

测绘科技专著出版基金资助

精密水准测量 的理论 and 实践

梁振英 董鸿闻 姬恒炼 著

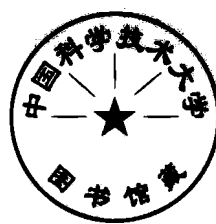
PRECISE LEVELING THEORY AND PRACTICE

测绘出版社

测绘科技专著出版基金资助

精密水准测量的理论和实践

梁振英 董鸿闻 姬恒炼 著



测绘出版社

· 北 京 ·

内 容 简 介

本书是一本关于精密水准测量理论和实践问题的专著,较为系统地介绍了近50年来国内外在这一领域的科研和生产实践,其中包括作者的科研成果。主要内容除包括精密水准测量的一般问题,如国家高程网的布测、高程基准和高程系统、仪器和作业方法、跨河水准和标石稳定性以及误差分析和精度评定等问题外,还重点讨论了各种系统性误差来源,如尺桩和脚架的垂直位移、标尺误差、折光差、热力作用、磁致误差和潮汐影响等。此外还论述了包括特高精度的精密水准测量、现代空间技术下的精密水准测量以及全球统一高程基准和全球统一高程/深度基准的构思模式等较为新鲜的命题。

本书内容兼顾国内外,重点在国内;理论与实践并重,以实践为主。因此,本书是我国近50年来在精密水准这一领域的理论与实践问题的总结,可供从事大地测量,特别是从事精密水准测量的生产、教学和科研的工作者参考。

©梁振英 董鸿闻 姬恒炼 2004

图书在版编目(CIP)数据

精密水准测量的理论和实践/梁振英,董鸿闻,姬恒炼著.—北京:测绘出版社,2004.12
ISBN 7-5030-1228-5

I. 精... II. ①梁... ②董... ③姬... III. 精密水准测量—研究 IV. P224.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 022339 号

精密水准测量的理论和实践

梁振英 董鸿闻 姬恒炼 著

测绘出版社出版发行

地址:北京市西城区复外三里河路 50 号 邮编:100045

电话:(010)68512386 68531558 网址:www.sinomaps.com

北京通州区次渠印刷厂印刷

新华书店经销

开本:890 mm×1240 mm 1/16 印张:19.25 字数:586 千字

2004 年 12 月第 1 版

2004 年 12 月第 1 次印刷

印数:0001—3000 册

ISBN 7-5030-1228-5/P·393

定价:50.00 元

如有印装质量问题,请与我社发行部联系

前 言

近年来，随着大地测量技术的发展，特别是卫星定位技术的广泛应用，传统大地测量的理论和方法，都发生了革命性的变化，卫星定位技术大有取代常规大地测量的趋势。但是，在精确传递高程和建立高程控制网方面，几何水准这种古老的测量方法，至今还不能完全为现代的空间技术所取代。因此，在一个可以预见的将来，精密水准测量仍将具有重要的意义。半个多世纪以来，我国完成了大量的精密水准测量工作，结合生产，进行了范围广泛的专题研究，积累了丰富的理论和实践资料。为了提供现势性强的高程数据，精密水准网必须定期复测。建立和维持国家高程控制网，仍将是今后我国大地测量工作的重点之一。虽然我们进行了充分的理论探讨，完成了大量的试验研究，但是还没有进行过系统的总结，更没有一本有关精密水准测量的专著。本书就是为了填补这一空白而做的努力。在这个大的背景之下，出版一本精密水准测量的专著，有着重要的现实意义。

本书兼顾在精密水准测量这一范畴的理论和实践，重点在于实践。因此可以说，它是我国半个世纪以来精密水准测量科技方面较为全面的总结。大量的外业生产实践和内业数据处理工程，为我们提供了基本的素材和经验；系统的科学研究为我们提供了坚实的理论基础；大量的国内外文献，大大充实了本书的写作内容。占有大量的资料，用统计数据作结论，是本书的最大特点。本书力求完整，但不可能全面；力求严谨，但谬误在所难免，敬希读者批评指正。

本书第三章、第十章由姬恒炼撰写；第二章、第十四章、第十五章和第八章的潮汐影响一节由董鸿闻撰写；其余部分由梁振英撰写。本书的出版得到了国家测绘局测绘科技专著出版基金的资助；测绘出版社为本书的出版付出了辛勤劳动。作者在此一并感谢！

作者

2004. 3

目 录

第一章 绪 论	(1)
第二章 国家高程控制网的布测	(4)
§ 2-1 国家高程控制网布测的基本原则	(4)
§ 2-2 国家水准网路线的设计	(5)
§ 2-3 水准测量标石类型与选埋	(5)
§ 2-4 国家第一期(1951—1969 年)一、二等水准网布测	(9)
§ 2-5 国家第二期(1976—1990 年)一、二等水准网布测	(11)
§ 2-6 国家第二期(1991—1997 年)一等水准网复测	(14)
第三章 水准测量的仪器、观测方法和外业成果的整理	(16)
§ 3-1 水准测量的仪器	(16)
§ 3-2 水准仪和水准标尺可能产生的误差	(23)
§ 3-3 水准仪和水准标尺的室内检定方法	(25)
§ 3-4 水准仪和水准标尺在使用过程中的检核	(35)
§ 3-5 精密水准测量的实施	(37)
§ 3-6 观测组各岗位的职责和相互配合	(37)
§ 3-7 野外操作方法	(38)
§ 3-8 选择适宜的观测条件	(40)
§ 3-9 水准测量的记录、计算和成果的整理	(41)
第四章 高程基准和高程系统	(45)
§ 4-1 高程基准和高程系统	(45)
§ 4-2 由不同高程基准推算的高程系统	(47)
§ 4-3 对水准测量数据取不同的处理方法所产生的高程表示法	(55)
第五章 尺桩、尺台和脚架的垂直位移及其对精密水准测量成果的影响	(61)
§ 5-1 尺桩、尺台和脚架的垂直位移对精密水准测量成果的影响	(61)
§ 5-2 恩津关于尺桩、尺台垂直位移的研究和主要结论	(64)
§ 5-3 恩津关于脚架垂直位移的研究和主要结论	(66)
§ 5-4 我国进行的尺桩、尺台和脚架垂直位移的试验研究	(67)
§ 5-5 我国关于尺桩、尺台和脚架垂直位移试验研究的主要结论	(79)
第六章 应用因瓦水准标尺带来的误差	(80)
§ 6-1 因瓦水准标尺的结构和误差分类	(80)
§ 6-2 标尺自身的误差	(81)
§ 6-3 尺长测定误差	(83)
§ 6-4 水平位置和垂直位置两种状态下的标尺长度差	(83)
§ 6-5 由外界环境引起的误差	(84)
§ 6-6 水准标尺双频激光干涉检定系统	(85)
§ 6-7 水准标尺光电自动瞄准检测装置	(89)
§ 6-8 双频激光干涉水准标尺检测系统的综合精度	(93)
§ 6-9 水准标尺因瓦带分划线质量的评定	(94)
§ 6-10 关于因瓦水准标尺的温度改正	(97)

§ 6-11	因瓦水准标尺膨胀系数的测定	(100)
§ 6-12	尺长和温度系数测定中的一个值得注意的问题	(101)
§ 6-13	尺长和温度系数测定的可靠性检验	(105)
第七章	关于水准折光	(109)
§ 7-1	水准折光的一般理论	(109)
§ 7-2	几种折光改正公式	(118)
§ 7-3	前苏联中央测绘科学研究院的研究结果	(125)
§ 7-4	美国和其他一些国家的研究结果	(128)
§ 7-5	我国对水准折光问题的研究	(134)
§ 7-6	国家测绘局组织实施的试验研究结论	(142)
§ 7-7	我国精密水准测量中为克服折光差所采取的措施和收益	(154)
第八章	磁致误差、热力作用和潮汐影响	(157)
§ 8-1	磁致误差	(157)
§ 8-2	热力作用	(165)
§ 8-3	潮汐影响	(170)
第九章	我国水准标石稳定性研究	(179)
§ 9-1	重要意义	(179)
§ 9-2	对水准标石稳定性的定性分析	(179)
§ 9-3	复测水准在地面沉降和地壳垂直运动研究上的应用	(182)
§ 9-4	地面升降和地壳垂直运动的分离	(183)
§ 9-5	我国复测水准网水准标石不稳定性分析	(184)
第十章	跨越障碍物的精密水准测量	(188)
§ 10-1	跨越方法的选择	(188)
§ 10-2	跨越障碍物测量的场地选择与测前准备	(189)
§ 10-3	跨河水准观测和记录	(192)
§ 10-4	跨河水准测量的高差计算和检验	(195)
第十一章	特高精度的水准测量方法	(200)
§ 11-1	特高精度的几何水准测量方法	(200)
§ 11-2	流体静力水准测量	(208)
§ 11-3	测微水准	(213)
第十二章	现代空间技术下的精密水准测量	(215)
§ 12-1	概论	(215)
§ 12-2	GPS/水准	(215)
§ 12-3	GPS 技术用于精密沉降监测和高程传递	(220)
第十三章	精密水准测量的误差分析和精度评定	(225)
§ 13-1	精密水准测量的误差来源及其对水准测量成果的影响	(225)
§ 13-2	精密水准测量的精度评定公式	(228)
§ 13-3	关于拉列曼公式的讨论和新的精度评定方法	(233)
§ 13-4	关于精密水准测量的误差传播、精度估计和质量控制	(237)
第十四章	水准网的静态平差与动态平差	(247)
§ 14-1	数据的整理与归算	(247)
§ 14-2	水准网静态平差的一般方法	(248)
§ 14-3	水准路线权的确定	(249)
§ 14-4	水准网动态平差的基本概念	(250)

§ 14-5 水准网动态平差的数学模型 (251)

第十五章 精密水准测量在我国现今地壳垂直运动研究中的应用..... (254)

§ 15-1 概述 (254)

§ 15-2 观测数据的净化及其使用 (256)

§ 15-3 数据处理方法 (257)

§ 15-4 单点动态垂直基准 (259)

§ 15-5 速率面拟合方法 (262)

§ 15-6 我国大陆现今地壳垂直运动趋势 (265)

第十六章 全球统一高程基准的建立和全球陆海统一高程/深度基准的构思模式 (267)

§ 16-1 概述 (267)

§ 16-2 高程基准面和深度基准面 (268)

§ 16-3 海面地形和海面动力地形 (269)

§ 16-4 大地水准面 (277)

§ 16-5 高程基准面、深度基准面和其他几种海上参考面之间的关系 (279)

§ 16-6 全球统一高程基准的建立 (280)

§ 16-7 陆海统一高程/深度基准的构思模式 (282)

§ 16-8 深度基准的转换关系 (285)

附录 有关水准仪和水准测量的术语释义..... (287)

参考文献..... (296)

第一章 绪 论

传统的大地测量是建立大地控制网，包括天文大地网、高程网和重力网。精密水准测量是建立高程控制网的唯一手段。虽然卫星大地测量，特别是 GPS 技术的广泛应用，大有取代常规大地测量方法的趋势，但在精密传递高程方面，目前及可预见的未来，精密水准测量仍将具有无法取代的地位。半个世纪以来，我国在精密水准测量的生产和科研方面，都做了大量的工作，例如，国家测绘局组织实施了几次大规模的精密水准测量工程；军事、产业部门和地方单位都进行了大量的精密水准测量工作；中国地震局在地震活跃的断裂带上，用精密水准测量方法在进行着逐年、逐月甚至逐日的监测。为了向国民经济建设部门和科研部门提供现势性强的高程数据，国家一等水准网必须定期复测，这是国际惯例。我国大地测量法式规定，国家一等水准网每 25 年复测 1 次。两三年后，我国将实施新的国家第三期高程控制网的布测工程。建立和维护国家高程控制网的工作，仍然是我国大地测量的工作重点之一。

随着测量仪器的发展和测量方法的改进，水准测量的精度在逐步提高。过去欧洲的一等水准测量又称精密水准测量，其精度不高。为了进一步提高精度并区别于原来的一等水准测量，1912 年国际大地测量协会使用了“高精度水准测量”一词。此后，欧洲称一等水准测量为“高精度水准测量”，二等水准测量为“精密水准测量”。1948 年 8 月 26 日，国际大地测量协会对高精度水准测量和精密水准测量的定义如下：

高精度水准测量：每千米往返测高差之平均值的总中误差 $\tau \leq \pm 2 \text{ mm}$ ；根据测段往返测闭合差计算的每千米偶然误差小于 $\pm 1 \text{ mm}$ ；系统误差小于 $\pm 0.2 \text{ mm}$ ；

精密水准测量： $\pm 2 \text{ mm} \leq \tau \leq \pm 6 \text{ mm}$ 。

我国将一、二等水准测量统称为精密水准测量，即按《国家一、二等水准测量规范》施测并达到其精度指标的水准测量。当前，各国精密水准测量的精度都有所提高。1948 年国际大地测量协会的高精度水准测量的精度指标，大体相当于我国二等水准测量的水平。除去惯用名称外，本书还提出了用于高精度工程测量的特高精度的水准测量概念，其精度与机械制造的限差相当，可达 $\pm 10 \mu\text{m}$ ，甚至更高。

21 世纪，我国新一代的大地测量工程包括 4 个方面：创建以 ITRF(国际地球参考框架)为基础的我国高精度的三维动态坐标系；新建我国高精度重力基准网和精化我国局部大地水准面；实施国家第三期高程控制网工程和创建国家 GPS 技术综合服务系统。其中，精密水准测量是最重要的方法之一，也是在人力、物力方面花费最大的工程项目。布测新的高程控制网，不是以复测为目的的简单重复，而是既要兼顾当前各部门的需要，又要保证今后的长期使用。在网的设计、精度要求、水准标石的选埋和改造，以及新仪器、新装备、新技术和新工艺的引进和推广方面，都要有所创新，达到高精度与经济、快速、务实措施的统一。我国半个多世纪以来的精密水准测量理论和实践的总结，以及本书的问世，必将对今后的工作起到良好的作用。

国家高程控制网，有两个方面的应用：一是为国民经济建设提供统一的高程控制，二是为科学研究提供可靠的高程数据。随着科学技术的进步和时间的推移，精密水准测量在科学研究方面的作用愈来愈重要。除了满足地震监测、现代地壳垂直运动、海面变化和倾斜的研究外，精密水准对大地测量自身的问题，即地球自然表面的形状和地球外部重力场的研究方面，也愈来愈重要。由于 GPS 的普及和精度的提高，GPS/水准成了在陆上精化大地水准面的主要手段。为满足国民经济建设和科学研究两个方面的需求，国家高程网必然满足 3 个条件：一是以足够的精度定期复测以提供现势性强的

程数据；二是网的合理结构，即水准路线在为监测地壳垂直运动上的科学布局；三是有足够的基岩点和保证水准标石的相对稳定性。精密水准测量的科学研究，主要应该包括这些内容。

第二章详细讨论了国家高程控制网布测的一般要求和原则，着重介绍了现行水准标石类型及其结构，特别是对国家第三期高程控制网的布网，有针对性地提出了网的设计原则，既要充分利用旧线，也必须顾及现势的骨干交通要道、地壳构造、板块划分、断裂带分布、西部大开发和“南水北调”等因素，适当增补新线，满足各部门的需求。

第三章除论述了水准测量的一般方法、仪器和标尺的检验和使用外，还特别论述了水准外业的操作方法。精密水准测量的发展和技术进步总是伴随着新仪器的问世而实现的。水准仪在最近几十年的发展上，带有平行玻璃板测微器的水准器水准仪的出现，在提高读数精度上是一大进步；其后，自动安平水准仪的问世，是精密水准测量的一次飞跃，大大提高了观测速度。由于几何水准是一站一站地传递高程，效率低是其最大的缺点。长期以来，人们都在追求读数和测量的自动化。这期间走过了一段漫长的路，进行过大量的探索。1990 年第一台数字水准仪 NA2000 的投入生产，标志着水准仪在观测自动化方向上的突破。电子数字水准仪虽然在现代科技的大视野中微不足道，但它是科技发展的时代产物，是融电子技术、编码技术、图像处理技术和计算机技术于一体的高科技产物。由于原来普遍使用的 Ni002 系列等光学水准仪已不再生产，因此电子数字水准仪的普及是必然趋势。本章对其基本原理、误差来源和使用上的特点进行了分析。

第四章是高程基准和高程系统。对这样经典的问题，本书的论述也注入了新的思维。首先是明确了高程基准面、高程基准和高程系统的确切含义；其次是提出了高程基准面及其双重含义，高程系统及其双重含义的问题，详细论述了双重含义下的高程系统。此外，还较翔实地论述了我国在 1949 年以前使用过的高程系统，尤其是目前仍在继续使用的大沽高程系统。本书根据有关单位的最新科研成果，介绍了天津市大沽 1972 高程系统与 1956 年黄海高程系统的动态换算关系。目前，这是有实用价值的。

第五章至第八章关于精密水准测量主要误差来源的分析研究是精密水准测量传统上的热点话题，也是本书的重点，占了全书的主要篇幅。精密水准测量最主要的误差来源包括尺桩(尺台)和脚架的垂直位移、水准折光、磁致误差、潮汐影响、热力作用和使用因瓦水准标尺带来的误差等。本书最为翔实地介绍了这些误差来源的国内外最新研究成果，尤其是笔者亲自完成的试验结果。根据试验数据，给出了许多新的结论。用统计数据说话，是本书的特点之一。

一切大地测量成果都以数据形式给出，而数据最终落实在标石上。例如：我国大地测量基准是以陕西泾阳大地测量原点的全部参数定义的。我国高程系统的数据都是以水准点的高程来表示的。水准标石是体现高程控制网价值之所在，因此要求相对稳定。实际上，任何水准点都不可能绝对稳定，它的变化包括地壳垂直运动、地面沉降运动和标石自身的不稳定性。第九章研究了水准标石的稳定性问题并据此提出了复测水准网动态平差方案。

第十章跨越障碍物的水准测量除常规的过河水准测量方法外，还特别论述了测距三角高程方法。有些特殊的工程项目和科研项目，测量精度要求特别高，较常规方法提高了一个数量级。因此，提出了特高精度的水准测量方法的命题。第十一章除包括特高精度的几何水准测量外，还包括了流体静力水准测量和不为大地测量人员所熟悉的测微水准。

第十二章，论述了 GPS 与精密水准相结合布测高程控制网的问题。目前，高精度 GPS 基线测量的精度已达 10^{-9} ，高程测量的精度也有大幅度的提高。研究表明，在 70~100 km 的距离上，由精心设计的观测纲要进行的 GPS 测量得到的大地高高差变化的精度已达 7~10 mm，几乎与精密水准测量的精度相当。因此，国家高程控制网与 GPS 技术相结合，不但在与水准测量成果进行比较的情况下，为精密水准测量提供了一个可资比较的外部条件，而且还为地壳垂直运动的研究提供更有利的手段。另外，GPS 与水准测量相结合的 GPS/水准，在求定大地水准面和在平原地区代替三、四等水准的问题，也是大地测量的一个新的方法。

第十三章对水准测量的误差来源进行了分析。由实测资料给出了精密水准测量的误差函数，将水

水准测量的误差来源区分为偶然误差和系统性影响，回避了“系统误差”的概念。在对主要误差来源进行全面分析的基础上，提出了精密水准测量的精度估计和质量控制的问题，论述了由现行公式代替国际上通用的拉列曼公式的理由。

第十四章是水准测量的各项改正和水准网静态平差与动态平差的一般原理。第十五章叙述了我国 3 次大规模水准网在研究现今地壳垂直运动中的应用，阐述了数据净化采取的措施、数据的采用、基准的选择、与地质构造相结合的数据处理模型以及速率面拟合的方法。其中包括我国新的大陆现今垂直运动的主要图件。应用几十年的重复水准测量成果由动态平差给出的一系列中国大陆现今地壳垂直运动图件，是我国精密水准测量的一项重大成果，有重要的实用价值和科学价值。

由于全球经济一体化的加快，每一个国家和地区的经济发展和政治生活都与周边国家和地区以及国际社会有着密切的关系。相邻国家和地区的海图、地形图、GIS 和 DTM 的拼接，数字地球的实施，都要求全球统一的高程基准，乃至全球陆海高程/深度基准的统一。建立全球统一高程基准和实现全球统一高程/深度基准是当前大地测量的发展趋势。第十六章翔实地论述了有关的理论和方法，特别是关于大地水准面、海面地形、海面动力地形和求定全球各高程基准面位差的基本方法，以及关于全球陆海统一高程/深度基准的构思模式。结合科研成果，本章提出了许多新方法和新概念。如求定浅海海域海面动力地形的“内插外推法”，关于大地水准面、海面动力地形的定义等。研究和实施全球统一高程/深度基准的问题，不但有实用价值，而且可以提升我国高程控制网在全球的地位。

在水准测量的范畴内，有关水准仪和水准测量的术语很多，本书附录搜集了 80 余条并作了相应的解释，可供读者参考。

采用几何水准方法建立高程网，是 1864 年国际大地测量协会会议上通过的。目前，世界上几乎所有国家和地区都已建成或即将建成精密水准网，但各国精度指标都不一样。许多国家，如欧洲大部分国家、独联体各国、北美和日本等国家的水准网，至少都观测过两次以上，我国已有 3 期成果。日本每年复测 6 000 km 以上，全国 5 年重复 1 次。世界上有 4 个大规模的水准网，即：欧洲统一水准网(包括英国、希腊、丹麦、西班牙、德国、法国和瑞士等)、北美高程网(包括加拿大、美国、墨西哥和 12 个中美洲国家)、前苏联高程网(包括独联体各国)和我国高程网。其中我国高程网的精度最高，欧洲和北美高程网水准点最密，前苏联高程网施测要求最严格。我国高程网在全球有着重要的地位，理论和实践也最丰富。本书主要就是以我国 50 多年来在精密水准测量方面的理论和实践为素材撰写而成的一本专著，希望对我国的大地测量工作有所贡献。

第二章 国家高程控制网的布测

§ 2-1 国家高程控制网布测的基本原则

国家高程控制网是国家大地测量控制网的一部分，它的布测目的服从于国家大地测量总的目的。

国家高程控制网是进行地理空间定位高程控制的框架。为了递推高程，并控制系统误差的传播，国家高程控制网按照由高精度至低精度逐级控制的原则布测，分为一等、二等、三等、四等水准网。

一等水准测量在高程控制网中精度最高，是整个控制网的骨干，同时还为研究地壳垂直运动、平均海面变化、区域地面沉降及其他地球动力学现象等科学目的服务。需要着重说明的是，随着科学技术的发展，虽然高精度卫星定位高程测量的精度在不断提高，但一等水准测量的科学目的与作用目前还无法取代。

二等水准测量是高程控制的全面基础，它的主要目的是为了控制低等级路线，以便于推算点的高程。三、四等水准是二等水准测量的进一步加密。当三、四等水准测量不能到达时，高程控制网的布测则采用三角高程测量。

原则上讲，水准网布测当然是应用于大地网优化设计方法，但正如一些文献指出的那样，目前还不清楚大型网的严格优化结果与现行规范化设计相比会有多大收益。但是可以肯定，优化设计必然会打乱目前的规范化作业方式，造成布测的困难(陈鑫连等 1994)。因此，国家高程网的布测通常是采用规范化方式进行。依据国家标准(国家技术监督局 1992)并总结我国水准网的实践，一等水准网的布测需遵循下列原则：

1. 国家一等水准网布测需构成环形。这种结构的主要作用在于提高其强度，保证精度符合要求。环的长度根据需要与可能应在 1 000~2 000 km 范围内。特殊困难地区，如我国的西部可以酌情放宽。

2. 国家一等水准网布测需要考虑板块内部不同地块的构造。板块运动学说的研究指出，地球大陆不但被划分为若干板块，而且板块内部还被划分为不同的地块，它们的垂直运动也在板块运动统一的背景下各自不同。目前，我国地学界对于被称为二级构造单元的板内地块划分已基本形成共识，为水准路线的布设提供了基础。

3. 国家一等水准网的布测需要考虑时间跨度。为了利用一等水准测量推求地壳垂直运动，必须对其定期复测，求得的垂直运动速率是复测间隔时间内具有平均意义的速率。也就是说，从研究地壳垂直运动的角度而论，一等水准测量有一个确定的历元，如果测量时间过长，将导致水准测量在空间上的不连续。因此，整个一期一等水准测量时间不宜太长，一个水准环的测量更不能过长。根据我国一等水准测量结果的分析认为，以全国 100 000 km 估算，最好集中在 3 年内完成，一个水准环的测量最好在 1~2 年内完成。

4. 国家一等水准网需要与大城市、大工矿区的地面沉降监测网相联系。大城市与工矿区的地面沉降监测对于区域的可持续发展具有重要意义。一等水准路线需至少通过几个监测点与监测网联系，这对于科学地分析和判断沉降状况是非常必要的。

5. 国家一等水准网应与国家基本验潮站有较好的连接。在尽可能的情况下，路线需通过验潮站的水准基点，实在做不到时，支线的路线也应尽量缩短。

根据目前一等水准测量达到的精度与我国大陆地壳垂直运动的一般量级，国家一等水准网需每隔

15~20 年复测 1 次。

§ 2-2 国家水准网路线的设计

国家一等水准网的路线需沿着便于施测的交通路线敷设。最好是路面坡度平缓、交通不太繁忙的地段。同时也要顾及交通路线的长远使用状况，以免由于近期道路扩建或改线，使水准路线遭到破坏或不能施测。

已有的一等水准路线的水准点包含着丰富的地壳垂直运动信息。为了实现一等水准测量的科学目的，国家一等水准路线重新设计时应尽可能利用已有的一、二等水准点。

设计国家水准网路线时，应避开土质松软的地段和磁场甚强的地段，避开行人多、车辆来往频繁街道和大的集散地。水准路线还应尽量避免通过大的河流、湖泊、沼泽与峡谷等障碍物。

国家一等水准网路线交叉处需形成结点，两结点之间为一条水准路线。一般路线长度在 200~500 km 范围，可根据实际情况变通。水准路线结点一般需设基岩点，每隔 40~50 km 设基本点，4~8 km 设普通水准点。

设计水准网路线时，首先应收集有关资料，主要有规划路线所经地区的 1:50 000 比例尺地形图，详细的公路交通图册，地质资料和已有的水准测量点之记、路线图、高差与高程表等。同时，还应收集有关高精度卫星定位网与国家重力基本网及加密重力测量资料。对于旧有资料，使用时需特别注意其现势性。在收集资料的基础上，根据有关技术标准和要求，在地形图上进行初步设计。

水准路线的设计，除路线本身外，还应包括测定水准点的大地坐标和沿水准路线施测重力的内容。

水准点的大地坐标可用卫星定位方式，如手持 GPS 施测，当地形图现势性较强时，也可在图上量取，精度取至 0.1'。

关于路线上的重力测量，国内曾依据前苏联别里宁(Л. П. Пэллиней)提出的公式进行分析与试验。式(2-2-1)是水准路线上重力点距的公式。

$$S \leq \frac{\eta}{2k \cdot \tan \beta_m} \tag{2-2-1}$$

式中：

η 为水准测量每千米偶然中误差；

k 为水准路线所在地区空间重力异常代表误差系数；

$\tan \beta_m$ 为水准路线的平均坡度状况。

别里宁认为，水准路线上有这样密度的重力点，所算出的每两点间的重力异常改正误差，在小于 $\frac{\eta}{2}\sqrt{L}$ (L 为水准点间距)时，不会由于计算而损害精度。式(2-2-1)由于推导中的一些设定，结果是偏严的。

重力测量应该达到一定的精度和密度。 $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 的测量误差，每百米高差会产生 0.1 mm 的改正误差。在高程大于 4 000 m 或水准点间的平均高差为 150~250 m 的地区，水准路线上每个水准点均应测重力。高差大于 250 m 的测段，在地面倾斜变化处应加测重力。高程在 1 500~4 000 m 之间或水准点间平均高差为 50~150 m 的地区，重力点的平均距离在 11 km 以内。

在地形图上初步设计完成后，应进行野外实地踏勘，最后确定水准路线和路线上各类水准点，同时做出相应的各种统计。

§ 2-3 水准测量标石类型与选埋

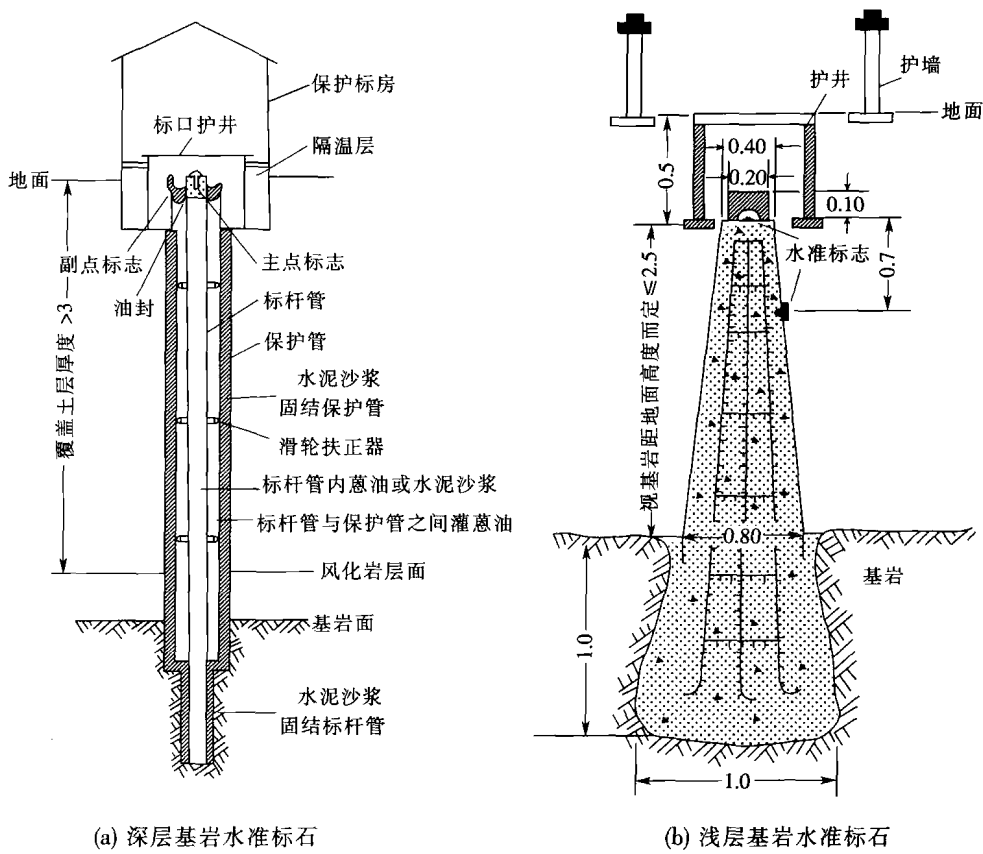
从事水准测量的人员，对于水准标石必须有明确的认识。水准标石确定了点的高程，因而它的稳定是非常重要的。如果标石不稳定，精确的高程无从谈起，更无法为国家建设和地学研究服务。由于对观

测结果有限差的要求，人们往往比较重视观测结果，但却常常忽略标石的稳定性问题，这是非常错误的观念。观测结果的真实性和精度必须保证，标石是观测的基础，对于它的稳定性必须给予高度重视。

标石的稳固包括了两个方面：一是标石结构设计的科学合理，另一个是埋设的牢固。

国家水准标石的设计，原则上可分为基岩水准标石、基本水准标石、普通水准标石 3 类。每一类根据其类型又可分为基岩(岩层)标石、钢筋混凝土(混凝土)标石、金属管标石以及墙脚标志。

各种标石类型如图 2-3-1 至图 2-3-4 所示。



单位：m

图 2-3-1 基岩水准标石

埋设基岩水准标石时应注意：在钻孔完成后，需将孔底整平并进行清孔。把标杆管和保护管组装好之后，再下入孔内，灌油。下管、灌油过程中要防止发生掉管事故。下管后，需使保护管静压长度大于 1 m，然后再使标杆管静压长度大于 1 m，在此基础上再在保护管外灌入水泥砂浆，捣实，防止出现蜂窝隙洞。

有时为了需要，也可以设双金属管标石。两金属管一为钢管，一为铝管。双管顶部镶焊水准标志。这样可以利用它们膨胀系数的不同分析研究其各自的变化，必要时还可依地温对标石的管长影响考虑有关改正。

水准标石中央所嵌的标志应用钢或不锈钢制作，不允许使用铁或瓷质的标志。

水准标石选位与埋设需根据它的用途、测量等级、路线所经地区的土壤及其他地理气象条件决定。

基岩水准标石主要用于一等结点和重要的水准点。一等水准路线的结点应尽量埋设基岩水准标石，只有少数无法埋设的地区才允许以其他类型来替代。埋设基岩水准标石时应注意埋在真正的基岩上，不允许埋在较大的孤石上。为了施工方便，可以尽量选在基岩露头的地方，遇有风化层时，必须将风化层剥离除去。埋设基岩水准标石一般应有地质人员参 或地质资料作依据，必要时需事先进行地质钻

探。基岩水准标石必须是钢筋混凝土制成，使其与基岩牢固相接。基岩水准标石必须有两个标志。在方便的地区，基岩水准标石允许用整块花岗石凿成的标石代替。

基本水准标石用于一等水准基本点和二等水准路线结点，通常是用钢筋混凝土制成。基本水准标石埋设时需特别注意了解地下水位的深度，地下有无孔洞和流沙。总之，标石要埋设在土质坚实稳定的地区，以确保标石的稳固。

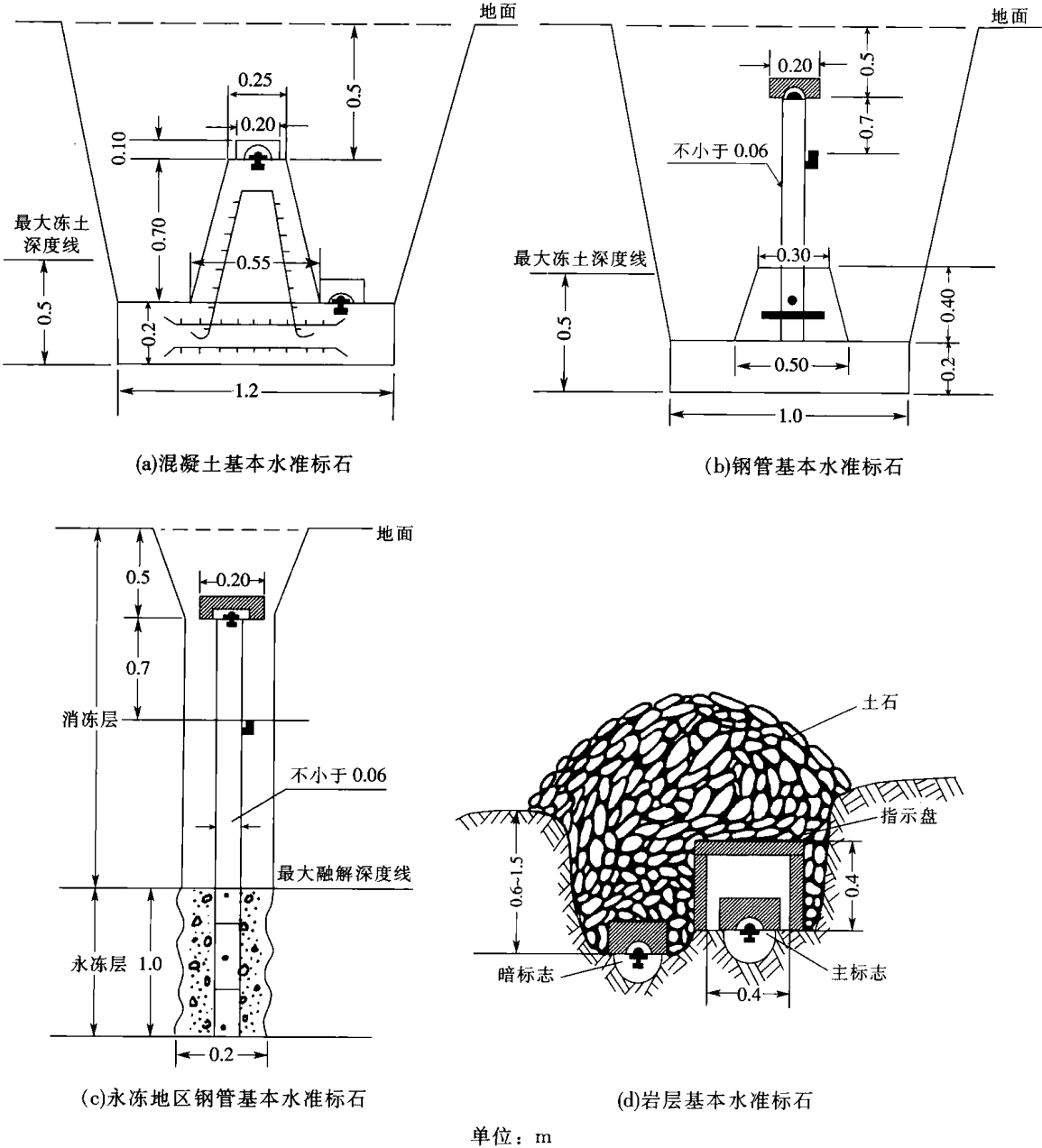
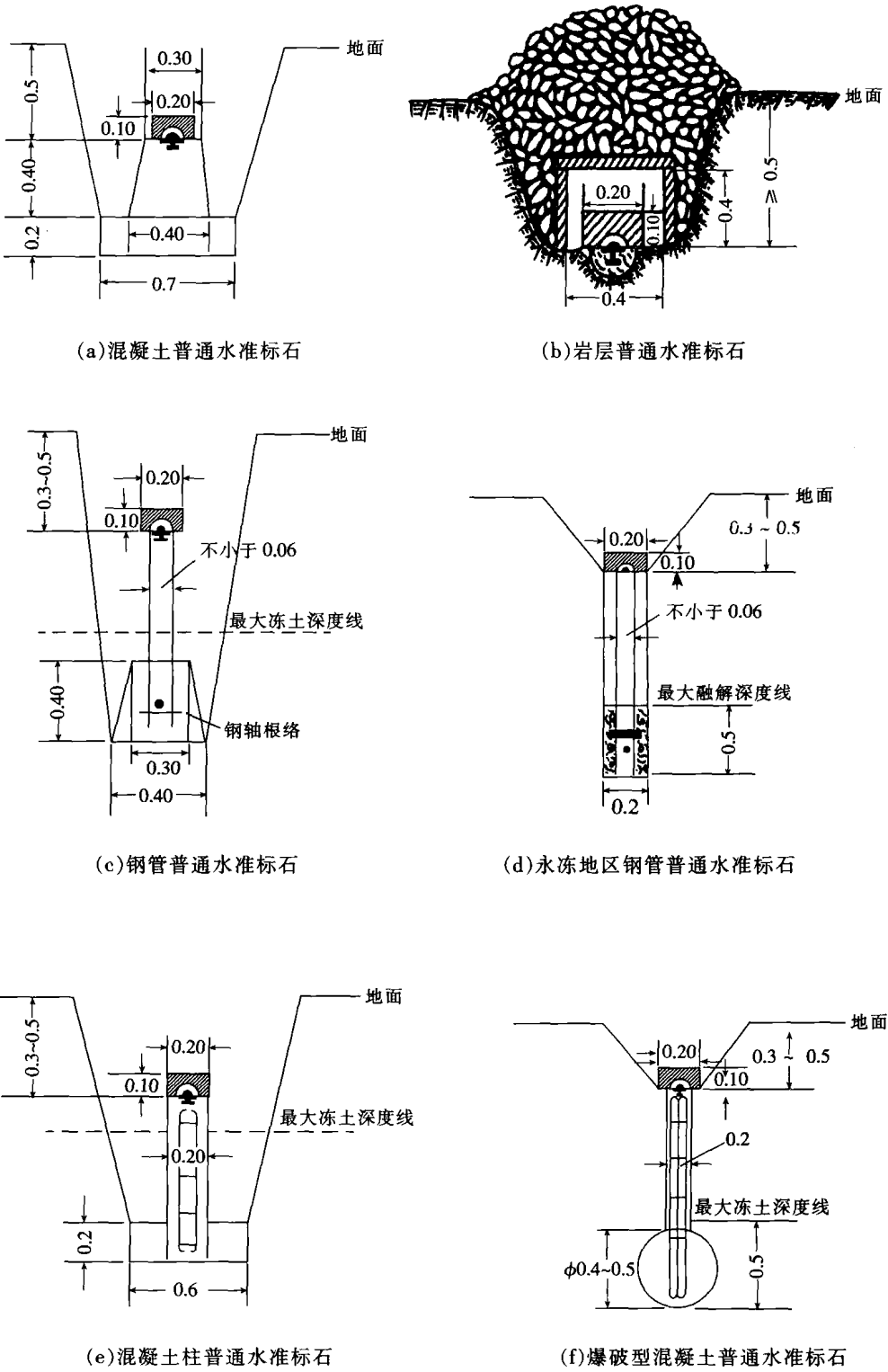


图 2-3-2 基本水准标石

普通水准标石适用于一般水准点，可用混凝土制作。

无论是基本水准标石还是普通水准标石，都可以埋设岩层标石。它一般只能埋设于岩层裸露的地区。埋设时必须清除风化层，在按规定深度所凿成的岩石坑内，浇灌混凝土固定标志。基本水准标石和普通水准标石还可以埋设在墙脚，一般是把岩石或混凝土的墙基凿成洞状，用混凝土固定标志。在大城市有沉降记录的建筑物上，不能埋设墙脚标石。在我国，不论何种情况的冻土地区的水准标石，其底部都应在冻土深度 1.0 m 以下。

制作标石的混凝土，应根据情况采用不同类型的水泥：制作不受冻融影响的混凝土标石时，应优先采用矿渣和火山灰质水泥，不能使用粉煤灰水泥；制作受冻融影响的标石时，宜使用普通硅酸盐水泥；



单位：m

图 2-3-3 普通水准标石

制作易受盐碱、海水或工业污水侵蚀地区的标石时，须使用抗硫酸盐水泥；制作沙漠、戈壁等干燥环境

中的标石时，不得使用火山灰质水泥。

灌制混凝土的石子，需采用级配合格的 5~40 mm 直径的天然卵石或坚硬碎石，不宜采用同一尺寸的标准石子。所用沙子应采用 0.15~3 mm 粒径的中沙，含泥量不得超过 3%。所用的清水需采用洁净的淡水，硫酸盐含量不得超过 1%。灌制混凝土时，可根据施工环境选用外加剂，如早强剂、防冻剂、减水剂、引气剂等，其质量应符合相应标准，但不得使用含氯盐的外加剂。

水准标石埋设完成后，应进行外部整饰。一般基岩点，在其四周应修筑适当高度的护墙。水准点上应用土加以覆盖，修饰成覆斗型，在其外应挖掘成方型的护沟。

此外，在水准点的正北方 1.5 m 处，应埋设标石指示盘或指示碑。指示盘或指示碑用钢筋混凝土制作，其底盘应现场浇筑。

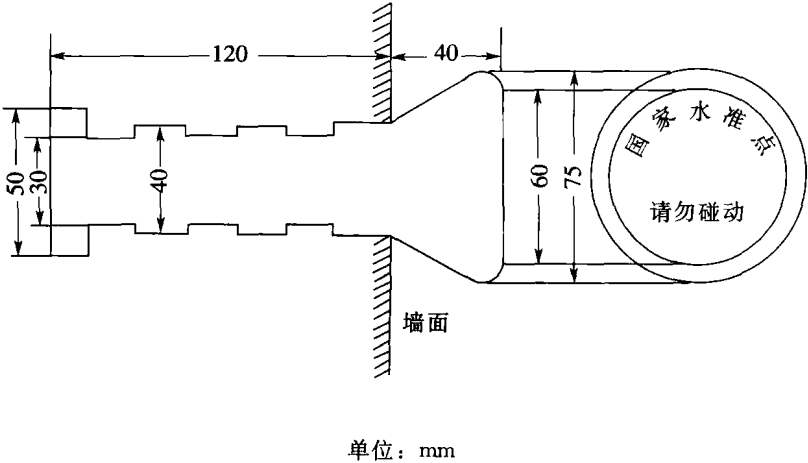


图 2-3-4 墙脚水准标志

§ 2-4 国家第一期(1951—1969 年)一、二等水准网布测

我们把 1951—1969 年期间完成的精密水准测量叫国家第一期一、二等水准网。国家第一期一、二等水准网施测初期，既没有统一的规划，也没有统一的规范，只是根据当时国家的经济建设和国防建设的急需而进行的，到 20 世纪 50 年代后期才制定了统一的规范。根据第一期水准网的施测情况，可分为两个部分：一是水利部所属各单位布测的精密水准，二是总参谋部测绘局和 1956 年成立的国家测绘总局布测的国家一、二等水准。

1. 精密水准

精密水准是新中国成立初期主要为水利工程而进行的测量工程，布测的目的在于建立沿我国各主要河道干支流为主的精密水准网，作为扩展低等级高程控制网的基础，并供水文观测、水利工程勘测、设计、施工及工程管理上的应用，也适当地为其他工程建设和科学研究提供高程资料。

精密水准的技术依据是华东军政委员会水利部 1951 年制定的《华东精密水准测量规程》，治淮委员会 1951 年制定的《淮河流域精密水准测量规则》，中央人民政府水利部 1954 年编印的《水利部精密水准测量细则》。国家一、二等水准的技术依据是前苏联 1939 年版本的《一等水准测量细则》中译本和 1943 年版本的《二等水准测量细则》中译本，国家测绘总局与总参谋部测绘局 1958 年共同制定的、1963 年修订的《一、二、三、四等水准测量细则》。

精密水准测量的布测是根据全国水系布置的，水准线路以接近主要河流为主，并尽可能地与其他部门的精密水准路线相配合。水准环长一般为 500~1 000 km。在水利工程甚少和困难地区，环长可适当放宽。每环由几条水准路线构成，水准路线长 150~250 km。水准路线的结点，埋设水准主点标石一组。重要结点埋设甲型水准标石，一般结点埋设乙型水准标石。在甲、乙型标石两旁 20~100 m 的范围内另

埋设两个丙型水准标石。一般水准点均埋设丙型水准标石。冻土与流沙地区分别埋设丁型和戊型标石。城市还有墙脚标志。上述甲型、乙型、丙型、丁型、戊型水准标石的规格可参见水利部 1954 年编印的《水利部精密水准测量细则》。水准点间距 4~8 km。水准观测，一般在埋石半年后进行。当时的水准点编号由 3 组数(字)组成，如苏-12-14 号点，表示由江苏省水利厅施测的第 12 号精密水准路线的第 14 号水准点。以后施测的水准点，编号方式与此不同。

精密水准的观测采用重合法读数，按往返测方式进行。一般使用威特 N3 水准仪和与之配套的因瓦水准标尺，转进点尺承采用尺台。视线长度一般为 50 m，最长不得超过 60 m，前后视不等差小于 1 m，观测次序采用“后、前、前、后”和“前、后、后、前”依次变换的方式。

精密水准测量的限差规定：测段往返差不符值小于 $\pm 4\sqrt{R}$ mm(R 为以 km 为单位的两水准点的间距)，40 km 以内的区段也依此计算限差；当区段大于 40 km 时，若限差超限，需计算每千米的系统中误差，其值不得大于 ± 0.3 mm。若大于此值的超限成果需返工重测。

精密水准测量完成后，需按拉列曼公式计算每千米水准测量的偶然中误差 η 和系统中误差 σ 。

$$\eta^2 = \frac{1}{4} \left\{ \frac{[\Delta^2]}{[L]} - \frac{[R^2]}{[L]^2} \cdot \left[\frac{\lambda^2}{L} \right] \right\} \tag{2-4-1}$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{4[L]} \left[\frac{\lambda^2}{L} \right] \tag{2-4-2}$$

若闭合环在 10 个以上时，尚需按式(2-4-3)计算每千米水准测量的系统中误差。

$$\sigma^2 = \frac{1}{[L^2]} \left\{ \frac{[F_h^2]}{2} - \eta^2 [L] \right\} \tag{2-4-3}$$

式(2-4-1)、式(2-4-2)、式(2-4-3)中：

- L 为有同一系统误差影响的各路线的长度，单位为 km；
- $[L]$ 为一组路线的总长度或闭合环的总长度，单位为 km；
- Δ 为测段往返测闭合差，单位为 mm；
- R 为测段长度，单位为 km；
- λ 为路线 L 往返观测结果之总系统误差，单位为 mm；
- F_h 为环闭合差，单位为 mm。

2. 国家一、二等水准

除水利部门进行的精密水准测量外，这一时期总参谋部测绘局和国家测绘总局还进行了国家一、二等水准测量。国家一等水准测量的目的是为在我国领土范围内以尽可能的高精度测定主要高程控制网，为国家经济建设、国防建设和科学研究服务。二等水准是一等水准的进一步加密。1958 年以后布测的一等水准选择最适当的路线，以主干线的形式并尽量闭合成环形。二等水准路线闭合环周长一般为 500~1 000 km，高山区、沙漠区及其他困难地区，可根据具体情况，适当布置。一、二等水准路线的结点，以及一等路线上每隔 100 km，二等路线上每隔 400~600 km 处，均埋设甲型基本标石。两个甲型基本标石之间，埋设乙型基本标石，其大致间距：一等为 50 km，二等为 50~80 km。在上述间距范围内，尽可能在大城市附近埋设甲型或乙型基本标石。在各等水准路线上，每隔 4~8 km 埋设普通水准标石。在通行困难的地区，可增长为 10~15 km，在工程建设地区，也可适当缩短。

国家水准路线的命名按照“起西止东，起北止南”的顺序，或按“顺时针方向”，以两端地名的简称确定，如北京至石家庄一等路线的名称编为“Ⅰ京石线”。水准点则以顺序编号并注以标石类型及其标志。如由北京起第 73 个水准点上的标志，编为“Ⅰ京石 73 甲上”。各类水准标石与标志可参阅当时的规范。

一、二等水准按重合法、往返测方式观测。仪器多使用蔡司 Ni004 及其相应的因瓦水准标尺，