

研究生教材

国防科技大学研究生院教材专项经费资助

机电系统 分析动力学 及其应用

温熙森 邱 静 陶俊勇 编著



科学出版社

www.sciencep.com

研究生教材 国防科技大学研究生院教材专项经费资助

机电系统分析动力学及其应用

温熙森 邱 静 陶俊勇 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

机电系统分析动力学是机电耦联系统最有效和最基本的建模与分析理论基础之一。它主要从演绎分析的角度给出机电耦联系统的分析与应用方法,用统一的观点和方法研究机电系统的力学、电学行为,建立力学问题与电路、电磁场问题相结合的模型方法,研究机电耦联的相互作用规律和工程应用。

全书共分四部分:分析动力学原理与方法,电动力学原理与方法,机电耦联系统分析动力学,机电系统动力学模型的监控诊断应用。重点在后两部分,强调理论与实践相结合,系统地给出传感器、测试仪、电机等机电耦联系统的动力学原理,给出机床传动系统、机器人、电磁轴承、电动机、捷联惯导系统等典型机电系统的动力学建模与监控诊断应用。

本书既可作为机电工程、电机工程、控制工程、电力与电子、自动化、力学、电学等专业的科研人员的参考书,又可作为相应专业的研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

机电系统分析动力学及其应用/温熙森,邱静,陶俊勇编著. —北京:科学出版社,2003

ISBN 7-03-011303-9

I. 机… II. ①温… ②邱… ③陶… III. 机电系统—分析动力学
IV. TM7

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第021267号

责任编辑:王 利 马长芳 / 责任校对:刘小梅

责任印制:刘秀平 / 封面设计:陈 敬

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>

溧海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2003年8月第 一 版 开本:185(720×1000)

2003年8月第一次印刷 印张:27 1/2

印数:1—2 000 字数:534 000

定价:46.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

前 言

机械系统、电磁系统和机电耦联系统是我们接触得最多的系统,掌握机械和电子两方面以及机电耦联系统最基础、最基本的演绎分析方法是非常必要的,它们在当今各学科中仍旧发挥着重要的作用,众多研究仍需借此为基础展开深入的研究。

多年来,我们在从事科研与教学过程和在与众多的高校、研究所等单位的交流与合作中,深感急需加强机电工程技术人员的基础理论知识与技能、提高演绎分析问题的能力、加强机电耦联系统建模与分析方法的系统训练。但目前国内外还没有一本通用、系统的教材和参考书来完整阐述机电系统分析动力学及其应用的理论体系。本书将在这方面作出有益的尝试,并基于此种背景来考虑和编著组织全书的内容。因此,本书可作为机械工程、机电工程、电机工程、电力与电子、自动化、力学、电学等专业的科研人员的参考书,也可作为相应专业的高年级本科生和研究生教材。

分析动力学用统一的观点和方法——能量概念、虚位移观点来研究系统的力学行为。一方面,它是现代应用力学和动力学的最基本原理和方法;另一方面,它是许多新兴学科的共同基础,给出了非线性、振动、稳定性、刚体系统、连续介质系统、天体与航天系统等一系列领域的有实用价值的成果;再者,它广泛应用于机械系统、机电系统、航天技术、现代控制工程、自动化、非线性力学、计算力学等科技领域。

电磁场理论、电动力学是 20 世纪最伟大的工程理论之一,如相对论、电磁辐射等,其理论与原理是目前应用物理、微电子技术、信息处理等学科最基本的方法和理论基础,被广泛应用于电子、光学与信息学科。

现代科技的发展,使得机械与电子的融合越来越紧密,光机电一体化趋势越来越明显,如各种电机、机电换能器、磁流体动力变换装置、磁悬浮列车、机电驱动与传动系统、机器人系统等等都是典型的机电能量转换系统。设计和研制性能优良的机电一体化系统,掌握和深入研究机电耦联系统的动态行为等问题,必然要以机电分析动力学为基础。因此,它对科学技术及国民经济的发展必将起到良好的促进作用。

每年国家自然科学基金资助的机械类、机电类、电机类、自动化类的众多课题,尤其是与动力学相关的课题,如转子系统、电机系统、机构系统的非线性行为与机理方面的研究,仍深深地依赖于本知识的基础和方法。另外,任何机械的、机电的问题的深入研究,最终必然要升华到数学和动力学建模。因此本书的内容对这些

问题的研究必将起到非常好的基础和辅助作用。机电耦联系统的动力学问题是非常复杂的系统工程问题,它涉及多个学科的基础理论,是工程中仍待解决的关键技术问题之一。本书将对这些研究的基础和进一步深入的研究与应用提供理论—技术—应用三个相互融合层面的一套思想方法。从我们开展机械电子工程多年的科研与人才培养经历出发,也深深体会到高层次科研人员和高水平科研工作必须牢牢掌握机电系统分析动力学的系统知识和专门技能。

作为兼顾教材的论著,本书的主要特色为:

①在理论联系实践的关系上,始终贯彻“出发点、缘由、原理、建模、分析方法、应用”一条线并重的原则。该领域内容是非常抽象化、数学化的理论框架,因此,为便于理解和学习,我们突出物理概念的理解和解释,突出提出问题、分析问题、解决问题的思维模式。重点落脚在理论如何应用上,使本来非常抽象、数学化的内容,尽量好理解。

②在系统性和理论体系与内容组织上,注重系统性和完整性,将全书按大的知识结构分为四部分,每部分按相关知识组织内容,尤其是前三部分,按对称结构和物理意义编排内容。在内容组织上,按基础—模型—分析—求解—应用的思路展开。对必要的数学、物理、力学、电学基础,每一部分专门归纳在前两章,尽量用通俗易懂的语言和形式深入浅出地描述、说明和归纳。基础较好的读者可直接跳过这些章节,深入研读后面的内容。对本领域的基本原理与分析方法,力求深入系统地给出其全貌,而对较新的研究成果、专业性过强的和知识扩展的部分,除必要的分析推导外,则尽量简化推导,重在思想、原理和应用要点的阐述。这样也便于教学时数变化的教学内容安排和不同层次人员对本书的需求。

③在学术专著与教材的关系处理上,突出本书的高层次教材特征,努力按照“基础性、科学性、系统性、实用性、先进性”统一的原则选取内容,按照教育、教学规律阐述内容。同时,对本领域的重要科研成就、发展动态和知识扩展也充分重视,给出完整的理论—应用案例,引导好阅读人员深入研究下去。

全书共分四个部分:分析动力学原理与方法,电动力学原理与方法,机电耦联系统分析动力学,机电系统动力学模型的监控诊断应用。各部分的内容安排如下:

第一部分,分析动力学原理与方法,共6章。第一章介绍分析动力学的数学基础,包括微积分基础、变矢与矢量导数、线性变换与正交变换、变分原理与拉氏乘法。第二章讲述分析动力学基本概念与理论基础,包括力学概念与基础、约束、广义坐标与自由度、实位移、虚位移与自由度、微分与变分运算的交换关系、达朗贝尔原理、虚位移原理、动力学普遍方程。第三章讲述分析动力学的拉格朗日方程建模,包括独立坐标下的第二类拉格朗日方程、非自由系的第一类拉格朗日方程、拉格朗日方程的进一步讨论、拉格朗日方程应用、动力学建模方法的评价标准讨论。第四章讲述分析动力学的变分原理,包括微分变分原理、完整系统的积分变分原

理、非完整系统积分变分原理、积分变分原理的应用。第五章讲述分析动力学的微分方程,包括欧拉-拉格朗日体系方程、尼尔逊体系方程、阿贝尔体系方程、正则方程。第六章讲述分析动力学的积分方法,包括动力学方程的降阶方法、泊松定理与应用、正则变换、哈密顿-雅可比定理、场方法。

第二部分,电动力学原理与方法,共4章。第一章介绍电动力学的数学基础,包括场论与矢量场、正交曲线坐标系、坐标系转动变换及标量、矢量、张量定义、张量、积分变换、 δ 函数。第二章讲述电动力学理论基础,包括电荷、电流与电荷守恒定律、积分形式的麦克斯韦方程组、微分形式的麦克斯韦方程组、电磁场边值关系、洛伦兹力、场标势与矢势。第三章介绍特定情况下的麦克斯韦方程组,包括似稳电磁场、特定介质下的电磁场方程、电机的气隙磁场。第四章讲述电磁场中的能量关系,包括电磁场能量、静电场能量关系、几个通用静电场能量定理、稳恒磁场能量关系。

第三部分,机电耦联系统分析动力学,共5章。第一章讲述电磁场的力学分析,包括机电系统电磁力的能量法求解、电磁场动量、动量密度和动量流密度张量、静电作用力、磁场对电流作用力、体积力与应力张量的关系、电介质内电场的有质动力、电介质内电场的应力张量、磁介质内磁场的有质动力、磁介质内磁场的应力张量。第二章讲述拉格朗日-麦克斯韦方程,包括机电耦联系统基本概念、基于能量表达的电路方程式、有质动力、拉格朗日-麦克斯韦方程、机电比拟关系。第三章讲述电磁系统的变分原理,包括时变电磁场的变分原理、准稳近似的时变电磁场的变分原理及离散描述、电磁场变分原理的对耦能量法。第四章讲述非完整机电系统分析动力学,包括非完整机电系统例子、非完整机电系统的格波罗瓦方程、直流电机的非完整分析动力学。第五章讲述机电耦联系统分析动力学的机电工程应用,包括测量仪表、扬声器与传声器、磁悬浮列车、电磁轴承转子系统控制参数分析、其他传感与测量仪器应用。

第四部分,机电系统分析动力学模型在监控与诊断中的应用,共4章。第一章讲述机床传动系统机电分析动力学模型及应用,包括传动系统机电动力学建模、基于模型的机床传动系统状态监测与诊断、机床传动系统状态监测与诊断实验研究、机床传动系统典型加工状态特征参数图示、基于模型监测的故障诊断推理分析。第二章讲述机器人机电系统动力学模型及应用,包括机器人驱动系统故障实时检测与诊断、工业机器人传感器故障实时检测与诊断。第三章讲述三相感应电动机在线故障检测与诊断,包括三相感应电动机动力学模型、离散状态空间的故障诊断模型、故障仿真研究。第四章讲述捷联惯导系统动力学模型与应用,包括捷联惯导系统简介、捷联惯导系统动力学建模、基于动力学模型的故障诊断模型建立、故障仿真与实验研究。

全书由邱静教授和温熙森教授负责统筹与编著工作,陶俊勇博士负责编写第

四部分第四章。感谢钟辉煌教授、白铭复教授、李爱丽副教授的教案和宝贵意见。在成书过程中,易晓山博士提出了许多好的建议,我校机械电子工程专业 2000 级博士研究生对本书篇章安排和内容提出了不少合理化建议。本书的完成还得到了机电工程研究所许多教员和学员的建议和鼓励,在此,对他们一并表示感谢!本书参考了大量国内外有关分析动力学、电动力学、电磁场理论和机电耦联系统分析动力学方面的教材和专著,在此不能一一列出,谨对他们表示衷心的感谢!

由于时间仓促和编著者水平有限,恳切希望各位专家和读者指出本书的错误和不当之处。

编 著 者

2003 年 6 月于湖南长沙

国防科学技术大学机电工程研究所

目 录

第一部分 分析动力学原理与方法

第 1 章 分析动力学数学基础	3
1.1 微积分基础	3
1.1.1 导数与偏导数、微分与全微分	3
1.1.2 高阶导数与高阶微分	5
1.2 变矢与矢量导数	6
1.2.1 变矢量及导数	6
1.2.2 矢量的绝对导数与相对导数	7
1.3 线性变换与正交变换	8
1.3.1 线性变换	8
1.3.2 正交变换	10
1.4 变分原理与拉氏乘子法	11
1.4.1 函数的极值与拉氏乘子法	11
1.4.2 变量、函数及积分的变分	13
1.4.3 泛函与变分法概念与基础	16
1.4.4 变分法问题分类	17
1.4.5 泛函极值问题与欧拉方程	18
1.4.6 其他变分法问题及广义变分问题	20
第 2 章 分析力学基本概念与理论基础	23
2.1 力学概念与基础	23
2.1.1 静力学	23
2.1.2 运动学	24
2.1.3 动力学	25
2.1.4 刚体静力学与分析静力学	27
2.1.5 分析动力学发展与研究对象、任务与方法	27
2.2 约束	29
2.2.1 约束定义与约束方程	29
2.2.2 约束分类	30
2.2.3 广义约束概念	32

2.3	广义坐标与自由度	32
2.3.1	广义坐标	32
2.3.2	广义速度	33
2.3.3	广义加速度	34
2.3.4	广义坐标、广义速度、广义加速度的约束方程	34
2.4	实位移、虚位移与自由度	35
2.4.1	实位移、可能位移与虚位移	35
2.4.2	约束加在虚位移上的条件	36
2.4.3	实位移处于虚位移中的充要条件	38
2.4.4	自由度	39
2.4.5	虚功与理想约束	39
2.5	微分与变分运算的交换关系问题	40
2.6	达朗贝尔原理	41
2.6.1	达朗贝尔原理与惯性力	41
2.6.2	达朗贝尔原理的质点系形式	42
2.7	虚位移原理	43
2.7.1	虚位移原理	43
2.7.2	虚位移原理应用概述	44
2.7.3	势能驻值定理	44
2.7.4	最小势能原理	45
2.8	动力学普遍方程	46
2.8.1	达朗贝尔-拉格朗日原理	46
2.8.2	达朗贝尔-拉格朗日原理应用	47
第3章	分析动力学的拉格朗日方程建模	49
3.1	独立坐标下的第二类拉格朗日方程	49
3.1.1	广义主动力概念	49
3.1.2	拉格朗日方程形式	50
3.2	非自由系的第一类拉格朗日方程	52
3.3	拉格朗日方程的进一步讨论	53
3.3.1	动能与质量讨论	53
3.3.2	有势力与非有势力的讨论	56
3.3.3	耗散系统与耗散函数	58
3.4	拉格朗日方程应用	61
3.5	动力学建模方法的评价标准讨论	66

第 4 章 分析动力学的变分原理	68
4.1 微分变分原理	68
4.1.1 达朗贝尔-拉格朗日原理	68
4.1.2 茹尔当(Jourdain)原理	71
4.1.3 高斯(Gauss)原理	72
4.1.4 万有达朗贝尔原理	73
4.2 完整系统的积分变分原理	74
4.2.1 哈密顿原理	74
4.2.2 拉格朗日原理	78
4.3 非完整系统积分变分原理	82
4.3.1 变分 δq_i 的定义讨论	82
4.3.2 哈密顿原理	83
4.3.3 拉格朗日原理	86
4.4 积分变分原理在近似解中的应用	87
4.4.1 哈密顿原理在近似法中应用的方法	87
4.4.2 应用实例	90
第 5 章 分析动力学的微分方程	95
5.1 欧拉-拉格朗日体系方程	95
5.1.1 完整系统的拉格朗日方程	95
5.1.2 非完整系统带乘子的拉格朗日方程——罗兹方程	97
5.1.3 非完整系统的 Mac-Millan 方程	104
5.1.4 非完整系统的查浦雷金(Чаплыгин)方程	104
5.1.5 高阶非完整系统的欧拉-拉格朗日方程	111
5.2 尼尔逊体系方程	112
5.2.1 完整系统的尼尔逊方程	112
5.2.2 非完整系统的广义尼尔逊方程	113
5.2.3 高阶非完整系统的尼尔逊方程	114
5.3 阿贝尔体系方程	115
5.3.1 完整系统的阿贝尔方程	115
5.3.2 一阶非完整系统的阿贝尔方程	117
5.4 正则方程	119
5.4.1 完整系统的哈密顿正则方程	119
5.4.2 非完整系统的正则方程	123
第 6 章 分析动力学的积分方法	127
6.1 动力学方程的降阶方法	127

6.1.1	循环积分和广义能量积分	127
6.1.2	利用循环积分的完整系统的罗兹(Routh)方程	131
6.1.3	非完整系统方程的降阶方法	132
6.2	泊松(Poisson)定理与应用	134
6.2.1	泊松符号及性质	134
6.2.2	第一积分 Poisson 定理	136
6.3	正则变换	138
6.3.1	正则变换	138
6.3.2	母函数	140
6.4	哈密尔顿-雅可比定理	146
6.4.1	化零正则变换	146
6.4.2	哈密尔顿-雅可比定理	148
6.5	场方法	150
6.5.1	求常微分方程的场方法	151
6.5.2	完整系统的场方法	154
6.5.3	非完整系统的场方法	155
第一部分思考题与习题		160

第二部分 电动力学原理与方法

第 1 章	电动力学的数学基础	167
1.1	场论与矢量场	167
1.1.1	场、梯度、散度与旋度	167
1.1.2	矢量微分算子	171
1.1.3	矢量场定理	173
1.2	正交曲线坐标系	174
1.2.1	正交曲线坐标系概念	174
1.2.2	正交曲线坐标系中的微分线元	175
1.2.3	梯度、散度、旋度及拉普拉斯算子在正交曲线坐标系的表述	176
1.2.4	梯度、散度、旋度和拉普拉斯变换算子在柱坐标和球坐标系下的表述	178
1.3	坐标系转动变换及标量、矢量、张量定义	180
1.3.1	坐标系转动变换	180
1.3.2	标量、矢量、张量的描述	182
1.4	张量	184
1.4.1	二阶张量表示, 应力张量	184

1.4.2	张量的代数计算	186
1.4.3	张量的微分计算	188
1.5	积分变换	189
1.5.1	体积分与面积分转换	189
1.5.2	面积分与线积分转换	189
1.5.3	格林公式	190
1.6	δ 函数	190
第 2 章	电动力学理论基础	193
2.1	电荷、电流与电荷守恒定律	193
2.1.1	电荷	193
2.1.2	电流	194
2.1.3	电荷守恒定律	195
2.2	积分形式的麦克斯韦方程组	195
2.2.1	位移电流	195
2.2.2	方程组的积分形式	198
2.3	微分形式的麦克斯韦方程组	200
2.3.1	麦克斯韦微分方程组	200
2.3.2	均匀介质的场方程	202
2.3.3	波动方程	203
2.3.4	涡流方程	204
2.4	电磁场边值关系	205
2.4.1	边值关系	205
2.4.2	场量沿界面法向分量的边值关系	206
2.4.3	场量沿界面切向分量的边值关系	206
2.5	洛伦兹力	208
2.6	场标势与矢势	209
2.6.1	电磁位	209
2.6.2	规范变换	209
2.6.3	用 A 和 φ 表示的电磁场方程	210
第 3 章	特定情况下的麦克斯韦方程组	212
3.1	似稳电磁场	212
3.1.1	似稳场条件	212
3.1.2	似稳场	213
3.1.3	似稳电路	213
3.2	特定介质下的电磁场方程	215

3.2.1	各向异性介质的电磁场方程	215
3.2.2	低速运动介质的电磁场方程	217
3.2.3	非线性介质的电磁场方程	218
3.3	电机的气隙磁场	221
3.3.1	场方程	222
3.3.2	标势与矢势	222
3.3.3	分离变量法求拉格朗日方程	227
3.3.4	正弦电枢磁势的气隙场	229
3.3.5	铁磁边界的泊松方程解	233
3.3.6	气隙中存在电路的情形	235
第 4 章	电磁场中的能量关系	243
4.1	电磁场能量	243
4.2	静电场能量关系	246
4.2.1	静电场能量	246
4.2.2	电荷系的相互作用能	247
4.2.3	小区域中的电荷在外场中的能量	248
4.3	几个通用静电场能量定理	249
4.3.1	格林定理	249
4.3.2	汤姆逊定理	250
4.3.3	安绍定理	251
4.3.4	不带电导体能量定理	252
4.4	稳恒磁场能量关系	253
4.4.1	稳恒磁场能量	253
4.4.2	恒定电流的磁能	253
4.4.3	铁磁介质的磁能	256
第二部分	思考题与习题	260
 第三部分 机电耦联系统分析动力学 		
第 1 章	电磁场的力学分析	267
1.1	机电系统电磁力的能量法求解	267
1.1.1	一般描述	267
1.1.2	一般处理方法	268
1.1.3	磁力(介质中 n 个线电流产生磁场时的磁力)	269
1.1.4	电力(电介质中 n 个导体系统产生电场时的电力)	270
1.2	电磁场动量、动量密度和动量流密度张量	271

1.3 静电作用力	274
1.4 磁场对电流作用力	277
1.5 体积力与应力张量的关系	279
1.5.1 电磁场内介质静平衡条件	279
1.5.2 体积力归结为应力的形式	280
1.6 电介质内电场的有质动力	281
1.6.1 能量法求电介质的受力	281
1.6.2 能量变分	281
1.6.3 电荷密度变分	282
1.6.4 介电常数变分	283
1.6.5 有质力	283
1.6.6 介质讨论	284
1.7 电介质内电场的应力张量	285
1.7.1 应力张量推导	285
1.7.2 流体介质中的物体受力	286
1.7.3 介质界面上的力	287
1.7.4 实例	288
1.8 磁介质内磁场的有质动力	289
1.8.1 能量法求磁介质受力	289
1.8.2 能量变分	289
1.8.3 传导电流密度 J 和介质磁导率 μ 的变分	290
1.8.4 有质动力	291
1.8.5 磁致弹性	292
1.9 磁介质内磁场的应力张量	292
1.9.1 应力张量推导	292
1.9.2 真空或流体中的物体受力	293
1.9.3 应力的分解	295
1.9.4 介质界面的力	296
1.10 本章小结	297
第 2 章 拉格朗日-麦克斯韦方程	298
2.1 机电耦联系统基本概念	298
2.2 基于能量表达的电路方程式	299
2.2.1 回路的电磁能	299
2.2.2 基于能量的回路方程式	300
2.3 有质动力	300

2.4	拉格朗日-麦克斯韦方程	302
2.4.1	机电系统能量关系	302
2.4.2	统一化机电耦联系统动力学方程	302
2.4.3	拉格朗日-麦克斯韦方程应用	303
2.5	机电磁比拟关系	306
2.5.1	机电磁比拟关系分析	306
2.5.2	机电磁比拟关系列表	307
第3章	电磁系统的变分原理	308
3.1	时变电磁场的变分原理	308
3.1.1	电动力学方程	308
3.1.2	电磁场变分关系分析	309
3.1.3	基于变分原理导出电磁场方程	310
3.2	似稳近似的时变电磁场的变分原理及离散描述	313
3.2.1	电动力学方程	313
3.2.2	电磁场变分关系分析	314
3.2.3	分布系统运动方程的离散描述	315
3.2.4	分布离散描述的变分分析	316
3.3	电磁场变分原理的对偶能量法	317
3.3.1	静电系统	317
3.3.2	静磁系统	321
第4章	非完整机电系统分析动力学	324
4.1	非完整机电系统例子	324
4.1.1	完整系统与非完整系统	324
4.1.2	具有均匀绕组的整流子电机非完整约束方程	324
4.1.3	巴尔罗环圈	326
4.2	非完整机电系统的格波罗瓦方程	330
4.2.1	格波罗瓦方程	330
4.2.2	格波罗瓦方程、查普雷金方程与阿贝尔方程比较	331
4.2.3	电机分析动力学基本方程	334
4.3	直流电机的非完整分析动力学	336
4.3.1	串激发电机	336
4.3.2	独立激磁整流子电动机	337
4.3.3	排斥电机	338
4.3.4	串激电机的串联联结	339
第5章	机电耦联系统分析动力学的机电工程应用	341

5.1 测量仪表、扬声器与传声器	341
5.1.1 电流计	341
5.1.2 电动式扬声器	343
5.1.3 电容式传声器	344
5.2 磁悬浮列车	346
5.2.1 运动微分方程建立	346
5.2.2 进一步讨论	348
5.3 电磁轴承转子系统控制参数分析	350
5.3.1 电磁轴承及控制系统概述	350
5.3.2 4自由度刚性转子-轴承机电耦合模型	350
5.3.3 系统的稳定区域与最优控制参数	355
5.4 其他传感与测量仪器应用	357
5.4.1 惯性式磁电传感器	357
5.4.2 非接触式传感器	358
5.4.3 测振放大器	361
5.4.4 光线振子示波器	364
第三部分思考题与习题	367
第四部分 机电系统分析动力学模型在监控与诊断中的应用	
第1章 机床传动系统机电分析动力学模型及应用	371
1.1 传动系统机电动力学建模	371
1.1.1 能量、功率、转矩、电势平衡关系	371
1.1.2 主轴驱动及传动系统动力学模型	372
1.1.3 进给轴驱动及传动系统动力学模型	373
1.2 基于模型的机床传动系统状态监测与诊断	377
1.2.1 总体思路	377
1.2.2 模型参数辨识	377
1.2.3 基于BAYES统计决策的参数变化检测	379
1.3 机床传动系统状态监测与诊断实验研究	380
1.3.1 实验测试内容及监测与诊断系统组成	380
1.3.2 加工工况与加工参数	381
1.3.3 机床传动系统典型加工状态特征参数图示	381
1.4 基于模型监测的故障诊断推理分析	386
第2章 机器人机电系统动力学模型及应用	388
2.1 机器人驱动系统故障实时检测与诊断	388

2.1.1	直流电机驱动机器人驱动系统动力学模型	388
2.1.2	动力学模型的状态监控与诊断模型转化	389
2.1.3	故障监控与诊断的数值仿真	390
2.2	工业机器人传感器故障实时检测与诊断	391
2.2.1	六个旋转关节机器人的动力学模型	391
2.2.2	动力学模型的离散时间状态空间模型转化	393
2.2.3	故障检测与诊断的数值仿真	395
第 3 章	三相感应电动机在线故障检测与诊断	397
3.1	三相感应电动机动力学模型	397
3.2	离散状态空间的故障诊断模型	398
3.3	故障仿真研究	400
第 4 章	捷联惯导系统动力学模型与应用	404
4.1	捷联惯导系统简介	404
4.2	捷联惯导系统动力学建模	407
4.2.1	动调陀螺的结构组成	407
4.2.2	动调陀螺的动力学方程	408
4.3	基于动力学模型的故障诊断模型建立	412
4.3.1	数据获取及预处理	412
4.3.2	离散化的故障模型建立	414
4.4	故障仿真与实验研究	419
参考文献	422