

普通高等教育“九五”国家级重点教材

现代飞行控制

文传源 等编著

 北京航空航天大学出版社

普通高等教育“九五”国家级重点教材

现代飞行控制

文传源 等编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书着重介绍飞行控制的基本理论、基本方法、基本技术及基本应用方面的内容,并力求反映当前国内外及北京航空航天大学导航制导与控制博士点的研究成果。主要内容包括飞行控制与相关学科和因素的协同发展关系;原始系统和仿真系统的建模与验模方法;飞行性能的分析与主动控制技术对应的飞行力学原理;飞行品质及其评价标准;电传操纵系统的可靠性、余度技术以及系统结构分析和控制律设计方法;主动控制技术的各种功能及其实现方法;综合控制和战术飞行管理系统的分析、设计、性能评价及仿真方法;综合系统的规范化建模及其稳定性、可达性和系统优化分析方法;非线性和变参数系统的求解、分析及综合方法。

本书可作为飞行器控制学科的研究生教材,也可供相关专业的科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代飞行控制/文传源等编著. —北京:北京航空航天大学出版社,2004.12

ISBN 7-81077-413-1

I. 现… II. 文… III. 飞行控制 IV. V249.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 105184 号

现代飞行控制

文传源 等编著

责任编辑 王 瑛

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083) 发行部电话(010)82317024 传真(010)82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail:bhpress@263.net

北京市松源印刷有限公司印制 各地书店经销

*

开本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:19.75 字数:506 千字

2004 年 12 月第 1 版 2004 年 12 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 7-81077-413-1 定价:26.00 元

前 言

《现代飞行控制》是一本以飞行控制基本理论、基本技术、基本方法及基本应用为主的研究生教材(普通高等教育“九五”国家级重点教材),也是一本可供相关专业科技工作者阅读的参考书。

由于科学技术的发展愈来愈迅速,各个学科的关联愈来愈强,所以控制系统、控制对象、相关系统、周围环境及干扰的相互影响愈来愈大,工作的空间和时间愈来愈广阔和持久。对飞行控制而言,这种情况尤为显著。例如,近几十年来,飞行控制发生了几次根本性的变化和飞跃。首先是20世纪60年代出现了飞行器随控布局CCV(Control Configuration Vehicle)总体设计思想,取代了过去长期以气动布局为核心的飞行器总体设计思想。它实质上是一种考虑气动布局、飞行器结构、推进装置及飞行控制4个主要环节并以飞行控制为纽带的综合化(集成化或一体化——integration)总体设计思想。显然飞行器是上述4个环节的总称,而不是单指4个环节中的某个单一环节(如气动布局)。采用随控布局的设计思想,并发挥飞行控制的纽带作用,不但可充分发挥每一个环节的潜力,尤其可充分发挥4个环节的综合优化效能,从而大大提高飞行器的总体性能。飞行控制之所以能成为随控布局设计思想中的4个主要环节之一并起到纽带作用,首先因为在提出随控布局设计思想的同时,出现了主动控制技术ACT(Active Control Technology)。主动控制技术一改过去被动应付的控制方式(如为了保证足够静稳定度所采取的降低气动效应的控制方式),而采用放宽静稳定度甚至出现负稳定度的高效主动控制措施等。其次,20世纪70年代开始出现综合化控制系统,如综合飞行/火力、综合飞行/推进及综合飞行/推进/火力控制系统。从控制角度而言,已从某一单个系统的被动应付控制方式转变为主动控制方式,并上升到集成化控制系统阶段。目前综合化控制的理论基础为经典控制、现代控制及大系统理论,所反映的技术为集成化(一体化)技术,在建模方法和数学处理上属于连续系统和离散事件系统范畴,而且主要属于连续系统范畴。当前和今后一段时间内,显然必须深入研究有关智能化、高级智能化、人机融合以及更为复杂的系统的理论、建模及分析方法等问题,以便促成新的飞跃。

有鉴于此,本书在内容布局上考虑了下列4方面的内容:一为飞行控制发展简史,特别是理论和技术飞跃阶段的情况;二为飞行控制系统与

各有关系统以及各有关重要因素的关联;三为当前飞行控制方面的理论、技术、应用或教学经验方面的总结;四为当前和今后一段时间内待探索、研究的理论和技术,并介绍开拓性的研究成果。上述成果包含北京航空航天大学导航制导与控制博士学科点曾获得的国家级教学成果一等奖、部级教学成果奖以及科技进步奖方面的内容。为此,本书章节的具体安排为:第1章,绪论,扼要介绍飞行控制与相关学科和因素的关联、建模和验模方法,以及稳定性或鲁棒性方面的内容;第2章,飞行力学,主要介绍飞机的飞行性能,在应用主动控制技术条件下的飞机特征、机动性及敏捷性等;第3章,飞机的飞行品质,主要介绍飞机的飞行品质规范和飞行品质的测试等;第4章,飞机电传操纵系统,主要介绍增稳与控制增稳、电传操纵及大机动飞行等控制系统的分析与设计;第5章,主动控制技术,主要介绍放宽静稳定度、边界控制、直接力控制、阵风减缓乘坐品质控制、机动载荷控制及颤振抑制等系统的分析和设计方法;第6章,综合控制与战术任务飞行管理,主要介绍综合飞行/火力、综合飞行/推进及综合飞行/推进/火力控制系统的分析和设计方法,以及战术飞行管理系统的分析;第7章,综合系统与非线性、变参数系统,主要介绍综合系统(comprehensive system)的涵义、建模及分析方法,非线性系统的精确线性化方法,以及非线性、变参数系统的求解、分析和综合方法等,它们是研究智能控制或更为复杂的系统的有效方法。

本书前言、第1章及第7章由文传源撰写,第2章由屠巴宁撰写,第3~5章由高金源撰写,第6章由申功璋撰写。书中内容大多反映了近期科技工作的总结、教学经验以及开拓性研究的成果。张明廉教授为第2章提供了素材,翻阅了本书的部分章节并提出了宝贵建议;特别是张林昌教授对本书进行了审阅,并提出了修改意见,一并在在此致谢。

书中不足之处,请读者不吝赐教。

作 者

2003年5月

目 录

第 1 章 绪 论

1.1 飞行控制与相关学科和因素的关联	1
1.1.1 飞行控制与相关学科和技术的关联	1
1.1.2 研制飞行器的策略与国家决策及国家军事决策的关联	1
1.1.3 飞行控制系统性能与飞行器性能以及它们的规范或协议的关联	1
1.1.4 飞行控制系统研制流程	1
1.1.5 飞行控制系统设计流程	2
1.2 飞行控制系统的建模与验模方法	5
1.2.1 飞行控制系统的数学模型	5
1.2.2 飞行控制系统的建模与有效性鉴别	5
1.2.3 对仿真模型的校核、验证与确认	8
1.3 飞行控制系统的稳定性与鲁棒性	11
1.3.1 飞行控制系统的稳定性	11
1.3.2 飞行控制系统的鲁棒性	12
复习思考题	14
参考文献	14

第 2 章 飞行力学

2.1 飞行性能	15
2.1.1 飞机在铅垂平面内运动的质心运动方程	15
2.1.2 平飞需用推力	16
2.1.3 可用推力	18
2.1.4 飞机的基本飞行性能	20
2.1.5 计及动能变化的最速上升	22
2.1.6 航程与续航时间	24
2.1.7 盘旋飞行	26
2.2 飞机扰动运动模态的可观性、可控性和可扰性分析	28
2.2.1 系统模态的表示式	28
2.2.2 可观性、可控性与可扰性	29
2.3 放宽纵向静稳定度要求的飞机特性	34
2.3.1 放宽静稳定度后飞机的纵向平衡与操纵	34
2.3.2 配平升力和配平阻力	37
2.3.3 纵向静不稳定飞机的锁舵动态特征	38
2.4 直接力控制	43



2.4.1 概 述	43
2.4.2 直接升力控制	43
2.4.3 直接侧力控制	48
2.4.4 直接阻力/推力控制	53
2.5 飞机的敏捷性	53
2.5.1 产生背景	53
2.5.2 敏捷性及机动飞行形式	54
复习思考题	58
参考文献	58

第3章 飞机的飞行品质

3.1 概 述	59
3.2 飞行品质	61
3.2.1 纵向飞行品质	61
3.2.2 横侧向飞行品质	64
3.3 大迎角非线性和惯性交感飞行品质	65
3.4 关于敏捷性问题	66
3.5 飞行品质评价准则	66
3.5.1 飞行品质的评估方法	66
3.5.2 飞行品质的评价等级	68
3.5.3 飞机俯仰轴飞行品质要求	69
3.5.4 对飞机法向飞行轨迹轴的要求	83
3.5.5 纵向速度轴的飞行品质要求	84
3.5.6 滚转轴的飞行品质评价准则	85
3.5.7 航向轴飞行品质评价准则	87
3.6 飞行品质评价中的几个问题	88
3.6.1 系统时间延迟的影响	88
3.6.2 人感系统动力学对飞行品质的影响	90
复习思考题	93
参考文献	93

第4章 飞机电传操纵系统

4.1 概 述	94
4.2 电传操纵系统发展的关键技术	96
4.2.1 系统的可靠性	97
4.2.2 系统飞行品质和控制律设计	97
4.2.3 系统的故障检测与监控能力	98
4.2.4 四防设计	99
4.3 电传操纵系统控制律结构分析	99

4.3.1 电传操纵系统功能	99
4.3.2 典型电传操纵系统控制律结构分析	100
4.3.3 电传操纵系统的多模态控制	109
4.3.4 电传操纵系统增稳功能的实现	111
4.4 电传操纵系统控制律的设计	115
4.4.1 概 述	115
4.4.2 电传系统控制律设计方法综述	117
4.4.3 电传操纵系统控制律设计	121
4.5 大迎角机动飞行控制系统控制律	133
4.5.1 概 述	133
4.5.2 X-31A 试验机飞行控制规律简介	136
4.6 电传操纵系统的余度技术	140
4.6.1 概 述	140
4.6.2 余度技术	140
4.6.3 电传操纵系统余度系统实例	147
4.6.4 自修复飞行控制系统	149
复习思考题	152
参考文献	154

第5章 主动控制技术

5.1 主动控制技术概念	155
5.2 放宽静稳定	157
5.2.1 放宽静稳定性的效益	158
5.2.2 放宽静稳定性飞机飞控系统设计要求	162
5.3 边界控制系统	163
5.3.1 概 述	163
5.3.2 边界限制方案分析	164
5.3.3 迎角闭环边界限制系统	164
5.3.4 采用非线性反馈的边界限制控制器	166
5.4 直接力控制	167
5.4.1 概 述	167
5.4.2 直接升力控制的非常规机动	169
5.4.3 侧向3种非常规机动模式	171
5.4.4 纵向解耦控制律设计	174
5.4.5 非常规机动直接爬升模态的实现	177
5.4.6 直接升力控制的特征向量配置设计	178
5.5 阵风减缓和乘坐品质控制	181
5.5.1 概 述	181
5.5.2 大气扰动的数学描述	182



5.5.3 大气扰动对飞机运动的影响	184
5.5.4 阵风减缓和乘坐品质控制系统	187
5.6 机动载荷控制	193
5.6.1 概 述	193
5.6.2 大型飞机的机动载荷控制	193
5.6.3 小型战斗机的机动载荷控制	198
5.7 主动颤振抑制系统	200
5.7.1 概 述	200
5.7.2 抑制颤振的方法	202
5.7.3 颤振主动抑制系统	202
5.8 新型主动控制功能	203
复习思考题	205
参考文献	207

第6章 综合控制与战术任务飞行管理

6.1 概 述	208
6.2 综合飞行/火力控制系统	209
6.2.1 综合飞行/火力控制系统的基本组成及特点 ^[1]	209
6.2.2 系统坐标系的选择及定义 ^[2,3]	210
6.2.3 目标状态估计器原理 ^[4]	212
6.2.4 火力控制系统建模 ^[1]	220
6.2.5 综合飞行/火力控制对飞行控制系统的要求	226
6.2.6 综合飞行/火力控制系统耦合控制律设计及系统仿真	228
6.2.7 超控耦合器的设计	232
6.2.8 综合飞行/火力控制系统性能分析与评价 ^[15]	235
6.3 综合飞行/推进控制系统	237
6.3.1 概 述 ^[4,16~18]	237
6.3.2 系统组成与功能	238
6.3.3 综合飞行/推进系统的建模	239
6.3.4 飞机起飞时控制律的设计及分析 ^[20]	243
6.4 综合飞行/火力/推进控制与战术任务飞行管理	247
6.4.1 概 述	247
6.4.2 系统的组成与功能	248
6.4.3 战术飞行实时轨迹优化系统的设计	250
6.4.4 综合飞行/火力/推进控制系统的设计	253
复习思考题	259
参考文献	260

第7章 综合系统与非线性、变参数系统

7.1 概 述	261
---------------	-----

7.2 综合系统及其理论 ^[1~11]	261
7.2.1 综合系统	261
7.2.2 综合事件动态系统规范化建模	262
7.2.3 综合系统的稳定性	268
7.2.4 综合系统的可达性	270
7.2.5 综合系统优化	270
7.3 非线性系统线性化与精确线性化 ^[13~17]	271
7.3.1 求解非线性系统的简易线性化近似法	271
7.3.2 精确线性化方法 ^[13~17]	271
7.4 非线性系统的伪线性-动态逆系统方法 ^[18~21]	287
7.4.1 非线性系统为仿射型非线性系统	287
7.4.2 特征指数 ρ_i	287
7.4.3 仿射型非线性系统输入/输出解耦	288
7.4.4 简化的伪线性-动态逆系统	289
7.5 非线性、变参数系统的多级线性化-高阶微分方程方法 ^[12,22]	290
7.5.1 典型非线性、变参数系统数学模型	291
7.5.2 多级线性化-高阶微分方程方法中起补偿作用的特解求解法	292
7.5.3 多级线性化-高阶微分方程方法	295
复习思考题	302
参考文献	303

第1章

绪 论

按 20 世纪 60 年代出现的随控布局飞行器总体设计思想,飞行控制、气动布局、飞机结构及动力装置是飞行器总体设计的 4 个主要环节,主动控制和随后发展的综合控制以及战术飞行管理又是飞行控制的主要环节。从控制理论和技术角度看,现代控制系统特别是飞行控制系统,已覆盖了综合化(集成化)领域,而且必将向智能化领域,直至逐步向高级智能化领域发展。同时飞行控制的发展与相关学科的发展密切相关;飞行控制及其对象——飞行器的需求和效能则与决策以至国家的总决策密切相关。任一新型飞行控制系统的出台,需经基础理论研究、应用基础研究、应用研究、预先研究以及研制、批产和应用各环节才能实现。飞行控制学科涉及的范围如此广泛,自然不是一本书所能概括的。绪论中就将涉及各领域的关联问题作简要介绍,以便对全局问题有粗略了解;在明确方向、理清局部与全局的主要线索的基础上,再逐章深入研究有关飞行控制的理论和技术问题。

1.1 飞行控制与相关学科和因素的关联

1.1.1 飞行控制与相关学科和技术的关联

飞行控制的基础理论是控制理论和系统理论,同时与计算技术、仿真技术及飞行器有着极为密切的关系。图 1-1 简要地描绘了它们在发展过程中的大致关系。

1.1.2 研制飞行器的策略与国家决策及国家军事决策的关联

研制飞行器策略与国家决策及军事决策的关联见图 1-2。

1.1.3 飞行控制系统性能与飞行器性能以及它们的规范或协议的关联

飞行控制系统性能与飞行器性能以及它们的规范或协议的关联见图 1-3。

注意:研制新型号时,由于无正式性能规范作依据,只能按协议(如任务要求、需求分析、规范草案、顶层设计及协议等)进行研制。

1.1.4 飞行控制系统研制流程

飞行控制系统研制流程可参看图 1-4 所示的一般研制项目的简要研制流程。

1.1.5 飞行控制系统设计流程

飞行控制系统设计流程参看图 1-5 所示的简化设计流程。它表示采用并行工程设计思路时,同一系统或同一分系统的初步设计与详细设计、系统与分系统的初步设计与详细设计之间,以及其他前后分析、设计环节之间,应按优化的原则适当重叠,以提高效率。同时用“-----”表示反馈信号通道,以便及时做相应修改。

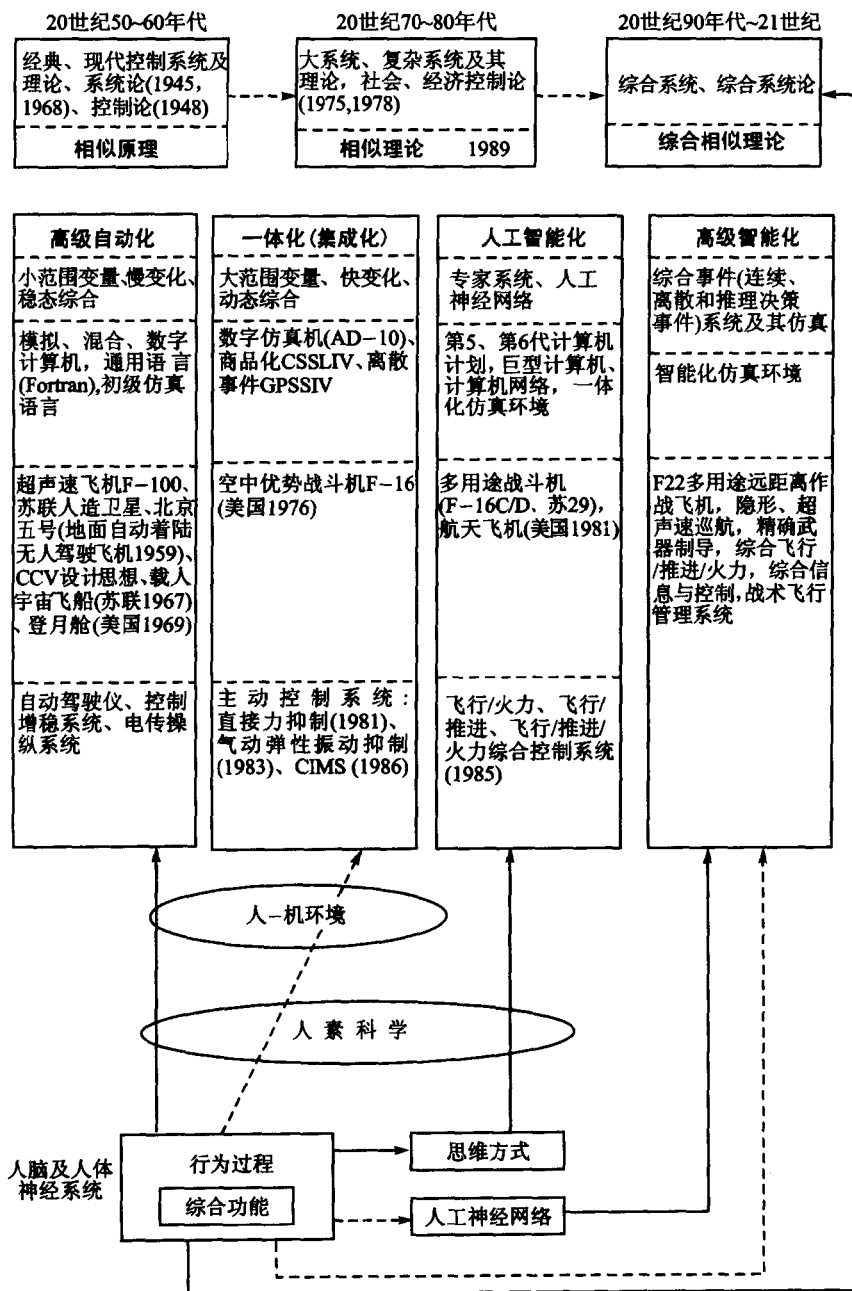


图 1-1 飞行控制理论与相关学科理论和技术的发展关联简图

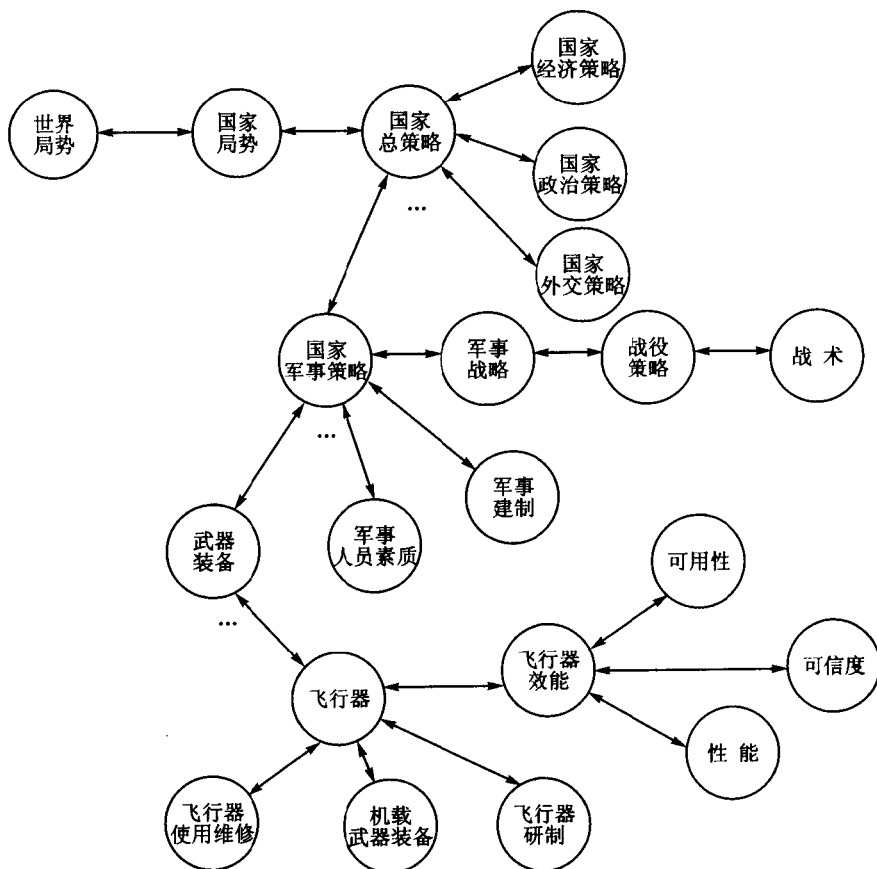


图 1-2 研制飞行器策略与国家决策及军事决策的关联

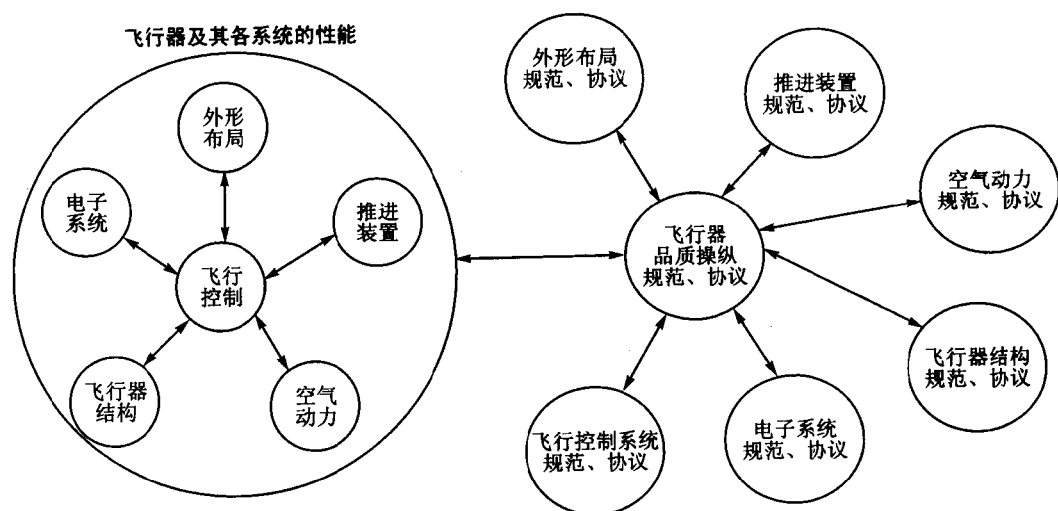


图 1-3 飞行控制系统性能与飞行器性能以及它们的规范或协议的关联

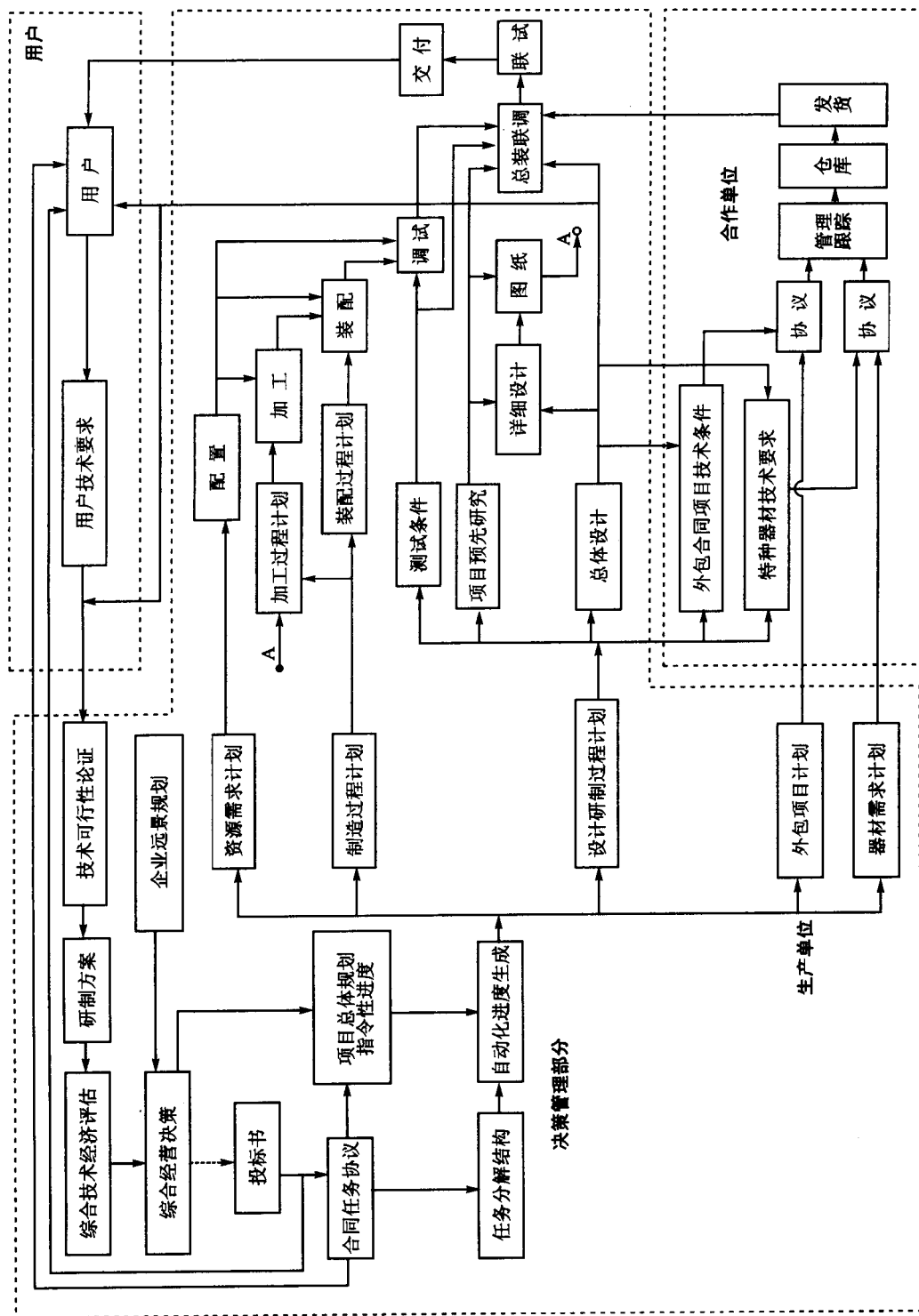


图 1-4 飞行控制系统研制流程

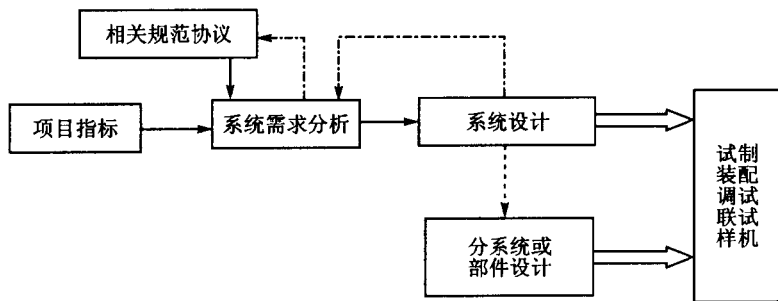


图 1-5 飞行控制系统设计流程

1.2 飞行控制系统的建模与验模方法

1.2.1 飞行控制系统的数学模型

1. 数学模型

1945 年,维纳(Norbert Wiener)对数学模型做了下述定义:数学模型是过程或系统的描述,是以面向目的的形式(purposeoriented form)反映过程或系统(存在于真实或实施性计划)的主要性能^[1]。

数学模型所描述的系统可以是受控系统,也可以是非控系统(如宇宙、地球的形成和演变等)。受控系统(控制系统)目前包括工程系统、社会系统、工程与非工程和生物与非生物系统(一般系统)^[2]以及综合系统(包括工程与非工程、生物与非生物、微观与宏观、思维与实践、主观与客观、个体与群体、本体与环境、受控与非控等各类系统)^[2~4]。

为区别于仿真数学模型,称直接描述过程或系统的数学模型为原始数学模型,或简称数学模型。

描述过程或系统的数学模型的表达形式有:数理逻辑方程(主要表达思维或推理决策等系统)、代数方程、微分方程、离散事件系统方程等,以及图形、数据、表格等。

2. 仿真数学模型

为了适应在数字计算机上进行数学仿真,需按变量(包括按时间)进行离散化处理,以及根据精度与计算速率要求选用适当算法,将原始数学模型变换为仿真数学模型。

为了适应在模拟计算机上进行数学仿真,需按适当的时间比例尺,以及数学模型的变量(或函数)与模拟计算机电路的电压的比例尺数值(与电路的参数有关),将原始数学模型变换为在模拟计算机上进行仿真的仿真数学模型。不过目前已很少使用模拟计算机进行仿真。

1.2.2 飞行控制系统的建模与有效性鉴别

1. 控制系统数学模型的建立

(1) 对建模的一般要求

对建模的一般要求为:准确性(accuracy)、描述的真实性(descriptive realism)、精确性(pre-

cision)、鲁棒性(robustness)、通用性(generality)及有效性(fruitfulness)^[5]。下面在讨论数学模型是否符合要求时,将着重于定量指标方面的检测。

(2) 控制系统建模的依据、条件和控制目标层次

控制系统建模的依据、条件和控制目标层次关联可参看图 1-6。

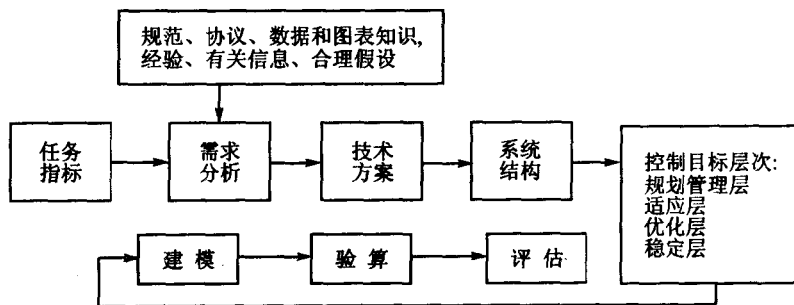


图 1-6 控制系统建模的依据、条件和控制目标层次关联简图

(3) 控制系统的建模步骤

图 1-7 说明了控制系统的建模步骤。

现对图 1-7 中的名词简要说明如下:

概念模型(conceptual model)——说明过程显著特性的某种逻辑表达形式,如过程或系统的原理、信息关联结构图等。

物理模型(physical model)——表达过程或系统的物理特征。物理模型又被称为实物模型,按缩小比例尺复制所研究的过程或系统。

数学模型(mathematical model)——也被称为软模型(software model),用一组数学关系式来描述系统。

面向目标数学模型(mathematical purpose-oriented model)——其形式和准确度必须适应控制或决策的特定问题。它是一组数学关系表达式,能充分说明系统目标和控制指标的形式。它所描述的系统目标和控制指标的层次为稳定性、优化、适应性以及规划管理。

控制灵敏度分析——模型正确表现在解的惟一以及与参数相对应,且参数的小变化所导致的解的变化也很小。但控制系统灵敏度分析不同于模型灵敏度分析,后者不但着重于模型变量与参数的依循关系以及控制器性能与基本模型参数的依循关系,而且必须考虑控制目标与控制器或基本模型参数的依循关系,以至与全部各类模型(表述真实过程或系统)的参数的依循关系。

控制系统的建模步骤大致为:

- ① 明确控制系统的主要问题;
- ② 建立概念和物理模型;
- ③ 在概念和物理模型(如果必需且已建立)的基础上,建立尽可能完备的数学模型;
- ④ 分析较完备的数学模型所反映的控制问题是否充分和准确;
- ⑤ 建立适应控制系统各层目标的面向目标数学模型;
- ⑥ 利用面向目标数学模型计算控制灵敏度并迭代;
- ⑦ 在面向目标数学模型的基础上,建立受鉴别的数学模型和扩充的统计模型(考虑随机

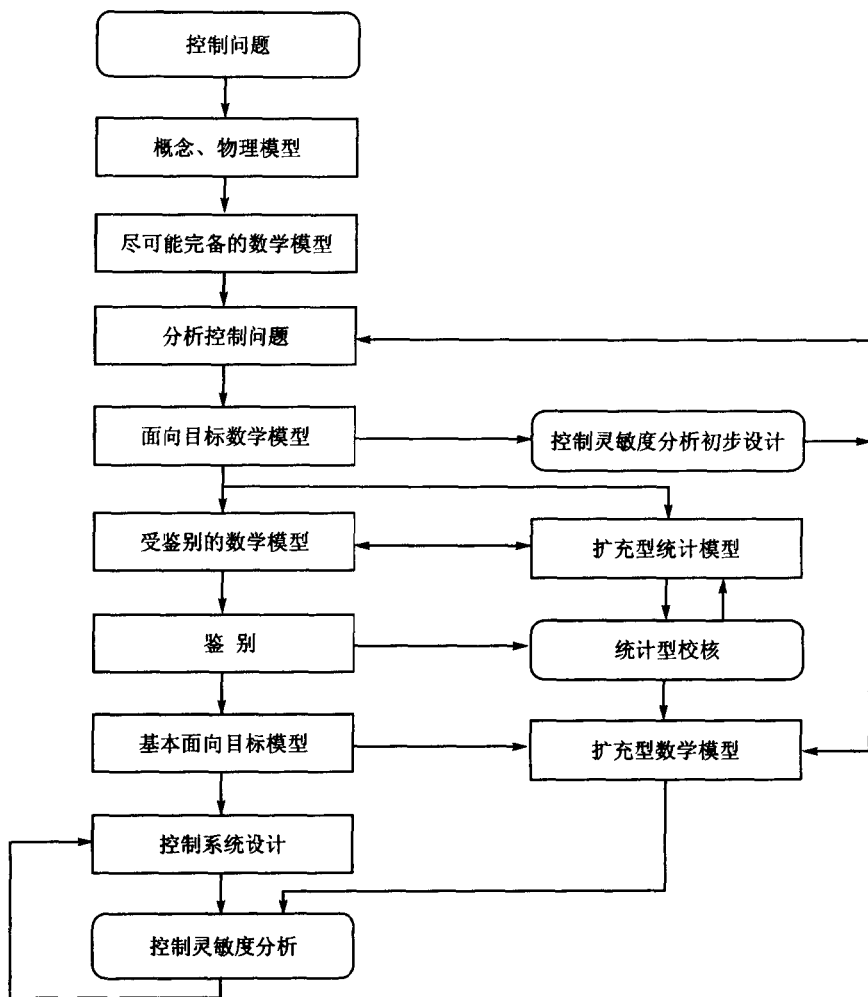


图 1-7 控制系统的建模步骤

性作用因素)，根据两种模型的关联，修订受鉴别的数学模型，校核扩充型统计模型；

- ⑧ 认可基本面向目标模型和扩充型数学模型；
- ⑨ 设计控制系统；
- ⑩ 分析控制灵敏度。

2. 参数的鉴别与模型的校核

参数的鉴别(图 1-8(a))是在将输入 $u(t)$ 分别加于实际过程(或期望过程)和过程模型输入端的情况下,根据二者输出的差值按鉴别指标进行计算,得出相应结果;借助使鉴别指标为极小来选择过程模型的参数,从而使过程模型尽量逼近实际过程或期望过程。在鉴别时,不但应考虑输入信号或扰动(disturbances),还应考虑过程或模型的起始条件。可考虑起始状态与模型参数同时进行鉴别。

图 1-8(b)同时描绘出扩充模型的统计校核(或模型评价——model assessment)与鉴别模型。统计校核可按残差 $Y_u = Y - \tilde{y}(u)$ 和均方差 $E(Y - \tilde{y}(u))^2$ 为最小等校核指标进行校核,