

实验导论

〔美〕 E. 雷宾诺维奇

计 量 出 版 社

实 验 导 论

〔美〕E. 雷宾诺维奇 著

邓善熙 任光辉 费业泰 译

刘智敏 校

计量出版社

内 容 提 要

本书主要介绍科学实验的方法、误差理论及实验结果的数据处理要求。内容侧重解释,基本概念清楚,语言通俗,实用性较强。可供机械工程技术人员、计量测试人员、科学实验工作者及大专院校的有关师生参考。

AN INTRODUCTION TO EXPERIMENTATION

ERNEST RABINOWICZ

ADDISON-WESLEY PUBLISHING COMPANY

1 9 7 0

实 验 导 论

[美] E. 雷宾诺维奇 著

邓善熙 任光晖 费业泰 译

刘 智 敏 校

责任编辑 王秉义

—*

计量出版社出版

(北京和平里 11 区 7 号)

技术标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

—*

开本 850×1168 1/32 印张 3 1/2

字数 96 千字 印数 1—22 000

1982 年 10 月第一版 1982 年 10 月第一次印刷

统一书号 15210·170

定价 0.56 元

科技新书目: 37—193

译者的话

本书是美国麻省理工学院机械工程系教材。内容主要介绍实验方法、误差理论和实验结果数据处理。内容侧重解释，基本概念明确，语言通俗易懂，实用性较强。每章后附有习题，便于加深理解。阅读本书，可以建立起科学实验方法和数据处理分析方法的基本概念，学会分析计算实验误差的方法并掌握其规律，使实验得出合乎科学的结论。

本书可供机械工程技术人员、计量测试人员、科学实验工作者及大专院校的有关师生参考。

全书由合肥工业大学精密仪器教研室邓善熙主持翻译，并翻译了第二、四章，任光辉翻译第一章，费业泰翻译第三章。中国计量科学研究院刘智敏担任审校。本书在翻译过程中，对第四章等略有删节。

由于我们水平所限，不妥之处，切盼指正。

1981.10

1351/106

目 录

第一章 实验的定性评定	(1)
1-1 为什么要实验	(1)
1-2 什么是实验	(2)
1-3 测量的类型	(3)
1-4 仪器的正确选择	(5)
1-5 仪器的分辨率和准确度	(5)
1-6 显微镜	(7)
1-7 作为显微镜透镜的眼睛	(10)
1-8 用显微镜所获得的放大率	(11)
1-9 透镜的聚焦深度	(11)
1-10 化学天平	(13)
1-11 天平分辨率的理论极限	(14)
1-12 仪器的准确度和测量误差	(15)
1-13 测径千分尺的误差	(15)
1-14 动态测量装置的误差：电压表	(20)
1-15 为减小误差而设计实验	(24)
第二章 测量误差	(27)
2-1 测量误差的实验估计和表面估计	(27)
2-2 误差的表面估计	(28)
2-3 误差的独立和从属	(30)
2-4 如何评定测量的表面误差	(32)
2-5 误差的实验估计	(33)
2-6 正态分布的特性	(35)
2-7 正态分布用于剔除数据	(37)
2-8 正态分布用于阐述各种误差定义	(37)
2-9 正态分布用于估计分布的极限值	(38)
2-10 正态分布用于计算 $\bar{x}$ 的或然误差	(38)

2-11 用标准误差去判断数据的相容性	(40)
2-12 如何计算正态分布	(42)
2-13 计算 σ 的捷径	(47)
2-14 检验分布的正态性: χ^2 检验	(48)
2-15 非正态分布	(51)
2-16 泊松分布	(54)
第三章 函数关系的评定	(61)
3-1 通过一批点如何作最佳直线	(61)
3-2 最小二乘法	(64)
3-3 相关	(69)
3-4 相关系数的物理意义	(71)
3-5 估计 r_{xy} 的近似方法	(72)
3-6 序列相关	(72)
3-7 相关技术的其它用途	(74)
3-8 自相关	(74)
3-9 作指数函数曲线	(78)
3-10 没有假设的常数值时, 作指数函数曲线	(83)
3-11 用累积法平滑实验数据	(86)
3-12 通过任意排列的点如何作一条满意的线	(87)
第四章 技术报告	(94)
4-1 技术报告的性质	(94)
4-2 技术报告的格式	(95)
4-3 实验工作中的主观性问题	(102)

第一章 实验的定性评定

1-1 为什么要实验

在我们头脑里对实验者都有一个固定的概念。他也许是一个身穿白工作服表情严肃认真的科学家，在充满奇形怪状的玻璃器皿的科学实验室里用显微镜进行观察；他也许是一个有些焦急的工程师，前额沾着油污，用一只手转动大型机械的控制器，另一只手记录从各种标盘和仪表得到的读数。这些实验者的社会价值如此明显，以致于看来不需要说明做实验的合理性。然而，应该提醒我们自己，几千年来有才智的社会思想的先驱者都认为实验是很不需要的，是会把人引入歧途的，因为一个宇宙实体的准确模型竟然可以由纯理智或恳求上帝就能获得。现在，当我们某些细心设计的实验没有得到理想结果时，这些看法的影响仍保留着。无论如何，现在人们已普遍承认，基于观察和实验的宇宙观是合理的，并认为这些观测和实验活动是重要的和有意义的。

虽然已广泛承认实验是个有成效的工作，但许多学生还不完全清楚实验课是他们教育计划中重要的组成部分。每一个好的理论科学家都应当很好考虑下面两个例子，从而认识到实验对他们也是重要的：

(1) 由于缺乏对实验结果固有误差的评价而妨碍了许多理论工作。举一个古典的例子，牛顿因为月球加速度的测量值同按他的理论要求的值相差约 10%，而推迟 20 年发表他的引力理论。牛顿显然没有想到，在他的计算中用到的地球半径的实验值的误差会达到如此大的程度。

(2) 一个好的理论家，可能会有一批实验员在他手下工作。这时，他自己的实践经验将帮助他判断那些实验员为什么搞不出成果，以及他们是否需要更好的更贵重的实验装置。

1-2 什么是实验

自然，实验分成许多不同的种类。从最基本的计算空间星系的分布以检验一种宇宙理论，到许多实际测量新型合金的强度以确定合金是否有商业价值，或通常地称一封信以确定付多少邮资。虽然这些实验的目的如此不同，但它们有许多共同点：在所有情况下，我们正在进行测量一个我们可以说明其准确程度的量，不管喜欢不喜欢，总有各种不同的误差影响测量。任何时候测量总是根据手头的任务选择适当的仪器和有效的方法进行的。最后，这些测量的量必须得到说明以使实验结果能被应用。

上述典型的实验是在机器、系统或装置中的一个工作过程，也是对一个量或一个现象进行一次或一系列测量。虽然在许多情况下对这些量是同时测量的，然而必须认识到，一个孤立的实验通常就象调查研究那样，只是研究问题的一步。任何完整的调查研究常需要各方面的努力。典型的主要研究步骤有下面几步：

(1) 问题的陈述和解释

应该回答下面几个问题：研究什么问题？这个研究为什么是必需的？我们希望证明什么？这些结果用在何处？过去在这个问题上曾经做过些什么工作？

(2) 问题的初步分析

设想一些可能用来解决上述问题的模型。这些模型或是在头脑里的，或是画出来的，也可以是数学的模型。这时，需要引入、衡量和综合原有想法和新的观念和概念。

(3) 问题的实验分析

设计并进行实验，证实或否定第二步中提出的模型的有用性。这时我们总是尽量作那种“判断性实验”，它可以对提出的理论加以肯定或否定。

(4) 根据实验来检验模型

根据得到的实验结果确定或选择步骤(2)提出的模型。第(2)，(3)，(4)步通常反复进行，直到所得的实验结果与预期的结果满

意地一致为止。

上述步骤讲起来很简单和直截了当，然而通常不是这样。一方面，问题的解决取决于获得正确的模型；另一方面，实验又是象路标那样用来指出哪个是正确的模型。可惜，多数人连判断哪个模型是正确的都不会。还有，或许在多数研究工作中，误差混进实验里，使根据实验所得的结论至少局部不正确。

实验者主要任务之一是发现这些误差，或者必须使自己知道误差可能存在和可能的大小，以便进行校正。当实验者用简单的实验装置，或许是他自己设计的装置工作时，当然会认识该装置的能力和限度。的确，历史表明许多重要的新发现基本上是使用一些简单的实验装备。然而今天，各种各样的测量设备可在市场上买到，实验者总是被引诱去买大量的设备。但在进行测量时却不了解这些设备的作用，在这种情况下他就不能够正确评价测量结果。

一旦研究者获得了他的数据，另一个危险是：当他将数据送到计算机时，可计算机使用的程序不是他亲自编写的，而且他不了解。结果，他得到的答案就大大值得怀疑。在这点上或许我们都能做到的是，要实验者警惕这种潜在的危险并满足于他自己的判断。

1-3 测量的类型

根据历史上的说法，最早的测量形式基于直接比较的原理。如果要测量绳子的长度，可将绳子放在标准长度（可以是一英尺或一腕尺*）的旁边，同时用标准长度一段一段地量绳子（如图 1-1 所示）。同样，为了确定一个物体的重量，实验者可以一只手拿被测物体，另一只手拿标准重量并进行比较（图 1-2）。这些直接比较过程一个明显的特点，是两个量的比较全靠人的感觉，因而测量结果的大小取决于实验者的能力。直接比较过程的第二个特点，是被测量只能同另外一个相同量纲的量比较（任何实验确实都是这样，只不过在少数直接测量中不很明显）。间接测量时，例如用传感器测量一个力并转换为

* 腕尺为旧长度单位，等于 45.7 cm——译者注

电信号，然后放大，最后在电磁记录器上用长度表示出来，也是只有用一个已知的力来标定记录器的示值才有意义。因此，总体来看还是被测力和一个标准的力相比较。由于这些理由，除非实验者能将测量和标准量（就象由国际或国家标准局定义和保存的标准公斤或伏特那样）联系起来（即使间接联系也行），否则没有一个实验者能进行测量。但是，在很多情况下仍使作者感到惊奇，许多学生，甚至很有能力的研究生，用几个月前定标的复杂系统进行一长串的测量，而没有感到仪器有重新校正的必要性或定期检查定标的必要性。

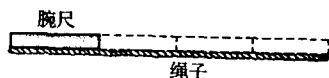


图 1-1 用标准腕尺一段一段地测量绳子



图 1-2 比较两个重量

直接比较过程的另一个特点，是被测量和标准量不仅要有相同的量纲，而且大小要大致相等。实际上，地球周长的确定是古代科学成就之一。为了测量这个周长，在地球上建立了大得惊人的基线，此直线从 Alexandria 到 Syene，长五百多英里（图 1-3）。但古代科学家却没有能力去测量原子的尺寸。因为测量原子尺寸的最方便的小标准尺度是 X 射线的波长，而 X 射线直到现代才被发现。

大家知道，间接测量承担了很多直接测量的任务。从直接测量变为间接测量有许多原因。这里，简单介绍一些。首先，我们感兴趣的许多量，观察者很难感觉其大小，例如电量中的电流和电压。在这种情况下，我们只能把这些电量变为电表或类似装置的指针偏转，使观察者能读出来。第二，在许多情况下测量是在人的能力范围以外进行的，例如地球到太阳的距离，原子的尺寸。还有，间接测量具有很多方便的因素，例如能在一天 24 小时内不断地快速地进行测量，自动记录测量结果，同时经过反馈控制，立即校正某些过程。

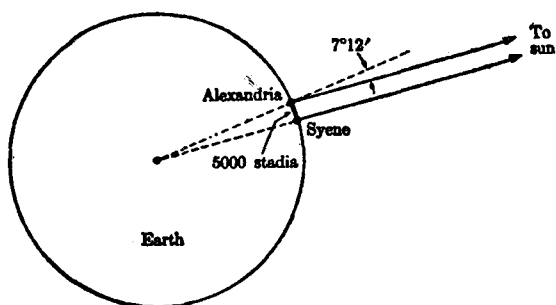


图 1-3 计算地球直径的 Eratosthenes 法。当太阳光在 Syene 垂直照射时，在 Alexandria 测到太阳光线与法线成 $7^{\circ}12'$ 角，从 Alexandria 到 Syene 的标准长度为 5 000 stadia*。

1-4 仪器的正确选择

现代技术领域的一个突出特点，是实验者可选用许多的测量方法。在这些方法中，所用的仪器的科学原理，应用这原理的机构，以及显示结果的方式，常常有很大差别。图 1-4 和图 1-5 表示了两种类型的测量和不同的测量方法。

很清楚，实验者为了很好地完成任务，必须考虑仪器的性能：

(1) 分辨率。(2) 准确度。(3) 方便性。(4) 成本。

由于主观因素影响很大，我们现在也可不考虑最后两点，而只限于讨论前面两点。

1-5 仪器的分辨率和准确度

仪器的分辨率可定义为仪器能够探测出的被测量的最小值。仪器的准确度可定义为进行测量时的相对误差。

这两个术语比较难处理。因为“高的”分辨率和“高的”准确度实际上表示这些量值小，所以，我们将用“好的”分辨率说明仪器能

* 原文 stadia 是 stadium 的复数形式，为古希腊尺度名，1 个 stadium 约等于 606.75 英尺——译者注

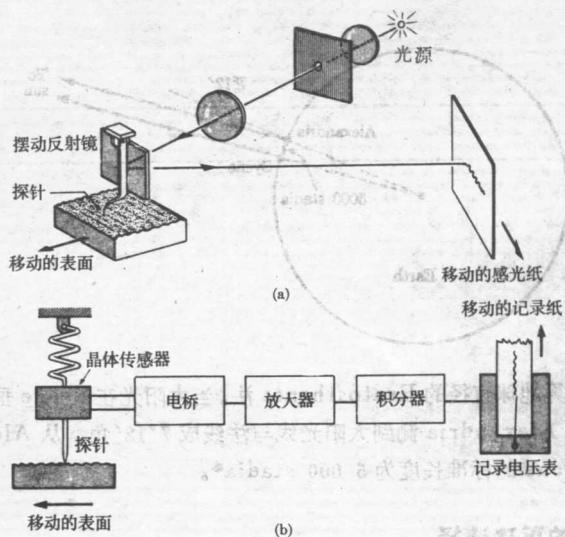
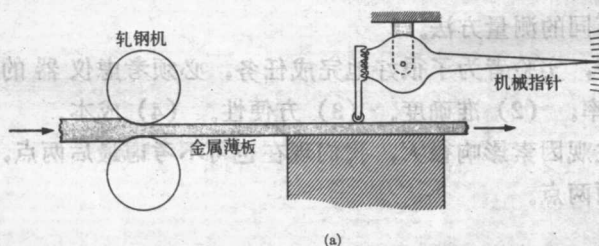
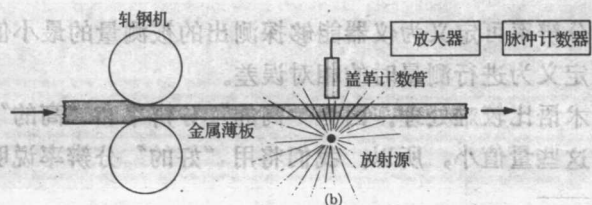


图 1-4 (a) 用光学杠杆测量粗糙度

(b) 用电子放大原理测量粗糙度



(a)



(b)

图 1-5 (a) 用机械探测器测量薄板厚度 (b) 用 β 测厚计测量薄板厚度

够检测小的量值。对准确度也是这样。

应该注意到准确度和分辨率这两个因素有时是独立的，有时是紧密相关的。假定测量滑动试验的磨损，可用放射性示踪技术或化学天平来确定磨损下来的材料的重量。放射性示踪技术有非常好的分辨率，能检测小到 10^{-10}g 的磨损，但其准确度低，即使磨损量很大，如 1g ，准确度也不高于 3% 。化学天平的分辨率很差，最小检测重量为 10^{-4}g 。但测量 1g 重量的误差只有 10^{-4}g ，其准确度为 0.01% 。磨损过程的特点(磨损速度很慢而变化很大)与具有好分辨率和低准确度的放射性示踪技术特征相适应，这比称重量的方法好。这种考虑在选取测量方法时，往往是决定性的因素，因为仪器的特点应和被研究量相适应。

在这一段里我们不进一步研究准确度问题，而只单独讨论仪器的分辨率。一般说来，分辨率是比准确度更简单更基本的问题。如果仔细研究各种仪器，我们就会发现每个仪器的分辨率不仅取决于一些基本因素，而且还多少决定于一些琐碎的设计因素，或者取决于两者的结合。作为实例，我们将只限于讨论两种常见的简单的仪器：显微镜和化学天平。

1-6 显微镜

假定用显微镜来测量某个被照明的小物体的长度，在视场中放大的影像投影在一标准刻尺上(图 1-6)。在这系统中，由于清楚的直线被投影为两端点模糊的直线，而产生误差。直线两端点位置的不确定度约等于模糊端半圆的半径。

光学领域的研究工作者常常研究这个问题，但他们从不同的角度考虑，也就是要确定两个像点最小间距，使显微镜系统能观测到两个圆斑

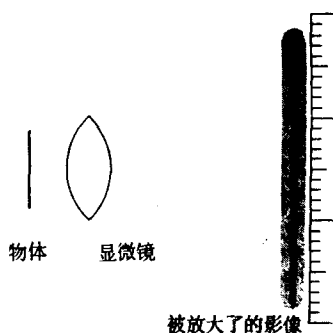


图 1-6 测量显微镜的示意图。
在显微镜标准刻尺平面上获得小
物体的放大影像

而不是只看到一个(图1-7)。开始时用简单的透镜来代替显微镜, 然后根据同样的规律来了解较为复杂的透镜系统。

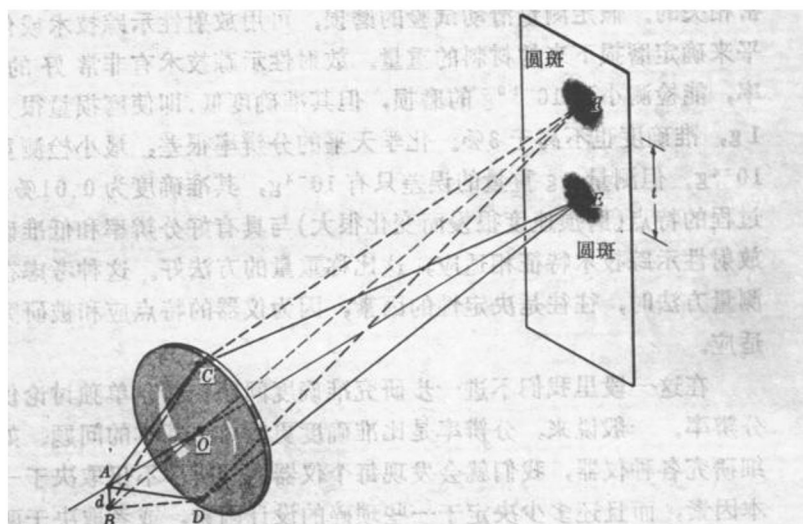


图 1-7 简单透镜的光学成像

若物体 A 位于透镜的轴上, 而 B 离 A 的距离为 d , 通过简单的光学成像, 其影像将落在 E 和 F , EF 相距 t 。然而, 实际上 E 和 F 都不是一个点像, 而是一个有限的圆斑。如果这些圆斑重叠起来, 就不可能根据影像来说明这里是一个或两个物体。分辨率取决于这个因素。因此必须首先确定构成 E 和 F 圆斑的尺寸。

众所周知, 一个点像弥散成一个圆斑是一种光波衍射现象。而圆斑的大小取决于我们称为波长 λ 的量值的大小。

由图 1-7 知道轴上一点 A 的影像 E 在轴线上。如何知道 A 位于轴线上呢? 因为距离 AD 与 AC 相等, 分别为 $m\lambda$, m 为波长的任意个数。如果 B 的影像不落在 E 点, B 必须离轴线有一距离, 这说明 BC 与 BD 必然不相等, 而 AD 与 AC 是完全相等的。

在信号用波长传递的情况下, BC 与 BD 之间最小差异为一波长的数量级才有现实意义。因此写进条件 $BC - BD = \lambda$ 或 $BC - AC = \lambda/2$ 。

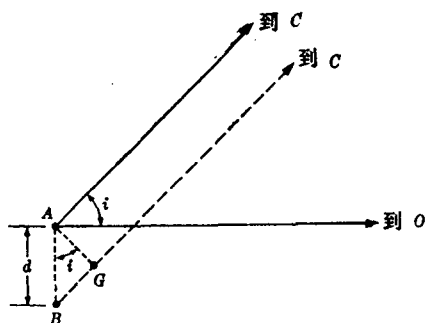


图 1-8 图 1-7 的局部放大图

图 1-8 是图 1-7 的一部分，放大是便于我们能够更清楚地了解如何利用上述条件。注意，若 d 很小，可以假定 AC 与 BC 平行，则

$$BC - AC = BG = d \sin i$$

但
$$BC - AC = \frac{\lambda}{2}$$

因此
$$d_r = \frac{\lambda}{2 \sin i} \quad (1-1)$$

这就是一个透镜的分辨率或最小分辨距离 d_r 的基本公式。在推导这个公式时，我们不考虑透镜系统影像边缘的几何关系。因此，这个公式同样适用于简单透镜、组合透镜和显微镜系统。

必须进行一个小的修正。已知在折射率为 n 的介质中，光的波长减小到 λ/n 。因此，物体 A 与 B 浸入液体中时，我们有

$$d_r = \frac{\lambda}{2n \sin i} \quad (1-2)$$

要得到最好的分辨率， d_r 必须尽可能的小，即 λ 越小越好， n 与 $\sin i$ 越大越好。如用紫色光 ($\lambda = 4 \times 10^{-5} \text{cm}$)，浸入油中 ($n = 1.6$) 和设计质量好的透镜系统 ($\sin i = 0.95$)，则 d_r 可以小到 $1.3 \times 10^{-5} \text{cm}$ ，如果物体不是浸入液体中，则 $d_r = 2.2 \times 10^{-5} \text{cm}$ 。

大家知道， $n \sin i$ 为显微镜的数值孔径 (N.A.)，几乎都刻于物

镜上。

注意，有趣的是不难得到具有好的分辨率而又便宜的数值孔径透镜，得到在空气中 N.A. 值为 0.9、在油中 N.A. 值为 1.4 的透镜的便宜显微镜也是不困难的。好的显微镜的消色差特性、消除畸变、视场的尺寸等可以比单透镜好得多，但它们的分辨率相差很少。

1-7 作为显微镜透镜的眼睛

讨论作为透镜的眼睛和评价它的作用是有意义的。参看图 1-9， d_r 由下式决定

$$d_r = \frac{\lambda}{2 \sin i} = \lambda \frac{\text{观察距离}}{\text{瞳孔直径}} \quad (1-3)$$

为了得到最高的分辨率，必须观察距离最小和瞳孔直径最大。多数人不能够正确地定焦在观察距离 25cm 以内，而在良好的光照下瞳孔直径约为 0.4cm，因此

$$d_r = \frac{5 \times 10^{-5} \times 25}{0.4} = 3 \times 10^{-3} \text{cm} \quad (1-4)$$

d_r 的实验值为 $7 \times 10^{-3} \text{cm}$ 。

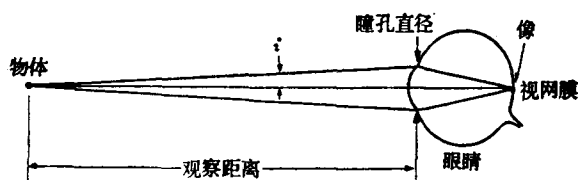


图 1-9 作为显微镜的眼睛

第二点，我们可以研究眼睛的探测系统——视网膜的结构。视网膜具有许多感觉单元，即神经末梢。每个神经末梢感觉它附近有无光线并将这信号传递给大脑。由于 t 仅为 d 的 $1/8$ （相当于视网膜到瞳孔与瞳孔到物体距离之比），故 t 为 $4 \times 10^{-4} \text{cm}$ 。这正好是眼睛感觉单元之间的距离，因此我们可以说眼睛是一个很能干的光学系统。在此系统中，显然眼睛感觉单元之间的距离（限制分辨率的一个因素）精确

地等于那个根据光学理论作为分辨率的另一个限制因素的距离。

上面我们所讲的眼睛的性能只是它实际性能的一半。这是因为，为了分清图1-10中如 E, F 那样的物像是分开的，则必须使一个未被照亮的视网膜神经末梢处在被照亮的 E 和 F 的单元之间，这个因素使眼睛能看到的最小分辨距离 d ，增加一倍。

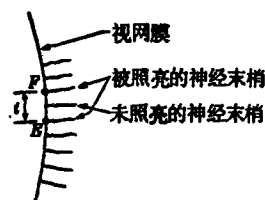


图 1-10 视网膜上感觉单元示意图

关于人眼作用的一些解释也许需要加些限制。因为经过进化，人眼的作用虽具有相当高的水平，但其优点只是使人能够在恶劣的环境中生存下来，而不是用来进行科学测量。人眼在判断形状的相互关系时，最容易被许多的光学幻影所欺骗。但眼睛最显著的能力是觉察微小的运动。天文学家利用这种能力去寻找小星星，接连几夜去拍摄星空的某部分，并把它们连续地感光于相纸上，这样人眼能容易地发现移动的小星星。对于原始人，这个同样的天赋的才能，使他们能够感受在他视野范围内的远处运动着或嬉戏着的动物的轻微变化。这对他们是极有价值的。

1-8 用显微镜所获得的放大率

我们曾经说过，显微镜的最好分辨率为 $1.3 \times 10^{-5} \text{cm}$ ，人眼的分辨率为 $7 \times 10^{-3} \text{cm}$ 。它们的比值（即 500）是用显微镜观察物体能感到正确形象所需要给出的实际放大率的界限。现在经常应用的放大率为 750，1 000 甚至 2 000 倍，它使观察者不必在他的眼睛分辨能力的极限处工作。但这样实际上使许多放大率是“徒有其名”。

为了得到较高的实际放大率，必须采用较短的波长照明，比如电子显微镜，所用波长约为 10^{-10}cm 。大多数电子显微镜的 N.A. 值约为 10^{-3} ，分辨率约为 10^{-7}cm ，因此，有效放大率可达到 100 000。

1-9 透镜的聚焦深度

透镜的聚焦深度可用简单的方法来计算。根据等时间原理，如果物体 A 成像于 E 点，则光路 ACE ， AOE 和 ADE 的时间周期必须相