

目 录

| | |
|---------------------------------|---------|
| 第一章 绪论 | (1) |
| 第二章 光学系统 | (8) |
| § 2-1 光电系统的物镜 | (8) |
| § 2-2 辅助光学系统 | (24) |
| § 2-3 光学材料和光学薄膜 | (36) |
| § 2-4 典型光学系统综述 | (46) |
| 第三章 光辐射量计算、探测器与调制盘 | (52) |
| § 3-1 光辐射量的计算 | (52) |
| § 3-2 光辐射在大气中的传输 | (60) |
| § 3-3 辐射探测器及主要特性 | (64) |
| § 3-4 光辐射的调制 | (75) |
| § 3-5 调制盘的工作原理及类型 | (85) |
| 第四章 光电信息检测和信号处理 | (94) |
| § 4-1 光电信息的检测 | (94) |
| § 4-2 光电信号的处理技术 | (106) |
| 第五章 光电系统性能分析 | (130) |
| § 5-1 非成像光电探测系统的静态性能 | (130) |
| § 5-2 微光成像系统的静态性能 | (133) |
| § 5-3 红外热成像系统的静态性能 | (141) |
| 第六章 光电跟踪系统 | (148) |
| § 6-1 方位探测系统的原理 | (148) |
| § 6-2 光电跟踪系统的组成及跟踪原理 | (158) |
| § 6-3 成像跟踪系统的工作原理 | (170) |
| 第七章 军用搜索系统 | (180) |
| § 7-1 搜索系统的工作原理和基本要求 | (180) |
| § 7-2 搜索信号的产生 | (183) |
| § 7-3 行扫描搜索系统及其它 | (188) |
| § 7-4 周视搜索系统介绍 | (192) |
| 第八章 光电测距系统与通讯系统 | (205) |
| § 8-1 光电测距系统 | (205) |
| § 8-2 光电通讯系统 | (215) |
| 第九章 光电对抗技术 | (225) |
| § 9-1 概述 | (225) |
| § 9-2 光电系统在军事上的主要应用 | (226) |
| § 9-3 光电对抗措施的实施 | (231) |
| § 9-4 红外对抗的研究 | (235) |
| § 9-5 光电多光谱技术及图像融合 | (238) |
| 参考文献 | (245) |

第一章 绪 论

一、军用光电系统的基本构成

军用光电系统是一种用于接收来自目标反射或自身辐射的光辐射，通过变换、处理、控制等环节，获得所需要的信息，并进行必要处理的光电装置。它的基本功能就是将接收到的光辐射转换为电信号，并利用它去达到某种实际应用的目的。例如：测定目标的光度量、辐射度量或各种表现温度；测定目标光辐射的空间分布及温度分布；测定目标所处三维空间的位置或图像等。利用这些所测得的信息，按实际应用的要求进行处理和控制在，分别构成诸如成像、瞄准、搜索、跟踪、预警、测距、制导等多种军用光电系统。

组成军用光电系统的基本框图如图 1-1 所示。它大致包括光学系统、探测器、电子系统、输出或控制单元，以及致冷器等。在一些系统内，有些部分可能没有，而有的又会因某个特殊功能的需要而增加一些其它的部分。

光学系统通常包括多种部件，它们主要有用于收集入射的光辐射，并将其聚集或成像到探测器上的光学物镜；用于对入射光辐射进行调制的斩波器或调制器，它能使连续的光辐射变换成有一定规律的或包含目标位置等信息的交变光辐射；用于使单元或非凝视多元探测器能按一定规律连续而完整分解目标图像的光机扫描器；在红外系统中，用于辐射定标的参考源；用于确定系统所探测的光谱范围，与一定光谱特性的探测器配合使用的光学滤波器；用于进一步为探测器聚光的聚光镜和二次聚光元件，如场镜、光锥、浸没透镜等。

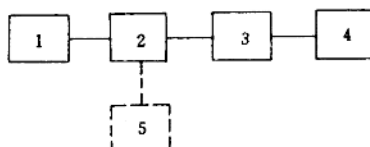


图 1-1 军用光电系统组成框图

1—光学系统；2—探测器；3—电子系统；
4—输出或控制单元；5—致冷器

探测器的主要功能是将入射的光辐射转换成电信号。就其原理来说，探测器可分为光电探测器和热电探测器两大类。光电探测器是基于光辐射的光子与物质中电子直接作用而使物质电学特性发生变化的光电效应。如引起光电子发射的外光电效应；引起物质电导率增加的内光电效应和引起障层两侧材料间电动势的障层光电效应等。由于光子与电子间的直接作用，因此光电效应的灵敏度较高，反应时间较快。此外由于光子的能量与光辐射的波长有关，且材料的电学特性变化存在阈值等原因，因此光电效应的光谱特性对光谱有选择性，且有红限存在。热电探测器的基础是热电效应，光辐射的能量为某些物质所吸收，产生温升而使其电学特性发生变化。如因温升而使电导率增加的热敏电阻；因温升使两种不同材料组成结的两侧间产生电动势的热电偶和热电堆；因温升使某些自极化晶体的两侧产生电动势的热释电探测器等。由于这类探测器增加了升温过程，因此热电效应的反应速度较慢，灵敏度较低。但由于有吸能升温过程的存在，使这类探测器具有一个重要的特性，这就是只要吸收光辐射的材料足够“黑”，则其光谱特性将无选择性。

探测器就其型式来说有单元、串联多元、并联多元、并串联多元、多条扫描型等探测器。

此外, 还有光电阴极面, 光电靶面探测器等。按照各种军用光电系统的实际需要, 适当地选择不同原理、不同类型、不同型式、不同材料的探测器。

在本系列教材中, 因有专门教材论述探测器, 因此本教材对探测器的原理和特性不再进行深入地讨论。

军用光电系统的电子系统最具有多样性, 归纳起来主要包括以下部分: 为使探测器工作在所要求的合理的工作点上, 就需要设计适当的偏置电路。例如光敏电阻的偏置电路根据工作要求不同可以有恒流偏置、恒压偏置及最大输出功率偏置电路, 探测器不同, 所要求的偏置电路亦不同。

为使探测器偏置电路获得的信号电平得到提高, 首先应采用前置放大器进行放大。这种放大器根据工作要求, 与偏置电路间可以是功率匹配, 也可以是最佳信噪比匹配。军用光电系统中因信号通常很弱, 一般采用后者。

经过前置放大后的信号, 按照不同系统功能要求采用完全不同的信号处理电路。归纳起来可以包括: 各种类型的放大器、带宽限制电路、检波电路、整形电路、钳位电路、直流电平恢复电路、有用信息提取电路等。

为使各种电路正常工作, 还必须要有的满足各自需要的电源, 有些电源还可能有很特殊的要求。

输出或控制单元是光电系统检测到的目标信号的最后表现或应用的形式。有些系统只需要目标信号的显示或记录, 那么可以通过显示屏显示、数字显示或指针式显示, 以供人眼判读。也可通过其它多种记录方式记录所获得的信息。有些系统在获得目标信号后不仅要判读, 还需把它作为控制信号, 达到某种控制的目的。这样目标信号还要通过 A/D 变换、计算机处理、D/A 变换, 以及其它的专用控制部件, 完成系统要求的控制功能。

系统中的致冷器主要用于对探测器的致冷, 有时也用于使光学系统、低噪声前置放大器致冷, 其目的都是为了使探测器及有关器件工作在低噪声状态下。特别是用于探测红外辐射的光电探测器, 几乎都需要进行致冷才能进行正常工作; 有些用于对微弱可见光探测的器件, 如光电倍增管, 也可通过对它的光阴极进行致冷, 以减少其热电子发射, 达到减少噪声的作用。

致冷的温度依探测器的要求而定, 有的探测器需致冷到液氮的沸点温度4.2K, 有的要求到液氮的沸点温度77.3K, 还有的要求到液氧的沸点温度90.2K或干冰的熔点温度194.6K等。也有的只要求-20℃~-40℃的低温即可, 如光电倍增管的光阴极, 温度过低反而使光阴极导电特性变坏, 使其性能特性下降。

根据致冷温度的要求采用不同的致冷方式, 如致冷温度较高时, 可采用珀尔帖效应制成的单级或多级电致冷器或称半导体致冷器。

当要求致冷温度很低时, 致冷器将比较复杂, 它将由杜瓦瓶和致冷机(或致冷剂)组成, 杜瓦瓶如图1-2所示。它由内外套封接成的真空腔组成, 通常内套为玻璃, 以利放置于内套端部的探测器输电引线的引出。外套可由玻璃或金属制成, 从而构成玻璃杜瓦瓶或金属杜瓦

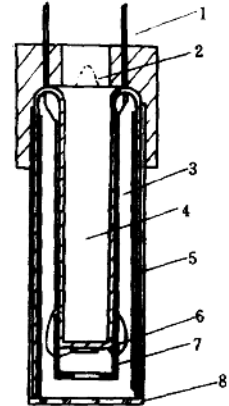


图1-2 杜瓦瓶结构简图
1—电引线; 2—抽气管;
3—杜瓦瓶; 4—致冷剂;
5—真空屏蔽; 6—探测器;
7—冷光窗; 8—红外窗

瓶。在外套的端部为光辐射输入窗，窗材料的选择应以透过探测器待测光辐射为首要条件。杜瓦瓶空腔内壁镀以反射率极高的材料。采用这样结构目的是减少探测器与外界形成辐射、传导和对流形式的热传递。当采用致冷剂致冷时，如液氮，则可将致冷剂倒入杜瓦瓶中，通过内套端部材料使处于真空腔中内套端部另一边的探测器致冷，工作时待测光辐射从外套端部引入。致冷剂致冷的杜瓦瓶开口只能向上，输入窗可开在下部或侧面。这种结构只适用于实验室或基座稳定的场所。军事系统中常采用致冷机进行致冷，其致冷方法又可采用节流式致冷或斯特林循环致冷等。

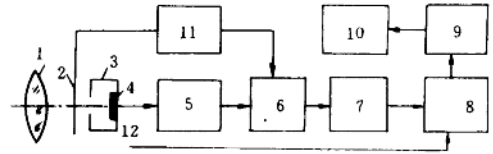


图 1-3 辐射测温仪框图

1—物镜；2—摆片调制器；3—屏蔽盒；4—探测器；5—前置放大器；6—相敏整流；7—目标比辐射率 ϵ 修正；8—室温校正；9—摄氏温度处理；10—温度显示；11—振子；12—室温测定

下面通过几个有代表性的光电系统，进一步说明系统的组成及作用。

1. 辐射测温仪

辐射测温仪是利用黑体辐射定律，对目标辐射进行探测，通过转换和处理得到目标的实际温度，其方框图如图 1-3 所示。目标光辐射通过物镜将目标成像在振子控制的摆片调制器上。探测器置于屏蔽盒中，接收经调制目标辐射和作为参考黑体的摆片辐射，经光电转换为电信号后经前置放大器和相敏整流器，产生目标与室温黑体辐射差的直流信号，经比辐射率的校正和室温校正得到对应绝对温度的电信号，再经绝对温度到摄氏温度的修正，最后输出所测得的目标温度。

2. 机载行扫描辐射测量仪

行扫描辐射测量仪的系统原理如图 1-4 所示。它是以摄取目标辐射分布热图，并将其转换成可见光图像的一种仪器。它由带光学机械扫描的望远镜系统、红外探测器和图像记录器三大部分组成。

望远镜的扫描机构通过飞机底部开口进行垂直于飞行方向的一维扫描。为了获得标准信号，在作下一次地面扫描前，它对扫描器内部的标准辐射源进行一次扫描。飞机不断向前飞行，就构成了另一个一维扫描，飞机按匀速向前飞行，扫描线一条接着一条，于是构成一幅连续的二维条状图像。由探测器将获得的这些红外信息变换成正比于红外辐射强度的电信号，并通过两种途径将其记录下来：一种是用探测器输出的电信号调制一个小光源的发光强度，利用与扫描反射镜同步转动的第二个反射

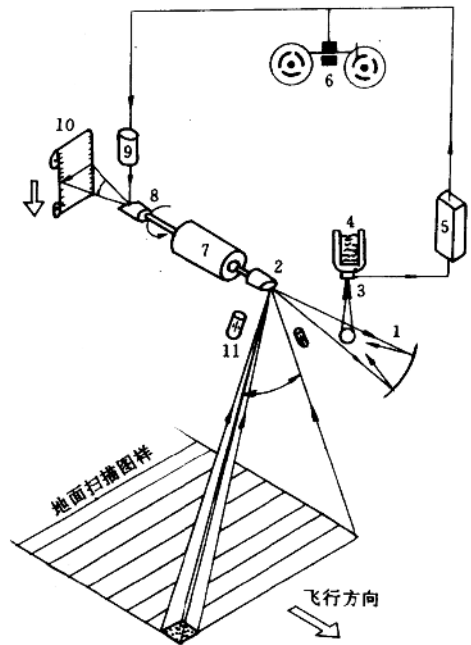


图 1-4 行扫描系统示意图

1—光学系统；2—扫描镜；3—探测器；4—致冷器；5—放大器；6—磁带记录器；7—电机；8—记录反射镜；9—受调制光源；10—胶片记录器；11—标准辐射源

镜，使被调制的光线在带状记录底片上进行扫描，由于记录底片前进的速率正比于飞机的速高比，对应地面上的每条扫描线，在底片上都有一条扫描线与之对应。另一种是磁记录法。这种仪器可工作在不同的波段，如8~14μm或3~5μm的红外波段，也可在可见光波段工作。但在不同波段工作则要求不同的探测器和光学系统。典型探测器的瞬时视场为1~3mrad。飞行高度为1000m时，地面分辨单元的边长约为1~3m，用于红外波段时，温度分辨力约为0.1℃的数量级。

3. 脉冲激光测距仪

脉冲激光测距原理是利用光束传播往返时间的测量来完成。其原理如图1-5所示。它是由脉冲激光发射系统、接收系统、控制电路、时钟和计数显示等组成。其工作过程简述如下：按下触发器按钮，使复原电路给出复原信号使整机复原，同时触发脉冲激光器产生脉冲输出，该脉冲光束中一小部分由参考信号取样器取样后，送到接收系统作为计时的起始信号，而脉冲光束中大部分射向目标，经反射后返回由接收系统接收，形成测距信号。

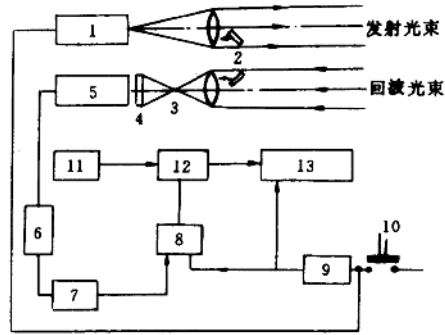


图 1-5 脉冲激光测距仪框图

1—脉冲激光器；2—参考信号取样器；3—光阑；4—干涉滤光片；5—光电接收器；6—放大器；7—整形器；8—控制器；9—复原电路；10—按钮触发器；11—时钟发生器；12—电子快门；13—计数显示器

两个光脉冲信号先后通过减少非信号干扰的光阑和干涉滤光片，为光电接收器所接收，并变换为两个电脉冲信号。两信号再经放大和整形后，送至控制电路，产生相应于参考和测距的两负脉冲A和B，用以打开和关闭电子门，使时钟脉冲在此期间顺利通过电子门，为计数器计数。各脉冲间的关系如图1-6所示。设设计脉冲 $n=1500$ ，时钟频率 $f=150\text{MHz}$ ，用 c 表示光速，则测定的距离 L 为

$$L = \frac{1}{2}tc = \frac{nc}{2f} = 1500\text{m}$$

由上述计算可知，在所用时钟频率很高的情况下，记录的每一个脉冲对应1m，可见绝对精度不高，这也是直接激光脉冲测距的主要缺点。

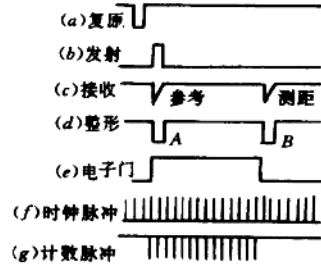


图 1-6 各脉冲波之间的关系

二、光电系统的分类

虽然光电系统的基本组成大体类似，但就其工作原理，应用目的和使用场所来讲又是千变万化的，分类方式也多种多样。例如：按主动（有源）工作还是被动（无源）工作分类；按装置的扫描方式分类；按信号处理的方式分类；以及按用途分类等等。由于相互间穿插，很难做到明确的分类。下面从系统工作的基本目的和原理出发将光电系统分为：探测与测量系统；搜索与跟踪系统；以及光电成像系统三个大类。

探测与测量系统主要是通过对待测目标光度和辐射变量的测量，对其光辐射特性、光谱特性、温度特性、光辐射的空间方位特性等进行记录和分析。如光照度计、光亮度计、辐射计、光谱仪、分光光度计、测温仪、辐射方位仪等。这些系统多用于测定或计量目标反射、

辐射等基本参量，用于对其基本光辐射特性进行分析。其它类型的光电系统也将对目标光辐射特性进行检测，但将应用于不同的目的而与此有着很大的差别。

搜索和跟踪系统主要是通过对视场内的搜索，发现特定的入侵的或运动的目标，进而测定其方位，进行跟踪。如：制导装置、寻的器、光电搜索与跟踪系统、光电预警系统、光电探测系统、光电测距与测角仪、红外导航系统等。

光电成像系统主要是通过像管（像增强器）或扫描实现对观察视场内的目标进行光电成像。如：主动夜视仪、微光夜视仪、CCD摄像机、微光电视、红外显微镜、光机扫描热像仪、周视成像系统等。这里要说明的是目前的光电成像系统除用于观、瞄外，已大量应用于前述的两类系统中，使上述系统获得更全面的信息，更好地完成各自的功能。一般的光电成像系统在本系列教材的“夜视系统”中给以介绍，在本教材中只作概述。

三、光电系统的应用

光电技术将涉及技术物理、光学、机械、电子和计算机等各个技术领域，它的发展将对促进国民经济各部门先进技术的采用，以及加强基础科学和应用科学的研究有着十分重要的作用。目前光电技术正被广泛地用以解决国防、国民经济、科学研究和空间技术中的各种不同的问题，用光电技术改造各传统领域，将是它们实现现代化的重要途径。

光电技术在军事装备中的应用有着广阔的前景，对装备技术现代化起着关键的作用。光辐射在电磁波谱中占有较宽的波段范围，通常认为其波长可从 $0.01\mu\text{m}$ 到 $1000\mu\text{m}$ 之间。它可大致分为紫外线，可见光和红外线三个波段，其中可见光只占有十分窄的一部分，波长约在 $0.38\sim 0.76\mu\text{m}$ 之间，人眼只有利用可见光来观察和认识世界，即使这样人眼还受到极限分辨力、极限对比度和灵敏阈的基本限制，所能获得可见光反应的信息也很有限，虽然通过一些光学仪器如望远镜、显微镜等，使人眼视觉在可见光范围内有所扩展，但灵敏阈的限制却并未打破，此外，人眼的反应速度、记忆能力、检测量的度量等方面还有许多限制。因此，从紫外——可见——红外的光辐射所反应的十分丰富的客观世界的信息，其中绝大部分不能为人直接感知，而光电系统恰是利用光电探测器来代替人眼，更全面地探知由光辐射所携带的丰富信息。特别在军事上，谁能迅速、准确、全面地掌握战场信息，谁就掌握了战场中对抗的主动权。所以早在第一次世界大战期间，人们就企图将光电系统用于战场。在第二次世界大战中，由于银氧铯光阴极的问世，出现了主动红外夜视仪，同时也出现了红外的通讯设备。第二次世界大战后，随着性能优良的各种波段的光电探测器的出现，与之相应的各波段的光源、光学材料、光学系统、微型制冷技术、各种空间滤波技术、电子及微电子技术以及计算机等技术的迅速发展，使光电系统在军事上得到广泛的应用。各种直接用于军事的微光夜视、热成像、跟踪、制导、预警、通讯、探潜、测距、导航、气象遥测、多光谱遥感、大地测绘等军用光电系统日益增多并完善。军用光电系统的广泛应用及发展，也促进了有关学科的不断进步。

由于大气特性的限制，目前所开发利用的波段主要是：近紫外波段、可见与近红外波段、 $3\sim 5\mu\text{m}$ 的中红外波段和 $8\sim 14\mu\text{m}$ 的远红外波段。当然这些波段加起来也只是光辐射波段的一小部分。其它波段的资源还有待于逐步开发。

国民经济各部门是光电系统应用最广泛的领域。光电系统已经在信息传感、信息存贮、信息传递、非接触精密检测等方面得到广泛应用。它已深入到了遥感和空间系统、通讯装置、工

业控制、精密测量、医学和生物仪器，以及办公自动化设备和生活用具等许多领域中。

四、光电系统的基础与发展

光电系统在 20 世纪初问世以来，经过了长时期的发展，特别是近 40 年，光电系统在性能、应用范围、使用效果等方面都得到了很大发展，这些都得益于其基础的发展。下面给予简单介绍。

(1) 光电系统的性能与光电探测器的发展密切相关。随着光电系统应用要求的不断增多，对探测器的性能也不断提出种种新的要求，这主要是在工作波段、响应度、弛豫时间、工作频率、敏感面积和结构工艺等方面，从而促进了光电探测器的发展；另一方面新型探测器的出现又为光电系统的发展开辟了新的途径。目前从近紫外到远红外，均有性能指标很高的光电探测器， $14\sim 40\mu\text{m}$ 长波红外光电探测器的性能也在不断提高，可适用的器件种类越来越多。探测器的响应时间最高的已小于 1ns 左右，光束可在几百 MHz 调频工作。有的探测器的探测能力可探测单个光子。多元器件中，并联可达 180 元，Sprite 扫积型探测器和并串联 64×64 元已应用多年。焦平面型探测器近年来也有很大发展，CCD 和 IRCCD 都已实现了商品化，新型凝视列阵及串并型 mn 系列探测器均已走向实用化。

综合利用现代探测器的成果，提高应用效果是目前光电系统发展的重要方向之一。

(2) 光电系统离不开各种类型的光学系统，因此几何光学、物理光学同样是其系统设计的理论基础。在光电系统的性能分析和计算中常用光学传递函数的方法去分析评价系统质量，也常用光学传递函数的方法去进行全系统的设计。

光学材料及各种光学元件，特别是适用于紫外和红外波段的材料和相应的光学元件以及光学工艺的发展也是光电系统发展的重要基础。目前非球面、任意空间曲面的加工技术已成熟；真空镀膜工艺、特种工艺亦具有很高的水平。所有这些技术的进展均为光电系统的发展建立了必要的基础。

(3) 光电系统从信息观点上看，它实质上是一个信息接收系统。在光电系统的研究中，首先应当考虑信号检测问题，而信号检测理论是信息论的重要分支。在光电系统中要研究信号形成、检测准则、检测方法和估值等问题。检测到的信号通过必要形式的处理，抑制噪声以获取所需要的目标信息。现代信号处理技术有模拟和数字两种方法。通常采用的滤波技术、相关技术、图像处理技术、以及各种背景抑制技术等，在光电系统设计中都得到广泛的应用。光电系统通常也是一个控制系统，现代控制理论及技术的发展也对光电系统的应用提供了重要基础。

(4) 新型集成电路和微机技术的发展使光电系统的自动化、智能化程度迅速提高。在军事上，如导弹制导系统、定向系统和预警系统中，新型集成电路和微机都占有重要地位。在工业生产的自动分选、自动检测、机器人视觉等系统中都离不开自动化、智能化的光电系统。

(5) 人造光源的发展，特别是各种新型激光器的出现，为光电系统提供了携带信息的优质媒体。利用激光的准直性、相干性特点，亦扩大了系统的应用范围，提高了系统的功能。

(6) 光电系统的发展还与组成系统各部件的技术现状有关。例如每分钟 $5\sim 6$ 万转的空气轴承的高速电机问世，使光机扫描热成像系统的扫描帧频才有可能达到 50Hz 以上。制冷器的微型化、伺服机构的新构思、机构结构的新设计、新材料新品种的增多和质量的提高等，都给改进光电系统的性能创造了新机会。

综上所述，光电系统的发展离不开以下三个基本因素：

(1) 光电系统发展的最基本动力是人类在光波范围内扩展视觉的渴望。精巧的人眼对感知光波段信息的能力实在是太有限了，大量的信息资源有待利用各种光电系统来进行开发，特别是军事上的需要。为实现全方位的侦察和精确打击，军用光电系统将是其重要的工具。军事需要促进了光电系统的发展。国民经济各领域对光电系统的渴求，亦是其发展的动力。在现代化的工农业生产中为实现过程的管理和控制，必须及时掌握各种表征过程特性的信息，而光电系统通常能实现快速的、精确的，高分辨的和多波段的信息采集、处理、控制和显示。显然各种光电系统的实现，也有力地促进了国防现代化、工业、农业和科技现代化的进程。

(2) 光电系统的发展与各种光电探测器的发展有着明显的依存关系。每一种新型器件的出现都将导致光电技术应用的新发展，并相应出现一批新型的光电系统。如 20 世纪初硒探测器的问世，才使光电搜索试验性装置成为可能，并使光度量的客观测量成为可能；40 年代研制成的银氧铯光阴极，很快就试制成了红外变像管，于是在第二次世界大战中就产生了用于步枪夜间瞄准的主动红外夜视仪和红外通讯系统，在战场上发挥了重要的作用；40 年代后期多晶硫化铅光敏电阻的出现，使从可见光到 $3\mu\text{m}$ 红外区有了性能良好的探测器，于是相应产生了慢速热像仪、光导摄像管，以及多种导弹位标器；随着 $3\sim 5\mu\text{m}$ 和 $8\sim 12\mu\text{m}$ 光电探测器的出现，多种用途的红外热像仪得以出现，其性能很快得到了提高，并被广泛用于三军装备和多种民用的温度探测系统；电荷耦合器件 (CCD) 的诞生不过 20 年的历史，广播电视级水平的 CCD 摄像系统已是普遍的设备了；军用微光电视中，也几乎都采用 CCD 作为系统的重要组成部分。

目前正在研制的多元探测器、焦平面列阵探测器，以及多种新型探测器材料的出现将预示着光电系统在今后将会有重大的发展。

(3) 光电系统的发展需要多种学科相互配合。它总是与物理学、光学、光谱学、电子学、微电子学和半导体技术等学科相互促进和渗透。因此各学科的最新成就在光电系统中的应用，将使光电系统能保持不断创新和发展。

光波段资源的不断开发，亦将促进光电系统的发展，推动科学技术的进步。

思考题

1. 军用光电系统的主要组成及各部分的主要功能。
2. 光电系统的主要用途及类别。
3. 光电系统发展的主要基础。

第二章 光学系统

本章主要介绍军用光电系统中几种常用的物镜的结构类型及其像差性质；场镜、光锥、浸没透镜等辅助光学系统的作用及设计要求；介绍几种常用的光学材料及光学薄膜；最后简单介绍几种典型的光学系统。

§ 2-1 光电系统的物镜

光电系统中使用的物镜通常有：折射式、反射式、折反射式及变焦距物镜。

一、折射式物镜

折射式物镜结构简单，装校方便，在各种光电系统中被广泛地采用。它可以由单片构成（单透镜），也可以由多片组成（复合透镜）。

1. 单薄透镜

单透镜是一片会聚透镜，它是折射式物镜中最简单的一种。单透镜成像的质量较差，尤其是球差和色差较大，但在一些对像质要求不高的光电系统（如某些红外系统）中采用这种单透镜，结构简单又便宜。

下面根据初级像差理论给出单薄透镜的球差、位置色差、彗差和像散的公式。这里假设物在无限远，且透镜在空气中使用。

(1) 初级球差

$$\delta L' = -\frac{h^2 \varphi}{2(n-1)^2} \left[n^2 - (2n+1)K + \frac{n+2}{n} K^2 \right] \quad (2-1)$$

式中 h ——透镜的半通光孔径； φ ——光焦度； $K = c_1/(c_1 - c_2) = c_1/c$ ，称为形状系数。其中 $c_1 = 1/r_1$ ， $c_2 = 1/r_2$ ，为薄透镜的两个表面曲率， r_1 和 r_2 分别为曲率半径。

由初级球差引起的最小弥散圆斑（简称弥散斑）大约位于离理想焦点 $(3/4)|\delta L'|$ 处，即离边缘光线焦点 $(1/4)|\delta L'|$ 处，因而球差弥散斑直径 δd_s 应为

$$\begin{aligned} \delta d_s &= \frac{1}{4} |\delta L'| (2u') \\ &= \frac{h^3 \varphi^2}{4(n-1)^2} \left[n^2 - (2n+1)K + \frac{n+2}{n} K^2 \right] \end{aligned} \quad (2-2)$$

球差弥散斑角直径近似为

$$\begin{aligned} \delta \theta_s &= \frac{\delta d_s}{f'} = \delta d_s \cdot \varphi \\ &= \frac{h^3 \varphi^3}{4(n-1)^2} \left[n^2 - (2n+1)K + \frac{n+2}{n} K^2 \right] \end{aligned} \quad (2-3)$$

由上式可见，如果透镜的孔径和焦距已定，则球差弥散斑角直径 $\delta \theta_s$ 随折射率 n 和形状系数 K 而变。

若将(2-1)式对 K 求导, 并令它等于零, 则可求出球差最小时的透镜形状。当形状系数满足下述关系式时球差为最小

$$K_{\min} = \frac{n(2n+1)}{2(n+2)} \quad (2-4)$$

即 $\frac{c_1}{c_2} = \frac{2n^2+n}{2n^2-n-4}$ 或 $\frac{r_2}{r_1} = \frac{2n^2+n}{2n^2-n-4}$ (2-5)

把上式代入薄透镜焦距公式, 即可得到

$$\begin{cases} r_1 = \frac{2(n-1)(n+2)}{(2n+1)n} f' \\ r_2 = \frac{2(n-1)(n+2)}{2n^2-n-4} f' \end{cases} \quad (2-6)$$

把(2-4)式代入(2-1)式可得最小轴向球差为

$$\delta L'_{\min} = -\frac{h^2 \varphi n(4n-1)}{8(n-1)^2(n+2)} \quad (2-7)$$

最小球差弥散斑角直径可将 K_{\min} 值代入(2-3)式求得

$$\delta \theta_{\min} = \frac{h^3 \varphi^3 n(4n-1)}{16(n-1)^2(n+2)} \quad (2-8)$$

上式还可化成更简单的形式。若系统的入瞳(薄透镜的直径)为 D , 则

$$h = \frac{D}{2}, \quad F = \frac{f'}{D} = \frac{f'}{2h} = \frac{1}{2h\varphi}$$

因此, (2-8)式可写为

$$\delta \theta_{\min} = P/F^3 \quad (2-9)$$

式中

$$P = \frac{n(4n-1)}{128(n-1)^2(n+2)} \quad (2-10)$$

例如: 对锗薄透镜, $n=4$, 最小球差时的透镜最佳形式可由(2-6)式求出

$$r_1 = f', \quad r_2 = 1.5f'$$

若该锗透镜的 F 数为 2, 则可由(2-9)式求出最小球差角直径为

$$\delta \theta_{\min} = \frac{0.0087}{8} \approx 1.1 \times 10^{-3} (\text{rad})$$

(2) 初级位置色差

单个薄透镜的初级位置色差公式为

$$\Delta L'_{\text{ch}} = -\frac{f'}{V} \quad (2-11)$$

式中 f' ——透镜焦距; V ——阿贝常数, 又称色散倒数, 对于可见光波段, V 值由下式确定:

$$V = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}$$

其中 n_D 、 n_F 和 n_C 分别为光学材料的 D 光、 F 光和 C 光的折射率。对于红外波段, V 值可由下式确定

$$V = \frac{n_m - 1}{n_l - n_s}$$

其中 n_s 、 n_l 和 n_m 分别为透镜材料在红外系统工作波段上的短波限折射率、长波限折射率和波

段中点波长($\lambda_m = (\lambda_1 + \lambda_2)/2$)折射率。

由(2-11)式可知,单透镜的色差和 V 成反比, V 值愈小色差愈大,这就是又称 V 为色散倒数的缘由。而且由于 V 恒为正值,所以色差的正负完全由焦距 f' 的正负所决定,正透镜($f' > 0$)产生负色差,负透镜($f' < 0$)产生正色差。因此,可以用正负透镜组合的办法消色差。

位置色差弥散斑角直径为

$$\delta\theta_{ch} = \frac{1}{2VF} \quad (2-12)$$

(3) 初级彗差和像散角直径

当物在无限远时,单透镜的轴外像差一般不是主要的,但在大视场、大孔径情况下,彗差和像散需要予以考虑。

当物在无限远且光阑与透镜相接时,弧矢彗差弥散斑角直径为

$$\delta\theta_c = \frac{W}{8n(n-1)F^2}[-(n+1)K + n^2] \quad (2-13)$$

当透镜具有最小球差形状时,将形状系数 K_{min} 的表示式(2-4)代入上式,得

$$\delta\theta_{cmin} = \frac{W}{16(n+2)F^2} \quad (2-14)$$

可以证明,像散与透镜形状无关,其弥散斑角直径为

$$\delta\theta_s = W^2/2F \quad (2-15)$$

式中 W ——半视场角; F ——系统的 F 数。

2. 复合透镜

当单透镜采用最佳形状,其像质仍不能满足系统的像质要求时,可以采用由双片或多片单透镜组成的复合透镜(透镜组)。

(1) 双胶合物镜。如图2-1所示,双胶合物镜是由一正一负的两个透镜用胶粘合而成的,胶合面具有相同的曲率半径。由于正透镜产生负色散和负球差,负透镜产生正色散和正球差,所以双胶合物镜可以校正色差和球差。

设计双胶合物镜,校正像差的顺序通常是先色差后球差。根据消色差要求,确定两块单透镜的光焦度 φ_1 和 φ_2 后,三个折射面中将有一个面的曲率半径是自由变数,通常把胶合面的曲率 c_2 作为变数。当 c_2 改变时,为保持 φ_1 和 φ_2 不变,另两个面的曲率 c_1 和 c_3 必须相应改变,这就是双胶合透镜的整体弯曲。用此方法即利用 c_2 的改变校正双胶合物镜的球差。如果适当选择二透镜的材料,能够在校正球差的同时校正彗差。

双胶合物镜结构简单,装调方便,光量损失小,又可校正色差和球差,所以得到广泛的应用。但双胶合透镜轴外像差较大,视场一般不超过 $8^\circ \sim 10^\circ$;最大口径不能超过100mm,以免由于透镜重量过大而脱胶。

(2) 双分离物镜。双胶合物镜只有在有透镜材料选择得恰当时,才能在满足焦距和消色差要求的同时,校正球差和彗差。但由于目前透红外光学材料还不太多,要选择得恰当很不容易,因此可采用双分离物镜,如图2-2所示。双分离物镜由于正负两块透镜之间有一定的间隙,所以 r_2 和 r_3 可以不等。另外,二透镜之间的间距可以调整,这就给设计增加了自由变数,可以对任意选定的两种透镜材料在满足总的焦距要求的同时做到系统消色差、球差和彗差。

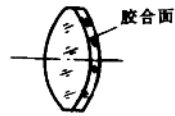


图2-1 双胶合透镜



图2-2 双分离物镜

双胶合物镜的剩余球差限制了其相对孔径的增大，而双分离物镜可以利用空气间隙的距离来校正剩余球差，所以它可以具有较大的相对孔径。另外，双胶合物镜由于胶合工艺上的问题，口径不能做得太大，而双分离物镜则不存在这个问题，它可以做成大口径的。但双分离物镜比双胶合物镜多了两个与空气接触的表面，因而反射损失加大了。此外，装校也比较困难，特别是两透镜的共轴性不易保证。

(3) 三片及多片透镜组。双片透镜的视场和相对孔径都不大，若要达到较大的视场（如二三十度）和相对孔径（1/2 左右），必须选用三片以上的组合透镜。图 2-3 为三片组合透镜，视场为 $15^\circ \sim 20^\circ$ ， F 数为 5~7。图 2-4 为六片组合透镜，视场角达 30° ， F 数可达 1.4~2.5，像质优良。在像面扫描中，往往要采用这种大视场大相对孔径的折射式物镜。为减少反射损失，每面均应镀膜增透膜。这种多片组合透镜，由于反射、吸收和散射损失均有，所以总透射比是不高的。在红外系统中，由于透红外光学材料不多，要消色差也是不容易的，若波段较宽，剩余色差较大，因此不如反射式物镜用得更多。

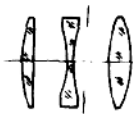


图 2-3 三片组合透镜

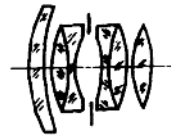


图 2-4 六片组合透镜

设一组薄透镜有 k 块，每块的光焦度相同为 $\varphi_j = \varphi$ ，入射高度 $h_j \approx h$ 相同，折射率 $n_j = n$ 也相同，且每块透镜具有最小球差形状时，则这组透镜的总球差为

$$\delta L' = \sum_{j=1}^k \delta L'_j \quad (2-16)$$

$$\text{其中} \quad \delta L'_j = \frac{-h^2 \varphi n [4n - 1 - 4j(j-1)(n-1)^2]}{8k^2(n-1)^2(n+2)} \quad (2-17)$$

显然，当只有一块透镜 ($k=1$) 时，(2-17) 式就是 (2-7) 式。单片透镜的球差虽为最小，但不可能等于零，要使球差为零，必须多块组合。当 $k=2$ 时，令总球差 $\delta L' = 0$ ，由以上二式可解出 $n=2.5$ 。当 $k=3$ 时令总球差为零，亦可解出 $n=1.75$ 。这就是三片薄透镜组合所选择的折射率。

图 2-5 表明折射率为 n 的 j 个薄元件（每个元件的弯曲使球差最小）的薄透镜像差。透镜的光瞳半径为 h ，透镜光焦度为 φ 。

二、反射式物镜

反射式物镜和折射式物镜相比，具有以下优点：(1) 可以制成大口径

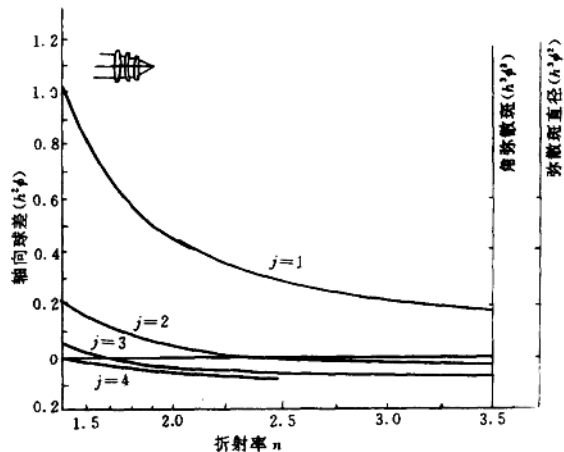


图 2-5 组合薄透镜的像差曲线

物镜，且取材容易。由于反射式物镜可以用金属制作，也可以在普通玻璃上镀一层金属或其它介质膜。(2) 反射镜的光量损失少。例如，最常用的镀铝反射镜面，对红外波段的反射比一般都在 95% 以上。(3) 反射镜不产生色差。但反射镜也有一些缺点，例如视场小、体积大、加工难和成本高等。

反射镜分单反射镜和双反射镜。最常用的是双反射镜系统，它是由两块单反射镜组合而成。

1. 单反射镜

单反射镜有球面反射镜和非球面反射镜，非球面反射镜包括抛物面反射镜、椭球面反射镜和双曲面反射镜。

(1) 球面反射镜。球面反射镜是最简单的反射式物镜，它易于加工和装调，价格便宜，没有色差，其球差值也比相同口径和相同焦距的单透镜小。如图 2-6 所示，若孔径光阑置于球心 c 处，由于任一主光线（通过孔径光阑中心）都可以作为此物镜的光轴，因此任一角度投射到物镜上的光束，其像质都和轴上点的像质一样，这样就在整个视场范围内得到均匀良好的像质。此时，因为主光线与球面法线重合，主光线入射角 $i_z = 0$ ，由初级像差理论可知，彗差、像散和畸变均为零，仅有的像是球差和场曲，当物在无限远时，初级轴向球差为

$$\delta L' = h^2/4r \quad (2-18)$$

式中 r ——球面反射镜半径； h ——孔径光阑半径。

此时像面为一球面，与反射镜同心，像面曲率半径为反射镜半径之半，也就是等于反射镜的焦距 f'

$$f' = r/2 \quad (2-19)$$

如果孔径光阑不在球心，那么除球差和场曲外，尚有彗差、像散和畸变。通常都以反射镜本身为光阑，此时由球差、彗差、像散引起的弥散斑角直径（线直径除以焦距）分别为球差角直径

$$\delta\theta_s = 1/128F^3 \quad (\text{rad}) \quad (2-20a)$$

弧矢彗差角直径

$$\delta\theta_c = W/16F^2 \quad (\text{rad}) \quad (2-20b)$$

像散角直径

$$\delta\theta_a = W^2/2F \quad (\text{rad}) \quad (2-20c)$$

式中 W ——半视场角。

由上可见，当视场增大， F 数变小时，像质迅速恶化。因此球面反射镜只能用于视场较小， F 数较大的场合。

为了使大口径或大视场的物镜能获得良好的像质，可采用非球面反射镜或加装校正透镜。

(2) 抛物面反射镜。如图 2-7 所示的一条抛物线，其方程为

$$y^2 = 2r_0x \quad (2-21)$$

将此抛物线绕 x 轴旋转一周，即可得到一个旋转抛物面。把以此面制成的反射镜称为抛物面

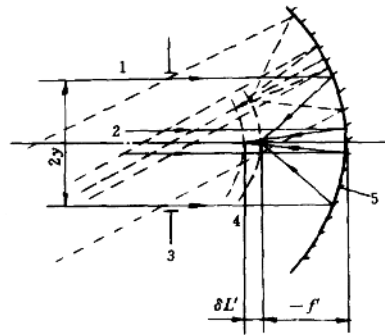


图 2-6 球面反射镜

1—边缘光；2—近轴光线；3—孔径光阑；
4—焦点；5—球面反射镜

镜, x 轴称为主光轴。

所有平行于光轴的入射光线经抛物面镜反射后都将严格地会聚于焦点 F' 上, 因此对无限远轴上物点来说, 抛物面反射镜没有像差, 像质仅受衍射限制, 弥散斑为艾里斑。所以抛物面反射镜是小视场应用的优良物镜。抛物面反射镜的焦距 f' 为顶点曲率半径 r_0 之半 ($f' = r_0/2$)。

对于轴外物点, 抛物面反射镜虽没有球差, 但存在彗差和像散, 它们的大小和光阑位置有关。

①当光阑为抛物面镜本身时

弧矢彗差角直径

$$\delta\theta_c = W/16F^2 \quad (\text{rad}) \quad (2-22a)$$

像散角直径

$$\delta\theta_a = W^2/2F \quad (\text{rad}) \quad (2-22b)$$

②当光阑在焦面上时

弧矢彗差角直径

$$\delta\theta_c = W/16F^2 \quad (\text{rad}) \quad (2-23a)$$

像散角直径

$$\delta\theta_a = 0 \quad (2-23b)$$

抛物面反射镜的像质比球面反射镜要好得多, 因为它对轴外物点不产生球差。但由于加工较困难, 只有在球面反射镜无法满足要求时才使用抛物面反射镜。

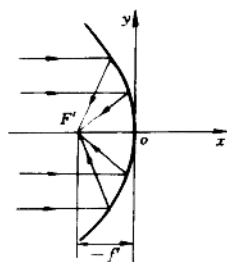


图 2-7 抛物面反射镜

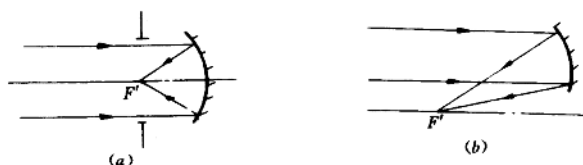


图 2-8 两种常用的抛物面反射镜的结构

图 2-8 是两种常用的抛物面反射镜的结构。图 2-8 (a) 的光阑位于焦面上, 球差和像散均为零, 像质较好, 但光电器件必须放在入射光之中, 要挡掉一部分中心光束, 使用起来也不方便。图 2-8 (b) 为离轴抛物面反射镜, 焦点在入射光束以外, 但装校麻烦, 非对称抛物面加工也较困难。

(3) 双曲面反射镜。双曲面反射镜是由方程为

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (2-24)$$

的两支双曲线中的一支绕对称轴 x 旋转一周, 取其一部分所得的旋转双曲面, 如图 2-9 (a) 所示。双曲面既可利用凸面, 也可利用凹面。

双曲面反射镜有一对共轭点 P 、 P' (称为双曲面的几何焦点, 但不是光学焦点), 由一个焦点 P 发出的光线将严格地会聚于另一焦点 P' , 没有像差。也就是说, 只有那些射向 P 点的光线才能无像差地在 P' 点成完善像, 其它光线是不能成完善像的。此外, 射向 P 点的光线,

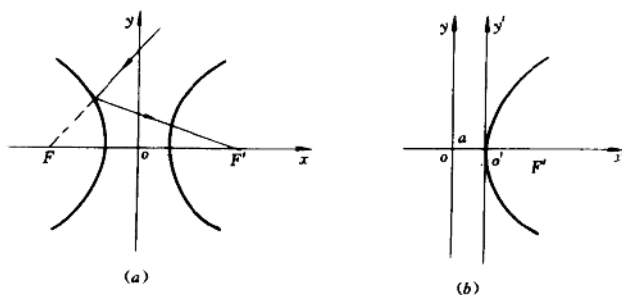


图 2-9 双曲面反射镜

不在 P' 点处观察,也是不能成完善像的。

双曲面反射镜的光学焦点 F' (近轴平行光的会聚点) 与其几何焦点 P' 一般并不重合。双曲面反射镜的光学焦距 f' 为其顶点曲率半径 r_0 之半 ($f' = r_0/2$)。

利用坐标平移可将方程(2-24)表示为顶点方程。如图 2-9(b)所示,取 $(a, 0)$ 为新坐标原点,经变换后可得

$$y'^2 = 2px' - (1 - e^2)x'^2 \quad (2-25)$$

式中

$$p = b^2/a \quad (2-26)$$

$$e^2 = (a^2 + b^2)/a^2 \quad (2-27)$$

双曲面的形状完全可以由(2-25)式确定,显然 $e^2 > 1$ 。

(4) 椭球面反射镜。椭球面反射镜是由方程为

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (2-28)$$

的椭圆绕其长轴(或短轴)旋转一周,取其一部分而得的旋转椭球面。如图 2-10(a)是椭圆绕其长轴(x 轴)旋转一周取一部分而得的旋转椭球面。椭球面反射镜一般利用内表面,但也有利用外表面的。

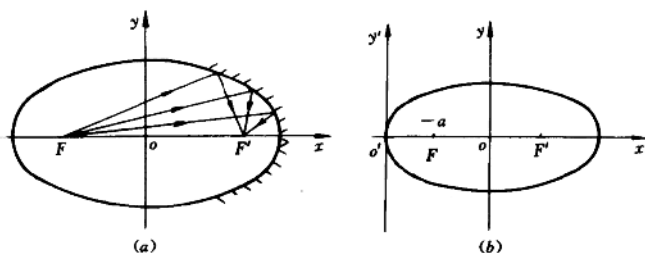


图 2-10 椭球面反射镜

椭球面反射镜也有一对共轭的几何焦点 P, P' , 由 P 点发出的光线将严格地会聚于 P' 点, 没有像差。也只有那些由 P 点发出的光线才能无像差地在 P' 点成完善像, 其它光线不能成完善像。椭球面的光学焦点 F' 与其几何焦点 P' 一般也不重合。光学焦距 f' 也是顶点曲率半径 r_0 之半 ($f' = r_0/2$)。

(2-28)式经坐标平移后,可表示成顶点方程,即坐标原点在曲面顶点处的方程,如图2-10(b)所示。取顶点 $(-a,0)$ 为新坐标原点 o' ,经变换后可得

$$y'^2 = 2px' - (1 - e^2)x'^2 \quad (2-29)$$

式中

$$p = b^2/a \quad (2-30)$$

$$e^2 = (a^2 - b^2)/a^2 \quad (2-31)$$

由(2-29)、(2-30)、(2-31)式可见,如果椭圆的 a, b (或 p, e^2)已定,则椭圆的形状就可确定,并且由它所得的旋转椭球面的形状也就被确定下来。容易看出,当 $0 < e^2 < 1$ 时,当长轴在 x 轴的椭球面;当 $e^2 < 0$ 时,为短轴在 x 轴的椭球面,通常称为扁球面。扁球面反射镜很少单独使用,有时可与球面主反射镜配合作次镜用。

椭球面反射镜和双曲面反射镜的彗差较大,像质不好,很少单独使用。它们都在与其它反射镜组合的双反射镜系统中使用。

由上述讨论可见,球面反射镜和透镜一样,它不能把平行于光轴的光束会聚于光轴上一点(即有球差),但可以利用二次旋转曲面来克服这一缺点。例如,从无限远轴上物点发出的平行于光轴的光束,可以利用抛物面反射镜把光束很好地会聚在其焦点上;若要使从一点发出的光束会聚到另一点时,可利用椭球面反射镜;若要使会聚于一点的光束再会聚到另外一点,则可使用双曲面反射镜。

2. 双反射镜系统

在双反射镜系统中入射光线首先遇到的反射镜称为主镜,第二个反射镜称为次镜。下面先介绍常用的三种双反射镜系统及其特点,然后介绍双反射镜系统初步设计的主要内容和公式。

(1) 常见的双反射镜系统。经常遇到的双反射镜系统有牛顿系统、卡塞格伦系统和格里高利系统。

① 牛顿系统。牛顿系统是由抛物面镜主镜和平面镜次镜组成,如图2-11所示。主镜对入射光线起会聚作用,次镜位于主镜的焦点附近,且与光轴成 45° 角。次镜的作用是使光线偏转方向,将焦点引到入射光束的外部,以便观察或接收。

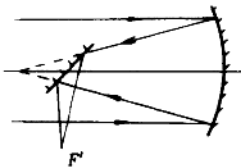


图 2-11 牛顿系统

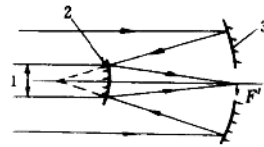


图 2-12 卡塞格伦系统

1—挡光区; 2—次反射镜; 3—主反射镜

由于牛顿系统的主镜是抛物面镜,所以对于无限远的轴上物点来说,是没有像差的,其像质只受衍射限制,但对轴外物点像差较大。牛顿系统常用于像质要求较高的小视场光电系统中。

牛顿系统的镜筒很长,因而重量大,这是光电装置所不希望的。

② 卡塞格伦系统。卡塞格伦系统的主镜是抛物面反射镜,次镜是凸双曲面反射镜,如图2-12所示。双曲面的一个焦点与抛物面的焦点重合,则双曲面的另一个焦点便是整个物镜系

统的焦点了。系统对无限远轴上物点是没有像差的。卡氏系统的次镜位于主镜焦点之内，次镜的横向放大率 $\beta > 0$ ，整个系统的焦距 f' 是正的（系统后主面在后焦点之左），因而整个系统所成的像是倒像。

卡氏系统的优点是镜筒短，焦距长，而且焦点在主镜后面，便于在焦面上放置光电器件。

为了消除不同的像差，卡氏系统已发展有多种结构。例如，主镜用椭球面镜，次镜用球面镜，系统可消球差；主镜和次镜都用双曲面镜时，系统可同时消球差和彗差等。

③ 格里高利系统。格里高利系统是由抛物面主镜和椭球面次镜组成，如图 2-13 所示。椭球面的一个焦点与抛物面的焦点重合，则椭球面的另一个焦点便是整个系统的焦点了，也即系统对无限远轴上物点是没有像差的。次镜位于主镜焦点之外，次镜的横向放大率 $\beta < 0$ ，整个系统的焦距 f' 是负的（系统后主面在后焦点之右），因而整个系统所成的像是正像。

格氏系统根据消像差的要求也可采用其它的配合，例如，若主镜和次镜都采用椭球面，则系统可同时消球差和彗差等。

双反射镜系统的次镜把中间一部分光挡掉，并且随着视场和相对孔径变大，像质迅速恶化，这是它的最大缺点。



图 2-13 格里高利系统
1—次反射镜；2—主反射镜

(2) 遮拦比和有效 F 数。在双反射镜系统中，由于次镜的存在，都要发生挡光现象。描述挡光程度的量是双反射镜系统的一个重要参数，为此引入遮拦比 α ，它的定义为

$$\alpha = D_2/D_1 \quad (2-32)$$

式中 D_1 、 D_2 ——为主镜和次镜的直径。

当发生遮拦时，系统的 F 数应为系统的焦距 f' 与有效通光孔径 D_e 之比，可称为有效 F 数，用 F_e 表示，即

$$F_e = f'/D_e \quad (2-33)$$

显然，有效通光面积为

$$\frac{1}{4}\pi D_e^2 = \frac{1}{4}\pi D_1^2 - \frac{1}{4}\pi D_2^2$$

由此可得

$$D_e = D_1 \sqrt{1 - \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2} = D_1 \sqrt{1 - \alpha^2} \quad (2-34)$$

因此有效 F 数为

$$F_e = \frac{f'}{D_e} = \frac{f'}{D_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \alpha^2}} \quad (2-35)$$

当系统没有遮挡时， $D_2=0$ ，则上式变为 F 数的一般定义了。

(3) 双反射镜系统的初步设计。由于双反射镜系统的结构简单且又不产生色差，故长焦距望远镜常采用之。双反射镜系统的初步设计，主要是根据光电系统所要求的焦距 f' ，次镜的横向放大率 β 和主镜后截距 b 来确定主镜与次镜的顶点曲率半径 r_{01} 、 r_{02} ，偏心率 e_1 、 e_2 以及它们之间的距离 d 。设计的方法一般分为两个步骤，首先是根据近轴理论计算 r_{01} 、 r_{02} 和 d ，然后再根据消像差要求找出 e_1^2 、 e_2^2 ，以确定主镜和次镜的面型。