6-7, pp. 511-536, 2003.
- [2] A. A. Rodriguez et al. Modeling and control of scramjet-powered hypersonic vehicles: challenges, trends, & tradeoffs. In *Proceedings of AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*, AIAA 2008-6793, Honolulu, Hawaii, USA, 2008.
- [3] P. L. Moses, V. L. Rausch, L. T. Nguyen, and J. R. Hill. NASA hypersonic flight demonstrators - overview, status, and future plans. *Acta Astronautica*, vol. 55, no. 3-9, pp. 619-630, 2004.
- [4] 吴宏鑫, 孟斌. 高超声速飞行器控制研究综述. *力学进展*, vol. 39, no. 6, pp. 756-765, 2009.
- [5] 孙长银, 穆朝絮, 余瑶. 近空间高超声速飞行器控制的几个科学问题研究. *自动化学报*, vol. 39, no. 11, pp. 1901-1913, 2013.
- [6] 李惠峰. 高超声速飞行器制导与控制技术. 北京: 中国宇航出版社, 2012.
- [7] E. Baumann, C. Bahm, B. Strovers, R. Beck, and M. Richard. The X-43A six degree of freedom monte carlo analysis. In *Proceedings of 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, AIAA 2008-203, Reno, Nevada, USA, 2008.
- [8] C. Bahm, E. Baumann, J. Martin, D. Bose, R. E. Beck, and B. Strovers. The X-43A hyper-X mach 7 flight 2 guidance, navigation, and control overview and flight test results. In *Proceedings of AIAA/CIRA 13th International Space Planes and Hypersonics Systems and Technology*, AIAA 2005-3275, 2005.
- [9] Z. Gao. On disturbance rejection paradigm in control engineering. In *Proceedings of the 29th Chinese Control Conference*, Beijing, China, pp. 6071-6076, 2010.
- [10] 黄琳. 稳定性与鲁棒性的理论基础. 北京: 科学出版社, 2003.
- [11] B. Fidan, M. Mirmirani, and P. A. Ioannou. Flight dynamics and control of air-breathing hypersonic vehicles: review and new directions. In *Proceedings of 12th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies*, AIAA 2003-7081, Norfolk, Virginia, USA, 2003.
- [12] J. D. Shaughnessy, S. Z. Pinckney, J. D. McMinn, C. I. Cruz, and M. L. Kelley. Hypersonic vehicle simulation model: winged-cone configuration. NASA TM-102610, 1990.
- [13] S. Keshmiri, R. Colgren, and M. Mirmirani. Development of an aerodynamic database for a generic hypersonic air vehicle. In *Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, AIAA 2005-6257, San Francisco, California, USA, 2005.
- [14] K. J. Murphy, R. J. Nowak, R. A. Thompson, B. R. Hollis, and R. Prabhu. X-33 hypersonic aerodynamics characteristics. *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 38, no. 5, pp. 670-683, 2001.
- [15] C. H. Campbell, J. Caram, S. Berry, M. Difulvio, and T. Horvath. An overview of X-38 hypersonic wind tunnel data and comparison with numerical results. In *Proceedings of AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit*, 97-0567, 1997.
- [16] M. A. Bolender and D. B. Doman. A non-linear model for the longitudinal dynamics of a hypersonic air-breathing vehicle. In *Proceedings of AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*, AIAA 2005-6255, San Francisco, California, USA, 2005.
- [17] M. A. Bolender and D. B. Doman. Nonlinear longitudinal dynamical model of an air-breathing hypersonic vehicle. *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 44, no. 2, pp. 374-387, 2007.
- [18] M. Mirmirani, C. Wu, A. Clark, S. Choi, and R. Colgren. Modeling for control of a generic airbreathing hypersonic vehicle. In *Proceedings of AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*, AIAA 2005-6265, San Francisco, California, USA, 2005.
- [19] I. M. Gregory, R. S. Chowdhry, J. D. McMinn, and J. D. Shaughnessy. Hypersonic vehicle model and control law development using H-infinity and u synthesis. NASA TM-4562, 1994.
- [20] H. Buschek and A. J. Calise. Uncertainty modeling and fixed-order controller design for a hypersonic vehicle model. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 20, no. 1, pp. 42-48, 1997.
- [21] S. D. Naidu, S. S. Banda, and J. L. Bufington. Unified approach to H-2 and H-infinity optimal control of a hypersonic vehicle. In *Proceedings of the 1999 American Control Conference*, San Diego, California, USA, pp. 2737-2741, 1999.
- [22] P. Lohsoonthorn, E. Jonckheere, and S. Dalzell. Eigenstructure vs constrained H-infinity design for hypersonic winged cone. *Journal of*

- Guidance, Control, and Dynamics, vol. 24, no. 4, pp. 648-658, 2001.
- [23] Z. D. Wilcox, W. MacKunis, S. Bhat, R. Lind , and W. E. Dixon. Lyapunov-based exponential tracking control of a hypersonic aircraft with aerothermoelastic effects. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 33, no. 4, pp. 1213-1224, 2010.
- [24] O. U. Rehman, B. Fidan , and I. Petersen. Uncertainty modeling and robust minimax LQR control of hypersonic flight vehicles. In *Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, AIAA 2010-8285*, Toronto, Ontario Canada, 2010.
- [25] C. I. Marrison and R. F. Stengel. Design of robust control systems for a hypersonic aircraft. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 21, no. 1, pp. 58-63, 1998.
- [26] Q. Wang and R. F. Stengel. Robust nonlinear control of a hypersonic aircraft. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 23, no. 4, pp. 577-585, 2000.
- [27] K. J. Astrom and B. Wittenmark. *Adaptive Control*: Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1995.
- [28] P. A. Ioannou and J. Sun. *Robust Adaptive Control*: Dover Publications, 2012.
- [29] E. Mooji. Numerical investigation of model reference adaptive control for hypersonic aircraft. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 24, no. 2, pp. 315-323, 2001.
- [30] H. Xu, M. Mirmirani , and P. A. Ioannou. Robust neural adaptive control of a hypersonic aircraft. In *Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, AIAA 2003-5641*, Austin, Texas, USA, 2003.
- [31] H. Xu, M. D. Mirmirani , and P. A. Ioannou. Adaptive sliding mode control design for a hypersonic flight vehicle. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 27, no. 5, pp. 829-838, 2004.
- [32] D. B. Doman and A. D. Ngo. Dynamic inversion-based adaptive/reconfigurable control of the X-33 on ascent. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 25, no. 2, pp. 275-284, 2002.
- [33] A. Somanath and A. Annaswamy. Adaptive control of hypersonic vehicles in presence of aerodynamic and center of gravity uncertainties. In *Proceedings of 49th IEEE Conference on Decision and Control, Atlanta, GA, USA, pp. 4661-4666*, 2010.
- [34] Y. Huo, M. Mirmirani, P. A. Ioannou , and M. Kuipers. Altitude and velocity tracking control for an airbreathing hypersonic cruise vehicle. In *Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, AIAA 2006-6695*, Keystone, Colorado, USA, 2006.
- [35] Z. Liu, X. Tan, R. Yuan, G. Fan , and J. Yi. Adaptive trajectory tracking control system design for hypersonic vehicles with parametric uncertainty. *Journal of Aerospace Engineering*, available online.
- [36] Y. Ji, Q. Zong , and F. Zeng. Immersion and invariance based nonlinear adaptive control of hypersonic vehicles. In *Proceedings of 2012 24th Chinese Control and Decision Conference, Taiyuan, China, pp. 2025-2030*, 2012.
- [37] J. Levin, P. A. Ioannou , and M. D. Mirmirani. Adaptive mode suppression scheme for an aeroelastic airbreathing hypersonic cruise vehicle. In *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, AIAA 2008-7137*, Honolulu, Hawaii, USA, 2008.
- [38] T. A. Adami and J. J. Zhu. Control of a flexible, hypersonic scramjet vehicle using a differential algebraic approach. In *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, AIAA 2008-7464*, Honolulu, Hawaii, USA, 2008.
- [39] L. Fiorentini, A. Serrani, M. A. Bolender , and D. B. Doman. Nonlinear robust adaptive control of flexible air-breathing hypersonic vehicles. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 32, no. 2, pp. 401-416, 2009.
- [40] L. Fiorentini and A. Serrani. Adaptive restricted trajectory tracking for a non-minimum phase hypersonic vehicle model. *Automatica*, vol. 48, no. 7, pp. 1248-1261, 2012.
- [41] L. Fiorentini, A. Serrani, M. A. Bolender , and D. B. Doman. Nonlinear control of a hypersonic vehicle with structural flexibility. In *Proceedings of 47th IEEE Conference on Decision and Control, Cancun, Mexico, pp. 578-583*, 2008.
- [42] L. Fiorentini. *Nonlinear adaptive controller design for air-breathing hypersonic vehicles*. The Ohio State University, Columbus, 2010.
- [43] T. E. Gibson and A. M. Annaswamy. Adaptive control of hypersonic vehicles in the presence of thrust and actuator uncertainties. In *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, AIAA 2008-6961*, Honolulu, Hawaii, USA, 2008.
- [44] X. Hu, L. Wu, C. Hu , and H. Gao. Adaptive sliding mode tracking control for a flexible air-breathing hypersonic vehicle. *Journal of the Franklin Institute*, vol. 349, no. 2, pp. 559-577, 2012.
- [45] L. Guo and S. Cao. Anti-disturbance control theory for systems with multiple disturbance: a survey. *ISA Transactions*, no. 53, pp. 846-849,

- 2014.
- [46] H. Nijmeijer and T. I. Fossen. New directions in nonlinear observer design: Springer-verlag, 1999.
- [47] M. Arcak and P. Kokotovic. Nonlinear observers: a circle criterion design and robustness analysis. *Automatica*, vol. 37, no. 12, pp. 1923-1930, 2001.
- [48] C. Hall and Y. Shtessel. Sliding mode disturbance observer-based control for a reusable launch vehicle. In *Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, AIAA 2005-6145*, San Francisco, California, USA, 2005.
- [49] C. Hall and Y. Shtessel. Sliding mode disturbance observer-based control for a reusable launch vehicle. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 29, no. 6, pp. 1315-1328, 2006.
- [50] J. Davidson et al. Flight control laws for NASA's Hyper-X research vehicle. In *Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, AIAA 99-4124*, Portland, OR, USA, 1999.
- [51] Z. Pu, X. Tan, G. Fan, and J. Yi. Uncertainty analysis and robust trajectory linearization control of a flexible air-breathing hypersonic vehicle. *Acta Astronautica*, vol. 101, pp. 16-32, 2014.
- [52] Q. Zong, J. Wang, B. Tian, and Y. Tao. Quasi-continuous high-order sliding mode controller and observer design for flexible hypersonic vehicle. *Aerospace Science and Technology*, vol. 27, pp. 127-137, 2013.
- [53] Q. Zong, Y. Ji, F. Zeng, and H. Liu. Output feedback back-stepping control for a generic hypersonic vehicle via small-gain theorem. *Aerospace Science and Technology*, vol. 23, pp. 409-417, 2012.
- [54] J. Yang, S. Li, C. Sun, and L. Guo. Nonlinear-disturbance-observer-based robust flight control for airbreathing hypersonic vehicles. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 49, no. 2, pp. 1263-1275, 2013.
- [55] L. Zhu, C. Jiang, and C. Zhang. Adaptive trajectory linearization control for aerospace vehicle based on rbfn disturbance observer. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, vol. 28, no. 3, pp. 673-677, 2008.
- [56] Q. Shen, B. Jiang, and V. Cocquempot. Fault-tolerant control for T-S fuzzy systems with application to near-space hypersonic vehicle with actuator faults. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 20, no. 4, pp. 652-665, 2012.
- [57] B. Xu, D. Wang, F. Sun, and Z. Shi. Direct neural control of hypersonic flight vehicles with prediction model in discrete time. *Neurocomputing*, vol. 115, pp. 39-48, 2013.
- [58] 韩京清. 自抗扰控制技术-估计补偿不确定因素的控制技术. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [59] Q. Zheng, Z. Chen, and Z. Gao. A practical approach to disturbance decoupling control. *Control Engineering Practice*, vol. 39, pp. 1016-1025, 2009.
- [60] Z. Pu, R. Yuan, X. Tan, and J. Yi. An integrated approach to hypersonic entry attitude control. *Internal Journal of Automation and Computing*, vol. 11, no. 1, pp. 39-50, 2014.
- [61] Z. Ren, J. Fan, and J. Li. A new robust controller for flight control system of hypersonic flying vehicle. *Advanced Materials Research*, vol. 562-564, no. 2012, pp. 1682-1688, 2012.
- [62] X. Shao and H. Wang. Active disturbance rejection based trajectory linearization control for hypersonic reentry vehicle with bounded uncertainties. *ISA Transactions*, available online.
- [63] Z. Pu, R. Yuan, X. Tan, and J. Yi. Active robust control scheme for uncertainty and flexibility suppression of air-breathing hypersonic vehicles. In *Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference*, Nanjing, China, pp. 2265-2270, 2014.
- [64] Z. Pu, X. Tan, G. Fan, and J. Yi. Robust trajectory linearization control of a flexible hypersonic vehicle in the presence of uncertainties. In *Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Takamatsu, Japan, pp. 365-370, 2013.
- [65] 王亮, 刘向东, 盛永智. 基于高阶滑模观测器的自适应时变滑模再入姿态控制. *控制与决策*, vol. 29, no. 2, pp. 281-286, 2014.
- [66] 黄国勇, 姜长生, 王玉惠. 基于自适应Terminal滑模的空天飞行器再入控制. *系统工程与电子技术*, vol. 30, no. 2, pp. 304-307, 2008.
- [67] J. J. Zhu, D. Banker, and C. E. Hall. X-33 ascent flight control design by trajectory linearization - a singular perturbation approach. In *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, AIAA 2000-4159*, Denver, CO, USA, 2000.
- [68] T. Bevacqua, E. Best, A. Huizenga, D. Cooper, and J. J. Zhu. Improved trajectory linearization flight controller for reusable launch vehicles. In *42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA 2004-875*, Reno, Nevada, USA, 2004.
- [69] X. Hu, L. Wu, C. Hu, and H. Gao. Fuzzy guaranteed cost tracking control for a flexible air-breathing hypersonic vehicle. *IET Control Theory & Applications*, vol. 6, no. 9, pp. 1238-1249, 2012.
- [70] F. Yang, R. Yuan, J. Yi, G. Fan, and X. Tan. Direct adaptive type-2

- fuzzy neural network control for a generic hypersonic flight vehicle. Soft Computing, vol. 17, no. 11, pp. 2053-2064, 2013.
- [71] G. Duan and Z. Zhong. Parametric autopilot design for an air-breathing hypersonic vehicle. In Proceedings of 2010 8th IEEE International Conference on Control and Automation, Xiamen, China, pp. 52-57, 2010.
- [72] B. Meng and H. Wu. Adaptive control based on characteristic model for a hypersonic flight vehicle. In Proceedings of the 26th Chinese Control Conference, Zhangjiatie, China, pp. 720-724, 2007.
- [73] K. P. Groves, D. O. Sigthorsson, A. Serrani, S. Yurkovich, M. A. Bolender, and D. B. Doman. Reference command tracking for a linearized model of an air-breathing hypersonic vehicle. In AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, AIAA 2005-6144, San Francisco, California, USA, 2005.
- [74] J. T. Parker, A. Serrani, S. Yurkovich, M. A. Bolender, and D. B. Doman. Control-oriented modeling of an air-breathing hypersonic vehicle. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, vol. 30, no. 3, pp. 856-869, 2007.

作者简介

蒲志强 男，1987年，中国科学院自动化研究所，博士、助理研究员。2014年在中国科学院自动化研究所获工学博士学位。发表SCI、EI检索论文十余篇，WCICA 2012优秀论文获得者。主要从事高超声速飞行器控制、无人机系统设计、智能机器人设计等方面的研究。

易建强 男，1963年，中国科学院自动化研究所，博士、研究员、博士生导师。1985年毕业于北京理工大学力学工程系，1992年获日本九州工业大学自动控制系工学博士学位。1992年就职于东京CSD公司，1994年任京都Mycom公司技术研究所主任研究员、研究室室长。2000年底入选中国科学院百人计划，IEEE、中国自动化学会和中国人工智能学会高级会员。承担国家863项目、国家自然科学基金项目、中科院知识创新项目、企业合作项目等，发表SCI、EI检索论文200余篇，主要从事智能控制方法、自适应控制方法、智能机器人技术的研究与开发。

袁如意 男，1983年，中国科学院自动化研究所，博士、助理研究员。2011年在中国科学院自动化研究所获工学博士学位。承担、参与国家自然科学基金项目、国家863项目、中科院知识创新项目、中航工业企业合作项目等。发表SCI、EI检索论文20余篇，主要从事非线性系统控制理论与方法、飞行控制理论与方法、智能控制方法与应用等方面的研究。

谭湘敏 男，1982年，中国科学院自动化研究所，博士、高级工程师。2009年在中国科学院自动化研究所获工学博士学位。承担、参与国家自然科学基金项目、国家863项目、企业合作项目等。发表SCI、EI检索论文20余篇，授权发明专利近10项，主要从事控制理论与应用研究、多旋翼系统及智能机器人系统研究与开发。

无人机飞控系统的容错控制技术 研究综述

姜 斌，钱默抒

南京航空航天大学自动化学院，南京 210016

摘要：本文对近年来无人机（unmanned aerial vehicle，简写UAV）飞行控制系统容错控制技术的发展状况进行了概况，将容错控制技术分为两个研究方向，即依赖于故障检测与辨识（Fault Detection and Identification, FDI）信息的主动容错控制与不依赖于FDI信息的被动容错控制。分析和阐述了现有的无人机飞控系统容错控制技术的最新进展、实现条件以及算法特点等；介绍和总结了现有的无人机容错控制在军用和民用等领域的工程应用情况。最后，展望了无人机飞控系统容错控制技术的未来研究方向。

关键词：无人机；飞行控制系统；容错控制；故障检测

1 引言

无人机（UAV, unmanned air vehicle），是一种由无线电遥控或由自身程序控制装置操纵的，执行特定任务的非载人飞行器。无人机由于具有尺寸小、重量轻、结构简单、机动性高、隐蔽性好、成本低廉、适应性强等特点，在军用和民用领域受到广泛关注^[1]。

1913年已经证实自动驾驶仪即飞行控制系统具有自动操纵飞行器的能力，但这并没有引起人们在无人机的发展和研制上的重视，在这之后近50年的时间里，无人机的发展相当缓慢，从20世纪60年代开始，无人机的战略价值逐渐被人们所认识，研制的步伐也开始加快。2003年伊拉克战争中美军动用了包括“全球鹰”在内的十多种无

人机数百架次，为所谓的“斩首行动”和“震慑行动”提供了大量准确的情报，据统计，英美联军作战信息中有三分之一是靠无人机获得的。在2004年7月，美军用于反恐战争的“猎人”无人侦察机实现了累计飞行3万小时的记录。无人机在前线和敌后的作战任务中表现出的零人员伤亡和强连续作战能力，特别是对大量战术运用信息的获取，无人机具有其他装备难以替代的优势，受到作战部队的广泛欢迎^[2]。在国民经济方面，无人机用于大地测量、气象观测、农业植保、城市环境监测、地球资源勘探、森林防火、电力巡线和人工降雨等；在科学技术方面，对核、生、化污染区的取样与检测，用于大气取样等；另外，由于无人机与空间飞行器都属于无人驾驶范畴，在某些方面具有相似之处，所以空间飞行器新型元器

基金项目：国家自然科学基金（61428303，61403195），航空重点实验室基金（20148052038），江苏省自然科学基金（SBK2014042586）

件、子系统和有效载荷的空中飞行试验也可以用无人机来进行先行验证^[3]。

正是由于上述无人机的战果和巨大的应用潜力，世界上有许多国家都已在研制和开发自己的无人机，包括美、法、加、英、德、意、日、澳、以色列和中国等^[4-7]。特别是美国从2000年起对无人机系统的投入急剧增长，如图1所示，其中2009年至2013年每年都已经超过了30亿美元。所以，开展无人机系统相关技术研究具有十分重要的学术价值、战略意义和应用前景。无人飞行器的发展是目前国际上各个发达国家竞相争夺空间

技术的焦点之一，是一个国家民族的综合国力的体现。

一般而言，无人机飞行控制系统主要由三部分组成，以飞行控制计算机为核心，并且与各种传感器及执行机构共同构成闭环控制系统，如图2所示。其中垂直陀螺、速率陀螺、加速度陀螺、GPS接收机、无线电高度表、大气数据计算机等共同组成了常见的飞行控制系统的传感器系统，而升降舵回路、副翼回路、方向舵回路和发动机转速控制器等属于常见的飞行控制系统的执行机构。



图1 美国国防部对无人机系统投资的统计图

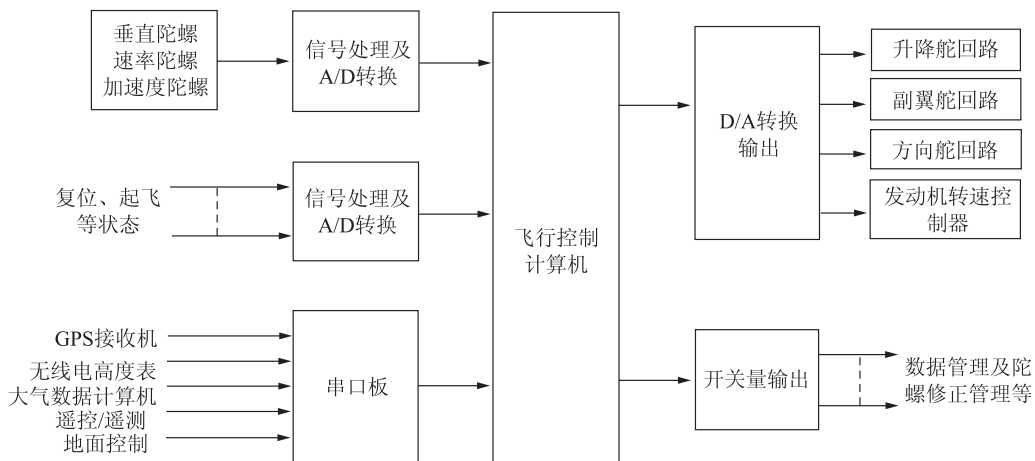


图2 典型飞行控制系统结构图

无人机系统是一个结构复杂、飞行过程涉及层面多、工作环境跨度大的复杂系统，也是一个技术安全性高、潜在风险大的大系统。据美国国防部在《无人机系统路线图2005-2030》中的研究统计无人机系统事故主要来自飞行控制系统、推进系统、操作和通信系统。飞行控制系统故障占无人机总故障的26%，在飞控系统方面提高可靠性，可大大降低无人机的总事故率。所以，研究复杂多变环境下的无人机的飞行控制系统，实现其高度可靠容错功能，对提高无人机可靠性与安全性的关键技术突破至关重要^[8]。

当飞控计算机、传感器或者执行机构任何一个单元出现问题，飞控系统都无法完成正常的飞行任务。通常情况下，无人机执行器故障包括操纵面的卡死、损伤、松浮和饱和。常见的传感器故障行为有卡死、增益变化、恒偏差三种^[9]。当飞控系统发生故障时，在不增加硬件设备的前提下，通过预先设计或在线调整控制器参数或结构，并充分利用无人机操纵面本身存在的功能冗余，最终实现闭环飞行控制系统稳定的技术称之为飞控系统容错控制（算法）技术^[10]。飞控系统容错控制技术包含两个部分：一是故障检测，能及时对故障发生的原因和部位进行判断，并预测潜在故障发生的可能性，进而为及时预警和飞控律重构以及自主故障诊断提供相关信息和依据，是飞控系统容错控制的核心技术之一；二是飞行控制律重构，是容错控制的另一项核心技术，其功能就是在无人机出现比较大的故障情况下，通过实时调整控制律，重构出可以正常操纵的控制律，保证故障无人机的飞行安全。

“容错控制”这个概念首次是1986年9月由美国电气和电子工程师学会控制系统分会及美国国家科学基金会共同在加州桑塔卡拉拉大学的控制会议上正式提出。目前国内外控制界所研究的容错控制系统，是指具有冗余能力的控制系统，当

某些元器件发生故障或者失效时，被控系统仍能按原定的性能指标或者在可允许范围内降低性能指标，顺利地完成任务。现代化的无人机飞行器的飞控系统都具有较强冗余能力，因此研究复杂飞行控制系统的容错控制算法对提高其自身的可靠性、安全性及可维护性都具有重要的理论意义和实际应用价值^[30]。

2 研究方向与进展

1971年，美国Niederlinski教授在《automatica》上发表的一篇文章中首次提出“完整性控制”的概念，这标志着容错控制思想的产生。1980年，Siljak教授在《International Journal of Control》上发表了关于被控系统可靠镇定控制的论文^[24]，这也是最早研究容错控制的学术论文之一。此后近四十年里，容错控制技术得到了国内外众多研究学者的关注和研究，取得了一大批创新性成果，如文献[11-14]等。目前对容错飞行控制系统的研究已取得很大进展，研究者们提出了许多针对飞机的容错控制方案，这些方案大体可分为两大类：一类是通过故障检测与辨识（Fault Detection and Identification, FDI）系统提供的故障诊断信息，选择针对不同故障形式所设计的控制律。例如：伪逆法、基于观测器的容错控制方法、多模型自适应控制等；另一类方法无需通过故障检测与辨识系统获取故障诊断信息，而是对飞机进行在线实时参数辨识，动态设计控制律。例如：直接自适应容错控制方法、鲁棒可靠控制方法等^[8]。

无人机飞控系统的容错控制由于其重要性，目前已引起了广泛的注意，特别是信号处理、模式识别、自适应控制、最优化方法和智能控制在容错控制概念下的交叉与融合，加快了飞控系统容错技术的发展，并且已经研究出了很多容错控制方法。根据对于故障检测与辨识信息的依赖性可归纳为以下二类：

2.1 依赖FDI信息的容错方法

依赖FDI信息的容错方法是指利用先验的故障及其影响的各种信息,预先设计容错方案,储存在机载飞行控制计算机中,当发生故障时根据FDI检测结果,重新分配控制指令,以抵消卡死操纵面影响或补偿损伤操纵面影响,利用剩余有效操纵面继续完成飞行任务或保证安全着陆,也可以在线计算容错控制律,这类容错控制设计方案的结构见图3所示。

(1) 基于伪逆法的容错控制方法 该容错方法的基本原理是修改常数反馈增益以使重构后的系统在某种意义上接近于正常系统,通过求广义逆矩阵来获得在误差范数的最小二乘极小化意义下的重构控制律。这类方法通常表现为在原系统的输入矩阵前乘以一个伪逆阵,故称为伪逆法^[15]。伪逆法的优点主要有两条:一是可以直接利用现有控制律,便于技术继承和设计验证;二是设计思路简单明了,易于理解,适于实时应用^[16]。该容错方法事先假定某些故障类型,对许多预料型故障解出增益,存储于控制计算机,一旦某些故障被检测、隔离和识别出来,获得故障系统的类型,下一步就修改反馈增益。

设无执行器故障情况下的无人机飞控系统可

线性化为如下线性系统:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

当某一执行器发生故障后,被控对象模型可描述为:

$$\dot{x} = Ax + B_f u_f$$

伪逆法容错方案的基本目标是,针对已知的正常情况下的控制输入 u 和控制输入阵 B , 求取 u_f 使得故障前后的输出基本不变,即 $Bu = B_f u_f$, 也就是要求故障时和标称时的控制效果基本一致,由此可以得到伪逆控制 $u_f = B_f^+ Bu$ 。但并非具有控制冗余的系统都能够用伪逆法进行重构,其伪逆控制律的存在须满足一定的条件,因为 u 可在一定范围内任意取值,所以 $Bu = B_f u_f$ 两边对于任意 u 都能够精确相等的充要条件是 B_f 的秩大于或等于 B 的秩。

伪逆法在具体应用过程中就是在正常控制律输出和执行机构之间增加一个控制混合器,在无故障情况下,控制混合器矩阵是单位矩阵,执行器或作动器发生故障后,就通过调整控制混合器中各元素的值,切换控制阀及其增益。实质上,控制混合器的作用就是在故障条件下实现控制效果的再分配,其被控系统容错控制原理如图4所示。

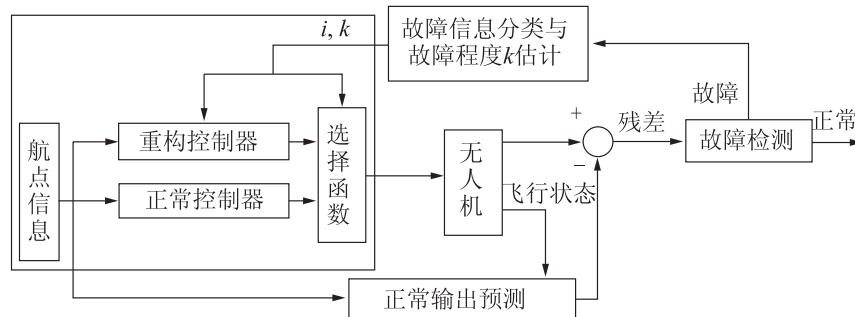


图3 依赖于FDI信息的无人机飞控系统容错控制结构示意图

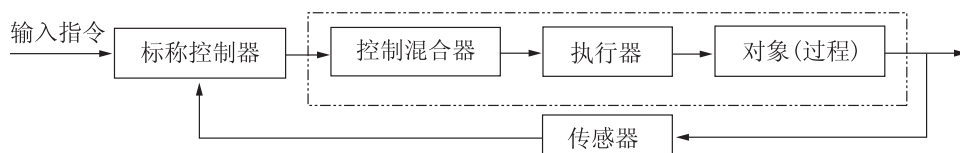


图4 基于伪逆法的容错控制结构示意图

在系统重构原理图中，正常控制器的输出端串联了一个控制混合器，从而构成新的控制律。由于使用伪逆法重构时，控制混合器的设计与正常控制律无关，因此只需考虑虚框中的部分。通过设计控制混合器，使得包括执行器在内的过程对象在发生故障前后保持接近的输入输出特性，维持整个控制系统的动态特性，从而可满足故障隐蔽的重构目标，从这个意义上讲，基于伪逆法的容错控制方法实际是对被控对象进行重构。

(2) 基于多模型的容错控制方法 它利用有限集可以完全描述飞控系统可能出现的各种损伤为假设前提，在飞控系统中建立多个损伤辨识模型及其对应的控制器，且要求这些控制器均可以保证在对应辨识模型周围充分大的集合内鲁棒，这样可使这些集合间相互交迭，从而保证容错控制设计解的存在^[17-19]。该容错控制方案针对飞控系统可能出现的各种损伤模型设计对应的观测器，动态寻找最接近当前实际状态的模型，并切换到相应的控制器以适应各种不同的故障环境，不过由于其结构比较复杂，且需要建立多个并行观测器和相应的控制器，被控系统的整体鲁棒性难以评估。文献[20]提出了一种新型的多模型主动容错控制方法，如图5所示。与传统主动容错控制方法相比较，文献[20]用了一个监控机制取代了传统主动容错控制系统中的FDI及相应的辅助决策子系统，其目的是为了解决传统主动容错控制系统中FDI及辅助决策系统的费时及可靠性问题。

在图5所示的主动容错控制方案中，监控机制由两部分组成，即模型库和监控决策机制。其中模型库是监控机制进行在线监控指标计算分析决策的基础，监控决策机制根据系统性能容忍度指标和模型失配度指标计算分析的结果，进行模型间控制器参数的切换调整，从而实现系统的主动容错控制。监控机制从系统的性能角度出发，认为当系统发生故障时，系统性能必然会变差，系统性能容忍度指标异常。当系统的性能容忍度指

标超出一定的范围时，即可认为系统已有故障发生，此时并不去确定故障的具体所在，只是依据此时系统模型失配度指标的计算分析，确定出系统运行的状态模式，进而调用相应的控制律或在线重构新的控制律以使系统性能重新满足要求，达到容错控制的目的。

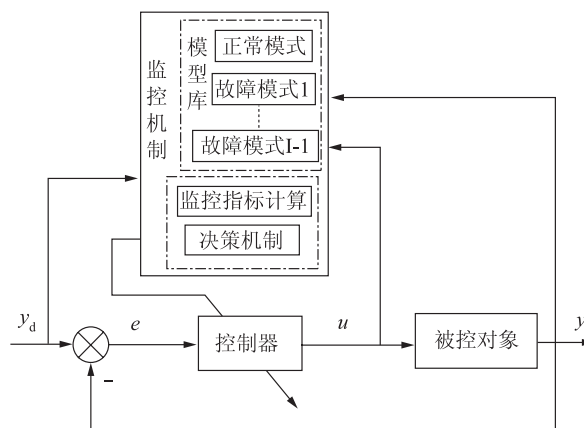


图5 基于多模型的容错控制方法结构示意图

(3) 基于专家系统的容错控制 对于复杂的控制系统，系统中可能发生的故障具有多样性，单纯采用控制器重构或完整性设计方法在许多情况下很难与故障系统匹配以实现良好的控制。专家系统为解决此类问题提供了一条有效的途径，基于专家系统的容错控制结构如图6所示。

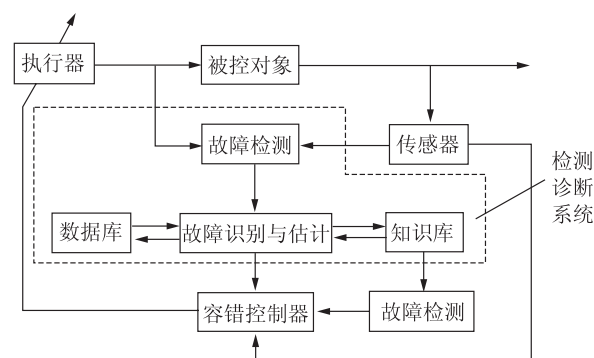


图6 基于专家系统的容错控制结构示意图

其中的检测诊断系统用于整个系统的故障检测、诊断、预报，并为容错控制器提供可靠信息，检测诊断结果以文件形式存于数据库中，对于中间结果可不断进行刷新。知识库由检测库、

诊断库和容错库三个子库组成，检测库用来获取故障信息，并对其进行比较、分类和处理，其中包括检测参数特性的描述，信号处理方法的选择，检测结果的排序、分析和比较等；诊断库用于故障识别，主要包括诊断算法的选择、诊断推理过程、诊断结果的解释等；容错库用于对故障进行控制和处理，其中包括故障补偿规则，故障的削弱、抑制和消除的方法等。容错控制推理器具有一定的职能作用，可根据不同的故障源和故障特征，采取相应的容错控制措施，以保证系统连续正常运行，或以牺牲性能指标为代价，保证系统在规定时间内完成其规定的功能。

(4) 基于观测器的容错控制方法 该方法主要针对被控对象通过设计观测器来解决故障诊断问题（含故障的检测、隔离和辨识），再此基础上根据辨识到的故障信息来进行补偿控制输入设计从而达到容错控制的目的^[21,22]，基于观测器的容错控制结构如图7所示。

基于观测器的故障诊断方法主要分为如下两个步骤^[23]：

第一：残差产生。应用被控系统可以测量到的输入、输出量，产生得到包含故障信息的残差信号。无故障发生时残差应当为零或者接近零的很小的量。而当故障发生时，残差信号会产生较

大的变化，这样诊断系统就可以灵敏地检测到故障是否发生。

第二：残差估计。针对诊断系统中产生的残差进行分析、评判，综合判断被控系统中是否有故障发生。在基于观测器故障诊断的方法中，残差的产生是通过估计过程的状态或输出，用估计误差作为残差。残差信号在理想情况下应当与输入、输出信号解耦，且应尽可能多的反映出故障信息。在故障诊断系统中，观测器可根据实际情况选用线性或非线性，全阶或降阶，固定或自适应观测器。经过很好的发展和改进，观测器能同时估计被观测系统的状态和未知参数，可应用于线性或非线性系统，并且它的结构和实现都相对简单，但基于观测器的故障估计依然需要满足故障分布阵列满秩的条件。

需要特别指出的是基于观测器的故障诊断技术是以系统的解析模型为依据设计的，其中对于系统模型的精确程度有着很大的关系，同样的观测器设计方法，在不同的系统模型上进行仿真验证一定会有着不一样的结果。因此对于大多数实际系统来说，由于系统线性化、近似化过程中存在大量的模型误差等不确定性，还会受到外界干扰等因素的影响，这些因素不可避免降低系统的性能指标，并且会对系统造成这样那样的影响，

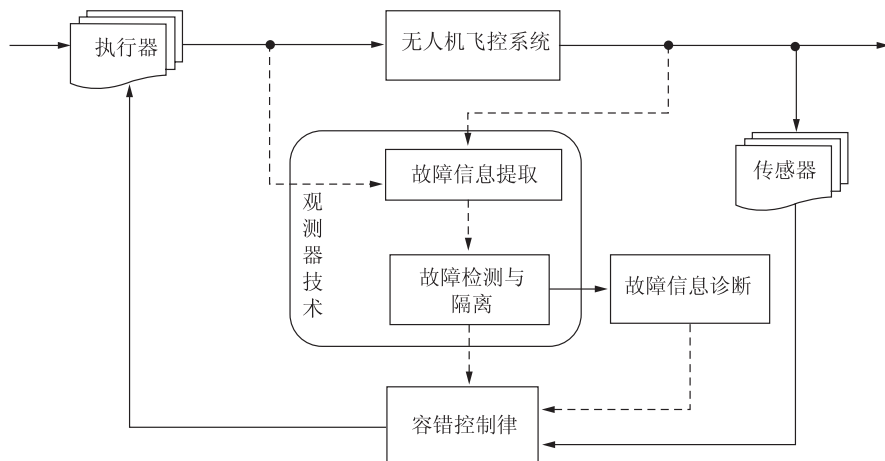


图7 基于观测器的容错控制结构示意图

甚至发生虚警漏检,使故障诊断效能降低等问题。因此对于观测器的故障诊断技术的研究日益朝向鲁棒观测器方向发展和延伸。而滑模观测器正是由于有着对抗系统的不确定性、外界干扰能力强的优点正被许多学者所重视^[24]。系统中的滑模项保证了系统在无故障时的鲁棒性,并以此为界,检验状态残差是否在我们预定滑模态,进而判断系统是否发生故障,否则滑模态被破坏,通过故障估计来确定系统的故障因素。因此基于滑模观测器的故障诊断方法适用性强了,可以在许多线性、非线性、带有不确定性和外界干扰的系统中进行故障的检测、隔离和辨识,进而设计主动容错控制策略实现对被控系统的稳定控制。

2.2 不依赖FDI信息的重构方法

不依赖FDI信息的重构方法也称为强鲁棒控制系统或高可靠控制系统。它是一种在飞机设计的开始阶段就将执行机构与操纵面故障考虑在内的鲁棒设计方法“设计得到的鲁棒飞控系统可以在故障下保持飞机稳定飞行、安全着陆。

(1) **鲁棒可靠容错控制方法** 该方法主要是设计一个鲁棒控制器使系统对某些部件传感器和执行机构故障不敏感。通常地鲁棒控制器设计为一个定常控制器,该控制器除考虑正常工作状态的参数之外,还要考虑有传感器或执行器失效等故障情况下的参数值^[25]。鲁棒容错控制的优点是故障发生时能及时实现容错控制,不存在重构容错控制中分离延时而引起的控制性能变坏问题。但由于系统故障的多样性和对系统性能的高要求,鲁棒可靠容错控制器的设计方法只能适应少数几种故障情况,不可能用一个控制器实现对所有故障的鲁棒性,并且以牺牲系统的性能为代价。研究既能保证系统的容错能力,又使系统保持一定的稳态、动态性能,同时用一个容错控制器实现尽可能多的故障的容错是鲁棒容错控制进一步发展的方向^[26]。

(2) **直接自适应容错控制方法** 该方法的主要特点是不需要知道故障的信息,只要能满足系统正实性的条件,就可以使得容错系统稳定,达到理想的控制效果,但是其有效性往往限定在特定条件下。直接自适应容错控制方法是指按照直接自适应控制方法的使用条件,通过不同的构造技术,使得故障后的飞机满足正实性条件,使用自适应调节机制完成故障飞机跟随参考模型的输出。文献[27]运用直接自适应控制技术对飞行控制系统操纵面故障进行了容错控制,运用操纵面故障参数模型,采用优化算法设计出反馈补偿器来保证故障系统的严格正实性,并利用IyaPunov理论证明了容错系统的渐近稳定性。仿真结果显示在操纵面严重受损的情况下,采用该方法飞机仍能保持良好的性能。文献[28]针对执行器部分失效和偏移的线性时不变系统,提出了一种直接自适应容错状态反馈控制策略,解决了被控系统渐近稳定问题。所提出的自适应律在线调节了执行器失效因子、状态依赖权值和常值偏移故障,并且基于调节信息构造直接自适应容错状态反馈控制控制器。下面我们来详细的给出该容错控制方法的设计过程,考虑连续时间线性时不变系统,其状态空间方法描述如下:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

考虑执行器出现失效和偏移故障,其故障模型描述如下:

$$u_i^{hF} = \rho_i^h u_i + \tau_i^h \sigma_i, \quad 0 < \underline{\rho}_i^h \leq \rho_i^h \leq \bar{\rho}_i^h$$

其中, ρ_i^h 为第 i 个执行器的未知失效因子, $\underline{\rho}_i^h, \bar{\rho}_i^h$ 分别为 ρ_i^h 的上界和下界。 σ_i 为第 i 个执行器的未知偏移/卡死值。 $\tau_i^h \in \{0, 1\}$ 。为描述方便,将对整个故障模式简写成:

$$u^F = \rho u + \tau \sigma$$

由此,飞控系统可以写成如下形式:

$$\dot{x} = Ax + B\rho u + B\tau\sigma$$

针对上述故障情况下的飞控系统设计如下直接自

适应容错控制:

$$u = K_1 x + K_2(t)$$

其中 $K_1 = WQ^{-1}$ 满足一个线性矩阵不等式 $QA^T + AQ + B\rho W + W^T \rho B^T < 0$; 选取 $K_2(t)$

$$K_2(t) = -\hat{\rho}^{-1}(\hat{\delta}B^T Px + \hat{\beta})$$

$\hat{\rho}, \hat{\delta}, \hat{\beta}$ 是三个自适应参数估计值, 其数学表达式可详见文献[28]。

(3) 基于神经网络的容错控制方法 基于专家系统的容错控制虽然可处理不精确知识, 但也只能解决与事先存储好的、由专家经验总结出来的故障现象与处理方法相对应的问题, 当遇到数据库里没有存储的未知故障时, 基于专家系统的容错控制方案就无能为力了。由于神经网络控制器在结构上有功能冗余性, 所以人们考虑把神经网络引入到容错控制器的设计过程中^[31]。以无人机飞行控制系统为研究对象, 采用基于神经网络的容错控制策略, 不必预先知道故障的位置和大小, 也不必对系统进行参数辨识, 就可使飞行控制系统在故障情况下的输出精确跟踪参考模型的输出, 达到理想的动态性能。需要特别指出的是神经网络的学习速度一般都比较慢, 为满足实时控制需要, 神经网络必须具有快速的学习算法。文献[29]提出基于神经网络自适应逆的容错飞行控

制系统结构, 使用动态逆和神经网络自适应控制的方法对作动器故障进行容错控制。文献[30]提出基于神经网络动态逆的自适应容错控制策略, 采用神经网络进行系统辨识, 建立系统的动态逆模型, 同时使用模糊神经网络补偿器进行自适应神经网络容错控制设计。下面我们给出该类容错控制方法的一个简单介绍: 当一个无人机发生执行器故障发生之后, 其飞控系统可描述为如下动态方程:

$$\dot{x}_p = A_p x_p + B_p u_p + \sigma(x_p, u_p)$$

$$y_p = C_p x_p$$

其中 A_p, B_p, C_p 故障状态下的飞控系统状态阵, 输入阵和输出阵, $\sigma(x_p, u_p)$ 由执行器故障引起的未知非线性输入向量函数。

为了跟踪控制目的, 引入下列参考模型:

$$\dot{x}_m = A_m x_m + B_m u_m$$

$$y_m = C_m x_m$$

为了实现容错跟踪控制, 设计如下容错跟踪控制器。

$$u_p = K_u u_m + K_m x_m + K_e e - K_p x_p - f(x_p, u_p)$$

其中, K_u, K_m, K_e, K_p 为控制器增益矩阵, $f(x_p, u_p)$ 为神经网络补偿控制器的输出。

整个闭环容错控制系统如图8所示:

通过动态调RBF神经网络的参数, 从而获得故障

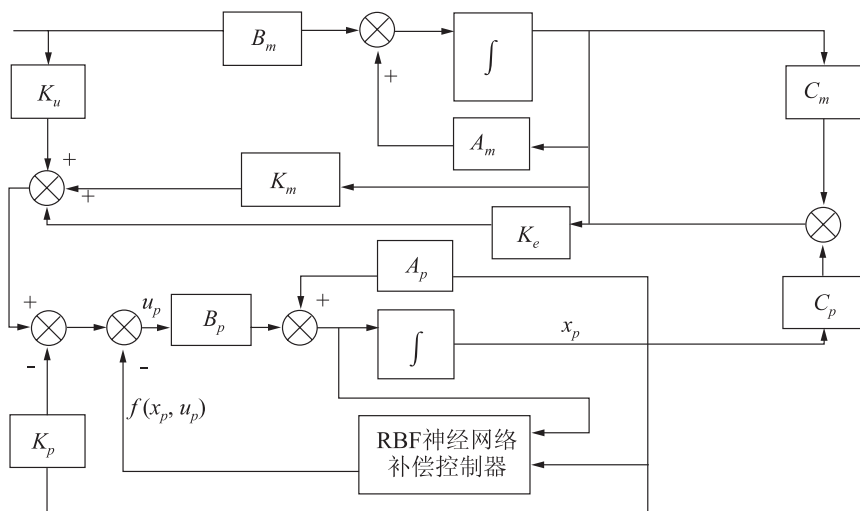


图8 基于神经网络的无人机飞控系统容错控制结构示意图

系统的非线性补偿控制项 $f(x_p, u_p)$ ，实现无人机的模型跟随控制，从而使系统获得满意的容错性能。

2.3 国外工程应用进展

飞行控制系统容错控制技术的工程应用研究开始于美国空军20世纪80年代进行的自修复飞行控制系统设计，1989年至1990年，美国空军在F-15验证机上成功验证了基于伪逆法的容错控制策略，这标志着可容错飞行技术开始进入实用性阶段。在1998年，美国空军首次利用无尾翼无人机X-36采用神经网络自适应控制算法成功地进行容错飞行试验，这次飞行试验不仅对控制律容错进行了可行性验证，同时还对故障状态下可容错飞行控制系统的鲁棒性进行了评估。经过多年的发展，飞行控制系统容错控制技术在理论和应用上都取得了一定的突破。

美军RQ-4“全球鹰”无人机（见图10）是目前世界上飞行时间最长、距离最远、高度最高的无人机，该机曾经创造且目前仍然保持着世界无人机领域的多项最高记录。早在2001年12月全球鹰无人机因为机械故障在阿富汗境内坠毁，目前，全球鹰无人机控制系统中已经装备了“特情管理单元”，即对意外情况进行紧急处理的单元，具有故障检测和容错控制能力，最近几年全球鹰几乎没有因为故障造成过失事，它是目前世界上公认的安全性较高的无人机。

2010年7月12日，英国BAE系统公司的首架高科技隐形无人飞机正式面世。雷电之神具有先进的隐身设计，军方可以在全球任意地点使用卫星通信系统控制这款无人机，高速、隐秘的飞抵地球上任意一个角落，同时它具备精确打击远程目标的能力，甚至还进行洲际性的远程打击，雷电之神上配备的自动人工智能系统和识别系统，还能使它防卫自身受到其他有人和无人敌机的攻击。“雷电之神”无人机的飞控系统中引入了人

工智能技术，可见当前智能控制在无人机飞行控制系统中已经进入到工程化实现阶段。



图10 “全球鹰”无人机

“神经元”无人战斗机（见图11）由法国领导，瑞典、意大利、西班牙、瑞士和希腊参与。可以在不接受任何指令的情况下独立完成飞行，并在复杂飞行环境中进行自我校正，此外它在战区的飞行速度超过现有一切侦察机。2012年11月，神经元无人机在法国伊斯特尔空军基地试飞成功。从飞行控制系统技术性能上看，“神经元”无人机综合运用了自动容错、神经网络、人工智能等先进技术，具有自动捕获和自主识别目标的能力，在复杂飞行环境中可进行自我校正，也可由指挥机控制其飞行或作战。“神经元”无人机解决了编队控制、信息融合、无人机之间的数据



图11 “神经元”无人机

通信以及战术决策与火力协同等技术,实现了无人机的自主编队飞行,其智能化程度达到了较高水平。由此可见,无人战斗机“神经元”无人机系统整体性能非常优异,并且其飞控系统已经具备自动容错控制能力。

2.4 国内工程应用进展

我国无人机研制始于20世纪60年代左右,除靶机外,已经研制出数十种不同类型、配套完整、性能先进的无人机,包括长空系列、彩虹系列、翼龙和翔龙等,但是它们的飞控系统还尚未具有自主的容错控制功能。西北工业大学采用控制分配技术进行了多操纵面无人机的容错飞行控制系统的试飞试验^[32]。

近年来我国在微小型无人机民用市场领域也取得了长足进展,如深圳市大疆创新科技有限公司的微型多旋翼航拍无人机,已成功占据了全球民用小型无人机约70%的市场份额,2013年销售额已经超过8亿元。另外,我国民用无人机在农作物的喷药、施肥、电力巡线、运送快递、航拍、测绘等各个应用领域的应用研究也日趋成熟。由于民用无人机价格低廉,所以,飞控系统容错控制技术在民用领域暂时没有研发和试验。

3 研究展望

随着计算机科学以及电子技术的迅猛发展,无人机的应用已经扩展到更广阔的领域,目前,其飞控系统容错控制技术的研究已经取得丰硕成果,但同时也存在一些不足,有待进一步研究。

(1) 容错控制算法简化。无人机是一个复杂的被控对象,要对其实现导航控制和多任务规划一般需要复杂的算法,这就占用了机载计算机的大量资源,留给容错控制算法的资源并不多,由此,对于无人机这样的复杂被控系统,计算代价与控制精度之间存在着很大的矛盾。简化容错

控制算法,在理论研究的同时密切联系实际计算能力的约束,发展简单、便于实现、占用计算资源少的容错控制算法是未来无人机容错控制设计的主要任务之一。

(2) 容错控制算法融合。目前已知的容错控制算法很多,但各有弊端,通过融合不同的控制方法,充分利用各种算法的优点,消除其不利因素,最终得到满意的控制效果,也是未来无人机飞控系统容错控制算法的主要研究方向。

(3) 容错控制算法的性能优化。未来将对无人机的精确控制、精确导航提出更高的要求,如无人机编队飞行和舰载无人机的自动着舰等,飞控系统的瞬态性能指标必须满足要求才能够保证无人机的飞行安全和飞行任务的圆满完成,特别是在复杂工作环境下,如何优化并提高闭环控制系统动态性能将是无人机容错控制技术的一个研究方向。

(4) 容错控制方案的实时性提高。未来对无人机的大机动、高速飞行等方面都将提出更高的要求,如无人作战飞机,它需要飞控系统的快速反应能力,包括快速容错控制能力,那么如何缩短FDI信息的获取时间和故障的调节时间,发展计算实时性强、符合无人机特点的容错控制方法将是未来无人机飞控系统容错控制技术的一个研究方向。

4 结束语

容错控制技术已经成为无人机领域一个新的研究热点,国内外对于无人机的相关研究已经取得了多项令人鼓舞的进展,也使人们认识到了其必然的发展方向以及广泛的应用前景,受到各国特别是发达国家的高度重视并制定了各种详细的发展规划。虽然目前无人机及其容错控制相关问题的研究会存在很多问题和困难,但研究和应用前景十分广阔,随着更多控制或其他相关学科的研究成果引入,无人机飞控系统的容错控制方法研究定能取得长足的进展和重大突破。

参考文献

- [1] G. Vachtsevanos, L. Tang, G. Drozeski, et. al. From mission planning to flight control of unmanned aerial vehicles: strategies and implementation tools. *Annual Reviews in Control*, 29: 101-115, 2005.
- [2] Y. J. Xu. Nonlinear robust stochastic control for unmanned aerial vehicles. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 32(4): 1308-1319, 2009.
- [3] H. Y. Chao, Y. C. Cao, Y. Q. Chen. Autopilots for small unmanned aerial vehicles: a survey. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 8(1):36-44, 2010.
- [4] W. MacKunis, Z. D. Wilcox, M. K. Kaiser, et. al. Global adaptive output feedback tracking control of an unmanned aerial vehicle. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 18(6): 1390-1397, 2010.
- [5] E. Lavretsky, R. Gadiant. Robust adaptive design for aerial vehicles with state-limiting constraints. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 33(6): 1743-1752, 2010.
- [6] Y. S. Yu, X. L. Ding, J. J. Zhu. Attitude tracking control of a quadrotor UAV in the exponential coordinates. *Journal of the Franklin Institute*, 350: 2044-2068, 2013.
- [7] 鲜斌, 古训, 刘祥等. 小型无人直升机姿态非线性鲁棒控制设计. *控制理论与应用*, 31(4): 409-416, 2014.
- [8] Y. M. Zhang, J. Jiang, Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems. *Annual Reviews in Control*, 32(2), 229-252, 2008.
- [9] Y. M. Zhang, A. Chamseddine, C. A. Rabbath, et. al. Development of advanced FDD and FTC techniques with application to an unmanned quadrotor helicopter testbed. *Journal of the Franklin Institute* 350: 2396-2422, 2013.
- [10] Y. M. Tang, R. J. Patton. Fault-tolerant flight control for nonlinear-UAV. 20th Mediterranean Conference on Control and Automation, Barcelona, Spain, July 3-6, 2012.
- [11] Moshu Qian, Bin Jiang, Dezhi Xu. Fault tolerant tracking control scheme for UAV using dynamic surface control technique. *Circuits Systems and Signal Processing*, 31(5): 1713-1729, 2012.
- [12] Sewook Park, Jonghee Bae, Youdan Kim, Sungwan Kim. Fault tolerant flight control system for the tilt-rotor UAV. *Journal of the Franklin Institute* 350: 2535-2559, 2013.
- [13] G. J. Liu, D. J. Wang, Y. C. Li, Active fault tolerant control with actuation reconfiguration. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 40(3), 1110-1117, 2004.
- [14] F. Bateman, H. Noura, M. Ouladsine. Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control Strategy for the Aerosonde UAV. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 47(3): 2119-2137, 2011.
- [15] Z. Q. Gao, P. J. Antsaklis. On the stability of the Pseudo-inverse method for reconfigurable control systems. *J. IEEE*, 9(9):333-337, 1989.
- [16] 张艳, 陈宗基, 魏晨. 一种基于广义逆的无人机鲁棒控制分配方法. *航空学报*, 29(S1): 198-203, 2008.
- [17] 赵亚斌, 高金源. 多模型方法在飞控系统故障重构控制中的应用. *飞行力学*, 22(3): 76-79, 2004.
- [18] H. Q. Wang, D. B. Wang, A. A. Mian, H. B. Duan, Robust multimode control design for an unmanned helicopter with multiloop flight structure. *Int. J. Innov. Comput., Inf. Control*, 6(2), 615-626, 2010.
- [19] Y. Y. Guo, B. Jiang. Multiple Model based adaptive reconfiguration control for actuator fault. *Acta Automatica Sinica*, 35(11): 1452-1458, 2009.
- [20] 李炜, 鲁保云, 乔平原. 一种基于多模型的主动容错控制方法. *甘肃科学学报*, 19(4): 92-96, 2007.
- [21] Y. M. Zhang, J. Jiang. Integrated design of reconfigurable fault-tolerant control systems. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 24, 133-136, 2001.
- [22] 周东华, 叶银忠著, 现代故障诊断与容错控制, 清华大学出版社, 2000.
- [23] 姜斌, 冒泽慧, 杨浩, 张友民. 控制系统的故障诊断与故障调节. 国防工业出版社, 2009.
- [24] H. Alwi, C. Edwards. Fault tolerant control using sliding modes with on-line control allocation. *Automatica*, 44(7): 1859-1866, 2008.
- [25] M. Benosman, K. Y. Lum. Passive actuators fault-tolerant control for affine nonlinear systems. *IEEE Transactions on Control System and Technology*, 18(1), 152-163, 2010.
- [26] 杨伟, 章卫国, 杨朝旭, 刘小雄. 容错飞行控制系统. 西北工业大学出版社, 2007.
- [27] 刘小雄, 章卫国, 武燕等. 基于直接自适应控制的重构飞控系统研究. *控制与决策*, 22(4): 440-444, 2007.
- [28] 金小峥. 一类执行器偏移/卡死故障下的自适应容错控制. *沈阳大学学报*, 26(1): 50-54, 2014.
- [29] 周川, 陈庆伟, 胡维礼等. 基于模型跟随的神经网络非线性重构控制. *系统工程与电子技术*, 22(8): 10-21, 2000.
- [30] 魏青. 基于RBF的无人机重构控制策略研究. 哈尔滨工程大学博士学位论文, 2008.
- [31] 张平, 陈宗基. 非线性飞控系统的控制可重构性. *飞机设计*. 3:12-15, 2001.
- [32] 王鹏, 周洲, 王睿. 基于分段线性的飞翼布局飞机控制分配方法. *西北工业大学学报*, 2009, 27(3): 321-325.

作者简介

姜斌 1966年10月出生, 南京航空航天大学无人自动化学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为复杂系统的故障诊断与容错控制技术及其应用研究。

钱默抒 1978年9月出生, 南京航空航天大学无人自动化学院副研究员, 研究方向为飞控系统容错控制技术及其应用研究。

无人作战飞行器协同制导控制研究综述

吴森堂¹, 吴钟博²

1.北京航空航天大学自动化学院, 北京 100191

2.中北大学武器装备技术学院, 太原 030051

摘要: 本文介绍了“网络中心战”框架下无人作战飞行器自主编队的发展需求, 论述了无人作战飞行器协同制导控制基本概念、原理和方法, 给出了协同制导控制系统的主要功能、基本结构及其评价等级, 并对无人作战飞行器协同制导控制理论与技术发展以及需要关注的核心问题给予了展望和评价。

关键词: 无人作战飞行器(UCAV), 自主编队(UAF), 协同制导控制(CGC), 协同制导控制等级(CGCL)

1 引言

自人类发明可控飞行器以来, 一直不懈地追求克服飞行器的留空飞行时间的局限, 进一步提高飞行器的综合应用效能, 空中相互加油的编队飞行技术应运而生。从早期有人驾驶飞机的完全人工加油的编队飞行(图1a), 到现代无人机的人在回路的半自主加油的编队飞行(图1b), 一直向着未来的完全自主自治的飞行器编队协同遂行任务(图1c), 正是飞行器编队协同制导控制理论与技术由人工阶段向自主协同阶段发展的典型例证^[1], 见图1所示。

1997年美军提出了“网络中心战”的概念, 并把它视为军事领域最重要的革命和新的全球军事战略的核心。“网络中心战”是指利用强大的计算机信息网络, 将分布的各种传感器和各类武器合成为一个统一高效的大系统, 实现战场态势和武器协同的互联互通互操作。在这种模式下, 作战单位可以实时地综合来自侦察卫星、预警机、无人作战飞行器(Unmanned Combat Air Vehicle, UCAV)、水面舰艇、通信情报和地面侦察部队获得的各种目标信息; 作战人员可以迅速、全面、可靠的洞察整个战场的局势, 互相协同, 指挥本平台或其它平台的武器, 以更快的指

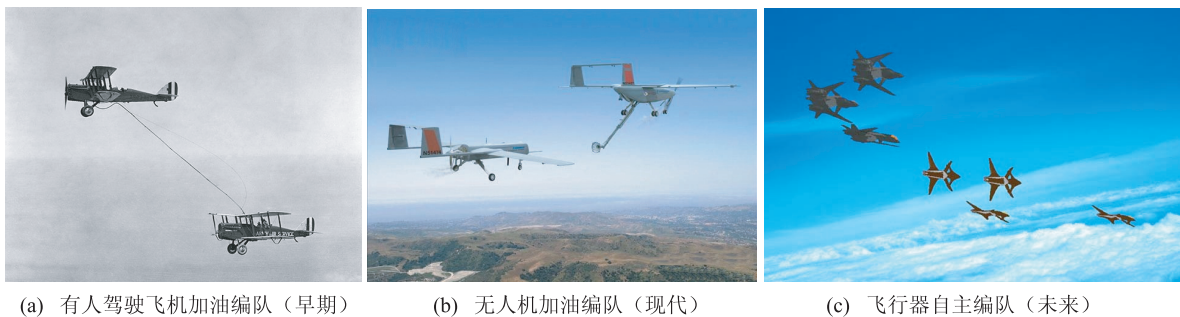


图1 飞行器编队协同制导控制发展路线

挥速度、更高的毁伤概率实施连续作战，以获得更大的综合作战效能。无人作战飞行器 (UCAV) 是网络中心战中至关重要的一环，承担着主要包括军事测绘、侦察探测、电子战、信息战、精确打击、战场评估以及与其它平台协同作战等任务^[1]。

由于现代陆海空天一体化防御技术迅速发展，尤其是高价值军事目标（如航母战斗群和战略指挥中心等）的区域防空、近程点防御力量组成了多层反导防御体系，使得制导武器的突防作战和攻击效果大大下降。为了突破敌方的多层反导防御体系，提升制导武器装备的综合作战效能，世界军事强国竞相研发具有综合智能制导控制能力的UCAV，并采用多类型配合、多批次和成规模的UCAV自主式的协同突防作战方式，旨在充分发挥低成本无人作战系统的规模优势，利用协同电子对抗、饱和打击等手段，形成新型的战术级的体系威慑能力和有效的体系对抗能力。无人作战飞行器协同制导控制（Cooperative Guidance & Control of UCAV, CGC-of-UCAV）是指根据作战任务要求，保证UCAV成员通过支撑网络组成具有态势感知和群体认知能力的编队，能依据综合作战效能最大原则，自主地实施编队决策与管理，并引导与控制编队完成作战任务的原理、方法和

技术。CGC-of-UCAV是实现不同类型的UCAV自主地组成编队，遂行多批次和成规模的有效协同作战任务的重要基础，是提升“网络中心战”框架下无人作战系统的电子对抗能力、突防能力、大范围分布目标的搜索能力和识别能力，降低作战消耗，提高效费比等综合作战效能的必由途径^[1-16]。

2 UCAV协同制导控制基本概念

2.1 自主性概念

在2000年美国空军研究实验室（AFRL）首次提出了自主作战（Autonomous Operations, AO）的理念，并定义了无人机的10个自主控制等级^[2,4-6]（Autonomous Control Level, ACL），在对现有的相关研究成果做了综合评估基础上，对最终实现网络中心战概念下的武器装备完全自主化发展方向给出了前瞻性的展望，见表1所示。

等级ACL1~ACL3追求的是成员个体的飞行控制能力，等级ACL4开始追求成员个体的作战能力，代表了成员个体的最高性能，但是前4级ACL1~ACL4只是侧重于成员个体的自主能力。等级ACL5~ACL10则注重追求群体的联合作战能

表1 AFRL定义的ACL的10个等级

ACL	英文	中文
1	Remotely Guided	遥控引导
2	Real Time Health/ Diagnosis	实时健康/故障诊断
3	Adapt to Failure and Flight Conditions	故障自修复与飞行环境自适应
4	Onboard Route Re-plan	在线航路重规划
5	Group Coordination	团队协调
6	Group Tactical Re-plan	团队战术重规划
7	Group Tactical Goals	团队战术目标
8	Distributed Control	分布式控制
9	Group Strategic Goals	团队战略目标
10	Fully Autonomous Swarm	完全自主群体

力，从群体协调到群体协同，从小规模机群的战术层面到大规模机群的战略层面，直至群体具备完全自主能力，其中等级ACL7~ACL10是美军未来的主要发展方向。在图2中给出了美军无人机系统发展路线图（2005-2030版）中对现有和未来项目所做的评级^[2]。美军现阶段绝大多数授予编号的无人机都具有ACL等级值，例如，美军的X-45从波音公司的部分试飞结果来看，已经达到了ACL6等级的水平^[3]。值得注意的是，到目前为止美国国防部前后发布了四版路线图^[2,4-6]，自2007-2032版开始，已将“无人机系统发展路线图”更名为“无人系统发展路线图”，囊括无人机、无人地面车辆和无人舰船等内容，进一步朝向自主作战（AO）的理念发展。虽然ACL并没有给出各级的明确解释，但给出了自主性的基本轮廓：所适应环境的变化程度从确定到不确定；人的介入程度从完全介入、半介入到完全不介入；所完成的任务难度从单一简单任务到复杂困难任务；完成任务的方式从独自行动到群体协同，从被动执行到主动决策^[7,8]。

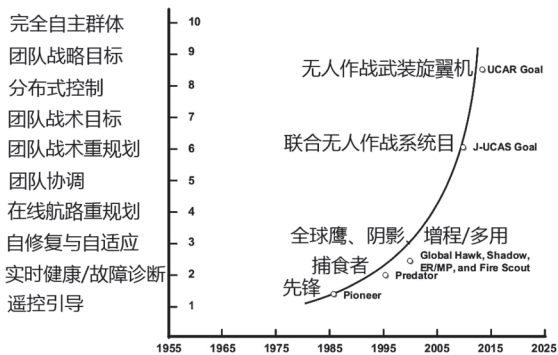


图2 美军无人机发展路线图中的自主控制等级

美国国家标准技术研究所（NIST）无人系统自主等级工作组（Autonomy Levels for Unmanned Systems, ALFUS）对自主性的定义是：“无人系统拥有观察、认知、分析、信息交流、规划、制定决策和行动的能力，并且完成操作员通过人机交互分配给它的目标。自主性可以根据任务的复杂性、环境的苛刻性和人机交互程度等因素划分

等级以便对应完成不同的任务。”

美国国家航空航天局（NASA）飞行器系统计划（Vehicle Systems Program, VSP）高空长航时部（Department of High Altitude Long Endurance, DHALE）针对高空长航时无人机的自身特点，也提出了更加明确的自主性定义。另外，印度国防部的学者根据美国空军研究实验室（AFRL）的定义把ACL等级分为11级，并对其中的每一级细分成几个亚级，并指出通信和信息在无人机的自主性的实现中起着关键作用^[8,9]。在国内北京航空航天大学IPCLab实验室较早地提出了无人飞行器自主编队协同制导控制的概念^[1,10-16]：是指根据作战任务要求，保证无人飞行器通过专用的信息支撑网络组成一定规模的编队，并使编队具有态势感知和群体认知能力，能依据综合作战效能最大原则，自主地实施编队决策与管理，并导引与控制编队完成作战任务的原理、方法和技术。中国科学院沈阳自动化研究所的机器人学国家重点实验室也对无人系统的自主性评价方法进行了相关研究^[17]。

2.2 协同性基本原则

群体的协同性行为在自然界中是一种较为普遍的生存形态，无论是处于生态链顶端的掠食者，还是处于生态链底端的被掠食者，群体的协同性行为往往成为一种获得生存进化最大收益的高效且稳定的途径。例如，狮群、蚁群、蜂群、雁群和鲸群等一类群居性动物都会采用一些等级严格、组织紧密、分工明确和战术灵活的协同性行动，以便在领地占据、食物捕获、威胁躲避和繁衍生息等方面获得更大的竞争优势。

按照美国国家标准技术研究所（NIST）、美国空军研究实验室（AFRL）和国内相关研究机构关于无人系统自主性及其控制等级的定义，由具有较高控制等级的无人系统组成的群体注重追求群体的联合作战能力，从群体协调到群体协同，从小规模群体的战术层面到大规模群体的战略层

面,直至群体具备完全自主自治能力的发展方向已成为了基本共识。换句话说,由UCAV协同所组成的编队也同样遵循群体协同性的三个基本原则^[1]:

1) 协同编队的必要性原则

由多架UCAV协同组成编队遂行任务,是会比单架UCAV单独遂行任务或者相互间无协同关系的多架UCAV遂行任务所获得的综合作战效能有显著提高,UCAV以协同编队方式遂行任务对于保证综合作战效能最大化是必要的。

2) 综合作战效能最大原则

综合作战效能是体现UCAV成员与协同编队的作战效能、协同编队的作战效能与成本费用之间的优化平衡关系,协同编队的目标是追求UCAV编队的综合作战效能最大化。

3) 编队的完整性惠顾原则

UCAV以协同编队方式遂行任务中,要充分兼顾UCAV成员的性能差异,在信息获取与共享、决策制定和协同行动时,应惠顾到编队中所有的UCAV成员,包容所有UCAV成员的编队完整性是协同编队的基本要求。

2.3 UCAV编队基本概念

UCAV协同编队是指由不少于两架以上UCAV根据作战任务需要,在时间间隔 $[t_0, t_f]$ 内按照一定协同规则遂行任务的编队,简称UCAV编队(UCAVs Formation, UF)。UCAV编队中的UCAV成员也称为节点,用 ε_i 表示。UCAV成员 ε_i 在惯性坐标系中的位置用 $q_i(t)$ 表示,向量 $q(t) = \text{col}\{q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t)\}$ 表示编队中所有UCAV成员组成的队形。 $i \in I = \{1, 2, \dots, n(t)\}$ 为编队中UCAV成员的编号, $n(t) \geq 2$ 为UCAV编队的规模。

成员间距 $d_{ij}(t)$ 是指在时刻 $t \in [t_0, t_f]$ 编队UCAV成员之间的距离 $d_{ij}(t) = \|q_j - q_i\|$, $i \neq j$, $i, j \in I = \{1, 2, \dots, n(t)\}$, 其数学期望 $\mu_{ij} = E\{d_{ij}$

$$(t)\} = E\{\|q_j - q_i\|\}。$$

UCAV自主编队(UCAVs Autonomous Formation, UAF)是指根据作战任务需要,在时间间隔 $[t_0, t_f]$ 内能够自主地遂行任务的UCAV编队。也就是说,UCAV自主编队是指那些具有自主能力的UCAV编队。

利用地形地貌掩护,在狭长的安全通道中以扁平的密集编队形式进行低空突防飞行,以高密度突袭的饱和攻击方式是UCAV编队的主要作战样式,这种扁平的密集编队使得成员之间、UCAV与障碍之间发生碰撞的概率增大,对于编队协同制导控制器性能提出了很高的要求。扁平的密集编队形式相当于整个编队在垂直方向几乎没有避碰机动的自由空间,是不能通过调整飞行高度的方法进行避碰机动,只能在水平方向实施避碰机动的。可见,二维水平面内高动态的密集编队的避碰问题是最为复杂的基础性问题。

解决密集编队的避碰问题主要涉及两个基本概念:疏密度和密集度。疏密度是由安全距离余量 $\Delta d_{ij}(t)$ 决定的UCAV编队成员间距 $d_{ij}(t)$ 的基本概念;密集度是描述UCAV成员周围可用于避碰机动的自由空间的基本概念,是由邻接度(adjacency) $n_{ai}(t)$ 来决定的。疏密度和密集度是UCAV自主编队协同制导控制系统设计的重要参数^[1,18-43]。

安全距离 $d_{si}(t)$ 是指,当UCAV成员 ε_i 与编队中其它成员 ε_i 或障碍威胁之间的间距 $d_{ij}(t)$ 小于它时(即 $d_{ij}(t) < d_{si}(t)$),成员 ε_i 必须采取相应的避碰措施;当 $d_{ij}(t) = d_{si}(t)$ 时,成员 ε_i 则处于采取避碰措施的准备状态。

安全距离 $d_{si}(t)$ 的主要影响因素有四个:①传感与控制误差分量 $d_{Ti}(t)$ 反映了成员 ε_i 的传感与制导控制系统的性能;②机动性能分量 $d_{Mi}(t)$ 反映了成员 ε_i 的机动性能;③网络诱导分量 $d_{Ni}(t)$ 反映了编队的支撑网络的性能;④任务环境分量 $d_{Ei}(t)$ 是

考虑到编队遂行任务的复杂度、飞行环境以及战术应用等因素对于编队飞行安全的影响。

安全距离余量 $\Delta d_{ij}(t)$ 是成员间距 $d_{ij}(t)$ 与其相应的安全距离 $d_{si}(t)$ 之差。即 $\Delta d_{ij}(t) = d_{ij}(t) - d_{si}(t)$ ，其数学期望 $\Delta \mu_{ij}(t) = \mu_{ij}(t) - d_{si}(t)$ 。

邻接度 $n_{ai}(t)$ 是指以节点 ε_i 为球心，由邻接距离 $d_{imax} = k_{imax} \cdot d_{si} > 0$ 为半径的几何空间球域内的邻居节点 ε_j 数量：即 $n_{ai} = \{j \in \varepsilon : \mu_{ij} < d_{imax}\}$ ， k_{imax} ，为节点 ε_i 的邻接系数（见图3所示）。

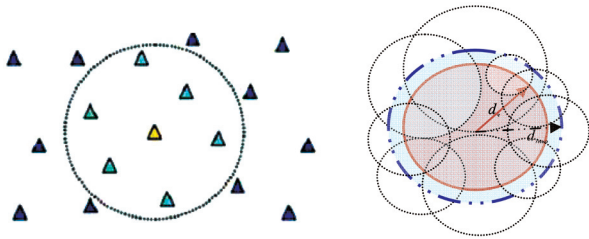


图3 邻接度 $n_{ai}(t)$ 与邻接距离示意图（二维情况）

随着UCAV编队所遂行任务的复杂性和要求进一步提高，UCAV编队的规模和密集程度也随之增大，UCAV成员间的避碰问题就成为高密度的编队飞行需要重点解决的基本问题，它直接关系到UCAV编队的自主性与协同性水平及其综合作战效能。UCAV成员间、邻近群和整个UCAV编队采取避碰机动的概率与疏密度、密集度之间有下列关系^[1]：

成员 ε_i 与 ε_j 之间需要采取避碰机动的概率 $p_m(i, j)$ 为：

$$p_m(i, j) = P\{\Delta d_{ij} \leq 0\} = \Phi(-\lambda_{eij})$$

式中， $\lambda_{eij} = \frac{\Delta \mu_{eij}}{\sigma_i}$ 是成员 ε_i 与 ε_j 之间的安全系数，反映了编队成员 ε_i 与 ε_j 之间的安全距离余量与其均方差间的关系； $\Phi(x)$ 为正态概率积分函数。

成员 ε_i 邻近群的避碰机动概率 $p_g(i)$ 为：

$$p_g(i) = \sum_{k=1}^{n_{ai}} \sum_{j=1}^{C_{n_{ai}}^k} [\Phi(-\lambda_{eij})]^k [1 - \Phi(-\lambda_{eij})]^{n_{ai}-k},$$

$$(n_{ai} \geq 2)$$

其中， n_{ai} 为成员 ε_i 的邻接度， $C_{n_{ai}}^k$ 为组合数。邻近群（Proximity Groups） $G(q) = (\varepsilon, v(q))$ 是由 ε 与节点集合 $v(q) = \{(i, j) \in \varepsilon \times \varepsilon : \mu_{ij} < d_{imax}, i \neq j\}$ 定义的。

规模为 n 的整个编队采取避碰机动的概率 P_f 为：

$$P_f = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^{C_n^k} [p_g(i)]^k [q_g(i)]^{n-k}$$

式中， $q_g(i) = 1 - p_g(i)$ 为成员 ε_i 无需采取避碰机动的概率。可见，在安全系数 λ_{eij} 给定情况下，整个编队采取避碰机动的概率 P_f 是随着邻接度 n_{ai} 与编队规模 n 的增大而增大的。

σ -邻近队形是指邻近群中所有成员间距以概率1等于安全距离 d_{si} ，即：

$$P\{d_{ij} = d_{si}\} = 1, \quad \forall j \in n_{ai}(q)$$

α -邻近队形是当 $d_{si} = d$ 的 σ -邻近队形。

σ -邻近队形和 α -邻近队形要求编队队形具有零误差的控制精度，这对于协同制导控制系统的性能要求极高。为了便于实际工程应用，给出更为普遍的准理想的编队空间结构-准 σ -邻近队形。

准 σ -邻近队形是指成员的安全距离余量 Δd_{ij} 落入区间 $[-\sigma_{si}, \sigma_{si}]$ 的概率接近于1，即：

$$P\{-\sigma_{si} \leq \Delta d_{ij} \leq \sigma_{si}\} = 1 - \zeta, \quad \forall (i, j) \in v(q)$$

其中， $\sigma_{si} = \rho d_{si}$ ， $0 \leq \rho, \zeta \ll 1$ 。

α -邻近队形节点 ε_i 的邻接度 $n_{ai} = \frac{2\pi d_{imax}}{d_{sj}} =$

$[2\pi\sqrt{m}]$ ， $\forall j \in n_{ai}(q)$ ； σ -邻近队形和准 σ -邻近

队形的邻接度范围为 $\frac{2\pi d_{imax}}{d_{smax}} \leq n_{ai} \leq \frac{2\pi d_{imax}}{d_{smin}}$ ，

$\forall j \in n_{ai}(q)$ 。其中， m 为空间的维数， $[\cdot]$ 为取整数

运算， d_{smax} 和 d_{smin} 分别为邻近群的最大安全距离和最小安全距离。

评价UCAV编队品质的势能值 $P_E(q)$ 函数,是衡量一个队形 q 与期望队形之间差别的偏离函数^[1]。

当期望队形为 σ -邻近队形时的势能值 $P_E(q)$ 函数为:

$$P_E(q) = \frac{1}{|v(q)|+1} \sum_{i=1}^n \sum_{j \in n_{ai}} \psi(d_{ij} - d_{si}),$$

$$\forall (i, j) \in v(q)$$

这里, $\psi(z) = [E\{z\}]^2$ 是非平滑的势能函数。

准 σ -邻近队形与 σ -邻近队形之间的势能值 $P_E(q)$ 函数满足下式:

$$P_E(q) = \frac{1}{|v(q)|+1} \sum_{i=1}^n \sum_{j \in n_{ai}} \psi(d_{ij} - d_{si}) \leq \sigma_{max}^2$$

其中, $\sigma_{max}^2 = \max_i \sigma_i^2$ 。

由此可见, 准 σ -邻近队形的每个UCAV成员 ε_i 的均方差 $\sigma_i(t)$, $t \in [t_0, t_f]$ 决定了其编队与期望的 σ -邻近队形的差距, 而此差距的最大值正是编队中的最大方差 σ_{max}^2 。安全系数 λ_{eij} 与邻接度 n_{ai} 的取值范围决定着UCAV编队队形的疏密度和密集度, 而成员 ε_i 的制导控制精度则直接影响着编队的势能值的大小, 也就是编队的品质高低。

由前所述, 避碰机动概率是对编队的动态稳定特性有着关键的影响作用, 下面就从避碰机动概率与编队的动态稳定特性出发, 利用安全系数 λ_{eij} 和邻接度 n_{ai} 对编队队形进行分类。这里所讨论的队形类型是指在一定时间内UCAV编队所保持的协同飞行队形的类别。按照编队的疏密度、密集度和势能值概念, 可将UCAV自主编队队形分为三种类型: 疏松队形、紧密队形和密集队形^[1]。

疏松队形 (Looseness Formation) 是指编队中所有成员的安全系数不小于3的队形, 即 $\lambda_{eij} \geq 3$, 其势能值 $P_E(q) \geq 10\gamma \cdot \sigma_{min}^2$ 。以疏松队形编队飞行时成员之间发生碰撞的机会较小, 编队的疏密度和密集度均处于较低的状态, 而其势能值 $P_E(q)$ 较大, 此情况下对于UCAV编队的协同制导控制器的

性能要求不高。

紧密队形 (Tight Formation) 是指编队中所有成员的安全系数介于1和3之间的队形, 即 $1 \leq \lambda_{eij} < 3$, 其势能值 $P_E(q) \geq 2\gamma \cdot \sigma_{min}^2$ 。当UCAV编队采用紧密队形编队飞行时, 从编队的疏密度来看, 与疏松队形不同的是, 其安全系数 λ_{eij} 较小, 使得成员间距 d_{ij} 更进一步地接近于其安全距离 d_{si} 。当采用紧密队形编队飞行时, 编队成员需要采取避碰机动的概率较大, 成员之间存在发生碰撞的机率较高; 而从编队的密集度来看, 紧密队形的UCAV成员 ε_i 的邻接度 n_{ai} 处于中等水平, 这些成员向周围规避机动所需要的自由空间是存在的, 这些自由空间对于成员向周围规避机动是适中的。与疏松队形相比, 这时对UCAV编队的协同制导控制器的性能要求较高。

密集队形 (Dense Formation) 是指编队中所有成员的安全系数介于零与1之间的队形, 即 $0 \leq \lambda_{eij} < 1$, 其势能值 $P_E(q) \geq \gamma \cdot \sigma_{min}^2$ 。特别地, 当 $\lambda_{eij} = 0$ 时, 相当于所有成员 ε_i 服从以安全距离 d_{si} 为数学期望的正态分布的准 σ -邻近队形。从编队的疏密度来看, 当安全系数 $\lambda_{eij} = 0$ 情况下, 编队的成员间距 d_{ij} 以很大的概率接近于其安全距离 d_{si} , 使得成员需要采取避碰机动的概率比紧密队形进一步增大。同时, 密集队形的成员 ε_i 的邻接度 n_{ai} 处于很高水平, 即编队具有很高的密集度, 致使成员几乎没有向周围规避机动所需要的自由空间, 成员之间存在发生碰撞的机率很高。因此, 与紧密队形相比, 密集队形飞行对UCAV编队的协同制导控制器的性能要求更高。其中,

$$\gamma = \frac{|v(q)|}{|v(q)|+1}。$$

可见, 疏松队形的最小势能值是紧密队形的最小势能值的5倍, 是密集队形的最小势能值的10倍; 紧密队形的最小势能值是密集队形的最小势

能值的2倍。势能值 $P_E(q)$ 可用来评价UCAV编队协同制导控制器的性能^[1]。

3 UCAV协同制导控制系统结构

从UCAV自主性和协同性的分级及其理解可以看出，UCAV自主编队能力应在自主性和协同性的级别上处于较高的位置，体现自主性和协同性的重点已经不是成员个体的自动化，而是与其它成员个体的配合和协同能力，其中NASA更是把合作和协同飞行定在了最高级别。要达到合作任务、协同飞行、集群自主自治等高级自主化程度，成员个体必须首先具备对群体的认知能力，即能评估群体的特点，评估自己在群体中的地位，评估自己的个体行为对群体的影响，只有具备这种群体意识才能实现高级别的自主性，实现能权衡群体和成员个体利益的自主性，实现能约束自我的自主性，这种自主性在一定程度上符合智能生物的自主性规律。基于自主性理念的启发，尝试在成员个体利益、局部利益和群体利益这三个层面对编队的协同飞行进行探索和研究，寻找一个使编队具备群体意识的方法来分析 and 解决避碰问题，同时丰富编队飞行的高级别的自主性的研究方法和内容，围绕密集编队中UCAV成员间避碰这个基本问题，展开对群体自主性的探索研究。

UCAV自主编队协同制导控制系统是涉及无线自组织网络与UCAV制导控制等多领域多学科交叉的新的综合集成系统，底层基于无线通信网络技术的编队支撑网络进行信息的互联、互通甚至是互操作，通过上层自主地完成编队决策与管理，使编队具备群体意识能力，实现任务规划与目标分配、协同航路规划与协同导引，保证编队协同完成复杂的作战任务。换句话说，UCAV自主编队协同制导控制系统是基于编队支撑网络，通过态势感知、群体认知、智能决策、任务规划和制导控制，完成突防毁伤以及战损评估等任务的。从系统应具备的功能和能力来看，UCAV自主编队协同制导控制系统应具有七大功能：态势感知、群体认知、智能决策、任务规划、制导控制、遂行任务和战损评估等，其功能结构如图4所示^[1]。

UCAV自主编队协同制导控制系统如果侧重于编队队形的拓扑与网络通信，那么整个系统可以看作是一个移动无线自组织网络系统（Mobile Ad Hoc Network, MANET）；如果侧重于节点上的传感器与网络通信，那么整个系统可以看作是一个无线传感器网络（Wireless Sensor Network, WSN）；如果侧重于控制性能与网络通信，那么整个系统可以看作是一个网络控制系统；如果侧重于网络化自主编队整体的综合作战效能，那么

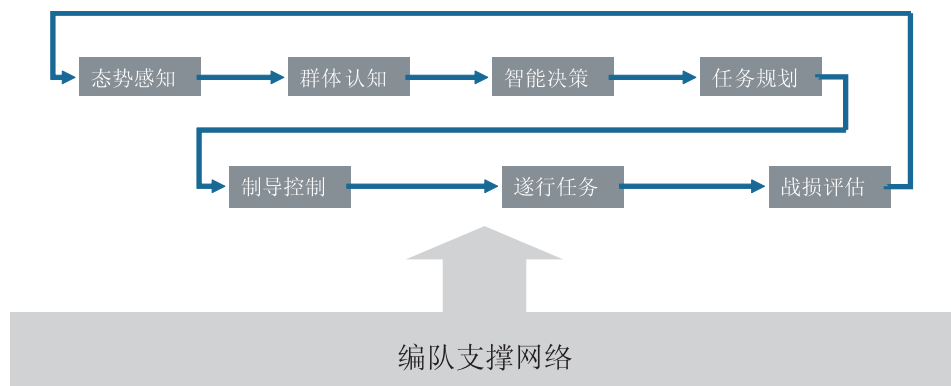


图4 UCAV自主编队协同制导控制系统的功能结构示意图

这样的系统就是UCAV自主编队系统。UCAV自主编队系统强调编队的整体意识，注重编队的整体行为和整体行为中的突出问题。UCAV自主编队协同制导控制是无线自组织网络与UCAV制导控制等多个领域的交叉融合，目前国内外在该领域的相关研究工作还处于起步与加速发展阶段。

UCAV自主编队协同制导控制体系结构包括编队支撑网络系统（Support Networks System, SNS）、信息获取系统（Information Acquisition System, IAS）、编队决策与管理（Decision and Management System, DMS）、编队飞行控制系统（Flight Control System of UAF, FCSU）和成员飞行控制系统（Member Flight Control System, MFCS）五部分（见图5所示）^[1]。

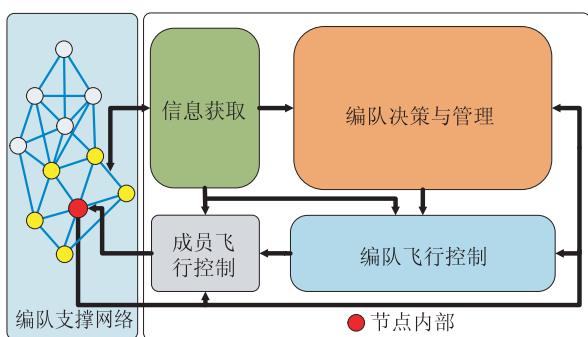


图5 协同制导控制系统的体系结构示意图

1) 编队支撑网络，是一种除了具备UCAV编队的信息传输与共享的通信网络作用外，更重要的还要通过某种协议使成员能够认知其在编队中的地位及其与周围其它成员的关系，能为成员在编队中的协同行动提供编队的群体代价信息的自组织网络系统。

编队支撑网络保证使UCAV编队中的成员能够仅依赖当前短时间内从局部获得的信息或过去获得的信息，对其自身将来的行为对整个UCAV编队造成的影响做出准确的评估，是支撑网络不同于普通通信网络的特点之一，也是支撑UCAV编队具备自主自治群体智能的一种网络化体现。

2) 信息获取系统，是包括成员的局部节点信息、编队的网络特征信息以及任务环境信息的信息获取系统；

3) 编队决策与管理系统，遵循UCAV编队的基本原则，负责个体代价与群体代价的权衡以及综合作战效能指标的形成，通过任务规划/目标分配、协同航路规划/协同制导、编队冲突的调解、节点的离入队管理等职能，优化生成编队队形和队形导引指令，保证按要求完成既定任务所需要遵循的自组织协同规则和规律的编队中枢系统；

4) 编队飞行控制系统，根据编队的队形导引指令及其编队的队形要求，实时优化并形成队形控制与保持的指令，保证实现节点的避碰机动控制和高品质编队队形的系统；

5) 成员飞行控制系统，也就是每个成员的飞行姿态和轨迹的制导控制系统。

UCAV自主编队协同制导控制（CGC）能够根据作战任务要求，保证成员通过支撑网络组成具有态势感知和群体认知能力的编队，依据综合作战效能最大原则，自主地实施编队决策与管理，并导引与控制编队遂行任务。也就是说，协同制导控制（CGC）能兼顾成员特性、发挥UCAV编队自主性和协同性优势，实现UCAV编队的综合作战效能最大化的目标。UCAV自主编队协同制导控制的等级（CGCL）与编队的协同程度（协同性）、编队类型之间的关系，见表2所示^[1]。

由表2可见，等级CGCL1~CGCL2的UCAV编队只适合采用疏密度和密集度低的较小规模的疏松编队，只有等级CGCL3以上的UCAV编队才适合采用疏密度和密集度高的较大规模的紧密编队或者密集编队；具有态势感知、群体特征认知和智能决策能力是等级CGCL3以上UCAV自主编队的重要特征。因此，等级CGCL3对于UCAV编队的自主性与协同性程度具有标志性的意义，等级CGCL3以上的UCAV编队是未来发展的主要方向。

表2 CGCL与编队的协同性、编队类型之间的关系

CGCL	编队类型	编队功能	自主性	协同性	通信特征	智能特点
1	疏松	人在回路	半自动	协同的响应时间和精度取决于操作员（慢、差），编队的规模小、疏密度低、密集度低	指控链路	操作员主导
2		预编程序	全自动		成员间链路	个体特征认知
3	疏松（紧密）	部分的战场态势感知与决策	半自主	协同的响应时间和精度（快、好），编队的规模中、疏密度中、密集度中	支撑网络	具备部分的群体特征认知和决策能力
4	紧密密集	全面的战场态势感知与决策	完全自主	协同的响应时间和精度（快、好），编队的规模大、疏密度高、密集度高	战术链路+支撑网络	具备完全的群体特征认知和决策能力
5	密集庞大	全面的战区态势感知与决策	自主自治	协同的响应时间和精度（快、好），编队的规模庞大、疏密度高、密集度高	信息栅格+战术链路+支撑网络	体系协同和自主自治能力

4 现状与展望

鉴于UCAV自主编队协同攻击的作战方式，在复杂的强电子对抗条件下对高防御能力和高军事价值目标，尤其对航母战斗群与大范围分布的大型重要军事设施等，具有突出的战术对抗与战术威慑能力。近年来，世界军事强国对于UCAV编队协同制导控制技术的研究给予了高度重视与投入，已有多个型号不同程度地采用了编队协同制导控制技术。

美国波音公司的X-45和诺斯洛普·格鲁门公司的X-47B具备了初等级（CGCL）的编队协同制导控制技术的基本特征，通过战术数据链与编队联网的武器平台共享，根据战场态势变化重新编程实施协同攻击，是美军“协同作战能力”（CEC）系统的主要组成部分。欧洲的“Neuron”和英国BAE系统公司的“Raven”也在UCAV编队协同制导控制技术方面开展了系列测试研究工作。

近年来，国内在UCAV自主编队协同制导控制理论与技术方面也取得了显著进步，已初步形成协同制导控制理论框架、系统设计方法和技术规范标准，完成了等级CGCL3以上的中等规模自主编队硬件在环（HIL）仿真测试，实现了邻接规模的编队等效试飞验证的阶段性目标^[44-48]。

随着无人作战飞行器协同制导控制理论与技术快速发展，一些需要引起高度关注和需要谨慎妥善处理的问题也会变得越来越突出。首先，信息链路和支撑网络的安全问题，是与协同制导控制发展方向和无人作战飞行器自主编队技术兴衰攸关的核心问题；其次，编队决策与管理机制及其系统的权限问题，关系到无人作战飞行器自主编队装备的可控使用和安全运用。相信这些重要问题和迫切需求会催生协同制导控制的新理论和新技术，也会加快无人作战飞行器自主编队装备向着更高CGCL等级的发展进程。

参考文献

- [1] 吴森堂. 导弹自主编队协同制导控制技术, 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [2] Unmanned aircraft systems (UAS) roadmap, 2005-2030[R]. Washington, D. C., USA: Office of the Secretary of Defense, 2005.
- [3] 高劲松, 王朝阳, 陈哨东. 对美国无人机自主控制等级的研究[J]. 航空科学技术, 2010, (2): 40-43.
- [4] Unmanned aircraft systems (UAS) roadmap, 2000-2025[R]. Washington, D. C., USA: Office of the Secretary of Defense, 2001.
- [5] Unmanned aircraft systems (UAS) roadmap, 2002-2027[R]. Washington, D. C., USA: Office of the Secretary of Defense, 2002.
- [6] Unmanned systems (UAS) roadmap, 2007-2032[R]. Washington, D. C., USA: Office of the Secretary of Defense, 2007.
- [7] Huang H. Ed., Terminology for Specifying the Autonomy Levels for Unmanned Systems, Version 1.0[S]. NIST Special Publication 1011, Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, 2004.
- [8] Huang H. M., Albus J., Messinan E., et al. Specifying autonomy levels for unmanned systems: Interim report[A]. Proceedings of the 2004 SPIE Defense and Security Symposium Conference[C], 2004, 386-397.
- [9] Suresh M., Ghose D. Role of information and communication in redefining unmanned aerial vehicle autonomous control levels[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2010, 224:171-197.
- [10] Liu Xing, Wu Sentang, Mu Xiaomin. Autonomous Formation and Cooperative Guidance of Multi-UAV: Concept, Design and Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(19): 5075-5085.
- [11] 刘星, 吴森堂. 多无人机自主编队协同制导技术的概念、设计和仿真[J]. 系统仿真学报, 2008(20).
- [12] 刘星. 多弹编队自组织网络控制系统研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2010.
- [13] 穆晓敏. 多弹自主编队控制与协同航路规划方法研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2010.
- [14] 孙健. 飞行器编队协同制导与控制研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2013.
- [15] 杜阳. 飞行器自主编队网络化系统分析与设计[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2013.
- [16] 吴森堂. 结构随机跳变系统理论及其应用, 科学出版社, 2007.
- [17] 王超越, 刘金国. 无人系统的自主性评价方法[J]. 科学通报, 2012, 57(15): 1290-1299.
- [18] 吴森堂. 飞航导弹制导控制系统随机鲁棒分析与设计, 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [19] 吴森堂. 飞行控制系统, 北京航空航天大学出版社, 2013.
- [20] John T., Emlen Jr. Flocking Behavior in Birds [J]. The Auk, 1952, 69(2): 160-170.
- [21] P. Ward. Formation-flying of birds as advertisement behavior [J]. Animal Behaviour, 1978, 26(4): 1273.
- [22] Pitcher T. J., Partridge B. L.. Fish school density and volume [J]. Marine Biology, 1979, 54: 383-394.
- [23] Reynolds C.W. Flocks, herds, and schools: A distributed behavioral model[J]. Computer Graphics 1987, 21(4): 25-34.
- [24] Warburton K., Lazarus J.. Tendency-distance models of social cohesion in animal groups [J]. J. Theor. Biol., 1991, 150: 473-88.
- [25] Irene Giardina. Collective behavior in animal groups: Theoretical models and empirical studies[J]. HFSP Journal, 2008, 2(4): 205-219.
- [26] Jadbabaie A., Lin J., Morse A.S. Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2003, 48(6): 988-1001.
- [27] Saber O., Murray R. Distributed cooperative control of multiple vehicle formations using structural potential functions [A]. In: Proc of the 15th IFAC World Congress[C]. Barcelona, 2002.
- [28] Fax J.A., Murray R.M. Information flow and cooperative control of vehicle formations [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(9): 1465-1476.
- [29] Saber O., Murray R. Graph rigidity and distributed formation stabilization of multi-vehicle systems [A]. In: 41st Conference on Decision and Control[C]. Las Vegas, 2002, 3: 2965-2971.
- [30] Alexander F.J., Richard M.M. Graph laplacians and stabilization of vehicle formations[A]. In: Proc of 15th IFAC Conf[C]. Barcelona, 2002, 3: 227-241.
- [31] Olfati-Saber R., Murray R. M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays[J]. Automatic Control, IEEE Transactions on. 2004. 49(9): 1520-1533.
- [32] Olfati-Saber R. Flocking for Multi-Agent Dynamic Systems: Algorithm and Theory [J]. IEEE Transaction on automatic control, 2006, 3(51): 401-420.

- [33] Saber O. Flocking for Multi-Agent Dynamic Systems: Algorithm and Theory [J]. IEEE Transaction on automatic control,2006,3(51):401-420.
- [34] Yohnnes K., Gary B. Formation stability with limited information exchange between vehicles[A].In:Proc of the American Control Conf[C].Penve,2003,1:290-295.
- [35] Ogren P., Fiorelli E., Leonard N.E. Formations with a mission: Stable coordination of vehicle group maneuvers [A].In:Proc of the 15th Int Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems[C]. Notre Dame, 2002.
- [36] Baras John.S., Tan X.B., Hovareshti Pedram. Decentralized control of autonomous vehicles[A].In:Proc of the 42nd IEEE Conf on Decision and Control[C].Hawaii,2003: 1532-1537
- [37] 吴森堂, 孙健.一种不确定环境下的无人飞行器编队协同搜索和动态任务分配方法[P].中国专利:201210356428.0,2012-09-24.
- [38] 孙健,吴森堂.基于改进粒子群算法的巡航导弹航路规划[J].北京航空航天大学学报, 2011, vol(37):1228-1232.
- [39] Sun J., Bao Y.M., Wu S.T. Cooperative route plan of initial stage for multiple missiles formation [C]. 2011 Chinese Control and Decision Conference.Guilin.2487-2491.
- [40] 彭琛,吴森堂.反舰导弹中/末制导交班点目标捕捉方法研究[J].飞行力学.2008((02)): 37-40.
- [41] 胡楠希.飞航导弹编队协同末制导技术研究[D].北京:北京航空航天大学, 2013.
- [42] 穆晓敏.多弹自主编队控制与协同航路规划方法研究[D].北京:北京航空航天大学, 2009.
- [43] 彭琛.多弹自主编队协同制导方法研究[D].北京:北京航空航天大学, 2009.
- [44] Ji Xiangyu, Wu Sentang, Liu Xing, etc. Research and Design on Physical Multi-UAV System for Verification of Autonomous Formation and Cooperative Guidance[A]. International Conference on Electrical and Control Engineering[C],2010, 1: 1570-1576.
- [45] 冀湘予.无人机组队飞行控制验证系统设计与仿真[D].北京:北京航空航天大学, 2010.
- [46] 穆晓敏, 吴森堂.飞航导弹高动态自主编队协同控制系统的建立与仿真[J].飞行力学, 2010, 28(4): 59-63.
- [47] 吴森堂, 孙健.一种多无人机的动态编队控制方法[P].中国专利:201210088140.X,2012-03-12.
- [48] 吴森堂,孙健.一种存在网络随机延迟的微型无人飞行器控制方法[P].中国专利:201210337812.6,2012-09-12.

作者简介

吴森堂 男,北京航空航天大学教授,博士生导师。海军装备部导弹预研专家组成员,国防科工局国防基础科研信息与控制专家组成员,国防科研某重大项目总师。代表性著作《飞行控制系统》、《飞航导弹制导控制系统随机鲁棒分析与设计》、《导弹自主编队协同制导控制技术》和《结构随机跳变系统理论及其应用》等,发表学术论文近百篇。先后完成武器装备预研、国防基础科研重点项目和重大项目十余项,承担多个型号导弹的制导控制关键技术预研任务。获得包括苏联科学研究成果推广证书、部级和国家科学技术进步奖三项以及国家发明专利三十余项。

吴钟博 男,中北大学武器装备技术学院,研究方向为探测制导与控制。

国际自动控制联合会宪章与附则

1984年7月2日全体大会通过，于匈牙利布达佩斯

1994年经全体大会修订

2000年经全体大会修订

2008年经全体大会修订

宪 章（Constitution）

第一章 总则（General Provisions）

第一条

- (a) 本组织名称是“国际自动控制联合会”，简称IFAC。
- (b) 本联合会不从事任何以盈利或以政治为目的的活动，具有学会的合法形式，符合瑞士民法典第60节和后续节（只要与现有宪章不相抵触）。
- (c) IFAC的所在地由全体大会决定。

第二条

- (a) 本联合会的目的是在最广泛的意义上发展诸如工程、物理、生物、社会或经济等所有系统的控制科学和技术的理论和应用。同时，IFAC也关注控制技术对社会的重大影响。
- (b) 本联合会的基本宗旨是服务于所有与自动控制和系统工程理论和应用有关的部门，也无论在哪里。为实现这一目标，本联合会与其它国际或国家组织特别是其它非政府的专业社团保持着工作上的联系。
- (c) IFAC为从事自动控制和系统工程的人们，无论其种族、信仰、肤色或地域，提供了相互合作的框架，同时促进了在本专业领域内理念和专家的自由交流。
- (d) 本联合会不介入任何政治活动，也不对任何此类问题表明立场。
- (e) 本联合会不参与任何明显以获取经济收益为目的的商业活动。

第三条

为促进自动控制和系统工程科学技术进步，IFAC与其它国际组织和国家进行合作。借助于：

- (1) 组织和主办学术会议，如世界大会、会议、专题研讨会和研讨班。
- (2) 学术刊物。
- (3) 符合本宪章的任何方法。

第四条

经全体大会批准，IFAC可以加入其它国际组织，这些组织的广泛目标或部分目标涵盖了IFAC的目标。

第二章 会员（Members）

第五条

每一个国家一个会员国组织，各国凡是对自动控制有浓厚兴趣和专业背景坚实的科学或工程专业组织，或由两个或两个以上这类组织所组成的社团都符合IFAC会员资格条件。在加入IFAC后，这些团体将被认为是会员国组织（NMOs），并有责任在各自所在国内推进IFAC的宗旨和目标。

第六条

- (a) IFAC入会申请应向IFAC秘书提出。
- (b) 理事会确认申请符合第五条要求后将该入会申请提交给全体大会，并将按投票表决的简单多数批准入会。
- (c) 入会具有承认和遵守本宪章和附则的义务，并交纳一定的会费，其数额届时由全体大会决定。

第七条

- (a) 如果会员国组织的活动一贯违背本宪章的条款或精神，经全体大会表决可终止其NMO会员资格。
- (b) 如果会员拖延两年不交会费，经全体大会表决可终止其会员资格；但这种终止并不免除会员该交纳所拖延会费的义务。
- (c) 未拖延交纳会费的会员国组织可要求终止其会员资格，为此需要在7月1日前向IFAC主席或秘书递交声明，以便在当年年底生效。

第三章 全体大会（General Assembly）

第八条

全体大会是本联合会的最高机构，由来自所有会员国组织的代表团组成。

第九条

- (a) 全体大会可以召开定期或临时会议。
- (b) 全体大会定期会议在每三年一次的IFAC世界大会时召开。
- (c) 全体大会临时会议由理事会决定可在其它任何时间召开。此外，经十个或十个以上会员国组织的要求，理事会有责召开此会议。

第十条

召开全体大会会议至少应有半数会员组织的代表团出席，以达到处理具体事宜所需法定人数。

第十一条

(a) 全体大会会议时，每个NMO只拥有一票。

(b) 全体大会会议通常由每个会员国组织的主席代表该NMO投票。如主席不能参加，NMO可由代理人代表；该NMO必须在会议的计划日期前将代理人的姓名书面通知IFAC秘书。

(c) 倘若IFAC秘书在会议计划日期前得到NMO的书面授权通知，每个NMO可授权另一个会员国组织在全体大会会议上代行投票。

第十二条

除非对本宪章进行修订，全体大会的任何决定至少需要得到半数赞成票的支持。在相同票数的情况下，由会议主席所投一票决定。

第十三条

本联合会主席或，当主席缺席时，候任主席或副主席之一或，若他们都不在时，由主席授权或当主席不在时由理事会授权的其他一名理事主持全体大会会议。

第十四条

(a) 如果需要在全体大会休会期间做出决定，理事会可安排通信投票。

(b) 只有至少半数会员国组织参加投票时，通信投票方才有效。

(c) 除非对本宪章进行修订，通信投票所做出的决定至少需要半数赞成票。在相同票数的情况下，由IFAC主席所投一票决定。

(d) 该决定可认为是由全体大会所作的决定。

第四章 语言 (Languages)

第十五条

(a) 用作学术会议上研讨，IFAC的五种语言是英语、法语、德语、俄语和西班牙语。

(b) IFAC的工作语言是英语。用于书面报告和作记录以及在全体大会和联合会所有工作机构（理事会、局、委员会）的任何会议上口头商讨问题。IFAC的任何书面文件使用英语行文。

第五章 官员 (Officers)

第十六条

(a) 选举出的IFAC官员是：

- 主席

- 候任主席
 - 两名副主席
 - 上一任主席
 - IFAC司库
- (b) 委任的IFAC官员是:
- IFAC秘书
 - 奖励委员会主席
 - 政策委员会主席
 - 出版委员会主席

第十七条

(a) 除去上一任主席外，列入第十六条(a)款的所有官员由理事会提名后，经全体大会选举产生。该选举至少需半数赞成票。

(b) 只有经选举或任命担任过至少两届下列一个或多个职务，才能被选为IFAC主席或候任主席：

- 理事
- 技术局成员
- 技术委员会主席
- 执行局成员
- 执行委员会成员

通常，候任主席以此资格任职一届后将被选任为下届主席。

(c) 选任官员应在他们被选上的那届全体大会结束时上任；如果在全体大会的两次会议之间进行通信投票，根据IFAC秘书宣布的投票结果，视具体情况而定。他们将留任直到全体大会的下次定期会议结束。

(d) IFAC主席和候任主席不可以再次参选同样的职位。副主席有资格再次参选谋求第二任，也不一定是紧接前一任。IFAC司库有资格被再次推选多达三届另加任期，并不必是连续任职。

第十八条

(a) 如果IFAC主席辞职或不能供职，候任主席或，如他/她不在时，由理事会选定的一位副主席或，如这些人不能供职时，由理事会选定的一位理事作为代理主席在理事会决定的期间内暂时履行主席职责。

(b) 代理主席供职时拥有与主席完全一样的权利、特权、责任和限制。

(c) 被这样委任的任何人都不应受到第十七条(d)款的限制而不能参选成为候任主席或以后成为主席。

第十九条

在法律上，IFAC主席代表了本联合会。

第二十条

(a) 理事会委任IFAC秘书。

(b) IFAC秘书的义务、职责和特权在附则中作了规定。

(c) 当有空缺时，IFAC秘书可在任何时间由理事会委任。新上任的秘

书通常任职到下一届三年一次的世界大会结束。可以再次被委任，每次为一届三年任期。至于任职届数，不受限制。

第二十一条

(a) 理事会任命奖励委员会主席、政策委员会主席和出版委员会主席。
(b) 通常，奖励委员会主席、政策委员会主席和出版委员会主席的任期从每三年一次的世界大会结束时开始到下一次世界大会结束时止。他们可再次被委任另一个三年任期也无需是连任。无论何原因如果其中有人不能供职，IFAC主席可随时任命继任人在剩余任期任职。

第二十二条

(a) 任何选任的IFAC官员从其IFAC职位上退休时或退休以后可由IFAC主席委任为IFAC顾问；该任职可以是终身的。
(b) 在职官员可向IFAC顾问咨询有关本联合会的任何事宜；如IFAC主席认为合适，可委以顾问特别使命。

第六章 理事会 (The Council)

第二十三条

(a) 本联合会的管理由理事会负责。
(b) 理事会对全体大会负有管理联合会的责任，接受全体大会的指令并至少在每三年一次的世界大会上向全体大会报告本联合会的状况。
(c) 在全体大会的指导下，理事会对涉及到世界上的控制工程师社团、会员国组织、政府间或其它非政府国际专业组织的问题制定本会政策，提出本会长期计划以备全体大会批准，对IFAC的各个局和委员会给予指导。
(d) 理事会应指导和监督本联合会的工作，其中包括既是技术性又是行政性的活动。赋予各局和委员会相应的具体职能，并不时听取这些局和委员会的工作报告。

第二十四条

(a) 理事会由IFAC的选任官员（第十六条(a)款）和若干名被选任的一般会员所组成。
(b) 一般会员人数既不少于会员国组织总数的六分之一也不多于四分之一，在此限额内被选任的一般会员人数由理事会酌情决定。
(c) 理事会应具有尽可能广泛的代表性，尤其是每个一般会员理事应来自IFAC不同的会员国组织；然而，理事会成员应以个人身份供职而不是作为各自会员国组织的代表。
(d) 理事应是自愿供职，无报酬。
(e) IFAC的委任官员（第十六条(b)款）应参加理事会会议和参与审议，但没有表决权。

第二十五条

(a) 理事由全体大会选举产生；该选举需投票数的简单多数。

(b) 理事会候选人只有在取得他/她本人所在国的会员国组织同意后方能被提名。

第二十六条

(a) 一般会员理事从他们被选上的那次全体大会会议结束时到任；如果是在两次全体大会会议之间进行通信投票，根据IFAC秘书宣布的投票结果，视具体情况而定。

(b) 在全体大会每三年一次的定期会议上所有的一般会员理事应退休。其中不多于半数的人有资格再次参选成为一般会员理事，任职到全体大会的下次定期会议结束。

(c) 一般会员理事任职既不超过连续两届，总共也不能多于三届。

第二十七条

(a) 除IFAC主席或候任主席外，任何理事因辞职、亡故或其它原因而不能履行职责时，理事会可委任其他人来做他/她的工作直到下次选举为止。

(b) 从第二十六条所阐述的后续选举来看，这一阶段工作不作为任职一届来考虑。

第二十八条

(a) 本联合会主席或，当主席缺席时，候任主席或副主席之一或，若他们都不在时，由主席授权或当主席不在时由理事会授权的其他一名理事主持理事会。

(b) 理事会议的法定人数应不少于全体理事的半数，而且必须包括不少于一般会员理事的半数。

(c) 所有有关选举的条款在附则中有说明。

第七章 局和委员会 (Boards and Committees)

第二十九条

(a) 理事会的工作由两个局即技术局与执行局和若干委员会协助。理事会把那些根据简单多数通过的决议而决定的事情授权给它们去执行。

(b) 局和委员会的所有成员都应以个人身份供职而不是任何NMO的代表。

(c) 局和委员会的官员和成员为IFAC的所有服务都应是自愿和无报酬的。

第三十条

(a) 技术局包括主席（为IFAC副主席之一）、一名或多名副主席和若干名一般会员。一般会员人数由理事会决定但不超过技术委员会人数的三分之一。

(b) 技术局副局长和成员由理事会委任。

(c) 技术委员会主席和副主席由技术局任命。

(d) 技术局的副主席和成员以及技术委员会的主席通常被任命从一届三年一次的世界大会结束时工作到下一届世界大会结束。他们都可以再次被委任原职务，但只能多加一届。如果任何人因任何原因不能工作，继任人可随时由IFAC主席委任（是技术局副局长和成员情况下）或由技术局主席委任（是技术委员会主席情况下）在他/她的剩余任期内任职。

第三十一条

(a) 技术局的主要职责是遵从事务会制定的政策，对技术委员会向它推荐的除每三年一次世界大会之外的其它学术集会，诸如学术研讨会、会议、专题研讨班给予考虑；如认为合适，做好组织和安排。

(b) 此外，技术局就所有学术问题向理事会提出建议，对有关学术会议，出版刊物以及每三年一次世界大会的学术内容进行推荐。

(c) 根据目的和要求随时总结IFAC的学术活动，并每年向理事会报告。

(d) 需要在技术局会议上投票表决的所有事宜按投票的简单多数决定。主席不投票，除非在得票数相同的情况下，他/她投决定的一票。

第三十二条

(a) 执行局包括主席（为另一名IFAC副主席）、上一任IFAC主席、IFAC司库和IFAC秘书，还有各执行委员会主席，即：奖励委员会主席、政策委员会主席、出版委员会主席及担任行政和财务委员会主席的IFAC候任主席。当理事会再设立任何新的执行委员会时，其主席同样可由理事会委任进入执行局。

(b) 任何执行委员会的副主席可作为主席的代表参加执行局会议。

第三十三条

(a) 除主席、当然成员和由理事会挑选到该委员会任职的理事外，执行委员会其它成员由执行局任命。其任期从一届三年一次世界大会结束到下次世界大会结束。

(b) 奖励委员会由主席和各个奖励评选委员会的主席为成员所组成。

(c) 政策委员会除主席外设有副主席和不少于三名也不多于六名一般成员。

(d) 出版委员会包括主席、副主席、出版管理局主席、IFAC PapersOnLine的主编、IFAC官方期刊的主编、通讯简报的编辑、电子媒体的编辑和多至四名一般会员。

(e) 行政和财务委员会包括作为主席的IFAC候任主席、理事会从其一般会员理事中任命的副主席、IFAC司库、IFAC秘书、当然成员和两名一般会员。

第三十四条

(a) 执行局应协调和监督IFAC的行政活动，尤其是属执行委员会权限内进行的活动。此外，协调本联合会的外部关系。还要考虑对IFAC会员资格的所有申请并向理事会做出推荐。

(b) 奖励委员会掌控和管理所有与奖励有关的活动并每年向理事会做工作报告。

(c) 政策委员会根据理事会要求或主动就以下方面向理事会提出建议并每年向理事会报告：联合会总体政策和长期规划，有关IFAC与其它国际组织以及IFAC与其NMOs之间关系，关系到本联合会内办事和组织学术会议的程序和准则等。

(d) 出版委员会按照理事会制定的方针掌控和管理IFAC的所有出版物，在理事会所通过的严格的预算限额内有权使用出版费用。每年向理事会提交工作报告。

(e) 行政和财务委员会负责指导秘书处的工作以及按理事会通过的年度预算控制IFAC经费的使用。应每年向理事会报告，在理事会考虑批准之前报送收入和支出账目和决算表。每年还应向理事会报下一年度财务预算提案。

(f) 通常，上一任IFAC主席应负责IFAC的外部事务，代表本联合会与其它无论是政府或非政府的国际组织保持工作关系。与这些组织在一起时，他/她就代表本联合会，除非IFAC主席亲自在场。

第三十五条

(a) 技术局按照理事会确定的方针成立那些确实认为必需和迫切要求的技术委员会。技术委员会任期的延续和结束同样由技术局决定。

(b) 技术局将建立协调委员会，由作为主席的一名技术局成员和两名或多名技术委员会主席组成。每个协调委员会在其技术委员会间进行协调和照管，定期举行会议和每年向技术局报告。

(c) 在技术局的指导下技术委员会组织联合会的学术活动，为全世界范围的学者在其具体的自动控制领域进行合作提供框架。

(d) 技术委员会应采取积极的步骤促进工业界和商业界参与联合会的活动，倡导控制理论研究人员与从事于应用的人员之间的合作。

(e) 技术委员会应计划和监督在由技术局所指定的专门领域内的学术会议、专题研讨会和研讨班，对这些活动的学术内容和水平负有责任。

第三十六条

(a) 每个技术委员会的成员由技术委员会主席挑选并得到副主席们的同意。每个NMO可向任一技术委员会推荐成员。

(b) 技术委员会成员被委任起初供职到下届三年一次世界大会结束。往后，可被各自的委员会主席再次委任供职另一个三年的任期，并且还需要通知有关的NMO。尽管对于这样的任期届数没有限制，但希望技术委员会的成员资格有一定的轮流。

(c) 任何委员会的主席在副主席的同意下可邀请其他专家提供临时、自愿、无报酬的服务。

第八章 资金 (Finance)

第三十七条

IFAC的收入来源是会员费、版权使用费和无条件的捐赠。

第三十八条

(a) 会员国组织需在每年1月2日前交纳年度会费。每年7月1日后加入IFAC的新会员国组织当年只需交纳年费的一半。

(b) 会员费数额由全体大会决定。

第三十九条

IFAC从销售其期刊和世界大会、各种会议、专题研讨会与研讨班的出版物以及其它学术刊物收取版权使用费。

第四十条

IFAC的收入应按理事会的指示用于行政和其它开支。理事会就这些收入的使用对全体大会负有责任。

第四十一条

(a) IFAC主办的学术会议通常在具有IFAC会员资格的会员国组织所在国举行，主办的NMO对会议的组织 and 进行负有资金和行政上的责任。

(b) 作为例外，理事会可以批准IFAC会议在一个非IFAC会员的国家里举行，只要那个国家的全国性团体对会议的举办在资金上和行政上承担责任。

第四十二条

IFAC不负责解决成员国组织代表或IFAC官员参加会议的费用。

第九章 后记条款 (Final Provisions)

第四十三条

(a) 将对本宪章提出的修正案提交全体大会投票表决前，必须获得至少三分之一IFAC会员国组织的支持，或五名当选理事的支持。

(b) 通过本宪章的修正案需要有全体IFAC会员的三分之二的多数赞成。

(c) 对本宪章的修正案可用通信投票的方式进行表决。

第四十四条

(a) 全体大会通过的附则应符合本宪章的总则，并确信它们是实现IFAC的宗旨和对各个局和委员会的目标和活动进行管理所必需的。

(b) 根据全体大会投票表决的简单多数制定和修改附则。在至少半数成员国组织参加表决的条件下，可以是直接投票也可以是通信投票。在得票数相同的情况下，IFAC主席一票决定。

第四十五条

本宪章和附则的阐述用英语文本，它是唯一的官方文本。

第四十六条

(a) 解散IFAC的程序与对本宪章提出修订的程序相同（第四十三条）。

(b) 如果解散IFAC的情况发生，理事会应决定资金和财产的处理方式，使一个或更多具有与IFAC的宗旨尽可能类似的非营利组织受益。

附则（By-Laws）

总则（General Provisions）

No.1

本附则根据宪章第四十四条起草。

No.2

IFAC所在地为瑞士苏黎世。

全体大会（General Assembly）

No.3

- (a) 全体大会的会议日期和议程表应由理事会考虑了会员国组织的建议后确定。
- (b) IFAC秘书至少在确定的会期前六个月将全体大会的会议通知连同暂定的议程表发送给会员国组织。
- (c) 对议程表的意见应在不少于会期前四个月返回到IFAC秘书。
- (d) 最后定下的议程表应在不少于会期前两个月送给会员国组织。

No.4

只有经全体大会半数以上到会的会员国组织预先同意，未列入全体大会会议议程表的事宜才可考虑。

No.5

- (a) 根据本宪章第九条(c)款，会员国组织提出召开全体大会临时会议的所有请求应连同他们对事项的陈述或希望讨论的问题提交给IFAC秘书。
- (b) 全体大会临时会议的日期应确定，以便在IFAC秘书收到请求后一年内召开。

理事会（Council）

No.6

- (a) 理事会既可在会上也可用通信方式做出决定。
- (b) 只要可能，理事会按一致意见做出决定。如必须投票，根据表决票数的多数做出决定。
- (c) 理事可委托另一名理事作为他/她的代理人出席理事会议。会前，应将他/她的代理人通知书报送IFAC主席。
- (d) 只要不是闭门会议，IFAC官员可以客人的身份参加任何理事会议；这样的客人通常不参与会议的评议，除非受到会议主席的邀请。

No.7

理事会应向全体大会提交：

- (1) 按照附则No.8准备好的下一届三年任期的理事会候选人提名名单。
- (2) 前三年理事会的工作报告。
- (3) 司库报告和IFAC账目报表。
- (4) 新会员国组织的人会提议。
- (5) 修改IFAC宪章或附则的提议。
- (6) 下次全体大会会议时间和地点的提议。

No. 8

在全体大会会议期间进行理事会的选举时，根据本宪章第二十五条，程序如下：

- (1) 参加选举的候选人预备名单由选举委员会准备。选举委员会包括三个来自不同国家的成员，由IFAC主席委任并挑选出选举委员会主席。
- (2) 该候选人预备名单经理事会批准后，由IFAC秘书在确定的选举日期之前至少四个月发送给所有会员国组织，邀请他们可在一个月內另行提名，并且征询有关的NMOs对按照本宪章第二十五条必须经他们同意的那些被提名人的意见。
- (3) 至少在选举日之前两个月将候选人的最终名单（包括会员国组织的提名）送给所有会员国组织。
- (4) 选举委员会监督投票过程和计票。
- (5) 选举委员会主席向全体大会报告投票结果。

No. 9

在用通信投票进行理事会选举的情况下，根据本宪章第十四条和第二十五条，程序如下：

- (1) 理事会向会员国组织提交其提名名单，邀请进一步的提名不迟于确定的选举日前四个月。
- (2) 最终候选人提名名单（包括由会员国组织提出的任何提名）在不迟于选举日前两个月发送给NMOs。
- (3) 只有在确定的选举日前收到的书面投票才有效。
- (4) IFAC秘书负责通信投票及报告结果。

No. 10

(a) 根据本宪章第二十条(a)款、第二十一条和第三十条(b)款，选举委员会也要准备直接属于理事会权限内那些职位的候选人提名名单。他们是：IFAC秘书、奖励委员会主席、政策委员会主席、出版委员会主席、技术局副局长和成员。

(b) 在准备候选人提名名单之前，选举委员会应征求有关委员会或局对列于(a)款中除IFAC秘书以外每个职位的推荐意见，最好要有可替换的人选。

- (c) 列于(a)款中任一职位的候选人只有经他/她自己国家的会员国组织的同意方可被提名。
- (d) 候选人提名名单由将满届的理事会在其卸任前临时性地批准。
- (e) 他们由继任的理事会上任后任命。

No. 11

按照本宪章第三十条(c)款，由将卸任的技术局推荐，新一届技术局上任后任命技术委员会主席和副主席。为便于进行这种推荐，低于No.10(a)款所列职位候选人提名名单的提出也适用于将卸任的技术局。

No. 12

根据本宪章第三十三条(a)款，除了执行委员会主席、当然成员和被挑选到这些委员会任职的理事外，执行委员会经将卸任的执行局推荐，由新一届执行局上任后任命。为便于进行这种推荐，低于No.10(a)款所列职位候选人提名名单的提出也适用于将卸任的执行局。

No. 13

在行政和财务委员会的协助下，IFAC司库经理事会批准，按执行局的指导管理联合会的资金。特别是，他/她将：

- (1) 收取会员费和其它收入；
- (2) 支付联合会的费用；
- (3) 管理IFAC资金；
- (4) 做出年度财务报告；
- (5) 做出年度预算。

No. 14

根据本宪章第二十条，IFAC秘书

- (1) 担当全体大会和理事会秘书；
- (2) 负责履行全体大会或理事会批准的决议，并将按照这些决议处理所有事宜。万一有些地方需要澄清，他/她应听取和遵从IFAC主席的意见。
- (3) 在考虑了IFAC主席和其他理事的建议后，制定每次理事会议的议程表，并在开会日期前至少两个月张贴。
- (4) 处理IFAC日常事务，管理秘书办公室，处理信件，保管联合会的记录。
- (5) 参加技术局会议，根据会议的决定监管所有的IFAC会议、专题研讨会和研讨班。发布这些会议的信息。

No. 15

以任何方式关系到IFAC的所有文件必需经两名理事会的成员签署，其中一名是IFAC主席，如涉及财务问题，另一名必须是司库。

资金 (Finance)**No. 16**

财务年按历年。

No. 17

捐赠、遗产和授予款经理事会授权方可接受。

No. 18

- (a) 会员费划分为五类。每个会员国组织可任选一类并按此交费。
- (b) 每类会员资格的会费率由全体大会按理事会的建议确定。
- (c) 如果希望改变下一年度会员资格类别，每个会员国组织应在每年十月一日前与IFAC司库联系。

(原文附后)

1



International Federation of Automatic Control

IFAC

Constitution

and By-Laws

INTERNATIONAL FEDERATION OF AUTOMATIC CONTROL

CONSTITUTION AND BY-LAWS

adopted by the General Assembly in Budapest, Hungary, July 2, 1984

amended by the General Assembly in 1994

amended by the General Assembly in 2000

amended by the General Assembly in 2008

CONSTITUTION

SECTION 1 - GENERAL PROVISIONS

Article 1

(a) The organization is to be called 'International Federation of Automatic Control' - abbreviated IFAC.

(b) The Federation, which does not engage in any activity with financial or political aims, adopts the legal form of an association in accordance with paragraph 60 and further of the Code Civil Suisse, as long as it is not contradictory to the present Constitution.

(c) The seat of IFAC shall be determined by the General Assembly.

Article 2

(a) The purpose of the Federation is to promote the Science and Technology of Control in the broadest sense in all systems whether, for example, engineering, physical, biological, social or economic, in both theory and application. IFAC is also concerned with the impact of control technology on society.

(b) The primary object of the Federation is to serve all those concerned with the theory and application of automatic control and systems engineering, wherever situated. To further this aim, it maintains working relationships with other organizations, national or international, especially with other non-governmental professional federations.

(c) IFAC is to provide a framework for collaboration between those working in automatic control and systems engineering, irrespective of race, creed or colour or of geographic location and to promote the free exchange of ideas and experts within its professional field.

(d) The Federation is not to become involved in any kind of political activity nor to take a stand on any such issue.

(e) IFAC will not take part in any commercial activity with the explicit aim of acquiring financial gain.

Article 3

IFAC is to promote the science and technology of automatic control and systems engineering, in cooperation with national and other international organizations, by

(1) Organizing and sponsoring technical meetings such as congresses, conferences, symposia and workshops.

(2) Technical publications.

(3) Any other means consistent with this Constitution.

Article 4

With the approval of the General Assembly, IFAC may join international organizations whose wider aims, or part of them, implicitly include those of IFAC.

SECTION 2 - MEMBERS

Article 5

For each country, one scientific or professional engineering organization, having a strong interest in automatic control and a sound professional background, or one council formed by two or more such organizations, shall be eligible for membership of IFAC. Such organizations, after admission to IFAC, will be known as National Member Organizations (NMOs) and shall have a responsibility for furthering the aims and objectives of IFAC within their respective countries.

Article 6

(a) Each application for membership of IFAC shall be addressed to the IFAC Secretary.

(b) The Council, having ascertained that the application corresponds to the requirements of Article 5, will submit the application for membership to the General Assembly which will authorize the admission on a simple majority of votes cast.

(c) Admission includes the obligation to recognize and adhere to this Constitution and By-Laws and to pay the appropriate dues as may from time to time be determined by the General Assembly.

Article 7

(a) The membership of an NMO may be terminated by a vote of the General Assembly if the activity of that NMO is consistently violating the letter or the spirit of the present Constitution.

(b) Membership may be terminated by a vote of the General Assembly if a member is two years in arrears in payment of its membership fee but such termination shall not relieve a member of the obligation to pay such membership fees which are in arrears.

(c) A National Member Organization not being in arrears in payment of its membership fee may terminate its membership by delivering a declaration to that effect to the President or to the Secretary prior to July 1st in order to become effective at the end of the current year.

SECTION 3 - GENERAL ASSEMBLY

Article 8

The General Assembly is the supreme body of the Federation and shall comprise delegations from all the National Member Organizations.

Article 9

- (a) The General Assembly may be convened either as a regular or an extraordinary meeting.
- (b) A regular meeting of the General Assembly takes place at each triennial international congress convened by IFAC.
- (c) An extraordinary meeting of the General Assembly may take place at any other time decided upon by the Council. The Council is furthermore obliged to convene such a meeting upon request of ten or more National Member Organizations.

Article 10

At a meeting of the General Assembly, delegations shall be present from at least half of the member organizations to constitute a quorum for the transaction of business.

Article 11

- (a) At a meeting of the General Assembly, each NMO shall have one and only one vote.
- (b) Each National Member Organization shall normally be represented at meetings of the General Assembly by its President who will cast the vote on the NMO's behalf. If the President is unable to attend, the NMO may be represented by a proxy whose name must be communicated by the NMO, in writing, to the IFAC Secretary prior to the scheduled date of the meeting.
- (c) Each NMO may authorize another National Member Organization to vote in its place at a meeting of the General Assembly, provided the IFAC Secretary has been notified by the authorizing NMO, in writing, prior to the scheduled date of the meeting.

Article 12

Except for amendments to the Constitution, any decision of the General Assembly will require the support of at least half of the votes cast. In the case of a tie, the Chair of the meeting will have a casting vote.

Article 13

The President of the Federation or, in his/her absence, the President-Elect or one of the Vice-Presidents or, if none of these be present, another member of the Council authorized by the President or failing him/her by the Council, shall preside at any meeting of the General Assembly.

Article 14

- (a) If any decision is required between meetings of the General Assembly, the Council may order a postal ballot.

- (b) A postal ballot will only be valid if at least half of the National Member Organizations have voted.
- (c) Except for amendments to the Constitution, any decision reached by postal ballot will require at least half of the votes cast. In the case of a tie, the President of IFAC will have a casting vote.
- (d) Such a decision will be considered as having been reached by the General Assembly.

SECTION 4 - LANGUAGES

Article 15

- (a) For the purpose of discussions at technical meetings, the five languages of IFAC shall be English, French, German, Russian and Spanish.
- (b) The working language of IFAC shall be English. This will be used for written reports and records as well as for verbal discussions at any meeting of the General Assembly and of all working bodies (Council, Boards, Committees) of the Federation. Any written document of IFAC shall be produced in English.

SECTION 5 - OFFICERS

Article 16

- (a) The elected officers of IFAC shall be
- The President
 - The President-Elect
 - Two Vice-Presidents
 - The Immediate Past President
 - The IFAC Treasurer
- (b) The appointed officers of IFAC shall be
- The IFAC Secretary
 - The Chair of the Awards Committee
 - The Chair of the Policy Committee
 - The Chair of the Publications Committee

Article 17

- (a) With the exception of the Immediate Past-President, all the officers listed in Article 16(a) shall be elected by the General Assembly after nomination by the Council. Such elections will require at least half of the votes cast.

(b) Only those who have been elected or appointed for at least a total of two terms in one or several of the following offices

- Council member
- Technical Board member
- Technical Committee chair
- Executive Board member
- Executive Committee member

may be elected to the offices of President and President Elect. Normally the President Elect, after serving in this capacity for one term, will be elected to the office of President for the next term.

(c) The elected officers shall take office at the conclusion of the General Assembly at which they are elected or, if a postal ballot be held between sessions of the General Assembly, on the announcement of the result of that ballot by the IFAC Secretary, as the case may be. They remain in office until the conclusion of the next regular meeting of the General Assembly.

(d) The President and President-Elect shall not be eligible for re-election to the same office. Vice-Presidents will be eligible for re-election for a second term of office not necessarily immediately following their first term of office. The IFAC Treasurer shall be eligible for re-election for up to but not more than three additional terms of office not necessarily consecutive.

Article 18

(a) If the President resigns or cannot serve, the President-Elect or, failing him/her, one of the Vice-Presidents selected by the Council or, if none of these can serve, a member of the Council selected by the Council will temporarily serve in his/her place as Acting President for such period as may be decided by the Council.

(b) The person serving as Acting President is to have exactly the same rights, privileges, responsibilities, and disabilities as the President would have.

(c) Anyone so appointed shall not be barred under Article 17(d) from election as President-Elect or President at a later date.

Article 19

The President shall legally represent the Federation.

Article 20

(a) The Council shall appoint an IFAC Secretary.

(b) The duties, responsibilities and privileges of the IFAC Secretary are defined in the By-Laws.

(c) The IFAC Secretary may be appointed at any time by the Council as and when a vacancy occurs. A new holder of such office will normally be appointed to the conclusion of the next

following Triennial International Congress. He/she may then be reappointed, for one three year term each time, with no limit as to the number of such terms.

Article 21

(a) The Council shall appoint the Chair of the Awards Committee, the Chair of the Policy Committee and the Chair of the Publications Committee.

(b) The Chair of the Awards Committee, the Chair of the Policy Committee and the Chair of the Publications Committee will normally serve from the conclusion of a Triennial Congress to the conclusion of the next. They may be reappointed for one additional three year term not necessarily consecutive. Should any of them be prevented from serving for any reason, a successor may at any time be appointed by the President to serve for the remainder of the term of office.

Article 22

(a) Upon retirement from his/her IFAC office or any time thereafter, any elected IFAC officer may be appointed by the President an Advisor of IFAC. Such an appointment may be for life.

(b) IFAC Advisors may be consulted by the active officers on any matter related to the Federation or given special assignments as the President deems appropriate.

SECTION 6 - THE COUNCIL

Article 23

(a) The management of the Federation shall be vested in a Council.

(b) The Council shall be responsible for the management of the Federation to the General Assembly from which it receives its mandate and to which it shall report on the state of the Federation, not less frequently than at each Triennial Congress.

(c) Subject only to the directions of the General Assembly, the Council will formulate the policies of the Federation, in relation to the world community of control engineers, the National Member Organizations, intergovernmental and other non-governmental international professional organizations. It shall develop the long-term plans of the Federation for approval by the General Assembly and shall instruct the various boards and committees of IFAC accordingly.

(d) The Council shall direct and supervise the functioning of the Federation, including both the technical and the executive activities. It will delegate particular functions to the appropriate boards and committees and will from time to time receive activity reports from those boards and committees.

Article 24

(a) The Council shall consist of the elected officers of IFAC (Art. 16a) and a number of elected Ordinary Members.

(b) The number of Ordinary Members shall be not less than one sixth nor more than one quarter of the total number of member organizations. Within these limits the number of ordinary Members to be elected shall be decided from time to time by the Council.

(c) The Council shall be as widely representative as possible and in particular each Ordinary Member shall be from a different National Member Organization of IFAC. However, members of the Council shall serve in a personal capacity and not as representatives of their member organization.

(d) Members of the Council shall serve voluntarily and be unpaid.

(e) The appointed officers of IFAC (Art. 16b) shall attend the meetings of the Council and participate in its deliberations but have no right to vote.

Article 25

(a) The members of the Council are elected by the General Assembly. Such an election shall require a simple majority of the votes cast.

(b) A candidate for election to the Council may only be nominated with the approval of the member organization of his/her own country.

Article 26

(a) Ordinary Members of the Council shall take office at the conclusion of the session of the General Assembly at which they are elected or, if a postal ballot be held between sessions of the General Assembly, on the announcement of the result of that ballot by the IFAC Secretary as the case may be.

(b) At each triennial regular session of the General Assembly, all the Ordinary Members of the Council shall retire and not more than half of them shall be eligible for re-election as Ordinary Members to serve until the conclusion of the next regular session of the General Assembly.

(c) No Ordinary Member shall serve for more than two consecutive terms nor for more than three terms in all in that capacity.

Article 27

(a) Should any member of the Council other than the President or President-Elect, due to resignation, death or other cause, be prevented from fulfilling his/her duties, the Council may appoint someone to serve in his/her place until the next election.

(b) Such a period of office shall not be considered as a term in office from the point of view of subsequent elections, as described in Article 26.

Article 28

- (a) The President of the Federation or, in his/her absence, the President-Elect or one of the Vice-Presidents or, if none of these be present, another member of the Council authorized by the President or failing him/her by the Council, shall preside at any meeting of the Council.
- (b) A quorum for a meeting of the Council shall be not less than half of the members of the Council and must include not less than half of the Ordinary Members of the Council.
- (c) All provisions concerning voting are set forth in the By-Laws.

SECTION 7 - BOARDS AND COMMITTEES**Article 29**

- (a) The Council shall be assisted in its work by two Boards, namely the Technical Board and the Executive Board, and a number of Committees to which it may delegate such powers as it may from time to time decide by resolutions of the Council passed by a simple majority.
- (b) All members of Boards and Committees shall serve in a personal capacity and not as representatives of any NMO.
- (c) All services to IFAC by the office bearers and members of Boards and Committees shall be voluntary and unpaid.

Article 30

- (a) The Technical Board shall comprise a Chair who shall be one of the Vice-Presidents, one or more Vice-Chairs and a number of Ordinary Members. The number of Ordinary Members is determined by the Council and shall not exceed one third of the number of Technical Committees.
- (b) The Vice-Chairs and members of the Technical Board shall be appointed by the Council.
- (c) The Technical Board appoints Chairs and Vice-Chairs to the Technical Committees.
- (d) Vice-Chairs and members of the Technical Board and Chairs of Technical Committees will normally be appointed to serve from the conclusion of one Triennial International Congress to the conclusion of the next. Any of them may be reappointed to the same office for one additional term of office but not more. Should any of them be prevented from serving for any reason, a successor may at any time be appointed by the President (in the case of a Vice-Chair or member of the Technical Board) or by the Chair of the Technical Board (in case of a Technical Committee Chair) to serve for the remainder of his/her term of office.

Article 31

(a) The main duty of the Technical Board will be subject only to the policy agreed by the Council and will be to consider such symposia, conferences, workshops and other technical meetings, other than the Triennial Congresses, as may be recommended to it by the Technical Committees and if it sees fit, arrange for their regulation and organization.

(b) In addition the Technical Board will advise the Council on all technical matters and make such recommendations in relation to technical meetings, publications, and the technical contents of the Triennial Congress.

(c) It shall from time to time review the technical activities of IFAC in the light of its aims and objectives and shall report to the Council each year.

(d) All matters requiring a vote in meetings of the Technical Board shall be decided on a simple majority of the votes cast. The Chair will not vote except in the case of a tie when he/she will have a casting vote.

Article 32

(a) The Executive Board shall comprise a Chair, who shall be the other Vice-President, the Immediate Past-President, the IFAC Treasurer and the IFAC Secretary, together with the Chairs of the Executive Committees, namely the Chair of the Awards Committee, the Chair of the Policy Committee, the Chair of the Publications Committee and the President-Elect who is Chair of the Administrative and Finance Committee. If and when the Council sets up any additional Executive Committees, the Chairs of them may also be appointed by the Council to the Executive Board.

(b) A Vice-Chair of any of the Executive Committees may attend any meeting of the Board, as an alternate to his/her Chair.

Article 33

(a) The Executive Committees shall be appointed by the Executive Board, with the exception of their Chairs, ex-officio members and any Council member selected by the Council to serve on such Committees. Their term of office is from the conclusion of one Triennial Congress to the conclusion of the next.

(b) The Awards Committee shall comprise a Chair and the Chairs of the Selection Committees of the various awards as members.

(c) Besides the Chair, the Policy Committee shall have a Vice-Chair and not less than three nor more than six ordinary members.

(d) The Publications Committee shall comprise the Chair, a Vice-Chair, the Chair of the Publications Managing Board, the Editor-in-Chief of IFAC PapersOnLine, the Editors-in-Chief of the official IFAC Journals, the Editor of the Newsletter, the Electronic Media Editor(s) and up to four Ordinary Members.

(e) The Administrative and Finance Committee shall comprise the President-Elect as Chair, a Vice-Chair appointed by the Council from its Ordinary Members, the IFAC Treasurer and the IFAC Secretary ex-officio and two Ordinary Members.

Article 34

(a) The Executive Board shall coordinate and supervise the executive activities of IFAC, in particular those activities in the competence of and carried on by the Executive Committees. Furthermore, it shall coordinate the external relations of the Federation. It shall also consider all applications for IFAC membership and make recommendations to the Council.

(b) The Awards Committee shall regulate and control all award-related activities. It shall report to the Council on its work each year.

(c) The Policy Committee shall advise the Council, at the Council's request or on its own initiative, on the general policy and long-range planning of the Federation, on matters concerning the relations between IFAC and other international organizations and between IFAC and its NMOs as well as on procedural matters and guidelines related to the conduct of business within the Federation and to the organization of technical meetings. It shall make a report to the Council each year.

(d) The Publications Committee shall regulate and control all IFAC publications in accordance with guidelines laid down by the Council and will authorize expenditure on publications within strict budgetary limits approved by the Council. It will submit a report on its work to the Council each year.

(e) The Administrative and Finance Committee shall be responsible for directing the work of the Secretariat and shall control the use of IFAC funds in accordance with the budgets approved annually by the Council. It shall report to the Council annually and shall submit for approval the balance sheet and account of income and expenditure prior to their consideration by the Council. It shall also submit to the Council annually a proposed budget for the ensuing financial year.

(f) The Immediate Past President shall normally take care of the external affairs of IFAC. He/she shall maintain working relationships with other international organizations, whether governmental or non-governmental, on behalf of the Federation and, except when the President of IFAC attending personally, he/she will represent the Federation with these organizations.

Article 35

(a) Such Technical Committees as are deemed necessary and desirable are formed by the Technical Board within guidelines set by the Council. The continuation and termination of the Technical Committees is also decided by the Technical Board.

(b) The Technical Board will establish Coordinating Committees, each of which will consist of one Technical Board member as Chair and two or more Technical Committee chairs. Each Coordinating Committee will provide oversight and coordination among its Technical Committees and will meet periodically, and report annually to the Technical Board.

(c) Subject to the general direction of the Technical Board, the Technical Committees shall organize the technical activities of the Federation. They shall provide a framework for the cooperation of the workers on a worldwide basis in their particular field of automatic control.

(d) The Technical Committees shall take active steps to promote the participation of industry and commerce in the activities of the Federation and to foster collaboration between those working on theoretical aspects of control and those engaged in its application.

(e) The Technical Committees shall plan and supervise the conferences, symposia and workshops in the particular fields assigned to them by the Technical Board and shall be responsible for the technical content and level of such meetings.

Article 36

(a) The members of each Technical Committee shall be selected by the Committee Chair with the concurrence of the Vice-Chairs. Each NMO may recommend members to each Technical Committee

(b) Members of Technical Committees shall be appointed in the first instance to serve until the conclusion of the next Triennial Congress. Thereafter they may be reappointed by the respective Committee Chair, who shall also notify the concerned NMOs, to serve for another three year term each time. While there is no limitation as to the number of such terms, it is desirable to have some rotation in the membership of Technical Committees.

(c) The Chair of any Committee, with the concurrence of the Vice-Chairs may invite other experts to offer temporary, voluntary, unpaid services.

SECTION 8 - FINANCE

Article 37

Membership fees, royalties and unconditional donations shall constitute the sources of revenue for IFAC.

Article 38

(a) Member organizations shall be required to pay an annual membership fee which will become due on January 2nd in each year. New member organizations joining IFAC after July 1st in any year shall be required to pay only half the annual fee for that year.

(b) The membership rates shall be as determined by the General Assembly.

Article 39

IFAC may collect royalties from the sales of its journals, of the publications arising from its congresses, conferences, symposia, and workshops and of other technical publications.

Article 40

The revenue of IFAC shall be used for administrative and other expenses as directed by the Council, which will be held responsible to the General Assembly for the use of such revenues.

Article 41

(a) An IFAC sponsored technical meeting will normally be held in a country which has a National Organization in membership of IFAC. The NMO of the host country will take financial and administrative responsibility for the organization and conduct of the meeting.

(b) Exceptionally the Council may approve the holding of an IFAC meeting in a country not in membership of IFAC provided that a national body in that country has undertaken to be responsible for its conduct both financially and administratively.

Article 42

IFAC shall not be held responsible for expenses incurred by representatives of member organizations or IFAC office-bearers in attending meetings.

SECTION 9 - FINAL PROVISIONS**Article 43**

(a) A proposed amendment to the Constitution must have the support of at least one-third of the National Member Organizations of IFAC or of at least five elected members of the Council before it can be brought to a vote in the General Assembly.

(b) Adoption of an amendment to the Constitution shall require a two-thirds majority of the total membership of IFAC.

(c) Amendments to the Constitution may be voted on by means of a postal ballot.

Article 44

(a) The General Assembly may, subject to the general provisions of the present Constitution, adopt any By-Law that it deems necessary for achieving the aims of IFAC or for regulating the objects and activities of the various boards and committees.

(b) Such By-Law shall be established or amended on a simple majority of votes cast by the General Assembly either by direct ballot or postal ballot, provided that at least half of the member organizations have voted. In the case of a tie, the President will have a casting vote.

Article 45

Both the Constitution and the By-Laws are to be interpreted on the English text which is to be considered as the only official text.

Article 46

(a) The procedure for the dissolution of IFAC is the same as for amendments to the Constitution (Article 43).

(b) In the event of the dissolution of IFAC the Council shall determine the manner of disposal of the funds and properties for the benefit of one or more non-profitmaking organizations, the aims of which are as similar to the aims of IFAC as possible.

BY-LAWS

GENERAL PROVISIONS

No. 1

These By-Laws are drafted in accordance with Article 44 of the Constitution.

No. 2

The seat of IFAC is in Zurich, Switzerland.

GENERAL ASSEMBLY

No. 3

(a) The date of a session of the General Assembly and the agenda therefore shall be fixed by the Council taking into account the suggestions of Member Organizations.

(b) Notice of a session of the General Assembly shall be sent to member organizations by the IFAC Secretary not less than six months prior to the date fixed, accompanied by a provisional agenda.

(c) Comments on the agenda shall be returned to the IFAC Secretary not less than four months before the date of the session.

(d) The final agenda shall be sent to Member Organizations not less than two months prior to the date of the session.

No. 4

Matters not appearing on the agenda of a session of the General Assembly will be considered only if prior approval is given by not less than half of the Member Organizations represented at the General Assembly

No. 5

(a) All requests for calling an extraordinary session of the General Assembly by member organizations shall be sent to the IFAC Secretary accompanied by a statement of the matter or matters which they desire to be discussed in accordance with the provisions of Article 9(c) of the Constitution.

(b) The date of an extraordinary session of the General Assembly shall be fixed so that the session may take place within one year from receipt of the request by the IFAC Secretary.

COUNCIL

No. 6

- (a) The Council shall reach decisions either at a meeting or by post.
- (b) Whenever possible, the Council should reach its decision by consensus. If a vote is necessary, decision shall be made on the basis of a majority of the votes cast.
- (c) For a meeting of the Council, a member may appoint as his/her proxy another member of the Council. Notice of his/her proxy shall be sent to the President or the Secretary prior to the meeting.
- (d) Bearers of IFAC offices shall be entitled to attend as guests any meeting of the Council provided it is not convened as a closed meeting. Such guests shall normally not participate in the deliberations of the meeting unless invited to do so by the Chair of the meeting.

No. 7

The Council shall submit to the General Assembly

- (1) A slate of candidates for election to the Council for the ensuing 3 years, including both the Elected Officers and the Ordinary Members and prepared according to By-Law 8.
- (2) The report of the Council for the preceding 3 years.
- (3) The Treasurer's report and statement of accounts of IFAC.
- (4) Proposals for the admission of new National Member Organizations.
- (5) Proposed modifications to the Constitution or By-Laws of IFAC.
- (6) Proposed date and place of the next session of the General Assembly.

No. 8

In the case of elections to the Council carried out during a session of the General Assembly, in accordance with Article 25 of the Constitution, the procedure shall be as follows:

- (1) A preliminary list of candidates for election shall be prepared by an Election Committee consisting of three members from different countries appointed by the IFAC President, who also selects the Chair of the Election Committee.
- (2) This preliminary list of candidates, after approval by the Council, shall be sent by the IFAC Secretary to all Member Organizations at least four months before the date fixed for the elections, inviting them to make additional nominations within one month and seeking from relevant NMOs their agreement to the nomination of those people for whom their approval is required in accordance with Article 25 of the Constitution.
- (3) The final list of candidates, including the nominations from Member Organizations shall be sent to all Member Organizations at least two months before the date of elections.

(4) The Election Committee shall supervise the operations of voting and count the ballots.

(5) The Chair or a member of the Election Committee shall report the results of voting to the General Assembly.

No. 9

In the case of elections to the Council carried out by postal ballot in accordance with Articles 14 and 25 of the Constitution, the procedure shall be as follows:

(1) The Council shall submit its nominations to the Member Organizations and shall invite further nominations not later than four months before the date fixed for the elections.

(2) The final slate of candidates, including any nominations which may have been made by Member Organizations, shall be sent out to the NMOs not later than two months before the date of the elections.

(3) Only ballot papers received by the day fixed for the elections will be valid.

(4) The IFAC Secretary shall be responsible for the postal ballot and shall report the results thereof.

No. 10

(a) The Election Committee will also prepare the slate of candidates to those offices that fall within the direct competence of the Council, according to Article 20(a), 21 and 30(b) of the Constitution. These are - the IFAC Secretary - the Chair of the Awards Committee - the Chair of the Policy Committee - the Chair of the Publications Committee - the Vice-Chairs of the Technical Board - the members of the Technical Board

(b) Before preparing the slate of candidates, the Election Committee shall seek recommendations from the concerned Committee or Board, preferably with alternatives, for each of the offices listed under (a) except the IFAC Secretary.

(c) A candidate to any of the offices listed under (a) may only be nominated with the consent of the Member Organization of his/her own country.

(d) The slate of candidates will be provisionally approved by the outgoing Council before its retirement.

(e) Appointments will be made by the incoming Council after it has taken office.

No. 11

In accordance with Article 30(c) of the Constitution, the Chairs and Vice-Chairs of the Technical Committees will be appointed by the incoming Technical Board, after it has taken office, upon the recommendation of the outgoing Technical Board. To facilitate such recommendation, the slate of candidates to the offices listed under No. 10(a) will be made available to the outgoing Technical Board.

No. 12

In accordance with Article 33(a) of the Constitution, the Executive Committees, with the exception of their Chairs, ex-officio members and any member of the Council selected to serve on such Committees, will be appointed by the incoming Executive Board, after it has taken office, upon the recommendation of the outgoing Executive Board. To facilitate such recommendation, the slate of candidates to the offices listed under No. 10(a) will be made available to the outgoing Executive Board.

No. 13

The IFAC Treasurer, with the assistance of the Administrative and Finance Committee, will manage the finances of the Federation as directed by the Executive Board after approval by the Council. In particular, he/she will

- (1) collect membership fees and other revenues;
- (2) pay the expenses of the Federation;
- (3) manage IFAC funds;
- (4) prepare an annual financial report;
- (5) prepare an annual budget.

No. 14

In accordance with Article 20 of the Constitution, the IFAC Secretary

- (1) acts as Secretary of the General Assembly as well as of the Council;
- (2) is charged with the implementation of the resolutions approved by the General Assembly or the Council and will act on all matters in accord with these decisions; in cases where clarification is required, he/she shall obtain and follow the opinion of the President;
- (3) shall, taking into account the suggestions of the President and the other members of the Council, prepare the agenda of each meeting of the Council and post it at least two months before the date of the meeting;
- (4) conducts the current business of IFAC, runs the secretarial office, deals with correspondence and maintains the records of the Federation;
- (5) attends meetings of the Technical Board and, in accordance with its decisions, monitors all IFAC conferences, symposia and workshops and disseminates information on such meetings.

No. 15

All documents committing IFAC in any way must be signed by two members of the Council, one of whom should be the President and, if financial matters are involved, the other must be the Treasurer.

FINANCE

No. 16

The financial year shall be the calendar year.

No. 17

Donations, legacies and grants can be accepted by authority of the Council.

No. 18

(a) The membership fees shall be fixed in five designated categories, each Member Organization having a free choice of the category in which it wishes to pay.

(b) The rates for each category of membership shall be fixed by the General Assembly on the recommendation of the Council as may from time to time be necessary.

(c) Each Member Organization shall communicate to the IFAC Treasurer by October 1st of each year if it wishes to change its category of membership for the ensuing year.

For copies of this brochure as well as for other information concerning IFAC, please refer to the IFAC Secretariat at: secretariat@ifac-control.org

Copyright © 2009, International Federation of Automatic Control - All rights reserved.

学会副理事长、东北大学柴天佑院士 团队获国际论文奖

2014年8月24-29日，第十九届IFAC世界大会在南非开普敦召开，学会副理事长、东北大学柴天佑院士和学会理事、东北大学丁进良教授撰写的论文《竖炉焙烧过程优化运行的混合智能控制》获2011-2013 IFAC CEP最佳论文奖，这是作者单位为国内单位、论文作者全部是国内学者的论文首次入选，实现了我国学者独立获得该奖项的

零突破。

同时，由柴天佑院士、博士研究生李海波和王宏教授撰写的论文《混合选别浓密过程区间串级智能切换控制方法》获得2014 IFAC最佳应用论文奖。这是继2008年韩国IFAC世界大会以来，柴天佑院士团队第二次获得IFAC最佳应用论文提名奖。

(东北大学 供稿)

第一届“台达杯”两岸高校自动化设计大赛成功举办

2014年7月18至19日，“发现能效高手——第一届台达杯两岸高校自动化设计大赛”总决赛在江苏吴江隆重举行。大赛由教育部高等学校电气类专业教学指导委员会、中国自动化学会和工业与信息化职业教育教学指导委员会自动化专业指导委员会主办，台达集团承办，是面向海峡两岸大学生的创新性科技竞赛活动，以节能环保为主题，征集结合台达自动化技术与产品的自动化系统创新设计方案。在入围总决赛的48所高校的60支代表队中，评出5个团队特等奖、10个团队一等奖、20个团队二等奖和25个团体三等奖，获奖方案内容涵盖电机节能、空调节能、废弃物处理、驱动控制、太阳能追踪系统等领域，评审专家表示这些设计方案不仅节能效果显著，且有较好的推广应用和市场前景。

18日，决赛队伍带着自己的最新创意和作品来到台达集团吴江厂区决赛场，争夺“能效高手”荣誉。教育部高等学校电气类专业教学指导委员会副主任戈宝军、中国自动化学会副理事长李少远、工业与信息化职业教育教学指导委员会

自动化专业指导委员会副主任狄建雄、吴江区委副书记梁一波、台达集团董事长海英俊为本次大赛致辞，来自海峡两岸自动化行业专家、教育界精英，两岸高校参赛师生共约350人与会，现场气氛高涨。总决赛采用满分100分制。其中“理论测试”以笔试方式进行，占总分20%；“产品应用能力测试”占80%，设有作品演示、报告和答辩环节，由高校老师、行业专家和企业用户组成的评审团成员对参赛队成绩进行综合打分排序。最终，上海理工大学“尚理团队”、成都信息工程学院“睿优绿能”、福建工程学院“为了队伍”、杭州电子科技大学“三枪队”、南京工业职业技术学院“能电队”五个团队获得特等奖。

大赛自2014年1月启动以来，得到海峡两岸自动化界、教育界、企业界的高度关注和支持，共计56所高校、122支队伍热情报名参与。本次大赛有多支台湾代表队参赛，同时有众多台湾知名专家、学者与大陆同行开展自动化教育教学经验交流。

(学会办公室 供稿)

《自动化学报》入选“第三届中国精品科技期刊” 并荣获2013“百种中国杰出学术期刊”称号

2014年9月26日，由科技部中国科学技术信息研究所主办的“中国科技论文统计结果发布会”在北京国际会议中心举行。会上揭晓“第三届中国精品科技期刊”、“2013年中国百种杰出学术期刊”、“第二届中国精品科技期刊”、“领跑者5000——中国精品科技期刊顶尖论文”评选结果。《自动化学报》再次入选“第三届中国精品科技期刊”，并荣获2013“百种中国杰出学术期刊”称号。

“中国精品科技期刊”、“中国百种杰出学术期刊”基于每年度的SCI、EI等数据库收录的中国科技期刊情况，以期刊的总引文频次、影响因子、他引率等各项学术指标为依据，进行学术综合评估确定的；“中国精品科技期刊”每三年评选一次，“中国百种杰出学术期刊”每年评选一次，具有很高的客观性和权威性。“领跑者

5000——中国精品科技期刊顶尖论文”来源于中国精品科技期刊，采取定量与定性相结合的方式产生，每个期刊最多22篇，入选论文在f5000.istic.ac.cn平台上展示。2013年度，《自动化学报》有22篇论文入围。

同时，科信所公布了《2014年版中国科技期刊引证报告(核心版)》，《自动化学报》的影响因子和总被引频次稳步增长，其中影响因子为1.390，在信息与系统科学相关工程与技术类期刊中连续排名第一。

(自动化学报编辑部 供稿)



中国自动化学会走进江苏宿迁 助力“宿迁智造”

经过学会秘书处与宿迁市科协筹备一个月，9月23日，中国自动化学会走进宿迁活动启动。本次活动学会邀请中国自动化学会高级会员、中科院自动化所党委委员林红权研究员及团队深入宿迁典型企业进行调研考察，主要包括蒙牛乳业宿迁有限公司、江苏双鹿电器有限公司、宿迁山亿新能源股份有限公司、江苏三元轮胎有限公司，与公司负责人深入交流，现场解答企业提出的问题，并对企业优化生产流程、提升智能化水平提出了“金点子”。陪同前往的还有宿迁科协主席袁恒、市经信委有关同志以及中国自动化学会副秘书长张楠博士。

有了调研考察做基础，9月24日，《推动“宿迁智造”》科技报告会在宿迁市委党校第一报告厅举行，中国自动化学会高级会员、中科院自动化所党委委员林红权研究员到会作主题报告，副市长冯岩主持报告会。市全民科学素质工作领导小组成员单位、市经信、国税、地税、交通、国土等部门负责同志，市各开发区、各县区分管领导和有关职能部门负责人，全市130余家重点工业企业负责人和技术负责人等共400多人

参加了报告会。

在报告会上，林红权研究员用深入浅出的语言、精美生动的图片、视频，对如何理解“机器换人”，如何利用自动化、信息化、智能化技术提升企业经济效益，如何对企业进行针对性的技术升级改造，结合自己科研团队实施的成功案例，作了系统的阐述。同时，他还结合宿迁实际，对广大企业在寻求转型升级、实现绿色发展、智能发展上提出了宝贵的建议。

在报告会结束前的讲话中，冯岩指出，支撑宿迁经济高速增长的人口红利、土地红利等传统优势逐渐消失，在经济新常态下，依靠科技进步来推动产业转型发展、企业绿色发展、智能发展已是势在必行。各地、各部门要结合各自实际，认真贯彻落实科教优先战略，鼓励和支持企业加快技术改造，增创经济发展新优势，提升全市产业信息化、智能化水平。各个企业要坚持学有所用，加大自主创新和研发投入力度，推进“两化”深度融合，加快企业转型升级步伐，努力培育核心竞争力。

(学会办公室 供稿)

第八届“三菱电机杯”全国大学生电气与自动化大赛举行

2014年8月2日-4日，第八届“三菱电机杯”全国大学生电气与自动化大赛在金华职业技术学院成功举办。本次大赛由教育部高等学校电气类专业教学指导委员会和中国自动化学会主办，



金华职业技术学院和三菱电机自动化（中国）有限公司承办，联合国教科文组织产学合作教席、电力职业教育教学指导委员会电气工程专业委员会、机械职业教育教学指导委员会电气自动化专业委员会协办。来自全国46所高校的72支参赛队伍齐聚一堂，用智慧谱写他们的青春。东南大学常务副校长、教育部高等学校电气类专业教学指导委员会主任委员胡敏强，中国自动化学会副理事长兼秘书长王飞跃，金华职业技术学院院长王振洪，三菱电机自动化（中国）有限公司总裁城下雅纪，北京交通大学机电学院教授、联合国教科文组织产学合作教席查建中等专家评委莅临比赛现场进行指导。

大赛主题分为创新设计与系统应用两类每年交替举行，本届是电气与自动化系统应用大赛，以三菱电机的自动化技术和产品为基础，比赛项目分为伺服定位随动控制、模拟量过程控制、微电网控制，大赛流程则包括提前准备、现场组装调试、基础笔试、现场演示以及答辩等环节。

现场可以看到，无论是在模拟量过程控制比赛现场、微电网控制比赛现场，还是在伺服定位随动控制比赛现场，参赛选手们配合默契，认真、仔细地组装、调试和演示参赛方案，现场节

奏紧张，但次序井然。在笔试和答辩环节，选手们亦展示出了优秀的综合能力。或许本次大赛特等奖获得者——九江职业技术学院代表队的感言颇有代表性：“我们在训练中相互学习，相互帮助；在竞赛中分

工负责，相互协作，才让我们取得好的成绩。这也将是我们今后迈出校园，走向社会最宝贵的精神财富……我们觉得成绩和名次在每个选手的心中已不再重要，更让我们珍惜的是这样一个历练和提升的过程。”



本届大赛期间，对校企合作非常看重的三菱电机自动化（中国）有限公司总裁城下雅纪先生观摩了大学生电气与自动化大赛决赛现场，揭幕并参观了金华职业技术学院的三菱电机自动化实验室。

对于大赛的高校学生来说，大赛不仅开阔了他们的视野，拓展了思维，更促使他们改进学习方法，提高理论知识与动手实践相结合的能力，真正实现学以致用。这是一种经历，也是一份收获。可谓，青春无悔，在此飞扬！

中国自动化学会第29届青年学术年会暨 中国自动化学会第8届青年科学家学术 论坛在渤海大学召开

7月2日,中国自动化学会第29届青年学术年会暨中国自动化学会第8届青年科学家学术论坛在渤海大学召开,国内自动化领域一大批专家学者,包括中国科学院院士、中国工程院院士、IEEE Fellow、入选国家千人计划专家、教育部特聘长江学者讲座教授、国家杰出青年基金获得者、国家优秀青年基金获得者等100余人参加了此次会议。渤海大学校长杨延东出席开幕式并致欢迎词。

开幕式由长江学者高会军教授主持。中国自动化学会青年工作委员会主任孙长银发表了讲话。工学院院长尹坤接过了由合肥工业大学唐昊教授交接的象征学术年会的“维纳杯”。

会上,中国科学院院士吴宏鑫、中国工程院院士柴天佑、清华大学自动化系教授周东华、北京航空航天大学教授郭雷、中国科学院数学与系统科学研究院研究员吕金虎、哈尔滨工业大学教授吴立刚分别作了学术报告,分析研讨了自动化领域的一系列前沿问题,引起参会代表的极大兴趣。

中国自动化学会成立于1961年,是我国最早成立的国家一级学术群众团体之一。青年工作委员会是中国自动化学会7个工作委员会之一,于1989年的中国自动化学会五届一次常务理事会上决定成立,经过20多年的发展,已经成为广大青年科技工作者广泛认同的学术交流组织。

(青年工作委员会 供稿)

探讨智能建筑发展新形势 —— 2014 华南自动化智能建筑论坛隆重召开

2014年9月22日,第十三届华南自动化智能建筑论坛在深圳圣廷苑酒店隆重召开,吸引了来自华南地区的知名企业家、技术人员、各大建筑设计院、工程商、系统集成商等200多人参加。

华南自动化智能建筑技术论坛由深圳自动化学会、广州市自动化学会、东莞市土木建筑学会共同主办,深圳市视频报警安防行业协会协办,论坛每年举办一次,是涵盖华南智能建筑行业的规模化、专业化的行业盛会,充分展示了当今智能建筑行业的最新发展方向。

本次论坛将分别在深圳、广州、东莞三地巡回举行,主要以智慧城市、创新技术、环保节能

为主题,对智能建筑行业及自动化行业智能化的发展趋势,新应用、新技术开展研讨。其中,来自深圳市华越力合科技有限公司高级工程师付谨为、深圳市联嘉祥科技股份有限公司高级工程师韩英健、深圳市安冠科技有限公司董事长刘三明、中国电子商务研究院副院长张柏宇教授分别就《掌控全局、决胜千里——远距离立体化可视指挥系统》、《弱电线缆选型商务指南》、《智慧建筑及园区物联网平台》、《建筑智能化设计与实现》等话题进行了演讲和探讨。

(深圳自动化学会 供稿)



第33届中国控制会议在南京举行

第33届中国控制会议（CCC2014）于2014年7月28-30日在南京国际会议大酒店举行。会议由中国自动化学会控制理论专业委员会和中国系统工程学会主办，南京理工大学承办，并得到中国科学院数学与系统科学研究院，中国兵工学会自动控制专业委员会，中国工业与应用数学学会，江苏省电机工程学会，IEEE控制系统协会，韩国控制、机器人与系统学会和日本仪器与控制工程师学会等国内外组织机构的协办。会议共收到来自27个国家和地区的投稿论文2377篇，经程序委员会严格评审，会议录用论文1634篇，其中英文论文占86.1%。本届会议注册代表1700余人，实际参会人数超过2000人（包括240余名教师和学生志愿者）。

会议邀请美国爱荷华大学白尔维教授、美国宾夕法尼亚大学Vijay Kumar教授、美国加州大学伯克利分校Kameshwar Poolla教授、美国加州大学圣塔芭芭拉分校Frank Doyle教授、香港城

市大学冯刚教授、中国科学院数学与系统科学研究院黄一研究员和瑞典皇家理工学院Karl Henrik Johansson教授等7位国际知名专家作大会报告。

本次会议颁发了关肇直奖、中国控制会议张贴论文奖、IEEE CSS Beijing Chapter青年作者奖。其中中国科学院数学与系统科学研究院李婵颖（合作者陈志强）和新加坡国立大学王飞（合作者Peidong Liu, Shiyu Zhao, Ben M. Chen, Swee King Phang, Shupeng Lai, Tong H. Lee, Chenxiao Cai）分别获得第20届关肇直奖。上海交通大学蔡正祥、黄丹、伏姍和哈尔滨工业大学刘付成及其合作者西北工业大学朱海峰、刘勇、冯乾、潘泉分别获得中国控制会议第8届张贴论文奖。北京化工大学沈栋及其合作者王友清获IEEE CSS Beijing Chapter青年作者奖。

第34届中国控制会议将由杭州电子科技大学承办，在杭州举行。

（控制理论专业委员会 供稿）

2014山东高校IT院长论坛成功举行

“2014山东省高校IT论坛”于2014年8月1日-3日在烟台大学学术中心成功举行。来自全省高校计算机、物联网和自动化学科的五十余位院长和代表参加了会议，学会秘书长王起功研究员代表贾磊理事长出席了交流活动并为论坛成功举办致辞。

本次“2014山东省高校IT论坛”活动是由我会发起并与山东省计算机学会联合主办的一次交叉学科的学术研讨活动。

当今时代是学科交叉的时代，自动化学科就是典型的代表。自动化学科是一门多学科交叉的综合学科，是当代高新技术的集中体现与应用，尤其是与计算机学科的融合，是自动化学科的重要特征之一。学科与学科之间、科学与技术之间、自然科学与人文社会科学之间的交叉、渗透、融合，已成为学科发展的必然趋势。IT论坛活动的举办给计算机、物联网和自动化领域的专家学者搭建了共同交流、相互学习、相互借鉴、相互合作、共同提高的学术平台。

本届IT院长论坛主要邀请山东高等本科院校含有计算机类、自动化类、电气类、电子信息类等专业的学院院长（或系主任）参加，论坛交流主题包括：计算机与自动化学科交叉领域及其研究进展；计算机、物联网技术在当今自动化系统中



的应用；计算机、软件工程和自动化最新技术的应用及其展望；以及IT专业领域大学生教学改革和卓越工程师培养体系与实践等内容。

论坛邀请到中国自动化学会副理事长、

教育部自动化教学指导委员会副主任、上海交通大学李少远教授，清华大学计算机科学与技术学院孙茂松教授，江南大学物联网学院院长刘飞教授，浙江工业大学信息工程学院院长俞飞教授等知名学者分别为论坛做了“从信息技术到知识自动化”，“MOOC在教学中的应用”，“物联网——多学科集成创新”和“精品课程建设 促进专业建设”等大会报告。教育部计算机教学指导委员会副主任、山东计算机学会副理事长、临沂大学校长杨波教授为论坛做了“计算机类、自动化类专业教学质量国家标准和学科建设”的大会报告。本届论坛是山东高校IT领域院长和学者首次交叉学科相聚交流，主题鲜明，内容丰富，引起了省内IT同行的极大关注，具有创新意义，对促进省内高校IT相关专业的的发展，促进IT学科领域的常态化交流和加深彼此之间联系具有积极的影响和作用。

（山东省自动化学会 供稿）

全国第十六届空间及运动体控制技术学术会议成功召开

2014年8月6日~8日，“全国第十六届空间及运动体控制技术学术会议”在哈尔滨召开，此次会议由中国宇航学会空间控制专业委员会、中国自动化学会空间及运动体控制专业委员会和五院科技委控制与推进专业组联合主办，由哈尔滨工业大学和空间智能控制技术重点实验室承办，502所协办。来自航天科技集团一院、五院、八院，航天科工集团二院、四院，北京航天飞行控制中心，中科院空间中心、清华大学、北京航空航天大学、哈尔滨工业大学、上海交通大学和国防科技大学等29所大专院校和科研院所的108位代表参加了会议。

本届会议共收到论文投稿96篇，并出版会议论文集。会议分两个组共计6个单元进行了学术交流，共交流论文67篇。会上交流的论文内容充实、主题明确，主要涉及：飞行器制导、导航与控制技术，空间交会对接、编队飞行及在轨服务技术，月球及深空探测GNC技术，敏感器、控制器和执行机构等方面的技术。与会代表对报告的论文进行了热烈讨论、学术气氛浓厚，达到了相互交流、相互启发、共同提高的目的。

会议期间，还召开了专业委员会/专业组联合工作会。会上，评选出本届会议的优秀论文8篇；并按照自动化学会对专业委员会学术会议公开申办的新要求，从三家提出申请的单位中投票选出

国防科技大学为全国第十七届空间及运动体控制技术学术会议的承办单位；会上还了讨论专业委员会和专业组的相关的工作。

闭幕式上，自动化学会空间及运动体控制专委会主任张笃周研究员、顾问刘良栋研究员、副主任汤国建教授和黄显林教授给本次会议的优秀论文作者颁发了证书和奖金。获奖的论文分别为：

- (1) 502所王新民的“欠驱动三轴稳定卫星异常翻滚的姿态控制”；
- (2) 上海交通大学刘铸永的“太阳电池阵模型降阶研究”；
- (3) 509所吕旺的“基于动力学频谱规划的卫星指向控制研究”；
- (4) 803所章晓明的“一种基于串联解耦的陀螺飞轮摆角控制方法”；
- (5) 哈尔滨工业大学张淳的“基于LMI的电磁编队飞行解耦控制”；
- (6) 清华大学曾祥远的“太阳帆航天器的小行星悬停探测”；
- (7) 国防科技大学郑伟的“单探测器脉冲星导航系统误差补偿方法研究”；
- (8) 502所张绍卫的“基于回归分析的飞轮泄漏预测模型构建研究”。

本次会议取得了圆满的成功。

(空间及运动体控制专业委员会 供稿)

第25届中国过程控制会议在大连召开

第25届中国过程控制会议于2014年8月9-10日在中国大连高级经理学院举行。本届会议由中国自动化学会过程控制专业委员会主办，大连理工大学承办，沈阳化工大学、辽宁科技大学、辽宁石油化工大学、《控制工程》编辑部协办。本次会议总主席是大连理工大学电子信息与电气工程学部部长王伟教授，程序委员会主席是加拿大工程院院士、Alberta大学黄彪教授，组织委员会主席是“青年千人”、大连理工大学刘涛教授。

会议共收到投稿708篇，经过网上专家审稿和会议程序委员会会议审稿，最后收入会议论文集的论文350篇，分成口头报告90篇，张贴报告260篇。来自中国控制领域近500名海内外代表参加了会议。到会的过程控制专业委员会委员与专家也是历届人数最多的一届，其中包含东北大学柴天佑院士、中南大学桂卫华院士、国家基金委信息学部秦玉文常务副主任，自动化处王成红处长、宋苏副处长和流动项目主任俞俊志研究员，很多校级和院长级领导出席了本届会议。出席本届会议的IEEE Fellow、“千人计划”特聘教授、杰青、长江学者也是历次会议以来最多的一届。



会议首次举行“863计划”系统控制技术主题专家论坛，邀请到了中科院沈阳自动化研究所杨志家研究员、浙江大学苏宏业教授、中南大学阳春华教授和大连理工大学仲崇权教授作特邀报告，他们分别介绍十二五“863计划”项目设立情况，项目征集和项目申请，以及系统控制技术主题十三五“863计划”项目规划情况。

此外，会议还组织了“研究生工程教育论坛”。由东北大学刘建昌教授、北京航空航天大学刘维教授和英国Leeds大学王学重教授介绍了研究生工程教育的经验和体会。

第26届中国过程控制会议将由华东交通大学承办，在美丽的南昌举行。

(过程控制专业委员会 供稿)

2014年中国国际智能制造与机器人 产业发展大会在蓉举办

2014年8月28-29日，2014年中国（成都）国际智能制造与机器人产业发展大会在成都凯宾斯基饭店举行。本次盛会由中国自动化学会、中国仪器仪表学会、中国机械工业联合会、成都市人民政府主办，承办单位为成都市科技局、成都市经信委、成都市投促委、成都市科协，执行单位为成都自动化研究会、成都科学技术服务中心。

本次大会举行“开幕式及工业机器人的发展与应用主题论坛”、“成都工业机器人发展与应用建言献策会”、“智能制造（工业机器人）领域校院地协同创新对接会”、“院士企业行”等四项活动。

工业机器人的发展与应用主题论坛由中国自动化学会副秘书长乔非主持，中国工程院院士封锡盛在题为《工业机器人的技术发展趋势》的报告中指出，中国高端制造业仍处于全球较低水平，要想在国际高端制造业占有一席之地，需要克服核心技术攻关、搭建公共研发平台和培养领域内的创新人才等三方面困难。机器人国家工程研究中心副主任曲道奎在题为《机器人与智能制造》的报告中分析认为，中国的工业机器人销量以年均25%以上的速度增长，工业机器人市场具有

广阔的发展前景，未来10年或将是中国机器人产业发展和中国制造模式变革的黄金十年。

在成都工业机器人发展与应用建言献策会上，与会的专家学者围绕成都的智能制造产业现状，出谋划策。在封锡盛的《从工业机器人产业发展趋势谈成都发展工业机器人产业面临机遇和挑战》报告中提到，以互联网、新材料和新能源为基础，“数字化智能制造”为核心的第三次工业革命即将到来，这对于我国振兴装备制造业既是机遇也是挑战，对成都而言，抓住此次机遇，整合各方优势资源，通过政、产、学、研的有机融合能够促进成都工业机器人产业链的形成与发展。

本次大会不仅汇聚了国内外机器人产业领域内的众多著名厂商和企业以及中国工程院、机器人国家工程研究中心、中国机器人产业联盟等机构的专家学者，中物院、四川大学、电子科大等20余家高等院校和科研院所也参与了大会，并开展了智能制造（工业机器人）领域校院地协同创新对接会，部分高校和领域内的企业签署了战略合作协议，希望能够协同创新，将科技切实转化为生产力。

（成都自动化研究会 供稿）

四川省自动化与仪器仪表学会、 成都自动化研究会机器人技术与应用 专业委员会成立

2014年8月28日，在2014中国（成都）国际智能制造与机器人产业发展大会期间，四川省自动化与仪器仪表学会、成都自动化研究会机器人技术与应用专业委员会成立仪式在蓉举行。中国自动化学会常务理事、副秘书长乔非，中国自动化学会机器人专委会、沈阳新松机器人公司中央研究院院长徐方，成都市科学技术协会副主席卢晓东，四川省自动化与仪器仪表学会理事长汪道辉，四川省自动化与仪器仪表学会副理事长、西南科技大学副校长庾先国，四川省自动化与仪器仪表学会常务副理事长杨，四川省自动化与仪器仪表学会秘书长、成都自动化研究会副理事长唐仕正等学会负责人，及成都地区各高校、科研院所、省内外大中型企业、各区（市）县的各位代表以及媒体记者近200人出席会议。本次大会也得到了四川省科协的大力支持。

成都市科学技术协会副主席卢晓东首先致辞，他对四川省自动化与仪器仪表学会、成都自动化研究会机器人技术与应用专业委员会的成立表示热烈的祝贺，他说，成都作为西部地区科技中心，高等院校、科研院所云集，发展机器人产业具有一定科技优势和产业基础，发展潜力巨大。机器人专委会的成立将把各方的力量聚成合力，大家齐心从不同的角度和层面协同创新，结成产业、技术、学术共同体，共同推进我市机器

人产业的发展。

机器人专委会秘书长、西南科技大学张华教授为大家介绍了专委会的筹备情况。在各级部门及领导的关心和支持下，专委会历经一年多时间的筹备，其间开展了多次调研活动，广泛征集各方意见，精心制订组织工作条例。专委会汇聚了省内机器人领域内的顶尖专家学者、企业领导，堪称是我省机器人行业的“群英会”。

会上举行了四川省自动化与仪器仪表学会、成都自动化研究会机器人技术与应用专业委员会授牌仪式。由四川省自动化与仪器仪表学会理事长汪道辉授牌，西南科技大学副校长、省市机器人技术与应用专业委员会主任庾先国接牌。中国自动化学会常务理事、副秘书长乔非、沈阳新松机器人公司中央研究院院长徐方、成都市科学技术协会副主席卢晓东、四川省自动化与仪器仪表学会常务副理事长杨靖等共同见证。

授牌仪式后，机器人专委会主任庾先国致辞，他对前来参会的各位嘉宾和委员表示感谢，感谢各位委员对西南科大和他本人的信任和支持，专委会将会团结省内各方力量，以促进四川机器人产业发展为己任，在机器人 发、制造、销售、维修、培训等各方面齐心协力，共创未来。

（四川省自动化与仪器仪表学会、成都自动化研究会 供稿）

全国学会党务干部学习班在兰考举办

7月1日至4日，由中国科协机关党委和中国科协学会服务中心党委主办的“学习贯彻习近平同志重要讲话精神专题学习班”在河南省兰考焦裕禄干部学院成功举办。中国科协机关党委党办副主任孟令耘，学会服务中心常务副主任、党委副书记李志刚，党委副书记吴晓琦，全国学会党务干部、党建通讯员、科协机关和直属事业单位的入党积极分子等百余人参加了本次学习培训。

7月2日上午举办了本次学习的开班仪式。焦裕禄干部学院常务副院长廖海敏致欢迎词、李志刚做了开班动员讲话，并就本次学习谈了三点建议：一要充分认识全党开展学习贯彻习近平总书记重要讲话精神的重大意义，把思想统一到中央精神上来；二要认真学习焦裕禄精神内涵，做焦裕禄式的好党员、好干部；三要准确把握新时期社会组织发展趋势，不断把“党建强会”计划推向深入。

学习班以弘扬焦裕禄精神为主线，采取内容生动的现场教学、生动感人的专题讲座、重现历史场景的主题和音像观摩等多种教学模式，通过



组织学员拜祭焦陵、奔赴张庄、参观黄河故道、观看《我眼中的焦裕禄》、领悟焦桐背后的故事、讲解基层服务型党组织建设的深刻内涵和工作方法等内容，使广大学员对焦裕禄精神有了更加深刻的理

解与领悟，教学成效显著，使大家受到了一次深刻的心灵震撼和洗礼。

孟令耘代表机关党委对参加培训的学员提出了希望和要求。吴晓琦做了培训班小结。她倡议广大党员干部要积极传承焦裕禄精神，坚持“深学、细照、笃行”，自觉做到讲党性修养、树良好作风，把学习弘扬焦裕禄精神与我们本职工作紧密结合起来，深入学习、扎实工作，把焦裕禄精神融入到我们日常工作之中。

通过学习，大家对焦裕禄精神的时代内涵有了深刻的理解，他的崇高精神将跨越时空、历久弥新，无论过去、现在还是将来，都将永远是鼓舞我们不懈努力的精神源泉。

最后，全体学员用掌声对焦裕禄干部学院领导和教职员工为培训班所付出的辛勤劳动表示衷心的感谢。



2015年中国自动化大会 (CAC 2015)

2015年11月27-29 中国·武汉

中国自动化大会是由中国自动化学会组织召开的全国性学术会议，2015年中国自动化大会（CAC 2015）将于2015年11月在武汉召开，本次大会由华中科技大学自动化学院承办。CAC 2015大会的目的是为自动化领域的研究者和工程师们提供该域内原创科学的沟通机会，其交流重点为充分沟通自动化领域的最新研究成果与进展，共享自动化领域的实践经验。热烈欢迎全国各高等院校、科研院所和企事业单位的科技工作者积极参加。

征文范围

2015年中国自动化大会（CAC2015）热烈欢迎全国各高等院校、科研院所和企事业单位的从事自动化理论与技术研究的科技工作者积极投稿，特别希望征集能反映各单位在自动化领域研究特色的学术论文。主要征文领域范围（包括但不限于）：

先进控制理论及应用， 高端自动化系统与技术， 信息融合与故障诊断， 工业系统工程， 智能制造装备与测控技术， 工业传感器与仪表， 基于数据的建模、优化与控制， 机器人与无人系统， 导航、制导与控制， 模式识别与图像处理， 网络化控制系统， 生物信息与仿生控制， 复杂系统理论与方法， 空间飞行器控制， 脑机接口与认知计算， 智能计算与机器学习， 复杂系统的平行控制和管理， 大数据技术和应用， 智能电网基础理论与关键技术， 流程工业知识自动化。

论文要求

来稿未曾公开发表过，具备真实性和原创性。论文摘要及全文请勿涉及国家秘密。

凡投稿论文被录用且未作特殊声明者，视为已同意授权出版。

论文篇幅不限，中英文均可，特别欢迎能反映本单位研究特色的长文。

论文投稿请通过登录会议网站投稿专栏在线投稿系统进行投稿。

征文出版

出版会议论文集，英文论文被IEEE Xplore检索，部分优秀论文拟推荐到国内外SCI、EI检索的重要期刊以专刊形式发表。

重要时间节点

投稿截止日期：2015-05-01

终审通知日期：2015-07-01

终稿提交日期：2015-08-01

更多信息，请访问大会网站<http://www.cac2015.org>。



IEEE





欢迎加入

中国自动化学会

Chinese Association of Automation

这里可以 **获取技术信息** **结识业内专家**
获得同行认可 **施展个人才华**

作为个人会员，你可以

- 优惠或免费获得学会提供的技术咨询和资料（以电子邮件方式为主）
- 优惠或免费参加学会或其所属专业委员会举办的学术活动
- 优惠或免费订阅学会通讯及与学会签约的学术期刊
- 优惠参加学会提供的继续工程教育培训
- 通过学会申请各类奖项和荣誉资格
- 其它可能由学会提供的服务

作为团体会员，你可以

- 派出代表参加全国会员代表大会
- 优惠参加学会组织的有关学术论坛、科技展览等活动
- 优惠或免费获得学会提供的有关资料、学术期刊和服务
- 优惠取得学会的技术咨询、新产品鉴定、工程项目验收等服务
- 优惠获得学会为单位员工进修而举办的新产品、新技术培训活动
- 其它可能由学会提供的服务

中国自动化学会办公室

地址：北京市海淀区中关村东路 95 号自动化大厦 509 室

邮编：100190

传真：010-62522248

电话：010-82544542

<http://www.caa.org.cn> E-mail: caa@ia.ac.cn