



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



北京高等教育精品教材

BEIJING GAODENG JIAOYU JINGPIN JIAOCAI

高等院校精品教材系列

# 理论力学教程

◎ 水小平 白若阳 刘海燕 编著



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
北京高等教育精品教材  
高等院校精品教材系列

# 理论力学教程

水小平 白若阳 刘海燕 编著

电子工业出版社  
Publishing House of Electronics Industry  
北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本教材根据教育部高等学校力学基础课程教学指导分委员会最新制定的“理论力学课程教学基本要求(A类)”编写,是普通高等教育“十一五”国家级规划教材和北京高等教育精品教材,也是国家精品课程的配套教材。全书共分为三篇:第一篇为运动学,包括运动学基础、刚体的平面运动、复合运动;第二篇为静力学,包括静力学基本概念、力系的简化、力系的平衡;第三篇为动力学,包括动力学基础、动能定理、动量原理(含碰撞)、达朗贝尔原理、虚位移原理、动力学普遍方程和第二类拉格朗日方程。全书共配有607道题(大部分是作者编写的新题),其中例题136道、思考题155道和习题316道。另外,还附有北京理工大学2010~2013年攻读硕士学位研究生入学考试“理论力学”试题。

本教材可作为高等学校工程力学类、航空航天类、机械类、动力类、材料类、土建类、船舶类、水利类专业本科生多学时理论力学教材,也可供函授、远程、高职高专的相关专业师生及有关工程技术人员参考,同时也是研究生入学考试和教师备课值得选用的参考材料。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有,侵权必究。

## 图书在版编目(CIP)数据

理论力学教程/水小平,白若阳,刘海燕编著. —北京:电子工业出版社,2013.9

高等院校精品教材系列

ISBN 978-7-121-21350-2

I. ①理… II. 水… ②白… ③刘… III. ①理论力学-高等学校-教材 IV. ①O31

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第202973号

策划编辑:余 义

责任编辑:余 义

印 刷:涿州市京南印刷厂

装 订:涿州市京南印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编:100036

开 本:787×1092 1/16 印张:24.75 字数:634千字

印 次:2013年9月第1次印刷

定 价:55.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

# 前 言

“理论力学”是一门演绎性很强的重要技术基础课,它不仅是整个力学学科的基础,也是许多工科专业的学生学习后续相关课程和将来从事科学技术工作的必要基础。“理论力学”课程以理论的系统性与应用的灵活性为特点,可以培养学生的逻辑思维能力、抽象简化能力、实践应用能力和初步的科学研究能力。通过该课程的学习,学生不仅可以掌握力学的最基本概念和定理(或原理),还可以学会处理力学问题的最基本方法和技能。同时,它又是将矢量函数、微积分、线性代数等高等数学知识较早地应用于工程实际的课程,在对学生进行工程意识与工程能力、科学素质与严谨作风、探索精神与创新能力的培养中起到了举足轻重的作用。

本教材是根据教育部高等学校力学基础课程教学指导分委员会最新制定的“理论力学课程教学基本要求(A类)”,借鉴国内外一些优秀教材的成功经验,结合北京理工大学工程力学课程组(我校“工程力学”课程2006年被评为国家级精品课程,我校“工程力学”教学团队2007年被评为首届国家级教学团队)多年来的教学研究、改革与实践的成果以及作者20多年的教学心得编写而成的,并被列为普通高等教育“十一五”国家级规划教材和北京高等教育精品教材。

针对理论力学虽然定理、公式不多,基本概念和基本理论貌似浅显却难以深入掌握,解题过程需对力和运动进行缜密分析,对基本定理(或原理)的应用灵活,题型多变,所研究的物体机械运动与日常生活及很多领域的工程有着广泛的联系等特点,本教材以力学的基本概念、基本定理、基本方法为主体内容,同时注重相关知识的扩展和适度的深化,较多地采用从一般到特殊的知识体系,结构紧凑,表述简洁;通过解释日常生活现象和工程实例,体现了理论与实际的密切联系,既提高了学生的学习兴趣,又增强了学生的工程意识与解决实际问题的能力;精编典型例题,规范解题过程,针对学生解题时往往止步于求出答案,缺乏对例题的深入思考这一弊端,本教材在所有例题的后面都附有深入细致的“注意”(即小批注),有的对解题的关键予以说明,有的指出了学生在解题中容易混淆的概念和忽略的问题或常犯的错误及错误的根源,有的给出一题多解的思路或进一步可研究的问题,可以夯实学生对基本知识的理解并更好地启迪学生的创新思维,学生仔细研读一题可胜过囫圇吞枣地阅读多题,是对基本理论学习的具体指导,能起到举一反三的作用;每章后的思考题都是针对一些容易犯错误的概念精心设计的,给学生留下了独立思考的空间,可以很好地帮助学生深入、准确地理解课程内容;所给习题新颖丰富,并在题目中注意体现基本理论和基本方法的灵活应用,以使 学生得到比较全面的训练,有利于学生综合能力的培养,能满足不同层次学生在学习中的多种需求,为了方便读者,书后附有习题参考答案。本教材中的例题、思考题和习题有相当一部分是作者围绕课程内容自己编写的新题,同时也参考国内外一些优秀教材中的部分例题、思考题和习题,在此,作者向这些教材的编著者们深表谢意。附录A给出了北京理工大学2010~2013年攻读硕士学位研究生入学考试“理论力学”试题,相信对报考北京理工大学及其他高校或研究院所相关专业的硕士研究生在“理论力学”课程的系统复习和进一步的提高中有一定的帮助作用。

总之,本教材力争将基本概念阐述得科学、准确,将基本理论阐述得系统、全面,将基本方法

阐述得清楚、易懂,帮助读者在较短的时间内融会贯通所学知识和深入理解其物理意义。同时,在重视基础、突出重点、加强综合能力、提高科学素质、培养工程意识和激发创新思维等方面进行了有益尝试。本教材很好地反映了编著者近年来开展“启发式和研究型”教学改革与实践的成果,体系新颖、条理清晰、逻辑严谨、特色鲜明,使学生在物体机械运动的瞬时分析和过程分析两个层面都得到有效训练,着力培养学生将工程实际问题抽象简化为力学模型和进行力学计算的能力,相信对“理论力学课程的高质量教学”能够起到积极的作用。

本教材由全国优秀教师、第三届北京市高等学校教学名师奖获得者水小平教授潜心编著,白若阳副教授精心绘制了全部插图并认真解答了所有习题,刘海燕副教授仔细校核了全书内容和所有习题的解答,工程力学课程组的韩斌、廖力、秦晓桐、张强、李海龙、赵希淑等老师在教材的编写过程中也参与了部分工作。

首届高等学校国家级教学名师奖获得者梅凤翔教授对教材进行了详细审阅,并提出了许多宝贵意见。北京理工大学宇航学院力学系许多教师对本教材的编写也提出了许多好的建议。北京理工大学教务处、宇航学院的相关领导以及电子工业出版社对本教材的出版提供了热情帮助和大力支持。在此,作者一并表示衷心的感谢。

编写一套集基本概念、基本理论、解题指导和富有创意的思考题、习题于一体的理论力学教材是作者多年的夙愿,也深深体会到做好这项工作的艰难,需要有志于理论力学教学的全体同仁的共同不懈努力。由于作者的水平有限,书中疏漏和有误之处在所难免,真诚希望广大读者对本教材提出修改意见和建议,使本教材能够不断得到提高和改进。

水小平 白若阳 刘海燕

2013年7月

# 目 录

绪论 .....	1
----------	---

## 第一篇 运 动 学

<b>第 1 章 运动学基础 .....</b>	<b>4</b>
1.1 约束及其分类 .....	4
1.2 刚体运动的分类 .....	6
1.3 机构、广义坐标与自由度 .....	8
1.4 点的一般运动及其描述方法 .....	9
1.5 刚体的基本运动及其描述方法 .....	16
思考题 .....	19
习 题 .....	21
<b>第 2 章 刚体的平面运动 .....</b>	<b>23</b>
2.1 刚体平面运动研究的简化和运动方程 .....	23
2.2 平面运动刚体的角速度和角加速度 .....	24
2.3 平面图形运动的位移定理 .....	25
2.4 用速度瞬心法求平面图形上点的速度 .....	25
2.5 平面图形上两点的速度关系 .....	28
2.6 平面图形上两点的加速度关系 .....	32
思考题 .....	42
习 题 .....	46
<b>第 3 章 复合运动 .....</b>	<b>53</b>
3.1 绝对运动、相对运动与牵连运动 .....	53
3.2 变矢量的绝对导数与相对导数的关系 .....	54
3.3 点的速度合成定理 .....	55
3.4 点的加速度合成定理 .....	58
3.5 平面运动刚体的复合运动 .....	76
思考题 .....	80
习 题 .....	83

## 第二篇 静力学

<b>第4章 静力学基本概念</b> .....	92
4.1 力和力偶 .....	92
4.2 力系的主矢和力系对某点的主矩 .....	95
4.3 力系平衡的基本公理 .....	97
4.4 力系等效的基本性质 .....	98
4.5 约束和约束力 .....	102
4.6 物体的受力分析和受力图 .....	105
思考题 .....	110
习 题 .....	114
<b>第5章 力系的简化</b> .....	119
5.1 力的平移定理 .....	119
5.2 一般力系向某点的简化 .....	120
5.3 一般力系的最简形式 .....	121
5.4 特殊力系的简化 .....	125
思考题 .....	134
习 题 .....	138
<b>第6章 力系的平衡</b> .....	142
6.1 力系的平衡条件及其平衡方程 .....	142
6.2 桁架的内力计算 .....	156
6.3 考虑摩擦的平衡问题 .....	161
思考题 .....	172
习 题 .....	176

## 第三篇 动力学

<b>第7章 动力学基础</b> .....	186
7.1 惯性参考系中的质点动力学 .....	186
7.2 非惯性参考系中的质点动力学 .....	190
7.3 质点系质量分布的特征量 .....	193
思考题 .....	198
习 题 .....	200
<b>第8章 动能定理</b> .....	204
8.1 动能 .....	204
8.2 力的功 .....	209
8.3 势力场和势能 .....	214

8.4	动能定理	215
8.5	机械能守恒定律	219
	思考题	221
	习 题	223
<b>第 9 章</b>	<b>动量原理</b>	<b>229</b>
9.1	质点系的动量和动量矩	229
9.2	质点系的动量定理和动量守恒定律	236
9.3	质点系的质心运动定理	238
9.4	质点系对固定点的动量矩定理	241
9.5	质点系对动点的动量矩定理	243
9.6	质点系的动量矩守恒定律	250
9.7	动量原理在碰撞问题中的应用	252
9.8	关于动力学的三个基本定理	263
	思考题	263
	习 题	266
<b>第 10 章</b>	<b>达朗贝尔原理</b>	<b>276</b>
10.1	达朗贝尔惯性力与质点的达朗贝尔原理	276
10.2	质点系的达朗贝尔原理	277
10.3	质点系达朗贝尔惯性力系的简化	277
10.4	动静法的应用举例	281
10.5	定轴转动刚体的轴承附加动约束力	292
	思考题	298
	习 题	300
<b>第 11 章</b>	<b>虚位移原理</b>	<b>307</b>
11.1	约束方程及其分类	307
11.2	虚位移	309
11.3	虚功	314
11.4	虚位移原理及其应用	315
11.5	通过广义力研究质点系的平衡问题	323
11.6	关于虚位移原理与静力学平衡条件求解平衡问题的对比	329
	思考题	330
	习 题	332
<b>第 12 章</b>	<b>动力学普遍方程和第二类拉格朗日方程</b>	<b>339</b>
12.1	动力学普遍方程	339
12.2	第二类拉格朗日方程	341
12.3	第二类拉格朗日方程的首次积分	346
	思考题	351
	习 题	353



附录 A 北京理工大学 2010~2013 年攻读硕士学位研究生入学考试	
“理论力学”试题 .....	356
附录 B 简单均质几何体的质心、转动惯量和惯性矩 .....	362
习题参考答案 .....	367
附录 A 参考答案 .....	384
参考文献 .....	386

# 绪 论

**理论力学是研究物体机械运动一般规律的科学。**所谓机械运动,就是物体的位置随时间而变化。它是客观世界中物质运动的最基本形式。力是物质间的一种相互作用,机械运动状态的变化就是由这种相互作用引起的。众所周知,许多工程技术学科,如机械、车辆、航空航天器、机器人等的主要运动形式就是机械运动,因此,理论力学是与这些机械运动密切相关的工程技术学科必不可少的基础。理论力学所研究的是力学中最普遍、最基本的规律,这就决定了它更是各门力学学科的重要基础。

理论力学的知识体系是以伽利略和牛顿所建立的力学基本定理为基础的,属于**经典力学**的范畴。它仅适用于运动速度远小于光速的宏观物体的运动,绝大多数工程实际中所遇到的力学问题都属于这个范围。至于速度接近光速的宏观物体的运动和微观粒子的运动,则是相对论和量子力学的研究范畴。

抽象化和数学演绎是形成理论力学的基本概念和基本理论的主要方法。在对具体的机械运动进行研究时,如果对实际存在的所有因素不分主次全部计入,看起来似乎很符合实际,而结果可能使问题无法求解,或者虽能求解,但困难极大,费时费力,而实际工作中并不需要这样高的精确度,因此,对于一个具体问题,可以根据研究问题的性质和目的,抓住起决定作用的主要因素,忽略影响很小的次要因素,进行合理抽象简化得到研究对象的**力学模型**,使其既满足实际要求,又必须在数学计算上方便可行。当被研究物体的运动范围远远大于其本身的大小,它的形状对运动的影响可以忽略不计时,可以将该物体抽象简化为只有质量而没有体积的点,称为**质点**。一般情况下,任何物体都可以看成是由许多质点所组成的系统,称为**质点系**。当物体的变形对其运动的影响可忽略不计时,可将该物体抽象为**刚体**,即不会发生变形的物体,是组成物体的各个质点之间的距离永远保持不变的**特殊质点系**。由多个刚体相互连接而组成的系统称为**刚体系**。将质点、质点系、刚体、刚体系统称为**离散系统**,它是理论力学的研究对象。在分析固体的变形或流体的流动规律时,必须建立另外一种力学模型,即物质在空间连续分布的**连续介质**,它是固体力学、流体力学等后续力学分支的研究对象。但理论力学中涉及的一些力学普遍规律也适用于连续介质。当然,不同的研究对象可以抽象为不同的力学模型,即使是同一研究对象,根据研究问题的性质和目的的不同也可以抽象为不同的力学模型,以我们生活的地球为例,当研究地球在太阳系中的运动轨道时,地球半径(约为 6370km)比其轨道平均半径(约为  $1.5 \times 10^8$  km)要小得多,此时可将地球抽象为一个质点;当研究人造地球卫星的运动轨道时,地球的大小就不能不考虑,但它的变形可忽略不计,此时的地球可抽象为一个刚体;至于考虑地震的起因或地球的演化时,则必须考虑地球各部分的变形和流动,即将地球看成是连续介质来研究。建立力学模型后,再采用数学演绎的方法得到相关的公式、定理、定律和结论,并经受实践的严格检验,得到正确的力学理论,深刻反映物体机械运动的规律,再应用这些概念、理论和结论去指导新的实践,解决工程、生产和生活中的实际力学问题。

理论力学的研究内容由运动学、静力学和动力学三部分组成。**运动学**只从几何的角度研究

物体的运动,而不研究引起物体运动的原因,给出运动描述的方法,建立不独立运动量与独立运动量之间的关系;静力学主要研究物体在力系作用下的平衡规律,同时也研究力的基本性质,物体受力的分析方法和力系的简化方法;动力学则建立物体的运动与其受力之间的定量关系。从理论力学的知识体系来讲,运动学和静力学的基本概念相对独立,但它们都是动力学的必备基础,动力学则是理论力学的核心内容。必须指出,这三部分内容所涉及的基本概念或公式、定理与解决问题的方法均可直接解决工程对象的力学问题,例如:运动学可以解决机械系统中从动件与主动件之间的运动学关系;静力学可以解决工程结构的内力计算和机构的条件平衡的求解;动力学可以直接给出机械系统在外力系作用下的运动规律。

理论力学是一门理论严谨、概念抽象、系统性强、应用面广的重要技术基础课程,需在以下三个方面达到要求:(1)具有清晰的物理概念和形象的几何直观,准确地理解和掌握基本概念与基本原理;(2)熟悉基本定理和公式,并能在正确条件下灵活运用;(3)学会处理力学问题的一些基本方法。这就需要在认真钻研理论、深入消化例题和独立完成足够数量的习题之间做一定的交替,力求达到深化认识、融会贯通、正确应用的课程学习的最终目的。

# 第一篇 运动学

**运动学**研究点和刚体运动的几何性质,包括点的运动方程(或轨迹)、速度、加速度和刚体的转动方程、角速度、角加速度等,而不考虑力和质量等与运动有关的物理量。换言之,运动学只研究对已给定运动的描述,而不考虑引起运动的原因和实现的方法。后者属于动力学的研究范围。

要描述一个物体的运动,必须以另一个不变形的物体为参照才能确定,这个参照物体称为**参考体**。通过不同的参考体来观察和描述同一物体的运动,其结果是不同的。例如,站在地面上和坐在行驶着的车辆中来观察同一地面建筑物,在地面上的观察者以地面为参考体,观察到的建筑物处于静止状态;而坐在车辆上的观察者以行驶着的车辆为参考体,观察到建筑物处于与车辆行驶的反方向运动中。因此,在描述物体的运动时,必须指出相对于哪个参考体,如不进行特别说明,则以地球为参考体。为了便于对物体的运动进行定量描述,通常在参考体上固连某种坐标系称为**参考系**,参考系也可视为与参考体相固连的整个延伸空间。

在运动学中研究的点是指一个没有质量和大小的纯几何点,当物体的几何尺寸和形状在运动过程中可忽略不计时,物体的运动便可简化为点的运动。由于刚体可看成是无数个点的组合,所以点的运动又是研究刚体运动学的基础。

# 第 1 章 运动学基础

点的运动和刚体的简单运动——平移和定轴转动是工程中很常见的运动,也是研究复杂运动的基础。本章先介绍约束及其分类、刚体运动的分类、广义坐标和自由度等基本概念,然后以地球为参考体研究点的一般运动的描述,最后研究刚体平移和定轴转动的整体运动特征及其上点的运动性质。

## 1.1 约束及其分类

在理论力学中将所有物体分为两类:自由体和非自由体。凡能在空间自由运动的物体称为**自由体**,即自由体在空间的位移不受任何限制,例如在空中飞行的飞机、卫星等。而非自由体是指它在空间的位移受到一定限制的物体,例如列车受铁轨的限制,只能沿轨道运动;电机转子受到轴承的限制,只能绕转轴转动等。一般将这种事先给定的限制物体运动的条件称为**约束**,因此,非自由体就是受到约束的物体,而自由体是不受约束的物体。必须注意对约束定义中“事先给定”的正确理解,例如,射击时枪膛事先限制了子弹只能沿枪膛内壁上刻出的螺旋线(称为来复线)作螺旋运动,因此,枪膛就是对子弹的一种约束,但子弹出膛后其质心作抛物线运动则不是事先给定的,而是由初始条件和动力学方程共同确定的,是子弹质心的运动轨迹,而不是约束。

工程中常见约束的基本类型如下:

### 1. 柔性体约束

不可伸长的质量可忽略不计的柔绳、链条或胶带构成的约束统称为**柔性体约束**(图 1-1),简称**柔索**,它只限制物体沿柔索被拉伸方向的运动,而不能限制物体其他方向的运动。

### 2. 光滑面约束

将物体搁置于光滑的平面或曲面上而形成**光滑面约束**(图 1-2),它限制物体不能取得沿法线方向进入光滑面的位移。

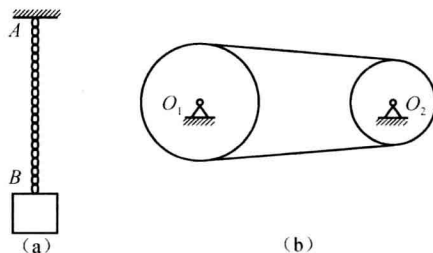


图 1-1 柔性体约束



图 1-2 光滑面约束

### 3. 光滑圆柱铰链约束

用光滑圆柱销钉将两个带有销钉大小孔的构件连接在一起组成**光滑圆柱铰链约束**(图 1-3(a)),

受这种约束的物体只能绕销钉中心轴线转动,而不能取得沿销钉轴向和任意径向的位移,其简图为图 1-3(b)。

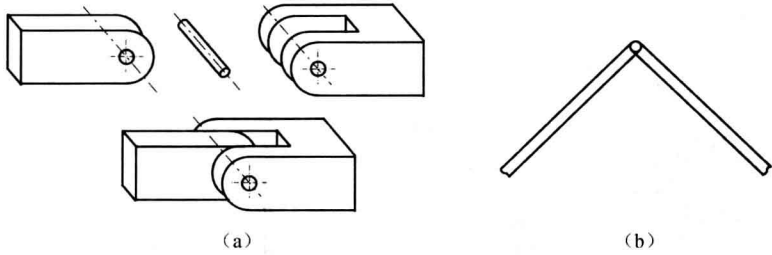


图 1-3 光滑圆柱铰链约束

#### 4. 固定铰支座约束

这类约束是光滑圆柱铰链的演变形式。若用光滑圆柱铰链相连的两物体中,有一个是与地面固连静止不动的支座,则称另一个物体在铰链处受**固定铰支座约束**(图 1-4(a)),其简图为图 1-4(b)。

#### 5. 活动铰支座约束

这类约束也是光滑圆柱铰链约束的演变形式,它是在固定铰支座下安放一排光滑滚柱而成,称为**活动铰支座约束**,又称为**辊轴支座**(图 1-5(a)),它限制与它相连的物体不能取得进入约束平面方向的位移,其简图为图 1-5(b)。

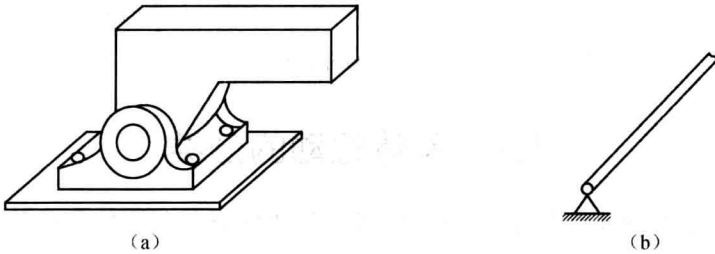


图 1-4 固定铰支座约束

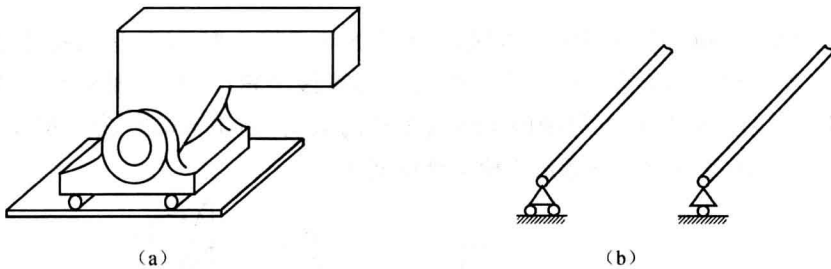


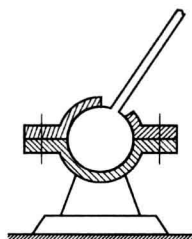
图 1-5 活动铰支座约束

#### 6. 光滑球铰链支座约束

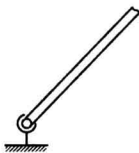
这种约束是光滑面约束的一种演变形式,它是将被约束物体的一端做成光滑圆球,并置于直径相同的光滑的固定球窝支座中而构成,称为**光滑球铰链支座约束**(图 1-6(a)),它允许被约束的物体只可绕球心作任意方向的转动,而球心不能有任何方向的位移,其简图为图 1-6(b)。

## 7. 固定端约束

物体的一端与另一物体相固连,不允许这两物体间发生任何相对运动称为**固定端约束**(图 1-7),如悬臂梁等。



(a)



(b)

图 1-6 光滑球铰链支座约束

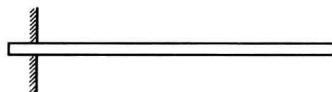
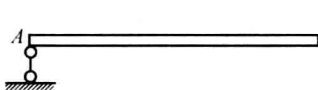


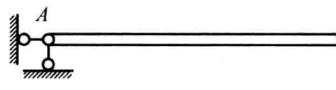
图 1-7 固定端约束

## 8. 链杆约束

两端用光滑圆柱铰链与被约束物体和大地相连接的刚杆称为**链杆**(图 1-8),链杆只限制被约束物体沿链杆被拉伸或压缩方向的位移。显然图 1-8(a)中点 A 只能沿水平方向运动,图 1-8(b)中点 A 不能发生任意方向的位移。



(a)



(b)

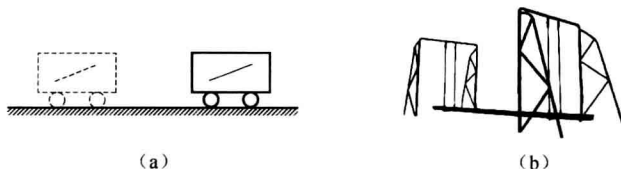
图 1-8 链杆约束

# 1.2 刚体运动的分类

由于约束能够限制刚体某些方向的运动,可以按照约束限制刚体运动的特点,将刚体的运动分为以下几类:

### 1. 平移

当刚体运动时,在刚体上任意画一直线,其方位始终保持不变,这种运动称为刚体的**平行移动**,简称**平移**。当平移刚体上点的轨迹为直线时称为**直线平移**,当平移刚体上点的轨迹为曲线时称为**曲线平移**。在直线轨道上行驶的车辆其车厢的运动(图 1-9(a)),公园里儿童荡浪木,浪木保持平行时的运动(图 1-9(b))都是这种运动的实例。



(a)

(b)

图 1-9 平移刚体实例

### 2. 定轴转动

当刚体运动时,若刚体内或在其延拓部分始终存在着一根不动的直线,则该刚体的运动称为**定轴转动**,这根不动的直线称为刚体的**转轴**,机器中的齿轮(图 1-10(a)),单摆中的摆杆 OA(图 1-10(b))均是此类运动的实例。

### 3. 平面运动

当刚体运动时,其上各点轨迹均为平面曲线,这些曲线所在平面相互平行(包括重合),则该刚体的运动称为**平面运动**。两端分别沿水平和铅垂轨道在铅垂面内运动的刚杆  $AB$  (图 1-11(a)),在直线轨道上滚动的车轮(图 1-11(b))均是这类运动的实例。

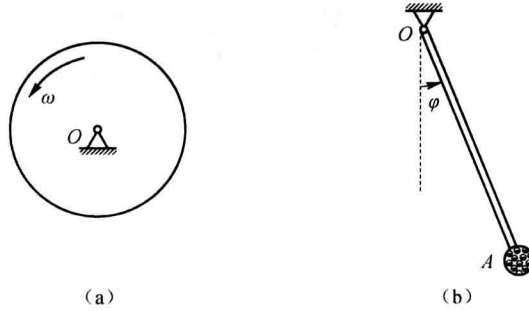


图 1-10 定轴转动刚体实例

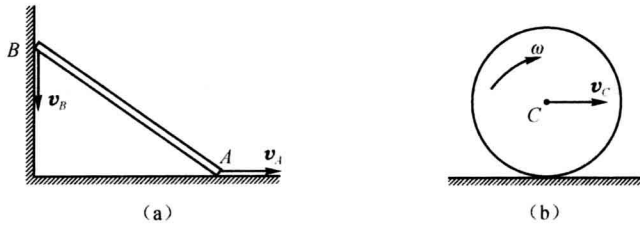


图 1-11 平面运动刚体实例

### 4. 定点运动

当刚体运动时,若刚体内或其延拓部分始终存在着一个且只有一个静止不动的点,则该刚体的运动称为**定点运动**。由于定点运动刚体上的点到固定点的距离始终保持不变,因此,其上任一点都在以固定点为中心,而以该点到固定点的距离为半径的球面上运动,也就是说,刚体的定点运动是三维的空间运动。陀螺运动(图 1-12(a)),研磨机的滚子(1-12(b))都是刚体定点运动的实例。

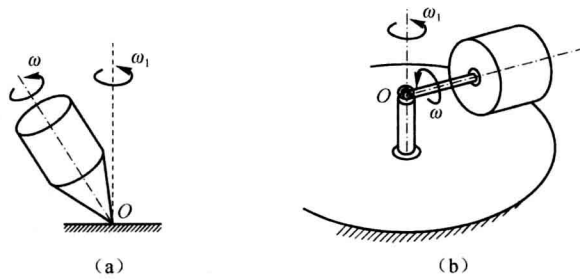


图 1-12 定点运动刚体实例

### 5. 一般运动

自由刚体的运动也称为刚体的**一般运动**,这时刚体的运动不受任何约束,空中的飞机(图 1-13(a)),海中的舰船(图 1-13(b))都是一般运动刚体的实例。

本书只研究刚体的前三种运动,重点是平面运动的刚体和刚体系。



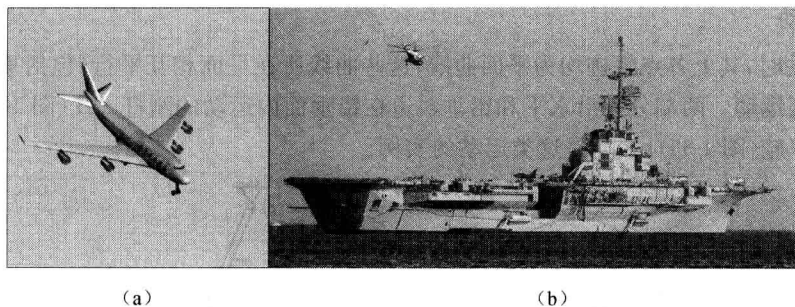


图 1-13 一般运动刚体实例

### 1.3 机构、广义坐标与自由度

机构是指用各种形式约束将各构件相互连接起来,能够实现某种预期运动的刚体系。在运动学中所谓分析运动就是分析机构中各构件的运动。工程中常利用机构来传递运动或改变运动的形式。先以人们熟悉的内燃机的曲柄—连杆—滑块(活塞)机构为例(图 1-14),活塞  $B$  为原动件,作平移运动;曲柄  $OA$  为从动件,作定轴转动;连杆  $AB$  作平面运动,通过它将活塞和曲柄连接起来。该机构将输入运动——平移转化为输出运动——定轴转动。再如图 1-15 所示的曲柄—连杆—摇杆机构,曲柄  $O_1A$  和摇杆  $O_2B$  均在一端受固定铰支座约束,而另一端均以光滑圆柱铰链与连杆  $AB$  相连,当曲柄  $O_1A$  绕轴  $O_1$  转动整周时,通过作平面运动的连杆  $AB$  带动摇杆  $O_2B$  绕轴  $O_2$  作往复摆动(只在小于  $360^\circ$  的某个范围内转动)。此机构又称四连杆机构( $O_1O_2$  可视为一固定不动的刚杆),它可以实现转动和摆动两种运动间的转换。

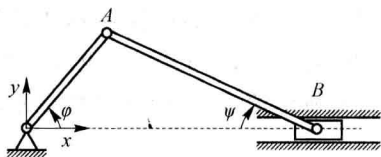


图 1-14 曲柄—连杆—滑块机构

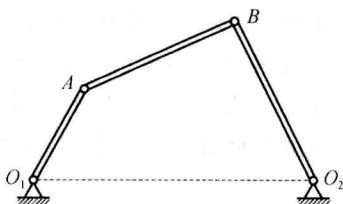


图 1-15 曲柄—连杆—摇杆机构(四连杆机构)

图 1-16 为一正(余)弦机构,曲柄  $OA$  的一端  $O$  受固定铰支座约束,另一端与置于 T 形杆铅垂滑槽中的滑块  $A$  以光滑圆柱铰链相连接,当曲柄转动整周时,通过铰链  $A$  带动滑块在 T 形杆的滑槽内滑动,并带动 T 形杆沿水平滑道作往复平移。由于 T 形杆的位移和曲柄与铅垂线夹角的正弦成比例(或和曲柄与水平线夹角的余弦成比例),因此,这种机构称为正(余)弦机构。它可以使一个构件的不停转动转换为另一构件的往复平移。图 1-17(a)为凸轮机构,当偏心轮(凸轮)绕固定铰支座转动时,通过其轮廓表面推动挺杆  $AB$  在铅垂滑道内往复平移,使与挺杆相固连的阀门时而开启、时而关闭。此机构多用于发动机配气机构,它也实现将一个构件的不停转动转换为另一构件的往复平移。图 1-17(b)为另一凸轮机构,当半圆凸轮沿水平轨道作平移时,通过其轮廓表面推动挺杆  $AB$  沿铅垂滑道作平移,实现了一构件的水平方向平移转换为另一构件的铅垂方向平移。图 1-18 为刨床机构,曲柄  $O_1A$  与摇杆  $O_2B$  的端部  $O_1$ 、 $O_2$  受固定铰支座约束,曲柄  $O_1A$  的另一端  $A$  与套在摇杆  $O_2B$  上的套筒  $A$  以光滑圆柱铰链相连接,连杆  $BC$  的两端分别与摇杆  $O_2B$  和沿水平滑道滑动的滑枕  $CDE$  以光滑圆柱铰链相连接,滑枕