



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

姚 华 编著

航空发动机全权限 数字电子控制系统

FULL AUTHORITY DIGITAL
ELECTRONIC CONTROL SYSTEM
FOR AERO-ENGINE

航空工业出版社

014056923

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

V233.7
08

航空发动机全权限 数字电子控制系统

姚 华 编著



航空工业出版社

北 京



北航

C1741949

V233.7
08

014028253

内 容 提 要

本书系统性地阐述了航空发动机全权限数字电子控制 (FADEC) 系统的设计和验证方法, 包括 FADEC 系统的技术发展, 发动机建模方法, 发动机对控制系统的技术要求, FADEC 系统的总体方案设计、控制律设计、故障诊断与容错设计和试验验证方法等内容。

本书适用于航空发动机控制系统设计人员使用, 也可作为航空发动机及其控制领域广大科研、设计、教学人员, 以及高校学生的参考书。

图书在版编目 (C I P) 数据

航空发动机全权限数字电子控制系统/姚华编著

--北京: 航空工业出版社, 2014. 6

(中航工业首席专家技术丛书)

ISBN 978 - 7 - 5165 - 0368 - 3

I. ①航… II. ①姚… III. ①航空发动机—数字控制系统 IV. ①V233. 7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 135388 号

航空发动机全权限数字电子控制系统

Hangkong Fadongji Quanquanxian Shuzi Dianzi Kongzhi Xitong

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 - 84934379 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 6 月第 1 版

2014 年 6 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

印张: 22

字数: 561 千字

印数: 1—2500

定价: 108.00 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。

林左鸣

中国航空工业集团公司董事长

序

由液压机械式控制向数字电子式控制的转变，无疑是 20 世纪后期航空发动机控制最具革命性的变化。早期的航空发动机调节器用燃油调节转速，功能简单，是发动机的一个附件。现代航空发动机的全权限数字电子控制（FADEC）系统对于发动机从起动、加速到最大状态，再减速到停车具有全部控制权限，FADEC 系统不仅要保证发动机具有良好的运行性能，它还要通过众多传感器来监视发动机状态，进行健康管理，保证发动机的安全运行。FADEC 系统已是现代航空发动机的必备系统，它在发动机中的作用显得日益重要。附件已不足以反映 FADEC 系统的重要性，现在把 FADEC 系统比喻为发动机的大脑和神经系统已不足为过。出版一本关于 FADEC 系统设计方面的参考书，是发动机行业广大工程技术人员以及有关院校师生翘首以盼的事情。

20 世纪 80 年代我国刚开始进行航空发动机数字电子控制系统研制时，本书作者姚华就参加了该项研究工作。1999 年开始担任航空动力控制系统研究所的总设计师，先后主持了多项 FADEC 型号研制以及预先研究项目，完成了我国第一个航空发动机全权限数字电子控制系统的研究和试飞演示验证，完成了我国第一型航空发动机全权限数字电子控制系统的型号研制和设计定型，主持了第三代发动机全权限数字电子控制系统的研制工作。由于国外对该项技术的封锁，国内的研制主要依靠自力更生，独立自主，许多研究具有开创性，历经 20 余年的研究实践，主持建立了具有自主知识产权 FADEC 的研发体系，包括一系列的设计标准和设计规范等，取得了丰硕的成果，他的博士论文被南京航空航天大学评为优秀博士学位论文。现在他已经成为发动机控制行业的首席科学家，这本书是其长期在此领域工作的总结和凝练。

我有幸先读了本书的书稿，本书系统、深入而全面地阐述了 FADEC 系统的设计方法。在建模部分，除了阐述部件级模型外，还阐述了状态变量模型、人工智能模型、自适应模型、组件化模型等发动机控制系统设计中可能要用到的发动机数学模型，这显然不同于发动机原理书籍中所讨论的发动机模型。本书从工程设计角度全面而系统地提出了对 FADEC 系统的技术要求，包括从顶层的控制

计划开始到对系统的功能要求、性能要求、工作环境要求,以及“五性”要求。继而阐述了FADEC 系统的总体方案设计,从基本结构设计到余度设计、可靠性分析、精度分析、稳定性分析,以及主要部件的原理方案和基本参数设计。在控制律设计部分,采用经典的设计方法,对各回路的控制律进行了详细的分析和设计,具有很强的实用性,除阐述经典控制的设计方法外,还阐述了鲁棒控制、自适应控制、智能控制、性能寻优控制和高稳定性控制等先进控制律的设计方法。在故障诊断与容错设计部分,阐述了有关的基本概念、机内自检测设计方法、故障诊断与故障处理的基本方法,以及先进的故障诊断与容错控制技术。最后阐述了 FADEC 系统的几种重要的试验验证方法:电子控制器在回路的仿真试验、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。书中每个部分大都提供了具体数据,有翔实的背景资料,有仿真试验或实物试验验证,具有很高的可信度和实用价值。

我相信,本书的问世,一定会受到航空发动机及控制领域广大科研、设计、教学人员,以及博士、硕士研究生的欢迎,会成为有关人员必不可少的一本参考书。对于非航空的燃气涡轮发动机及控制领域的广大科技人员,本书也有很高的参考价值。

孙健国

2013 年 7 月 10 日

前 言

航空发动机全权限数字电子控制 (FADEC) 系统已经取代液压机械调节器成为现代航空发动机的典型技术, 现已从第一代发展至第三代。我国从 20 世纪 80 年代开始研究 FADEC 技术, 90 年代完成地面验证, 2002 年完成试飞验证, 2010 年某型号设计定型, 并已批量生产。目前, 新研发发动机都采用了 FADEC 系统。在发动机控制领域, 曾出版过多本教科书, 主要内容是介绍自动控制的基本原理和液压机械调节器的设计方法, 但至今为止还没有出版过一本 FADEC 方面的专著, 因此, 出版本书对发动机控制专业人员及发动机的总体、系统、使用维护人员都是十分有意义的。

本人从 20 世纪 80 年代开始从事 FADEC 的技术研究, 多年来, 主持了多型航空发动机 FADEC 型号和预先研究工作, 积累了一些经验, 本书是本人在此领域工作的总结和提炼, 希望通过这本书, 把我获得的一些知识和经验与从事本行业工作的同事们共享, 为我国 FADEC 技术的进一步发展尽一点微薄之力。

本书编写之初, 试图包括全权限数字电子控制系统的设计与试验验证, 以及分系统和部件设计与试验验证的全部内容, 但写完系统的设计与试验验证后, 篇幅已经很大, 因此, 分系统和部件的设计与试验验证部分将待以后出版。

本书共分为 7 章。第 1 章为航空发动机全权限数字电子控制系统发展综述, 概述了 FADEC 系统国内外的发展历史和发展现状, 简述了典型 FADEC 系统的研究计划, 分析了未来航空发动机控制系统的发展方向。第 2 章为航空发动机建模与仿真, 阐述了部件级模型的建模原理及状态变量模型、人工智能模型、自适应模型和组件化模型等发动机控制系统设计中可能要用到的发动机数学模型的建模方法。第 3 章为控制系统技术要求, 在对航空发动机的调节计划进行详细分析的基础上, 从工程设计的角度全面而系统地提出了对 FADEC 系统的技术要求, 包括从顶层的控制计划开始到对系统的功能要求、性能要求、工作环境要求, 以及“五性”要求。第 4 章为控制系统总体方案设计, 阐述了 FADEC 系统的总体方案设计, 从基本结构设计到冗余设计、可靠性分析、精度分析、稳定性分析, 以及主要部件原理方案和基本参数设计。第 5 章为控制律设计, 采用了经典的设计方法, 对各回路的控制律进行了详细的分析和设计, 还阐述了鲁棒控制、自适应控制、智能控制、性能寻优控制和高稳定性控制等先进控制律的设计方法。第 6 章为故障诊断与容错设计, 阐述了有关的基本概念、机内自检测设计方法、故障诊断与故障处理的基本方法, 以及先进的故障诊断与容错控制技术。第 7 章为控制系统的综合与试验验证, 阐述了 FA-

DEC 系统几种重要的试验验证方法,包括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。

本书可用于航空发动机控制系统设计人员使用,也可作为航空发动机及其控制领域广大科研、设计、教学人员及高等院校学生的参考用书。

FADEC 技术需要很深的理论基础,感谢我硕士研究生导师南京航空航天大学赵子元教授和博士研究生导师孙健国教授,是他们的精心教诲,为我的研究工作打下了良好的基础。FADEC 系统研制是一项系统工程,需要团队才能完成研制,感谢多年来共同工作过的领导和同事,FADEC 系统研制的每一次进步都是大家共同努力的结果。感谢南京航空航天大学孙健国教授,李秋红、张海波副教授在发动机建模和现代控制理论方法部分提供的帮助,感谢西北工业大学樊丁教授对本书进行了校对。感谢多年来默默支持我的亲人和朋友,他们的理解、鼓励和帮助,使我能全身心地投入到我所热爱的 FADEC 技术的研究工作。

由于本人水平和时间有限,书中难免有不妥或错漏之处,恳请读者和专家们批评指正。

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_{Le}	低压转子换算转速
n_H	高压转子转速
n_{He}	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}	喷管喉道处燃气总温
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_{45}	低压涡轮进口燃气质量流量
W_{g46}	低压涡轮出口燃气质量流量
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}	喷管喉道燃气质量流量
σ_1	进气道总压恢复系数
σ_B	燃烧室总压恢复系数
σ_{16}	外涵总压恢复系数
σ_7	掺混室总压恢复系数
σ_{AB}	加力燃烧室总压恢复系数
σ_e	喷管总压恢复系数
η_F	风扇效率
η_B	燃烧室效率
η_{HT}	高压涡轮效率
η_{AB}	加力燃烧室效率
η_{mH}	高压轴机械效率
η_{mL}	低压轴机械效率
π_F	风扇压比
π_{HT}	高压涡轮落压比 (膨胀比)
π_{LT}	低压涡轮落压比 (膨胀比)
π_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}	高压涡轮抽功量
A_{16}	外涵出口面积
A_8	尾喷管喉道截面面积
A_9	喷管出口截面面积
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	喷管气流速度
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
α_f	风扇进口可调叶片角度
α_c	高压压气机进口可调静子叶片角度
L_1	矢量喷管作动筒 1 位置
L_2	矢量喷管作动筒 2 位置
L_3	矢量喷管作动筒 3 位置
p_{ck}	喘振压差
I_{WT}	主燃油流量控制输出电流
I_{af}	风扇进口可调叶片角度控制输出电流
I_{ac}	高压压气机进口可调静子叶片角度控制输出电流
I_{WTAB1}	加力 1 区燃油流量控制输出电流
I_{WTABi}	加力内涵燃油流量控制输出电流
I_{WTABo}	加力外涵燃油流量控制输出电流
I_{A8}	尾喷管喉道截面面积控制输出电流

I_{L1}	矢量喷管作动筒 L_1 控制输出电流
I_{L2}	矢量喷管作动筒 L_2 控制输出电流
I_{L3}	矢量喷管作动筒 L_3 控制输出电流
δ	矢量偏转角
θ	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	给定
ac	加速
dc	减速
c, cor	换算
ds	设计点

目 录

第 1 章 航空发动机全权限数字电子控制系统发展综述	(1)
1.1 国外控制系统的发展历程	(1)
1.1.1 第一代 FADEC (FADEC I) 系统 (20 世纪 80 年代)	(2)
1.1.2 第二代 FADEC (FADEC II) 系统 (20 世纪 90 年代初期)	(5)
1.1.3 第三代 FADEC (FADEC III) 系统 (20 世纪 90 年代中后期)	(7)
1.2 我国航空发动机全权限数字电子控制系统的发展	(9)
1.3 FADEC 的未来发展趋势	(12)
1.3.1 未来航空发动机控制系统面临的要求和挑战	(12)
1.3.2 未来航空发动机控制技术的发展趋势	(12)
1.4 结论	(21)
第 2 章 航空发动机建模与仿真	(22)
2.1 航空发动机建模技术概述	(22)
2.1.1 模型分类	(22)
2.1.2 模型要求	(23)
2.1.3 建模方法	(23)
2.2 航空发动机部件级模型	(23)
2.2.1 各部件模型	(24)
2.2.2 风扇	(25)
2.2.3 压气机	(25)
2.2.4 燃烧室	(25)
2.2.5 高压涡轮	(26)
2.2.6 低压涡轮	(26)
2.2.7 外涵	(26)
2.2.8 掺混室	(27)
2.2.9 加力燃烧室	(27)
2.2.10 尾喷管	(27)
2.2.11 推力计算	(28)
2.3 航空发动机稳态模型	(28)
2.4 航空发动机动态模型	(31)
2.5 航空发动机状态变量模型	(32)
2.5.1 线性化状态变量模型的建模原理	(32)
2.5.2 偏导数法求解线性化模型	(33)
2.5.3 拟合法求线性化模型	(33)
2.6 基于人工智能的航空发动机简化模型	(34)

2.7 航空发动机自适应模型	(37)
2.7.1 自适应模型的发展	(37)
2.7.2 基于卡尔曼滤波器的自适应模型	(37)
2.7.3 基于人工智能的自适应模型	(43)
2.7.4 基于控制器的自适应模型	(47)
第3章 控制系统技术要求	(53)
3.1 航空燃气涡轮发动机控制计划	(53)
3.1.1 航空燃气涡轮发动机的工作状态	(53)
3.1.2 航空燃气涡轮发动机各工作状态的使用限制	(54)
3.1.3 航空燃气涡轮发动机控制变量的选择	(56)
3.1.4 航空燃气涡轮发动机非加力工作状态的控制计划	(57)
3.1.5 航空燃气涡轮发动机起动状态的控制计划	(65)
3.1.6 航空燃气涡轮发动机加力工作状态的控制计划	(66)
3.2 控制系统功能要求	(71)
3.2.1 控制系统功能	(71)
3.2.2 控制功能的详细描述	(73)
3.3 控制系统性能要求	(90)
3.3.1 稳态性能指标	(91)
3.3.2 动态性能指标	(91)
3.3.3 切换性能指标	(91)
3.3.4 执行机构回路控制品质要求	(92)
3.4 工作环境要求	(94)
3.4.1 电子控制器工作环境	(94)
3.4.2 燃油附件工作环境	(94)
3.5 安全性、可靠性、维修性、保障性、测试性设计要求	(94)
3.5.1 安全性设计要求	(94)
3.5.2 可靠性设计要求	(95)
3.5.3 维修性设计要求	(95)
3.5.4 保障性设计要求	(96)
3.5.5 测试性设计要求	(96)
第4章 控制系统总体方案设计	(97)
4.1 控制系统的基本结构	(97)
4.1.1 控制系统的总体结构和功能分配	(97)
4.1.2 主燃油流量控制	(99)
4.1.3 风扇进口可调叶片角度控制	(100)
4.1.4 高压压气机进口可调静子叶片角度控制	(100)
4.1.5 加力燃油流量控制	(101)
4.1.6 尾喷管喉道截面面积控制	(101)
4.1.7 矢量喷管控制	(102)

4.2	控制系统余度设计	(103)
4.2.1	控制系统可靠性的基本概念	(103)
4.2.2	控制系统典型结构余度分析	(104)
4.2.3	控制系统结构余度设计	(108)
4.3	控制系统可靠性分析	(113)
4.3.1	控制系统可靠性模型的基本概念	(113)
4.3.2	典型结构可靠性建模与分析	(116)
4.3.3	对控制系统方案的可靠性建模与评估	(120)
4.3.4	控制系统可靠性指标分配	(129)
4.4	控制系统精度分析	(130)
4.4.1	在给定控制计划下控制精度的选择	(130)
4.4.2	根据控制精度选择控制计划	(133)
4.4.3	传感器精度计算方法	(134)
4.4.4	传感器精度计算	(135)
4.5	控制系统稳定性分析	(138)
4.5.1	主燃油流量控制回路	(138)
4.5.2	尾喷管喉道截面面积控制回路	(142)
4.5.3	其他控制回路	(146)
4.5.4	多回路共同工作对系统稳定性的影响	(146)
4.6	主要部件原理方案和基本参数设计	(149)
4.6.1	电子控制器	(150)
4.6.2	燃油系统	(160)
4.6.3	控制软件	(170)
4.6.4	传感器	(174)
第5章	控制律设计	(177)
5.1	经典控制方法	(177)
5.1.1	主燃油流量控制	(177)
5.1.2	加力燃油流量控制	(192)
5.1.3	风扇进口可调叶片角度控制	(193)
5.1.4	高压压气机进口可调静子叶片角度控制	(194)
5.1.5	喷口控制	(194)
5.1.6	矢量喷管控制	(197)
5.1.7	伺服回路控制	(199)
5.2	鲁棒控制技术	(204)
5.2.1	LQG/LTR 控制方法	(204)
5.2.2	H_{∞} 控制方法	(208)
5.2.3	ALQR 控制方法	(211)
5.2.4	LQ— H_{∞} 控制方法	(214)
5.3	自适应控制技术	(217)

5.3.1	基于李雅普诺夫理论的模型参考自适应控制方法	(218)
5.3.2	纳朗特兰 (Narendra) 自适应控制方法	(223)
5.3.3	基于发动机相似参数的自适应控制方法	(230)
5.4	智能控制技术	(235)
5.4.1	控制器参数智能优化方法	(235)
5.4.2	神经网络 PID 控制器设计方法	(238)
5.4.3	模糊控制	(243)
5.5	性能寻优控制	(247)
5.5.1	引言	(247)
5.5.2	优化原理	(248)
5.5.3	数字仿真	(252)
5.5.4	结论	(254)
5.6	高稳定性控制	(254)
5.6.1	基于迎角预测的发动机高稳定性控制原理	(255)
5.6.2	扩展的发动机模型	(257)
5.6.3	仿真算例	(258)
5.6.4	结论	(260)
第6章	故障诊断与容错设计	(261)
6.1	故障诊断与测试的基本概念	(261)
6.1.1	故障定义与分类	(261)
6.1.2	故障诊断的概念和过程	(262)
6.1.3	测试性与机内自检测	(264)
6.1.4	故障诊断与测试技术指标	(264)
6.2	机内自检测设计	(267)
6.2.1	上电机内自检测	(267)
6.2.2	运行前 (飞行前) 机内自检测	(268)
6.2.3	运行中 (飞行中) 机内自检测	(270)
6.2.4	维护机内自检测	(273)
6.3	故障诊断与故障处理的基本方法	(273)
6.3.1	故障发现	(273)
6.3.2	故障定位	(275)
6.3.3	故障隔离	(275)
6.3.4	系统重构	(279)
6.3.5	故障恢复	(282)
6.3.6	故障告警	(283)
6.3.7	故障记录	(284)
6.4	先进的故障诊断和容错控制技术	(284)
6.4.1	基于部件跟踪滤波器的故障诊断方法	(285)
6.4.2	基于卡尔曼滤波器的故障诊断方法	(287)