

AIAA 航空航天技术丛书

AIAA EDUCATION SERIES

飞机发动机控制

——设计、系统分析和健康监视

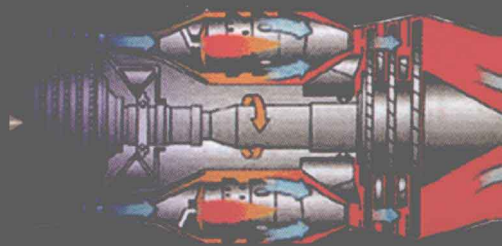
AIRCRAFT ENGINE CONTROLS
DESIGN, SYSTEM ANALYSIS, AND
HEALTH MONITORING

(美)

赵连寿 (Link C. Ju)

杰克·马丁利 (Jack D. Mattingly)

张新国 等 译



航空工业出版社

AIAA 航空航天技术丛书

飞机发动机控制

——设计、系统分析和健康监视

(美) 赵连春 (Link C. Jaw) 杰克·马丁利 (Jack D. Mattingly) 著

张新国 等 译

航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

本书是美国航空航天学会 (AIAA) 最新出版的航空发动机系列教材之一, 内容包括航空发动机控制和监视系统的基础理论、最新进展和成果, 运用发动机控制理论和工程知识解决实际问题的案例分析, 发动机控制的新概念和新思路, 并针对涡扇与涡轴发动机, 介绍了航空发动机控制和监视系统的综合设计方法。本书可为我国航空发动机管理人员和专业技术人员了解航空发动机控制和监视系统的发展提供参考, 也可供相关专业院校师生教学使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

飞机发动机控制: 设计、系统分析和健康监视 /
(美) 赵连春 (Jaw, L. C.), (美) 马丁利
(Mattingly, J. D.) 著; 张新国等译. --北京: 航空工
业出版社, 2011. 2
(AIAA 航空航天技术丛书)
ISBN 978-7-80243-667-1

I. ①飞… II. ①赵… ②马… ③张… III. ①航空发
动机—设计②航空发动机—监视控制 IV. ①V23

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 244457 号

Translated from the English language edition: Aircraft Engine Controls: Design, System Analysis, and Health Monitoring. By Link C. Jaw with Jack D. Mattingly. Originally published by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. ISBN 978-1-60086-705-7. Copyright © 2009 by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. All rights reserved.

北京市版权局著作权合同登记

图字: 01-2010-6336

飞机发动机控制
——设计、系统分析和健康监视
Feiji Fadongji Kongzhi
——Sheji、Xitong Fenxi he Jiankang Jianshi

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里 14 号 100029)

发行部电话: 010-64815615 010-64978486

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2011 年 2 月第 1 版

2011 年 2 月第 1 次印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 19.5 插页: 16 字数: 475 千字

印数: 1—2000

定价: 80.00 元

AIAA Education Series

Editor-In-Chief

Joseph A. Schetz
Virginia Polytechnic Institute and State University

Editorial Board

Takahira Aoki
University of Tokyo

Rakesh K. Kapania
*Virginia Polytechnic Institute
and State University*

João Luiz F. Azevedo
*Instituto de Aeronáutica e Espaço
São José dos Campos, Brazil*

Brian Landrum
University of Alabama in Huntsville

Karen D. Barker

Tim C. Lieuwen
Georgia Institute of Technology

Robert H. Bishop
University of Texas at Austin

Michael Mohaghegh
The Boeing Company

Aaron R. Byerley
U.S. Air Force Academy

Conrad F. Newberry

Richard Colgren
University of Kansas

Joseph N. Pelton
George Washington University

J.R. DeBonis
NASA Glenn Research Center

Mark A. Price
Queen's University Belfast

Kajal K. Gupta
*NASA Dryden Flight
Research Center*

David K. Schmidt
*University of Colorado
Colorado Springs*

Rikard B. Heslehurst
University of New South Wales

David M. Van Wie
Johns Hopkins University

序

航空发动机控制系统是决定航空发动机性能的一个关键功能系统，航空发动机控制技术是航空发动机专业的一个重要分支，在航空发动机的发展中占有举足轻重的地位。航空发动机控制系统的作用是在整个飞行包线内，在发动机各个气动、热力和机械设计限制内及在发动机所有功率范围内，根据外界干扰或油门杆的指令，通过控制器改变可控变量（如供油量、尾喷口截面积等）的大小，以保证发动机被控量（如转速、增压比等）等于常数或按预定的规律变化，使发动机安全、可靠、稳定工作，并获得最佳性能。

过去 60 年，随着航空发动机技术的不断进步和飞机对发动机性能要求的不断提高，发动机控制系统已从简单的开环液压机械系统发展到复杂的闭环液压机械系统，到今天已经发展成高度复杂的、闭环、模型基、多变量、时变、非线性、多功能的计算机电子控制系统，成为集现代先进光、机、电、信息与控制技术为一体的高科技产品。发动机控制系统除了具有强大的控制功能外，还具有健康管理、自动和精确诊断故障的能力。将来，发动机控制技术将向数字化、综合控制、分布控制、主动控制、多变量控制、容错控制和智能控制等方向发展。发动机控制系统的功能也将超出推进控制的范畴，而发展成为一种能平衡推进控制要求、配电和管理要求、状态监视系统的机载管理系统，成为综合的控制系统，即飞行/推进综合控制以及火力/飞行/推进综合控制，将对发动机性能发挥日益重要的作用。

航空发动机是飞机的“心脏”，而控制系统是保证这个“心脏”高效、稳定工作的关键因素之一。目前，国内关于航空发动机控制和监视系统设计的专业书籍十分缺乏，全面、系统阐述航空发动机控制系统设计的专业书籍更是少之又少。中国航空工业集团公司张新国副总经理亲自组织引进翻译出版的《飞机发动机控制——设计、系统分析和健康监视》一书，是美国航空航

天学会 (AIAA) 2009 年最新出版的航空发动机系列教材之一, 内容包括航空发动机控制和监视系统的基础理论、最新进展和成果, 运用发动机控制理论和工程知识解决实际问题的案例分析, 发动机控制的新概念和新思路, 并从涡扇与涡轴发动机两个方面介绍了航空发动机控制和监视系统的综合设计方法。其中关于航空发动机控制系统基础理论、发展历程和趋势的介绍, 可为我国航空发动机管理人员和专业技术人员了解发动机控制和监视系统的发展提供参考; 所论述的建模技术、设计方法和解决问题的方式, 可为我国航空发动机控制和监视技术的发展提供借鉴。

本书是我们学习了解航空发动机控制和监视系统的好教材, 希望本书的出版能帮助业内人士开拓视野、启发思路、完善设计、提升能力, 为促进我国航空发动机的快速发展作出积极贡献!



2010 年 6 月 1 日

序

美国空军从 20 世纪 70 年代末就开始致力于提供最新的飞机燃气涡轮发动机教材，本书就是这项工作的最新成果。飞机燃气涡轮发动机教材最初只涉及空气热力学技术、控制技术和结构技术 3 个领域。该项工作由俄亥俄州 Wright-Patterson 空军基地怀特实验室航空推进系统理事会发起，首批成果包括 Gordon C. Oates 编写的空气热力学教材（3 册）、由马丁利、Heiser 和 Pratt 编写的飞机发动机设计教材（1 册）。这些教材现已被 AIAA 教育系列丛书收录。

本书是关于燃气涡轮发动机控制系统的最新教材。这项工作由俄克拉何马州 Tinker 空军基地的推进系统理事会发起，由 Timothy Dues 领导完成。2003 年，Dues 要求我主持这项工作并确定作者人选。经过大范围筛选之后，我找到了由美国国家航空航天局（NASA）格伦研究中心的 Sanjay Grag 先生和美国空军研究实验室的 Timothy Lewis 先生向我大力推荐的赵连春博士。赵连春博士是燃气涡轮发动机控制系统和健康监视系统领域的专家，正是编写本书的最佳人选。2005—2007 年，赵连春博士编写了一本学时一周的燃气涡轮发动机控制系统教程，用于空军、海军和陆军工程师培训，本书的大部分内容都出自这本教程。本书中介绍发动机控制系统的内容有 6 章，其余部分分别介绍了发动机控制系统与飞机控制的集成、发动机控制新概念、发动机监视和健康管理技术。

杰克·马丁利

前 言

燃气涡轮发动机的发明可以追溯到 20 世纪 30 年代早期~40 年代末之间,到 20 世纪 50 年代燃气涡轮发动机已经成为飞机推进系统的主要动力源。如今,燃气涡轮发动机及其相关技术代表了一种最高效的发电方式;燃气涡轮发动机之所以能够成为航空推进系统的首选,除了因其具有的高效率,还因其在工作过程中的可靠性表现满足了苛刻的飞行安全性要求。

设计一台燃气涡轮发动机要求具备包括空气动力学、流体力学、固体力学、热力学、化学和材料学等多学科知识,而只有全面、透彻地了解发动机系统的性能,才能控制这样一个复杂的机械设备。在某些航空应用领域,燃气涡轮发动机要能够在整个发动机工作包线范围内提供各类可预测、可重复的推力特性,而发动机工作包线涵盖的飞行高度下至海平面以下,上至数万英尺高空。飞机在从起飞到超声速飞行的过程中,随着飞行速度的变化,飞行高度也随之改变,致使发动机进口温度、进口压力和出口压力同时发生变化。除了发动机本身的复杂性以外,大范围变化的工作条件、不断提高的推力控制精确度和工作可靠性要求,都是发动机控制系统设计过程中要面临的首要问题。

变更控制系统一直都是发动机遭遇外场意外故障时最理想的、“一步到位”的解决方式,因为变更控制逻辑和几行代码要比重新设计、制造和安装新的发动机部件容易得多。

虽然人们都承认燃气涡轮发动机控制系统的重要意义,但是即使是在燃气涡轮发动机发明 70 多年后,系统、全面阐述发动机控制系统设计的公开刊物鲜有出现。目前已知的关于发动机控制系统的最近著作发行于 1963 年,由 Sobey 和 Suggs 编写。他们的著作奠定了飞机动力装置控制技术的基础,但是书中的内容并不足以囊括近 50 年来发动机控制和监视系统技术领域中出现的最引人瞩目而又意义重大的最新进展。所以,本书的编写就是为了保证燃气涡轮发动机控制和监视系统知识的连续性。

21 世纪初,NASA 格伦研究中心为纪念莱特兄弟 1903 年首飞成功 100 周年,考虑

出版一份关于美国飞机发动机控制系统发展史的技术报告，而我则很荣幸地被选为这项工作的主要执笔人。在完成这篇有关发动机控制系统发展情况的报告之后不久，我又受 NASA 之邀撰写发动机健康管理技术发展情况的研究报告。正是因为这两份报告，美国空军热情邀请我准备关于飞机发动机控制和监视系统设计的短期课程，并在 2005 年和 2007 年各举办了一次课程讲座。本书就是以这些短期课程的教学材料为基础编写的。为感谢所有给予我教诲和鼓励的人们，我接受了这项艰巨的任务，但是我明白我并不是承担这项任务的最佳人选。编写本书的难点在于要将飞机发动机控制系统 50 多年来的知识消化吸收，而且还要将这些知识以精炼的表述形式呈现给专业背景宽广的读者。因篇幅所限，我在本书的编写过程中经常为一些论题和参考资料的取舍而伤脑筋。所以，我承认本书可能遗漏了一些读者感兴趣的话题，而增加了读者不甚关注的话题，而这样的缺憾是在所难免的。

本书的关注点不在于控制和监视系统的理论知识，而在于如何运用控制理论和工程知识解决实际问题。本书关注较多的是如何透彻地理解问题而非彻底地解决问题。本书以飞机发动机作为目标应用系统。我认为本书中所论述的建模技术、设计方法和解决问题的方式也可以应用到其他工程系统和行业，因为涡轮发动机是世界上现有的最复杂的物理系统之一，而到目前为止其他行业使用的控制和监视技术都是最先应用在飞机发动机上的。本书可供控制系统和监视系统设计专业的工程技术人员、高年级本科生和低年级研究生使用。

赵连春
2009 年 8 月

致 谢

我要对所有给予我帮助和言传身教的人表示衷心感谢，他们教授的知识在我编写本书时发挥了重要作用。由于篇幅所限，我不能向所有帮助过我的人一一致谢，在此仅向其中的一些人表达我的感激之情：感谢我在 Scientific Monitoring 公司的同事——Walter Merrill, Hoang Tran Van, Jim(Yu-tsung)Wang 和 George Mink；感谢 20 世纪 80 年代时我在加雷特涡轮发动机（Garret Turbine Engine）公司工作时的同事——Richard Ling, Glen High, Larry Yee 和 Robert McCarty；感谢在发动机控制专业方面给予我指导的加雷特公司（该公司现在已经成为了霍尼韦尔国际（Honeywell International）公司的一部分）的 Glen Schwent、NASA 格伦研究中心的 Sanjay Garg 和 Ten-Hui Guo、美国空军研究实验室的 Timothy Lewis 和 Jeffrey Stricker、通用电气（GE）公司的 Ki-Young Chung 和 Lee Lapierre、普·惠公司的 Bruce Wood、Allan Volponi 和已故的 Frank D. Gass。2009 年 5 月，我在机缘巧合时见到了 Albert Sobey 先生，他为我讲述了 1963 年出版的《飞机发动机控制系统》一书背后的故事，我深感荣幸。

我衷心感谢加雷特公司赠与我的博士奖学金，这在当时是没有先例的，这笔奖学金使我有幸得以脱离繁重的日常工作，从而有充裕的时间前往斯坦福大学继续专注于学业。我特别感谢 Jack Fredlake、John Mason 和 Joan Cudahy，为帮助我获得奖学金他们做了大量工作。在斯坦福大学，我有幸师从于 Arthur E. Bryson 教授并在他的指导下开始了愉快的学习生活和研究工作。Bryson 教授不仅学识渊博，而且工作勤奋、为人谦逊，堪称学术的权威和治学的典范。

我同样衷心感谢美国空军的慷慨解囊，为我编写的发动机控制和监视系统设计两个短期课程教材提供资金支持，这为本书的最终成稿打下了基础。我要感谢所有短期课程学员反馈给我的信息和建议，正是他们的积极反应为我完成此书提供了不竭的动力。特别感谢 Fred Kimler 和 Douglas Decker，与他们进行的讨论使我受益良多，他们的真知灼见更让我获益匪浅。

感谢杰克·马丁利，没有他就不会有本书的付梓发行。杰克·马丁利指导我如何编写技术专业书籍，为我重新制作了大量图片，他的修改和润色更好地突出了本书的专业性。杰克·马丁利还负责编写书中附录 B 部分的内容，主要介绍发动机性能和可操作性，这使本书得到了进一步完善。感谢 AIAA 的编辑 Pat DuMoulin 和她的团队，他们为本书的编辑做了大量工作。

感谢我的女儿 Jessica，她与其他出版商联系请他们允许我们在本书中借用一些插图和照片。感谢我的孩子 Timothy 和 Stacey，他们是以超乎寻常的耐心等待此书的完成并不断给我鼓励。感谢我的母亲张家鸾，是她将奉献、坚持和不断学习的价值观灌输给了我。最后我要感谢我的妻子朱嘉玫，她一如既往地支持我、爱我，给我快乐。她是我今生的至爱。

赵连春

符 号 表

A	面积, $\text{in}^{2\text{D}}$ 或 m^2
A	状态方程的状态矩阵
a	声速, $\text{ft}^{\text{D}}/\text{s}$ 或 m/s
$A(s)$	作用传递函数
B	状态方程的输入矩阵
C	状态方程的输出矩阵
c_d	流量系数
c_p	空气或气体的比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
c_m	涡轮金属的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
D	状态方程的前馈矩阵
F	力或推力, lbf^{D} 或 N
F	离散时间状态方程的动态矩阵
f	状态函数; 油气比 (燃油流量与质量流量之比)
G	离散时间状态方程的输入矩阵 (同连续系统中的 B)
$G(s)$	系统或过程传递函数
g	输出函数
H	离散时间状态方程的输出矩阵 (同连续系统中的 C)
$H(s)$	测量值反馈传递函数
h	比焓, J/kg
I	电流、惯量或脉冲函数, A ; 转动惯量或质量惯性矩, $\text{lb}^{\text{D}} \cdot \text{ft}^2$ 或 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; 单位矩阵 (黑体)
I_{2Q}	每个叶片围绕超前一滞后转折点的惯性矩, in^4 或 m^4
IGV	进口导向叶片角度或位置, rad , in 或 m
$K(s)$	控制器传递函数
K_d	微分控制增益
K_e	发动机增益常数
K_i	积分控制增益
K_p	比例控制增益
K	增益常数, 刚度 (或弹簧系数)
L	长度, in 或 cm
Ma	马赫数
$\dot{m}$	质量流量, lb/s 或 g/s

续表

$\dot{m}_{ci}$	第 i 个计算站点的换算质量流量
N	转速, r/min 或 %
n_{ci}	第 i 个计算站点发动机换算转速
n_{cmd}	转速指令, r/min 或 %
n_g	燃气发生器转速
n_H	高压转子转速, r/min 或 %
n_L	低压转子转速, r/min 或 %
n_P	动力涡轮转速
n_1	低压转子转速, r/min 或 %
n_2	高压转子转速, r/min 或 %
P	功率, hp [®] 或 W; 累积概率
p	压力, psi [®] 或 N/m ² ; 概率密度函数
p_i	第 i 个计算站点的压力
p_{ti}	第 i 个计算站点的总压
Q	扭矩或转矩, lbf · ft, N · m 或 J; 容积流量, m ³ /s, ft ³ /s 或 USgal [®] /min
$\mathcal{Q}$	加权矩阵
R	气体常数, J/(K · mol); 加权矩阵 (黑体)
s	频率变量, 1/rad
S	熵, J/K
T	温度, °F [®] , °R [®] , °C 或 K; 扭矩, lbf · ft 或 N · m
t	时间, s
T_{ti}	第 i 个计算站点的总温
U	输入 (控制) 变量
V	速度, ft/s 或 m/s; 体积, in ³ 或 m ³ ; 电压, V
V	测量噪声
W	质量流量, lb/s 或 kg/s
W_f	燃油流量, kg/h
x	状态变量
$\dot{x}$	状态变量变化率
$\bar{x}$	x 平均值 (或期望值)
y	输出变量
z	输出变量测量值
Γ_k	第 k 级 (或区间) 的多级 (或离散) 输入矩阵
γ	比热 (容) 比
Δ	有限变化量
δ	微小 (或无穷小) 变化量

续表

δ_i	无量纲总压, p/p_{std}
∂	偏导符号
Λ	对角矩阵
η_i	第 i 个部件的绝热效率
θ	无量纲温度, T/T_{std}
θ_i	无量纲总温, T_i/T_{std}
ρ	密度
σ	无量纲密度, ρ/ρ_{std}
τ	时间常数; 特征时间, s
Φ_k	第 k 级 (或区间) 的多级 (或离散) 动态矩阵
ω	频率, rad/s
$\wedge$	估计值
① 1in=25.4mm; ② 1ft=0.3048m; ③ 1lbf=4.448N; ④ 1lb=0.4536kg; ⑤ 1hp=745.7W; ⑥ 1psi=1lbf/in ² ; ⑦ 1USgal=3.785L; ⑧ $t(^{\circ}\text{C}) = \frac{5}{9} (t(^{\circ}\text{F}) - 32)$; ⑨ $1^{\circ}\text{R} = \frac{5}{9} \text{K}$ 。	

目 录

第 1 章 发动机控制系统综述	1
1.1 控制系统专业术语	4
1.2 燃气涡轮发动机控制系统介绍	6
1.3 发动机控制系统的发展史	8
1.3.1 初始阶段	9
1.3.2 成长阶段	10
1.3.3 电子化阶段	12
1.3.4 综合化阶段	15
1.3.5 飞行研究与先进控制	16
1.3.6 控制系统的复杂性	19
1.3.7 历史上的重要发动机	22
第 2 章 发动机建模与仿真	29
2.1 稳态发动机模型	29
2.2 动态发动机模型	30
2.2.1 转子动力学——惯性效应	30
2.2.2 压力动力学——质量存储效应	34
2.2.3 温度动力学——能量存储效应	36
2.3 整台发动机动力学的建模	37
2.4 作动器和传感器动力学的建模	39
2.4.1 液压作动器	40
2.4.2 气动作动器	44
2.5 高逼真度发动机仿真	45
2.5.1 美国空军通用涡扇发动机模型	45
2.5.2 NASA 通用涡扇发动机模型	48
2.6 发动机线性模型的导出	49
2.6.1 非线性仿真导出线性模型	49
2.6.2 按试验/运行数据的模型辨识	51

第3章 模型降阶和动态分析	55
3.1 发动机动态举例	55
3.2 值得关注的频谱	57
3.3 基本控制带宽内的主导动态	58
3.3.1 通过频谱分解进行模型降阶	58
3.3.2 基于奇异值分解的模型降阶(平衡实现)	62
3.4 发动机和飞机动态综合	64
3.4.1 涡轴发动机动态	65
3.4.2 发动机和机身的兼容性问题	69
3.4.3 直升机旋翼和涡轴发动机	70
3.5 发动机动态变化	73
第4章 稳态控制器设计	76
4.1 单轴发动机控制器设计	77
4.1.1 单轴发动机根轨迹设计	78
4.1.2 单轴发动机频率响应设计	82
4.2 双轴发动机控制器设计	84
4.2.1 不带作动器动态的双轴发动机PI控制律设计	86
4.2.2 带有作动器动态的双轴发动机PID控制律设计	87
4.3 涡轴发动机控制设计	89
4.3.1 动力涡轮转速反馈控制	90
4.3.2 旋翼负载预期前馈控制	90
4.3.3 最优燃油消耗量自适应控制	91
4.4 稳态控制的某些实际问题	92
4.4.1 不同控制律下的发动机响应	92
4.4.2 用燃油流量比作控制变量	94
第5章 过渡态和限制控制器设计	96
5.1 基于计划的过渡态控制器设计	97
5.1.1 控制计划概念	98
5.1.2 加速控制	99
5.1.3 减速控制	100
5.2 过渡态控制中应考虑的非线性问题	100
5.2.1 增益调参	101
5.2.2 抗积分卷积分	103
5.2.3 减速喘振	104

5.3 基于加速度的过渡态控制器设计	104
5.3.1 $\dot{n}$ 控制概念	105
5.3.2 双轴涡扇发动机 $\dot{n}$ 控制设计	108
5.3.3 基于计划的控制与 $\dot{n}$ 控制的对比	109
5.4 限制保护控制器设计	110
5.5 旋翼飞机发动机应考虑的问题	113
5.5.1 功率管理	113
5.5.2 自适应加速控制和消喘控制	114
第6章 控制系统综合	116
6.1 概述	116
6.2 功率设定	117
6.2.1 起飞功率计划	117
6.2.2 慢车功率计划	119
6.2.3 部分功率	120
6.2.4 调整功能和自动调整	121
6.3 瞬时计划	122
6.3.1 加速计划	123
6.3.2 减速计划	124
6.4 控制模式	124
6.5 发动机附件	126
6.5.1 附件的分类	126
6.5.2 电子控制器	127
6.6 控制器综合实例	130
6.6.1 单轴发动机控制器的设计和综合	131
6.6.2 双轴发动机控制器的设计和综合	136
第7章 先进控制概念	141
7.1 多变量控制	141
7.1.1 多变量设计主题问题	141
7.1.2 频域方法	145
7.1.3 时域方法	147
7.1.4 多变量控制方法比较	148
7.2 主动间隙控制	149
7.2.1 ACC 建模	151
7.2.2 线性控制律设计	153