



全国高等职业教育示范专业规划教材

机械设计与制造专业

机械设计基础 (含工程力学)

李国斌 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书是根据教育部制定的“高职高专教育机械设计基础课程教学基本要求”和高等职业教育教学改革的要求编写而成的。

本书共分为 18 章,包括静力学、拉伸和压缩、剪切、挤压和扭转、弯曲、组合变形的强度计算、平面机构运动简图与自由度、平面连杆机构、凸轮机构、间歇运动机构、联接、带传动和链传动、齿轮传动、蜗杆传动、轮系、轴、轴承、其他常用零部件、机械的平衡与调速。

本书可作为高等职业技术学院、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院机械、机电及近机类专业的教学用书,也可供相关专业工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

机械设计基础:含工程力学/李国斌主编. —北京:机械工业出版社, 2009. 11

全国高等职业教育示范专业规划教材·机械设计与制造专业
ISBN 978-7-111-28897-8

I. 机… II. 李… III. ①机械设计—高等学校:技术学校—教材②工程力学—高等学校:技术学校—教材 IV. TH122 TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 196300 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
策划编辑:王海峰 责任编辑:王丽滨 版式设计:霍永明
封面设计:鞠杨 责任校对:张媛 责任印制:乔宇
北京机工印刷厂印刷 (兴文装订厂装订)

2010 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 17.25 印张 · 424 千字

0 001—4 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-28897-8

定价: 29.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010) 68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010) 88379649

读者服务部: (010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书突出高职高专“以应用为目的”，“以能力为本位”的教育理念，体现“以必需、够用为度”的原则。

本书的特点是：突出应用、简化推导，体现高职高专教育的特点；简洁精炼，难易适度；精选内容，融会贯通，方便学习和应用，并适当考虑知识的连续性和学生今后继续学习的需要。根据当前高职高专工程力学与机械设计基础两门课程的教学改革需要，将理论力学、材料力学、机械原理以及机械零件四个部分的内容有机地整合在一起。

本书共分18章，包括静力学、拉伸和压缩、剪切、挤压和扭转、弯曲、组合变形的强度计算、平面机构的运动简图与自由度、平面连杆机构、凸轮机构、间歇运动机构、联接、带传动和链传动、齿轮传动、蜗杆传动、轮系、轴、轴承、其他常用零部件、机械的平衡与调速。

书中配有一定数量的例题和较多的练习题，并附有答案，便于学生课后复习使用，也便于教师根据教学需要安排，以帮助读者巩固相关的知识。本书参考学时数为100~120学时。

本书可作为高等职业技术学院、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院等机械、机电及近机类专业的教学用书，也可供相关专业工程技术人员参考。

参加本书编写的有：李国斌（绪论、第3、6~8、12、14、15、18章，第1章的1.11.4节，第11章的11.3.5~11.3.6节），蒋昊（第10、13章）、王春艳（第2、5、16章），马文元（第1章），乐伟程（第4章），赵江平（第11章）、刘庆伦（第9章）、冯嫦（第17章）。

本书由李国斌任主编并统稿，王春艳、蒋昊、马文元任副主编。

在本书的编写过程中，得到了广州番禺职业技术学院、广州科技贸易职业学院、深圳市技工学校、中山火炬职业技术学院、茂名职业技术学院等单位领导和同事的大力支持，在此一并表示衷心的感谢。

限于编者水平，书中错误和不妥之处在所难免，殷切希望使用本书的广大教师和读者批评指正。

编 者

目 录

前言	
绪论	1
0.1 机器的组成及特征	1
0.2 本课程的学习内容和任务	2
0.3 本课程的学习方法	2
0.4 机械设计的基本要求和一般过程	3
0.5 机械零件的失效形式和设计准则	5
0.6 机械零件的工艺性及标准化	5
习题	6
第1章 静力学	7
1.1 静力学的基本概念	7
1.2 力的基本性质	7
1.3 工程中常见的约束	8
1.4 平面汇交力系合力与平衡：几何法	11
1.5 力的分解和力的投影	12
1.6 平面汇交力系合力与平衡：解析法	13
1.7 平面力偶系	13
1.8 平面一般力系的简化	17
1.9 平面任意力系的平衡方程及应用	19
1.10 摩擦	21
1.11 空间力系简介	24
习题1	30
第2章 拉伸和压缩	34
2.1 概述	34
2.2 轴向拉伸（压缩）杆件、横截面上的内力——轴力、轴力图	34
2.3 拉（压）杆的应力	36
2.4 拉（压）杆的变形、胡克定律	38
2.5 材料在拉伸和压缩时的力学性能	39
2.6 拉（压）杆的强度条件及其应用	42
习题2	44
第3章 剪切、挤压和扭转	45
3.1 剪切和挤压	45
3.2 扭转	48
习题3	52
第4章 弯曲	54
4.1 平面弯曲的概念和梁的计算简图	54
4.2 梁的内力——剪力与弯矩	55
4.3 剪力方程与弯矩方程、剪力图与弯矩图	57
4.4 纯弯曲正应力	61
4.5 强度条件及其应用	65
4.6 提高梁抗弯强度的主要措施	67
4.7 梁的变形和刚度条件	69
习题4	71
第5章 组合变形的强度计算	74
5.1 组合变形的概念	74
5.2 拉伸（压缩）与弯曲组合变形	74
5.3 弯曲与扭转组合变形	76
习题5	79
第6章 平面机构的运动简图及自由度	80
6.1 运动副及其分类	80
6.2 平面机构运动简图	81
6.3 平面机构的自由度	83
习题6	86
第7章 平面连杆机构	88
7.1 平面四杆机构的类型	88
7.2 平面连杆机构的基本特性	90
7.3 铰链四杆机构的演化	93
7.4 平面四杆机构的设计	96
习题7	99
第8章 凸轮机构	102
8.1 凸轮机构的应用和分类	102
8.2 从动件的常用运动规律	104
8.3 图解法设计凸轮轮廓	107
8.4 凸轮机构运动设计中应该注意的问题	110
习题8	111
第9章 间歇运动机构	113
9.1 棘轮机构	113
9.2 槽轮机构	115

9.3 不完全齿轮机构	116	13.2 蜗杆传动的的基本参数和几何尺寸 计算	192
习题9	117	13.3 蜗杆传动的失效形式和设计准则	195
第10章 联接	118	13.4 蜗杆、蜗轮的材料和结构	196
10.1 键联接	118	13.5 蜗杆传动的强度计算	198
10.2 花键联接	122	13.6 蜗杆传动的效率、润滑和热平衡 计算	199
10.3 销联接	122	习题13	203
10.4 螺纹联接的基本类型及螺纹联接件	124	第14章 轮系	205
10.5 螺纹联接的预紧与防松	128	14.1 轮系的分类	205
10.6 螺栓联接的强度计算	130	14.2 定轴轮系及其传动比	205
10.7 螺栓组联接结构的设计	132	14.3 行星轮系及其传动比	207
习题10	134	14.4 混合轮系及其传动比	210
第11章 带传动和链传动	135	14.5 轮系的应用	210
11.1 带传动概述	135	习题14	212
11.2 V带的结构和标准	136	第15章 轴	214
11.3 带传动的工作情况分析和设计计算	138	15.1 轴的分类	214
11.4 V带轮的材料和结构	146	15.2 轴的材料	215
11.5 V带传动的张紧、安装和维护	148	15.3 轴的结构设计	216
11.6 链传动概述	149	15.4 轴的强度计算	218
11.7 链传动的类型和套筒滚子链的 结构与规格	150	15.5 轴的刚度计算	222
11.8 链传动的失效形式与许用功率	151	习题15	222
11.9 链传动的布置、张紧和润滑	153	第16章 轴承	224
习题11	155	16.1 轴承的功用和分类	224
第12章 齿轮传动	156	16.2 滑动轴承	226
12.1 齿轮传动的类型及基本要求	156	16.3 滚动轴承的类型、代号及选用	228
12.2 齿廓啮合基本定律	157	16.4 滚动轴承的失效形式和设计准 则	232
12.3 渐开线齿轮	158	16.5 滚动轴承的寿命计算	232
12.4 齿轮各部分名称及渐开线标准 齿轮的基本尺寸	159	16.6 滚动轴承的组合设计	238
12.5 渐开线标准齿轮的啮合	161	习题16	241
12.6 渐开线齿轮的切齿原理	163	第17章 其他常用零部件	243
12.7 齿轮传动的失效形式及设计准则	166	17.1 联轴器	243
12.8 齿轮的常用材料及热处理	168	17.2 离合器	246
12.9 渐开线标准直齿圆柱齿轮的强度 计算	170	17.3 弹簧	247
12.10 平行轴斜齿轮机构	176	习题17	251
12.11 直齿锥齿轮机构	182	第18章 机械的平衡与调速	252
12.12 齿轮的结构设计及齿轮传动的 润滑	186	18.1 回转件的平衡	252
习题12	188	18.2 机械运转速度波动的调节	256
第13章 蜗杆传动	191	习题18	260
13.1 蜗杆传动的特点和类型	191	附录 习题参考答案	261
		参考文献	269

绪 论

机械是人类进行生产借以减少体力劳动和提高生产率的主要工具，使用机械进行生产的水平是衡量一个国家的技术水平和现代化程度的重要标志。为了更好地运用、研究、设计机械，对于机械工程技术人员和掌握一定的机械设计基础知识是非常重要的。

0.1 机器的组成及特征

在日常生活和生产中，人们广泛地使用着名目繁多的机器，例如缝纫机、洗衣机、汽车、电动机、起重机等。尽管这些机器的结构、性能和用途各不相同，但它们具有一些共同的特征。

图 0-1 所示为单缸内燃机，它由气缸体 1、活塞 2、进气阀 3、排气阀 4、连杆 5、曲轴 6、凸轮 7、顶杆 8、齿轮 9 和 10 等所组成。燃气推动活塞移动，通过连杆使曲轴作连续转动，从而将燃气的热能转换为曲轴转动的机械能。

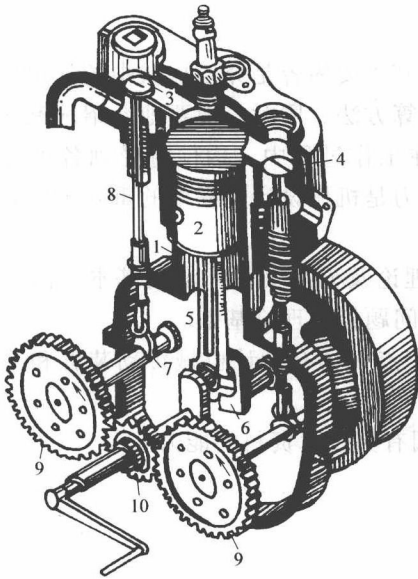


图 0-1 内燃机

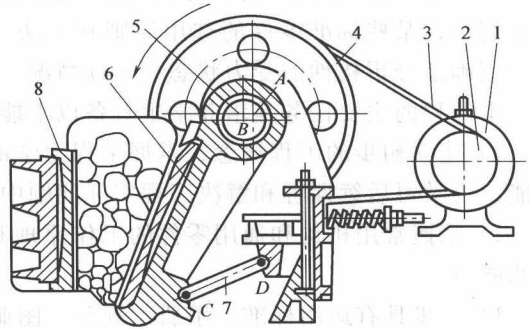


图 0-2 颚式破碎机

图 0-2 所示为颚式破碎机，它由电动机 1、带轮 2 和 4、V 带 3、偏心轴 5、动颚板 6、肘板 7、定颚板及机架 8 等组成。电动机的转动经带传动带动偏心轴转动，从而使动颚板产生平面运动，与定颚板一起实现轧碎物料的功能。

由以上分析可知，各种机械虽然结构型式，功用和性能不同，但都具有以下的共同特征：

- 1) 它们是为许多人体的组合。
- 2) 各实体间具有确定的相对运动。
- 3) 它们能代替或减轻人类的劳动, 以完成有效的机械功或进行能量转换。

凡同时具有以上三个特征的机械称为机器, 仅具备前两个特征的则称为机构。由此可见, 机器是由机构组成的, 但从构成和运动的观点看, 机器与机构并无区别。故在工程上, 通常以“机械”一词作为机器和机构的总称。

机构中的运动单元体称为构件。所以, 构件具有独立的运动特性, 它是运动的单元, 而零件则是制造的单元。如图 0-3 所示的连杆, 它是由连杆体 1、连杆盖 4、螺栓 2 及螺母 3 等几个零件组成。零件是组成机械的不可拆的基本单元, 如螺钉、齿轮轴、弹簧等。

对于机械中的零件, 按功能和结构特点又可分为通用零件和专用零件。各种机械中普通使用的零件称为通用零件, 如前所述零件。仅在某些专门行业中才用到的零件称为专用零件, 如汽轮机的叶片、机床的床身、内燃机的活塞等。

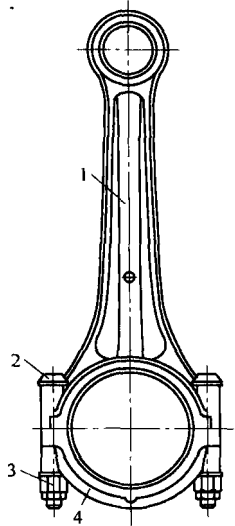


图 0-3 连杆

0.2 本课程的学习内容和任务

机械设计基础课程是一门综合性的技术基础课, 其主要内容是介绍机械中的常用机构和通用零件的工作原理、结构特点, 基本设计理论和计算方法, 同时, 扼要地介绍国家标准和有关规定, 某些标准零件的选用原则和方法。机械在工作过程中, 构件将受到各种力的作用。正确地分析构件的受力状态、运动情况、承载能力是机械设计过程中的重要步骤。

本课程的主要任务是培养学生具备以下能力:

- 1) 建立初步的工程概念, 掌握工程力学的基本理论及分析工程问题的基本方法和基本技能, 为学习后续课程和解决工程实际问题中的力学问题打好理论基础。
- 2) 掌握常用机构和通用零件的工作原理和结构特点, 具有设计机械传动装置和简单机械的能力。
- 3) 初步具有运用标准、手册、规范、图册和查阅有关技术资料的能力。

0.3 本课程的学习方法

机械设计基础如同机械制图、电工学一样, 是高等学校工科有关专业的一门主要的技术基础课。通过本课程的学习, 可以培养学生初步具备运用手册设计机械传动装置和简单机械的能力, 为日后从事技术革新创造条件, 为学习有关专业课程提供必要的理论基础。学习本课程时应注意以下几个特点:

- 1) 本课程要综合运用高等数学、金工实习、制图、互换性与技术测量等课程的基本知识去解决常用机构、通用零件的设计等问题。因此, 先修课程的掌握程度直接影响到本课程的学习。

2) 学生一接触本课程就会产生“没有系统性”、“逻辑性差”等错觉,这是由于学生习惯了基础课的系统性所造成的。本课程中,虽然不同研究对象所涉及的理论基础不同,且相互之间无多大关系,但最终的研究目的只有一个,即设计出能应用的机构、零件等。本课程的各部分内容都是按照工作原理、结构、强度计算、使用维护的顺序介绍的,有其自身的系统性,学习时应注意这一特点。

3) 由于实践中的问题很复杂,很难用纯理论的方法来解决。因此,常常采用很多经验公式、参数以及简化计算等,这样往往会给学生造成“不讲道理”、“没有理论”等错觉,这点必须在学习过程中逐步适应。

4) 计算步骤和计算结果常常不像基础课具有惟一性。

5) 计算对解决设计问题虽然很重要,但并不是惟一所要求的能力。学生必须逐步培养把理论计算与结构设计、工艺等结合起来解决设计问题的能力。

0.4 机械设计的基本要求和一般过程

0.4.1 机械设计的基本要求

机械的类型很多,但其设计的基本要求大致相同,主要有以下几点:

1. 满足预定功能的要求

满足预定功能要求是指能够按照预期的技术要求顺利地执行机械的全部职能,如机器工作部分的运动形式、速度、运动精度和平稳性、需要传递的功率,以及某些使用上的特殊要求(如高温、防潮等)。

2. 满足经济性要求

机械的经济性是指在设计、制造上成本低,使用上效率高,能源和辅助材料消耗少,维护及管理费用低等。

在产品整个设计周期中,必须把产品设计、制造及使用三方面作为一个系统工程来考虑,用价值工程理论指导产品设计,正确使用材料,采用合理的结构尺寸和工艺,以降低产品的成本。

3. 满足工艺要求

设计机器时应尽量减少零件的数量,尽可能地采用标准件,装配及维修简单等。

4. 满足劳动保护要求

操作方便、有利于减轻操作人员的劳动强度。能实现对操作人员的防护,保证人身安全和身体健康。对于技术系统的周围环境和人不致造成危害和污染,同时要保证机器对环境的适应性。

5. 满足其他特殊要求

必须考虑有些机械由于工作环境和要求不同,而对设计提出某些特殊要求,如药品、食品、纺织机械要求防止产品污染,航空航天机械要求减轻重量等。

总之,必须根据所要设计的机械的实际情况,分清应满足的各项设计要求的主次程度,切忌简单照搬或乱提要求。

0.4.2 机械设计的一般过程

机械设计方法很多,既有传统的设计方法,也有现代的设计方法。由于各种机械的用途、性能要求不同,设计的具体条件不同,所以设计的步骤和方法不完全一致,但一般过程和内容是基本一致的。机械设计的过程通常可分为以下几个阶段:

1. 提出和制定产品设计任务书

设计任务书通常是人们根据市场需求提出,通过可行性分析后确定的。其中包括产品的预期功能、有关指标、限制条件等。

2. 总体方案设计

在满足设计任务书要求的前提下,由设计人员提出各种设计方案并进行分析比较,从中选择最佳方案。

3. 技术设计

在既定设计方案的基础上,完成机械产品的总体设计、部件设计、零件设计等,设计结果以工程图及计算书等技术文件的形式表达出来。

4. 样机的试制和鉴定

根据技术设计提供的图样和技术文件进行样机试制并对样机进行试运行,检测样机是否达到设计要求。把发现的问题反馈给设计人员,经过修改完善,最后通过鉴定。

5. 产品的正式投产

当机械的总体方案已经确定,运动学和动力学计算完成后,就要进行主要零部件的设计。机械零件设计的一般步骤如下:

- 1) 根据机械的具体运转情况和简化的计算方案确定零件的载荷。
- 2) 根据零件工作情况的分析,判定零件的失效形式,从而确定其计算准则。
- 3) 进行主要参数的选择,选定材料,根据计算准则求出零件的主要尺寸,考虑热处理及结构工艺性等。
- 4) 进行结构设计。
- 5) 绘制零件工作图,制订技术要求,编写计算说明书及有关技术文件。

对于不同的零件和工作条件,以上这些步骤可以有所不同。此外,在设计过程中,这些步骤又是相互交错、反复进行的。

产品设计过程是智力活动过程,它体现了设计人员的创新思维活动。设计过程是逐步逼近解答方案并逐步完善的过程。设计过程中还应注意几点:

- 1) 设计过程要有全局观点,不能只考虑设计对象本身的问题,而要把设计对象看作一个系统,处理人一机一环境之间的关系。
- 2) 善于运用创造性思维和方法,注意考虑多方案解答,避免解答的局限性。
- 3) 设计的各阶段应有明确的目标,注意各阶段的评价和优选,以求出既满足功能要求又有最大实现可能的方案。
- 4) 要注意反馈及必要的工作循环。解决问题要由抽象到具体,由局部到全面,由不确定到确定。

0.5 机械零件的失效形式和设计准则

1. 零件的工作能力

进行机器的零件设计时，一般都要根据零件的可能失效形式来进行，保证零件具有足够抵抗失效的工作能力。

零件的工作能力是指在不发生失效的条件下，零件所能达到的安全工作的限度。若用载荷来表示，习惯上称为承载能力。

2. 失效形式

机械零件的失效是指零件由于某些原因不能正常工作的现象。失效并不单纯意味着损坏，而且有更广泛的含义。零件常见的失效形式有：断裂或过大的塑性变形，过大的弹性变形，工作表面过度磨损或损坏，发生了强烈的振动，工作温度过高而产生过大的热应力，热变形或破坏正常的润滑油膜，靠摩擦力工作的零件打滑，联接零件的松动等等。如果零件发生失效，机械就可能无法正常工作。

同一种机械零件可能有几种不同的失效形式，对应于各种失效形式就各有其不同的工作能力。例如，设计机床的主轴时，必须保证它具有足够的强度，而不发生断裂，且其弹性变形不能超过一定的数值，即还必须保证其刚度。对于有些作相对运动的零件，如机床的导轨，除了保证其强度和刚度外，还要求具有良好的耐磨性，否则会破坏机床应用的精度。

3. 设计准则

为了防止零件在预期工作寿命期内发生失效，设计零件时必须依据一定的设计准则，显然这些准则与失效形式紧密地联系在一起。这些准则主要有：强度准则、刚度准则、耐磨性准则、振动稳定性准则和可靠性准则。

0.6 机械零件的工艺性及标准化

1. 工艺性

机械零件的结构，主要由它在机械中的作用，它和其他相关零件的关系及制造工艺所决定。如果零件的结构在具体生产条件下，能用最少的工时和最低成本制造和装配出来，则这样的零件结构具有良好的工艺性，因此，对零件进行结构设计时，有关工艺性的基本要求是：

(1) 毛坯选择合理 机械制造中毛坯制备的方法有：直接利用型材，铸造，锻造，冲击和焊接等。毛坯的选择与具体的生产条件有关，一般取决于生产批量、材料性能和加工可能性等。

(2) 结构简单合理和便于机械加工 设计零件的结构形状时，应尽量采用简单的表面（如平面、圆柱面）及其配合，并使加工表面数目最少和加工面积最小。

(3) 制造精度及表面粗糙度选得合适 制造精度选得越高，表面粗糙度造得越低，加工费用就越高，因此，应在满足使用要求的原則下，恰当地选择制造精度和表面粗糙度。

2. 标准化

标准化是指以制订标准和贯彻标准为主要内容的全部活动过程。它包含两方面的内容：

制订标准和贯彻标准,其原则是统一、简化、协调、选优。标准化有重大意义:有利于设计和制造,有利于产品的互换性,便于维修。标准件可以组织专门化生产,既有利于保证产品质量,又可降低成本。

随着工业的发展,我国有了许多标准,其中有国家标准(GB),行业标准和企业标准,在机械设计过程中,如无特殊需要,就必须采用这些标准。在国际上,为了促进世界各国在技术上的统一,成立了国际标准化组织(简称ISO)和国际电工委员会(简称IEC),由这两个组织负责制定和颁发国际标准。我国于1978年恢复参加ISO组织后,陆续修订了自己的标准。修订的原则是,在立足我国生产实际的基础上向ISO靠拢,以利于加强我国在国际上的技术交流和产品互换。

习 题

- 0-1 人们常说的机械含义是什么?机器与机构的区别是什么?指出下列设备中哪些是机构:铣床、发电机、机械式手表、洗衣机、汽车等。
- 0-2 什么是通用零件?什么是专用零件?试各举三个实例。
- 0-3 什么是机械零件的失效?机械零件可能的失效形式主要有哪些?

第1章 静力学

1.1 静力学的基本概念

1.1.1 力的概念

力是物体间的相互机械作用。这种机械作用使物体的运动状态或形状尺寸发生改变。力对物体的效应取决于力的大小、方向和作用点，这三个因素称为力的三要素。

力是一个既有大小又有方向的物理量，称为力矢量。如图 1-1 所示，力可用一条有向线段表示，线段的长度（按一定比例尺）表示力的大小；线段的方位和箭头表示力的方向；线段的起始点（或终点）表示力的作用点，力的国际单位为牛 [顿] (N)。

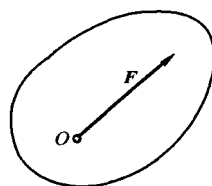


图 1-1 力矢量

若干个力组成的系统称为力系。如果一个力系与另一个力系对物体的作用效应相同，则这两个力系互称为等效力系。若一个力与一个力系等效，则称这个力为该力系的合力，而该力系中的各力称为这个力的分力。已知分力求其合力的过程称为力的合成，已知合力求其分力的过程称为力的分解。

1.1.2 平衡与刚体的概念

平衡是指物体相对于地球处于静止或匀速直线运动的状态。若一力系使物体处于平衡状态，则该力系称为平衡力系。

静力学研究的物体都被认为是刚体。所谓刚体，是指在外力作用下，大小和形状保持不变的物体。这是一个理想化的力学模型，事实上是不存在的。实际物体在力的作用下，都会产生程度不同的变形。但微小变形对所研究物体的平衡问题不起主要作用，可以忽略不计，这样可以使问题的研究大为简化。

1.2 力的基本性质

静力学公理是静力学研究与分析的基础。

公理 1 二力平衡公理

作用在刚体上的两个力，使刚体保持平衡的必要和充分条件是：这两个力大小相等，方向相反，且作用在同一直线上。

对于变形体而言，二力平衡公理只是必要条件，但不是充分条件。例如：在绳索两端施加一对等值、反向、共线的拉力时可以平衡，但受到一对等值、反向、共线的压力时就不能平衡了。

公理 2 加减平衡力系公理

在已知力系上加上或者减去任意平衡力系,并不改变原力系对刚体的作用。

推论 1 力的可传性原理:作用在刚体上某点的力,可以沿着它的作用线移动到刚体内任意一点,并不改变该力对刚体的作用效应。

如图 1-2 所示的小车,在 A 点的作用力 F 和在 B 点的作用力 F 对小车的作用效果是相同的。

公理 3 力的平行四边形公理

作用于物体上某一点的两个力,可以合成为一个合力,其作用点也在该点,合力的大小和方向由两已知力所构成的平行四边形的对角线确定,如图 1-3 所示。力的合成法则可写成矢量式: $\boldsymbol{F} = \boldsymbol{F}_1 + \boldsymbol{F}_2$ 。

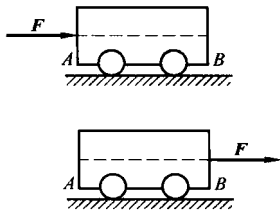


图 1-2 力的可传性

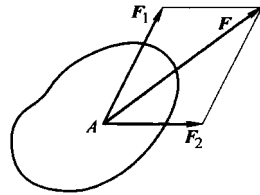


图 1-3 力的平行四边形公理

推论 2 三力平衡汇交原理:作用在刚体上三个相互平衡的力,若其中两个力的作用线汇交于一点,则第三个力的作用线通过汇交点。

公理 4 作用与反作用公理

两物体间的作用力与反作用力总是同时存在,且大小相等、方向相反、沿同一条直线,分别作用在这两个物体上。

1.3 工程中常见的约束

1.3.1 约束和约束反力的概念

凡在空间的位置不受任何限制,可以做任意运动的物体称为自由体,如在空间飞行的飞机、炮弹和火箭等。凡是因为受到周围其他物体的限制而不能做任意运动的物体称为非自由体,如机车、机床的刀具等。

凡是能限制某些物体运动的其他物体,称为约束。如铁轨对于机车、轴承对于电动机转子、机床刀夹对于刀具等,都是约束。约束对非自由体的作用实质上就是力的作用,这种力称为约束反力,简称反力。反力的作用点是约束与非自由体的接触点。反力的方向总是与该约束所能限制的运动方向相反。图 1-4 所示为一向心滚动轴承,其外圈 1 (一般固定在机架上,构成固定件) 通过滚动体 2 构成对轴 3 (与内圈连接为一体,成为活动件) 的约束。

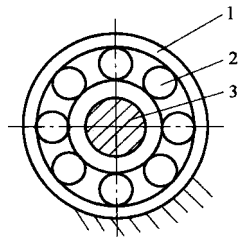


图 1-4 向心滚动轴承

1.3.2 约束的基本类型

1. 柔性约束

由柔软的绳索、链条、皮带等构成的约束称为柔性约束。它们只能受拉不能受压，约束反力方向沿中心线背离被约束物体。如图 1-5 所示线绳上的约束反力为 F_1 。

2. 光滑面约束

如果两个物体接触面之间的摩擦力很小，可忽略不计，两个物体之间构成光滑面约束。这种约束只能限制物体沿着接触点朝着垂直于接触面方向的运动，而不能限制其他方向的运动。因此，光滑接触面约束反力的方向垂直于接触面或接触点的公切线，并通过接触点指向物体，如图 1-6 所示。

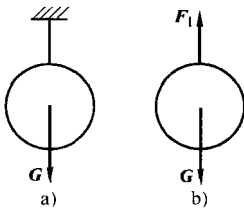


图 1-5 柔性约束

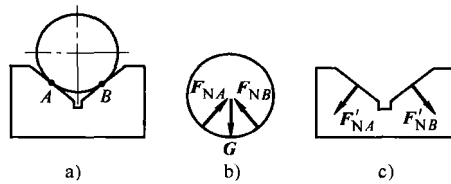


图 1-6 光滑面约束

3. 光滑铰链约束

物体经圆柱铰链连接所形成的约束。如图 1-7 所示圆柱铰链是由两个端部带圆孔的杆件，用一个销轴连接而成。受约束的物体只能绕销轴相对转动。

铰链约束分类：这类约束有连接铰链、固定铰链支座、活动铰链支座等。

(1) 连接铰链（中间铰链） 两构件用圆柱形销钉连接且均不固定，即构成连接铰链，其约束反力用两个正交的分力表示，如图 1-7 所示。

(2) 固定铰链支座 如果连接铰链中有一个构件与地基或机架相连，便构成固定铰链支座，其约束反力仍用两个正交的分力表示，如图 1-8 所示。

(3) 活动铰链支座 在桥梁、屋架等工程结构

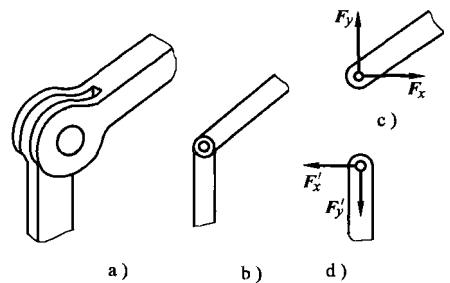


图 1-7 铰链约束

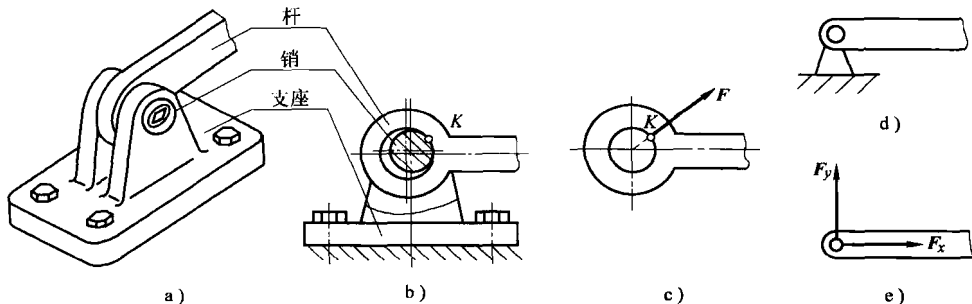


图 1-8 固定铰链支座

中经常采用这种约束。在铰链支座的底部安装一排滚轮,可使支座沿固定支承面移动,这种支座的约束性质与光滑面约束反力相同,其约束反力必垂直于支承面,且通过铰链中心,如图 1-9 所示。

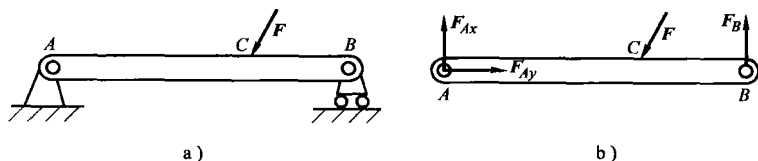


图 1-9 活动铰链支座

1.3.3 物体受力分析和受力图

首先来了解什么是受力图。为了清晰地分析与表示构件的受力情况,要将研究的构件(研究对象)从与它发生联系的周围物体中分离出来,把作用于其上的全部外力(包括已知的主动力和未知的约束反力)都表示出来。这样作成的表示物体受力情况的简图即为受力图。

1. 研究对象

所研究的物体称为研究对象。

2. 分离体

解除约束后的物体称为分离体。

3. 受力图

在分离体上画上它所受的全部主动力和约束反力的图称为受力图。

例 1-1 如图 1-10a 所示,均质球重 G ,用绳系住,并靠于光滑的斜面上。试分析球的受力情况,并画出受力图。

解 (1) 研究对象 确定球为研究对象。

(2) 画出主动力 G , 约束反作用力 F_T 和 F_N 如图 1-10b 所示。

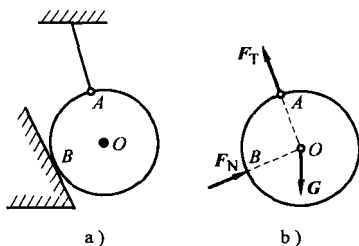


图 1-10 球的受力图

注: 满足三力平衡汇交原理。

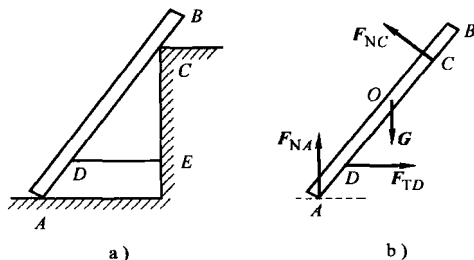
例 1-2 如图 1-11a 所示均质杆 AB , 重量为 G , 支于光滑的地面及墙角间, 并用水平绳 DE 系住。试画出杆 AB 的受力图。

解 (1) 研究对象 确定杆 AB 为研究对象。

(2) 画出主动力 G , 三个约束反作用力 F_{NA} 、 F_{TD} 和 F_{NC} 如图 1-11b 所示。

由以上两例可以归纳画受力图的步骤是:

- 1) 简化结构, 画结构简图。
- 2) 选择研究对象, 画出作用在其上的全部主动力。
- 3) 根据约束性质, 画出作用于研究对象上的

图 1-11 杆 AB 的受力图

约束反力。

1.4 平面汇交力系合力与平衡：几何法

各力作用线均在同一平面内的力系，称为平面力系。若平面力系中的各力作用线都汇交于一点，则称平面汇交力系。平面汇交力系是力系中较简单的一种。

1. 力的三角形法则

设有两个力作用于某刚体的一点 O ，则其合力可由三角形法则确定。三角形法则的实质是力的四边形法则的另一种表达方式，如图 1-12 所示。

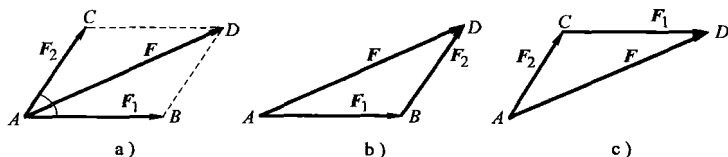


图 1-12 力的三角形法则

如图 1-12b、图 1-12c 所示，其方法是自任意点 A 先画出一力矢 F_1 ，然后再由 F_1 的终点画一力矢 F_2 ，最后由 A 点至力矢 F_2 的终点画一力矢 F ，它代表 F_1 、 F_2 的合力。合力 F 也作用于该点 O 。

2. 力的多边形法则

设作用在刚体上汇交于 O 点的力系 F_1 、 F_2 、 F_3 和 F_4 如图 1-13a 所示，求其合力。首先将 F_1 、 F_2 两个力进行合成，将这两个力矢量的大小利用长度比例尺转换成长度单位，依原力矢量方向将两力矢量依次进行首尾相连，得折线 OF_1F_2 ，再由折线起点向折线终点作有向线段 F_{12} ，即将折线封闭，得合力 F_{12} ，有向线段 F_{12} 的大小为合力的大小，指向为合力的方向。同理，力 F_{12} 与 F_3 的合力为 F_{123} ，最后求得 F_{123} 与力 F_4 的合力 F_R ，如图 1-13b 所示。可以省略中间求合力的过程，将力矢量 F_1 、 F_2 、 F_3 和 F_4 依次首尾相连，得折线 $OF_1F_2F_3F_4$ ，由折线起点向折线终点作有向线段 OF_R ，封闭边表示其力系合力的大小和方向，且合力的作用线通过汇交 O 点，多边形 $OF_1F_2F_3F_4$ 称为力的多边形，此法称为力的多边形法则。作图时力的顺序可以是任意的，但力的多边形的形状发生变化，并不影响合力的大小和方向，如图 1-12c 所示。

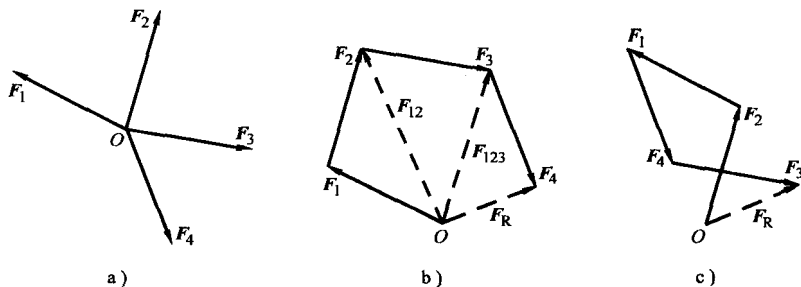


图 1-13 力的多边形法则

因平面汇交力系可用其合力来代替，所以，平面汇交力系平衡的充分和必要条件是：该

力系的合力等于零。用矢量式表示。即

$$\mathbf{F}_R = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \cdots + \mathbf{F}_n = \Sigma \mathbf{F} \quad (1-1)$$

平面汇交力系平衡的必要与充分几何条件是：该力系的力多边形是自行封闭的。

例 1-3 一钢管放置在 V 形槽内，如图 1-14a 所示，已知管重 $G = 5\text{kN}$ ，钢管与槽面间的摩擦不计，求槽面对钢管的约束力。

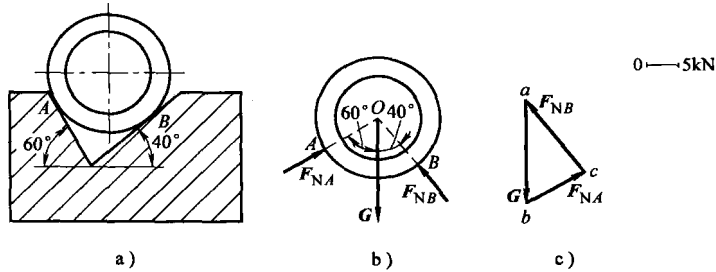


图 1-14 槽面对钢管的受力图

解 取钢管为研究对象，它所受到的主动力为重力 G 和约束力为 F_{NA} 和 F_{NB} ，汇交于 O 点，如图 1-14b 所示。

选比例尺，令 $ab = G$ ， $bc = F_{NA}$ ， $ca = F_{NB}$ ，将各力矢量按其方向进行依次首尾相连得封闭的三角形 abc ，如图 1-14c 所示。量取 bc 边和 ca 边的边长，按照比例尺转换成力的单位，则槽面对钢管的约束力为

$$F_{NA} = bc = 3.26\text{kN}, F_{NB} = ca = 4.40\text{kN}$$

另一解法，利用三角关系的正弦定理得

$$\frac{F_{NA}}{\sin 40^\circ} = \frac{F_{NB}}{\sin 60^\circ} = \frac{G}{\sin 80^\circ}$$

则约束力为

$$F_{NA} = bc = 3.26\text{kN} \quad F_{NB} = ca = 4.40\text{kN}$$

1.5 力的分解和力的投影

如图 1-15 所示，过 F 两端向坐标轴引垂线得垂足 a 、 b 、 a' 、 b' 。线段 ab 和 $a'b'$ 分别为 F 在 x 轴和 y 轴上投影的大小，投影的正负号规定为：从 a 到 b （或从 a' 到 b' ）的指向与坐标轴正向相同为正，相反为负。 F 在 x 轴和 y 轴上的投影分别计作 F_x 、 F_y ，若已知 F 的大小及其与 x 轴所夹的锐角 α ，则有

$$\left. \begin{aligned} F_x &= F \cos \alpha \\ F_y &= -F \sin \alpha \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

如将 F 沿坐标轴方向分解，所得分力 F_x 、 F_y 的值与在同轴上的投影 F_x 、 F_y 相等。但必须注意，力在轴上的投影是代数量，而分力是矢量，不可混为一谈。若已知 F_x 、 F_y 值，可求出 F 的大小和方向，即

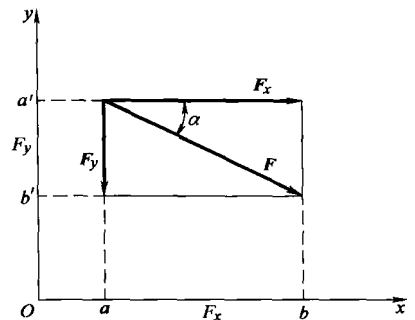


图 1-15 力在坐标轴上的投影