

文章编号:1000-6893(2005)06-0720-06

战斗机非线性飞行控制技术的研究与发展

朱家强¹, 郭锁凤², 朱纪洪¹, 胡春华³

(1. 清华大学 智能技术与系统国家重点实验室, 北京 100084)

(2. 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016)

(3. 清华大学 航天航空学院, 北京 100084)

Development of Nonlinear Flight Control Technology for Fighter Aircrafts

ZHU Jia-qiang¹, GUO Suo-feng², ZHU Ji-hong¹, HU Chun-hua¹

(1. State Key Laboratory of Intelligent Technology and Systems, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(2. College of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

(3. School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

摘要: 战斗机非线性飞行控制技术研究综述。首先介绍战斗机技术发展走向, 然后对当前主要战斗机飞行控制设计方案进行分析, 并重点介绍神经网络在飞行控制中的应用研究。最后指出, 基于神经网络的智能控制方案作为飞行控制的重要研究方向, 将为未来先进战斗机飞行控制系统设计提供重要的解决方案。

关键词: 飞行控制; 非线性控制; 自适应控制; 智能控制; 神经网络

中图分类号: V249 **文献标识码:** A

Abstract: Researches on nonlinear flight control of fighter aircrafts are surveyed. Technical development directions for future advanced fighter aircrafts are summarized and major fighter aircraft flight control designing approaches are introduced. Research activities on neural network based intelligent flight control are introduced particularly. It is pointed out that, as an important research direction, neural network based intelligent adaptive control will provide potential flight control schemes for advanced fighter aircrafts in the future.

Key words: flight control; nonlinear control; adaptive control; intelligent control; neural network

当前, 战斗机发展到第四代, “先敌发现、先敌开火、先敌摧毁”的作战思想指引着第四代战斗机研制的全过程; 隐身、超音速巡航、高机动能力和敏捷性、综合化航空电子系统以及良好的可维护性是第 4 代战斗机的 5 大典型特征^[1]。在现代战争中, 空中作战由原来的保障、从属的地位上升为主导、决定性的地位。空战样式由尾追攻击、近距离格斗发展到全向攻击、中/远距离作战; 由各机种间的小合成向各军种力量和各种武器之间的大合成方向发展。中国的空中力量与世界军事强国相比仍然存在较大差距, 根据世界航空科技发展现状和中国面临的严峻形势, 现在针对第 4 代和未来战斗机开展先进飞行控制技术研究是非常必要和紧迫的。

本文对战斗机飞行控制技术研究进行综述。首先简要回顾美、俄先进战斗机发展过程, 展望未来战斗机技术发展走向。接下来, 分析当前广泛研究的战斗机飞行控制系统设计方案, 指出各种

方案的优点和不足。在此基础上, 对神经网络在飞行控制中的应用研究进行比较详细地介绍。最后指出, 作为飞行控制研究的主要方向, 神经网络智能飞行控制将为未来先进战斗机飞行控制系统设计提供重要解决方案。

1 先进战斗机技术发展走向

在战斗机技术发展中, 美国一直走在最前沿。20 世纪 80 年代初, 美国针对来自前苏联新一代战斗机的威胁和 21 世纪空战需求提出“先进战术战斗机”(Advanced Tactical Fighter, 简称 ATF) 计划。按照该计划要求, ATF 战机采用推重比为 10 的新一代发动机, 航程比 F-15 远, 同时要易于维护。1991 年 4 月, 美国空军宣布洛克希德·马丁公司的 YF-22 方案中选。根据 ATF 计划研制成功的 F/A-22 战斗机是目前国际公认的、先进的“第 4 代战斗机”。此外, 为了弥补空军整体作战能力不足和节省军费开支, 美国又提出“联合攻击/战斗机”(Joint Strike Fighter, 简称 JSF) 计划, 要求研制一种全寿命周期耗费低廉、能够同时

收稿日期: 2004-09-02; 修订日期: 2004-12-22

基金项目: 国家 863 计划(2004AA755022)、中国博士后科学基金资助项目

满足3个不同军种使用要求的轻型第4代战斗机。JSF战斗机包含常规起降型(CTOL)、舰载型(CV)和短距起飞垂直着陆型(STOVL)等3种不同机型,而且所有功能的实现都必须首先满足价格要求。2002年10月,洛克希德·马丁公司的X-35方案中选,空军编号定为F-35。至此,美国主要的两型第4代战斗机基本完成设计,发展思路明朗。美国的第4代战斗机强调了4大先进性能:超视距攻击能力、超音速巡航能力、超机动空战性能和优秀的隐身能力。

前苏联比美国稍晚开始了新型战斗机研究。俄罗斯确定的第5代战斗机(相当于美国第4代)主要特点是:多功能性、超机动性、隐身性、短距起降能力。在飞行性能上,俄罗斯第5代战斗机特别强了高机动性要求,甚至要求飞机在90°迎角下仍具有较好的稳定性和可操纵性。俄罗斯的米高扬和苏霍伊战斗机设计局分别研制出了新一代技术验证机——米格1.44(三翼面布局,前翼-机翼-尾翼)和苏-47(前掠翼布局)。在经过综合对比之后,俄空军于2002年4月宣布由苏霍伊设计局负责新一代战斗机研制。针对美国的JSF计划,俄罗斯提出了LFS“轻型前线战斗机”计划,几乎与美国完全对应。

为使空中力量更具威慑性,未来的先进战斗机将通过空中加油具备远程作战能力,并具备以充分信息化、数字化为基础的精确空战能力,重视高低档搭配、三军通用和多用途性能。从各国在研战斗机的特点和发展趋势看,未来战斗机设计将更加注重以下几方面的技术或性能:(1)超机动性能;(2)超音速巡航;(3)新的隐身技术;(4)推力矢量控制技术;(5)变弯度机翼;(6)前掠翼;(7)智能结构与智能材料;(8)环保无污染。

2 飞行控制技术研究现状

从系统与控制的角度看,战斗机是非线性、多变量、强耦合、具有不确定性的高阶控制对象。近几十年来,战斗机飞行控制技术取得了很大发展,本文着重介绍目前非线性飞行控制领域中研究和应用最广泛的几个系统设计方案。

2.1 增益预置

目前,飞行控制系统设计主要采用经典线性控制理论和增益预置技术^[2-4]。首先将飞机从概念上分成几个单独的操作区域或者飞行条件,对于每个特定区域,用一个比较精确的线性模型描

述飞机的运动,同时用线性控制理论设计控制器,以满足对闭环性能的要求,不同区域的控制器形式上相同而参数不同。再采用插值策略把各个单独的控制器的综合完成飞机在整个飞行包线内的控制。最后的控制器还要经过非线性仿真和谨慎细致的试飞加以验证。基于增益预置方案设计了許多高度可靠、有效的飞行控制系统,一直到现在仍然发挥着不可替代的作用。

增益预置方法能够胜任第2、3代战斗机控制系统的设计,但是对于第4代及以后的战斗机则很困难。线性化增益预置仅能在系统平衡流形的邻域保证闭环系统的稳定性^[5],并且外部参考输入和预置变量的急剧变化将使闭环系统性能急剧恶化甚至不稳定。因此,对局部线性化模型同整体非线性模型之间等价的区域进行扩展和充分利用外部输入和预置变量的相关信息而不仅仅是瞬时值成为目前增益预置方法的研究方向。模糊技术和神经网络等非经典的智能控制方案被引入经典的增益预置系统^[6-8],以解决在不同工作点之间切换可能造成的参数突变,以及不易在全部工作点得到经典的线性化模型等问题。

2.2 反馈线性化

反馈线性化方法的基本思想是:通过恰当的非线性状态反馈和坐标变换(或动态补偿),将一个非线性系统变换成(部分或全部的)线性系统,然后再用线性系统设计方法对变换后的线性系统进行设计,使系统满足设计指标要求^[9]。反馈线性化方法可以分为两大类:动态逆方法和微分几何方法。动态逆方法通过对运动方程求逆实现系统的线性化和解耦,物理概念明确;而微分几何方法则通过微分同胚坐标变换和非线性状态反馈给出解耦结构,理论上比较严谨。

对于飞行控制系统,动态逆是研究最广泛的反馈线性化方法,在大迎角超机动飞机^[10]、先进短距起飞/垂直着陆飞机^[11]、直升机^[12]以及无人机^[13]等飞行控制研究中得到成功应用。用动态逆方法综合的系统无需复杂的变增益调节,动态特性与增益之间关系是一种简单的线性、解耦、时不变的一阶或二阶系统,并且能够以固定增益自动适应飞行条件和构型的大范围变化。系统增益只与响应特性有关,对象参数的变化和不同对象参数的差异,只需相应改变其对消的函数关系,而无需改变系统结构和增益。动态逆方法的主要限制是:反馈线性化要求高度准确地建立飞机非线

性力和力矩模型并且实时求逆,这在实际应用中十分困难。一个难题是飞机的非线性动态特性非常复杂,难以建立精确的数学模型;另一个难题是在整个飞行包线内对飞机的非线性模型实时解析求逆,这经常难以做到,即使能够做到,计算量也非常大^[14]。

微分几何方法在飞行控制系统设计中也得到许多应用。比如,状态反馈线性化用于 CTOL 飞机^[15]和直升机^[16]的控制设计,近似输入输出线性化应用于 V/STOL^[17]等。近年来,为了克服微分几何方法要求精确系统模型而遇到的应用困难,发展了多种近似线性化方法,如伪线性化^[18]、奇异摄动^[19,20]、扩展线性化^[21]、线性化族^[22]和近似输入-输出线性化^[23]等。

2.3 自适应控制

经典的参数自适应控制方案可以分为间接自适应和直接自适应两种:间接自适应控制基于对象参数的实时辨识完成控制律设计;直接自适应则直接更新控制器参数。非线性系统不确定性的来源主要包括:参数不确定性、外界干扰、不确定的非线性特性和未建模动态特性等。针对非线性系统不确定动态特性来源,研究人员提出了多种鲁棒控制方案,以提高自适应控制的鲁棒性。比如, Peterson 采用死区解决噪音条件下的误差有界性^[24], Naik 应用参数预测解决系统针对未建模动态的鲁棒性^[25]。Isidori 等将线性系统内模原理引入不确定非线性系统的鲁棒控制中,提出一类能够跟踪不确定性输出的自适应输出调节方法,并基于该方法对 VTOL 飞机和小型无人直升机的着舰方法进行了研究^[26~28]。该方法从理论上得到了比较完整的结果,但在实际系统中的应用尚需进一步研究。

Backstepping 自适应控制^[29]是 20 世纪 90 年代以后提出的一种不依赖于求逆的非线性系统自适应控制方案。其基本思想是针对级联线性/非线性系统,通过分步适当选取李亚普诺夫函数,构造辅助控制输入的同时补偿不确定性的影响,最终得到稳定的控制律。这种方法的优点是可以避免对消掉有用的非线性信息,并且可以经常引入额外的非线性项来改善系统瞬态性能,使系统设计者在选择反馈控制的形式时具有更大的自由度^[30,31]。Backstepping 方法应用于飞行控制系统设计^[13,32]有两个显著优点:首先,在控制器设计过程中可以处理一大类非线性、不确定性的影响,而且稳定性

及误差的收敛性已经得到证明;其次,采用该方法设计的控制器收敛速度很快,在损伤或者故障状态下这种方法非常有效。不过 Backstepping 方法的鲁棒性及作动器饱和问题仍不容忽视。

2.4 智能控制

智能控制的主要特点是:(1)学习功能,系统能对过程和环境未知特征的固有信息进行学习,并将得到的知识用于进一步的估计、分类、决策和控制;(2)适应功能,比传统的自适应控制具有更广泛的含义,不是按照系统的模型,而是根据任务和性能要求进行适应;(3)组织功能,即根据任务和传感器信息自行决策、组织和实施^[33]。当前,智能控制技术已经从单学科研究逐步发展到理论交叉研究,应用领域不断拓展。智能控制与传统控制方法之间的交叉研究有:模糊变结构控制、模糊自适应控制、神经网络自适应控制、神经网络变结构控制等;各种智能控制方法之间的交叉研究有:模糊专家系统、模糊神经网络控制、专家神经网络控制等。

近年来智能飞行控制得到了大量研究^[34,35]。神经网络、模糊逻辑等智能控制技术用于复杂的飞行控制具有巨大的潜力,如可用于飞机底层的控制增强系统、自动驾驶系统、自主无人机路径规划、损伤和故障条件下的控制系统重构以及飞机动态辨识等。由于目前单一的智能控制方法在飞行控制应用中各有优缺点,无法满足飞行控制任务复杂化的要求,因此,将不同智能控制方法之间,以及智能控制与反馈线性化、自适应控制、增益预置等方法相融合,发挥各自优点,实现高度组合智能飞行控制成为当前普遍关注的焦点和发展趋势。

3 基于神经网络的智能飞行控制研究

人工神经网络具有并行处理、分步存储、高度容错、非线性运算等诸多优点,能够高度精确地逼近非线性函数^[36,37],因此,其在非线性控制方面所具备的巨大潜力越来越被飞行控制领域的研究者关注。

3.1 神经网络在飞行控制中的应用研究

20 世纪 90 年代以来,神经网络控制作为一种新型控制技术开始进入飞行控制领域,在飞行器的气动参数辨识^[38~40]、非线性飞行控制^[41~43]、飞行故障诊断^[44]以及控制系统重构^[45,46]等方面得到广泛研究和应用。

Steiberg 等将飞行控制系统中神经网络的应用分为 3 个领域^[47]。(1) 自动驾驶飞行控制系统。控制律基于神经网络控制器在线产生,避免昂贵的设计代价,并且能够补偿系统非线性和不确定性。(2) 容错飞行控制系统,传统飞行控制系统通常使用硬件冗余来增强系统的可靠性,但是硬件冗余增加了系统重量,可能会降低系统可靠性,因此,基于神经网络和自适应技术的容错飞行控制研究成为一个新的研究领域。(3) 大迎角超机动飞行控制系统,具备大迎角超机动能力的战斗机在对敌作战中将取得显著优势,但是超机动意味着飞行动力控制面有效性下降和飞行器非线性动态特性增强,使控制问题异常复杂。利用神经网络自适应非线性控制技术成为解决此类问题的一个重要途径。

Kumar 等提出了一种在现存 PI 控制器上增加自适应神经网络的控制方案^[48]。该方案提出非线性发动机逆模型自适应神经网络,经过训练能使发动机发生大范围变化情况下控制器保持令人满意的性能。该方法的独特性在于全前向连接的神经网络结构,权值的在线调整算法采用标准 BP 算法(SBPA)。

Napolitano 等对固定翼飞机神经网络控制进行深入研究,提出一种扩展 BP 算法(EBPA),对于提高神经网络在线学习的准确性和学习速度特别有效^[49]。EBPA 主要应用于重构飞行控制方面,作动器故障和传感器故障都得到了解决。在飞行控制面受到严重损伤(AFDIA)、传感器受到损伤(SFDIA)和无物理冗余情况下,在线完成控制律的重构,使飞机返回到一种新的平衡状态^[50,51]。文献[52]研究了容错飞行控制系统的实时性和 AFDIA 与 SFDIA 之间的合成策略问题,该系统具有基于在线学习的并行神经网络系统硬件。

目前,美国 Georgia 理工大学 Anthony J. Calise 教授领导的研究小组在与飞行控制有关的神经网络应用研究中处于国际领先地位。他们提出了一种基于线性化对象逆模型(反馈线性化)并融合多层感知器神经网络的飞行控制方案^[52],该方案在以下的应用领域中被证明是有效的:(1) 工作区间空气动力学特征高度非线性的系统^[53];(2) 具有多时间尺度特性并且非线性动力学特性变化迅速的系系统^[54,55];(3) 具有高度不确定性特征的系统^[56];(4) 作动器通道发生故障的情况下仍然要求保持一定操纵品质的系统^[57,58];此外,

该方案对改善敏捷性空空导弹增益预置控制器设计点之间和增益预置覆盖范围之外的控制效果也是有效的^[59]。现在,该研究小组正在把这种基于神经网络的智能飞行控制方案应用在更广泛的领域,如大迎角飞行控制^[60]、飞行器制导与控制综合^[61]等。

Calise 等提出的智能飞行控制方案的一个突出特点是采用在线学习的神经网络。在线神经网络与离线神经网络的主要区别是:(1) 离线神经网络权值调整依据控制器输入-输出映射样本数据离线完成,而在线神经网络权值根据跟踪误差进行实时调整,权值调整所依据的跟踪误差不包含控制器输入信息。(2) 离线神经网络根据已有的样本数据进行训练,神经网络控制系统的性能与样本数据有关,在线神经网络在调整过程中必须保证闭环系统中所有信号的有界性(稳定性)。

3.2 NASA 智能飞行控制研究项目

智能飞行控制系统(IFCS)是美国 NASA 与波音公司等合作开展的一项智能飞行控制研究项目,目标是开发一种基于直接自适应神经网络的飞行控制系统,使飞机在出现主系统失效/作战损伤时能够安全、受控着陆^[62]。该项目在一架经过高度改装的 F-15B 上进行,重点是飞行控制计算机开发具有自主学习能力的神经网络软件。在前期工作基础上,NASA Dryden 飞行研究中心从 2003 年起计划分两个阶段对 IFCS 项目进行飞行试验。项目完成后,该软件将能把飞机和系统的数据与正常飞行的数据库中数据进行比较,自动调整飞行控制律以补偿损坏或失效的飞行控制面或系统。

另一项重要的智能飞行控制研究计划是美国空军、波音和 NASA 等合作开展的无尾战斗机重构控制(RESTORE)研究计划,重点是利用神经网络动态逆为新一代战斗机提供自适应重构控制方案^[63]。RESTORE 技术包括在线控制律重构、在线系统辨识、在线控制分配和指令限制等内容,被称为第二代 IFCS 系统^[64]。通过常规控制律与神经网络自适应控制律的数字仿真、物理仿真和利用 X-36 无垂尾技术验证机进行飞行试验^[65],验证了在飞机出现结构失效/作战损伤等故障条件下,神经网络自适应控制方案的可行性和有效性,并对重构飞行控制系统的鲁棒性进行了评估。波音公司计划与 NASA 合作将 RESTORE 控制方案应用于运输机 C-17、无人战斗机(UCAV)等

项目中。

4 结 论

当前战斗机飞行控制的研究热点集中于鲁棒、非线性、自适应和智能控制等方面。根据未来战斗机隐身、超音速巡航、超机动、新型气动布局等特点,以及自动补偿操纵故障/作战损伤等性能要求,传统的基于经典线性控制理论的设计方法已经越来越难以适应现代复杂飞行控制系统设计要求,迫切需要采用先进的控制技术解决未来战斗机的飞行控制问题。

人工神经网络具有强大的并行计算能力、容错能力和学习能力,在非线性自适应控制的理论发展和应用方面具有重要的地位。由于基于神经网络的智能飞行控制方案能够有效简化飞行控制系统设计过程,增强系统鲁棒性和故障适应能力,因而在复杂的战斗机飞行控制中具有重要的优势,将为未来先进战斗机飞行控制系统设计提供重要的解决方案。

参 考 文 献

- [1] 姜明远, 胡英俊. [J]. 航空科学技术, 2003, (1): 29 - 30.
Jiang M Y, Hu Y J. [J]. Aeronautical Science and Technology, 2003, (1): 9 - 30. (in Chinese)
- [2] Rugh W J. [J]. IEEE Control System Magazine, 1991, 11(1): 79 - 84.
- [3] Rugh W J, Shamma J S. [J]. Automatica, 2000, 36(10): 1401 - 1425.
- [4] Kammer A M, Pascoal A M. [J]. Automatica, 1995, 31(8): 1185 - 1191.
- [5] 廖晓昕. 动力系统的稳定性理论和应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
Liao X X. Stability theory and application of dynamical system [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000. (in Chinese)
- [6] Lin C, Su H. [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2001, 24(4): 683 - 692.
- [7] Tan S, Hang C, Chai J. [J]. Automatica, 1997, 33(3): 411 - 419.
- [8] 郭树军. 直升机超机动飞行的神经网络控制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2000.
Guo S J. Study on neural network control for super maneuverable flight of helicopters [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2000. (in Chinese)
- [9] Isidori A. Nonlinear control systems [M]. New York: Springer-Verlag, 1995.
- [10] 朱恩. 大迎角超机动飞行控制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 1995.
Zhu E. Technique study for high-angle-of-attack supermaneuverable flight control [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 1995. (in Chinese)
- [11] 王健. 先进短距起飞垂直着陆飞机的非线性动态逆控制[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2000.
Wang J. Nonlinear dynamic inversion flight control for ASTOVL aircrafts [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2000. (in Chinese)
- [12] 黄一敏. 直升机飞行控制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 1999.
Huang Y M. Study of flight control techniques of helicopters [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 1999. (in Chinese)
- [13] 苏丙未. 无人机先进飞行控制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2001.
Su B W. Study of advanced flight control techniques of uninhabited aerial vehicles [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2001. (in Chinese)
- [14] 朱家强. 基于神经网络和动态逆的超机动飞行控制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2004.
Zhu J Q. Neural network and nonlinear dynamic inversion based supermaneuverable flight control [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004. (in Chinese)
- [15] Tomlin C, Lygeros J, Benvenuti L. In: Proceeding of the 34th IEEE Conference in Decision and Control [C]. 1995. 1867 - 1872.
- [16] Meyer G, Su Rand Hunt L R. [J]. Automatica, 1984, 20(1): 103 - 107.
- [17] Hauser J, Sastry S, Meyer G. [J]. Automatica, 1992, 28(4): 665 - 679.
- [18] Bortoff S A. [J]. Automatica, 1998, 33(8): 1449 - 1458.
- [19] Naidu D S, Calise A J. [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2001, 24(6): 1057 - 1078.
- [20] Tomlin C J, Sastry S. [J]. International Journal of Control, 1998, 68(4): 819 - 848.
- [21] Baumann W T, Rugh W J. [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1986, 31(1): 40 - 46.
- [22] 李铁成. [J]. 控制理论与应用, 1995, 12(5): 623 - 626.
Li T C. [J]. Control Theory and Applications, 1995, 12(5): 623 - 626. (in Chinese)
- [23] Doyle F J, Algorner F, Morari M. [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1996, 41(2): 305 - 309.
- [24] Peterson B B, Narendra K S. [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1982, 27(6): 1162 - 1168.
- [25] Naik S M, Kumar P R, Ydstie B E. [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1992, 37(2): 182 - 197.
- [26] Serrani A, Isidori A, Marconi L. [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2001, 46(8): 1178 - 1194.
- [27] Marconi L, Isidori A, Serrani A. [J]. Automatica, 2002, 38(1): 21 - 32.
- [28] Isidori A, Marconi L, Serrani A. [J]. IEEE Transactions on Automatic Control. 2003, 48(3): 413 - 426.
- [29] Krstic M, Kanellakopoulos I, Kokotovic P V. Nonlinear and adaptive control design [M]. New York: John Wiley

- and Sons Inc, 1995.
- [30] Krstic M, Sun J, Kokotovic P V. In: Proceedings of the 33rd Conference on Decision and Control [C]. 1994. 1633 - 1638.
- [31] Kokotovic P V. [J]. IEEE Control Systems Magazine, 1992, 12(3): 7 - 17.
- [32] Lee T, Kim Y. [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2001, 24(4): 675 - 682.
- [33] 孙增圻. 智能控制理论与技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
Sun Z Q. Intelligent control theory and applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997. (in Chinese)
- [34] Stengel R F. [J]. IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics, 1993, 23(6): 1699 - 1717.
- [35] Lin C L, Su H W. Proceedings of the National Science Council, ROC, Part A[C]. 2000, 24(1): 15 - 30.
- [36] Poggio T, Grossi F. Proceedings of the IEEE [C]. 1990. 1481 - 1497.
- [37] Sadegh N. [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1993, 4(6): 982 - 988.
- [38] Linse D J, Stengel R F. [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1993, 16(6): 1018 - 1025.
- [39] Hu Z, Balakrishnan S N. Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Control Applications [C]. 1999. 225 - 230.
- [40] 张锐. 武装直升机大机动、高敏捷性神经网络鲁棒自适应飞行控制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2002.
Zhang R. The study on attack helicopter super-maneuverable and super-nimble robust adaptive flight control using neural network [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2002. (in Chinese)
- [41] Calise A J. [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 1996, 11(7): 5 - 10.
- [42] Calise A J, Rysdyk R T. [J]. IEEE Control System Magazine, 1998, 18(6): 14 - 25.
- [43] Nardi F. Neural network based adaptive algorithms for nonlinear control[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2000.
- [44] Napolitano M R, Chen C, Naylo S. [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1993, 16(6): 999 - 1009.
- [45] 王源. 不确定非线性系统的神经网络自适应重构控制[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2002.
Wang Y. Neural network adaptive reconfigurable control for uncertain nonlinear systems [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2002. (in Chinese)
- [46] Shin D, Kim Y. [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2004, 12(1): 87 - 100.
- [47] Steiberg M, DiGrolamo R. Applying neural network technology to future generation military flight control systems [R]. International Joint Conference on Neural Networks, Seattle, WA, 1991.
- [48] Kumar K, Kulkarni N. Inverse adaptive neuro-control of a turbo-fan engine [R]. AIAA-99-3994, 1999.
- [49] Napolitano M R, Kincheloe M. [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1995, 18(6): 1008 - 1015.
- [50] Napolitano M R, Naylor S, Neppach C. [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1995, 18(1): 170 - 176.
- [51] Napolitano M R, Younghwan A, Seanor B, *et al.* Application of a neural sensor validation scheme to actual Boeing 737 flight data [R]. AIAA Paper 99-4236, 1999.
- [52] Napolitano M R, Molinaro G, Innocenti M, *et al.* Proceedings of the American Control Conference [C]. 1999. 2615 - 2619.
- [53] Calise A J, Sharma M, Corban J E. [J]. AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2000, 23(5): 837 - 843.
- [54] Nardi F, Rysdyk R T, Calise A J. Neural network based adaptive control of a thrust vectored ducted fan [R]. AIAA Paper 99-3996, 1999.
- [55] Leitner J, Calise A J, Prasad J V R. Proceedings of IEEE Aerospace Conference [C]. 1998. 117 - 126.
- [56] McFarland M B, Calise A J. Proceedings of the 1997 American Control Conference [C]. 1997. 1996 - 2000.
- [57] Rysdyk R T, Calise A J. Fault tolerant flight control via adaptive neural network augmentation [R]. AIAA Paper 98-4483, 1998.
- [58] Calise A J, Lee S, Sharma M. [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2001, 24(5): 896 - 902.
- [59] McFarland M B. Augmentation of gain-scheduled missile autopilots using adaptive neural networks [R]. AIAA-98-4491, 1998.
- [60] Shin Y, Johnson M, Calise A. Neural network-based adaptive control for nonlinear flight regimes [R]. AIAA Paper 2003 - 5717. 2003.
- [61] Johnson E N, Calise A J, Corban E. Reusable launch vehicle adaptive guidance and control using neural networks [R]. AIAA-2001-4381, 2001.
- [62] NASA Facts. Intelligent flight control system [Z]. Document number: FS-2002-09-076-DFRC. 2002.
- [63] Brinker J S, Wise K A. Reconfigurable flight control for a tailless advanced fighter aircraft [R]. AIAA-98-4107, 1998.
- [64] Urnes J M. Proceedings of the 2002 45th Midwest Symposium on Circuits and Systems [C]. 2002. 135 - 138.
- [65] Brinker J S, Wise K A. [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2001, 24(5): 903 - 909.

作者简介:

朱家强(1974 -) 男, 山东人, 博士后。研究方向: 飞行器制导与控制、嵌入式系统。E-mail: zhujiaqiang@tsinghua.org.cn

郭锁凤(1929 -) 男, 教授, 博士生导师。研究方向: 飞行器导航、制导与控制。电话: 025-84892301

朱纪洪(1968 -) 男, 教授, 博士生导师, 863 航空航天领域专家。研究方向: 无人机导航、制导与控制。E-mail: jhzhu@tsinghua.edu.cn

胡春华(1976 -) 男, 江苏人, 博士。研究方向: 飞行控制与仿真、嵌入式控制系统。E-mail: huchunhua@tsinghua.edu.cn

(责任编辑: 李泓洁)