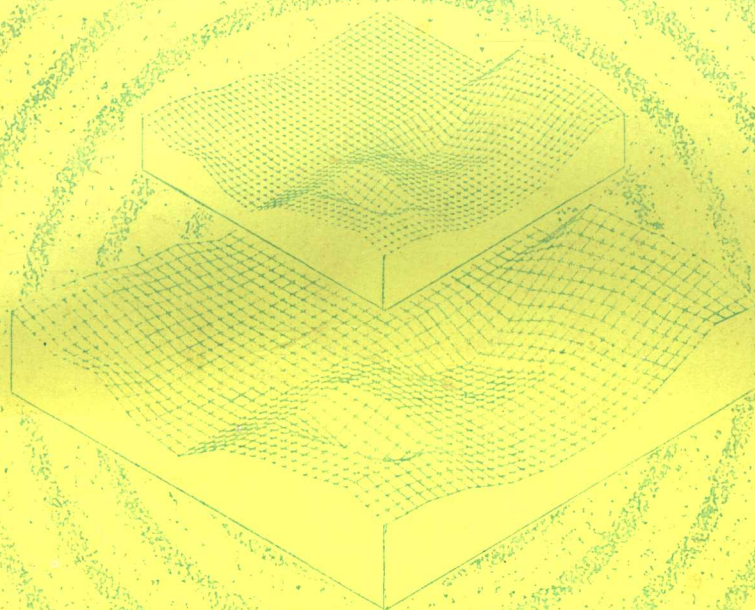


高等学校规划教材

测绘新技术及其应用

郭达志 金学林 盛业华 韩国建 编著



中国矿业大学出版社

高等学校规划教材

测绘新技术及其应用

郭达志 金学林 编著
盛业华 韩国建

中国矿业大学出版社

(苏)新登字第 010 号

内容提要

本书比较系统、全面地论述了现代测绘技术理论与方法。全书从电子速测仪(俗称全站仪)野外数据自动采集、存储,计算机数据处理及成图系统出发,着重论述了电子速测仪的结构、工作原理以及各种应用范围与方法。本书还简要介绍了遥感(RS)、全球定位系统(GPS)和地理信息系统(GIS)(通称三“S”)的基本理论、工作方法和发展前景,以及三者的内在联系。

本书涉及面广,实用性强,且深入浅出。

本书为测绘专业本科生和研究生的教学用书,也可供地学、环境、采矿等专业师生以及科技人员参考。

责任编辑 洪 铨

责任校对 马景山

技术设计 马景山

高等学校规划教材 测绘新技术及其应用

郭达志 金学林 盛业华 韩国建 编著

中国矿业大学出版社出版发行

新华书店经销 中国矿业大学印刷厂印刷

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 12.75 字数 307 千字

1995 年 8 月第一版 1995 年 8 月第一次印刷

印数 1~1000 册

ISBN 7 - 81040 - 402 - 4

TB·4

定价:11.50 元



前 言

测绘科学的发展是与社会的需求和科学技术的发展、进步密切相关的,因而显示出不同的时代特征。70年代以来,小型、精密光电测距仪,特别是电子速测仪(俗称全站仪)和电子数据记录器(电子手簿)的问世、发展和推广应用,是近二十年中测绘技术,特别是工程和矿山测量技术最重大的事件之一。由此,测量作业方式向数字化、自动化方向迈进了一大步,上了一个新台阶。然而,电子速测仪(含电子手簿)只有与自动数据存储、处理、计算机绘图和空间地理信息系统有机地联结在一起,构成综合自动测绘系统,才能充分发挥其潜力,使室内外测绘工作全过程自动化。

近十余年来,现代化工业生产进入了一个新阶段,要求对生产过程和产品质量进行自动控制和检测,从而促使三维工业测量技术的兴起和发展。

新一代卫星导航/定位系统(GPS)正以其高精度、可靠性、全天候、全球覆盖等优势,吸引着军事和民用的许多部门,逐渐成为测量的一种重要技术手段。随着接收机性能/价格化的进一步提高,应用领域和潜力还将日益发展,从而使空间定位技术发生深刻的变革。

无论是资源勘测和开发,工程设计、施工,还是城市规划管理、生态环境保护,无不需要(空间)地理信息系统(GIS)和智能化的专家系统的支持。此外,遥感(RS)技术在资源勘测、开发、环境动态监测和治理中有着广泛的应用。

就近期而论,电子速测仪仍是常规的基本测量手段(设备)。配合三“S”(GPS、RS、GIS)系统,形成实时动态对地观测体系,将是当代测绘科技的基本模式。尽管如此,现在较系统地介绍以电子速测仪为主的自动测绘技术及其应用的书籍还很少。因此,我们在原有教材(讲义)的基础上经修改、补充形成本书。作为测绘等专业大学生和研究生的教材,也可供有关科技人员参考。

本书由郭达志、金学林、韩国建和盛业华合作编著,由郭达志主编和统稿。

清华大学杨德麟教授、刘翰生教授等对本书稿进行了认真审阅,提出了宝贵的修改意见;煤炭工业部科技教育司、煤炭高校矿山测量专业教材编审委员会对本书的出版给予了大力支持,笔者谨致衷心的感谢!

由于我们水平有限,加上有关科技的发展迅速,书中错误、不妥及挂一漏万之处难免,欢迎不吝批评指正。

编著者

1994年3月

目 录

前 言

第一章 绪论	(1)
第二章 电子速测仪和三维自动测量系统的基本结构原理	(3)
第 2-1 节 概述	(3)
第 2-2 节 精密光电测距原理的新发展	(3)
第 2-3 节 光电测角原理	(6)
第 2-4 节 程序控制微处理机	(14)
第 2-5 节 竖盘指标与倾斜传感器	(15)
第 2-6 节 光电度盘定位	(17)
第 2-7 节 日本 SET 系列电子速测仪简介	(18)
第 2-8 节 瑞士徕卡(威特)电子速测仪简介	(22)
第 2-9 节 反射器的若干问题	(26)
第 2-10 节 电子速测仪检验的若干问题	(28)
第 2-11 节 自动三维工业测量系统	(30)
第三章 电子数据记录器	(34)
第 3-1 节 概述	(34)
第 3-2 节 野外测量数据输入	(34)
第 3-3 节 电子数据记录器	(35)
第 3-4 节 串行异步通讯与数据传输	(37)
第 3-5 节 野外数据记录器简介与评价	(42)
第四章 自动测量基本原理和成果处理	(55)
第 4-1 节 三维工程控制测量与数据自动记录	(55)
第 4-2 节 地形地物点特征信息的自动记录	(57)
第 4-3 节 野外地形信息采样方法	(61)
第 4-4 节 数字地籍测量的基本原理与实践	(63)
第 4-5 节 大气折射及其对测量成果的影响	(69)
第 4-6 节 光电测距成果的改正	(80)
第 4-7 节 光电测距边的归算	(81)
第 4-8 节 三维电子测量平差	(83)
第 4-9 节 矿山测量自动化	(87)
第五章 计算机图形系统及其在测绘中的应用	(89)
第 5-1 节 计算机成图系统硬件介绍	(89)
第 5-2 节 计算机绘图软件	(93)

第 5-3 节 数字地面模型及其应用	(95)
第六章 现代定位技术简介	(102)
第 6-1 节 概述	(102)
第 6-2 节 GPS 全球定位系统及其应用	(103)
第 6-3 节 GPS 接收机的选择和产品简介	(115)
第 6-4 节 ГЛОНАСС 全球导航卫星系统	(120)
第 6-5 节 惯性测量系统	(123)
第 6-6 节 现代定位技术的应用	(128)
第七章 测量控制网优化设计	(129)
第 7-1 节 控制网优化设计中的几个问题	(129)
第 7-2 节 控制网优化设计的质量标准及其求解方法	(131)
第 7-3 节 基准的选择和一类设计	(133)
第 7-4 节 二类设计(SOD)	(136)
第 7-5 节 三类设计和模拟法	(139)
第 7-6 节 GPS 测量网的设计	(144)
第八章 遥感技术与分形理论应用概说	(148)
第 8-1 节 遥感的概念	(148)
第 8-2 节 遥感信息的特性及其应用	(149)
第 8-3 节 遥感图像微机地形数据的采集与处理	(150)
第 8-4 节 神经网络计算机在遥感中应用展望	(152)
第 8-5 节 分形理论及其应用	(156)
第九章 地理信息系统(GIS)简介	(163)
第 9-1 节 GIS 的概念、组成和发展概况	(163)
第 9-2 节 GIS 与测绘、遥感技术	(165)
第 9-3 节 GIS 的基本功能	(166)
第 9-4 节 数据结构与数据模型	(168)
第 9-5 节 GIS 的应用	(174)
第 9-6 节 人工智能在 GIS 中的应用	(175)
第 9-7 节 空间信息系统(SIS)的网络化	(177)
附录一 电子速测仪(电子经纬仪)主要技术参数一览表	(181)
附录二 GPS 接收机主要技术参数一览表	(182)
附录三 GIS 系统基本特征表	(187)
附录四 信息处理/交换用 7 位编码	(191)
参考文献	(196)

第一章 绪 论

现代科学技术的重大成就,特别是激光、微电子技术、空间技术、计算机技术的飞速发展,促使现代大地测量科学技术有了较大的发展和突破。由于全球定位系统(GPS)、卫星激光测距(SLR)和甚长基线干涉(VLBI)等技术的出现,使距离和定位测定技术在全球空间任意尺度上能达到 $1\sim 0.01\text{ppm}$ 的相对精度;定位所需时间已从几天提高到只需几小时、甚至几分钟。重力场参数测定技术已发展到微伽级或更高的精度。随着上述技术的突破,导致大地测量学科产生革命性的划时代的转变,跨入一个崭新的发展阶段。在大地定位控制网的布设理论上,按精度和边长分等级布设,逐级控制的层次性结构理论正在逐渐消亡;大地测量数据处理和平差方面,从分离的一维(高程)和二维(平面)数据处理发展到三维、四维以及几何和物理数据整体综合处理的阶段;从测定静态刚性地球表面几何和重力场元素发展到监测研究非刚性(弹性、流变性)地球的动态变化;从局部参考坐标系中的地区性大地测量发展到统一地心坐标系中的全球大地测量。从而使大地测量学从经典的自给自足的封闭状态发展成为与地球科学中多种分支学科(如地球动力学、地球物理学、地质学)相互交叉的现代大地测量学。因此,现代大地测量学的基本任务是:建立和维持一个高精度的惯性和地固参考坐标系统,并在这两个系统中建立、维持地区性和全球的三维大地控制网,监测这些网随时间的变化,藉以实现高精度的地球坐标框架和地面点位基准;测定、模拟和解释地球的动态现象,如地球的自转和极移,地球潮汐,地壳运动和海平面变化等;确定随时间变化的地球外部重力场等。可见,现代大地测量学实质上是研究地球空间特性、物理状态和环境变迁的一门地球信息学科。它不仅是一门基础性学科,也是一门应用性很强的学科。

各种工程测量、矿山测量仪器设备的自动化、数字化程度越来越高,硬件与软件系统协调发展,越来越轻型化、高精度。数据采集和处理日趋自动化、数字化,成果的提供向实时或准实时水平发展。测量工作与工程结合更加密切,规划设计工作走向科学化、智能化。综观国际测绘科技的发展可知,在当今信息时代,测绘、遥感和地理信息系统(GIS)之间的结合日趋紧密,具有广阔的发展潜力和应用前景。GPS 导航/定位技术具有高精度、高速度和全天候的优良性能,已在大地测量控制网及基线测量、城市测量、工程测量、形变监测、摄影测量和遥感、海上定位、野外勘探定位等领域得到应用,显示出极大的优越性,并且其应用潜力还在不断发挥。这样,数字化自动测绘科技体系已基本形成,并已在许多领域发挥效能。数字化测绘科技体系的主要内容应包括:内外业一体化数字测量与制图;智能型图形、图像扫描数字化装置;摄影测量制图工作站;遥感图像判读及专题信息提取智能化技术和遥感数字制图实用化系统;测绘数据库通用管理系统;地图制图综合专家系统及数字化专题地图设计系统;以及结合各行各业应用的模型、模式的研究。这种数字化测绘科技体系的基本结构框图如图 1-1 所示。

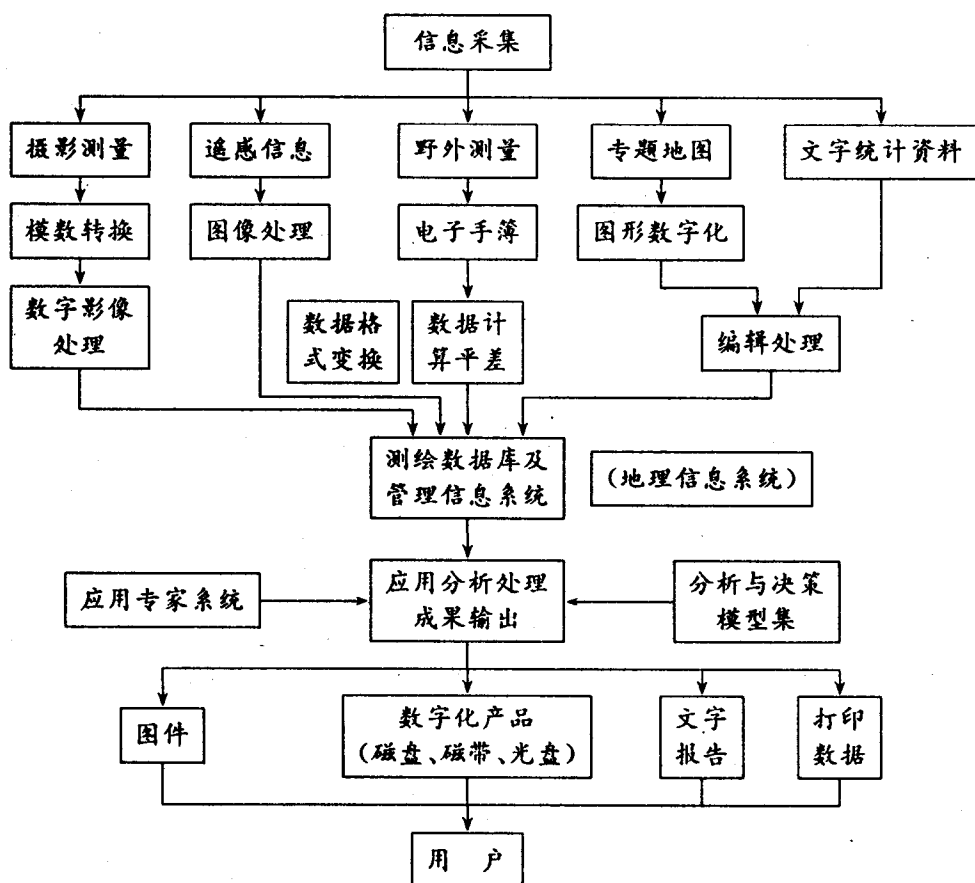


图 1-1 数字化自动测绘技术体系基本结构框图

信息与人类生活休戚相关。早期的信息技术主要是指通讯技术，而现在则是信息的获取（采集）、通讯、存储和处理各类技术全面发展，并且相互渗透，融为一体。信息技术被引入社会生活的各个领域，成为现代技术群中的一种主导技术，促使社会迅速走向信息化或信息网络化。因此，现代信息技术也就是信息化技术。

由于电子速测仪，特别是遥感、GPS、GIS 和智能专家系统(ES)等现代地理信息采集、存储、处理和分析评价科技的发展与应用，促使地理信息学(Geoinformatics 或 Geomatics)或地理信息工程(Geomatics Engineering)学科的形成和发展。它是对有关地理信息的采集、存储、分析、显示、传播及其应用的一门科学和技术。它具有相当广泛的业务范围，包括从利用各种测量技术采集和分析现场的空间数据到在资源开发和环境管理中应用 GIS 和遥感技术。其中，大地测量学是进行空间数据获取和管理的学科基础，并包括地籍测量、海洋测量、矿山测量和各种工程测量以及地图制图学。地理信息学在地球科学的各个领域，资源开发利用，环境科学、农林、城市规划、建设和管理中起着重要作用。本书作为地理信息学的一部分，在当今信息社会中与人们关系密切，期望能对广大测绘和地学工作者，以及相关专业的大学、研究生有一定的参考作用。

第二章 电子速测仪和三维自动测量系统 的基本结构原理

第 2-1 节 概 述

随着现代科学技术的飞速发展,特别是微电子技术、计算机技术、激光、空间技术、信息技术的突飞猛进,近二十余年来测绘仪器跨入了电子化、数字化、自动化的新纪元。大地测绘仪器和摄影测量、遥感仪器设备正处在一个划时代的变革时期,并促使测绘学科和测绘工作的内涵发生重大变革。其中影响特别突出和深远的有光电测距仪、电子经纬仪和全站型电子速测仪、地面综合测绘系统、GPS 全球定位系统和 GIS 地理信息系统。

就大地测量仪器而论,90 年代将进一步向电子化、高精度、自动化和综合测量系统的方向发展。电子速测仪将进一步多功能化,例如加上伺服马达轴系驱动系统则成为自动电子经纬仪,加上 CCD 摄像机则成为摄像电子经纬仪,加上激光扫描器则成为激光电子经纬仪。目前正在发展整平自动补偿、自动调焦、自动照准、自动正倒镜观测、轴系误差自动改正、自动记录观测数据等的电子速测仪。电子速测仪与电子计算机和专用测绘软件构成一个体系——综合测绘系统,将得到普及应用。智能监测和定位测量系统可用于无接触三维坐标测定、滑坡或变形监测区的自动监测。GPS 全球定位系统性能价格比将进一步提高,将日益广泛地应用于各种导航和定位工作,包括全球和区域性大地测量、工程测量、地形测量、航测和遥感作业等。

电子速测仪可同时测定目标的水平方向、斜距和天顶距,并自动记录观测成果,还能直接与适合于外业工作的计算机联结。这类仪器系统有两种型式:组合式和整体式。组合式电子速测仪的优点是,由现有的构件组成,还可以用不同的构件灵活地组合。当个别构件损坏时便于更替。整体式电子速测仪将电子经纬仪和光电测距仪装在仪器壳内构成一个整体,两者应用共同的光学望远镜,一般都配有数据记录器。电子速测仪至少应具备如下功能:测程达到 2km 以上;测距精度不低于 $\pm(5\text{mm} + 5\text{ppm})$;测角精度达到秒级;数据自动记录、可靠储存、双向传输,便于检查修改,有可与计算机联结的通用接口;可自动补偿仪器竖轴的剩余倾斜误差对水平角和竖直角的影响,自动进行地球曲率、大气折光及气象条件的改正。

第 2-2 节 精密光电测距原理的新发展

一、相位测距原理的新发展

目前,光电测距仪正朝着高精度、长测程和轻巧的方向发展。例如威尔特厂生产的测距仪精度可达 $(3\text{mm} + 1\text{ppm})$,测程可达 14km。关于光电测距仪的一般结构原理,在作者所写

的《大地测量仪器学》(煤炭工业出版社,1986年)一书中已有详细论述,这里仅作些补充。

近年来生产的光电测距仪,为了同时满足测距精度和长测程的要求,广泛采用“三测尺频率”方式,且两个粗测尺频率大都相当接近,应用它们的差频来测量相位,保证长测程的单值性解。几种光电测距仪的测尺频率如表 2-1 所示。

表 2-1 测距仪测尺频率

仪器型号	精测频率 f_0 精测尺长 L_0	粗测频率 f_1 粗测尺长 L_1	粗测频率 f_2 粗测尺长 L_2	差 频 $f_1 - f_2$ 相当测尺长 dL
OPTON Elta 2	$\frac{15\text{MHz}}{10\text{m}}$	$\frac{300\text{KHz}}{500\text{m}}$	$\frac{30\text{KHz}}{5000\text{m}}$	---
Kern DM503	$\frac{14.9854\text{MHz}}{10\text{m}}$	$\frac{149.854\text{KHz}}{1000\text{m}}$	$\frac{151.353\text{KHz}}{990.096\text{m}}$	$\frac{1499\text{Hz}}{100\text{km}}$
Wild DI20	$\frac{4.495620\text{MHz}}{33.333\text{m}}$	$\frac{71.369\text{KHz}}{2100.0\text{m}}$	$\frac{69.163\text{KHz}}{2166.666\text{m}}$	$\frac{2.1956\text{KHz}}{68250\text{m}}$
Nikon, ND-21 NTD-4	$\frac{14.972947\text{MHz}}{10\text{m}}$	14.935484MHz	14.223675MHz	---

由上表可见,Elta2 型测距仪采用分散的直接测尺频率方式,频率与测尺长度直接相对应。DM503 型仪器的测距方程式为:

$$D = (N_1 + \Delta N_1)L_0$$

$$D = (N_2 + \Delta N_2)L_1 = (N_2 + \Delta N_2)10^2 L_0$$

$$D = [(N_3 - N_2) + (\Delta N_3 - \Delta N_2)]dL = [(N_3 - N_2) + (\Delta N_3 - \Delta N_2)]10^4 L_0$$

如果所测距离小于 1000m,则仅需频率 f_0 和 f_1 。精测频率 f_0 可以 $\pm 1\text{mm}$ 的精度测得精测读数。当所测距离大于 1000m 时,则应采用差频 $f_2 - f_1$,其相当测尺长度为 100km。上式中 D 为被测距离。 N_1 、 N_2 、 N_3 分别为整测尺长度的个数。 ΔN_1 、 ΔN_2 、 ΔN_3 分别为不足测尺长度的小数。

在 DI20 型仪器中,精测尺长度 33.333m 保证了测距精度,相当测尺长度 68250m 保证可单值地测到 68km。

相当的组合粗测尺长度是这样计算的:

$$dL = \frac{L_1}{L_2 - L_1} \cdot L_2 = \frac{2100.0 \times 2166.666}{2166.666 - 2100.0} = 68250\text{m}$$

因此,DI20 以及 DI5 等测距仪是采用分散的直接测尺频率方式和集中的间接测尺频率方式的组合——混合测尺频率方式,也称为三测尺频率方式。当距离大于 2100m 但小于 68250m 时,利用相当的组合粗测尺和精测尺来测距,同时满足测程和精度的要求。

应该指出,在近年来生产的光电测距仪中普遍采用具有一定计算功能的微型计算机或微处理机,对测距信息的转换和处理较方便、迅速,因而不必苛求测尺长度为整米数和它们之间比值为一百倍或数十倍。

二、计时脉冲测距法

市场上有各种用计时脉冲法测距的产品,其中大部分用于分米精度范围的任务。威尔特

DI3000 型测距仪能够用计时脉冲技术达到 3 ~ 5mm 的测距精度。有时可不用反光镜作合作目标以米级精度测量几百米的距离。这种测距仪在正常大气条件下用单棱镜测距可达 6km 的测程。其测距原理和精度保证技术简介如下：

在 DI3000 型测距仪中，使用波长 865nm 的脉冲式 GaAs 红外激光二极管作光源，光脉冲宽度为几个毫微秒，瞬间脉冲电流达数十安培。从测距仪到反光镜的距离 D_0 可用如下公式计算： $D_0 = \frac{c_0}{2n_0}t$ ，式中 c_0 为光速值， n_0 为群折射率， t 为脉冲往返时间（渡越时间）。在理论上，仅需单个脉冲就能以厘米的精度测定距离。然而，为了减小成果的离散性，提高可靠性，以取得毫米级的精度，就需要分析大量的脉冲。而测量系统单值性的要求限制了脉冲重复频率的使用范围。因此，该仪器设计的脉冲重复频率为 2000Hz，脉冲间隔为 0.5ms。于是，在两个脉冲间隔的时间内每个脉冲的最大传播距离为 75km。为了消除电子线路和光学元器件的附加偏移，如同相位式测距仪那样，也采用交替测量机内校准距离和外部光程相校核的方法。

计时脉冲法准确测定距离的关键问题是准确量测光脉冲的渡越时间 t_m 和大气的群折射率。仪器中所用基准振荡器的脉冲频率为 15MHz，它相当于 10m 的距离分辨率。为了达到毫米量级的测距精度，如图 2-1 所示，可根据参考振荡器整周期数 n 和剩余时间 t_a 和 t_b 来求得渡越时间 t_m ： $t_m = n \cdot T + t_a - t_b$ ，式中 T 为整周期， n 为光脉冲经历的整周期数。采用扫描电压变换器来确定剩余时间 t_a 和 t_b 。原理是，在 1 ~ 2 和 3 ~ 4 的时间内用恒定电流对电容器连续充电，而整周期 T 有给定的电压值，故根据 t_a/T 和 t_b/T 的电压比则可算得剩余时间。利用这种方法作单次脉冲测距能达到几个毫米的分辨率。实际上，DI3000 仪器每次测距时要作数百次甚至数千次这种基本量测，取其平均值后使最后的测距值具有毫米级的精度。此外，大气抖动和热颤动会引起脉冲信号的幅度发生变化，因此接收机应能处理不同强度的接收信号。为此，电子线路中用比较器（过零检测器）来检测第二个振荡的过零点。图 2-2 为 DI3000 计时脉冲测距仪结构原理框图。

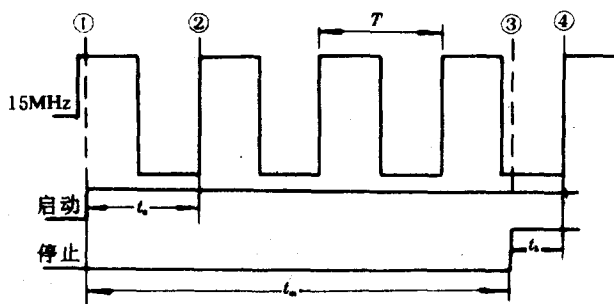


图 2-1 计时测量原理

与相位测距法相比，计时脉冲法测距具有测距时间短，测程长，也即同样测程时脉冲法仪器的光学系统可更小巧些等优点。不过，计时脉冲测距仪的设计和制造技术要求更高些。因此，计时脉冲测量法特别适合于中远程测距仪，以及一些特殊用途，如运动目标的快速测量和不用反光镜的测距等。

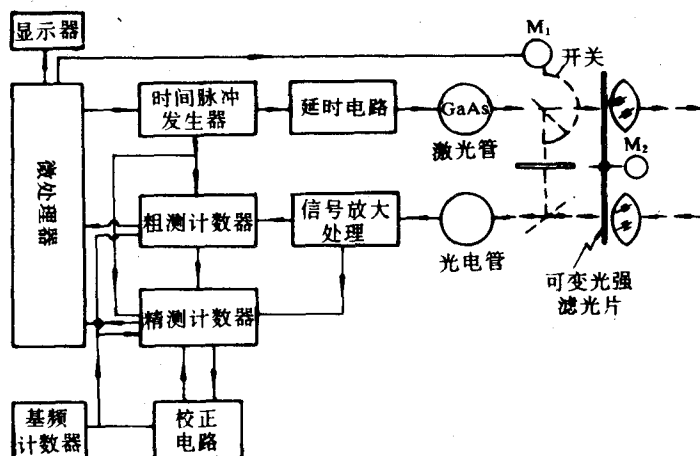


图 2-2 DI3000 计时脉冲测距仪结构原理框图

第 2-3 节 光电测角原理

60 年代人们就试图使测角过程及其记录自动化,并研制了具有“角度—编码—数字”变换器的编码经纬仪样机。至今,归纳起来实现自动化读取目标角位置的技术方案有下列几种:

- (1) 用摄影测量法记录度盘分划值,然后再根据所获影像读取信息;
- (2) 采用电感应变换器、位能变换器、电压变换器等的光电机械法;
- (3) 测定均匀旋转测标(缝隙)通过时间的动态方法;
- (4) 采用“角—码—数字”(编码法)的模拟数字变换器;
- (5) 采用光电法读取光栅度盘的模拟数字变换器(增量法)。

光电数字读数经纬仪(电子速测仪)分类的主要标志是测角变换器的类型。从变换器的设计原理来看,基本可分为两种类型:一是直接把角度变换成编码;另一是把与角度值成比例的中间模拟信号进行离散变换。从获取角度值的方法来看,也有两种:一种是逐次读取角的单位增量(累加变换器);另一种是直接利用给定的仪器部件(计数变换器)读取数字编码信号。美国研制了一种以时间作为角度单位的电子经纬仪样机,这种以时间原理为基础的仪器必须保持轴的旋转速度是个常数,保证轴的旋转姿态稳定,有足够的测时精度。目前,商品化电子经纬仪(电子速测仪)的光电扫描度盘都采用第 4 或第 5 种技术方案。

一、光栅度盘测角原理

所谓光栅就是刻线间距很小的标尺或度盘。通常线条和缝隙等宽。根据测量对象不同,可分为测量直线位移的直线光栅和测量角位移的圆光栅。将两块光栅重合(但不相接触,而保持微小的间距),且它们的栅线有很小的交角,则可看到明暗相间的粗条纹,称为莫尔条纹(Moire Fringe)。若光栅的栅线平行排列,则莫尔条纹的透光部分是由一系列四菱形图案构成,不透光部分则是由一系列黑色叉线图案组成(图 2-3)。

莫尔条纹有下述四个重要特性:

1. 莫尔条纹运动与光栅移动方向具有对应关系

当光栅体中任一光栅沿着垂直于刻划线方向移动时,莫尔条纹就沿着近似垂直于光栅移动方向运动。当光栅移动一个栅距 ω 时,莫尔条纹就移动一个条纹间隔 B ; 光栅移动方向改变时,莫尔条纹也改变运动方向,两者的运动关系是对应的。因此,欲知光栅的移动距离,只需测量莫尔条纹移过的条纹数目即可。

2. 莫尔条纹具有位移放大作用

条纹间隔 B 与栅距 ω 之比称为莫尔条纹的放大倍数 k , 且具有如下关系:

$$k = \frac{B}{\omega} = \frac{1}{\theta} \quad (2-1)$$

式中 θ 称两光栅体的交角,以弧度为单位。一般 θ 角取值很小,因此 k 值很大。例如,当 $\theta = 20'$ 时, $k = 172$ 倍。这就是说,莫尔条纹起着—个高质量可调前置放大器的作用。而—般的光机方法很难取得这样大的放大倍数。由于条纹间隔可调得很大,因此可在一个条纹间隔内设置电子细分装置,实现高分辨率精密测角。

3. 莫尔条纹具有平均光栅误差的作用

莫尔条纹是由一系列栅线的交点所组成的,如果栅距有误差,则各交点的连线将不是直线,但光电器件所接收的光信号是它接收到的所有栅线 N 的综合平均结果,该结果对各栅距误差起平均作用。

假定单个栅距误差为 δ , 形成莫尔条纹视场内有 N 条刻线数,则平均栅距误差为

$$\Delta = \pm \frac{\delta}{\sqrt{N}} \quad (2-2)$$

例如,AGA700 型电子经纬仪的径向光栅为每毫米大约 100 条刻线,若单个栅距误差 $\delta = 1\mu$, 用 $10 \times 10\text{mm}$ 的光电器件接收,则 $N = 10 \times 100 = 1000$ (条线),故 $\Delta = \pm 0.03\mu$ 。

4. 便于实现自动控制和数字化量测

莫尔条纹的光强和反差较大,光电转换后的输出电信号也较强;此外,采用非接触式传信装置,便于准确、迅速地将量测值传送到其他系统,实现自动控制和数字化量测。

由上述可知,光栅度盘测角需要在相对运动中才能累计出角度的变化量,因此它属于增量式测角方式。

莫尔条纹现象是光栅量测技术的基础,而光栅信号(莫尔条纹信号)的光电计数和细分技术的发展与日臻完善,则是光栅量测技术得以广泛应用的前提。下面以典型仪器为例,进一步论述光栅度盘测角原理。

莫尔条纹光电信号是一种非正弦周期函数,但非常接近正弦波信号,可用如下付氏级数表示:

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin\left(\frac{2n\pi}{\omega} + \phi_n\right)$$

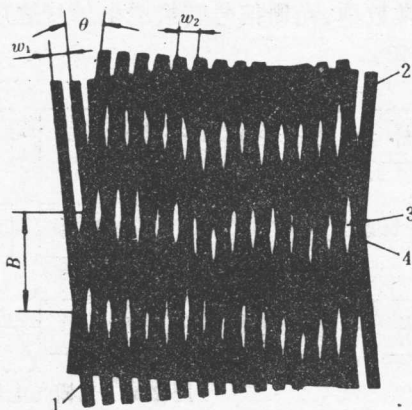


图 2-3 莫尔条纹图像

1—光栅 1; 2—光栅 2; 3—四棱形; 4—叉线

式中 A_0 为常数项。光栅信号转换成电信号之后,需通过电路计数、细分及进一步数据处理,如图 2-4 所示。

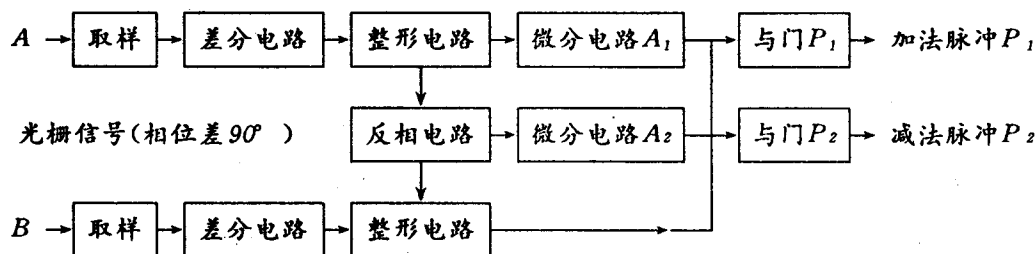


图 2-4 光栅光电信号的计数与细分

一般主、辅光栅产生的条纹相位差为 90° , 于是仪器正转时主条纹相位超前 90° , 输出加法脉冲, 计数器增加; 仪器反转时主条纹相位落后 90° , 输出减法脉冲, 计数器计数减少, 从而实现正确计数的目的。在实际电路中是在主、辅光栅各自 180° 相位差处设置另外二个指示光栅, 再通过差分电路(或其它电路)来消除光栅信号中的直流分量。这样, 除实现判别旋转方向及消直流分量的功能之外, 还提供了四个脉冲, 供电子细分之用。从图 2-4 可见, 只有输出的两路信号同时处于正电位时, P_1 才输出脉冲信号, 否则门电路 P_1 关闭。光栅正向转动时, 进入与门 P_1 的两信号 A_1 、 B 同处于高电位, P_1 开启输出加法脉冲。而 A_2 、 B 不同时处于高电位, P_2 门关闭。同理, 反向转动时, 与门 P_1 关闭, P_2 开启, 实现正确计数。

电子细分有多种方法, 如直接、内插、移向、调制细分等。直接细分法是在一个莫尔条纹间隔内平均安放四个光电器件, 则可得到四个相位差为 90° 的莫尔条纹电信号, 即

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= U_0 + U_1 \sin(\omega t + 0) \\ U_2 &= U_0 + U_1 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \\ U_3 &= U_0 + U_1 \sin(\omega t + \pi) \\ U_4 &= U_0 + U_1 \sin\left(\omega t + \frac{3}{2}\pi\right) \end{aligned} \right\} \quad (2-3)$$

经电路运算后得

$$\left. \begin{aligned} U_{1,3} &= U_1 - U_3 = 2U_1 \sin \omega t \\ U_{2,4} &= U_2 - U_4 = 2U_1 \cos \omega t \\ U_{3,1} &= U_3 - U_1 = -2U_1 \sin \omega t \\ U_{4,2} &= U_4 - U_2 = -2U_1 \cos \omega t \end{aligned} \right\} \quad (2-4)$$

例如, 日本 TOPCON 公司生产的 ETL-1 型电子经纬仪, 光栅度盘 1 周刻有 16200 条刻线, 转动过 1 个条纹相当于转过角度 $80''$ 。由光电接收装置得到相位差为 90° 的四个信号, 经电路处理后得到两个消去直流分量的正弦信号:

$$A = A_0 \sin \theta, \quad B = A_0 \sin\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right)$$

将这两个信号合成后共得四个莫尔条纹电信号, 经整理可简写成:

$$A = \sin \theta, \quad B = \sin\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right), \quad C = \sin\left(\theta - \frac{\pi}{4}\right), \quad D = \sin\left(\theta - \frac{3\pi}{4}\right)$$

这四个信号之间彼此的相位差为 $\frac{\pi}{4}$,相当于相差角度为 $10''$ 。不足 $10''$ 的部分如图 2-5 中的一小段正弦曲线,可近似按直线计算,则

$$\theta = 10'' \left(2 + \frac{d}{d+a} \right) \tag{2-5}$$

这样可通过电路来完成上述计算,得到精确的角度值。这种细分法称为内插法。

此外,竖盘还应设置零位光栅,设置天顶角零位置。还要有适宜的光电接收元件以及一些机内工作软件等。在度盘对径 180° 处设置两组指示光栅,相当于光学经纬仪的对径读数,可消除偏心的影响,提高仪器的角度分辨率一倍。

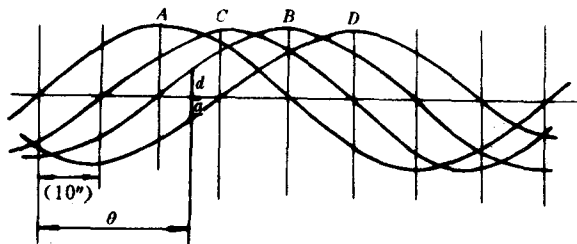


图 2-5 莫尔条纹电信号的细分和计数

随着光电技术的发展,又研制了动态光栅测角方法,其代表性仪器是 WildT2000。它的基本结构原理如下。

1. 测角系统的构成

T2000 信息经纬仪的度盘为刻有一定数目光栅的玻璃度盘。整个度盘被等分为 1024 份,度盘上相间 90° 安置有四组刻划识别器。

为了对竖盘指标差进行自动补偿,改正竖轴倾斜残余误差,在读数系统中采用硅油液体补偿器。通过特殊设计的光路可以补偿硅油折射率随温度而产生的变化。仪器的光学系统如图 2-6 所示。

2. 基本工作原理

在度盘的内、外侧分别安装有一光信号发射和接收系统 S, R , 一个安装在仪器的固定部分, 另一个安装在仪器的可旋转部分(如照准部), 这样 S, R 之间的夹角则随照准方向的不同而变化。 S 和 R 分别为红外发光二极管和接收二极管。在测量时, 度盘在马达带动下以一定的速度旋转, 于是接收二极管断续地接收到发光二极管发来的红外光。有光信号时给出高电平信号; 无光信号时给出低电平信号, 从而完成对度盘的扫描。见图 2-7。

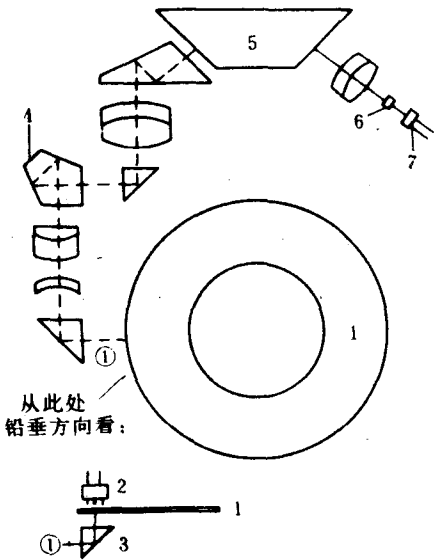


图 2-6 WildT2000 信息经纬仪的光学系统

- 1—度盘; 2—发光二极管; 3—反射镜; 4—五角棱镜;
- 5—液体补偿器; 6—刻缝玻璃; 7—接收二极管

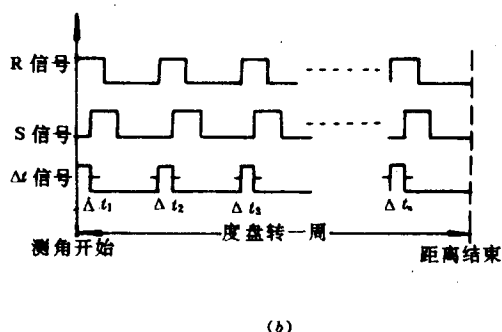
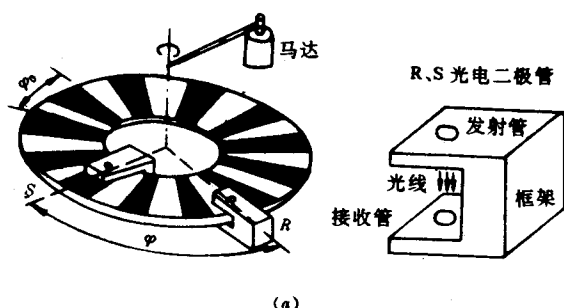


图 2-7 动态测角原理

在图中 φ_0 为一个刻线所代表的角度, 若度盘总刻划数为 N , 则 $\varphi_0 = 2\pi/N$, 而任意角度值 φ 的计算式为: $\varphi = n\varphi_0 + \Delta\varphi$ (n 为正整数, $0 \leq \Delta\varphi < \varphi_0$)。因此, 关键问题是测出 n 和 $\Delta\varphi$ 值。

由图 2-7 可见, 信号 R 和 S 之间存在 $\Delta\varphi$ 的相位差, 相应的时间延迟为 ΔT (脉冲前沿之间)。对应于 $\Delta\varphi$ 的变化范围 $0 \sim \varphi_0$, 则 ΔT 的变化范围为 $0 \sim T_0$ 。假定马达转速一定, 则有 $\Delta\varphi_i = \varphi_0/T_0 \cdot \Delta t_i$ ($i = 1, 2, \dots, N$)。 Δt_i 可用填充脉冲法精确测定。仪器中的微处理机按上式算出 $\Delta\varphi_i$ 后, 再用式 $\Delta\varphi = \frac{[\Delta\varphi_i]}{N}$ 算出最后结果, 实现了度盘的全刻划测角, 彻底地消除了度盘刻划误差的影响。

n 值的测定方法如下: 前面提到的度盘上的四组刻划识别器 A, B, C, D 是专为确定 n 值而设置的。如图 2-8 所示, 若被测角度为 φ , 当度盘旋转一周时, A, B, C, D 均经过 R, S 一次。 R 和 S 发出信号 $R_A, S_A, R_B, S_B, R_C, S_C, R_D$ 和 S_D 。识别器 A 由 R 转到 S 时所对应的时间若为 T_A , 则角度 φ 中所包含 φ_0 的个数 n_A 由下式计算: $n_A = \frac{T_A}{T_0}$ (取整)。同理, 对于 B, C, D 识别器有 $n_i = \frac{T_i}{T_0}$ (i 可为 B, C, D)。因此, 在一周内可测出四个 n 值, 微处理机对它们自动比较, 若发现不一致, 则自动再测定一次 n 值, 以保证该值的正确性。

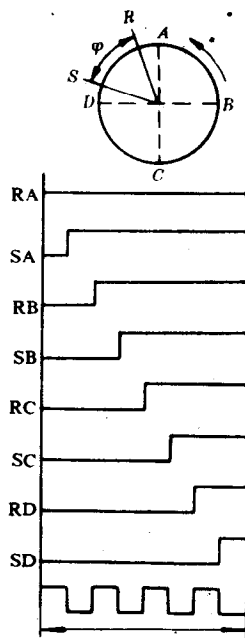


图 2-8 整分划数 n 的确定原理

度盘扫描完毕, 微处理机将 $\Delta\varphi$ 和 $n\varphi_0$ 正确衔接而得到 φ 值。在实际测角过程中, 由于微处理机要对数据 Δt 和 T 及时进行处理, 并适时控制马达转速, 因而在度盘旋转一周时, 对 $\Delta\varphi$ 测 $N/2$ 次, T 测 2 次。

3. 测量值的校准及马达转速的调整

根据动态测角原理, $\Delta\varphi = \frac{\varphi_0}{T_0} \cdot \frac{[\Delta t_i]}{N}$, 式中 T_0 是度盘在马达带动下转过 φ_0 角度所需的时间。显然, 若马达转速不均匀, 则求得的 $\Delta\varphi$ 值将产生较大的误差。为了最大限度地减小这种误差, 在 T2000 中采取了两个措施:

(1) 校准测量值。仪器在对各个 Δt 计数的同时, 对应于 φ 的校准信号也进行计数。因度盘转过 φ 角度仅需 $325\mu\text{s}$, 故在如此短的时间内可以认为度盘转速是均匀的, 则利用公式 $\Delta\varphi$

$$= \varphi_0 \cdot \frac{\left[\frac{\Delta t_i}{T_i} \right]}{N} \quad (i = 1, 2, \dots, N)$$
 所算得 $\Delta\varphi$ 的精度显著提高, 当度盘转速变化较小时误差极小。

(2) 调整马达转速。当度盘转速极不均匀, 以致在 $325\mu\text{s}$ 的瞬间也不能看作匀速转动时, 则用上式算得的 $\Delta\varphi$ 值仍存在不可忽视的误差。为此, 应对马达进行适时控制, 使马达转速基本均匀。办法是: 对 T_i 计数后将其与标准值 T_0 比较, 即按 $\Delta T = T_0 - T_i$ 值的大小给马达输送一反馈信号, 使 T_i 基本等于 T_0 。通过以上两个措施, 使动态测角具有很高的精度。

T2000 测角系统的计数器频率为 1.72MHz , 度盘的转速一般为 3周/秒 , 可计算得 $T_0 = 325\mu\text{s}$, 因而测角的最大误差将达 $0.69\text{mgon}(2.2'')$ 。该误差服从正态分布规律, 则一次相位测量产生的标准偏差为: $\delta_{\varphi_0} = \frac{\pm 0.69}{\sqrt{12}} = \pm 0.2\text{mgon}(0.65'')$ 。此外, 还得考虑度盘半径为 26mm 的分划误差, $0.5\mu\text{m}$ 的分划误差将产生 $1.2\text{mgon}(4'')$ 的角度误差。在度盘动态测量中取大量单次测量结果的平均值作为精测结果, 从而使度盘分划误差之影响远小于一次相位测量的标准偏差。整个度盘为 1024 个分划, 共进行 512 个相位测量, 并取其平均值。因此, 平均值的误差为单次相位测量的 $\frac{1}{\sqrt{512}}$, 精度大大提高了。理论上内部符合精度约为 $0.01\text{mgon}(0.03'')$, 而检验表明, 实际的内部符合精度不大于 $\pm 0.05\text{mgon}(0.16'')$ 。实验结果表明, 室内方向观测精度为 $\pm 0.1\text{mgon}(0.32'')$, 野外方向观测精度为 $\pm 0.15\text{mgon}(0.5'')$ 。

由于 T2000 的动态测角系统与旋转变度盘已消除了度盘分划误差的影响, 故作方向观测时不必要变换度盘位置, 但要从键盘输入起始方位角, 这相当于键入一个起始常数。此外, 由于补偿器的安置精度很高, 对竖直度盘测量无明显影响, 因此, 可以认为两个度盘的测量精度一致。

二、编码盘测角原理

编码度盘测角系统主要包括“角-码”变换器和信号处理系统。模-数变换器的基本原理是用有限个离散值代替不断变化的输入信号, 以此保证信号对时间和电平的量化。磁盘(玻璃盘)是用磁道(或透光和不透光)的黑白元素(量子)的有序结合给出编码。编码的类型有: 自然码、二进制码、单变化循环码(格雷码)、巴尔盖尔逻辑编码、楚泽组合编码等。

光学编码度盘(简称码盘)是一种绝对值式编码器, 它以二进制代码运算为基础, 用透光和不透光两种状态代表二进制代码的“1”和“0”两种状态, 配以一定的电子电路, 就可以实现角度量与数字量的转换, 即模-数转换。

指标线相对于经纬仪度盘的角度位置是一个连续变化的量。当需要由二进制编码数字显示连续变化量时, 最好是当变化量变动等增量时, 数码只变一位数。象这样的二进制码称为累进码。最简单的累进二进制码就是循环码, 或称格雷(Gray)码。表 2-2 表示十进制数 $0 \sim 15$ 的循环码和纯二进制码的关系形式。给出了与 16 个十进制数相当的二进制数必须用四位数。可见, 在第一次变化之后, 循环码的第一位数, 当十进制数每增加 2 时才变化一次; 循环码的第二位数, 当十进制数每增加 4 时才变化一次; 循环码的第三位数, 当十进制数每增加 8 时才变化一次, 等等; 循环码的第 n 位数, 当十进制数每增加 2^n 时才变化一次。图 2-9 表示六十分划的圆弧和以六位数编码的循环码。由于循环码的这一特点, 因此进位时产生的