

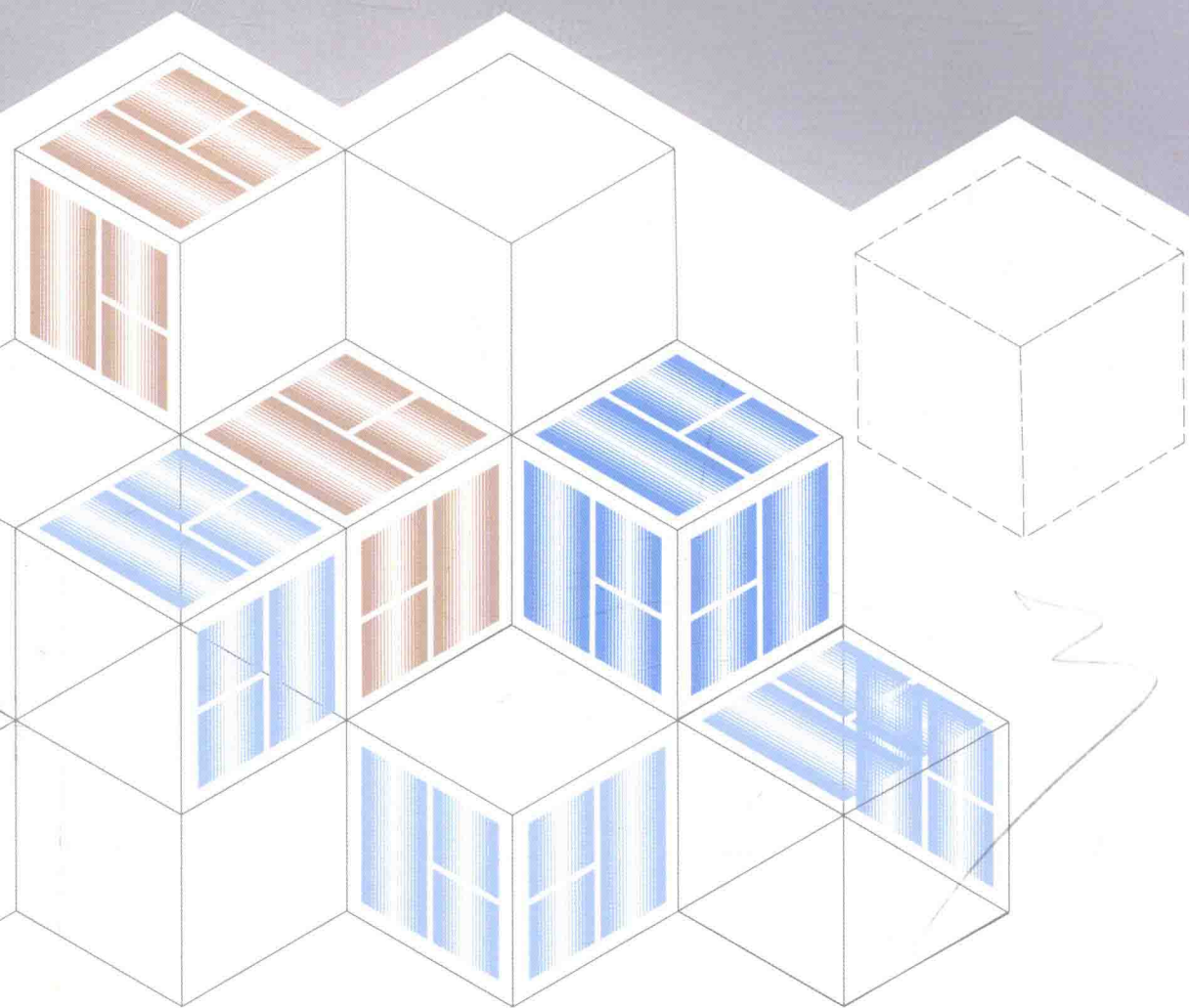


合肥学院模块化教学改革系列教材

# 刚体运动力学

Dynamics of Rigid Bodies

主 编 徐启圣 / 副主编 王艳梅



中国科学技术大学出版社

合肥学院模块化教学改革系列教材

# 刚体运动力学

Dynamics of Rigid Bodies

主 编 徐启圣 / 副主编 王艳梅



中国科学技术大学出版社

## 内 容 简 介

本教材属于合肥学院模块化教学改革的一项内容,理论体系与传统的静力学、运动学和动力学对应,主要包括刚体静力学、刚体平动力学分析、刚体定轴转动力学分析、刚体平面运动力学分析以及动力学专题五大模块单元。其中,动力学专题包含达朗贝尔原理、动载荷、虚位移原理和机械振动基础。本书涵盖了教育部高等学校力学基础课程教学指导委员会制定的《高等学校理工科非力学专业力学基础课程教学基本要求》的“理论力学课程教学基本要求(A类)”的内容,同时满足《工程教育专业认证标准(通用标准)》规定中毕业生应该达到的12项能力中的6种培养需求,即工程知识、问题分析、研究、使用现代工具、个人和团队以及终身学习。

本书可作为高等工科院校机械、土建、交通、水利、化工等本科专业的理论力学教材,也可作为夜大、函授大学、职工大学等成人教育院校学生自学的理论力学教材,同时也可供相关工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

刚体运动力学/徐启圣主编. —合肥:中国科学技术大学出版社,2017.1  
ISBN 978-7-312-03836-5

I. 刚… II. 徐… III. 刚体运动学 IV. O311.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 186886 号

出版 中国科学技术大学出版社  
安徽省合肥市金寨路 96 号,230026  
<http://press.ustc.edu.cn>  
印刷 合肥市宏基印刷有限公司  
发行 中国科学技术大学出版社  
经销 全国新华书店  
开本 787 mm×1092 mm 1/16  
印张 19  
字数 486 千  
版次 2017 年 1 月第 1 版  
印次 2017 年 1 月第 1 次印刷  
定价 40.00 元

# 合肥学院模块化教学改革系列教材

## 编 委 会



主 任 蔡敬民

副主任 刘建中 陈 秀

委 员 (按姓氏笔画排序)

王庆龙	王晓峰	牛 欣
刘 力	刘 红	江 芳
许泽银	李道芳	余国江
陈江华	杨学春	胡晓军
侯继红	俞志敏	袁 睿
顾 俊	葛春梅	董 强
储 忠	谢海涛	谭 敏

## 总 序

课程是高校应用型人才培养的核心,教材是高校课程教学的主要载体,承载着人才培养的教学内容,而教学内容的选择关乎人才培养的质量。编写优秀的教材是应用型人才培养过程中的重要环节。一直以来,我国普通高校教材所承载的教学内容多以学科知识发展的内在逻辑为标准,与课程相对应的知识在学科范围内不断地生长分化。高校教材的编排是按照学科发展的知识并因循其发展逻辑进行的,其内容由教师依序系统地教给学生。

当我们转变观念——大学的学习应以学生为中心,那我们势必会关注“学生通过大学阶段的学习能够做什么”,我们势必会考虑“哪些能力是学生通过学习应该获得的”,而不是“哪些内容是教师要讲授的”,高校教材承载的教学内容及其构成形式随即发生了变化,突破学科知识体系定势,对原有知识按照学生的需求和应获得的能力进行重构,才能符合应用型人才培养的目标。合肥学院借鉴了德国经验,实施的一系列教育教学改革,特别是课程改革都是以学生的“学”为中心的,围绕课程改革在教材建设方面也做了一些积极的探索。

合肥学院与德国应用科学大学有30多年的合作历史。1985年,安徽省人民政府和德国下萨克森州政府签署了《按照德国应用科学大学办学模式,共建一所示范性应用型本科院校》的协议,合肥学院(原合肥联合大学)成为德方在中国最早重点援建的两所示范性应用科学大学之一。目前,我校是中德在应用型高等教育领域里合作交流规模最大、合作程度最深的高校。在长期合作的过程中,我校借鉴了德国应用科学大学的经验,将德国经验本土化,为我国的应用型人才培养模式改革做出了积极的贡献。在前期工作的基础上,我校深入研究欧洲,特别是德国在高等教育领域的改革和发展状况,结合博洛尼亚进程中的课程改革理念,根据我国国情和高等教育的实际,开展模块化课程改革。我们通过校企深度合作,通过大量的行业、企业调研,了解社会、行业、企业对人才的需求以及专业对应的岗位群,岗位所需要的知识、能力、素质,在此基础上制订人才培养方案和确定教学内容,并及时实行动态调整,吸收最新的行业前沿知识,解决人才培养和社会需求适应度不高的问题。2014年,合肥学院“突破学科定势,打造模块化课程,重构能力导向的应用型人才培养教学体系”获得了国家教学成果一等奖。

为了配合模块化课程改革,合肥学院积极组织模块化系列教材的编写工作。以实施模块化教学改革的专业为单位,教材在内容设计上突出应用型人才能力

的培养。即将出版的这套丛书此前作为讲义,已在我校试用多年,并经过多次修改。教材明确定位于应用型人才的培养目标,其内容体现了模块化课程改革的成果,具有以下主要特点:

(1) 适合应用型人才培养。改“知识输入导向”为“知识输出导向”,改“哪些内容是教师要讲授的”为“哪些能力是学生通过学习应该获得的”,根据应用型人才的培养目标,突破学科知识体系定势,对原有知识、能力、要素进行重构,以期符合应用型人才的培养目标。

(2) 强化学生能力培养。模块化系列教材坚持以能力为导向,改“知识逻辑体系”为“技术逻辑体系”,优化和整合课程内容,降低教学内容的重复性。专业课注重理论联系实际,重视实践教学和学生能力培养。

(3) 有利于学生个性化学习。模块化系列教材所属的模块具有灵活性和可拆分性的特点,学生可以根据自己的兴趣、爱好以及需要,选择不同模块进行学习。

(4) 有利于资源共享。在模块化教学体系中,要建立“模块池”,模块池是所有模块的集合地,可以供应用型本科高校选修学习,模块化教材很好地反映了这一点。模块化系列教材是我校模块化课程改革思想的体现,出版的目的一是与同行共同探索应用型本科高校课程、教材的改革,努力实现资源共享。

(5) 突出学生的“学”。模块化系列教材既有课程体系改革,也有教学方法、考试方法改革,还有学分计算方法改革。其中,学分计算方法采用欧洲的“work-load”(即“学习负荷”,学生必须投入 28 小时学习,并通过考核才可获得 1 学分),这既包括对教师授课量的考核,又包括对学生自主学习量的考核,在关注教师“教”的同时,更加关注学生的“学”,促进了“教”和“学”的统一。

围绕着模块化教学改革进行的教材建设,是我校十几年来教育教学改革大胆实践的成果,广大教师为此付出了很多的心血。在模块化系列教材付梓之时,我要感谢参与编写教材以及参与改革的全体老师,感谢他们在教材编写和学校教学改革中的付出与贡献!同时感谢中国科学技术大学出版社为系列教材的出版提供了服务和平台!希望更多的老师能参与到教材编写中,更好地展现我校的教学改革成果。

应用型人才培养的课程改革任重而道远,模块化系列教材的出版,是我们深化课程改革迈出的又一步,由于编者水平有限,书中还存在不足,希望专家、学者和同行们多提意见,提高教材的质量,以饕莘莘学子!

是为序。

合肥学院党委书记 蔡敬民  
2016年7月28日于合肥学院



# 前 言

《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010~2020年)》在高等教育方面做出重要规划,其中一项内容为:“教师要把教学作为首要任务,不断提高教育教学水平,加强实验室、校内外实习基地、课程教材等教学基本建设,深化教学改革。”可见,加强课程教材的建设是提高高等教育质量的一个重要方面。

目前,工科类工程力学在运动学和动力学方面的教材,几乎都沿用了苏联的理论力学体系。虽然该体系完整、经典,但五十多年来,教材的形式、内容、方法几乎没有什么变化,难以适应现代工程的力学需要。对于培养应用型人才的本科高校来说,更是亟待加强对解决学生解决实际问题的能力的培养,特别是计算能力及分析能力方面。

合肥学院模块化教学改革于2014年获得了国家级教学成果一等奖,这是安徽省高等教育的重大突破。工程力学这个模块,作为机械设计制造及其自动化专业的模块化培养方案的一个专业基础模块,其教学效果直接关系到后续模块的教学,有着重要的作用。因此,从工程需要的能力出发,我们对工程力学进行了模块化教学改革,其思路如图0.1所示。

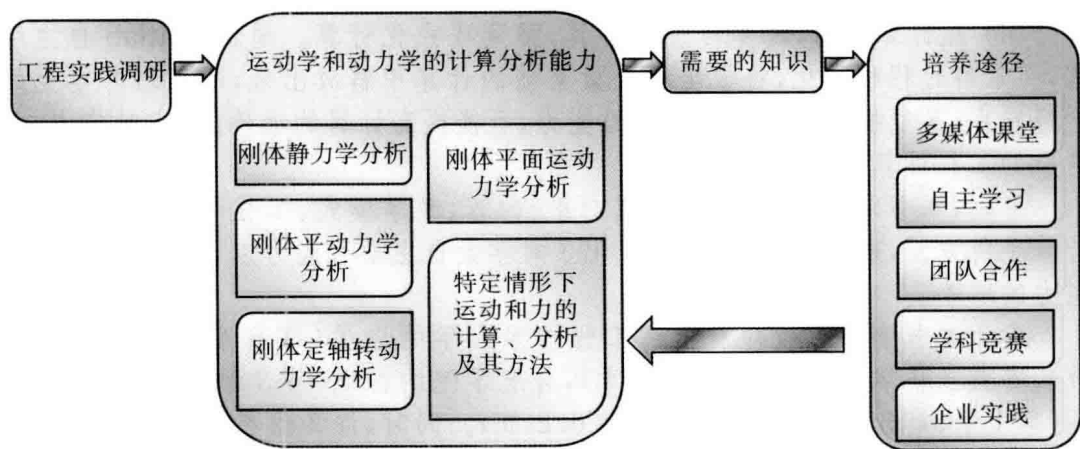


图 0.1 工程力学思路

为此,通过模块化改革,将知识输出为向导转变为能力输出为导向,针对原来的理论力学课程,通过知识重构,进行改革,形成了这本《刚体运动力学》。

本书具以下特点:

(1) 在研究对象方面,本书不再像传统理论力学从点到刚体的运动学、动力

学分析那样,而是直接从刚体入手研究其运动学、动力学,并将点作为刚体的部分来处理。这是因为,对机械工程、建筑工程及近机类专业而言,刚体是普遍的研究对象,仅在特殊情况下才可简化成点来处理。但点的运动状态和受力状态不能代替刚体的复杂运动状态和受力状态,从这点而言,以刚体作为研究对象更符合工程实际。再者,大学物理中已经详细讲述了点的运动和力的分析知识点,因此本书对此不必再做赘述。

(2) 在内容方面,本书将同种运动现象及其本质进行整合,形成模块。目前,同类出版物的相关内容几乎都按照静力学、运动学和动力学体系进行规划,属理论力学范畴。对于每种运动,往往将运动现象到本质的内容(即运动方程、速度、加速度、动量、动量矩、动能等)分散在运动学和动力学内容的多个章节中,容易造成从运动现象到运动本质的本应连贯的分析被硬性分离,极易导致学生的学习“孤岛”,形成单元知识、能力过关,而对于需要知识综合应用之类的问题往往无能为力的局面。我们认为,工程类构件的运动按运动形式主要分为平动、定轴转动和平面运动三种。每种运动从现象到本质的内容,通过运动方程—速度—加速度—动量—动量矩—动能主线进行整合处理,形成一个模块,加以实际工程案例进行力学模型、数学模型、算法模型的分析、解决,形成连贯性分析,有助于加深学生对力学现象到本质的认识,并体会到相应知识的应用。

(3) 在教法方面,实现了以学生为本、以工程为目的,将问题式、讨论式、自主式等教学模式融入本书,力争突破教师先讲、学生后学后练的传统式做法,以工程或生活问题引导,形成学生团队先学—教师精讲—学生再学—教师辅导的循环递进模式,激发学生的兴趣,这对培养学生的自主学习能力、合作交流能力有极大好处。

(4) 在计算方面,改变传统的手算,强调程式化计算。通过 Matlab 自主编程,将求解过程程式化,将学生从大量繁琐的计算中解放出来,既能培养学生的学习能力,又能提高学生的逻辑思维能力,且能提高计算的准确度,省时省力,为复杂的工程计算打下基础。

总之,本书以学生为本,从研究对象、内容、教学模式、工程问题的处理以及计算手段方面,进行了创新尝试,强化了对学生自主学习能力以及解决工程问题能力的培养。

参加本书编写的教师有上海工程技术大学的许勇(第6章的6.3、6.4两节),安徽三联学院的王艳梅(第2章),合肥学院的白琨(第3章、第4章)、徐启圣(第1章、第5章、第6章的6.1和6.2节)。同时,许泽银教授、赵茂俞教授、张远斌教授、谭敏教授、王锡明教授提出了宝贵建议,孙庆元、朱家辉、宋文宽等同学参与了部分例题、习题的画图工作,在此表示感谢。

由于时间与能力所限,书中定有不足之处,请读者批评指正。

编者

2015年7月于合肥



# 目 录

总序 .....	( i )
前言 .....	( iii )
第 1 章 绪论 .....	( 1 )
1.1 工程力学的学习意义 .....	( 1 )
1.1.1 生活中无处不在的工程力学 .....	( 1 )
1.1.2 工程中承担重头戏的工程力学 .....	( 3 )
1.2 工程力学的学习目标 .....	( 5 )
1.3 工程力学能力要素分解 .....	( 6 )
1.4 本书主要内容 .....	( 8 )
1.4.1 研究对象 .....	( 8 )
1.4.2 研究任务 .....	( 9 )
1.4.3 研究方法 .....	( 9 )
1.5 工程力学能力的养成 .....	( 9 )
1.5.1 树立工程意识 .....	( 9 )
1.5.2 用数学知识建立力学模型 .....	( 10 )
1.5.3 勇于尝试、积极应用 .....	( 10 )
1.6 阅读材料——工程力学的昨天、今天和明天 .....	( 11 )
1.6.1 力学及其体系 .....	( 11 )
1.6.2 经典力学的起源与建立 .....	( 12 )
1.6.3 近代力学的发展 .....	( 14 )
1.6.4 现代力学的发展 .....	( 15 )
1.6.5 21 世纪力学发展的动向 .....	( 17 )
1.7 自主学习 .....	( 18 )
第 2 章 刚体静力学分析 .....	( 19 )
2.1 力 .....	( 20 )
2.1.1 力与力系 .....	( 20 )
2.1.2 静力学公理 .....	( 21 )
2.1.3 力矩 .....	( 24 )
2.2 力偶 .....	( 26 )
2.2.1 力偶的定义及性质 .....	( 26 )
2.2.2 力偶系及其合成 .....	( 27 )
2.3 约束 .....	( 27 )
2.3.1 约束与约束力 .....	( 27 )

2.3.2 常见理想约束及其约束力的简化 .....	( 27 )
2.4 力系的简化 .....	( 30 )
2.4.1 力系等效与简化的概念 .....	( 30 )
2.4.2 力向一点平移定理 .....	( 30 )
2.4.3 平面力系的简化 .....	( 31 )
2.4.4 空间力系的简化 .....	( 37 )
2.5 力系的平衡 .....	( 40 )
2.5.1 力系的平衡方程 .....	( 40 )
2.5.2 刚体系的平衡 .....	( 48 )
2.5.3 平面桁架 .....	( 49 )
2.6 摩擦与摩擦力 .....	( 52 )
2.6.1 滑动摩擦定律 .....	( 52 )
2.6.2 摩擦角与自锁现象 .....	( 53 )
2.6.3 滚动摩阻(擦) .....	( 54 )
2.7 小组合作解决工程问题 .....	( 57 )
2.8 典型工程案例的编程解决 .....	( 59 )
习题 2 .....	( 62 )
<b>第 3 章 刚体平动力学分析</b> .....	( 70 )
3.1 刚体平动运动方程 .....	( 71 )
3.1.1 定义 .....	( 71 )
3.1.2 刚体平动运动特点 .....	( 73 )
3.1.3 刚体平动运动方程 .....	( 73 )
3.2 刚体平动速度及其合成 .....	( 73 )
3.2.1 刚体平动速度 .....	( 73 )
3.2.2 点的合成运动及速度合成定理 .....	( 74 )
3.3 刚体平动加速度及其合成 .....	( 76 )
3.3.1 刚体平动加速度 .....	( 76 )
3.3.2 点的加速度合成定理(牵连运动为平动) .....	( 77 )
3.4 刚体平动微分方程及质心运动定理 .....	( 78 )
3.4.1 刚体平动微分方程 .....	( 78 )
3.4.2 质心运动定理 .....	( 79 )
3.5 刚体动量定理及其守恒 .....	( 82 )
3.5.1 刚体动量定理 .....	( 82 )
3.5.2 刚体动量守恒定理 .....	( 82 )
3.6 刚体平动动能定理 .....	( 83 )
3.7 典型工程案例的编程解决 .....	( 85 )
3.8 团队合作解决工程问题 .....	( 93 )
习题 3 .....	( 95 )
<b>第 4 章 刚体定轴转动动力学分析</b> .....	( 101 )
4.1 刚体定轴转动运动方程 .....	( 102 )

4.1.1	定义	(102)
4.1.2	刚体定轴转动方程	(103)
4.1.3	刚体定轴转动运动特点	(103)
4.2	刚体定轴转动速度及其合成	(104)
4.3	刚体定轴转动加速度及其合成	(106)
4.3.1	定轴转动刚体上点的加速度	(106)
4.3.2	点的加速度合成定理(牵连运动为转动)	(106)
4.4	刚体对轴的转动惯量	(107)
4.5	刚体定轴转动动量矩定理及动量矩守恒定理	(109)
4.6	刚体定轴转动动能定理	(110)
4.7	典型工程案例的编程解决	(111)
4.8	团队合作解决工程问题	(114)
	习题4	(115)
<b>第5章</b>	<b>刚体平面运动力学分析</b>	(121)
5.1	刚体平面运动的概念及运动方程	(123)
5.1.1	刚体平面运动的概念	(123)
5.1.2	刚体的平面运动简化成平面图形的运动	(123)
5.1.3	刚体平面运动方程	(124)
5.1.4	平面运动的特性	(125)
5.2	平面运动时刚体平面图形的速度	(126)
5.2.1	用基点法求速度	(126)
5.2.2	用速度投影定理求速度	(127)
5.2.3	用瞬心法求速度	(129)
5.3	刚体平面运动的加速度	(133)
5.4	刚体平面运动的动力学方程	(137)
5.4.1	刚体平面运动与刚体平动及刚体定轴转动的关系	(137)
5.4.2	刚体平面运动的微分方程	(137)
5.5	刚体平面运动的动能定理	(138)
5.5.1	刚体平面运动的动能	(138)
5.5.2	刚体平面运动力系的功	(139)
5.5.3	刚体平面运动力系的动能定理	(139)
5.6	典型工程案例的编程解决	(140)
5.7	团队合作解决工程问题	(149)
	习题5	(152)
<b>第6章</b>	<b>动力学专题</b>	(161)
6.1	达朗贝尔原理	(162)
6.1.1	惯性力和动静法	(162)
6.1.2	刚体运动的惯性力简化	(164)
6.1.3	典型案例的编程解决	(170)
6.1.4	团队合作解决工程问题	(172)

6.2 动载荷 .....	(173)
6.2.1 动载荷的概念及分类 .....	(174)
6.2.2 构件做匀加速直线运动时的动应力 .....	(175)
6.2.3 构件做匀速转动时的动应力 .....	(177)
6.2.4 冲击现象及冲击韧度 .....	(180)
6.2.5 自由落体冲击的动应力 .....	(182)
6.2.6 水平冲击的动应力 .....	(185)
6.2.7 突然制动的冲击问题 .....	(188)
6.2.8 典型工程案例的编程解决 .....	(189)
6.2.9 团队合作解决工程问题 .....	(190)
6.3 虚位移及虚位移原理 .....	(192)
6.3.1 虚位移概念 .....	(192)
6.3.2 虚位移原理 .....	(195)
6.3.3 典型工程案例的编程解决 .....	(198)
6.3.4 团队合作解决工程问题 .....	(200)
6.4 机械振动基础 .....	(201)
6.4.1 振动概念 .....	(201)
6.4.2 拉格朗日方程简介 .....	(202)
6.4.3 单自由度振动的线性方程 .....	(203)
6.4.4 单自由度系统的自由振动 .....	(205)
6.4.5 单自由度系统的强迫振动 .....	(209)
6.4.6 典型工程案例的编程解决 .....	(215)
6.4.7 团队合作解决工程问题 .....	(217)
习题 6 .....	(219)
附录 .....	(225)
附录 I Matlab 编程基础 .....	(225)
I.1 Matlab 简介 .....	(225)
I.2 变量与函数 .....	(228)
I.3 Matlab 的数值计算功能 .....	(230)
I.4 Matlab 的图形功能 .....	(236)
I.5 程序设计 .....	(245)
I.6 Matlab 符号计算 .....	(251)
I.7 muPAD notebook 符号运算 .....	(280)
习题 I .....	(285)
附录 II 简单均质几何体的质心、转动惯量和惯性矩 .....	(287)
参考文献 .....	(290)

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 工程力学的学习意义

“工程力学(刚体运动力学)”是机械、建筑及近机械类专业的基础课程,属于模块化教学设计中的“工程力学”模块。该课程主要讲授刚体平动、刚体转动及刚体平面运动的运动力学方面的知识,引导学生掌握分析方法、把握运动现象及其原因和规律、形成力学思维、解决实际问题尤其是运动强度问题,主要包括生活和工程中的力学问题。

### 1.1.1 生活中无处不在的工程力学

众所周知,今天的工程基础,主要来源于牛顿提出的力学基本原理。而在实际中,很大程度上起因于人们在生活中对工具的需要、制造和使用。可见,工程来源于生活。其中最原始的莫过于人类在狩猎中对工具的使用,原始人使用树枝削成的树矛进行狩猎:在靠近猎物时直接刺杀,而在距猎物较远时,通过抛掷刺伤猎物,如图 1.1 所示。



图 1.1 原始人狩猎

### 1. 体育运动

在体育项目的跳高方面,运动员最初都采用自由式,沿垂直方向跑向横杆,随意跨越。1839 年,加拿大运动员沃夫兰用自由式跳过了 1.69 m,这是公认的最早世界纪录。目前,男子世界跳高纪录为 2.45 m。这种进步,除了身体素质提高外,更多的原因是充分应用了运动学和动力学知识,从而不断创造纪录。如图 1.2 所示的背越式跳高,助跑的目的是获得必要的水平速度,并为提高起跳效果和顺利地越过横杆创造条件,而且另一大优势是助跑运用了“J”形的弧线轨迹,如图 1.3 所示。随着最后三四步的曲率半径越来越小,人体起跳时便在惯性作用下沿切线飞出,获得转向横杆的动量矩(角动量),并自然舒展为水平姿势,从而

跨越栏杆。



图 1.2 背越式跳高

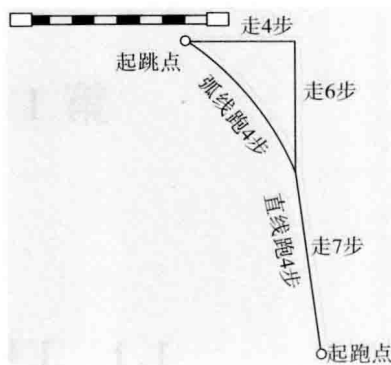


图 1.3 背越式跳高的“J”形弧线助跑

另外,传说为春秋时期北方的山戎民族所创的“千秋”,也就是今天的秋千(图 1.4),深为大众所喜爱。但不是所有人都是高手,会荡秋千的人,不用别人助推,也能越摆越高;反之,则很难摆动起来。这是为什么? 原来,其技术要领是:双手抓紧悬索,双脚站稳踏板,在高处屈膝下蹲,在低处挺身直立,即可越荡越高。其重心轨迹如图 1.5 所示。请思考一下,其中用到了哪些力学原理呢?



图 1.4 秋千

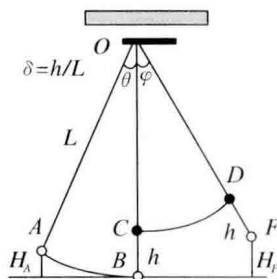


图 1.5 荡秋千时的重心轨迹图

## 2. 开发高科技产品

应用力学知识,更为重要的是可开发出高科技产品。例如:许多人喜欢玩的陀螺(图 1.6),必须不断地用外力抽打,才能持续竖立旋转,一旦停止抽打,则很快就会停止,其原因何在? 如何分析? 原来陀螺在旋转的时候,不但围绕本身的轴线转动,而且还围绕一个垂直轴做锥形运动。也就是说,陀螺一面围绕本身的轴线做自转,一面围绕垂直轴做公转。陀螺围绕自身轴线做自转运动的速度快慢决定着陀螺摆动角的大小:转得越慢,摆动角越大,稳定性越差;转得越快,摆动角越小,因而稳定性也就越好(这和人们骑自行车的道理差不多。两者不同的是,陀螺做直线运动,自行车做的是圆形的曲线运动)。陀螺高速自转时,在重力偶作用下,不沿力偶方向翻倒,而绕着支点的垂直轴做圆锥运动,这就是**陀螺原理**。





图 1.6 150 kg 的陀螺

其实,类似的例子还有很多,蕴含了很多运动力学的机理。例如:

- (1) 将一只熟鸡蛋放在桌上旋转时,如果用力合适,它转着转着就会竖立起来,但生鸡蛋就不会这样。
- (2) 滑水运动员在滑板上不会沉下去。
- (3) 打乒乓球时打出或破解弧圈型上旋球和前冲式上旋球的方法。
- (4) 骑车时,在一定情况下撒开车把不会倒下。
- (5) 自然界中禽类的蛋是椭圆形的而不是圆形的。

## 1.1.2 工程中承担重头戏的工程力学

除了生活中,工程中更脱离不开运动力学。可以说,没有运动力学就不会有工程。随着制造业的振兴,现代科技日新月异,其中力学起到了无法替代的作用,尤其在 20 世纪以前,蒸汽机、内燃机、铁路、桥梁、船舶、兵器等推动了近代科学技术的更新与社会发展,从本质上讲就是力学推动科技的发展,因为这些都是力学知识的积累、研究和应用的基础上逐步形成和发展的。

近代出现的高新技术群(高层建筑、大型桥梁、精密仪器、航空航天器、机器人、高速列车、核反应堆工程、电子工程、计算机工程以及大型水利工程等)更是运动力学在工程中的应用的成功代表,如图 1.7~1.9 所示。



图 1.7 鸟巢

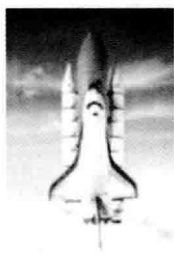


图1.8 航天飞船



图 1.9 动车

在机械工程方面,运动力学的应用更是广泛,如带轮传动、齿轮传动(图 1.10 和图 1.11),其传动链复杂、精确,起到了传递运动和动力的作用。

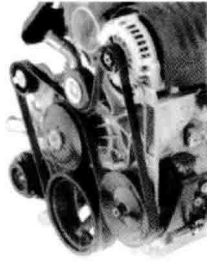


图 1.10 带轮传动



图 1.11 齿轮传动

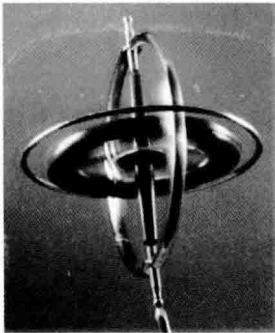


图 1.12 定点旋转的陀螺

通过对陀螺的分析,知道陀螺运动有两个特点:进动性和等轴性。当高速旋转的陀螺遇到外力时,它的轴的方向是不会随着外力的方向发生改变的,而是轴围绕着一个定点进动,如图 1.12 所示。如果玩过陀螺就会知道,陀螺在地上旋转时轴会不断地扭动,这就是进动。简单来说,陀螺效应就是旋转的物体有保持其旋转方向(旋转轴的方向)的惯性。

利用这个原理,改进了直升机(图 1.13),极大地降低了事故率。以前,模型直升机没有陀螺仪,油门、主旋翼角度和尾旋翼角度很难配合,启动后便需要尽快往天空飞,如要悬停就要控制杆快速灵敏地动作,所以很容易撞毁。直升机飞行的基本原理是利用主旋翼可变角度产生反向推力而上升,但这对机身会产生扭力作用,于是需要加设一个尾旋翼来抵消扭力,以平衡机身。这时需要最早用于航海导航的陀螺仪(图 1.14),它可以根据机身的摆动幅度,自动发出补偿信号给伺服器,以此改变尾旋翼的角度,产生推力以平衡机身。这种陀螺仪就是常说的锁尾陀螺仪。



图 1.13 直升机

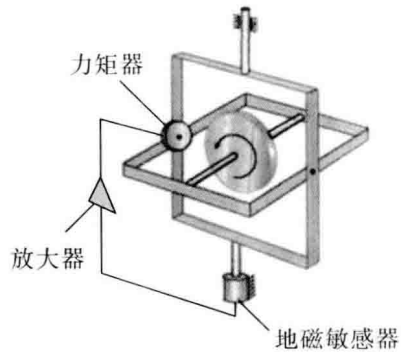


图 1.14 陀螺方位仪结构模型

此外,陀螺仪还可用于手机导航、摄像防抖以及卫星等方面(图 1.15)。尤其 MEMS(微机械)陀螺(图 1.16)还可应用于航空、航天、航海、兵器、汽车、生物医学、环境监控等领域,并且 MEMS 陀螺相比传统的陀螺有明显的优势。

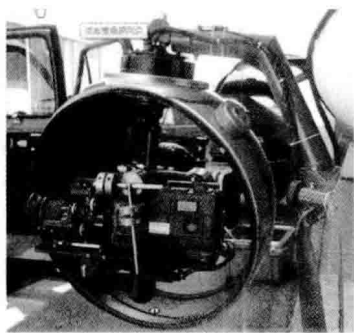


图 1.15 陀螺仪摄像机

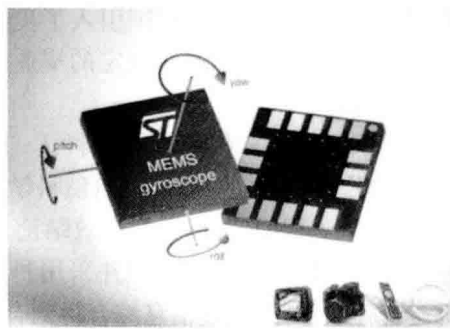


图 1.16 MEMS 陀螺仪器

此外,工程力学还有一个重要的应用——爆炸冲击。1994年,霍普金森完成了一个颇具意义的实验(图 1.17),当引爆了放置在厚钢板上的适量炸药后,他发现与炸药位置相对的钢板背面发生了拉伸断裂,一块圆帽状的金属“崩片”携带动量飞迸出来。为何会发生这种“隔山打牛”现象呢?

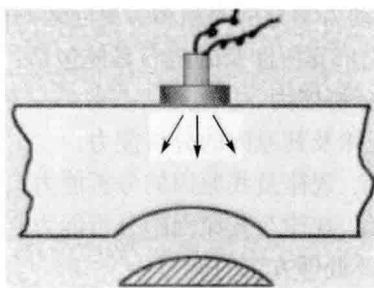


图 1.17 “隔山打牛”实验

原来,在固体中传播的波可分为两种,即集散波和畸变波。当任何一种波入射到两种介质的交界面上时,将同时产生反射和折射现象。反射应力波脉冲与入射应力波脉冲具有相同形状,但应力符号经表面反射后改变,脉冲成为拉伸脉冲。如果传播脉冲的介质的抗拉强度较低,反射后的拉应力就可能造成其自由表面附近的介质断裂,这种断裂称为**反射断裂**。这种观点也成功地解释了装甲车着弹时内壁“崩片”的剥落以及抛撒现象。然而反射断裂并不总是有害的,在结构定向爆破时,它也是有用的。

综上所述,“工程力学(刚体运动力学)”是机械工程师的专业基础之一,为“机械原理”“机械零件”“结构力学”“弹性力学”“流体力学”“机械振动”等一系列后续课程(模块)的重要基础,在机械及近机械类工程中具有极其重要的地位,为其提供了所需的知识、能力及方法。

## 1.2 工程力学的学习目标

既然工程力学在生活中和工程中都具有这么重要的地位,那么我们就应该有明确的学