



普通高等教育“十二五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU "12·5" GUIHUA JIAOCAI

理论力学

L I L U N L I X U E

主编◎张克盛



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press



普通高等教育“十二五”规划教材

理论力学

主 编 张克盛

副主编 刘孜文 刘振昌

北 京

冶金工业出版社

2013

内 容 简 介

本书共分 13 章,第 1 章静力学;第 2 章平面汇交力系;第 3 章空间力系;第 4 章空间力系;第 5 章运动学基础;第 6 章刚体的基本运动;第 7 章点的合成运动;第 8 章刚体的平面运动;第 9 章动力学基础;第 10 章动量定理;第 11 章质点系的惯性特征;第 12 章达朗贝尔原理;第 13 章机械振动基础。

本书适用于普通高等教育、高等职业技术学院和中等专业技术学校工程类专业及土建类其他相关专业学生参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

理论力学/张克盛主编. —北京:冶金工业出版社,
2013.12

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5024-6476-9

I. ①理… II. ①张… III. ①理论力学—高等学校—
教材 IV. ①031

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 279513 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcbcs@cnmip.com.cn

ISBN 978-7-5024-6476-9

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;北京明兴印务有限公司印刷

2013 年 12 月第 1 版,2013 年 12 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 13.5 印张; 326 千字; 216 页

29.00 元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿邮箱:tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

近年来高等教育发展迅猛,其宏观规模发生了历史性变化。为了适应我国高等教育发展的需要,在我院领导和相关系部领导及老师的指导和帮助下,特编写本教材。

本书的主要特点有:

1. 在现有教材基础上进行精简,以适应高职院校的教学要求;
2. 在内容上本教材尽量以简单的表述进行阐述;
3. 以更加贴切高职教学为原则进行编写

本教材由张克盛任主编,刘孜文、刘振昌任副主编。本书从静力学、运动学和动力学三个部分进行了编写,参加本书编写的有甘肃畜牧工程职业技术学院的尹辉彦(第一、二、三章)、张克盛(第四、五、六、七及全书校对统稿)、刘孜文(第八、九、十章)、刘振昌(第十一、十二章)。

在本书的编写过程中得到了甘肃畜牧工程职业技术学院钟灵副教授的大力支持和帮助,在此表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在疏漏,恳请广大师生批评指正。

编者

2013年8月



目 录

第一篇 静力学

第一章 静力学基础	(3)
第一节 静力学的基本概念	(3)
第二节 静力学公理	(4)
第三节 约束和约束反力	(6)
第四节 物体的受力分析和受力图	(9)
第二章 平面汇交力系	(14)
第一节 平面汇交力系的合成与平衡	(14)
第二节 平面汇交力系的平衡	(15)
第三节 力矩与平面力偶系	(18)
第四节 平面任意力系的简化	(26)
第五节 平面任意力系的平衡	(28)
第六节 物体系的平衡	(30)
第七节 摩擦	(32)
第三章 空间力系	(39)
第一节 空间汇交力系	(39)
第二节 力对点的矩和力对轴的矩	(40)
第三节 空间力偶	(43)
第四节 空间任意力系的简化结果	(46)
第五节 空间任意力系的平衡方程	(48)
第六节 重心	(49)

第二篇 运动学

第四章 运动学基础	(59)
第一节 点运动的矢量法	(59)



第二节 点运动的直角坐标法	(61)
第三节 点运动的自然法	(64)
第五章 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	(73)
第三节 转动刚体内点的速度和加速度	(77)
第四节 定轴转动矢量表示方法	(78)
第六章 点的合成运动	(84)
第一节 合成运动的概念	(85)
第二节 点的速度合成	(88)
第三节 点的加速度合成	(94)
第七章 刚体的平面运动	(105)
第一节 刚体平面运动	(105)
第二节 平面图形上各点的速度	(107)
第三节 平面图形上各点的加速度	(113)

第三篇 动力学

第八章 动力学基础	(121)
第一节 动力学的基本定律	(121)
第二节 质点的运动微分方程	(123)
第三节 质点在非惯性坐标系中的运动	(124)
第九章 动量定理	(132)
第一节 动量和冲量	(132)
第二节 动量定理	(132)
第三节 质心运动定理	(136)
第十章 质点系的惯性特征	(142)
第一节 质点系的质量中心	(142)
第二节 刚体的转动惯量	(143)
第三节 转动惯量的平行轴定理	(146)
第四节 转动惯量的转轴公式 惯性积及惯量矩阵	(149)
第五节 惯量椭球和惯量主轴	(154)
第六节 转动惯量的实验求法	(156)



第十一章 达朗贝尔原理	(162)
第一节 惯性力的概念	(162)
第二节 达朗贝尔原理	(163)
第三节 质点系惯性力系的简化	(164)
第四节 转动刚体的轴承动约束力	(171)
第十二章 机械振动基础	(178)
第一节 单自由度系统的自由振动	(178)
第二节 计算固有频率的能量法	(187)
第三节 单自由度系统的有阻尼自由振动	(189)
第四节 单自由度系统的无阻尼受迫振动	(194)
第五节 单自由度系统的有阻尼受迫振动	(200)
参考文献	(208)

第一篇

静力学

静力学是研究物体在力系作用下平衡的规律的科学。

第一卷

卷一

第一章 静力学基础

第一节 静力学的基本概念

静力学是研究物体在力系作用下的平衡规律的科学。

一、力的概念

力是物体间相互的机械作用。这种作用会使物体的运动状态发生变化或使物体变形。机械作用形式多种多样,可归纳为两类。一类是物体相互间的直接接触作用,如弹力、摩擦力等;另一类是通过场的相互作用,如万有引力、静电引力等。力不能脱离物体出现,且有力必定至少存在相互作用的两个物体。

通常物体运动状态变化称为力的外效应,物体变形称为力的内效应。由于刚体是受力作用不变形的物体,所以力对刚体只有运动效应。静力学的研究对象是刚体或刚体系统,因此在静力学中不考虑力的内效应,只研究力的外效应。

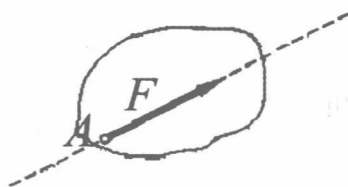


图 1-1 力的三要素

实践表明,力对物体的作用效果取决于力的大小、方向、作用点,这三者称为力的三要素。所以力是一个矢量,可以用一个定位的有向线段来表示,如图 1-1 所示。表示力的矢量必须与该力确定的作用点联系起来,这样的矢量称为定位矢量。力的大小反映物体相互间机械作用的强弱程度,度量力的大小通常采用国际单位制(SI),力的单位用牛顿(N)或千牛顿(kN)。力的方向表示物体间的相互机械作用具有方向性,它包括力所顺沿的直线(称为力的作用线)在空间的方位和力沿其作用线的指向。力的作用点是物体间相互机械作用位置的抽象化。实际上物体相互作用的位置并不是一个点,而是物体的一部分面积或体积。如果这个面积或体积相对于物体很小或由于其他原因以致力的作用面积或体积可以不计,则可将它抽象为一个点,此点称为力的作用点,而作用于这个点上的力,称为集中力;如果力的作用面积或体积不能忽略,则称该力为分布力,例如水压力、风压力、重力等。

此外,平衡是指物体的运动状态不变。它包括静止和匀速直线运动。



力系指的是作用于物体上的若干个力。按力的作用线分布:平面力系和空间力系;按力的作用线关系:汇交力系、平行力系和任意力系。

若两力系对同一物体作用效果相同为等效力系;把一个力系用与之等效的另一个力系代替一力系的等效替换。一个复杂力系用一个简单力系等效替换的过程一力系的简化。若一个力系可用一个力等效替换,则该力称为合力;力系中的各力称为分力。

若作用于物体上的力系使物体保持平衡,则该力系称为平衡力系。此时力系所满足的条件称平衡条件。

二、刚体的概念

为了便于研究,刚体是从实际物体抽象得来的一种理想的力学模型,自然界中并不存在。刚体在运动中和受力作用后,形状和大小都不发生改变,而且内部各点之间的距离不变。实际上,任何物体在力的作用下都将发生变形,如果物体的变形尺寸与其原始尺寸相比很小,在所研究的力学问题中,忽略这种变形后不会引起显著的误差时,就可以把这个物体看成刚体,从而使所研究的问题得到简化。当物体的微小变形在所研究的问题中转化为主要因素时,就不能再把此物体看做刚体,而必须视为变形体。这种科学的抽象是必要的,也为实际所许可的。

由于静力学所研究的物体主要是刚体,所以静力学也称为刚体静力学。

当物体的微小变形在所研究的问题中转化为主要因素时,就不能再把此物体看做刚体,而必须视为变形体。在以后的学习过程中,将研究杆件的强度、刚度和稳定性,静定结构的内力,超静定结构的解法。这些问题的研究,都与杆件、结构在荷载作用下或其他原因所产生的变形相联系。此时,物体的可变形性质在所研究的问题中就成为重要因素,不能再把物体抽象化为刚体、而必须把它视为变形体。

静力学所研究的基本问题:

- (1) 力系的简化;
- (2) 力系的平衡条件及其应用。

第二节 静力学公理

静力学公理是生活和生产实践中对力的基本性质概括的一种客观规律,它源于实践,经过实践反复检验,被证明是正确的结论。公理无需证明,它是静力学的理论基础。

静力学公理是生活和生产实践中对力的基本性质概括的一种客观规律,它源于实践,经过实践反复检验,被证明是正确的结论。公理无需证明,它是静力学的理论基础。

公理1 二力平衡公理

刚体只受两个力作用而保持平衡的充分必要条件是这两个力大小相等、方向相反,且作用线在同一条直线上。如图 1-2 所示, $\vec{F}_A$ 和 $\vec{F}_B$ 大小相等、方向相反,且在同一条直线上。

公理2 加减平衡力系公理

在作用于一个刚体的任意力系中,增加(或减少)一个平衡力系,不会改变原力系对刚体的作用效应。

该公理是力系简化的理论依据。

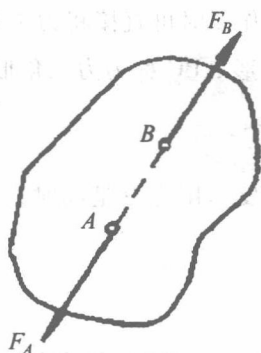


图 1-2 二力平衡公理图

作用在刚体上的力可沿其作用线任意移动,而不改变该力对刚体的作用,如 1-3 图所示。



图 1-3 加减平衡力系公理

作用于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,则此三力必在同一平面内,且第三个力的作用线通过汇交点,如图 1-4 所示。

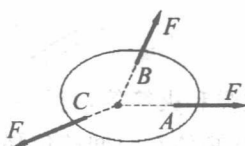


图 1-4 三力汇交

如图 1-4 所示,不平行三力平衡的必要条件,即:三力平衡必汇交。三力汇交不一定平衡。

公理 3 力的平行四边形法则

作用在物体上同一点处的两个力的合力仍作用于该点。合力矢量的大小和方向由以该两个力矢量为邻边所构成平行四边形的对角线所确定。此公理是力系简化的基础,如图 1-5(a)所示,图中 $\vec{F}_R = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$ 。

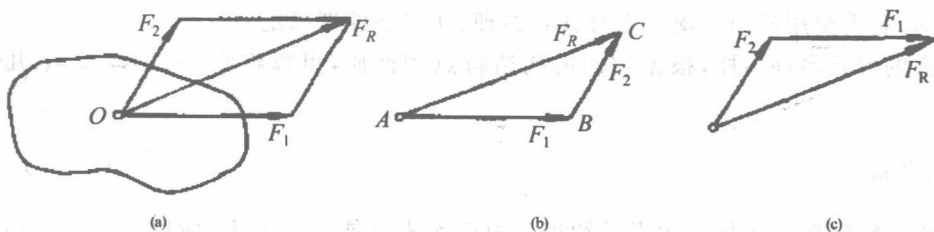


图 1-5 力的平行四边形法则



为了简便,如图 1-5a), b) 所示,作图时可直接将力矢 $\vec{F}_2$ 平移到力矢 $\vec{F}_1$ 的末端,连接 BC 两点即可求得合力矢 $\vec{F}_R$ 。这个三角形 ABC 称为力三角形,这样的作图方法称为力的三角形法则。

公理 4 作用力反作用力公理

两物体间相互作用的作用力和反作用力总是同时存在,大小相等,方向相反,沿同一直线,分别作用在这两个物体上。

它是受力分析必须遵循的原则。

公理 5 刚化原理

当变形体在已知力系作用下处于平衡时,如果把该物体变成刚体,则平衡状态保持不变。

它建立了刚体力学与变形体力学的联系。

此外,必须指出,刚体的平衡条件,只是变形体的必要条件,而非充分条件。例如,绳索在等值、反向、共线的两个拉力作用下处于平衡,如将绳索刚化为刚体,其平衡状态保持不变;若绳索在两个等值、反向、共线的压力作用下并不能平衡,此时绳索就不能刚化为刚体,但刚体在上述两种力的作用下是平衡的。这说明对于变形体的平衡来说,除了满足刚体平衡条件之外,还应满足与变形体的物理性质相义的附加条件(如绳索个能承受压力)。

第三节 约束和约束反力

有些物体,例如:飞行的飞机、炮弹和火箭等,它们在空间的位移不受任何限制。位移不受限制的物体称为自由体。相反有些物体在空间的位移却要受到一定的限制。如机车受铁轨的限制,只能沿轨道运动;电机转子受轴承的限制,只能绕轴线转动;重物由钢索吊住,不能下落等。位移受到限制的物体称为非自由体。对非自由体的某些位移起限制作用的周围物体称为约束。例如,铁轨对于机车,轴承对于电机转子,钢索对于重物等,都是约束。

约束对于物体的作用力称为约束力或约束反力,也常简称为反力,与约束力相对应。因此,约束反力的方向必与该约束所能够阻碍的位移方向相反。有些力主动地使物体运动或使物体有运动趋势,这种力称为主动力,比如重力、水压力等都是主动力,工程上也常称荷载。约束反力的方向总是与约束所能阻碍的物体运动的方向相反,这是判定约束反力方向的基本方法。约束反力的作用点就是物体上与约束相接触的点。约束反力的大小,一般都是未知的,它需要用静力平衡条件及其它物理、几何条件来确定。

约束的形式多种多样,根据它们的构造特点和性质,可以将它们归纳为以下几种典型约束。

一、柔索

绳索、链条、胶带等属于柔索类约束。由于柔索只能承受外力,所以柔索给予所系物体的约束力作用于接触点,方向沿柔索中心线而背离物体,如图 1-6 所示。



图 1-6 柔索

二、光滑接触面

当两物体接触面上的摩擦力可以忽略时,即可看作光滑接触面。这时,无论接触面形状如何,只能阻止接触点沿着通过该点的公法线趋向接触面的运动。

所以,光滑接触面的约束力通过接触点,沿接触面在该点的公法线,并为压力,方向指向物体内部。

如果两物体中有一物体以其棱角与另一物体的表面相接触,则约束反力沿着此表面在接触处的法线,如图 1-7 所示的直杆在 A、B 两点所受的约束反力分别为 N_A , N_B 。

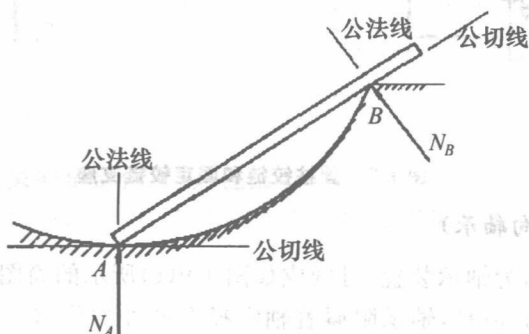


图 1-7

两物体分别被钻上直径相同的圆孔并用销钉连接起来,不计销钉与销钉孔壁间的摩擦,这类约束称为光滑圆柱形铰链约束,简称铰链约束。这类约束的特点是只能限制两物体在垂直于销钉轴线平面内任意方向的相对移动,但不能限制两物体绕销钉轴线的相对转动和平行于销钉轴线的相对移动。因此,铰链的约束反力作用在与销钉轴线垂直的平面内,并通过销钉中心,而方向待定。

三、光滑圆柱形铰链、固定铰支座和轴承约束

两物体分别被钻上直径相同的圆孔并用销钉连接起来,不计销钉与销钉孔壁间的摩擦,这类约束称为光滑圆柱形铰链约束,简称铰链约束。

根据约束的性质,光滑圆柱铰链、固定铰文座和轴承这三种约束可归为一类,统称光滑圆柱铰链约束。

(一) 圆柱铰链和固定铰链支座

如图 1-8 所示的圆柱形铰链只能适用于平面机构或结构。这类约束的特点是只能限



制两物体在垂直于销钉轴线平面内任意方向的相对移动,但不能限制两物体绕销钉轴线的相对转动和平行于销钉轴线的相对移动。因此,铰链的约束反力作用在与销钉轴线垂直的平面内,并通过销钉中心,而方向待定。工程中常用通过铰链中心的相互垂直的两个分力 $\vec{F}_{Ax}$ 、 $\vec{F}_{Ay}$ 表示。

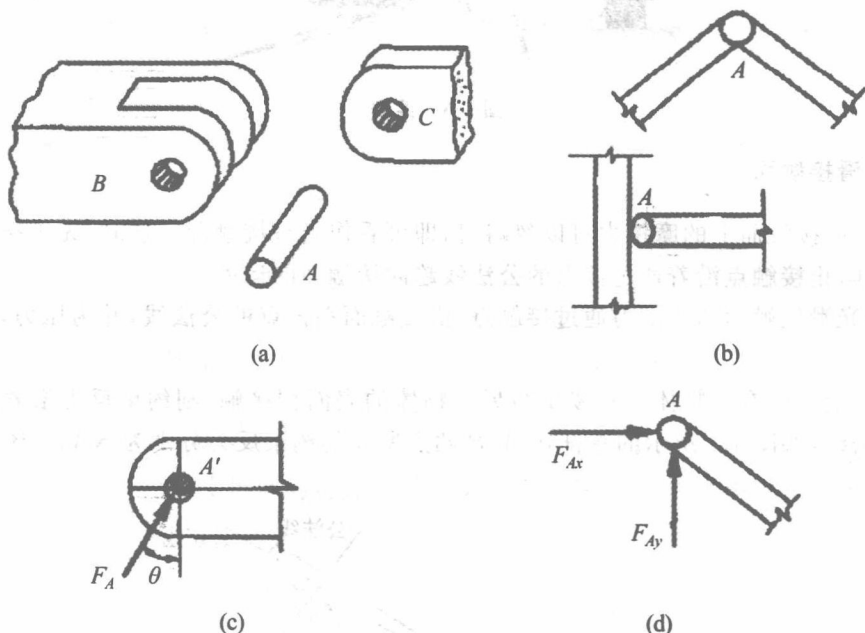


图 1-8 圆柱铰链和固定铰链支座

(二)向心轴承(径向轴承)

图 1-9(a)、(b)所示为轴承装置,可画成如图 1-9(c)所示的简图。轴可在孔内任意转动,也可沿孔的中心线移动;但是,轴承阻碍着轴沿径向向外的位移。忽略摩擦,当轴和轴承在某点 A 光滑接触时,轴承对轴的约束反力 $\vec{F}_A$ 作用在接触点 A ,且沿公法线指向轴心,如图 1-9(a)所示。

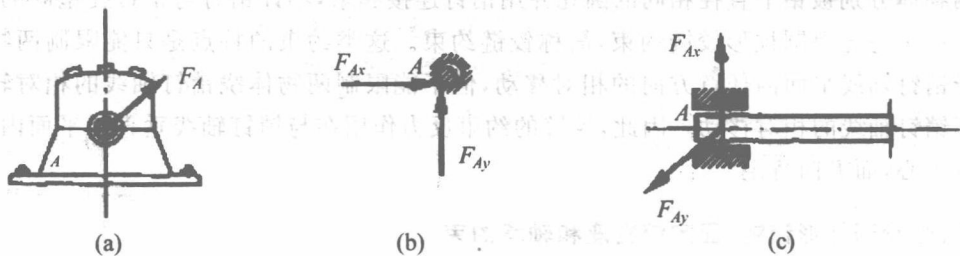


图 1-9 向心轴承(径向轴承)

随着轴所受的主动力不同,轴和孔的接触点的位置也随之不同。所以,当主动力尚未确定时,约束反力的方向预先不能确定。

无论约束反力朝向何方,它的作用线必垂直于轴线并通过轴心。这样一个方向不能预先确定的约束反力,通常可用通过轴心的两个大小未知的正交分力 $\vec{F}_{Ax}$ 、 $\vec{F}_{Ay}$ 来表示,如图 1-9(b)或(c)所示, $\vec{F}_{Ax}$ 、 $\vec{F}_{Ay}$ 的指向暂可任意假定。



四、其他约束

(一)滚动支座

在固定铰支座的底座与支承物体之间安装几个辐轴,就可构成可动铰支座. 又称辊轴支座。它可以沿支撑面移动,允许由于温度变化而引起结构跨度的自由伸长或缩短。显然,滚动支座的约束性质与光滑面约束相同,其约束反力必垂直于支撑面,且通过铰链中心。

(二)球铰链

将固结于物体一端的球体置于球窝形的支座内,就形成了球形铰支座. 简称球铰。这种约束的特点是限制了物体上的球体沿任何方向的移动,但水能限制物体绕球心的转动。若忽略摩擦,球铰链的约束反力必通过球心,但方向待定。

第四节 物体的受力分析和受力图

在工程实际中进行力学研究时,为了求出未知的约束反力,需要根据已知力,应用平衡条件求解。为此,首先要根据待解决的问题,选定须要进行研究的物体,即确定研究对象以及受了几个力,每个力的作用位置和力的作用方向,这种分析过程称为物体的受力分析。

此外,工程上所遇到的物体大都是非自由体,它们相互连接着。为了分析研究对象的受力情况,往往把该研究对象从周围物体中分离出来,单独出其力学简图,称为取分离体。将周围各其他物体对研究对象的全部作用力(包括主动力与约束反力)用力矢表示在该分离体图上,这样的图形称为该研究对象的受力图。这个分析过程称为物体的受力分析。画物体受力图是解决静力学问题的一个重要步骤。

受力分析的步骤如下:

(1)确定研究对象,取分离体;

(2)先画主动力,明确研究对象所受周围的约束,进一步明确约束类型,什么约束画什么约束反力。

(3)必要时需用二力平衡共线、三力平衡汇交等条件确定某些反力的指向或作用线的方位。

受力图的正确性,是分析和解决力学问题的基础。画受力图时须注意如下几点:

(1)必须明确研究对象。画图时根据求解需要,可以取单个物体为研究对象,也可以取由几个物体所组成的系统为研究对象。不同的研究对象的受力图是不同的。此外,受力图只画研究对象的简图和所受的全部力。

(2)正确确定研究对象受力的数目以及每画一力都要有依据,做到不多不漏。力是物体之间相互的机械作用,对每一个力都应明确它是哪一个施力物体施加给研究对象的,决不能凭空产生。同时,也不可漏掉一个力。一般可先画已知的主动力,再画约束反力;凡是研究对象与外界接触的地方,都一定存在约束反力。

(3)正确画出约束反力。一个物体往往同时受到几个约束的作用,这时应分别根据每个约束本身的特性来确定其约束反力的方向,不要画错力的方向,反力要和约束性质相符,物



体间的相互约束力要符合作用与反作用公理。

(4)当分析两物体间相互的作用力时,应遵循作用、反作用关系。若作用力的方向一经假定,则反作用力的方向应与之相反。当画整个系统的受力图时,由于内力成对出现,组成平衡力系,因此不必画出,只需画出全部外力。

例 1-1 作图示 1-10 所示轧路机轧轮的受力图。

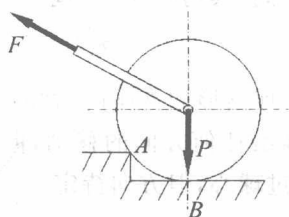


图 1-10 例 1-1 图

解:受力图如图 1-11 所示。

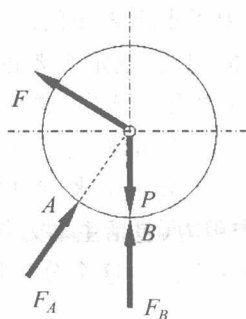


图 1-11 轧路机轧轮的受力图

例 1-2 如图 1-12 所示结构,画 AD、BC 的受力图。

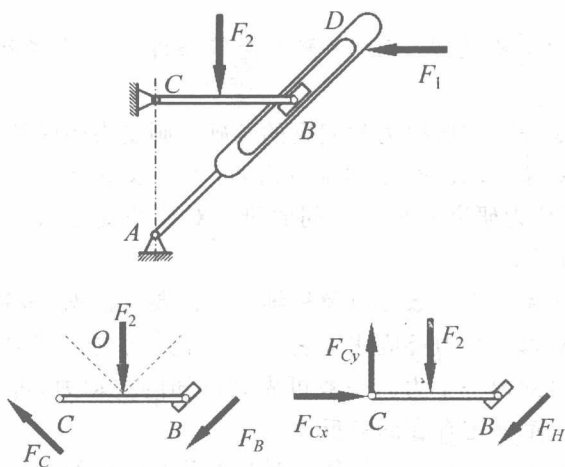


图 1-13 例 1-2 机械结构