

Control System Design  
Technology for Aero-Engine

# 航空发动机 控制系统设计技术

姚 华 编著  
张天宏



科学出版社

飞行器动力工程专业系列教材

# 航空发动机控制系统 设计技术

姚 华 张天宏 编著

江苏高校品牌专业建设工程资助项目

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书结合工程实际,系统阐述航空发动机全权限数字电子控制系统的设计技术,包括 FADEC 系统的发展概况与设计流程、控制系统设计的技术要求、发动机控制系统的总体方案设计、航空发动机基本控制律设计、数字电子控制器设计、燃油系统设计、故障诊断与容错设计、控制系统的综合和试验验证等内容。

本书为飞行器动力工程专业发动机控制方向的特色专业教材,可作为航空宇航推进理论与工程、动力机械与工程专业研究生的参考书,也可作为航空发动机控制系统设计人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

航空发动机控制系统设计技术/姚华,张天宏编著. —北京:科学出版社,2017.6  
飞行器动力工程专业系列教材

ISBN 978-7-03-052845-2

I. ①航… II. ①姚… ②张… III. ①航空发动机—控制系统设计—教材  
IV. ①V233.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 110715 号

责任编辑:胡 凯 李涪汁 王 希 / 责任校对:赵桂芬  
责任印制:张 倩 / 封面设计:许 瑞

**科学出版社** 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

**新科印刷有限公司** 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2017 年 6 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2017 年 6 月第一次印刷 印张:18 1/2

字数:439 000

定价:59.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 《飞行器动力工程专业系列教材》编委会

主 编：宣益民

副主编：宋迎东 张天宏 黄金泉 谭慧俊 崔海涛

编 委：（按姓氏笔画排序）

王 彬 毛军远 方 磊 吉洪湖 刘小刚

何小民 宋迎东 张天宏 陈 伟 陈 杰

陈茉莉 范育新 周正贵 胡忠志 郭 文

姚 华 崔海涛 韩启祥 葛 宁 温 泉

臧朝平 谭晓茗



# 丛书序

作为飞行器的“心脏”，航空发动机是技术高度集成和高附加值的科技产品，集中体现了一个国家的工业技术水平，被誉为现代工业皇冠上的明珠。经过几代航空人艰苦卓越的奋斗，我国航空发动机工业取得了一系列令人瞩目的成就，为我国国防事业发展和国民经济建设做出了重要的贡献。2015年，李克强总理在《政府工作报告》中明确提出了要实施航空发动机和燃气轮机国家重大专项，自主研发和发展高水平的航空发动机已成为国家战略。2016年，国家《第十三个五年规划纲要》中也明确指出：中国计划实施100个重大工程及项目，其中“航空发动机及燃气轮机”位列首位。可以预计，未来相当长的一段时间内，航空发动机技术领域高素质创新人才的培养将是服务国家重大战略需求和国防建设的核心工作之一。

南京航空航天大学是我国航空发动机高层次人才培养和科学研究的重要基地，为国家培养了近万名航空发动机专门人才。在江苏省高校品牌专业一期建设工程的资助下，南京航空航天大学于2016年启动了飞行器动力工程专业系列教材的建设工作，旨在使教材内容能够更好地反映当前科学技术水平和适应现代教育教学理念。教材内容涉及航空发动机的学科基础、部件/系统工作原理与设计、整机工作原理与设计、航空发动机工程研制与测试等方面，汇聚了高等院校和航空发动机厂所的理论基础及研发经验，注重设计方法和体系介绍，突出工程应用及能力培养。

希望本系列教材的出版能够起到服务国家重大需求、服务国防、服务行业的积极作用，为我国航空发动机领域的创新性人才培养和技术进步贡献力量。

董道氏

南京航空航天大学

2017年5月



受南京航空航天大学张天宏教授的邀请,编写了本书。本书的主要读者对象是飞行器动力工程专业的学生,侧重工程设计方面的知识和方法,旨在提高学生的工程应用能力。本书的一部分内容参考了本人此前出版的《航空发动机全权限数字电子控制系统》一书,为了使本书更贴近于实际应用,保留了原书中在工程中已得到实际应用的部分内容,去掉了现代控制理论等相关内容,并增加了数字电子控制器设计、燃油系统设计等章节。

本书共分 8 章:第 1 章由姚华和张天宏编写,第 2 章、第 3 章、第 4 章、第 7 章和第 8 章由姚华编写,第 5 章由蒋文亮和张天宏编写,第 6 章由张东辉和张天宏编写。张天宏对全书进行了策划、校核和统稿。参与编写的人员都曾多年从事航空发动机全权限数字电子控制系统的设计研究,积累了一定的知识和经验,本书是我们在此领域工作的总结和提炼,供本专业的学生和同事共享。

本书结合某双转子加力涡扇发动机系统地阐述航空发动机全权限数字电子控制系统及主要部件的设计技术。第 1 章为绪论,概述控制系统的国内外发展现状和未来发展方向。第 2 章为控制系统设计的技术要求,对航空发动机的控制计划进行详细分析,并从工程设计的角度系统地提出对控制系统的技术要求,包括控制计划、功能要求、性能要求、工作环境要求以及“五性”要求等。第 3 章为控制系统的总体方案设计,阐述控制系统基本结构设计、余度设计、精度分析、稳定性分析、可靠性分析以及主要部件的原理方案和基本参数设计等。第 4 章为控制律设计,采用经典的设计方法,对控制系统各回路的控制律进行详细的分析和设计。第 5 章为数字电子控制器设计,阐述处理器、总线、输入信号处理、输出驱动、余度管理、电源变换等电路的概要设计。第 6 章为燃油系统设计,介绍各种燃油泵等部件的原理和在燃油系统设计中的应用,并阐述燃油计量和伺服作动系统及部件的结构原理、主要结构参数设计计算。第 7 章为故障诊断与容错设计,阐述有关的基本概念、BIT 设计方法、故障诊断与故障处理的基本方法。第 8 章为控制系统的综合和试验验证,阐述控制系统几种重

要的试验验证方法：电子控制器在回路仿真试验、控制系统半物理模拟试验、发动机地面试验、高空台试验以及飞行试验。

由于作者水平有限，书中难免有不妥之处，恳请读者和专家们指正。

姚 华

2016 年 10 月

## 符 号 表

$H$	飞行高度
$Ma$	飞行马赫数
$F$	推力
$n_L$	低压转子转速
$n_{LC}$	低压转子换算转速
$n_H$	高压转子转速
$n_{HC}$	高压转子换算转速
$T_{s0}$	大气静温
$T_{st}$	标准大气温度
$T_{t1}$	进气道进口空气总温
$T_{t2}$	进气道出口/风扇进口空气总温
$T_{t22}$	风扇出口空气总温
$T_{t25}$	高压压气机进口空气总温
$T_{t3}$	高压压气机出口/燃烧室进口空气总温
$T_{t4}$	燃烧室出口燃气总温
$T_{t41}$	高压涡轮进口燃气总温
$T_{t45}$	高压涡轮出口燃气总温
$T_{t46}$	低压涡轮转子出口燃气总温
$T_{t6}$	低压涡轮内涵出口燃气总温
$T_{t16}$	外涵出口空气总温
$T_{t75}$	加力燃烧室出口燃气总温
$T_{t8}$	喷口喉道处燃气总温
$P_{s0}$	大气静压
$P_{t1}$	进气道进口空气总压
$P_{t2}$	进气道出口/风扇进口空气总压
$P_{t22}$	风扇出口空气总压
$P_{t25}$	高压压气机进口空气总压
$P_{t3}$	高压压气机出口空气总压
$P_{t4}$	燃烧室出口燃气总压
$P_{t41}$	高压涡轮进口燃气总压
$P_{t45}$	高压涡轮出口燃气总压
$P_{t46}$	低压涡轮转子出口燃气总压
$P_{s6}$	低压涡轮内涵出口燃气静压
$P_{t6}$	低压涡轮内涵出口燃气总压
$P_{s16}$	外涵出口空气静压
$P_{t16}$	外涵出口空气总压
$P_{t7}$	掺混室出口燃气总压
$P_{t75}$	加力燃烧室出口燃气总压



- $P_{t8}$ —— 喷口喉道燃气背压  
 $P_{tC8}$ —— 喷口喉道处燃气总压  
 $W_{a13}$ —— 外涵进口空气质量流量  
 $W_{a2}$ —— 风扇空气质量流量  
 $W_{a22}$ —— 风扇出口空气质量流量  
 $W_{a25}$ —— 压气机进口空气质量流量  
 $W_{a3}$ —— 压气机出口空气质量流量  
 $W_{a31}$ —— 燃烧室空气质量流量  
 $W_{g4}$ —— 燃烧室燃气质量流量  
 $W_{g41}$ —— 高压涡轮进口燃气质量流量  
 $W_{g46}$ —— 低压涡轮转子出口燃气质量流量  
 $W_{g6}$ —— 内涵燃气质量流量  
 $W_{g16}$ —— 外涵空气质量流量  
 $W_{g7}$ —— 掺混室燃气质量流量  
 $W_{g75}$ —— 加力燃烧室燃气质量流量  
 $W_{g8}$ —— 喷口喉道燃气质量流量  
 $\sigma_1$ —— 进气道总压恢复系数  
 $\sigma_B$ —— 燃烧室总压恢复系数  
 $\sigma_{16}$ —— 外涵总压恢复系数  
 $\sigma_7$ —— 掺混室的总压恢复系数  
 $\sigma_{AB}$ —— 加力燃烧室总压恢复系数  
 $\sigma_e$ —— 喷口总压恢复系数  
 $\eta_F$ —— 风扇效率  
 $\eta_B$ —— 燃烧室效率  
 $\eta_{HT}$ —— 高压涡轮效率  
 $\eta_{AB}$ —— 加力燃烧室效率  
 $\eta_{mH}$ —— 高压轴的机械效率  
 $\eta_{mL}$ —— 低压轴的机械效率  
 $\pi_F$ —— 风扇压比  
 $\pi_{HT}$ —— 高压涡轮落压比 (膨胀比)  
 $\pi_{LT}$ —— 低压涡轮落压比 (膨胀比)  
 $\pi_T$ —— 涡轮落压比 (膨胀比)  
 $N_{LC}$ —— 低压压气机功率  
 $N_{HC}$ —— 高压压气机功率  
 $N_{HT}$ —— 高压涡轮功率  
 $N_{LT}$ —— 低压涡轮功率  
 $N_{EX}$ —— 高压涡轮的抽功量  
 $A_{16}$ —— 外涵出口面积  
 $A_8$ —— 喷口喉道截面面积  
 $A_9$ —— 喷口出口截面面积  
 $f_a$ —— 油气比  
 $H_n$ —— 空气的焓  
 $S_n$ —— 空气的熵

- $v_0$ ——进气道进口气流速度  
 $v_8$ ——喷口气流速度  
 $k_0$ ——比热比  
 $R_A$ ——气体常数  
 $J_L$ ——低压转子转动惯量  
 $J_H$ ——高压转子转动惯量  
 $PLA$ ——油门杆角度  
 $W_f$ ——主燃油流量  
 $W_{fAB}$ ——加力燃油流量  
 $W_{fAB1}$ ——加力 1 区燃油流量  
 $W_{fABi}$ ——加力内涵燃油流量  
 $W_{fABo}$ ——加力外涵燃油流量  
 $L_m$ ——主燃油计量位置  
 $L_{a1}$ ——加力 1 区燃油计量位置  
 $L_{ai}$ ——加力内涵燃油计量位置  
 $L_{ao}$ ——加力外涵燃油计量位置  
 $\alpha_f$ ——风扇进口可调叶片角度  
 $\alpha_c$ ——高压压气机进口可调静子叶片角度  
 $L_1$ ——矢量喷口作动筒 1 位置  
 $L_2$ ——矢量喷口作动筒 2 位置  
 $L_3$ ——矢量喷口作动筒 3 位置  
 $P_{ck}$ ——喘振压差  
 $I_{W_f}$ ——主燃油流量控制输出电流  
 $I_{\alpha_f}$ ——风扇进口可调叶片角度控制输出电流  
 $I_{\alpha_c}$ ——高压压气机进口可调静子叶片角度控制输出电流  
 $I_{W_{fAB1}}$ ——加力 1 区燃油流量控制输出电流  
 $I_{W_{fABi}}$ ——加力内涵燃油流量控制输出电流  
 $I_{W_{fABo}}$ ——加力外涵燃油流量控制输出电流  
 $I_{A8}$ ——喷口喉道截面面积控制输出电流  
 $I_{L1}$ ——矢量喷口作动筒  $L_1$  控制输出电流  
 $I_{L2}$ ——矢量喷口作动筒  $L_2$  控制输出电流  
 $I_{L3}$ ——矢量喷口作动筒  $L_3$  控制输出电流  
 $\delta$ ——矢量偏转角  
 $\theta$ ——矢量方位角

下标:

- idle——慢车状态  
 min——最小  
 max——最大  
 sT——起动  
 err——偏差  
 cmd——指令  
 ac——加速  
 dc——减速



# 目 录

丛书序  
前言  
符号表

第 1 章	绪论	1
1.1	航空发动机控制技术的发展	1
1.1.1	液压机械控制	2
1.1.2	液压机械 + 电子控制	2
1.1.3	全权限数字电子控制	3
1.2	FADEC 技术的发展	3
1.2.1	国外 FADEC 技术的发展历程	3
1.2.2	我国 FADEC 技术的发展	9
1.2.3	FADEC 技术的发展趋势	12
1.3	FADEC 系统的一般设计流程及本书内容安排	15
1.3.1	FADEC 系统的一般设计流程	15
1.3.2	本书内容安排	15
第 2 章	控制系统设计的技术要求	16
2.1	航空发动机控制计划	16
2.1.1	航空发动机的工作状态	16
2.1.2	航空发动机各工作状态的使用限制	17
2.1.3	航空发动机控制变量的选择	19
2.1.4	起动过程的控制计划	20
2.1.5	非加力工作状态的控制计划	21
2.1.6	加力工作状态的控制计划	30
2.2	控制系统的功能要求	36
2.2.1	航空发动机控制系统的功能	36

2.2.2	控制功能的详细描述	38
2.3	控制系统的性能要求	58
2.3.1	稳态性能指标	58
2.3.2	动态性能指标	59
2.3.3	切换性能指标	59
2.3.4	执行机构回路控制品质要求	59
2.4	控制系统的工作环境要求	62
2.4.1	电子控制器工作环境	62
2.4.2	燃油附件工作环境	62
2.5	安全性、可靠性、维修性、保障性、测试性设计要求	62
2.5.1	安全性设计要求	62
2.5.2	可靠性设计要求	63
2.5.3	维修性设计要求	63
2.5.4	保障性设计要求	64
2.5.5	测试性设计要求	64
<b>第 3 章</b>	<b>控制系统的总体方案设计</b>	<b>65</b>
3.1	控制系统的基本结构	65
3.1.1	控制系统的总体结构和功能分配	66
3.1.2	主燃油流量控制	67
3.1.3	风扇进口可调叶片角度控制	68
3.1.4	高压压气机进口可调静子叶片角度控制	69
3.1.5	加力燃油流量控制	69
3.1.6	尾喷口喉道截面面积控制	70
3.1.7	矢量喷口控制	71
3.2	控制系统余度设计	71
3.2.1	控制系统可靠性的基本概念	71
3.2.2	控制系统典型结构余度分析	73
3.2.3	控制系统结构余度设计	77
3.3	控制系统精度分析	83
3.3.1	在给定控制计划下控制精度的选择	83
3.3.2	根据控制精度选择控制计划	86
3.3.3	传感器精度计算方法	87
3.3.4	传感器精度计算	88
3.4	控制系统稳定性分析	92
3.4.1	主燃油流量控制回路	92
3.4.2	尾喷口喉道面积控制回路	97
3.4.3	其他控制回路	101
3.4.4	多回路共同工作对系统稳定性的影响	101

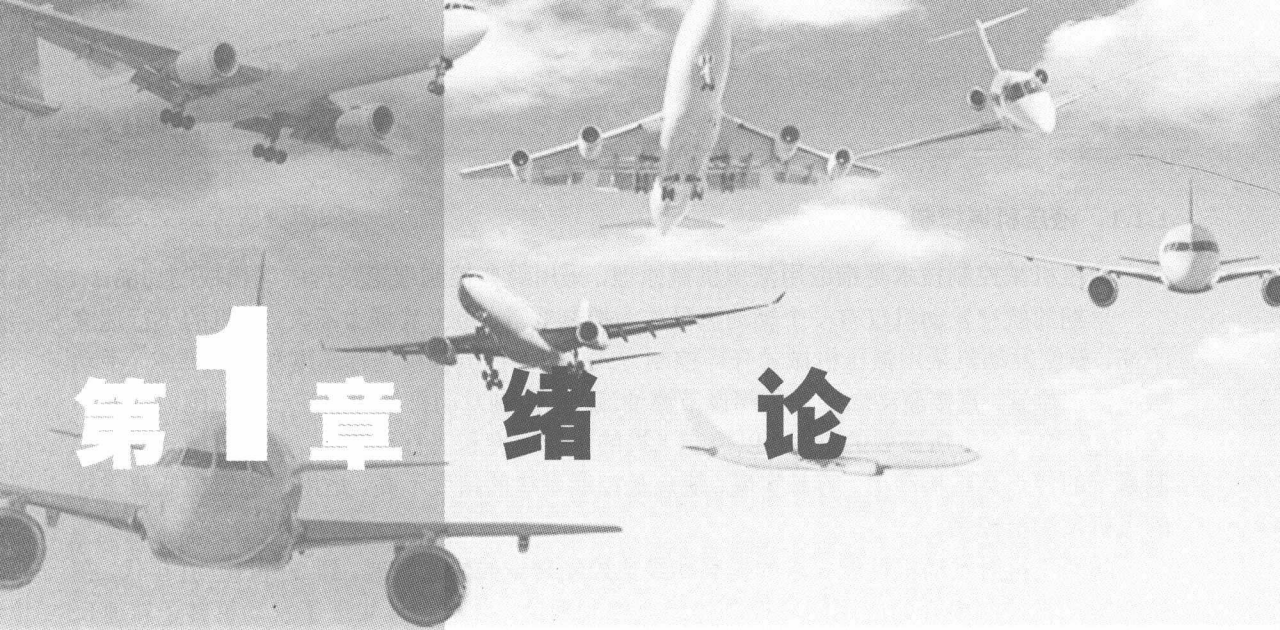
3.5	控制系统可靠性分析	105
3.5.1	控制系统可靠性模型的基本概念	105
3.5.2	典型结构的故障树模型	107
3.5.3	对控制系统方案的可靠性建模与预计	109
3.5.4	控制系统可靠性指标分配	110
3.6	电子控制器原理方案	112
3.6.1	电子控制器主要功能设计	112
3.6.2	电子控制器总体架构设计	113
3.7	燃油系统原理总体方案	117
3.7.1	燃油系统的主要功能设计	117
3.7.2	燃油系统的总体架构设计	118
3.7.3	主燃油系统原理方案	119
3.7.4	加力燃油系统原理方案	121
3.8	传感器参数设计与选型配置	123
3.8.1	压力传感器	123
3.8.2	喘振传感器	124
3.8.3	发动机进口总温传感器	124
3.8.4	高压压气机进口气体总温传感器	124
3.8.5	低压涡轮出口温度传感器及集电环	125
3.8.6	喷口喉道面积传感器	125
3.8.7	转速传感器	125
3.8.8	火焰传感器	126
第 4 章	控制律设计	127
4.1	位置伺服回路控制	128
4.2	主燃油流量控制	134
4.2.1	稳态点控制	134
4.2.2	增益调参	136
4.2.3	基于相似理论的增益调参	139
4.2.4	限制保护控制	140
4.2.5	加减速控制	142
4.2.6	起动控制	147
4.2.7	主燃油流量控制综合	149
4.3	加力燃油流量控制	150
4.4	风扇进口可调叶片角度控制	151
4.5	高压压气机进口可调静子叶片角度控制	151
4.6	喷口控制	152
4.6.1	喷口开环控制	152
4.6.2	喷口闭环控制	153

4.7	矢量喷口控制	156
<b>第 5 章</b>	<b>数字电子控制器设计</b>	<b>158</b>
5.1	数字电子控制器设计概述	158
5.2	输入信号处理模块设计	159
5.2.1	模拟信号处理电路	159
5.2.2	频率信号处理电路	165
5.2.3	离散量信号处理电路	167
5.2.4	信号采集电路	168
5.3	控制处理模块电路设计	170
5.3.1	CPU 电路	170
5.3.2	存储器电路	171
5.3.3	外围接口电路	171
5.3.4	FPGA 电路	172
5.3.5	WDT 及复位电路	172
5.3.6	时钟电路	173
5.3.7	局部总线接口电路	173
5.3.8	通信总线接口电路	174
5.4	输出信号处理电路	180
5.4.1	模拟信号电流放大电路	180
5.4.2	高速电磁阀驱动电路	181
5.4.3	离散信号驱动电路	182
5.4.4	步进电机驱动电路	183
5.4.5	D/A 转换电路	184
5.5	电源模块设计	185
5.5.1	EMI 滤波	185
5.5.2	AC/DC 变换	186
5.5.3	DC/DC 变换	188
5.5.4	过压保护电路	189
5.5.5	电源监控	191
5.6	余度管理电路	192
5.6.1	通道同步电路	192
5.6.2	逻辑切换电路	193
5.6.3	通道间交叉通信电路	194
5.7	开放式电子控制器的智能模块设计	195
5.7.1	串行数据总线	195
5.7.2	信号输入模块	196
5.7.3	CPU 模块	197
5.7.4	伺服控制模块	198

5.8	控制软件设计	199
5.8.1	控制软件的主要功能设计	199
5.8.2	控制软件的架构设计	199
5.8.3	操作管理软件设计	200
5.8.4	应用软件设计	201
5.8.5	软件设计注意事项	202
<b>第 6 章</b>	<b>燃油系统设计</b>	<b>204</b>
6.1	燃油泵选型分析	204
6.1.1	增压泵	204
6.1.2	主泵	204
6.1.3	加力泵	205
6.1.4	伺服油源泵	206
6.2	伺服作动控制系统设计	207
6.2.1	伺服作动控制系统工作原理	207
6.2.2	风扇进口可调导叶和高压压气机静子叶片角度控制装置	208
6.2.3	喷口喉道面积控制装置	208
6.2.4	矢量喷口控制装置	209
6.2.5	典型伺服作动回路设计计算	210
6.3	燃油计量系统设计	218
6.3.1	燃油计量工作原理	218
6.3.2	计量活门型孔设计	221
6.3.3	压差回油式燃油计量回路设计计算	223
6.3.4	燃油计量稳态精度分析	231
<b>第 7 章</b>	<b>故障诊断与容错设计</b>	<b>234</b>
7.1	故障诊断与测试的基本概念	235
7.1.1	故障定义与分类	235
7.1.2	故障诊断的概念和过程	236
7.1.3	测试性与机内自检测	237
7.1.4	测试性指标	237
7.2	机内自检测设计	240
7.2.1	上电前自检测	240
7.2.2	飞行前自检测	241
7.2.3	飞行中自检测	243
7.2.4	维护性自检测	245
7.3	故障诊断与处理的基本方法	245
7.3.1	故障发现	245
7.3.2	故障定位	247

7.3.3	故障隔离	247
7.3.4	系统重构	248
7.3.5	故障恢复	252
7.3.6	故障告警	252
7.3.7	故障记录	254
<b>第 8 章</b>	<b>控制系统的综合和试验验证</b>	<b>255</b>
8.1	电子控制器在回路仿真	256
8.1.1	电子控制器在回路仿真装置主要功能	256
8.1.2	电子控制器在回路仿真系统的组成和原理	256
8.1.3	电子控制器在回路仿真装置主要性能参数	258
8.1.4	电子控制器在回路仿真的主要内容	258
8.2	控制系统的半物理模拟试验	263
8.2.1	半物理模拟试验器的主要功能	263
8.2.2	半物理模拟试验系统的组成和原理	263
8.2.3	半物理模拟试验器主要指标要求	266
8.2.4	半物理模拟试验主要内容	267
8.3	发动机试验与验证	271
8.3.1	发动机地面试车	272
8.3.2	发动机高空台试验	274
8.3.3	发动机飞行试验	274
<b>主要参考文献</b>		<b>276</b>





# 第1章 绪论

## 1.1 航空发动机控制技术的发展

航空发动机控制技术由 20 世纪 40 年代简单的液压机械控制、液压机械 + 电子控制, 发展到现代的全权限数字电子控制 (full authority digital electronic control, FADEC), 并向智能/分布式控制方向发展。图 1-1 展示了各阶段控制技术的发展历程和典型的飞机发动机应用情况。

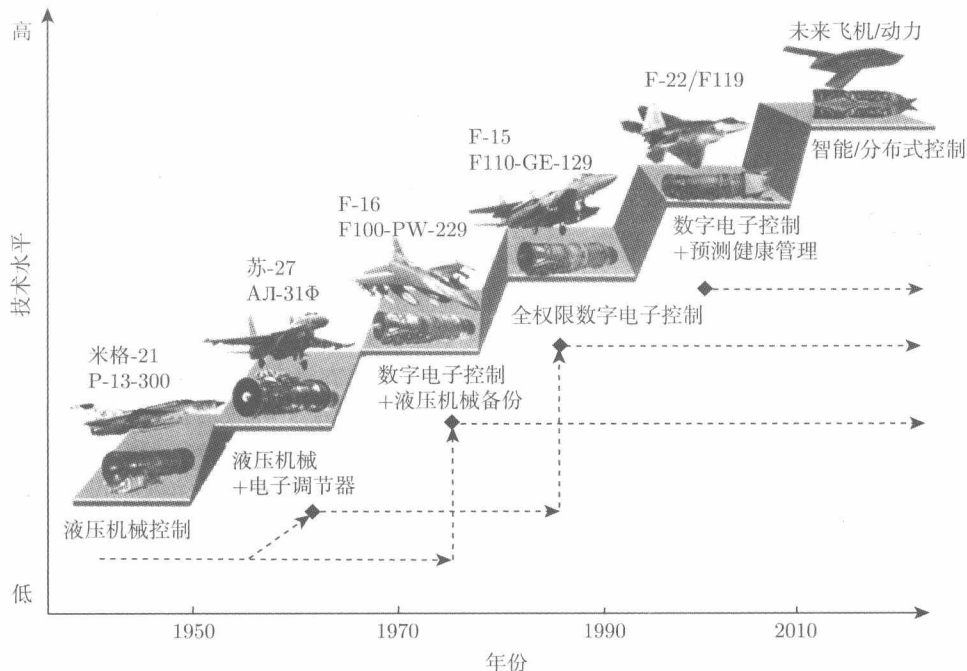


图 1-1 航空发动机控制技术发展历程与趋势