

武警学院统编教材



工程力学

GONGCHENG LIXUE

徐文毅 主编



中国人民公安大学出版社

武警学院统编教材

工程力学

主 编 徐文毅

撰稿人 徐文毅 高亚萍 李 贵

中国人民公安大学出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

工程力学/徐文毅主编. —北京: 中国人民公安大学出版社, 2016. 3

武警学院统编教材
ISBN 978-7-5653-2555-7

I. ①工… II. ①徐… III. ①工程力学-武警院校-教材 IV. ①TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 062577 号

武警学院统编教材

工程力学

徐文毅 主编

出版发行: 中国人民公安大学出版社
地 址: 北京市西城区木樨地南里
邮政编码: 100038
印 刷: 北京市庆全新光印刷有限公司

版 次: 2016 年 3 月第 1 版
印 次: 2016 年 3 月第 1 次
印 张: 20
开 本: 787 毫米×1092 毫米 1/16
字 数: 368 千字

书 号: ISBN 978-7-5653-2555-7
定 价: 65.00 元

网 址: www.cppsups.com.cn www.porclub.com.cn
电子邮箱: zbs@cppsup.com zbs@cppsu.edu.cn

营销中心电话: 010-83903254
读者服务部电话 (门市): 010-83903257
警官读者俱乐部电话 (网购、邮购): 010-83903253
教材分社电话: 010-83903259

本社图书出现印装质量问题, 由本社负责退换
版权所有 侵权必究

说 明

教材作为体现教学内容和教学方法的知识载体，是深化教学改革、提高教学质量的重要保证。为满足我院各专业教学需要，我们组织各系（部）教员陆续编写了具有我院专业特色的系列教材。《工程力学》是其中一部。

这套教材是以马克思列宁主义、毛泽东思想、邓小平理论、“三个代表”重要思想和科学发展观为指导，以教育部关于加强教材建设的文件精神、公安部关于教育训练改革的战略部署为依据，以提高教学质量、培养高素质人才为目的，按照学院人才培养方案和教学大纲的总体要求，在认真总结公安现役部队实战经验，充分吸收各学科最新理论成果和相关领域有益经验的基础上，结合公安现役高等教育自身发展规律编写而成的。在内容上，力求正确地阐述各门学科的基础理论、基础知识和基本技能，突出专业特色，贴近部队实际，并注意体现内容的科学性、系统性、适用性和相对稳定性。

本教材由徐文毅任主编。参加撰稿的人员有：高亚萍（绪论，第1~6章）；李贵（第7章、第14章）；徐文毅（第8~13章）。

由于时间仓促，编者水平有限，缺点错误在所难免，恳请读者批评指正，以便再版时修改。

这套教材在编写过程中，得到了上级主管部门、兄弟院校及有关部門的大力支持和帮助，谨在此深表谢意。

武警学院教材建设委员会

2016年1月

目 录

绪 论	1
-----	---

第 1 篇 刚体静力学

第 1 章 刚体静力学引论	5
§ 1-1 刚体静力学模型	5
§ 1-2 静力学基本原理	10
§ 1-3 物体的受力分析与受力图	12
第 2 章 力系的等效与简化	17
§ 2-1 力矩	17
§ 2-2 力系等效定理	19
§ 2-3 力偶与力偶系	22
§ 2-4 一般力系的简化	25
第 3 章 平面力系的平衡	35
§ 3-1 平面力系的平衡方程	35
§ 3-2 平面力系平衡方程的应用	38
§ 3-3 平面静定桁架的静力分析	43
第 4 章 空间力系的平衡	56
§ 4-1 力在空间直角坐标系中的投影	56
§ 4-2 空间力系的平衡方程	58
§ 4-3 空间力系平衡方程的应用	60

第 2 篇 弹性静力学

第 5 章 弹性静力学引论	69
§ 5-1 工程结构与构件分类	70
§ 5-2 弹性静力学的基本假设	70
§ 5-3 弹性体的内力与截面法	71
§ 5-4 弹性体受力与变形特征	74
§ 5-5 应力与应变	74
§ 5-6 杆件变形的基本形式	77

第 6 章 静定结构的内力分析与内力图	81
§ 6-1 基本概念和基本方法	81
§ 6-2 拉、压杆的内力分析与内力图	83
§ 6-3 扭转轴的内力分析与内力图	87
§ 6-4 静定单跨梁的内力分析与内力图	89
§ 6-5 平面刚架的内力分析与内力图	102
第 7 章 简单的弹性静力学问题	108
§ 7-1 杆件在轴向载荷作用下的内力与应力	108
§ 7-2 拉、压杆的变形分析	110
§ 7-3 两种典型材料拉伸和压缩时的应力—应变曲线	114
§ 7-4 常温、静载下材料的力学性能	116
§ 7-5 其他常见工程材料的力学性能	121
§ 7-6 温度对材料力学性能的影响	124
§ 7-7 强度失效与失效控制	126
§ 7-8 杆件在轴向载荷作用下的强度计算	128
第 8 章 杆件截面的几何性质	137
§ 8-1 静矩和形心	137
§ 8-2 惯性矩、极惯性矩、惯性积和惯性半径	140
§ 8-3 惯性矩与惯性积的平行移轴定理	143
§ 8-4 形心主轴、形心主矩与组合截面的惯性矩	144
第 9 章 弹性杆件横截面上的正应力分析	150
§ 9-1 平面弯曲时梁横截面上的正应力分析	150
§ 9-2 斜弯曲时梁横截面上的正应力分析	159
§ 9-3 弯矩与轴力同时作用时杆件横截面上的正应力分析	162
第 10 章 弹性杆件横截面上的切应力分析	171
§ 10-1 受扭圆轴的扭转变形与切应力互等定理	171
§ 10-2 圆轴扭转时横截面上的切应力分析	173
§ 10-3 非圆截面杆扭转时的切应力分析	178
§ 10-4 薄壁截面梁横截面上的切应力分析	180
§ 10-5 实心截面梁横截面上的弯曲切应力分析	182
第 11 章 应力状态与强度设计准则	190
§ 11-1 概述	190
§ 11-2 平面应力状态分析——任意方向面上应力的确定	193
§ 11-3 应力状态中的主应力与最大切应力	197

§ 11-4 复杂应力状态下的应力—应变关系	204
§ 11-5 工程中常用的强度设计准则	208
第 12 章 杆类构件的静载强度设计	224
§ 12-1 设计准则与设计过程	224
§ 12-2 平面弯曲时的强度设计	225
§ 12-3 斜弯曲时的强度设计	235
§ 12-4 弯曲与拉伸或压缩同时作用时的强度设计	237
§ 12-5 圆轴的静载强度设计	239
§ 12-6 提高构件强度的途径	243
第 13 章 杆类构件的位移分析与刚度设计	253
§ 13-1 变形与位移的相依关系	253
§ 13-2 梁位移的计算方法	257
§ 13-3 超静定问题	265
§ 13-4 梁和轴的刚度设计	270
§ 13-5 提高构件刚度的途径	273
第 14 章 压杆稳定性分析与设计	281
§ 14-1 压杆稳定的基本概念	281
§ 14-2 细长压杆的临界力与临界应力	283
§ 14-3 非细长压杆的临界应力	286
§ 14-4 压杆的稳定性设计	289
§ 14-5 提高压杆稳定性的措施	291
附 录 部分型钢规格表	298
主要参考文献	302
部分习题参考答案	303

绪 论

工程力学是既与工程又与力学密切相关的课程。工程力学涉及众多的力学学科分支与广泛的工程技术学科，其包含的内容极其广泛。

1 工程与工程力学

工程力学的应用范围十分广泛，它几乎根植于国民经济的各个产业门类。20 世纪以前，推动近代科学技术与社会进步的蒸汽机、内燃机、桥梁、铁路、船舶、兵器等，无一不是在力学知识积累的基础上产生与发展起来的。20 世纪产生的许多高新技术，如高层建筑（图 1）、海洋平台、大跨度桥梁（图 2）、机器人、航空航天器（图 3）、高速列车、大型水利工程（图 4）、压力容器（图 5）、钢结构（图 6）等更是在工程力学的指导下得以实现并不断发展完善



图 1 高层建筑



图 2 大跨度桥梁



图 3 航空航天器



图 4 大型水利工程

的。随着国民经济的迅速发展,在生产建设的各个领域产生了许多新的复杂的工程技术问题。这些问题有的可以直接用力学知识解决,有的则需要力学知识和其他专业知识结合起来共同解决。



图5 压力容器



图6 钢结构

2 工程力学的研究对象和内容

工程力学是研究宏观物质的机械运动规律的学科,其所包含的内容非常广泛,但作为消防工程专业和抢险救援指挥与技术专业的一门专业基础课,在学时有限的前提下,为了适应专业需要,更好地发挥其基础性和专业服务性的双重作用,本教材所讨论的“工程力学”只包含“刚体静力学”和“弹性静力学”两部分。“刚体静力学”研究作用在平衡物体上的力及其相互关系,内容包括物体的受力分析、力系的简化和物体在力系作用下的平衡规律。“弹性静力学”研究物体(主要是构件)在外力作用下的变形与破坏(或失效)的规律,为合理设计构件提供有关强度、刚度与稳定性分析的基本理论与方法。

3 工程力学的研究方法

工程力学的研究方法有理论分析方法和实验分析方法。

理论分析方法有两种,一是研究物体的运动及作用在物体上的力与运动之间的关系时采用的。在建立力学模型的基础上,根据物体机械运动的基本概念及基本原理,应用数学演绎的方法,确定物体的运动规律以及运动与力之间关系的定理与方程。二是研究物体的变形及作用在物体上的力与变形之间的关系时采用的。通过建立在实验基础上的简化与假定,应用平衡、变形协调与物性关系,确定变形体受力后的变形与位移以及由于变形引起的内力分布规律。

实验分析方法大致可以分为以下几种类型:

(1) 基本力学量的测定实验,包括位移、速度等的测定。

(2) 材料的力学性能实验,通过实验测定不同材料的弹性常数(如弹性模量)、材料的物性关系等。

(3) 综合性与研究性实验,一方面研究工程力学的基本理论应用于实际问题时的正确性与适用范围;另一方面研究一些基本理论难以解决的实际问题,通过实验建立合适的简化模型,为理论分析提供必要的基础。

4 工程力学的学习目的

工程力学作为消防工程专业和抢险救援指挥与技术专业的必修课,是一系列后续课程——流体力学、建筑技术基础、建筑结构与耐火设计、建筑防火、建筑结构安全基础、抢险救援技术等的基础。只有学好工程力学,才能将基础课与专业课有机结合,使基础知识更好地应用到工程实际,使学员的专业知识更扎实深入,具有较强的独立获取知识的能力和初步的科学研究能力,才能具备消防监督检查、消防设计审核、灾害事故应急救援、消防指挥、组织执勤训练等能力,才能适应消防事业的发展和岗位转换,实现培养目标。通过该课程的学习,应该达到以下目的:

- (1) 使学员掌握工程力学的基本概念及求解静力结构的基本原理和方法。
- (2) 培养学员具有对构件作强度、刚度计算和稳定性校核的能力。
- (3) 培养学员应用工程力学的理论与方法解决工程实际问题的能力。
- (4) 培养学员的学习能力、辩证思维能力和理论联系实际的能力,以及在学习、工作中的严谨作风。

第 1 篇

刚体静力学

第 1 章 刚体静力学引论

静力学是研究刚体在力系作用下的平衡规律的科学，其主要研究三方面的内容：物体的受力分析、力系的简化和力系的平衡。

本章主要介绍刚体的静力学模型、静力学的基本原理、物体的受力分析方法与画受力图的步骤，目的是使学员对刚体静力学有一个初步的、比较全面的了解。

§ 1-1 刚体静力学模型

模型是指实际物体与实际问题的合理抽象与简化。工程力学与物理学中的力学部分相比，不同之处在于它所涉及的研究对象不再仅限于高度抽象的质点和简单刚体，而拓宽为工程中的具体构件和实际结构。在解决工程实际对象的力学问题时，需要对其进行合理的抽象和简化，抓住起主要作用的因素，摒弃某些次要因素，理想化为力学模型。

刚体静力学模型包括三个方面：物体的合理抽象与简化；受力的合理抽象与简化；接触与连接方式的合理抽象与简化。

1 物体的理想化——刚体

刚体是指在力的作用下不变形的物体。自然界和工程实际中的物体在受到力的作用时，其内部各质点间的相对距离总要发生改变，即发生变形。但由于研究目的不同，对它们的简化抽象也不同。当被研究对象的运动范围远远大于其本身的大小，物体形状对运动的影响可以忽略不计时，可以将该物体简化为有质量而无几何尺寸的质点。当物体的变形很微小，对研究它的运动不起主要作用，如果略去不计，对研究结果的精确度无显著影响，却可以使问题的研究大为简化时，就忽略物体的变形，将其看作**刚体**。第一篇“刚体静力学”采用的力学模型就是刚体。

2 受力的理想化——集中力

力是物体相互间的一种机械作用，这种机械作用的效应主要有两方面：一是使物体的机械运动状态发生改变；二是能引起物体的变形。力使物体运动状态发生变化的效应称为力的**运动效应**；力使物体发生变形的效应称为力的**变形**

效应。力对刚体只有运动效应（包括平动、转动以及此效应的特例——平衡），对弹性体才有变形效应。

力对物体的作用效应取决于力的三要素：大小、方向和作用点。力的三要素说明，力可以用一带箭头的线段来表示，线段的长度 AB 按一定比例表示力的大小，线段的方位和箭头指向表示力的方向，线段的始端 A 表示力的作用点，如图 1-1a 所示。力的三要素中任何一个发生改变，则力对物体的作用效应就会改变。

力是**矢量**。由于力的作用点是力对物体作用的三要素之一，我们规定表示力的矢量只能将其始端放置在作用点 A 上，这种矢量称为**定位矢量**。因此，力是**定位矢量**。

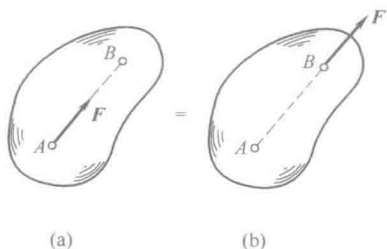


图 1-1 力的可传性

但是对于刚体而言，作用在刚体上的力沿其作用线滑移到刚体上的另一点并不改变它对刚体的作用效应，如图 1-1 所示。这种性质称为力的**可传性**。可沿作用线滑动的矢量称为**滑动矢量**，所以作用在刚体上的力是**滑动矢量**。

图 1-2a 所示刚性环与图 1-2b 所示柔性环均在二力作用下平衡，即 F 和 F' 大小相等，方向相反。力 F 沿其作用线滑移前后对刚性环的运动效应相同，但对柔性环的变形效应差别很大。这说明力的可传性只适用于刚体模型。

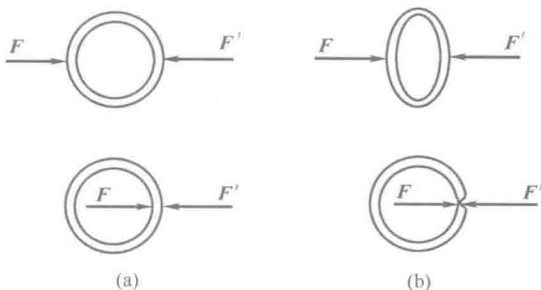


图 1-2 力滑移前后刚性环与柔性环的效应对比

在物理学中，一般认为力是作用在一点上的，这种力称为**集中力**。实际上，任何物体间的相互作用力都分布在一定的范围内，这种力称为**分布力**。例如，两物体接触时，其相互间的压力分布在整個接触面上，重力分布在物体的整个体积上。集中力在实际中是不存在的，它是分布力的理想化模型。当分布力的作用面积很小时，为了分析计算方便，可以将分布力简化为作用于一点的

合力，称力集中力。

如图 1-3a 所示，静置在路面上的汽车轮胎，由于轮胎比路面软，其受路面的力作用在宽度为 b 的小面积内。当以汽车整体为研究对象时， b 相对于汽车的轮距等尺寸来说非常小，可忽略不计，因此可用集中力 F_R 代替。如图 1-3b 所示，水坝受到的静水压力分布在坝与水的接触面上。根据物理学知识，压强沿水的高度线性变化。在近似计算时，可将坝体简化为单位长度的变截面梁，静水压力简化为线分布载荷，如图中虚线三角形所示。此分布载荷的合力为作用在三角形重心上的集中力 F_R 。

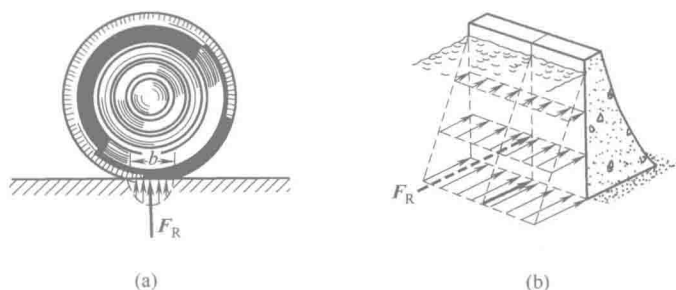


图 1-3 集中力是分布力的理想化模型

图 1-4 所示的绳轮结构中，绳与轮之间的正压力如图中 b、c 所示，一般不简化为集中力。

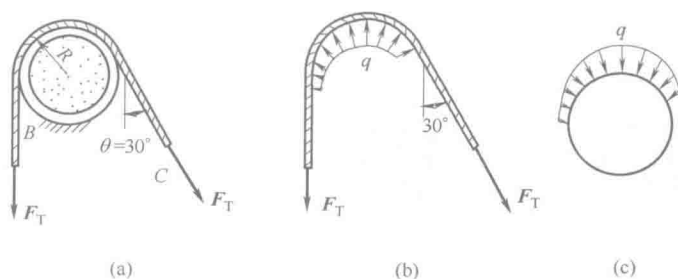


图 1-4 绳与轮间的正压力分布

3 物体间接触性质和连接方式的理想化——理想刚性约束

实际物体的运动有两种可能：一种是在空间的运动没有受到其他物体的限制，如飘浮的气球、飞行的飞机、出膛的炮弹等，这类物体称为自由体；一种是在空间的运动受到其他物体的限制，如轨道上的机车、轴承中的轴、桌面上

的书本等,这类物体称为**非自由体**。对非自由体起限制作用的物体称为**约束**。如轨道是机车的约束,轴承是轴的约束,桌子是书本的约束。约束物体对研究对象的约束力,称为研究对象受到的**约束反力**或**约束力**。使研究对象产生运动趋势的力称为**主动力**或**载荷**,如物体的重力、结构所受的风力、水压力等。研究对象受到的力可分为约束反力和主动力,约束反力由主动力引起并随主动力的改变而改变。

研究非自由体的运动时,通常主动力是已知的,约束反力的大小、方向和作用位置决定于被约束体和约束体接触面的物理性质和连接方式。接触面的物理性质分为绝对光滑和存在摩擦。绝对光滑是一种理想化的情况,这种情况下的约束是理想约束。当被约束体与约束体间为刚性接触时称为**理想刚性约束**。下面介绍几种常见的理想刚性约束。

3-1 光滑接触面

当物体与约束体间的接触面非常光滑,摩擦可以忽略不计时,就可以简化为光滑接触面约束。光滑接触面约束只能阻碍物体沿两接触面的法线方向往约束体内部的运动,不能阻碍它在切线方向的运动。所以光滑接触面约束的约束反力作用在接触点处,沿两接触面的公法线方向指向受力物体,记为 F_N ,如图 1-5 所示。

在桥梁、屋架等结构中,经常采用辊轴约束,如图 1-6 所示。这种约束用几个圆柱形滚轮支承结构,以便当温度变化,引起结构物在跨度方向伸缩时,滚轮可有微小滚动。所以,辊轴也是一种光滑接触面约束,其约束反力 F_N 及约束符号如图 1-6 所示。

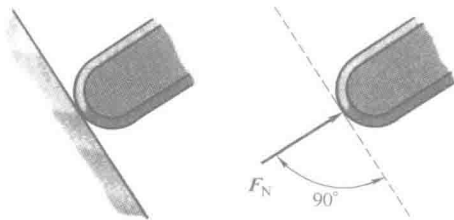


图 1-5 光滑接触面约束

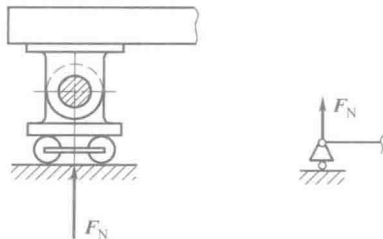


图 1-6 辊轴约束

3-2 光滑圆柱铰链

在两个物体上分别穿直径相同的圆孔,再将一直径略小于孔径的圆柱体(销钉)插入该两物体的孔中,便构成了圆柱铰链。圆柱铰链包括固定圆柱铰(图 1-7)和活动圆柱铰(图 1-8)。被约束物体既可沿销钉轴线方向运动,又

可绕销钉轴线转动,但却不能沿垂直于销钉轴线的方向脱离销钉。若不计摩擦,物体与销钉为点接触。由于接触点在圆上的位置随物体所受的主动动力而变,故约束反力 $\mathbf{F}_R$ 为大小和方向均未知的二维约束力,一般用两个分量表示: $\mathbf{F}_R = (F_x, F_y)$ 。

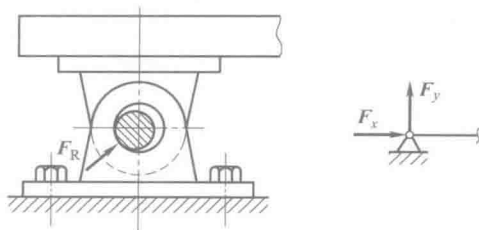


图 1-7 固定圆柱铰

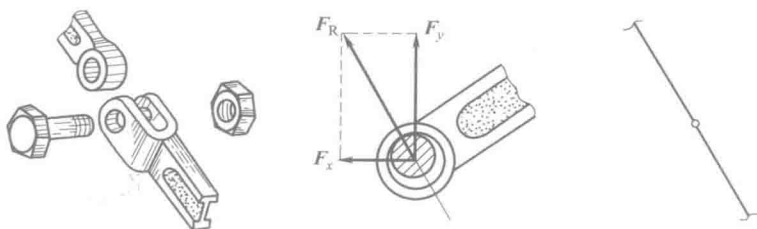


图 1-8 活动圆柱铰

支承传动轴的向心轴承也是一种固定铰链支座约束,如图 1-9 所示。

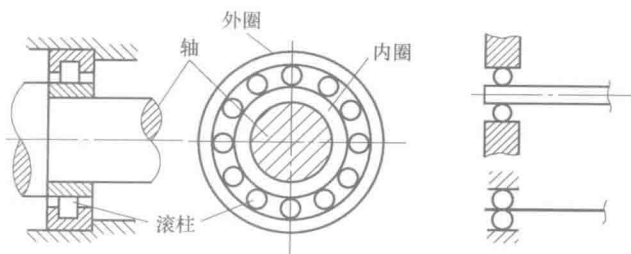


图 1-9 向心轴承

3-3 光滑球形铰链

物体的一端为球形,能在固定的球窝中转动,这种约束称为光滑球形铰链,简称为球铰,其结构简图如图 1-10 所示。被约束物体上的球头与约束物体上的球窝连接,使被约束物体只能绕球心做空间转动,而不能有沿空间任何方向的移动。因此,球铰的约束反力为空间力,一般用三个分量表示: $\mathbf{F}_R = (F_x, F_y, F_z)$ 。

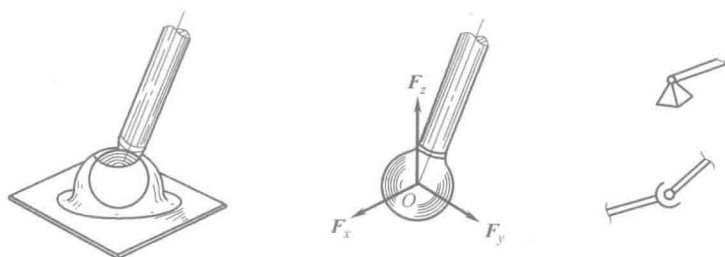


图 1-10 球铰

3-4 止推轴承

止推轴承除了与向心轴承一样具有作用线不固定的径向约束力外, 由于限制了轴的轴向运动, 还有沿轴线方向的约束力, 如图 1-11 所示。

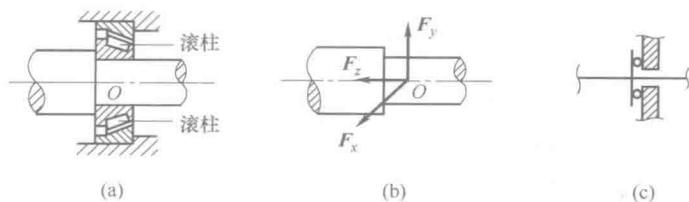


图 1-11 止推轴承

4 理想柔性约束

绳子、皮带、链条、缆索等都可理想化为柔性约束(柔索)。这种约束的特点是其产生的约束力只能是沿柔索方向的拉力, 而不能是压力。柔性约束的约束反力作用在与物体的连接点上, 作用线沿柔索, 指向背离物体, 如图 1-12 所示。

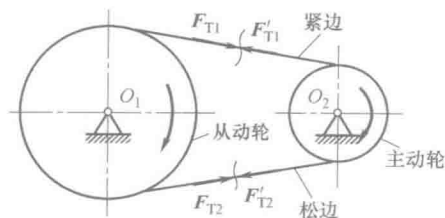


图 1-12 皮带轮上的皮带受力

工程上还有一些其他约束形式, 将在以后的章节中进一步讨论。

§ 1-2 静力学基本原理

1 力与力系

如果两个力系分别作用于同一物体其作用效应相同, 则这两个力系称为等