

# 沉管隧道设计施工手册

## 综合篇 I

中国交通建设股份有限公司

科学出版社



# 沉管隧道设计施工手册

## 综合篇 I

中国交通建设股份有限公司

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

沉管隧道工程的不同施工阶段对测量工作有不同的要求，科学的测量组织管理在沉管隧道建设方面可发挥巨大的作用。

本书全面系统地介绍了沉管隧道工程各项施工测量的主要关键技术，包括测量前期规划、控制网建立、沉管预制、隧道基础施工、沉管浮运、沉放和水下对接等多道工序内容。本书是在港珠澳大桥沉管隧道理论结合实践的基础上，结合国内外其他沉管隧道工程应用情况编写而成，汇集了港珠澳大桥沉管隧道、韩国釜山—巨济沉管隧道等案例的工程测量的方法、原理、精度要求方面内容。

本书可供从事沉管隧道设计、测量、施工、工程监理等工作的工程技术人员参考。

审图号：GS ( 2018 ) 5376 号

图书在版编目 ( CIP ) 数据

---

沉管隧道设计施工手册. 综合篇. I / 中国交通建设股份有限公司编. —北京：科学出版社，2019.2

ISBN 978-7-03-059343-6

I. ①沉… II. ①中… III. ①沉管隧道—隧道工程—设计—手册 ②沉管隧道—隧道施工—手册 IV. ①U459.9-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 ( 2018 ) 第 251400 号

---

责任编辑：郭勇斌 欧晓娟 / 责任校对：杨聪敏

责任印制：张克忠 / 封面设计：黄华斌

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100717

http: //www.sciencep.com

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2019 年 2 月第 一 版 开本：787×1092 1/16

2019 年 2 月第一次印刷 印张：27 插页：8

字数：631 000

定价：188.00 元

( 如有印装质量问题，我社负责调换 )

# “沉管隧道设计施工手册”

## 编委会

署 名 中国交通建设股份有限公司  
顾 问 冯正霖 徐 光 朱永灵

## 编辑委员会

主 任 刘起涛 陈奋健  
副 主 任 陈 云 孙子宇 林 鸣 刘伯莹  
编 委 (以姓氏笔画排序):

王世峰	王汝凯	王彰贵	毛元平
方 彦	卢永昌	史福生	吕卫清
朱利翔	刘建波	李一勇	李惠明
吴利科	吴维忠	张 鸿	张鸿文
陈绍章	林少敏	孟凡超	钟建驰
曹根祥	曹湘波	康学增	梁卓仁
梁德章	裴明山		

主 编 林 鸣  
副 主 编 刘晓东 尹海卿 卢永昌  
编审委员 (以姓氏笔画排序):

久保田	王 强	孔令磊	刘亚平
刘海青	关秋枫	孙 亮	花田幸生
苏长玺	李春初	杨 华	杨 威
杨永宏	杨绍斌	杨树生	吴凤亮
何 波	辛文杰	张 洪	张宝兰
陈 林	陈 鸿	陈 越	陈伟彬
罗 冬	周光强	孟凡利	赵 辉
钟辉虹	高 潮	高纪兵	郭旭理
黄凯彬	黄维民	梁 桁	梁杰忠
宿发强	屠柳青	董 政	韩西军
谢臣伟	翟世鸿	樊建华	黎亚洲

## 《综合篇 I》编辑组

组 长 高纪兵 李哈汀 刘可心  
成 益品 马宗豪

成 员 (以姓氏笔画排序):

于 健	冯颖慧	刘 馨	刘兆权
刘思国	孙阳阳	李 斌	李顺凯
李德辉	杨润来	肖利军	汪华文
宋江伟	张 超	张秀振	张怡戈
陈 琥	赵 辉	胡志远	胥新伟
莫日雄	高 潮	锁旭宏	焦运攀

# 序 言

沉管隧道工法是水下隧道建设的主要工法之一，其建设关键工序包括基础处理、管节预制、浮运、沉放对接、最终接头等。1910年建成的穿越美国密歇根州底特律（Detroit）河铁路隧道是世界上第一条沉管隧道，采用钢壳式沉管隧道技术，其后在北美洲陆续建造了几十条这种结构的沉管隧道。直至1942年建成的穿越荷兰鹿特丹马斯（Maas）河的公路沉管隧道，揭开了混凝土沉管隧道建设的序幕，也形成了沉管隧道两种主要结构型式，即钢壳式沉管和混凝土沉管隧道。后来，日本在这两种主要结构型式的基础上进行融合，形成了一种新的管节结构，即三明治式沉管结构，并得到了广泛的应用。

通过百年的沉管隧道设计与施工技术积累，沉管技术在深水、复杂水流和复杂地质条件下的设计施工技术不断进步并渐趋成熟，已经能够跨越更深和更宽阔的河口、海峡水道。其中几大标志性沉管隧道工程包括：首座混凝土沉管隧道工程马斯隧道，工厂法预制的厄勒（Øresund）海峡沉管隧道，干坞内移动模架全断面水平浇筑节段的釜山—巨济沉管隧道，目前最深的海底沉管隧道博斯普鲁斯（Bosphorus）海峡沉管隧道，目前世界最长、埋深及体量最大的港珠澳大桥公路沉管隧道。

港珠澳大桥东连香港，西接珠海、澳门，是集桥、岛、隧为一体的超大型跨海通道。由中国交通建设股份有限公司联合体承建的岛隧工程是大桥的控制性工程，是目前世界上综合难度最大的沉管隧道之一。本手册主要由中国交通建设股份有限公司依托港珠澳大桥岛隧工程项目的建设经验，并结合世界上其他沉管隧道的建设经验，在多家设计、施工单位及同行的支持和共同努力下汇编完成。

编者收集和研究了世界典型沉管隧道相关资料，根据参与港珠澳大桥沉管隧道的规划、调研、选型、建设等全过程的设计施工经验，并对当今世界上的主要沉管隧道设计施工技术进行了系统的梳理、总结与概括，最终编写完成了本手册。由于目前世界上还没有沉管隧道行业系统性的应用手册公开发表，编写过程中汇集了世界各地典型沉管隧道工程的资料，有较多资料并未正式发表，作者姓名不详，在此向为本手册作出指导、提供资料的同行和专家及未知姓名的作者们致以崇高的敬意，感谢他们为沉管隧道设计施工手册的系统性、完整性做出的巨大的贡献。

本手册具体分为设计篇、基础篇、预制（制造）篇、安装篇及综合篇，汇集了国内外类似沉管隧道工程的规划、科研、勘察设计、试验及施工等资料，其目的在于为世界沉管隧道行业梳理一套有关沉管隧道勘察设计、基础、制造、安装及综合系统性的工具书。本手册主要对沉管隧道设计、施工原理及具体工艺方法要点进行了阐述，并列举了大量典型工程案例，以提供思路及借鉴，希望读者能从中得到启发及参考。由于时间紧，作者水平有限，难免有不足、不妥和理解有误之处，敬请专家和读者批评指正。

编 者

2018年12月

# 目 录

## 序言

<b>1 绪论</b> .....	1
1.1 沉管隧道对测量工作的要求.....	1
1.1.1 控制网建立阶段.....	1
1.1.2 沉管预制阶段.....	2
1.1.3 沉管隧道基础施工阶段.....	2
1.1.4 沉管沉放对接阶段.....	2
1.1.5 沉管隧道贯通阶段.....	2
1.2 沉管隧道工程测量的特点与内容.....	3
1.2.1 平面控制测量.....	3
1.2.2 高程控制测量.....	3
1.2.3 参考站系统.....	4
1.2.4 水下地形测量.....	4
1.2.5 施工测量.....	4
1.2.6 测量管理.....	4
<b>2 平面控制测量</b> .....	5
2.1 技术设计.....	5
2.1.1 平面控制网的分类.....	5
2.1.2 平面控制网的布设原则.....	6
2.1.3 平面控制网的布设方案.....	7
2.1.4 专用控制网的特点.....	8
2.2 测量方法.....	20
2.2.1 角度观测.....	20
2.2.2 距离观测.....	30
2.2.3 方向观测.....	33
2.2.4 GPS 测量.....	34
2.3 应用案例.....	44
2.3.1 港珠澳大桥首级平面控制网.....	44
2.3.2 港珠澳大桥沉管隧道首级加密平面控制网.....	55
2.3.3 港珠澳大桥沉管预制专用控制网.....	60
2.3.4 港珠澳大桥沉管标定专用控制网.....	66
2.3.5 港珠澳大桥沉管隧道贯通测量控制网.....	80

<b>3</b>	<b>高程控制测量</b>	111
3.1	<b>技术设计</b>	111
3.1.1	高程控制网的分类	111
3.1.2	高程控制网的布设原则	111
3.1.3	高程控制网的布设方案	113
3.2	<b>测量方法</b>	114
3.2.1	水准测量	114
3.2.2	静力水准测量	125
3.2.3	三角高程测量	127
3.2.4	跨河(海)水准测量	132
3.3	<b>应用案例</b>	151
3.3.1	港珠澳大桥沉管隧道首级高程控制网	151
3.3.2	港珠澳大桥沉管隧道首级加密高程控制网	156
3.3.3	港珠澳大桥沉管隧道长距离跨海高程传递测量	169
<b>4</b>	<b>参考站系统</b>	186
4.1	<b>参考站系统介绍</b>	186
4.1.1	参考站功能	186
4.1.2	参考站的性能指标	187
4.2	<b>GNSS 参考站系统分类</b>	188
4.2.1	临时参考站系统	188
4.2.2	CORS	189
4.2.3	CORS 的未来发展和展望	189
4.3	<b>GNSS 参考站系统设计</b>	190
4.3.1	技术依据	190
4.3.2	测量平台基础设施建设	191
4.3.3	设备配置	196
4.4	<b>应用案例</b>	196
4.4.1	港珠澳大桥沉管隧道测量平台稳定性监测	196
4.4.2	港珠澳大桥沉管隧道连续运行参考站建设应用	201
<b>5</b>	<b>水下地形测量</b>	206
5.1	<b>水下地形测绘精度与技术设计</b>	206
5.1.1	精度要求	206
5.1.2	技术设计	206
5.2	<b>水深的测量方法</b>	210
5.2.1	单波束测深	210
5.2.2	多波束测深	211
5.3	<b>应用案例</b>	214

5.3.1	港珠澳大桥沉管隧道基础验收测量	214
5.3.2	港珠澳大桥沉管隧道基础回淤监测	225
<b>6</b>	<b>施工测量</b>	<b>238</b>
6.1	水上定位测量	238
6.1.1	平面位置测量	238
6.1.2	高程测量	243
6.2	水下定位测量	245
6.2.1	平面位置测量	245
6.2.2	高程测量	265
6.3	应用案例	270
6.3.1	港珠澳大桥沉管隧道基础施工测量	270
6.3.2	厄勒海峡沉管隧道先铺基础施工测量	286
6.3.3	港珠澳大桥沉管隧道基床施工测量	292
6.3.4	港珠澳大桥沉管预制测量	313
6.3.5	港珠澳大桥沉管浮运导航定位	331
6.3.6	港珠澳大桥沉管隧道安装定位	335
6.3.7	韩国釜山—巨济沉管隧道安装定位	372
6.3.8	港珠澳大桥沉管隧道贯通测量	391
<b>7</b>	<b>测量管理</b>	<b>404</b>
7.1	概述	404
7.1.1	标准化管理	404
7.1.2	风险管理	406
7.2	应用案例	408
7.2.1	测量标准化流程	409
7.2.2	风险管理	410
	参考文献	417
	彩图	



# 绪 论



## 1.1 沉管隧道对测量工作的要求

沉管隧道施工涉及预制、基础铺设、浮运、沉放和水下对接等多道工序，测量作业点多且面广，其有着精度要求高、技术难度大、测量周期长和工作量繁重等显著特点。在整个施工过程中，每道工序的测量任务对沉管隧道建设都起着至关重要的作用。沉管隧道自诞生以来，已经在美国、荷兰和日本等国得到广泛应用。随着我国经济建设的快速发展和城市化水平的不断提高，交通系统也得到迅速发展，沉管隧道的建设日益增多，但由于沉管隧道的规模越来越大，其建设条件也变得更加复杂，因而在沉管法隧道建设领域仍有一些需要继续深入探究和改进的测量技术问题。

沉管隧道工程的不同施工阶段对测量工作有不同的要求，现分别说明如下。

### 1.1.1 控制网建立阶段

沉管隧道工程一般不超过几平方公里，根据工程规模和性质可两级或多级布设控制网，有些工程的次级网可能比首级网的精度还要高。控制网一般分为测图控制网、施工控制网和变形观测控制网。

测图控制网的测量工作包括确定工程的平面坐标系和高程基准，是整个工程最重要的综合基础测量，为各项测量工作提供位置基准，满足工程建设不同阶段对测绘在质量（精度、可靠性）、进度（速度）和费用等方面的要求，也具有控制全局、提供基准和控制测量误差累积的作用。

施工控制网是为工程施工建设服务的测量控制网，受施工干扰大，控制点使用频繁，对控制点的稳定性、使用的方便性及点位在施工期间保存的可能性等有较高的要求。同时施工控制网的布设应作为整个工程施工设计的一部分，必须考虑施工现场的布置情况及施工的程序、方法，点的位置应分布恰当，密度也应较大。为了防止控制点被破坏，所布设的点位应画在施工设计的总平面图上。

变形观测控制网是在运营阶段为了监视工程建筑物安全情况而专门建立的控制网。

对于大型沉管隧道工程而言，在工程前期应该根据控制网建立一个全面规划，合理地选择海中测量平台的位置和分布，以使其在沉管隧道建设时发挥最大的效益。

### 1.1.2 沉管预制阶段

对于沉管预制阶段的施工测量工作，主要是按照设计的技术要求，建立沉管预制独立施工控制网来控制管节的几何尺寸、线形、顶推轴线、匹配浇筑线形、端钢壳安装精度及舾装件安装等，并进行必要的沉管预制变形监测。

沉管预制并张拉完成后，需对端钢壳（GINA 止水带端及非 GINA 止水带端）进行姿态测量，确定其平整度（竖向偏角、水平偏角），并拟定相应的沉管安装线形控制措施。

### 1.1.3 沉管隧道基础施工阶段

对于沉管隧道基础施工测量（包括基槽挖泥、抛石夯平、碎石基床整平）阶段，主要是在原来设计勘测的基础上，把设计内容测设（放样）到实地上去。但是，对于大范围基础施工且碎石基床铺设精度要求高的沉管隧道，采用常规的测量方法往往不能满足施工需要。为了达到施工要求，还必须开发专用施工管理测控系统，甚至需要打造专用的大型船机辅助设备。基础控制的精度主要取决于隧道的深度与地质条件。另外，施工前和施工过程中还需定时对测控系统稳定性进行检校。

### 1.1.4 沉管沉放对接阶段

在沉管预制完成后，进入浅坞区舾装阶段，除了需要测量端钢壳（GINA 止水带端及非 GINA 止水带端）平面度以外，还需要在端钢壳（GINA 止水带端及非 GINA 止水带端）各倒角处布设特征点，以便正确地选择沉管轴线的实际位置。在沉管绞移至深坞区舾装阶段，对于导向托架、导向杆、拉合台座及测量塔的测设，主要是以待安管节的设计位置为基础，可采用浮态同步测量定位的方法，以便详细地测量和设定各部位的位置和尺寸。

对于沉管沉放对接测量（包括沉管浮运、水下对接安装），主要是以待安管节的设计位置为基础，首先通过长距离浮运导航系统指引管节安全到达设计（待安装）概略位置，然后再按照沉管隧道施工的需要，采用各种不同的测量和设定（放样）方法，将管节按照图纸上所设计的内容准确转移到实地。此外，还要进行施工质量控制。

### 1.1.5 沉管隧道贯通阶段

当前沉管隧道单个管节的长度一般为 120~200 m，沉管隧道由多个管节对接组成，管节的每一次对接安装都存在线形偏差，无论是平面的错边、轴线偏差，还是竖向的管节错台，线形上的偏差会对隧道结构的安全性及后续施工作业带来极为不利影响，若不加以控制，偏差的累加将会对隧道的顺利安装造成难以挽回的损失。

为保证隧道的施工质量，在工程施工前应进行工程测量误差预计，预计中应将允许的竣工误差加以适当分配。一般来说，地面上的测量条件比管内好，故对地面控制测量的精

度要求应相应高一些，而将管内测量的精度要求适当降低。在控制网建立阶段，应严格按照先控制后碎部、高级控制低级、对测量成果逐项检核，测量精度必须满足规范要求等原则进行。在隧道建设阶段，两个相向安装的工作面的施工中线往往因测量误差产生贯通误差（分为纵向贯通误差、横向贯通误差和高程贯通误差）。对于隧道而言，纵向贯通误差不会影响隧道的贯通质量，而横向贯通误差和高程贯通误差将会影响隧道的贯通质量，因此应尽量采用先进的测量设备结合多种控制措施，以保证工程质量。地面控制测量应采用全球定位系统（GPS）测量技术进行；平面联系测量应分多时段观测；洞内导线测量应采用高精度全站仪加大导线边长，减少导线点数，为限制测角误差的传递，当导线前进一定距离后应加测陀螺定向边、人孔井投点等。

## 1.2 沉管隧道工程测量的特点与内容

沉管隧道工程测量与普通工程测量相比，在精度要求、采用的仪器设备和测量方法等方面都存在一定的差别，概括起来，沉管隧道工程测量有以下特点。

- ①沉管隧道工程测量各施工环节的测量精度普遍要求高。
- ②沉管隧道工程规模较大、结构复杂、构件多，测量困难多且难度大。
- ③远离海岸的沉管隧道工程，常规测量手段不能满足测量精度要求。
- ④气象、水文等海上复杂环境因素对测量精度影响较大。
- ⑤测量点多面广，新测量技术应用多，多学科融合，对测量仪器设备性能要求较高。

本书全面系统地介绍了沉管隧道工程各项施工测量的内容，汇集了港珠澳大桥沉管隧道、韩国釜山—巨济沉管隧道等工程测量的各种测量方法、原理、精度要求和必要的实例。现将各章测量内容简介如下。

### 1.2.1 平面控制测量

沉管隧道工程平面控制测量仍遵循从整体到局部、高级到低级的布设原则。其首级控制网等级按照工程大小、规模及位置重要性选择，一般是国家或城市一、二、三、四等网（点），在其基础上布设加密。其布设形式包括：GPS 测量、小三角网、导线、角度和方向交会等。本书重点介绍 GPS 控制测量和全站仪导线测量，而对传统的外业工作只列出作业要求。

### 1.2.2 高程控制测量

高程控制测量作为高程基准，对工程测量至关重要，因此本书使用较大篇幅对高程控制网测量、平差计算、三角高程、跨（河）海水准测量和 GPS 高程测量结合实例做具体介绍。特别是跨（河）海水准测量在外海沉管隧道工程中占有重要位置，本书着重对这部分内容作了较详细的说明，包括水准测量法、光学测微法、经纬仪倾角法、测距三角高程法和 GPS 高程法等观测方法。

### 1.2.3 参考站系统

参考站系统具有范围大、精度高和野外单机作业等众多优点，目前在国内各种工程领域建设中已被广泛应用。对于一个超大型外海工程的施工，可能几个独立的参考站才满足要求。本书主要介绍了在外海作业环境条件下，参考站系统规划、建立、维护、监测及使用的技术方法。

### 1.2.4 水下地形测量

水下地形测量是以图形、数据形式表示水下地物、地貌的测量工作，其成果通常为水下地形图、截面图或以表格、磁性存储器为载体的数据。本书不仅列出了传统的水深测量内业、外业工作的原理、方法、精度要求等内容，还重点介绍了浮泥测量、清淤测量、多波束测深等新技术，其中用了较大篇幅详细介绍了沉管隧道清淤测量的方法和数据处理等。

### 1.2.5 施工测量

施工测量主要包括：水上定位测量和水下定位测量。这是本书的重点内容之一，本书较全面地介绍了沉管基础施工测量、沉管基床施工测量、沉管预制测量、沉管标定测量、沉管浮运导航、沉管安装定位及隧道贯通等施工测量方法，并列出了各施工测量平面控制网及高程控制网的布设与精度要求。

### 1.2.6 测量管理

沉管隧道施工测量点多面广，只有建立科学规范的沉管隧道工程施工测量管理体系，才能保质保量地完成测量工作。本书详细介绍了港珠澳大桥沉管隧道的测量管理，以及从标准化和风险防控的角度全面革新日常管理模式，建立了一套健全的测量组织管理体系，并且制定了完善的测量技术规程及相关管理制度，以有效实施施工测量的监控管理。

沉管隧道工程施工测量依据国家及相关行业有关施工测量与控制方面的标准、规范及规程等，结合工程施工质量及验收评定标准，严格依据相关规定实施，保证测量控制质量。



## 2.1 技术设计

### 2.1.1 平面控制网的分类

在各种工程建设中，一般工程项目从开始实施到完成大致可分为设计、施工和运营三个阶段。因此，对于为工程建设服务的平面控制网来说，根据工程建设的不同阶段对平面控制网提出的不同要求，平面控制网一般可分为以下三类。

#### 2.1.1.1 测图控制网

测图控制网是在工程设计阶段建立的用于测绘大比例尺地形图的控制网。在这一阶段，技术设计人员将要在在大比例尺图上进行建筑物的设计或区域规划，以求得设计所依据的各项数据。因此，作为图根控制依据的测图控制网，必须保证地形图的精度和各幅地形图之间的准确拼接。另外，测图控制网也是地籍测量的基本依据。

#### 2.1.1.2 施工控制网

施工控制网是在工程施工阶段建立的用于测量工程施工放样的控制网。在这一阶段，施工测量的主要任务是将图纸上设计的建筑物放样到实地上。对于不同的工程，施工测量的具体任务也不同。例如，隧道施工测量的主要任务是保证对向开挖的隧道能按照规定的精度贯通，并使各建筑物按照设计修建；放样过程中，标尺所安置的方向、距离都是依据控制网计算出来的。因此，在施工放样以前，应建立具有必要精度的施工控制网。

#### 2.1.1.3 变形观测控制网

变形观测控制网是在工程竣工后的运营阶段，建立的以监测建筑物变形为目的的控制网（因是专门用途又称专用控制网）。由于在工程施工阶段改变了地面的原有状态，加之建筑物的重量将会引起地基及其周围地层的均匀变化。此外，建筑物本身及其基础也会由于地基的变化而产生变形，这种变形，如果超过了一定的限度，就会影响建筑物的正常使用，严重的还会危及建筑物的安全。在一些大中城市，由于地下水的过度开采，会引起

市区大范围的地面沉降。所以，在工程竣工后的运营阶段，需要对相关建筑物或市区进行变形监测，这就需要布设变形观测控制网。由于这种变形的量级一般都很小，为了能精确地测出其变化，要求变形观测控制网具有较高的精度。

## 2.1.2 平面控制网的布设原则

### 2.1.2.1 分级布网、逐级控制

对于平面控制网，通常先布设精度要求最高的首级控制网，随后根据测图需要，测区面积的大小再加密若干级较低精度的控制网。用于工程建筑物放样的专用控制网，往往分二级布设。第一级作总体控制，第二级直接为建筑物放样而布设；用于变形观测或其他专门用途的控制网，通常无须分级。

### 2.1.2.2 要有足够的精度

工程上的平面控制网一般要求最低一级控制网（四等网）的点位中误差能满足大比例尺 1:500 的测图要求。按图上 0.1 mm 的绘制精度计算，这相当于地面上的点位精度为  $0.1 \times 500 = 50 \text{ mm}$ 。对于国家层面的平面控制网而言，尽管观测精度很高，但由于边长比工程上的平面控制网长得多，待定点与起始点相距较远，因而点位中误差远远大于工程上的平面控制网。

在施工阶段，测量工作的主要任务是直接为施工服务，测量的精度主要体现在相邻点位的相对位置上。目前的水运工程规模比较大，水运工程建筑物离岸比较远，如何正确制定可以保证建筑物定位和放样的精度，是一项极为重要的工作。在施工之前应根据工程需要进行施工控制网的布设，在选择时，应考虑现场施工的条件，以及建筑物是否必须从控制点直接进行施工放样。虽然有的建筑物的相对精度要求很高，但是在施工放样时，可以利用它们相对精度较高的特点进行直接放样。所以，当考虑施工控制网布设时，可以不考虑对于它们放样精度的需求。

设  $M$  为工程施工放样后所得的控制网的点位的总误差， $m_1$  为控制网布设的点误差所引起的误差， $m_2$  为放样过程中所产生的误差。则有

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

有  $m_1 < m_2$ ，故  $\frac{m_1}{m_2} < 1$ ，将式 (2-1) 中的二项式展开为泰勒级数，略去高次项，则有

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

假设  $\frac{m_1^2}{2m_2^2} = 0.1$ ，即控制点的点误差只使总误差增加  $\frac{1}{10}$ ，可知：

$$m_1^2 = 0.2m_2^2 \quad (2-3)$$

把式(2-3)代入式(2-2)推出:

$$m_1 \approx 0.4M \quad (2-4)$$

综上所述,当控制点的点误差为 $m_1 \approx 0.4M$ 时,施工放样的总误差仅增加 $0.1M$ 。

### 2.1.2.3 要有足够的密度

无论是测图控制网还是专用控制网,都要求在测区内有足够多的控制点。控制点的密度通常是用边长来表示的。《城市测量规范》(CJJ/T 8—2011)中对于城市三角网平均边长的规定列于表 2-1 中。

表 2-1 三角网的主要技术要求

等级	平均边长/km	测角中误差/(")	起始边边长相对中误差	最弱边边长相对中误差
二等	9.0	$\leq 1.0$	$\leq 1/300000$	$\leq 1/120000$
三等	5.0	$\leq 1.8$	$\leq 1/200000$ (首级) $\leq 1/120000$ (加密)	$\leq 1/80000$
四等	2.0	$\leq 2.5$	$\leq 1/120000$ (首级) $\leq 1/80000$ (加密)	$\leq 1/45000$
一级小三角	1.0	$\leq 5.0$	$\leq 1/40000$	$\leq 1/20000$
二级小三角	0.5	$\leq 10.0$	$\leq 1/20000$	$\leq 1/10000$

### 2.1.2.4 要有统一的规范

为了使不同部门施测的控制网能够互相利用互相协调,应制定统一的规范,如现行的《城市测量规范》(CJJ/T 8—2011)和《工程测量规范》(GB 50026—2007)。

## 2.1.3 平面控制网的布设方案

以《城市测量规范》(CJJ/T 8—2011)为例,将其中三角网的主要技术要求列于表 2-1,电磁波测距导线的主要技术要求列于表 2-2。从这些表中可以看出,三角网具有如下的特点。

- ①各等级三角网平均边长较相应等级的国家网边长显著地缩短。
- ②三角网的等级较多。
- ③各等级控制网均可作为测区的首级控制。这是因为工程测量服务对象非常广泛,测区面积大的可达几千平方公里(如大城市的控制网),小的只有几公顷(如工厂的建厂测量),根据测区面积的大小,各等级控制网均可作为测区的首级控制。
- ④三等、四等三角网起算边相对中误差,按首级网和加密网分别对待。对独立的首级

三角网而言,起算边由电磁波测距求得,因此起算边的精度以电磁波测距所能达到的精度来考虑。对加密网而言,则要求上一级网最弱边的精度应能作为下一级网的起算边。这样有利于分级布网、逐级控制,而且也有利于采用测区内已有的国家网或其他单位已建成的控制网作为起算数据。

以上这些特点主要是考虑工程上的平面控制网应满足最大比例尺 1:500 测图的要求而提出的。

表 2-2 中电磁波测距导线共分 5 个等级,其中的三等、四等导线与三等、四等三角网属于同一个等级。这 5 个等级的导线均可作为某个测区的首级控制。

表 2-2 电磁波测距导线的主要技术要求

等级	闭合环或附合导线长度/km	平均边长/m	测距中误差/mm	测角中误差/(")	导线全长相对闭合差
三等	≤15.0	3000	≤18	≤1.5	≤1/60000
四等	≤10.0	1600	≤18	≤2.5	≤1/40000
一级	≤3.6	300	≤15	≤5	≤1/14000
二级	≤2.4	200	≤15	≤8	≤1/10000
三级	≤1.5	120	≤15	≤12	≤1/6000

## 2.1.4 专用控制网的特点

专用控制网是为工程建筑物的施工放样或变形观测等专门用途而建立的。由于专用控制网的用途非常明确,建网时应根据特定的要求进行控制网的技术设计。例如,桥梁三角网对于桥轴线方向的精度要求应高于其他方向的精度,以利于提高桥墩放样的精度;隧道三角网则对垂直于直线隧道轴线方向的横向精度的要求高于其他方向的精度,以利于提高隧道贯通的精度;用于建设环形粒子加速器的专用控制网,其径向精度应高于其他方向的精度,以利于精确安装位于环形轨道上的磁块。

### 2.1.4.1 精密工程水平控制网

#### 1. 精密工程水平控制网的主要作用

精密工程水平控制网是为精密工程服务的,应在工程勘察设计阶段完成。精密工程水平控制网与常规的控制网相比,具有以下基本特点。

①精密工程水平控制网的大小、形状、点位分布与工程的大小、形状相适应,边长不要求相等或接近,而是根据工程需要进行设计,同时点位布设要考虑工程施工放样和监测的方便。

②投影面的选择应满足“控制点坐标反算的两点间距离与实地两点间的距离尽可能相等”的要求,如隧道施工控制网应投影到隧道贯通平面上。