

Algorithms in intelligent
control systems of

aerocrafts 飞行器

智能控制系统中的算法

柯芳 聂吾希宾 K A 著



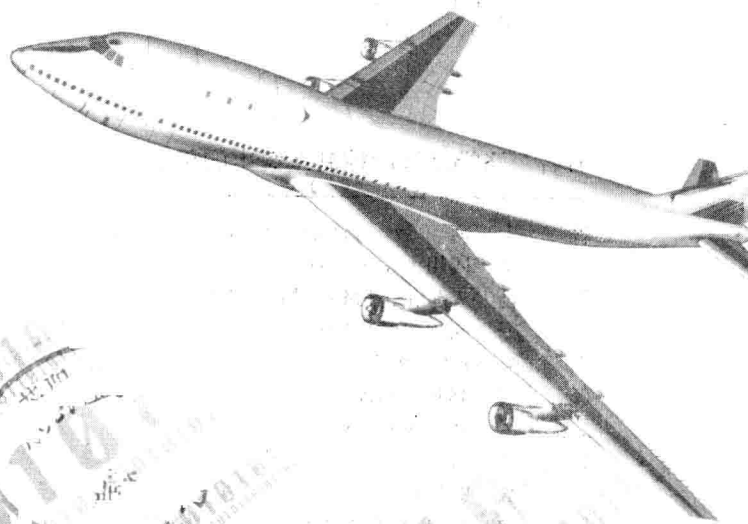
四川大学出版社

Algorithm
control systems of

aerocrafts 飞行器

智能控制系统中的算法

Ke Fang Neusipin K A



四川大学出版社

责任编辑:毕 潜
责任校对:张 阅
封面设计:墨创文化
责任印制:李 平

图书在版编目(CIP)数据

飞行器智能控制系统中的算法 / 柯芳, (俄罗斯) 聂
吾希宾著. —成都: 四川大学出版社, 2011. 6
ISBN 978-7-5614-5311-7

I. ①飞… II. ①柯…②聂… III. ①飞行控制系统—智能控
制—算法 IV. ①V249.122

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 105608 号

内容简介

本书是作者将“功能—智能系统”用于飞行器控制的研究成果的总结, 内容主要包括飞行器“功能—智能”控制系统的概念综合、实现行动感知器的预测算法和非线性控制算法。书中提供了大量的数学仿真结果, 以证实所研制的预测及控制算法的有效性。为了使读者对智能控制系统能有较全面的认识, 开篇就给出了飞行器智能控制系统研制进展的综述, 还简要列举了广泛采用的传统智能组件, 并对建模中采用的自组织方法作了专门介绍。

本书读者对象为大学自动控制专业高年级学生、研究生和从事智能控制系统研究的科技工作者及工程技术人员。

书名 飞行器智能控制系统中的算法

著 者 柯 芳 聂吾希宾 K A
出 版 四川大学出版社
地 址 成都市一环路南一段 24 号 (610065)
发 行 四川大学出版社
书 号 ISBN 978-7-5614-5311-7
印 刷 郫县犀浦印刷厂
成品尺寸 185 mm×260 mm
印 张 11
字 数 247 千字
版 次 2011 年 7 月第 1 版
印 次 2011 年 7 月第 1 次印刷
定 价 28.00 元

◆读者邮购本书, 请与本社发行科
联系。电 话: 85408408/85401670/
85408023 邮政编码: 610065

◆本社图书如有印装质量问题, 请
寄回出版社调换。

版权所有◆侵权必究

◆网址: www.scupress.com.cn

序 言

在现代科学技术飞速发展的今天,控制科学与技术学科面临巨大的机遇与挑战,传统控制理论也正遭遇前所未有的困难。与此同时,控制论、信息论,特别是在人工智能研究中的成果衍生了进行复杂非线性控制系统建模、控制及优化的一些新的手段。在这样的背景下,在现代控制理论、人工智能、神经网络及微电子学等学科的交叉发展趋势中,形成并积极发展了研究开发的新领域——智能控制。智能控制系统是目前解决复杂对象控制问题的最好手段。

现代智能控制系统建立在多种概念和理论之上,目前还没有建立智能控制系统的标准体系结构。其中,于20世纪90年代初由前苏联提出并发展的,基于功能系统理论的智能系统成为最具发展前景的智能系统之一。现代飞行器作为复杂的非线性动态对象,正是基于功能系统理论的智能系统发挥作用的重要领域。作者的研究工作正是在这一背景下开展的,即进行基于功能系统理论的飞行器智能控制系统的概念综合,重点是研究飞行器智能控制系统中的预测和控制算法。在预测上,作者提出了依靠自组织算法实现的改进型Demark趋势项来建立预测模型,并在此基础上建立了智能系统中的行动感知器;在控制手段上,作者采用微分几何理论,实现了基于对象模型精确线性化的继电调节器。

为充分验证所研制算法的有效性,作者进行了大量的数学仿真工作,并在仿真中使用了对实际产品进行半实物仿真和实物试验中获得的数据。作者将提出的改进型Demark趋势项算法用于惯性导航系统输出参数误差的预测与修正和导航综合系统最优结构的选择,提高了惯导系统输出参数的精度和导航综合系统的参数测量精度。将基于对象模型精确线性化的继电调节器用于发动机推力矢量/气动力复合控制的导弹对机动目标的制导,在运用传统的比例导引律的情况下,在垂直平面内达到了满意的制导精度。

上述预测及控制算法的构想不仅具有独创性,而且均针对飞行器控制的实际要求,即高度机动性、实现紧凑快速及高精度。因此,无论作为未来新一代飞行器智能控制系统中的算法,还是在当前系统中可独立使用的智能组件,均具有一定的理论指导及现实意义。

作者衷心希望书中介绍的算法和实现的思路能为相关领域的研究人员带来启发,并为基于功能系统理论的智能控制系统研究在中国的发展起到推动作用。由于作者学识水平所限,书中错误和疏漏在所难免,恳请读者批评指正。

柯 芳 聂吾希宾 K A

2011年5月

前 言

各种飞行器的控制由控制系统实现。通常，飞行器控制系统都是建立在使用周围环境的先验信息基础之上的，系统目标的概念退化为解决由系统处理某个规划好的信号的任务，只是在某些时候才引入对某种变化条件具有适应功能的系统元件。事实上，系统工作的所有智能部分由人来完成，他们将控制系统的运行转化为实现他们所制定的固定的算法。实际应用中系统工作的环境在改变，系统自身状态的特性也在发生变化，而要在预先固定好的算法中考虑到所有这些变化，事实上是不可能的。因此，上述控制系统的精度会降低，在某些实际应用场所甚至完全不可能使用这样的系统来完成任任务。客观情形要求用新的观点来建立系统。

当前飞行器用于完成非常复杂的任务时，要求它们在飞行中进行行动目标的综合，考虑自身和外部环境状态的各种不同因素来采取最优行动决策，并精确执行这些决策。现代飞行器的这些功能可以借助新一类的控制系统——智能系统来实现。

我们将智能系统理解为由信息过程连接起来的技术设备和软件的综合体，它可以与人（或人的集体）一起或独立工作，能够在使用信息和知识的基础上，在存在动机的条件下综合出目标、制定行动决策并找到达到目标的合理方式。

我们可以依据各种不同的原则建立智能系统。其中，于 20 世纪 90 年代初在前苏联提出并发展的，基于功能系统理论的智能系统成为最具发展前景的智能系统之一。功能系统理论是由前苏联科学家阿诺辛（Анохин Р К）奠定的，其基本思想认为在外界环境变化的条件下，人体是具有选择性地连接各个功能模块而使整体具有有益适应特性的一个完整的系统。他将这一系统称为功能系统，而功能系统又由若干子功能系统构成。将功能系统理论用于复杂动态对象控制，可以使整个系统建立在多个功能系统共生的基础上，包括目标综合模块、行动感知器、动态专家系统、决策与控制，共同保证有益目标的实现，使其本质上具有对自身及外界环境变化的适应能力。现代飞行器作为复杂的非线性动态对象，正是基于功能系统理论的智能系统发挥作用的重要领域。

在这一背景下，作者提出了研究工作的目标，即基于功能系统理论的飞行器智能控制系统的概念综合，并具体实现行动感知器（建立预测模型）和控制算法。本着这一目标，作者取得了以下的研究成果：

（1）提出了具有上、下两级控制层次的飞行器智能控制系统结构框图。该结构充分运用了功能系统理论的思想，在行动感知器的预测模型基础上，可以综合出飞行器运行最佳场景并实现该场景，使其从根本上优于已有的不含目标综合的系统，并具体指明了目标综合和目标实现环节的算法保障措施。

(2) 提出了用自组织方法对 Demark 趋势项进行修正的改进型算法, 用该算法建立了飞行器参数预测模型, 实现了智能控制系统中的行动感知器。运用这一算法对高度机动飞行器导航系统误差进行预测, 提高了导航参数确定的精度。

(3) 采用基于微分几何理论的反馈线性化方法对飞行器进行控制, 实现了发动机推力矢量/气动力复合控制导弹对机动目标的制导, 达到了满意的制导精度。

飞行器智能控制系统研制是复杂、多层次的任务, 适宜于分步骤解决, 因而作者所实现的预测和控制算法无论是作为飞行器智能控制系统中的重要组成部分, 还是作为在传统控制系统中可独立使用的智能性组件, 均具有重要的理论和现实意义, 它们是基于功能系统理论的智能系统在飞行器控制中取得的最新成果。

本书正是对上述研究成果的详细介绍, 核心是飞行器智能控制系统中的算法。书中给出了:

(1) 飞行器智能控制系统研究进展综述。

(2) 基于功能系统理论的飞行器智能控制系统结构框图。

(3) 建立在 Demark 趋势项和自组织方法相结合基础上的实现预测模型的紧凑算法。

(4) 基于微分几何理论的智能系统的反馈线性化控制算法。

(5) 在对返回大气层式无人飞行器系统生成分析基础上得到的无人飞行器智能控制系统行动感知器算法保障的结构。

(6) 将建立的预测算法用于惯性导航系统参数误差修正和导航系统最优结构选择的数学仿真结果。

(7) 将建立的控制算法用于发动机推力矢量/气动力复合控制导弹对机动目标制导的仿真结果。

(8) 返回大气层式无人飞行器系统生成三个阶段中实现行动感知器的仿真结果。

开展的研究和所得成果的科学创新点在于对现有飞行器智能控制系统的系统分析、最有前景的飞行器智能控制系统结构选择的论证和作为飞行器智能控制系统重要组成部分的预测和控制算法的建立。这些算法是独创性的。其中: 预测算法是借助自组织方法对 Demark 趋势项进行直接改型; 控制算法基于微分几何理论, 允许实现非线性调节器到与之符合的线性调节器的继电切换。

本书工作成果的实用价值在于: 第一, 给出了建立惯性导航系统误差预测数学模型的算法, 该算法具有紧凑性特点, 可适用于高度机动的飞行器, 既保证了较高的精度, 又满足快速性要求。第二, 将建立的控制算法应用于发动机推力矢量/气动力复合控制导弹, 实现了对垂直平面内高度机动目标的制导, 达到了满意的制导精度。此外, 依靠在飞行器运行的一定区域从非线性调节器切换到线性调节器, 可以大大简化飞行器智能控制系统中控制过程的实现。在这些区域中, 向线性空间的切换可以在不损失精度的条件下进行。第三, 在对无人飞行器智能控制系统生成进行分析的基础上, 实现了无人飞行器运行的每一阶段控制系统算法保障的选择, 这大大地节约了计算资源, 并提高了系统的快速性。

书中得到的结果及结论的可靠性由所获得的数学模型与从实验室半实物仿真试验结

果中获得的惯性导航系统误差变化的实际过程具有足够的吻合度来保证；在控制算法的仿真中使用了由风洞吹风试验获得的对象气动参数，且所获得的结果与该领域发表的相关数据的一致性也提供了可信度的证据。

基于书中介绍的研究成果已公开发表了 17 篇论文，其核心内容也在相应的国际会议上进行了公布和报告，主要有：

- (1) “第二届控制问题国际会议”，俄罗斯，莫斯科，2003 年 6 月。
- (2) “2003 智能化大会”，中国，香港，2003 年 12 月。
- (3) “第六届国际研讨会：智能系统”，俄罗斯，萨拉托夫，2004 年 6 月。
- (4) “国际科学实践大会：电子设备和控制系统”，俄罗斯，托蒙斯克，2004 年 9 月。
- (5) “第二十九届宇航学术会议”，俄罗斯，莫斯科，2005 年 1 月。

本书篇章结构由前言、7 个章节、结论和参考文献组成，其中第 1、4、5、6、7 章为核心章节，集中反映了基于功能系统理论的飞行器智能控制系统概念综合的思想以及作者建立的预测和控制算法。

第 1 章进行了飞行器智能控制系统研究进展的分析与综述，简要回顾了基于动态专家系统的飞行器自适应控制系统和当今广泛采用的飞行器建议控制系统；在分析智能系统发展趋势的基础上，推荐了建立在阿诺辛提出的功能系统理论基础上的最具发展前景的智能系统（以下简称“功能—智能系统”），给出了结构框图，介绍了该智能系统核心模块的预测算法、控制算法、目标综合和动态专家系统的构建问题，重点放在目标综合模块上。为了使读者在开篇就能对本书有概貌性的认识，在该章中还简要介绍了作者将功能系统理论用于飞行器控制取得的最新成果，着重描述了功能—智能控制系统结构框图和关键部分的实现过程。在对智能控制系统的功能结构及其算法保障进行分析的基础上，给出了在实际应用中建立工作有效、性能良好的智能系统的建议。

第 2 章回顾了广泛采用的传统智能组件，即人工神经网络、进化计算、专家系统和模糊控制，对它们的基本工作原理、主要特点及研究发展的新方向进行了简要介绍。由第 1 章的分析结果表明，传统智能组件及其融合技术将用于功能—智能系统中各子功能系统的独立实现。

第 3 章对自组织方法理论作了专门的介绍，给出了自组织建立的原则和自组织算法实现的主要步骤。自组织方法是一种智能性的数学建模方法，是作者建立预测模型所依据的主要理论基础。该章的内容能使读者更好地理解作者提出的预测算法的数学基础，也是深入掌握自组织方法的入门性知识。

第 4 章是关于无人飞行器智能控制系统的行动感知器的研制。该章介绍了作者提出的建立预测模型的独创性算法，是本书的核心章节之一。预测模型是行动感知器的基础，预测算法的紧凑性和快速作用性是对无人飞行器智能控制系统算法保障的特殊要求，这是无人飞行器运行的特点所决定的。根据这些要求，对自组织和短时间序列的建模方法进行了分析。考虑到这些要求，选择了使用 Demark 趋势项建立算法。Demark 趋势项的特点是实现简单、紧凑，其建立要求的时间最少。但是传统的 Demark 趋势项精度不高，很难运用在无人飞行器高度机动的情况下。因此，在实际应用中，Demark

趋势项只可以在无人飞行器接近直线的飞行段使用。为了适用于高度机动的飞行器,作者提出了用非线性项对 Demark 趋势项进行修正,而非线性修正项用自组织算法获得,这样就得到了 Demark 趋势项与自组织算法相结合的改进型算法。改进型算法提高了预测模型建立的精度,同时又满足紧凑性和快速性要求,可以在无人飞行器机载数字计算机计算时间和机器存储容量有限的条件下建立预测模型。

第 5 章介绍了研制的无人飞行器智能控制系统的体系结构以及上层控制中的目标综合算法和下层控制中的目标实现算法,是本书的又一核心章节。目标的综合是实现场景选择的决策算法,决策依据评价函数实现,在评价函数中包含了适合于具体任务的总准则,它们按照技术系统决策方法的经典理论来选择。而下层控制保证以最优方式实现上层控制所选出的最优场景,为此系统采用了极大值原理和变分法。但即使对于线性被控对象,非线性控制算法的实现也非常复杂,对高阶的非线性对象,更是难以实现,因此,提出了削减计算量而不损失精度的任务。作者采用基于微分几何理论的反馈线性化方法实现了控制对象模型的精确线性化,从而在无人飞行器运行的过程中划分出使用线性数字模型和对应非线性调节器的区域,这些线性模型与原非线性模型完全吻合,因而不损失精度。在此基础上,设计了飞行器运动控制的继电调节器,使得最优控制的算法可以针对对象的线性化模型设计。分别针对采用主发动机推力控制和推力矢量/气动力复合控制的导弹,应用上述反馈线性化方法,得到了两种控制方案,将其用于对机动目标的制导,达到了良好的制导精度。

第 6 章介绍了对返回大气层式无人飞行器控制系统的算法组成的研究结果。通过对无人飞行器智能控制系统的系统生成的分析,可以对无人飞行器生命周期的各个阶段算法保障的使用给出建议。作者研究了返回大气层式无人飞行器运行的三个基本阶段,对每个阶段运行的特殊性进行了分析,在分析的基础上实现了行动感知器中特殊算法保障的选择。

第 7 章是关于作者所研制算法的仿真结果,是算法有效性的直接证明。所给出的结合 Demark 趋势项和自组织算法的改进型预测算法的有效性,以惯性导航系统误差预测任务和无人飞行器智能控制系统行动感知器中飞行器测量系统结构的选择任务为例进行了演示,并进行了改进型算法与传统的自组织算法和传统的线性算法的比较分析。除了数学仿真外,还使用从实际批量生产的导航系统的半实物试验中获得的数据进行了仿真。将无人飞行器智能控制系统行动感知器在系统生成的三个基本阶段的预测算法的仿真结果与自组织方法和线性趋势项的预测结果进行了比较。此外,还进行了发动机推力矢量/气动力复合控制导弹对垂直平面内机动目标实施制导过程的仿真,达到了良好的制导精度,验证了所提出的基于微分几何理论的反馈线性化算法的有效性。以上各项仿真的结果共同证实了所研制的预测及控制算法具有足够高的精度,可以将它们用于飞行器功能—智能控制系统中。

结论部分对作者所取得的主要创新工作成果再次进行了总结。

目 录

第 1 章 飞行器智能控制系统研究进展	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 飞行器控制系统中智能控制的前期应用	(3)
1.2.1 带预测模型的专家系统	(3)
1.2.2 神经网络自适应系统	(4)
1.2.3 咨询式智能系统	(6)
1.3 “功能—智能系统”的概念综合	(7)
1.3.1 “功能—智能系统”结构	(7)
1.3.2 目标综合模块	(8)
1.3.3 动态专家系统	(10)
1.3.4 实现行动感知器的预测算法	(12)
1.3.5 智能系统中的非线性控制算法	(14)
1.4 “功能—智能系统”在飞行器控制中实现的最新成果	(15)
1.4.1 系统实现框图	(15)
1.4.2 上级控制中的目标综合算法	(15)
1.4.3 下级控制中的控制算法	(16)
1.4.4 仿真研究结果	(17)
1.4.5 结论	(18)
1.5 本章内容小结	(19)
第 2 章 传统智能组件	(20)
2.1 人工神经网络	(20)
2.1.1 神经网络结构及学习方法	(21)
2.1.2 神经网络的工作方式	(23)
2.1.3 前向神经网络数学模型	(23)
2.1.4 神经网络发展趋势	(26)
2.2 进化计算	(27)
2.2.1 遗传算法的基本思想和特点	(27)
2.2.2 遗传算法的基本原理	(28)
2.2.3 遗传算法的设计与实现	(29)
2.3 专家系统	(35)

2.3.1	专家系统的基本结构	(35)
2.3.2	专家系统的知识表示法	(36)
2.3.3	专家系统的推理机制	(38)
2.4	模糊控制	(40)
2.4.1	模糊理论基础	(41)
2.4.2	模糊模型	(45)
2.4.3	模糊控制器	(46)
2.5	传统智能组件融合技术研究	(49)
2.6	本章内容小结	(50)
第3章	预测及模型自组织方法	(51)
3.1	预测和预测的方法	(51)
3.1.1	预测任务的提出	(51)
3.1.2	以控制理论的术语来提出预测的任务	(51)
3.1.3	短期预测和长期预测	(52)
3.1.4	预测的试验方法	(53)
3.1.5	需要的先验信息	(53)
3.2	启发式自组织	(54)
3.3	“自组织”术语的其他应用	(54)
3.4	模型自组织的基本原则	(55)
3.4.1	数学模型自组织	(55)
3.4.2	模型自组织算法	(63)
3.4.3	基函数形式和方程类型的选择	(71)
3.4.4	筛选的准则	(75)
3.4.5	正规性准则形成方法	(84)
3.4.6	MITA 理论的基本状况	(87)
3.5	本章内容小结	(90)
第4章	飞行器智能控制系统中行动感知器的建立	(92)
4.1	自组织方法建模的应用	(92)
4.2	短时间序列建模的应用	(96)
4.2.1	时间序列的描述	(96)
4.2.2	专家判断	(97)
4.3	改进型 Demark 趋势项建模	(99)
4.4	本章内容小结	(102)
第5章	飞行器智能控制系统控制算法的研制	(103)
5.1	控制算法的体系结构	(103)
5.2	体系上层中的决策	(104)
5.3	体系下层中的控制回路结构	(108)
5.4	体系下层中的最优控制律	(109)

5.5 基于微分几何理论的对象模型精确线性化	(111)
5.6 飞行器控制继电调节器的研制	(117)
5.7 本章内容小结	(121)
第6章 返回大气层式无人飞行器智能控制系统的“系统生成”	(122)
6.1 问题的提出	(122)
6.2 返回大气层式无人飞行器智能控制系统的运行过程	(122)
6.3 智能系统“系统生成”的基本阶段	(124)
6.4 返回大气层式无人飞行器运动的各阶段行动感知器的运行过程	(125)
6.5 本章内容小结	(126)
第7章 算法的仿真研究	(128)
7.1 用改进型 Demark 趋势项建立惯性导航系统误差预测模型的数学 仿真	(128)
7.1.1 惯性导航系统输出速度参数及误差修正	(129)
7.1.2 惯性导航系统输出速度参数误差的预测模型	(129)
7.1.3 仿真结果	(130)
7.2 基于改进型 Demark 趋势项进行导航系统结构选择的数学仿真	(134)
7.3 返回大气层式无人飞行器“系统生成”三个阶段中行动感知器实现的 数学仿真	(135)
7.4 发动机推力矢量/气动力复合控制导弹对机动目标实施制导的数学 仿真	(138)
7.4.1 导弹动力学模型	(138)
7.4.2 导弹数学模型的反馈线性化及控制律设计	(139)
7.4.3 仿真中对系统实际条件的考虑	(140)
7.4.4 仿真结果	(141)
7.4.5 结论	(151)
7.5 本章内容小结	(152)
结论	(153)
参考文献	(155)

第1章 飞行器智能控制系统研究进展

1.1 引言

在现代科学技术飞速发展的今天,控制科学与技术学科面临巨大的机遇与挑战。传统控制理论正遭遇前所未有的困难,主要体现在以下几个方面:第一,对象的复杂性、高度非线性和不确定性导致系统辨识和建模的困难,在控制系统中总存在未建模动力学,它需要通过学习过程或者实时地获得缺失信息来解决建模问题;第二,线性系统控制理论在解决复杂的对象特性和复杂的控制任务时面临困难;第三,在一系列的情况下控制问题中的函数关系经常不能被解析地表达,往往需要利用专家判断、经验和知识、定性、逻辑、语言等新途径来解决问题。

与此同时,控制论、信息论,特别是在人工智能研究中的成果衍生了进行复杂非线性控制系统建模、控制及优化的一些新的手段。在这样的背景下,在现代控制理论、人工智能、神经网络及微电子学等学科的交叉发展趋势中,形成并积极发展了研究开发的新领域——智能控制。智能控制系统是目前解决复杂对象控制问题的最好手段。

与许多先进学科的概念一样,智能控制系统直到目前都没有一个公认的明确定义,人们根据它的技术特征和发展历程给出了一个定义:智能控制系统是能够在复杂、不确定环境中,自主地运用定性与定量相结合的方法,实行信息处理、决策优化与控制优化,从而能够有效地解决复杂与不确定任务的系统。其主要特点有:①智能控制通常是一个混合的控制过程,建立在数学和非数学的模型基础上,能更充分地使用关于对象和环境的知识,以预定的准则进行可靠的控制,如已知期望的轨迹、控制品质泛函、目标集合等;②智能控制是综合利用现代控制理论、人工智能、专家经验、神经网络、进化算法和计算机科学等新兴技术来协调解决复杂过程控制问题。

大约从20世纪80年代开始,传统上属于人工智能的思想开始在控制理论及实践中得到运用,文献[1]对此进行了总结。进入控制系统中的对应研制部分,通常被称为控制系统的智能手段,文献[2]列举了被广泛认可的传统智能组件,即神经网络、进化算法、专家系统、逻辑推理机制、模糊控制等。在文献[3,4]中详细介绍了神经网络算法的类型及其在机器人学、工艺过程控制、远程通讯、人工视觉系统(图像处理)、航空航天等领域的应用。将进行决策的神经元机制与逻辑机制相结合,可以使智能系统的功能更为强大。文献[5~11]介绍了得到广泛应用的各种进化算法及其在移动机器人运动路线布局和实时控制任务中的应用。其中,文献[9]指出,进化算法与神经元

网络具有高并行性,其结果是更高的快速性,这对于实时完成辨识和控制任务而言是非常重要的。不过,文献[10]也指出了其局限性:当前的人工神经网络所模拟的“眼睛的功能多于大脑的功能”;类似的,进化算法模拟的是达尔文类型的自然现象的组织,却还不是创造性过程。文献[12]给出了专家系统的定义。文献[13~18]比较系统地介绍了在专家系统中为表示知识和解决问题,通常使用的基于规则和逻辑推理的有关机制,其中较有前景的是使用对象—逻辑语言、框架逻辑和逻辑编程的基于知识的系统。由于保存在知识库中且决策基于的大量信息是不准确、不完全或者不完全可靠的,因此,带模糊逻辑的专家系统得到越来越广泛的应用。文献[19]介绍了基于模型和分析方法的现代模糊控制,常用的有 Mamdani 模型和 T-S 模型。

现代智能控制系统建立在多种概念和理论之上,还没有建立智能控制系统的标准体系结构。早在几十年前,在维纳(Винер Н)的著作中就出现了有关智能机雏形的概念。随着用信息量来评价的系统复杂度水平的增加,应该尝试使用、建立和发展智能化水平更高的系统和控制组件。在文献[28~30]中提出了建立智能控制系统的五种原则:①信息交换的原则:系统与变化的外部世界相互作用(世界模型),获得信息,补充知识,用于决策;②用于自学习和自组织的智能控制系统的开放性原则:在获得知识的过程中系统的智能组件形成充分符合实际环境的模型;③预测变化的原则:在各种假设前提下,对世界(环境和系统)变化的动态行为进行预测,以评价和挑选最可取的控制;④智能化程度降低而精度增长的原则:存在多级结构,随着系统中控制级别的提高而提高智能化程度和降低对精度的要求;⑤局部性递减原则:在工作中如果较高级别的控制受到破坏,应允许部分损失系统的性能。

文献[1]中将智能系统划分为四类,即辨识控制系统、自适应控制系统(带自调整的系统)、不含目标综合的智能控制系统和带目标综合的智能控制系统,其智能化程度逐步增加。其中,带目标综合功能的智能控制系统是智能程度最高的,本质上区别于前三类的智能控制。对于这种智能程度较高的系统,按照前面给出的原则④,可考虑智能控制的三个级别:①控制上级:目标综合;②控制中级:寻找达到上级中给定的目标的途径;③控制下级:实现中级所选定的途径(以求达到上级所给定目标)的方法。

在文献[22, 26, 27]中讨论了上级、中级和下级控制中的算法,并提及了由机载计算机所支持的传统机载算法和指示保障的结构局限性。

在现在和最近的将来,基于这三个级别的智能控制系统将按照下列方式工作:

(1) 提出确定的工作目标。从具体的标准情景的确定集合中选择一个情景,目标综合任务的解决完全放在操作员身上,机载算法和指示保障的设计者仅为操作员建立外部状况的信息模型,并在机舱的控制区域安放信号引入的专门机构。

(2) 分析达到目标的可能方式,并从中选择最可取的方式。中级控制任务的解决由对应标准情景的机载快速建议专家系统完成,该系统下一步发展的趋势是使用逻辑推论的方法。

(3) 按选择的方法执行操作以实现目标。下级控制任务的完成在硬件上主要由传统的结构支持,尽管在这一级别应用智能组件也是可能和适宜的。

相应于智能系统建立的上述原则和发展趋势,20 世纪 90 年代,在阿诺辛提出的功

能系统理论基础上,前苏联建立了一种智能系统的概念,即“功能—智能控制系统”。该智能系统综合了动态专家系统,用于预测的自组织方法、决策,非线性自适应控制和估计,以及目标形成算法,并将其连接起来置于功能系统的框架中,成为了最具发展前景的智能系统之一,代表了智能控制系统发展的一个重要方向。对智能系统的理论和实践而言,使用功能系统理论的主要优点是功能系统的通用体系结构,以及被进化所磨砺的功能系统的机制。

飞行器是非线性、多变量和不确定性复杂对象,是智能控制发挥潜力的重要领域。本章主要对俄罗斯学者和作者在这个领域的研究成果及发表文献进行综述,也介绍了一些中国学者和欧美学者的研究成果。在本章的最后,简要介绍了作者将“功能—智能系统”用于飞行器控制所取得的最新成果,以使读者在开篇就能对全书的核心内容有概貌性的认识。

1.2 飞行器控制系统中智能控制的前期应用

飞行器智能系统的综合是一项复杂而艰巨的任务,适宜于分步骤解决。前期阶段是在已有的自适应控制系统研制成果的基础上进行的,主要是把专家系统用于飞行器控制。为了建立动态对象的专家模型,考虑过使用各种智能技术,如模糊逻辑的方法、逻辑推论的方法、神经元控制和进化模拟算法等。

这里介绍的控制式智能系统和咨询式智能系统已在实践中获得应用,它们展示了实现不同智能化级别的飞行器智能系统的一系列观点。

1.2.1 带预测模型的专家系统

在文献[20]中,给出了使用专家系统来建立自适应控制系统的例子。在运行的过程中,控制对象和全系统的动态性能可能随机地改变,这将导致系统动态品质和控制精度降低,因此需要使用预测模型,其算法要使用参数估计的“在线”程序。预测模型可以用各种方式实现,实现方式之一是使用各周期时刻的统计信息和由研制者预先确定的最优模型选择准则,在系统运行的各种条件下获得适宜的预测模型。这些模型的组合形成了动态专家系统中控制对象的模型库。对于每个预测模型,可以找到满足控制品质指标的调节器参数调整的对组组合。这样可以建立调节器调整库,它们随预测模型进行切换。

在系统的控制主回路中带有自调整、自适应比例积分调节器,带有控制对象模型的隐含参数估计和调节器参数的专家调节。控制对象是飞行器机电驱动装置。在通用软件 Matlab-simulink 环境中进行的仿真结果表明,用该类型专家系统建立起来的自动控制系统,在控制对象有实质性参数扰动的条件下,具有令人满意的静态和动态品质性能。系统的结构框图如图 1-1 所示。图中: K_1, K_2 为比例积分调节器的调节值; $g(t)$, $u(t)$, $y(t)$ 分别为输入控制对象的参考信号、控制作用以及控制对象的输出信号; $\odot$ 为调节器参数调整库中的任一组合; $\odot^*$ 为对应于最佳预测模型的调节器最佳调整组

合; $\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_N$ 为对应于预测模型组合之中的模型 1, 模型 2, $\dots$, 模型 N 的比例积分调节器的调节矢量; n_M^* 为在系统运行的具体时刻最佳预测模型的下标; Index_P 为上述时刻在调节器调整库中选出的序数。

自适应回路的工作算法可以表示成逻辑规则组的形式: 若 $n_M^* = \text{argmin}(I_n)$, 则 $\text{Index}_P = n_M^*$; 若找到 Index_P , 则 $\Theta^* = \Theta_{\text{Index}_P}$ 。其中, I_n 为预测模型符合度评价准则。

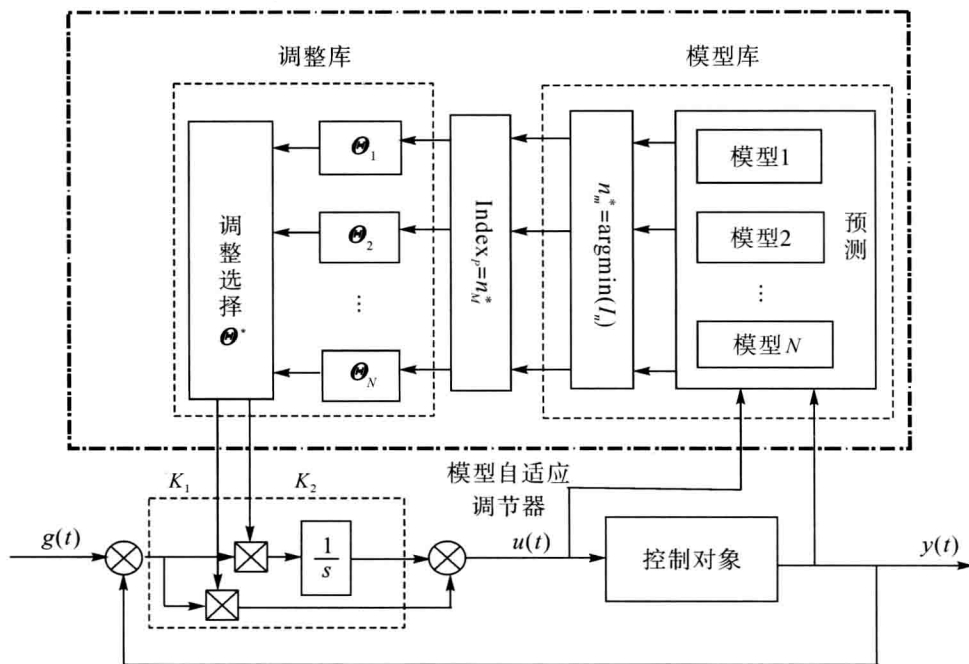


图 1-1 参数自调整专家系统结构框图

1.2.2 神经网络自适应系统

在控制系统中, 使用智能组件的另一个尝试是将神经网络与基于知识的系统(专家系统)结合使用。神经网络与专家系统并行工作, 在起始时刻, 专家系统被全面启动并负责控制。随着时间的推移, 神经网络从专家系统和测量中学习, 进而接管控制, 保证了更高的质量。专家系统保证运行的鲁棒性, 而神经网络保证对对象特有条件的精确调节, 而这些条件是不能预先以足够的精度把握的。如果条件发生剧烈的改变, 那么系统重新将控制转交给专家系统, 并且重新开始学习的过程。

在这个系统中, 专家系统保证了更高的智能程度, 但从另一方面来看, 它的准确度更低。神经网络在低智能水平上可产生更准确的控制, 如引言中的原则④。文献 [21] 对神经网络自适应系统控制飞行器进行了阐述。

图 1-2 给出了使用自适应神经网络控制系统的体系结构。在自适应控制系统中包括基控制系统、对基控制系统参数实现实时辨识的神经网络、具有期望性能指标的系统自适应基准模型(AEM)、包含基于基控制系统参数辨识对 AEM 参数实施调整算法的逻辑计

算单元 (БЛБ) 和实时自适应单元。图中: u_0 , u_{ad} , u 分别为来自基调节器的控制信号、来自自适应单元的补充校正信号、总控制信号; y_0 , $\hat{y}_0$, y_r 分别为控制对象输出信号、输出信号辨识值、来自 АЭМ 的期望值; $\hat{e}$, e 分别为基系统和神经元辨识器间的误差信号、基控制系统和基准模型响应间的偏差; r 为输入信号。

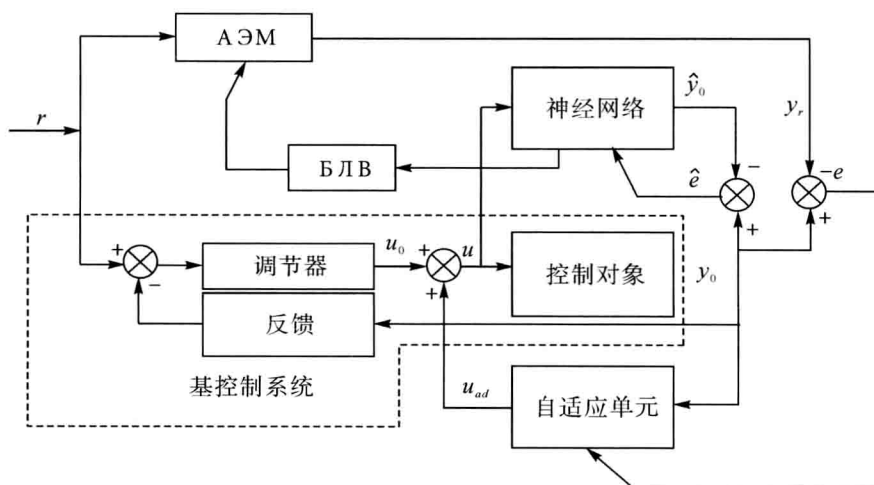


图 1-2 带有神经元自适应的控制系统

在系统工作条件改变时,控制对象的动态性能参数将具有大范围的分散性,这样就不能够使用具有定常基准模型的基控制系统。可以使用如图 1-2 所示的带有自适应基准模型的控制系统的,模型的参数在逻辑计算单元中得到估计,逻辑计算单元使用了神经元辨识器实时获得的结果。基控制系统参数的辨识由具有单层静态神经网络体系结构的神经元辨识器实现,静态神经网络由具有线性激活函数的 4 个神经元构成。在学习阶段(离线),神经元辨识器在权系数调整过程中按照学习指标最小化形成对给定学习数据的最优逼近。在辨识阶段(在线),神经元辨识器在每个时间间隔上适应控制系统动态性能的改变。在系统工作时,包含多层神经网络和补偿器的自适应单元形成校正信号,补偿在设计时不可能预先考虑到的控制系统的不确定性和非线性。自适应单元根据基系统和基准模型响应间的误差信号工作,不要求离线学习。该自适应控制系统保留了基控制系统的现有结构,技术实现简单,系统构造的原则可以使用在现有的和未来的控制系统中。

用上述方法设计了飞行器纵向运动自适应控制系统,其有效性已由在 Matlab-simulink 环境中进行的仿真得到验证。

综上所述,可以得出以下结论:

- (1) 在实现自适应控制时最有前景的技术是基于使用智能控制系统概念的技术。
- (2) 上述智能系统具有模块化的结构,允许在总体上不改变信息—算法布局的条件下对其进行改变和扩展,这样就不会对多处理器计算网络的组织和计算元件本身提出额外的要求。

(3) 所提出的算法可以采用并行处理的各种方法来组织,这满足了实际应用中对算法快速性原则的要求,包括计算程序的并行性、功能—算法结构的并行性、算法层次结构的并行性。

1.2.3 咨询式智能系统

在文献 [22~25] 中介绍了机载快速建议专家系统,它是咨询式智能系统的代表之一,工作于实际的机载信息环境,并针对外界环境改变的可能场景的实际条件给出建议,其目的是提高战斗机的有效性。高级和中级水平的机载快速建议专家系统应致力于在机载算法中建立逻辑推论和假设产生的操作程序,它们符合人对推断正确性的表示,以及在机上形成的信息环境中对推断进行的可能性的表示。

20 世纪 80 年代,欧美开始大力研制咨询式智能系统,除了完善飞机的空气动力学、发动机和机载设备的性能外,还将很大一部分的力量放在航空综合体“系统组成核心”的智能成分的完善上。该智能成分在机载算法中得以实现,并与传统的算法一起建立功能上完整的“机组—机载仪器—飞行器”综合体,以解决首要的任务——战斗机的出击。已有的机载快速建议专家系统的研究原型基本上处于中级和低级控制水平。在上述文献中,从系统的观点分析了实际有用的机载快速建议专家系统,并考虑了它们知识库的结构。

标准情景机载快速建议专家系统的机载算法保障及指示保障设备的建立通常按下列步骤实现:①在应用领域的概念化基础上划分出标准情景和按照原因—结果关系排序的相应标准情景的问题子情景;②构造知识库和研制机载智能系统的基本模板;③在模拟仿真系统中完善知识库。

设计者在机载算法保障和指示保障设备中应用人工智能和专家系统的元素时,给自己提出的任务是将其应用在“选择达到给定目标的方法”和“实现解决当前问题子情景的方法”的水平上。对每个标准情景,将有对应的机载快速建议专家系统、机载测量和执行机构的专家系统在进行工作,它们保证最大程度地完整获得当前时刻关于外部环境和机载设备状态的必要信息,最大程度地准确执行系统做出的决策。

智能系统的有效性及其研制的适宜性在很大程度上取决于知识库的结构、符合度和完全度。对标准情景的每个子情景,需要建立其知识库。对标准情景的每个子情景,列出对象—活动者和有用事件的清单。将这一标准情景的每个子情景用数学模型的集合表示,该集合描写了子情景参与者们的空间位置,预测位置的时间变化,并确定有用事件可能到达的时刻。该集合即对应标准情景的子情景的场景。

通常要求用一系列数学模型对子情景进行预先研究,这些模型是以最优控制、博弈论的数学问题和决策的各种问题的形式来表述的。将结果中获得的或者在模拟数学仿真中挑选出的子情景的“合理解决方案”放入数学模型,这些数学模型就是机载快速建议专家系统知识库的模块之一。对外界和机载环境进行分析,并借助于同样放置在快速建议专家系统知识库中的产生式规则,为飞行员提供相应的建议。这样机载快速建议专家系统工作所需的知识以规则和数学模型的形式放置,并按照不同场景集结在一起。

用模糊关系矩阵的方法获取知识在建立知识库的过程中最常采用。在知识获取后形