

相位式光波测距仪

黄瑞光 王建华 顾天龙 孙照炜 编著

地震出版社

相位式光波测距仪

黄瑞光 王建华 编著
顾天龙 孙照炜

地震出版社

1986

内 容 简 介

本书介绍一种激光测距仪——相位式光波测距仪的原理和技术。全书分十章,首先介绍光波测距仪的原理及必要的光学知识,然后按章介绍光调制、光学系统、光电转换、相位测量、基本电路以及机械系统等环节,最后介绍了仪器测程的计算和测量精度问题。

本书可供仪器研制、测量等方面的工程技术人员参考。

本书的绪论、第一章、第五章由黄瑞光执笔,第二章、第三章、第九章由王建华执笔,第四章、第八章由顾天龙执笔,第六章由孙照炜、黄瑞光执笔,第七章由孙照炜、王建华执笔,第十章由黄瑞光、王建华执笔。

相位式光波测距仪

黄瑞光 王建华 顾天龙 孙照炜 编著

责任编辑:裴 申

地 震 出 版 社 出 版

北京复兴路63号

广 益 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

850×1168 1/32 7.5 印张 194 千字

1986年10月第一版 1986年10月第一次印刷

印数 0001—1,500

统一书号:13180·280 定价:2.10元

序

测定两点之间的距离，无论在科研和生产工作都是必不可少的。这既是一个古老的但又仍然是年青的课题。

仪器仪表是扩大人类感觉和控制工作过程的工具。有了相应的仪器仪表就可以把工作做得更快更好。光波测距仪是当代测距工作中较好的手段之一。

人们首先是用尺子进行测距。用这种方法进行远距离高精度的测量是不可想象的。量出一条高精度的边（基线）作为一定几何形状中的一条边，然后通过测定各个角，平衡测值相互之间的矛盾，就可以间接地推算出其它边的长度。然而，通过相对来说是很小的度盘测定出的角来推算较基线长得多的边，它的精度显然是大大降低了的。

自然科学的进展使人们增长许多新的知识，技术的进展又提供了实施理想的可能。把调制光作为尺子就可以以光的速度进行测距工作，提高调制的稳定度以及使用多次测量的平均值，再通过对外界影响的消除，从理论上讲就可以得出高精度的长距离。现代技术已经达到了实施这种测距方法的可能，它不但能测得几十公里以内精度达到厘米以及毫米级的距离，而且也提供了在人们无法到达的特殊环境中进行测距的可能。这种技术的推广可以大大的加快我国的四化建设。

本书的几位作者从事光波测距仪的研制工作多年，他们在总结前一阶段工作的基础上，编写了这本书，以使更多的人对光波测距仪有所了解，并能关心这方面工作的开展，

我殷切希望广大读者对书中的缺点和错误提出意见，与作者相互切磋，使光波测距仪的研制工作取得更大的成绩。

郭 惠 申

目 录

绪论	(1)
第一章 光波测距仪的原理	(5)
§ 1.1 光波测距原理	(5)
§ 1.2 测相原理	(7)
§ 1.3 多值性问题	(14)
§ 1.4 常数和内光路预置	(25)
第二章 光源和光	(28)
§ 2.1 光的本性	(28)
§ 2.2 光是电磁横波	(29)
§ 2.3 光的反射、折射、衍射、干涉	(35)
§ 2.4 光的偏振	(47)
§ 2.5 激光辐射的基本原理	(51)
§ 2.6 光波测距仪中的激光器	(56)
第三章 光调制	(71)
§ 3.1 光调制的种类	(71)
§ 3.2 声光调制器	(74)
§ 3.3 电光调制器	(92)
第四章 光学系统	(116)
§ 4.1 光学系统的功能和分类	(116)
§ 4.2 望远镜	(118)
§ 4.3 反射器	(127)
§ 4.4 信号损耗与光学零件的增透	(130)
§ 4.5 光噪声的抑制	(132)

第五章 光电转换技术	(135)
§ 5.1 光电倍增管	(135)
§ 5.2 光电转换与光电混频	(139)
§ 5.3 半导体光电二极管	(143)
第六章 相位测量技术	(145)
§ 6.1 电延迟测相	(145)
§ 6.2 光延迟测相	(156)
§ 6.3 自动数字测相	(161)
第七章 基本电路	(170)
§ 7.1 主控振荡器	(170)
§ 7.2 混频器	(178)
§ 7.3 自动频率跟踪电路	(179)
§ 7.4 接收放大电路	(183)
§ 7.5 高压直流变换电路	(189)
第八章 机械结构	(191)
§ 8.1 光波测距仪的机械结构	(192)
§ 8.2 光波测距仪的轴系	(194)
§ 8.3 光波测距仪的安放机构	(201)
§ 8.4 调焦系统的机械结构	(205)
第九章 测程的计算	(207)
§ 9.1 光波传输距离方程	(207)
§ 9.2 测程与噪声的关系	(212)
§ 9.3 湍流大气中激光闪烁对测程的影响	(215)
第十章 误差及修正方法	(217)
§ 10.1 光波测距仪的仪器误差	(218)
§ 10.2 大气折射率误差	(224)
附录 部分国产光波测距仪的性能	(229)
主要参考文献	(233)

绪 论

距离测量是人类生产活动中最基本的内容之一。从人类还以较原始的方式进行生产的时候起，直到科学技术高度发达的今天，距离测量一直是人类生产活动不可缺少的一个组成部分，只不过随着时间的推移，测量的手段在逐渐提高，测量的内容在不断丰富罢了！

以前，人们只能用比较直观的方法，用杆尺、带尺、线尺、链尺丈量待测的距离。随着制尺技术的提高及测量程序的合理化，这种方法虽然也能取得较高的精度，但是，费人力，费时间，在长跨距和地形复杂的地方，使用尺丈量就非常困难。

1610年发明了望远镜，使人们观测遥远的目标成为可能。在大地测量学科的推动下，1915年诞生了三角测量方法。三角测量方法简单的说来是用精密线尺经反复丈量得到一条基线边，以此基线为一边建立一个三角形，用经纬仪测得三角形的三个内角，因为基线边为已知，用三角学的基本关系式，可算出其它边的长度。经过几次三角形的测量，就可以把待测的边扩大到较长的测程上去。

用经纬仪进行三角测量，一次被测的距离可达10公里以上，作业效率大为提高，并能在线尺无法进行作业的地区实现距离的测量。但这毕竟是通过测角进行的，中间必须经过十分繁复的计算。由于三角形扩大过程中所形成的积累误差，使所得的扩大边的精度往往满足不了近代科学的要求。本世纪上半叶，人们在较精确地测定光速的基础上，探索用光作为传播物质直接进行距离的测定。1941年，瑞典大地测量学者贝尔格斯川(Bergstrand)在诺贝尔物理研究所工作，对光的传播进行了深入的研

究，于1948年与瑞典的AGA厂合作，制成一台具有实用价值的相位式光波测距仪，使长测程高精度的直接距离测量成为现实，并为六十年代以后的精密激光测距技术的蓬勃发展开创了一条宽广的道路。

所谓高精度的距离测量，一般是指相对精度不低于 1×10^{-5} 量级的距离测量。在科学研究、生产建设、军事工程等许多方面都需要有很高精度的距离。

在地面上建立高精度坐标控制网是航空摄影、地图绘制、大型工程建设以及远程火炮射击参数确定的基础，控制网的精度很大程度上取决于距离的测量精度。

对导弹、航天飞行物靶场及跟踪台网进行远距离联测是发射监控和轨道测定的必要条件。地面超级基线与人造卫星大地测量相配合，可以更精确地测定地球形状，从而解决一系列地球和空间科学中的问题。

多年的地震研究工作表明，地震的发生经常以地形变作为一种前兆现象。精密测距是目前国内外地震科学工作者所普遍采用的手段之一。

当代，凡高精度的测距，几乎都用相位式激光测距仪进行。相位式激光测距仪是光波测距仪的一种型式，它与通常光波测距仪的基本区别主要在于光源的不同。六十年代激光技术的兴起和电子技术的高速发展，有力地推动了光波测距仪的研制工作。由于激光所具有方向性好，能量集中，颜色单纯等优点，使测距仪容易做到测程长、精度高并实现全天候作业，加之电子电路使用晶体管和集成电路，使仪器结构小巧，携带方便，从而使五十年代曾被测量界视之为珍品的普通光源光波测距仪相形见绌。

十多年来，一些工业比较发达的国家都在进行激光测距仪的研制。在瑞典、瑞士、西德、东德、美国、苏联、英国、日本等十多个国家研制的数十种产品中，虽然各有特色，但总的说来，瑞典AGA厂的产品和瑞士WILD厂的产品分别在远程测距和

短程测距仪中占据着引人注目的位置。

AGA 厂在 1948 年完成了光速测距仪样机以后，于五十年代及六十年代的前期先后完成了 Geodimeter 1、2、2 A、3、4、4 B、4 D、6、6 A 等型号的普通光源测距仪，形成了 AGA 光波测距仪系列。六十年代后期，AGA 厂又致力于激光测距仪的研制工作，于 1969 年制成 AGA-8 型产品，并很快垄断了国际市场。AGA-600 是在 AGA-8 型以后，AGA 厂的又一长测程的激光测距仪，由于它在光路系统等方面有了改进，光电转换元件等的质量有了提高，仪器在性能上较 AGA-8 型又前进了一步。

半导体激光器的出现，吸引了不少厂家和研究部门从事短程轻便激光测距仪的研究。由于这类仪器结构轻巧，造价低廉，一机多能，使用方便，很受工程测量部门的欢迎。目前，十多个国家研究的数十种产品中，以半导体砷化镓红外射束为光源，测程 1—3 公里。精度 ± 1 厘米的短程测距仪在数量和品种上都占了绝大多数。它们多将发射镜筒和接收镜筒安装在经纬仪上，可同时实现测距和测角。仪器一般带有专用电子计算器和自动显示装置，不但可以由测得的仰角立即把斜距换算成水平距，同时可以由测得的气象元素(温度、气压、湿度)对所测的距离进行气象改正。

我国于 1973 年完成了第一台精密激光测距仪——JCY-2 型激光测距仪的研制工作。这种测距仪使用氦氖激光光源，超声调制器调制，白天测程为 20 公里，精度 $\pm (10 \text{ 毫米} + 10^{-6} D)$ ，主机重量 16.5 千克。

1980 年，我国又研制成功测量过程全自动化数字显示 JCY-3 型激光测距仪，该仪器采用 KDP* 电光晶体调制，白天测程为 50 公里，精度 $\pm (5 \text{ 毫米} + 10^{-6} D)$ ，主机重量为 20 千克。

精度和测程是现代光波测距仪的两项最重要指标，在不同的使用场合，对这两项指标要求也不一样。

光波测距仪器的测程虽然受很多因素影响，但就其主要的而

言，不外乎是激光器的功率、光的调制深度、反光镜的有效面积、接收镜筒的口径、光电转换效率等。归纳起来就是取决于几种关键元件的性能以及仪器的体积和重量。也就是说，在一定的元件质量水平的基础上，测程的增加将伴随着仪器体积、重量的增加；反过来说，在进行了合理的设计以后，只要保证元件、器件的质量，测程一般也就保证了。因此，从事精密测距研究的科学工作者，往往集中更多的注意力研究如何获得更高的测量精度。

大气对光折射的影响无法准确地修正，是当前限制测距精度进一步提高的关键。通常的测距作业，大气的温度、气压和湿度是靠测量测站和镜站两点的数值取平均计算的。在一般情况下，从测站到镜站气象变化梯度是非线性的，这样测得的气象数据就不完全具有代表性。这种气象改正与实际情况存在的差异就构成了与距离成正比的误差。

激光的单色性，给更准确修正大气折射的影响提供了新的途径。利用不同波长光的折射率也不同的原理，制作多色光波测距仪，可以准确修正大气折射的影响。可以预见，由于采用多光束测量技术，在不远的将来，精密测距的相对精度可以突破 10^{-7} 量级。

第一章 光波测距仪的原理

§ 1.1 光波测距原理

光以速度 c 在空中传播, 在 A 、 B 两点间往返一次所需时间与距离的关系可表示为:

$$D = \frac{1}{2}ct, \quad (1.1)$$

式中 D ——待测两点 A 、 B 间的直线距离,

c ——光在大气中传播的速度,

t ——光往返 AB 一次所需时间。

由上式可知, 距离测量实质是光运动时间的测量。根据测量时间方法的不同, 光波测距仪通常可分为脉冲式和相位式两种。

脉冲式: 如图 1.1, 激光器发射的光脉冲通过发射望远镜投

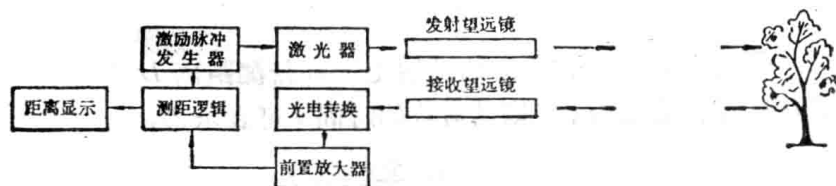


图 1.1 脉冲式光波测距原理图

射到待测目标 (如一棵树) 上, 通过目标的漫反射由接收望远镜接收, 再由光电转换元件转变为电信号并经过放大器放大后, 用数字电路或图象法直接测定光往返一次所需时间, 并以距离显示出来。

脉冲式光波测距仪主要特点是光能以脉冲形式集中发射，通过待测目标的漫反射进行距离测量，不需要专门设置合作目标，使用非常方便。特别在军事上对敌占区的某一军事目标进行距离测量，这一优点表现得更为突出。但是，由于反射物体表面的高低不平及时间测量技术的限制，这种测距装置，精度较低，一般误差为 2—5 米。

相位式：和脉冲式的测距机制不同，相位式光波测距仪用无线电波段的频率，对光束进行幅度调制，测定调制光往返测线一次所产生的相位延迟，再根据调制光的波长，换算此相位延迟所代表的距离。即相当于用间接的方法测定光往返测线所需时间，如图 1.2。为了有效地反射信号，并使测定的目标限制在与仪器精度相称的某一特定点上。这种测距仪都设置了反射镜，通常称为合作目标。

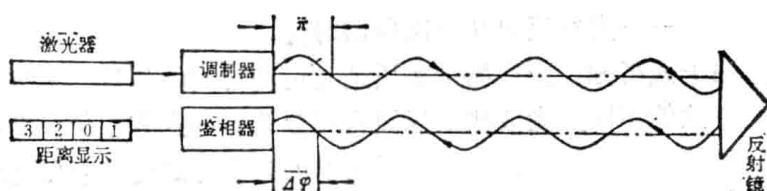


图 1.2 相位式光波测距原理图

假若调制角频率为 ω 的调制光，在待测距离 D 上往返一次产生的相位延迟为 φ ，则其对应的时间 t 可表示为：

$$t = \frac{\varphi}{\omega}$$

将此关系式代入 (1.1) 式，待测的距离 D 可表示为：

$$\begin{aligned} D &= \frac{1}{2}ct = \frac{1}{2}c \frac{\varphi}{\omega} = \frac{c}{4\pi f}(N\pi + \Delta\varphi) \\ &= \frac{c}{4f}(N + \Delta N) = U(N + \Delta N), \end{aligned} \quad (1.2)$$

式中 φ ——信号往返测线一次产生的总的相位延迟，

ω ——调制信号的角频率，在数值上 $\omega = 2\pi f$ ，

U ——单位长度，数值上等于四分之一调制波长，

N ——测线所包含调制波半波长个数，

$\Delta\varphi$ ——信号往返测线一次产生相位延迟不足 π 的部分，

ΔN ——测线所包含调制波不足半波长的小数部分，数值上

$$\Delta N = \frac{\Delta\varphi}{\pi}.$$

在给定调制频率和标准大气¹⁾条件下， $\frac{c}{4\pi f}$ 为一常数。距离的测量变成了测线所包含半波长个数的测量和小于半波长的小数部分 ΔN 或 $\Delta\varphi$ 的测量。近代的精密机械加工技术和无线电测相技术的发展，使 $\Delta\varphi$ 的测量达很高的精度。

§ 1.2 测相原理

对于不足 π 的相角 $\Delta\varphi$ ，可通过不同的方法进行测量，这里着重介绍的是比较普通采用的延迟测相及数字测相两种方法。

一、延迟测相

延迟测相原理如图 1.3 所示。光源发出的光束，被由主控振荡器馈电的调制器所调制，成为调制频率为 f 的调制光，该光束由发射系统投射到测线的另一端，经反射镜反射回来，由接收系统所接收，经光电倍增管转变为电信号。此信号称测量信号，记作 e_1 。

另一路信号由主控振荡器直接引出称参考信号，记作 e_2 。参考信号 e_2 经过移相器和外来信号 e_1 一起被送进鉴相器。

鉴相器是一种特殊的相位检波器（原理详见第六章），它与幅值检波器的根本区别是：输出不仅与输入的两个信号的幅值有

1) 当气温 $t=0^\circ\text{C}$ ，大气压 $P=760$ 毫米汞柱，湿度 $e=0\%$ ，含有 0.03% 二氧化碳的大气称标准大气。

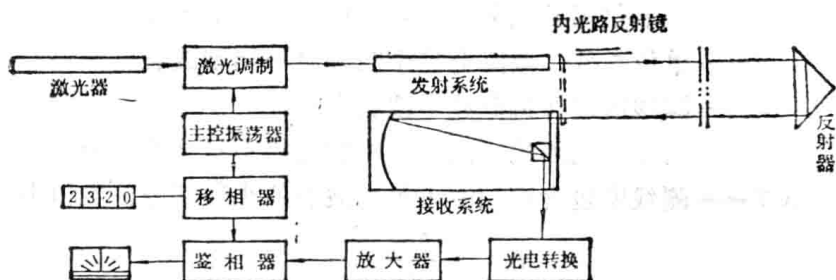


图 1.3 延迟测相原理图

关，而且是它们之间相位差的周期函数，一般可表示为：

$$I = f(U_1, U_2, \varphi).$$

对于典型的桥式二极管鉴相电路，则可写成：

$$I = 4 a_2 U_1 U_2 \cos \varphi,$$

式中 I ——鉴相器的输出电流，

U_1 ——测量信号 e_1 的电压幅值，

U_2 ——参数信号 e_2 的电压幅值，

φ ——信号 e_1, e_2 间的相角差，

a_2 ——台劳公式的二次项常数。

因为鉴相器的输出电流 I 同时是 U_1, U_2, φ 的函数，测量信号和参考信号幅值的大小直接影响着鉴相器的输出，因而无法直接依据鉴相器的输出大小判断 U_1, U_2 间的相位差 φ 。为此，在参考信号的通道上接入一移相器，借助于移相器对参考信号产生的相位延迟 φ' ，在鉴相器的输出为峰值或过零处进行相位测量。

1. 峰值延迟测相

据 (1.3) 式，当设置在参考信号通过的移相器产生相移 φ' ，则测距信号和参考信号之间也增加了相位差 φ' ，此时，

$$I = 4 a_2 U_1 U_2 \cos(\varphi - \varphi').$$

若人为地控制移相器，当产生的相移 φ' 满足 $\cos(\varphi - \varphi') = 1$ ，使鉴相器的输出 $I = 4 a_2 U_1 U_2 \cos(\varphi - \varphi')$ 为最大值时（可从接在鉴相器输出端的微安表读得），则有

$$\varphi = \varphi'.$$

即是说测量信号与参考信号之间的相位差等于移相器产生的相位延迟 φ' ，该数值可从移相器的机械转角的读数读得。

2. 过零延迟测相

控制移相器产生的相位延迟满足 $\cos(\varphi - \varphi') = 0$ ，此时鉴相器输出 $I = 4 a_2 U_1 U_2 \cos(\varphi - \varphi') = 0$ ，接在鉴相器输出端微安表指 0，则有

$$\varphi = \frac{\pi}{2} + \varphi'. \quad (1.4)$$

φ' 可以从移相器的机械转角中读得，因而 φ 也可以求出来。

虽然上述的两种测相方式都可以求得相位差 φ ，但取 $\cos(\varphi - \varphi')$ 的导数可以求得 $(\varphi - \varphi') = 0$ 处是曲线的极点，斜率为零。在 $(\varphi - \varphi') = \frac{\pi}{2}$ 处是曲线的拐点，斜率最大。为提高测相精度，通常采用过零延迟测相。

测出来的 φ 除了包含信号在整个测程上所产生的相位延迟外，还包含光在仪器内的光通道上以及光信号转变为电信号后在线路网络中所产生的相移 φ_0 。在无特殊装置的情况下，电路参数是无法长期稳定的，因而， φ_0 也不可能长期保持不变。为了排除这种不稳定因素可能造成的测距误差，在发射系统的前端，加设一屋脊反光棱镜（称内光路反射棱镜），光信号刚离开发射筒即被它反射进入接收镜筒（图1.3）。这样，和内光路所产生的相位延迟 φ_0 相对应的鉴相器输出应该是：

$$I_0 = 4 a_2 U_1 U_2 \cos \varphi_0.$$

采用过零延迟测相，令 $I_0 = 0$ ，此时移相器转过的角度 φ'_0 应满足 $\cos(\varphi_0 - \varphi'_0) = 0$ ，即

$$\varphi_0 = \frac{\pi}{2} + \varphi'_0, \quad (1.5)$$

式中 φ_0 ——内光路情况下测距信号和参考信号间的相位差，

φ'_0 ——内光路情况下,移相器的相移值。

(1.4)式减去(1.5)式得

$$\varphi - \varphi_0 = \left(\frac{\pi}{2} + \varphi'\right) - \left(\frac{\pi}{2} + \varphi'_0\right) = \varphi' - \varphi'_0.$$

因为信号在整个通道上产生的相移 φ 等于内光路产生的相移 φ_0 与信号从零等效面到待测目标往返一次所产生的相移 φ_1 之和,即

$$\varphi = \varphi_0 + \varphi_1,$$

所以

$$\varphi_1 = \varphi - \varphi_0 = \varphi' - \varphi'_0. \quad (1.6)$$

光信号从零等效面至待测目标往返一次所产生的相位延迟,等于外光路测量时鉴相器的输出为零时移相器的读数与内光路测量时鉴相器的输出为零时移相器的读数之差。

应该说明,在移相器旋转一周中,鉴相器有两次输出为零,即当 $\varphi + \varphi' = \frac{1}{2}\pi$ 及 $\frac{3}{2}\pi$ 时,如图1.4所示。而实际测量中移相器

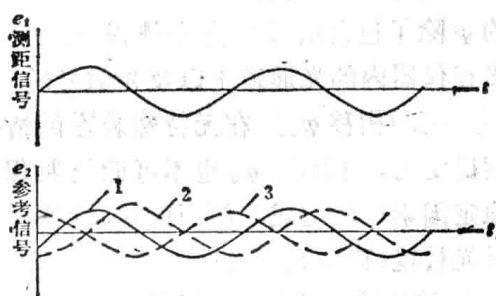


图 1.4 测距信号与参考信号关系

1. 参考信号未经移相器, 2. 经移相 $\varphi - \varphi' = \frac{\pi}{2}$ 时的参考信号,
3. 经移相 $\varphi - \varphi' = \frac{3}{2}\pi$ 时的参考信号

只显示小于 π 的角度值。(1.6)式也可写成以下形式:

$$\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi' - \Delta\varphi'_0,$$

式中 $\Delta\varphi_1$ ——光信号从零等效面至待测目标往返一次产生的相

位延迟不足 π 的部分;

$\Delta\varphi'_0$ ——内光路测量时移相器的相移读数;

$\Delta\varphi'$ ——外光路测量时移相器的相移读数。

二、数字测相

用数字电路进行相位测量,是精密测距技术进入新的阶段的一个标志。自动数字测相具有速度快、精度高、成果便于自动处理、直接进行距离显示等优点,因而,目前在各种短程测距仪中已普遍采用,而中程测距仪也正朝这个方向发展。

图 1.5 是自动数字测相的原理图。测量信号 U_1 和参考信号 U_2

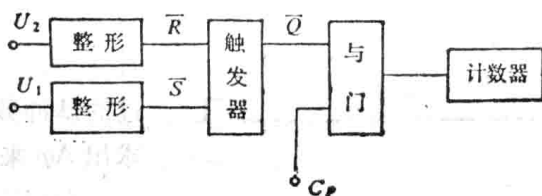


图 1.5 数字测相原理图

经整形成方波后送给双稳态触发器的 $\bar{S}$ 端和 $\bar{R}$ 端。参考信号由 $\bar{R}$ 端输入, U_2 的负跳变使触发器 $\bar{Q}$ 置“1”并打开与门 Y_1 ; 测量信号 U_1 由 $\bar{S}$ 端输入, 其负跳变使触发器 $\bar{Q}$ 置“0”, 因而把测量与门 Y_1 关闭。在触发器 $\bar{Q}$ 置“1”期间, 填充脉冲 c_p 从 Y_1 通过, 直至测量信号负跳变的前沿到达, 使触发器关闭为止, 计数器记录这一时间的脉冲数目, 如图 1.6。如果填充脉冲的重复频率为 f_0 , 参考信号 U_2 与测量信号 U_1 到达触发器的时间差为 Δt , 则在时间 Δt 内计数器计得的脉冲数 N 为:

$$N = f_0 \cdot \Delta t,$$

因为 $\Delta t = \frac{\Delta\varphi}{\omega}$, 所以待测的相位为:

$$\Delta\varphi = \frac{N\omega}{f_0} = 2\pi N \frac{f}{f_0}, \quad (1.7)$$