

普通高等学校规划教材

应用理论力学

YINGYONG LILUN LIXUE

邱支振◎主编

中国科学技术大学出版社

普通高等学校规划教材

YINGYONG LILUN LIXUE

应用理论力学

■主编 邱支振

■参编 谢能刚 王 彪 冯建有

中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本教材主要是为培养应用型工程技术人员而编写的,因此重视对学习者的解决问题能力的训练.整个教材不再采用静力学、运动学、动力学三大块的传统结构,而是按照一般解决理论力学问题的基本思维过程分为研究对象、运动分析、受力分析和建立方程四大部分.

全书共分为 10 章,包含了教育部制定的理工科非力学专业理论力学课程教学基本要求(A类)中所有的基础部分与部分专题部分(碰撞与非惯性系下的动力学)的内容.另外,第 10 章为“动力学问题的分类与求解方法选择”,在该章中把动力学问题分成三类:必须计算加速度的、不必计算加速度的和不能计算加速度的.这样可以有针对性地解决动力学问题的方法分类,便于学生掌握使用.

为提高学生利用理论力学知识解决实际问题的能力,本书给出较多的例题,并且选编了一定量的有工程背景的习题,书末附有答案.

本书可作为高等院校工科专业理论力学课程的教材,也可供有关工程技术人员参考.

图书在版编目(CIP)数据

应用理论力学/邱支振主编. —合肥:中国科学技术大学出版社,2011.2
ISBN 978-7-312-02763-5

I. 应… II. 邱… III. 应用力学:理论力学—高等学校—教材 IV. O3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 239083 号

出版 中国科学技术大学出版社
地址:安徽省合肥市金寨路 96 号,230026
网址: <http://press.ustc.edu.cn>
印刷 安徽省瑞隆印务有限公司
发行 中国科学技术大学出版社
经销 全国新华书店
开本 710 mm×960 mm 1/16
印张 24.75
字数 513 千
版次 2011 年 2 月第 1 版
印次 2011 年 2 月第 1 次印刷
定价 38.00 元

前 言

随着社会的发展,大量的知识积累与技术的飞速进步,都不断对工程技术人员解决问题的能力提出新的要求.理论力学是一门工科专业普遍、重要的技术基础课,它对诸多工科专业后续课程的基础作用是无法取代的.多年来对理论力学课程的教学内容与教学方法的改革探索生生不息,也取得了不少成绩,出现了一些新教材.但是在教学实践中,发现学生总感到运用理论力学知识解决问题的能力难以得到提高.教学的根本目的并不仅仅是让学生知道这些知识,而是使学生能够运用这些知识去解决问题.如果有一本在学习理论的同时又训练了解决问题能力的教材,无疑对培养学生运用力学知识解决问题的能力是有益的.这就是我们编写本教材的宗旨,也是本教材的基本特色.

本教材主要是为培养应用型工程技术人员编写的,因此重视对学习者的解决问题能力的训练,而不受经典理论体系的束缚.面向应用并不是降低要求,并不是在原来比较系统、经典的教材中做一些删减,而是在教学基本要求的范围内针对不同的要求设计不同的教学体系、教学内容,适应新的社会要求的上升与提高.

培养学生运用力学知识解决问题的能力也需要训练基本功.在本教材中根据解决力学问题的基本思维过程,分步骤训练学生选取研究对象、进行运动分析与受力分析、建立方程的基本功,使他们在在学习理论力学理论的同时也接受了运用理论力学知识解决问题能力的训练.因此在本教材中放弃了传统理论力学教材的结构体系,从培养能力出发重新组织内容,整个教材不再采用静力学、运动学、动力学三大块的传统结构,而是按照一般解决理论力学问题的基本思维过程分为研究对象、运动分析、受力和建立方程四大部分.

全书共分为 10 章,包含了教育部制定的理工科非力学专业理论力学课程教学基本要求(A类)中所有的基础部分与部分专题部分(碰撞与非惯性系下的动力学)的内容.另外,第 10 章为“动力学问题的分类与求解方法选择”,在该章中把动力学问题分成三类:必须计算加速度的、不必计算加速度的和不能计算加速度的.这样可以有针对性地把解决动力学问题的方法分类,便于学生掌握使用.本教材中加 * 的内容供学有余力的读者选用.

进行充分的解题练习是提高应用理论力学知识的能力的关键.本教材选编了一定的具有工程背景的习题,并逐一进行了核对、解答,便于学生更顺利地进行练习.

本教材主要由邱支振执笔,整个编写过程得到安徽工业大学有关教师的关心与

支持. 特别是参加编写的谢能刚、王彪、冯建有老师, 以及参与了部分工作的邱晗与黄志来老师, 本书的顺利完成与他们的共同努力是分不开的.

本教材编写过程中参考了许多理论力学优秀教材, 在此对这些教材的编著者在提高理论力学教学效果上所做的努力表示崇高的敬意.

本教材是我们为提高理论力学教学效果进行多年探索的一个结晶, 虽然作者兢兢业业、不敢懈怠, 但囿于能力, 疏漏之处难免, 恳请读者指正.

编 者

2011 年 1 月于安徽工业大学

目 录

前言	(i)
绪论	(1)
0.1 力学与工程技术	(1)
0.2 理论力学的特点	(1)
0.3 怎样学好理论力学	(2)

第 1 篇 研究对象

第 1 章 力学问题的提炼	(3)
1.1 起重机的安全工作问题	(4)
1.2 电动机的振动与噪声问题	(5)
1.3 装载车转弯限速问题	(5)
1.4 重力坝的稳定问题	(6)
第 2 章 力学模型的建立	(8)
2.1 物体的模型	(8)
2.1.1 质点 质点系 刚体	(8)
2.1.2 质心 转动惯量	(9)
2.2 约束的模型	(15)
2.2.1 自由体 非自由体 约束	(15)
2.2.2 约束模型的分类	(15)
2.2.3 建立约束模型举例	(19)
2.3 机械作用的模型	(21)
2.3.1 机械作用	(21)
2.3.2 力的基本性质	(21)
2.3.3 力的描述	(24)
2.3.4 力偶的性质与描述	(29)
2.3.5 力系的等效与简化	(31)
2.4 研究对象的选择	(39)
2.4.1 外力 内力 外约束 内约束	(39)
2.4.2 分离体	(40)

习题	(40)
----------	------

第2篇 运动分析

第3章 运动分析基础	(49)
3.1 运动的相对性	(49)
3.2 点的运动的基本描述	(51)
3.2.1 矢量法	(51)
3.2.2 坐标法	(52)
3.3 刚体的基本运动	(61)
3.3.1 刚体平移	(61)
3.3.2 刚体定轴转动	(62)
习题	(72)
第4章 运动的合成	(77)
4.1 点的运动的合成	(77)
4.1.1 动点 动系 牵连点	(77)
4.1.2 三种速度与三种加速度	(78)
4.1.3 速度合成定理	(80)
4.1.4 加速度合成定理	(82)
4.2 刚体运动的合成	(87)
4.2.1 平移与平移的合成	(87)
4.2.2 平移与转动的合成	(88)
4.2.3 转动与转动的合成	(90)
4.3 平面运动刚体上点的运动分析	(95)
4.3.1 速度分析	(95)
4.3.2 加速度分析	(103)
4.4 平面机构的运动分析	(107)
4.4.1 平面机构运动分析的矢量法	(107)
* 4.4.2 平面机构运动分析的解析法	(111)
习题	(127)

第3篇 受力分析

第5章 主动力与约束力	(141)
5.1 主动力	(141)
5.2 约束力	(143)
5.2.1 理想约束力	(143)

5.2.2 摩擦力	(151)
习题	(157)
第6章 惯性力	(163)
6.1 非惯性系惯性力	(163)
6.1.1 牛顿定律 惯性系 非惯性系	(163)
6.1.2 质点的非惯性系惯性力	(163)
6.2 达朗贝尔惯性力	(166)
6.2.1 质点的惯性力	(166)
6.2.2 刚体惯性力系的简化	(166)
习题	(176)

第4篇 建立方程

第7章 平衡方程方法	(180)
7.1 静力平衡方程	(181)
7.1.1 平衡条件 任意力系的平衡方程	(181)
7.1.2 特殊力系的平衡方程	(184)
7.1.3 物体系统的平衡问题	(189)
7.1.4 平面简单桁架的内力分析	(194)
7.1.5 考虑摩擦的平衡问题	(198)
7.2 动力平衡方程——动静法	(205)
7.2.1 质点的达朗贝尔原理	(205)
7.2.2 质点系的达朗贝尔原理	(210)
7.2.3 平移刚体的动力方程	(213)
7.2.4 定轴转动刚体的动力方程	(215)
7.2.5 平面运动刚体的动力方程	(221)
7.2.6 简单物体系统的动力方程	(225)
*7.2.7 非惯性系中的动静法	(233)
习题	(237)
第8章 动力学普遍定理	(254)
8.1 动量定理	(254)
8.1.1 动量 动量定理	(254)
8.1.2 动量定理的应用	(256)
8.2 动量矩定理	(260)
8.2.1 动量矩	(260)
8.2.2 动量矩定理	(263)

8.2.3 动量矩定理的应用	(268)
8.3 动能定理	(270)
8.3.1 动能 功 势能	(270)
8.3.2 动能定理	(279)
8.3.3 动能定理的应用	(281)
习题	(286)
第9章 虚位移原理	(295)
9.1 约束 自由度与广义坐标	(295)
9.1.1 约束及其分类	(295)
9.1.2 自由度与广义坐标	(297)
9.2 虚位移 虚功 理想约束	(298)
9.2.1 虚位移	(298)
9.2.2 虚功	(301)
9.2.3 理想约束	(302)
9.3 虚位移原理及应用	(302)
9.3.1 虚位移原理	(302)
9.3.2 虚位移原理的应用	(302)
9.4 动力学普遍方程	(311)
习题	(315)
第10章 动力学问题的分类与求解方法选择	(320)
10.1 必须计算加速度的问题	(320)
10.1.1 利用几何关系分析加速度	(321)
10.1.2 利用运动学关系分析加速度	(324)
10.1.3 利用动力学关系分析加速度	(329)
10.2 不必计算加速度的问题	(337)
10.2.1 运用积分形式的动力学普遍定理	(337)
10.2.2 利用动力学普遍定理中的守恒定律	(339)
*10.3 不能计算加速度的问题	(342)
10.3.1 碰撞问题的基本假设	(343)
10.3.2 恢复因数	(343)
10.3.3 刚体的碰撞	(345)
习题	(358)
附录1 简单均质形体重心表	(369)
附录2 均质物体的转动惯量、体积表	(371)
习题答案	(374)
参考文献	(388)

绪 论

0.1 力学与工程技术

力学是一门古老的自然科学,17 世纪牛顿建立的经典力学奠定了力学发展的基础,也确立了力学作为一门基础学科的地位.到 19 世纪末,力学已经发展到很高的水平,建立起了相当完善的理论体系.随着工业生产的发展,力学与工程技术的结合越来越紧密,逐渐成为一门重要的技术学科.20 世纪前,人类的近代工业发展中,蒸汽机与内燃机、机械加工业、大水利工程、大跨度桥梁、铁路与机车、轮船、枪炮等无一不是在力学知识积累的基础上产生与发展起来的.

力学解决了工程技术中出现的难题,推动了工业生产的进步,同时在解决问题的过程中自身也得到了丰富与提高,并形成了许多分支.如流体力学有黏性流体力学、空气动力学、气动热力学、热化学流体力学、电磁流体力学、稀薄气体动力学等,固体力学有弹塑性力学、振动力学、结构力学、断裂力学、损伤力学、板壳力学和复合材料力学等.

20 世纪,由于力学的参与而形成与发展的工程技术学科有航空航天、船舶工程、土木工程、机械工程、海洋工程,等等.它们对于人类社会的发展与进步起着巨大的推动作用.

虽然迄今为止力学与工程技术已取得了巨大的成就,但是人类的需求与社会的发展是永无止境的.工程技术与自然界中的不少问题,至今还无法解决.从这些问题中提炼出基础性的力学问题来研究,仍然是今后力学学科的重要使命.

0.2 理论力学的特点

理论力学是研究物体机械运动一般规律的科学.物体在空间的位形(位置与姿态)随时间的变化称为机械运动.最简单的机械运动是静止与匀速直线运动,也称为平衡状态.理论力学只研究速度远小于光速的宏观物体的运动,它属于经典力学的范畴,我们在物理学中已经学过的牛顿运动三大定律是它的基础.

在自然界与人类的生产生活中,存在各种各样的物质运动,机械运动是最常见

的一种. 而且其他的运动形式往往也伴随着物质的机械运动, 所以机械运动是物质运动中最基本、最简单的一种. 因此, 理论力学研究的内容具有广泛的应用性, 是许多相关学科进一步研究的基础.

许多工程技术专业都要涉及物体的机械运动问题. 有些工程问题可以直接运用理论力学知识去解决, 有些则需要用理论力学与其他专门知识共同解决, 所以理论力学知识是解决许多工程问题的基础.

在工程技术专业的课程体系中, 包含许多与理论力学相关的课程, 例如材料力学、机械原理、机械设计、结构力学、弹塑性力学、流体力学、振动力学、断裂力学等许多专业课程, 所以理论力学课程是一系列后续课程的重要基础.

0.3 怎样学好理论力学

力学既是基础科学又是技术科学, 所以在学习力学时既要注意基础理论的学习, 又要注意用理论解决实际问题能力的训练. 力学现象充斥在生活、生产实践之中, 我们提倡不仅仅要做一定量的力学练习题, 而且要努力捕捉周围的力学问题, 尝试用已有的力学知识去分析、解决.

学习知识的目的是应用知识, 所以学好理论力学的标准是能否运用理论力学知识去解决实际问题. 掌握好理论力学的理论是解决问题的基础, 但是熟悉理论力学的理论未必能够很好地解决问题. 如果在学习理论力学理论时, 始终能够清楚所学的内容在应用中所起的作用, 一定会有助于更好地运用这些知识. 整个理论力学学习内容的作用都包含在这样一句话里: 理论力学研究物体机械运动的一般规律. 其中的关键词有三个: 物体、机械运动、一般规律. 它们的内涵是:

物体 { 理论力学中怎样描述所研究的物体?
物体之间的联系会影响物体的机械运动, 理论力学中怎样描述这些联系?

机械运动 { 理论力学中怎样描述机械运动?
影响物体机械运动的原因是物体之间的相互机械作用, 在理论力学中怎样描述这种机械作用?

一般规律——机械运动与机械作用的关系有怎样的规律以及如何运用这些规律?

概括地说, 必须掌握这四种描述和一般规律, 才能够运用理论力学知识去解决问题.

第1篇 研究对象

用理论力学知识解决工程问题时,首先要从工程问题中找出需要用力学知识解决的问题,并且要把习惯的、经验的、通俗的问题表达方式变成用力学语言描述的形式,归结为力学问题,这就是**力学问题的提炼**。

找到力学问题后再把问题所在的物体或物体系统转变成用力学标准要素构成的、便于用力学知识分析的**力学模型**。然后按照所要解决问题的目标从力学模型中选取适当的部分作为有针对性的**研究对象**。再用理论力学的定理、定律、公式进行分析,建立相应的**数学方程**进行计算求解。因此,确定力学模型中的研究对象是解决问题的第一步。

第1章 力学问题的提炼

在工程实际与日常生活中,经常出现各种各样的现象,发生各种各样的问题。能够从中找出用力学知识分析的现象、用力学知识解决的问题是运用力学知识的起点。我们碰到的问题往往并不是单一的力学问题,还与许多其他学科有关。能从错综复杂的关系中分离出力学问题,才可能运用力学知识去解决。显然对于一个缺乏力学知识的人,是难以做到这一点的。要从实际问题中提炼出力学问题必须有牢固的力学知识做基础。力学是个分支众多的学科,能用力学知识解决的问题十分丰富。

在本课程中只涉及理论力学的知识。如绪论中所言,理论力学是研究宏观物体机械运动一般规律的科学,所以凡是周围的物体涉及到运动快慢、平衡稳定、抖动摇晃、是否结实、姿态变化、碰撞冲击等现象都与理论力学有关,可以从中提炼出能用理论力学知识分析解决的问题。

在提炼力学问题时需要把实际问题中的**力学成分**用力学语言表达出来,也就是说要把对问题经验的、习惯的描述变成力学的描述,这是用力学知识解决问题的出发点。

以下的几个例子是工程中出现的并不复杂的问题,借以说明力学问题提炼的概

念.在学习理论力学知识以前可能看不懂这些分析与表述,等学完相关知识后再回顾时就自然明白了.

1.1 起重机的安全工作问题

实际问题 图 1.1(a)所示建筑工地上的移动起重机,除平衡重 W_0 外的机架部分的自重为 W ,其重心在两轨道之间.起吊重量为 W_1 时,起重机会发生向前(左方)的倾倒.为了防止倾倒发生,要在起重机后部(右方)安装平衡重 W_0 .但是在不起吊重物时,起重机又可能因平衡重的设置不当而向后(右方)倾倒.为了保证起重机的安全工作,平衡重 W_0 应该多重,而且应该放在什么位置呢?

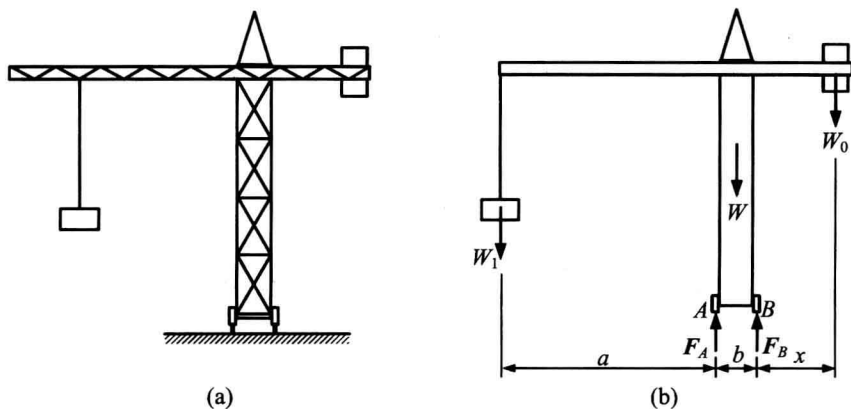


图 1.1 起重机及其受力图

分析 这是个物体的平衡问题,属理论力学的范畴.在分析起重机整体的稳定时,不必考虑其细部结构,而作为一个刚体分析.它的力学模型与受力图如图 1.1(b)所示.向前倾斜时,起重机会绕 A 轮与轨道的接触点转动,而 B 轮脱离轨道.向后倾斜时,起重机会绕 B 轮与轨道的接触点转动,而 A 轮脱离轨道.因此起重机安全工作的条件是两轮始终与轨道接触.两轮与轨道接触意味着两轨道对起重机的约束力存在,这样就把安全工作的条件变成了力的条件.这里“两轮始终与轨道接触”是通常的语言表述方式,而“两轨道对起重机的约束力存在”就是力学的语言了.

力学的表述 该起重机在起吊重物时,必须保证: $F_B > 0$;在不起吊重物时,必须保证: $F_A > 0$.

这表示起重机安全工作的问题提炼成了两个关于力的不等式,再用力学方法计算起吊重物时的 F_B 与不起吊重物时的 F_A 就可以解决这个问题了.

1.2 电动机的振动与噪声问题

实际问题 车间里有一台设备,开动电动机后楼板振动、噪声很大,影响到其他工人的操作.怎样减少振动与噪声呢?

分析 这是个环境质量的问题,但振动是理论力学研究的内容.振动与噪声的来源是电动机,电动机通过底座作用在楼板上的力引起楼板的振动与噪声.如果不能更换或改造电动机,就只能设法减少电动机传到楼板上的力了.也就是改造电动机与基础的连接方式,使它通过一定的支承系统再安装到楼板上.

力学的表述 在电动机与楼板之间设置具有一定刚度与阻尼的支承作为隔振装置,使系统如图 1.2(b)所示.电动机运行时产生简谐激振力 $F_0 \sin \omega t$,这也是原来直接作用在楼板上的力,其最大值是 F_0 .现在需要确定支承的参数刚度 k 与阻尼因数 c ,使得隔振装置的弹簧与阻尼器共同作用于楼板的力的最大值小于 F_0 .即

$$(F_k + F_c)_{\max} < F_0$$

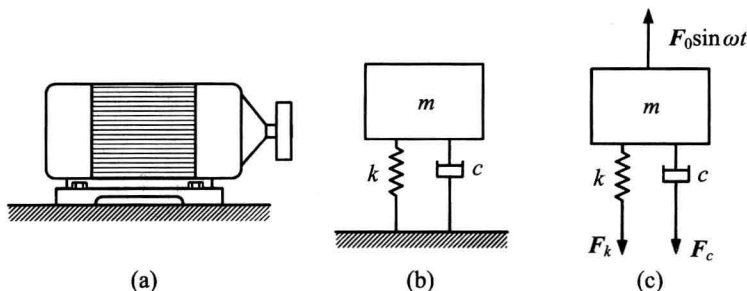


图 1.2 电动机及其受力图

利用理论力学的知识可以分别计算出 F_k 与 F_c ,这样就把振动与噪声的问题变成了力的计算问题.

1.3 装载车转弯限速问题

实际问题 大型装载车在弯道行驶时,如果速度过大会出现打滑甚至倾覆事故.为了保证安全,对速度必须限制.而且为了起到预警作用,要求速度过大时打滑在倾覆之前发生.这样万一出现打滑时,驾驶员立即减速就可以避免更严重的倾覆事故发生.现在需要确定这个速度限制值.

分析 这是个安全操作规范的问题.这里出现的是车辆运动与受力的关系,属

于理论力学的范畴. 车辆转弯时依靠地面与轮胎的横向摩擦力. 正常行驶没有打滑时, 轮胎与地面的摩擦力为静摩擦力. 当静摩擦力达到最大值时, 车辆就进入即将打滑的临界状态. 另一方面, 车辆转弯倾覆时都是向弯道外侧翻倒, 此时处于弯道内侧的轮胎会脱离地面. 因此行驶中如果地面对内侧轮胎的作用力变为零时, 车辆就进入即将倾覆的危险临界状态了.

力学的表述 如图 1.3 所示大型装载车重 W , 重心高度 h , 轮距为 b , 在半径为 ρ 的弯道匀速行驶, 地面摩擦因数为 f .

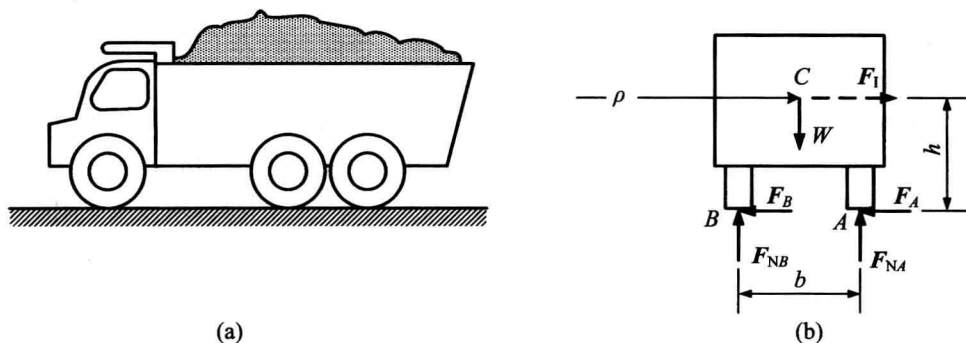


图 1.3 装载车及其转弯受力图

进入打滑的临界状态时, 有 $F_A = fF_{NA}$ 且 $F_B = fF_{NB}$, 由此条件与相关的平衡方程可以计算出不致打滑的最高速度 v_1 .

进入倾覆的临界状态时, 有 $F_{NB} = 0$, 由此条件与相关的平衡方程可以计算出不致倾覆的最高速度 v_2 .

由 $v_1 < v_2$ 的条件, 就可以得到打滑先于倾覆的速度限制值.

1.4 重力坝的稳定问题

实际问题 重力坝是一种常见的结构比较简单的水坝. 重力坝的设计与施工中许多力学问题. 在理论力学中我们只研究其中一个最基本的问题: 重力坝在内外水压力差的作用下会不会整体倾倒? 图 1.4(a) 是一个重力坝的简图. 坝自重为 W , 坝内水压力是 F_1 , 坝外水压力是 F_2 .

分析 分析坝的整体倾倒时, 可以把坝作为一个刚体考虑. 为了提高坝的安全性, 这里除去比较复杂的基础对坝的作用, 假设坝放在一个刚体支承面上. 如果此时坝是稳定的, 那么加上基础的作用坝就更加稳定了. 这种简化对提高坝的稳定性有利, 是允许的. 显然, 如果作用在坝上的几个力的合力把水坝牢牢地压在支承面上, 坝就是稳定的. 因此, 保证坝稳定条件就是图中几个力的合力方向指向支承面而且

合力的作用线在坝的底面之内.

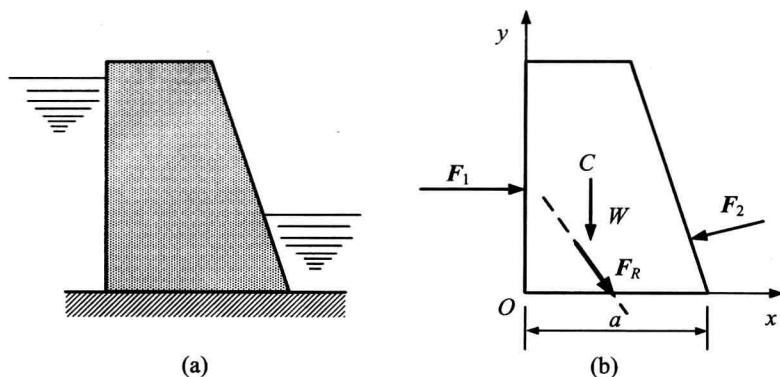


图 1.4 重力坝及其受力图

力学的表述 把作用在水坝上的外力系向 O 点简化, 得到这个力系的主矢 F_R 与主矩 M_O . 合力向下指向支承面就是要求 $F_{Ry} < 0$. 另一方面合力的作用线的方程是 $xF_{Ry} - yF_{Rx} = M_O$, 设这个直线与底面的交点是 $(x_0, 0)$, 则有 $x_0 = \frac{M_O}{F_{Ry}}$. 所以坝稳定的条件是 $F_{Ry} < 0$, 且 $0 < \frac{M_O}{F_{Ry}} < a$.

第2章 力学模型的建立

2.1 物体的模型

2.1.1 质点 质点系 刚体

对每个物体都可以给出一系列的量来描述它特有的个性,如:形状、大小(尺寸)、重量(质量)、硬度、刚性、内部结构、外部色彩、光洁度、材料、气味等.描述不同特性的量分属不同学科关注的范畴.对于研究物体机械运动的理论力学,关注的只是物体自身与运动状态改变有关以及便于描述物体运动状态的量:质量、形状与大小.如果物体的形状与大小在其运动描述中并不重要的话,也可以忽略其形状与大小,而只把物体视为一个点.这种只有质量的点,称为**质点**.质点是物体在理论力学中最基本的模型.

如果在空间建立一个直角坐标系,那么确定一个点在空间的位置只要三个独立的坐标 (x, y, z) ,换句话说它可以在 x 、 y 、 z 三个方向自由运动(图2.1).

我们把确定物体在空间位置与形态的独立参数数目称为物体的**自由度**.一个自由的质点有三个自由度.

如果研究飞机在飞行中的姿态,那么就必须考虑它的形状、大小及质量的分布情况,显然此时不能再用一个质点的模型了.一般可以用由有限个或无限个有着一定联系的质点组成的**质点系**模型.

由无限个质点组成,且各质点的距离保持不变的质点系称为**刚体**.刚体的形状大小是不会发生改变的,它是会发生变形的实际物体在理论力学中的理想化模型.研究飞机飞行姿态时就用飞机的刚体模型.此时除了描述飞机在空间位置的三个坐标 (x, y, z) 以外,还需要描述其姿态的三个量,即绕竖轴 z' 轴转动的航向,绕横轴 y' 轴转动的俯仰与绕纵轴 x' 轴转动的侧滚.可见一个自由刚体有六个自由度(图2.2).

质点系模型是力学中基本、最普遍的物体模型,它包括刚体、变形体、流体和自由质点系等模型.采用哪一种模型由研究问题的需要决定.比如:研究飞机在空中飞行的速度或者它的位置时,把整个飞机作为一个质点处理就可以了;研究飞机的飞行姿态变化时,要把飞机作为一个刚体处理;而在研究飞机遇到气流发生颤动时,就必须把飞机作为变形体处理了.

由若干个刚体组成的系统也是质点系,但通常称之为物体系统,简称**物系**.工程