

DIANZI CELIANGYIQI YUANLI JI YINGYONGJISHU

电子测量仪器原理 及应用技术

须鼎兴 倪 涵 虞润身 编著



同济大学出版社

电子测量仪器 原理及应用技术

须鼎兴 倪 涵 虞润身 编著

同济大学出版社

内容提要

本书共分八章及附录,第一、二章介绍光电测距及电子测角的基本原理,第三章介绍电子全站仪,第四章介绍电子数字化水准仪基本原理及其使用,第五章介绍电子测量仪器的数据存储、通讯与格式转换,第六章介绍电子全站仪的检定方法,第七章介绍电子全站仪在工程中的应用,第八章介绍数字化测图,附录介绍了坐标法线路中桩测设程序等。

本书可供工程测量、桥梁工程、道路与城市交通工程、地下工程等专业作为“电子测量仪器原理及应用技术”课程的教材,也可供工程勘测、施工、监理技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电子测量仪器原理及应用技术/须鼎兴等编著. —上海:
同济大学出版社, 2002. 11

ISBN 7-5608-2490-0

I. 电… II. 须… III. 电子测量设备—高等学校
—教材 IV. TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 059417 号

电子测量仪器原理及应用技术

须鼎兴 倪 涵 虞润身 编著

责任编辑 陈全明 责任校对 郁 峰 封面设计 潘向葵

出 版
发 行

同济大学出版社

(上海四平路 1239 号 邮编 200092 电话 021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 同济大学印刷厂印刷

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 12.5

字 数 320000

印 数 1—3000

版 次 2002 年 11 月第一版 2002 年 11 月第一次印刷

书 号 ISBN 7-5608-2490-0/TN·3

定 价 19.50 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换

前 言

本书的前身是同济大学测量与国土信息工程系为测量工程专业所编写的试用教材——《电子测量仪器应用技术》，根据几年来教学实践及形势发展的需要，在原教材的基础上将内容作了增删，重新编写而成。

从 20 世纪 50 年代开始，电磁波测距技术迅速发展，特别是近十年中，电子全站仪、电子水准仪已广泛普及与使用，这种全新的电子测量仪器已与袖珍计算机、微机系统相配合，改变了传统的由机械、光学测量仪器野外测量、手工记录、计算、平板测图的方式，而采用电子测量仪器数据存储、数据通讯和计算机数据处理、数字化成图的全新方式，实现了从外业到内业一整套自动化的作业流程，成为今后的发展方向。本书对电磁波测距、电子测角原理、电子全站仪、电子水准仪的结构、特点和应用开发等方面均作了较详细的介绍。

在本书的编写过程中，力求内容新颖、内涵精炼；注意内容的系统性，深入浅出，通俗易懂；结合实际，适应科技发展方向，符合国家规范标准。

本书编写分工如下：虞润身编写第一章、附录三，倪涵编写第二、五章，须鼎兴编写第三、四、六、七、八章及附录一、二。全书由须鼎兴主编。

在本书中存在的问题与不足之处，恳请使用教材的师生及读者批评指正。

编 者

2002 年 10 月

目 录

第一章 光电测距技术	(1)
§ 1-1 大气对光波的衰减作用	(1)
§ 1-2 大气折射率的影响	(4)
§ 1-3 大气湍流和背景辐射的影响	(9)
§ 1-4 关于光波测距最佳时刻的选择	(11)
§ 1-5 双色激光及三波长测距	(13)
第二章 电子测角技术	(21)
§ 2-1 概述	(21)
§ 2-2 编码度盘测角的基本原理与方法	(21)
§ 2-3 光栅度盘测角的基本原理与方法	(26)
§ 2-4 角度的电子测微技术	(28)
§ 2-5 编码度盘与光栅度盘测角实例	(33)
§ 2-6 动态测角原理	(36)
§ 2-7 电子经纬仪自动补偿系统	(38)
§ 2-8 电子经纬仪的自动化	(40)
第三章 电子全站仪及使用	(43)
§ 3-1 概述	(43)
§ 3-2 电子全站仪的基本组成与精度等级	(43)
§ 3-4 SET2100 电子全站仪	(47)
第四章 电子数字化水准仪	(62)
§ 4-1 概述	(62)
§ 4-2 电子水准仪的基本原理及使用	(63)
§ 4-3 Topcon DL-101/102 电子水准仪	(70)
§ 4-4 SDL30 数字水准仪	(77)
第五章 电子测量仪器的数据存贮、通讯与格式转换	(89)
§ 5-1 概述	(89)
§ 5-2 数据存贮原理	(90)
§ 5-3 实时数据通讯与格式转换	(93)
§ 5-4 仪器内存数据的通讯	(103)

第六章 电子全站仪的检定	(112)
§ 6-1 全站仪光电测距部分的检定	(112)
§ 6-2 全站仪电子测角系统的检定	(128)
§ 6-3 全站仪数据采集系统的检定	(136)
第七章 全站仪及电子经纬仪在测量中的应用	(138)
§ 7-1 工业测量系统及其应用	(138)
§ 7-2 全站仪在公路定线中的应用	(144)
§ 7-3 全站仪的间接水准测量	(149)
§ 7-4 全站仪在纵、横断面测量中的应用	(151)
§ 7-5 面积测量与计算	(155)
第八章 数字测图	(161)
§ 8-1 数字测图概述	(161)
§ 8-2 电子全站仪野外数据的采集、通讯及数据格式	(163)
§ 8-3 数字化测图信息符号及编程方法	(167)
§ 8-4 数字化图的生成	(172)
附录	(177)
附录一 坐标法线路中桩测设程序(BASIC 语言 PC-E500 计算机)	(177)
附录二 AutoCAD LISP 常用函数一览表	(184)
附录三 测量不确定度评定的基本概念.....	(187)
参考文献	(194)

第一章 光电测距技术

光电测距的稳定性及其精度不仅取决于仪器的结构设计、元器件和工艺的完善程度,而且在很大程度上还与光波的大气传输情况和环境条件有关。因此,光电测距比经纬仪测角和水准仪测高要更加重视大气及环境条件的影响。这些影响可概括为大气对光的衰减作用、大气对光波的折射影响以及大气湍流和背景辐射对光电测距的随机误差影响。掌握它们的影响规律,采取必要的措施将有利于保证成果的精度及其稳定性,这就是本章所要讨论的内容。

§ 1-1 大气对光波的衰减作用

大气对光波的衰减有两个方面:大气吸收和大气散射。

一、大气吸收

大气中的一些气体分子,如二氧化碳 CO_2 、水蒸气 H_2O 和臭氧 O_3 等均具有永久电偶极矩,它们由于其分子结构的特点可与入射的光波相耦合而吸收光能。其吸收性能随光的波长不同而差异很大。水蒸气的吸收中心波长(单位: μm)是 0.94, 1.12, 1.40 以及 1.9, 2.3, 6.3。二氧化碳对波长较长的光有吸收作用,其吸收中心波长为: 2.7, 4.3 和 1.5。中短程光电测距仪的光波是在离地面数十米至数百米的低层大气中传播的,在这个近地面大气层中,主要是水蒸气和二氧化碳对光能的吸收。而对近红外光波段,则主要是水蒸气的吸收。大气吸收的程度以吸收系数 α_a 表示。显然,由于大气吸收作用而使某些波长的光波在传播中蒙受较大的损失,因此,在选择测距仪的载波波长(光源)时,应使其避开大气吸收中心。从这一点来看,常见的红外测距仪中,光波长为 $0.875 \sim 0.885 \mu\text{m}$ 的仪器(如型号为 DI3S, DI4L)就比用 $0.91 \mu\text{m}$ 的仪器(如型号 Eldi-2)为有利。

二、大气散射

在实际大气中,除气体分子外,还存在着大量的烟雾、水气、微生物和灰尘等悬浮微粒,其半径从 0.01 微米至几十微米,数量为每 m^3 约 100~10 万个不等。大气分子和悬浮微粒会使光辐射产生散射作用而受到衰减。按微粒周长与光波长 λ 对比的关系,有两种形式的散射:

(1) 当 $2a < \lambda$ 时,为瑞利散射,主要发生于空气分子和极小粒子的散射作用中。式中, a 为散射粒子的半径。瑞利散射系数 α_R 为

$$\alpha_R = 0.827 N A_p^3 \lambda^{-4} \quad (1-1)$$

式中 N ——单位体积的微粒密度；

A_p ——微粒截面积(μm^2)；

λ ——光波波长(μm)。

可见,瑞利散射系数与 λ^{-4} 成正比,故其主要对短波长的光辐射产生散射影响。

(2) 当 $2a \gg \lambda$ 时,为迈散射,这是由较大悬浮粒子产生的散射,迈散射系数 α_M 的经验公式为:

$$\alpha_M = \frac{3.91}{R_V} \times \left(\frac{\lambda}{0.55} \right)^{-0.585 R_V^{\frac{1}{3}}} \quad (1-2)$$

式中, R_V 为大气能见度,以 km 为单位。

表 1-1 列出了几种光波长在能见度 $R_V = 10\text{km}$, 光程为 $D = 2\text{km}$ 时的迈散射系数及迈散射透过率。可见从 He-Ne 激光($\lambda = 0.6328\mu\text{m}$)到一般红外测距仪所用的近红外光($\lambda = 0.72 \sim 0.94\mu\text{m}$),由迈散射引起衰减要比大气吸收严重,直到远红外区,大气吸收才明显起来。

表 1-1 几种光的迈散射系数及迈散射透过率

光波波长 $\lambda/\mu\text{m}$	迈散射系数 $\alpha_M/(\text{km})^{-1}$	迈散射透过率 $T_M/\%$
0.5	0.44	41
1.0	0.19	68
2.0	0.08	84
5.0	0.03	94

三、大气衰减公式与透过率

受大气吸收和散射的影响,测距仪的光波在传播距离 D 上所受到的总衰减,可按布盖定律计算:

$$I_D = I_0 e^{-(\alpha_e + \alpha_M)D} = I_0 e^{-\alpha D} \quad (1-3)$$

式中 I_D ——传播到距离 D 处的光强；

I_0 ——发射光强；

α ——大气衰减系数, α 为大气吸收及迈散射系数之和,即 $\alpha = \alpha_e + \alpha_M$ 。

可见,大气对光的衰减是一种非线性的指数关系。

为表示其相对衰减程度,可取比值 I_D/I_0 并用 T 表示,称为大气透过率,即

$$T = \frac{I_D}{I_0} = e^{-\alpha D} \quad (1-4)$$

图 1-1 为表示大气透过率与光的波长之间关系的大气传输特性曲线,它表示了大气吸收与大气散射同时发生时不同波长的透过率。从图 1-1 可见,处于大气吸收中心的那些光波段,其透过率就相对低下,而介于两吸收中心之间的区域如 $0.6 \sim 0.7\mu\text{m}$ 和 $1.0 \sim 1.1\mu\text{m}$, 则透过率较大,称为“大气窗口”。He-Ne 激光测距仪的光波长度正处在大气窗口上,故所

受的衰减较小,而有利于远程的测距。

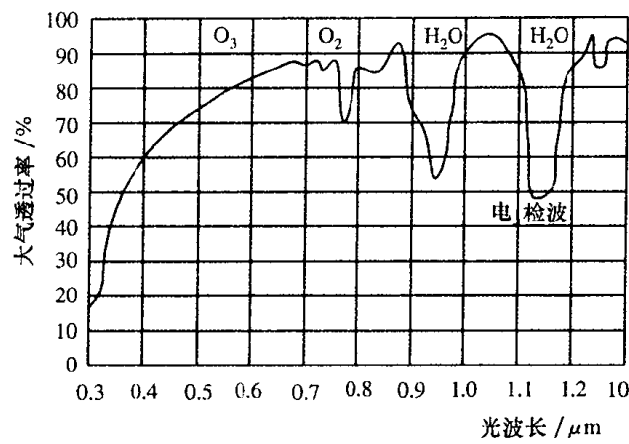


图 1-1 大气传输特性曲线

在气象学中,用“大气能见度” R_V 来表示大气清晰或透射的程度。所谓大气能见度系指白昼透过率 $T=I_D/I_0=2\%$ 时的大气能见距离 R_V 。在式(1-4)中,当取 $T=2\%$ 时,距离 D 即为 R_V ,从而有

$$R_V=\frac{1}{\alpha}\ln\left(\frac{1}{2\%}\right)=\frac{3.91}{\alpha}$$

说明大气能见度仅与大气衰减系数有关,即取决于大气吸收与大气散射的程度,当大气中水雾重、尘粒多即大气浑浊时,能见度必定差。因此光电测距仪的测程是依大气能见度为转移的。表 1-2 列出了七种大气情况所相应的大气能见度数,以及对 $\lambda=0.9\mu\text{m}$ 的近红外光的衰减系数及其在 2km 距离上的透过率,表中取标准清晰($R_V=23.55\text{km}$) 大气状态的透射率为基准列出了其他各种大气状态的相对透射率。

表 1-2 七种大气情况下相应的大气能见度数值

大气状况	雾	中雾	轻雾	清晰	标准清晰	非常清晰	特别清晰
能见度 R_V/km	4	6	10	20	40	56	78
$\lambda=0.9\mu\text{m}$ 时 α 值	0.9	0.6	0.4	0.2	0.1	0.07	0.05
$D=2\text{km}$ 时的 透射率 $T/\%$	16	30	45	67	82	87	90
相对透射率	0.20	0.37	0.55	0.82	1.00	1.06	1.10

四、信噪比与测程

进入到测距仪测相单元的信号,除了有用的测距信号外,还有各种干扰因素带来的随机信号,其频带很宽,称为噪声。由于作业中噪声不可避免地存在,因此,孤立地讲测距信号的

强弱或噪声的大小是没有意义的。人们所关心的应是两者之比值,即“信噪比”:

$$A=\frac{P_s}{P_N} \tag{1-5}$$

式中 P_s ——测距信号平均功率;
 P_N ——噪声平均功率。

信噪比是光电测距仪设计和作业中的一个重要指标,它直接影响到仪器的测程和测距精度。

为保证一定的测距精度要求,仪器在配用一定数量的反光棱镜下所能测到的最远距离,取决于作业时的接收信噪比。由于大气衰减的作用,会减弱接收信号导致接收信噪比的降低,因此必然使测程变短,因此说测程与大气状况是有必然联系的。在光电测距实际作业中,可把气象分为三种情况:

- (1) 差——雾气甚重,能见度约 4km;或阳光强烈,有大量热流闪。
- (2) 一般——略有薄雾,能见度约 20km;或阳光温和,只有少许热流闪。
- (3) 良好——多云、阴天,没有雾气,能见度约 40km;没有热流闪。

表 1-3 所列为 WILD DI5S 红外测距仪在此三种大气条件下的测程。

表 1-3 WILD DI5S 红外测距仪的测程情况

棱镜数	测程/km		
	大气情况差	大气情况一般	大气情况较好
1	1.2	2.5	3.5
3	1.5	3.5	5.0
11	1.8	5.0	7.0

§ 1-2 大气折射率的影响

一、大气折射率的基本公式及其要求精度

由光电测距基本公式

$$D=\frac{t}{2}\times\frac{c_0}{n}$$

式中 D ——两点间斜距(m);
 t ——光在两点间传播的时间(s);
 c_0 ——光在真空中传播速度(299 792 458±1.2m/s);
 n ——大气折射率。

可知大气折射率误差 dn 对测距的影响为

$$\frac{dD}{D}=-\frac{dn}{n} \tag{1-6}$$

将 dD 取为增量 ΔD 形式,并顾及 $dn=(n-n_0)$,而 $n\approx 1$,则得到测距边的气象改正公式

$$\Delta D_n = -(n-n_0)D \quad (1-7)$$

式中 n_0 ——测距仪设计气象参考点所相应的折射率;

n ——测距仪作业时的实际折射率。

从式(1-6)可见,折射率的精度与测距精度为同一数量级。因此,仪器测距精度最终是受大气折射率的测定精度所制约的。

大气折射率的一般计算公式为

$$n=1+\frac{n_g-1}{1+\alpha t}\times\frac{p}{760}-\frac{5.5\times 10^{-8}}{1+\alpha t}e \quad (1-8)$$

式中 t, p, e ——分别为大气温度($^{\circ}\text{C}$)、气压(mmHg, $1\text{mmHg}=1.33\text{hPa}$)及湿度(hPa)。

α ——气体膨胀系数, $\alpha=1/273.16$ 。

n_g ——标准大气压条件($t=0^{\circ}\text{C}$, $p=760\text{mmHg}$, $e=0\text{hPa}$)下的调制光群折射率, n_g 与仪器所用的光载波波长 λ 有关,由下式计算:

$$n_g=1+\left(2876.04+\frac{48.864}{\lambda^2}+\frac{0.680}{\lambda^4}\right)\times 10^{-7} \quad (1-9)$$

鉴于大气折射率与光波波长 λ 、温度 t 、气压 p 、湿度 e 有以上两式的关系,故用误差分析法,可得出光波波长与诸气象因素对于折射系数或光波测距的影响(当气压 p 为 $760\sim 680\text{mmHg}$,温度为 $0\sim 20^{\circ}\text{C}$ 时)

$$\Delta D=(\pm 0.0055\Delta\lambda\pm 1.0\Delta t\pm 0.4\Delta p\pm 0.053\Delta e)D\times 10^{-6} \quad (1-10)$$

对一般的光电测距仪,在实际工作中取百万分之一作为允许误差的指标是足够的,于是为达到此指标而对 t, p, e 允许的测定中误差为

$$m_t=\pm 1.0^{\circ}\text{C}$$

$$m_p=\pm 2.5\text{mmHg}$$

$$m_e=\pm 26.7\text{hPa}$$

由此可见,当进行精度低于 50 万分之一的短程光电测距时,湿度的影响甚至可以忽略不计。对气压测定不可忽视,而最重要的是必须保证温度的精度。

二、气象代表性误差

为对测距边进行气象改正,必须在作业时测定大气的温度和气压。用经过气象部门检验过的温度计和气压计测定温度和气压数值本身的误差,通常不会超过 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 和 $\pm 0.5\text{mmHg}$ 。但问题是人们理论上所要求的大气折射率,应是测距作业时光波传播路径上折射率 $n(D)$ 的积分平均值,即

$$n_{\text{整}}=\frac{1}{D}\int_0^D n(D)dD$$

但在实际上,这是难于做到的。仅是在测线两端点上测定气象元素,求得两端的折射率 n_1, n_2 取其平均值,即

$$n_{\text{中}} = \frac{1}{2}(n_1 + n_2)$$

将 $n_{\text{中}}$ 取代 $n_{\text{中}}$,就产生了气象代表性误差,这是影响测距精度的主要原因之一。

光电测距是在近地表大气层中进行的,为探讨这种气象代表性误差的大小和规律,就必须对近地表的大气温度场和大气压力场有所了解。

(一) 大气温度场与温度代表性误差

由于阳光对地面的照射和地面热辐射的结果,在近地表的大气中形成一个温度场,受其影响的空气层可达几百米。其中贴近地表的一薄层空气,为不稳定层,其厚度因季节而变化,夏季约 30~40m 厚,冬季则不足 10m。在不稳定层以上,则为绝热中间层,厚度可达 200m 以上。

在不稳定层中,温度场的结构白天与夜晚差别很大。白天由于阳光和地表辐射热的温度随高度成对数比例下降,见图 1-2 中的 a 曲线下部;夜晚地表温度很快下降,由于受底层大气中水蒸气和二氧化碳等空间辐射的影响,会出现温度递增,即在一定高度内存在着随高度增加反而升温的现象,如图 1-2 中的 b 曲线下部。当然这一种昼夜的温度分布变化还因季节、天气和地貌及植被情况而异。

布鲁克斯(Brooks)曾给出一个计算不稳定层中高度和温度之间关系的经验公式:

$$T = T_1 + 2.303 \times 10^{-2} a \log(h/h_1) \quad (1-11)$$

式中 a ——离地 1m 处测定的递减率($^{\circ}\text{C}/100\text{m}$);

T_1 ——高度 h_1 处测定的温度($^{\circ}\text{C}$);

T ——高度 h 处的温度($^{\circ}\text{C}$)。

该式可作为探讨大气不稳定层中温度分布的参考。而不少光电测距往往是在温度场的不稳定层中进行的,因此,进一步研究其分布的规律性还有待继续努力。

在温度场的绝热中间层(断热层),随高度增加而温度降低的递减率约为

$$\frac{dt}{dh} = -0.97^{\circ}\text{C}/100\text{m} \quad (1-12)$$

无论是白昼还是夜晚均为如此,见图 1-2 中的 a 和 b 曲线之直线部分。

一个值得注意的现象是,大气中温度场的分布,按式(1-11)和式(1-12)推算及实测的结果,其近地面的等温面是大致与地面平行的,离地面越高,等温面越趋于水平,如图 1-3 所示。图中是一种跨越山谷的锅底地形,与地面大致平行的虚线为等温线;A、B 为凌空越过山谷的测线。不难想象,由于测线上各点(1, 2, ...)离地表的高度差异较大,因此,按式(1-11)可知,测线上各点的温度也会有较大差异。显然在这种地形下取两端点 A 和 B 的温度(折射率)平均值取代全测线温度(折射率)的积分平均就必然会有较大的代表性误差,并且在白天有温度偏高、夜间则温度偏低的倾向。这类地形常见于丘陵地区。

在平坦地区测量距离较短而地面覆盖物一致时,按等温面大致与地面平行的特点,其气

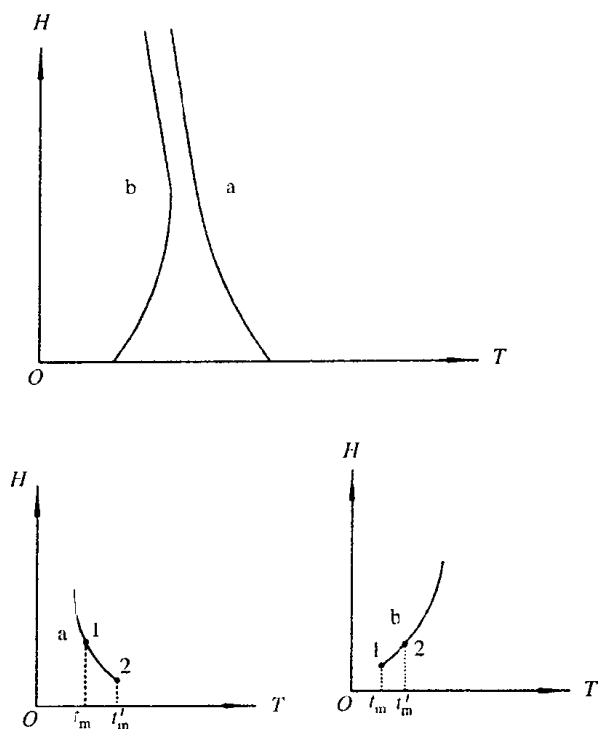


图 1-2 昼夜温度分布曲线

象代表性误差将并不显著,应当在测站与镜站离地面 1.5m 以上高度并通风较好的地方测定温度,以避免地表辐射热的影响。

但当测线方向地面覆盖物的吸热性能差异较大,例如测线通过水田与旱田、陆地与水系、城市建筑区与农村时,即使是在平坦的地区,其近地面不稳定层的温度分布也是比较复杂的。这时如测线非常靠近地面,也常常会发生较大的温度代表性误差。

在山区测量,测线离地表面常有数十米至数百米高,这个高度由于已接近或处于绝热中间层,光程上各点的温度就相当稳定,这时,在测线端点所在的高标上进行温度测定也能得到比较好的结果。

总的来说,温度的代表性误差是与测线上地形起伏的情况、植被和覆盖物的差异、日光照射、风力大小以及测线长短和温度计离地面的高度等诸因素有关。按一些实测资料统计,温度的代表性误差,在较好的条件下为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$,一般条件下为 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$,极不利情况下可达 $\pm 3.5^{\circ}\text{C}$ 。对于测距精度的影响,按式(1-10)就分别为 $0.5 \times 10^{-6} D$, $1.5 \times 10^{-6} D$ 和 $3.5 \times 10^{-6} D$ 。因此,如何减少光电测距作业中温度的代表性误差,是人们一直关心的问题。

(二) 大气压力场与气压代表性误差

气压与高度有关,离地面愈高处空气愈稀薄,气压愈低。大气压与高度的关系是能够比较精确求得的,按测量学中的气压测高公式,可推出气压与高差的关系如下:

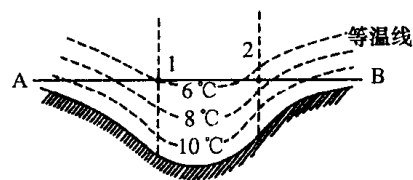


图 1-3 跨越山谷锅底地形等温线

$$p_2 = p_1 \times 10^{\frac{-h}{N(1+\epsilon_m)}} \quad (1-14)$$

式中 N, ϵ ——两个系数: $N=18400, \epsilon=0.003665$;
 t_m ——1,2 两点温度平均值, $t_m=(t_1+t_2)/2$;
 p_1, p_2 ——分别为 1,2 两点的大气压;
 h ——两点间的高差(m)。

按上式的关系可知,在地表空气层中,大气压力的分布大致为水平的等压面结构。在垂直方向,大气压随高度按指数规律减小。因此,当测线两端高差较小时,气压代表性误差不会很大。当测线两端高差较大时,用简单的两端平均值 p_m 作为全测线的平均气压 p ,会有一定误差。

贝克列特(Bakkelid)曾给出一个对 p_m 值加一项 Δp 改正数的计算公式:

$$p = p_m + \Delta p$$

式中 p_m ——两端平均气压, $p_m=(p_1+p_2)/2$;

$$\Delta p = p_1 \left[\left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\ln \alpha} \right) (1 - \alpha) - 1 \right] \quad (1-14)$$

式中 α ——测线端点气压的比值, $\alpha = p_2/p_1$ 。

按式(1-14)可将 α 和 Δp 的关系列表 1-4。

表 1-4 α 和 Δp 的关系

α	Δp	α	Δp
0.97	0.1	0.91	0.6
0.96	0.1	0.90	0.7
0.95	0.2	0.89	0.8
0.94	0.3	0.88	1.0
0.93	0.4	0.87	1.2
0.92	0.5	0.86	1.3

表 1-4 中 Δp 值,实际上也就是通常所指的气压代表性误差,可见其量值较小,在一般的中、短程测距中,实际上也可以不考虑。只有当长边、高差很大的高精度测距时,才有必要考虑。

气压的情况和温度相反,在有风的天气反而说明在近地的大气层中存在着气压的水平梯度分布,这是会产生一定气压代表性误差的,其值也较小。实测统计资料表明,包括各种因素影响的气压代表性误差,一般为 $\pm 0.5 \sim 1.0 \text{ mmHg}$ 。

综合以上分析,可见大气折射率的误差直接影响测距的精度。在由折射率求定的误差中,主要是温度代表性误差的问题,对于如何减少其影响,在下面还要继续讨论。

三、关于大气折射率模型

人们曾探讨通过一系列试验来建立大气折射率模型,以解决光速测距的大气影响问题,

在这一方面对于解决近于垂直传播的电磁波测距,是比较容易取得成功的,因为大气温度场在垂直方向的梯度分布还是比较有规律的,而温度场贴近地面的不稳定层,由于只有几十米厚,其对于垂直方向传播的光速的影响就相对地比较小。在近于垂直的方向,按空气物理学的理论和大量试验的结果表明,大气折射率的变化大致上是高度的抛物线函数,即光速测距波道上,高度为 h 的给定点的大气折射率为:

$$N = (n-1) \times 10^6 = A + Bh + Ch^2 \quad (1-15)$$

式中 N ——大气折射率,取 $N = (n-1) \times 10^6$ 表示折射率,是为了使计算折射率的表达简洁;

A, B, C ——与光波波长及大气状态有关的系数。

显然,全测线的平均折射率为

$$N_{\text{中}} = \frac{1}{h} \int_0^h N dh = A + \frac{h}{2} B + \frac{h^2}{3} C \quad (1-16)$$

为确定系数 A, B, C 之值,应在测线附近,不同高度的 m 个点上 ($m > 3$),在测距的同时实测温度 t ,气压 p 和湿度 e ;这些点可利用测线附近的已知高程点,或者运用系留气球带气象仪表遥控测定。将不同高度点上测得的 t, p, e 值以及测距仪的光波波长 λ 代入式(1-8),式(1-9),即求得了这些点上实测的 n_i 值,再按 $N_i = (n_i - 1) \times 10^6$ 关系求得各个 N_i 值。然后按最小二乘法间接观测平差即可求定该 A, B, C 之值,实际上这就是一种曲线拟合平差。这里令实测算得的 N_i 作为观测值即令 $N_i = l_i$,于是误差方程式为

$$V_i = A + (h_i/2)B + (h_i^2/3)C - l_i \quad (1-17)$$

按式(1-16)所建立的大气折射率模型,可应用于某些特种场合下,测线近于垂直的光电测距,例如测定高层空间结构物的高度、峭壁及深谷的上下测距等等。当然系数 A, B, C 之值会因测线的地理位置、地形环境、作业季节、天气晴阴、昼夜等不同情况而变化,因此该大气折射率模型只能反映某特定测线上进行测距作业的一种情况。

对于大量的是一般并非近于垂直的边长测量,前面指出过,由于测线大多在温度场不稳定层中通过,其大气折射率模型也将复杂得多,又受到许多随机变化的影响而损失精度,故虽然也有人在这方面做过一些试验,但迄今在实用方面仍受到不少局限。人们感兴趣的则是力图从选择“最佳观测时间”的观测方法,甚至采用“双载波测距”等手段来削弱或克服气象代表性误差的影响,这将在后面叙述。

§ 1-3 大气湍流和背景辐射的影响

一、大气湍流与背景辐射噪声源

在地表的大气层中,由于冷热空气的剧烈对流而产生湍流,大气的湍流是大气分子在三维空间中的一种随机运动,使大气中各点的温度和密度在无规则地变化着,这种变化又随高度和风速的不同而异。由于湍流的存在,便看到大气在抖动。大气湍流效应对光电测距的

影响表现在以下诸方面：

1) 由于大气温度 t 的起伏, 直接导致大气折射率 n 产生随机的变化, 而使光电测距仪的电子尺长有随机的伸缩。

2) 大气湍流会使光束发散及产生光的闪烁, 即光的强度有起伏; 其效果会导致测程缩短, 并相当于附加一种无规则的光调制。

3) 大气湍流还会使光束产生偏转以及无规则的抖动, 由于反光镜的有效面积在百米外的距离上要比光截面积小得多, 因此这就会导致光束的不同部分被接收, 当发光管的相位不均匀时, 这就增加了测相误差。

以上均属于外界随机噪声的性质, 并且都随距离增大而加剧。

而外界随机噪声的另外一个主要来源, 则是背景辐射的影响, 主要是指外界的日光、灯光等直接投射进入测距仪的接收系统, 以及反射棱镜周围的反射光和大气中悬浮微粒对太阳光的散射进入到了仪器的接收系统而产生的噪声。在一定的条件下, 背景辐射的噪声影响出现系统性, 例如白天与晚上、晴天与阴天、逆光与顺光等, 受背景辐射的影响就有不同。

除了以上外界随机噪声外, 在仪器作业时, 还存在着机器内部的噪声, 它们主要是指光电接收探测器件负荷电阻的热噪声、探测器本身的暗电流以及前置放大器的散弹噪声等。这些机内噪声是与元件品质、线路布置、机内温度和干燥情况有关。

二、信噪比与测相误差

进入到测相单元的信号, 除有用的测距信号外, 总还带进一定的噪声信号。在图 1-4 中, E_s 为测距信号的峰值, E_N 为叠加在测距信号中的噪声的峰值。图中表示由于噪声对于测距信号的过零触发, 将产生附加相位移 $\Delta\varphi'$, 这是一种测相误差。

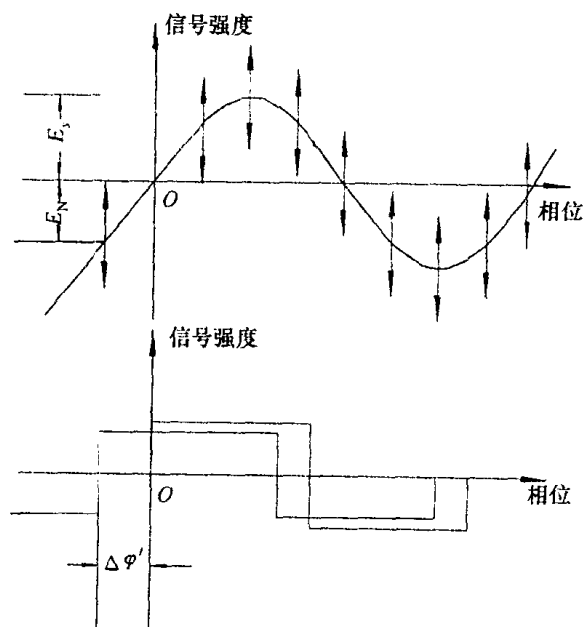


图 1-4 噪声与测距信号

$$\Delta\varphi' = \frac{E_N}{E_S} \times \frac{1}{\sqrt{n}} \rho^\circ = \frac{\rho^\circ}{A\sqrt{n}} \quad (1-18)$$

式中按功率与峰值的关系：

$$\frac{E_N}{E_S} = \frac{P_N}{P_S} = \frac{1}{A} \quad (1-19)$$

式中 A ——信噪比, $\rho^\circ = 57.3^\circ$;

n ——仪器一次测距显示的检相次数。

如此,若仪器的精测调制频率 $f_1 = 15\text{MHz}$,则欲使测距误差小于 $\pm 5\text{mm}$ 时,就要求 $\Delta\varphi' < 0.18$,按上式则对于具有 $n = 25000$ 次检相的仪器,对信噪比的要求为 $2:1$ 。因此,为保证达到一定的测距精度,就应有足够的信噪比。按国产 HGC-1 红外测距仪的测试资料,信噪比与测相误差的关系如表 1-5 所列。

表 1-5 信噪比与测相误差的关系

信噪比 A	测相误差/mm
4:1	小于 ± 2.5
2:1	± 5
1:1	± 10

从而,在作业中要选择有利的天气(阴、多云)和一天中有利的时机,以减少大气湍流的影响;观测时避免逆光进行,必要时甚至布置人工背景(黑色)以减少背景辐射影响;以及保持主机供电电压的稳定和机内温度的均匀性以减少机内噪声。凡此种种,对于提高信噪比、保证仪器稳定地工作都十分重要。

§ 1-4 关于光波测距最佳时刻的选择

由前述,大气气象对测距精度的影响,主要是温度代表性误差。由于近地表的大气层中,温度分布主要与阳光的照射有关,而阳光照射的强度又主要与太阳的高度有关,太阳的高度在一天之内是不断变化的,而且随季节而有不同。这样,就导致了温度的周日变化和周年变化的现象。为此还有必要进一步了解近地表大气层中温度的梯度分布随时间而变化的情况。这里,其周日变化的规律是有实际意义的,从中能否找到一段最有利于测距的时间段?

在风和日丽的白天,地面吸收了太阳的短波辐射之后,获得丰富的盈余热能,其温度常常高于大气温度,因而不断向外辐射热量而使地表附近空气增热,逐渐出现随高度递增而气温递减的情况,形成了一种负的温度垂直梯度分布,即 $dt/dh < 0$ 。

日落以后,地表则因辐射冷却而剧烈降温,使其贴近的空气层冷却较快而较高的空气层冷却得慢,因而在夜间,在近地表大气层中会出现逆转的情况,形成一种正的温度垂直梯度分布,即 $dt/dh > 0$ 。

如此出现温度的周日变化,如能在一个点上 24h 连续不断地进行温度观测,则就能得到当地的温度周日变化曲线。尽管其周日变化的振幅,会因地理位置、地面覆盖物以及季节和