

激光脉冲测距的原理及应用

清华大学激光教研组

激光测距是激光技术中发展得很快和富有成效的领域之一。自1960年第一台红宝石激光器制出后,1961年就有人制出了激光测距的实验装置。1965年左右就研制出各种实用的测距仪。到1970年激光测距仪在国外已成为标准化装置。目前,激光测距仪与激光雷达已成功地用于大地测量、人造卫星与月球测距,飞机、坦克、炮兵测距,制导、导航等许多方面。气象、污染监测等方面的应用,也正在研制之中。

我国于1966—1968年前后也制成了若干种类型的激光测距仪及激光雷达(图1即为一台国产中、近程测距仪外形)。特别是在无产阶级文化大革命以后,在



图1 中近程激光测距仪外形图

毛主席革命路线指引下,知识分子走出学校、研究室,与工人群众相结合,激光测距仪及激光雷达的研制工作获得更加迅速和广泛的发展。目前,有些已由试制走向投产阶段。激光测距与激光雷达正在我国国民经济和国防建设上发挥越来越大的作用。

一、测距概述

大家知道,盖房子要丈量地基;地质勘探要测绘地形;军队作战打炮,要预知距离。在许多工作中距离的量测都是很重要的。在激光出现以前,距离的量测主要是利用几何的三角交会及光电测距,在军事上还利用光学视测距及无线电雷达测距。

三角交会是古老也是最基本的方法。它是在离被测目标较远处选取两个点。此两点与目标构成一个三角形。先测出这两个点之间的距离,称为基线。然后,分别从这两点(用经纬仪等仪器)对目标进行瞄准。测量出瞄准线与基线的夹角。这样,知道两角一边,由简单的三角关系就可求出另两边——目标至所取两点的距离。这种方法测量结果须经较繁的数学计算,操作复杂、工作量大,所需人力多,作业时间长,易发生错误。显然在某些场合就不能满足要求。光学视测距是目测的改进,其测量精度是很低的。雷达测距是利用无线电波在空间传播的时间或位相变化等参量来进行距离测量,这种测量方法比前几种不仅具有快速、方便等优点,还可同时测知距离、方位和运动速度、显示目标的性质或图象。因此,它在军事上的应用占十分重要的地位。但无线电雷达体积结构复杂庞大,价格昂贵,且在军事对抗上(自从反雷达的导弹出现后)易被敌干扰和破坏。在激光出现以前,虽也制出过利用普通光作为光源的光电测距仪(其测量原理与雷达的相位测距类似),但由于普通光源的亮度太弱,且单色性很差,在白天日光的干扰下几乎完全不能工作,故限制了其发展与应用。

激光,是一种新颖的光源,它具有一系列的特点,使它成为测距的理想光源。首先,激光具有很高的亮度。例如,一台较高水平的红宝石激光器发射出的红光亮度约为太阳表面亮度的224亿倍。其次,激光的单色性和方向性很好。单色性指颜色很单纯。大家都知道,太阳光有红、橙、黄、绿、青、蓝、紫七色,可用波长来表示。波长范围越小,颜色越单纯。而激光的单色

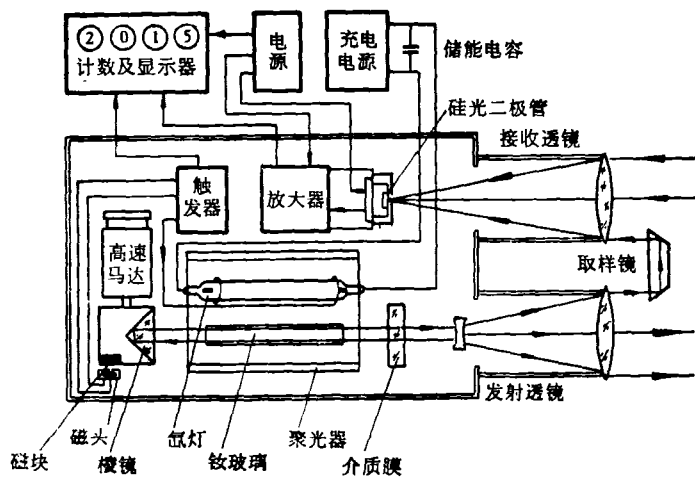


图2 测距仪原理结构图

性用波长范围表示可小于 0.0001μ 。激光的方向性表现为其光束的发散度很小,例如,可小于1分。此外,激光可以发出极短的脉冲光,脉冲的宽度可压缩到毫微秒(10^{-9} 秒)和微微秒(10^{-12} 秒)的数量级。所有这些特点,使激光雷达具有比无线电雷达测量精度高、分辨率(指分辨靠得很近的目标的本领)好、抗干扰能力强、结构较简单等优点。而激光测距则是激光雷达最简单、最常用的形式。激光测距与激光雷达不仅可以弥补无线电雷达之不足,而且在许多方面可以完全代替过去的测距方法。因此,可以说,激光的出现使测距领域揭开了新的一页。

激光测距的原理与无线电雷达测距的原理相似。一般有两种方法:脉冲法和相位法。

脉冲测距法,是利用经过Q调制压窄的巨脉冲激光器,发射出一个很短促的激光脉冲。测定这一脉冲自仪器到达目标的往返时间,从而测知距离。用这种方法,仪器结构较简单。只要眼睛能看到的物体,将仪器对准后,一按电钮,“立即”可知距离,测量方便迅速。故此法应用最广泛。

相位测距法,是采用连续激光器,将输出的连续激光用某种频率的信号调制,然后发射至目标,测定往返调制信号的相位差,来确定目标距离。这种方法能够测很小的距离并有很高的测距精度(可达厘米以下)。但这种方法要有两种以上的调制频率作为发射信号,且测量结果还须经过计算,不能直接读出。为了保证精度要在被测距离上放置立方角反射器作为合作目标。仪器结构及使用操作均较脉冲法复杂。因此,这种方法的测距系统只在需要高精度测量的场合应用(如绘制地图、导航等)。

二、脉冲测距原理

脉冲法激光测距仪的原理结构如图2。图中铷灯、钷玻璃(激光工作物质)、聚光器、介质膜和棱镜构成激光器。激光器与发射望远镜构成激光发射系统。硅光二极管、放大器、接收透镜构成激光接收系统。

储能电容供给铷灯一个电压,再由触发器给铷灯加一脉冲高压,使铷灯的两极间打一火花,铷灯便放电闪光。强光使激光物质——钷玻璃中的钷激发并产生受激辐射。受激辐射在介质膜与棱镜构成的共振腔中来回振荡,往返经过钷玻璃而不断被加强。最后,形成一束很强的激光束射出。由于高速马达带动棱镜旋转,就使得共振腔只是在极短的一瞬间建立,因而激光的往返振荡也只能在极短的一瞬间(约 10^{-9} 秒)内完成。故发射的激光就是被压窄到 10^{-9} 秒宽度之内的高功率单脉冲,又称巨脉冲。这种用高速马达带动旋转的棱镜,比静止的棱镜所构成的共振腔发出的激光脉冲,宽度要小1000倍以上。这种使输出激光脉冲压窄的方法,又称Q调制。实际上,未经Q调制的激光是分布在较长的一段时间内的多脉冲。故Q调制不仅在时间上压窄了,而且使脉冲个数减少为单一的。多脉冲是不能用来测距的。激光器发射出的单脉冲激光经发射望远镜进一步准直,使光束发散度减至更小,射向被测目标。其中很小很小的一部分,经取样镜被接收系统接收,称为主波脉冲。从目标反射回来的激光称为回波脉冲。主波与回波经接收光电元件(硅光二极管或光电倍增管等)转变为电讯号,经放大器放大送给计数显示系统。计数器记录下主、回波的时间间隔,显示器直接将距离显示出来(磁头和磁块是控制铷灯触发到棱镜转至共振腔建立位置时的时间延迟的)。

若主、回波之间的时间间隔为 t , 被测目标距离为 L , 则

$$L = \frac{1}{2} ct, \quad (1)$$

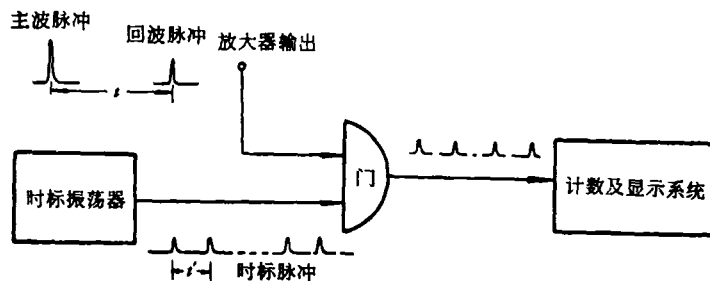


图3 距离计数器计时原理

其中 $c \approx 3 \times 10^{10}$ 厘米/秒

现在,问题是计数器如何记录时间 t , 又如何变为距离由显示器直接显示出来(见图3)。图中主、回波讯号由放大器输出给“门”电路。同时,时标振荡器又输送给“门”电路一系列小脉冲,称为时标脉冲。当主波讯号将“门”打开时,这些小脉冲才能进入计数及显示系统。而当回波脉冲到来之时,将“门”关闭,这些小脉冲就停止进入计数系统,从而计数器停止计数。计数器实际上是记录这些小脉冲的个数 n , 而这些小脉冲的时间间隔设为 t' , 则主、回波脉冲的时间间隔

$$t = n t' \quad (2)$$

这样,只要已知 t' , 则 t 即可测知。那么,又如何将其转变为距离而直接显示呢? 这只要在 t' 的选取上动些脑筋就行了。我们将式(2)代入式(1)得

$$\begin{aligned} L &= \frac{1}{2} c t \\ &= \frac{1}{2} c \cdot n t' \\ &= n \cdot \frac{1}{2} c t' \end{aligned}$$

若以 $l = \frac{1}{2} c t'$ 代入则得

$$L = n l \quad (3)$$

由(3)式可以看出,主、回波之间的时间间隔,等效于一个距离间隔 l 。只要我们这样来选取 l' , 使得

$$l = \frac{1}{2} c t' = 1 \text{ 米,}$$

那么,计数器记录的数 n 就直接表示以“米”为单位的距离了(实际上,还可以选取 $l = 5$ 米或 10 米等)。这样,在计数显示系统中就可以直接读出以“米”为单位的距离来了。

三、脉冲测距仪的主要技术指标

脉冲测距仪的主要技术指标为:激光波长,测距精度,测距范围,重复工作频率及体积、重量等项。我们着重介绍前四项。

1. 激光波长

激光波长主要由测距仪所用激光器件决定。目前,用于测距的激光物质及波长有:

固体:红宝石(掺铬的三氧化二铝),波长 0.6943μ 。

钕玻璃和掺钕钷钽石榴石,波长 1.06μ (使用倍频晶体还可以将 1.06μ 变频为波长 0.53μ 的绿光)。

气体:主要是大功率二氧化碳激光,波长 10.6μ 。

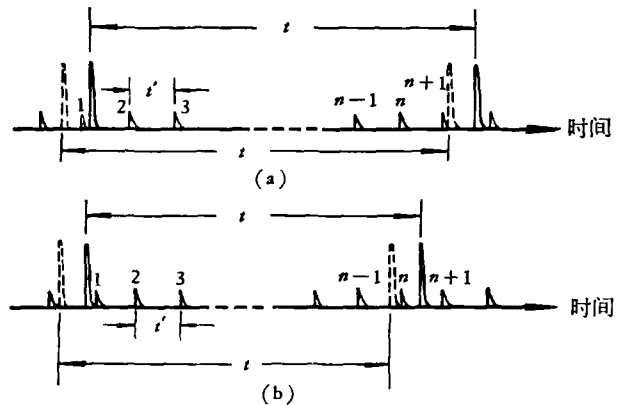


图4 计数误差分析图

半导体:砷化镓,波长 0.91μ (室温下)。

由于脉冲测距大都靠目标漫反射,所需激光脉冲功率较高,一般多采用 Q 调制的固体器件。早期多采用 Q 开关红宝石激光器,近年来较多采用钕玻璃及钷钽石榴石器件,特别是在高重复率时钷钽石榴石的应用更为普遍。大功率二氧化碳激光器具有效率高、重复率高的特点,是较有发展前途的器件,但由于其体积较大,故还不能取代固体器件。半导体激光器体积小,重复率高,但一般发射功率小,故只用于较近距离的测距。

不同用途的测距仪,要求使用不同的激光波长。大多数军用测距仪为了保密和隐蔽常用眼睛看不见的红外光,如 0.91μ 、 1.06μ 、 10.6μ 等。而气象与污染监测中往往采用 0.6943μ 的红光。水下测距采用在海水中传输损耗最小的 0.53μ 绿光。

由于对各种波长光的接收元件的光谱灵敏度不同,因此往往在用途不要求波长的情况下,则可根据接收元件的灵敏度来考虑。

2. 测距精度

测距精度主要取决于时标脉冲间隔 t' , 也就是距离 l 。因为计数器的记录精度往往可以是正负一个脉冲,见图4。假设图中的时标脉冲间隔 t' , 相当于 $l = 1$ 米。图4(a)表示目标距离稍大于“ n 米”的情况。(b)表示目标距离稍小于“ n 米”情况。(a)中计数器显示“ n ”或“ $n+1$ ”(虚线)米。(b)中计数器显示“ n ”或“ $n-1$ ”(虚线)米。故计数器的测距精度为 ± 1 米。若实际距离为 1495 米,则计数器显示 1495 米或 1494 米或 1496 米都是正确的。

由此可见, t' 取得越小,即 l 越小精度越高。但 t' 越小,时标脉冲振荡器的频率越高(因 $t' = \frac{1}{f}$, f

1) 此外,还取决于脉冲前沿、时标脉冲频率的稳定性及目标性质,但在一般测距精度下可不考虑,故此从略。

为计数器的频率),计数器的记录速度也要求越高。过高的频率和记录速度,在元件和制作上都有一定困难。测距精度一般为: ±10 米、±5 米、±1 米及 ±1 呎(约 0.3 米)。

3. 测距范围

测距范围指最小和最大可测距离。因脉冲测距仪发射的极高功率的脉冲在刚发射出去的一段路程上,随时都会被空气中的浮游微粒(如尘埃、水汽甚至较大的气体分子等)散射,而干扰计数显示部分的工作,使其记录乱数。为了消除这一干扰,在电子线路上加些抑制措施,使在较短距离上的一切散射干扰都不能进入计数显示系统。这样,在这一段距离内也就不能测到目标。这一段距离又称盲区,就是测距仪所能测到的最小距离。盲区的大小视测距仪使用要求而定。中、近程测距仪一般为几十到几百米。

最大可测距离除了与仪器本身有关而外,还与气候条件及目标性质有关。下面从测距方程来看一下各因素的影响。设接收系统收到的回波功率为 P_r , 测距方程为

$$P_r = P_e \cdot \frac{D^2 \cdot \rho \cdot A_t}{\pi \theta^2 R^4} e^{-2\alpha R}, \quad (4)$$

其中 P_e 为测距仪的发射功率; D 为测距仪接收透镜的口径; θ 为测距仪发射激光束的角发散度; ρ 为目标漫反射系数; A_t 为目标与光束相交的截面积; α 为大气对激光的衰减系数。其中前三项是仪器本身所决定的,后三项为目标及气候条件所决定的。由此可见要增大作用距离 R , 就不仅需要测距仪能发射很强功率、很小光束发散度的激光和有大的接收口径与接收灵敏度,还需要有良好的天气及反射性能较好的较大目标。测距仪的激光发射功率与角发散度主要由激光器决定。一般中、小型激光器发射功率为几到十几兆瓦。大型激光器可达几十或几百兆瓦。

测距仪的最大测程视使用要求而定。一般中、近程测距仪为几公里到几十公里。远程测距仪可达几百到几千公里。超远程测距仪可达 38 万多公里(主要是月球测距)。

4. 重复工作频率

测距仪的重复工作频率,是指测距仪每分钟或每秒钟能够正常测距的最高次数。限制重复频率的主要因素是激光材料的温度升高。由于固体激光器件的效率比较低,约千分之几到百分之几(输出能量与输入能量之比)。输入能量的绝大部分都转变为热消耗掉了,这些热能对激光发射是很不利的,严重时使激光器完全不能发射激光,甚至导致激光材料的破裂。故高重复率的激光器都要加冷却装置。不加冷却的红宝石激光器重复工作频率一般可达到 1—2 次/分; 钕玻璃激

光器一般可达 4—6 次/分; 掺钕钷石榴石激光器可达 8—10 次/分。加了冷却装置后,视冷却的效率而异。一般可达几十次/秒。钷石榴石器件可达 1000 次/秒。气体和半导体激光器的重复频率一般都较高,可达每秒几千次。

5. 体积重量

对中、近程测距仪来说,体积重量也是一个主要的指标。较小的体积重量便于携带。但此项指标往往与最大测程有关。故在此不详述。目前,中、近程测距仪的总重量一般为 20—30 公斤。

四、测距仪的应用及国外发展概况^[1]

激光测距仪的应用随着激光技术的发展仍在不断扩大,本文只能扼要介绍一下已知的应用。

1. 中、近程激光测距仪

可用于地形勘测,特别是测量难以到达的河流险滩的对岸、悬崖陡壁的峰顶等目标有很大的优越性。在军事上,无论是炮兵、坦克、飞机(空对空、空对地)的测距,还是为提高投弹准确度而用的激光制导系统(将测距仪的发射和接收部分分别安装在飞机和炸弹上,再加上控制所构成的系统),都越来越多地采用此种测距仪。这种测距仪研制得较早,发展得很快。近几年,在提高系统的可靠性、增大作用距离、提高重复频率、减小体积重量等方面,均取得较大进展。据报导,1968 年美国已大量投产此种测距仪; 1970 年有些已装备部队使用。苏、英、法、日、瑞典等国也已经或正在准备装备部队。

2. 远程测距仪

主要用于人造卫星的轨道测距或宇宙飞船对月球、对地球等测距。人造卫星环绕地球的运行轨道因

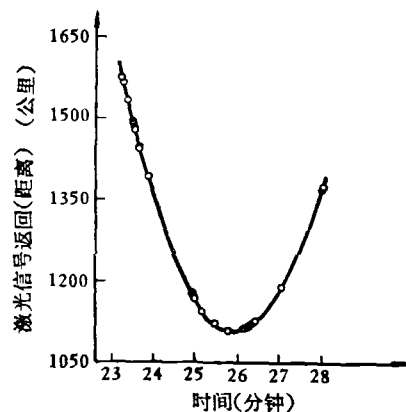


图 5 激光所测卫星轨迹

受地球重力场及高空大气阻力等因素影响而时刻在变化，卫星轨道变化的研究是天体力学、测地学、地球物理学等领域内的重要课题。不断地测量卫星对于观测站的距离变化，就可以得出卫星运行轨迹（见图5）。用激光测距仪测量卫星的距离比过去用无线电测距及光学照象等方法具有精度高、迅速且在卫星处于太阳阴影中或背景光很亮时均可测距等优点。故1964年以后，美、苏、法、日、捷等许多国家，相继实现了用激光对装有立方角反射器的人造卫星进行了测距。

3. 超远程激光测距仪

主要用于测月。从地球上的几个点，长期精确地测定月球上几个点的距离，对研究月球的运动与结构，地球、月球相互作用力，以及地球上的许多现象（如地球日长度的变化，潮汐的变化，大陆的漂移，海床的扩展，地极地理，地震等），均有着重要意义。而脉冲激光测距是目前能以高精度测量月球距离的唯一方法，也是激光测距最突出的应用。

早期的激光测距由于靠月球表面漫反射，测距精度较差。因为即使激光束的平行性很好，它在大气中

传输时受气流的散射也会变坏。假使穿过大气层后只有2—3秒的发散度，到了月球上，它的光束截面直径也将有3.5—5公里。在这样大的范围内地形高低起伏足以引起几百米的误差。为了提高精度，就需要在月球上装置角反射器（现在月球上已放置了四个角反射器）。有了角反射器，不仅可将测距精度提高到1米，甚至更高，而且可以使反射回波的强度增加达50倍以上。美、苏两国早在第一台红宝石激光器问世后不久就开始了用激光进行测月的研究。目前法、日等国也利用月球上的角反射器进行了月球测距。图6即为一个简单的激光测月系统图。

4. 激光雷达

高重复频率的激光测距仪即激光雷达。如前所述，激光雷达具有无线电雷达所没有的许多优点。因此激光雷达的应用也越来越广泛。除与无线电雷达一起使用以抗干扰外，还可以用于精密自动跟踪飞行物体（如飞机、导弹、卫星等）、宇宙空间制导飞船的会合与停靠，用来研究高空大气层的结构及对流层情况。近年来用于大气污染监视与测量的研究也很有进展。

但总的说来，激光雷达还处于试验阶段。

激光雷达除具有无线电雷达所没有的一些优点外，也还具有一些根本的缺点：如受气候影响很大（在雨、雾或浓云密布的天气，作用距离将大大减小）；搜索、捕捉目标的能力差（因光束很窄），因之还不能完全代替无线电雷达，只能作为一种补充。不过，尽管有着这些缺点，但激光测距与激光雷达的一系列优点仍使其具有极大的生命力和发展前途。随着激光技术的进一步发展，随着元器件及材料水平的不断提高，激光测距与激光雷达的性能也将会不断提高。在各方面的应用定将日益发展并占据重要地位。

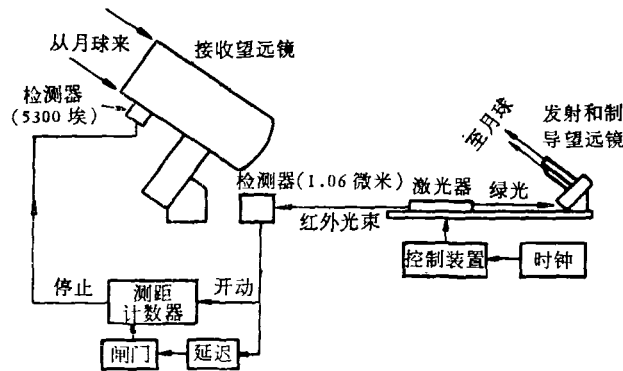


图6 月球测距系统