

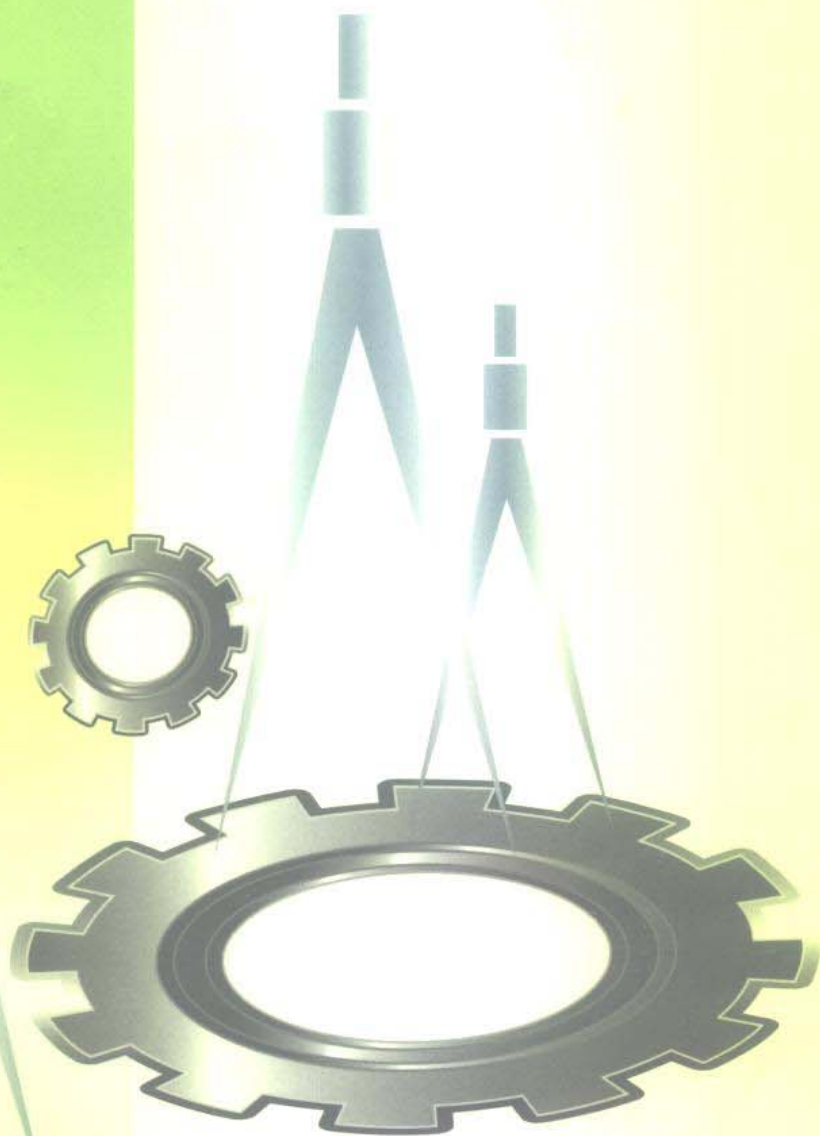
高等工科院校适用

机械设计基础

上册

胡德淦 主编

JIANXIAO SHIYONG



机械工业出版社

高等工科院校适用

机械设计基础

上册

主 编	胡德淦	
副主编	魏建芝	刘申全
参 编	刘志柱	徐起贺
	李宏德	孟 达
	马冬梅	
主 审	沈成武	



机械工业出版社

1253 30
本书是根据国家教委 1996 年审定的高等工程专科机械类专业机械基础系列课程的教学基本要求编写的。

全书分上、下两册。上册包括理论力学和材料力学的基本内容,结合机械设计又增加了机构的运动分析及转动副的摩擦等内容。全书共分四篇:第一篇静力学,包括静力学基础、平面力系平衡、摩擦、空间力系;第二篇运动学,包括点的运动、刚体的基本运动、点的合成运动、刚体的平面运动;第三篇动力学,包括质点运动微分方程、动量定理、动量矩定理、功能原理、达朗伯原理;第四篇材料力学,包括拉伸与压缩、剪切与挤压、扭转、弯曲、应力状态和强度理论简介,组合变形、动载荷及交变应力、压杆稳定,电测实验应力分析。

本书可作为高等工程专科学校机械类专业理论力学和材料力学课程的教材(推荐学时数为 120~140 学时)。也可供职大、函大相应专业教学使用,还可供从事机械设计的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

机械设计基础 上册/胡德淦主编. —北京:机械工业出版社, 1997. 7
高等工科院校适用
ISBN 7-111-05614-0

I. 机… II. 胡… III. 机械设计-高等学校-教材 IV. TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 06588 号

出版人:马九荣(北京市百万庄南街1号 邮政编码:100037)

责任编辑:冯 铤 版式设计:冉晓华 责任校对:张 佳

封面设计:姚 毅 责任印制:王国光

国防大学第一印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1997年8月第1版第1次印刷

787mm×1092mm 1/16·22.75印张·558千字

0 001—6 000册

定价:26.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页、由本社发行部调换

前 言

本书是根据1996年国家教委审定的高等学校工程专科机械类专业机械基础系列课程的教学基本要求,结合参编学校多年来教学改革的实践,并吸取兄弟院校教学改革的成功经验,在机械工业出版社教材编辑室的指导和支持下编写的,是配合高等学校工程专科教学改革的系列教材之一。

本书以突出专科教育特色、增强应用性和加强机械设计能力培养为指导,以必需、够用为原则,精选了原《理论力学》《材料力学》《机械原理》《机械零件》《公差与技术测量》等课程的部分教学内容,并对所选内容进行了适当编排,避免了课程之间部分内容的重复。全书分上、下两册。上册包括静力学、运动学、动力学及材料力学四篇;下册包括常用机构及其设计、通用零部件及其设计两篇。本书的内容和体系既体现了原学科各自的规律性,又进行了适量的交叉,以达到理论联系工程应用实际、学用结合的目的。为了加强计算机应用能力的培养,本书加大了解析法的比重。

本书在编写过程中采用了最新国家标准和法定计量单位。全书尽量做到思路清晰,文字简明,便于教学使用。

本书可作为高等学校工程专科机械类各专业的机械基础课教材(适应240~280学时),也可作为职工大学、职业大学、函授用教材及自学参考书,并可供从事有关专业工作的工程技术人员参考。

参加本书编写的有:上册 胡德淦(第2、6、7、22章),魏建芝(第11、12、13章),刘申全(第17章),刘志柱(第5、20、21章),徐起贺(第1、3、4章),李宏德(第16、19章),孟遑(第8、9、10章),马冬梅(第14、15、18章)。由胡德淦任主编,魏建芝、刘申全任副主编。下册 张莹(第5、9章),李铁成(第16、18章),曹学民(第6、7章),邢荣胜(第1、3章),邢鸿久(第2、17、19章),卫增芬(第4章),丁然(第8章),张月英(第10、11、13章),杨宗田(第12章),陆笑容(第14、15章)。由张莹任主编,李铁成、曹学民任副主编。

本书上册由武汉交通科技大学土木建筑工程系主任沈成武教授任主审,参加审稿的还有关伯陶、吴世昭、吕运冰三位副教授;下册由武汉交通科技大学邓昭铭教授任主审。他们对本书的内容和体系提出了许多宝贵的意见和建议,在此,对他们的辛勤劳动表示衷心的感谢。

高等工程专科学校的教学改革是一项长期而又艰巨的工作,目前仍处于探索阶段。如果本书的出版能对教学改革起一点作用,将是我们最大的欣慰。但由于我们水平有限,经验不足,编写时间又较短促,书中难免有不妥之处,恳请各兄弟院校的师生和读者批评指正。

编者

1996年11月

目 录

前言

绪论	1
第一节 本课程的研究对象和内容	1
第二节 本课程在教学计划中的地位与作用	2
第三节 机械设计的基本原则	2
第四节 机械设计的一般程序	4

第一篇 静 力 学

引言	5
第一章 静力学基础	5
第一节 静力学基本概念与公理	5
第二节 约束与约束反力	7
第三节 研究对象与受力图	9
习 题	12
第二章 平面力系的平衡	15
第一节 力的投影	15
第二节 力矩与平面力偶系	16
第三节 平面任意力系的简化	19
第四节 平面任意力系的平衡方程	21
第五节 物体系统的平衡	24
习 题	25
第三章 摩擦	29
第一节 滑动摩擦	29
第二节 摩擦角与自锁	30
第三节 转动副中的摩擦	32
第四节 考虑摩擦时物体的平衡问题	34
第五节 滚动摩擦简介	38
习 题	39
第四章 空间力系	42
第一节 力在空间坐标轴上的投影	42
第二节 力对轴的矩	43
第三节 力对点的矩	44
第四节 空间力系的平衡方程	46
第五节 物体重心及求法	51
习 题	55

第二篇 运 动 学

引言	58
第五章 点的运动	58
第一节 点的运动、速度、加速度的 矢量表示法	58
第二节 点的运动、速度、加速度的 直角坐标法	60
第三节 点的运动、速度、加速度的 自然法	65
习 题	69
第六章 刚体的基本运动	71
第一节 刚体的平行移动	71
第二节 刚体的定轴转动	72
第三节 转动刚体上各点的速度 和加速度	74
习 题	76
第七章 点的合成运动	78
第一节 点的合成运动的概念	78
第二节 点的速度合成定理	79
第三节 牵连运动为平动时点的 加速度合成定理	81
第四节 牵连运动为转动时点的 加速度合成定理	83
习 题	85
第八章 刚体的平面运动	88
第一节 刚体平面运动的简化及平面 运动方程	88
第二节 用基点法求平面图形上各点 的速度	89
第三节 用速度瞬心法求平面图形上 各点的速度	91
第四节 用基点法求平面图形上各点 的加速度	95
第五节 平面机构的运动分析	97
习 题	103

第三篇 动力学

引言	108
第九章 质点运动微分方程	108
第一节 动力学基本定律	108
第二节 质点运动微分方程	109
习 题	112
第十章 动量定理 质心运动定理	114
第一节 动量定理	114
第二节 质心运动定理	117
习 题	119
第十一章 动量矩定理 转动惯量	122
第一节 动量矩定理	122
第二节 刚体绕定轴转动微分方程	127
第三节 转动惯量	129
习 题	133
第十二章 功能原理	137
第一节 力的功	137
第二节 动能定理	142
第三节 功率 功率方程 机械效率	150
第四节 势力场 势能	151
习 题	155
第十三章 达朗伯原理	160
第一节 惯性力和质点的达朗伯原理	160
第二节 质点系的达朗伯原理	163
第三节 刚体平面运动微分方程	167
习 题	169

第四篇 材料力学

引言	172
第十四章 拉伸与压缩	174
第一节 拉(压)杆的内力 轴力图	174
第二节 拉(压)杆横截面上的应力 斜截面上的应力	176
第三节 拉(压)杆变形 虎克定律	178
第四节 材料拉伸、压缩时的力学性能	181
第五节 拉(压)杆的强度计算	184
第六节 拉(压)静不定问题	187
第七节 拉(压)变形能	191
第八节 应力集中	192
习 题	193

第十五章 剪切和挤压	197
第一节 剪切的概念 剪切实用计算	197
第二节 挤压的概念 挤压实用计算	199
第三节 切应力互等定律 剪切虎克定律	201
习 题	203
第十六章 扭转	205
第一节 扭转的概念 外力偶矩与功率、转速的关系	205
第二节 扭矩与扭矩图	206
第三节 扭转时的应力与变形	207
第四节 极惯性矩和抗扭截面系数	210
第五节 圆轴扭转时的强度和刚度计算	212
第六节 提高圆轴扭转强度和刚度的措施	216
第七节 圆轴扭转时的变形能	217
习 题	217
第十七章 弯曲	220
第一节 平面弯曲概念	220
第二节 梁的计算简图及分类	221
第三节 剪力和弯矩 剪力图和弯矩图	222
第四节 弯矩、剪力与分布载荷集度之间的微分关系	228
第五节 纯弯曲梁横截面上的正应力	232
第六节 截面惯性矩 平行移轴公式	236
第七节 梁的切应力	238
第八节 梁弯曲时的强度计算	240
第九节 梁弯曲时的挠度和转角	244
第十节 梁弯曲挠曲线的近似微分方程及其积分	245
第十一节 用叠加法求梁的挠度和转角	249
第十二节 梁的刚度计算	255
第十三节 用变形比较法解简单静不定梁	256
第十四节 提高梁强度和刚度的措施	259
第十五节 弯曲变形能	263
习 题	264
第十八章 应力状态和强度理论	
简介	275
第一节 应力状态概念	275
第二节 二向应力状态下的应力分析——解析法、图解法	276

第三节 主应力和主平面	279	习 题	312
第四节 三向应力状态简介 广义 虎克定律	282	第二十一章 压杆稳定	314
第五节 强度理论概述	284	第一节 压杆稳定的基本概念	314
第六节 四个强度理论简介	285	第二节 压杆临界载荷的确定 欧拉 临界力	315
习 题	288	第三节 支承对临界力的影响	316
第十九章 组合变形	290	第四节 临界应力与柔度	318
第一节 拉(压)弯组合变形的强度 计算	291	第五节 压杆稳定安全校核	322
第二节 偏心拉(压)的强度计算	293	第六节 提高压杆承载能力的措施	325
第三节 弯扭组合变形的强度计算	295	习 题	326
习 题	299	第二十二章 电测实验应力分析	328
第二十章 动载荷和交变应力	301	第一节 电测法基本原理	328
第一节 动载荷概念及惯性力问题	301	第二节 电桥接法及应力测定	330
第二节 构件受冲击时的应力计算	302	第三节 二向应力状态下主方向未知时主 应力的测定	332
第三节 交变应力的概念 材料的 持久极限	306	习 题	335
第四节 构件的持久极限 疲劳 强度计算	310	附录 型钢规格表	336
		附录 习题答案	345
		参考文献	358

绪 论

第一节 本课程的研究对象和内容

机械是人类进行生产和生活的主要劳动工具。在现代社会,人们运用各种类型的机械,以改善劳动条件,提高劳动生产率和产品质量。同时,随着经济的发展,人们也运用越来越多的机械,以提高自身的生活质量。可以说,国民经济各部门及人类自身生活中使用机械的程度,是整个社会发展水平的重要标志之一。

本课程的研究对象是常见通用机械、常用机构和通用零件;研究的内容是它们的工作原理、结构特点、设计的基本理论和计算方法。

机械是机器和机构的统称。

各种类型的机器,尽管它们的用途、结构和性能不相同,但都有如下三个共同的特征:

- (1) 它们都是人为的实物组合;
- (2) 它们各部分之间具有确定的相对运动;
- (3) 在工作时能代替或减轻人类的劳动,或完成有用的机械功,或转换机械能。

作为机构,只具备机器的前两个特征,而不能完成有用的机械功或转换机械能。

图 0-1 所示的内燃机即为常见通用机械之一,它由气缸体(连同机架)、活塞、连杆、曲轴、齿轮、凸轮、进气阀推杆和排气阀推杆等组成。燃烧的气体膨胀时推动活塞,通过连杆推动曲轴转动。转动的曲轴通过齿轮带动凸轮轴控制进气与排气,同时输出机械能。内燃机工作时能将燃气的热能转变为曲轴旋转的机械能,因此,它是一台典型的机器。

能够将其它形式的能量转换为机械能的机器称为原动机,如电动机、内燃机、涡轮机等。能够利用机械能来完成有用功,或者能将机械能转变为其它形式能量的机器统称为工作机,如金属切削机床、起重机械,空气压缩机等。

在图 0-1 所示的内燃机中,为了将热能转换为机械能,必须依靠各个最基本的组合体的协调动作。这些最基本的组合体称为机构。图中凸轮 4,进气阀 2 的推杆与气缸体 1 组成一凸轮机构;凸轮 5、排气阀 3 的推杆与气缸体 1 也组成一凸轮机构;活塞 11(称为滑块)、连杆 10、曲轴 8(称为曲柄)与气缸体 1 组

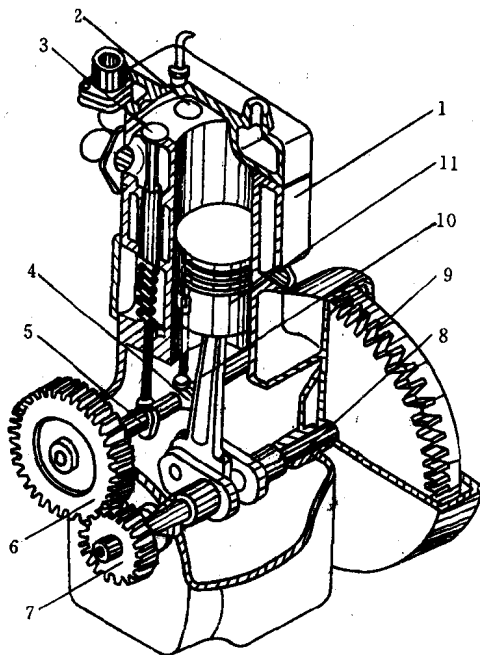


图 0-1 内燃机

- 1—气缸体 2—进气阀 3—排气
4、5—凸轮 6、7、9—齿轮
8—曲轴 10—连杆 11—活塞

成曲柄滑块机构；齿轮 7、6 和气缸体 1 组成齿轮机构。

机构是由各个具有确定相对运动的运动单元所组成的。这些运动单元称为构件。构件可以是单一的零件，也可以是几个零件组成的刚性整体。例如齿轮、轴和键这三个零件可联接成一个构件。构件和零件的区别是，构件是运动的单元，而零件是制造的单元。在各种机械设备中都会用到的零件，称为通用零件，如螺栓、键、轴承、齿轮等。只是在某些机械设备中用到的零件，称为专用零件，如活塞、曲轴等。

本课程研究的具体内容为：

- (1) 物体机械运动的一般规律及机构的结构、运动和受力分析等方面的基础知识；
- (2) 构件的承载能力及零件设计的计算基础；
- (3) 通用零件部件的工作原理、选用原则及设计方法；
- (4) 常用机构的结构特点、运动特点、设计方法，以及机械系统运动方案的设计。

第二节 本课程在教学计划中的地位与作用

“机械设计基础”所研究的是机械设计中共性的问题，特殊性问题由有关专业课程来研究。

本课程是一门理论与实践相结合，在工程实践中有着广泛应用的技术基础课程。

通过本课程的学习，学生应达到下列基本要求：

- (1) 掌握机械运动的基本规律和研究方法，掌握常用平面机构的结构设计、运动分析和动力分析的基本方法。
- (2) 树立构件强度、刚度和稳定性的基本概念，并能进行熟练计算，掌握通用机械零件的设计方法。了解机械设计的一般步骤与过程，具有运用国家有关标准、规范、手册、图册和查阅有关技术资料及设计简单机械的能力。
- (3) 得到有关实验技能的基本训练。

第三节 机械设计的基本原则

机械设计是根据对机械产品提出的任务，应用当代各种先进的技术成果，求得一个在技术上尽可能完善、经济上合算、外观上满足美学要求的结果，该结果能集中反映先进生产力在研制机械产品的方案和生产过程中的作用。为了设计出技术性能指标高、经济效果好、造型美观大方的机械产品，机械设计应遵循的基本原则（机器应满足的要求）如下：

一、功能性（具有预定功能的要求）

机械产品必须完成规定的功能，并保持功能参数在限定的范围内。如起重机必须能够吊起规定的重量；汽车要有功率、载重量、最高速度、百公里耗油量、大修行驶里程等参数。

二、可靠性

可靠性是保证机器正常运转的关键。可靠性的定量尺度是可靠度，它是指机器在规定的条件下和规定时间内无故障地完成规定功能的概率。

设有 N_T 个零件在预定的时间 t 内有 N_f 个零件不能正常工作，剩下 N_s 个零件仍继续工作，则可靠度 R 为

$$R = N_s / N_T$$

不可靠度为:

$$F = N_f / N_T$$

显然, 因为 $N_T = N_f + N_s$, 所以 $R + F = 1$ 。机器都是由零件所组成的系统。系统的可靠度取决于其组成零件的可靠度, 所以要精心设计零件, 确保其可靠性。

三、使用和维修性

设计机器必须注意人机关系, 应力求操作安全舒适, 反应灵敏, 效率高。

1. 极力保证技术安全

安全系指人身安全和机器本身的安全。在设计机械时, 各种各样的防护装置及措施就成为机器不可缺少的组成部分。

2. 力争减少操作人员的体力及脑力消耗

操控零部件的外形要简单, 易于辨认, 重量轻, 动作要灵活; 尽量减少操控手柄的数目, 且手柄、仪表和信号装置布局要合理, 必要时可采用各种可靠的联锁装置等。

3. 努力改善操作者所处的环境

噪声、废水、废气, 粉尘等是影响环境的主要因素。在设计机械时, 应按国家有关环保规定, 采取措施, 加以控制或消除。

4. 易于维修

设计的机器必须便于管理、维护和修理。

四、标准化、系列化和通用化

所谓标准, 就是由一定的权威组织对经济、技术和科学中重复出现的技术语言和技术事项, 以及产品的品种、质量、度量及生产方法等方面, 规定出来的统一技术准则。它是各方面必须共同遵守的技术依据。标准化就是制定标准和使用标准。标准分为国家标准 (GB)、部颁标准 (专业标准)、企业标准等三级。我国已是国际标准化组织成员。国际标准 (ISO) 适合于国际间科学技术的合作及贸易往来。

与标准化密切相关的是零、部件的通用化。通用化是最大限度地减少和合并产品的型式、尺寸及材料品种等, 使零、部件尽量在不同规格的同类产品甚至不同类产品上通用互换。通用化是广义的标准化。

系列化是指将产品尺寸和结构按大小分档, 按一定规律优化成系列。工程上系列化数值是采用几何级数作为优先数列的基础, 目的是用较少的品种规格满足国民经济的广泛需要。

五、经济性

经济性是机械产品的一个综合性指标, 它体现在设计、制造、使用的全过程中。据统计, 大约有 75%~80% 的生产费用将在设计阶段确定下来, 所以设计是实现经济效益的关键环节。设计及制造的经济性表现为设计制造成本的降低。使用经济性表现为高效率、低消耗 (能源及材料), 以及较低的管理和维护费用等。

六、其它特殊性能要求

有些机器还各自具有其特殊要求。例如, 航空发动机要求在最轻重量条件下具有最大推力 (或输出功率); 机床有长期保持精度的要求; 流动使用的机械有便于安装, 拆卸和运输的性能要求; 食品、纺织、造纸机械有不得污染产品的要求等。

第四节 机械设计的一般程序

机械设计是研制新产品的重要环节。机械产品设计有三种类型：①开发性设计，即按需求进行的全新设计；②适应性设计，即设计原理、方案不变，只对结构和零部件重新设计；③参变数设计，即仅改变部分结构尺寸而形成系列产品。机械设计的一般程序如下：

一、设计任务的研究和制订

根据社会、市场、用户的需要和使用要求，确定机器的功能范围和工作指标，明确设计需要解决的课题和项目；研究实现的可能性；编制出完整的设计任务书及明细表。任务书中必须明确规定机器的用途、主要性能参数范围、工作环境条件、有关特殊要求、生产批量、预期成本范围、设计完成期限，以及承制单位生产条件等。

二、方案设计（初步设计）

工作原理是机器实现预期功能的基本依据。方案设计就是在分析设计任务和要求的前提下，确定机器的工作原理和技术要求，拟定机器的总体布置、传动方案和机构运动简图等。

在方案设计阶段中，往往要进行多种方案的全面分析对比和技术经济评价，从中选定最佳设计方案，按比例画出初步设计总图。

三、总体设计（技术设计）

根据选定的最佳设计方案，进行机构和传动的总体布置；确定制造方法和选用材料的种类；对零部件进行初步设计。同时，还要进行机器运动学和动力学分析计算，零部件工作能力的计算，必要的模型试验和测试，并对总体结构设计进行技术经济评价，找出薄弱环节并采取措施加以消除，最后画出总体设计图（装配草图）。

四、工作图设计和编写技术文件（施工设计）

根据确定的总体设计，充分考虑零部件的工作能力，特别是从结构工艺性出发，将零部件的全部尺寸和形状、装配关系和安装尺寸完全确定下来，并绘出各种工作图（零件图、装配图、总体图等），编写出各种技术文件和说明书，为生产提供必备的条件。

整个设计过程的各个阶段是互相紧密联系的，也是一个不断反复、不断完善、逐渐接近最优结果的过程。

随着科学技术的迅猛发展，新材料、新工艺、新技术、新能源、新结构的不断涌现，特别是电子计算机的应用和计算数学的完善，近年来机械设计有了许多新的发展。可以预见，由于广泛应用新的理论和技术，采用新的设计方法（如计算机辅助设计等），人类将设计出越来越多具有高效率、高自动化程度，机械—电子—信息一体化的高科技机械产品而造福于人类。

第一篇 静 力 学

引 言

在日常生活和工程实践中，最常见的一种运动就是机械运动。所谓机械运动，是指物体在空间的相对位置随时间发生改变的现象。它是自然界中最普遍、最基本的运动形式。机械运动中还包括一种特殊的形式，即平衡。所谓平衡，是指物体相对于地面处于静止或匀速直线运动的状态。静力学研究物体在力系作用下平衡的普遍规律，其主要内容有：物体的受力分析，力系的简化，以及物体在力系作用下处于平衡的条件。静力学在工程实际中有着广泛的应用。工程中有许多机器的零件和构件，如机器的传动轴、机架、机床的主轴、起重机的起重臂等，它们在工作时处于平衡状态或可近似地看作处于平衡状态。为了合理地设计这些零件和构件的形状、尺寸，选用恰当的材料，往往需要对它们进行强度、刚度和稳定性的分析计算，这些问题的分析和解决，都是以静力学的基本知识作为基础的。

第一章 静力学基础

第一节 静力学基本概念与公理

一、静力学基本概念

(一) 力的概念

人们通过长期的生产实践和科学实验，建立了力的概念。力是物体间的相互机械作用，这种作用使物体的运动状态和形状发生改变。例如用手推小车，由于手对小车的作用使它由静止开始运动；用弹簧提重物，由于重物对弹簧的作用使弹簧发生变形。

力使物体运动状态发生改变的效应称为力的外效应，力使物体产生变形的效应称为力的内效应。

力对物体的作用效果取决于力的三个要素：力的大小；力的方向；力的作用点。若受力的区域很小，不影响问题的研究，可认为力作用于一个几何点。

力是矢量，可用一有向线段 $\overrightarrow{AB}$ 来表示，如图 1-1 所示。线段 $\overrightarrow{AB}$ 的长按选定的比例表示力的大小，线段的方向与箭头指向表示力的方向，作用点可用线段的起点或者终点表示。一般用黑体字母 $\mathbf{F}$ 表示力矢量，而以普通字母 F 表示这矢量的模（即大小）。

在国际单位制中，力的单位为 N，在工程单位制中，

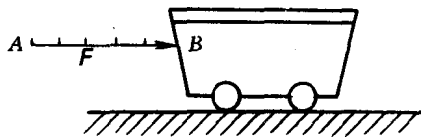


图 1-1 用有向线段表示力

力的单位为 kgf，其换算关系为

$$1\text{kgf} \approx 9.8\text{N}$$

(二) 刚体的概念

刚体是指在力的作用下保持其形状和大小不变的物体。或者说，在力的作用下其内部任意两点之间的距离保持不变的物体。实际物体受力后总会产生程度不同的变形。如果某物体受力后变形很小，又不影响研究问题的实质，那么就可以忽略变形，把它看作为刚体。可见，刚体实际上并不存在，它只是经过抽象并理想化的力学模型。这种科学的抽象抓住了问题的本质，是合理的、必要的。反过来，当所研究的问题不考虑变形便无法解，也就是当变形成为关键因素时，就不能将物体看作为刚体。

(三) 平衡力系与等效力系

作用于物体上的一组力称为力系。若物体在某力系的作用下处于平衡，这个力系就称为平衡力系。作用于同一物体上的两个力系，若产生的外效应完全相同，则这两个力系就互为等效力系。将一个复杂的力系化为一个与之等效的简单力系，称为力系的简化。

二、静力学公理

静力学公理是在研究力系的平衡和简化中总结出来的最基本的力学规律。这些规律的正确性已为实践反复证明，是符合客观实际的普遍规律。

公理一 二力平衡公理

作用在刚体上的两个力，使刚体处于平衡的充分与必要条件是这两个力等值、反向、共线，如图 1-2 所示。

对于变形体，这个条件不是充分的，但它是必要的。如柔绳受两个等值反向的压力作用就不能平衡。

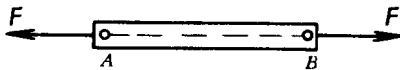


图 1-2 二力平衡

在两个力作用下处于平衡的物体称为二力体。这种物体多属杆件，也称二力杆。由公理一可知，作用在二力体上的两个力，它们的作用线必通过两力作用点的连线（与杆件形状无关），且等值反向。如图 1-3 所示。

公理二 加减平衡力系公理

在作用于刚体的任意一个力系上，加上或减去任意个平衡力系，并不改变原力系对刚体的效应。此公理对研究力系的简化很重要。它不适用于变形体，因为加减平衡力系会影响到物体的变形。

推论 力的可传性原理

作用在刚体上某点的力，可沿其作用线任意移动作用点而不改变该力对刚体的效应。如图 1-4 所示，作用于车上 A 点的推力 F 可沿其作用线移到 B 点，虽然推力变为拉力，但小车的运动不会改变，即效果相同。因此，作用于刚体上的力的三要素是力的大小、方向和作用线的位置。可见，作用于刚体上的力是滑动矢量。



图 1-3 二力杆

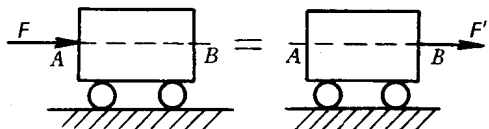


图 1-4 力的可传性

公理三 力的平行四边形法则

作用于物体上同一点的两个力可以合成为一个合力，合力也作用于该点，其大小和方向由以两分力为邻边所构成的平行四边形的对角线表示，如图 1-5 所示。或者说，合力矢等于这两个分力矢的矢量和，即

$$\mathbf{F}_R = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2$$

在求两共点力的合力时，为了作图方便，只需画出平行四边形的一半，即三角形便可。其方法是自点 O 先画出一力矢 $\mathbf{F}_1$ ，然后再由 $\mathbf{F}_1$ 的终端画一力矢 $\mathbf{F}_2$ ，最后由 O 点至力 $\mathbf{F}_2$ 的终端，作一矢量 $\mathbf{F}_R$ ，它就是 $\mathbf{F}_1$ 、 $\mathbf{F}_2$ 的合力。这种作图法称为力的三角形法则。改变 $\mathbf{F}_1$ 、 $\mathbf{F}_2$ 的顺序，其结果不变。如图 1-6 所示。

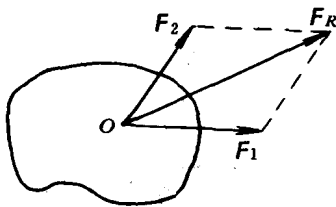
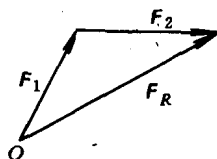
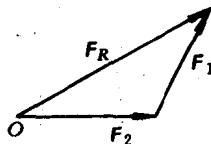


图 1-5 力的合成



a)



b)

图 1-6 力的三角形

推论 三力平衡汇交定理

当刚体受三个力作用（其中两个力的作用线相交于一点）而处于平衡时，则此三力必在同一平面内，并且它们的作用线必汇交于一点。如图 1-7 所示。

公理四 作用和反作用定律

两个物体间相互作用的一对力，总是大小相等，方向相反，作用线相同，同时并分别作用于这两个物体上。这两个力互为作用力和反作用力。借助于这个定律，可以从机器中一个零件的受力分析过渡到另一个零件的受力分析。应当注意该定律与二力平衡公理之间的区别。

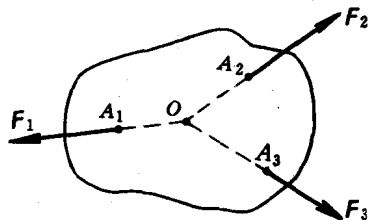


图 1-7 三力平衡汇交

第二节 约束与约束反力

在空间可以自由运动而获得任意位移的物体称为自由体，如飞机、火箭等。而位移受到限制，在某些方向不能自由运动的物体，称为非自由体。对非自由体的某些运动起限制作用的周围物体称为约束。如机车为非自由体，铁轨为约束，机车只能在轨道上运动；转轴也是非自由体，轴承为约束，故转轴只能绕轴线转动等。

当物体沿着约束所限定的方向运动或有运动趋势时，约束对物体必产生一作用力。通常将约束作用于非自由体上的力称为约束反力。约束反力的方向总是与约束所能限制的运动方向相反。而将能主动引起物体运动或使物体有运动趋势的力称为主动力。在静力学中，约束反力和物体所受的主动力组成平衡力系，因此可用平衡条件求出约束反力。下面介绍工程中

常见的几种基本约束类型和确定约束反力的方法。

一、柔索约束

工程中常见的钢丝绳、带、链条等都可以简化为柔索。柔软绳索对物体的约束反力作用在连结点，它只能是拉力。当物体受到柔索的约束时，柔索只能限制物体上与柔索连接的一点沿着柔索方向离开柔索。因此，柔索的约束反力总是沿着柔索而背离所系的物体，如图 1-8 所示。

二、光滑接触面约束

若物体接触面之间的摩擦力很小，可以略去不计时，则认为接触面是光滑的。光滑接触面约束只能限制物体沿接触表面法线并向约束内部的运动，而不能限制沿接触表面切线的运动。因此，光滑接触面对物体的约束反力作用在接触点处，方向沿接触面的公法线，并指向受力物体。通常这种约束反力称为法向反力，如图 1-9 中 F_R 、 F_{RA} 、 F_{RB} 、 F_{RC} 所示。

三、光滑圆柱铰链约束

两个开有同样大小圆孔的零件用一直径略小于孔径的销钉连接起来，便构成了圆柱铰链约束，如图 1-10 所示。其中 c 图为其简图。这种约束只能限制被铰接物体在连接处不能分开，但它们可以绕销钉轴转动。不计摩擦，铰链中圆柱销钉与圆孔之间可看作光滑接触，而接触点可能为圆周上任一点。因此约束反力 F_R 通过圆柱铰链中心。由于 F_R 的大小和方向都不能预先确定，一般可将其分解为互相垂直的两个分力 F_{Rx} 和 F_{Ry} ，如图 1-11 所示。

若构成圆柱铰链约束中的一个零件固定不动，则称此铰链为固定铰链支座，其约束反力仍用两个正交的分力来表示，如图 1-12 所示。

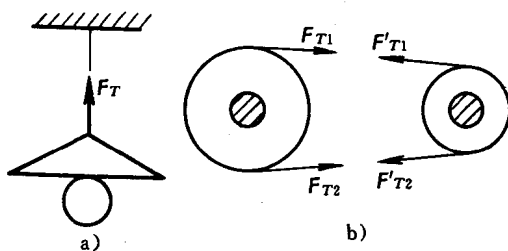


图 1-8 柔索约束

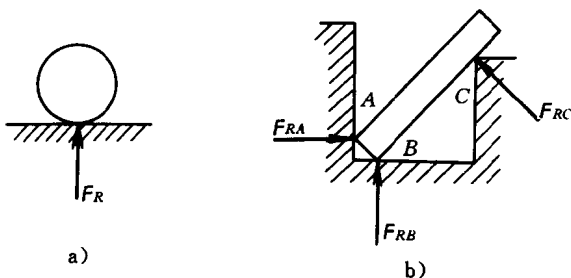


图 1-9 光滑接触面

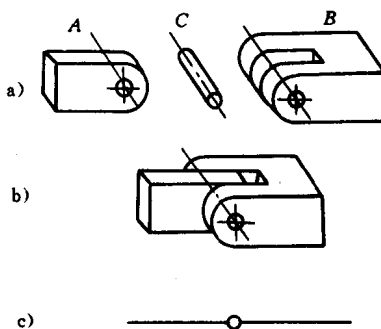


图 1-10 光滑圆柱铰链

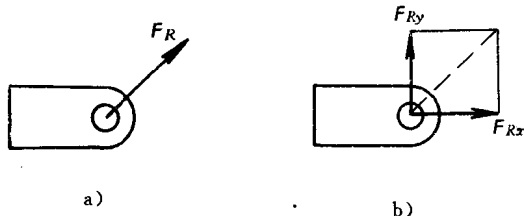


图 1-11 圆柱铰链约束反力

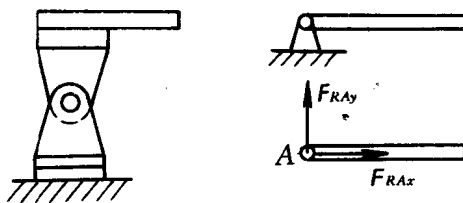


图 1-12 固定铰链支座约束反力

若将构成圆柱铰链约束中的一个零件放在一个光滑接触面上,就构成了活动铰链支座,如图 1-13 所示。这种支座的性质和光滑接触面相同,其约束反力通过铰链中心并沿光滑接触面的法线。

当转轴的轴颈由向心滑动轴承所支承时(见图 1-14),若略去摩擦,则轴颈和轴承以两个光滑圆柱面相接触,在受力分析上与光滑圆柱销钉连接是相同的。向心滑动轴承的约束反力 F_R 的作用线在垂直于轴线的对称平面内,其方向不能预先确定,故可用两个正交分力 F_{Rx} 、 F_{Ry} 表示。若轴颈为向心滚动轴承所支承时,其约束反力与向心滑动轴承的一样。

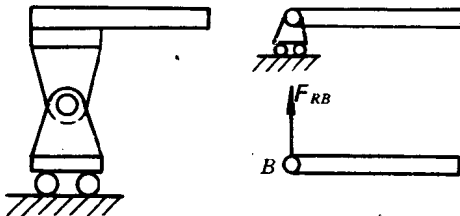


图 1-13 可动铰链支座约束反力

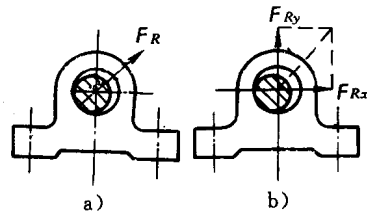


图 1-14 向心滑动轴承

四、光滑球铰链

球铰链是固连于物体的球嵌入另一物体的球窝内而构成的一种约束,如图 1-15 所示。这种铰链在空间结构中用途较广。在不计摩擦的情况下,构成铰链的两个物体之间为光滑球面接触,物体只能绕球心相对转动,因而约束反力必通过球心且垂直于球面(即沿半径方向)。由于预先不能确定接触点的位置,故约束反力在空间的方位不能确定,一般以三个正交分力来表示。

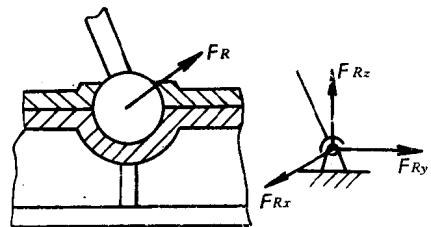


图 1-15 光滑球铰链

除了以上几种常见的约束外,还有其它类型的约束,将在后面适当的章节中再作介绍。

第三节 研究对象与受力图

在研究静力平衡时,首先要搞清两个问题:(1)哪一个物体是需要研究的对象,即确定研究对象;(2)研究对象上受到哪些力的作用,即受力分析。由于研究对象往往是非自由体,因而必须设法把研究对象所受到的约束予以解除,即把所要研究的物体从周围物体中分离出来,并单独画出。这种被分离出来的物体称为分离体。然后用约束反力代替约束对分离体的作用,并画出其上所有的主动力。这种包括分离体所受的全部作用力(包括约束反力和主动力)的图称为受力图。

有时在分析问题中需要以若干物体组成的系统为研究对象。系统内各物体间的相互作用力称为内力;系统外的物体作用于该系统中各物体的力称为外力。内力和外力不是绝对的,随着研究范围的改变,内力和外力是可以相互转化的。然而一旦确定了研究对象,内力和外力的划分也就完全明确了。由于内力在系统内成对出现,作用相互抵消,所以在画物体系统的受力图时只画外力而不画内力。

在应用静力平衡条件求解约束反力时，正确地确定研究对象，进行受力和作出完整的受力图，是解决问题的关键。下面举例说明。

例 1-1 重为 W 的均质圆柱 O ，由杆 AB 、绳索 BC 与墙壁来支持，如图 1-16 所示。各处摩擦及杆重不计，试分别画出圆柱 O 和杆 AB 的受力图。

解 (1) 以圆柱为研究对象，画出分离体图。先画主动力 W 。由于 D 、 E 处为光滑面约束，故可画出杆对圆柱的约束反力 F_{ND} 及墙对圆柱的约束反力 F_{NE} 。其受力如图 1-16b 所示。

(2) 以 AB 杆为研究对象，画出分离体图。 A 处为固定铰支座约束，画上约束反力 F_{RAx} 、 F_{RAy} ； B 处受绳索约束，画上拉力 F_{TB} ； D 处为光滑面约束，画上法向反力 F'_{ND} ，它与 F_{ND} 是作用与反作用的关系。其受力如图 1-16c 所示。注意， A 处的约束反力 F_{RA} 也可由三力平衡汇交定理画出。

例 1-2 图 1-17 所示的结构 由杆 AC 、 CD 与滑轮 B 铰接组成。物重 W 用绳子挂在滑轮上。如杆、滑轮及绳子的自重不计，并忽略各处的摩擦，试分别画出滑轮 B 及绳索、杆 AC 、 CD 及整体的受力图。

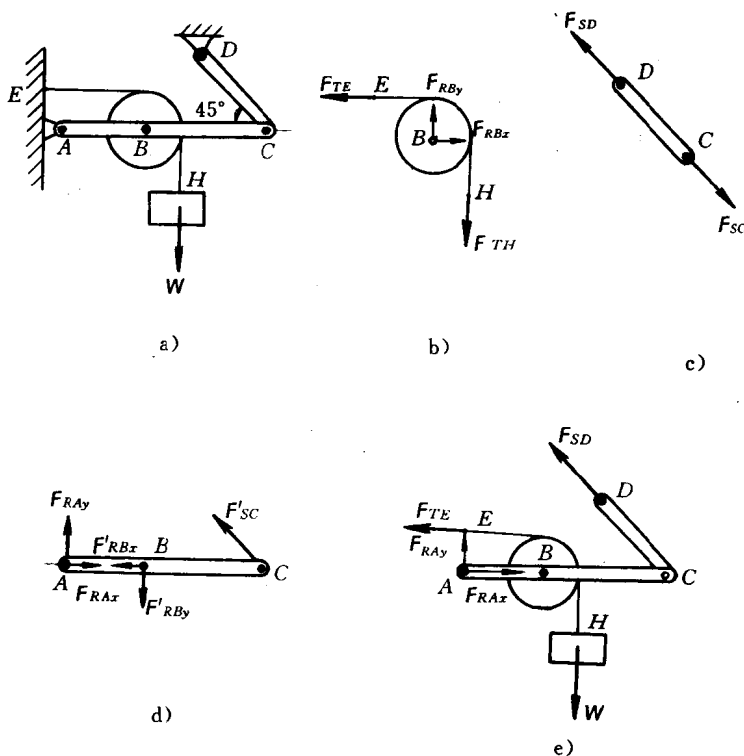


图 1-17 滑轮及杆件的受力图