

国之重器出版工程

国防现代化建设

Aircraft Automatic Flight Control System

飞机自动飞行控制系统

徐军 著

中国工信出版集团

北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

飞机自动飞行控制系统

徐　军　著

北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书全面、系统地介绍了飞机自动飞行控制系统的组成、原理和分析及设计方法。在系统定义的基础上，本书从数学模型的建立出发，确定反馈控制系统的结构和控制律参数的计算方法，给出了性能分析和控制律参数随飞行状态调节的方法，并给出了系统设计和数学仿真的实例。

本书既可以作为飞行控制、制导及飞行器设计等专业本科生和研究生的教材或参考书，也可作为相关专业的研究者和工程技术人员的参考书或手册。

版权专有　侵权必究

图书在版编目（CIP）数据

飞机自动飞行控制系统 / 徐军著. —北京：北京理工大学出版社，2020.5
国之重器出版工程
ISBN 978-7-5682-8405-9

Ⅰ. ①飞…　Ⅱ. ①徐…　Ⅲ. ①飞机–自动飞行控制–飞行控制系统
Ⅳ. ①V249.122

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2020）第 069928 号

出　　版 / 北京理工大学出版社有限责任公司
社　　址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号
邮　　编 / 100081
电　　话 /（010）68914775（总编室）
　　（010）82562903（教材售后服务热线）
　　（010）68948351（其他图书服务热线）
网　　址 / http://www.bitpress.com.cn
经　　销 / 全国各地新华书店
印　　刷 / 固安县铭成印刷有限公司
开　　本 / 710 毫米×1000 毫米　1/16
印　　张 / 22　　责任编辑 / 曾　仙
字　　数 / 379 千字　　文案编辑 / 曾　仙
版　　次 / 2020 年 5 月第 1 版　2020 年 5 月第 1 次印刷　　责任校对 / 周瑞红
定　　价 / 96.00 元　　责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题，请拨打售后服务热线，本社负责调换

《国之重器出版工程》
编辑委员会

编辑委员会主任：苗　圩

编辑委员会副主任：刘利华　辛国斌

编辑委员会委员：

冯长辉	梁志峰	高东升	姜子琨	许科敏
陈　因	郑立新	马向晖	高云虎	金　鑫
李　巍	高延敏	何　琼	刁石京	谢少锋
闻　库	韩　夏	赵志国	谢远生	赵永红
韩占武	刘　多	尹丽波	赵　波	卢　山
徐惠彬	赵长禄	周　玉	姚　郁	张　炜
聂　宏	付梦印	季仲华		



专家委员会委员（按姓氏笔画排列）：

于　全　中国工程院院士
王　越　中国科学院院士、中国工程院院士
王小谟　中国工程院院士
王少萍　“长江学者奖励计划”特聘教授
王建民　清华大学软件学院院长
王哲荣　中国工程院院士
尤肖虎　“长江学者奖励计划”特聘教授
邓玉林　国际宇航科学院院士
邓宗全　中国工程院院士
甘晓华　中国工程院院士
叶培建　人民科学家、中国科学院院士
朱英富　中国工程院院士
朵英贤　中国工程院院士
邬贺铨　中国工程院院士
刘大响　中国工程院院士
刘辛军　“长江学者奖励计划”特聘教授
刘怡昕　中国工程院院士
刘韵洁　中国工程院院士
孙逢春　中国工程院院士
苏东林　中国工程院院士
苏彦庆　“长江学者奖励计划”特聘教授
苏哲子　中国工程院院士
李寿平　国际宇航科学院院士



李伯虎　中国工程院院士

李应红　中国科学院院士

李春明　中国兵器工业集团首席专家

李莹辉　国际宇航科学院院士

李得天　国际宇航科学院院士

李新亚　国家制造强国建设战略咨询委员会委员、中国机械工业联合会副会长

杨绍卿　中国工程院院士

杨德森　中国工程院院士

吴伟仁　中国工程院院士

宋爱国　国家杰出青年科学基金获得者

张　彦　电气电子工程师学会会士、英国工程技术学会会士

张宏科　北京交通大学下一代互联网互联设备国家工程实验室主任

陆　军　中国工程院院士

陆建勋　中国工程院院士

陆燕荪　国家制造强国建设战略咨询委员会委员、原机械工业部副部长

陈　谋　国家杰出青年科学基金获得者

陈一坚　中国工程院院士

陈懋章　中国工程院院士

金东寒　中国工程院院士

周立伟　中国工程院院士



郑纬民　中国工程院院士

郑建华　中国科学院院士

屈贤明　国家制造强国建设战略咨询委员会委员、工业和信息化部智能制造专家咨询委员会副主任

项昌乐　中国工程院院士

赵沁平　中国工程院院士

郝　跃　中国科学院院士

柳百成　中国工程院院士

段海滨　“长江学者奖励计划”特聘教授

侯增广　国家杰出青年科学基金获得者

闻雪友　中国工程院院士

姜会林　中国工程院院士

徐德民　中国工程院院士

唐长红　中国工程院院士

黄　维　中国科学院院士

黄卫东　“长江学者奖励计划”特聘教授

黄先祥　中国工程院院士

康　锐　“长江学者奖励计划”特聘教授

董景辰　工业和信息化部智能制造专家咨询委员会委员

焦宗夏　“长江学者奖励计划”特聘教授

谭春林　航天系统开发总师



前　言

自动飞行控制系统对于现代飞机来说不可或缺。它是一种能代替驾驶员操纵飞机的电气/机械装置，从而减轻驾驶员操纵工作负担的系统。一旦有了这种系统，驾驶员就可以成为一个超级监控者，将更多的精力关注于飞行安全的有关工作上。

自动飞行控制系统按照驾驶员所选择的自动飞行模式，使飞机进行不需要人工干预的自动飞行，这种优势的获得主要依赖于负反馈控制系统的特性。因此，自动飞行控制系统本质上是一类负反馈控制系统，其控制对象是飞机。

自 1914 年斯佩雷父子发明第一台能保持飞机三个姿态角（俯仰角、滚转角、航向角）不变的自动驾驶仪以来，自动飞行控制系统经过了百年的发展和应用。在计算机软硬件得到高度发展的今天，自动飞行控制系统的功能不断得到完善、性能日益精密，而且可靠性程度已经能实现从起飞到降落的整个飞行过程的自动控制。自动飞行控制系统已经成为一种普通的飞机设备，极大地提高了飞机自动化飞行的能力。

当前，无人机的快速发展对自动飞行控制系统提出了新的需求。从控制的原理来说，无人机和有人驾驶飞机的自动飞行控制系统是相同的，仅在两方面有差异：一方面是在物理实现方式上，由于无人机通过无线电数据链来形成自动飞行指令进行输入，而指令则来自地面控制人员，因此数据链是无人机自动飞行控制系统控制回路的组成部分；另一方面是在自动操纵方式上，无人机的操纵人员在地面通过数据链来发送指令，只有在必要时（如数据链故障等），无人机自动飞行控制系统才自我启动应急控制程序（如自动返航）。因此，从系统的分析、设计和数学仿真的角度，本书内容完全适用于无人机自动飞行控制系统的理论设计阶段。

所谓理论设计，就是按照需求分析的结果，对自动飞行控制系统的所有任务（或主要控制任务）进行分析和设计，并形成对任务描述的数学模型，然后通过数学仿真的结果来检查和确认数学模型对任务的描述是否正确。该数学模型是任务由软件实现的重要依据。从原型技术来说，通过该数学模型应该可以直接得到实时软件的源代码，并可以将其直接应用于飞行控制计算机。

本书的写作目的之一，就是对自动飞行控制系统的理论设计阶段提供全面知识，使理论设计阶段的所有工作内容都可以从本书中找到。也就是说，本书既可以用于研究，又可以用于参考。当然，本书也可以作为自动飞行控制系统的入门书来应用，这需要读者具备一定的基础知识，如自动控制原理、飞行动力学和微分方程理论等。因此，本书既可以作为飞行控制、制导和飞行器设计及飞行力学等专业的本科生、研究生的教材或参考书，也能供相关专业的研究者和工程师作为参考书或手册使用。若将本书作为飞机设计制造单位和自动飞行控制系统研制单位之间工程技术人员的共同语言或工作标准，将体现本书的最大价值。

为此，本书在内容安排上尽量围绕自动飞行控制系统的理论设计和对飞机动力学影响这两个角度来阐述。因此，在飞行动力学方面，本书仅介绍了建立飞机运动方程或数学模型的必要知识和条件，而着重于如何根据风洞试验数据来得到飞机运动方程，并省略了关于空气动力学方面的内容，还特别指出了用于自动飞行控制系统设计的飞机数学模型和有关限制条件，这些飞行动力学知识对于从事自动飞行控制系统理论设计是足够的；其后，本书系统地介绍了现代飞机自动飞行控制系统所有控制方式的分析和设计问题，并在应用回路分离法的基础上使用了近似计算/根轨迹检查的组合设计方法，以尽量避免根据经验的试凑设计方法，而且对每一种控制方式都给出了设计和数学仿真例子，以便读者根据这些示例去设计其实际应用；此外，本书还研究了自动回零和自动配平等特殊问题，使本书的内容更加系统和完整。

本书得以出版，首先要感谢北京理工大学出版社的全力支持和帮助；其次要感谢友人的鼓励和关怀，才使本书的写作能够顺利完成；最后要感谢研究生虞江航和屠吉帅，他们高质量地绘制了书中所有插图，且完成了对设计实例的数学仿真工作。

限于笔者的水平，书中内容难免有不妥之处，请各位读者不吝赐教。

徐军

2020 年 1 月 18 日于良乡大学城



目　录

第 1 章　绪论 …… 001

第 2 章　自动飞行控制系统的基本问题 …… 009

2.1　自动飞行控制系统的基本功能 …… 010
2.2　驾驶员如何使用这个系统 …… 012
2.3　自动飞行控制系统的一般组成形式 …… 013
2.4　数学模型和物理模型的建立及意义 …… 014
2.5　在理论设计中数学仿真的作用 …… 016
2.6　把理论设计结果高效率地转换为工程实现的方法 …… 017
2.7　理论设计和实际系统之间的差异及调整 …… 018

第 3 章　飞机动力学和数学模型 …… 023

3.1　飞机运动的一般特点 …… 024
3.2　飞机运动方程的常用坐标系 …… 025
3.3　飞机运动变量的定义 …… 027
3.4　坐标系之间的变换关系 …… 030
3.5　力、力矩和运动变量在各坐标系内的习惯表示和符号 …… 033
3.6　飞机操纵机构及运动变量的定义 …… 036
3.7　飞机运动自由度和分类 …… 037
3.8　刚体飞机运动方程的建立 …… 038
3.8.1　建立飞机运动方程的考虑 …… 038

3.8.2 刚体飞机运动的假设条件 …… 039
3.8.3 刚体飞机运动动力学方程形式 …… 040
3.8.4 飞机转动运动方程（力矩方程） …… 041
3.8.5 飞机平移运动方程（力运动方程） …… 042
3.8.6 运动学方程 …… 043
3.8.7 几何关系方程 …… 044
3.8.8 关于方程的讨论 …… 044
3.9 小扰动线性化运动方程 …… 046
3.9.1 运动方程简化处理的目标和方法 …… 046
3.9.2 小扰动线性化方法和基准运动 …… 046
3.9.3 纵向运动和横侧向运动的解耦和条件 …… 048
3.9.4 小扰动线性化中基准运动的条件和运动变量定义 …… 048
3.9.5 一般情况下（$\gamma_0 \neq 0$）的小扰动线性化运动方程 …… 049
3.10 对称定常直线水平飞行（$\gamma_0 = 0$）时的小扰动线性化运动方程 …… 052
3.11 进一步简化的线性化运动方程 …… 054
3.11.1 纵向运动方程的简化 …… 054
3.11.2 横侧向运动方程的简化 …… 057
3.12 用于系统设计的飞机运动数学模型 …… 060
3.12.1 纵向运动的传递函数模型 …… 061
3.12.2 横侧向运动的传递函数模型 …… 068
3.13 飞机运动特性及飞行状态的影响 …… 069
3.13.1 短周期运动特性及飞行状态的影响 …… 069
3.13.2 长周期运动特性及飞行状态的影响 …… 073
3.13.3 横侧向运动特性及飞行状态的影响 …… 078
3.14 协调转弯运动和横侧向运动水平轨迹的近似方程 …… 080
3.15 风作用下飞机动力学响应传递函数模型 …… 083
3.16 扰动力矩对飞机动力学响应的影响 …… 087

第 4 章 关于自动飞行控制系统设计问题的讨论 …… 089

4.1 自动飞行控制系统设计的内容、方法和适用性 …… 090
4.2 自动飞行控制系统需求分析及其自动飞行方式 …… 093
4.2.1 自动飞行控制系统的需求分析 …… 093
4.2.2 自动飞行控制系统的自动飞行方式 …… 094
4.3 自动飞行中的杆力配平问题 …… 097



4.4 自动飞行控制系统与电传操纵系统的关系 …… 101
4.5 自动飞行控制系统与机械操纵系统的关系 …… 102
4.6 自动飞行控制系统的性能要求 …… 104
4.6.1 有关描述自动飞行控制系统性能要求的规范 …… 104
4.6.2 姿态控制回路的设计指标 …… 104
4.7 自动飞行控制系统的接通和断开 …… 107
4.8 自动飞行控制系统接通时的自动回零方法 …… 108
4.9 自动飞行控制系统的组成、数学模型和设计 …… 109
4.9.1 自动飞行控制系统的物理模型（或组成）及意义 …… 109
4.9.2 飞机动力学和运动学数学模型 …… 110
4.9.3 舵机与机械操纵系统数学模型 …… 110
4.9.4 测量飞机运动的传感器和有关滤波器数学模型 …… 111
4.9.5 自动飞行控制系统的设计工作内容 …… 112

第 5 章 俯仰角控制系统分析和设计 …… 113

5.1 俯仰角控制系统的目的和意义 …… 114
5.2 俯仰角控制系统的分析和数学模型 …… 115
5.2.1 飞机动力学模型 …… 115
5.2.2 对俯仰角控制系统的动力学特性要求 …… 115
5.2.3 系统的反馈结构形式 …… 115
5.2.4 俯仰角控制系统的数学模型及其分析 …… 117
5.2.5 用近似方法来确定控制律参数 k_q 和 k_θ …… 119
5.2.6 短周期运动模型误差对系统性能的影响 …… 122
5.2.7 控制律参数随飞行状态调节的方法 …… 122
5.2.8 俯仰角控制系统抗干扰能力分析和计算 …… 124
5.3 俯仰角控制系统设计实例和数学仿真 …… 126
5.3.1 飞机纵向运动模型的选择和设计性能指标 …… 126
5.3.2 控制律参数 k_q 和 k_θ 及静增益 $K_{\theta dc}$ 的计算 …… 127
5.3.3 在 k_q=0.69 和 k_θ=1.82 时的系统性能分析 …… 127
5.3.4 舵机时间常数对系统特征根的影响 …… 130
5.3.5 系统稳定性要求下的 k_q 和 k_θ 及其特征根分布 …… 132
5.3.6 控制律参数随飞行状态调节的设计 …… 134
5.3.7 数学仿真和分析 …… 135

第 6 章　垂直速度控制系统 …… 141

6.1　控制目的和方法 …… 142
6.2　建立垂直速度动力学响应的数学模型 …… 142
6.3　垂直速度的有效控制条件 …… 144
6.4　反馈结构和控制律及数学模型 …… 145
6.5　控制律参数计算 …… 146
6.6　控制性能分析 …… 147
6.6.1　飞行状态的影响 …… 147
6.6.2　对垂直风扰动的响应性能 …… 148
6.6.3　对常值俯仰扰动力矩的响应性能 …… 149
6.7　垂直速度控制系统设计和数学仿真实例 …… 151
6.7.1　设计状态和数学模型 …… 151
6.7.2　控制律参数计算和控制律形式 …… 151
6.7.3　设计结果分析和检查 …… 152
6.7.4　对设计结果的数学仿真 …… 154

第 7 章　高度控制系统分析和设计 …… 161

7.1　控制目的和方法 …… 162
7.2　反馈结构分析和高度控制系统数学模型 …… 163
7.3　控制性能分析 …… 164
7.3.1　垂直风扰动下的响应分析 …… 164
7.3.2　俯仰扰动力矩作用下的响应分析 …… 165
7.4　控制律参数设计 …… 166
7.4.1　用根轨迹法选择参数 …… 166
7.4.2　用近似设计方法选择参数 …… 167
7.5　高度控制系统设计和数学仿真实例 …… 168
7.5.1　设计状态和控制律参数的计算 …… 168
7.5.2　对设计结果进行根轨迹检查 …… 169
7.5.3　对设计结果的数学仿真 …… 171
7.6　对高度控制系统的改进 …… 177
7.6.1　改进目的和方法 …… 177
7.6.2　高度控制系统的改进设计和数学仿真实例 …… 178



第 8 章 速度控制系统 …… 183

8.1 速度控制的动力学分析及数学模型 …… 184
8.1.1 速度控制的目的和方法 …… 184
8.1.2 速度控制的动力学过程 …… 185
8.2 升降舵速度控制系统 …… 187
8.2.1 反馈结构形式分析和数学模型 …… 187
8.2.2 控制律参数设计 …… 189
8.3 油门杆速度控制系统 …… 192
8.3.1 反馈结构分析和数学模型 …… 192
8.3.2 控制律参数设计 …… 193
8.3.3 控制性能分析 …… 194
8.4 使用减速板（扰流板）的速度控制系统 …… 197
8.5 升降舵速度控制系统设计和数学仿真实例 …… 198
8.5.1 设计状态和控制律参数计算 …… 198
8.5.2 对升降舵速度控制系统的数学仿真 …… 199
8.6 油门杆速度控制系统设计和数学仿真实例 …… 201
8.6.1 控制律参数计算和分析 …… 201
8.6.2 控制律性能分析 …… 202
8.6.3 油门杆速度控制系统与俯仰角控制系统共同工作时的数学仿真 …… 202

第 9 章 下滑波束和拉平着陆控制 …… 209

9.1 飞机在着陆过程中的纵向操纵 …… 210
9.1.1 着陆时纵向操纵的过程和特点 …… 210
9.1.2 使用 ILS 着陆时纵向操纵和自动着陆控制问题 …… 211
9.2 下滑波束导引运动学模型 …… 212
9.3 下滑波束导引控制系统的控制律设计和性能 …… 214
9.3.1 反馈结构和控制律 …… 214
9.3.2 控制性能分析 …… 215
9.3.3 控制律参数选择 …… 216
9.3.4 控制律参数随飞行状态的调节 …… 217
9.4 拉平着陆的运动学模型 …… 219
9.4.1 拉平着陆的需求分析 …… 219

9.4.2 拉平着陆的轨迹设计 …… 221
9.5 拉平着陆控制系统的设计和性能分析 …… 222
9.5.1 拉平控制指令模型 …… 222
9.5.2 拉平着陆控制系统的控制律和性能分析 …… 223
9.6 下滑波束导引控制系统的设计和数学仿真实例 …… 225
9.6.1 设计状态和模型 …… 225
9.6.2 俯仰角控制系统和油门杆速度控制系统设计 …… 226
9.6.3 下滑波束导引控制系统的设计 …… 226
9.6.4 下滑波束导引控制系统的数学仿真 …… 229
9.7 拉平着陆控制系统的设计和数学仿真实例 …… 232
9.7.1 拉平控制指令设计 …… 232
9.7.2 垂直速度控制系统设计 …… 233
9.7.3 拉平着陆控制系统数学仿真 …… 233

第 10 章 航向控制系统 …… 237

10.1 航向控制的目的和方法 …… 238
10.1.1 航向控制的目的 …… 238
10.1.2 航向控制的方法和问题 …… 239
10.1.3 航向控制系统的基本结构 …… 239
10.2 滚转角控制系统 …… 240
10.2.1 滚转运动动力学模型 …… 240
10.2.2 反馈和系统数学模型 …… 242
10.2.3 滚转扰动力矩作用下的性能 …… 242
10.2.4 控制律设计 …… 243
10.2.5 滚转角的改平控制 …… 244
10.3 侧滑角控制系统 …… 244
10.3.1 侧滑角动力学和控制系统模型 …… 244
10.3.2 侧滑角控制性能分析 …… 245
10.3.3 控制律参数选择 …… 246
10.4 航向控制系统 …… 248
10.4.1 反馈结构和数学模型 …… 248
10.4.2 抗干扰能力分析 …… 249
10.4.3 控制律参数设计 …… 250
10.5 滚转角控制系统设计和数学仿真实例 …… 251



10.5.1 设计状态和数学模型 …… 251
10.5.2 设计性能指标和控制参数计算 …… 251
10.5.3 数学仿真设计 …… 252
10.5.4 数学仿真和分析 …… 252
10.6 侧滑角控制系统设计和协调转弯数学仿真实例 …… 255
10.6.1 侧滑角性能指标和控制参数计算 …… 255
10.6.2 协调转弯控制数学仿真设计 …… 256
10.6.3 数学仿真和分析 …… 257
10.7 航向角控制系统设计和数学仿真实例 …… 261
10.7.1 设计性能指标和控制参数计算 …… 261
10.7.2 数学仿真设计 …… 263
10.7.3 数学仿真结果和分析 …… 263

第 11 章 横侧向波束导引和轨迹控制系统 …… 269

11.1 飞机横侧向运动的轨迹控制问题 …… 270
11.2 侧向波束导引的运动学模型 …… 271
11.3 侧向波束导引控制系统设计 …… 273
11.3.1 反馈结构分析和数学模型 …… 273
11.3.2 控制律参数计算和性能 …… 274
11.4 横侧向轨迹的运动学模型 …… 276
11.5 横侧向轨迹控制系统设计 …… 277
11.5.1 反馈和系统构型分析 …… 277
11.5.2 系统数学模型和性能分析 …… 278
11.5.3 近似数学模型和控制律参数计算 …… 279
11.6 侧向波束导引控制系统的设计和数学仿真实例 …… 280
11.6.1 侧向波束导引控制系统设计 …… 280
11.6.2 数学仿真设计 …… 281
11.6.3 数学仿真和分析 …… 281
11.7 横侧向轨迹控制系统的设计和数学仿真实例 …… 287
11.7.1 控制律参数计算和数学仿真设计 …… 287
11.7.2 数学仿真和分析 …… 288
11.8 航路之间的转换飞行和提前转弯 …… 294

第 12 章　无人驾驶飞机自动飞行控制系统 …… 297

12.1　无人驾驶飞机的操纵形式 …… 298
12.2　自主驾驶中的驾驶程序设计 …… 300
12.3　数据链路中断后的驾驶程序 …… 303
12.4　无人机和有人驾驶飞机 AFCS 的差异 …… 304

参考文献 …… 305

附录 A　有因次导数计算公式 …… 307

附录 B　算例飞机导数 …… 311

附录 C　算例飞机小扰动线性化运动方程 …… 321