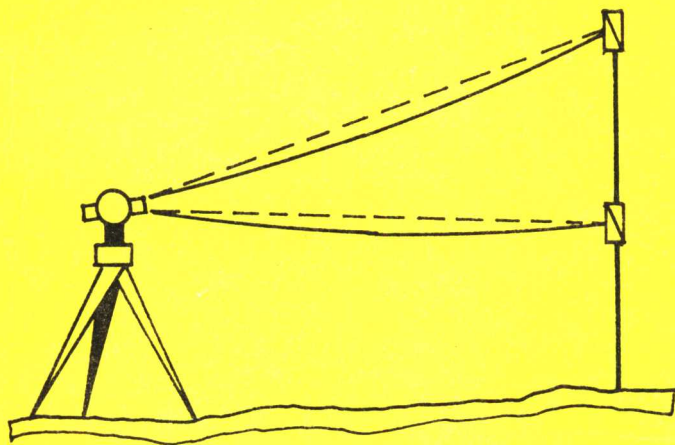


现代测绘科技丛书

EDM三角高程测量

刘志德 章书寿 郑汉球 张学廉 编著



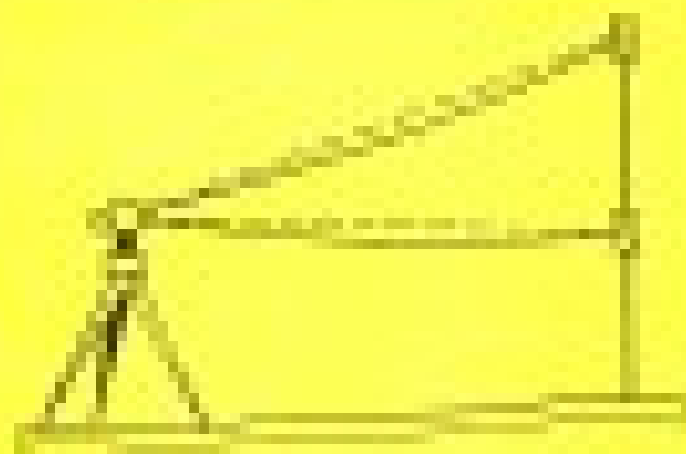
XIANDAI
CEHUI KEJI CONGSHU

测绘出版社

測量學與工程測量

EDM三角高程測量

編者 曹明輝 編次編 曹明輝 校閱



測量學
電子測距三角高程測量

測 量 學 叢 書

现代测绘科技丛书

EDM 三角高程测量

刘志德 章书寿 郑汉球 张学廉 编著

测绘出版社

内 容 简 介

本书概括地介绍了 EDM 三角高程测量的原理，一般的作业方法以及与此有关的三维网平差的基本内容。本书重点在于详细讨论影响 EDM 三角高程测量精度的各项因素，以及为改善精度所采取的措施；特别是深入地论述了削弱大气折射和垂线偏差影响的各种方法、原理和不同的观点。

本书可供从事大地和工程测量的科技人员使用，也可作为有关专业师生的教学和科研参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

EDM 三角高程测量/刘志德等编著.-北京: 测绘出版社, 1996.2
(现代测绘科技丛书)

ISBN 7-5030-0831-8

I . E... II . 刘... III . 电磁波测距-三角测量: 高程测量
IV . P216

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 00222 号

测绘出版社出版发行

(100045 北京市复外三里河路 50 号 (010)68512182)

大兴星海印刷厂印刷·新华书店总店北京发行所经销

1996 年 5 月第一版·1996 年 5 月第一次印刷

开本: 850×1168 1/32·印张: 4.625

字数: 122 千字·印数: 0001—2500 册

定价: 9.00 元

《现代测绘科技丛书》

编委会委员名单

主任委员：陈俊勇

副主任委员：宁津生 高俊 张祖勋

楚良才 陈永奇 华彬文

委 员（以姓氏笔划为序）：

于来法 方恒 田应中

朱华统 李德仁 陈绍光

张清浦 林宗坚 陶本藻

钱曾波 黄杏元 梁宜希

喻永昌 廖克 潘正风

出版说明

《现代测绘科技丛书》是经国家测绘局批准列入我社“八五”重点出书规划的选题之一。其编写宗旨是对 80 年代以来测绘科技领域在新理论、新技术、新工艺等方面所取得的成果进行总结，整理成册，以期对改造传统测绘生产技术，提高劳动生产率和产品质量，形成我国现代测绘技术体系，发挥科技图书应有的作用；同时也为反映我国测绘科学研究水平，丰富我国测绘学术专著宝库服务。出版本套丛书也是为适应加速测绘科技成果转化为实现生产力的需要。

本套丛书按专题成册，专题有两种类型：一类偏重学术性，主要反映我国测绘各专业近十年来在理论研究方面所取得的、能代表我国先进水平的新成就和某些老专家毕生研究成果的专著，以及测绘前沿填补国内空白的著作，另一类偏重应用技术，是本丛书的主体，其内容是在理论指导下以新技术、新工艺、新材料、新产品研究成果的推广应用为主，个别的配有实用软件。

由于 GPS（全球定位系统）涉及测量界多方面的应用，内容较多，丛书中将分册配套编写。有关各册主题明确，内容相辅相成，组合起来 GPS 测量内容就显得比较完整，又发挥了各作者的专长。

丛书编委会于 1992 年 1 月成立，全体编委对丛书出版意图、读者对象，乃至每个选题及其内容都作了充分研究和讨论，在全国测绘界选择了有代表性的专家参加各个分册的撰写和审稿工作。按照计划，这套丛书的各分册将根据撰写完成情况先后定稿出版，陆续与读者见面。

前 言

三角高程测量是一种为广大测量人员所熟知的古老的传递高程的方法。它具有快速、经济和减轻劳动强度等优点。然而由于竖直角度的观测精度不高，特别是受到大气垂直折射的影响，使得此法的应用受到限制。

从 Picard 在 1669 年首先提出大气折射问题以及 1826 年 Gauss 根据实测结果求得折光系数为 0.13 以来，至今人们对大气折射问题的研究已有几百年的历史。许多测量人员觉得这个问题颇为隐晦而具有魅力，从而为此花费了大量的时间和精力。自 50 年代电磁波测距仪问世以后，国内外测量工作者对三角高程测量的研究愈加重视。国际大地测量组织将大气折射问题列为重大难点课题之一。IAG (国际大地测量协会) 曾召开过 10 多次国际会议，旨在共同协作解决这一问题。我国于 1982 年在昆明召开的全国电磁波测距应用讨论会以及 1992 年在厦门召开的大气折射与测距三角高程代替水准测量学术讨论会都对 EDM 三角高程测量及大气折射问题进行了广泛的交流与深入的探讨。目前国内外对这方面的研究已取得很大进展，我国的一些测量规范已将 EDM 三角高程测量代替三、四等水准测量列入正式条款。高精度全站仪的发展，尤其是双波长测角仪器的研制又将为 EDM 三角高程测量代替精密水准测量和精密工程测量提供了更加有力的物质条件，从而开创了精密三角高程应用的新阶段。

本书概括地介绍了 EDM 三角高程测量的原理，一般的作业方法以及与此有关的三维网平差的基本内容。本书重点在于详细讨论影响 EDM 三角高程测量精度的各项因素，以及为改善精度所采取的措施，特别是深入地论述了削弱大气折射和垂线偏差影响的各种方法、原理和不同的观点。这些主要是近年来的研究成

果，其中包括一些作者本身的研究、实验成果。

全书分六章，章书寿编写 § 1·1~ § 1·3 和 § 3·1~ § 3·3，郑汉球编写第二章和 § 1·4；张学廉编写 § 5·3；刘志德编写其余各章节并负责全书的统稿。

本书在编写过程中得到了武汉测绘科技大学孙仁心副教授的帮助。此外，德国的 R.Jäger 博士，澳大利亚的 M.Rueger 副教授和 B.A.Campbell 工程师都主动提供了他们已发表的论文。测绘出版社的李建明编辑为本书的出版作了组织和深入细致的编辑工作，仅在此表示诚挚的谢意。同时，特别对本书的审稿者梁振英先生表示由衷的感谢。

对本书中的缺点和错误请读者给予批评指正。

编 者

1994 年 5 月

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1.1 EDM 三角高程测量的现状与发展	(1)
§ 1.2 EDM 三角高程测量的原理	(8)
§ 1.3 EDM 三角高程测量的观测方案	(14)
§ 1.4 大气边界层的温度分布	(16)
第二章 EDM 三角高程测量高差的计算	(30)
§ 2.1 考虑垂线偏差时大地高高差的计算	(30)
§ 2.2 正高高差及测站水准面曲率不等差改正	(32)
§ 2.3 EDM 三角高程测量正常高高差的计算公式	(35)
§ 2.4 用大地高高差计算正常高高差	(37)
§ 2.5 中间设站观测时水准面曲率不等差改正	(40)
§ 2.6 水准面曲率不等差改正值的分析	(43)
§ 2.7 垂线偏差分量的符号	(44)
第三章 近地大气层折射系数的计算及削弱其影响的 某些方法	(45)
§ 3.1 近地大气层的垂直折光	(45)
§ 3.2 k 值计算及削弱其影响的非气象学方法	(54)
§ 3.3 微气象垂直折光模型及折光改正计算	(67)
§ 3.4 关于湍流模型用于折射改正中的问题	(83)
第四章 EDM 三角高程的精度分析	(85)
§ 4.1 三角高程精度的理论分析	(85)
§ 4.2 三角高程实测成果的精度评估	(94)
§ 4.3 EDM 三角高程测量代替国家等级水准测量的 讨论	(101)

§ 4.4	关于垂线偏差的影响	(102)
第五章	EDM 三角高程的作业方法和技术规定	(105)
§ 5.1	三角高程主要观测量的观测方法	(105)
§ 5.2	关于对向观测高差之差的限差	(113)
§ 5.3	关于同时对向观测法	(115)
§ 5.4	全面评定三角高程测量精度等级的标准	(125)
第六章	三维控制网平差概述	(126)
§ 6.1	坐标系及坐标系间的转换	(126)
§ 6.2	两种坐标系中的观测方程和误差方程	(128)
§ 6.3	关于附加垂线偏差参数和大气折光参数的 讨论	(132)
参考文献	(134)

第一章 绪 论

§ 1.1 EDM 三角高程测量的现状与发展

一、概述

19世纪以前,三角高程测量几乎是测定控制点高程的基本方法,而且广泛用作地形测量的高程控制。但是,由于近地面大气层的垂直折光使观测天顶距受到歪曲,成为限制三角高程测量精度的主要障碍。另一方面,由于几何水准测量的发展,并逐渐成为高程控制,特别是精密高程控制的重要手段,而使三角高程测量成了只是在一些特殊情况(如高山区或次要地区)的几何水准测量的补充。

但是,几何水准测量的速度慢(按规范规定,一等水准测量的视线应小于30m,二等水准测量应小于50m,即使国外有所谓摩托化水准,也没有显著地提高它们的速度),劳动强度大,而且在较长的倾斜路线上也受到垂直折光误差累积性影响。当后、前视视线通过不同高度温度层时,每100m高差中可能产生的系统性影响为15mm~30mm。尽管不少学者已提出一些折光差改正计算公式,但正如Whalen指出的,这些模型仍保留20%~65%的系统误差^[1]。近年来,还发现地球磁场对补偿式精密水准仪的影响可能达到2mm/km。此外,几何水准测量转点多,标尺与仪器下沉误差是另一项系统误差来源。由于上述原因,在丘陵、山区等地区用几何水准测量进行高程传递是非常困难的,有时甚至是不可能的。

自本世纪中叶以来,获得迅速发展的电磁波测距和空间定位技术,如多普勒卫星定位(DOPPLER)、甚长基线干涉测量(VLBI)、全球定位系统(GPS)等也同样受到大气层垂直折射

的影响。为了提高空间测量和三角高程测量的精度，迫使人们重新研究大气折射率的测定和计算问题。国际大地测量协会(IAG)成立了专门的研究组，并将其列为国际重大的难点课题之一。从 60 年代起，相继举行过近 10 次国际会议，旨在协作解决这一问题。许多测量工作者为此耗费了大量的时间和精力，也取得一些长足的进展。但总的说来，迄今仍处于继续探索阶段。一些测量工作者觉得这个问题隐晦而富有魅力从而孜孜以求。也有人认为大地测量折射问题很复杂，是极难逾越的障碍。但是，在科学技术和生产实践发展的推动下，国内外对它的研究仍方兴未艾。

80 年代以来，随着电子经纬仪的问世和光电测距仪的广泛应用，三角高程测量已引起国内外同行的高度重视。三角高程测量不仅在测边网或边角网中作为确定点位高程的普遍方法，而且进一步同传统的二维控制网相结合，发展成为同时确定点位空间位置的三维控制网。这类网的具体形式之一是用作某些工程需要的高程监测网，和监测滑坡、矿山或大坝变形的变形监测网等。另一种则是测距仪高程导线。这类导线又有两种作业形式，一种是采用类似于水准测量的观测方法，在两点上设置目标，而仅在两目标之间设置仪器，称为中间法（也有人称为跳点法或三角水准测量）。还有一种是常用的对向观测法。（关于这两种作业方案的介绍见 § 1.3）。

二、国外精密三角高程测量的研究现状

美国国家大地测量局于 1984~1985 年间用 T2000 经纬仪和 DI5 测距仪组成全站型仪器，按中间法和对向观测法施测了总长为 30km 的线路，边长为 300m 左右，求得每公里往返测平均值标准差小于 $\pm 0.76\text{mm}$ 和 $\pm 1.02\text{mm}$ ，环线闭合差小于 $\pm 4\text{mm}\sqrt{L}$ （L 为线路长度，以公里计）。

加拿大纽不伦斯威克大学于同一时期采用与美国同类仪器在大学校园内 600m 的道路上按中间法进行试验，边长分别为 200m、

250m、300m，垂直角观测 8~12 测回，求得每公里往返平均值的标准差为 $\pm 2.2\text{mm}$ 。

在澳大利亚悉尼北部面积为 80km^2 的果园所进行的中间法试验中，采用 HP3820A、DM502 测距仪加 DKM-2A 及 T2 经纬仪等观测，垂直角用三丝法观测一测回，与几何水准测量比较，求得每公里高差中误差为 $\pm 4.3\text{mm}$ 。

德国德累斯顿大学使用 Recote 全站仪（测距中误差 $\pm(5\text{mm} + 2 \times 10^{-6} \times D)$ ，测角精度为 $\pm 1.6''$ ）在 1.2km 与 1.5km 的两条闭合线路进行中间法和对向观测法试验，共测了 22 次，总长为 60 km，平均边长分别为 150m 和 370m。其结果与几何水准测量比较，在有利观测和一般观测条件下，对向观测时每公里高差中误差均小于 $\pm 3\text{mm}$ 。两条导线的作业效率分别为 1.3km/h 和 2.3km/h ，实验表明在倾斜地面作业更为经济^[2]。

法国国家地理院曾于 1982 年在巴黎东北部进行摩托化三角高程测量试验。试验时用两台 Kern DKM-2A 经纬仪和一台 DM502 测距仪并配有两辆装有起重系统的小汽车。为了便于对向观测，在经纬仪物镜上配有左右对称的两只小环形觇牌，两觇牌中心的连线水平并且通过物镜中心，该装置不影响望远镜的纵转。脚架有特制钢管，管内有减震材料，用带球关节的脚垫以增加与地面接触。两台经纬仪同时相互照准环形觇牌，即光轴对光轴相互照准。观测天顶距两测回，两辆汽车交替行驶，观测结果输入 HP41-CV 计算机中及时校核，也曾用 Kern E1 与 DM502 相结合进行试验。观测线路总长 129km，分 8 个环，224 个测段，得每公里平均高差中误差为 $\pm 3\text{mm}$ 。该试验平均每站约 8 分钟，每小时推行 4.5km，站距 600m 左右。生产效率比摩托化几何水准测量高 60%（该地区曾试验摩托化几何水准测量），在困难地区则是它的 2.3 倍，经费上比摩托化几何水准测量节约 68%，比传统的水准测量节约 126%^[3]。

我们知道，提高三角高程测量精度的主要影响是大气竖直折

射问题。近几十年来,测量工作者对此进行了大量研究。A. A. ИЗОГОВ 等人^[10]早在 60 年代就提出根据异常折光与大气湍流参数间的关系来确定折光的异常部分,并首次提出下层面上光线的等效高度概念。B. И. ТАМАРСКИЙ 在 70 年代的著作里认为大气湍流是一种随机过程,并证明折射率的随机起伏可用 КОЛМОГОРОВ-ОБУХОВ 的三分之二定律来描述^[5]。D. C. WILLIAMS 和 H. KAHMEN 用双波长法和色散计原理研制专门的仪器,移动仪器内玻璃板的倾角,使影像处于无折射位置^{[6], [7]}。另一种解决大气竖直折射影响的方法是用常规的大地测量仪器观测,再对大气影响建立某种模式进行改正。当然,这些模式要求对近地面层的大气结构有深入的了解。E. K. WEBB 在研究了大气边界层中温度及湿度结构之后,认为大气湍流波动主要取决于垂直热通量与风速,也即不同高度的大气层,其位温梯度不同,即使同一高度处的大气在不同的大气层结稳定度下,其位温梯度也不同。对不同的情况,WEBB 等人建立了相应的模型^[8]。F. K. BRUNNER 把大气效应中的确定性部分与随机性部分分离开来,从而建立了估计大气效应的整体模型与周边模型^[20]。但鉴于这一问题的复杂性,获得实用性的成果还有待各国学者的共同努力。

另外还值得一提的是,德国学者 R. JÄGER 将谱分析的方法用于对高程网中的粗差、系统误差和偶然误差进行分析,从而在理论上证明了用三角高程代替等级水准测量的可能性^[10]。

三、我国 EDM 三角高程测量的研究概况

在我国,近十几年来,对 EDM 三角高程测量的研究相当普遍。1982 年 11 月和 1987 年 9 月先后在昆明和北京召开了“电磁波测距仪在工程测量中的应用”学术讨论会。1992 年 11 月在厦门召开的“大气折射与测距三角高程代替水准测量学术讨论会”,标志着我国在这一领域的研究进入了新的阶段。

先前的研究着重于 EDM 三角高程测量代替三、四等水准测量问题。如云南省水利水电勘测设计院用 DM502(或DM503)测距仪测边,用 DKM2A 经纬仪观测天顶距 3 测回,施测高程导线 103 条,边长从 116m~1147m。试验结果表明,当用中间法观测时,边长在 1km 以内,EDM 三角高程测量可以代替四等水准测量;而当采用对向观测时,边长在 1.1km 以内,可以代替三等水准测量。

国家测绘研究所等单位于 1984 年至 1985 年间使用 AGA122 测距仪与 T2 经纬仪在面积为 50km² 的地区进行了大规模试验。采用对向观测,天顶距 3 测回,边长 492m~4130m。其结果是,当边长在 50m~1.1km 内,EDM 三角高程测量可以代替三等水准测量;边长在 70m~3.4km 时可以代替四等水准测量。铁道部门在大瑶山工程所做的试验,也证实了 EDM 三角高程测量可以达到三等水准测量的精度要求。

东北水利水电勘测院与水电一局在白山电站监测网中,用 ME-3000 精密测距仪测边,用 T3 经纬仪同时照准对方经纬仪支架上的照准觇牌,测量觇牌上的双标志垂直角各 3 测回,观测时还读取气温和气压;该三角网的平均边长为 600m,最大高差 45m,由 EDM 三角高程测量结果与一等水准测量的 36 个差值计算每公里高差中误差为 $\pm 2.19\text{mm}$,而由三角形 12 个闭合差计算每公里高差中误差则为 $\pm 2.88\text{mm}$ 。这表明该电站 EDM 三角高程测量已接近二等水准测量要求。

福建华田公司在水口电站测量中,用 T2000 经纬仪和 DI5 测距仪进行的 4 条 EDM 三角高程导线,总长 6.7km,最大边长为 793m,最短 84m,最大高差 47m,计算得每公里高差中误差约为 $\pm 1\text{mm}$ 。用同样仪器进行过江高程传递,视线长 311.3m,在两天时间进行往返测,最后算得高差与二等水准测量相差不到 1mm。说明该电站 EDM 三角高程测量达到了较高精度⁽¹⁰⁾。

河海大学于 1990 年与 1991 年在南京市进行了约 10km 的

EDM 三角高程导线测量。用中间法与对向观测分别施测了 10 个闭合环，最大边长 338m，最短 40m，平均边长 189m，用 DI5 测距仪与 T2000 经纬仪观测，在因瓦水准尺上作固定标志，专制了量高设备，使量高精度达 $\pm 0.2\text{mm}$ 。同时用二等水准测量施测了全部点的高程。由两期观测的环线闭合差计算每公里高差中误差，当采用中间法时各为 $\pm 1.87\text{mm}$ 与 $\pm 1.37\text{mm}$ 。两期都用对向观测法时，混合计算得每公里高差中误差为 $\pm 1.94\text{mm}$ 。用三角高程测量与水准测量差值计算每公里高差中误差为 $\pm 1.53\text{mm}$ 。这表明该项试验达到了二等水准测量的精度要求。

解放军测绘学院在郑州郊区用 DI5 测距仪和 T2000 经纬仪按中间法进行了 3.8km 的高程导线试验，按其结果与一等水准测量之差求得每公里高差中误差小于 $\pm 1.4\text{mm}$ 。该校还在海南岛实测了总长 138km 的高程导线，导线长度由 1.74km~6.72km，平均为 3.44km，组成了 24 个闭合环，采用 DIOR3002 测距仪和 T2000S 经纬仪按中间法施测 20 个测段，相邻点高差均用一等水准测量测出。由 24 个闭合环的闭合差计算每公里高差中误差为 $\pm 1.25\text{mm}$ ^[11]。此外，武汉测绘科技大学、中南工业大学等也进行了类似的试验研究。

在我国，大气垂直折光影响的研究工作也取得进展。中南工业大学在 Webb 分层区计算位温梯度的基础上，提出分层区计算折光系数的模式，这是因为在山区或丘陵进行大地测量时，控制点一般都设在山顶上，这时观测垂直角的视线要穿越不同的层区，由于各层区点折光系数函数式的定义域不同，他们利用分段积分法来计算该气象条件下沿视线的平均折光系数，这比不分层计算的精度要高。中国科学院安徽光学精密机械研究所根据大气湍流理论对大气折射的不均匀性进行研究。分析了现有的一些修正方法，包括平均光线弯曲修正，两点折射率平均修正，通量模式修正的根据，并推荐相应的温度廓线修正方法。武汉测绘科技大学对实验网连续垂直角时序观测值按频谱法进行分析，证明大

气垂直折射变化确有明显的周期性变化；河海大学对试验场和某电站连续观测成果分析，也初步得出大气垂直折射系数在不同季节、视线通过不同覆盖情况下的变化规律。所有这些为我国进一步研究和认识大气垂直折射规律奠定了基础。

从已有资料可以看出，EDM三角高程测量的精度除与大气垂直折射的影响有关，还与垂直角观测精度以及垂线偏差的影响有关。一般说来，用J2型仪器(如T2、DKM2等)测定垂直角一测回中误差在 $\pm 2''$ 左右。配合中等精度的测距仪，采用适当的观测方案，用以代替三、四等水准测量是可行的。而用T2000电子经纬仪或E1、E2等全站仪，可使测角误差达 $\pm 0.5'' \sim 0.7''$ ，再配以高精度的测距仪和其它设备与措施，高程测定有望达到二等水准测量的精度。目前，有的测量规范中已明确规定EDM三角高程测量可代替三、四等水准测量的作业方法与技术规格。而代替二等水准测量的试验研究表明，其精度与主、客观条件和采用的方法有很大关系，还须进一步试验研究。

四、EDM三角高程测量的发展

为了提高EDM三角高程测量的精度，多年来，测量工作者进行了大量艰苦的工作，取得了长足的进展，今后应继续探讨的主要问题包括：

1. 从理论上研究近地面大气层的温度、湿度和风速等结构，建立适用的大气湍流模型，并根据测量的气象元素计算折射系数。

2. 利用多色激光仪器直接测定折光差。70年代，美国西雅图华盛顿大学生产出叫Terrameter LDM-2的双色测距仪。80年代，科罗拉多州博尔德公司生产一种三色激光测距仪。但都处于研制阶段。目前，美、加和芬兰等国出资金委托瑞士著名厂家研制新的双波长测量系统，用以直接测定折光角和计算折光差，而无需知道气象条件。预计不久新仪器即将通过鉴定，无疑