

光电检测原理及应用

(上 册)

秦 积 荣 编著
归 绍 升 主审



国防工业出版社

73.77
460

光电检测原理及应用

(上 册)

秦积荣 编著
归绍升 主审

国防工业出版社

DT31/01
内 容 简 介

本书分上、中、下三册出版。上册主要介绍光电传感器的原理、组成、计算及光电检测的基本方法；中册介绍几何量和机械量的光电检测；下册介绍温度、浓度、成分等的光电检测及光电器件在其它方面的应用。

光电检测目前已广泛应用于工业各部门，它能使检测自动化、数字化、无接触化，并能与微型计算机相结合，因而在生产中将起着越来越重要的作用。

本书可供从事检测工作的工程技术人员作参考，亦可作为高等院校有关专业的选修课教材。

光电检测原理及应用

(上册)

秦积荣 编著

归绍升 主审

责任编辑 崔金泰

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 $1/32$ 印张 $7\frac{1}{2}$ 197千字

1985年3月第一版 1985年3月第一次印刷 印数：0,001—5,500册

统一书号：15034·2676 定价：0.96元

出版说明

秦积荣副教授从事教学数十年，有较丰富的实践经验。为编写本书，他早在六十年代初期就广泛收集了光电检测方面的素材。在十年动乱期间，他继续收集了美、日、苏各国及国内有关工厂、高等院校和科研单位在这方面的材料，并参加了某些光电检测的科研项目，从而为编著本书奠定了基础。本书初稿曾在有关院校的光学仪器、计量仪器等专业作选修课教材试用，效果较好。

在本书的审稿会上，五所院校的教师一致认为本书内容丰富全面，安排合理，层次清楚，文字通俗易懂，弥补了国内在光电检测专业书籍方面的空白。

本书对学习和研究检测技术有一定参考价值。它既可用作高等院校有关专业的选修课教材，也对高等院校、工厂有关人员进行科研和技术革新有一定参考、启发作用。

前 言

随着生产率和自动化程度的提高，在工农业和国民经济各领域中，光电检测的应用越来越广泛。近年来智能机器人的迅速发展，对电子视觉系统——光电检测提出更高的要求。然而全面和系统叙述这方面的书还很少见，因此，编著这本书，一方面可部分满足读者的急需，另一方面可借以推动光电检测技术的进一步普及和发展。

本书涉及面广，为了压缩篇幅，尽量避免与其他书的内容重复，是按下述原则取材的：

1. 力求对生产有实际的参考价值；
2. 一般书上没有涉及到的内容；
3. 由于产品和电子元件在不断更新，着重介绍各种光电检测装置的基本原理和方法；
4. 照顾到光电检测本身的完整性、系统性和理论性。

叙述力求概念清楚，文字通俗易懂。但阅读本书需具有一定的电子技术和光学的基础知识。

本书由上海交通大学归绍升教授担任主审，并有：副教授方德政、顾立簏、曹余庚、方志成、孙希鲁，讲师张志练、楼维照、叶章光、郑友琴、陈离等参加审稿。对他们提出的许多宝贵意见在此表示谢意。在编写过程中，还得到有关领导和同志们的关心和支持，甚为感激。

由于本人水平有限，缺点和错误在所难免，敬希读者批评指正。

秦积荣 1982年3月

目 录

第一部分 光电检测的基本原理

第一章 概述	1
§1-1 光电检测的原理及其应用	1
§1-2 光电检测的重要性	5
第二章 光电传感器	11
§2-1 光的辐射本质及其度量单位	11
§2-2 热辐射光源和气体放电光源	19
§2-3 激光	25
§2-4 发光二极管	35
§2-5 光通量的调制	41
§2-6 计量光栅	68
§2-7 光学纤维(光导纤维)	77
§2-8 光电效应、光电器件的分类和特性	85
§2-9 真空光电管和充气光电管	88
§2-10 光电倍增管	98
§2-11 光敏电阻(光导管)	107
§2-12 结型光电器件的原理	118
§2-13 光伏电池(光电池)	123
§2-14 光敏二极管	134
§2-15 光敏三极管	145
§2-16 光电传感器的计算	155
§2-17 光电继电器及其计算	165
§2-18 光电传感器的安装、调整、维护及检修	175
主要参考资料	185
第三章 光电检测的基本方法	187
§3-1 组成光电传感器的各种类型	187
§3-2 直接作用法(直读法)	195

§3-3 差动作用测量法	198
§3-4 补偿测量法	202
§3-5 脉冲测量法	209
主要参考资料	215
附录 部分国产光电器件参数	217
一、发光二极管	217
二、光电管	219
三、光电倍增管	220
四、光敏电阻	223
五、光电池	224
六、光敏二极管	226
七、光敏三极管	232

第一部分 光电检测的基本原理

第一章 概 述

这一章主要谈谈光电检测的基本原理、应用、重要性及其发展方向。

§ 1-1 光电检测的原理及其应用

人类的生活离不开光，若无自然光和电灯等人工光源，人类将无法工作和生活。

另一方面，若无视觉器官——眼睛把各种各样的光信息传递给大脑，人则成为瞎子。某些信息虽可通过其他器官，例如听觉和触觉等来辨别和弥补，但仍有许多东西则是瞎子永远无法享受和做到的。

另外，在工程上，有些工作由于眼睛的分辨力和精度不够高而不能精确测量；有些工作又容易使眼睛过于疲劳，那么是否可模拟眼睛的作用，制造一些仪器来代替人的眼睛呢？这就是本书中要讨论的内容——光电检测的原理和应用。

把光能（可见光或不可见光）的变化转换为电量（电阻、电流、电压等）变化的器件称为光电器件，例如光电池、光敏三极管等。用一个或几个光电器件把欲测的物理量（长度、宽度、直径、压力、转速、转矩、温度、溶液浓度等）转换成电量的装置称为光电传感器。图 1-1-1 示出了光电检测零件直径的原理图。光电传感器由光源或辐射能源 1、透镜等光学系统 2 及光电池 3 组成。若被测物 4 的直径越大，则被遮断的光通量越多，投射于

8510447

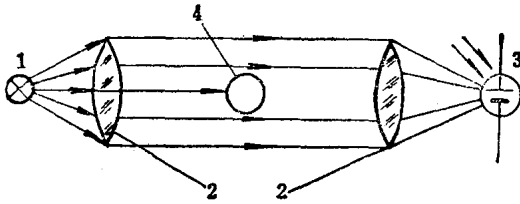


图1-1-1 测量直径的原理图

光电池 3 的光通量就少，光电池产生的电动势就小（光电动势的大小随光通量而变的原理在以后说明）。因此，从光电动势或光电流的大小可测量出被测物 4 的直径。

由上例可知，光电检测主要由光电传感器进行测量。光电传感器的作用原理是：光源产生光通量，光通量的参数（如辐射能流的横截面积、光谱成分及光强度等）受被测对象控制，然后由光电器件接收再转变成电参数的变化进行测量。光源可采用白炽灯、气体放电灯、激光、发光二极管及能发射可见光谱、紫外线光谱、红外线光谱的其他器件。此外还可采用 X 辐射（伦琴辐射）及同位素放射源，这时一般需把辐射能变成可见光谱的转换器。有时被测对象本身就是辐射能源，例如需要测温的发热体。因此，用于检测系统中的光源有时称为辐射能源。

光学系统中常用的元件有透镜、滤光片、光阑、光楔、棱镜、反射镜、光通量调制器、光栅及光学纤维等。

用于检测系统的光电器件有光电池、光敏二极管、光敏三极管、光敏电阻（又称光导管）、真空光电管、充气光电管及光电倍增管等，选用何种型式，决定于光电传感器所需的灵敏度、反映的速度、光源的特性及仪器的运用环境和条件等。

包含光电传感器的检测装置称为光电检测装置。在大多数情况下，传感器输出的电信号较小，不足以使测量机构动作，在它们之间需设置放大器，其方框图如图 1-1-2 所示。

直流放大器的零点漂移较大，故常采用交流放大器或线性集成放大器。对于物理量变化缓慢的被测物，在光学系统中常采用

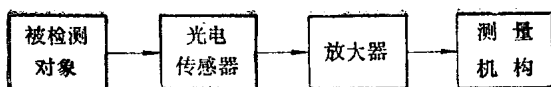


图1-1-2 光电检测装置的方框图

光调制，因而放大器中有时包含相敏检波及其它运算电路。

测量机构可以是指示仪表、记录仪表、数字显示器、报警器及产品分选装置等。由它们示出被测物理量的数值，或对产品进行自动分类。指示和记录仪表，在大多数情况下与一般的电气测量仪表无多大区别，仅仅是仪表机构的特性数值、刻度尺的形状或物理量的单位有所不同而已。

光电装置亦常用来自动调节生产过程，使被测物理量维持不变，或按希望那样变化，将被检测产品按需要进行加工。例如某些测量和分析仪器需要恒定的光源，其测量的精度与光源的稳定性有关，但光源的稳定性易受电源波动、光源本身老化等因素的影响。在这种情况下，可采用图 1-1-3 的自动调节装置。

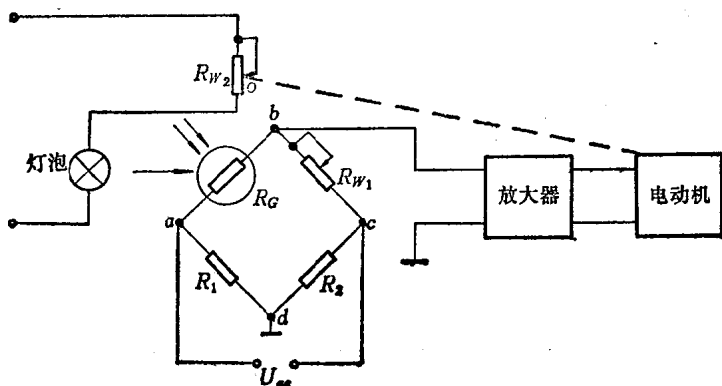


图1-1-3 自动调节光通量的原理图

图中 R_1 、 R_2 、 R_{W1} 、 R_G 为电桥的四臂，电桥的 a 、 c 两端加电压 U_{ac} ，另外二端 b 、 d 接至放大器的输入端。 R_G 为光敏电阻，其阻值的大小决定于照射的光通量，光通量大，阻值小；反

之则阻值变大（其原理在以后说明）。 R_1 和 R_2 为已知的电阻。为了简单，设 $R_1=R_2$ 。 R_{W1} 为可调整的电阻。

在正常情况下，调整 R_{W1} 使它等于 R_G ，电桥平衡，每个电阻上的电压降相等， $U_{R_1}=U_{R_2}=U_{R_{W1}}=U_{R_G}=\frac{1}{2}U_{ac}$ ， b 、 d 两端无输出电压，电动机不转，其输出轴与可变电阻 R_{W2} 的滑动触点 o 有机械联系。若由于某种原因灯泡的光通量减弱，则光敏电阻 R_G 的阻值增加，其上的电压 U_{ab} 大于 $\frac{1}{2}U_{ac}$ ，电桥对角线 b 、 d 两端有电压输出，经放大后电动机转动，带动滑动触点 o 向下移。这时， R_{W2} 的阻值减小，灯泡两端的电压升高，光通量回升，光敏电阻 R_G 减小。当光通量回升至原来值， R_G 亦回复至原来值，电桥重新平衡，电动机停止不动，此时， R_{W2} 就固定在新的数值。反之，若由于某种原因例如电压升高而使光通量增大，则电动机反转，通过可变电阻 R_{W2} 数值的改变，同样可使光通量回复至原来值。

图 1-1-3 仅仅是自动调节中的一个例子，目前自动化程度越来越高，自动调节装置的应用极为广泛，形式多种多样，但归纳起来可用方框图 1-1-4 表示。

对于图 1-1-3 的例子，调节对象为光通量。光电传感器产生电信号，它的参数（图 1-1-3 中为光敏电阻的阻值）决定于被调节光通量的实际值。

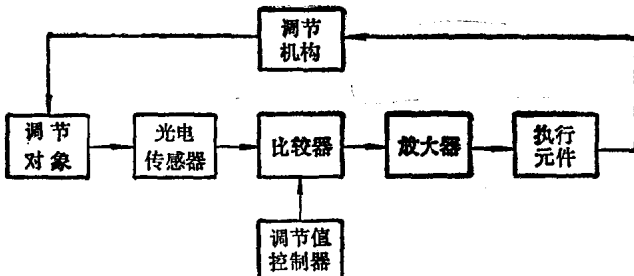


图1-1-4 自动调节装置的方框图

自动调节装置中为什么需要比较器和调节值控制器呢？既然要调节，总得给出希望有的参数值，即给定值或期待值，然后把待测量与给定值比较，用比较的结果调整被调节对象，以达到自动控制的目的，这就是比较器和调节值控制器的作用。对于图 1-1-3，电桥为比较器， R_{w1} 为调节值控制器，由它给出给定值。 R_{w1} 小，电桥平衡时的光敏电阻亦小，被维持的光通量就大； R_{w1} 大，则被维持的光通量就小。如果待测量与给定值不一样，不是正偏差，就是负偏差。电桥 b 、 d 两端有输出，利用这一偏差的大小和正、负极性发出自动调节的信号。比较器输出的信号一般较小，故需放大。执行元件（图 1-1-3 中为电动机）受控于放大器，作用于调节机构（图 1-1-3 中为 R_{w2} ）。调节机构用来调节对象，它直接与带有能量的介质（例如蒸汽、冷却剂、燃料、电流等）或物料相接触，并能以一定方式改变能量或物料量，使被调节量接近或等于给定值。用得最多的调节机构是电磁阀、变阻器等。

上面简单叙述了光电传感器在检测和自动调节中的原理、应用及其方框图，下面再谈谈其在工业生产中的重要性。

§ 1-2 光电检测的重要性

光电检测的优点较多，可从下述两个主要方面说明它在工业生产中的重要作用。

一、检测技术的发展趋向

1. **检测自动化** 随着生产的发展，用于检测的时间和人力将占相当大的比重，因此为了进一步提高生产率和自动化程度，要求检测必须自动化。先进的检测方法和仪器，应能在零件加工过程中进行主动测量，或在传送带上的传输过程中进行检测和发出信号，这样既可减少工作人员，又可节省检测时间，提高生产率；

2. **测量无接触化** 由于无接触，所以没有力和力矩作用于被测物，而且即使被测物有较大的冲击作用，对检测仪表亦无损害。另外，由于无机械运动部分，故测量装置具有寿命长，反映

速度快，工作可靠，准确度高，对被测物无形状和大小要求，检测距离可以大等优点；

3. 电子元件和电路集成化 它具有体积小，重量轻，工作可靠，寿命长，使用方便和工作速度高等优点；

4. 检测数字化 它具有测量精度高，灵敏度高，测量速度快，指示值的客观性（不因人或位置而异），易于自动化等优点。由于这种方法的测量信息以数码的形式进行传输、存储、运算、判断等，大大提高了测量的可靠性和稳定性。例如目前工业上用的质量比较高的模拟仪表，其典型漂移值约为 0.1% /小时，对标准信号 $1\sim 5$ 伏而言，其漂移值为 5 毫伏/小时。在抗干扰方面，百米长的电缆可有 5 毫伏的噪声电压，故仪表的总精度不会优于 0.2% 。但对数字仪表来说，只要能辨别“0”和“1”，而“0”和“1”的差别较显著，因此漂移和噪声的影响就较小。就可靠性和稳定性来看，数字仪表优于模拟仪表，所以由数字仪表组成的检测系统用得越来越多。由于光栅和莫尔条纹的利用，对光电检测的数字化提供了有利条件。数字化后有利于与数字计算机相结合进行使用。

5. 与计算机相结合 计算机具有数据的运算、处理、校验、逻辑判断、储存等功能。检测系统与它相结合后，能实现仪表本身根本无法实现的许多功能，使检测系统的测量精度、速度和性能显著提高。目前在国外，先进的测量仪器常常带有微型计算机。它能使检测系统的灵活性提高，测量项目增多，以满足不同的需要；并能对故障自诊，自动显示故障部位，以缩短检修时间。如果把它用于自动调节系统，根据计算机对测量数据的不断分析和判断，能使机器处于最佳工作状态。因此，含有微型计算机的测量装置和仪器，有时称为“智能”仪器。

检测技术在五十年代经过一次电子化的飞跃以后，目前正在采用计算机（一般为微型计算机）技术来实现检测技术的新飞跃。为了适应八十年代电子计算机的广泛应用和近年来微型计算机的迅速发展，目前正致力于研究数字式变换器，使它能直接与计算

机衔接起来。

光电检测或光电传感器适合于上述检测技术现代化的要求，所以用途越来越广，已普及于各工业部门，很有发展前途。

二、光电传感器相当于人类的眼睛，制造 电子视觉系统——人造眼睛

人在社会中生活，不是与人就是与物打交道，在打交道和处理事物的过程中，首先必须相互交换信息，根据信息作出处理的决定和相应的动作，以达到所希望的目的。例如两人交谈，除听对方讲外，还要看对方的脸色和眼睛的表情，经过迅速思考才决定怎样回答，其过程可用方框图 1-2-1 表示。图中中心线的上面为一方，中心线下面为另一方（对方）。取得信息的感觉器官为耳、眼（相当于传感器），中枢神经得到信息后经过思维和判断，下命令给表达器官——嘴，用言辞表达意思。脸部和眼睛的表情，有时是有意辅助，有时是无法隐瞒地流露出内心世界的感情来（相当于指示仪表）。

如果与物打交道，管理、操作机器，其过程可用图 1-2-2 表示。中心线的上面为人，下面为物。机器的工作状态由显示仪器（指示仪表、数字仪表、指示灯等）显示出来。如果发生事故，可由警报器发出刺耳的叫声以示危险状态。管理人员用眼、耳得到信息后，传给中枢神经系统思维和判断，发命令给执行机构（手和足），去操作控制机器的调节机构（开关、可调电阻、阀门等），

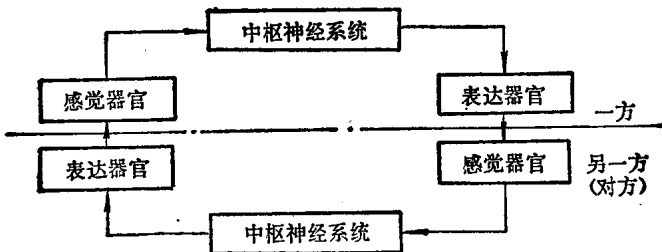


图1-2-1 人间对话的方框图

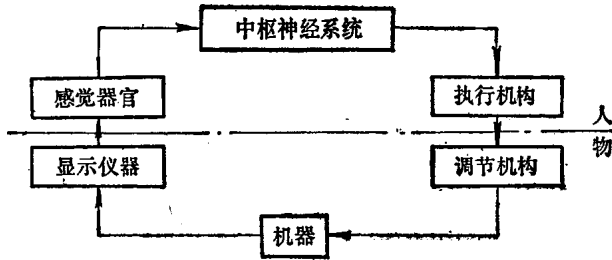


图1-2-2 人操作机器的方框图

使机器工作在希望的状态。与人打交道，我们习惯于用耳、眼相互传递信息，速度快、效率高（哑巴用手相互交换信息）；与物打交道，由于一时还造不出适应于人活动的机器，总是以人去迁就机器，所以给机器以信息的手段往往是手，用手操作开关、阀门、可调电阻、纸带穿孔等。如果机器迁就人，能根据我们的讲话去动作，那将是非常有趣的。例如我国用一台小容量的小型通用电子计算机识别上百条口令，能运用口令直接指挥计算机进行加、减、乘、除、方次等运算。国外曾报导利用讲话来控制其它设备，例如一台打字机能根据讲话直接把字打出来；医院里病人的卧车能根据病人的讲话进行正确行驶等。“君子动口不动手”，嘴巴讲一句话，总比书写及随后的揆键码或按钮来得省事，何况还可少出差错。

为着机器本身的简单、使用方便和价廉，把信息给人的手段大多数是仪表、指示灯、穿成纸带等。如果以机器来适应人，必要时以语言与管理人对话，以语言表示工作状态，机器正常时说“健康”，故障时说“有病”，甚至能说出什么毛病，那也是很有趣的。操作机器岂不相似于人之间的对话了吗？国外曾报导和展出用电脑能回答各种问题的机器，并能根据计算机里的不同程序说出各种外语，抑扬顿挫，有腔有调。

能使机器人学会听懂人的话，并能与人对话，具有重大意义。这是人和机器用人习惯的语言直接进行对话的一个重大飞跃，它开辟了实现高级自动化的一条新途径。人类用习惯的语言指挥机

器工作的梦想将逐步变成现实，它将大大减轻人的劳动强度，提高劳动生产率。但从目前讲，电脑系统只能听简单而有限的语句，只能讲一些简单的句子，价格昂贵，技术上还存在着一些问题需要突破，还不能普及，处于科研、探索阶段，但这是今后的发展方向之一。由上述可知，能相互交换信息从而得到第一性资料的感觉器官非常重要。没有正确的第一性资料，就谈不上正确的思维、运算和判断，也谈不上正确的响应，正确的动作。人的感觉器官有视觉、听觉、触觉、味觉、嗅觉等，其中视觉用处最大，中枢神经系统的信息大部分来自视觉，因此对于宝贵的东西往往用爱护“眼睛”一样来形容，可见其重要性。

光电传感器相当于人的视觉，起着眼睛的作用，虽在某些方面已超过人的眼睛，例如灵敏度和精度高，能觉察红外和紫外线，能长期工作等。从这个角度讲，光电传感器可认为是眼睛的延续、补充和发展，但在抗干扰性、灵活性、随机应变性、综合性、观察活动目标等方面与眼睛相比还望尘莫及。眼睛能同时辨认视域内一切物体的大小、形状、距离的远近、颜色及复杂的背景，而光电传感器只能反映单一的信息或少量的复合信息。随着大规模集成电路的发展，数目众多的光敏元件，有规则地排列在整个面上的固体摄像器件新近问世，它相似于人类的视网膜，向人的眼睛靠近了一步。因而光电传感器除了适应检测和自动化的要求，制造出多种产品外，还应能制造出类似眼睛那样卓越的光电装置。电子视觉系统或人造眼睛等正在逐步形成。特别在目前，作为大脑的电子计算机的发展已一日千里。作为手、脚的执行机构如机械手、起重机、汽车、飞机等也有惊人的发展，而作为视觉系统的光电传感器相形见绌。光电传感器是得到第一性资料的感性元件，没有正确和快速的信息，在自动化生产中，计算机不能发挥其快速的优点，执行机构无法执行正确的动作，因此为了提高自动化，加速实现四个现代化，对光电传感器一方面要应用它，另一方面要研究它、改进它和发展它。从医学角度看，有人从治疗、动手术和移植眼球（来源有限）着手使盲人重见光明，但也有人

研究着复杂的电子仪器，使盲人恢复部分视觉。

目前在自动化程度较高的情况下，工作人员管理的不是一台或几台机器，而是整个系统和工厂，这时表示各台机器工作情况的显示仪表集中在控制室，通过遥控管理各台机器，人与机器如何互相配合，发挥各自的特长，提高效率，这些就是目前正在讨论和研究的人-机系统的内容。但有些场合，例如氢弹爆炸、两极探险、海洋开发、太空探索等的环境都很恶劣，如果能用机器人代替人去工作，那是很理想的。在繁重而简单重复的体力劳动中，也需要用机器人。这种机器人不但要有机械手、机械脚，最好还要有眼、耳等人工器官，使它能看、能听，有触觉来感受当地的环境信息，再经电子计算机处理后，令其“手”“足”动作，操作各种设备，成为智能机器人。随着科学和生产的发展，没有或用很少工人的工厂会越来越多。在那里不但有机器人在自动装配线上操作，而且还有来回走动着的机器人，监视正在操作的机器人是否有故障或其他情况，这种智能机器人没有视觉系统行吗？从目前来看，能制造出适合于人的人造眼睛为时尚早，还有许多问题有待解决，但作为智能机器人的视觉系统已提到议事日程上，它直接影响着智能机器人的发展和完善。

正像视觉不能代替听觉、触觉、嗅觉、味觉一样，光电传感器虽有一系列优点，也不能取代其他的传感器，例如压电、电感及电容传感器等，根据工作条件和环境，各有各的用处。

在结束本章时，还是回到本书的范围来。从方框图 1-1-2、1-1-4 可看出，光电检测的原理和应用涉及面较广，幸好有关放大器、脉冲数字电路、测量机构、比较器及调节机构等方面的基本原理和计算已有较多的专门书籍论述，本书不予讨论。本书着重讨论两方面的内容：第一部分讨论光电传感器的基本原理、计算及几种基本而常用的光电检测方法，即基本原理部分；第二部分讨论光电传感器在各方面的应用，即各种物理量的测量，为便于各行各业的人员参考，分成几何量、机械量、温度、浓度及成分等章进行讨论。最后一章讨论光电器件在其他方面的应用。