

# 工程控制测量建网理论

卓健成

西南交通大学出版社



# 工程控制测量建网理论

卓健成

西南交通大学出版社

## 内 容 简 介

本书主要是为工程测量研究生的学位课程而编写的一部教材。全书共九章,依次论述工程控制测量建网理论的主要问题,包括工程测图控制网、施工控制网、控制网的优化设计、观测和数据处理所涉及的理论问题、分期建网的特殊问题、精密工程测量控制网、变形监测控制网、GPS工程控制网、个别专用工程控制网的建网理论问题。

本书内容力求对研究生的学习和论文写作能起基础性、先进性和启发诱导性的作用。因此书中除阐述当代的前沿理论以外,对现在还不十分成熟的论点,也作了简要的介绍,以求激发读者的探索热情。

全书取材系统、全面,并尽量结合我国工测生产的丰富经验和我国学者的重要科研成果,所以本书除适合作研究生的教材以外,对工程测量专业的教师、科研人员,生产上的工程测量工程师,当有很好的参考价值。

### 工程控制测量建网理论

卓健成

\*

西南交通大学出版社出版发行  
(成都 二环路北一段 610031)  
郫县印刷厂印刷

\*

开本: 787×1092 1/6 印张: 9.75  
字数: 223 千字 印数: 1—600 册  
1996年7月第1版 1996年7月第1次印刷  
ISBN—7—81022—959—1/T·188  
定价: 15.00 元

## 前 言

工程测量研究生的科研和论文内容牵涉的方面极广,但不论牵涉到什么内容,几乎都要论及工程控制网的精度合理性、经济性、可靠性,以及监测的灵敏性(度)等等。也就是说研究生在学习《工程控制测量建网理论》这门课程以后,在工程控制网基础理论的拓宽和加强方面,在先进理论和技术的了解、掌握和应用方面,在论文选题的启发和诱导方面,都应起重要的作用。因此,上面提到的基础性、先进性、启发和诱导性这三性作为本教材编写的客观要求,督促作者努力接近于这一要求。

研究生的教材与大学本科教材的一个最大的不同点,就是启发和诱导性。研究生的课程学习是为研究生的科研工作及论文撰写加强基础和掌握先进的科研方法,同时还要在课程的学习过程中,对论文的选题及科研方向有所启发和诱导。要做到这一点,除了成熟了的理论和技术应加以阐述外,还应对当前并不十分成熟的东西、存在争论的问题加以介绍,介绍问题的焦点所在,介绍不同的论点和论据,并阐述作者自己的观点,论及它们可能的发展前景,充分激发研究生的探索热情。

本书是一部工测研究生学位课程的教材,是在研究生课程学习的后期学习的。它是在工测专业的本科课程及研究生的前期课程中,学过工测专业的大地测量学、工程测量学、控制测量、测量控制网的优化设计、线性代数(包括广义逆矩阵、矩阵的 Kronecker 乘积、Hadamard 乘积、Khatri-Rao 乘积、矩阵的拉直变换等)、应用概率统计、运筹学(特别是线性规划)、计算机应用技术、广义测量平差(包括秩亏自由网平差;最小二乘滤波、推估与配置;卡尔曼滤波等)等课程以后学习的。此外,这门课程按 60~70 学时考虑,而建网理论本身问题又很多,所以牵涉到前期课程学习过的内容,本书不再作介绍和讨论,或不作详细的讨论,一般的惯用符号也不再作说明或解释。

作者在写作时,尽量结合我国工测生产的丰富经验,和我国学者的科研成果来阐明理论问题。

根据以上的想法,以及作者多年来对本课程的教学经验,研究生学习时对本课程的反映意见,研究生在论文写作中应用本课程内容的情况,按目录中所列章节来写这本教材。

作者在写作过程中曾有过几章的反复,主要是有关公式推导过程的罗列。开始时把许多公式的详细推导列入内容,后来发现这样的写法将大大超出预定的字数。而且把这些作者认为是正确的、比较成熟的、已见诸多著作和文献的东西,重复地引入本书,实无必要;尤其是不利于研究生查阅、检索资料能力的培养,不利于研究生独立思考和科研探索能力的培养。所以后来将全部的公式推导过程删去,辅之以推荐参阅的文献。书中保留了极少数公式,只是为了理论上的阐述方便,或指出某些理论上值得讨论的问题。这样,不但可以把全书的字数限制在原定的计划之内,而

且理论阐述的全面性和周密性反而加强了。

全书取材力求系统、全面，并尽量结合我国工测生产的丰富经验，和我国学者的重要科研成果。所以，本书除适合作研究生的教材以外，对工程测量专业的教师、科研人员，生产上的工程测量工程师，当有很好的参考作用。

由于作者的业务能力和思想水平有限，希望读者对书中的缺点、错误给予批评指正。

整个书稿经广东工业大学彭先进教授的仔细审阅，提出了对文字、内容各方面的许多宝贵意见和建议，为本书增色不少，特此表示感谢。

**卓健成**

1995年4月于成都

# 目 录

## 第一章 工程控制网和工程测图控制网

§ 1—1 概 述	1
§ 1—2 对工程测图的质量要求	1
§ 1—3 对工程测图控制网的技术要求及其设计	5

## 第二章 施工控制网的用途、特点和对它的要求

§ 2—1 施工控制网的用途	13
§ 2—2 施工控制网的特点	15
§ 2—3 对施工控制网的要求	16

## 第三章 施工控制网的优化设计问题

§ 3—1 关于设计目标	17
§ 3—2 现代控制网测量技术优化设计的几个核心问题	19
3—2—1 关于控制网的精度准则问题	19
3—2—2 关于控制网的可靠性准则问题	24
3—2—3 关于建网费用问题	28
3—2—4 关于建网的时限问题	29
3—2—5 关于建网的基准问题	29
§ 3—3 施工控制网的优化设计问题	32
3—3—1 零阶段(零类)设计问题	32
3—3—2 一阶段(一类)设计问题	33
3—3—3 二阶段(二类)设计问题	35
3—3—4 三阶段(三类)设计问题	38

## 第四章 关于实施观测和数据处理的理论问题

§ 4—1 实施观测和数据处理在测量误差理论上的紧密联系	
——野外观测质量的重要性	40
§ 4—2 数据处理的步骤及理论问题	44
4—2—1 观测数据分析和观测数据诊断	44
4—2—2 观测值质量评估	45
4—2—3 关于在“检测性”平差中对模型误差(包括系统误差和粗差)进一步进行检测和定位的问题	45

4—2—4 观测值平差与参数估计问题·····	46
<b>第五章 分期建网的特殊问题</b>	
§5—1 问题的提出·····	48
§5—2 前期网平差数据保持固定时,后期网数据处理的几种方法·····	49
§5—3 分期建网时,各期网起算数据误差的传播及其影响·····	54
5—3—1 各期网起算数据误差的传播·····	54
5—3—2 各前期网的起算数据误差对各后期网精度的影响·····	56
§5—4 分期(分级)建网的设计方法·····	68
§5—5 施工控制网的点位误差对施工放样精度的影响·····	68
<b>第六章 精密工程测量控制网</b>	
§6—1 精密工程测量的特点·····	72
§6—2 精密工程控制网的设计·····	73
6—2—1 精密工程施工控制网的设计·····	74
6—2—2 精密工程设备安装控制网的设计·····	77
§6—3 精密工程控制网观测和数据处理个别理论问题·····	81
<b>第七章 变形监测控制网</b>	
§7—1 变形观测的目的、意义与特点·····	86
7—1—1 变形观测的目的、意义·····	86
7—1—2 变形状态的特点·····	87
7—1—3 变形观测的特点·····	88
§7—2 变形观测对工程监测网的要求·····	90
7—2—1 变形观测对点位稳定性的要求·····	90
7—2—2 变形观测对观测周期的要求·····	91
7—2—3 变形观测对精度上的要求·····	91
7—2—4 变形观测对可区分度和灵敏度的要求·····	92
§7—3 监测网的优化设计·····	92
7—3—1 监测网优化设计的现状·····	92
7—3—2 监测网优化设计的质量准则·····	92
7—3—3 监测网优化设计中的特殊问题·····	97
§7—4 监测网观测的特殊问题·····	101
§7—5 监测网数据处理的特殊问题·····	104
<b>第八章 GPS工程控制网</b>	
§8—1 GPS工程控制网的特点·····	108
§8—2 GPS网踏勘与设计特殊问题·····	112
§8—3 GPS控制网观测的特殊问题·····	118

§ 8—4 有关数据处理的特殊问题·····	124
§ 8—5 实时动态差分定位控制网 ——导航控制网的特殊问题·····	134
§ 8—6 GPS 技术近期发展前景 ·····	137
<b>第九章 个别专用工程控制网的建网理论问题</b>	
§ 9—1 隧道网·····	139
§ 9—2 桥梁网·····	142
<b>参考文献</b> ·····	144



# 第一章 工程控制网和工程测图控制网

## § 1—1 概 述

工程控制网不仅仅指工程施工控制网，凡是为了工程的需要而建立的测量控制网，都属于工程控制网。它应包括工程测图控制网、施工控制网（含精密工程控制网）、竣工及运营控制网（包含导航控制）、变形或动态观测（监测）控制网，以及其他。

工程测图也不仅仅为了工程设计，举凡工程的设计、施工、竣工、监测、运营、维修、改扩建，以及动态的管理和调度（例如基于GPS的定位和无线电通讯的车队管理和调度所采用的电子图）等，都需要了解环境、了解有关目标的空间位置，其主要手段就是测图。

测图是一个传统而形象化的名称，现代应该称为客观环境的信息获取。因为现代的通过测量所获取的信息，不一定制成图。就图来说，也不一定是常规的固化图（固定在纸上或塑料薄膜上的图），它可以是数字图，或电子瞬间图。

现代工程的概念已大大超出原先的土木工程范畴。但所有工程和环境的关系都有一个特点，就是事前了解环境和（或）属性关系，而事后将改变环境和（或）属性关系。规模大的工程改变大环境和（或）属性关系；规模小的工程，例如安装或改造某项设备，则改变小环境。不论环境大小，在环境改变的前后，均需测定它们的相对空间位置或空间位置，这就是现代工程测图的主要任务。出于这样的理解，测图和制图学可能发展成为地理信息学或环境信息学，在应用上与地理信息系统（GIS）相整合（集成）（Integration），发挥更大的功能和效益。

现代的测图手段也远远超出使用常规仪器。根据测图手段的不同，例如航天或航空遥感（包括摄影）测图、近景摄影测图、大（小）平板仪测图、数字化地面测图、GPS测图（包括电子导航图）、采用计量仪器测图（包括工程结构的应力应变图）等等，其测图控制网都有其各自的布网特点和要求。

到目前为止虽然图种很多，但是固定在纸上或塑料薄膜上的常规固化图，仍然是制图的主要方式，固化图能较好地适应人的视觉功能而长期存在。它在旅游、宣传、教育、表达环境和研究环境等方面，很难用其他方式完全取代。尽管测图可以用各种手段，测图数据也可用不同的方法存贮，但是人们往往还是要求输出固化图，作为主要的产品之一。

## § 1—2 对工程测图的质量要求

工程建设的规划，指可行性研究、工程规划、方案设计。这一阶段，我国不称为设计阶段，而称为工程规划，所用的地形图，常常是现有的，这样就没有测图控制的问题。

这时常用 1 : 10000 或更小比例尺的现有的地形图,同时可以用航测像片、立体像对配合使用。面积较大的时候,利用航天遥感图像,得到大面积的景观。这对地貌、地物、工程地质勘察、水文地质勘察、水源、矿产、植被分布、气象、环境监控等现象的调查和分析很有好处。这些信息对工程规划,尤其是工程防护区、变迁区(例如矿业开发区的土地规划、利用和复垦)的规划有重要价值。

如果需要测图,常常是现有资料不足以说明情况的地方,或缺少资料的地方,以及其他特殊要求。例如行政区划,重要的军事区,土地、矿产、水利资源的评价,所有权和使用权的属性信息,工程施工和运营以后将牵涉到的权属变化、生态环境的变化、环境污染以及美学景观等问题。总之,现代工程规划所涉及的方面,如果现有资料不足以提供信息,常常需要做局部的、补充性质的调查和小比例尺测图。

我国工程建设的设计,通常分为两个阶段,就是初步设计和施工图设计。

为了满足初步设计和施工图设计的需要,常常需要测绘大比例尺(1 : 5000 及以上)地形图。大比例尺地形图可以采用一般航空摄影测量、直升机摄影测量、系留气球摄影测量、地面摄影测量和各种地面测量的方法。不论采用什么方法,都需建立测图控制网。

测图控制网是为测图服务的,必需满足测图对它的要求,所以要首先了解工程对测图有什么要求,也就是工程测图的质量指标问题。

工程设计对测图的要求,各国测量学者的见解不一。波兰的 F·博泽基在他的一篇论文中提出:地形图应考虑下列各方面的适用性,即比例尺、地形点(表示地貌的等高线,地物点)的精度、信息的综合或分解能力、易读性、便于复制、便于更新。这可以作为参考。除此之外,应该还要考虑:必要信息的充分性;测区范围的适用性(工程测图不是通用图,在一个图幅里,不需要的地方可以不测,需要的地方或预料将会发展的地方不能漏测);成本低,出图快。

如果测绘数据存贮在数据库中,前述的要求仍然全部存在,还要考虑数据提取的便利,计算机辅助编图和制图的条件。当然由数据库提取数据制图,比例尺可大可小,但是数据的精度仍然在测量精度,只不过与测量精度不相匹配的过小比例尺绘图,其比例尺精度过低;而过大比例尺的绘图,其比例尺精度可能表面上高于实地测量精度而形成虚假现象。

测图比例尺的选择,主要根据与设计有关的地貌地物信息的显示程度、测区大小、地形的复杂程度、设计在图上要求表达的详细程度、图解设计位置的精度、清晰易读性、图纸大小便于使用、测绘工作经济合理。比例尺的适用性是一个重要的质量指标。英国 J. D. Leatherdale 调查了 18 个国家的 50 个测量单位的统计结果,发现测图的成本,通常随比例尺的加大和精度的提高而迅速增加。较高的精度和较密的等高线,通常会较大地增加测图成本。很明显,增加的成本中,包括了控制网提高精度和增加控制点密度所增加的成本,也就是对测图质量的要求,直接影响到对测图控制网的要求。

测图精度的选择是一个和比例尺选择同等重要,而且彼此相关的问题。从测图质量上考虑,这就是精度适用性的问题。测图精度的适用性,应着重从下列各方面进行分析,以影响最大的一个或若干个工程设计精度为准,决定测图精度。它们是:

- (1) 工程的主要功能的设计精度。
- (2) 工程建筑物设计位置的精度。例如在铁路选线的紧迫地区,左有大河陡岸,右有耸立的岩质山体,前需建桥,后需布置隧道,在采用横断面选线方法的时候,等高线的测绘精

度影响极大，线路中线的设计位置精度要求很高，稍大的测绘误差，就可能将实际线路掉入水中，或嵌入山体造成极大的土石方工程量，甚至影响前后桥梁、隧道的定位，如图 1—1 所示。

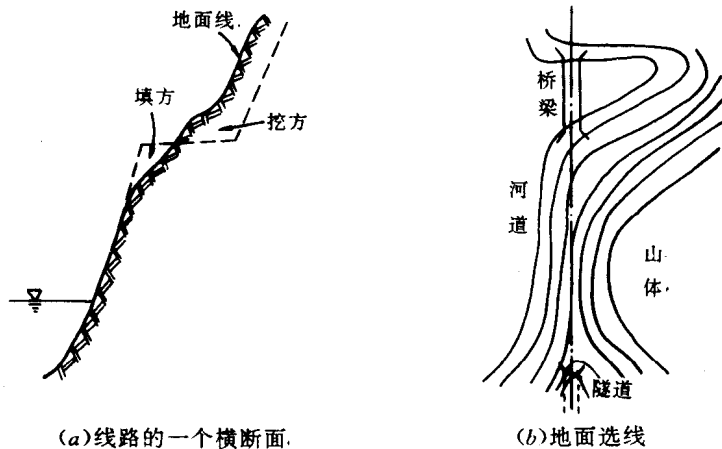


图 1—1

例如在工程改建或扩建的时候，新建筑物的设计与原有建筑物或设施之间，有时存在生产上的衔接、防火、防水、防震、防电磁感应等的安全界限，以及避开地下管道等问题，这时对测绘精度将提出相应的要求。又例如在水下地形的测绘方面，也有针对某项工程的设计和施工提出相应测绘精度的要求。泰国 Khanom 动力站在海洋中铺设输气管道，每段管道长 12.5 m，段与段之间在工作船上焊接。在初步决定管子铺设位置前，用遥控小型无人潜艇（水深 60 m）进行水下带状地形测量，海床用 0.1 m 等高距绘出等高线。所以有这样的精度要求，是因为每米管子重 300 kg，如果海床地形测的不准，而将管子架空在海床上，这样管子就要因自重压弯而折断。

(3) 工程数量的计算精度。地形测绘精度、表示的完整性和详细程度，对某些工程的工程量影响很大，例如新建城市的竖向设计、排水设计，大面积种植的土地平整，露天采矿的剥土量计算，铁路、公路、运河的土石方数量的计算，海港工程的挖泥量和海床基础工程量的估算等等。满足这些工程量的计算和估算精度，应是测绘精度考虑的问题之一。

(4) 线型工程坡度设计的精度。坡度设计精度在某些线型工程的设计中至关重要，因为这些工程的坡度稍加改变，对工程量、工程的功能、运营效率和运营费影响很大。在铁路线路的坡度设计中，这个问题是非常明显的，其他如引水渠道、运河、液体运输的重力管道等都有类似情况。这些工程的坡度设计精度，与等高线的测绘精度密切相关。

(5) 大面积竖向设计的精度。这在一个新城市的竖向设计中是显而易见的，它在很大程度上影响街道坡度设计和排水系统设计的合理性。其他如大的航空港的竖向设计、大规模公园或游乐园的竖向设计等，都有类似情况。

(6) 数字地面模型的精度。数字地面模型的基础数据存贮于数据库，这些基础数据的测量精度将影响它一切应用的精度。

(7) 综合性的工程费预算的精度。这里要注意的就是工程费常常是一个硬指标，从以上

某项单因素考虑，可能精度要求合理，可是诸因素综合考虑，就有可能超出预算而不能允许。

所以测图精度作为测图质量的一个重要指标，是一个很复杂的问题。这个问题处理得好，才能谈到为它服务的工程测图控制网精度的经济性、合理性问题。

在评价工程测图质量的时候，还必须考虑到工程测图的特点。这些特点都是与基本图、通用图比较而言的。以后可以看到，正是由于这些特点，而产生对测图控制网布点、精度、密度、测量方法合理性的特殊要求。

工程测图具有下列一些特点：

(1) 允许制图比例尺与实际测图精度不相配合。为了设计时图面便于使用，常将比例尺放大；也有时为了一览大面积的景观，而将原来大比例尺测图的数据，在制图时缩小比例尺使用。除此以外，还可以与照片、立体摄影像对、特殊景观的录像配合使用。

(2) 一幅图不一定测满，测图的范围以设计或施工的需要来定，这在铁路的带状地形图上表现得十分明显。

(3) 地形点的测绘密度也不一定要求均匀。例如山岭隧道，预计设计洞口或洞口施工的地方，测点很密；而山顶部分，尤其已经钻探掌握了地质情况的山顶，除钻孔定位以外，测点可以很稀，有时甚至空白不测。在铁路、公路等线路工程的设计阶段，预计选线可能摆动到的地方，测得密；估计摆动不到的地方可以不测，或稀疏地测少数点，例如带状地形以外有一地下火药库，则只测一、两点即可，其用意是线路摆动时不能放在火药库的危险区以内。又例如在为扩、改、建所测的地形图中，重要地物需用解析法测出坐标，其精密测点的分布，按重要地物的分布来安排。

(4) 一幅图内地形点、地物点的测绘精度可以不同，视需要而定。地形点的精度和密度是有相关关系的，如(3)所举的例子，隧道洞门范围的地形点测绘密度和精度应按地形图测绘的技术设计来实施，而山顶部分地形点既稀疏精度又可大幅度降低。

(5) 测绘内容的取舍不同。通用图的取舍一般按比例尺大小和社会功能的重要性来考虑，不论取还是舍，测图并不影响目的物的实际存在。但工程测图不同，工程一旦施工，绝大多数要改变原有的地貌和地物，有的会在实地消灭。例如一口小井、一个小泉眼，通用图可能忽略过去，但工程设计图必需测绘出来，工程设计时对它的存在必须加以考虑，甚至做实地调查。因为一旦被工程施工破坏掉，就有可能断送了全村人的生活水源。像这类情况，在许多工程测图中都能遇到。其他如工程施工用水及将来运营时用水的水源测绘（铁路、公路经过沙漠地带，这问题异常突出），工程材料的产地（沙、石、木材等）的测绘，特殊病害地质区的测绘，特殊气象区域（例如青藏线路的雷击区）的测绘等等，都是通用图可能忽略的问题，但在工程测图上，它们成为重点测绘的对象。

(6) 制图的投影面高程可能不一致。举一个特别显而易见的例子，如测绘从成都入藏的铁路线路带状地形图。成都投影面高程假若是500 m，入藏以后投影面高程可能逐步上升到4000 m以上，几乎每幅图的投影面高程都不一样，每幅图都是按照地面上的实际长度按选定的比例尺描绘在图上，只有这样的测图，才能在图上估计铁路线路的实际长度、钢轨的需要量，估计土石方工程量，计算桥梁和隧道的实际长度，等等。这与国家基本图、通用图有很大区别。

(7) 同一项工程因施工方法不同，也会影响地形测绘的范围和精度。例如地下铁道，采用明挖方法和盾构方法施工，对地形测绘的要求有很大区别。

以上的一些工程测图的特点，似乎都不符合通用图的测绘原则，但是从专用图的角度来看，却是经济、合理的。

这里值得考虑的一个问题是：工程施工以后，可能大面积地改变地形、地物的现状，所以工程完成以后，应该详细测绘竣工图，这是最及时的大比例尺现势图。从国家整体工作来考虑，这些竣工测绘的数据应提供给国家测绘部门，以作为修测基本图或通用图的依据，避免重复性的工作。

### § 1—3 对工程测图控制网的技术要求及其设计

对工程测图控制网的要求，主要来自工程测图的质量要求。与控制网关系最密切的测图质量，是比例尺大小适用、测点的精度与分布密度、测区的形状和范围、测图的经济合理性。满足这些质量要求，除了和控制网的形状、控制点的分布、控制网的测量精度有关以外，还要依靠碎部点的测绘手段（大（小）平板仪测图、数字化地面测图、地面摄影测量、航空摄影测量，以至航天遥感绘制大面积的影像等）来实现。所以，对控制网的要求应与不同的碎部点的测绘手段结合起来考虑。

摄影测量与遥感对控制网的要求，在摄影测量与遥感的专业课程中，有专门的、详细的阐述。此处主要考虑地面的视距仪和电子速测仪（包括电磁波测距仪配合各种经纬仪工作的形式）测图与其控制网配合的问题。

在使用这两种手段测碎部点时，主要要考虑这样一个事实，普通视距仪和电子速测仪的测程有一定的限制（只不过电子速测仪的测程可能长得多），而且测碎部点时基本都是半测回，碎部点的数量又非常大，所以再要求测碎部点降低精度或提高精度，以适应测图的质量要求，都是不实际的，在经济上和工作效率上也是不合理的。这样，就只好主要以安排控制网的方法来适应测图质量的要求，因为控制点数量比碎部点少得多，而且位置和精度都能较准确地设计，这也是研究测图控制网的主要原因。

控制点的分布位置和分布密度，主要依据测距仪器的测程来设计。比例尺大，碎部点测定精度要求较高时，控制点之间的距离应适当减小；比例尺小，碎部点的测定精度要求较低时，可适当将控制点之间的距离增大。同一幅图中地形点的分布密度可以稀疏的地方（测定精度一般也随着降低），自然可将该局部控制点的分布密度也放稀。如果该处地形点分布密度并不稀疏，但其测定精度要求较低时（例如铁路线路附近的大型工程材料产地——可供开采的石料山体），可将该处局部控制网的测量精度降低，而不放稀控制点的密度加以适应。测区的形状一般决定控制网的形状，测区的范围一般决定控制网的规模，这些是适应工程测图特点的“一般设计原则”。

测图控制网的设计理论，学术界讨论不多，而工程测图控制网的设计理论讨论得更少。在一般测图控制网设计理论中，引用得最多的就是泰乐—卡尔曼结构（T—K 结构）。这是 Taylor, G. I. 和 Karman, T. 在研究流体力学时，求得的在均匀和各向同性条件下，对称的二阶两点张量函数表示式，后来 1970 年 Grafarend, E. 引用于测量中<sup>[1,2]</sup>，通称 T—K 结构。T—K 结构主要把各控制点点位误差形成一个大小彼此相等的误差圆，这个理论在学术研究上可以探讨，但是在工程测图控制网上几乎没有什么实用价值。这只要仔细分析一下 § 1—2 中所

提到的工程测图的特点，就会十分清楚这样的论断。除此之外，工程测图控制网没有必要以 T—K 结构来设计，还有以下一些原因：

(1) 地形碎部点与重要的施工放样点、主要的变形观测点不同，它们在精度的设计上区别很大。重要的施工放样点和主要的变形观测点，常常需要一定的精度设计和仔细的误差分析，甚至有时纳入工作控制网一并考虑。而地形碎部点是无法加以准确控制的（指地面视距仪或速测仪测图），因为在一个测站上，不论碎部点相对于测站距离的远近、方向的各异，几乎都采用同一方法施测。即使控制点具有 T—K 结构的性质，但各碎部点相对于控制点的精度也各个不同，等于 T—K 结构不起作用。

(2) 除城市测图可能范围稍大外（工程测量规范对 50 km<sup>2</sup> 以上的测区有规定），一般工程测图的测区是不太大的（指大比例尺工程测图），而且绝大多数使用局部独立坐标系，并有固定的或假定的起始数据。这种控制网的点位误差，肯定是距基准点（固定数据的起算点）愈远误差愈大，是无法形成 T—K 结构性质的。对工程控制网来说，主要的是按控制点之间（不一定是相邻控制点之间）的相对点位精度的要求来设计。这种相对点位误差椭圆，在长半轴方向和大小上常有特殊的要求，往往不是大小相同的误差圆。如果有某些相对点位要求形成相对点位误差圆，也不难实现。

工程测图控制网的设计问题，主要考虑前已述及的“一般设计原则”。在一般设计原则的安排下，初步考虑控制网的层次，结合层次考虑测区中每一局部的控制点分布密度，然后再具体地进行每一局部控制点的测量精度设计。控制面积不大的测区，控制网最好用一个等级全面布网，但针对局部测区地形点的密度和精度要求的不同，那么这些局部测区控制点的分布密度和测定精度也可以不同。放低或提高局部测区控制点的测定精度，主要影响该区控制点之间的相对点位精度，这正适应该区地形测绘的质量要求。实际上，控制网的边、角测量增减一两测回，在费用的差别上，工程主管单位常常毫不在意，他们愿意以一个较高的测量精度施测全网，那么这已不属于测量技术设计的理论问题。

测量精度设计，通常以一定的经费开支作为约束条件；或以经费开支最小为目标，约束条件为达到一定的精度，这种设计大体上和施工控制网的设计没有什么区别。优化设计的理论和技术已于运筹学中涉及，结合测量的阐述，见施工控制网的设计部分。

这里要特别强调的是，控制网建网理论可以作为纯学术问题来讨论，甚至某些优化设计问题可以作为数学问题来探讨，这对有些缺乏实际设计经验的研究生，往往最感兴趣。可是工程控制网设计所牵涉到的问题是非常复杂的，建网理论必须结合实际存在的各方面问题加以阐明，否则是无法实施的。例如，每一优化设计中都要考虑费用问题，费用问题牵涉的方面极广，其内容远不是多少测站、多少方向、多少边长、多少测回所能概括的。举一个最常遇到的情况，在费用问题上应充分考虑下列各方面的问题：仪器的补充、购置；建标、埋石的材料及运费、用工费；技术人员，管理人员，仪器设备的运输和观测中的转运运输；住宿、给养、伙食、安全、保健费、工资支出；气候、植被对工作效率的影响，可能导致的总工作时间的延长；损坏树木和农作物的赔偿；数据处理费；绘图及印制费；消耗品及器材的添置费等等。可能其中的许多方面的费用都要超过单纯的观测费用，而且每一方面的费用都和物价有关，和社会功能所提供的服务有关。具体到不同的国家，甚至一个国家内的不同地区（例如我国的经济特区和内地、城市、农村、山区、荒漠等），在费用上有很大差别。在社会功能所能提供的服务上，差别就更大。例如标材、沙石等能否就地取材、加工；在山顶建标、

埋石, 这些材料是用人扛上去, 还是能够得到直升飞机的支持, 等等, 可见费用问题的复杂性。当然, 作为理论问题来研究, 不能具体到个别地区、个别方面的具体费用上, 但是在考虑费用时, 不能遗漏每一方面的问题, 这样的理论才称周全。

工程测图控制网, 主要技术上的考虑, 是各局部布点的密度和各局部控制点的测定精度, 已如前述。各局部布点密度, 在布网设计图上, 根据测图的需要和观测环境的条件来布设和修改, 是非常直观的。但各局部控制网的测量精度如何安排, 才能达到各局部控制点所要求的测定精度, 是比较复杂的问题, 理论上应进行控制网的二类优化设计, 设计方法可参阅文献 [3]。但由于前述的在测站上测图的特点, 普通的工程测图, 也可以不做那样复杂的精度设计, 而根据一般的控制点测定方法及点位误差椭圆分布的规律, 和控制点之间相对点位误差分布的规律, 简单地加以筹划<sup>①</sup>。

一、由两已知点设站, 进行测角交会定点, 交会点距两已知点的距离总和愈长, 其点位误差愈大。进行测边交会时同此。

当交会角为  $90^\circ$  时, 点位误差椭圆长短轴相等。

测角交会, 当交会角小于  $90^\circ$  时, 交会点误差椭圆的长半轴指向两已知点的连线 (指正、反向)。交会角大于  $90^\circ$  时, 交会点误差椭圆的长半轴, 随交会角的增大而渐趋平行于两已知点的连线。

测边交会同测角交会的长半轴方向大致成正交。

二、由一条基线的两端点进行测角交会又进行测边交会时, 交会点位的平差结果, 其误差椭圆显著缩小, 其长半轴方向视测角与测边的精度配合不同而异。

三、具有一条起始边的自由测角网, 起算点只有一个时, 控制点距起算点愈远 (以传算点位坐标的传算三角形个数计), 误差愈大。其误差椭圆的长半轴方向, 大致指向起算点。现举圆形网和长形网各一例以示其意。

图 1—2 为圆形网, 呈中心正六边形, 边长约 7 km; 起始边为 I—II, 其测量精度为  $1/350000$ ; 起算点设于 I 点, 其坐标假设无误差; 起始方向  $\alpha_{1-1} = 0^\circ 00' 00''$  假设无误差; 此网的方向观测精度为  $0.7''$ 。

其各点误差椭圆长半轴的大小和长半轴方位角如表 1—1 所示。

图 1—3 为长形网, 呈等边三角形单锁, 边长约 7 km; 起始边为 I—II, 其精度为  $1/350000$ , 其方位角  $\alpha_{1-1}$  假设为  $90^\circ$ , 假设无误差; 原点设于 I 点, 其坐标假设无误差; 网的方向观测精度为  $0.7''$ 。

其各点误差椭圆长半轴的大小及其方位角如表 1—2 所示。长半轴的指向: II 指向 I; III、IV、V 指向 II; VI 垂直于基线; VII、VIII、IX 指向 I。

如图 1—2、图 1—3 为测边网, 则一般仍保持其点位误差椭圆长半轴方向与测角网的相应长半轴方向大致呈正交的规律。

① 此处分析点位精度的分布规律时, 为了简单起见, 未用置信椭圆, 而用的是误差椭圆。它们之间只是一个比例关系:

$$\frac{\text{置信椭圆长、短半轴}}{\text{误差椭圆长、短半轴}} = \begin{cases} \sqrt{\chi_{2,1-2}^2} & (\text{用理论方差因子 } \sigma_0^2 \text{ 计算时}) \\ \sqrt{2F_{2,f,1-2}} & (\text{用验后方差因子 } S_0^2 \text{ 计算时}) \end{cases}$$

误差椭圆的置信概率为 39.4% (用  $\sigma_0^2$  算) 或 29.3%—39.4% (用  $S_0^2$  算, 依自由度  $f$  的不同而异)。

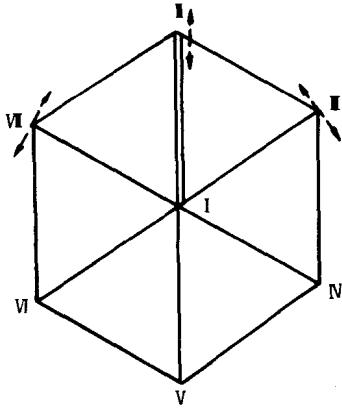


图 1—2

II、VII 两点的误差椭圆长半轴指向如虚线所示，但此两点的误差椭圆近于圆形。其他 III、IV、V、VI 点的误差椭圆长半轴方向均指向 I 点

表 1—1

点 名	I	II	IV	V	VI	VII
长半轴 (mm)	19.8	26.8	31.0	33.6	31.0	26.8
长半轴方位角	0°	150°	120°	180°	60°	30°

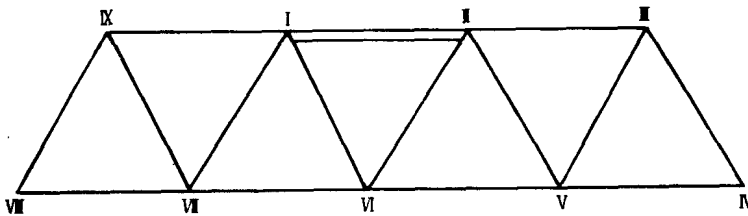


图 1—3

表 1—2

点 名	I	II	IV	V	VI	VII	VIII	IX
长半轴 (mm)	19.8	54.2	86.6	42.1	26.8	42.1	86.6	54.2
长半轴方位角	90°	90°	120°	150°	180°	30°	60°	90°

四、图 1—2、图 1—3 如为边角网，则在相应点上的误差椭圆都较前两种网缩小，而且处于前两种网误差椭圆的重叠区以内，如图 1—4 的实线椭圆。

边角网的测方向和测边精度的匹配，一般采用

$$\frac{m'_r}{\rho''} = \frac{m_s}{s}$$

式中， $m'_r$  为测方向误差， $m_s$  为测边长误差， $s$  为边长， $\rho'' = 206265''$ 。



五、具有强制符合的网，则较难找到通用的规律。如图 1—5，这是以图 1—3 的网为前期网，以它各控制点平差后的坐标为固定数据而进行的全面插网。插网共 16 点，全部为等边三角形，边长 4 km，方向观测精度为  $1.8'/\sqrt{2}$ 。其各插点的点位误差椭圆长半轴及其方位角如表 1—3 所示。

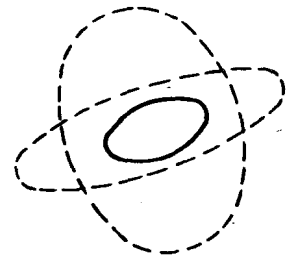


图 1—4

对照图 1—5 和表 1—3 来看，虽然插网各点的误差椭圆长半轴多数不指向最初的原点 I（或 I），但他们均指向插网的起算点，或垂直于临近插点的起算边。例如点 1、2、3、4、5、6、7、8、9 的长半轴垂直于它们各自临近的起算边 I—II、II—III、III—IV、IV—V、V—VI、VI—VII、VII—VIII、VIII—IX、I—IX，点 10、11、12、13、14、15、16 均处于三个起算点的中心，它们的长半轴都指向其中一个起算点，而垂直于另外两个起算点的连线（相当于该局部的起算边）。例如点 10，它的长半轴指向起算点 IX，垂直于起算边 VII—VIII；点 11 的长半轴指向起算点 VII，而垂直于起始边 I—IX，等等。至于指向哪一个起算点，这要看具体的网形和相对于前期网控制点的位置而异。这也是一个很有启示的现象。

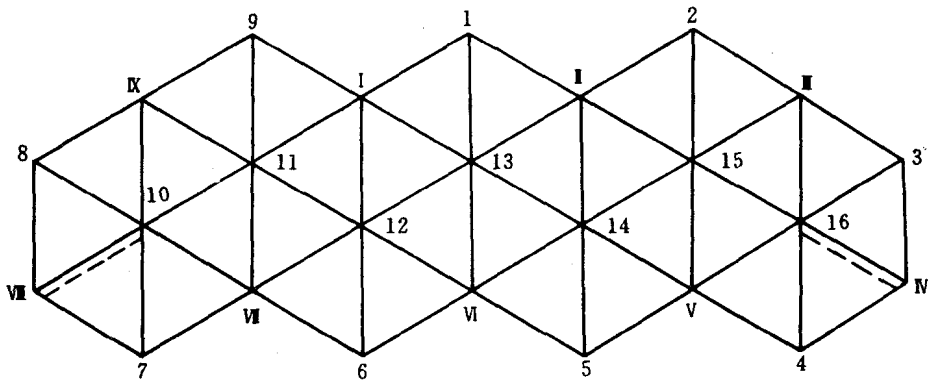


图 1—5

表 1—3

点 名	1	2	3	4	5	6	7	8
长半轴 (mm)	23.6	23.6	24.0	23.9	23.6	23.6	23.9	24.0
长半轴方位角	90°	90°	150°	90°	90°	90°	90°	30°
点 名	9	10	11	12	13	14	15	16
长半轴 (mm)	23.6	12.8	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.8
长半轴方位角	90°	60°	90°	90°	90°	90°	90°	120°

注 方位角为近似数，准确到 2°。

六、点位误差分布有一个重要规律：即点的周围直接与该点联系的观测方向（或边长）愈多，或传算该点坐标时途径愈短（当传算途径有多条时，以最少的传算三角形的个数计），那