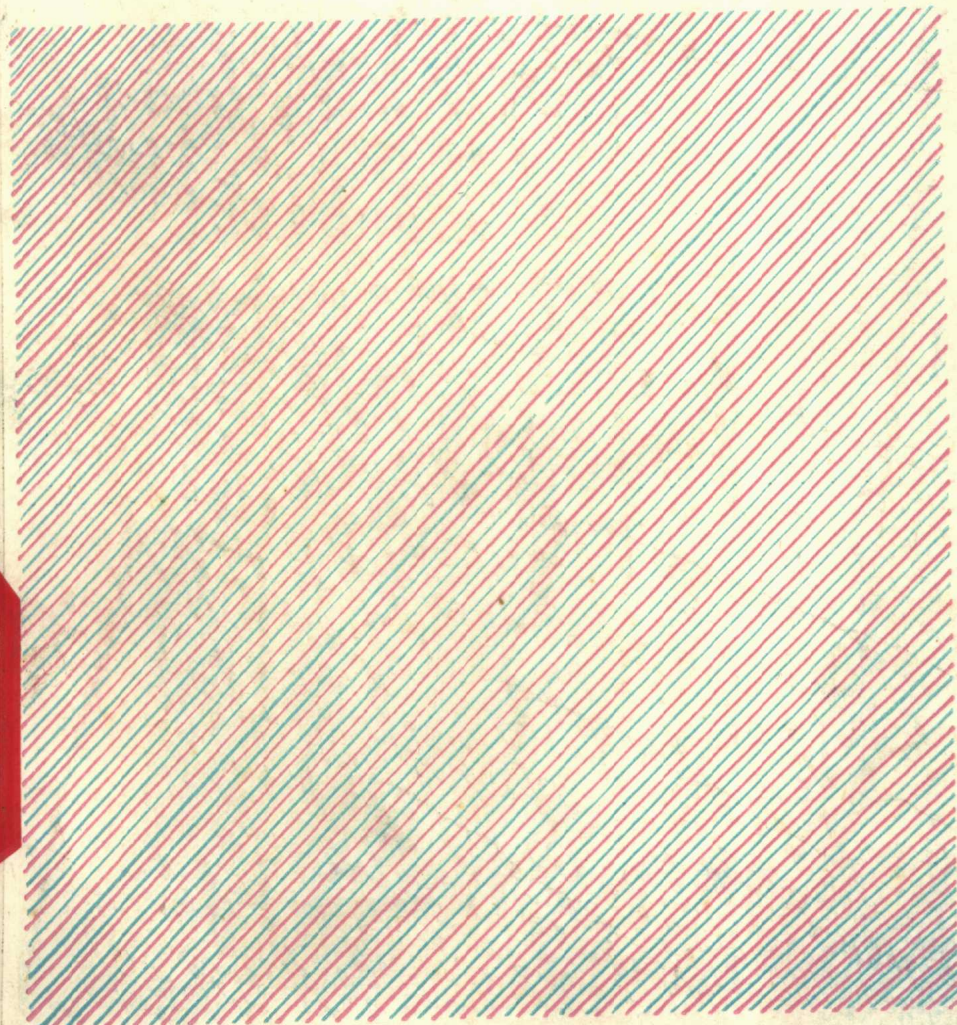


华中师范大学出版社

祁存谦 主编
胡振瑗

简明化工原理实验



简明化工原理实验

祁存谦 胡振瑗 主 编

黄光斗 项绍伟 李德树 副主编



华中师范大学出版社

内容提要

本书是根据参加编写单位多年的教学实践,并参考了国内出版的几种教材及多种化工原理实验讲义而编写的。全书编入了流体阻力、流量计校正、泵性能、过滤、传热、精馏、吸收、干燥等 20 套设备的化工原理实验。每个实验均由实验目的、基本原理、装置与流程、操作步骤、实验记录与数据整理、思考题等六部分组成。简要介绍了实验数据的处理方法、常用测量方法及仪表等。

本书可供化工类本科、专科、电大、职大的学生作为实验教材使用,也可供化工方面的科研、设计及生产单位的科技人员参考。

简明化工原理实验

祁存谦 主编
胡振媛

华中师范大学出版社出版发行

(武昌桂子山)

新华书店湖北发行所经销

武汉市新华印刷厂印刷

开本 850 × 1168 印张 4 字数 100 千字

1991 年 9 月第 1 版 1991 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 7-5622-0735-6/O·77

印数 1 - 12 500

定价: 1.85 元

前 言

目前，能开设化工原理实验的单位越来越多，各单位急需一本适合各方要求的化工原理实验教科书，《简明化工原理实验》就应运而生了。本书编写突出了两个特点，一是通用性，二是大众化。

通用性表现在，本书内容不仅适用于普通化工类专业，而且对于轻工化工、粮食化工、冶金化工等专业也可以使用；不仅适用于正规工厂生产的化工原理实验设备，也适用于自制的实验设备。

大众化表现在，语言通俗易懂，理论层次适中。不仅适用于一般化工类本科生水平，而且也适用于化工类专科、中专、电大、职大、夜大的学生使用。本书省去了较高层次的实验理论，增加了实验步骤、实验记录与数据整理，更适合于中低层次使用者的需要。

本书内容，可以满足“高等学校工科本科《化工原理》课程教学基本要求”，也可满足理科《化工基础教学大纲》对实验教学的要求。当然，本书在内容取舍上更适合于工科。

《简明化工原理实验》的编写，不仅参考了多种化工原理实验讲义，而且有多名具有丰富教学经验的教师参加编写。它是集体智慧的结晶。参加本书编写的编委有：雷达（武汉粮食工业学院）；王孝法（湘潭大学）；龙军（广东石油化工专科学校）；路平（华中工学院汉口分院）；项绍伟、梁中汇（武汉钢铁学院）；黄光斗、彭义霆（湖北工学院）；曾舟华（黄冈师范专科学校）；袁湘、胡振瑗、李德树、黄建华、吴岳俊、姚斌（武汉化工学院）；李应麟、祁存谦、陈义锋、吴宏（华中师范大学）。姚斌同志整理并描绘了全部插图，路平同志撰写了实验数据的计算机处理，

全书最后由祁存谦同志统一汇编定稿。

在本书出版之际，感谢参编单位的实验室工作人员及同事们
对本书所做的贡献。对于指出本书疏漏之处的读者，预致谢诚。

编 者

1991 年 3 月于武汉

目 录

第一章 化工原理实验数据的处理	(1)
一、实验应测取哪些数据.....	(1)
二、读取与记录数据应注意的问题.....	(1)
三、实验数据的处理方法.....	(2)
四、实验数据的图示法举例.....	(8)
五、实验数据的计算机处理举例.....	(14)
六、实验报告的制作要求.....	(17)
第二章 基础化工原理实验	(18)
实验一、流体流动阻力测定.....	(18)
实验二、流量计校正.....	(25)
实验三、泵性能测定.....	(30)
实验四、过滤实验.....	(35)
实验五、传热 (一) 蒸汽—空气套管换热.....	(39)
传热 (二) 液—液套管换热.....	(46)
实验六、精馏 (一) 板式塔.....	(49)
精馏 (二) 中间加料板式塔.....	(54)
精馏 (三) 填料精馏塔.....	(59)
实验七、吸收实验.....	(62)
实验八、干燥实验.....	(72)
实验九、脉冲示踪法测停留时间分布.....	(78)
实验十、阶跃示踪法测停留时间分布.....	(83)
第三章 一般实验和演示实验	(88)
实验 1、雷诺实验.....	(88)
实验 2、柏努利方程实验.....	(90)
实验 3、固体流态化实验.....	(93)

实验 4、热边界层演示实验·····	(96)
实验 5、旋风分离器演示实验·····	(98)
实验 6、板式塔演示实验·····	(99)
第四章 测量方法及测量仪表简介·····	(101)
一、压力测量·····	(101)
二、流量测量·····	(104)
三、温度测量·····	(112)
附录一 空气的重要物理性质·····	(119)
附录二 水的重要物理性质·····	(120)
附录三 乙醇—水在常压下的气液平衡数据·····	(120)
附录四 乙醇—水溶液密度与组成的关系·····	(121)
附录五 乙醇—正丙醇常压下气液平衡数据·····	(122)
参考文献·····	(122)

第一章 化工原理实验数据的处理

进行化工原理实验，首先遇到的是实验设备的使用问题，其次是测取数据的问题。第一个问题散见于各个实验中。下面介绍带有共性的问题，例如，应该测取哪些数据？如何读取和记录？记录的数据又如何整理、分析为实验结论等等。

一、实验中应测取哪些数据

1. 凡是影响实验结果或者数据整理过程所必需的数据，都必须测取。它包括大气条件、设备有关尺寸、物料性质及操作数据等。

2. 有些数据不必直接测取，可以从测取某一数据导出，或从手册中查到。例如测出水温后，可查出水的粘度和密度等数据。

二、读取和记录数据应注意的问题

1. 事先必须拟好记录表格，表格要有简明扼要而又符合实验内容的标题名称。

2. 表格中应录下各项物理量的名称、符号及单位。化工数据中，有的数量级很大或很小，如二氧化碳的亨利系数 E ，用科学记数法表示：20℃时， $E = 1.42 \times 10^8$ [Pa]。当列表时，项目名称写为： $E \times 10^8$ ，单位记作：[Pa]，而表中数字写为：1.42，即 $E \times 10^8 = 1.42$ [Pa]。也可以如下法表示，项目名称为 E ，单位记作 [$\times 10^8$ Pa]，表中数字仍为 1.42。

3. 实验时一定要等操作稳定后，才开始读数，条件改变后，要等操作再次稳定后，再读取数。不稳定情况下所读取的实验数据，是不可靠的。

4. 数据记录必须真实地反映仪表的精确度。一般要记录至

仪表上最小分度以下一位数。例如温度计最小刻度为 1°C ，读出某一温度应为 25.3°C ，若温度恰好在 25°C ，也应写为 25.0°C ，有效数字为三位。

5. 实验直接测量或计算的结果，该用几位数字表示，是件很重要的事。有人认为数值在小数点后面的位数越多越准确。其错误在于没有弄清小数点的位置与所用测量单位的大小有关，而与测量的准确性无关。例如记录长度为 0.314m 和 314mm ，其准确度完全相同。还有人认为，计算结果保留位数越多越准确。其错误在于不了解在一定仪表条件下，所测得数据只能具有一定的准确度。绝不应该过多地保留位数，以致使计算的准确度超过测量仪器的精度。例如传热实验中，蒸汽温度 $T = 120.5^{\circ}\text{C}$ ，空气进、出口温度为 24.4°C 和 79.7°C ，则对数平均温度差 $\Delta t_m = 64.6^{\circ}\text{C}$ 。若保留位数过多，写作 $\Delta t_m = 64.55^{\circ}\text{C}$ ，则超出了温度计的测量精度，是不科学的。

三、实验数据的处理

记录下来的原始数据通常要进行运算，或以列表法表示，或以图示法表示，或以经验公式表示。因此，取得实验数据后，还要正确地处理这些数据，才能获得应有的结果。

1. 数据的运算。

(1) 在计算中应注意有效数字和单位换算，按工程计算对有效数字的要求进行。

(2) 数据运算中采用常数归纳法，即计算公式中的许多常数归纳为一个常数对待。例如计算固定管路中，由于流量改变而导致雷诺准数的改变。因为 $Re = \frac{du\rho}{\mu}$ ， $u = \frac{Vs}{\frac{\pi}{4}d^2}$ ，故

$$Re = \frac{4\rho Vs}{\pi d\mu} = B \cdot Vs。 \text{计算时先求出 } B \text{ 值，依次代入 } Vs，$$

即可求出相应的 Re 值。

2. 数据的处理。

(1) 列表法。

利用列表法表达实验数据时，通常是列出自变量和因变量的相应数值。每一格都应有表的名称。表头栏目应写明所测物理量名称、符号、单位（如表 1—2）。自变量选择时最好能使其数值依次等量递增。

(2) 图示法。

利用图示法表示实验数据有许多优点。首先它能清楚地显示所研究对象的变化规律与特点，如极大、极小、转折点、周期性等。其次可利用足够光滑的曲线，作图解微分和图解积分。第三可通过适当地坐标变换，求出经验方程式。图示法在化学工程实验数据整理中，具有特殊重要的地位。下面将列专题介绍。

(3) 经验公式法。

实验数据用经验公式表达，使实验规律更加定量化。经验公式本身是客观规律的一种近似描述，是进一步探讨的线索和依据。

建立经验方程式的基本步骤如下：

①将实验测定的数据加以整理与校正。

②选出自变量和因变量，并绘出曲线。

表 1—1 坐标变换示例表

方 程 式	变 换	直线化后的方程
$y = ax^b$	$Y = \lg y, \quad X = \lg x$	$Y = bX + \lg a$
$y = ab^x$	$Y = \lg y, \quad X = x$	$Y = \lg b \cdot X + \lg a$
$y = ae^{bx}$	$Y = \ln y, \quad X = x$	$Y = bX + \ln a$
$y = e^{a+bx}$	$Y = \ln y, \quad X = x$	$Y = bX + a$
$y = \frac{1}{a+bx}$	$Y = \frac{1}{y}, \quad X = x$	$Y = bX + a$
$y = \frac{x}{a+bx}$	$Y = \frac{x}{y}, \quad X = x$	$Y = bX + a$

③由曲线的形状, 根据解析几何的知识, 判断曲线的类型。

④确定公式的形式, 并将曲线通过改变坐标方法, 变换成直线关系。常见例子如表 1-1 所示。

⑤用图解法或解析法来决定经验公式中的常数。

【示例 1】在蒸汽-空气换热实验中, 要将给热系数 α 与管内流速 u 的关系, 整理成如下形式:

$$\frac{\alpha d}{\lambda} = A \cdot \left(\frac{du \rho}{\mu} \right)^n$$

即 $Nu = AR_c^n$

式中: α ——管壁对空气的给热系数, $W/(m^2 \cdot K)$;

λ ——空气的导热系数, $W/(m \cdot K)$;

d ——管内径, m ;

u ——空气流速, m/s ;

ρ ——空气密度, kg/m^3 ;

μ ——空气粘度, $kg/(m \cdot s)$;

Nu ——努塞尔特准数;

Re ——雷诺准数;

A 、 n ——经验公式的系数。

数据记录如表 1-2 所示。

表 1-2 传热数据记录表

序号	流量计示值 R, mm	计前表压 $P_{表}, Pa$	热电偶示值, E, mV		
			蒸汽或壁	空气进口	空气出口
1	70.0	4080	5.332	1.006	3.348
2	50.0	3906	5.338	0.986	3.40
3	35.0	4599	5.338	1.03	3.478
4	25.0	5093	5.34	1.05	3.54
5	15.5	5960	5.342	1.096	3.624
6	8.5	6440	5.332	1.112	3.708

管径 $d = 0.0178\text{m}$ ；管长 $L = 1.224\text{m}$ ；流量系数 $C' = 0.001233$ ；

室温 $t = 13^\circ\text{C}$ ；大气压强 $P_a = 101330\text{Pa}$ 。

以第一组数计算举例。

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{78.6 - 24.9}{\ln \frac{120.4 - 24.9}{120.4 - 78.6}} = 65.0$$

$$\begin{aligned}\rho &= 1.293 \times \frac{p_s + P_a}{101330} \times \frac{273}{273 + t} \\ &= 1.293 \times \frac{101330 + 4080}{101330} \times \frac{273}{273 + 24.9} \\ &= 1.233\text{kg/m}^3\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}G &= V_s \rho = C' \sqrt{R \rho} = 0.001233 \sqrt{R \rho} \\ &= 0.001233 \sqrt{70.0 \times 1.233} = 0.01145\text{kg/s}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}Re &= \frac{du \rho}{\mu} = \frac{4G}{\pi d \mu} = 71.53 \frac{G}{\mu} \\ &= 71.53 \times \frac{0.01145}{1.97 \times 10^{-5}} = 4.157 \times 10^4\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}Nu &= \frac{\alpha \cdot d}{\lambda} = \frac{d}{\lambda} K = \frac{d}{\lambda} \cdot \frac{Q}{\Delta t_m S} \\ &= \frac{d}{\lambda \cdot \Delta t_m} \cdot \frac{GCp(t_2 - t_1)}{\pi d L} \\ &= \frac{1}{\pi \times 1.224} \cdot \frac{GCp(t_2 - t_1)}{\lambda \cdot \Delta t_m} \\ &= 0.26 \times \frac{0.01145 \times 1005 (78.6 - 24.9)}{2.837 \times 10^{-2} \times 65} = 87.3\end{aligned}$$

所有计算结果见表 1-3。

表 1—3 传热数据整理表

序号	温度, $^{\circ}\text{C}$			对数平均温差 $\Delta t_m, ^{\circ}\text{C}$	密度 $\rho, \text{kg/m}^3$	质量流量 $G, \text{kg/s}$	雷诺数 Re	努基尔特数 Nu
	蒸汽, T	进口, t_1	出口, t_2					
1	120.4	24.9	78.6	65.0	1.233	0.01145	41570	87.3
2	120.5	24.4	79.7	64.6	1.234	0.00969	35160	76.3
3	120.5	25.4	81.4	63.0	1.237	0.00811	29301	66.2
4	120.5	26.6	82.7	61.9	1.240	0.00687	24801	57.7
5	120.5	27.4	84.6	60.1	1.246	0.00542	19473	47.4
6	120.5	26.2	86.4	58.6	1.250	0.00402	14443	36.8

用双对数坐标作图, 如图 1—1 所示。

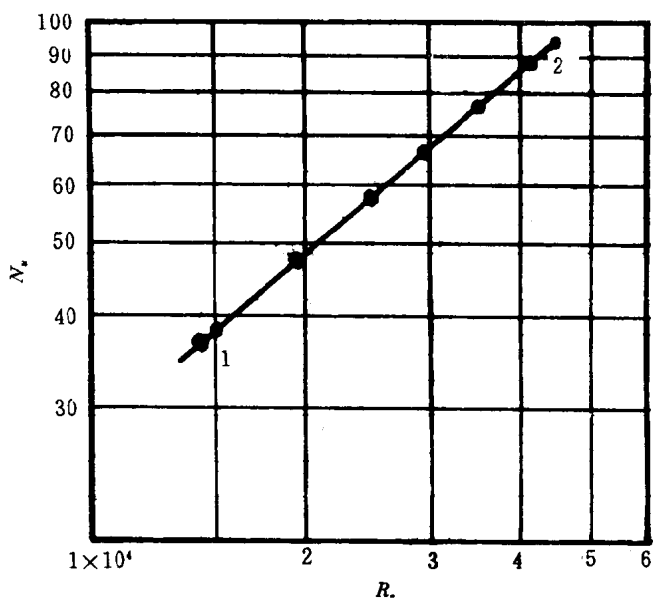


图 1—1 $Nu \sim Re$ 关联图

$$\text{由 } Nu = AR_e^n \dots\dots\dots (1)$$

$$\therefore \lg Nu = n \lg Re + \lg A$$

由图 1-1 得斜率

$$n = \frac{\text{点1.2纵坐标对数差}}{\text{点1.2横坐标对数差}} \\ = \frac{\lg 94 - \lg 38}{\lg 45000 - \lg 15000} = 0.824$$

$$\therefore \lg Nu = 0.824 \lg Re + \lg A$$

将第一组数据代入上式, 则

$$\lg A = \lg 87.3 - 0.824 \times \lg 41570 = -1.865$$

$$\therefore A_1 = 0.0136$$

分别将第二组至第六组数据代入, 求得 $A_2, A_3, \dots$, 取平均值, $\bar{A} = 0.0138$

$$\therefore Nu \cong 0.0138 Re^{0.824} \dots\dots\dots (2)$$

式(2)是用图解法得到的经验公式。此式亦可用最小二乘法计算。首先将方程(1)线性化处理: $\ln Nu = n \ln Re + \ln A$

$$\text{令 } y = \ln Nu, \quad x = \ln Re, \quad b = \ln A$$

$$\text{则 } y = nx + b$$

这就将指数关系转化为一元线性回归问题, 根据一元线性回归原理:

$$n = \frac{\sum x_i \cdot \sum y_i - N \cdot \sum x_i y_i}{(\sum x_i)^2 - N \sum x_i^2}$$

$$b = \frac{\sum x_i y_i - n \sum x_i^2}{\sum x_i}$$

式中: N ——数据的组数, 此题中 $N = 6$ 。

我们根据表 1-3 中的 $Re \sim Nu$ 的 6 组数据, 分别将 Re 与 Nu 取自然对数, 然后计算有关项目, 并列在表 1-4 中。

表 1—4 最小二乘法计算表

序号	$x_i = \ln Re$	$y_i = \ln Nu$	x_i^2	$x_i y_i$
1	10.635	4.467	113.111	47.509
2	10.468	4.335	109.579	45.379
3	10.285	4.193	105.781	43.121
4	10.119	4.055	102.394	41.033
5	9.877	3.859	97.555	38.115
6	9.578	3.606	91.738	34.538
	$\Sigma x_i = 60.961$	$\Sigma y_i = 24.514$	$\Sigma x_i^2 = 620.147$	$\Sigma x_i y_i = 249.684$

$$\therefore n = \frac{60.961 \times 24.514 - 6 \times 249.684}{(60.961)^2 - 6 \times 620.147} = 0.80$$

$$b = \frac{249.684 - 0.80 \times 620.147}{60.9961} = -4.04 = \ln A$$

$$A = e^{-4.04} = 0.0175$$

$$\therefore Nu = 0.0175 Re^{0.80} \dots\dots\dots (3)$$

比较式(2)和式(3),说明无论是图解法还是回归分析法,所得经验公式是一致的。

四、实验数据的图示法

图示法常选横轴为自变量,纵轴为因变量。坐标分度的选择,要反映出实验数据的有效数字位数,并要求方便易读。分度坐标不一定从零开始,而应使图形占满坐标纸为宜。同一幅面上可以有几种不同单位的纵轴的分度。不同纵轴分度,应使曲线不致于交叉重叠。

1. 直角坐标图示法。化工原理实验中的干燥速率曲线、泵性能曲线和过滤曲线,均采用直角坐标图示法。本书以泵性能曲线的标绘为例,说明直角坐标图示法。

【示例2】 泵性能实验测定的数据如表1—5所示。泵入

口与出口管径为 $d = 0.04\text{m}$ ；真空计与压力表接口的垂直距离为 $h_0 = 0.1\text{m}$ ；水温 $t = 20\text{℃}$ ；查水的密度 $\rho = 998\text{kg/m}^3$ 。

表 1—5 泵性能实验数据表

序号	流量 $Q, 10^{-3}\text{m}^3/\text{s}$	真空度 mm	压力 kg/cm^2	实际功率 N, W	扬程 H_e, m	有效功率 Ne, W	效率 $\eta, \%$
1	0	83	2.16	403	22.83	0	0
2	0.68	95	2.17	500	23.09	154	30.75
3	0.96	100	2.17	553	23.16	218	39.36
4	1.65	119	2.15	698	23.42	378	54.20
5	2.07	135	2.07	780	22.64	459	58.81
6	2.77	168	1.89	902	21.28	577	64.00
7	3.46	215	1.64	1007	19.42	658	65.33
8	4.72	317	1.07	1143	15.11	698	61.09

以第二组数据计算举例。由于 $u_1 = u_2$ ， $\Sigma h_f = 0$ 。

$$\therefore H_e = h_0 + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} + \frac{p_1 - p_2}{\rho g} + \Sigma h_f$$

$$= 0.1\text{m} + 0 + \text{压力计读数} \times 10 + \text{真空计读数} \times 13.6$$

$$= 0.1 + 2.17 \times 10 + 0.095 \times 13.6$$

$$= 233.09\text{m}$$

$$Ne = QH_e \rho g = QH_e \times 998 \times 9.81$$

$$= 9.79 \times 10^3 QH_e$$

$$= 9.79 \times 10^3 \times 0.68 \times 10^{-3} \times 23.09 = 154\text{W}$$

$$\eta = \frac{Ne}{N} = \frac{154}{500} = 30.75\%$$

将表 1—5 中数据： $H_e \sim Q$ ， $N \sim Q$ ， $\eta \sim Q$ 分别标绘在图 1—2 中，得到泵性能曲线。

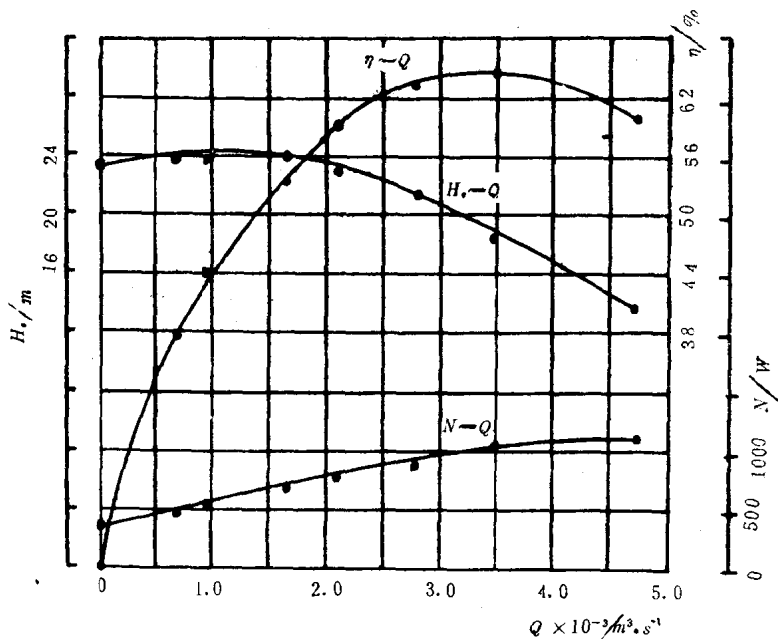


图 1-2 泵性能曲线图

2. 双对数坐标图示法。一般是横坐标与纵坐标均采用常用对数分度。在化学工程实验中应用十分广泛。例如，流体流动阻力实验中的 $\lambda \sim Re$ 曲线；吸收实验中 $\Delta p \sim u$ 曲线；传热实验中的 $Nu \sim Re$ 曲线等等，均采用双对数坐标图示法。下面以流体流动阻力实验中 $\lambda \sim Re$ 曲线的标绘为例，说明双对数坐标图示法的应用。

【示例 3】 流体阻力实验测定的数据，如表 1-6 所示。
管内径 $d = 0.04\text{m}$ ；直管测压点距离 $l = 4\text{m}$ ；水温 $t = 20^\circ\text{C}$ 。