



普通高等教育创新型人才培养规划教材



机电耦合系统 分析动力学

JIDIAN OULIAN XITONG
FENXI DONGLIXUE

聂伟荣 席占稳 编著



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



普通高等教育创新型人才培养规划教材

机电耦联系统分析动力学

聂伟荣 席占稳 编著

北京航空航天大学出版社

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。本书主要从演绎分析的角度给出机电耦联系统的分析和应用方法,归纳总结并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,并应用于工程问题的分析与解决。

本书内容包括五个部分。一、分析动力学原理与方法;二、电动力学原理与方法;三、机电耦联系统分析动力学;四、微机电系统动力学;五、机电系统动力学模型的应用。

本书可作为高等院校相关专业本科生、研究生的教材,也可供从事微机电系统的设计与工艺制作等方面工作的科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机电耦联系统分析动力学 / 聂伟荣, 席占稳编著

. -- 北京 : 北京航空航天大学出版社, 2014. 9

ISBN 978-7-5124-1578-2

I. ①机… II. ①聂… ②席… III. ①机电系统—分析动力学—高等学校—教材—IV. ①TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 211582 号

版权所有, 侵权必究。

机电耦联系统分析动力学

聂伟荣 席占稳 编著

责任编辑 刘晓明

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱: bhpess@263.net 邮购电话:(010)82316524

北京楠海印刷厂印装 各地书店经销

*

开本: 710×1 000 1/16 印张: 21.25 字数: 453 千字

2014 年 9 月第 1 版 2014 年 9 月第 1 次印刷 印数: 2 500 册

ISBN 978-7-5124-1578-2 定价: 45.00 元

前 言

机械系统、电磁系统和机电耦合系统是工程领域应用最多的系统,它们所涉及的机械、电学以及交叉学科的基础理论、演绎分析方法仍然是学科发展和深入研究的基础,也是当今机电工程技术人员必须具备的基础知识。

机电耦合系统的动力学问题是较为复杂的系统工程问题,它涉及机械、电磁、力学、微电子、材料等多学科及学科交叉的基础理论。现代科技的发展,使得机械学与电子学的结合越来越紧密,微小型化和光机电趋势越来越明显,如各种电机、机电换能器、机电驱动与传动、机器人系统等都是典型的机电能量转换系统。设计和制造性能优良的机电一体化系统,掌握和深入研究机电耦合系统的动态行为,进行机电耦合系统非线性动力学分析及机电耦合系统的振动稳定性问题研究等,必然要求本科生和研究生具备一定的多学科交叉理论与分析基础。

本教材的编写结合了多年来对机械学科的本科生、研究生教学的切身体会,以及从事微机电系统的设计与工艺制作等多方面的科研工作经验,一方面注重学科知识基础,另一方面注重理论分析方法与应用,因此本教材的主要特色表现在以下几点。

1. 注重系统性

全书内容包括五个部分:一、分析动力学原理与方法;二、电动力学原理与方法;三、机电耦合系统分析动力学;四、微机电系统动力学;五、机电系统动力学模型的应用。第一、第二部分重点介绍分析动力学与电动力学的基本概念、理论和数学演绎表达方法。第三部分重点强调电磁场的力学分析并建立机电耦合系统基于能量的统一分析方法,且将理论与实践相结合,系统地给出传感器、测试仪、电机等机电耦合系统的动力学原理,给出典型机电系统的动力学建模与应用案例。第四部分扩展宏观机电动力学内容到微机电系统,介绍了微纳尺度下的微机电系统的力和特殊效应。第五部分分别针对一般机电耦合系统和微机电系统进行动力学模型分析与应用案例介绍。教材内容整体包含了现代机电系统



分析设计的全部基本原理和方法,便于学习人员全面了解相关学科内容并参考应用。

2. 注重详实性和应用性

每一部分内容按基础、模型、分析、求解、应用的思路展开,尽量用通俗易懂的语言描述基本原理,并结合应用分析过程进行简化推导,重在思想、原理和应用要点的阐述,使各部分内容清晰易懂且全面系统,便于在工程研究中选择学习和应用。

3. 注重学习实用性

各部分内容之后都附有思考题与习题,便于学生在学习教材内容后拓展思考和应用。

全书由聂伟荣副教授统筹,席占稳研究员负责编写第一部分,第二、三、四、五部分由聂伟荣副教授负责编写,王新杰讲师负责校对全书。同时在本书编写过程中,博士生曹云、黄刘,研究生温京亚、余平新、徐安达都做了书稿整理工作,在此表示感谢。本书的完成还得到了机械工程学院很多教师的意见和建议,在这里表示衷心的感谢。

由于编者知识水平有限,书中若有疏漏和错误之处,恳请专家学者和读者指正。

作 者

2014年6月

于南京理工大学机械工程学院

目 录

第一部分 分析动力学原理与方法

第 1 章 分析动力学变分原理	3
1.1 变矢量与矢量导数	3
1.1.1 变矢量及其导数	3
1.1.2 矢量的绝对导数与相对导数	4
1.2 线性变换与正交变换	5
1.2.1 线性变换	5
1.2.2 正交变换	7
1.3 变分原理与拉氏乘子法	8
1.3.1 函数的极值与拉氏乘子法	8
1.3.2 变量、函数及积分的变分	9
1.3.3 泛函与变分法的概念与基础	12
1.3.4 变分法问题分类	13
1.3.5 泛函极值问题与欧拉方程	14
1.3.6 其他变分法问题及广义变分问题	15
第 2 章 分析力学基本概念与理论基础	19
2.1 力学概念与基础	19
2.1.1 静力学与动力学	19
2.1.2 刚体静力学与分析静力学	21
2.1.3 分析动力学的发展与研究对象、任务及方法	22
2.2 约 束	23
2.2.1 约束定义与约束方程	23
2.2.2 约束分类	24
2.2.3 广义约束的概念	25
2.3 广义坐标与自由度	26
2.3.1 广义坐标(系)	26
2.3.2 广义速度	27



2.3.3	广义加速度	27
2.3.4	广义坐标、广义速度、广义加速度的约束方程	28
2.4	实位移、虚位移与自由度	29
2.4.1	实位移、可能位移与虚位移	29
2.4.2	约束加在虚位移上的条件	29
2.4.3	实位移处于虚位移中的充分必要条件	31
2.4.4	自由度	32
2.4.5	虚功与理想约束	32
2.5	微分与变分运算的交换关系问题	33
2.6	达朗贝尔原理——动静法	34
2.6.1	达朗贝尔原理与惯性力	34
2.6.2	达朗贝尔原理的质点系形式	34
2.7	虚位移原理	35
2.7.1	虚位移原理概述	35
2.7.2	虚位移原理的应用	36
2.7.3	势能驻值定理	37
2.7.4	最小势能原理	37
2.8	动力学普遍方程	38
2.8.1	达朗贝尔-拉格朗日原理	38
2.8.2	达朗贝尔-拉格朗日原理的应用	39
第3章	分析动力学的拉格朗日方程建模	41
3.1	独立坐标下的第二类拉格朗日方程	41
3.1.1	广义主动力概念	41
3.1.2	拉格朗日方程的形式	42
3.2	非自由系的第一类拉格朗日方程	44
3.3	拉格朗日方程的进一步讨论	45
3.3.1	动能与质量讨论	45
3.3.2	有势力与非有势力讨论	48
3.3.3	耗散系统与耗散函数	49
3.4	拉格朗日方程的应用	52
3.5	动力学建模方法的评价标准讨论	58
第4章	分析动力学的变分原理	60
4.1	微分变分原理	60
4.1.1	达朗贝尔-拉格朗日原理	60



4.1.2	茹尔当原理	63
4.1.3	高斯原理	63
4.1.4	万有达朗贝尔原理	64
4.2	完整系统的积分变分原理	66
4.2.1	哈密尔顿原理	66
4.2.2	拉格朗日原理	70
4.3	非完整系统的积分变分原理	73
4.3.1	变分 δq_i 的定义讨论	73
4.3.2	哈密尔顿原理	74
4.3.3	拉格朗日原理	77
4.4	积分变分原理在近似解中的应用	78
4.4.1	哈密尔顿原理在近似法中应用的方法	78
4.4.2	应用实例	80
	思考题与习题	84

第二部分 电动力学原理与方法

第5章	电动力学的数学基础	89
5.1	场论与矢量场	89
5.1.1	场、梯度、散度与旋度	89
5.1.2	矢量微分算子	92
5.1.3	矢量场定理	93
5.2	场量的正交曲线坐标系表示	94
5.2.1	梯度、散度、旋度和拉普拉斯算子在正交曲线坐标系下的表述	95
5.2.2	梯度、散度、旋度和拉普拉斯算子在柱坐标和球坐标系下的表述	96
5.3	坐标系转动变换及标量、矢量、张量的定义	98
5.3.1	坐标系转动变换	98
5.3.2	标量、矢量、张量的表述	100
5.4	张量	100
5.4.1	二阶张量的表述与应力张量	100
5.4.2	张量的代数计算	103
5.4.3	张量的微分计算	104
5.5	δ 函数	105



第 6 章 电动力学的理论基础	108
6.1 电荷、电流与电荷守恒定律.....	108
6.1.1 电 荷	108
6.1.2 电 流	109
6.1.3 电荷守恒定律	109
6.2 积分形式的麦克斯韦方程组	110
6.2.1 位移电流	110
6.2.2 麦克斯韦方程组的积分形式	112
6.3 微分形式的麦克斯韦方程组	114
6.3.1 麦克斯韦微分方程组	114
6.3.2 均匀介质的场方程	117
6.3.3 波动方程	117
6.3.4 涡流方程	118
6.4 电磁场边值关系	119
6.4.1 边值关系	119
6.4.2 场量沿界面法向分量的边值关系	119
6.4.3 场量沿界面切向分量的边值关系	120
6.5 洛仑兹力	121
6.6 场标势与矢势	122
6.6.1 电磁位	122
6.6.2 规范变换	123
6.6.3 用 \mathbf{A} 和 φ 表示的电磁场方程	123
第 7 章 特定情况下的麦克斯韦方程组	126
7.1 似稳电磁场	126
7.1.1 似稳电磁场条件	126
7.1.2 似稳场	127
7.1.3 似稳电路	128
7.2 特定介质下的电磁场方程	129
7.2.1 各向异性介质的电磁场方程	129
7.2.2 低速运动介质的电磁场方程	130
7.3 电机的气隙磁场	132
7.3.1 场方程	132
7.3.2 标势与矢势	132
7.3.3 分离变量法求拉格朗日方程	137



第 8 章 电磁场中的能量关系	139
8.1 电磁场能量	139
8.2 静电场能量关系	142
8.2.1 静电场能量	142
8.2.2 电荷系的相互作用能	143
8.2.3 小区域中的电荷在外场中的能量	144
8.3 几个通用静电场能量定理	144
8.3.1 格林定理	145
8.3.2 汤姆逊定理	146
8.3.3 安绍定理	146
8.3.4 不带电导体能量定理	147
8.4 稳恒磁场能量关系	148
8.4.1 稳恒磁场能量	148
8.4.2 恒定电流的磁能	149
8.4.3 铁磁介质的磁能	151
思考题与习题	154

第三部分 机电耦联系统分析动力学

第 9 章 电磁场的力学分析	159
9.1 机电系统电磁力的能量法求解	159
9.1.1 一般描述	159
9.1.2 一般处理方法	160
9.1.3 磁力(介质中 n 个线电流产生磁场时的磁力)	161
9.1.4 电力(电介质中 n 个导体系统产生电场时的电力)	162
9.2 电磁场动量、动量密度和动量流密度张量	162
9.3 静电作用力	165
9.4 磁场对电流的作用力	167
9.5 体积力与应力张量的关系	170
9.5.1 电磁场内介质静平衡的条件	170
9.5.2 体积力归结为应力的形式	170
9.6 电介质内电场的有质动力	171
9.6.1 能量法求电介质的受力	171
9.6.2 能量变分	172



9.6.3	电荷密度变分	173
9.6.4	介电常数变分	173
9.6.5	有质动力	174
9.6.6	介质讨论	174
9.7	电介质内电场的应力张量	175
9.7.1	应力张量推导	175
9.7.2	流体介质中的物体受力	176
9.7.3	介质界面上的力	177
9.7.4	实例	178
9.8	磁介质内磁场的有质动力	179
9.8.1	能量法求磁介质受力	179
9.8.2	能量变分	179
9.8.3	传导电流密度 J 和介质磁导率 μ 的变分	180
9.8.4	有质动力	181
9.8.5	磁致弹性	182
9.9	磁介质磁场的应力张量	182
9.9.1	应力张量推导	182
9.9.2	真空或流体中的物体受力	183
9.9.3	应力的分解	184
9.9.4	介质界面的力	185
9.10	本章小结	186
第 10 章	拉格朗日-麦克斯韦方程	188
10.1	机电耦合系统的基本概念	188
10.2	基于能量表达的电路方程式	188
10.2.1	回路的电磁能	188
10.2.2	基于能量的回路方程式	189
10.3	有质动力	190
10.4	拉格朗日-麦克斯韦方程组	191
10.4.1	机电系统的能量关系	191
10.4.2	统一化机电耦合系统的动力学方程	192
10.4.3	拉格朗日-麦克斯韦方程组的应用	192
10.5	机电磁比拟关系	195
10.5.1	机电磁比拟关系分析	195
10.5.2	机电磁比拟关系列表	196



第 11 章 电磁系统的变分原理	198
11.1 时变电磁场的变分原理	198
11.1.1 电动力学方程	198
11.1.2 电磁场变分关系分析	199
11.1.3 基于变分原理导出电磁场方程	200
11.2 似稳近似的时变电磁场的变分原理及离散描述	202
11.2.1 电动力学方程	202
11.2.2 电磁场变分关系分析	203
11.2.3 分布系统运动方程的离散描述	204
11.2.4 分布离散描述的变分分析	206
11.3 电磁场变分原理的对偶能量法	207
11.3.1 静电系统	207
11.3.2 静磁系统	210
第 12 章 非完整机电系统分析动力学	213
12.1 非完整机电系统的例子	213
12.1.1 完整系统与非完整系统	213
12.1.2 具有均匀绕组的整流子电机非完整约束方程	213
12.1.3 巴尔罗环	215
12.2 非完整机电系统的格波罗瓦方程	218
12.2.1 格波罗瓦方程	218
12.2.2 格波罗瓦方程、查普雷金方程与阿贝尔方程的比较	220
12.2.3 电机分析动力学基本方程	222
第 13 章 机电耦联系统分析动力学的机电工程应用	225
13.1 测量仪表、扬声器与传声器	225
13.1.1 电流计	225
13.1.2 电容式传声器	226
13.2 磁悬浮列车	228
13.2.1 运动微分方程的建立	228
13.2.2 进一步讨论	230
13.3 其他传感与测量仪器的应用	232
13.3.1 惯性式电磁传感器	232
13.3.2 非接触式传感器	233
13.3.3 测振放大器	236



13.3.4 光线振子示波器	239
思考题与习题	241

第四部分 微机电系统动力学

第 14 章 微机电系统基础	247
14.1 微机电系统的概念与特点	247
14.1.1 微机电系统的概念	247
14.1.2 微机电系统的特点	249
14.2 微机电系统的材料与微加工技术	250
第 15 章 微机电系统中的力	254
15.1 物理基本力	254
15.2 静电力与电磁力	256
15.2.1 静电力	256
15.2.2 电磁力	257
15.3 范德瓦尔斯力	257
15.4 卡西米尔力	258
15.4.1 卡西米尔力概述	258
15.4.2 卡西米尔效应	259
15.4.3 卡西米尔力的量子力学阐释	259
15.4.4 卡西米尔力对微加速度计性能的影响	260
15.5 布朗力与噪声	263
15.5.1 布朗运动现象与噪声	263
15.5.2 噪声的一般性质	264
15.5.3 机械噪声(布朗力)	265
15.6 毛细力	268
15.6.1 毛细现象与毛细原理	268
15.6.2 表面张力	269
15.6.3 毛细力在平行板间的作用	269
15.7 阻尼力	271
15.7.1 压膜阻尼	271
15.7.2 滑膜阻尼	272



第 16 章 作用力的尺度效应和行程效应	273
16.1 作用力的尺度效应	273
16.2 作用力的行程效应	274
16.3 微机电系统动力学及其非线性特征	278
16.3.1 MEMS 的尺度力学特征	278
16.3.2 MEMS 的动力学特征	279
16.3.3 MEMS 动力学的非线性特征	280
第 17 章 微机电系统动力学建模与仿真	281
17.1 微机电系统建模与仿真概论	281
17.2 微机电系统宏建模与分析方法	283
17.2.1 节点分析法	283
17.2.2 等效电路法	287
17.3 微机电系统多能量场耦合降阶建模	293
17.4 微机电系统多能量场耦合模拟仿真	298
17.4.1 MEMS 多能量场耦合特性	299
17.4.2 MEMS 多能量场耦合分析	300
思考题与习题	302

第五部分 机电系统动力学模型的应用

第 18 章 机床传动系统机电分析动力学模型及应用	305
18.1 传动系统机电动力学建模	305
18.1.1 能量、功率、转矩、电势平衡的关系	305
18.1.2 主轴驱动及传动系统动力学模型	306
18.1.3 进给轴驱动及传动系统动力学模型	307
18.2 基于模型的机床传动系统状态监测与诊断	310
18.2.1 总体思路	310
18.2.2 模型参数识别	311
18.2.3 基于 BAYES 统计决策的参数变化检测	312
第 19 章 微机械谐振陀螺的动力学特性	314
19.1 陀螺哥氏效应	314
19.2 动力学方程的建立	316



19.3	微机械梳齿式陀螺的静电驱动力·····	319
19.4	动力学方程求解及讨论·····	320
19.4.1	常值角速度下检测系统的位移解·····	321
19.4.2	谐波角速度下检测系统的位移解·····	323
19.4.3	一般变角速度下检测系统的位移解·····	324
参考文献 ·····		325

第一部分

分析动力学原理与方法

