

绪 论

1 理论力学的研究对象和内容

理论力学是研究物体机械运动一般规律的科学。**机械运动**是指物体在空间的位置随时间的变化。在客观世界中,存在各种各样的物体运动,机器的运转、车辆的行驶、人造卫星的飞行、建筑物的振动等,都是机械运动。在物质的各种运动形式中,机械运动是最简单、最基本也是最常见的一种运动。物质的各种运动形式在一定条件下可以相互转化,而且在高级和复杂的运动中,往往存在着简单的机械运动。理论力学主要研究宏观可见的机械运动,主要是指工程中常见的各种机械运动。平衡是机械运动的特殊情况。

理论力学研究的内容是速度远小于光速的宏观物体的机械运动,它以伽利略和牛顿总结的基本定律为基础,属于**古典力学的范畴**。对于运动速度接近光速的基本粒子的运动,则必须用相对论和量子力学的观点才能完善地予以解释,这不是理论力学研究的基本范畴。虽然古典力学有局限性,但是经过长期的实践证明,不仅在一般工程中,就是在一些尖端的科学领域中(如火箭、宇宙航行等),一些关键问题用古典力学来解决也能够保证足够的精确性,所以古典力学在工程领域中仍有很大的实用意义,并且还在不断地发展。

从知识体系上讲,理论力学中的力学定义、定理和基本方程也适用于其他相关学科,是整个力学研究的重要基础。在土木、交通、航空航天、电力、机械等重要工程领域中,大量的力学问题需要解决,大部分问题都涉及理论力学的研究内容,因此,理论力学是现代工程技术的重要理论基础。同时,理论力学还具有方法论的作用,它与其他专业知识相结合,可以指导解决实际工程技术问题,促进科学技术和社会经济的发展。

理论力学研究内容包括以下三个部分:

静力学: 主要研究物体在力系作用下的平衡规律,同时也研究物体受力的一般性质以及力系的简化方法。

运动学: 研究物体运动的几何性质(如轨迹、速度和加速度等),而不研究引起物体运动的物理原因。

动力学: 研究受力物体的运动变化与作用力之间的关系。

2 理论力学的研究方法

科学就是认识客观世界的过程,任何正确的研究方法一定要符合辩证唯物主义的认识论,理论力学的研究和发展也必须遵循这个规律。通过观察生活和生产实践中的各种现象,

进行无数次的科学实验,经过分析、综合和归纳,总结出力学最基本的概念和定律。如“力”和“力矩”的概念、摩擦定律以及动力学三大定理等,都是在大量实践和实验的基础上经过分析、综合和归纳得到的。

理论力学研究的一般方法是在对事物观察和实验的基础上,通过抽象化建立力学模型,形成概念,在基本规律的基础上,经过逻辑推理和数学演绎,建立理论体系。客观事物总是复杂多样的,通过对大量来自实践的资料研究,根据所研究问题的性质,抓住主要的、起决定作用的因素,撇开次要的、偶然的因素,深入事物的本质,了解其内部联系,这就是力学中普遍采用的抽象化方法。例如,钢索在静力学研究中忽略实际物体受力后的变形,建立在力的作用下物体形状、大小均不改变的刚体模型;但是在动力学研究中必须考虑其弹性特点,则刚化模型转换为变形体。工程中的结构究竟应该作为质点还是作为刚体,主要决定于所讨论的问题,而不完全决定于物体本身的几何结构。例如地球半径几何尺寸很大,但当研究地球在绕太阳公转的轨道上的运行规律时,可以将其看作质点,而当考察地球的自转时,却必须看作刚体。这种抽象化、理想化的方法,一方面简化了所研究的问题,另一方面也更深刻地反映出事物的本质。

对于实际系统,将其抽象为质点或质点系,再对力学模型进行准确的受力、运动分析,然后应用动力学知识建立具体力学方程,将实际系统转化为一个数学描述,充分体现出数学在理论力学学习中的重要性。随着近代计算机的发展和普及,数学不仅能完成力学问题中大量繁杂的数值计算,而且在逻辑推理、公式推导等方面也是极有效的工具。从实践到理论,再由理论回到实践,通过实践进一步补充和发展理论,然后再回到实践,如此循环往复,理论力学和所有的科学一样,沿着这条道路不断地向前发展。

理论力学就是在古典力学理论指导下,经过长期反复的实践,深化和提高,逐步归纳总结出来的一个力学知识体系。这个体系是经过长期检验、符合人们的认知过程的,并且在新技术不断更新的今天,理论力学仍然能够指导人们不断地改造世界,推动技术不断向前发展。

3 学习理论力学的目的

学习理论力学的主要目的是掌握机械运动的规律,在生产实践中应用科学的规律,解决工程中各种力学问题。工程问题涉及面极其广泛,从土建、水利工程、机械制造,到人造卫星、宇宙飞船的发射和运行,这些复杂的多学科交叉系统,力学思想和方法论在解决关键问题中占有重要的位置。另外,理论力学的基本理论又是材料力学、结构力学、弹性力学、流体力学、振动理论、机械原理等的学习基础,这些课程中的理论推导和计算都经常用到理论力学的基本原理和方法,因此,理论力学也是专业基础课,只有打好基础,将来才能在其他学科中有所创造和发展。

理论力学具有方法论的作用,理论力学来源于实践又服务于实践,既抽象又紧密联系实际,而且系统性和逻辑性很强,这对培养学生建立唯物主义世界观、逻辑思维和解决问题的能力起着重要的作用。理论力学又是指导工科专业的学生从数学建模到指导工程实际问题的初始阶段。通过理论力学的学习,可初步懂得如何将工程问题简化为数学问题,并应用理论力学基本原理来解决生产实际问题,从而为今后从事科学研究工作打下基础。

第1篇 静力学

理论力学是研究物体机械运动普遍规律的学科,而静力学是研究在力的作用下物体的平衡规律。**平衡**是指物体相对于惯性参考系处于静止或匀速直线运动的情况,这是物体运动的一种特殊情形。地面上的静物,如桥梁、堤坝、房屋建筑以及沿直线轨道匀速行驶的火车等,都是平衡的实例。

静力学研究的主要问题:

(1) 物体的受力分析

物体的受力分析即分析物体共受几个力以及每个力的作用位置、大小和方向。分析物体所受的力,画出它的受力图,是解决静力学问题的重要步骤。

(2) 力系的简化及其运算

所谓力系的简化就是将原力系用一个与之等效的、更为简单的力系来代替。这时,这两个力系互称等效力系。

(3) 刚体力系的平衡

当物体处于平衡状态时,作用在物体上的各种力系必须满足一定的条件。

静力学从基本公理出发,借助数学工具进行演绎和推理,得出力系简化和平衡的系统理论和各种计算方法,这些结论和方法是研究动力学、材料力学、结构力学以及其他力学学科和相关工程学科的重要基础和工具。

刚体和**力**都是力学中最基本的概念,现分别加以说明。

(1) 刚体

刚体是一个理想的力学模型。刚体是指在力的作用下形状和大小都始终保持不变的物体;或者说,受力时刚体内任意两点间的距离保持不变。实际上物体在受力作用时总会有变形,但只要变形很小而不影响所研究问题的实质,就可以把这些物体看做刚体。静力学以刚体为研究对象,所以又称为刚体静力学。

(2) 力

力是物体间相互的机械作用,这种作用使受力物体的形状和运动状态发生改变。引起物体变形的效应称为内效应,引起物体运动状态发生改变的效应称为外效应。因为理论力学是以刚体为研究对象,所以它研究的是力的外效应。

力的作用效应决定于力的三要素:力的大小、力的方向、力的作用位置或作用点。力是一个矢量,用 $\boldsymbol{F}$ 表示。本书中矢量都用粗斜黑体字母表示,而同字母的细斜体字母表示该矢量的模。在国际单位制(SI)中,力的单位为 N(牛顿)。

力的作用位置一般来说是物体的一部分面积或体积。若作用面积或体积很小时,可抽象为点,作用在此点的力称为集中力,否则称为分布力。分布力的大小用力的集度表示。例如,重力是体积分布力,其大小用重力集度 γ 表示,单位为 N/m^3 或 kN/m^3 ; 房屋屋面的雪

荷载可以简化为面积分布力,其单位为 N/m^2 或 kN/m^2 ; 楼板传给梁的力可以简化为线分布载荷,其单位为 N/m 或 kN/m 。

作用于同一物体或物体系的一群力称为**力系**。力系有各种分类,比如按其作用线的空间关系可分为**平面力系**和**空间力系**; 按其作用线的相互关系可分为**汇交力系**、**共线力系**、**平行力系**和**任意力系**。这些力系将在后边的章节中分别介绍。

静力学在工程中有广泛的应用,例如结构物的设计常常需要先作静力分析。另外静力学关于力的性质及运算方法也是动力学研究的基础。

静力学公理和物体的受力分析

1.1 静力学公理

静力学公理是人们在长期的生活和生产中经过反复的观察和实践总结出来的客观规律,它正确地反映了作用于物体上力的基本性质。静力学中所有的定理和结论都是由这几个公理推演出来的,这些公理已为大量的实验、观察和实践所证实。

公理一 二力平衡原理

刚体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,且作用在同一条直线上,如图 1-1 所示。

该公理阐述了静力学最简单力系的平衡条件。这个公理对刚体来说是必要和充分的,但对于变形体就不是充分的。例如,软绳的两端受两个等值、反向的拉力可以平衡,但受两个等值、反向的压力时就不能平衡。

根据二力平衡原理,在两个力作用下处于平衡的杆件(构件)称为二力杆(构件)。

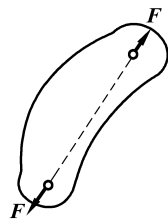


图 1-1

公理二 力的平行四边形法则

作用在物体上同一点的两个力可以合成为一个合力,合力的作用点也在该点,合力的大小和方向由这两个力为边构成的平行四边形的对角线确定,如图 1-2(a)所示。或者说,合力矢等于这两个力矢的几何和(矢量和),即

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

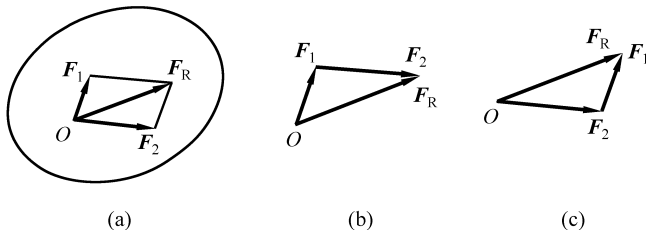


图 1-2

应用此公理求两汇交力合力的大小和方向(即合力矢)时,可由任一点 O 起,另作一力三角形,如图 1-2(b)、(c)所示。力三角形的两个边分别为 F_1 和 F_2 ,则力矢和为第三边 F_R ,即代表合力矢,而合力的作用点仍在汇交点 O 。

这个公理表明了最简单力系的简化规律,它是复杂力系简化的基础。

公理三 加减平衡力系原理

力系作用于物体上而不改变其运动状态,称该力系为平衡力系。如果两个力系分别作用于同一个物体上的效应相同,则这两个力系称为等效力系。

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,也就是说,前后两个力系为等效力系,这就是加减平衡力系原理。这个公理也只适用于刚体。对变形体来说,增加或减去一组平衡力系,可能会改变变形体各处的受力状态,将引起其内、外效应的变化。

由公理二、三可导出下面的重要推论。

推论一 力的可传性

作用于刚体的力,它的作用点可以沿其作用线在刚体内任意移动,而不改变它对该刚体的作用。

证明: 设在刚体上点 A 作用着力 F ,如图 1-3(a),根据加减平衡力系原理,可在力的作用线上任取一点 B 并加上两个相互平衡的力 F_1 和 F_2 ,使 $F = -F_1 = F_2$,如图 1-3(b)所示,则 F 和 F_1 构成一对平衡力系。再根据加减平衡力系原理,可将力 F 和 F_1 同时去掉,如图 1-3(c)所示。这样,得到的新力系与原力系等效,也就是说,力 F_2 就是原来的力 F ,只不过作用点沿着其作用线由点 A 移动到了点 B 而已。

由此可见,对于刚体来说,力的作用点已不是决定力的作用效果的要素,它已被作用线所代替。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。

作用于刚体上的力可以沿着作用线移动,这种矢量称为滑动矢量。

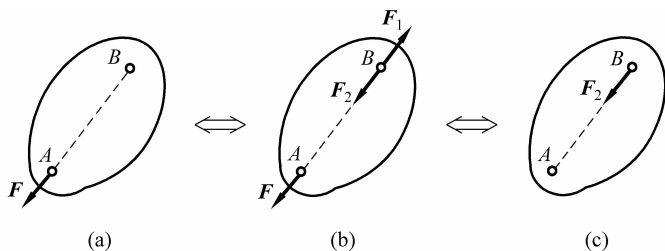


图 1-3

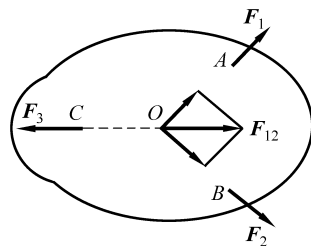


图 1-4

推论二 三力平衡汇交定理

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。

证明: 如图 1-4 所示,在刚体的 A 、 B 、 C 三点上,作用三个相互平衡的力 F_1 、 F_2 、 F_3 。根

据力的可传性,将力 F_1 和 F_2 移到汇交点 O ,然后根据力的平行四边形规则,得合力 F_{12} ,则力 F_3 应与 F_{12} 平衡。由于两个力平衡必须共线,所以力 F_3 必定与力 F_1 和 F_2 共面,且通过力 F_1 与 F_2 的交点 O 。于是推论得证。

公理四 作用和反作用定律

作用力和反作用力总是同时存在,两力的大小相等,方向相反,沿着同一直线,且分别作用在两个相互作用的物体上。

这个公理概括了物体间相互作用的关系,表明作用力和反作用力总是成对出现的。

下面举一个实例来说明。如图 1-5(a)所示,绳索悬吊一重物,重物的重量为 P 。绳索受到的拉力为 F_T ,如图 1-5(b)。此外,重物受到重力 P 和绳索拉力 F'_T 的作用,如图 1-5(c)。其中, F_T 与 F'_T 是作用力和反作用力关系,即 $F_T = -F'_T$ 。作用力和反作用力用同一字母表示,但其中之一在字母的右上方加一“'”表示。

公理五 刚化原理

当变形体在已知力系作用下处于平衡时,如将此变形体变为刚体(刚化),则平衡状态保持不变。

这个公理提供了把变形体看作刚体模型的条件。处于平衡状态的变形体,我们总可以把它视为刚体来研究,这就建立了刚体力学与变形体力学间的联系。

必须指出,刚体的平衡条件对于变形体来说只是必要条件,而非充分条件。如图 1-6 所示,绳索在等值、反向、共线的两个拉力作用下处于平衡,如将绳索刚化成刚体,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,这时绳索就不能刚化为刚体。但刚体在上述两种力系的作用下都是平衡的。

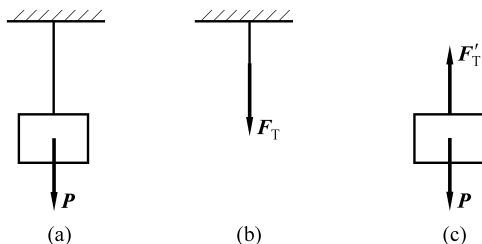


图 1-5

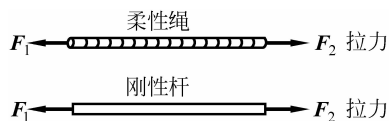


图 1-6

由此可见,对于变形体的平衡来说,除了满足刚体静力学的平衡条件外,还应满足与变形体的物理性质有关的某些附加条件。

静力学全部理论都可以由上述五个公理推证得到,如前述的推论一和推论二。

1.2 约束与约束力

力学研究的对象有的不受什么限制可以自由运动,如在空中可以自由飞行的飞机、导弹等,像这些凡是可以在空间作任意运动的物体称为**自由体**。相反,有些物体在空间的位移却

受到一定的限制,如绳子悬挂而不能下落的重物、支撑于墙上而静止不动的屋架、机车受铁轨的限制只能沿轨道运动等,位移受到一定限制的物体称为**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,绳子对于重物,墙对于屋架,铁轨对于机车等,都是约束。

既然约束阻碍着物体的位移,也就是约束能够起到改变物体运动状态的作用,所以约束对物体的作用实际上就是力的作用,这种力称为**约束力**。因此,约束力的方向必须与该约束所能够阻碍的位移方向相反。应用这个准则,可以确定约束力作用线的方向。至于约束力的大小则是未知的。在静力学问题中,约束力和物体受的其他已知力(称**主动力**)组成平衡力系,因此可用平衡条件求出未知的约束力。

下面介绍几种在工程中常遇到的简单的约束类型和确定约束力方向的方法。

1. 由柔软的绳索、链条或胶带等构成的约束

细绳吊住重物,如图 1-5(a)所示。柔软绳索能够承受较大的拉力,但抵抗压缩和弯曲的能力很差,可以认为绳索只能承受拉力,所以它给物体的约束力也只能是拉力。因此,绳索对物体的约束力作用在接触点,方向沿着绳索背离物体,通常用 $\boldsymbol{F}$ 或 $\boldsymbol{F}_T$ 表示这类约束力。

而如图 1-7 所示的带轮传动机构中,皮带虽有紧边和松边之分,但两边的皮带所产生的约束力都是拉力。

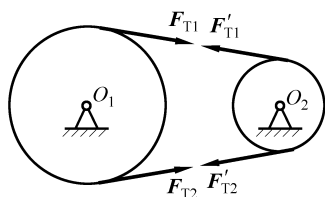


图 1-7

2. 具有光滑接触表面的约束

当两物体接触面之间的摩擦力很小时,可以忽略不计看做光滑接触面。因为支承面是光滑的,所以物体可以自由地沿接触面滑动或离开支承面,但不能沿物体和接触面的公法线方向压向接触面。因此,光滑接触面对物体的约束力作用在接触点,方向沿着接触面在该点的公法线,并指向受力物体。这种约束力称为**法向约束力**,通常用 $\boldsymbol{F}_N$ 表示,如图 1-8 中的 $\boldsymbol{F}_{NA}$ 、 $\boldsymbol{F}_{NB}$ 、 $\boldsymbol{F}_{NC}$ 。

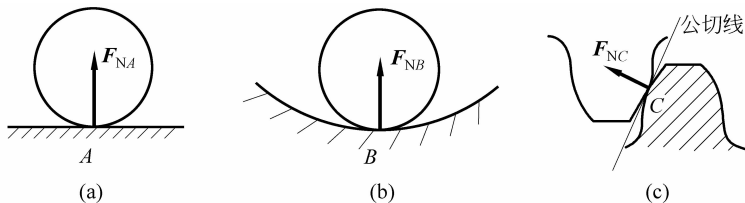


图 1-8

3. 向心轴承(径向轴承)

轴承约束是工程中常用的支承形式,图 1-9(a)即为轴承的示意图。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,轴承对轴的约束力 $\boldsymbol{F}_A$ 作用在接触点 A,且沿公法线指向轴心。

但是,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,约束力的方向预先并不能确定。但是,无论约束力朝向何方,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力通常可用通过轴心的两个大小未知的正交分力 F_{Ax} 、 F_{Ay} 来表示,如图 1-9(b)或(c)所示, F_{Ax} 、 F_{Ay} 的指向暂可任意假定。

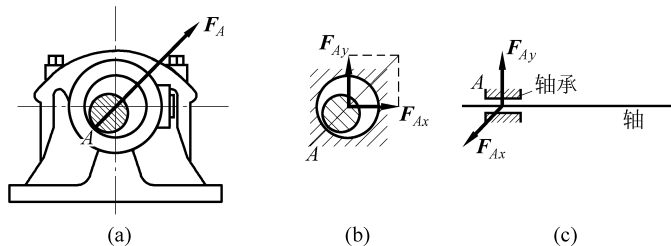


图 1-9

4. 圆柱铰链和固定铰链支座

圆柱铰链亦称铰链或简称铰,在工程结构和机械设备中常用来连接构件或零部件。理想的圆柱铰链是由圆柱形销钉 B 将两个钻有同样大小孔的构件 A 、 C 连接在一起,如图 1-10(a)所示。门窗的合叶、活塞销都是常见的铰链。圆柱铰链的简图如图 1-10(b)所示。销钉与圆孔的接触面在一般情况下可以认为是光滑的,则这种约束只能限制物体在垂直于销钉轴线的平面内任意方向的运动,但不能限制物体绕销钉的转动和沿其轴线方向的滑动。因此,铰链的约束力作用在圆孔与销钉的接触点上,垂直于销钉轴线并通过销钉中心,而它的方向待定,如图 1-10(c)所示。而在实际应用中,通常用两个互相垂直且通过铰链中心的分力 F_{Bx} 、 F_{By} 来代替,两个分力的指向可以任意假定,其正确性可根据计算的结果来判定。

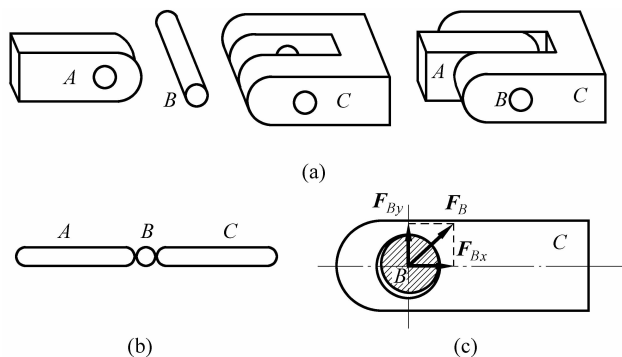


图 1-10

在工程实际中,常用光滑圆柱销钉把结构物或构件与支座连接,并把支座固定在支承物上,这样构成的支座称为固定铰链支座,简称铰支座,如图 1-11(a)所示。这种支座的约束性质与圆柱铰链相同。铰支座的简图及其约束力的表示方法分别如图 1-11(b)、(c)所示。

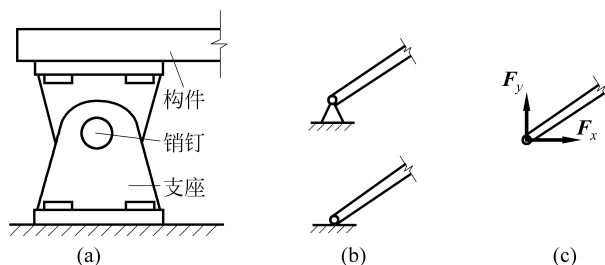


图 1-11

5. 滚动支座

在工程实际中,为了保证构件变形时既能发生微小的转动又能发生微小的移动,可将结构物或构件的铰链支座与光滑支承面之间装几个辊轴,构成滚动支座,又称辊轴支座,如图 1-12(a)所示,其简图如图 1-12(b)所示。如略去摩擦,这种支座只能限制构件在与支座接触处向着支承面或离开支承面的移动,而不能限制构件沿着支承面的移动或绕着销钉的转动。因此,滚动支座的约束性质与光滑面约束相同,其约束力必垂直于支承面且通过铰链中心。通常用 F_N 表示其法向约束力,如图 1-12(c)所示。在桥梁和屋架中,滚动支座是非常常见的。

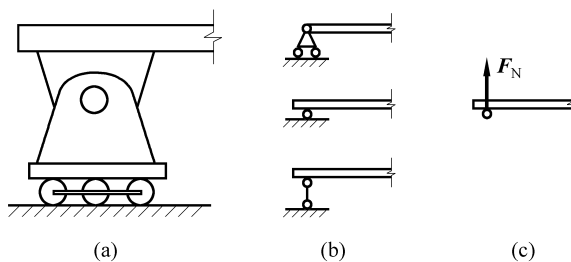


图 1-12

6. 光滑的球铰链

在空间问题中会用到球铰链。这种约束是由固连于物体 B 的光滑圆球 A 嵌入物体 C 上的球壳而构成的,这种约束称为球铰链,如图 1-13(a)所示。它使构件的球心不能有任何位移,但构件可绕球心任意转动。若忽略摩擦,与圆柱铰链分析相似,其约束力应是通过球心但方向不能预先确定的一个空间力,可用三个正交分力 F_{Ax} 、 F_{Ay} 、 F_{Az} 表示,其简图及约束力如图 1-13(b)所示。

7. 止推轴承

止推轴承与径向轴承不同,它除了能限制轴的径向位移以外,还能限制轴沿轴向的位移。因此,它比径向轴承多一个沿轴向的约束力,即其约束力有三个正交分量 F_x 、 F_y 、 F_z 。止推轴承的简图及其约束力如图 1-14 所示。