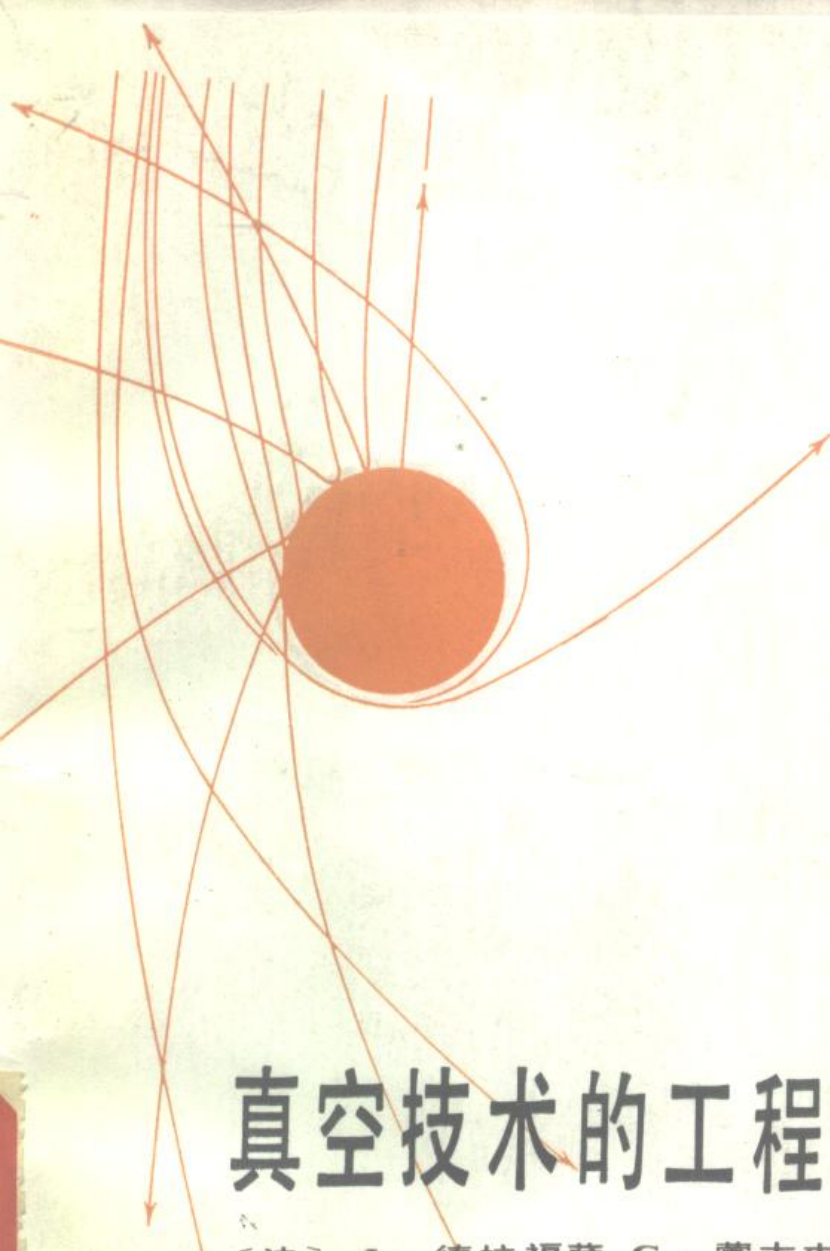




真空技术的工程计算

〔法〕 J. 德拉福萨 G. 蒙古屯 著

机 械 工 业 出 版 社

真空技术的工程计算

〔法〕 J. 德拉福萨 G. 蒙古屯 著

陈丕瑾 译

机械工业出版社

本书属于真空系统经典的有关设计计算的范本。

本书围绕各种真空系统的工程设计问题，系统地阐明了气体分子运动论，真空系统的一般特性以及存在或不存在出气的情况下稳态或瞬态气流的许多基本概念和计算。

本书叙述简明，概念清楚，避免运用复杂的数学公式而代之以大量诺模图表、曲线，通俗易懂地阐明了真空技术的各种工程计算方法，等等。

本书可作为真空技术设计计算的通俗读物，也可作为非真空专业中高级工程技术人员参考。

**LES CALCULS DE LA TECHNIQUE
DU VIDE**
J. DELAFOSSE G. MONGODIN
**EDITE PAR LA SOCIETE FRANCAISE
DES INGENIEURS ET TECHNICIENS DU VIDE**

1961

真空技术的工程计算

〔法〕J.德拉福萨 著
G.蒙古屯
陈丕瑾 译

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $5 \frac{1}{2}$ · 字数 114 千字

1985 年 11 月北京第一版·1985 年 11 月北京第一次印刷

印数 0,001—3,600 · 定价 1.35 元

*

统一书号：15033·6028

译者前言

我们知道，从传统的电子工业脱颖而出的真空技术业已发展为一门独立的学科，并已广泛地渗透到一切科学和工业部门，如原子能、加速器、宇航、风洞、医药、食品、冶金，还有能源、资源和环境等许多新兴科学领域。因此，国内外有关的统计数字表明，直接和间接从事与真空有关的科研人员数以千万计，而投资额也与日俱增。法国德拉福萨（J. Delafosse）和蒙古屯（G. Mongodin）所著的“真空技术的工程计算”一书正是适应这种形势的需要，而赢得了许多读者的欢迎。

本书内容围绕着各种典型的高真空系统（包括具有分布出气的大型加速器在内）的工程设计和计算问题，并系统地阐明了高真空系统的一般特性以及存在或不存在出气情况下稳态和瞬态气体流动的许多基本概念。

所谓真空计算，就是预测高真空排气装置内的压强分布及其变化。本书采用工程计算方法，在与电路类比的基础上，运用大量诺模图表和曲线，避免了许多复杂的公式和计算，而其计算结果在许多情况下仍然落在工程允许的误差范围内。尽管近代真空技术的某些领域必须依赖计算机计算，以获取更加精确的结果和概念，（例如流导的串联公式，弯管流导公式，泵与导管连接后的抽速等等），与此相适应开拓了许多计算方法，如传输几率法、几何因子法（又称为角系数法）、蒙特卡洛（Monte Carlo）法等等，而本书仍不失却很高的实用价值，尤其是作为本书支柱的“与电路类比”的

IV

方法, 80 年代仍在发展, 比较著名的有电阻网络法, 可用于真空气路的计算。

本书取材和叙述简明扼要, 概念清楚, 范例生动, 适合于接触真空的各行各业的工程技术人员、大专院校师生和各生产厂的工人翻阅、参考。

本书曾作为学生设计真空系统时的教学参考书, 这次出版前进行了重译和整理。

陈丕瑾

1983 年于清华园

主要符号表

A —导管截面积	N' —单位时间的分子数
A_0 —上流容器截面积	n —克分子数
a —边长	n_1 —单位体积实际分子数
α —出气率	ν —入射频率
α — <i>Clausing</i> 系数 (克劳辛系数)	P —压强
b —边长	$\bar{P}$ —平均压强
C —流导	P_0 —极限压强
C_c —修正后的流导	P_i —起始压强
γ —气体的绝热指数	P_f —最终压强
D —管径	Q —气体流量
η —粘滞系数	R —气体普适常数
J —从分子流流导出发计算过渡流或粘滞流流导的修正系数	Re —雷诺数
K —形状系数	r —压强比
k —波尔兹曼常数	r_c —临界压强比
L —管长	ρ —密度
i —边长	S —抽速
$\log_e$ —自然对数 (e 为底)	S_t —理论抽速
$\log$ —一般对数 (10 为底)	S_p —泵抽速
λ —平均自由程	σ —分子直径
M —克分子量	T —绝对温度
m —分子量	t —时间、期间
$\mathcal{N}$ —阿佛加德罗常数	τ —时间常数 $\left(\frac{V}{S}\right)$
N —实际分子数	V —体积

X

V' —体积流量

v —速度 (流速)

v —最可几速度

v_m —算术平均速度

v_q —均方根速度

x —横坐标, 直线长度

Y —形状系数

y —直线长度

Z —管阻

Z_o —入孔管阻

Z_e —修正后的管阻

z —直线长度

目 录

译者前言

第一章 气体分子运动论要义	1
§ 1.1 理想气体的基本定律	1
1.1.1 阿佛伽得罗定律	1
1.1.2 马略特定律	1
1.1.3 盖·吕萨克定律和理想气体状态方程式	1
§ 1.2 气体运动论基础	3
§ 1.3 气体分子的速度分布	3
1.3.1 麦克斯韦·波尔兹曼函数	3
1.3.2 最可几速度	7
1.3.3 算术平均速度	8
1.3.4 均方根速度	8
§ 1.4 分子的碰壁数 (入射频率)	9
§ 1.5 气体运动论的压强概念, 压强的计算	10
§ 1.6 平均自由程	11
§ 1.7 分子对器壁的碰撞, 克努逊假设, 气体动力学	13
第二章 真空系统的一般特性	15
§ 2.1 与电路的类比	15
2.1.1 压强与电位的类比	15
2.1.2 气体流量的各种定义	16
2.1.3 气体流量与电流强度的类比	18
2.1.4 流阻的概念	18
2.1.5 流导的概念	19
§ 2.2 抽速的定义	20
§ 2.3 泵与导管连接后的抽速	21

§ 2.4 计算流导串联和有效抽速用图表	22
第三章 没有出气情况下稳定流动的研究	25
§ 3.1 通过小孔的流动	25
3.1.1 高压强下的流动 (粘滞流)	25
3.1.2 低压强下的流动 (分子流)	28
§ 3.2 与上流容器比, 孔较大时的修正	31
3.2.1 分子流时的修正	31
3.2.2 粘滞流时的修正	34
§ 3.3 通过导管的流动	35
3.3.1 对各种流动的一般讨论	35
3.3.2 粘滞流圆截面直管的流导	41
3.3.3 分子性流动下任意均匀截面直长管的流导	43
3.3.4 粘滞流、过渡流、分子流情况下圆截面直管的流导	46
3.3.4.1 克努逊公式	46
3.3.4.2 分子性流动	46
3.3.4.3 粘滞性流动	47
3.3.5 对 20°C、空气的粘滞流、过渡流和分子流情况 下圆截面管流导的通用公式	47
3.3.6 关于粘滞流下导管流导的注解和应用	50
3.3.6.1 短管	50
3.3.6.2 空气以外的气体	50
3.3.6.3 作为压强梯度函数的表示式	50
3.3.6.4 矩形导管的粘滞流流导	51
3.3.6.5 例子、图表	51
3.3.7 关于分子流流导的注解和应用	55
3.3.7.1 短管与容器尺寸相比, 直径不可忽略的 孔, 克劳辛系数	55
3.3.7.2 空气以外的气体	58
3.3.7.3 曲线和图表	58

3.3.7.4 均匀环截面直管	60
3.3.7.5 均匀矩形截面的直管	61
3.3.7.6 均匀三角形截面的直管	61
3.3.7.7 均匀任意截面的直管	62
3.3.7.8 弯角	62
3.3.7.9 任意变截面导管的流导	64
§ 3.4 真空泵的抽速	65
§ 3.5 阱的抽速 (阱流导的计算)	66
3.5.1 分子性流动	66
3.5.2 粘滞性流动	67
3.5.3 分子流阱的计算例子	68
§ 3.6 热泻流	71
§ 3.7 对空气以外的其它气体或对非20°C温度的 公式修正	72
第四章 没有出气情况下瞬变过程的研究	74
§ 4.1 通过无限大流导对容器抽气, 假定抽速保持 不变, 极限压强可予忽略	76
§ 4.2 通过无限大流导对容器抽气, 假定抽速保持 不变, 考虑极限压强 P_0	77
§ 4.3 通过无限大流导对容器抽气, 假定抽速并非常 数, 极限压强 P_0 可予忽略	85
§ 4.4 通过无限大流导对容器抽气, 假定抽速并非常 数, 考虑极限压强 P_0	86
§ 4.5 通过恒定流导对容器抽气, 假定抽速不变, 极限 压强 P_0 可以忽略	87
§ 4.6 通过恒定流导对容器抽气, 假定抽速不变, 考虑 极限压强 P_0	88
§ 4.7, § 4.8 通过恒定流导对容器抽气, 假定抽速 并非常数, 考虑或不考虑极限压强	88
§ 4.9 在粘滞流情况下, 通过导管对容器抽气,	

这时流导是可变的	89
第五章 出气的研究	95
§ 5.1 出气的宏观定律	95
§ 5.2 实验研究	97
§ 5.3 出气的结果, 对稳定过程或瞬变过程真空计算的 影响	99
5.3.1 局部出气	99
5.3.2 分布出气	111
§ 5.4 室温下的出气曲线	119
第六章 泵间配合——泵组的选择	122
§ 6.1 关于特性曲线的评述	122
6.1.1 预抽泵	122
6.1.2 罗茨泵	124
6.1.3 扩散泵	126
6.1.4 增压泵	128
§ 6.2 泵间的配合	130
§ 6.3 抽气的经典问题	136
6.3.1 中真空区的抽气	136
6.3.2 分子性真空的获得, 采用中间罗茨泵的益处	139
6.3.3 阱与罗茨泵配合抽到分子性真空	143
第七章 公式、图表和曲线	148
表 7.1 压强单位换算表	156
表 7.2 各种气体流量单位换算表	157
表 7.3 各种抽速单位换算表	158
表 7.4 某些气体和蒸气的物理特性表	158
表 7.5 海平面上干燥空气的成分	160
表 7.6 各种温度下的水蒸气压	161

第一章 气体分子运动论要义

我们只扼要地阐述了真空技术计算必须的气体运动论的几个要素，但并未深入地研究这一经典课题以及并未对下面所用的所有公式给予证明。

§ 1.1 理想气体的基本定律

从宏观的观点看，气体几乎都遵守理想气体的所有定律。尤其对于温度不太低，压强不太高的真实气体或远离液化条件的蒸汽，实验证明是令人满意的。

1.1.1 阿佛伽得罗定律

$$M = 29 d \quad \text{在 } 0^{\circ}\text{C}, 760 \text{ 托 } (1.01 \times 10^5 \text{ 帕}) \quad (1.1)$$

M ——克分子量。 d ——相对空气的密度。

此定律可以用另一种方式表示：

相同体积的不同气体，在相同的温度和压强的情况下，包含相同的分子数。在标准温度和标准压强的情况下 (0°C , 760 托) 一克分子的任意气体占据 22.4 升。

1.1.2 马略特定律

在恒定的温度（等温变化）下，一定质量气体的压强 P 和体积 V 之乘积为常数：

$$PV = C' \quad (1.2)$$

1.1.3 盖·吕萨克定律和理想气体状态方程式

一定质量的气体在等体积变化过程中压强遵循

$$P_2 = P_1 \frac{T_2}{T_1} \text{ 定律变化。}$$

最终状态用脚标 2，起始状态用脚标 1。 T_2 和 T_1 用绝对温度 (K)。

同样，等压变化遵循 $V_2 = V_1 \frac{T_2}{T_1}$ 定律。

我们假设一种质量的气体由状态 1 (P_1, V_1, T_1) 通过状态 2 ($P_2, V_2 = V_1, T_2$) 变化到状态 3 ($P_3 = P_2, V_3, T_3$)，则可以写出：

$$P_2 = P_1 \frac{T_2}{T_1}$$

以及

$$V_3 = V_2 \frac{T_3}{T_2}$$

两式左右各自相乘

$$P_2 V_3 = P_1 V_2 \frac{T_3}{T_1}$$

且因

$$P_2 = P_3, V_2 = V_1,$$

故有

$$P_3 V_3 = \frac{P_1 V_1}{T_1} \cdot T_3$$

我们取状态 1 为参考状态 (对 1 克分子)

$$P_1 = 760 \text{ 托} = 1.013 \text{ 巴} = 1.013 \times 10^5 \text{ 帕}$$

$$V_1 = 22.4 \text{ 升} = 22400 \text{ 厘米}^3 = 0.0224 \text{ 米}^3$$

$$T_1 = 273 \text{ K 或 } 0^\circ\text{C}$$

对于任意状态的 (1 克分子) 气体，可以写出关系式

$$PV = RT$$

式中 R ——理想气体常数 (普适常数)。

$$R = \frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{1.013 \cdot 10^5 \times 22400}{273} = 8.31 \cdot 10^7 \text{ 尔格/度} =$$

8.31 焦耳/度, 普遍情况下, 对于 n 克分子气体有

$$\boxed{PV = nRT} \quad \text{厘米-克-秒单位制} \quad (1.3)$$

P (巴), V (厘米³), T (K) 则 $R = 8.31 \cdot 10^7$ 尔格/度。如果把 $\mathcal{N}'$ 称为阿佛伽得罗常数, N 为真正的分子数, 便有,

$$PV = n \cdot \mathcal{N}' \cdot \frac{R}{\mathcal{N}} T \quad (\mathcal{N}' = 6.02 \cdot 10^{23})$$

$$\boxed{PV = NkT} \quad (1.4)$$

其中 k ——波尔兹曼 (Boltzmann) 常数

$$k = 1.38 \cdot 10^{-16} \text{ 尔格/K}$$

§ 1.2 气体运动论基础

我们可以根据组成气体的分子内在的行为来研究该气体的特性。这里, 认为气体是由大量尺寸极小, 持续不停, 随机地快速运动的粒子 (分子) 组成的。

分子运动的轨迹是由一些折线组成, 在二次碰撞之间, 每个分子以等速直线运动。碰撞是在二分子之间或在分子和壁之间发生。

分子的直径比起它们之间的距离要小得多, 但是在比容器小得多的体积元内却包含着大量分子。

因此, 可以认为在分子动能和热之间建立平衡。

§ 1.3 气体分子的速度分布

1.3.1 麦克斯韦·波尔兹曼函数

在任一给定状态, 分子的速度、方向都不相同。此外, 每次

碰撞后，分子既改变速度，也改变方向。

普遍说来，不能认为在给定的体积内，气体分布是均匀的，分子速度在空间的每一点是各向同性的（也就是说有偏爱方向）。在这些条件下，对速度分布的分析就不可实现。例如气体通过小孔向容器内膨胀，而容器本身又不处于同一温度下，便是这种情况。

我们只研究最重要的特殊情况，即包含在温度均匀的容器内，而又处于热平衡的单纯气体。

在此种场合下，有理由认为粒子的分布是均匀的（也就是说：单位体积内的粒子数在整个容器内是相同的，并且不随时间改变）。

我们也假设分子速度的方向是均匀分布的。

最后我们认为速度分布是稳定的，即在任何瞬时，在每一体积元内任意给定速度的粒子数是相同的。从瞬时看，某些分子由于碰撞使一部分速度改变，但是总有另外一些分子恰好取得这些速度，而总的速度分布并不改变。

我们来给出下述形式的速度分布图。

假设能够在给定瞬时计算速度在 $0 \sim 100$ 米/秒， $100 \sim 200$ 米/秒， $200 \sim 300$ 米/秒……之间的分子数。令 $\Delta n_1, \Delta n_2, \Delta n_3, \dots$ 是求出的粒子数， Δv 是考虑的速度间隔，即： $\Delta v = 100$ 米/秒。

我们来描绘下述曲线，横坐标为速度，纵坐标为比值 $\frac{\Delta n}{\Delta v}$ 。于是我们便获得了阶梯形曲线 A （图 1.1）而速度值在 $600 \sim 700$ 米/秒之间的分子数显然正比于阴影部分的面积 $\frac{\Delta n}{\Delta v} \cdot \Delta v$ 。

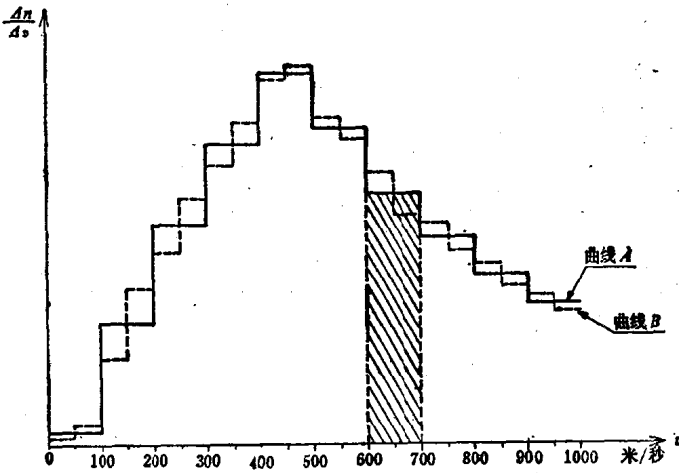


图1.1 速度分布

如果我们希望表达得更精确，可以重新进行上述计算，但间隔 Δv 要取得更小，例如令 $\Delta v = 50$ 米/秒。

这样得到曲线 B。间隔取得越小，速度分布曲线越精确，在极限的情况下，阶梯形曲线变为一条连续曲线，纵坐标实际上变为导数 $\frac{dn}{dv}$ 。

在麦克斯韦 (Maxwell) 之后，波尔兹曼 (Boltzmann) 也给出了上述分布曲线的表达式。根据偏重速度或其分量麦氏方程略有差异。

令 dn 为单位体积内速度分量在 v_x , v_y , v_z 和 $v_x + dv_x$, $v_y + dv_y$, $v_z + dv_z$ 之间的分子数

则可以写出

$$dn = n_1 f(v_x, v_y, v_z) dv_x dv_y dv_z$$

其中 n_1 是单位体积内分子总数， $f(v_x, v_y, v_z)$ 是分布函

数，于是可以证明：

$$dn = \frac{n_1}{2} \sqrt{\frac{m^3}{2\pi^3 k^3 T^3}} \cdot e^{-\frac{m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)}{2kT}} \cdot dv_x \cdot dv_y \cdot dv_z \quad (1.5)$$

如果对上式 v_y, v_z 从 $-\infty$ 积分到 $+\infty$ ，则我们便得到单位体积内 x 方向速度在 v_x 和 $v_x + dv_x$ 之间（其它二速度分量可以是任意的）的分子数 dn_x

$$\text{可以求出 } dn_x = n_1 \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}} \cdot e^{-\frac{mv_x^2}{2kT}} dv_x \quad (1.6)$$

最后，如果只对分子速率感兴趣，而对其方向不感兴趣，则可以求出速率包含在 v 和 $v + dv$ 之间的粒子数是：

$$dn_v = n_1 \cdot 2 \sqrt{\frac{m^3}{2\pi k^3 T^3}} e^{-\frac{mv^2}{2kT}} v^2 dv \quad (1.7)$$

为了建立这个分布的概念，只要描出形式为 $f(x) = K \cdot x^2 \cdot e^{-x^2}$ 的曲线 $f(v)$ 便行了。图 1.2 给出了函数 $x^2 e^{-x^2}$ 的图形。

曲线的一般形式都是从 O 出发，经过最大值，而后渐近于 x 轴（速度轴）。最大值的位置和数值与温度有关。温度增加时，最大值移向 v 增加处，分子的热运动增强。曲线和 v 轴包括的面积正比于分子总数，因此这个面积是常数（图 1.3）。