

高等学校教材

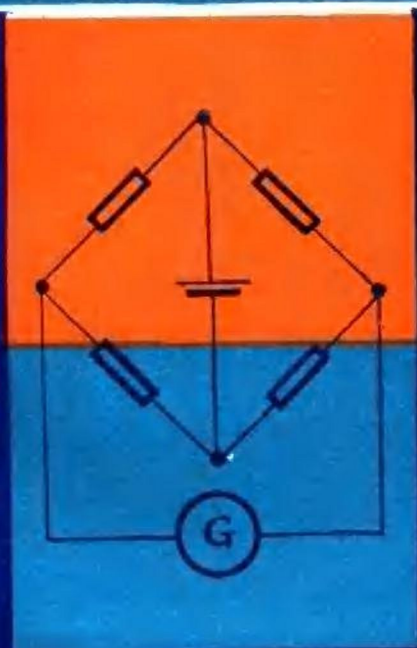
普通物理实验

(二. 电磁学部分)

第二版

杨述武 主编

杨介信、陈国英 编



高等教育出版社

0161966

高等学校教材

普通物理实验

(二. 电磁学部分)

第二版

杨述武 主编
杨介信 编
陈国英

高等教育出版社

(京)112号

内 容 提 要

本书是在第一版的基础上,参照1989年国家教委高教司颁发供试行的“普通物理实验教学基本要求”组织修订的。第二版编写时着重考虑了以下几点:1. 增强通用性;2. 增进易读性;3. 增加手、脑并用的训练。

全书共29个实验,可作为高等院校物理专业普通物理实验课教材,也可供其他专业有关课程参考。

本书责任编辑:张思擎

高等学校教材

普通物理实验

(二. 电磁学部分)

第 二 版

杨述武 主编

*

高等教育出版社出版

新华书店总店北京科技发行所发行

国防工业出版社印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 10.125 字数 260 000

1985年10月第1版 1992年5月第2版 1992年5月第1次印刷

印数 0001—10 150

ISBN 7-04-003738-6/O·1105

定价3.90元

第二版前言

本书是在第一版的基础上，参照1989年国家教委原高等学校理科物理学教材编审委员会物理实验编审小组拟订的“综合大学、师范院校普通物理实验教学基本要求”（由国家教委高教司颁发，供试行。见(89)教高司字 122 号文）组织修订的。

本书共收入 29 个实验，比第一版增加了 5 个实验，其中 2 个是基本电路实验、3 个是实用性的实验。

本书在原有基础上着重考虑了以下几点：

1. 增强通用性

尽量使本书适应不同规格的仪器；

处理数据的方法不作统一规定，例如研究二物理量之间的关系，既可以用图解法、也可以用线性回归法或其它计算方法，我们希望学生能熟悉各种处理方法。

2. 增进易读性

适当删减字数，减少学生的阅读时间；

在原理部分增加些小标题，使学生阅读时容易抓住中心问题。

3. 加强手、脑并用的训练

注意加强动手训练；

努力使学生在动手操作时，增加分析的内容，而不是给学生一套操作指令。

本书的修订是在山东大学孟尔熹同志的倡议下，在高教出版社曹建庭同志的大力支持下进行的，东北师大赵元良同志对本书的修订提出了宝贵的意见。我们在修订此书时，着重参考了以下几本实验书：

贾玉润 王公治 凌佩玲主编，《大学物理实验》，

复旦大学出版社, 1987

孟尔熹主编,《普通物理实验》, 山东大学出版社, 1988

苏登记编著,《大学物理实验指南》电磁学分册,

厦门大学出版社, 1989

赵元良编著,《普通物理实验(电磁学部分)》,

东北师大校内教材, 1990

我们对鼓励和支持本书修订工作的各位同志致以衷心的感谢。

由于作者的水平和教学经验所限, 修订本中不免有缺点和错误, 请各位指导教师和同学批评指正。

编 者

1991春

致学生读者

1. 你们已经做了力学和热学实验，有过成功的喜悦，也可能有过失败的苦恼，现在要开始做可能使你们更感兴趣的电磁学实验，因此应当回顾一下在过去的实验中为了做好实验是如何做的。

2. 做电磁学实验，电路的设计与分析是很重要的，应明确电路中各部分的作用，选用合适的仪器，防止接线出错。要注意，就是在最简单的电路——制流电路和分压电路的安排中，也时常会出错。

3. 调节仪器是很好的训练，要想调得又快又好，需有较高的操作技能，还要会分析。

4. 在实验中遇到故障时应在切断电源后审查：

(1) 电路设计正确否？

(2) 实际电路与电路图一致否（仪器的安排，接线特别是滑线变阻器的接线）？

(3) 仪器的功能、量限合适否？

(4) 参量的选择合适否？等等。

分析故障、并予以排除是培养分析能力的好机会，不要輕易求助别人。

5. 学习实验的最终目的是能独立做实验，它包括：方案设计、仪器选择、步骤安排、参量选取、故障分析、数据处理和结果评论等方面，但这些方面的训练并不是通过某一个（或每一个）实验全面进行，而是在每次实验中对其中某一方面做些探索。

6. 要牢记电磁学实验操作规程，养成科学的工作习惯。

电磁学实验操作规程

1. 联接电路时，必需有规整的电路图，对电路各部分的作用应明确，对电路中电源、仪器、电表及其它器具的规格应预先定好。

2. 选择出合用的仪器及用具，参照电路图将它们分布到实验台上，注意安全并能很方便地进行观察、操作和读数。

3. 对多功能、多量程的仪表，要调到合用的功能状态和量限，对灵敏度可调的仪器要先调到灵敏度最低的状态。

4. 连线时，应将电路分为主回路和支路，从电源一端开始沿主回路按顺序进行，其次为支路；主回路中必需有开关（先断开！）；导线最好有几种颜色的，主、支回路分别用一种颜色。

5. 往接线柱上接导线时，应按顺时针方向将导线缠上。

6. 电路联接后，必须认真复查，可请指导教师检查，但是要确信自己所联电路是正确的，绝对不允许未经仔细审查电路就通电试试看！

7. 实验中途调换仪器、仪器换档、改变量程，改变接线，都要先切断电源。

8. 实验仪器显示任何不正常，都要先切断电源。

9. 实验结束时，将仪器调到最安全的状态再切断电源，如果时间容许应审查记录，看是否有漏测或错误，最后拆除联线，整理好仪器和导线。

目 录

第二版前言	1
致学生读者	1
电磁学实验操作规程	1
绪论	1
§ 1 测量数据处理的基本问题	1
§ 2 二个变量关系的研究——作图法	6
§ 3 二个变量线性关系的研究——分组计算法	12
§ 4 二个变量关系的研究——最小二乘法	14
§ 5 电磁学实验基础知识	20
§ 5-1 电表	20
§ 5-2 万用电表	31
§ 5-3 电阻器	35
§ 5-4 直流电源	38
§ 5-5 电磁学实验中用的标准器	39
实验一 制流电路与分压电路	44
实验二 伏安法测电阻	53
实验三 伏安法测二极管的特性	58
实验四 静电场的描绘	61
实验五 用惠斯通电桥测电阻	69
实验六 半导体热敏电阻特性的研究	77
实验七 用板式电势差计测量电池的电动势和内阻	83
实验八 用箱式电势差计校正电表	89
实验九 低电阻的测量	98
实验十 万用电表的制作与定标	104
实验十一 灵敏电流计特性的研究	113
实验十二 冲击电流计特性的研究	123

实验十三	用冲击电流计测电容及高电阻	141
实验十四	用冲击电流计测螺线管内轴线上磁场的分布	148
实验十五	用冲击电流计测铁磁物质的磁化曲线	155
实验十六	磁场的描绘	163
实验十七	磁致伸缩系数的测定	171
实验十八	霍耳效应	185
实验十九	热电偶的定标	197
实验二十	电子示波器的使用	205
实验二十一	铁磁物质动态磁滞回线的测试	222
实验二十二	电子束线的偏转	230
实验二十三	电子束线的聚焦	238
实验二十四	交流电路功率的测量	247
实验二十五	交流电桥	261
实验二十六	LRC电路的稳态特性	274
实验二十七	LRC电路的暂态过程研究	284
实验二十八	LRC电路谐振特性的研究	298
实验二十九	地磁场水平分量测量	308

绪 论

§ 1 测量数据处理的基本问题

物理实验中对一物理量进行测量的主要目的是：(1) 获得被测量的最可信赖值；(2) 对最可信赖值的可靠性作出估价，即给出被测定量的真值在某个量值范围的一个评定。有关在普通物理实验范围内的数据处理理论及方法，已在《普通物理实验(一、力学、热学部分)》中有过介绍，在此只作必要的摘记与补充。

1. 直接测量

设 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为某一物理量 X 的 n 个等精度测量值，则可按以下顺序处理数据。

(1) 求算术平均值 $\bar{x}$

$$\bar{x} = \sum x_i / n \quad (0-1)$$

(2) 计算测量列标准偏差 $\hat{\sigma}$

$$\hat{\sigma} = [\sum (x_i - \bar{x})^2 / (n - 1)]^{1/2} \quad (0-2)$$

(3) 剔除坏数据 (肖维涅舍弃判据)

当某一测量值 x_k 满足下列关系时，可认为是坏数据而剔除

$$x_k < \bar{x} - c_n \cdot \hat{\sigma} \quad \text{或} \quad x_k > \bar{x} + c_n \cdot \hat{\sigma} \quad (0-3)$$

式中 c_n 为肖维涅舍弃判据系数。各 n 值的 c_n 值见下表。

(4) 剔除坏数据后，再求平均值 $\bar{x}$ 、测量列标准偏差 $\hat{\sigma}$ 及平均值标准偏差 $\hat{\sigma}(\bar{x})$ 。

$$\hat{\sigma}(\bar{x}) = \hat{\sigma} / \sqrt{n} \quad (0-4)$$

n	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
c_n	1.65	1.73	1.80	1.86	1.92	1.96	2.00	2.03	2.07	2.10

n	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
c_n	2.13	2.15	2.17	2.20	2.22	2.24	2.26	2.28	2.30	2.31

n	25	30	40	50	75	100	200
c_n	2.33	2.39	2.49	2.58	2.71	2.81	3.02

(5) 如果平均值 $\bar{x}$ 中含有符号和大小确定的系统误差 ξ , 则取 $(-\xi)$ 为修正值, 被测量 X 的最可信赖值为平均值加修正值, 即

$$X = \bar{x} + (-\xi) \quad (0-5)$$

(6) 最可信赖值的不确定度 σ 为

$$\sigma = [\hat{\sigma}(\bar{x})^2 + u^2]^{1/2} \quad (0-6)$$

式中 $\hat{\sigma}(\bar{x})$ 为用统计方法求出的不确定度分量, 即按式 (0-4) 算出的平均值标准偏差; u 为用其它方法求出的不确定度分量, 一般是残留系统误差。

2. 只测一次的直接测量

有许多待测量不可能进行多次重复测量, 也有不少的待测量能一次精确地测定, 没有必要多次重复测量, 这两种情况都是一次测量就得到结果的, 我们称为一次直接测量。一次直接测量如何合理地确定它的测量结果值和它的误差范围, 是最基本而又非常普遍的问题。在电磁学实验中, 一次直接测量用得较多, 例如用电表测量电流、电压或者其他量, 其值都是根据电表指针偏离零位的角度大小来度量的, 如图 0-1 所示, 指针指示着 7.20mA 电流, 估计值 $\bar{0}$ 有一定的参考意义, 为了估计电流值的误差范围, 必须

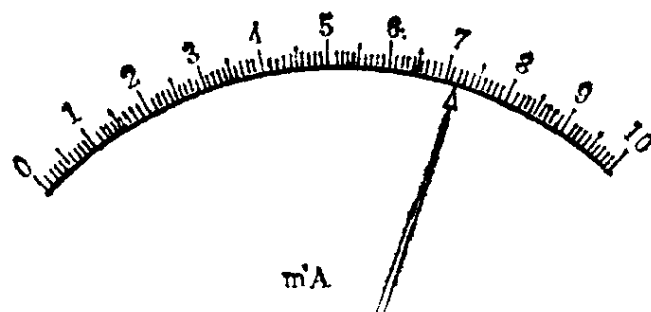


图 0-1 电流计读数。

知道电表的级别，若电表的级别为 1.0 级，即指示值带有不大于满量程 1% 的误差。图 0-1 所示的电流表由于它满量程的电流值为 10.0mA，根据 1.0 级表的要求，则电流表的误差

$$|\delta| \leq 10.0 \times 0.01 = 0.10 \text{ (mA)}$$

这时的 δ 为极限误差，可近似认为它是标准偏差的 3 倍，因此，这个一次测量值的不确定度 $\sigma = \pm \frac{0.10}{3} = \pm 0.04 \text{ mA}$ ，结果记为

$$I = 7.20 \pm 0.04 \text{ mA (一倍标准偏差)}$$

也可以记为

$$I = 7.20 \pm 0.10 \text{ mA (三倍标准偏差)}$$

电桥、电势差计等复合式仪器，测量一次时的极限误差可由其感度（灵敏度的倒数）求出。

3. 间接测量

设间接测定量 y 是直接测定量 $x_1, x_2, \dots, x_m$ 的函数，即

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (0-7)$$

对 y 的最可信赖值可有两种方法去计算。

(1) 将各测量值的算术平均值代入函数中求 y ，即

$$y = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m) \quad (0-8)$$

(2) 从各直接测定量的测量值中，分别取一个代入函数中求出一个 y 值，若直接测定量各测 n 个，则可求得 n 个 y 值，取其平均值，即

$$y = \sum f(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{mi}) / n \quad (0-9)$$

一般情况下，两种方法并不一致，但是对于大多数计算，两者差异很微小，可以任选一种。由于方法（2）要求各直接测量均有 n 个测量值的条件，在应用上受到限制。

间接被测量的不确定度 设直接被测量的误差为 δ_1 、 δ_2 、 $\dots$ 、 δ_m ，则间接被测量的误差 δ_y 为

$$\delta_y = \left| \frac{\partial f}{\partial x_1} \right| \delta_1 + \left| \frac{\partial f}{\partial x_2} \right| \delta_2 + \dots + \left| \frac{\partial f}{\partial x_m} \right| \delta_m \quad (0-10)$$

或

$$\delta_y = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \right)^2 \delta_1^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \right)^2 \delta_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_m} \right)^2 \delta_m^2 \right]^{1/2} \quad (0-11)$$

一般使用式（0-11）。又设 $K_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$ 则式（0-11）可写成

$$\delta_y = [K_1^2 \delta_1^2 + K_2^2 \delta_2^2 + \dots + K_m^2 \delta_m^2]^{1/2} = [\sum K_i^2 \delta_i^2]^{1/2} \quad (0-12)$$

间接测量结果的不确定度可记为

$$\sigma_y = [\sum K_{1i}^2 \hat{\sigma}(\bar{x}_i)^2 + \sum K_{2i}^2 u_i^2]^{1/2} \quad (0-13)$$

式中方括号中的第一项为用统计方法确定不确定度分量的总和，第二项为用其它方法确定的不确定度分量的总和。

4. 非等精度测量值的综合

当待测量是用不同方法或不同准确度仪器测得的，这些测量值为非等精度测量值，从这些测量值求最可信赖值，要用加权平均。设 x_1 、 x_2 、 $\dots$ 、 x_n 的权分别为 p_1 、 p_2 、 $\dots$ 、 p_n ，则加权平均为

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n p_i x_i}{\sum_{i=1}^n p_i} \quad (0-14)$$

参照式（0-11），可得加权平均 $\bar{x}$ 的误差传递公式为

$$\sigma(\bar{x}) = \left[\left(\frac{p_1}{\sum p_i} \right)^2 \sigma_1^2 + \left(\frac{p_2}{\sum p_i} \right)^2 \sigma_2^2 + \cdots + \left(\frac{p_n}{\sum p_i} \right)^2 \sigma_n^2 \right]^{1/2}$$

$$= \left[\frac{\sum p_i^2 \sigma_i^2}{(\sum p_i)^2} \right]^{1/2}$$

可以证明^①，权 p_i 与其相应标准偏差 σ_i 的平方成反比，因此上式可写成

$$\sigma(\bar{x}) = \left[\frac{\sum \left(\frac{1}{\sigma_i^2} \right)^2 \sigma_i^2}{\left(\sum \frac{1}{\sigma_i^2} \right)^2} \right]^{1/2} = \left[\frac{1}{\sum \frac{1}{\sigma_i^2}} \right]^{1/2} \quad (0-15)$$

其不确定度可参照式 (0-13) 去计算。

为了熟悉“权”的计算方法，举下例加以说明。

已知同一个电阻的三种（或三组）测量结果值：

$$R_1 = 350 \pm 1 \Omega$$

$$R_2 = 350.3 \pm 0.2 \Omega$$

$$R_3 = 350.25 \pm 0.05 \Omega$$

（表示式中的误差都是标准偏差。）

求：电阻的平均值 $\bar{R}$ 及其标准偏差 $\sigma_{\bar{R}}$ 。

解：根据 p_i 与 σ_i^2 成反比，有

$$p_i = k / \sigma_i^2$$

式中 k 为比例常数。由给定的测量结果可以得到

$$p_1 : p_2 : p_3 = k / \sigma_1^2 : k / \sigma_2^2 : k / \sigma_3^2 = k : 25k : 400k$$

若取 $k = 1$ ，则各权之比就是最简单的整数比，即 $p_1 = 1$ ， $p_2 = 25$ ， $p_3 = 400$ ，由 (0-14) 和 (0-15) 式可以求得 $\bar{R}$ 和 $\sigma_{\bar{R}}$ 。

$$\bar{R} = \frac{1 \times 350 + 25 \times 350.3 + 400 \times 350.25}{1 + 25 + 400} = \frac{149208}{426}$$

$$= 350.25$$

① 参见张世箕著，《测量误差及数据处理》，科学出版社，1979，p. 231。

$$\sigma_R = \frac{1}{\sqrt{\sum \frac{1}{\sigma_i^2}}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{1} + \frac{1}{0.2^2} + \frac{1}{0.05^2}}} = 0.048 = 0.05$$

最后结果

$$R = 350.25 \pm 0.05 \Omega$$

注意： k 取任意值对计算结果没有影响，但 k 取得合适时，计算就比较简单，并且各种测量值的权都是简单的正整数。

§ 2 二个变量关系的研究——作图法

研究二个变量的关系就是用曲线或函数式将二个变量的联系表现出来。对于如何作图已在力学实验中讨论过，在此仅讨论变量间的函数关系。这类问题有两种不同的情况：

- (1) 已知二个变量函数关系的形式，但是其中有未知参量；
- (2) 二个变量函数关系的形式尚未知。

现在分别就这两种情况进行讨论。

A. 二个变量函数关系的形式已知时

如果二个变量 x 、 y 间是直线关系，即

$$y = a + bx \quad (0-16)$$

则可用 n 组 (x_i, y_i) 作图，所得直线的截距即参量 a ，而斜率是参量 b 。

但是，实验中二个变量的关系往往不是直线关系，例如，弹簧振子的振动周期 T 和所加负载 m 的关系为

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m + cm_0}{k}}$$

式中 m_0 为弹簧有自身质量， π 为圆周率， c 和 k 为待定参量。测量不同 m 对应的 T ，可以作 $T-m$ 图线，图 0-2 为其一例。由于

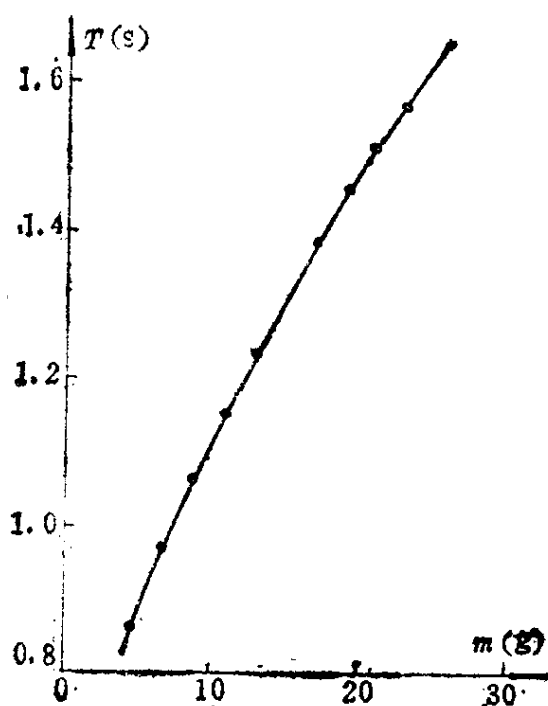


图 0-2

它是曲线，因而无法从图上得出待定参量值。类似这种情况，可以设法改换变量，将函数关系转变为直线关系，对此周期公式可以改成为

$$T^2 = \left(\frac{4\pi^2 cm_0}{k} \right) + \left(\frac{4\pi^2}{k} \right) m$$

它表示 T^2 和 m 间为直线关系。即作 $T^2 - m$ 直线，从图上求出截距 a ，斜率 b ，则

$$a = \frac{4\pi^2 cm_0}{k}$$

$$b = \frac{4\pi^2}{k}$$

由此可求出 k 和 c 之值 (m_0 、 π 为已知)。

即对于非线性函数，要通过变换变量使之成为线性函数，再用作图求出截距和斜率，进而确定待定参量。

实际的非线性函数如何变换要看函数的形式，例如

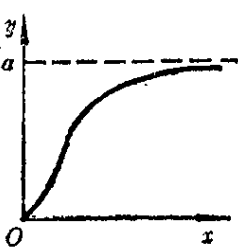
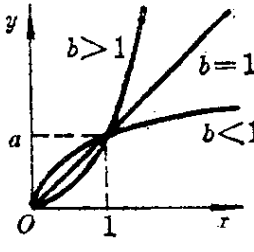
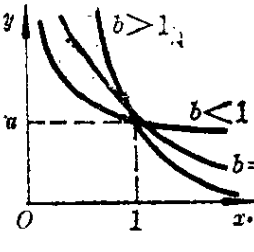
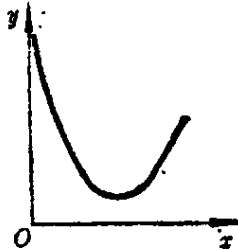
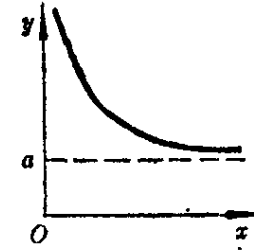
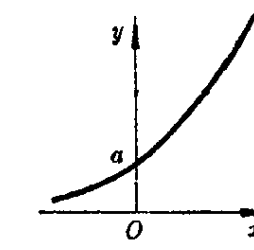
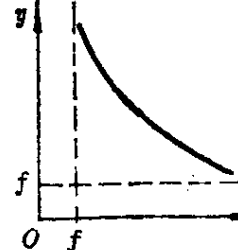
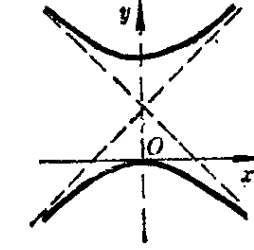
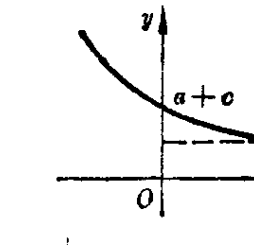
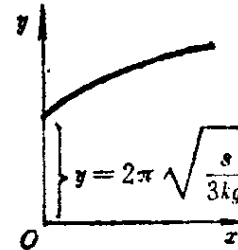
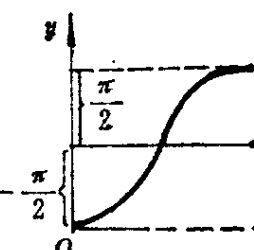
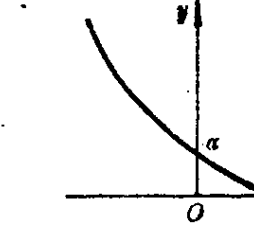
		
$y = ae^{-b/x}$	$y = ax^b (b > 0)$	$y = ax^{-b}$
		
$y = 2\pi \sqrt{\frac{c^2 + k^2}{xg}}$	$y = ae^{b/x} (b > 0)$	$y = ae^{bx} (b > 0)$
		
$(x-f)(y-f) = k$	$f = \frac{y^2 - x^2}{xy}$	$y = ae^{-bx} + c (b > 0)$
		
$y = 2\pi \sqrt{\frac{s + s/3}{kg}}$	$y = \text{arctg} \frac{Lx - \frac{1}{cx}}{R}$	$y = ae^{-bx} (b > 0)$

图 0-3