

道路工程测量

王健 田桂娥 吴长悦 宋利杰 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

道路工程测量

王健 田桂娥 吴长悦 宋利杰 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

道路工程测量/王健等编著. —武汉: 武汉大学出版社, 2015. 7
ISBN 978-7-307-15813-9

I. 道… II. 王… III. 道路测量 IV. U412.24

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 103135 号

封面图片为上海富昱特授权使用(© IMAGEMORE Co., Ltd.)

责任编辑: 方慧娜

责任校对: 汪欣怡

版式设计: 马 佳

出版发行: 武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: cbs22@whu.edu.cn 网址: www.wdp.com.cn)

印刷: 武汉宏达盛印务有限公司

开本: 787 × 1092 1/16 印张: 12.5 字数: 290 千字

版次: 2015 年 7 月第 1 版 2015 年 7 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-15813-9 定价: 28.00 元

版权所有, 不得翻印; 凡购我社的图书, 如有质量问题, 请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

随着我国经济建设的迅猛发展,测绘技术也在朝着高智能化、电子化方向进步。在道路工程建设方面,工程的规模越来越大、等级越来越高、结构越来越复杂、对质量的要求越来越高,这就要求相应的测量技术和手段要不断更新和完善。在这种情况下,作者在总结多年测绘教学、生产及科研经验的基础上,参阅了大量相关资料,编写了本书。

本书在阐述工程测量基本理论和方法的基础上,分类介绍了公路、铁路、桥梁、隧道等工程建设中测量工作的内容和方法。书中的内容着重突出实用性和创新性,并以适量的篇幅介绍了当前国内外道路、桥梁、隧道测量的先进成果和经验。本书共分9章,分别介绍了道路工程控制网建立的方法、施工放样的方法和误差控制措施、线路曲线测设的方法、道路勘测阶段的测量工作,以及公路、铁路、桥梁、隧道等工程施工测量的内容和方法。参加编写的作者及分工情况如下:王健(华北理工大学),撰写第1~7章;田桂娥(华北理工大学),撰写第8章;吴长悦(华北理工大学),撰写第9章;宋利杰(华北理工大学)对书稿进行统一校对工作。

在本书的编写中,作者参阅和引用了大量相关标准、规范、书籍和文献资料,在此向有关作者表示衷心感谢!虽然作者多次修改书稿,力图完善,但仍难免存在疏漏和错误,敬请读者提出宝贵的修改意见。

作者

2015年4月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 铁路工程建设中的测量工作	1
1.2 公路工程建设的一般知识	2
1.3 道路工程测量技术的发展	3
第 2 章 道路工程控制网的建立	6
2.1 道路工程控制网建立的一般要求	6
2.2 道路工程平面控制网坐标系的选择方法	8
2.3 道路工程控制网的建立	11
2.4 铁路工程控制网的建立	20
第 3 章 施工放样的方法和精度分析	25
3.1 概述	25
3.2 坐标法放样点的平面位置	26
3.3 交会法放样点的平面位置	34
3.4 归化法放样点位	37
3.5 高程放样方法	39
第 4 章 道路曲线测设	44
4.1 概述	44
4.2 圆曲线的测设	45
4.3 有缓和曲线的圆曲线	50
4.4 偏角法测设带缓和曲线的圆曲线	57
4.5 坐标法放样平面曲线	60
4.6 不完全缓和曲线的计算	62
4.7 曲线弦线的偏角和夹角的计算	64
4.8 竖曲线	66
第 5 章 道路工程勘测设计阶段的测量工作	69
5.1 道路初测阶段的测量工作	69
5.2 道路定测阶段的测量工作	72

5.3	道路纵横断面测量	76
5.4	既有线路测量	79
第6章	道路工程施工测量	82
6.1	路基施工与竣工测量	82
6.2	公路路面施工测量	87
6.3	铁路轨道施工测量与竣工测量	89
6.4	道路工程变形监测概述	90
6.5	路基的变形监测	93
第7章	桥梁施工测量	99
7.1	概述	99
7.2	桥梁施工控制网的建立	101
7.3	桥梁基础施工测量	106
7.4	桥梁墩、台及高塔柱施工测量	108
7.5	桥梁架设施工测量	113
7.6	桥梁施工和运营期间的变形监测	119
第8章	隧道工程施工测量	123
8.1	概述	123
8.2	隧道地面控制测量	125
8.3	隧道地下控制测量	130
8.4	竖井联系测量的方法和精度分析	135
8.5	陀螺经纬仪定向	146
8.6	大坡度斜井联系测量的方法	149
8.7	贯通测量误差的预计	153
8.8	隧道施工测量与竣工测量	156
8.9	隧道结构变形监测	161
第9章	高速铁路施工测量	166
9.1	概述	166
9.2	高速铁路精密工程控制网的建立	169
9.3	高速铁路路基施工测量	180
9.4	高速铁路轨道施工测量	183
9.5	高速铁路竣工测量	189
	参考文献	191

第1章 绪 论

道路工程包括铁路、公路及桥梁、隧道、涵洞等构造物。与其他工程建设相似，道路工程建设一般可以分为三个阶段，即规划设计阶段、建筑施工阶段、运营管理阶段，三个阶段对应的测量工作分别为“工程勘测”、“施工测量”、“变形监测”。

1.1 铁路工程建设中的测量工作

1.1.1 铁路工程勘测设计阶段的基本程序

一条线路的勘测和设计工作，主要是根据国家的计划与自然地理条件，确定线路经济合理的方案。线路设计除了地形资料以外，还必须考虑线路所经地区的工程地质、水文地质以及经济等方面的因素。线路设计一般分阶段进行，其勘测工作也要分阶段进行。铁路是一种以钢轨引导列车前进的运输方式，为保证交通安全，铁路不仅要有平顺的线形、缓和的纵坡，而且还要有坚实稳定的路基、平整的轨(路)面、牢固耐用的桥涵和其他人工构造物及附属设备。铁路由路基、轨(路)面、涵洞、桥梁、隧道等基本构造物组成，有时还有路基防护工程、排水工程等。

铁路工程勘测设计是为铁路建设收集设计资料，并做出经济合理的设计，这项工作是一项政策性强、涉及面广、技术复杂的工作。铁路勘测设计一般要经过下列过程：方案研究、初测和初步设计、定测和施工设计。方案研究是在搜集沿线各种技术资料(包括相关地区的中小比例尺地形图、各种航摄相片、气象、水文、经济等资料)，设计人员对资料进行全面的分析和比较后，拟定线路的可能方案和确定一些重要技术问题(例如线路等级、运输能力等)，提出初步选择意见和方案研究报告。初测是初步设计阶段的勘测工作，其主要任务是提供沿线大比例尺带状地形图以及地质和水文方面的资料。初步设计是由设计人员根据初测带状地形图和其他初测资料，研究各种方案线路的中线位置，确定线路、桥涵、隧道等工程结构物的位置、方向、坡度、曲线半径等，初步设计要对一切有价值的方案进行研究比选，通过经济、技术等方面的比较，选定一个经济合理的方案，由于这项工作在室内进行，故称为纸上定线。定测是为施工设计收集资料，其主要任务是把初步设计选定的线路中线测设到实地上，并测绘线路的纵、横断面，结合现场的地形、水文、地质等实际情况尽量改善线路的位置，力求选出最经济合理的线路。施工设计的主要任务是根据定测资料进行线路纵、横断面设计和路基设计，并对线路全线的所有桥涵、隧道、车站等个体工程做出单独的详细设计，并提供工程数量和各种工程预算，形成施工设计文件。方案研究一般不作为一个设计阶段，故这种方式称为两阶段设计，即初步设计和

施工设计, 勘测工作分为初测和定测两个阶段。

勘测设计阶段的测量工作有草测、初测和定测工作。在方案研究中, 若无足够的地形资料, 就要进行草测。初测时要进行线路平面控制测量、线路高程测量和地形测量。定测中要进行交点放样、中线测量(包括直线和曲线的测设)、纵断面测绘和横断面测绘。

1.1.2 铁路工程施工和运营阶段的测量工作

施工阶段测量的主要任务是保证各种建筑物能按照设计位置准确地建立起来。施工阶段的首项工作是对控制点和中线点进行“复测”。复测是为了检查线路的主要控制桩的正确性和补设缺损的桩橛。路基施工前应先建立施工控制网, 对于重要的工程, 施工控制网还应进行专门的设计。然后按照设计要求测设工程构筑物的各个部位(例如路基工程应进行中桩、边桩的放样, 施工过程中要随时进行中线和高程测量, 这些工作要反复进行, 贯穿整个施工过程)。各种工程结束后, 再进行贯通全线的竣工测量。

运营阶段, 当对既有线路进行改建、修建时, 都需要进行一系列的测量, 其测量工作的特点是以既有线路为基础, 并对既有线路做详细的测量。为了更新资料, 对线路现状和沿线地形每隔一定年份要进行全线的测量, 即所谓“旧线测量”。

对于沿线的桥梁和涵洞, 施工前应建立专门的施工控制网。在施工过程中, 应按设计的精度要求放样构筑物的各个部分。为了保证构筑物的质量和施工安全, 在施工过程中就要对某些部位进行变形监测, 例如, 对桥梁的桥墩桥台进行沉降监测、对主梁的挠度变形监测、对高塔柱的变形监测等。这些变形监测工作一直延伸到运营阶段。

1.2 公路工程建设的一般知识

1.2.1 公路勘测设计概述

公路是指连接城市、乡村和工矿基地等, 主要供汽车行驶, 具备一定技术和设施的道路。由于受自然条件和地物的限制, 公路在平面和纵断面上均由直线和曲线组成。公路结构主要有路基、路面、排水结构物、桥梁、隧道、挡土墙等组成。公路勘测程序与铁路勘测程序大体相同, 基本可以分为初测和定测, 这种勘测方式通常称为两阶段勘测设计。初测常被称为踏勘测量, 定测常被称为详细测量。初测是一般公路所采用的勘测设计程序。踏勘测量主要是了解线路所经地区的自然地理条件(包括地形、地质、水文等情况), 选择线路的大致位置, 为初步设计收集资料, 进行初测、编制初步设计和工程概算。详细测量是全面深入地研究线路的各项情况, 精确地测定线路的长度和位置, 编制施工图和工程预算。

除了两阶段勘测设计之外, 根据公路路线的性质和要求, 有时还有一阶段勘测设计和三阶段勘测设计两种方式。一阶段勘测设计这种方式只进行一次详细的定测, 据以编制施工设计和工程预算, 该方式仅适用于技术简单、方案明确的小型公路工程。三阶段勘测设计包括初步设计、技术设计和施工设计三个阶段。技术设计阶段主要是对重大、复杂的技术问题, 落实技术方案, 计算工程数量, 提出修正的施工方案, 修正设计概算, 其深度和

要求介于初步设计和施工图设计之间。三阶段勘测设计适合于技术上复杂且又缺乏经验的建设项目或建设项目中的个别路段、特殊大桥、隧道等。

1.2.2 公路工程施工和运营阶段的测量工作

与铁路工程建设基本一致,公路工程施工和运营阶段的测量工作主要有道路控制网的建立和复测、路基施工测量、路面施工测量、桥梁和隧道等构筑物的施工测量、变形监测、竣工测量等工作。

铁路工程和公路工程都属于国家基本建设,其投资可观,规模宏大。其测量工作有以下特点:

- (1)不同的建设阶段测量工作的内容不同;
- (2)不同的工程或同一工程的不同部位,对施工测量精度的要求不同;
- (3)由于工程规模宏大,其控制网可能跨越若干个投影带,为使投影变形满足要求,常常分段建立抵偿投影面的任意带平面直角坐标系,对于一些精度要求很高的大型构筑物有时还要建立独立坐标系。

需要注意的是,不论是铁路工程还是公路工程,由于其测量工作是为工程建设服务的,所以工程测量人员还必须具有一定的有关工程建设方面的知识。例如,在为工程的规划设计进行勘测时,应该了解该项工程的作用、总体布置的特点以及工程与周围环境的关系,等等。在为工程施工进行定线放样时,必须了解工程的结构,了解工程施工的步骤和方法以及施工现场的布置情况,以便确定在现场应该放样的点和线,选择合适的控制点布设位置和控制测量方案,选择合适的放样方法。测量工作者必须善于识图和读图,以便在工作中验证工程图纸的正确性,正确地计算所需的相关元素。当进行变形监测时,为了合理地进行观测点和基准点的布置,确定观测的精度,选择观测的方法,以及合理地进行成果的整理与分析,都需要具有该项工程的构造及其使用情况的知识。总之,在工程建设的整个过程中进行测量工作时,都需要相关工程的知识。测量工作的目的是为工程建设服务的,测量工作的程序从属于工程勘察设计和施工的程序,测量的方法受施工方法的影响,测量的精度取决于工程建筑的限差要求。因此,从事测量工作的人员必须掌握相关工程建设方面的知识,这样才能使测量工作有针对性,避免盲目。

1.3 道路工程测量技术的发展

随着测绘科学技术的进步,道路工程测量技术正沿着测量数据采集和处理一体化、实时化方向发展,其测量仪器正向精密化、自动化、智能化方向发展。

1.3.1 道路工程测量仪器的发展

(1)测量仪器已由传统的光学仪器发展到光电仪器。光电测角仪器不但实现了数据的自动获取、改正、传输、显示和存储,而且实现了目标自动照准,测角精度与光学仪器相当甚至更高。如T2000、T3000电子经纬仪不但采用了动态测量原理,而且其测角精度可达 $\pm 0.5''$ 。精密距离测量仪器发展迅速,光电测距仪与传统的距离丈量相比较,其自动化

程度与测距精度也越来越高。光学水准仪逐渐被能自动读数、记录、数据处理的电子水准仪代替。

(2)电子全站仪实现了自动测角、测距、自动记录、计算及存储功能。全站仪能够利用其高精度的测角、测距功能提供三维坐标测量系统(STS),如 Leica 公司推出的 TC2003,其测角精度为 $\pm 0.5''$,测距精度为 $1\text{mm}+D\times 10^{-6}$ 。

(3)在全球定位系统 GPS 仪器方面,用 GPS 进行工程测量具有精度高,速度快,不受时间、气候条件和通视条件的限制,并可提供统一坐标系中三维坐标信息等优点,因此在道路工程测量中得到了广泛应用。

(4)陀螺全站仪逐渐发展和普及起来,该仪器可以直接测定方位角,为隧道施工地下导线测量提供起始方位角。相对于传统的陀螺经纬仪,这种仪器具有精度高、一次定位时间短、功能更加强大等优点。

(5)三维激光扫描仪可以对被测对象在不同位置扫描,快速地获取物体在给定坐标系下的三维坐标,通过坐标转换和建模,可以输出被测对象的各种图形和数字模型。

(6)具有多种功能的混合测量系统的发展也为道路工程测量工作带来诸多便利。例如,采用多传感器的高速铁路轨道测量系统,用测量机器人自动跟踪沿轨道前进的测量车,测量车上装有棱镜、倾斜传感器、长度传感器和微机,可以同时测量轨道的三维坐标、轨道的宽度和倾角。

1.3.2 道路工程测量技术和实践的发展

在勘测设计初测阶段的带状地形图测绘中,目前一般采用航空摄影测量的模拟法、解析法,对于小范围的或局部的地区,也采用地面数字成图法测绘。改变了过去的经纬仪导线、水准测量作控制、平板仪测图的方法,使测量精度和效率有了极大的提高。全站仪、GPS 技术的应用,给道路工程测量带来了革命性的变革。利用 GPS 静态相对定位的方式建立的施工控制网,不要求相邻点间通视,在数十平方公里的范围内相对精度达到 10^{-6} 以上,这项技术广泛应用在特大桥、隧道等工程中。GPS RTK 技术可以实时提供厘米级到亚厘米级的定位精度,适用于道路工程的中线、边线放样、纵横断面测量等多种工作,给测量工作带来了极大的便利。目前,全站仪、GPS 技术在道路工程测量中广泛应用于以下方面:

- (1)建立道路工程全线统一的控制网;
- (2)测绘大比例尺带状地形图;
- (3)用于道路中线、边线的放样;
- (4)建立工程或滑坡变形的自动化监测系统;
- (5)纵断面、横断面测量;
- (6)建立桥梁、隧道的施工控制网;
- (7)进行汽车导航和交通管理的测量。

20 世纪 50 年代以来是我国道路工程建设快速发展的阶段,复杂的工程环境和对测绘提出的愈来愈高的精度要求,推动着道路工程测量技术的快速进步,下面列举几个国内相关的工程实例。全长 4407.6m 的武汉长江二桥,主桥为双塔双索面钢筋混凝土斜拉桥,

全桥的施工测量贯通精度(跨距和墩中心偏差)达毫米级;为保证桥梁的运营安全,检验设计参数的合理性,在车辆通行状态下对该桥进行了三个方面的监测:索力测量、塔柱摆动和桥面线型测量,监测结果表明桥梁的设计和施工均满足要求。长达30余公里的杭州湾大桥的GPS首级控制网的最弱点点位精度高达 $\pm 1.4\text{mm}$ 。长18.4km的秦岭隧道,洞外GPS网的平均点位精度优于 $\pm 3\text{mm}$,一等精密水准线路长120余公里,已贯通的辅助隧道,在仅有一个贯通面的情况下,贯通后实测的横向贯通误差为12mm,高程方向的贯通误差只有3mm(张正禄,2005)。在沪宁、沪杭高速公路的上海段施工中,利用GPS建立首级控制网,采用全站仪导线方式加密,在数十公里的范围内点位误差都在20mm以内。在江阴长江大桥的建设中,首先用全站仪建立了高精度的边角网,然后利用GPS对该网进行了检测,检测网的精度达到了毫米级,两种网在精度上符合得非常好。

第2章 道路工程控制网的建立

2.1 道路工程控制网建立的一般要求

道路工程建设中的施工测量工作，也要遵循“由整体到局部，先控制后碎部”的原则，即先在施工现场建立统一的平面控制网和高程控制网，然后以此为基础，测设出各个建(构)筑物及其构件的位置。在进行各建(构)筑物放样时，所利用的各类控制点必须是同一个系统中的，这样才能保证各建(构)筑物的正确施工。道路工程施工控制网的点位、密度以及精度取决于工程建筑物的性质和施工条件。由于平面坐标是相对于几何参考面，而高程是相对于物理参考面，因此控制点通常表述为平面坐标和高程两个方面，故施工控制网应包括平面控制网和高程控制网。道路施工控制网一般具有以下特点：

(1)道路工程的控制点都是沿线路布设的。由于控制网建立的目的是为工程建筑物的施工放样提供控制，所以控制点的位置应沿线路布设，一般位于距线路中线 50~300m 范围内、地势较高、土质坚实、便于放样的位置。

(2)控制点使用频繁。在施工过程中，控制点往往直接用于放样。对于复杂构筑物，不同的高度层往往具有不同的形状、不同的尺寸和不同的附属工程，随着施工层面的升高，往往对每一层都要进行放样工作。由此可见，控制点的使用是相当频繁的。这样一来，对于控制点的稳定性、长期保存的可能性、使用时的方便性就提出了比较高的要求。

(3)控制网的投影变形小。道路工程施工控制网的相对精度要求比较高，一般道路要求控制网的长度投影变形值不大于 25mm/km，高速铁路要求不大于 10mm/km。为了减小投影变形带来的误差，其坐标系常常选择抵偿投影面和任意带的高斯投影平面直角坐标系。对于某些施工精度要求更高的构筑物施工，常常采用经过联测得到的一个点的坐标和一个方位角作为固定的起算数据，其长度基准不需要投影到平均海平面或参考椭球面所对应的平面上，而是投影到工程对定线放样精度要求最高的高度面上。

道路工程往往是路基、桥涵、隧道等构筑物的综合体，各个项目对放样的精度要求不同。另外，各项目之间轴线的几何联系，相对于其内部各轴线间的几何联系，在精度上往往有较大差异。因此，在布置施工控制网时，采用分级布设的方法是比较合理的，线路平面控制网为首级控制网，沿整个线路统一布设，其作用是控制整个道路的位置和形状，桥涵、隧道可以根据首级控制网建立加密的二级控制网，其作用是控制各建(构)筑物内部的几何关系。《公路勘测规范》(JTG C10—2007)中规定：大型构筑物控制网与国家或路线控制网进行联系且其等级高于国家或路线控制网时，应保持其本身的精度。因此，对精度有特殊要求的工程建筑物，其二级控制网的精度有时要高于首级控制网，其在精度上并不

遵循“由高级到低级”的原则。

道路工程勘测设计和施工期间的高程控制网，一般都要分级布设，尤其在施工期间，要求在建筑物附近的不同高度上都必须布置临时水准点，临时水准点的密度应保证只设置一个测站就能进行高程放样。分级布设的原则：首先沿线路全线布设基本高程控制网，然后根据不同施工阶段和施工高度布设加密网。加密点一般为临时水准点，可以因地制宜，置于凸出的岩石上或已经浇筑好的混凝土上，但标记要醒目，便于保存和寻找。需要指出的是，平面控制网和高程控制网可以分开布设，也可以把平面控制点联测高程作为一个整体布设，具体采用哪一种形式应该视地形起伏和测量的难易程度等情况而定。

在道路工程的勘测设计阶段，主要的测量工作是测绘各种比例尺的地形图和纵、横断面，其控制网的精度只要满足相关要求即可。而在施工阶段，主要的测量工作是施工放样，其精度主要体现在相邻点的相对位置上，必须满足设计和相应的规范要求，一般来说比勘测设计阶段的精度要求高。对于各种不同的构筑物，或对于同一构筑物中不同的部分，这些精度要求并不一致，而且有时相差悬殊。施工放样的精度受控制网误差和放样过程中的误差影响，施工控制网精度的确定，应该从保证建筑物放样的精度要求来考虑。正确制定工程建筑物放样的精度要求，是一项极为重要的工作，如果定得过宽就可能造成质量事故，若定得过严则会给测量工作增加许多不必要的麻烦。

建筑物竣工时的实际误差是由施工误差（对于桥涵等构筑物而言包括构件制造误差、施工安装误差等）和测量放样误差所引起的，其值不能超过设计或相关规范的容许偏差（即建筑限差），所以测量误差的限差应该根据建筑限差和施工的精度来制定。由于各种建筑物，或同一建筑物中各不同的建筑部分对放样精度的要求是不同的，因此，首先遇到的问题是根据哪一个精度要求来考虑控制网的精度。在选择时，应该考虑到施工现场条件、施工方法和程序，分析这些建筑物或建筑部分是否必须直接从控制点进行放样。对于某些建筑元素，虽然它们之间相对位置的精度要求很高，但在放样时，可以利用它们之间的几何联系直接进行，因而在考虑控制网的精度时，可以不考虑它们。例如某些大桥施工中提出，钢箱梁的安装误差限差为 1mm，合拢段拼接误差限差为 3mm，但它们都不是直接根据控制点放样的，而是根据桥梁主轴线来放样，所以在设计控制网的精度时无需考虑这些精度要求。

确定了测量放样的精度要求以后，就可以用这个精度作为起算数据来推算施工控制网的必要精度。此时，应根据施工现场的情况和放样工作的条件来考虑控制网误差与放样过程中产生误差的比例关系，以便合理地确定施工控制网的精度。设 M 为放样后所得点位的总误差， m_1 为控制点误差引起的误差， m_2 为放样过程中所产生的点位误差，则

$$M = \sqrt{m_1^2 + m_2^2} \quad (2-1)$$

设 $m_1 = \frac{m_2}{k}$ ，则有

$$M = m_2 \sqrt{1 + \frac{1}{k^2}} \approx m_2 \left(1 + \frac{1}{2k^2} \right) \quad (2-2)$$

对于桥梁和道路上一般的放样点，由于其距离控制点较远，现场环境复杂，放样工作

中受到施工的干扰，因而放样过程中的误差较大。因此在设计施工控制网精度时，应该遵循“忽略不计原则”，即应使控制点误差对于施工放样最终结果的误差影响，小到可以忽略不计，以便为今后的放样工作创造有利的条件。根据这个原则，对于施工控制网的精度要求进行以下分析。

若令 $\frac{M - m_2}{M} \leq 5\%$ ，可以认为 $M \approx m_2$ ， m_1 对 M 的影响可以忽略不计。此时则有 $\frac{1}{2k^2} \leq 0.05$ ，即 $k \geq \sqrt{10}$ 。于是可得

$$m_1 = \frac{1}{\sqrt{10}}m_2 \approx \frac{1}{3}m_2$$

(2-3)

2.2 道路工程平面控制网坐标系的选择方法

许多道路工程的相关规范中都有这样的规定：当工程建筑物附近有精度满足要求的合适的国家控制点时，应予以利用。这样一方面便于利用国家高精度控制点的现有成果，另一方面便于其他单位的使用和管理。所以，道路工程控制网的坐标系应尽量纳入国家坐标系。目前，我国国家大地测量控制网都是依高斯投影方法按 6° 或 3° 带进行分带和计算，这样就会使控制网的边长产生投影变形。道路施工放样要求点位之间的距离要与设计的距离一致，这时控制网的边长投影变形会影响放样点间边长的精度。为了减小这种影响，就必须对变形值的大小进行分析，选择出满足控制网精度要求的投影带和投影面。

2.2.1 投影变形分析和投影带、投影面的选择

1. 投影变形分析

控制网边长的变形主要由两种因素引起：

(1) 实测边长归算到参考椭球面上的变形影响，其值 ΔS_1 为

$$\Delta S_1 = - \frac{S \times H_m}{R}$$

(2-4)

式中： H_m ——归算边高出参考椭球面的平均值；

S ——归算边的长度；

R ——归算边方向参考椭球法截弧的曲率半径。

按照式(2-4)可以计算不同高度处每千米长度的投影变形值，如表 2-1 所示。

表 2-1

每千米的长度投影变形值

H_m/m	10	20	30	40	50	80	100
$\Delta S_1/mm$	-1.6	-3.1	-4.7	-6.3	-7.8	-12.6	-15.7

(2) 将参考椭球面上的边长归算到高斯投影面上的变形影响，其值 ΔS_2 为

$$\Delta S_2 = \frac{1}{2} \times \left(\frac{y_m}{R_m} \right)^2 \times S_0 \tag{2-5}$$

式中： S_0 ——椭球面上的归算边长， $S_0 = S + \Delta S_1$ ；

y_m ——归算边两端点的横坐标平均值；

R_m ——归算边方向参考椭球法截弧的曲率半径。

按照式(2-5)计算各种 y_m 时每千米长度的投影变形值，如表 2-2 所示。

表 2-2 每千米的长度投影变形值

y_m/km	10	20	30	40	50	80	100
$\Delta S_2/\text{mm}$	1.2	4.9	11.1	19.7	30.7	78.7	133.0

控制网边长的投影变形值为

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = -\frac{S \times H_m}{R} + \frac{1}{2} \times \left(\frac{y_m}{R_m} \right)^2 \times S_0 \approx S \times \left(\frac{y_m^2}{2R_m^2} - \frac{H_m}{R} \right) \tag{2-6}$$

《公路勘测规范》(JTG C10—2007)中规定：线路平面控制网坐标系的确定，应满足控制网的长度投影变形值不大于 25mm/km 的要求。为了满足测量结果的一测多用，在满足工程精度的前提下，工程中应统一采用国家 3°高斯平面直角坐标系。当控制网边长的投影变形值不能满足工程的精度要求时，由公式(2-6)可以看出，可以通过选择合适的高程参考面(改变 H_m)或移动中央子午线的位置(改变 y_m)的方法，使变形值 ΔS 的大小满足要求。

2. 道路工程控制网平面坐标系的选择

在道路工程控制测量时，根据工程所在的位置、工程范围及施工各个阶段对投影误差的要求，可以采用以下几种平面直角坐标系。

(1) 国家 3°带高斯正形投影平面直角坐标系

由前面的分析可知，当工程区域的平均高程值不大，而且按照国家 3°投影带的 y 坐标值也不大时，其总的投影变形值 ΔS 也满足要求，此时无须考虑投影变形的问题，直接采用国家统一的 3°带高斯正形投影平面直角坐标系作为工程测量的坐标系。

(2) 抵偿投影面的 3°带高斯正形投影平面直角坐标系

在这种坐标系中，仍采用 3°带高斯正形投影，但投影的高程面不是参考椭球面，而是依据长度投影变形选择的高程参考面，在这个参考面上，工程区域的长度变形为零，即 $\Delta S = 0$ 。于是按照公式(2-6)得选择的高程参考面的高程为

$$H_m = \frac{y_m^2}{2R_m^2} \times R \approx \frac{y_m^2}{2R} \tag{2-7}$$

当工程区域的平均高程值较大，且距离国家 3°投影带的中央子午线较近时，采用这种坐标系比较有效。

(3) 任意带高斯正形投影平面直角坐标系

在这种坐标系中,仍把地面观测结果归算到参考椭球面上。为了使 $\Delta S=0$,投影带的中央子午线不采用国家3°带的划分方法,而是依据长度投影变形选择某一条子午线,在这条子午线上,工程中央区域的长度变形为零。按照公式(2-6)得选择的子午线与工程中央相距为

$$y_m = \sqrt{2RH_m} \quad (2-8)$$

当工程区域的平均高程值不大,且距离国家3°投影带的中央子午线较远时,采用这种坐标系比较有效。例如,长深(长春至深圳)高速公路的某段位于东经117°58′、北纬40°16′,平均高程为20m,建立施工控制网时如果选择国家3°带高斯正形投影平面直角坐标系,则控制网边长的投影变形值太大,于是按照该方案选择经度为117°50′的中央子午线建立了控制网的坐标系,可以有效地减小了控制网边长投影误差。

(4) 具有高程抵偿面的任意带高斯正形投影平面直角坐标系

在这种坐标系中,往往把投影的中央子午线选择在测区中央,地面观测值归算到测区平均高程面上,按高斯正形投影计算平面直角坐标。当工程区域的平均高程值较大,且距离国家3°投影带的中央子午线较远时,采用这种坐标系比较有效。

例如,在上海市磁悬浮轨道工程中,由于工程区域内绝对高程和平均高差较小(一般均在20m以下),且整个工程线路长约30km,故采用上述方案建立了控制网的坐标系。具体做法:选择过磁悬浮工程线路中间位置的子午线为中央子午线进行高斯投影,投影面为工程的平均高程面,保持 x 坐标轴与上海平面坐标系的 x 坐标轴平行, y 轴与上海市平面坐标系的 y 轴重合,经平移,使原点的坐标值保持原上海平面坐标系统的坐标值。通过这样的转换,使得设计单位在上海平面坐标系中所设计的各分项工程的设计坐标都可以直接在磁悬浮轨道工程坐标系中实施放样。

(5) 独立平面直角坐标系

当工程区域的范围较小时,可以不进行方向和距离改正,直接把局部地球表面看做平面,建立独立的平面直角坐标系。这时,起算点坐标及起算方位角最好能与国家网或城市网联测,若联测困难,可以自行测定边长和方位角,而起始点坐标可以假设。

2.2.2 不同的平面直角坐标系间的坐标转换

在道路工程测量工作中经常会遇到不同坐标系之间进行坐标换算的问题,例如:同一点位的施工坐标系与城市坐标系或国家坐标系下的坐标进行换算。在坐标系统转换时,必须建立双向转换关系,使每个点在坐标系中可以自由转换。如图2-1所示,设 xOy 为测量坐标系, $AO'B$ 为施工坐标系,施工坐标系的坐标原点在测量坐标系中的坐标为 (x'_0, y'_0) , $O'A$ 轴的坐标方位角为 α , P 点在两个坐标系中的坐标分别为 (x_p, y_p) 、 (A_p, B_p) ,其换算关系为:

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_0 \\ y'_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_p \\ B_p \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

$$\begin{bmatrix} A_p \\ B_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p - x'_0 \\ y_p - y'_0 \end{bmatrix} \quad (2-10)$$

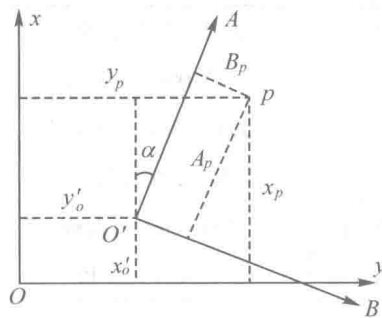


图 2-1 测量坐标系与施工坐标系间的坐标转换

2.3 道路工程控制网的建立

2.3.1 道路工程平面控制网的形式

道路工程平面控制网的建立一般经过下列过程：

(1) 首先进行控制网的设计工作，包括：

- ① 搜集道路沿线已有的测量资料，进行现场踏勘和周密调查研究；
- ② 根据控制网的建立目的、要求和控制范围，进行图上规划和野外选点，确定控制网的网形和参考基准；
- ③ 根据测量仪器条件拟定观测纲要（观测方法和观测值的预期精度）；
- ④ 根据观测的人力、物力进行成本预算；
- ⑤ 根据控制网图形和观测精度进行目标成果的精度估算与分析，并与预定的要求相比较，再做必要的方案修正。

(2) 然后付诸实施，包括：埋设标志，建立观测墩、观测台和观测标志，按预定纲要进行观测，按观测数据评定观测精度。

(3) 最后进行成果处理、平差计算。

公路平面控制测量，包括道路、桥梁、隧道及其他大型建筑物的平面控制测量。平面控制网的布设应符合因地制宜、技术先进、经济合理，确保质量的原则。路线平面控制网是公路平面控制测量的主控制网，沿线各种构造物的平面控制网应联系于主控制网上，主控制网宜全线贯通，统一平差。平面控制网的建立，可以采用全球定位系统（GPS）测量、三角测量、边角测量和导线测量等方法。各级公路、桥梁、隧道的平面控制测量等级的确定，应符合表 2-3 中的规定。对于桥梁控制测量的等级，除符合表 2-3 中的规定外，还应考虑施工时对桥轴线中误差的要求，对施工放样精度要求特别高的桥梁，应根据桥梁跨度、结构等计算桥轴线定位的相对中误差，进而确定控制网的等级。对于隧道控制测量的等级，除符合表 2-3 中的规定外，还应考虑隧道横向贯通误差对控制网精度的要求。