

[美] William C. Lyons 编



石油与天然气 工程技术手册

(上册)

李晓明 赵洪才 等译

*STANDARD HANDBOOK OF
PETROLEUM & NATURAL
GAS ENGINEERING*

中国石化出版社

[美] William C. Lyons 编

烃

石油与天然气 工程技术手册

(下册)

李晓明 赵洪才 等译

*STANDARD HANDBOOK OF
PETROLEUM & NATURAL
GAS ENGINEERING*

中国石化出版社

责任编辑 龚志民
程天阁
封面设计 况 晗
责任校对 张小宏

ISBN 7-80164-336-4



9 787801 643360 >

ISBN 7-80164-336-4/TE·048

全套定价：280.00元

石油与天然气工程技术手册

(上册)

[美] William C. Lyons 编

李晓明 赵洪才 等译

中国石化出版社

石油与天然气工程技术手册

(下 册)

[美] William C. Lyons 编

李晓明 赵洪才 等译

中国石化出版社

内 容 提 要

本手册分上、下两册。上册主要包括数学、计算机应用、通用工程等基础学科和配套设备以及石油工程学的钻井和完井工程等主要内容；下册主要包括油藏工程、采油工程和石油经济学等主要内容。

手册采用大量的数据、公式和图表阐述了石油和天然气工程中经常遇到的理论和实际问题，内容丰富、实用性强。可供从事石油天然气工程的科研、技术、现场施工人员及相关院校师生参考使用。

著作权合同登记 图字：01-2001-4147号

Standard Handbook of Petroleum & Natural Gas Engineering (Volume 1, 2)

By William C. Lyons

Original edition copyright (1996) by Butterworth-Heinemann. All rights reserved.

中文版权(2003)为中国石化出版社所有。版权所有，不得翻印。

图书在版编目(CIP)数据

石油与天然气工程技术手册.(上、下册)/[美]William C. Lyons 编；
李晓明 赵洪才等译。

—北京：中国石化出版社，2003

ISBN 7-80164-336-4

I.石… II.①莱…②李…③赵… III.①石油工程-技术手册 ②天然气工业-技术手册 IV.TE-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 009071 号

中国石化出版社出版发行

地址：北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编：100011 电话：(010)84271850

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com.cn

北京精美实华图文制作中心排版

北京大地印刷厂印刷

新华书店北京发行所经销

*

787×1092 毫米 16 开本 120.25 印张 3071 千字 印 1—2000

2003 年 2 月第 1 版 2003 年 9 月第 1 次印刷

定价：280.00 元

译者的话

《石油与天然气工程技术手册》(Standard Handbook of Petroleum & Natural Gas Engineering)分上、下两册。上册主要包括数学、计算机应用、通用工程等基础学科和配套设备以及石油工程学的钻井和完井工程等主要内容;下册主要包括油藏工程、采油工程和石油经济学等主要内容。手册用大量的数据、公式和图表阐述了石油和天然气工程中经常遇到的理论和实际问题,内容丰富、实用性强,是广大石油天然气工作者和有关院校师生比较理想的一本工具书。

上册由李晓明、蒋海军、张文中、刘国明、李朝霞、刘修善、于培志、王昔彬、吕雪雁、崔迎春、王西江等同志翻译,李晓明、蒋海军、张文中等同志参与了校对,最后由李晓明同志通校了全文。

下册由赵洪才、黎发文、李莉、李大荣、钱华、宋明雁和朱跃胜等同志翻译,赵洪才、陈钦保、杨寿山等同志参与了校对,最后由赵洪才同志通校了全文。周文、陈晓明、刘强和赵忠义等同志参与了少量翻译工作。

翻译工作得到了中国石化出版社和中国石化集团公司石油勘探开发研究院有关领导和人员,以及江汉油田杨寿山教授、陈钦保高级工程师的大力支持,在此一并致谢。

限于时间关系和译者水平,译文中可能会存在一些疏漏和错误之处,希望读者不吝赐教,以便在有机会再版时加以更正。

译者
2002年11月

前 言

《石油与天然气工程技术手册》(上、下册)秉承了其他工程学科手册的编写精神,反映了石油和天然气工程所服务的石油工业的重要性(标准普尔指数表明:燃料部门在国内生产总值 GDP 中是最大的单一实体)及其作为一门成熟工程学科的专业技术发展状况。

编写本手册的初衷是修订 20 世纪 40 年代由海湾出版社出版的《石油工程实用手册》。按此思路实施后发现:对旧手册的任何修订都是不充分且不完善的。因此,决定编纂一套全新的手册,并采用其他主要工程学科的手册编写原则和通用模式。也就是说,在手册前几章增设数学、计算机应用、通用工程等基础学科及配套设备等内容。这些初始章节采用了在所有工程学科中通用的术语和符号,从而为该手册设置了基调。这些术语和符号在全书中是通用的(且在所有事例中均与 SPE 的出版物保持一致)。编书的所有 27 名作者都尽量(且希望已经做到)避免使用过去 20 年中在石油工程文献中逐渐产生的难懂的行话和术语。我们的目标是要编撰一本可供任何现代工程师阅读和理解的石油工程学科手册。

有关石油工程专业学科的章节涵盖了钻井和完井、油藏工程、采油工程和经济评价等具体内容。这些章节的内容包含了在石油工程实践中经常要涉及的信息、数据和相关计算实例。并且,为了体现天然气在石油工业中日益增加的重要性,在手册的上、下册都增加了与天然气工程有关的内容。

因此,重新编纂该手册费事费力且困难颇多。但在整个工作过程中,作者们始终与编辑进行了充分的合作并给予了大力的支持。在手册的准备过程中,作者们使用了来自美国石油学会(API)和石油工程师协会(SPE)的大量公开资料,作者感谢两协会在准备和完成定稿过程中的诚挚合作。同时也感谢那些在编写和出版该手册过程中提供支持和帮助的许多石油开发和服务公司。

作者非常感谢 Jerry Hayes, Danette DeCristofaro 以及 Execustaff Composition 服务公司的职员们,他们为最后的版面进行了非常出色的准备。同时,还感谢海湾出版公司的 Bill Lowe 先生,感谢他对出版该手册的真知灼见和持之以恒的支持。感谢那些在准备手稿过程中提供非常必要的打印和从事其他事务的许多人员。感谢那些占用了许多周末休息时间的作者家人的支持。编者还要特别感谢在整体组织、手稿的撰写和相应的绘图过程中提供多年支持的一组人,他们是: Ann Gardner、Britta Larsson、Linda Sperling、Ann Irby、Anne Cate、Rita Case 和 Georgia Eaton。

所有的作者和编者都知道这项工作并非完美无瑕的,但是我们也知道有必要编写这本手册。我们最大的心愿就是给后来的编撰者在本手册以后的修订中提供非常有价值的基本素材。

William C. Lyons, Ph. D., P. E.
Socorro, New Mexico

石油与天然气工程技术手册(上、下册)

目 录

| | | |
|-----|---------------|---------|
| 第一章 | 数学 | (1) |
| 第二章 | 工程与科学概论 | (94) |
| 第三章 | 配套设备 | (292) |
| 第四章 | 钻井和完井 | (387) |
| 第五章 | 油藏工程 | (1103) |
| 第六章 | 采油工程 | (1386) |
| 第七章 | 石油经济 | (1862) |
| 附 录 | 单位及其换算 | (1899) |

上册目录

| | |
|--------------------------|---------|
| 第一章 数学 | (1) |
| 第一节 几何学..... | (1) |
| 第二节 代数学..... | (10) |
| 第三节 三角学..... | (16) |
| 第四节 微分和积分计算..... | (21) |
| 第五节 分析几何学..... | (32) |
| 第六节 数值方法..... | (38) |
| 第七节 应用统计学..... | (61) |
| 第八节 计算机应用..... | (73) |
| 参考文献..... | (92) |
| 第二章 工程与科学概论 | (94) |
| 第一节 力学基础(静力学和动力学)..... | (94) |
| 第二节 流体力学..... | (118) |
| 第三节 材料力学..... | (131) |
| 第四节 热力学..... | (154) |
| 第五节 地质工程..... | (178) |
| 第六节 电学..... | (208) |
| 第七节 化学..... | (221) |
| 第八节 工程设计..... | (273) |
| 参考文献..... | (288) |
| 第三章 配套设备 | (292) |
| 第一节 原动机..... | (292) |
| 第二节 动力传输..... | (315) |
| 第三节 泵..... | (358) |
| 第四节 压缩机..... | (372) |
| 参考文献..... | (385) |
| 第四章 钻井和完井 | (387) |
| 第一节 标准井架和轻便井架..... | (387) |
| 第二节 提升系统..... | (405) |
| 第三节 旋转设备..... | (492) |
| 第四节 泥浆泵..... | (500) |
| 第五节 钻井泥浆与完井液..... | (533) |
| 第六节 钻具结构及其设计..... | (583) |
| 第七节 钻头和井下钻具..... | (635) |

| | | |
|-------|-----------------|---------|
| 第八节 | 钻井泥浆水力学 | (678) |
| 第九节 | 空气和气体钻井 | (686) |
| 第十节 | 井下马达 | (700) |
| 第十一节 | MWD 和 LWD | (724) |
| 第十二节 | 定向井 | (864) |
| 第十三节 | 钻井参数的选择 | (872) |
| 第十四节 | 井眼压力控制 | (880) |
| 第十五节 | 打捞作业和打捞工具 | (889) |
| 第十六节 | 套管和套管柱设计 | (896) |
| 第十七节 | 固井 | (948) |
| 第十八节 | 油管与油管柱设计 | (988) |
| 第十九节 | 腐蚀与结垢 | (1006) |
| 第二十节 | 环境保护 | (1067) |
| 第二十一节 | 海洋作业 | (1083) |
| 参考文献 | | (1092) |

目 录

| | |
|-----------------------------|--------|
| 第五章 油藏工程 | (1103) |
| 第一节 基本原理、定义和数据 | (1103) |
| 第二节 地层评价 | (1168) |
| 第三节 油气井的压力不稳定试井 | (1269) |
| 第四节 依靠天然能量开采油气的机理和采收率 | (1278) |
| 第五节 物质平衡和体积分析 | (1282) |
| 第六节 递减曲线分析 | (1293) |
| 第七节 储量估算 | (1298) |
| 第八节 二次采油 | (1305) |
| 第九节 水淹油层中的流体流动 | (1311) |
| 第十节 水驱残余油饱和度的估算 | (1335) |
| 第十一节 提高原油采收率方法 | (1348) |
| 参考文献 | (1369) |
| 第六章 采油工程 | (1386) |
| 第一节 烃类混合物性质 | (1386) |
| 第二节 流体流动 | (1431) |
| 第三节 天然流动特征 | (1507) |
| 第四节 人工举升方法 | (1553) |
| 第五节 增产和修井作业 | (1605) |
| 第六节 地面产油系统 | (1634) |
| 第七节 天然气开采工程 | (1674) |
| 第八节 腐蚀与结垢 | (1791) |
| 第九节 环境保护 | (1826) |
| 第十节 海上作业 | (1844) |
| 参考文献 | (1850) |
| 第七章 石油经济 | (1862) |
| 第一节 油气储量的估算 | (1862) |
| 第二节 增产措施 | (1875) |
| 第三节 未来产量的确定 | (1880) |
| 第四节 原油和天然气财产的评估 | (1891) |
| 参考文献 | (1896) |
| 附录 单位及其换算 | (1899) |

第一章 数 学

第一节 几 何 学

更多信息见参考资料 1-3。

一、集合和函数

集合被清楚地定义为特征事物或元素的集合。集合 S 和集合 T 的交集是指集合中的元素既属于集合 S 又属于集合 T 。集合 S 和集合 T 的并集是指集合中的元素或者属于集合 S 或者属于集合 T 。

函数是有序元素的集合，没有两个有序对具有相同的初始元素，记作 (x, y) 。这里 x 是自变量， y 是因变量。对于每一个 x 值，当决定 y 值的条件存在，函数就已经建立。条件通常由类似 $y = f(x)$ 的方程来定义[2]。

二、角

角 A 可以是锐角 ($0^\circ < A < 90^\circ$)、直角 ($A = 90^\circ$) 或钝角 ($90^\circ < A < 180^\circ$)。方向角 $A \leq 0^\circ$ 或 $A \geq 180^\circ$ 将在三角学部分讨论。如果两个角的和是 90° ，那么这两个角互余；如果两个角的和是 180° ，那么这两个角互补。如果角的度数相等那么角是全等的；如果线段具有相等的长度那么该线段是全等的。二面角由具有相同边的不在同一平面上的两个半平面组成。平面角是垂直平面与二面角的相交部分。

三、多边形

多边形是同一平面上有限个三角区域的连接。这样，如果两个区域相交，那么它们的相交部分或者是一个点或者是一个线段。如果两个多边形相应的角相等，相应的边呈比例(常数 k)，那么这两个多边形相似。多边形不相邻的两个顶点连接的线段叫多边形的对角线，多边形所有边的和叫多边形的周长。

四、三角形

三角形的中线是指两端点分别为三角形顶点及顶点对边中点的线段；三角形的角平分线是位于平分三角形一角的射线上的中线；三角形的垂线是指三角形顶点到其对边的垂线段。三角形的内角和是 180° 。等腰三角形是指两条边相等，两条边对应角也相等的三角形。如果三角形的三条边都相等，那么该三角形是等边三角形。不等边三角形是三条边都不相等的三角形。下列情况中，如果已知其中的一种，就可以画出一组全等三角形 ($S =$ 边长, $A =$ 角的大小): SSS、SAS、AAS 和 ASA。

五、四边形

四边形是由同一平面上的四个点(其中三点不在一条直线上)决定的具有四个边的多边形。如果这样形成的线段彼此只在端点处相交就形成四个角。

梯形有一组对边平行而另一组对边全等。平行四边形的两组对边平行且相等, 其对角相等, 邻角互补, 对角线相互平分且相等。菱形是四条边都相等的平行四边形, 它的对角线相互垂直。矩形是四个角都为直角的平行四边形, 其两组对边也相等。四条边都相等的矩形叫正方形。

六、圆和球形

P 是平面上的一个点, r 是一个正数, 以 P 为圆心以 r 为半径的圆是同一平面内到 P 点的距离为 r 的所有点的集合。以 P 为中心、以 r 为半径的球形是空间内到 P 点的距离等于 r 的所有点的集合。具有相同中心但不同半径的两个圆或更多圆(球形)是同心的。

以圆(或球形)上的两点为端点的线段叫做弦; 与圆(或球形)相交于两点的直线叫圆(或球形)的割线; 过中心的弦叫圆(或球形)的直径。半径是从中心到圆(或球形)上一点的直线段。

过中心的平面与球形的相交部分叫大圆。

与圆只有一个交点的直线叫圆在该点的切线, 每一条切线垂直于过切点的半径。球形可以有切线或切面。

$Pi(\pi)$ 是任意圆的圆周与其直径的比值, $Pi(\pi)$ 等于 $3.1415927\dots$ 。圆的直径为 $2d$ 或 $2\pi r$ 。

七、圆弧

圆心角是顶点在圆心的角。如果点 P 是圆心, A 、 B 是不在同一直径上的圆周上的两点, 则圆小弧 AB 连接 A 与 B 并且所有点都在 $\angle APB$ 内侧的圆上; 圆大弧 AB 连接 A 与 B 并且所有点都在 $\angle APB$ 外侧的圆上; A 和 B 是圆弧的端点, P 是圆弧的圆心。如果 A 和 B 是直径的两个端点, 那么圆弧就是一个半圆。圆的扇形是两条半径和圆弧所围的区域。

圆小弧的度数是相应圆心角的度数(半圆的度数是 180°)。圆大弧的度数就是 360° 减去相应圆小弧的度数。如果圆弧的度数为 q , 半径为 r , 则圆弧的长度 $L = q/180 \cdot \pi r$ 。

弧的一些性质由下列原理定义:

(1) 在全等圆中, 如果两条弦相等, 那么相应的小弧也相等。

(2) 切线-割线原理——如果切线和割线形成的角顶点在圆上, 那么角的大小是所截弧的一半。

(3) 二切线定理——圆外一点到圆的两条切线段相等并且决定了两条切线段与该点到圆心的线段的夹角相等。

(4) 二割线定理——如果已知圆 C 和圆外一点 Q , L_1 是过 Q 点的割线, 与圆 C 相交于点 R 和 S , L_2 是过 Q 点的另一条割线, 与圆 C 相交于点 U 和 T , 那么 $QR \cdot QS = QU \cdot QT$ 。

(5) 切线-割线相乘原理——如果已知圆的切线段 QT 和过点 Q 的割线与圆相交于点 R 和 S , 那么 $QR \cdot QS = QT^2$ 。

(6)二弦定理——如果 \overline{RS} 和 \overline{TU} 是同一圆的两条弦，相交于点 Q ，那么 $QR \cdot QS = QU \cdot QT$ 。

八、相交

如果有一个点位于所有直线上，那么这两条或多条直线是相交的。三角形的三条垂线（如果将其看作直线，而不是线段）总是相交于一点，它们的交点叫垂心。三角形的角平分线也是相交于一点的，交点到各边的距离相等。中线沿着中线方向在顶点到对边距离的三分之二处相交于一点。中线的交点叫重心。

九、相似

如果对应角相等，对应边呈相同比例，那么具有直角边的两个图形相似。平行于三角形一条边的直线按比例分开另外两条边所产生的第二个三角形相似于原三角形。

十、棱柱体和锥体

棱柱体是底全等且平行、侧面是平行四边形的三维图形。锥体是一个立体图形，底由任意多边形组成，三角形侧面相交于平行于底面的平面上的一点。

棱柱体和锥体根据它们的底面命名：三角形棱柱体的底面为三角形，平行六面体的底面为平行四边形，长方体是一个直立的长方形柱体。正方体是所有边都相等的长方体，三角锥有一个三角形底面，等等。圆柱是底面为圆的柱体，圆锥是底面为圆的锥体。

十一、坐标系

平面上的每一个点都由一数对来定义。坐标系由平面上的直线 X （ X 轴）和垂直于它的直线 Y （ Y 轴）组成。它们的交点叫原点，记作 O 。平面上的任意一点 P 可由坐标形成的一对有序数字来描述。所以 $P(x_1, y_1)$ 是指其位置在 X 轴和 Y 轴上分别对应实数 x_1 和 y_1 的点。

如果坐标系延伸到空间范围内，需要垂直于 X 轴和 Y 轴所在平面的第三个轴（ Z 轴）来定义点 $P(x_1, y_1, z_1)$ 的三维坐标。 Z 轴与 X 轴和 Y 轴在原点处相交。在数学上经常用到超过3的维数，但是很难可视化。

平面上端点为 $P_1(x_1, y_1)$ 和 $P_2(x_2, y_2)$ 的线段的斜率 m 由垂直坐标（ y 坐标）变化量和水平坐标（ x 坐标）变化量的比值来决定，即 $m = (y_2 - y_1) / (x_2 - x_1)$ ，垂直线段没有斜率（ x 轴变化为零，斜率没有定义）。

水平线段的斜率为零。斜率相等的两条直线相互平行，斜率互为负倒数的两条直线相互垂直。

两点 $P_1(x_1, y_1)$ 和 $P_2(x_2, y_2)$ 之间的距离是一个直角三角形的斜边，那么线段 P_1P_2 的长度

$$L = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

十二、图形

图形是一个图，例如，坐标系中的一组点或满足条件 $x = y + 2$ 的所有点的图形。斜截方程 $y = mx + b$ 的图形是过点 $(0, b)$ 的直线， b 是 y 轴上的截距， m 是斜率。方程

$(x-a)^2 + (y-b)^2 = r^2$ 的图形是圆心为 (a, b) , 半径为 r 的圆。

十三、向量

坐标平面上描述的向量是从起点到终点有方向的线段。有方向的线段代表这样一个事实, 每个向量不仅有大小而且有方向。如果向量 \vec{v} 的大小和它与 x 轴的夹角不变, 在坐标平面上移动时该向量不变。因此可将向量 \vec{v} 的起点放在坐标系的原点, 该向量记作 $\vec{v} = \langle a, b \rangle$, a 是终点的 x 坐标, b 是终点的 y 坐标。根据毕达哥拉斯定理, $v = \sqrt{a^2 + b^2}$ 。对每一对向量 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 来说, 向量的和由向量 $(x_1 + x_2, y_1 + y_2)$ 得出。向量 $P = (x, y)$ 与实数(一纯量) r 的点积是 $rP = (rx, ry)$ 。也可以参考三角几何部分对极坐标的讨论和第二章“基本机理”部分。

十四、平面图形的周长和面积^[1]

(三角函数的定义参考“三角学”)

1. 直角三角形(图 1-1)

$$c^2 = a^2 + b^2$$

$$\text{面积} = 1/2 \cdot ab = 1/2 \cdot a^2 \cot A = 1/2 \cdot b^2 \tan A = 1/4 \cdot c^2 \sin 2A$$

2. 等边三角形(图 1-2)

$$\text{面积} = 1/4 \cdot a^2 \sqrt{3} = 0.43301 a^2$$

3. 任意三角形(图 1-3)

$$\text{面积} = 1/2 \text{底} \cdot \text{高} = 1/2 \cdot ah = 1/2 \cdot ab \sin C$$

$$= \pm 1/2 \cdot \{(x_1 y_2 - x_2 y_1) + (x_2 y_3 - x_3 y_2) + (x_3 y_1 - x_1 y_3)\}$$

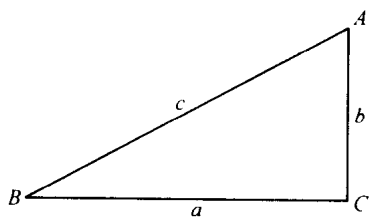


图 1-1

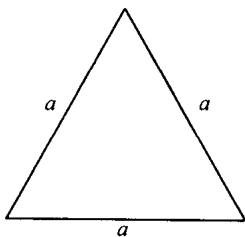


图 1-2

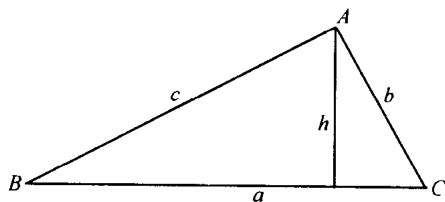


图 1-3

这里, (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) 是顶点坐标。

4. 矩形(图 1-4)

$$\text{面积} = ab = 1/2 \cdot D^2 \sin u$$

这里, u 是对角线 D , D 的夹角。

5. 菱形(图 1-5)

$$\text{面积} = a^2 \sin C = 1/2 \cdot D_1 \cdot D_2$$

这里, C 是相邻边的夹角; D_1 , D_2 是对角线长度。

6. 平行四边形(图 1-6)

$$\text{面积} = bh = ab \sin c = 1/2 \cdot D_1 \cdot D_2 \sin u$$

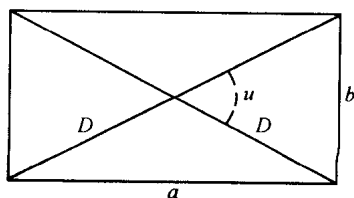


图 1-4

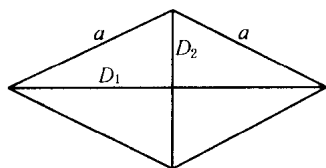


图 1-5

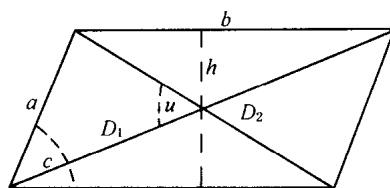


图 1-6

这里, $u =$ 对角线 D_1, D_2 的夹角。

7. 梯形(图 1-7)

$$\text{面积} = 1/2 \cdot (a + b)h = 1/2 \cdot D_1 D_2 \sin u$$

这里, $u =$ 对角线 D_1, D_2 的夹角, 底 a 和 b 平行。

8. 任意四边形(图 1-8)

$$\text{面积} = 1/2 \cdot D_1 D_2 \sin u$$

$$\text{注意, } a^2 + b^2 + c^2 + d^2 = D_1^2 + D_2^2 + 4m^2$$

$m = D_1$ 和 D_2 中点间的距离。

9. 圆

$$\text{面积} = \pi r^2 = 1/2 \cdot Cr = 1/4 \cdot Cd = 1/4 \cdot \pi d^2 = 0.785398 d^2$$

这里, $r =$ 半径;

$d =$ 直径;

$$C = \text{周长} = 2\pi r = \pi d。$$

10. 圆环(图 1-9)

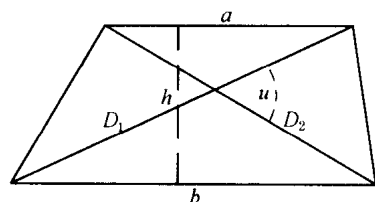


图 1-7

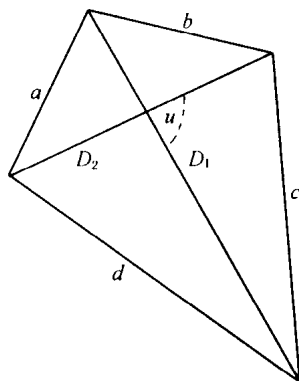


图 1-8

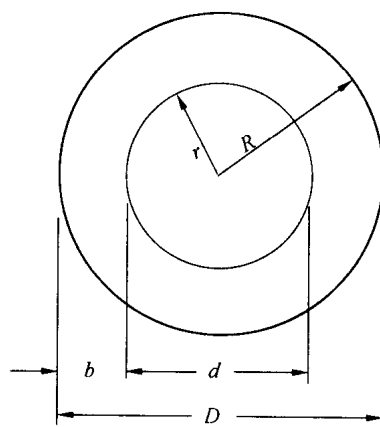


图 1-9

$$\text{面积} = \pi(R^2 - r^2) = \pi(D^2 - d^2)/4 = 2\pi R'b$$

这里, $R' =$ 平均半径 $= 1/2 \cdot (R + r)$, $b = R - r$ 。

11. 扇形(图 1-10)

$$\text{面积} = 1/2 \cdot rs = \pi r^2 A / 360^\circ = 1/2 \cdot r^2 \text{rad} A$$

$\text{rad} A =$ 角 A 的弧度

$$s = \text{弧的长度} = r \cdot \text{rad} A$$

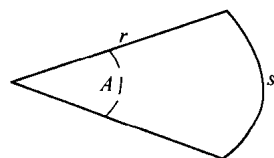


图 1-10