



中航工业首席专家
技术丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目
中航工业科技与信息化部组织编写

杨朝旭 编著

启发式算法与 飞行控制系统优化设计

HEURISTIC ALGORITHMS
AND THE OPTIMIZING DESIGN
OF FLIGHT CONTROL SYSTEM

航空工业出版社

中航工业首席专家技术丛书

“十二五”国家重

启发式算法与 飞行控制系统优化设计

杨朝旭 编著

航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

本书介绍了进化算法、进化策略、粒子群算法、多目标优化算法和蚁群算法等现代启发式算法,围绕如何将优化算法应用于飞机飞行控制系统参数优化及飞行航路规划问题展开讨论。本书共计 11 章,内容包括飞机的常用飞行品质和飞行控制系统优化策略、提高遗传算法搜索效率的改进措施、粒子群算法和进化策略的改进措施及其在飞机飞行控制系统优化设计中的应用、基于多目标进化算法的飞行控制系统优化设计、进化算法在多操纵面控制分配中的应用、基于蚁群算法的路径规划和多机任务分配等。

本书以工程应用为导向,没有过多地涉及优化算法的理论研究工作,主要从使用角度对现代启发式算法进行工程化改造,以提高飞行控制系统设计效率 and 设计质量。

本书可作为与飞机飞行控制专业有关的教师和硕士、博士研究生的教学参考书,也可供有关专业的科技人员参考。

图书在版编目 (C I P) 数据

启发式算法与飞行控制系统优化设计 / 杨朝旭编著

—北京:航空工业出版社,2014.11

(中航工业首席专家技术丛书)

ISBN 978-7-5165-0608-0

I. ①启… II. ①杨… III. ①启发式算法—应用—飞行控制系统—系统设计 IV. ①V249

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 256232 号

启发式算法与飞行控制系统优化设计

Qifashi Suanfa yu Feixing Kongzhi Xitong Youhua Sheji

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑 2 号院 100012)

发行部电话: 010-84936597 010-84936343

北京世汉凌云印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2014 年 11 月第 1 版

2014 年 11 月第 1 次印刷

开本: 787×1092 1/16

印张: 20

字数: 513 千字

印数: 1—2000

定价: 120.00 元

总 序

航空工业被誉为“现代工业之花”，是国家战略性高技术产业，同时也是技术密集、知识密集、人才密集的行业。中国是世界航空产业格局中的后来者，而中航工业作为支撑中国航空工业发展的核心力量，履行国家使命，必须大力推进自主创新，必须在科技创新和知识创新上有所作为。

从 2009 年开始，中航工业按照航空技术体系，在科研一线技术人员中陆续遴选出近百位集团公司级“首席技术专家”。此举既是集团公司对这些技术人员技术水平和能力的肯定，也意味着集团公司赋予了他们更大的责任和使命。我们希望这些技术专家在今后的工作中，要继续发挥科研技术带头人的作用，更加注重学习和创新，不断攀登航空科技新的高峰；要坚持潜心科研，踏实工作，不断推动航空科技进步；要带队伍、育人才，打造高水平的科研队伍，努力培养更多的高层次专业技术人才，为中航工业的发展做出更大的贡献。

21 世纪企业的成功，越来越依赖于企业所拥有知识的质量，利用企业所拥有的知识为企业创造竞争优势和持续竞争优势，这对企业来说始终是一个挑战。正因如此，“知识管理”在航空工业等高科技产业领域得以快速推广和应用。依照这个思路，将首席技术专家们所积淀和升华出来的显性或隐性知识纳入知识管理体系，是进一步发挥其人才效益的重要方式，也是快速提升中航工业自主创新能力的的重要途径。

知识管理理论的核心要义，就是把知识作为一种重要资产来进行管理，正如知识管理的创始人斯威比所说：“知识资本是企业的一种以相对无限的知识为基础的无形资产，是企业核心竞争能力的源泉。”如果专家们把其掌握的各类显性或隐性知识，用书面文字的形式呈现出来，就相当于构建了一个公共资料库，提供了一个交流平台，可以让更多的人从中受益——这就是出版这套“中航工业首席专家技术丛书”的初衷。

集团公司的这近百位“首席技术专家”，基本覆盖了航空工业的所有专业。每位专家撰写一部专著，集合起来，就相当于一个航空工业的“四库全书”，很有意义。在此，我要特别感谢这些专家们，他们在繁重的科研生产任务中，不辞辛劳地撰写出了自己的专著，无私地将自己的宝贵经验呈现给大家，担当起了传承技术、传承历史的责任。

相信这套丛书的出版，会使更多的航空科技工作者从中获益，也希望在一定程度上能助力中航工业的自主创新，对我国航空工业的科技进步产生积极影响。



中国航空工业集团公司董事长

前 言

现代飞机的飞行包线不断扩展，飞行性能不断提升，飞行控制系统优化设计需要做大量的仿真计算和人工试凑工作。在仿真计算过程中，通常考虑的设计指标相对较少，而且只在某些模态和某一两项指标上进行优化设计，采用这种设计方法进行飞行控制系统设计效率比较低，所得结果也不能保证是最优的。随着计算机技术和优化算法的发展，人们开始考虑将优化理论应用于控制系统设计之中，首先用先进控制理论设计控制器结构，其次利用优化算法对控制器参数进行搜索，最后得到一个满足要求的控制系统，从而提高设计效率和质量，这就产生了一个研究热点——基于优化算法的控制系统计算机辅助设计。

在众多优化算法中，类比于自然进化规律而产生的启发式算法发展前景较好，应用领域广泛，在飞行控制参数优化领域也受到了较多的关注。欧美航空强国投入了极大的精力开发基于启发式算法的飞行控制系统优化设计工具和辅助设计软件，并已取得了巨大的成功。国内也有一些学者致力于基于启发式算法的飞行控制系统优化设计的研究，但在基于优化算法的飞行控制系统优化软件开发方面只是刚刚起步，和美德等航空强国相比仍然存在较大差距。为了提高我国飞行控制系统设计水平，缩短系统设计周期，降低飞行控制系统设计人员的劳动强度，开展基于启发式算法的飞行控制系统优化设计研究是一项具有重要工程意义和应用价值的工作。

有鉴于此，中航工业成都飞机设计研究所和国内有关高校合作开展了基于启发式算法的飞行控制系统优化研究，取得了一些研究成果并在实际中得到了初步的应用，本书就是对我们几年研究工作的总结。本书围绕如何将飞机的飞行品质评价引入到进化算法从而实现对飞行控制系统进行优化、如何选择启发式算法的控制参数和寻优区间、如何提高进化策略的搜索精度和跳出局部极小的能力等问题展开，探讨了进化算法、多目标优化算法、粒子群算法的改进措施及其在飞行控制系统参数优化中的应用以及进化算法在多操纵面控制分配中的应用问题，并对基于蚁群算法的路径规划和多机任务分配进行了讨论。

本书以工程应用为导向，没有过多地涉及优化算法的理论研究工作，对于算

法的改进也是从使用角度进行工程化改造，旨在抛砖引玉，让更多的科技工作者关注基于启发式算法的飞行控制系统优化设计研究，从而产生更多更好的成果，推动我国飞行控制系统设计技术的发展。

西北工业大学自动化学院章卫国教授、李广文副教授对本书进行了认真的审阅，提出了宝贵的修改意见，在此表示感谢。

感谢所引用参考文献的作者，他们的出色工作为本书打下了坚实的基础。

限于作者水平，书中难免有疏漏和不妥之处，欢迎各位读者批评指正。

作者

2014 年 2 月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 现代飞行控制系统的特点	(1)
1.1.1 现代飞行控制系统的特点	(1)
1.1.2 现代飞行控制系统设计的难点	(3)
1.2 启发式算法综述	(4)
1.2.1 遗传算法综述	(5)
1.2.2 进化策略综述	(12)
1.2.3 多目标进化算法综述	(13)
1.3 基于启发式算法的飞行控制系统优化综述	(16)
1.3.1 基于启发式算法的飞行控制系统优化综述	(17)
1.3.2 多目标参数综合方法简介	(18)
1.3.3 CONDUIT 简介	(20)
1.4 本书的研究内容	(21)
1.5 本章小结	(23)
第 2 章 飞机飞行品质常用评价准则和飞行控制系统优化策略	(24)
2.1 飞机飞行品质规范的基本体制	(24)
2.1.1 飞机的分类	(24)
2.1.2 飞行任务阶段的种类	(25)
2.1.3 飞行品质的等级	(26)
2.2 飞机飞行品质的常用评价准则	(28)
2.2.1 等效系统的概念、原理和方法	(28)
2.2.2 飞机法向(飞行轨迹)轴的要求	(29)
2.2.3 飞机纵向速度轴的要求	(30)
2.2.4 飞机俯仰轴的飞行品质评价准则	(31)
2.2.5 飞机滚转轴的飞行品质评价准则	(41)
2.2.6 飞机航向轴的飞行品质评价准则	(43)
2.3 飞行控制系统优化策略和参考模型选择	(45)
2.3.1 基于参考模型的飞行控制系统进化算法优化策略	(45)
2.3.2 参考模型的选择原则	(47)
2.4 多目标进化算法在飞行控制系统优化中应用时的问题	(52)
2.4.1 大包线范围内飞行控制系统优化设计点的选择	(52)
2.4.2 使用多目标进化算法对飞行控制系统进行优化时偏好信息的处理	(52)

2.5	基于动压的参数范围快速界定和调参方法	(53)
2.6	本章小结	(54)
第3章	基于直接搜索的遗传算法及其在飞行控制系统中的应用	(55)
3.1	遗传算法概述	(55)
3.1.1	遗传算法的基本概念和原理	(55)
3.1.2	适应度函数的选择及其尺度变换	(57)
3.1.3	遗传操作的具体方法	(59)
3.1.4	小生境技术	(61)
3.2	基于模式搜索法的遗传算法	(62)
3.2.1	模式搜索法简介	(63)
3.2.2	基于模式搜索法的遗传算法	(63)
3.2.3	基于模式搜索法的遗传算法数字仿真结果	(66)
3.3	基于旋转方向法的遗传算法	(69)
3.3.1	旋转方向法简介	(69)
3.3.2	基于旋转方向法的遗传算法	(70)
3.3.3	基于旋转方向法的遗传算法数字仿真结果	(72)
3.3.4	在飞行控制系统参数优化中的应用示例	(75)
3.4	基于单纯形法的遗传算法	(77)
3.4.1	单纯形法简介	(77)
3.4.2	基于单纯形的遗传算法	(78)
3.4.3	基于单纯形的遗传算法数字仿真结果	(80)
3.5	3种基于直接搜索的遗传算法的对比	(83)
3.5.1	3种基于直接搜索的遗传算法搜索速度的对比	(83)
3.5.2	3种基于直接搜索的遗传算法搜索精度的对比	(83)
3.6	遗传算法在无人机路径规划中的应用	(84)
3.6.1	协同逆推优化控制问题	(84)
3.6.2	协同逆推优化控制求解	(87)
3.6.3	仿真	(88)
3.7	本章小结	(89)
第4章	基于正交设计和均匀设计的进化算法及其在飞行控制系统优化中的应用	(90)
4.1	基于正交设计的进化算法	(90)
4.1.1	正交设计	(90)
4.1.2	基于正交设计的进化算法	(93)
4.1.3	仿真验证	(94)
4.2	基于均匀设计的进化算法	(96)
4.2.1	均匀设计简介	(96)

4.2.2 基于均匀设计的进化算法	(98)
4.2.3 仿真验证	(98)
4.3 基于正交设计的进化算法和基于均匀设计的进化算法对比分析及改进	(101)
4.3.1 基于正交设计的进化算法和基于均匀设计的进化算法的对比分析	(101)
4.3.2 基于小生境的改进正交设计进化算法	(102)
4.3.3 仿真验证	(103)
4.4 基于正交设计的小生境遗传算法在飞机飞行控制系统中的应用	(104)
4.5 本章小结	(107)
第 5 章 基于反馈机制和混沌变异的改进进化策略及其在飞行控制系统优化中的 应用	(108)
5.1 基于反馈机制的改进进化策略	(108)
5.1.1 (μ, λ) -ES 基本步骤	(108)
5.1.2 基于反馈机制的进化策略	(109)
5.1.3 基于反馈和共享机制的进化策略步骤	(111)
5.1.4 数字仿真验证	(111)
5.2 基于反馈机制和混沌变异的进化策略	(114)
5.2.1 混沌及其运动特性简介	(114)
5.2.2 基于反馈机制和混沌变异的进化策略	(116)
5.2.3 数字仿真验证	(117)
5.3 基于反馈机制和混沌变异的进化策略在飞行控制系统优化中的应用	(119)
第 6 章 基于 Pareto 方法的多目标进化算法及其改进	(125)
6.1 多目标优化的基本概念	(125)
6.1.1 多目标优化的基本概念	(125)
6.1.2 多目标进化算法的设计要求	(126)
6.1.3 多目标进化算法性能指标	(127)
6.1.4 多目标进化算法的标准测试函数	(129)
6.2 非劣分类遗传算法及其改进	(131)
6.2.1 NSGA - II 算法	(131)
6.2.2 NSGA - II 的缺点及改进思路	(133)
6.2.3 NSGA - II 中自适应 SBX 算子及其性能分析	(133)
6.2.4 Tent 映射性能分析及其改进	(135)
6.2.5 ACHNSGA - II 算法	(139)
6.3 一种改进的非劣分类差分进化算法 (INSDE)	(149)
6.3.1 差分进化算法基本原理	(150)
6.3.2 INSDE	(153)
6.3.3 数值仿真验证	(156)
6.4 强度 Pareto 进化算法 (SPEA2) 及其改进	(158)

6.4.1	SPEA2 算法	(159)
6.4.2	SPEA2 算法的缺点分析及其改进	(160)
6.4.3	仿真验证	(162)
6.5	强度 Pareto 混沌差分进化算法 (SPCDE)	(164)
6.5.1	SPCDE 算法的主要思想	(164)
6.5.2	SPCDE 算法的主要操作及步骤	(164)
6.5.3	数值试验与分析	(166)
第 7 章	粒子群算法及其在飞行控制系统优化中的应用	(169)
7.1	粒子群算法的基本理论	(169)
7.2	基于粒子群算法的飞机鲁棒控制律设计	(170)
7.2.1	问题提出的背景	(170)
7.2.2	μ 综合理论概述	(171)
7.2.3	存在弹性模态的飞机方程	(171)
7.2.4	使用粒子群算法优化加权函数	(173)
7.2.5	仿真	(174)
7.2.6	控制器降阶	(175)
7.3	多目标粒子群优化算法及其改进	(177)
7.3.1	基本多目标粒子群优化算法	(178)
7.3.2	自适应混合多目标粒子群优化算法	(178)
7.3.3	性能验证	(184)
7.4	本章小结	(188)
第 8 章	飞行控制设计多目标优化研究	(189)
8.1	多目标飞机低阶等效系统拟配	(189)
8.1.1	目标函数的选择	(190)
8.1.2	改进的精英保留策略	(191)
8.1.3	算法步骤	(192)
8.1.4	仿真算例	(192)
8.1.5	仿真结果分析	(195)
8.2	基于人机闭环参考模型的飞行控制多目标优化设计	(195)
8.2.1	基于参考模型的飞行控制设计优化策略	(196)
8.2.2	基于人机闭环 TDNS 准则和 CAP 准则的参考模型选择	(199)
8.2.3	基于人机闭环的飞行控制系统多目标优化	(208)
8.2.4	PIO 易感性分析	(212)
8.2.5	仿真结果分析	(212)
8.3	LQG/LTR 纵向飞行控制系统优化设计	(212)
8.3.1	LQG/LTR 设计的基本原理	(213)
8.3.2	基于参考模型的 LQG/LTR 飞行控制系统优化设计方法	(215)

8.3.3 基于参考模型的 LQG/LTR 设计方法仿真算例	(219)
8.4 基于含约束的输出反馈特征结构配置的飞行控制系统优化设计	(227)
8.4.1 含约束的输出反馈特征结构配置优化设计方法	(228)
8.4.2 基于多目标优化的含约束的输出反馈特征结构配置的优化设计	(235)
8.4.3 重构飞行控制系统的优化设计	(238)
8.5 本章小结	(243)
第 9 章 基于进化算法的飞机多操纵面控制分配技术	(244)
9.1 控制分配问题的基本内容	(244)
9.1.1 控制分配问题的数学描述	(244)
9.1.2 线性系统的分配描述	(246)
9.1.3 非线性系统的分配描述	(246)
9.1.4 执行器动态特性对控制分配的影响	(248)
9.2 广义逆分配法	(248)
9.2.1 伪逆法与加权伪逆法	(249)
9.2.2 广义逆分配法的分配效率	(250)
9.2.3 仿真算例	(252)
9.3 基于小生境遗传算法的伪逆分配法设计	(254)
9.3.1 问题的描述	(254)
9.3.2 基于小生境遗传算法的广义逆阵优化	(255)
9.3.3 仿真算例	(256)
9.4 基于小生境遗传算法的加权伪逆法优化设计	(258)
9.4.1 基于小生境遗传算法的加权伪逆法优化	(258)
9.4.2 仿真算例	(259)
9.5 基于遗传算法的控制分配系统设计	(260)
9.5.1 LQR - 加权伪逆法控制分配系统设计	(261)
9.5.2 仿真验证	(263)
9.6 本章小结	(264)
第 10 章 蚁群算法及其在无人机航路规划中的应用	(265)
10.1 蚁群算法简介	(265)
10.1.1 蚁群算法中的基本概念	(265)
10.1.2 蚁群算法中的基本流程	(267)
10.1.3 蚁群算法中的常见衍生算法	(267)
10.2 基于蚁群算法的路径规划	(270)
10.2.1 引入启发式搜索方向的蚁群算法	(270)
10.2.2 引入搜索代价的蚁群算法	(271)
10.2.3 改善信息素播撒规则	(272)
10.2.4 改进的算法流程	(272)

10.3	基于改进蚁群算法的路径规划	(272)
10.3.1	栅格 V 图方法	(272)
10.3.2	概率地图方法	(274)
10.3.3	仿真算例	(276)
10.4	基于多目标蚁群算法的路径规划	(278)
10.4.1	多目标蚁群算法	(278)
10.4.2	仿真算例	(280)
10.5	基于蚁群算法的多机任务分配技术	(281)
10.5.1	任务分配评价函数	(282)
10.5.2	基于蚁群算法的多机任务分配算法	(282)
10.5.3	仿真算法	(283)
10.6	本章小结	(285)
第 11 章	总结	(286)
11.1	本书工作总结	(286)
11.2	需要进一步研究的问题和启发式算法在飞行控制系统中应用的展望	(288)
附录	Admire 飞机结构布局、结构参数、操纵面约束	(289)
参考文献		(290)

第1章 绪 论

随着现代飞机在可靠性、机动性、安全性、舒适性等方面性能要求的不断提高，现代飞机在气动布局上与传统布局相比发上了很大变化，现代飞机在朝着操纵面多、气动耦合强的方向发展。飞行控制系统是决定飞机飞行品质和性能的核心系统，对于这样的一个多输入多输出且各变量之间存在耦合的复杂系统，如何设计出符合飞行品质要求的高性能的飞行控制系统，是当代飞行控制系统设计人员必须面对的巨大的挑战。长期以来，飞机设计师们借助于经典控制理论设计出了很多高性能的飞行控制系统，但是这种基于单输入单输出线性定常系统的控制系统设计方法在解决多输入多输出的强耦合系统问题时显得力不从心，需要耗费大量的时间和人力。高效地设计出现代先进复杂飞机的高性能飞行控制系统，是每一位飞行控制系统设计人员不懈追求的目标。现代启发式算法和计算机技术的发展，为解决这个问题提供了有力的工具。本书就现代启发式优化算法在飞行控制系统优化中的应用进行了探讨，重点研究了基于现代飞行品质评价准则的飞行控制系统的设计方法，对如何应用启发式算法优化飞行控制系统进行了较为深入的探索。

本章主要阐述了现代飞行控制系统的特点以及应用启发式算法解决飞行控制系统参数优化问题的意义，并对现代启发式算法及其在飞行控制系统优化中的应用情况做了概要的介绍。

1.1 现代飞行控制系统的特点

1.1.1 现代飞行控制系统的特点

电传飞行控制系统是现代飞机的核心控制系统，具有多通道、多回路、多模态、多余度、高增益、宽频带、全时全权限等特点，是先进飞机实现各种功能的基础平台和必要条件。同机械控制系统相比，电传飞行控制系统的优点如下：

- (1) 减轻飞行控制系统的体积和重量（因节省了重量大的机械部件与传动装置，节省了机械传动所占用的活动空间和孔道）；
- (2) 多余度电传系统，可以进一步提高飞机的安全性；
- (3) 降低飞行控制系统的安装、维护费用；
- (4) 可以容忍飞机的弹性变形（因为电缆不受飞机弯曲、变形、膨胀等影响）；
- (5) 改善飞机的操纵品质（因电传系统可以消除机械系统的非线性、摩擦、滞环等影响，并且可以实现所需要的特性）；
- (6) 增加座舱布局设计的灵活性（例如，可以使用侧杆，从而改善驾驶员对座舱仪表的视界和观察条件）；
- (7) 利于飞行控制系统构型的改变（控制律的变化因无机械系统而更加方便，易于系统重新布局）；

(8) 提高系统的生存能力（余度电气部件与电缆的分散分布，可以降低战斗损伤引起的系统失效概率）；

(9) 增强自诊断能力，提高维修性。

不仅如此，目前飞机机载电子设备已逐步实现数字化。飞行控制采用数字计算机，通过标准的机内总线，可以使飞行控制系统和飞机上的其他航空电子系统间的通信更容易，从而提高了飞机完成多种飞行任务的能力。

某典型三代机电传飞行控制系统原理图如图 1-1 所示。从图中可以看出，电传飞行控制系统是一个任务可剪裁的复杂的多回路自动控制系统，该系统具有控制模态多、控制律结构复杂、控制器待调整参数多、控制通道耦合强、控制逻辑切换多的特点。若想为这样的一个系统设计出高性能的飞行控制系统，除了选择合适的控制律结构外，还要求

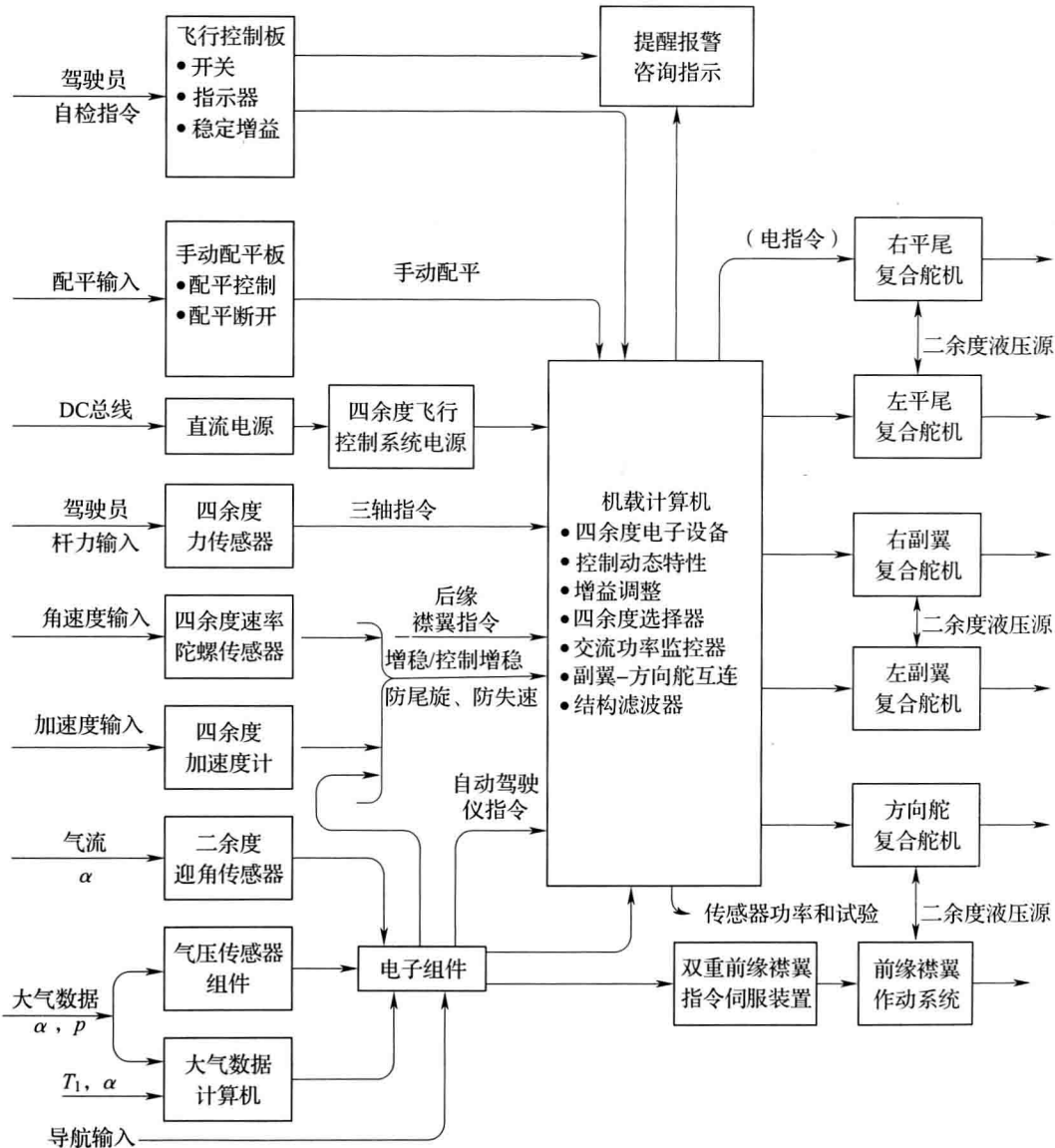


图 1-1 某典型三代机电传飞行控制系统原理图

为控制律选择合适的参数,以保证系统具有良好的飞行品质。由于现代电传控制系统的复杂性,控制律和控制系统的设计不可能一次完成,而需要反复迭代验证,必须充分利用计算机辅助设计手段才能够完成。因此发展人机友好的适用于飞行控制系统设计的计算机软件是完成高质量控制系统设计的关键,这也是本书的研究意义所在。

1.1.2 现代飞行控制系统设计的难点

飞机的飞行控制系统对飞机的飞行品质有着决定性的影响,要想提高飞机的飞行品质,使飞机能够快速准确地按照驾驶员的指令去调整姿态、改变航迹,就必须有一个响应快速准确、操纵性良好的飞行控制系统。由于飞机是一个多变量的非线性时变的系统,各个变量之间存在很强的耦合,所以飞行控制系统的设计是一项复杂的极具挑战性的工作。为了提高控制系统的性能、缩短系统设计的周期,多年来,许多研究者投身于控制理论的研究工作,提出了自适应控制、模糊控制、鲁棒控制等诸多现代控制理论方法。然而遗憾的是,这些现代控制系统设计方法大都不适合飞机飞行控制系统的设计,致使多年以来,基于现代控制理论的飞行控制系统设计多数停留在教科书和各种论文上,沦为脱离应用基础的“空中楼阁”。其结果是,学术界在用现代控制理论研究问题,而工程界却在沿用经典方法设计现代飞行控制系统,造成这种局面的原因主要有以下几个方面。

(1) 多数现代控制理论基于状态变量模型,对飞机飞行控制系统设计来讲,被控对象——飞机的完整状态变量模型并非总是能准确得到,尤其是考虑到工程上的非线性和未建模动态特性后更是如此。

(2) 现代控制理论基于性能指标,对现代复杂的飞行控制系统设计来说,其设计指标并非总能用标准形式的性能指标来描述,也就是说,要把飞行品质要求直接引入到系统设计的性能指标中并非一件容易的事情。

(3) 现代设计方法取决于选择大量的设计参数(如加权矩阵),而这些参数与性能指标之间没有明确的关系,脱离了设计者对系统的理解和实际的物理概念,由于这些参数选择的任意性,使得本来数学非常严密的现代控制设计方法失去了系统性。

(4) 在使用现代控制理论对问题求解时往往使用状态反馈,而实际的工程应用中,并非所有的状态都是可测或可用于反馈的,这些基于全状态反馈的控制理论所设计出的控制律在实际实现时就引起了许多困难。

(5) 虽然引入观测器可从系统模型的输入和输出所获得的信息中恢复不可测的状态,但是这个求解又产生了附加的问题,因为在反馈通道引入了高阶动态。即使这个附加的复杂性在某种程度上可以容忍,但采用观测器的闭环系统特性与使用真实状态反馈的同样系统所展示的特性在瞬态期间往往是不同的。

(6) 很多现代控制方法,如 H_∞ 控制方法和 μ 综合,尽管能够保证模型存在不确定性或摄动时控制器的鲁棒性,但是其设计过程极为烦琐,设计过程依赖于性能加权矩阵的选择,而选择这些加权矩阵本身就是一件极为困难的工作,并且使用这些方法所设计出来的控制器阶次往往很高,难以在工程上实现,这也成为现代控制方法在实际中应用的障碍。

正是由于以上原因,在当前飞行控制系统的设计过程中,往往采用先将非线性的飞机运动方程线性化,而后再根据经典控制理论选择飞行控制系统各回路的参数的方法。由于控制系统参数与飞机的性能指标之间没有明确的解析关系式,尽管控制器结构很简单,但

是在选择控制器参数的时候，只能通过人工试凑的方法反复调参，即使是有经验的设计人员也要做大量的仿真，工作量巨大。这种方法虽然简单有效，但是效率较低，而且不能保证所选参数是最优或接近最优的。随着飞行器性能的提高，飞行控制系统也越来越复杂，采用人工试凑方法选择控制器参数已经成为制约飞行控制系统设计的一个瓶颈。

随着计算机技术的发展，各种仿真和计算机辅助设计手段越来越多，如果能够利用计算机的快速运算和强大的逻辑判断能力，按照合适的寻优策略对飞行控制系统进行优化，自动寻找最优的控制器参数，使系统处于最优或接近最优的状态，从而达到取代人工调参的目的，无疑将大大提高飞行控制系统设计的效率，提高飞行控制系统的性能，是一项意义十分重大而又极具挑战性的工作。

这样的想法当然很好，从目前的计算机技术水平来看也是可行的，但是，要想实现飞行控制系统优化过程的完全自动化，还具有很多困难。飞行控制参数优化研究的难点主要有以下3点。

(1) 缺少成熟的算法。飞行控制系统是一个多输入多输出系统，各个输出变量之间存在很强的耦合，而对不同的输出往往有不同的指标要求，这些指标之间通常是存在矛盾的，所以飞行控制系统的设计实际上是在不同的指标之间进行折中，飞行控制系统参数的优化设计实际上是一个多目标优化问题。在优化理论的研究中，多目标优化是当前的一个研究难点，目前还没有很成熟的解决方法。

(2) 性能指标难以选择。优化是对一个或一组性能指标来讲的，性能指标的选择直接关系到优化问题的难易程度和优化算法的运算规模。尽管现在可以用飞行品质规范来评价飞行控制系统的性能，但是这些评价都是在飞行器设计完成后所做的工作，飞行品质和飞行控制系统参数之间没有明确的解析的映射关系，如何选择合适的性能指标，如何将飞行品质在优化算法中用合适的形式表示出来，都是很棘手的问题。

(3) 优化策略选择困难。目前控制器参数的优化方法有两种：目标函数间接寻优和直接寻优。目标函数间接寻优是基于现代控制理论的整定方法，需要写出目标函数的解析式并求出目标函数的 Hessian 阵和梯度，然后根据目标函数取极值的充分必要条件，求出控制器参数的最优解。直接寻优则是直接在参数空间中按照一定的寻优策略进行寻优，寻得的目标函数即为最小的参数值。对于飞行控制系统而言，控制器结构往往比较复杂，而且存在非线性环节，目标函数很难写成解析式，求出其 Hessian 阵和梯度则更为困难，甚至是不可能的。在这种情况下，只能选择直接寻优方法。

1.2 启发式算法综述

由于飞行控制系统存在的待优化参数与指标间难以表示成解析式等难点，所以无法采用传统的基于梯度的优化方法，只能采用启发式优化方法。启发式算法是通过模拟类比社会系统、物理系统、生物系统等的运行机制而发展起来的。这些方法建立在经验判断或学习的基础上，以并行分布计算、自组织、自适应、自学习为特征，在可接受的时间内求得关于问题的满意解，尽管不能保证产生这个问题的最优解，但一个好的启发式算法可以使其解和最优解尽可能地接近，同时保证求解质量有较好的稳定性。求解优化问题的典型理论与方法有进化算法 (Evolutionary Algorithm, EA)、模拟退火算法 (Simulating Algorithm,