

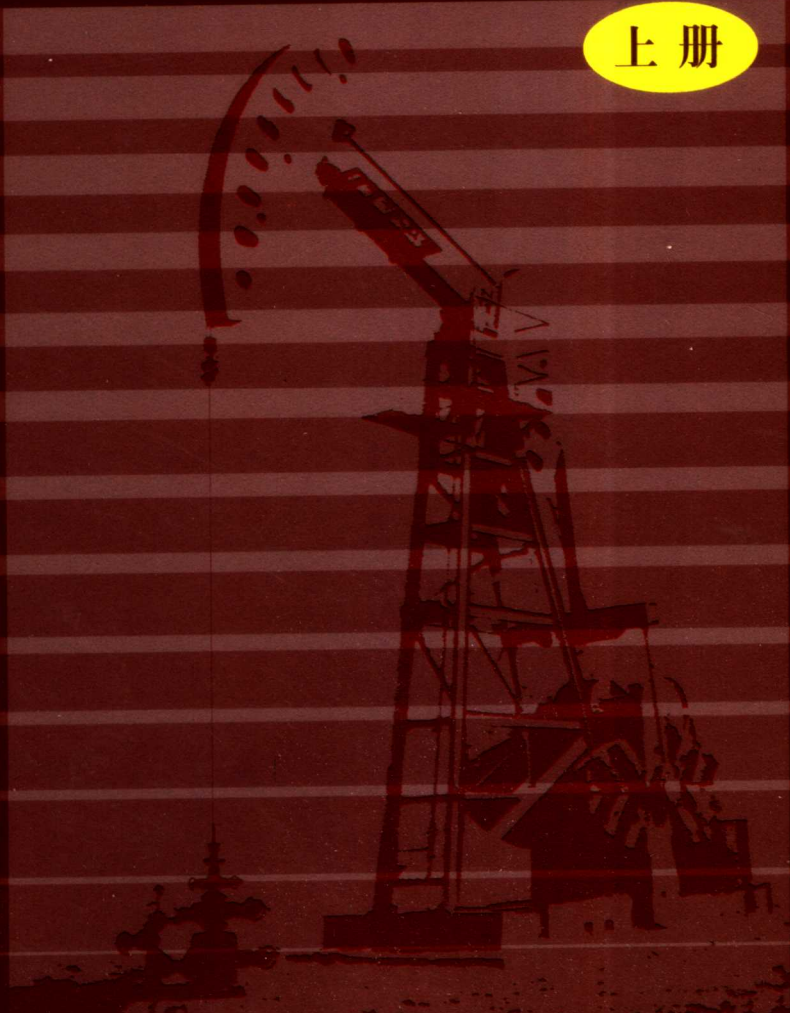
# 采油工程手册

Petroleum Production Engineering Handbook

万仁溥 主编

*Wan Renpu*

上册



石油工业出版社

# 采油工程手册

## 上册

万仁溥 主编

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本手册重点介绍我国现有的、最新的、公认的采油工程基本原理、基本概念、基本公式、基本数据、基本技术、基本设备等方面的知识，同时也介绍了国外一些成型的最新技术和方法。上册包括通用工程及科学、油藏工程基础、采油工程基础、完井工程、人工举升等方面的内容

本手册可供从事油气田开发、生产方面的管理人员、工程技术人员、研究人员，以及相关院校师生参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

采油工程手册 (上册) / 万仁溥主编 .  
北京: 石油工业出版社, 2000.8  
ISBN 7-5021-2908-1

- I. 采…
- II. 万…
- III. 石油开采—手册
- IV. TE35-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 76910 号

石油工业出版社出版  
(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)  
石油工业出版社印刷厂排版印刷  
新华书店北京发行所发行

\*

787×1092 毫米 16 开本 38.75 印张 1 插页 966 千字 印 1—7000

2000 年 8 月北京第 1 版 2000 年 8 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-2908-1/TE·2266

定价: 98.00 元

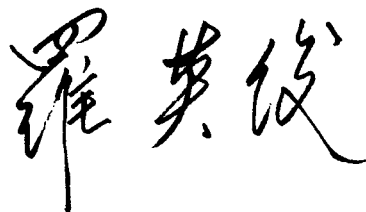
## 序

油田开发工程应由油藏工程、采油工程和地面建设工程所组成。采油工程在油田开发中起着非常重要的作用。采油工程要实现油藏工程方案的各项指标并达到油田开发的目的，还要与地面建设工程结合，保证油田能正常开采。同时，通过采油工程衔接油藏工程和地面建设工程，来制定和优化整体油田开发方案。从而与油藏工程、地面建设工程共同付之实施。

但采油工程从解放以来一直沿用前苏联模式，油田开发方案只有油藏工程和地面建设工程，仅将采油工程作为一项技术措施。以为只要钻井完井后即可采油，或者认为油井能自喷就自喷开采，不能喷即上抽油机。甚至有人用油藏工程代替采油工程。直至改革开放后，加强了对外交流，对采油工程的认识才有所转变。因为西方国家对采油工程是非常重视的，油田开发的好坏不仅是要有好的油田开发方案及油藏工程的研究。关键是要靠采油工程去实现。因为油田开发方案再好也要靠采油工程去实施才能开发好油田。因而近年来，人们对采油工程有了不少新的认识。但因传统的作法已沿袭几十年，转变还需一个过程。

为了加速采油工程的进步必须采用新工艺新技术，要让更多油田掌握它，因此，有必要出版一系列的工具书，供人们参照和使用。1990年对原来的“采油技术手册”进行了修订。扩大了版面，及增加了内容，阐述了各项工艺技术，但侧重于工具设备、技术规范、应用范围及使用方法，前后两套“手册”为促进采油工艺技术发展发挥了重要作用。1997年又参照了美国“采油采气工程标准手册”的作法，编辑了此“采油工程手册”，在格式、做法及内容上均有别于前两本“手册”。该手册侧重于工程系统的论述。从通用基础理论、油藏工程及采油工程基础开始，再论述到采油工艺机理，以及应用公式、计算、优化曲线及图，与前两本“手册”相辅相成，成为采油工程技术人员必备的工具书。

在本书编写过程中，原中国石油天然气总公司开发局、科技局，石油工业出版社，组织并特邀了我国采油工程界的著名专家、教授、以及有丰富实践经验的油田工程技术人员担任该书的撰写及审稿人。历时两年多，经过五次大的修改后，于1990年9月定稿。全书共分11章，分上下两册，约200万字。总结了有中国特色的采油工艺技术的经验和做法，并加以理论化，同时收集了某些国外新技术，是一本以理论为基础并结合实际的工具书。具有理论性、实用性和可操作性。希望采油工程界人士读读此书，同时在实践中应用之，这将会对今后的工作起到一定的指导和推动作用，以便提高我国采油工程系统的技术水平，为搞好油田开发做出贡献。



二〇〇〇年六月八日

## 前 言

采油工程技术是实现油田开发方案的重要手段。油田开发生产的全过程，几乎都要依赖于采油工程的各项技术措施。大到油田的开采速度、产量、采收率以及经济效益，小到一口油井能否维持正常出油，一口水井能否正常注水，几乎都与采油工程密切相关。尤其我们中国的绝大多数油田都形成于陆相沉积盆地之中，陆相油藏地质结构的复杂性，决定了我们所碰到的采油工程问题的多样性。我国广大的采油工程技术人员，在近半个世纪的油田开发实践中，为解决陆相油藏复杂多样、油气储层非均质性严重、原油和流体性质变化而带来的复杂情况，创造出丰富多彩的采油工程技术。这些技术具有明显的中国特色。

油田投入开发以后，日常的、大量的工作，几乎都是采油工作者的任务。因此，编撰出版一本全面系统的《采油工程手册》，为从事采油工程的技术人员、尤其是采油现场的工程技术人员提供一本得心应手的工具书，是一项十分重要的工作。1977年，石油工业出版社曾经出版过一本《采油技术手册》，以后，又组织出版过一套《采油技术手册》（修订本），按专业分类共10个分册，这两部采油工程技术的工具书先后在20年的时间里，对我国油田开发起到了很大的作用，成为采油工程技术人员的重要工具书。

1996年，石油工业出版社对以往出版的各类专业技术手册进行了一次总结，发现在工具书出版中存在着比较散、不规范，而且出版周期长，跟不上技术更新的进度要求等问题，决定对一些主要专业的工程技术手册进行修订再版。此事经与当时中国石油天然气总公司开发生产局商议达成了共识。恰好当年美国海湾出版公司出版了一本《采油采气工程标准手册》（Standard Handbook of Petroleum & Natural Gas Engineering），发现其内容和表述形式有一定特点，对我们有所启发。

1997年，中国石油天然气总公司开发生产局以当年第105号文件发出“关于组织编写《采油工程手册》的通知”，要求系统总结我国采油工程领域定型的各项新理论、新工艺、新方法，以适应油田及科研院所的需要。从1997年开始，石油工业出版社与开发生产局组织了我国一些具有较高理论造诣和实践经验的专家、教授和若干各具专长的采油工程技术人员，在以往出版的采油工程手册的基础上，编撰一本新的《采油工程手册》，他们认真负责、精益求精，历时两年，几易其稿，终于编撰完成。这本新版的《采油工程手册》是从通用的基础理论、油藏工程和采油工程开始，讲述采油工艺原理、技术方法，以及应用公式、曲线和图表，内容概括了当前采油工程的主要技术系列，是一本以理论为基础，紧密结合生产实际，可直接应用的工具书。全书共分十一章，具有较强的理论性、实用性，尤其注重可操作性，可供中高级技术人员使用。

这本新版的《采油工程手册》的出版，对于我国采油工程技术的应用和提高，对于新的采油工程技术的发展，将起到积极的作用，为改善我国油田开发的效果，提高油田开发水平，将做出积极的贡献。由于是第一次编撰出版此种格式的工具书，缺乏经验，不当之处在所难免，希望读者在使用中提出宝贵意见，以便不断改进和完善。

张家茂

二〇〇〇年四月八日

# 目 录

<b>第一章 通用工程及科学</b> .....	(1)
<b>第一节 力学基础</b> .....	(1)
一、定义、定律和单位制系统.....	(1)
二、静力学.....	(3)
三、运动学.....	(6)
四、动力学.....	(11)
<b>第二节 水力学基础</b> .....	(15)
一、流体及其主要物理性质.....	(15)
二、液体静力学.....	(17)
三、液体流动的基本原理.....	(17)
四、量纲分析与相似理论.....	(19)
五、水头损失及其计算.....	(22)
<b>第三节 材料的强度</b> .....	(27)
一、基本概念和基本原理.....	(27)
二、应力和应变.....	(29)
三、载荷的基本类型.....	(33)
四、破坏形式.....	(36)
<b>第四节 化学基础</b> .....	(40)
一、常用基本概念.....	(40)
二、石油化学基础.....	(42)
三、油田结垢机理及影响因素.....	(45)
四、防腐化学.....	(49)
五、表面活性剂与高分子化合物.....	(49)
<b>第五节 热力学基础</b> .....	(62)
一、基本概念与定义.....	(63)
二、热力学基本定律.....	(64)
三、热力学第一定律的应用——能量衡算.....	(64)
四、热力学第二定律的应用.....	(67)
五、热力学基本方程.....	(70)
六、热力学性质.....	(71)
<b>第六节 传热学基础</b> .....	(72)
一、导热传热.....	(72)
二、对流传热.....	(74)
三、辐射传热.....	(77)
<b>第七节 电工电子学基础</b> .....	(79)
一、基本物理量和基本定律.....	(79)

二、电路元器件及装置 .....	(84)
三、基本电路及分析计算 .....	(87)
四、磁路 .....	(89)
五、安全用电 .....	(91)
第八节 工程设计基础 .....	(93)
一、引言 .....	(93)
二、科学方法与工程方法 .....	(95)
三、工程设计艺术 .....	(97)
四、石油工业中的设计 .....	(99)
五、知识产权 .....	(100)
参考文献 .....	(101)
<b>第二章 油藏工程基础</b> .....	<b>(103)</b>
第一节 油藏地质基本概念 .....	(103)
一、储集岩、储集层与含油层 .....	(103)
二、圈闭与油气藏 .....	(103)
第二节 油藏流体物性 .....	(105)
一、天然气 .....	(105)
二、原油 .....	(113)
三、油田水 .....	(120)
第三节 油气储集层性质 .....	(124)
一、孔隙结构与孔隙度 .....	(124)
二、储集层岩石的压缩性 .....	(126)
三、岩石的渗透率 .....	(127)
四、储集层流体的饱和度 .....	(129)
第四节 油藏岩石的渗流特征 .....	(130)
一、油藏岩石的润湿性 .....	(130)
二、油藏岩石的毛细管力 .....	(132)
三、油藏岩石的相渗特征 .....	(133)
第五节 渗流力学与试井分析 .....	(136)
一、基本概念 .....	(136)
二、常规试井解释 .....	(138)
三、现代试井解释 .....	(140)
第六节 油气藏开发方式与井网 .....	(144)
一、油气藏开发方式 .....	(144)
二、开发层系 .....	(145)
三、井网 .....	(147)
第七节 油藏动态分析 .....	(149)
一、物质平衡法 .....	(149)
二、经验方法 .....	(152)
第八节 油藏数值模拟 .....	(155)

一、基本概念	(155)
二、油藏数值模拟应用	(156)
<b>参考文献</b>	(160)
<b>第三章 采油工程基础</b>	(161)
<b>第一节 油层敏感性评价</b>	(161)
一、保护油层的岩心分析	(161)
二、油层敏感性评价	(163)
<b>第二节 流入动态</b>	(169)
一、直井流入动态	(169)
二、水平井和定向井流入动态	(178)
<b>第三节 井筒气液两相流动</b>	(183)
一、基本概念	(183)
二、计算井筒压力分布的 Duns—Ros 方法	(189)
三、计算井筒压力分布的 Orkiszewski 方法	(194)
四、计算井筒压力分布的 Hagedorn—Brown 方法	(201)
五、计算井筒压力分布的 Aziz—Govier 方法	(202)
六、计算井筒压力分布的 Hasan—Kabir 方法	(206)
七、计算井筒压力分布的 Beggs—Brill 方法	(210)
八、水平井变质量流压力分布计算	(215)
<b>第四节 油井生产系统的节点分析方法</b>	(217)
一、油井生产系统	(217)
二、节点系统分析	(219)
三、节点分析方法应用	(220)
<b>第五节 岩石力学与地应力基础</b>	(227)
一、岩石力学基本知识	(227)
二、油田原地应力分布规律	(233)
三、地应力测试方法	(238)
四、地应力剖面计算	(243)
<b>第六节 采油工程方案设计概要</b>	(246)
一、概述	(246)
二、采油工程方案的基本内容	(248)
<b>参考文献</b>	(255)
<b>第四章 完井工程</b>	(257)
<b>第一节 完井工程新概念</b>	(257)
一、完井工程定义	(257)
二、完井工程理论基础	(257)
三、完井工程系统内容	(257)
四、完井工程系统设计程序	(259)
五、完井工程设计	(259)
<b>第二节 完井方式</b>	(260)



一、射孔完井方式·····	(260)
二、裸眼完井方式·····	(261)
三、割缝衬管完井方式·····	(261)
四、砾石充填完井方式·····	(263)
五、防砂滤管完井·····	(265)
六、化学固砂完井·····	(265)
七、水平井完井·····	(265)
第三节 完井方式的选择·····	(269)
一、按岩性来选择完井方式·····	(269)
二、按油田开发和采油工程选择完井方式·····	(270)
第四节 完井油管及生产套管尺寸的选定·····	(274)
一、自喷井、天然气井油管及生产套管尺寸的选定·····	(274)
二、油管尺寸敏感性分析及优选·····	(275)
三、自喷井及天然气井生产套管的选定·····	(279)
四、人工举升井油管及生产套管尺寸的选定·····	(279)
五、增产措施对油管及生产套管尺寸选择的影响·····	(286)
六、稠油和高凝油开采井油管及生产套管尺寸的选定·····	(288)
第五节 生产套管及注水泥·····	(294)
一、生产套管设计的基本依据·····	(295)
二、套管规范·····	(295)
三、生产套管设计·····	(315)
四、注水泥·····	(316)
五、复杂类型井的固井技术要求·····	(326)
第六节 射孔技术·····	(337)
一、射孔工艺·····	(337)
二、射孔枪和射孔弹·····	(347)
三、射孔参数优化设计·····	(348)
四、射孔负压设计·····	(352)
五、现场检测井下射孔及射孔套管质量方法·····	(357)
第七节 结束语·····	(359)
参考文献·····	(359)
<b>第五章 人工举升技术·····</b>	<b>(361)</b>
第一节 人工举升方式综述·····	(361)
一、人工举升方式分类·····	(361)
二、各种人工举升方式的适应性·····	(362)
三、人工举升方式选择方法·····	(362)
第二节 有杆泵采油·····	(365)
一、有杆泵采油装备工作原理及主要技术规范·····	(365)
二、有杆泵采油的基本计算·····	(436)
三、有杆泵抽油系统设计步骤和方法·····	(448)

四、有杆泵抽油系统诊断技术·····	(454)
第三节 电动潜油泵采油·····	(460)
一、主要设备·····	(461)
二、电动潜油泵的选择·····	(478)
三、电动潜油泵井的诊断技术·····	(484)
四、电动潜油泵配套工艺技术·····	(491)
第四节 水力泵抽油·····	(498)
一、水力活塞泵·····	(498)
二、地面泵·····	(509)
三、高压控制管汇·····	(513)
四、井口装置及井下专用工具·····	(517)
五、水力活塞泵生产井测试及取样·····	(521)
六、水力活塞泵设计与参数优选·····	(525)
七、水力喷射泵·····	(531)
八、动力液·····	(536)
第五节 气举采油·····	(543)
一、气举采油的特点及工作方式·····	(543)
二、气举采油装置·····	(545)
三、气举阀·····	(548)
四、气举采油地面流程及设备·····	(555)
五、气举井设计·····	(563)
六、气举井的诊断与故障处理·····	(576)
第六节 螺杆泵采油技术·····	(586)
一、螺杆泵工作原理及组成·····	(586)
二、螺杆泵工作特性·····	(592)
三、螺杆泵采油设计和配套工艺技术·····	(596)
参考文献·····	(603)

# 第一章 通用工程及科学

## 第一节 力学基础

力学是研究物质机械运动规律的科学，是物理学的一个分支，主要研究固体、液体和气体在静止和运动状态下力的作用过程和结果。力学的研究领域可以分成刚体力学、变形体力学和流体力学。刚体是在运动中和受力作用后，形状和大小不变，且内部各点相对位置不变的物体。当需要研究应力和应变时，则须考虑变形，再应用变形体力学（包括材料力学、弹性力学、塑性力学等）的理论和方法进行研究。刚体力学又可进一步分成静力学（研究静止中的物体）和动力学（研究运动中的物体）。

### 一、定义、定律和单位制系统

#### 1. 基本量

牛顿力学是以牛顿运动定律和万有引力定律为基础研究宏观物体的运动规律，它认为长度、时间和质量是绝对的、独立的、不能精确定义的，但它们具有如下公认的含义：

空间：一种使物体的位置惟一确定的定位参考系。空间的概念一般由坐标系统来建立，如笛卡尔直角坐标系，物体的位置可在该坐标系中用数组来描述。

时间：物理事件通常由某种因果关系引起，而时间就是这种结果的度量，它与事件载体的空间位置密切相关，以便完全描述这一事件。

质量：度量物体抵抗自身运动状态变化特性的物理量。

#### 2. 导出量

质点：具有一定质量而不计大小尺寸的物体。物体本身实际上都有一定尺寸，但若某物体的尺寸同它到其他物体的距离相比，或同其他物体的尺寸相比是很小的，则该物体可近似看作一个质点。质点是研究物体运动的最简单、最基本的对象。

物体：质点的聚合体。刚体就是由大量质点刚性连接的聚合体。

力：力是一个物体对另一个物体的作用，为一种矢量。

力偶：大小相等、方向相反、作用线不在同一直线上的一对力。力偶能使物体产生纯转动。力偶的二力对空间任一点之矩的和是一常量，称为力偶矩，大小可由其中一力乘以二力的距离来计算。力偶是一个矢量，它的作用点可以是刚体上的任一点，其方向线与力偶作用平面垂直，并按右手螺旋定则确定其指向。如果力偶作用在变形体上，力偶矢就不可自由平移，因为这样会产生不同的扭转效应。力偶是物体获得角加速度的外因。

速度：表征在某瞬时运动快慢和运动方向的矢量。

角速度：表征在某瞬时转动快慢和转动方向的矢量。

加速度：表征单位时间内速度改变程度的矢量。它等于速度矢量对时间的导数，其方向沿着速端图的切线方向并指向轨迹内侧。

角加速度：表征单位时间内角速度改变程度的矢量。它等于角速度矢量对时间的导数。

重力加速度：通常指地面附近物体受地球引力作用在真空中下落的加速度，记为  $g$ ，其值近似为  $980\text{cm/s}^2$  或  $9.8\text{m/s}^2$ 。由于地球是微椭球，有自转，因此重力加速度方向一般不通

过地心。在月球、其他行星或星体表面附近物体的下落加速度，则分别称为月球重力加速度、某行星或星体重力加速度。

重量：物体在地球（其他行星或天体）表面所受到引力的大小。其值为：

$$W = Mg \quad (1-1)$$

这里， $W$  表示物体重量。重量是一个矢量，这是因为重力加速度是具有方向的。

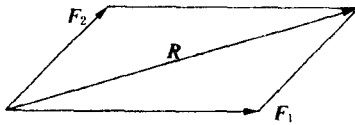


图 1—1 力平行四边形定律

### 3. 普遍定律（力学公理）

质量守恒定律：质点系的质量在物理过程中始终保持不变。

力合成的平行四边形定律：作用于物体同一点上的二力  $F_1$  和  $F_2$  可以合成为一个力  $R$ （称为合力）。合力作用点仍在该点，合力大小和方向由两分力为邻边构成平行四边形的

对角线确定（图 1—1）。

力的传递性原则：作用于刚体上某点的力可以用作用于该刚体上不同点的另一个力来代替，而不会改变刚体的平衡状态或运动状态，只要后一个力的大小和作用线方向与前一个力完全相同。

### 4. 牛顿运动定律

牛顿第一定律（又称惯性定律）：任何质点都将保持静止或作匀速直线运动状态，除非有施加于它的力迫使它改变状态。该定律确定了质点惯性运动性质。设  $F$  为施加于质点的力， $v$  为质点的速度，则第一定律可写作：如  $F=0$ ，则  $v=$  常矢量，特殊时  $v=0$ 。

牛顿第二定律（又称运动定律）：物体（质点）运动量的改变与所施加的力成正比，并发生于该力的作用线方向上。该定律可用下式表示：

$$F = ma \quad (1-2)$$

式中  $a$ ——加速度。

该式是解决动力学问题的基本依据，也称为动力学基本方程。

牛顿第三定律（又称作用和反作用定律）：对于任何一个作用，必有一个大小相等而方向相反的反作用，它们分别作用在两个不同的物体上。

万有引力定律：存在于任何两个物体之间的由质量引起的相互吸引力，力的作用线约在两个物体质心的连线上，其大小与两物体的质量成正比，与两物体的距离平方成反比。以  $m_1$ ， $m_2$  表示两物质的质量， $r$  表示两者之间的距离，则万有引力为：

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (1-3)$$

式中  $G$ ——万有引力常数。

### 5. 单位制系统

目前，国际普遍采用国际标准化组织制定的 SI 制，它是一种基于长度、时间和质量为基本量的单位制系统，所有其他的力学单位都是由它们派生出来的。SI 制中，质量的基本单位是千克（kg），长度的基本单位是米（m），时间的基本单位是秒（s）。力的导出单位为牛顿（N），定义为：加在质量为 1kg 的物体上使之产生  $1\text{m/s}^2$  加速度的力为 1N。

## 二、静力学

### 1. 力的分解与合成

将一个力化作等效的两个或两个以上的分力称为力的分解。分解的依据是力的平行四边形法则。

**例 1—1** 将已知力  $F$  分解为沿同一平面内任意两给定方向线  $l_1$  和  $l_2$  上的两个力，如图 1—2 所示。从  $F$  的  $B$  端分别作  $l_1$  和  $l_2$  的平行线，与之相交于  $C, D$  点，则  $AC, AD$  即为所求的两个分力  $F_1$  和  $F_2$ 。

**例 1—2** 将一个已知力  $F$  沿直角坐标轴分解，可得到三个分力  $F_x, F_y, F_z$  (图 1—3)。 $F_x, F_y, F_z$  是力  $F$  在直角坐标轴  $x, y, z$  上的投影。

用一个力等效地代替两个或两个以上作用在同一刚体上或同一质点上的力，称为力的合成，这一个力称为合力。对于空间任意力系，不一定有合力，例如力偶就不能用一个合力来代替。汇交力系和同向平行力系一般都可求出合力。

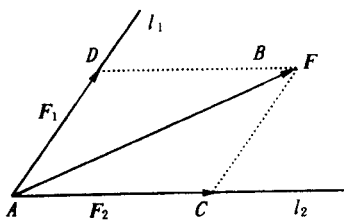


图 1—2 力沿同面两方向分解

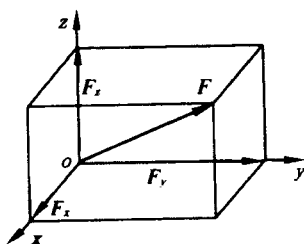


图 1—3 力沿坐标轴的分解

**例 1—3** 汇交力系的合成 (图 1—4)。各力作用线交于一点的力系称为汇交力系。根据力的可传递性，作用于刚体的汇交力系可换成各力作用于公共交点的共点力系。利用力的平行四边形法则将图中各力  $F_1, F_2, F_3, F_4$  的力矢顺序首尾相连，由起点指向终点的矢量  $R$  就是该力系的合力矢量。由分力和合力所构成的多边形称为力多边形，该方法称为多边形法。特殊情况下，若共点力系力矢构成的折线的终点和始点重合，即封闭边长度为零，则该力系的合力为零，这时力系就成为平衡力系。

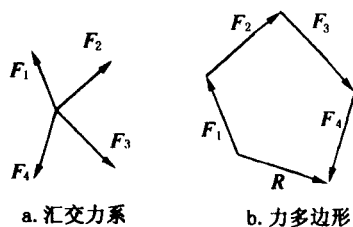


图 1—4 汇交力系的合成

**例 1—4** 同向平行力系的合成。各力作用线相互平行且方向相同的一组力称为同向平行力系。此时，可在成对的平行力作用点上沿作用点连线方向添加一对平衡力，使问题转化为汇交力系的合成。

### 2. 力系的简化

把一个复杂力系化为一个简单的等效力系，可用力的平移将力系中的诸力  $F_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 移向指定点 (简化中心)，得到一个作用在简化中心的汇交力系和一个附加力偶系。此汇交力系可合成为一个合力  $R$ ，它等于原力系诸力的矢量和：

$$R = \sum_{i=1}^n F_i \quad (1-4)$$

称为原力系的主矢。不论选何简化中心，主矢的大小和方向都不变，即主矢与简化中心

的位置无关。简化中引入的附加力偶系可合成一力偶，其力偶矩  $M_o$  等于原力系诸力分别对简化中心之矩的矢量和：

$$M_o = \sum_{i=1}^n M_{oi} \quad (1-5)$$

称为原力系对简化中心的主矩。对于不同的简化中心，各力的力臂也不同，因此，主矩与简化中心的位置有关。

### 3. 力系的平衡条件

空间任意力系的平衡条件是：力系的主矢和主矩都等于零，即：

$$R = 0, M_o = 0 \quad (1-6)$$

因  $R = \sqrt{(\sum F_x)^2 + (\sum F_y)^2 + (\sum F_z)^2}$ ， $M_o = \sqrt{(\sum M_{ox})^2 + (\sum M_{oy})^2 + (\sum M_{oz})^2}$  故得出空间任意力系的 6 个平衡方程：

$$\begin{cases} \sum F_x = 0, \sum F_y = 0, \sum F_z = 0 \\ \sum M_{ox} = 0, \sum M_{oy} = 0, \sum M_{oz} = 0 \end{cases} \quad (1-7)$$

式中， $F_x, F_y, F_z$  分别为各分力在  $x, y, z$  轴上的投影； $M_{ox}, M_{oy}, M_{oz}$  分别为各分力对通过简化中心  $o$  的  $x, y, z$  轴的矩。从如上 6 式可解出 6 个未知量。其他力系均可看成是它的特殊情况。例如平面任意力系的平衡方程为：

$$\sum F_x = 0, \sum F_y = 0, \sum M_o = 0 \quad (1-8)$$

平面汇交力系的平衡方程为：

$$\sum F_x = 0, \sum F_y = 0 \quad (1-9)$$

平面平行力系的平衡方程为：

$$\sum F_z = 0, \sum M_o = 0 \quad (1-10)$$

### 4. 考虑摩擦时的平衡问题

摩擦是使物体保持平衡或影响它运动的重要因素。当两物体有相对滑动趋势时，在接触处的公切面上所产生的阻力，叫做静滑动摩擦力（简称静摩擦力，如图 1-5 所示），其大小在  $0 \leq F \leq F_{\max}$  范围内变化，并随物体受力情况而变，具体数值由平衡方程来决定。 $F_{\max}$  表示当物体受力作用后处于运动和静止的临界状态时，静摩擦力达到的最大值，称为最大静摩擦力。实验证明， $F_{\max}$  与物体间的法向反力  $N$  成正比：

$$F_{\max} = f \cdot N \quad (1-11)$$

式中， $f$  为静滑动摩擦系数，它与两物体间接触面材料、光洁度、温度、湿度等因素有关。

当摩擦力达到最大值时，全反力（法向反力  $N$  与最大静摩擦力  $F_{\max}$  的合力）与反力  $N$  之间的夹角  $\phi$  也达到最大值  $\phi_{\max}$ ，称为摩擦角，它与摩擦系数的关系是：

$$\operatorname{tg} \phi_{\max} = f \quad (1-12)$$

当作用于物体上的主动力的合力作用线与法线间的夹角小于  $\phi_{\max}$  时，无论主动力的的大小如何，物体都不会发生相对滑动，这种现象称为自锁。上述的夹角条件称为自锁条件。

在有摩擦的问题中，物体的位置以及作用在物体上的力（三要素）可以在一定范围内变化，而不破坏物体的平衡状态。

当物体间有相对滚动或有滚动趋势时，在其接触处将受到阻碍，叫做滚动摩擦（如图 1—6 所示）。它是阻碍作用的结果，其力偶矩随外力作用的不同而变化，变化范围为：

$$0 \leq M \leq M_{\max} \quad (1-13)$$

式中， $M_{\max}$  表示滚动临界状态（将滚未滚）时的最大滚动摩擦力偶矩，实验证明，它与两物体接触处的法向反力  $N$  成正比：

$$M_{\max} = \delta \cdot N \quad (1-14)$$

式中， $\delta$  为滚动摩擦系数，它也与物体接触面的材料、光洁度、温度、湿度等因素有关，其量纲为长度。

使物体发生滚动比使它发生滑动一般容易得多，所以发生滚动时，滑动摩擦力  $F$  通常都远未达到最大值。在滚动问题中（包括动力学问题），除非特别声明，通常都不须考虑滚动摩擦。

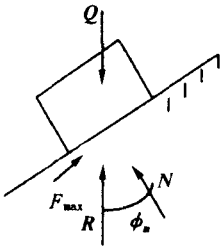


图 1—5 摩擦角

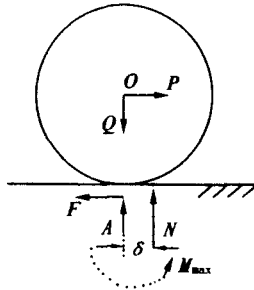


图 1—6 滚动摩擦

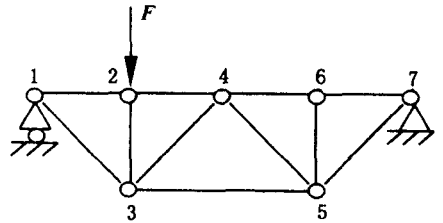


图 1—7 平面桁架

### 5. 桁架 (Truss) 的受力分析

桁架是由一些直杆组成的三角形框构成的几何形状不变的结构。杆件间的结合点称为节点（或结点）。组成桁架的杆件轴线和所受力都在同一平面内，称为平面桁架（如图 1—7 所示）。能保持几何坚固性桁架称为静定桁架，否则称为静不定桁架（或超静定桁架）。静定桁架的条件是：

$$(n - 3) = 2(j - 3) \quad (1-15)$$

式中  $n$ ——桁架中杆件数；

$j$ ——节点数。

为便于计算桁架内力，需作下列假设：

- (1) 桁架的节点都是光滑的铰结点；
- (2) 组成桁架的杆件都是直杆，其轴线通过铰结点；
- (3) 杆件自重和载荷都可分配到两端节点，使外力、支座约束力都集中作用于节点。

因此，桁架中每一杆都是二力杆，其所受的压力或拉力称为桁架内力。分析静定桁架受

力情况有以下两种方法:

(1) 截面法。假设将桁架的某些杆件截断, 取出其一部分作为研究对象。这部分桁架在外力和被截杆件的内力作用下保持平衡。可用平面任意力系的三个平衡方程求出被截杆件中的未知内力。

(2) 节点法。假设将某一节点周围的杆件截断, 取该节点作为研究对象, 它在外力和被截杆件内力的作用下保持平衡。节点上外力和杆件内力组成一平衡的平面汇交力系, 可用平面汇交力系的平衡方程或力多边形法求出杆件的内力。

如果组成桁架各杆件的轴线和所受外力不在同一平面内, 称为空间桁架, 如网架结构、塔架结构、起重机构架等。其他定义同平面桁架。节点和杆件数关系为:

$$W = 3j - n \quad (1-16)$$

若  $W > 0$ , 则为几何可变桁架;  $W = 0$ , 为几何不变且无多余约束的空间桁架。空间桁架也可用部分截割法和节点法求出桁架内力。

### 6. 重心 (Centre of Gravity)

物体各部分所受重力之合力的作用点称为重心。由于物体尺寸远小于地球半径, 所以可以近似地把物体上的引力视为平行力系, 它的总重量就是这些引力的合力。重心不一定在物体上, 例如, 圆环的重心不在圆环上, 而在它的几何中心上。

如将重为  $W$  的物体分割为许多微元, 微元重  $dw$ , 在直角坐标系中的坐标为  $(x, y, z)$ , 则重心  $C$  的坐标可由下式计算:

$$x_c = \frac{1}{W} \int x dw, y_c = \frac{1}{W} \int y dw, z_c = \frac{1}{W} \int z dw \quad (1-17)$$

若物体是均质的, 单位体积重力  $\gamma$  为常量, 则  $w = \gamma v$ 、 $dw = \gamma dv$ , 则:

$$x_c = \frac{1}{V} \int x dv, y_c = \frac{1}{V} \int y dv, z_c = \frac{1}{V} \int z dv \quad (1-18)$$

这时, 重心与形心重合, 式中  $V$  为物体的体积。

计算复杂形状物体的重心位置时, 可把它分为若干简单形状的分体。设有  $n$  个分体,  $w_i$  为第  $i$  分体重力,  $x_i, y_i, z_i$  为第  $i$  块分体的重心坐标,  $w$  为组合体总重力, 则该组合体重心为:

$$x_c = \frac{1}{w} \sum_{i=1}^n w_i x_i, y_c = \frac{1}{w} \sum_{i=1}^n w_i y_i, z_c = \frac{1}{w} \sum_{i=1}^n w_i z_i \quad (1-19)$$

## 三、运动学

运动学研究物体机械运动的时间、空间关系, 而不涉及引起运动或运动改变的原因。研究的基本问题是确定运动物体在任一瞬时的位置、运动轨迹、速度与加速度 (包括线速度、线加速度和角速度、角加速度)。

描述物体的运动必须先选定参考体及与参考体连结在一起的参考系。

### 1. 点的运动

运动学里分析质点运动时无须考虑其质量, 而只把它作为一个运动的几何点。

#### 1) 点的运动方程



对点运动过程的数学描述,能给出任何瞬时  $t$  动点所在的位置。点的运动方程可用动点的矢径  $r$  作为时间  $t$  的函数来表示(如图 1—8)。

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t) = x(t)\mathbf{i} + y(t)\mathbf{j} + z(t)\mathbf{k} \quad (1-20)$$

式中,  $x(t), y(t), z(t)$  为矢径在三个直角坐标轴上的投影。已知  $x(t), y(t), z(t)$ , 就很容易求出点的速度和加速度。在极坐标系中, 矢径  $r$  的坐标为:

$$\begin{cases} r = r(t) \\ \theta = \theta(t) \end{cases} \quad (1-21)$$

对于真实物体, 上述函数均为时间的单值连续函数。

## 2) 轨迹

轨迹即动点在空间的位置随时间连续变化而形成的曲线。轨迹是直线称为直线运动; 轨迹为曲线称为曲线运动。

从点的运动方程中消去时间参量  $t$ , 即可得到轨迹方程, 例如,  $A$  点在  $oxy$  平面内运动, 其运动方程为:

$$x = R\cos\omega t, y = R\sin\omega t \quad (1-22)$$

将两式平方相加, 即得到  $A$  点的轨迹方程:

$$x^2 + y^2 = R^2 \quad (1-23)$$

上式说明  $A$  点的轨迹是以  $o$  为圆心,  $R$  为半径的一个圆。

## 3) 位移

位移即质点的位置变动, 用连接先后两位置的有向线段表示。

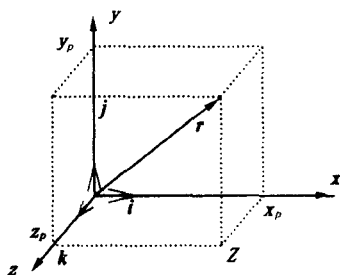


图 1—8 直角坐标系中的运动方程

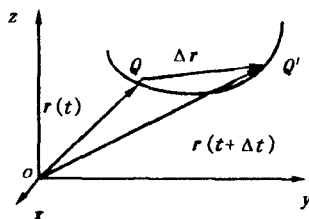


图 1—9 质点的位移

如图 1—9 所示, 在瞬时  $t$  质点位于  $Q$  点, 瞬时  $t + \Delta t$  位于  $Q'$  点, 则矢量  $QQ'$  表示质点从  $t$  时刻开始在  $\Delta t$  时间间隔内的位移。它等于  $Q'$  点的矢径与  $Q$  点的矢径之差, 即

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}(t + \Delta t) - \mathbf{r}(t) \quad (1-24)$$

在  $\Delta t$  内质点由  $Q \rightarrow Q'$  所经过的路径是弧长  $QQ'$  (标量)。因此, 位移和路程是两个不同的概念。但是当  $\Delta t$  很小, 位移矢量的模和路程的差为高阶小量, 当  $\Delta t \rightarrow 0$ , 两者相等。

## 4) 速度

用  $v$  表示。速度的大小称为速率, 可直接由运动方程计算得到。动点的位移  $\Delta r$  和所用时间  $\Delta t$  的比称为平均速度, 即为  $v_p$ :