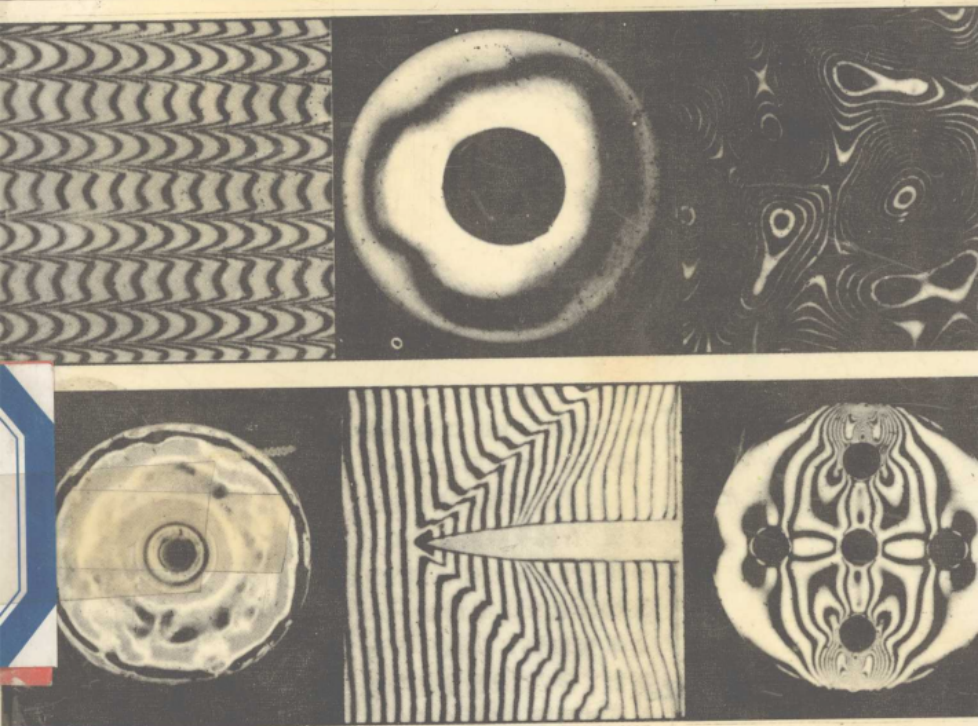


# 最新光学应用测量技术

ZUIXIN GUANGXUE YINGYONG CELIANG JISHU

艾勇 编著



武汉测绘科技大学出版社

# ZUIXIN GUANGXUE YINGYONG CELIANG JISHU

责任编辑 张立福

装帧设计 娟子

ISBN 7-81030-328-7



9 787810 303286 >



ISBN 7-81030-328-7/T • 51

定价 14.00 元

# 最新光学应用测量技术

艾 勇 编著

武汉测绘科技大学出版社

(鄂)新登字 14 号

**图书在版编目(CIP)数据**

最新光学应用测量技术/艾勇编著. —武汉:  
武汉测绘科技大学出版社, 1994, 4.

ISBN 7-81030-328-7/T · 51

I. 最...

II. 艾...

III. 光学—应用光学—测量方法

IV. O439

**最新光学应用测量技术**

艾 勇 编著

\*

武汉测绘科技大学出版社出版发行  
武汉测绘科技大学出版社印刷厂印刷

\*

开本 850×1168 1/32 印张:10.25 插页:3 字数:272 千

1994 年 4 月第一版 1994 年 4 月第 1 次印刷

\*

印数 1~2 500 册 定价:14.00 元

# 前 言

近些年来,随着制造工艺和技术的发展,光学测量的重要性也越来越突出。现在各类制造产业中渗透着越来越多的高技术成分。而技术的高度化、多样化、高可靠性化、高密度化与非接触测量、高速测量、分布测量技术是分不开的。在这些测量技术里面,光学测量技术又是重要的组成部分之一。今天,各种高精度测量技术之所以能够引起人们的极大注目,不仅仅是由于人们对它的需求,更重要的是因为电子技术的飞速发展,使得测量技术更具有生命力。当然,光学测量技术的发展对整个测量技术的发展起到了正反馈的推动作用。

本书将要介绍各项最新光学测量技术,使读者感受到它的重要性,同时将对各项测量技术作较详细的基础原理性说明,并描述测量装置和给出测量结果,每介绍完一部分内容后还给出一些实际应用例子,以使读者既能了解测量的实质又能了解它的实际应用。本书中不仅刊载了作为光学测量方法的经久不衰的基础内容,也给出了它们的最新应用例子。同时,对新技术与有关基础知识的对应关系作了通俗易懂的说明。从基础出发来介绍最近的飞速发展的光学测量技术知识是本书的意图。

由于本书内容通俗易懂,即使不是从事光学专业工作的人员也能看懂。本书中的实际应用例子也是经过挑选的,希望在读者本身的实际应用工作中能起到参考作用。另外本书在阐明某项技术时,还尽量考虑此项技术与其它方面的相互联系性,以使读者能更加灵活地运用所掌握的技术。作为光学工程技术人员,具有综合设计的能力是很重要的,不应当局限于某一单项技术的分析与考虑。当了解了事物之间的相互关联性后,就可能将一种方法移植到别

的方法中去,而这往往容易导出新技术的开发。另外,养成观察从表面上看不出有相互关系的不同技术之间的关联性的习惯,是引导你发现埋藏在深处的极其有价值的新技术所不可缺少的条件。本书的各章节中尽量体现了各项技术之间的相互联系性,但由于编者水平有限,可能这种尝试并不很成功,希望能从读者处得到许多有益的启示,以改进今后的工作。

鉴于我国目前专门介绍光学测量方面的书籍暂不多见,作者根据多年来从事光学测量工作的经验和收集到的大量最新中外文献资料编写了这本书,目的是为我国从事光学测量及相关专业人员提供一本较系统的参考资料。

由于编写时间仓促,本书中定有许多不妥之处,恳请读者给予指教。

1994年2月

艾 勇

# 目 录

|       |                        |      |
|-------|------------------------|------|
| 第一章   | 绪 论                    | (1)  |
| 第二章   | 长度、距离的测量               | (4)  |
| § 2.1 | 雷达方法                   | (5)  |
|       | 应用: (1) 测量月—地距离        | (7)  |
|       | (2) 激光雷达               | (9)  |
|       | (3) 水深计                | (13) |
| § 2.2 | 调制法                    | (15) |
|       | 应用: 激光测距仪              | (21) |
| § 2.3 | 干涉法                    | (22) |
|       | 应用: (1) 双频测距装置         | (27) |
|       | (2) 重力加速度的测量           | (28) |
|       | (3) 半导体激光干涉测长仪         | (30) |
|       | (4) 利用外差干涉法对光频变化和距离的测量 | (34) |
|       | (5) 半导体激光干涉测长技术        | (42) |
| § 2.4 | 反馈型干涉法                 | (51) |
| § 2.5 | 高精度雷达法                 | (64) |
| § 2.6 | 光量传感器                  | (66) |
| § 2.7 | 三角测量法                  | (67) |
|       | 应用: 自动测焦照相机            | (70) |
| § 2.8 | 光栅法(编码法)               | (74) |
|       | 应用: 旋转式编码器             | (76) |
| § 2.9 | 莫尔条纹法                  | (77) |
|       | 应用: (1) 角度的测定          | (81) |
|       | (2) 光楔楔角的测量            | (81) |
|       | (3) 利用声光效应的莫尔条纹位移的检测   | (86) |
| 第三章   | 速度、角速度的测量              | (88) |

|       |                             |       |
|-------|-----------------------------|-------|
| § 3.1 | 多普勒法 .....                  | (88)  |
|       | 应用:(1)微波多普勒速度仪 .....        | (91)  |
|       | (2)流速的测量 .....              | (92)  |
| § 3.2 | 相关法 .....                   | (93)  |
|       | 应用:汽车速度仪 .....              | (95)  |
| § 3.3 | 空间格栅法 .....                 | (96)  |
|       | 应用:角速度的测量 .....             | (101) |
| § 3.4 | 多普勒法和空间格栅法 .....            | (104) |
|       | 应用:(1)跟随型多普勒速度仪 .....       | (109) |
|       | (2)位移、形变、振动的测量 .....        | (109) |
| § 3.5 | 光陀螺仪法 .....                 | (112) |
| 第四章   | 形状的测量 .....                 | (116) |
| § 4.1 | 二次曝光全息法 .....               | (116) |
| § 4.2 | 莫尔条纹法 .....                 | (120) |
| § 4.3 | 光刀法 .....                   | (123) |
|       | 应用:三维面形的光刀测量法 .....         | (125) |
| § 4.4 | 三角测量法 .....                 | (128) |
| § 4.5 | 雷达法 .....                   | (130) |
| § 4.6 | 扫描法 .....                   | (131) |
|       | 应用:(1)核燃料棒的检查 .....         | (133) |
|       | (2)CCD 传感器的利用 .....         | (134) |
| § 4.7 | 干涉法 .....                   | (135) |
| 第五章   | 光纤应用测量 .....                | (165) |
| § 5.1 | 光纤的特点 .....                 | (166) |
| § 5.2 | 光纤的结构 .....                 | (166) |
| § 5.3 | 光源 .....                    | (168) |
| § 5.4 | 光检测元件 .....                 | (174) |
| § 5.5 | 测量方式 .....                  | (176) |
| § 5.6 | 测量方式举例 .....                | (180) |
| § 5.7 | 多点型光纤传感器 .....              | (209) |
| § 5.8 | 光纤速度、振动传感器的发展近况与集成化前景 ..... | (218) |
| 第六章   | 温度、振动的测量 .....              | (227) |



|       |                          |       |
|-------|--------------------------|-------|
| § 6.1 | 光测温度的原理 .....            | (227) |
|       | 应用: (1) 红外辐射温度计的用途 ..... | (234) |
|       | (2) 塑料成型中的应用 .....       | (234) |
| § 6.2 | 光纤测温法 .....              | (234) |
| § 6.3 | 振动的测量 .....              | (247) |
| 第七章   | 光谱测量 .....               | (264) |
| § 7.1 | 棱镜 .....                 | (264) |
| § 7.2 | 衍射光栅 .....               | (265) |
| § 7.3 | 法布里-珀罗干涉仪 .....          | (266) |
| § 7.4 | 付里叶光谱 .....              | (268) |
| § 7.5 | 多通道光谱分析仪(MSS) .....      | (269) |
|       | 应用: (1) 农业自动化中的应用 .....  | (274) |
|       | (2) 植物活性度的评估 .....       | (278) |
| 附录 1  | 光外差探测原理 .....            | (281) |
| 附录 2  | 光零差探测 .....              | (284) |
| 附录 3  | 三频光外差探测 .....            | (285) |
| 附录 4  | 电荷耦合器件 .....             | (287) |
| 附录 5  | 变像管和像增强器 .....           | (296) |
| 附录 6  | 相关检测原理 .....             | (301) |
| 附录 7  | 锁定放大器 .....              | (306) |
| 附录 8  | 光反射器 .....               | (309) |
| 附录 9  | 多普勒频移的计算 .....           | (310) |
| 附录 10 | 光分接器与光联结器 .....          | (311) |
| 后 记   | .....                    | (313) |
| 参考文献  | .....                    | (314) |

# 第一章 绪 论

在我们从外界得到的各种信息当中,有一部分是通过视觉系统得到的。当然这是指利用可见光而得到的。我们并不是漫无目的地收集信息,只有那些对我们的认识和行动有利的信息才被收集。不仅仅是人类需要各种信息,就连某些机械或者装置,也需要周围那些与它们有关的目标或者环境的许多信息。将来,随着具有多性能、高机动性、高智能性的复杂系统的问世,人们对各种信息的依赖程度会大大提高。另外,对获得信息而言,采用广范围的、非接触的、快速的收集方法将是十分重要的,而在这里面,采用光学探测手段的测量系统将会起到重要作用。

光学测量方法有许多的优点。(1)以非接触、非破坏性和在对被测对象没有干扰的情况下就可获得被测物的各种信息。(2)光的直线传播性、高速传送性。(3)光波的振幅、位相、频率(或波长)以及偏振光的时间和空间的变化等特性可被用于多种测量目的。(4)通过投影或者成像的办法可对光载信息进行空间位置的移动。(5)利用光载信息可进行遥感测量和遥感控制。

光学测量法中当然包含激光的运用。激光的高单色性、高相干性、平行性、方向性以及能量的随时间和空间的可能会聚性等独特的特点都可被用于不同的测量目的。光波与微波相比,波长更短,所以它还具有微波所不能比拟的许多优点。(1)可进行高分辨率的测量(干涉测量长度)。(2)频率高的缘故,对微小的变频效应进行放大后就可进行测量(多普勒速度计)。(3)对频率进行稳定后,可利用外差法对拍频信号进行检出(外差法测量长度、双波长激光干涉)。(4)可利用物质和电磁波间相互作用时而产生的量子效应(喇曼散射)。(5)射向被测物的能量较集中的缘故,使测量仪的小型化

成为可能。除了这些外还可列举出其它许多特点。

充分和灵活地运用了这些特点后,现在已开发出了利用传统的光源不可能或很难达到的新的测量方法,将来还会有更多的新方法出现。光学测量方法不仅具有以上所述的各项优点,光学技术的进步也使得许多相关技术受益匪浅,我们的现实生活自然也不例外。我们从表 1-1 中可看到这种情况。

表 1-1

| 光 源   | 光学元件   | 处 理 技 术     |      |
|-------|--------|-------------|------|
|       |        | 硬 件         | 软 件  |
| 激光    | 光纤     | 电路元件·技术     | 全 息  |
| 气体    | 单模     | 模拟·         | 同步检波 |
| 固体    | 多模     | 数字          | ·    |
| 半导体   | 偏振面不变  | 元件          | ·    |
| 发光二极管 | 非球面透镜  | 振荡器         | ·    |
|       | 非球面镜   | 调制器         | ·    |
|       | 衍射光栅   | 检测器         | ·    |
|       | 微小光学元件 | 集成元件(CCD 等) |      |
|       |        | 功能元件(PSD 等) |      |

最近,小型且容易进行光调制的半导体激光器的发展非常引人注目。另外,可用作传感器的光纤的急速发展以及微型光波导和非球面透镜等光学器件的大量开发也正在进行。另一方面,用于将信息从光载波中分离出来的检测技术和处理技术随着电子技术的迅速发展也在快速地完善着。为满足这些要求,高灵敏度、高速度、使用于不同目的的高性能器件正在不断地问世。

随着这些技术的发展,随之而来的是对光学测量的性能和范围的要求也越来越高(表 1-2)。而这反过来又进一步促进了相关技术的发展。这种相互间的促动关系今后会变得愈加紧密,进而各

种相关技术的发展也将更加迅速。

表 1—2

| 功 能      | 举 例         | 能利用的特点          |
|----------|-------------|-----------------|
| 高精度·高灵敏度 | 精密加工(LSI 等) | 波长短,高频率         |
| 高可靠性     | 恶环境下        | 非接触,光纤          |
| 柔软性·适应性  | 机器人,FA      | 非接触,信息传递(视觉传感器) |
| 广域性      | 环境,资源       | 非接触,信息传递(遥控传感器) |
| 空间分布测量   | 形状测量        | 非接触             |
|          | 伤痕检查        | 非接触             |
|          | 交通量调查       | 非接触             |

下面将叙述光学测量方法在长度和距离测量中的应用。对长度和距离都随时间变化的速度量的测量、以及在空间发生变化(或分布发生变化)的形状测量方法也将叙述。对最近发展迅速的光纤应用测量的思维方法也进行介绍并给出若干个具体例子。如果说这些测量方法是用于对量进行测量的话,那么本书对用于对质的测量的光谱分析也略作介绍。

## 第二章 长度、距离的测量

光学用于长度和距离的测量当中,分为沿着光束方向的长度和距离的测量与垂直于光束方向的长度和距离的测量两种。前者是采用对光波加上某种标记(时间调制),然后测出光发射到光接收间所需要的时间,由此传输时间可求出有关长度或距离来。也可利用光强度在传输过程中要产生衰减的特点来进行测量;另外还可以采用三角法来进行测量(参照表 2-1)。在第一种方法中,又分为测量光传输时间方法(雷达法)和测量与时间成比例的位相角方法(干涉法、调制法)两种。而在位相角方法中,为除去因相位  $2\pi$  的整数倍(或波长的整数倍)而带来的不确定性,需采用符合法(使用多波长或多频率的方法)。也可移动被测物,通过测量反射光的位相角变化部分,并对它进行时间积分后来测量所移动的长度或距离。

表 2-1 沿光路方向的测量法

| 长度,位移   | 速 度    | 形 状    |
|---------|--------|--------|
| 雷达方法    | —      | 雷达方法   |
| 调制法     | (多普勒法) | 莫尔条纹法  |
| 干涉法     | 多普勒法   | 全息干涉   |
| (符合,计数) |        | 双曝光法   |
| 光量传感器   | —      | (扫描法)  |
| 三角测量法   | —      | 光刀法    |
|         |        | 激光多普勒法 |

将沿着光路方向的速度测量法和形状测量法与长度、位移测量法进行比较后可得表 2-1 中所示的对应关系。由于光路上的折射率的变化(温度、湿度、压力的变化而引起)可引起测量误差,而通过多波长光波和对折射率变化不太敏感的红外光的使用则可消除或明显减小上述误差。

对与光路相垂直的长度、距离进行测量时,采用对光波加上某种标记并测量这个标记的往复传输时间的方法是行不通的。这种情况下,可采取对被测物加上某种标记(空间调制)而进行测量的方法。它包括两种,一种是用与光波周期构造相类似的基准格栅来进行移动距离的测量;另一种是使用两个周期稍有不同的基准格栅或者两个格栅的周期虽然相同,但相互间略有倾斜,通过计数与光波干涉类似的莫尔条纹来测量移动的距离,这种方法称为莫尔法。与前述两种方法相对应的速度测量、形状测量法如表 2-2 所示。这些方法的测量范围和精度如表 2-3 所示。

表 2-2 与光路垂直方向的测量法

| 长度,位移    | 速 度                  | 形 状        |
|----------|----------------------|------------|
| 光栅法(编码法) | 相关法<br>空间格栅法<br>多普勒法 | 投影法<br>照射法 |
| 莫尔条纹法    | —                    | —          |
| —        | —                    | 扫描法        |

表 2-3 长度、距离测量法

| 方 法   | 范围(m)                  | 精 度                            |
|-------|------------------------|--------------------------------|
| 干涉法   | 10                     | 0.1 $\mu$ m                    |
| 调制法   |                        |                                |
| 振幅调制  | 数千                     | $\pm 1\text{mm}, \pm 10^{-6}$  |
| 频率调制  | $10^3$                 | 0.1mm, $\pm 10^{-6}$           |
| 雷达法   | $5 \sim 3 \times 10^3$ | cm, $\pm 10^{-5} \sim 10^{-6}$ |
| 莫尔条纹法 | 0.2                    | 0.2 $\mu$ m                    |
| 声循环法  | 0~15                   | $10^{-6}$                      |

## § 2.1 雷达方法

此方法是通过测量脉冲式光波传播至被测物处,然后被反射,回到接受器期间所需时间  $\tau$  来进行距离  $L$  测量的。设真空中的光速为  $c_0$ ,光路上的折射率的平均值为  $\langle n \rangle$ ,则有

$$\tau = 2L\langle n \rangle / c_0$$

所以

$$L = c_0 \tau / 2 \langle n \rangle$$

以下用  $c = c_0 / \langle n \rangle$  来表示。

脉冲光波由发射器传输至被测物,再由被测物反射回到接受器这期间所需要的时间可通过计数高频时钟脉冲来测量。一般情况下,是用带有刻度的尺来进行测量。这里,在两个脉冲之间的间隔  $\Delta\tau$  内光所传播的距离,相当于尺上的单位刻度,即  $l_0 = c\Delta\tau$ ,而通过计数脉冲的个数就可测出实际距离来(参照图 2-1)。假设有

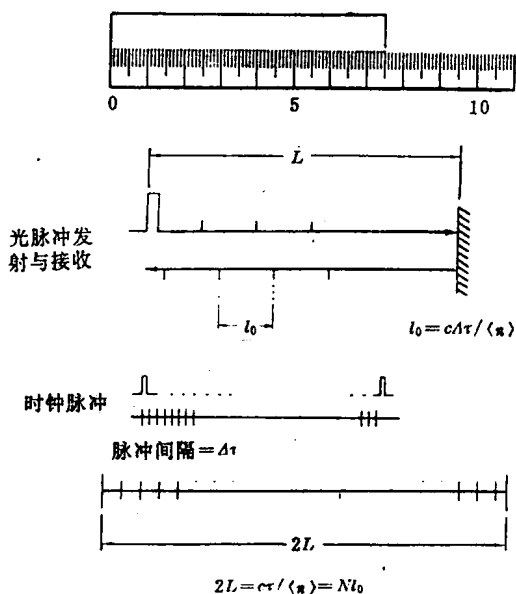


图 2-1 雷达方法的工作原理

$N$  个脉冲被计数,因

$$\tau = N \Delta\tau$$

所以

$$L = c\tau/2 = Nc\Delta\tau/2 = Nl_0/2$$

知道  $N$  后即可求出  $L$ 。

在式子  $L = Nl_0/2$  中,可理解成是用最小刻度为  $l_0/2$  的尺子去度量尺寸为  $L$  的物体,测量结果为  $l_0/2$  的  $N$  倍。造成这种刻度  $l_0$  的实际效果下降一半的原因是因对距离  $L$  进行了往复测量的结果,或者说是测量对象被放大了 2 倍而带来的结果。一般说来,测量对象被放大  $M$  倍后,刻度的实际效果将变为  $1/M$ ,这样可实现高灵敏度的测量。

为提高测量精度,当然光脉冲的宽度越窄越好,但当信噪比不太好时,脉冲宽度不宜过窄。当反射光的信噪比较低时,必须采用与脉宽  $\Delta T$  相同的时钟脉冲来测  $\tau$ 。比如  $\Delta T = 20\text{ns}$  时,采用  $50\text{MHz}$  的时钟脉冲,此时最低分辨率只有  $3\text{m}$ 。如使用较好的角反射镜,信噪比较高。假设  $\Delta T = 2.8 \sim 4\text{ns}$  的脉冲的上升沿也被利用的话,时钟脉宽取  $2\text{ns}$  时,可得到  $30\text{cm}$  的分辨率。

此时如进行多次重复测量,然后取平均值,精度还可提高。对不同距离的两个物体进行区分时的分辨率是由脉冲的宽度来决定的。假设脉宽为  $\Delta T$ ,利用反射光来分辨距离的分辨率为  $c\Delta T/2$ 。这是因为,当两物体的距离分别为  $R_1$ 、 $R_2$  且有关系  $R_1 > R_2$  存在时,最低能分辨的时间间隔为

$$2R_1/c - 2R_2/c = \Delta T$$

所以有

$$R_1 - R_2 = \frac{c\Delta T}{2}$$

## ● 应用

### (1) 测量月—地距离

美国的阿波罗号飞船和前苏联的路勒号飞船都在月球表面上放置了光反射器[由 100 个嵌在铝框里的角反射器(见附录 7)组成],在地球上用红宝石激光器发射脉冲光束,光束经反射器反射



后折回地球，测量出光束传输中所花的时间即可知道月球离地球有多远。月球测距的测距装置如图 2-2 所示。将脉冲间隔为  $4\text{ns}$  的脉冲光送往月球，反射光由望远镜来进行接收，用测时用的电子装置对时钟脉冲进行计数。测量结果如图 2-3 所示。横轴为脉冲发射时刻，纵轴为光的往复传输时间的计算值与红宝石激光器的实测值间的差。分两次发射，一次发射 50 个脉冲，分别约有 10 个脉冲被接收到。脉冲先后到达望远镜的时间间隔为  $4\text{ns}$  以内，将这换算成距离，相当于  $1.2\text{m}$ ，如果使用平均值，则相当于  $0.3\text{m}$  左右。

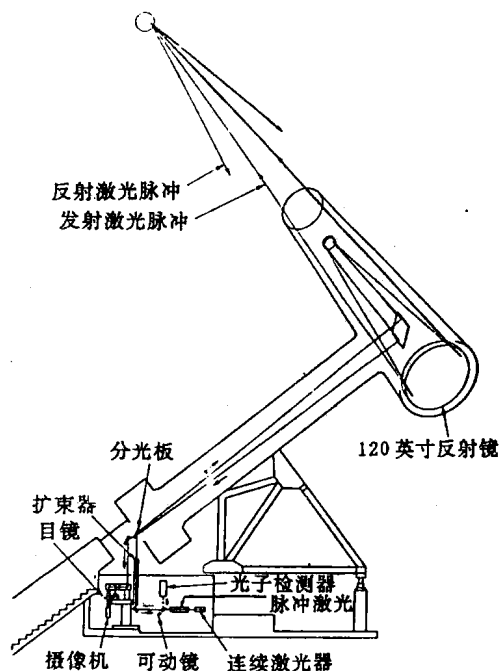


图 2-2 月球测距系统