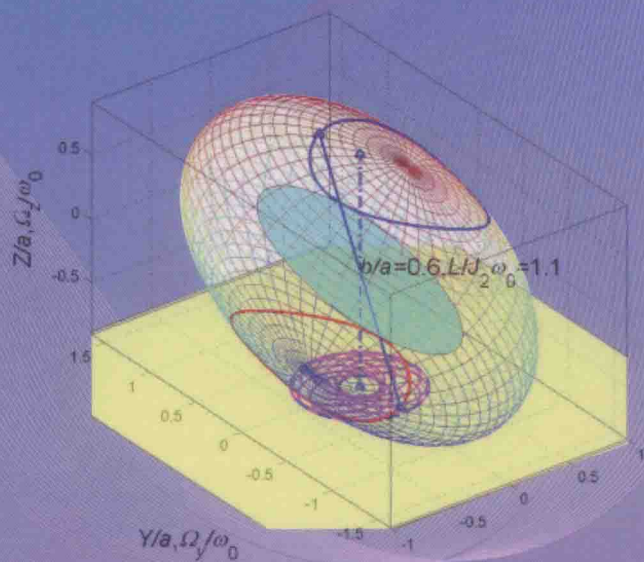




普通高等学校“十三五”规划教材
湖南大学出版社图书出版基金资助项目

MATLAB 可视化 理论力学

周群益 杨旭静 刘天贵 编 著



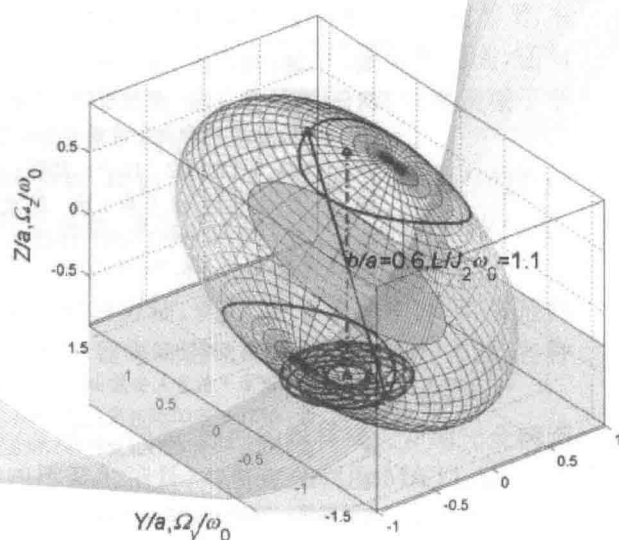
湖南大学出版社



普通高等学校“十三五”规划教材
湖南大学出版社图书出版基金资助项目

MATLAB 可视化 理论力学

周群益 杨旭静 刘天贵 编 著



湖南大学出版社

内 容 简 介

本书是结合高级科学计算语言 MATLAB 的理论力学专著, 全书分为 8 章, 涵盖了从牛顿力学到分析力学的基本内容, 每章都分为基本内容与范例的解析和图示两大部分, 基本内容系统地介绍理论力学的概念和方法, 每一章都精选和编制了 12 个范例, 共 96 个范例, 包括了大量理论力学的典型例题和习题, 本书用传统方法解析各个范例, 许多范例的解析还有独到之处, 作者设计了 200 多个 MATLAB 程序, 计算和绘制了每个范例的图片, 本书的动画可以用手机微信扫描二维码演示, 本书可以作为物理、机械、土建和航空等专业的本科生和研究生的教材和参考资料, 书中内容可以供大学教师采用和参考, 动画可在教学中演示。

图书在版编目 (CIP) 数据

MATLAB 可视化理论力学/周群益, 杨旭静, 刘天贵编著. —长沙:
湖南大学出版社, 2018. 12

ISBN 978-7-5667-1548-7

I. ①M… II. ①周…②杨…③刘… III. ①Matlab 软件—应用—
理论力学 IV. ①031—39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 117732 号

MATLAB 可视化理论力学

MATLAB KESHIHUA LILUN LIXUE

编 著: 周群益 杨旭静 刘天贵

责任编辑: 黄 旺 责任校对: 尚楠欣

印 装: 北京虎彩文化传播有限公司

开 本: 787×1092 16 开 印张: 25.75 前彩插: 6 页 字数: 656 千

版 次: 2018 年 12 月第 1 版 印次: 2018 年 12 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5667-1548-7

定 价: 72.00 元

出 版 人: 雷 鸣

出版发行: 湖南大学出版社

社 址: 湖南·长沙·岳麓山 邮 编: 410082

电 话: 0731-88822559(发行部), 88821315(编辑室), 88821006(出版部)

传 真: 0731-88649312(发行部), 88822264(总编室)

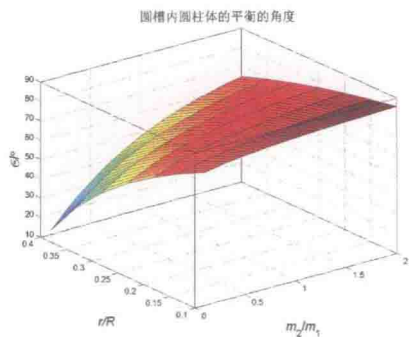
网 址: <http://www.hnupress.com>

电子邮箱: 274398748@qq.com

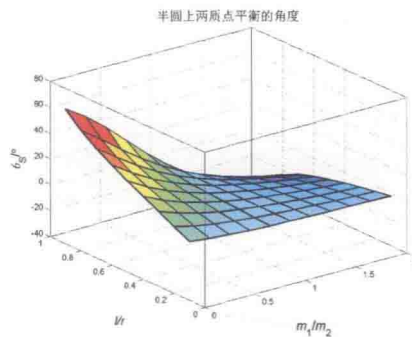


版权所有, 盗版必究

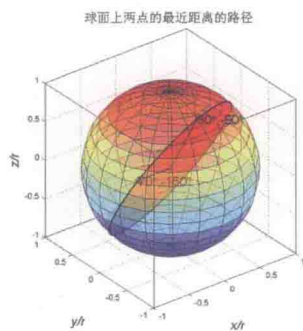
湖南大学版图书凡有印装差错, 请与发行部联系



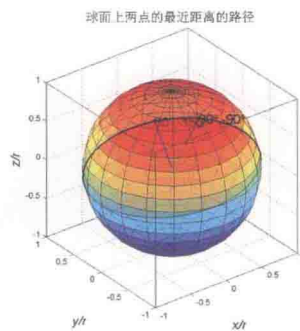
P4-3-1a 图



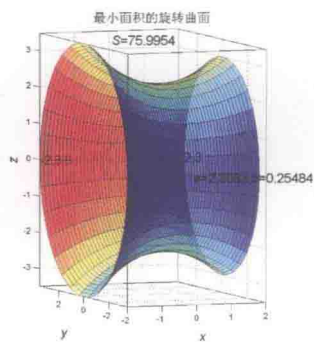
P4-3-2a 图



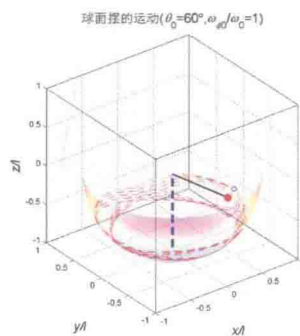
P4-9a 图



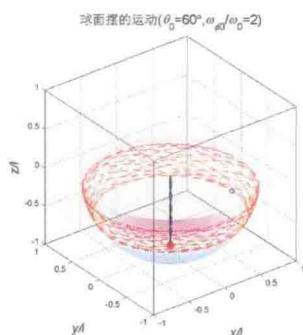
P4-9b 图



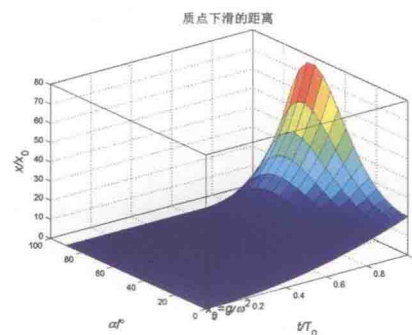
P4-12-2a 图



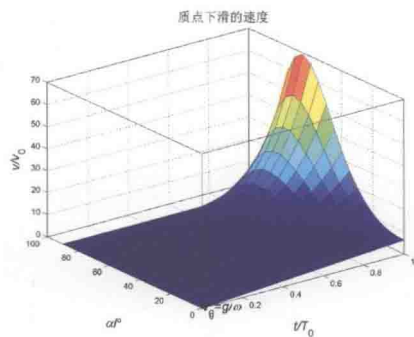
P5-2-2a 图



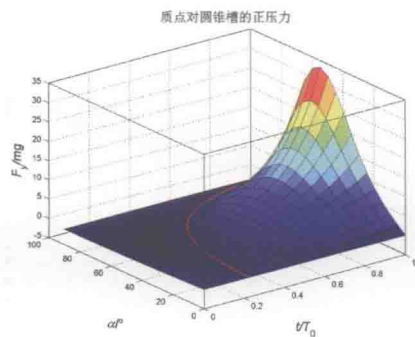
P5-2-2c 图



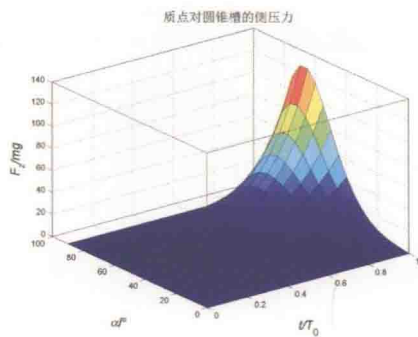
P6-3a 图



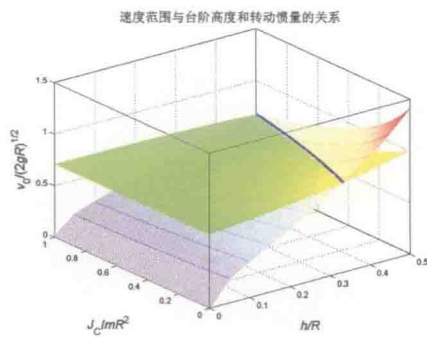
P6-3b 图



P6-3c 图

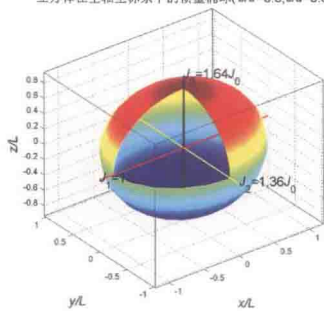


P6-3d 图



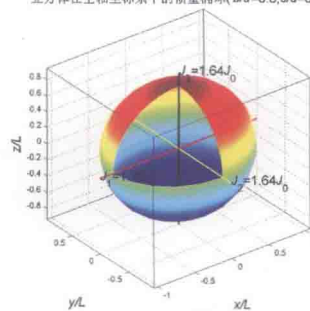
P7-3e 图

立方体在主轴坐标系下的惯量椭球 (\$b/a=0.8, c/a=0.6\$)



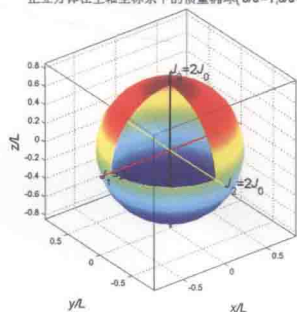
P8-2-1a 图

立方体在主轴坐标系下的惯量椭球 (\$b/a=0.8, c/a=0.8\$)



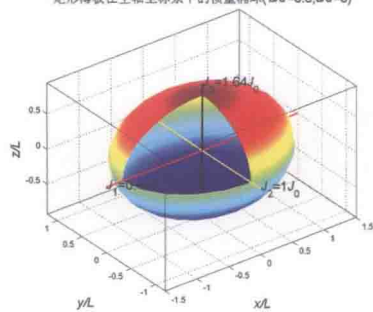
P8-2-1b 图

正立方体在主轴坐标系下的惯量椭球 (\$b/a=1, c/a=1\$)

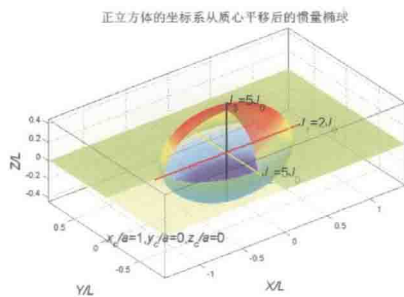


P8-2-1c 图

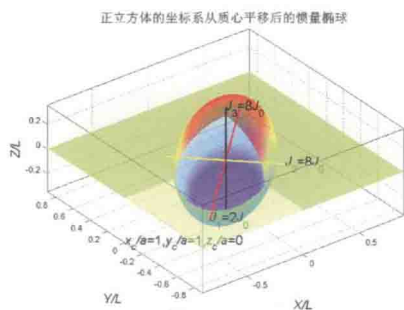
矩形薄板在主轴坐标系下的惯量椭球 (\$b/a=0.8, c/a=0\$)



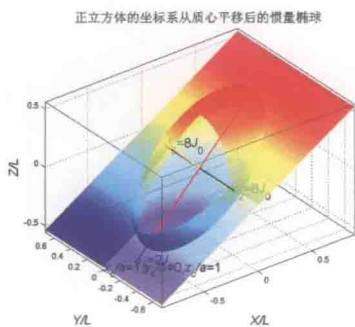
P8-2-1d 图



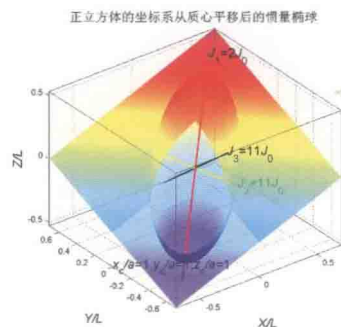
P8-2-2a 图



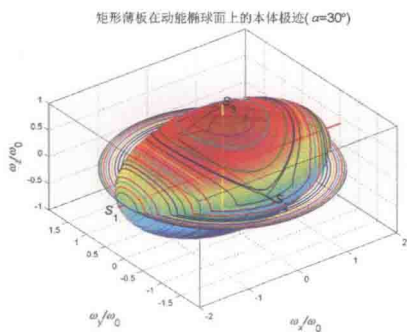
P8-2-2b 图



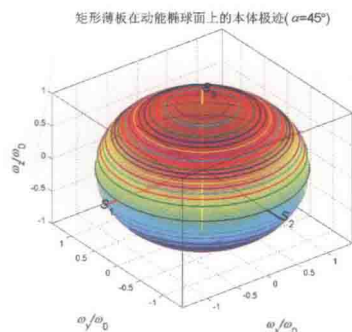
P8-2-2c 图



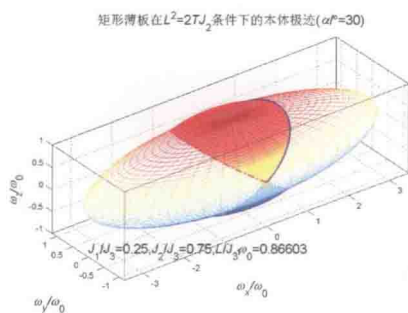
P8-2-2d 图



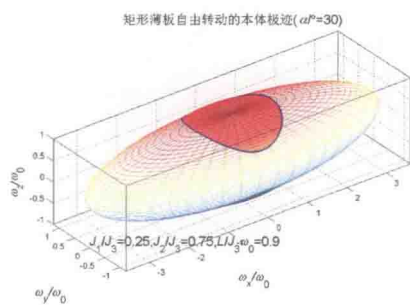
P8-3a 图



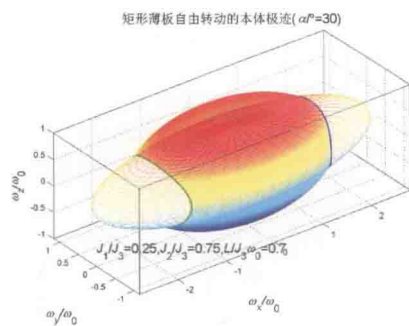
P8-3f 图



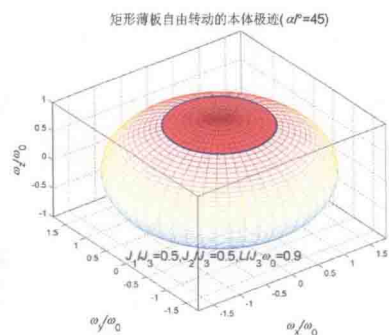
P8-4-1b 图



P8-4-2b 图

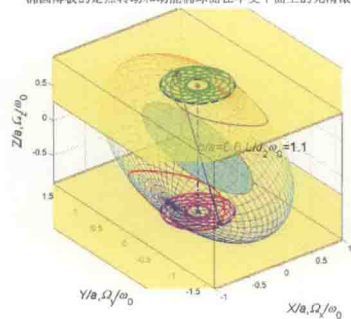


P8-4-2d 图



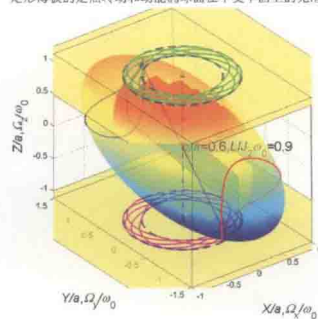
P8-4-2f 图

椭圆薄板的定点转动和动能椭球面在不变平面上的无滑滚动



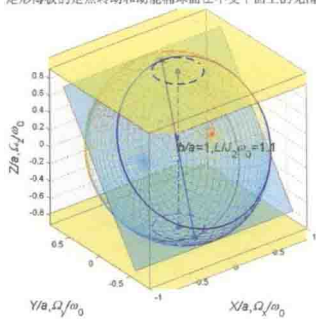
P8-5-2a 图

矩形薄板的定点转动和动能椭球面在不变平面上的无滑滚动



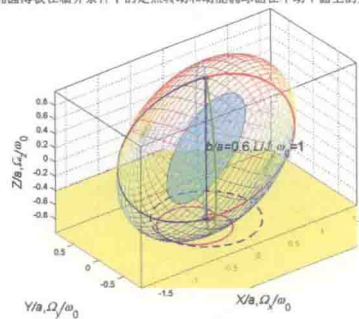
P8-5-2c 图

矩形薄板的定点转动和动能椭球面在不变平面上的无滑滚动



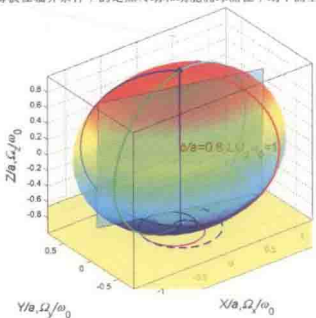
P8-5-2e 图

椭圆薄板在临界条件下的定点转动和动能椭球面在不动平面上的无滑滚动



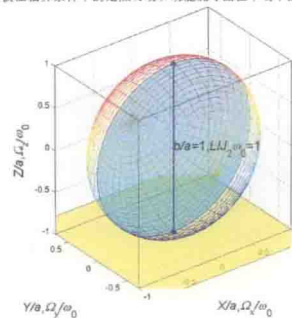
P8-5-3a 图

矩形薄板在临界条件下的定点转动和动能椭球面在不动平面上的无滑滚动



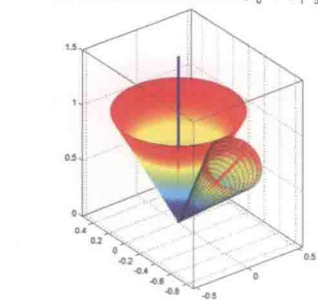
P8-5-3c 图

椭圆薄板在临界条件下的定点转动和动能椭球面在不动平面上的无滑滚动



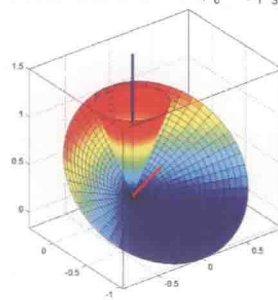
P8-5-3d 图

本体锥面在空间锥面无滑动的滚动($\theta_0=40^\circ, J_1/J_3=4$)



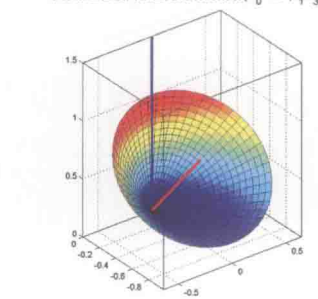
P8-6-1a 图

本体锥面在空间锥面无滑动的滚动($\theta_0=40^\circ, J_1/J_3=0.5$)



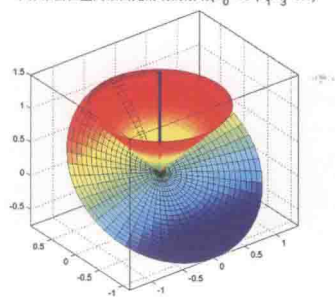
P8-6-1b 图

本体锥面在空间锥面无滑动的滚动($\theta_0=40^\circ, J_1/J_3=1$)



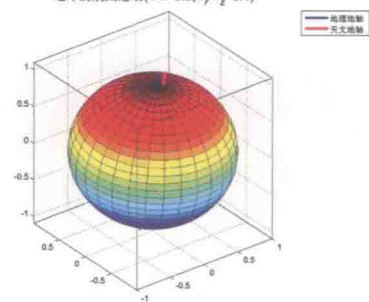
P8-6-1c 图

本体锥面在空间锥面无滑动的滚动($\theta_0=40^\circ, J_1/J_3=0.1$)



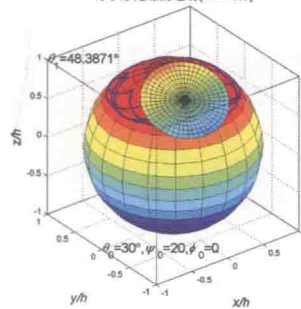
P8-6-1d 图

地球的规则进动($c/a=0.9, \omega/\omega_z=0.1$)



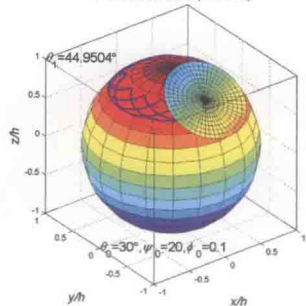
P8-6-2 图

钉子形陀螺的运动($R/h=0.5$)



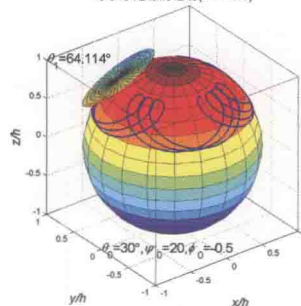
P8-8-2a 图

钉子形陀螺的运动($R/h=0.5$)

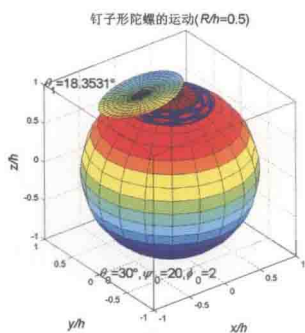


P8-8-2e 图

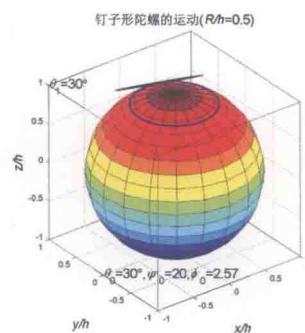
钉子形陀螺的运动($R/h=0.5$)



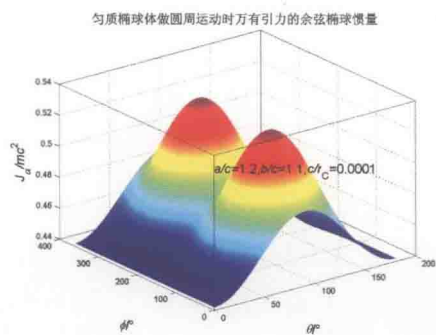
P8-8-2f 图



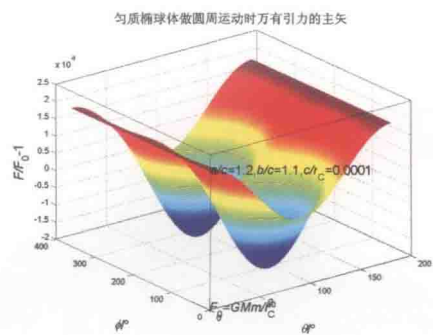
P8-8-2g 图



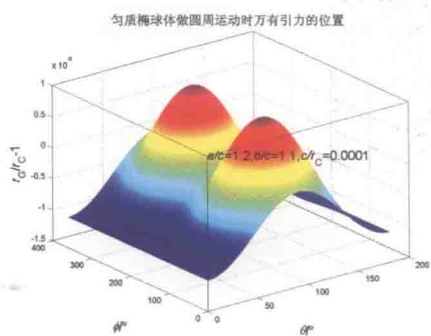
P8-8-2h 图



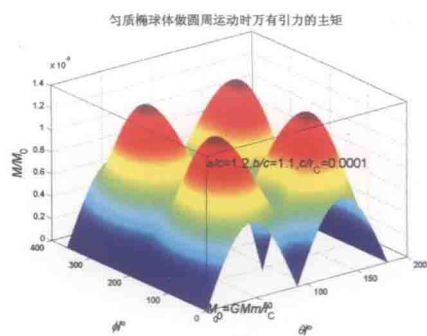
P8-10-2a 图



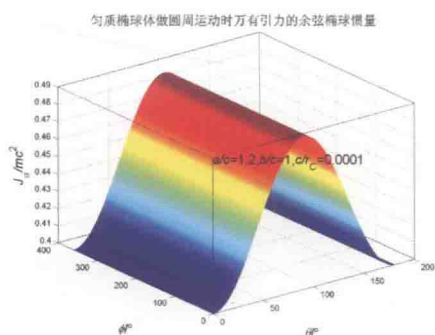
P8-10-2b 图



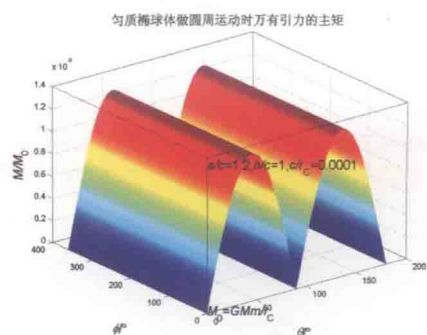
P8-10-2c 图



P8-10-2d 图



P8-10-2e 图



P8-10-2f 图

前言

理论力学是一门理论性较强的基础课,其理论和方法在许多领域都有着广泛的应用.国内外已经出版了许多优秀的理论力学教材,这些教材各具特色,为系统学习理论力学知识提供了很好的参考.将理论力学的抽象概念、原理和理论采用现代科学计算语言进行编程,并采用先进的计算机图形和动画进行可视化描述,是理论力学教育教学改革的一个重要方向.本书力求将这种改革做得更加系统全面.

MATLAB是由MATrix(矩阵)和LABoratory(实验室)两个单词合成的,是一门高级计算语言.这种语言计算功能强,除了一般的数值计算之外,还能求微积分、求微分方程的符号解和数值解等等,能够满足理论力学的基本计算的需要.这种语言图形功能强,能够画二维曲线和三维曲面,并具有动画功能,将计算结果直观地展现出来.由于篇幅的限制,本书无法说明各个范例的程序设计方法.对于常用的程序设计方法,读者可以参考《MATLAB可视化大学物理学》的第零章.

作者精心研究了许多理论力学教材,博采众长,并有所拓展.与一般的理论力学的教材相比,本书的编写有一些新的特点.

(1)结构新颖.本书共分为8章,每章均由两个部分构成.第一部分是理论力学的基本内容,第二部分是范例的解析和图示.将基本内容汇集起来,使读者能够掌握知识的纲要.本书对范例进行了解析,并将解析过程当作建立数学模型的过程,然后用图片和动画说明结果.

(2)内容丰富.本书包含了理论力学的基本内容,在运动学中增加了包络线的知识,在刚体的定点运动中增加了卡尔丹角和刚体在有心力场中的运动等内容.本书将刚体力学安排在分析力学的后面,以使用分析力学的方法求解刚体力学的问题.

(3)范例丰富.本书精选了许多典型的例题和习题,例如飞船的运动, α 粒子散射等等.本书改编了许多范例,例如对于最速降线问题,本书不但求出了质点沿摆线下降的时间,还与质点沿斜线、抛物线和椭圆下降的时间进行比较.本书还自编了一些范例,例如弹簧振子平面运动的规律,等等.本书一共汇编了96个范例,丰富了理论力学的内容.

(4)解析透彻.本书对许多范例做了透彻的解析,例如,对于单摆的运动,本书专门介绍了第1类和第2类完全积分以及正弦和余弦椭圆函数,求出圆环摆的精确的解析解.又例如,本书求出了刚体自由运动的角速度在不同情况下的解析解,说明了临界情况.

(5)方法多样.本书在范例的解析中往往采用多种方法,例如,在第5章中,对许多范例采用了牛顿运动定律、拉格朗日方程、哈密顿正则方程和哈密顿原理推导动力学方程,各种方法可相互比较和检验.

(6)计算精确.一般教材通常回避复杂的计算问题,例如,国内的教材很少介绍完全椭圆积分和椭圆函数.MATLAB是一种强大的解决问题的工具,本书充分利用MATLAB的计算功能,解决了一些用手工无法或很难求解的问题.例如,斜抛物体在速度一次律的阻尼介质中运动时,最大射程的射角是一个由阻尼系数决定的超越方程,用MATLAB很容易求出超越方程的数值解.又例如,在许多涉及非线性振动的问题中,周期是用积分表示的,除了少

量积分有精确的解析解之外,许多积分没有精确解析解,只能求出数值解.还例如,刚体自由运动的空间极迹的计算涉及到特殊函数,已知的教材都没有精确的空间极迹的曲线,而用 MATLAB 能够巧妙计算和绘制精确的空间极迹,并演示本体极迹在不变平面上做无滑滚动的动画.牛顿运动定律从数学上来说是微分方程组,用拉格朗日方程能够列出系统的微分方程组,而用 MATLAB 很容易求出微分方程组的数值解,并且检验解析解的正确性.

(7)图片精细.一般的理论力学教材图片不多,多数曲线是定性的曲线,本书系统地解决了理论力学的可视化问题,所有范例都用 MATLAB 绘制了定量的曲线(族)和曲面,直观地反映了理论力学的规律,用编程语言保证了图形的正确性.一些复杂的公式,很难想象曲线(族)和曲面的形状,通过作图就能直观地显示结果.有些曲线(族)和曲面的细节只有通过精细的图片才能显现出来.例如,电子在屏蔽库仑势场中运动,其有效势能曲线有单调下降的曲线,还有势阱和势垒曲线,两类曲线存在临界曲线.

(8)动画生动.本书大量使用动画说明问题,不但形象生动,而且反映了运动过程和规律.例如,对于轨道和曲率圆,用动画很容易发现:曲率圆与轨道有外切、内切和割切的三种相切的情况.又例如,四连杆机构的运动规律,如果不用动画,很难想象系统的运动有三种类型.还例如,刨床部件的运动规律,如果不用动画,很难发现增根的问题.本书所有动画都可以用手机微信扫码二维码演示.

本书是 MATLAB 与理论力学相结合的结果,也是不断探索的结果.书中差错难免,恳请读者指正,并提出建设性意见.探索是无止境的,还有许多问题需要探索,恳请读者指点迷津,共享探索的快乐.

刘天贵老师负责第一章的编写,周群益老师负责第二章到第七章的编写,杨旭静教授负责第八章的编写,周群益老师负责全书的程序设计.作者特别感谢卢宇编辑和黄旺编辑,他们的热情帮助使本书的出版成为现实.最后,作者感谢湖南省普通高等学校教学改革研究项目和湖南大学教改基金课题的资助.

作 者

2018. 11

目次

CONTENTS

第1章 质点运动学	1
I 基本内容	1
1.1 参考系和坐标系	1
1.2 直角坐标系	1
1.3 柱坐标系	2
1.4 球坐标系	3
1.5 自然坐标系	4
1.6 曲率半径	5
1.7 包络线	6
II 范例的解析和图示	7
{范例 1-1}斜抛物体的运动轨道和运动范围(曲线动画)	7
{范例 1-2}质点沿抛物线匀速运动的规律	9
{范例 1-3}斜抛轨道的曲率圆(图形动画)	13
{范例 1-4}椭圆规尺的运动轨道和运动范围	15
{范例 1-5}圆盘沿直线匀速滚动时动点的运动规律	17
{范例 1-6}圆盘沿圆环匀速滚动时动点的运动规律(图形动画)	20
{范例 1-7}圆盘沿抛物线和余弦线运动时动点的轨道(图形动画)	22
{范例 1-8}方轮的滚动和链轨方程(图形动画)	26
{范例 1-9}曲柄连杆活塞的运动规律(图形动画)	28
{范例 1-10}曲柄摇杆的运动规律	31
{范例 1-11}四连杆机构的运动规律(图形动画)	33
{范例 1-12}刨床部件的运动规律(图形动画)	36
III 练习题	40
第2章 牛顿运动定律	43
I 基本内容	43
2.1 牛顿运动定律	43
2.2 牛顿第二定律的分量形式	43

2.3	动量定理和动量守恒定律	43
2.4	角动量定理和角动量守恒定律	44
2.5	功和动能定理	45
2.6	保守力、势能和机械能守恒定律	46
2.7	质点在势阱中运动的周期	46
2.8	惯性坐标系和质心坐标系	47
2.9	质心运动定理	48
2.10	变质量系统的运动方程	49
II	范例的解析和图示	50
	{范例 2-1}质点在重力作用下沿圆柱螺旋线的运动规律(曲线动画)	50
	{范例 2-2}大高度自由落体的运动规律	53
	{范例 2-3}物体沿 $1/4$ 圆弧运动的规律	56
	{范例 2-4}斜抛物体在速度 1 次律阻尼介质中的运动规律	60
	{范例 2-5}斜抛物体在速度 2 次律阻尼介质中的运动规律	64
	{范例 2-6}等时摆的运动规律(曲线动画)	68
	{范例 2-7}椭圆函数和单摆的运动规律	70
	{范例 2-8}质点在准弹力作用下的运动规律	74
	{范例 2-9}质点在 n 次势场中运动的规律	78
	{范例 2-10}质点在平方反比斥力和一次方反比引力势场中的运动规律	80
	{范例 2-11}质点在势阱中的运动规律	82
	{范例 2-12}雨滴在饱和大气中下落的速度和高度	85
III	练习题	89
第 3 章	有心力	92
I	基本内容	92
	3.1 有心力的特点	92
	3.2 有心力的运动方程	92
	3.3 有心力场的能量和有效势能	93
	3.4 质点在有心力场中的运动规律	94
	3.5 有心力场中圆形轨道的稳定性	95
	3.6 二体问题	96
	3.7 散射	97
II	范例的解析和图示	98
	{范例 3-1}飞船在万有引力作用下的运动轨道与能量和角动量的关系	98
	{范例 3-2}远程物体的最大射高和射程以及安全线	101
	{范例 3-3}通信卫星的变轨(曲线动画)	107
	{范例 3-4}木星对飞船的引力加速作用(图形动画)	110
	{范例 3-5}微扰对万有引力作用下轨道的影响和水星的进动(曲线动画)	111
	{范例 3-6}弹簧振子平面运动的轨道(曲线动画)	118

{范例 3-7}质点在立方正比的引力势场中的运动规律	122
{范例 3-8}质点在立方反比的引力势场中的运动规律	125
{范例 3-9}质点在 n 次有心引力作用下的运动规律(曲线动画)	128
{范例 3-10}电子在屏蔽库仑势场中的运动规律(曲线动画)	134
{范例 3-11}带电粒子在库仑斥力场中的散射(曲线动画)	140
{范例 3-12}地球引潮力的分布规律	143
III 练习题	148
第 4 章 虚功原理和变分法	150
I 基本内容	150
4.1 约束的分类和自由度	150
4.2 虚功原理	151
4.3 广义力	151
4.4 达朗贝尔原理	152
4.5 平衡的稳定性	152
4.6 变分法	153
II 范例的解析和图示	154
{范例 4-1}滑轮组平衡的拉力	154
{范例 4-2}碗中细杆的平衡角度和稳定性	156
{范例 4-3}在槽中的圆柱体和光滑钢丝上的质点平衡的稳定性	157
{范例 4-4}弹簧圈套在半球上的平衡角度和稳定性	161
{范例 4-5}抵墙靠角和抵墙靠圆细杆的平衡角度和稳定性	162
{范例 4-6}铰链四杆和三杆系统的平衡角度和稳定性	167
{范例 4-7}夹杆平衡的稳定性	170
{范例 4-8}双弹簧单振子纵向振动和长方体在半圆柱上摆动的稳定性	171
{范例 4-9}球面上两点的最短路径	174
{范例 4-10}最速降线方程和质点下降的时间	176
{范例 4-11}费马原理与光的反射和折射定律	179
{范例 4-12}悬链线的方程和旋转曲面最小面积的母线方程	182
III 练习题	184
第 5 章 分析力学方程	187
I 基本内容	187
5.1 拉格朗日函数和第二类拉格朗日方程	187
5.2 第一类拉格朗日方程	189
5.3 哈密顿函数和哈密顿正则方程	189
5.4 哈密顿原理	191
5.5 线性振动和简正坐标	192
II 范例的解析和图示	195

{范例 5-1} 锥面摆的运动规律和压力的变化规律(曲线动画)	195
{范例 5-2} 球面摆的运动规律(图形动画)	200
{范例 5-3} 有耦合的平面弹簧振子的运动规律(曲线动画)	206
{范例 5-4} 弹簧双振子自由振动的规律	209
{范例 5-5} 双弹簧三振子自由振动的规律(图形动画)	211
{范例 5-6} 串联弹簧振子的振动规律和本征圆频率(图形动画)	215
{范例 5-7} 圆环弹簧振子的本征圆频率和振动规律(图形动画)	222
{范例 5-8} 椭圆摆的振动规律(图形动画)	229
{范例 5-9} 弹簧振子-单摆系统的振动规律	232
{范例 5-10} 轻杆双摆(混沌摆)的运动规律(图形动画)	236
{范例 5-11} 悬点不固定的轻杆双摆的运动规律	240
{范例 5-12} 弹簧耦合双摆的运动规律(图形动画)	244
III 练习题	248
第 6 章 相对运动	251
I 基本内容	251
6.1 位 矢	251
6.2 速 度	251
6.3 加速度	252
6.4 力	253
II 范例的解析和图示	254
{范例 6-1} 在地球上观察行星的运动轨迹(图形动画)	254
{范例 6-2} 旋转管中弹簧振子的运动规律	256
{范例 6-3} 质点在旋转圆锥槽中下滑的规律	258
{范例 6-4} 正弦滑动单摆微振动的规律	260
{范例 6-5} 正交四弹簧振子在转盘上运动的轨道(曲线动画)	262
{范例 6-6} 水平旋转圆环摆的运动规律(图形动画)	267
{范例 6-7} 单摆在车厢中的运动规律	271
{范例 6-8} 竖直旋转圆环摆相对平衡的稳定性和运动规律(图形动画)	272
{范例 6-9} 重力加速度随纬度的分布规律	277
{范例 6-10} 自由落体的偏东运动	278
{范例 6-11} 傅科摆的运动规律(曲线动画)	280
{范例 6-12} 海面在自转地球中的形状	282
III 练习题	284
第 7 章 刚体的平面转动	286
I 基本内容	286
7.1 刚体和自由度	286
7.2 刚体的运动类型	286

7.3	刚体的自由运动方程	286
7.4	空间力系的简化和刚体的平衡	286
7.5	刚体的定轴转动	287
7.6	刚体的平面运动	288
7.7	复摆振动的周期	289
II	范例的解析和图示	290
	{范例 7-1}套环细杆和双等臂四连杆的空间极迹和本体极迹(图形动画)	290
	{范例 7-2}圆形刚体沿三角斜面滚下的加速度	293
	{范例 7-3}圆形刚体滚上台阶的速度范围	297
	{范例 7-4}圆形刚体从固定圆柱面上滑下的角度	300
	{范例 7-5}细杆沿光滑墙面和地面滑倒的质心运动的规律	304
	{范例 7-6}扇形复摆的运动规律(图形动画)	307
	{范例 7-7}半圆柱面(体)在水平面上摇动的规律(图形动画)	309
	{范例 7-8}圆弧滚摆的运动规律(图形动画)	312
	{范例 7-9}活动圆槽-圆形刚体系统的运动规律	315
	{范例 7-10}弹簧圆槽-圆形刚体系统的运动规律	317
	{范例 7-11}弹簧振子-细杆系统的运动规律	320
	{范例 7-12}日光灯管单线悬吊时的摆动(图形动画)	323
III	练习题	327
第 8 章	刚体的定点转动	332
I	基本内容	332
8.1	定点转动的角速度矢量	332
8.2	欧拉角和角速度	333
8.3	卡尔丹角和角速度	334
8.4	刚体的角动量和惯量张量	335
8.5	惯量椭球和主惯量	338
8.6	刚体定点转动的动能	339
8.7	欧拉动力学方程	340
8.8	无力矩刚体的定点转动	341
8.9	有心力的主矢和主矩	344
8.10	有心力的能量	346
II	范例的解析和图示	348
	{范例 8-1}欧拉角和卡尔丹角的形成(图形动画)	348
	{范例 8-2}匀质长方体的惯量椭球	352
	{范例 8-3}无力矩匀质矩形薄板的本体极迹和运动的稳定性	354
	{范例 8-4}无力矩匀质矩形薄板自由转动的角速度	356
	{范例 8-5}无力矩匀质椭圆薄板和矩形薄板自由转动的空间极迹(图形动画)	362
	{范例 8-6}无力矩轴对称刚体的本体锥面和空间锥面(图形动画)	368

{范例 8-7}轴对称刚体定点转动的有效势能	371
{范例 8-8}钉子形陀螺的运动规律(图形动画)	378
{范例 8-9}圆圈在平面上无滑滚动的规律(图形动画)	385
{范例 8-10}直杆和矩形薄板在万有引力场中的主矢和主矩以及重心位置	390
{范例 8-11}薄板在万有引力场中运动的规律和稳定性(图形动画)	393
{范例 8-12}椭球体在万有引力场中运动的规律	395
III 练习题	398