

986/13

46715

中国测绘学会第二届综合性学术年会论文选编

第四卷

工程测量



中国测绘学会编辑
测绘出版社出版

中国测绘学会第二届综合性学术年会论文选编

第四卷

工 程 测 量

中国测绘学会编辑
测绘出版社出版

中国测绘学会第二届综合性学术年会论文选编

第 四 卷

工 程 测 量

(内部发行)

*

中国测绘学会编辑

测绘出版社出版、发行

测绘出版社印刷厂印刷

*

开本 787×1092 $1/16$ · 印张 $14\frac{3}{4}$ · 插页 3 · 字数 341 千字

1981 年 6 月第一版 · 1981 年 6 月第一次印刷

印数 1—3,300 册 · 定价 2.35 元

统一书号: 15039 · 新176

出版说明

中国测绘学会于一九七九年六月二十九日至七月九日在成都召开了第二届全国代表大会暨第二届综合性学术年会。会议共收到学术论文三百八十多篇。为了汇总这次学术年会的科技成果，扩大交流范围，进一步推进我国测绘科学技术工作的发展。根据中国测绘学会第三届理事会关于编辑出版第二届综合性学术年会论文选编的决定，由学会临时组成论文选编委员会，选编具有一定学术水平的论文，按专业汇集分五卷出版，供广大测绘工作者在生产、科研和教学工作中参考。其中第一卷：大地测量；第二卷：摄影测量；第三卷：制图；第四卷：工程测量；第五卷：测绘仪器。

选编的论文，对已在其他公开出版刊物上发表过，或者已在各单位自己出版印发范围较广的专刊上刊登过的文章，为了避免重复，我们原则上不再刊登全文，而只在附录中刊登论文题目，并引注其刊登刊物的名称，以便查找参考。

本卷论文由李青岳、张大有、朱成麟、范家鼎、沙钟瑞、马立德、顾秉一等同志负责选稿和编辑，徐让同志为执行编辑。

由于我们水平有限，错误和不足之处在所难免，敬希广大读者批评指正。最后，仅向积极支持论文选编出版工作的各位作者、审稿人、印刷出版单位和其他有关同志表示感谢。

中国测绘学会论文选编委员会

一九八〇年元月

目 录

工程测量国外的概况及我国今后发展方向的探讨	李青岳 (1)
大型粒子加速器环形控制网的布设及精度探讨	刘自健、王俊卿、卫治华 (11)
结点平差法任意平差值函数权倒数与中误差的计算	沈迪宸 (39)
论精密工程测量面临的任务	吴翼麟 (58)
用国产HGC-1型红外光电测距仪施测D ₄ 级导线的体会	夏松年、胡世超、姜 文 (66)
航测结合初测现场成图	桂应隆、易铁云 (78)
施工测量中前方交会的平差及精度估计	范家鼎 (93)
高精度短边三角网的几个问题	长江流域规划办公室勘测处 (102)
数理统计应用于工程测量观测数据中若干问题的探讨	陈茂棋 (123)
附合在坚强点间的测边单三角锁的平差	李奠国、于文锦 (169)
航测及电子计算技术在高压输电线路勘测设计中的应用	
.....	电力工业部西北电力设计院 (192)
近景摄影测量在桥梁受害变形观测中的应用	天津市市政工程勘测设计院勘测队 (211)
卫星接收天线的安装测量	同济大学测量教研室 (213)
附录:《出版说明》中所指的部分论文题目及其刊登刊物	(233)

工程测量国外的概况及我国今后 发展方向的探讨

李 青 岳

一切的学科，都是根据人类社会三大革命运动的需要发展起来，工程测量自然也不例外。顾名思义，这门学科就是应用测绘科学的理论、仪器与方法为生产斗争与科学实验服务。近年来，随着其他科学技术（例如电子学、光学、精密机械、计算理论与计算技术等）的发展，工程测量也得到了迅速的发展。同时，为生产斗争和科学实验服务的工程建设，规模愈来愈大，要求愈来愈严格，也对工程测量不断地提出新的要求。也就是说，工程测量吸取了各有关学科的新成就，促进了本身的发展，同时又以其本身的新成就，为其他的学科服务，完成时代对它的要求，对人类作出应有的贡献。

国际学术组织中讨论工程测量较多的是国际测量协会（FIG），该协会设有 9 个专业委员会，它们的活动中都有工程测量的内容。最近的几次学术讨论活动是：1974 年在美国华盛顿举行的第 14 次国际学术讨论会；1976 年由第五与第六委员会联合在西德慕尼黑召开第 7 次国际精密工程测量学术讨论会；1977 年在瑞典斯德哥尔摩举行第 15 次国际学术讨论会；第 16 次会议将于 1981 年在瑞士的蒙特勒举行。除了这个国际性的组织以外，还有一些区域性的活动，例如西欧的一些国家（如奥地利、瑞士及西德等）每隔四年就联合召开一次工程测量的讨论会。另外有些国家（如美国、英国、加拿大、澳大利亚等）每年都召开全国性的测量与制图方面的讨论会，其中也包括工程测量的内容。

工程测量这门学科服务的面很广，大至国家资源的开发利用，小至室内的设备安装、模型试验，各种类型工程建设的规划设计，施工兴建，以及经营运转，都需要它来解决一些理论与实践中的问题。这项工作进行得是否正确，直接影响到工程的设计质量、施工质量以及正常的运营。但是在整个的工程费用中，它所占的比重却很小（根据国外的统计，一般小于 1%）。所以对于这项工作，我们必须予以足够的重视。

工程测量除了直接为工程建设的各个阶段服务以外，在国外，还有土地测量（有时称为地籍测量）这一部份工作，它的任务就是测定土地的边界、计算土地的面积、估计地价以及进行土地的划分。这是一项工作量很大的测量任务，据报道，在澳大利亚的 2500 个专业测量人员中，至少有 1500 人直接或间接地为城市的土地测量服务。我国在城市的规划设计中，也要进行此项工作，称为建筑用地界址的测定，或简称为拨地测量。

在国外，工程测量工作除了由国家有关的机关进行以外，很多是由私人企业来承包的。例如丹麦，其国土只有 43000 平方公里，就有 4 家航空摄影测量公司与 155 个测量企业，另外还有测量计算公司与测量员责任事故保险公司。日本有私营的测量公司 5438 家

(1975 年的统计)，其中有 54 家能进行摄影测量工作。总的来说，全世界的测绘工作大约有 40% 由私人企业来承担。

近年来由于测绘技术发展的很快，国民经济建设中对于它的要求也不断提高，国外很重视测绘作业人员的培养训练。例如英国过去在大学里都没有测量专业，其一般测量作业人员一部份由军事系统培训，一部份则由其他系（例如土木系）转行过来，一直到七十年代，才在少数的大学与学院里设立了测量专业。因此其测量作业人员大都需要培养提高，此任务由皇家测量师协会（RICS）负担，它和能授与测绘科学学位的大学与学院协作，进行测绘新技术、科学管理、土地使用的法律以及外国语言等方面的培训。RICS 的会员来自各个方面，例如建筑测量，土地测量，河海测量、矿山测量、工程量的测量等，各个方面的要求不同，学习的内容也不相同。

以上简单地谈了一下国外工程测量的一般情况，现再就工程测量工作进行的次序，按工程建设规划设计阶段的测量、工程建筑物施工时的定线放样，以及工程建筑物的变形观测三个部份，分别加以叙述，最后对于发展方向谈一点看法。

工程建设规划设计阶段的测量

在这个阶段中，工程测量工作的任务主要是提供地形资料与工程量的计算。提供地形资料的手段一般是采用地形图。对于地形图的质量要求，是用图者与测图者都很关心的问题，对此问题过去所探讨的一般都是集中在精度指标上，即使对这一指标，目前也还没有完整确切的结论。实际上，地形图是传递地形信息的一种工具，它的质量指标不只是一个精度问题，还有详细程度、清晰程度、便于使用等，以使用图者能获得适当的信息，构成对于实地空间关系的图象，解决设计中的问题。所以近年来就有人根据信息论的理论来讨论供工程设计使用的地形图的质量问题。

为了获得地形资料，近 20 年来，航空摄影测量逐渐地代替了野外的断面测量与细部测图。地面测量只用于小的面积。不过对于设计所需要的高程资料，航摄像片有时尚难以满足，还需进行地面的高程测量。

对于航摄像片的取得，除了应用一般航空摄影的方法外，对于大比例尺的测图，国外还有的应用直升飞机进行低空摄影。最初因为飞机震动太大，影响摄影质量。近年来由于采用了专门的减震装置，已取得良好效果。例如美国曾以航高为 300、200 与 100 米进行低空摄影，制作了 1/240、1/120 比例尺的地形图。对于遥控的航模摄影，在美国偏僻地区的土地测量中也曾采用。

对于航摄像片的应用，除了制作线划地形图以外，近年来已采用将摄影时的中心投影转换为正射投影的方法而印制正射象片图。为了获得这种正射象片，美国研制了全能自动测图仪（UNAMACE），西德有蔡司正射投影仪，加拿大研制的有 GPM I 型自动测图仪。后一种仪器一方面能自动晒印正射象片，一方面另外加了一些装置，可以晒印正射立体象对，以供模型量测与判读之用。

航摄像片除了用以制作地形图以外，还可以将其数字化。即在摄影立体模型上选取一定数量的点子，用带有自动记录装置的立体坐标量测仪自动量测和记录点的 x 、 y 坐标，

并求出 z 坐标。再经过插值计算，即可由象片资料获得许多地面点的空间坐标，把它们记录在磁带上，就建立了所谓数字地面模型 (Digital Terrain Model 简称为 DTM)。应用它们再辅以电子计算机，就可以自动地进行工程设计。这种方法最早用于公路的选线，现正在研究扩大它的应用范围。

地面摄影测量在工程建设中的应用，已经有比较长的历史。它不但能施测地形图，同时还广泛地应用于非地形测量方面。既能施测静态物体，也能施测动态现象，甚至快速移动的物体。因此所使用的摄影机就不限于传统的摄影经纬仪，也可使用普通照象机、特种（快速）摄影机、同步摄影机以及电影摄影机等。为了适应工程测量的需要，地面摄影测量的仪器正向着全能方向发展，使它有同步快门，能自动换片，能进行倾斜摄影。例如东德 Zeiss 厂的 UMK 10/1318 全能摄影经纬仪，就是这种类型的仪器。对于近距离精密立体摄影测量所用的仪器有 SMK 5.5/0808，这种仪器附有固定长度（40 厘米与 120 厘米）的基线架，适用于对小目标作近景摄影测量。

由于摄影器材的改进，高精度量测仪器的采用，以及电算技术的应用，使地面摄影测量的精度不断提高，目前不少国家在采用这一方法对各种不同的工程建筑物进行变形观测，取得了较好的效果。例如西德波恩大学对房屋建筑物所作的变形观测试验，在 x 、 y 、 z 三个方向测得的精度为 1 ~ 5 毫米。美国工程测量机构在一滑坡地区进行的监视测量工作，在摄影距离为 520 米时，坐标的偶然中误差为 1.2 厘米。

对于近景摄影测量来说，目前采用普通照象机的方法发展很快，由于它装备简易，轻便灵活，能解决常规摄影测量设备难以解决的问题。因为普通照象机没有框标，无法直接量得以象主点为原点的象点坐标，所以在实际应用中必须采用数学方法进行分析，用事先编好的电算程序来解算。从目前试验的情况看来，如果摄影距离在数米以内，所求点坐标的精度可小于 1 毫米。

除了使用摄影测量的方法以外，还可以使用自动化的测量仪器，直接获得所需要地形资料。例如美国地质测量局应用惯性导航系统的原理，研制了三维坐标惯性测量系统 (IMU)。它系由精密的陀螺仪、加速仪、激光测高仪与电算机互相配合，装置在车辆上或飞机上使用。从一个已知坐标的点出发，可以根据需要，随时显示出它所在位置的三个坐标，其精度在 0.5 米以内。美国曾用它在低航高上测量一河谷的地形，用以根据百年一遇的暴雨来确定河流的洪水位。这种测量方法如果试验成功，将在测量领域内引起一次革命。为此，它受到了测量工作者的重视。1977 年 10 月，曾在加拿大举行第一次“惯性技术在测量领域中的应用”国际学术讨论会。

近年来短程（测程在 5 公里以内）电磁波测距仪器的发展，对工程测量工作起了很大的促进作用，使得控制网的布设灵活，细部点测量的精度与速度大为提高。这种仪器按其功能来说，大致可以分为三种类型。第一种是只测距不测角的仪器，它适用于建立测边网，精度比较高。例如瑞士的 ME-3000，英国的 MA-100，东德的 EOK-2000。第二种是测距与测角配合的仪器，适用于导线测量，例如瑞士的 DI 10、DI 3 S 等。第三种称为全站式电子速测仪，它一方面可以用电磁波测距，同时使用编码度盘可以自动测角，并且附有小型电子计算机，可以自动归算。例如西德的 Zeiss Reg-Elta 14、瑞典的 AGA710、

美国的 HP 3820 A 等。这种仪器的发展方向是自动化、高精度与小型化，例如 1970 年前后问世后 Reg-Elta 14，仪器重 20 公斤，连附件共重 80 公斤，而 1976 年所介绍的 HP 3820 A 仪器连附件总重是只有 9.5 公斤。

以上所述的是陆地上测量的情况。为了海洋资源的开发而进行工程建设时，还需要进行海洋测量，从测量的观点来看，它包括海上定位与水深测量。就海上定位来说，沿岸地区可应用岸上的控制点用光学仪器进行交会；当距离较远时，则需利用电磁波测距来进行定位。这时采用的有两种系统：一种是圆系统，它是由主台向两个副台（岸上的已知点）进行测距，用两段圆弧交出主台的位置，例如 RAYDIST、AUTOTYPE 等系统；另外一种是双曲线系统，它是由主台测定到岸上的基线两个端点距离的差数，由两条双曲线来交出主台的位置，例如 DECCA、SEA-FIX 等系统。当点位更向海洋延伸时，则须布设海洋控制网，设置水声浮标，用水声测量的仪器以建立空间测边网的方法测定其位置。海上定位也可以利用船载的惯性测量系统，而目前应用较多的是利用人造卫星进行多普勒观测。水深测量则采用中、深海的回声测深仪。

工程建筑物施工时的定线放样

工程建筑物的定线放样，是设计与施工间必不可少的连系环节，它是工程测量领域内极为重要的一项工作。但是有时由于人们的重视不够，因而造成重大的损失。为此，近年来这项工作在国外已受到了应有的重视。

要进行放样工作，首先遇到的就是精度要求问题。在国外，也有“放样工作愈精确愈好”的提法，近年来欧洲的一些国家（例如英国、西德、匈牙利、波兰等）提出的论文批评了这种观点，一些高等学校也在组织力量研究施工限差与测量误差之间的关系。另外，国际测量协会（FIG）的第六委员会与国际建筑工程研究协会（CIB）的 W.49 工作组联合组成了研究小组，并在 FIG 的第 14 届学术讨论会上提出了“放样工作的国际标准”的建议。瑞典国家建筑标准研究所的工作小组研究制定了“建筑场地上的测量与放样工作的瑞典标准”，也在这次会议上提出报告。

放样工作与测图工作相比较，它具有很多特点，但是它也要遵循由总体到局部的原则，也就是说，它也要首先建立控制网，然后再进行细部放样。这种控制网一般称为施工控制网（也称专用或特种控制网）。由于它具有明确的目的性，针对性很强，例如隧道控制网主要就是保证相向开挖面的正确贯通，桥梁控制网则是用以精确地测定桥长与墩台定位，对于高能加速的建设，为了保证各种部件的精密定位，需要建立高精度的环形控制网。因此就要根据实际需要，对于布网的图形与观测方案进行设计。这就与测图控制网根据规范的要求进行工作不同。近年来，为了探索微观世界的秘密，各国相继建立高能加速器这一实验设备。其规模愈来愈大，能量愈来愈高，例如早期欧洲粒子研究中心（CERN）的第一期工程，能量为 280 亿电子伏特，当时为了建立八边中心多边形的量边测角网，曾在地下开挖了八条辐射形的隧道，其测角精度为 $0''.2$ ，量距精度为 100 米的长度误差在 10μ 以内。以后美国建设 330 亿电子伏特的布鲁克海文环形加速器时，就没有开挖辐射形隧道，而是在环形的隧道内布设了由伸长三角形组成的量边测角环形控制网，共计 24 个控

制点，其测角精度为 $0''2$ ，量边精度为 25μ 。为了实现这种高精度控制测量的要求，工程测量工作者进行了一系列的工作，它包括：(1)研制各种高度稳定的特种测量标志的结构形式，以保证地面与地下控制网的稳定性。(2)设计和制造在加速器施工的条件下进行测量工作所需要的特种仪器和设备，例如高精度强制对中的经纬仪，自动对中和置平的激光准直仪，不同类型的测尺，显微镜测微装置等，并对它们进行现场实验。

对于其他工程的施工控制网来说，也各有其特点，例如对于地下工程的施工，地面与地下的控制网系分别建立，而共同的作用是保证相向开挖面的正确贯通。对于特别长的隧道，例如日本由北海道到本洲的跨海地下高速铁路隧道全长为 53.9 公里（有 23.3 公里在水下），这时地面上的控制网就尽可能地作得精确些。该工程的地面三角网于 1965 年建立，最大边长为 35.2 公里，当时用 Wild T3 观测，其观测方向的标准误差为 $0''6$ ，基线用 Geodimeter model-2 量测。至 1970 年又将该网重测，所有的边长均用激光测距仪进行了量测。两次比较，边长最大的较差为 6.8 厘米（该边长为 22698.671 米，相对较差为 3×10^{-6} ）。隧道两端水准基点的高差，系使用 T3 经纬仪以精密三角高程测量测定，于 1965，1970，1971 共观测了三次，三个结果相比，最大较差为 11 厘米。隧道施工的地下控制网，一般均为支导线，为了减少测角误差的累积对于横向贯通的影响，除了采取措施（例如采用三联脚架法与适当的照准标志等）来提高测角的精度外，国外还采用在导线中间加测陀螺方位角的方法来控制测角误差的累积，例如连接英、法两国穿过英吉利海峡的隧道（全长约 52 公里）开挖中，就采取了这种措施，据报导，他们仔细地使用陀螺经纬仪，测定方位角的精度可以达到 $5''$ 。

在控制网的分析中，过去认为非常繁复的精度计算，近年来由于电子计算技术的应用，已变为不大费时的工作。这样就可以根据对控制网的具体要求，按概率论与最小二乘法的原理，绘画各主要点的点位误差椭圆或相对误差椭圆，反复地进行计算比较，选择最好的布网方案与观测方法。亦即可以把最优化的理论应用于施工控制网的设计中。

对于控制测量观测成果的质量评定，一般是根据平差计算结果计算单位权的中误差。近年来由于统计检验与电算技术在测量领域中的应用，对于观测成果可先以最少的约束条件（外部附合条件）进行平差计算，以使其不受起始数据误差的影响。这时，如果认为各观测值的改正数 v 为正态分布的随机变量，则 $[pvv]$ 就是 χ^2 分布的随机变量，可以对它进行 χ^2 检验（这时显著性水平 α 一般取值为 0.1 至 0.01，通常取 0.05），以研究观测中是否有系统性的误差，观测与计算中是否有粗差存在。在确认观测质量良好以后，即可应用全部约束条件进行平差计算。

对于工程建筑物施工与设备安装中的细部放样来说，激光技术的应用，起了很大的促进作用，无论在精度还是在速度方面，在施工测量中应用激光技术都有其优越性。按其用途来说，施工测量中所用的激光仪器大致地有以下的四类：

1. 激光水准仪：利用置平设备将激光束置平，即可用以传递高程，置平设备可以用水准器（这是常用的方法），也可以使用自动置平设备，例如东德的 Zeiss-gena Ni-007 带有补偿器的自动置平水准仪上增加了激光附件，就形成了自动置平的激光水准仪，再辅以装有光电探测器的水准尺，在视线长度 100 米的情况下，其精度为 0.7 毫米/公里。另

外还有使用光电探测设备置平的仪器，例如加拿大新布伦瑞克大学测量系研制的光电激光水准仪，它是使用竖直装置的激光器，其发射出来的激光束用分光镜分为两部份，一部份折射 90° ，水平的射出去，一部份竖直向下经水银面上的反射镜反射至光电探测器上，以便调整使其垂直，亦即使另一光束水平。根据试验的结果，对于相距为 1 米至 100 米的两点，其高差测量的标准误差为 $0.01 \sim 0.1$ 毫米。不过在使用时，仪器应放在两点的中间，以消除其系统误差的影响。此外，瑞典还研制了一种激光平面仪（AGA Geoplane 300），仪器用补偿器自动置平，旋转的光学系统（旋转的速度从每秒 10 转开始，可以变化）有两个出光孔，发出两条闪动的激光束，由它们的重叠部份，形成一个水平面，可以在 200000 平方米的范围内应用。接收装置可以用激光探测器，也可以用水准尺。为了进行精度试验，曾将用此仪器测得的高程与用水准仪测得的高程相比较，结果为：当使用探测器时，距离为 100 米时不符值为 ± 2 毫米，距离为 150~200 米时，不符值为 ± 6 毫米。

2. 激光经纬仪：激光技术应用在经纬仪上大致有三种类型。第一种是激光器代替了望远镜的功能，而成为其主要部件，另外加一个附属的瞄准设备。其中有的激光器可以通过天顶纵转，有的不能纵转而可以从支架上取下换置。东欧一些国家生产的仪器多为此种类型。第二种是在一般经纬仪上附加激光附件，其中有的是使激光束与望远镜的视准轴重合，例如瑞士 Kern 厂生产的 DKM₂-A₁ 型的仪器，激光功率为 5 毫瓦，白天测程达 400 米，在 100 米处的光斑直径为 7 毫米；在 Wild 厂的 T2 型经纬仪上，可加激光附件 GL-01，这些仪器的激光器都不是放在望远镜上，以减轻其重量，而是由光导纤维将激光束导至望远镜中射出。这是一种比较常用的激光经纬仪。第三种是激光器代替了望远镜，但是它既不能通过天顶纵转，也不能从支架上取下换置，只能安置在一定的位置上使用。例如美国出品的 LT-3，这种仪器实际上是一种导向仪。

3. 激光垂直投影仪：在工程建筑物的施工中，常需要垂直向上或向下投影的仪器。这种仪器可以利用水准器将激光束安置到垂直位置上，例如西德生产的 LJL-132 激光铅垂仪。也可以使用自动安平的设备达到使激光束垂直的目的，例如波兰生产的 APLO-KP3 激光铅垂仪（此仪器无激光器，需要与 KP2 型激光水准仪配合使用）。它们的主要部件是用金属细丝悬挂的五角棱镜，由它将水平射来的激光束折射向上或向下，而进行垂直投影。

4. 激光准直仪：直线定线是工程施工与设备安装中常常遇到的测量工作。随着国民经济和国防建设的发展，对直线定线（或称准直）的精度要求愈来愈高，例如高能直线加速器的定位，高速滑行轨道的铺设，大型机械设备安装等，都要求有 0.2 毫米以上的点位精度或 10^{-6} 以上的直线度，常规的直线定线方法就很难满足这些要求。激光准直仪就是适应这些需要而发展起来的。它的应用有两种情况，一种是利用光电探测器直接测定激光束的能量中心来确定直线上的点位，也就是用激光束来代替一般的人眼照准来定线。第二种是利用激光的单色性好、相干性强的特点，应用波带板使其发生衍射现象，以探测器探测其形成的衍射图案的对称中心来确定直线上的点。第二种方法可以达到较高的精度。例如美国加利福尼亚州的斯坦福直线加速器 3 公里的定线，通过真空管道采用这种方法，精度达 10^{-7} 。英国国家物理实验室在大气中采用这种方法，对于 1 公里的定线也达到了 10^{-6} 的精度。

现在再简单地谈一下激光仪器在工程建筑物的施工中应用的概况。在工业与民用建筑场地上，清楚的红色光束给定位放样提供了很好的依据，对于场地平整与楼层模板的放样，可以使用激光平面仪，例如瑞典在使用此仪器时，将探测器装在推土机上，用以在场地平整中控制填挖的高度，其精度可达1厘米；西德曾用此仪器放样水平的混凝土模板，浇灌后又用此仪器（使用探测器）检测其高程，与用一般水准测量所得的结果相比较，平均误差为2.1毫米。在基础打桩时，可以用激光束标出桩群的轴线，再辅以距离丈量，即可方便地确定桩位。对于柱子的垂直度，可以用两架激光经纬仪进行校准，指挥工人操作。在地下管道的敷设中，可用激光经纬仪（或水准仪）指出管道中线的方向与坡度。激光垂直投影仪用于指导高层民用建筑与烟囱的施工。对于机械设备的安装，则可使用激光准直仪。

在桥梁建设中，当进行水文测验时，可用激光仪器建立方向线，以便沿着它进行测深。在桥墩施工的初期，对于浮运工具与抛锚地点的定位，由于其工作频繁而精度要求不高，使用激光经纬仪进行前方交会，非常方便。在跨越结构物的架设中，可用激光仪器检核主桁架的直线性与其高程。对于桥梁由于动荷载而引起的瞬间变形，可用绘有格网的接收屏焊接于观测点上，在岸上用激光经纬仪照射接收屏，观测时用电影摄影机记录光斑在格网上的位置变化，从而求得其变形值，其精度可达2~4毫米。

激光仪器在隧道建设中的应用，主要是用以指示开挖的方向与通过竖井向坑道内投影。在用盾构或联合掘进机开挖隧道时，激光导向设备主要为发射装置与接收装置两大部份。发射装置要根据地下控制点安置在设计的方向上，接收装置可以是目视的画有格网的接收屏，也可以是自动化的光电接收设备。例如美国新墨西哥州的地下工程施工时所用的光电接收设备为200个光电池组成的0.14平方米的陈列。使用前将激光束对准陈列的中心。当掘进机向前推进时，如果方向偏歪，则由光电池的电能将偏歪值传送到推进器上，随时进行校正。通过竖井向坑道内投影，则采用前述的激光垂直投影仪。

工程建筑物的变形观测

工程建筑物的变形观测是工程测量中比较年青的一部份，它的发展决定于工程地质、土壤力学、土工技术、房屋建筑、工程力学及电子学等学科的发展，随着时代的需要，近年来愈来愈受到人们的重视。FIG的第六委员会一直设有变形观测研究小组，不少的国家对这一方面的实践和研究进行了大量的工作。

与其他的测量工作一样，在变形观测中，首先遇到的一个问题就是观测的精度要求问题。目前对此尚无统一的分析方法。根据FIG的研究小组在学术讨论会上提出的报告，变形观测的精度要求决定于预计的变形值的大小和观测的目的。如果观测是为了监视建筑物的安全，则其观测的中误差应小于允许变形值的 $\frac{1}{10} \sim \frac{1}{20}$ 。如果观测是为了研究其变形的过程，验证设计理论，则其中误差要比上述的数值小得多。近来有人根据上述原则，又作了比较详细的分析，认为变形的过程一般是由快到慢而后趋于稳定，每个周期观测的精度就不一定相同，其方法是根据一段时间观测的结果，用多项式回归的方法建立建筑物

的动态模型,以后就可按此模型求得预期的变形值,再根据预期的变形值与允许的变形值来确定观测的精度。采用这种分析方法,开始时观测精度可稍低,愈到后来精度应愈高。

对于比较大的工程建筑物,除了测量其相对位移以外,一般认为还应测定其绝对位移,以便分析整体变形的情况。这样就需要建立高精度的控制网。对于这种小规模的控制网,一般观测的精度都是很高的。例如英国对 Llyn Brianne 坝的位移观测所布设的控制网,边长只有 300 米左右,其观测墩的埋设,一方面可以进行三角测量,另外也可以进行三维的三边测量,以便使用两种方法观测,互相校核。对于这个网的基线曾用两种精密的电磁波测距仪 MA100 与 Mekometer II 进行观测。

为了测定工程建筑物的绝对位移,必须有稳定不动的控制点作为依据。因此就需要对固定点的稳定性进行检验。检验的方法最简单的是根据点子的结构和它所处的条件,一般定性的判断其稳定性,通常选择一个或几个可靠的固定点作为起始点,就是采用这种方法,但是在实际上,除了埋置在基岩上的固定点以外,很难确定那一个点子是绝对稳定的,尤其是在冲积地区所设置的固定点,更是如此。这样就需要对每个固定点都定量的进行稳定性的分析,以判断其可靠的程度,选择最稳定的点子作为起算点。例如对于沉陷观测来说,就可分三种情况分析。前面两种情况不考虑观测误差的影响,相对于水准点的升降来说,测量的误差应该小至略而不计。第三种情况则分析所测得的水准点的高程变化值是否由于观测误差所引起。现在将三种情况分别叙述如下:

第一种情况是知道各水准点变化的总趋势(普遍下降或上升)。这时可利用相邻两次观测的各水准点间高差的差数来分析各水准点的稳定性。设 i 、 k 两水准点向第一次测得的高差为 h'_{ik} ,第二次为 h''_{ik} (此高差应为平差后的数值),则高差差数 $\Delta h_{ik} = h''_{ik} - h'_{ik}$ 。由此对任何一个水准点 i ,都可以求出它与其他 $(n-1)$ 个水准点(n 为水准点总数)高差差数的总和 $\omega_i = \sum_{k=1}^n \Delta h_{ik}$ 。如果水准点总的变化趋势是下降(即负的变形),则 ω_i 的负值最大的 i 点,可以认为是比较最稳定的水准点。反之,如果总的变化趋势是上升,则 ω_i 的正值最大的 i 点应该也是比较最稳定的一点。

第二种情况是水准点的升降系随机性的。这时,在首次观测时,可取认为比较最稳定的一点作为起算点,测得各点的起始高程。在重复观测以后,可认为各点的高程为近似高程,而计算各水准点高程的改正数(或变化值) Δ_i 。计算时把各水准点都认为是结点,按结点法平差的规则写出法方程式,但是由于没有固定的起算点,该法方程式组无定解。为此,可根据“水准点高程变化系随机性的”这一前提,增加一个方程式,其形式为 $\Delta_1 + \Delta_2 + \dots + \Delta_n = 0$,这样就可以解得各 Δ_i 值。如果求得的各 Δ_i 值相差较大,可取 p_i 与 Δ_i^2 成反比,将附加的方程式改为 $p_1 \Delta_1 + p_2 \Delta_2 + \dots + p_n \Delta_n = 0$,再进行计算与分析。

第三种情况是测量时有固定的起算点,根据它来检查其他水准点的稳定性。这时可由重复观测的结果,按一般方法求出各水准点 i 首次测得的高程 H_i^0 与第 γ 次重复观测所得的高程 H_i^γ 之间的差数 d_i 及其权 p_i ,用统计检验的方法来分析水准点的稳定性。为此,

组成统计量 $\theta^2 = \frac{[pdd]}{\eta}$ (η 为独立的 d 的个数), 另外根据重复观测平差计算的结果,

可以计算 $u^2 = \frac{[pvv]}{m-t}$ (m 为观测值的个数, t 为未知数的个数) 然后再组成 F 变量,

即 $F = \frac{\theta^2}{u^2} = \frac{\chi_1^2/f_1}{\chi_2^2/f_2}$ (式中 θ^2 为 χ_1^2 变量, 其自由度为 $f_1 = \eta$, 称为第一自由度。 u^2 为

χ_2^2 变量, 其自由度为 $f_2 = m - t$, 称为第二自由度)。取一定的显著性水平 α (一般取其等于 0.05), 即可按 α 、 f_1 、 f_2 的数值, 在预先制就的 F 分布的数表中查得应有 F 值

(F_α, f_1, f_2), 如果算得的 F 值小于查得的 F_α, f_1, f_2 , 则认为水准点是稳定的, 所产生的 d_i 值, 系由于观测误差所引起。上述为一次观测中总的检验, 至于每一点的稳定情况, 可按对该点多次重复观测的结果来检验。设对该点观测了 k 个周期, 每次沉陷值为

s_i , 中误差为 m_{s_i} , 则其观测误差的代表值为 $m_0^2 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k m_{s_i}^2$ 。如果每年观测 n 次,

于是一年中的平均沉陷为 $\bar{s}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_i$, r 年中的平均沉陷为 $\bar{s}_i = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \bar{s}_i$, 则随年观

测周期而发生的高程变化的代表值为 $m_{i+}^2 = \frac{n}{r-1} \sum_{i=1}^r (\bar{s}_i - \bar{s}_i)^2$, 由此可组成统计量

$F = \frac{m_i^2}{m_0^2}$ 而进行上述的 F 检验, 以确定该点的稳定性。这种方法既可以检验水准点, 也可

以检验观测点。以确定其沉降是否终止。

在变形观测的方法方面, 近年来国外研制了把机械位移转换成电信号的各种类型的传感器, 使其便于长距离的传送和进行处理, 向着自动化的方向前进, 以适应变形观测中精度要求高、提供成果快的要求。

对于变形观测数据的整理, 首先要检验观测成果精度的均匀性。为此, 对于沉陷观测而言, 重复观测的水准线路应尽可能组成多的闭合环 (例如国外某高能加速器的观测就组成 30 个闭合环), 根据这些环的闭合差 Δ 进行统计检验, 一般认为 Δ 是正态分布的随机变量进行 χ^2 检验。其次要研究引起变形的原因, 为此要进行相关分析, 计算变量之间的相关系数, 以为建立回归方程的依据。第三就是根据大量的观测数据, 确定变形与各主要影响因素之间的关系公式, 以便预测预报变形值。为此要采用回归分析的方法。

关于我国工程测量今后发展的方向, 根据当前的一些情况, 提出下面几点看法, 供大家讨论。

1. 摄影测量方法在工程测量领域中的应用。

用航空摄影测量的方法制作中、小比例尺的地形图, 已有较长的历史。为工程设计提供大比例尺地形图, 近年有了很大的发展。此外直接由航摄像片取得的数字资料, 对于设计应用, 也很方便。因此, 为工程的规划设计提供地形资料时, 摄影测量方法已成为非常重要的手段。

非地形测量的摄影测量，对于解决工程建设中的问题，起着很大的作用，前述的动态观测，就是一个例子。为此应从提高其成果精度方面加以研究，使其能适应更多的要求。

2. 工程测量的精度要求问题。

工程测量工作都有明确的目的，为达到此目的应如何经济合理地进行测量工作，精度要求是一个基本问题。目前工程设计中对于地形资料的要求，各项工程施工放样的要求，施工限差与施工控制网精度和放样精度之间的关系，以及各项变形观测的精度要求等，都还没有完善的解决。因此，一方面要进行理论分析，同时更要总结我国生产实践的经验，从中找出规律。

3. 短程电磁波测距仪的研制与应用。

前已述及，这一仪器对于工程测量工作的促进很大，各种类型的（中等精度的、高精度的）短程电磁波测距仪，国外已经很多，而我国尚未普及。为此，一方面要研究仪器的制造，同时也研究其使用方法，例如布网方案与操作规程等。

4. 激光仪器的研制与应用。

激光仪器应用在工程测量领域中，无论是在速度或精度方面，都有其优越性。而在实现工程测量的自动化中，它也是一种有力的工具。现在国内已有不少的单位在这方面进行研究，但是应用尚不普遍。

5. 概率论与数理统计方法在工程测量中的应用。

对于测量成果的数学处理，最小二乘法应用已久。近年来数理统计方法已日渐增多地引用到工程测量领域中来。无论是观测质量的评定，观测成果的处理分析，以及最后整理，都更多地采用这一方法。我们应加强对其应用的研究，使工程测量工作更符合客观规律。

6. 海洋测量的仪器与手段的研究。

我国海域辽阔，无论是海洋资源的勘探，航海用图的提供，以及海洋工程建设，都需要进行海洋测量。我国在这一方面作的工作尚不多，需大力开展。就全世界来说，水域约占地球总面积的70%，而测绘的1:100000以上比例尺的水下地形图，大概还不超过5%（1972年的调查）。所以在世界范围内，这也是一项巨大的工作。

大型粒子加速器环形控制网的布设 及精度探讨

刘自健 王俊卿 卫治华

内 容 提 要

本文根据大型粒子加速器精密工程环形巷道的特点和对测量所提出的超高精度的要求,对几种可能的环形构网方案的几何构成及精度作了详细的计算和理论探讨,进行了分析和比较,得出了若干结论,供进行这项工程测量设计时参考。

前 言

大型粒子加速器,从设计、施工、安装、调试直至运转当中,都离不开精密工程测量,而且都是现有的仪器设备与操作技术所无法胜任的。因此,必须从技术理论上、仪器设备研制上及专门人员培养上狠下功夫,才有可能适应这方面的特殊需要。

本文拟就大型粒子加速器精密测量中一个重要组成部分,即环形控制网的布设及精度问题,作些探讨,供设计参考。

一、大型粒子加速器环形控制网的特点及要求

粒子加速器通常称为高能加速器,目的是生产和加速高能粒子束,并对物质的“基本粒子”结构及运动规律作探测实验。所谓大型粒子加速器,是指它的能级从几百亿电子伏到几千亿电子伏甚至更大的高能加速器。它的构成主要由直线加速器、环形助推器、主环加速器及试验探测等几部分组成。其中助推环和主环都是建筑在地下的圆环形巷道内。在这样的圆环巷道中布设测量控制网,由于受到地形、环境、超高精度等各种限制,与一般地面测量控制网情况很不相同。因此,在研究布网之前,应首先分析圆环形巷道的特点和工程对测量的基本要求。

环形控制网点必须布设在一定宽度(一般不超过5~6米)的圆环形水平巷道内,构成闭合环网,与地面上的点无法通视,必须用特殊方法才能联测。由于巷道的弯曲,视线受阻,图形边长受到限制,图形结构和点位的选择还必须紧密结合施工、安装、调试以及便于复测等条件通盘考虑。

环形控制网各点的标石、标志、对中设备、照准装置等都必须专门设计,要充分掌握地层地质、施工方案,并事先设计好量测方法、操作要领。要使设计的标点便于使用和维护,又能长期保存,稳固可靠。

圆环巷道虽在地下，温差比地面为小，但水平温度梯度仍然存在，经典的测角方法因受水平折光等影响，精度在达到一定限度后很难进一步提高。加之视线长短悬殊，对观测精度很不利，所以控制网的施测，不宜以测角为主，而只能采用高精度测边或者带测部分主要角度。这就要求图形结构划一、构网坚强、密度均匀，既能构成必要的几何条件，又能尽量减少量尺的种类，以便施测。

工程安装及调试对测量提出了超高精度的要求。因为粒子在环形加速器中受控并被不断加速，其轨道极接近于圆曲线，加速器磁件上的测点必须精确地安装到理论设计位置。如果以圆环的中心为轨道环的中心，则要求安装后测点的实际位置与理论设计位置之差，就全环而言，可以将近似的圆曲线轨道放样成两个长轴互相垂直的共轭椭圆，其长轴与短轴相差为 $1 \sim 2$ 厘米。但如果只是轨道的一部分，则要精度相当高，通常规定任意两相邻磁件的点的相对径向中误差应不大于 ± 0.10 毫米，这是安装结束后的最终要求。考虑到磁件测点本身的制造以及控制网点和基础梁的稳定性等各种误差影响，因此，要求测量的精度比最终精度还要大约高一个数量级。就测边而言，要求以 $20 \sim 30$ 微米的中误差进行测定，而点位对中误差应不大于 $10 \sim 15$ 微米。

环形控制网，因为要连续控制巷道精施工、粗安装、精调试、运转后监测等多种过程，所以复测是经常的，运算也必须有固定程序，一切仪器设备都应当考虑按照：操作简便、精度超高、稳定可靠、力求自动化和程序化进行设计研制。

这项工程在对测量提出超高要求的同时，对测量仪器的研制和计量检定工作也提出了非同寻常的要求。只有与精密测量有关的各个方面的工作都上去了，环形控制网的测算才能满足工程的要求，达到预期的目的。

二、环形控制网的布设

1. 环形布网结构的基本理论

如图 1 ~ 4，并对下列各符号定义为：

r_1 ——环形巷道内壁圆半径；

r_2 ——环形巷道外壁圆半径；

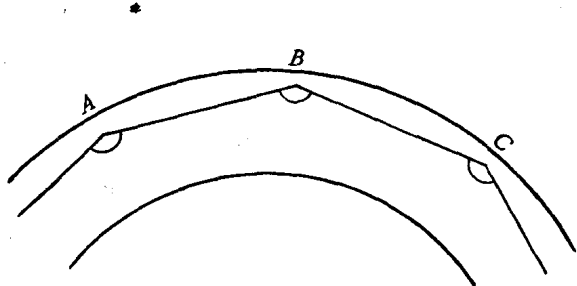


图 1

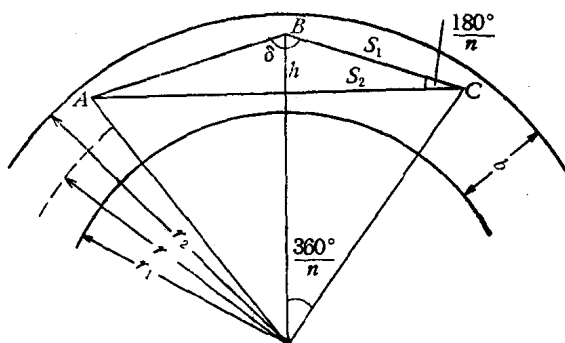


图 2