

京沪高速铁路工程
技术培训讲义之六

京 沪 高 速 铁 路

工程测量技术标准与施工测量关键技术

京沪铁路客运专线公司筹备组

二〇〇七年三月

京沪高速铁路

工程测量技术标准与施工测量关键技术

西南交通大学 岑敏仪 张同刚 任自珍 编

2007 年 3 月

目 录

一、 高速铁路测量技术简介 1

 (一) 高速铁路采用精测网的必要性 1

 1. 高速铁路的要求 1

 2. 暂规的新规定 2

 3. 勘测设计要求 6

 (二) 德国无碴轨道测量控制网 9

 1. 控制网基准和体系 9

 2. 控制网密度和网形 11

 (三) 德国测量技术标准 12

 1. 博格公司的要求 12

 2. 德铁 RIL883 规程 14

二、 无碴轨道铁路工程测量技术指标 16

 (一) 无碴轨道铺设精度指标 16

 1. 内部尺寸 16

 2. 外部尺寸 17

 (二) 平面控制测量技术指标 18

 (三) 高程控制测量技术指标 19

 (四) 国内外控制网指标对比 21

 1. 控制网等级比较 21

 2. 控制网精度比较 21

三、 无碴轨道勘测控制网 23

 (一) 控制网设计 23

 1. 控制网基准 24

 2. 控制网网形 30

 3. 精度和可靠性 31

(二) 初测和定测	32
1. CP I 网测量	32
2. CP II 网测量	33
3. 线路测量	34
4. 高程测量	34
(三) GPS 测量	34
1. GPS 测量要求	34
2. GPS 数据处理	37
四、 无碴轨道变形监测技术	40
(一) 沉降监测标准	40
1. 路基	40
2. 桥梁	43
3. 隧道	50
4. 过渡段	52
(二) 沉降监测方法	52
1. 基准点设置	52
2. 工作基点设置	53
3. 监测点设置	53
4. 水准测量方法	53
(三) 沉降监测数据处理及软件	58
五、 无碴轨道测量技术	60
(一) 无碴轨道施工控制网	60
1. 起算基准设计	60
2. 网形设计	60
3. 精度设计	60
4. CPIII 测量	63
(二) 轨道安装控制测量	66
1. 基桩加密	66

2. 轨道测量系统	67
3. 常规作业方法	68
(三) 轨道平顺性测量技术	74
1. 平面测量	74
2. 高程测量	79
六、 无碴轨道测量评估	80
(一) 评估验收指标	80
1. 外业测量数据的精度指标	80
2. 平面控制网的可靠性指标	81
3. 平面控制网的点位精度指标	81
(二)、 评估验收内容	83
1. 精密工程控制网测量评估	83
2. 高程控制网测量检查评估	86
3. 路基、桥涵、隧道工程沉降观测评估	87
4. 工程控制网复测维护评估	94
七、 京沪高速铁路执行新测量技术有关建议	95
参考文献	96

一、 高速铁路测量技术简介

(一) 高速铁路采用精测网的必要性

1. 高速铁路的要求

客运专线无碴轨道的主要特点有：

(1) 高速铁路要求轨道结构具有高平顺，轨道几何尺寸偏差通常控制在 2mm 以内；

(2) 无碴轨道几何形位的调整只能依靠扣件系统来进行；

(3) 无碴轨道扣件的调整量为 mm 级精度。在长期的列车荷载作用下，路基会不断下沉，轨面水平均需通过扣件系统来调整，路基的长期永久不均匀沉降不得大于 15mm，因此在施工过程最多只能使用 6mm 左右的扣件调整量。这就对无碴轨道的施工精度提出了相当高的要求；

(4) 对于长大的无碴轨道结构，特别是板式无碴轨道的施工，还要求不同施工区段的水平闭合差不得大于 2mm，这样才能利用较小的扣件水平调整量来保证轨道的方向不平顺在容许范围内。

德国高速铁路无碴轨道的施工，所采用的超高偏差为 $\pm 2\text{ mm}$ ；纵长水平对于 5 m 的长度， $< 2\text{ mm}$ ；轨距应少于 2 mm；相邻点之间的方向，对于距离为 5 m 的长度，不大于 2 mm。并建立起了 GEODO、HERGIE、TARGET SIGNAL 等空间基础坐标系统，其三维坐标是通过自动目标识别并在线传输给轨道工作人员的 PC 机，有关位置的理论数据与完工数据之间的差别实时显示在 PC 机上，以此来控制施工的精度。

我国普通铁路建设中采用的是四等控制网，长大桥梁、隧道施工采用的局部二级控制网，施工精度难于保证高速铁路无碴轨道的要求；而且各勘测设计部门、各施工单位在同一线上采用多标段测量坐标系统，无统一的测量控制网，很显然这种测量方法是无法满

足高速铁路无碴轨道的施工要求的。

高精度的无碴轨道勘测、施工、观测所需要的测量技术系统，首先是要建立起高精度的测量控制网。目前国家坐标系统， 3° 带最大的长度变形误差高达 340mm/km ，无法满足无碴轨道的高精度施工要求。原来的《京沪高速铁路测量暂行规定》的最大长度变形允许值为 25mm/km ，德国铁路制定的标准 DB RIL 883 的长度变形误差小于 10mm/km 。由此可见，传统的铁路测量技术标准较国外高速铁路测量标准相差很大，难以满足无碴轨道工程施工的要求。

2、暂规的新规定

为确保客运专线无碴轨道建设的成功，铁道部组织国内铁路轨道和工程测量专家，参考翻译了大量的国外有关资料，并在测量理论指导下进行仿真实验验证，结合遂渝线无碴轨道试验段的经验教训，制定了《客运专线无碴轨道铁路工程测量暂行规定》。暂规的新内容主要有：

(1) 三网合一

客运专线无碴轨道铁路工程测量的平面、高程控制网，按施测阶段、施测目的及功能不同可分为勘测控制网、施工控制网、运营维护控制网。与有碴轨道相比，无碴轨道的最大特点是工程施工工艺和精度要求高，运营维护技术特殊，周期长（按 60 年设计标准）。为保证控制网的测量成果质量满足勘测、施工、运营维护 3 个阶段测量的要求，适应客运专线无碴轨道铁路工程建设和运营管理的需要，3 阶段的平面、高程控制测量必须采用统一的基准。即勘测控制网、施工控制网、运营维护控制网均采用 GPS 控制网为基础平面控制网，二等水准基点网为基础高程控制网。简称为三网合一。

(2) 平面基础控制网采用 GPS B 级网

由于我国国家平面基础控制点稀少，其精度和密度都远远不能

满足铁路工程平面基础控制的需求，因此规定客运专线无碴轨道铁路工程测量应采用 GPS 定位技术建立客运专线无碴轨道 GPS 基础平面控制网，以满足无碴轨道工程测量平面基础控制的要求。

无碴轨道工程测量精度要求高，施工中要求由坐标反算的边长值与现场实测值应一致，即所谓的尺度统一。由于地球面是个椭球曲面，地面上的测量数据需投影到施工平面上，曲面上的几何图形在投影到平面时，不可避免会产生变形。采用国家 3° 带投影的坐标系，在投影带边缘的边长投影变形值达到 340mm/km，这对无碴轨道的施工是很不利的，它远远大于目前普遍使用的全站仪的测距精度（1~10mm/km），对工程施工的影响呈系统性。从理论上来说，边长投影变形值越小越有利。因此规定客运专线无碴轨道铁路工程测量控制网采用工程独立坐标系，把边长投影变形值控制在 10mm/km，以满足无碴轨道施工测量的要求。

铁二院与西南交通大学的《无碴轨道测量技术的研究》和《无碴轨道控制测量理论和方法研究》成果，实验证实采用 C 级 GPS 控制网可以满足客运专线无碴轨道基础控制网的精度要求。考虑到目前 GPS 控制网的精度估算尚没有公认的理论严密的计算方法，由边角网近似计算的控制点点位误差和相对点位误差较德国标准略低，且边长投影变形值控制在 10mm/km 时，控制网的精度也受到一定的损失。按现行全球定位系统（GPS）铁路测量规程的规定，GPS 测量从 C 级提高到 B 级，测量工作量的投入增加不大。按照经济可靠，精度留有余地的原则，将 GPS 基础平面控制网 CP I 测量精度定为 B 级，等经过工程验证，积累实践经验后，再根据实际情况制定无碴轨道的 GPS 基础控制网的等级，就会更加合理。

（3）二等水准测量

铁二院与西南交通大学完成的《无碴轨道控制测量理论和方法研究》和《客运专线无碴轨道铁路工程测量控制网精度标准的研究》，

通过理论分析和大量的仿真模拟计算，得出结论：高程控制网可分级进行，首级采用二等水准测量，为全线统一的高程控制网；次级水准网为精密水准网，水准点距离为 1km。这与遂渝线无碴轨道工程试验段的高程控制测量经验相吻合。

这一标准略高于德国 RIL883 标准和旭普林公司的高程控制网测量标准。

在勘测阶段，若全线采用二等水准测量，由于野外地形条件的限制，测量投入会增加很多，且水准路线需要绕行。特别是大型跨海（江）桥梁和越岭隧道，绕行的水准路线比线路贯通后直接测量的路线最大可增加 10 倍，由此高精度测量得到的控制点，其高程精度却降低很多，最终还需在线路贯通后重新进行二等水准测量。因此，在勘测设计阶段，施测高等级水准测量困难时，高程首级控制网可分两阶段实施：勘测阶段高程控制网按四等水准测量要求建立，线下工程施工完成后，再按铺设无碴轨道施工要求重新建立二等水准控制网。这样可降低测量成本，提高二等水准控制网的测量精度。二等水准控制网贯通后，需根据实际情况将线下工程施工的高程控制调整到二等水准控制网基准上。

（4）、平面和高程控制网的精度

无碴轨道与有碴轨道的最大区别是无碴轨道铺轨要求的精度高，轨道板和轨道安装的可调量极小。无碴轨道控制网的高精度要求主要体现在线下施工完成后的轨道敷设阶段。现有的有碴轨道测量规范，即使测量精度达不到线路路基、大型桥梁和隧道施工的要求，测量误差或系统误差（如边长投影变形）过大已造成施工困难或矛盾，但这些信息通常不会反映到勘测设计部门，施工单位多数通过工程本身的局部调整来消化吸收这些测量误差。由于无碴轨道的施工精度高，工程可调量小，测量误差和边长投影变形就难以采用局部工程调整的办法，只能通过更改设计的方法，使实际施工的

线路中线与设计值吻合。基础控制网的测量误差或系统误差越大，更改设计的工作量也越大。因此，提高测量精度，是减少更改设计工作量的有效措施，也是今后更好地进行轨道快速检测和变形监测，提高运营管理水平的重要保证。

在勘测阶段，困难地区的高程控制网先按四等水准测量要求建立，待线下工程施工完成后，再按铺设无碴轨道施工要求重新建立二等水准控制网，这是不得已的办法，这一变通方法需要更改线路的纵断面设计才能满足铺设无碴轨道的精度要求。故有条件的地区，宜敷设二等水准路线建立基础高程控制网。

如勘测设计部门对提高基础控制网测量精度的认识不足，对测量精度过低造成铁路线路设计文件的改变处理不力，势必引发无碴轨道敷设困难，甚至造成工程事故。因此，各勘测设计单位和各级领导，必须对控制网测量的高精度有足够重视。

(5)、三级平面控制网的相互关系

平面控制网分三级布设，首级 GPS 基础平面控制网（CP I），二级线路控制网（CP II），三级基桩控制网（CPIII）。

CP I 在初测阶段布设，采用 GPS 施测，每对 GPS 点间距离 1km 左右，点对间距离以 4km 为宜，按 B 级 GPS 网精度要求测量。

CP II 主要在定测阶段布设，可采用 GPS 或导线测量方法施测，按 C 级 GPS 网或四等导线精度要求测量。点间距为 800m~1000 m，控制网不仅考虑导线边（基线边）的方位角精度，还考虑控制网的可靠性。

CPIII 主要在无碴轨道铺设阶段布设，可采用附和导线或后方交会形式施测，按五等导线或三角网要求测量。考虑到无碴轨道铺设 150m 长波不能大于 10mm 的要求，故规定 CPIII 控制点间距为 150m~200m。

CPI、CPII 和 CPIII 三级网可采用高级控制低级的方式建立联系。

CPIII 也可根据无碴轨道的需要,建立独立的控制网,并在 CPI 或 CPII 中置平,使控制网的联系更合理。

(6)、测量评估和验收

根据现场的测量实践,参考德国高速铁路测量规范的有关标准,《客运专线无碴轨道铁路工程测量暂行规定》对无碴轨道测量控制网的建立和验收有一套完整的评估验收标准,主要包括:

1) 控制网测量评估验收内容:控制网设计,控制点埋设,测量仪器,观测资料,数据质量,平差计算,精度评定等。

2) 测量数据质量评估指标:精度指标,可靠性指标,点位精度指标。

3) 数据处理质量评估:平差基准和起始数据检验,数据处理的数学模型和计算软件验证,平差成果验算,验后精度、误差统计、误差变化曲线和分布评估。

4) 控制网测量评估报告:控制网设计,观测纲要,数据质量,平差计算,验后精度及可靠性等评估报告。

(7)、无碴轨道工程安装测量

《客运专线无碴轨道铁路工程测量暂行规定》根据国内客运专线目前所采用的 CRTS I 型板式无碴轨道(CRTS I s)、CRTS II 型板式无碴轨道(CRTS II s)、CRTS III 型板式无碴轨道(CRTS III s)及 CRTS I 型双块式无碴轨道(CRTS I b)、CRTS II 型双块式无碴轨道(CRTS II b)五种轨道结构型式,分别制定了相关的测量要求,对于以后开发的其它新型无碴轨道结构型式,可参照执行。

无碴轨道安装测量主要依据其结构型式及施工方法,进行过程控制测量,内容包括底座或支承层测量、轨道板或道床板定位测量及轨道整理测量等。

3、勘测设计要求

在勘测阶段采用以往的测量标准，基本上可以满足线下土建工程的施工精度要求，对于特大型桥隧工程，可以通过建立局部的精密控制网，以保证大型桥隧工程按设计要求正确施工。实践已证实这是一套成熟的勘测程序和标准。

在无碴轨道安装阶段，按照铺设无碴轨道的要求，布设高精度的无碴轨道安装控制网。因此，原来的勘测网可通过加密和改造构成新的安装控制网。

《客运专线无碴轨道铁路工程测量暂行规定》的精度标准除了比京沪暂规的测量精度标准高外，其最大的差别是投影转换的模型误差为 10mm/km ，比京沪暂规的 25mm/km 高了许多。由于勘测控制网与安装控制网在控制点密度、测量精度和投影模型等方面的差别较大，竣工的线下工程线路中线与由高精度建立的安装控制网测定的理论中线（设计中线）会有较大的差异。无碴轨道与有碴轨道的最大区别是无碴轨道铺轨要求的精度高，轨道板和轨道安装的可调量极小。无碴轨道控制网的高精度要求主要体现在线下施工完成后的轨道敷设阶段。现有的有碴轨道测量规范，即使测量精度达不到线路路基、大型桥梁和隧道施工的要求，测量误差或系统误差（如边长投影变形）过大已造成施工困难或矛盾，但这些信息通常不会反映到勘测设计部门，施工单位多数通过工程本身的局部调整来消化吸收这些测量误差。由于无碴轨道的施工精度要求高，可调量非常有限，测量误差和边长投影变形就难以采用局部工程调整的办法，稍大一些的差异都会给施工造成极大的困难，甚至无法调整，从而造成工程事故。因此，若采用原低精度的测量控制网进行设计，必须在精密的安装控制网建好后，重新确定线路的理论中线与实际的竣工中线的差异，通过更改设计使理论中线与竣工中线尽可能相符。

为使更改设计的工作量尽可能地少，在建立精密安装控制网时，需对全线的重点工程，如长大桥隧、桩-板结构路基、车站或长大曲线等线路现状纳入精密安装（平面和高程）控制网中。选择投影变

形小于 10mm/km 的投影模型，重新平差计算安装控制网的坐标和高程。这样可尽量保持全线的重点工程设计不作更改，只作坐标转换，把不可避免的变更设计部分放在直线路基段或适宜的路段。因此，这种方案是解决已开工的客运专线现有测量控制网改造的最佳方法。

由于这一方案在建立精密的安装（平面和高程）控制网中，需兼顾已竣工的线路现状和已有的勘测控制网，还需考虑为运营安全监测服务，因而精密安装控制网的布设、测量以及数据处理方法和手段均要有较高的要求，而且由于与勘测控制网的精度不一致，增加了许多更改设计和施工调整的工作量，这些更需要由铁路测量和线路设计（或现场施工）的专业技术人员的密切配合才能完成。勘测和安装控制网的精度和投影模型的差别越大，增加的更改设计工作量就越大。若更改设计的工作进度没跟上，这些误差必然留到后续的施工去消化，这就会给工程施工增加更大的调整工作量和困难，遂渝线无碴轨道试验段的施工实践已充分说明了这一点。

从德国的建设无碴轨道的经验和我国已经开展的无碴轨道工程试验段建设的实践，均表明测量控制网（精测网）对无碴轨道工程的重要性。目前我国建设中的客运专线，因为测量控制网精度过低而出现的问题以及有关各方为克服存在问题而作出的艰辛工作和努力，已充分说明了测量工作在无碴轨道建设中的重要作用。

到目前为止，各级领导、工程技术专家和绝大多数技术同行均赞同这样的观点，即无碴轨道建设必须采用精密工程测量技术和手段。当然也存在这样认识，认为通过购买国外精密测量仪器设备，采用高等级测量方法来建立精测网，便可一劳永逸地解决无碴轨道的测量问题。这是一种不正确的认识。

目前在建的无碴轨道客运专线公司最近完成了各自客运专线线下土建工程现状的评估工作。以某无碴轨道客运专线为例，原控制网与精测网比较，坐标系统的精度差别远大于测量精度的差别。这

给线路和轨道准确定位带来很大困难。实际评估的数据和结论充分说明，测量系统对无碴轨道工程施工所产生的影响要比测量精度大得多。为解决上述问题，各方面付出了很大的代价。

据了解，目前在建的无碴轨道客运专线线下工程测量系统虽有很大改善，但核心仍采用传统的方法和技术，新坐标系统存在的系统误差仍然远远大于精测网的测量误差。我们最近完成的理论研究证明：若在无碴轨道铺设时仍然采用这套坐标系统，将无法保障轨道位置和平顺性满足要求，甚至可能出现更为严重的后果。若设计、施工和建设单位，特别是领导干部对勘测和施工阶段的测量精度和坐标系统问题重视不够，等到无碴轨道施工合拢时才发现问题，轨道工程已无法调整，造成工程事故，其经济损失将非常大。

德国睿铁公司（Rail One）执行副总裁巴哈曼先生说：“要成功地建设无碴轨道，就必须有一套完整、高效且非常精确的测量系统，否则必定失败”。他用简单的语言说明了精密测量系统的重要性。

无碴轨道建设是一项系统工程，一套完整、高效且非常精确的测量系统是无碴轨道各个建设阶段得以顺利实施的基础和可靠保证。对不同工程专业、不同施工工序和阶段、以及日后运营阶段的监测，都应该以精确测量系统为基础，才能做到有序、高效、精确和统一，才能使整个建设过程和运营阶段工作有机顺利进行，才能使高速铁路真正达到高速、安全、平稳和有效的目的。因此，对于即将开工的京沪高速铁路，建议采用高效、完整、精确和统一的坐标系统来建立无碴轨道精测网，以保证无碴轨道建设的顺利实施。

（二） 德国无碴轨道测量控制网

1. 控制网基准和体系

德国铁路线路技术采用的大地测量基准数据是以德国土地测量管理部门的 ETRF89 为基础的 DB_REF。通过 7 参数坐标转换，可

以实现由 ETRF89 转换到局部参考椭圆体，使用 3 度带高斯-克吕格投影可将球面坐标投影到平面上。

建立了永久标志的控制基准点用大地测量方法来测定，并作为固定标志导入德国铁路的信息系统中。这些控制基准点具有较高的测量精度、可靠性和稳定性，构成了德国铁路的基准控制网。

据资料介绍，德国高速铁路采用 MKS 定义的特殊技术坐标网。MKS 可根据需要把地球表面正形投影到设计或计算平面上，发生的不可避免的长度变形限定在 10mm/km 的数量级上。

基准控制网与坐标框架建立了固定的关系（如在地理信息系统中）之后，铁路线路的测量、评价和分析均可以坐标为基础来进行。与此对应，所有以坐标为基础的测量、评价和分析方法也必须以 DB_REF 的基准控制网为基础。新控制基准点只能在 DB_REF 系统中加密。但对于专用测量网，其控制点坐标可不与 DB_REF 保持一致。既有基准控制网的加密和扩展必须在所规划的施工措施范围内（新建、扩建、改建和维修作业）进行，同时必须遵守铁路工程测量的相关规范。

控制基准点分为三维控制基准点、水平控制基准点和高程控制基准点。对于水平控制基准点和高程控制基准点等非三维控制基准点，需要以分米级的精度为新控制基准点给出所缺少的维数。所有新控制基准点必须以三维方式设置和测定。取决于精度、测定方法、使用目的及与相邻控制基准点的距离，控制点的状态可以表明控制基准点的质量。

表 1-1 控制基准点的质量

控制点状态	标志	含义
PS0	参考点	坐标框架的形成，GPS 及大地测量方法的初始点
PS1	加密点	大地测量方法（测距仪、水准测量）的初始点
PS2	平面控制基准点	大地测量方法（测距仪）的初始点

PS3	高程的控制基准点	大地测量方法(水准测量)的初始点
PS4	其他控制基准点	如其它测量网的控制点、线路标志测设控制点

2. 控制网密度和网形

相邻控制基准点之间的距离必须要确保能够经济地进行测量作业，并应采纳以下数据：

表 1-2 控制点的密度

控制点状态	距 离	设立的规定
PS0	约 4km	在线路交汇范围内，一个点必须覆盖多条线路
PS1	800~1000m	
PS2	约 150m	可作为永久的控制基准点设立
PS3	700~1000m	只设立在适宜的大楼和建筑物处
PS4	—	根据要求

德铁的平面控制网分为 PS0、PS1、PS2 和 PS4 四级，网形如图 1-1~图 1-3 所示。

根据德国国家控制网点的间隔 30km-50km，加密的 PS0 点间隔 4km 左右且远离施工区，由静态 GPS 来测定（图 1-1）。

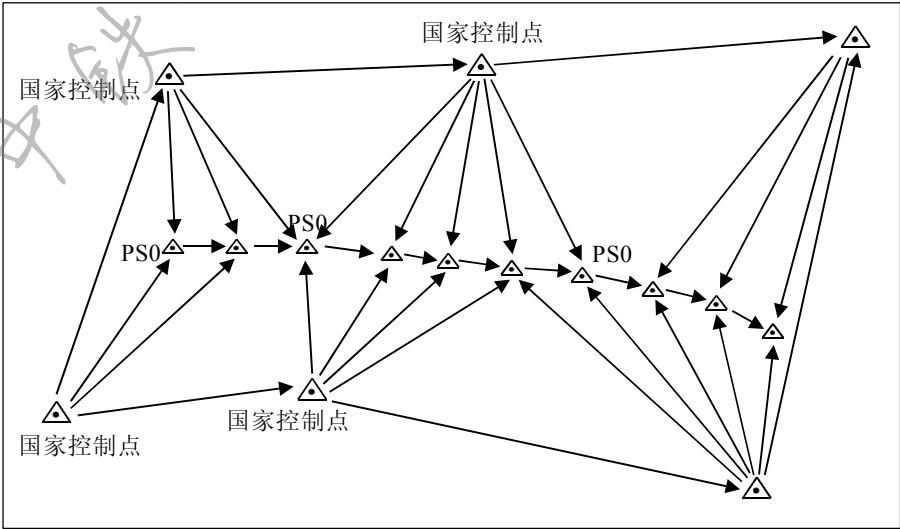


图 1-1 PS0 控制网

图 1-2 为 PS0 控制点下加密 PS1 控制点示意图。PS1 点沿线路

单侧布设。相距 800-1 000m，位于施工区内，与线路的距离 $\leq 15\text{m}$ 。

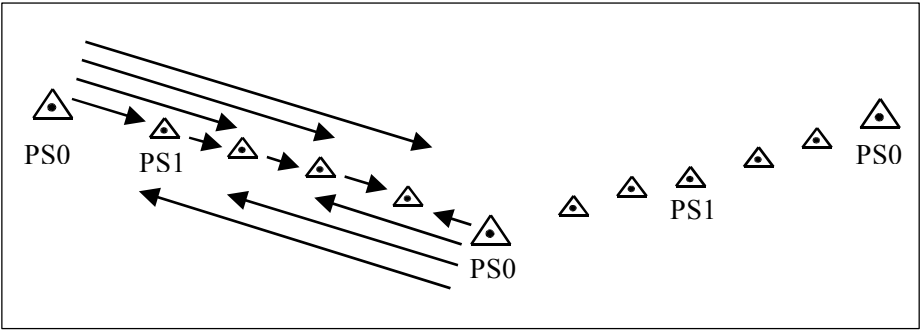


图 1-2 PS1 控制网

图 1-3 为两种不同方法建立 PS4 控制网的示意图。图 1-3 (a) 中 PS2 为 PS1 控制点下的加密点，采用导线测量，相距 150-250m。PS4 间距为 60m，沿线路两侧布设，为轨道铺设控制网。图 1-3 (b) 中的 PS4 布设形式与图 1-3 (a) 相同，但 PS4 网中间的红色圆点不是 PS2，而是自由设站点。

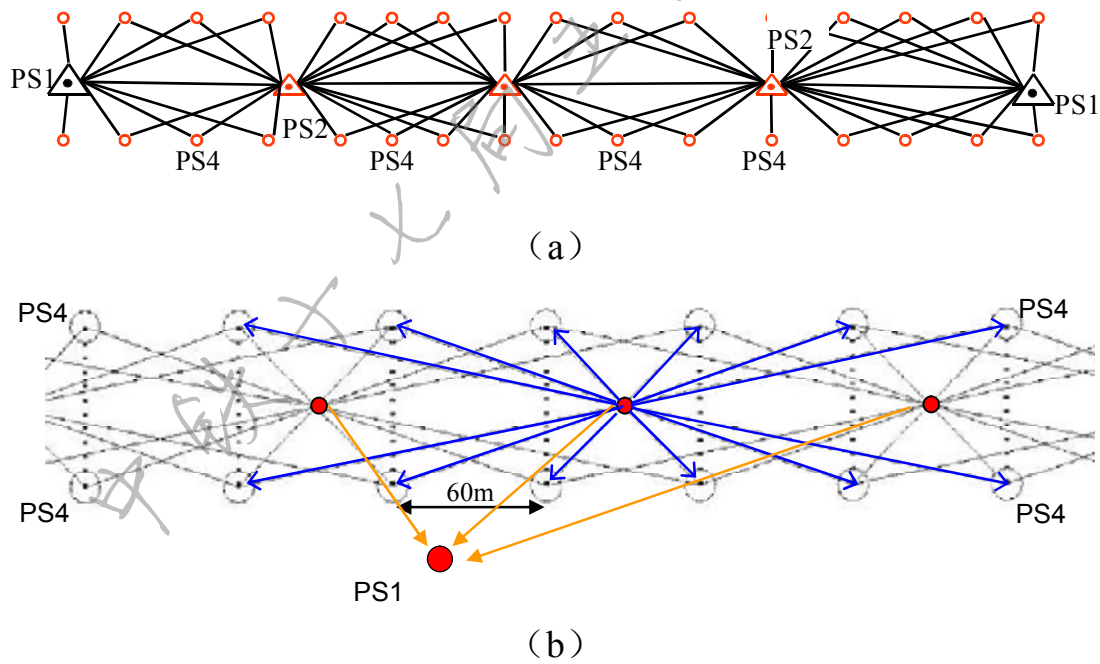


图 1-3 PS4 控制网

(三) 德国测量技术标准

1. 博格公司的要求

表 1-3 博格公司控制网精度标准

控制网级别	精 度 要 求
基础网	每 1000m, 水平位置 10mm, 高程 2mm。
线路导线网	约每 250m, 水平位置 5mm, 高程 1mm。
建筑物特殊网	小于 100m, 水平位置 3mm, 高程 1mm。
轨道设标网	每 60m 有两个点, 水平位置 1mm, 高程 1mm。
轨道基准网	每块板缝处有一个点, 水平位置 0.2mm, 高程 0.1mm。

博格公司最近提出：线路导线网和建筑物特殊网合并建设，精度要求：每 180-200m, 水平位置 3mm, 高程 1mm。

1) 德铁 DS833 标准

表 1-4 德铁 DS833.0020 的控制网精度标准

控制网级别	精 度 要 求
一级控制点 PS1	800-1000m, 平面位置精度: 单点平面位置误差 $\leq 8\text{mm}$, 相邻点相对位置误差 $\leq 10\text{mm}$; 高程精度: 单点高程误差 $\leq 2\text{mm}$; 相邻点相对高程误差 $\leq 5 \times \sqrt{R} \text{ mm}$ (R 为相邻两水准点之间的距离, 单位为 km)。
二级控制点 PS2	150-250m, 平面位置精度: 单点平面位置误差 $\leq 8\text{mm}$, 相邻点相对位置误差 $\leq 10\text{mm}$; 高程精度: 无
三级控制点 PS3	700-1000m, 高程基准点 高程精度: 单点高程误差 $\leq 2\text{mm}$;

	相邻点相对高程误差 $\leq 5 \times \sqrt{R}$ mm (R 为相邻两水准点之间的距离, 单位为 km)。
四级控制点 PS4	50-60m, 平面位置精度: 单点平面位置误差 ≤ 5 mm, 相邻点相对位置误差 ≤ 6 mm; 高程精度: 单点高程误差 ≤ 2 mm;

2. 德铁 RIL883 规程

表 1-5 德铁 RIL883 的控制网精度标准

控制网级别	精度要求
零级控制点 PS0	约 4km, 平面位置精度: 单点平面位置误差 ≤ 10 mm; 相邻点相对位置误差 ≤ 5 mm; 高程精度: 单点高程误差 (无数据); 相邻点相对高程误差 (无数据)。
一级控制点 PS1	800-1000m, 平面位置精度: 单点平面位置误差 ≤ 15 mm; 相邻点相对位置误差 ≤ 10 mm; 高程精度: 单点高程误差 (无数据); 相邻点相对高程误差 (无数据)。
二级控制点 PS2	约 150m, 平面位置精度: 单点平面位置误差 ≤ 15 mm; 相邻点相对位置误差 ≤ 10 mm; 高程精度: 无

三级控制点 PS3	700-1000m, 高程基准点 高程精度: 单点高程误差 ≤ 5 mm; 相邻点相对高程误差 $\leq 5 \times \sqrt{R}$ mm (R 为相邻两水准点之间的距离, 单位为 km)。
四级控制点 PS4	根据要求

二、 无碴轨道铁路工程测量技术指标

(一) 无碴轨道铺设精度指标

1. 内部尺寸

内部尺寸描述轨道自身的几何形状，主要影响列车的动力学性能。轨道自身几何尺寸的各项规定是为了给列车的平稳运行提供一个平顺的轨道。内部尺寸由轨距、水平、纵向高低和方向等四个参数来描述，这些参数能保证轨道有正确的形状，确定轨道的实际形状与设计形状是否相符。

一般钢轨的形状，或者说钢轨的曲率在几何上可以通过一条弦线的矢高来描述。这个方法几十年来在轨道工程中已为人们所知。无碴轨道铺设精度要求可参见表 2-1。从表 2-1 中可以看出，在轨道验收时，主要是以 20m 弦长来量测，轨道高低偏差限差为 2mm，轨向偏差限差为 2mm。

表 2-1 无碴轨道铺设精度（静态）标准（mm）

项目	高低	轨向	水平	轨距
限差值	2mm	2mm	1mm	±1mm
弦长	20m			

在德国无碴轨道验收规章中，为检测轨道几何形态规定了两项检验标准：

- ① 第 1 个标准是用于检查轨道在较短长度范围内的几何形态，也就是起控制作用的单个不平顺。这些单个不平顺的偏差必须控制在较低的数值，采用 30m 弦长，按间距 5m 设置一对测点，检测这一对点的矢高差。
- ② 第 2 个标准用于检查长波不平顺对轨道的影响，采用 300m 的弦长，按间距 150m 设置一对测点，检测这一对点的矢高差。

极限值的规定如下：

表 2-2 德铁无碴轨道施工要求

测量参数	容许偏差极限值
轨距	2mm，相对轨距基本尺寸 1.436m 而言
水平	2mm，等高的两股钢轨相对而言，或相对于规定超高而言
纵向高低	两个相邻检测点的实际高差与设计高差的偏差：用于评估高差的两测点间距离为 5m 时，为 2mm；用于评估高差的两测点间距离为 150m 时，为 10mm
方向	两个相邻检测点的实际矢距差与设计矢距差的偏差：用于评估矢距差的两测点间距离为 5m 时，为 2mm；用于评估矢距差的两测点间距离为 150m 时，为 10mm

参考德国的验收标准，我国客运专线无碴轨道采用以下两种验收要求：

- ① 以 20m 弦量测，矢距差为 2mm，纵向高低偏差为 2mm，即 2mm/20m。
- ② 以 300m 弦量测，矢距差为 10mm，纵向高低偏差为 10mm，即 10mm/300m。

2. 外部尺寸

无碴轨道的外部尺寸描述的是无碴轨道的空间位置和标高，即无碴轨道在空间三维坐标系中的坐标和高程。无碴轨道外部尺寸由轨道中线与周围相邻建（构）筑物的相互关系来确定。无碴轨道外部尺寸必须与路基、桥梁、隧道、站台等线下工程的空间位置坐标和高程相匹配协调。

无碴轨道的外部尺寸的量测（也称为无碴轨道绝对定位）精度必须满足无碴轨道平顺性的要求。由此可见，无碴轨道各级测量控制网测量精度应同时满足线下工程施工和轨道工程施工的精度要

求，即必须同时满足轨道绝对定位和相对定位的精度要求。

表 2-3 无碴轨道轨面高程、轨道中线、线间距允许偏差

序号	项目		允许偏差(mm)
1	轨面高程与设计比较	一般路基	+4
		在建筑物上	-6
		紧靠站台	+4 0
2	轨道中线与设计中线差		-10
3	线间距		+10 0

(二) 平面控制测量技术指标

表 2-4 各级平面控制网布网要求

控制网级别	测量方法	测量等级	点间距	备 注
CP I	GPS	B 级	≥1 000m	≤4km 一对点
CP II	GPS	C 级	800~1 000m	
	导线	四等		
CPIII	导线	五等	150~200m	10~20m 一对点
	后方交会		50~60m	

表 2-5 GPS 测量的精度指标

控制网级别	基线边方向中误差	最弱边相对中误差
CP I	≤1.3"	1/170000
CP II	≤1.7"	1/100000

表 2-6 导线测量主要技术要求

控 制 网 别	附 合 长 度 (km)	边 长 (m)	测 距 中 误 差 (mm)	测 角 中 误 差 (")	相 邻 点 位 坐 标 中 误 差 (mm)	导线全长相对闭合差限差	方 位 角 闭 合 差 限 差 (")	对 应 导 线 等 级
CP II	≤4	800~1000	5	2.5	10	1/40000	$\pm 5\sqrt{n}$	四等
CPIII	≤1	150~200	3	4	5	1/20000	$\pm 8\sqrt{n}$	五等

各级控制点的可重复性测量精度和相邻点位的相对精度（X、Y 坐标方向的中误差）应符合表 2-7 的要求。可重复性测量精度：控制点两次定位坐标差的中误差或补设、增设控制点时，由现有已知控制点发展的新控制点相对于已知点的坐标中误差。

表 2-7 控制点的定位精度要求（mm）

控制点		可重复性测量精度	相对点位精度
CP I		10	$8+D\times10^{-6}$
CP II		15	10
CPIII	导线测量	6	5
	后方交会测量	5	1

注：D 为基线边长，单位为 mm。

（三） 高程控制测量技术指标

表 2-8 各级高程控制测量等级及布点要求

控制网级别	测量等级	点间距
勘测高程控制测量	二等水准测量	$\leq 2000\text{m}$
	四等水准测量	
水准基点高程控制测量	二等水准测量	$\leq 2000\text{m}$
CPIII 高程测量	精密水准测量	$\leq 200\text{m}$

长大桥隧及特殊路基结构施工高程控制网等级应按相关专业要求执行。各等级水准测量精度要求应符合表 2-9 的规定，各等级水准观测的技术要求应符合表 2-10 的规定。

表 2-9 各等级水准测量精度要求（mm）

水准测量等级	每千米水准测量偶然中误差 M_{Δ}	每千米水准测量全中误差 M_W	限差			
			检测已测段高差之差	往返测不符值	附和路线或环线闭合差	左右路线高差不符值

二等水准	≤ 1.0	≤ 2.0	$6\sqrt{L}$	$4\sqrt{L}$	$4\sqrt{L}$	—
精密水准	≤ 2.0	≤ 4.0	$12\sqrt{L}$	$8\sqrt{L}$	$8\sqrt{L}$	$4\sqrt{L}$
三等水准	≤ 3.0	≤ 6.0	$20\sqrt{L}$	$12\sqrt{L}$	$12\sqrt{L}$	$8\sqrt{L}$
四等水准	≤ 5.0	≤ 10.0	$30\sqrt{L}$	$20\sqrt{L}$	$20\sqrt{L}$	$12\sqrt{L}$

表 2-10 各等级水准观测主要技术要求

等级	水准尺 类型	水准仪 等级	视距 (m)	前后视距 差 (m)	测段的前后视 距累积差 (m)	视线高度 (m)
二等	因瓦	DS ₁	≤ 50	≤ 1.0	≤ 3.0	下丝读数 ≥ 0.3
		DS ₀₅	≤ 60			
精密 水准	因瓦	DS ₁	≤ 60	≤ 2.0	≤ 4.0	下丝读数 ≥ 0.3
		DS ₀₅	≤ 65			
三等	双面	DS ₃	≤ 65	≤ 3.0	≤ 6.0	三丝能读数
	因瓦	DS ₁ /DS ₀₅	≤ 80			
四等	双面	DS ₃	≤ 80	≤ 5.0	≤ 10.0	三丝能读数
	因瓦	DS ₁	≤ 100			

水准仪视准轴与水准管轴的夹角，DS₁级不应超过 15″；DS₃级不应超过 20″；水准尺上的米间隔平均长与名义长之差，对于因瓦水准尺，不应超过 0.15mm，对于双面水准尺，不应超过 0.5mm；二等水准测量采用补偿式自动安平水准仪时，其补偿误差 Δa 不应超过 0.2″。

观测读数和记录的数字取位：使用 DS₀₅ 或 DS₁ 级仪器，应读记至 0.05mm 或 0.1mm；使用数字水准仪应读记至 0.01mm；使用区格式木尺应读记至 1mm。

水准测量计算取位应符合表 2-11 的规定：

表 2-11 水准测量计算取位

等级	往（返）测 距离总和	往（返） 测距离	各测站 高差	往（返） 测高差	往（返）测 高差中数	高程 (mm)
----	---------------	-------------	-----------	-------------	---------------	------------

	(km)	中 数 (km)	(mm)	总 和 (mm)	(mm)	
二等、精密水准	0.01	0.1	0.01	0.01	0.1	0.1
三、四等	0.01	0.1	0.1	0.1	0.1	1

定测高程测量时应对初测水准点逐一进行检测，其不符值应小于四等水准测量限差 ($20\sqrt{L}$)。当超出限差，应采用二等水准测量进行复测，在确认初测水准点有误时，方能更改。长度在 300m 以上的桥梁、500m 以上的隧道和大型车站的两端及其范围内，均应设置适当密度的水准点。初测设置的水准点间距太长、远离线路或离线路太近易被施工破坏时，应予增设或迁移，并与邻近水准点闭合。中桩高程测量应起闭于水准点，其闭合限差应为 $30\sqrt{L}$ 。中桩高程应观测 2 次，其不符值不应大于 10cm，取位至厘米。

(四) 国内外控制网指标对比

1. 控制网等级比较

德国铁路标准 RIL883 与我国客专无碴轨道测量控制网等级对应关系：

- (1) CP I 相当于 PS0;
- (2) CP II 相当于 PS1;
- (3) 水准基点相当于 PS3;
- (4) CPIII 在线下工程土建施工时相当于 PS2;

无碴轨道施工时，重建（或恢复）CPIII 控制点（150~200m）和加密控制基桩（间隔 50~60m），相当于 PS4。

2. 控制网精度比较

现收集到的德铁标准中，模型误差的限制为 10mm/km。《客运

专线无碴轨道铁路工程测量暂行规定》中的模型误差，采用不大于 10mm/km，有条件推行小于 10mm/km。

从相邻点误差来说，我国客运专线无碴轨道的 CP II 精度高于德铁 DS833.0020 和 RIL883 规程的 PS1；水准基点的精度高于德铁 DS833.0020 和 RIL883 规程的 PS3；CPIII 点的高程精度低于德铁 DS833.0020 和 RIL883 规程的 PS3，平面精度高于德铁 DS833.0020 的 PS4。

按照德铁标准对单点平面（或高程）位置误差的解释，可理解为需补设或增设控制点时，由现有已知控制点发展的新控制点相对于已知点的坐标（或高程）中误差。现有测量规范均未设计该指标，而铁路工程测量的实践经验表明该指标对实际工作具有指导性意义。因此，《客运专线无碴轨道铁路工程测量暂行规定》的 CP I、CP II 和水准基点单点平面（或高程）位置中误差参照德铁标准，CPIII 单点平面（或高程）位置中误差采用铁二院与西南交通大学共同完成的铁道部建设司规范科研项目《无碴轨道工程测量控制网精度研究报告》提出的加密基桩的精度指标。

三、无碴轨道勘测控制网

（一）控制网设计

CP I 网和 CP II 网应根据测区地形、地貌和线路工程的具体情况，并顾及经济性原则进行设计。在设计之前需要收集线路平、纵断面图及测区 1:10 000 和 1:50 000 地形图，以及沿线国家大地点和地方控制点资料，包括平面控制网图、水准线路图、点之记、成果表和技术总结等相关资料。在充分研究线路平、纵断面图的基础上进行整个控制网的设计，包括控制网起算基准设计、控制网网形设计和控制网精度设计。需要增补控制点时，还需要进行控制网改造设计。控制网设计采用计算机辅助设计。

无碴轨道控制测量工作开展前，应根据测区地形、地貌及线路工程情况进行控制网设计。

控制网设计前，应收集线路设计的有关资料和沿线国家大地点资料，在充分研究线路平、纵断面图的基础上进行控制网设计。控制网的设计分为平面控制网设计和高程控制网设计。

设计时可根据德国慕尼黑国防军事学院天文、物理大地测量教授格伦法伦德（E.Grafarend）博士提出的建议，将控制网的设计分为四类，即解决控制网基准问题的零类设计、解决控制网布网问题的一类设计、解决控制网精度问题的二类设计以及解决已有控制网改进与加密问题的三类设计，并可分阶段进行。在客运专线无碴轨道铁路测量中，基准设计应满足施工平面控制网坐标投影长度变形值小于 10mm/km；网形和精度设计应考虑精度准则、可靠性准则以及经济性原则，精度计算应考虑起算数据误差的影响。在进行控制网改造设计时，增设或补设控制点的点位精度也应符合控制网设计准则的要求。

控制网设计完成并经审定后，编写控制网设计书并拟定作业计划。

1. 控制网基准

测量控制网的点位坐标是待估参数。对于测角网，观测量是方向或角度。仅根据方向或角度的观测值不可能确定点的坐标值，即不能确定网的位置、方位和大小。因此需要有一个点的坐标（平面坐标）、一个方位和一个尺度基准，也可以是2个点的位置（平面坐标）作为基准。对于测边网、边角网或导线网，观测量是边长和方向（或角度）。为了确定点的坐标，也需要有一个点的位置（平面坐标）和一个方位基准和一个尺度基准。一般说来，测角网、测边网、边角网和导线网都是二维平面控制网，其基准数为4（包括尺度基准）。

(1) 控制网的定位和定向

测量控制网优化设计问题，一般属于强基准问题，即固定的原始起算数据，要求平差后保持起算基准的形式不变。测量控制网按经典的最小二乘法作间接平差时，一般是以某些参数的固定值作为网的基准，以求得待定参数的估计值或平差值，如测角网通常以一个点（例如点 A ）、一条边（例如 S_{BC} ）和一条边的方位（例如 α_{DE} ）为起算数据构成基准，对于测边网（以及导线网、边角网），其位置基准和方位基准是由一个固定点（例如点 A ）和一条边的固定方位角（例如 α_{BC} ）确定的。在考虑尺度比参数时，一般将网中一部分边长的尺度比固定为 $\mu_1=1$ ，作为尺度基准。

控制网的基准设计不仅为网的待定参数提供了起算数据，还对网的精度有很大影响。众所周知，离起始点愈远，待定点点位精度愈低。各种控制网按照其用途和精度要求，在进行网基准设计时加以考虑。

对于同一个测量控制网，如果采用不同的基准进行平差计算，会得到不同的结果。有时需要改变网的起算基准，这可以通过重新

平差来实现，也可以用相似变换方法来完成网的起算基准变换，从而不用重新平差便得到新基准系的测量结果。

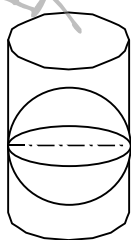
(2) 控制网的尺度

控制网的尺度是工程测量最关心的问题，也是最现实的问题。任何一项工程，测量计算的投影面均以施工精度要求最高的设计尺寸所在的高程面为准。对于客运专线无碴轨道铁路工程而言，则应该以线路轨顶标高作为平面独立坐标系统（施工平面控制网）的投影高程面。

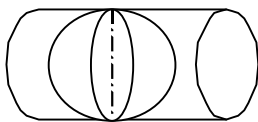
《客运专线无碴轨道铁路工程测量暂行规定》要求施工平面控制网坐标投影长度变形值不大于 10mm/km 。为达到这个要求，有三种数学模型可供选择：

- ①根据客运专线通过地区的具体情况和要求，选择抵偿坐标系统、任意中央子午线坐标系统、任意中央子午线的较窄宽度带的坐标系统。
- ②采用斜轴墨卡托投影。

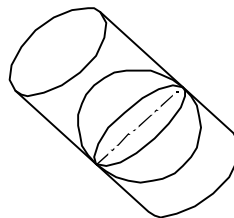
墨卡托投影是一种保角圆柱投影。它以圆柱作为投影面，将经纬线投影到圆柱面上，然后将圆柱面展成平面而成。圆柱面可与地球椭球相切或相割，同时也有正位、横位、斜位三种不同位置的区别（图 3-1）。



(a) 正圆柱



b) 横圆柱



(c) 斜圆柱

图 3-1 圆柱投影示意图

正轴圆柱投影适用于低纬度地区或沿纬度线扩展的区域，假如投影区域是沿除赤道圈以外的某一大圆方向或沿经线方向伸展的地

x 轴的交点为坐标原点。如同正轴时的情况一样，式中函数 f 的形式是依据不同的投影变形条件而决定的。

斜轴或横轴投影的计算过程和步骤：

a) 选定合适的球体半径 R ；

b) 针对斜轴投影首先要确定新极 Q ，其地理坐标为 φ_0 和 λ_0 ；当横轴投影时，要选定一条中央经线，以 λ_0 表示。

c) 采用已知地理坐标换算至球面极坐标的公式，将按要求规定的经纬网密度（即经差和纬差）计算出制图区域内各经纬线交点的 φ 和 λ 并换算为 α 和 Z ；

d) 按顺序计算投影坐标、长度比、面积比和最大角度变形。在计算时应注意斜轴投影也可采用正轴时的公式而毋需再推演，仅以 α 换 λ ， $(90^\circ - Z)$ 代替 φ 即可。但在横轴切圆柱投影中，由于圆柱面和通过制图区域的中央经线 λ_c 相切，在此经线上的长度比 $u_c = 1$ ，新极 Q 恰位于赤道上，故纬度等于 0° ，如图示经度则为： $\lambda_0 = \lambda_c + 90^\circ$ 。

e) 在图 3-2 中， POP_1 为与横圆柱相切的中央经线，可视为投影后的 X 轴，赤道 WOE 定为 Y 轴，若令 $\lambda_c = 0^\circ$ ，可认为所有经度均来自中央经线起算，方位角按定义应自 PQ 起算。已知 $\lambda_0 = \lambda_c + 90^\circ$ ，当 $\lambda_c = 0^\circ$ 时 $\lambda_0 = 90^\circ$ ，此时所有经度都按 $\lambda + 90^\circ$ 计算。

当 $\varphi_0 = 0^\circ$ 时，可采用

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha &= \operatorname{ctg} \varphi \sin \lambda \\ \cos Z &= \cos \varphi \cos \lambda \end{aligned} \right\} \quad (3-2)$$

此时，上式中的 λ 应以 $\lambda + 90^\circ$ 代入，可改为：

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{ctg} \alpha &= \operatorname{tg} \varphi \sec \lambda \\ \cos Z &= \cos \varphi \sin \lambda \end{aligned} \right\} \quad (3-3)$$

斜轴投影与半径 R 的圆球体相切的大圆，称投影中线，其长度比 $u_c = 1$ 。离开投影中线的点，会产生长度变形，其变形性质与高斯投影类似。因此，为保证必要的尺度精度，规定离开投影中线的最大横向距离 $a \leq 25\text{km}$ 。如果不能维持最大横向距离的条件，则规定若

干个投影区段，每个区段包含足够的重叠部分（至少包含高一级固定基准点矩形区域的 3 个点，约 6 km）。除了上述的投影特性外，在测定固定基准点和施工时必须对经仪器和大气修正的测距值进行几何学简化，即简化为水平线和建筑地平线，并考虑地球的曲率。剩余的长度变形（长度比差）可以量化如下：

$$L_v \approx \frac{a^2}{2R^2} \tag{3-4}$$

式中： a 为偏离投影中线的横向距离， R 为地球平均曲率半径，可取 6 371km。

偏离投影中线的长度失真率如表 3-1 所列。

表 3-1 偏离投影中线的长度失真

横向距离 a /km	每 100m 的长度失真 /mm
10	+0.1
25	+0.8
50	+3.1
75	+6.9

铁路线路至选定作中心投影的大地线的最大横向距离控制在 25 km 内（图 3-3），可使整个路线轨迹范围内不可避免的长度失真不超过 1mm/100m 数量级。通过上述限制，剩余的偏差（投影变形）保持在可能的建造精度以内（比较：构筑物件 $\pm 1^\circ\text{C}$ 的温度变化造成大约每 100m 发生 $\pm 1\text{mm}$ 的长度变化）。因此，剩余偏差可在随后的各项工作或（和）计算中忽略不计。然后，必须的计算可以根据平面三角学的简单公式完成。特别是可以省略对投影进行修正的工作。

确定高速铁路独立坐标系统的步骤：

- a) 根据地图确定一根均衡直线，使线路于均衡直线之间的横向距离不超过 25 km。必要时再细分为若干区段（图 3-3）。
- b) 用图解法在路线中部确定一个坐落在均衡直线上的基准点 $P_0(\varphi_0, \lambda_0)$ 。必要时利用舍入取整的椭圆坐标。

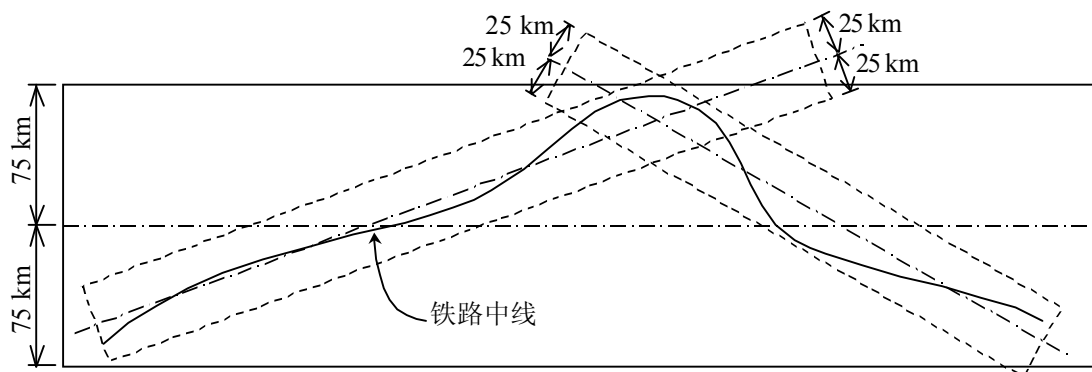


图 3-3 投影区段示意图

c) 用图解法或计算确定均衡直线上在基准点 P_0 处的椭圆方位角 α 。

确定高速铁路独立坐标系统，保证：

- 1) 零点与基准点 P_0 一致；
- 2) x 轴正向在 P_0 上与正北方向吻合。

按照斜轴正形投影法则将这一系统投影到地图或（和）计算平面上。将通过基准点 $P_0(\varphi_0, \lambda_0)$ 在地理方向角 α 下延伸的均衡直线（在椭圆体上相当于大地线）在平面 (x, y) 系统上进行保长投影。

用移轴和旋转变换将 (x, y) 坐标系统转化为 X 沿线路前进方向的坐标系统。

$$\begin{aligned} X &= y \sin \alpha + x \cos \alpha + X_0 \\ Y &= y \cos \alpha - x \sin \alpha + Y_0 \end{aligned} \quad (3-5)$$

由 GPS 测量导出的高一级固定基准点框形区域的各基准点椭圆坐标进行计算投影。投影的基础是 WGS-84 椭球的椭圆特征值（长半轴和扁率），采用斜轴墨卡托投影。转换方程涉及到的级数项，取决于计算精度的要求。除可得到线路偏离保长投影时的长度失真（宽度不大于 $2 \times 25\text{km}$ ）外，还可得到由于精度方面的原因对应用范围（线路纵向延展长度）的相应限制（准确地控制级数的取项）。

限制作用主要取决于以下参数：

- a) 基准点 P_0 的地理纬度；
- b) 主轴的定向；

- c) 投影区段的纵向延展长度；
- d) 投影区段的带宽；
- e) 所使用计算程序的中断标准。

根据高速铁路平面独立坐标系统的应用范围，可给出最大容许的计算精度：

- a) 在 1 km 的距离内相邻的两个点之间不超过 1mm；
- b) 相对于坐标原点，最远的点不超过 20 mm。

为减小以后的高程投影面误差，把高速铁路平面独立坐标系统定义在一个平均的建筑地平上。通过选择合适的参考椭圆参数来确定建筑水平面。根据线路全程的地形特征，可以在一定条件下放弃高程投影面的调整，这对详细选线和施工测设特别有利。

③ 采用自由投影

斜轴墨卡托投影只能在高程规划变形满足小于 1/100 000 的要求前提下改善高斯投影引起的变形，由于客运专线纵坡可达 20‰，高差起伏很大。因此可采用西南交通大学岑敏仪教授提出来的自由投影，以解决投影带边缘和高差起伏大引起的长度变形。自由投影可使客运专线坐标系统的投影变形比例小于 1/1 000 000 的要求，即 $\leq 1\text{mm/km}$ 。

2. 控制网网形

CP I 沿线路每 4km 布设 1 对 GPS 点，GPS 点间距约 1km，整个 CP I 网由大地四边形网形构成（图 3-4）。若线路控制网（CP II）用 GPS 测量，则可每 4km 布设 1 个 GPS 点。

CP II 可采用 GPS 或导线测量方法施测。采用导线测量时，CP II 采用附和导线网形式，导线起闭于 CP I 控制点，边长在 800~1 000m 之间。

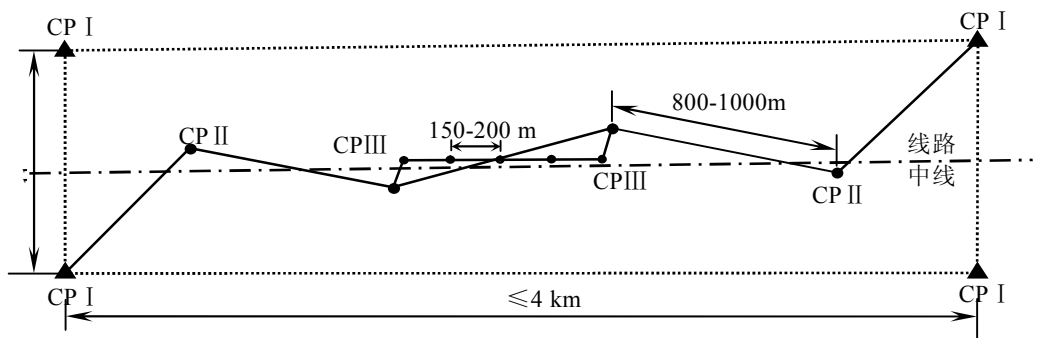


图 3-4 无碴轨道平面控制网示意图

3. 精度和可靠性

(1) 精度设计

控制网精度设计包括控制点的可重复性测量精度，相对点位精度及其平均可靠率等几个方面。特别需要强调的是，精度计算应考虑原始数据误差的影响。

可重复性测量精度是指控制点两次定位坐标差的中误差或补设、增设控制点时，由现有已知控制点发展的新控制点相对于已知点的坐标中误差；相对点位精度是指通过测量可导出的相邻控制点之间的精度；平均可靠率是指控制网的多余观测数与总观测数的比值。

根据铁道第二勘测设计院与西南交通大学共同完成的《无碴轨道控制测量理论和方法研究》，通过理论分析和大量的仿真计算，并参照德铁 RIL883 标准，基础平面控制网 GPS 测量精度定为 B 级，线路控制网 GPS 测量精度定为 C 级（或四等导线）。与德铁标准相比，CP I 相对点位精度短边高于德铁 RIL883 标准，长边低于 RIL883 标准，但仍然高于测量所要求的精度；CP II 的精度指标与德铁 RIL883 标准持平。

根据无碴轨道施工验收标准，考虑到控制测量和施工测量误差，CP I 和 CP II 控制点的定位精度要求在表 3-2 中给出。

表 3-2 CP I 和 CP II 控制网控制点的定位精度要求 (mm)

控制点	可重复性测量精度	相对点位精度
CP I	10	$8+D\times10^{-6}$
CP II	15	10

注：①表中数据为 X、Y 坐标方向的中误差；② D 为基线边长，单位为 mm。

(2) 可靠性设计

参照德铁 RIL883 标准，各级控制网的多余观测平均可靠率宜满足

$$\bar{r} = \frac{r}{n} > 0.25 \tag{3-6}$$

式中， r 为控制网的多余观测数， n 为控制网的总观测数， \bar{r} 为平均可靠率。

CP I 网按大地四边形形式布设 (参见图 3-4)，其平均可靠率 $\bar{r} = \frac{9}{18} = 0.5 > 0.25$ ，CP II 网按 5km 内布设边长 1km 的附和导线，平均可靠率 $\bar{r} = \frac{3}{11} = 0.27 > 0.25$ ，均满足可靠性要求。

(二) 初测和定测

1. CP I 网测量

初测时应建立基础平面控制网 (CP I) 和高程控制网。CP I 主要为勘测设计、施工、运营维护提供坐标基准，按 B 级 GPS 网精度要求施测，全线 (段) 一次布网，整体平差。CP I 布设方法与 CP II 采用的测量方法有关，如果 CP II 采用导线测量，CP I 沿线路每 4km 布设 1 对 GPS 点，每对 GPS 点间距不小于 1000m，并采用边联结方式构网，形成由三角形或大地四边形组成的带状网；如果 CP II 采用 GPS 测量，那么 CP I 沿线路每 4km 布设 1 个 GPS 点。GPS 点位

布设应符合表 3-3 的要求。为了求得无碴轨道铁路工程独立坐标系统与国家坐标系统之间的转换参数，CP I 网一般每 50km 左右与不低于国家二等三角点或 GPS 点联测。GPS 控制测量外业观测和基线解算应执行现行全球定位系统（GPS）铁路测量规程的相关规定。

在初测阶段，有条件的测区可一次布设二等水准测量精度的高程控制网，如果不具备二等水准测量条件，可分两阶段施测，即：勘测阶段按四等水准测量要求建立高程控制网，线下工程施工完成后，全线再按二等水准测量要求重新建立高程控制网。高程控制测量应与高一等级及以上的国家水准点联测。四等水准测量一般每 30km 联测一次，困难条件下不应大于 80km；二等水准测量一般每 150km 联测一次，困难条件下不应大于 400km，并形成附合水准路线。

表 3-3 各级平面控制网布网要求

控制网级别	测量方法	测量等级	点间距(m)	备注
CP I	GPS	B 级	≥1 000	≤4km 一对点
CP II	GPS	C 级	800~1 000	
	导线	四等		

定测的主要工作是建立线路控制网（CP II）、线路测量以及建立高程控制网。

2. CP II 网测量

CP II 网测量是在 CP I 网的基础上采用四等导线测量或 C 级 GPS 测量方法施测。CP II 控制点的布设应符合表 3-3 的要求，一般选在距线路中线 50~100m、稳定可靠、不易破坏的范围内，并按规定埋石且作点之记。在线路勘测设计起点、终点及其它平面控制网衔接地段，应联测 2 个以上平面控制点，并在测量成果中反映出相互关系。

3. 线路测量

线路测量目的是确定线路的空间位置，主要是将线路中线（包括直线和曲线）按设计位置进行实地测设。线路中线（包括直线控制桩、曲线控制桩、百米桩和中线桩）可根据 CP I 控制点或 CP II 控制点，采用极坐标法或 GPS RTK 测设，并测定高程。一般地段中线桩间距不宜大于 20m，在地形变化处或施工需要时，应另设加桩，加桩宜设在就近整米处。直线上的转点、曲线交点或副交点、曲线控制桩的测设，宜使用全站仪直接测设，并钉设方桩及标志桩。测点应观测两测回，取其平均值，计算测点实际坐标，以便中线加桩测量。

4. 高程测量

定测高程测量时应对初测水准点逐一进行检测，其不符值应小于四等水准测量限差（ $20\sqrt{L}$ ）。当超出限差，应采用二等水准测量进行复测，在确认初测水准点有误时，方能更改。长度在 300m 以上的桥梁、500m 以上的隧道和大型车站的两端及其范围内，均应设置适当密度的水准点。初测设置的水准点间距太长、远离线路或离线路太近易被施工破坏时，应予增设或迁移，并与邻近水准点闭合。中桩高程测量应起闭于水准点，其闭合限差应为 $30\sqrt{L}$ 。中桩高程应观测 2 次，其不符值不应大于 10cm，取位至厘米。

（三）GPS 测量

1. GPS 测量要求

在选点时应注意 GPS 控制点设在方便安置接受设备的地方，且视野开阔。在视场内周围障碍物的高度角，一般应小于 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 要小，无较大遮挡；为了避免周围磁场对 GPS 卫星信号的干扰，控制点应远离大功率无线电发射源（如电视台、微波站等），其距离不小

于 400 米；远离高压输电线路，其距离一般应不小于 200 米；为了减弱多路径效应的影响，控制点周围不应有大面积的水域，或对电磁波反射（或吸收）强烈的物体；地面基础稳定，便于点的保存；每个 GPS 桩位应做好点之记。

在客运专线无碴轨道施工中，CP I 网的 GPS 点可沿线布设，宜离线路中线 100~200m、稳固可靠且不易被施工破坏；GPS 一般成对布设，每对点之间距离大于 1km，点对的距离通常为 4~5km，CP II 网的 GPS 点间距离为 800~1 000m。埋桩控制点标志制作材料可选择铸铁等金属或直径为 12~20mm 的不锈钢（图 3-2）。

在一般地区通常埋设普通标石，CP I 控制点标石埋设方法如图 3-4（a），CP II 控制点标石埋设方法如图 3-4（b）。标石也可设置在建筑物顶面，设置时标石应和建筑物顶面牢固连接（参见图 3-3）。特殊地区应根据线路所在地区的土质、地质构造及区域沉降等因素，进行特殊地区的控制点埋设（如：基岩点、深埋点等）。

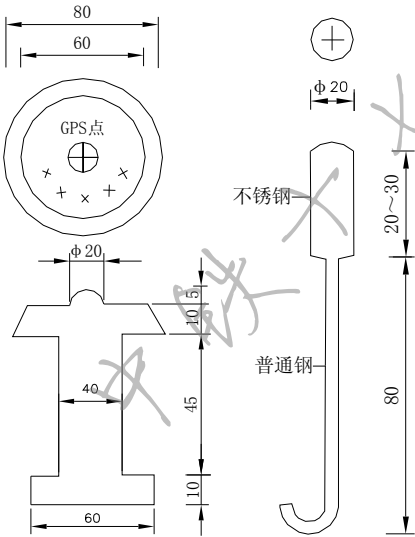


图 3-1 金属和不锈钢标志
(单位: mm)

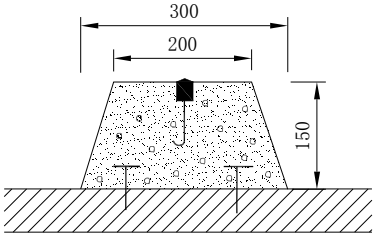
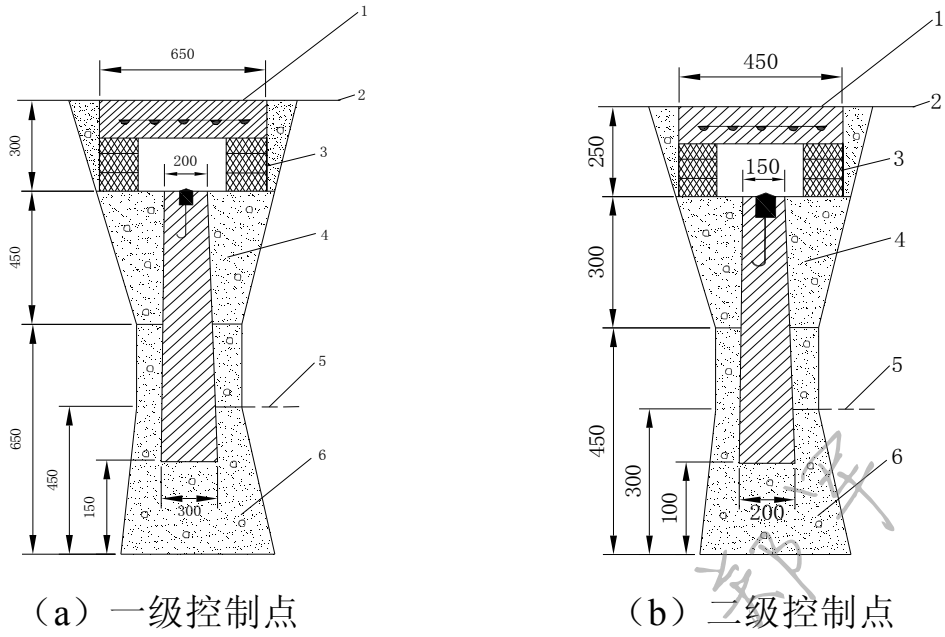


图 3-2 建筑物顶面标石设置
(单位: mm)



注：1—盖；2—土面；3—砖；4—素土；5—冻土线；6—贫混凝土
图 3-3 控制点标石埋设图（单位：mm）

观测前应进行仪器检校，包括圆水准器整平检验、基座对中检验，确保仪器处于良好工作状态。

GPS 测量主要分为 B、C、D、E 四个等级，各级 GPS 测量作业的基本技术要求应符合表 3-4 的规定。

表 3-4 各级 GPS 测量作业的基本技术要求

项目 \ 级别		B	C	D	E
静态测量	卫星高度角 (°)	≥15	≥15	≥15	≥15
	有效卫星总数	≥5	≥4	≥4	≥4
	时段中任一卫星有效观测时间 (min)	≥30	≥20	≥15	≥15
	时段长度 (min)	≥90	≥60	≥45	≥45
	观测时段数	≥2	1~2	1~2	1~2
	数据采样间隔 (s)	15~60	15~60	15~60	15~60
	PDOP 或 GDOP	≤6	≤8	≤10	≤10

采用标称精度不大于 $5\text{mm}+1\text{ppm}$ 双频 GPS 接收机按相对静态定位模式观测，作业前对光学对点器进行检验校正。作业时天线严格置平对中，对中精度小于 1mm ；每个时段观测前、后各量天线高一次，两次较差值小于 2mm ，取均值作为最后成果。现场填写观测手簿，并仔细核对手簿记录数据和仪器输入数据，确保一致正确。在仪器观测过程中的异常现象均应记录并向计算人员说明。

2. GPS 数据处理

(1) 基线解算

得到基线向量（坐标差）及其相应的方差与协方差。

(2) 检核与平差

基线解算采用广播星历为起算数据，以 GPS 随机的软件解算。GPS 基线采用静态相对定位模式进行解算，以 GPS 网中某个 GPS 点的 WGS-84 坐标为起算坐标进行基线解算。

检核同步环、异步环以及重复观测边的闭合差。进行网的整体平差，消除不符值。整体平差应在 WGS-84 坐标系统中进行，平差的结果一般是网点的空间直角坐标，大地坐标和高斯平面坐标，以及相应的方差与协方差。

- a) 计算同一时段观测值的资料剔除率应小于 10%。
- b) 同一条边任意两个时段解算值互差小于 $2\sqrt{2}\sqrt{5^2 + D^2}$ (mm)。
- c) 独立观测边闭合环各坐标分量闭合差应符合下式规定：

$$W_x \leq 3\sqrt{n} \cdot \sigma, W_y \leq 3\sqrt{n} \cdot \sigma, W_z \leq 3\sqrt{n} \cdot \sigma, W \leq 3\sqrt{3n} \cdot \sigma$$

- d) 同步观测环闭合差应满足以下要求：

$$W_x \leq \sqrt{n} \cdot \sigma/5, W_y \leq \sqrt{n} \cdot \sigma/5, W_z \leq \sqrt{n} \cdot \sigma/5$$

$$W = \sqrt{W_x^2 + W_y^2 + W_z^2} \leq \sqrt{3n} \cdot \sigma/5$$

式中：n—闭合环边数， σ —取仪器标称精度为指标。

(3) 坐标转换

铁路工程测量中，往往需要将 GPS 三维的测量结果，转换到铁路独立的坐标系统上。因此，需进行坐标系统的转换。GPS 独立的工程控制网与国家大地测量控制网之间的转换参数，可采用工程控制网与国家控制网联合平差的方法求定。

数据处理软件可采用 ESGPS software 软件，是铁道第二勘测设计院和西南交通大学的路伯祥、岑敏仪和卢建康共同研制，经过 10 多年的生产实践和不断的版本更新，功能不断加强，并通过四川省科技成果鉴定，获四川省 2006 年度科技进步三等奖。它有以下功能：

- (1) GPS 三维平差；
- (2) 平面坐标转换。ESGPS 将 GPS 控制网分为约束网和工程网两大处理；
- (3) 高程转换。每一种转换方法均可采用四种拟合函数，即双 B 样条函数，工程椭球函数，二次曲面函数和平面函数。

ESGPS software 软件的主界面如图 3-4 所示：



图 3-4 ESGPS software 软件主界面

ESGPS software 软件的二级界面如图 3-5 所示：



图 3-5 ESGPS software 软件二级界面

四、无碴轨道变形监测技术

（一）沉降监测标准

1. 路基

（1）无碴轨道路基工后沉降控制标准

无碴轨道对线下基础变形限制严格，已颁布的《客运专线无碴轨道铁路设计指南》（铁建设函〔2005〕754号文）规定：

- ① 一般地段路基工后沉降量 $\leq 15\text{mm}$ ；
- ② 长度大于 20m 的沉降均匀的路基地段，允许最大工后沉降量 30mm，但调整后轨面高程竖曲线应满足： $R_{sh} \geq 0.4V_{SJ}^2$ ；
- ③ 路桥、路隧连接处沉降差异造成的错台 $\leq 5\text{mm}$ ；
- ④ 路桥、路隧过渡段或任意两段路基沉降造成的折角应 $\leq 1/1000$ 。

由于路基工程的特殊性，无法准确计算路基工程沉降，必须采用信息化施工方法，对路基工程沉降进行监测，并根据观测数据预测铺设无碴轨道后的工后沉降是否满足要求。

（2）路基沉降观测的内容及方法

路基沉降观测内容一般包括：地基沉降观测、路基面沉降观测、过渡段不均匀变形观测、路堤边坡及坡脚位移观测、路堤填土分层沉降观测等。

路基沉降观测以路基面沉降和地基沉降观测为主。

① 地基沉降观测

非岩石地基，一般均应进行地基沉降观测。

地基路基沉降观测可采用沉降板、位移计等方法进行监测。

断面的设置及观测断面的观测内容应根据地形地质条件、地基

处理方法、路堤高度、堆载预压等具体情况，结合沉降预测方法和工期要求具体确定观测方案。

②路基面沉降观测

路基面沉降数据是确定路基工后沉降是否满足无碴轨道铺设技术要求的依据。路基地段均应进行路基面沉降观测。

路基面沉降观测采用观测桩法进行观测。

③过渡段不均匀变形观测

路基过渡段不均匀变形是否满足无碴轨道铺设技术要求，必须通过沿线路纵向的连续的沉降观测进行判断或评估。

路基过渡段不均匀变形可以采用连续的路基面沉降观测，也可采用沿线路纵向布置的剖面沉降仪进行观测。

(3) 观测断面布置

路基沉降观测断面的设置及观测断面的观测内容应根据地形地质条件、地基处理方法、路堤高度、堆载预压等具体情况，结合沉降预测方法和工期要求具体确定观测方案。

沉降观测断面的间距一般不应大于 50m，对于地势平坦、地基条件均匀良好、高度小于 5m 的路堤或路堑可放宽到 100m；对于地形、地质条件变化较大地段应适当加密。

路基过渡段不均匀变形采用连续的路基面沉降观测时，观测断面间距宜加密至 5m。

路基过渡段不均匀变形采用剖面沉降仪观测时，剖面沉降管应在路基过渡段范围内连续布置，一般采用对角线方式布置。

(4) 观测技术要求

①观测精度与观测仪器

沉降水准的测量精度为 1mm，读数取位至 0.1mm；剖面沉降的测量精度为 8mm/30m。

②观测时间与观测频次

路基沉降观测的频次不低于表 4-1 的规定。当环境条件发生变化或数据异常时应及时观测。

表 4-1 路基沉降观测频次

观测阶段	观 测 频 次	
填筑或堆载	一般	1 次/天
	沉降量突变	2~3 次/天
	两次填筑间隔时间较长	1 次/3 天
堆载预压或 路基施工完毕	第 1 个月	1 次/周
	第 2、3 个月	1 次/2 周
	3 个月以后	1 次/月
无碴轨道铺设后	第 1 个月	1 次/2 周
	第 2、3 个月	1 次/月
	3~12 个月	1 次/3 月

(5) 观测数据记录及资料整理

① 观测数据记录

一般采用电子表格记录。

② 观测资料整理

观测断面的观测数据应整理为时间-沉降关系曲线；过渡段观测数据还要整理沿线路纵向分布的不同时间的沉降曲线。

(6) 路基工后沉降预测与评估

① 沉降预测的可靠性验证

根据路基填筑完成或堆载预压后不少于 3 个月的实际观测数据作多种曲线的回归分析，确定沉降变形的趋势，曲线回归的相关系数不应低于 0.92。

沉降预测的可靠性应经过验证，间隔不少于 3 个月的两次预测最终沉降的差值不应大于 8mm。

② 路基工后沉降预测

路基沉降预测应采用曲线回归法。

路基填筑完成或堆载预压后，最终的沉降预测时间应满足下列条件：

$$s(t)/s(t=\infty) \geq 75\% \quad (4-1)$$

式中： $s(t)$ 为预测时的沉降观测值， $s(t=\infty)$ 为预测的最终沉降值。沉降时间以路基填筑完成或堆载预压后为起始点。

③ 路基工后沉降评估

路基沉降的评估应结合路基各观测断面以及相邻桥（涵）隧的沉降预测情况，以及路基工程设计、地基加固以及路堤填筑施工质量监测情况等综合进行。

路基沉降的评估的标准及铺设无砟轨道条件：

- a) 一般地段路基工后沉降量 $\leq 15\text{mm}$ ；
- b) 长度大于 20m 的沉降均匀的路基地段，允许最大工后沉降量 30mm，但调整后轨面高程竖曲线应满足： $R_{sh} \geq 0.4V_{sj}^2$ ；
- c) 路桥、路隧连接处沉降差异造成的错台 $\leq 5\text{mm}$ ；
- d) 路桥、路隧过渡段或任意两段路基沉降造成的折角应 $\leq 1/1000$ 。

2. 桥梁

(1) 桥涵变形控制条件

- ① 墩台应检算沉降。自无砟轨道铺设后，墩台的均匀沉降量不应超过 15mm，相邻墩台的沉降量差不应超过 5mm。
- ② 徐变上拱度：终张拉 60 天后， $L \leq 50\text{m}$ 梁体跨中徐变上拱度不应大于 7mm； $L > 50\text{m}$ 梁体跨中徐变变形不应大于 $L/7000$

或 14mm。

- ③ 涵身整体沉降：要求无碴轨道铺设后的工后沉降量与相邻段的路基相一致，且 $\leq 15\text{mm}$ 。
- ④ 涵节间的差异沉降：要求控制相邻涵节的沉降量，且沉降差不得大于 5mm。
- ⑤ 涵路差异沉降：要求涵身沉降与过渡段的沉降应基本一致，当不一致时，其形成的沉降差不得大于 5mm。

(2) 观测系统的建立

由于无碴轨道对结构变形要求较高，须根据无碴轨道下部结构的实际变形，及时调整相关设计，以满足无碴轨道设计安装精度要求。桥梁、涵洞在施工之前应建立永久的观测系统，并在施工过程中对桥梁、涵洞的变形分阶段性地进行观测。桥梁、涵洞需在适当位置设置足够的观测点，建立观测系统，并以合理的观测周期进行观测。一般桥梁、涵洞的观测点的设置详见图 4-1～4-4：

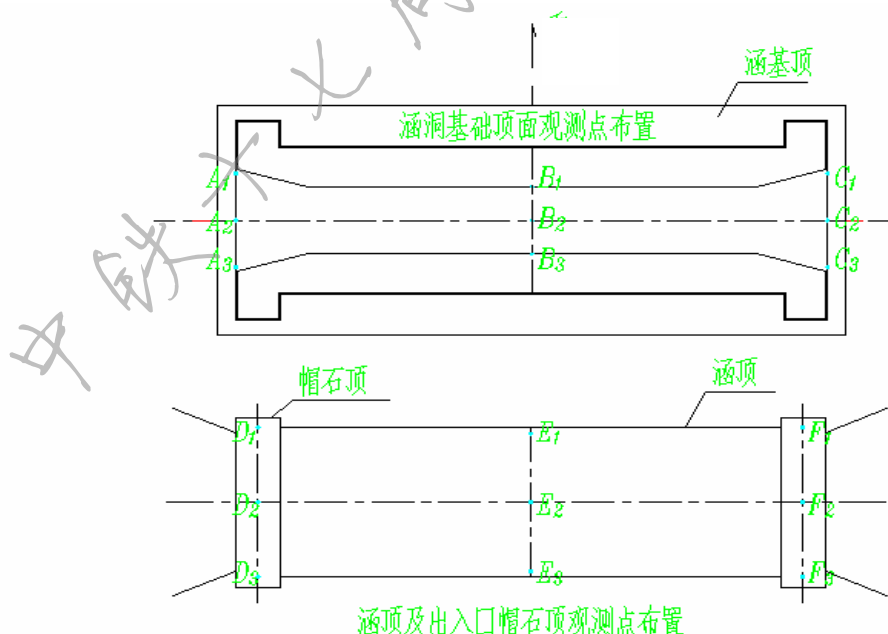


图 4-1 涵洞变形观测点布置图

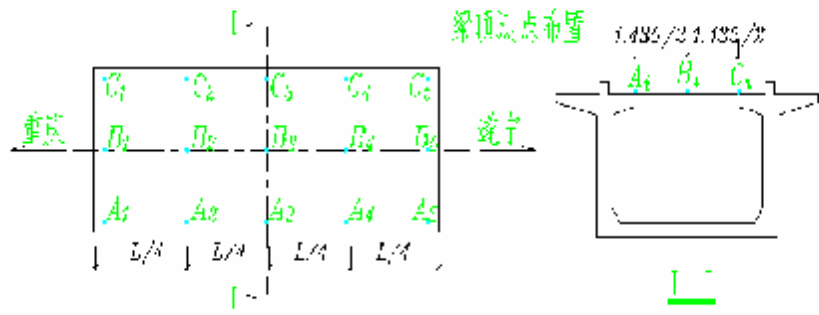


图 4-2 桥梁变形观测点布置图（梁顶测点布置）

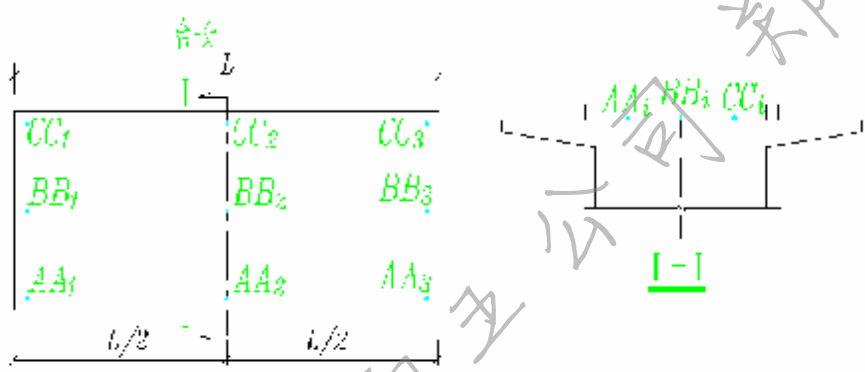


图 4-3 桥梁变形观测点布置图（桥台道碴槽顶测点布置）

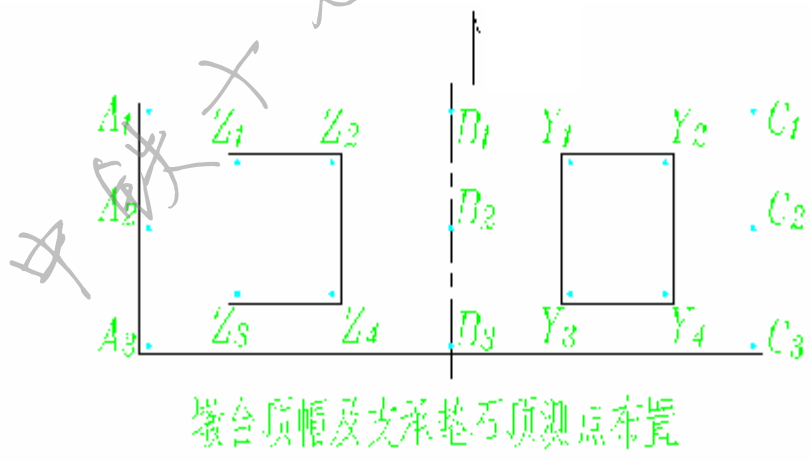


图 4-4 墩台顶帽及支承垫石顶测点布置

(3) 观测阶段及频次

为掌握桥涵各个时期的变形，恰当地评估“工前变形”，有效地控制“工后变形”，应按下列要求对桥梁、涵洞的变形进行观测：

表 4-2 墩台沉降观测频次

观测阶段		观测频次		备 注
		观测期限	观测周期	
墩台施工完成		/	/	设置观测点
预制梁桥	架梁前	全程	1 次/周	
	预制梁架设	全程	前后各 1 次	
	附属设施施工	全程	荷载变化前后各 1 次或 1 次/周	
桥位施工桥梁	制梁前	全程	1 次/周	
	上部结构施工中	全程	荷载变化前后各 1 次或 1 次/周	
	附属设施施工	全程	荷载变化前后各 1 次或 1 次/周	
架桥机（运梁车）通过		全程	前后各 1 次	沉降稳定后可不观测
桥梁主体工程完工～无碴轨道铺设前		≥6 个月	1 次/周	岩石地基的桥梁，一般不宜少于 60 天
无碴轨道铺设期间		全程	1 次/天	
无碴轨道铺设完成后	24 个月	0～3 个月	1 次/月	工后沉降长期观测
	个月	4～12 个月	1 次/3 个月	
	月	13～24 个月	1 次/6 个月	

注：观测墩台沉降时，应同时记录结构荷载状态、环境温度及天气日照情况

况。

表 4-3 梁体竖向变形观测频次

观测阶段	观测频次		备 注
	观测期限	观测周期	
梁体施工完成	/	/	设置观测点
预应力张拉期间	全程	张拉前后各一次	测试梁体弹性变形
桥梁附属设施安装	全程	安装前后各一次	测试梁体弹性变形
预应力张拉完 ~ 无碴轨道铺设前	≥60 天	1 次/1、3、5 天后 后期 1 次/周	
无碴轨道铺设期间	全 程	1 次/天	
无碴轨道铺设完后	24 个月	0~3 个月	残余徐变变形长期观测
		4~12 个月	
		13~24 个月	

注：测试梁体竖向变形时，应同时记录梁体荷载状态、环境温度及天气日照情况。

表 4-4 涵洞沉降观测频次

观测阶段	观测频次		备 注
	观测期限	观测周期	
涵洞主体施工完成	/	/	设置观测点
洞顶填土施工	全程	荷载变化前后 或 1 次/周	

架桥机（运梁车）通过	全程		前后	沉降稳定后可不观测
涵洞完工～无碴轨道铺设前	≥6 个月		1 次/周	岩石地基的涵洞，一般不宜少于 60 天
无碴轨道铺设期间	全程		1 次/天	
无碴轨道铺设完成后	24 个月	0～3 个月	1 次/月	工后沉降长期观测
		4～12 个月	1 次/3 个月	
		13～24 个月	1 次/6 个月	

注：测试涵洞沉降时，应同时记录结构荷载状态、环境温度及天气日照情况。

(4) 变形评估

在观测过程中取得了桥涵结构的变形数据后，可将这些数据绘制成随时间变化的曲线。那么如何根据变形曲线对桥涵结构的变形作出评估与预测，以决定桥涵结构上的无碴轨道的铺设时机是非常必要的。评估前应收集下列资料：

- ① 桥涵沉降及变形观测资料。
- ② 桥涵地段线路纵断面图、工程地质纵横断面图、桥涵设计图纸和说明书、沉降计算报告等相关设计资料。
- ③ 施工过程、施工核查和原材料检验情况等施工资料。
- ④ 施工质量控制过程和抽检情况等监理资料。

桥涵基础沉降分析评估应采用曲线回归法。对于预制梁桥，基础沉降应按架梁前、后两阶段进行；对于原位施工的桥梁及涵洞，基础沉降应根据实际施工状态及荷载变化情况，划分多个阶段。

根据桥涵实际荷载情况及观测数据，应作多个阶段的回归分析及预测，综合确定沉降变形的趋势，曲线回归的相关系数应不低于

0.92。首次回归分析时，观测期不应少于桥涵主体工程完工后 3 个月，对于岩石地基等良好地质的桥涵不应少于 30 天。

利用两次回归结果预测的最终沉降的差值不应大于 8mm。两次预测的时间间隔一般不少于 3 个月，对于岩石地基等良好地质的桥涵不应少于 30 天。

桥梁主体结构完工至无碴轨道铺设前，沉降预测的时间 t 应满足以下条件：

$$s(t)/s(t=\infty) \geq 75\% \quad (4-2)$$

式中： $s(t)$ 为预测时的的沉降观测值， $s(t=\infty)$ 为预测的最终沉降值。

处于岩石地基等良好地质的桥涵，当墩台沉降值趋于稳定且沉降总量不大于 5mm 时，可判定沉降满足无碴轨道铺设条件。

预应力混凝土桥梁上部结构的变形应符合以下规定：

- a) 终张拉完成时，梁体跨中弹性变形不宜大于设计值的 1.05 倍。
- b) 扣除各项弹性变形、终张拉 60 天后， $L \leq 50\text{m}$ 梁体跨中徐变上拱度不应大于 7mm； $L > 50\text{m}$ 梁体跨中徐变变形不应大于 $L/7\ 000$ 或 14mm。
- c) 不能满足上述要求时，应根据梁体变形的实测结果，确定梁体的实际弹性变形及徐变系数，并按下式估算无碴轨道的最早铺设时间 t ：

$$[\Phi(\infty) - \Phi(t)] \cdot \Delta_{\text{弹性}} \leq \Delta_{\text{允许}} \quad (4-3)$$

式中： $\Phi(\infty)$ ：根据实测结果确定的混凝土徐变系数终极值；

$\Phi(t)$ ：根据实测结果确定的铺设无碴轨道时混凝土徐变系数；

$\Delta_{\text{弹性}}$ ：实测梁体终张拉后的弹性变形；

$\Delta_{\text{允许}}$ ： $L \leq 50\text{m}$ 为 10mm； $L > 50\text{m}$ 为 $L/5\ 000$ 或 20mm。

预测的桥涵基础沉降和梁体变形满足设计要求后，方可铺设无碴轨道。

3. 隧道

(1) 观测断面的布设原则

- ① 隧道内一般地段沉降观测断面的布设根据地质围岩级别确定，一般情况下，Ⅱ级围岩段每 500m、Ⅲ级围岩每 400m、Ⅳ级围岩每 300m、Ⅴ级围岩每 200m 布设一个观测断面，地应力较大、断层破碎带、膨胀土、湿陷性黄土等不良和复杂地质区段适当加密布设。
- ② 隧道范围内基础承载力较低的段落，每 25m 布设一个观测断面。
- ③ 洞口至分界里程范围内应至少设置一个观测断面。

(2) 观测点位的布置与埋设

隧底工程完成后，每个观测断面在相应于两侧边墙内侧处设一对沉降观测标志点。

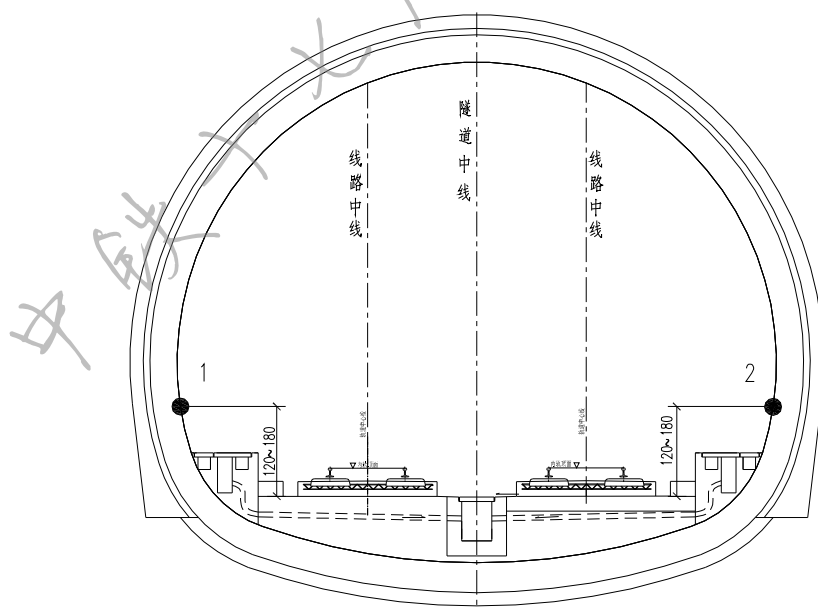


图 4-5 隧道内观测点位布置图

(3) 观测的频度

隧道基础沉降观测的频次不低于表 4-5 的规定，沉降稳定后可不再进行观测。

表 4-5 隧道基础沉降观测频次

观测阶段	观测频次		
	观测期限		观测周期
隧底工程完成后	3 个月		1 次/周
无碴轨道铺设后	3 个月	0 ~ 1 个月	1 次/周
		1 ~ 3 个月	1 次/2 周

(4) 观测的精度要求

隧道范围沉降观测以 CPIII 基桩点为基点进行测设，其精度要求按《客运专线铁路无碴轨道工程测量暂行规定》中的二等水准测量技术要求进行。

(5) 评估方法及标准

评估前应收集下列资料：

- a. 隧道基础沉降观测资料。
- b. 隧道地段的线路设计纵断面图、工程地质纵横断面图、地质勘查报告、设计图纸和说明书等相关设计资料。
- c. 隧道开挖地质描述及开挖围岩分级记录、IV~VI 级围岩地段基底承载力检测情况、施工监控资料、仰拱施工分项工程验收记录等施工资料。
- d. 施工质量控制过程和抽检情况等监理资料。

隧道内无碴轨道铺设条件的评估应根据有关设计、施工和监理的资料及交接检验和复检的结果进行综合分析。

隧道基础的沉降预测与评估方法可参照路基相关章节办理。

预测的隧道基础工后沉降值不应大于 15mm。

4. 过渡段

路桥、路隧、路涵、堤埝等过渡段沉降观测

路基过渡段不均匀变形是否满足无碴轨道铺设技术要求，必须通过沿线路纵向的连续的沉降观测进行判断或评估。

路基过渡段不均匀变形可以采用连续的路基面沉降观测，也可采用沿线路纵向布置的剖面沉降仪进行观测。

过渡段沉降观测应以路基面沉降和不均匀沉降观测为主，沉降观测期与路基相同，不少于 6 个月。

分别在路桥、路涵、路隧过渡段的结构物起点、距结构物起点 5~10m 处、15~25m 处、50m 处各设一个观测断面，沿涵洞轴线设路基面观测断面，每个观测断面设 3 个观测桩。

路堤和路埝过渡段在分界处设路基面观测断面，每个观测断面设 3 个观测桩。

(1) 观测的精度要求

沉降观测水准的测量精度不低于 1mm，读数取位至 0.1mm。

(2) 观测的频度

沉降观测的频次不低于路基沉降观测频次。当环境条件发生变化或数据异常时应及时观测。

(二) 沉降监测方法

1. 基准点设置

每个独立的监测网应设置不少于 3 个稳固可靠的基准点，且基准点的间距不大于 1 公里。

基准点应选设在变形影响范围以外便于长期保存的稳定位置。使用时应作稳定性检查与检验，并应以稳定或相对稳定的点作为测定变形的参考点。

水准基点应按二等水准测量要求施测。二等水准路线一般150km与国家一等水准点联测一次，最长不应超过400km联测一次。水准基点控制网应全线（段）一次布网测量。

2. 工作基点设置

工作基点应选在比较稳定的位置。对观测条件较好或观测项目较少的工程，可不设立工作基点，在基准点上直接测量变形观测点。

3. 监测点设置

变形观测点应设立在变形体上能反映变形特征的位置。

4. 水准测量方法

在进行沉降变形观测之前应在已设水准基点(间距大约为2km)的基础上建立沉降变形观测网，布设水准基点和工作基点。水准基点按距离不大于1km增设；工作基点在两水准基点之间沿线路方向按间距不大于200m，距路基中心距离小于100m的范围内布设。水准网应沿铁路线路布设成附和路线、闭合路线或结点网。精密水准网按二等水准测量的要求进行施测。在工作期间，工作基点应定期与水准基点进行校核。当对沉降观测成果发生怀疑时，应随时进行复测校核。

(1) 仪器检校

① 作业前应检验以下项目：

水准仪检验项目

1) 水准仪的检视；

- 2) 水准仪上概略水准器的检校;
- 3) 光学测微器隙动差和分划值的测定;
- 4) 气泡式水准仪交叉误差的检验;
- 5) i 角检校。

水准尺检验项目

- 1) 标尺的检视。
- 2) 标尺上的圆水准器的检校。
- 3) 标尺分划面弯曲差的测定。
- 4) 标尺名义米长及分划偶然中误差的测定。
- 5) 一对水准标尺零点不等差及基辅分划读数差的测定。

② 水准尺在观测前、观测中、观测后应按规定要求作全面检验。

仪器检验方法见《国家一、二等水准测量规范》GB12897—91 附录 B, 仪器技术指标见其第 6 章表 6。其它未阐述的检验项目、方法和要求可参照《国家一、二等水准测量规范》GB12897—91 第 6 章的有关规定执行。

(2) 观测

① 观测方式

采用单线路往返观测。一条线路的往返测, 须由同一组观测人员, 使用同一类型的仪器和尺垫, 沿同一道路进行。

在一区段内, 先连续进行所有测段的往测 (或返测) 随后再连续进行该区段的返测 (或往测)。

同一测段的往测 (或返测) 或返测 (或往测) 应分别在上午与下午进行。在日间气温变化不大的阴天或观测条件较好时, 若干里程的往返测可同在上午或下午进行。但这种里程的总站数, 不应超过该区段总站数的 30%。

② 观测的时间、气象条件

水准观测应在标尺分划线成像清晰而稳定时进行。在下列情况下，不应进行观测：

- a) 日出后与日落前 30 分钟内；
- b) 太阳中天前后各约 2 小时内；
- c) 标尺分划线的影像跳动而难于照准时；
- d) 气温突变时；
- e) 风力过大而使标尺与仪器不能稳定时；
- f) 在道路上施测时，有大车或重车驶过时。

③ 观测中应遵守的事项

观测前 30 分钟，应将仪器置于露天阴影下，使仪器与外界气温趋于一致。观测时应用测伞遮蔽阳光。

对气泡式水准仪，观测前应测出倾斜螺旋的置平零点，随着气温的变化，应随时调整零点的位置。如果是带附合水准器的仪器，还应将附合水准气泡严格对齐。

在连续各测站上安置水准仪的三脚架时，应使其中两脚与水准路线的方向平行，而第三脚轮换置于路线方向的左侧与右侧。

除线路转变处外，每一测站上仪器与前后标尺的三个位置，应接近一条直线。禁止为了增加标尺读数，而把尺桩（台）安置在壕坑中。

光学水准仪在同一测站上观测时，不得两次调焦。转动仪器的倾斜螺旋和测微鼓时，其最后旋转方向，均应为旋进。电子水准仪的读数原理形同于照像原理，要求在每一测站上任何一次读数都须精确调焦。

每一测段的往测与返测，其测站数均应为偶数。由往测转返测时，两根标尺必须互换位置，并重新整置仪器。

观测间歇时，尽量在水准点上结束。否则，应在最后一站选择两个坚稳可靠、光滑突出、便于放置标尺的固定点，作为间歇点加以标记。间歇后应对两个间歇点的高差进行检测，检测结果如符合

限差要求 ($\leq 0.7\text{mm}$), 即可从间歇点起测, 若超过限差, 可变动仪器再观测一次, 如仍超限, 则须从前一水准点起测。

为了消除系统误差 (其中包括人差、仪器差, 及其他综合测量误差) 的影响, 各期水准测量全部由同一观测员、同一仪器、同一标尺, 沿同一路线进行, 并尽可能在往返测采用同一类型的转点。

(3) 观测方法

光学水准仪采用光学测微法, 进行往返观测, 观测顺序如下:

- ① 往测奇数站的读数顺序为:
 - a) 后尺下丝;
 - b) 后尺上丝;
 - c) 后尺中丝基本分划;
 - d) 前尺中丝基本分划;
 - e) 前尺下丝;
 - f) 前尺上丝;
 - g) 前尺中丝辅助分划;
 - h) 后尺中丝辅助分划。
- ② 往测时, 偶数站的读数顺序为:
 - a) 前尺下丝;
 - b) 前尺上丝;
 - c) 前尺中丝基本分划;
 - d) 后尺中丝基本分划;
 - e) 后尺下丝;
 - f) 后尺上丝;
 - g) 后尺中丝基本分划;
 - h) 前尺中丝辅助分划。

返测时, 奇数站按往测时偶数站的顺序读数, 偶数站按往测时奇数站的顺序读数。其中, 上、下丝读四位数, 中丝读五位数。

电子水准仪可任意选择常见的 8 种测量模式: BF, BFFB, BFBF, BBFF, aBF, aBFFB, aBFBF, aBBFF (B 表示后尺, F 表示前尺, a 表示带有奇偶转换)。在本次水准网的观测中选择 aBFFB 模式。各项限差、点号、点名、线名、线号、读数的取位等均可方便地输入到

仪器中。可直接设置正、倒尺测量模式。

(4) 观测记录方法和要求

- ① 为了减少人为计算错误，提高观测速度，外业观测记录中拟采用 PDA 小型计算机。其中编写有一等水准观测记录程序，其主要功能要求如下：
 - a) 对输入的各项观测数据，能够按《规范》要求进行逐项检查，出现超限数据时，能提示作业员调整测站或重新观测；
 - b) 能够纪录并存储各路线和各测段的标题信息（如水准路（环）名称、等级、观测方向）和观测条件信息（温度、天气、成像、太阳方向）；
 - c) 能存储每个测站的前、后视标尺基、辅分划面的中丝读数。计算并存储每个测段的视距和、高差和。电子水准仪使用机带的 PCMCIA 记录卡自动记录，由机载程序检查超限情况。
- ② 观测记录的内容包括测量的标题信息、观测数据、观测条件信息，细部要求如下：
 - a) 每测站需记录上、下丝在前后标尺的读数，中丝在前后标尺基、辅分划面的读数；
 - b) 每五个测站记录一次标尺温度；
 - c) 每测段的始末，工作间歇的前后及观测中气候变化时，应记录观测日期、时间、温度、天气、云量、成像、太阳方向、道路土质、风向及风力等内容。
- ③ 任何原始观测数据必须按规定形式实时输入到记录器上，不允许人工进行记录、删除、修改或决定数据的存取。数据输入到记录器后，禁止采用任何方法删改数据。
- ④ 每天观测结束，应将数据传输至计算机，并做备份。用程序处理后按规定的格式打印出观测记录手簿。

(5) 观测限差

- ① 视线长度、前后视距差、视线高度的规定：

表 4-6 视线长度、前后视距差、视线高度的规定(m)

等级	仪器类型	视距长度	前后视距差	任一测站前后视距累积差	视线高度 (下丝读数)
一等	DSZ ₀₅ ,DS ₀₅	≤30	≤0.5	≤1.5	≥0.5
二等	DS ₁ ,DS ₀₅	≤50	≤1.0	≤1.0	≥0.3

注：在作业前，电子水准仪可测定*i*角并存贮到仪器中，仪器将自动进行计算并改正由于*i*角而引起的读数改正数。因此，用电子水准仪施测时可以不考虑前后视距差，此仪器测距较便捷，智能化较高，由于现行规范无电子水准仪的作业要求，为使精度更高，更可靠，本工程仍按光学仪器的相关规定进行。

② 测站观测限差

表 4-7 测站观测限差(mm)

上下丝读数平均值与中丝读数的差		基辅分划 读数之差	基辅分划 所测高差 之差	检测间歇点 高差之差
0.5cm 刻划尺	1cm 刻划尺			
≤1.5	≤3.0	≤0.3	≤0.4	≤0.7

注：电子水准仪为中丝读数法，各项限差按光学测微法执行。

(三) 沉降监测数据处理及软件

平差计算拟采用我校与铁二院联合研制的测量平差软件进行处理。平差计算前，先绘出平差网图，注明线路方向、高差和长度，检查各环线闭合差是否符合限差要求。拟用平差结果直接分析出起算点的兼容情况，弃用不兼容的起算点后再平差计算。平差后得出每个待定点的高程和高程中误差及按[pvv]计算的单位权中误差，分析成果中偶然误差和系统误差的影响程度，对水准网的观测质量作综合评定。检算各项闭合差符合要求后，计算每千米高差中数偶然中误差和全中误差以及各点的偶然中误差、最弱点中误差和相邻点相对高程中误差，作出精度评价。各监测点高程中误差、观测所得

沉降量的中误差等精度信息。用严密的整体平差方法求出各监测点的高程及相对上仪器和第一期的沉降量。

中铁十七局工程有限公司 郑军

五、 无碴轨道测量技术

（一） 无碴轨道施工控制网

在无碴轨道施工中，铺轨控制基桩不仅是加密基桩的基准点，也是无碴轨道铺设的控制点，它的精确测设是保证轨道施工质量的关键。布设 CPⅢ的目的就在于准确的测设铺轨控制基桩，确保无碴轨道施工满足线路平顺性要求。

1. 起算基准设计

基桩控制网（CPⅢ），可拟合到 CPⅠ网和 CPⅡ网上，采用固定数据平差基准，或采用独立自由网平差基准，然后在 CPⅠ网中置平 CPⅢ网。

2. 网形设计

CPⅢ网可采用导线网的形式，控制基桩的间距为 150~200m 左右，布设如图 5-1 所示。用全站仪加密的附和导线，全站仪的标称精度测角为 $2''$ ，测边为 $2\text{mm} + 2\text{mm} \times S(\text{km})$ 。

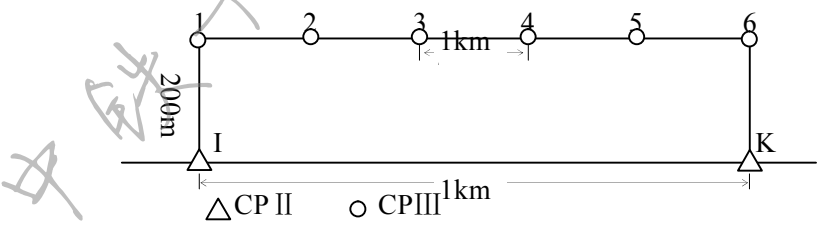


图 5-1 CPⅢ网示意图

3. 精度设计

无碴轨道的最重要的特点之一就是轨道的高平顺性，而轨道的高平顺性又可以分为横向和垂向两个分量。其中横向平顺性要求主要是轨道的方向要求，其精度要求非常高，为毫米级。CPⅢ则是主

要为铺设无碴轨道提供控制基准，因此在 CPIII 网的精度设计中，除需要考虑 CPIII 的点位误差之外，更重要的是要考虑 CPIII 网中任意三个相邻控制基桩，即 CPIII 控制点形成的角度中误差。CPIII 点位误差和相邻 CPIII 控制点形成的角度中误差也还需要考虑原始数据误差的影响，对于 CPIII 而言就是需要考虑 CP I 和 CP II 误差的影响。

下面重点介绍如何根据轨道施工要求来确定相邻 CPIII 控制点形成的角度中误差的限差。

(1) 轨道施工要求

无碴轨道的验收参数分为内部尺寸和外部尺寸。内部尺寸描述轨道自身的几何形状，主要影响列车的动力学性能。轨道自身几何尺寸的各项规定是为了给列车的平稳运行提供一个平顺的轨道。内部尺寸由轨距、水平、纵向高低和方向等四个参数来描述，这些参数能保证轨道有正确的形状，确定轨道的实际形状与设计形状是否相符。

一般钢轨的形状，或者说钢轨的曲率在几何上可以通过一条弦线的矢高来描述。这个方法几十年来在轨道工程中已为人们所知。无碴轨道铺设精度在轨道验收时，主要是以 20m 弦长来量测，轨道高低偏差限差为 2mm，轨向偏差限差为 2mm。长波分量以 300m 弦长来量测，轨道高低偏差限差为 10mm，轨向偏差限差为 10mm。

(2) 精度指标

施工控制网的设计原则，首先要满足施工精度要求，即精度设计准则。从施工精度要求出发，可推求施工控制网设计的精度指标。

由于轨道的方向性，按平面几何的概念和测量实践知识，可表述为在线路上任意选取（或测量）3 个点，组成的角度值与线路设计值之差要满足设计要求，因此可将轨道的方向要求来转化为 3 个控制基桩的角度中误差要求（图 5-2）。由于无碴轨道的施工验收

标准有两种，2mm/20m 和 10mm/300m。下面分别将这两种验收标准转化为控制基桩的角度中误差测量要求，并以最高的要求作为控制网的精度要求。

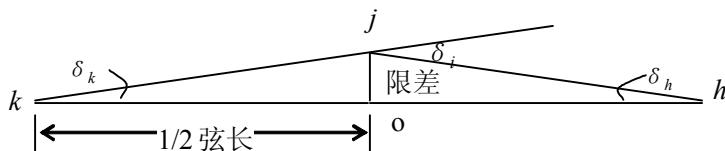


图 5-2 测量误差示意图

如果按照前一种轨道验收标准来衡量轨道的平顺性，即以 20m 弦量测，正矢距最大允许偏差为 2mm。取控制测量的限差为允许偏差的 1/5，则控制基桩 j 相对于 k 、 h 直线的横向限差为 ± 0.4 mm。采用同等精度进行测量， $\angle kjh$ 的角度测量限差 δ_j 为：

$$\begin{aligned}\delta_j &= \delta_k + \delta_h = 2\delta_k \\ \delta_k &\leq (jo/ko) \times \rho'' = 0.4/10000 \times 206265 \approx 8'' \\ \delta_j &\approx 16''\end{aligned}\quad (5-1)$$

取中误差为限差的 1/2，则控制基桩点位误差引起的的角度 $\angle kjh$ 中误差为 8''。

如果按照后一种轨道验收标准来衡量轨道的平顺性，即在 300m 的范围内，正矢距的最大允许限差为 10 mm，取轨道施工时的定位限差为 ± 8 mm，那么控制基桩 j 相对于 k 、 h 直线的横向限差应为 ± 6 mm。采用同等精度进行测量， $\angle kjh$ 的角度测量限差 δ_j 为：

$$\begin{aligned}\delta_j &= \delta_k + \delta_h = 2\delta_k \\ \delta_k &\leq (jo/ko) \times \rho'' = 6/150000 \times 206265 \approx 8'' \\ \delta_j &\approx 16''\end{aligned}\quad (5-2)$$

取中误差为限差的 1/2，则控制基桩点位误差引起的角度 $\angle kjh$ 测量中误差为 8''。

从结果来看，由两种验收标准推导出来的角度中误差都是 8''，

从实际出发,可以把任意 3 个相邻控制基桩点位误差引起的角度中误差允许值定为 $\pm 8''$ 。

考虑到控制长波为 150 m,故控制基桩相邻点间距设置应为 150~200 m,以保证在控制长波段的施工精度。

在直线段加密基桩,可在 150-200 m 的控制基桩下进行。在岔区和曲线段,加密控制基桩,可在 2 个相距 150-200m 的控制基桩内,先加密 2-3 个 50m 间隔的基桩。若以控制基桩的相对中误差为 $\pm 3\text{mm}$,则加密控制基桩相对于两端控制基桩的横向中误差应小于 $3\text{mm}/\sqrt{4}=1.5\text{mm}$;若以相邻基桩的方向中误差为 $4''$,则加密基桩相对于两端控制基桩的横向中误差应小于 $100\text{m} \times 4''/\rho = 2.0\text{mm}$ 。综合考虑,可确定加密的控制基桩相对于两端控制基桩的横向中误差应小于 1.5mm。然后在 50 m 的加密控制基桩下加密 5m 和 10m 的加密基桩,它们相对于两端加密控制基桩的横向中误差应小于 0.7mm ($0.7\text{mm} \times \sqrt{5} = 1.56\text{mm}$, $0.7\text{mm} \times \sqrt{10} = 2.21\text{mm}$)。客运专线的最小半径 2000m,200m 的弦长,最大的矢距 2.5m。因此采用光学准直法,可保证加密控制基桩的矢距误差不大于 0.7mm。

(3) 可靠性设计

如果基桩控制网 CPIII 按 800m 布设边长 200m 的附和导线,平均可靠率 $\bar{r} = \frac{3}{11} = 0.27 > 0.25$,满足可靠性要求;按 1km 布设边长 200m

的附和导线,平均可靠率 $\bar{r} = \frac{3}{13} = 0.23 < 0.25$,略低于可靠性要求。因

此,当 CP II 网的边长在 800m-1000m 时,CPIII 基本满足可靠性要求。

4. CPIII 测量

在 CP II 网的基础上进行基桩控制网 (CPIII) 测量,可采用导

线法施测。导线测量的具体技术要求为：

表 5-1 导线测量主要技术要求

附和长度 (km)	边长 (m)	测距中误差 (mm)	测角中误差 (")	相邻点位坐标中误差 (mm)	导线全长相对闭合差限差	方位角闭合差限差 (")	对应导线等级
≤1	150~200	3	4	5	1/20000	$\pm 8\sqrt{n}$	五等

表 5-2 控制点的定位精度要求 (mm)

	可重复性测量精度	相对点位精度
导线测量	6	5
后方交会测量	5	1

注：① 可重复性测量精度：控制点两次定位坐标差的中误差或补设、增设控制点时，由现有已知控制点发展的新控制点相对于已知点的坐标中误差；

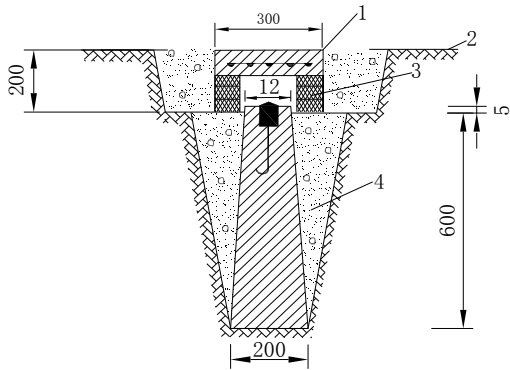
② 表中数据为 X、Y 坐标方向的中误差。

CPIII 控制点的布设应兼顾施工及运营维护，埋点应满足以下要求：

1) CPIII 控制点宜设于线路外侧，距线路中线的距离一般为 3~4m，或直接利用凸形档台，沿线路中线布设，控制点的间距以 150~200m 为宜。对线路特殊地段、曲线控制点、线路变坡点、竖曲线起终点及道岔区均应增设加密控制点，曲线地段加密控制点间距以 50~60m 为宜。

2) CPIII 控制点应设置在稳固、可靠、不易破坏和便于测量的地方，并应防冻、防沉降和抗移动，控制点标识要清晰、齐全、便于准确识别和使用。

3) CPIII 控制点有条件时宜埋设混凝土强制对中标（图 5-3）。当 CPIII 设在接触网杆等建筑物上时，可根据实际情况自行设计。



注：1—盖；2—土面；3—砖；4—贫混凝土

图 5-3 CPIII及施工控制点标石埋设图（单位：mm）

4) CPIII控制点采用导线法测量时，直线部分宜设于线路一侧，曲线部分宜设于线路外侧；采用后方交会法测量时，应设于线路两侧。在一条线路上控制点的外移距离宜相等，如遇障碍物，外移距离可适当减少，但增减值应相等。

CPIII控制点埋设完成后，应对其进行检测。检测控制点间夹角时，方向观测应不少于两测回，距离往返观测各两测回；控制点间的距离允许偏差为 $1/20\,000$ ；直线段控制点间夹角与 180° 较差应小于 $8''$ ，曲线段控制点间夹角与设计值较差计算出的线路横向偏差应小于 1.5mm ；弦长测量值与设计值较差应小于 2mm 。

CPIII控制点满足各项限差要求后应永久固定。控制点标识要清晰、齐全、便于使用，并绘制布设平面示意图和控制点表，做好点之记描述其位置、里程、外移距。CPIII导线测量水平角及导线边长测量按表 5-3 的技术要求执行。

表 5-3 CPIII导线测量水平角观测技术要求

仪器等级	测回数	半测回归零差	2C 较差	同一方向各测回间较差
DJ1	2	6''	9''	6''

DJ2	4	8"	13"	9"
-----	---	----	-----	----

CPIII导线应在方位角闭合差及导线全长相对闭合差满足要求后，采用严密平差计算。

(二) 轨道安装控制测量

1. 基桩加密

加密基桩的测设应满足下列要求：

- ① 依据相邻 CPIII控制点加密，采用光学准直法和精密水准测量方法，逐一测定加密基桩的位置和高程，并标定点位；
- ② 加密基桩间距应根据施工方法确定，一般在 5~10m 范围设置一个；
- ③ 加密基桩一般设置在线路中线上，也可设置在线路中线的两侧。

CRTS I 型板式无碴轨道(CRTS I s)在底座和凸形挡台混凝土施工完毕后，应在每个凸形挡台上沿线路中线方向重新设置加密基桩（基准器）。

道岔区控制基桩测量应满足下列要求：

- ① 道岔区应在岔心、岔前、岔后位置及道岔前后 100~200m 范围内增设控制基桩，其位置一般设置在直股和曲股的两侧，可按坐标直接测设，也可按岔心和直股与曲股线路方向测设，并应埋置永久性桩位。
- ② 道岔区控制基桩的测量方法和精度要求应符合控制基桩的测设要求。

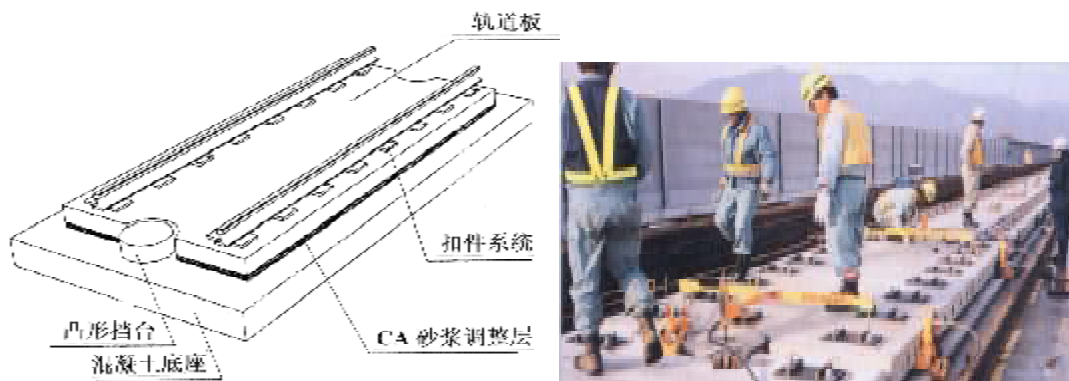


图 5-4 凸形挡台

加密基桩（基准器）测设精度应符合如下规定：

- ① 加密基桩垂直于线路中线方向的限差为 $\pm 1\text{mm}$ ；
- ② 每相邻加密基桩间距离的限差为 $\pm 2\text{mm}$ ；
- ③ 每相邻加密基桩间高差的限差为 $\pm 1\text{mm}$ ；
- ④ 加密基桩间偏差应在两相邻 C_{PIII}控制点内调整。

2. 轨道测量系统

轨道板精调定位测量时每个测量作业面需配备四根测量滑架，每个测量滑架上有一个固定棱镜，使用专用三角架将速测仪安置在轨道板接缝处加密基桩点上（对中精度 0.5 mm ）。用于轨道板精调定位测量的滑架、速测仪应配合配套软件使用。

将测量滑架安置在所需精调定位轨道板的第一、最后和中间支点以及已精调定位好的轨道板的最后支点上。测量滑架卡尺架在支点（打磨了的混凝土承轨台面）上，并通过固紧调节装置单面与支点面相触。由此而建立起了与支点几何间的参考关系。在轨道板接缝处加密基桩点对速测仪进行程控设站，并通过已精调好轨道板上的测量滑架进行定向，再使用其它已知加密基桩点进行定向检查。

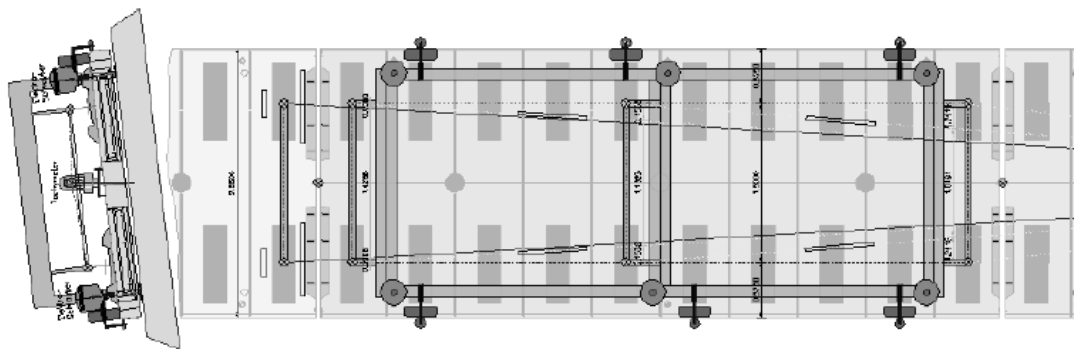


图 5-5 轨道板精调定位测量滑架

通过程控计算（实际空间位置与理论空间位置比较）及显示指令，借助精调装置调整轨道板的空間位置（含水平、高程和超高），直到支点平面精度达到要求为止。

3. 常规作业方法

CRTS I 型板式无碴轨道主要施工流程见图 5-6。CRTS I 型板式无碴轨道施工需采用专用的工装设备主要有砂浆运输车、移动式搅拌站、铺轨龙门吊、轨道板运输车和测量定位系统。

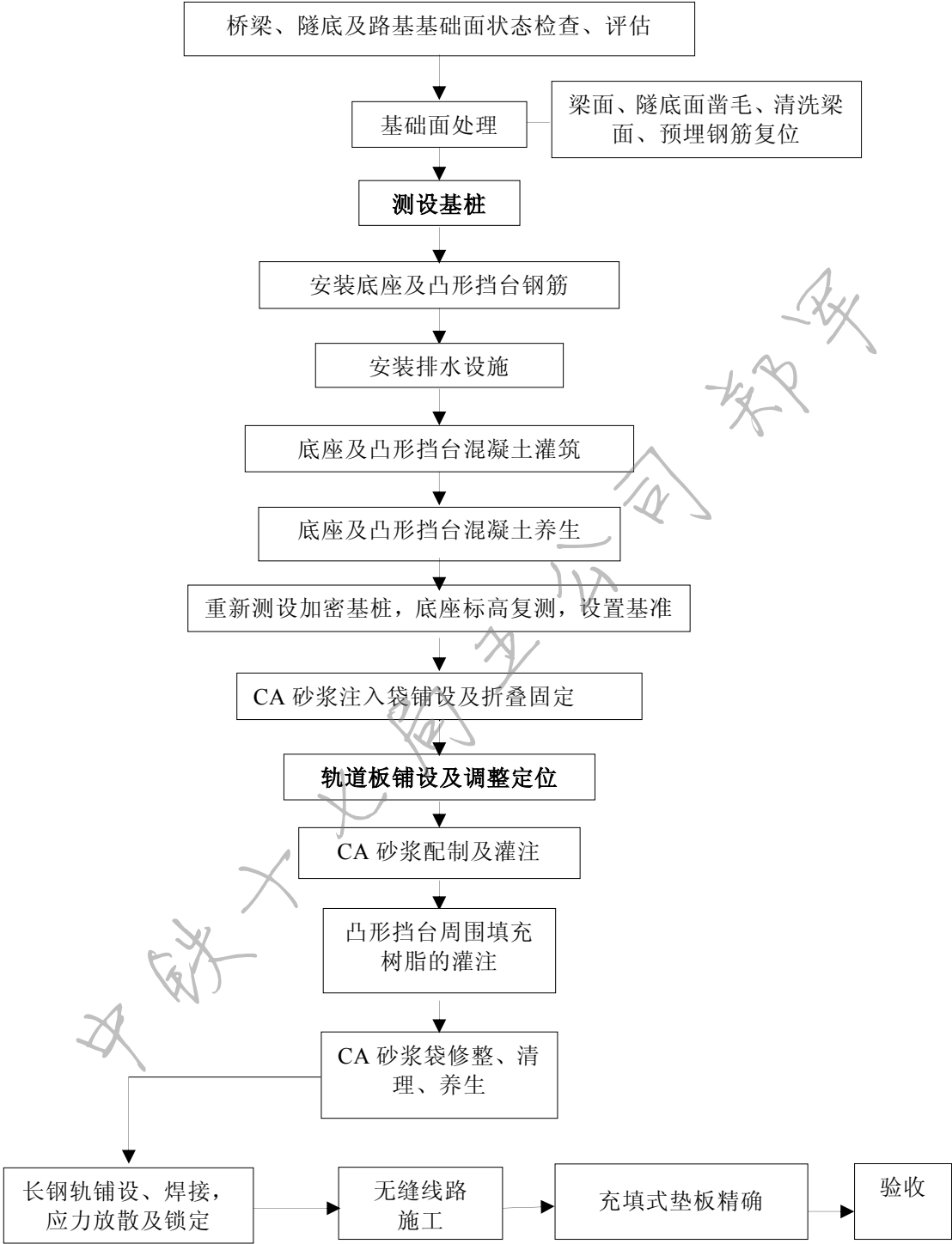
(5) 底座和凸形挡台

无碴轨道道床中，底座和凸形挡台是唯一的现浇混凝土结构，因此该结构的施工方案着重从“现浇、线状、薄层、高性能”方面考虑。

结构断面形状：底座采用 C40 混凝土，双层配筋，底座通过预埋在桥梁、隧道或路基里的钢筋与其连成一体。底座上设 C40 混凝土凸形挡台，半径 260mm，凸形挡台与底座连成一体。其结构断面形式如图 5-7 所示。

曲线超高在底座上设置,缓和曲线和圆曲线范围的底座厚度根据实设超高计算确定。于凸形挡台的混凝土采用二次浇筑的施工工艺,底座模板安装平面位置定位限差 $(-3\text{mm}, +3\text{mm})$,高程定位限差 $(-5\text{mm}, 0)$,施工允许偏差较大,故可以采用CPIII控制点或加密基桩加密基桩进行立模放样,同样可以保证底座的施工精度,且施

工方便易于操作。底座立模放样中应注意曲线地段底座中心线相对线路中心线的偏移及超高的设置。



注：加粗工艺为需测量配合工艺。

图 5-6 CRTS I 型板式无碴轨道施工流程

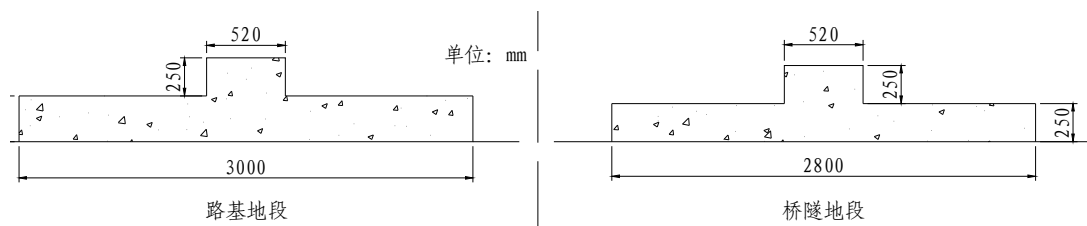


图 5-7 底座与凸形挡台结构断面示意图

加密基桩一般设置在线路中心线上，为一次使用，混凝土灌注完成后不进行加密基桩的恢复。由于需绑扎凸形挡台，为保证其位置的准确性，需在凸形挡台中心或线路中线上设置加密基桩。施工前应先沿线路中心线进行底座高程检测，高程测量按精密水准要求往返观测，闭合于 CPIII 控制点，以保证 CA 砂浆厚度。利用 CPIII 进行凸形挡台的立模放样，应按加密基桩要求直接采用极坐标法测设凸形挡台的中心和高程测量。

应利用 CPIII 控制点进行凸型挡台立模放样和加密基桩（基准器）测设。凸形挡台模板平面位置定位限差：相邻挡台中心间距（-3mm，+3mm），横向（-2mm，+2mm）；高程定位限差（-2mm，+2mm）。底座施工测量重点为保证底座的高程测量数据的计算准确性及测设的精确性，保证整个板式无砟轨道系统中 CA 砂浆的厚度满足设计要求。

凸形挡台施工完成后，直接在凸形挡台上测设加密基桩，加密基桩应位于轨道板的铺设中心线上（沿线路方向可适当移动，但不应超过 5mm），直线地段与线路中心线重合，曲线地段应注意线路偏角。当用微调式基准器时，测设点应位于基准器与三角道尺的结合点处。

(6) 基准器测设

基准器是轨道板铺设的重要量测依据，设在凸形挡台顶部。基准器位于线路中心线上，纵向间距与凸形挡台间距基本一致，标准间距为 5m。基准器测设精度见下表。

表 5-4 基准器测量精度表

序	项目	允许偏差（mm）
1	相邻基准器间距/偏离中心线/高程	$\pm 5\text{mm}/\leq 2\text{mm}/\pm 2\text{mm}$
2	相邻基准器实测高差与设计高差较差	$\leq 1\text{mm}$

为便于精确定位，基准器设为微调式：即采用螺栓固定在凸形挡台凹槽内，根据测设数据，由纵、横及竖向三方向调整铜质芯棒，达到中心点位位于线路中心、点位与轨面高差值一致的要求。精确定位后用高标号砂浆覆盖。基准器结构形式如 5-8 图所示。

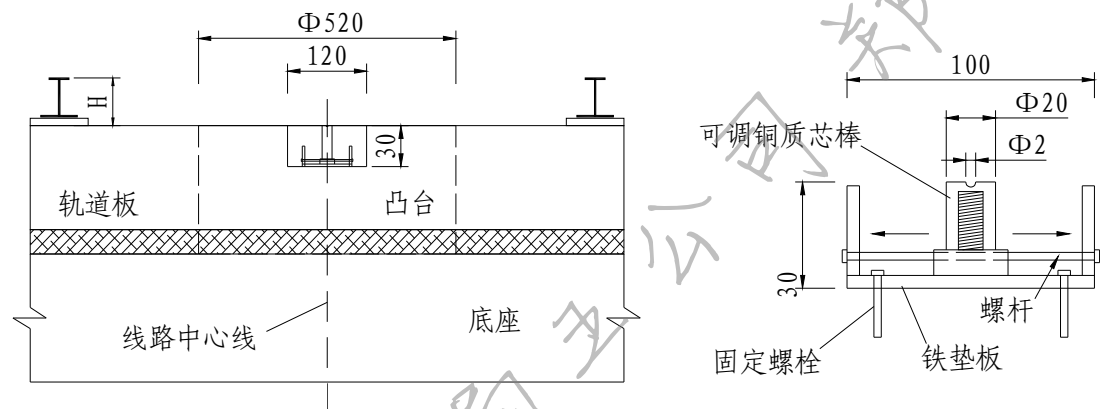


图 5-8 基准器设置示意图

主要技术措施：

- 1) 根据凸形挡台位置，详细计算基准器的坐标。采用高精度的测量仪器，精确测定基准器的中心位置。
- 2) 在凸形挡台混凝土浇筑前，先在路基面或梁面上测设基准器中心点位，并测设该点位的法线护点，以保证凸形挡台的位置不偏移，也便于安装基准器。
- 3) 利用线路关系，核准基准器点位，并依次编号、登记。量测结果做成标签，贴在线路前进方向的左侧或曲线外侧。标签反映内容如图 5-9 所示。

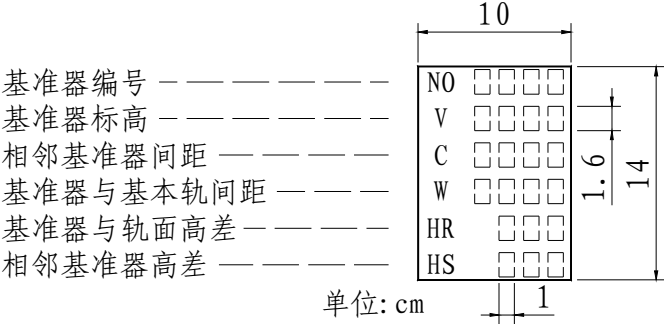


图 5-9 基准器测量标签示意图

直、曲线地段，分别采用针对性的测量工艺流程，如图 5-10 所示：

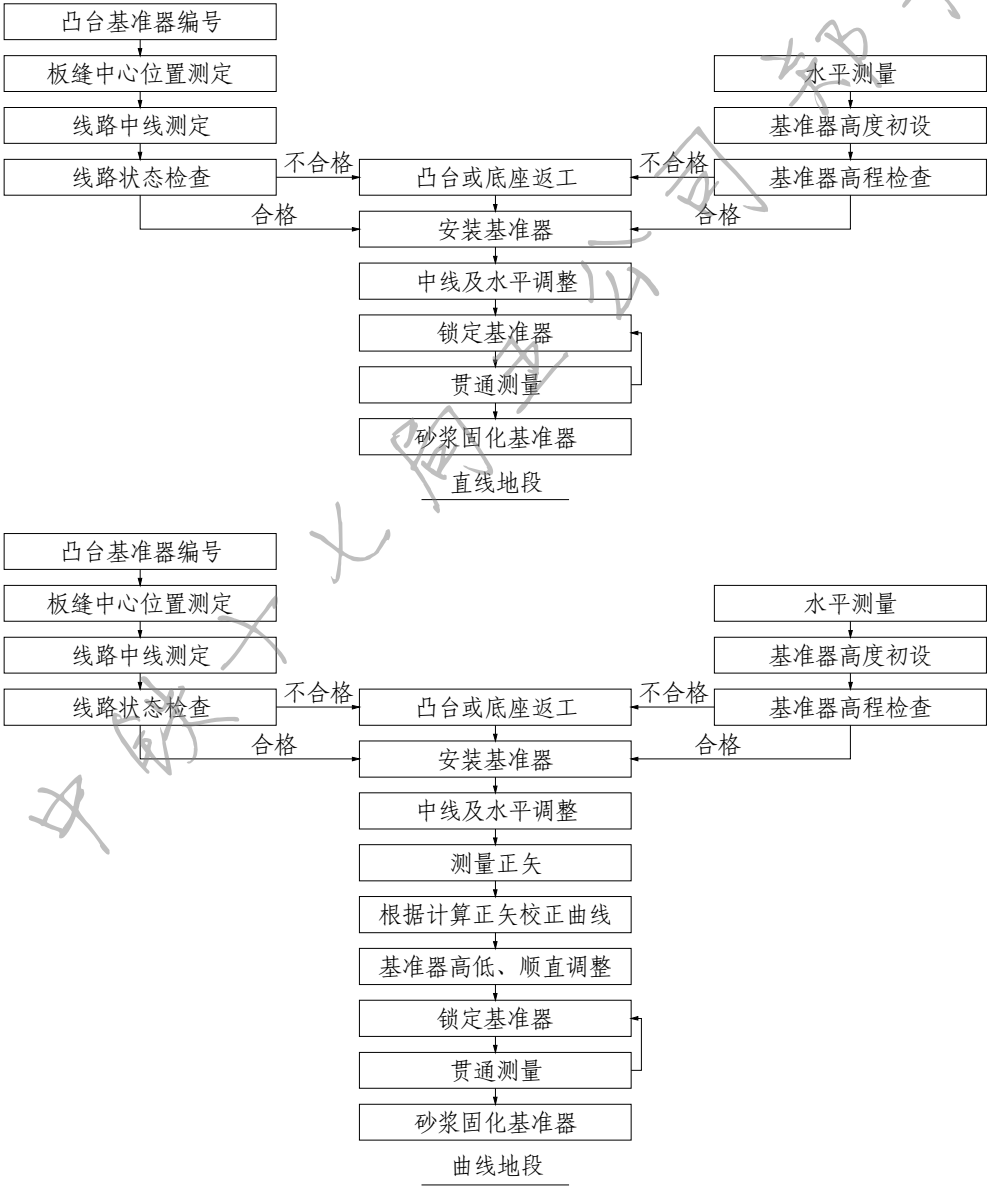


图 5-10 直、曲线地段基准器测设工艺流程图

(7) 轨道板铺设

轨道板在预制过程中已经标志出其中心线及扣件安装中心线,偏差均小于 1mm,故轨道板的铺设可以采用板的中心线及扣件安装中心线两种方式测量定位,同时所需基准点也不同,分别为加密基桩和微调式基准器。当采用加密基桩测量时,对中应利用轨道板中心线,轨道板中心线应与加密基桩连线重合,且轨道板的标高应采用精密水准测量测设。

当采用微调式基准器时,对中应利用轨道板扣件安装中心线,并必须使用专用三角规进行测量,同时实现方向及标高的调整。由于轨道板预制为平板,表面理论上位于一个平面上,当在曲线地段(尤其缓和曲线地段)且非平坡地段,轨道板四点设计高程不在一个平面上,故调整过程中应高点降低,低点上升。轨道板平面位置定位限差:纵向: $(-3\text{mm}, +3\text{mm})$, 横向 $(-2\text{mm}, +2\text{mm})$; 高程定位限差 $(-1\text{mm}, +1\text{mm})$ 。

(8) 充填式垫板施工

充填式垫板施工为 CRST I、III型板式无碴轨道施工的工序,主要作用为调整轨道结构的高低及水平,使轨道状态达到高平顺性的要求。充填式垫板施工的前提为轨道的方向达到要求,并且将专用楔块抬高钢轨,使其水平及高低符合技术要求,需进行精确的测量,保证轨道状态合格。

钢轨调整使用的仪器宜采用轨检小车测量,也可采用全站仪+水准仪测量。采用轨检小车测量时,测量步长宜为 1 个轨枕间距。采用全站仪+水准仪测量时,应依据 CPIII控制点测设轨道平面位置和高程,测点间距不应大于 2m; 用 10m 弦确定钢轨的轨向和高低,10m 弦步长不应大于 2m; 使用的全站仪测角标称精度 $\leq 1''$, 测距标称精度 $\leq 1\text{mm} + 1\text{ppm}$; 高程测量按精密水准测量要求施测。

由于轨检小车自动化程度高，数据自动保存，所以规范推荐尽量采用轨检小车进行测量，同时为保证钢轨的高平顺性及操作的可实现性，建议轨检小车的步长为 1m。实际施工中可以根据轨检小车的测量结果对步长进行适当调整。

（三） 轨道平顺性测量技术

1. 平面测量

为了适应客运专线铁路高速行车对平顺性和舒适性的要求，客运专线铁路轨道必须具有高平顺度标准。由于无碴轨道施工完成后基本不再具备调整的可能性，施工误差以及线下基础沉降所引起的轨道变形只能依靠扣件进行微量的调整。客运专线扣件技术条件中规定扣件的轨距调整量为 $\pm 10\text{mm}$ ，高低调整量 -4 、 $+26\text{mm}$ ，因此用于施工误差的调整量非常小，施工精度较有碴轨道的要求更严格。

无碴轨道铺设应满足轨道内部几何尺寸(轨道自身的几何尺寸)和外部几何尺寸(轨道与周围建筑物的相对尺寸)的精度要求。其中内部尺寸描述轨道的几何形状，对列车走行的动力学性能(例如乘车舒适性、轮轨磨损等)起唯一决定性作用。为此，要尽量使轨道几何状态平顺。那些起控制作用的单个不平顺及某些周期性不平顺是非常有害的。外部几何尺寸描述轨道的空间位置和高程，对保证轨道的正常功能有重要意义。

(1) 内部尺寸

轨道的内部尺寸可以用轨道相邻点之间的相对位置进行描述。可以用一根弦线上的矢高，或者说是用一根弦线上的垂直坐标(h_2)来描述，如图 5-11。其中，确定相对位置的两相邻点之间的距离具有特别重要的意义，这个距离取决于与行车速度有关速度有关的振动邻界周期。对于高速而言，这个距离的范围在 150m 以内。轨道

方向不平顺性的允许值是由这个不平顺所引起的各种力所决定的。

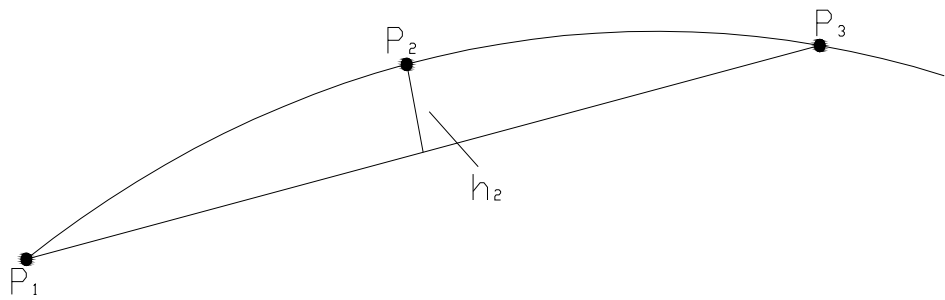


图 5-11 平顺性检测

通过对轨道内部尺寸的轨道，保证在走行动力学方面具有良好的线路走向。因此，除了轨距和超高外，还规定了纵向高度和轨道轴线方向的参数，它们保证轨道正确的形状或曲率。通过参数检查轨道的实际形状与设计形状是否一致。

钢轨的形状或曲率可以通过弦上的矢高一几何方式来描述。在德国验收规程中规定了两个检验标准检测轨道纵向高低和方向。

第一个标准用于检验轨道在较短长度范围内的几何形态，按间距 10m 设置一对测点，检测这一对测点的矢高之差。

第二个标准用于控制长波不平顺的影响，按间距 150m 设置一对测点，检测这一对点的矢高差。因为侧点间距超过 150m 之后，其不平顺的动力影响可以被忽略。

轨道偏差极限值的规定如下：

表 5-5 轨道偏差极限值

测量参数	容许偏差极限值
轨距	±2mm，相对标准轨距 1.435m 而言
水平	±2mm，等高的两股钢轨相对而言，或相对于规定超

	高而言
纵向高低	两个相邻检测点的实际矢高差与设计矢高差的偏差： 当用于评估矢高差的两检验点间距离为 10m 时，为 ±2mm；当用于评估矢高差的两检验点间距离为 150m 时，为±10mm
方向	两个相邻检测点的实际矢高差与设计矢高差的偏差： 用于评估矢高差的两检验点间距离为 10m 时，为 ±2mm；用于评估矢高差的两检验点间距离为 150m 时，为±10mm

① 2mm/10m 标准检验方法

用 2mm/10m 标准检验时，采用弦长 $S = 30\text{ m}$ ，弦线可以用计算方法设置或在现场选择拉线。对所有支承点（一般就是所有轨枕）的矢高或者说垂直坐标进行计算或直接测量。为了检验一个钢轨支承点，应计算出该支承点与相隔 10m 的另一支承点（检算点）之间的实际矢高差，并与相应的设计矢高差进行比较。实际矢高差与设计矢高差之间的偏差允许最大值为 2.0mm。

图 5-12 中的点号是钢轨支承点的编号。 $S = 30\text{ m}$ 时，在上述假设的轨枕间距的情况下共有 49 个支承点，弦线端部的支承点分别用 P_1 和 P_{49} 表示。要在这个弦线上方分别确定支承点 P_2 至 P_{48} 的矢高。为清楚起见，图中只标出间距为 10m 的各个支承点。

作为实例，检验支承点 P_{25} 。其间距为 10m 的对应核算点为支承点 P_{33} ，计算出 P_{25} 和 P_{33} 的设计矢高，并测定其实际矢高。必须满足的极限值可由设计矢高和实际矢高按下式算出：

$$\Delta h = (P_{25\text{设计}} - P_{33\text{设计}}) - (P_{25\text{实测}} - P_{33\text{实测}}) \leq 2\text{mm} \quad (5-3)$$

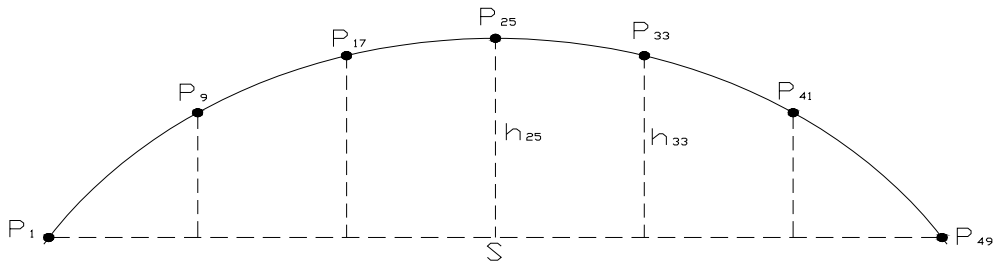


图 5-12 利用“长弦”检验轨道自身的几何尺寸

要用 $P_1 \sim P_{49}$ 的弦线检验所有可能的检验的支承点，这里指的是从 P_2 （校算点 P_{10} ）至 P_{40} （校算点 P_{48} ）。不可能对支承点 P_{41} 进行检验，因为相应的校算点 P_{49} 处的矢高为零，要用新的弦线来检验支承点 P_{41} ， P_{42} 等各点。

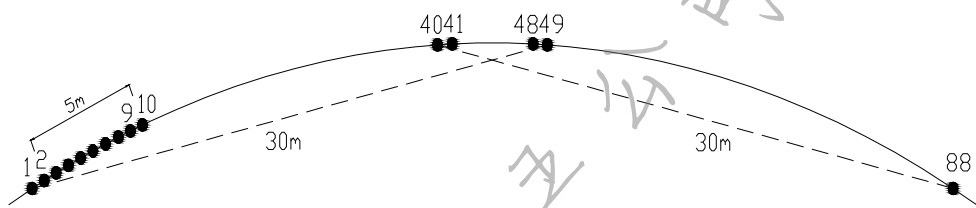


图 5-13 标准 2mm/10m 时检验方法的弦线布置

新的弦线要从最后一个已经检验的支承点开始。在此处这个支承点就是 P_{40} ，而新的最后一个支承点是 P_{88} 。在这根新的弦线上又可确定 P_{41} 至 P_{87} 等各支承点的矢高，并检验支承点 P_{41} （校算点 P_{49} ）至 P_{79} （校算点 P_{87} ）。再下一根新弦线是从支承点 P_{79} 开始。

② 10mm/150m 标准检验方法

两测点（检验点和校算点）间距为 150m 的第二个标准采用类似上述的办法。此时弦长 $S = 300\text{ m}$ ，由于在实际测量中难于采用这样长的弦线，所以它只能用计算方法来实现。

仍假设轨枕间距为 0.625m，则 $S = 300\text{ m}$ 时共有 480 个钢轨支承点间距。这样，第一根弦线从支承点 P_1 开始，在支承点 P_{481} 结束（见图 5-14），此时需要测定支承点 P_2 至 P_{480} 之间所有各点的矢高。

要进行检验的支承点是从 P_2 （检算点 P_{242} ）至 P_{240} （检算点 P_{480} ）。

下一根弦线从最后检验的支承点 P_{240} 开始，在支承点 P_{720} 结束。这样就可检验在支承点 P_{479} （检算点 P_{719} ）及其之前所有支承点的矢高。

仍以支承点 P_{25} 为例，其相距 150m 的相应检算点是 P_{265} 。先算出支承点 P_{25} 和 P_{265} 的设计矢高，然后再用测出的数据算出 P_{25} 和 P_{265} 的实际矢高。这两个矢高值之差就应满足允许偏差极限值要求：

$$\Delta h = (P_{25\text{设计}} - P_{265\text{设计}}) - (P_{25\text{实测}} - P_{265\text{实测}}) \leq 10\text{mm} \quad (5-4)$$

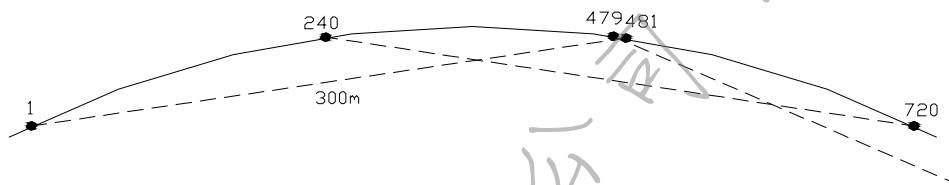


图 5-14 10mm/150m 标准检验方法时弦线的布置

(2) 外部尺寸

轨道相对于周围建筑的几何尺寸，包括与邻线的间距，与站台、接触网、隧道、桥梁等的相对位置等。因为这些建筑物往往都是从同一个基准点通过测量进行测设的，所以轨道相对于周围建筑物的几何尺寸也可用于描述轨道的平面位置和高程。竣工轨道必须满足机车的接近限界。其相对于设计平面位置和设计高程的允许偏差均在 $\pm 10\text{mm}$ 以内时，认为轨道相对于周边建筑物的距离和高程满足设计要求。

最大偏差 10mm 是相对于有效基准线而言的。基准线通常是通过轨道定位桩或精度等同的基准点来体现。

从测量技术的角度讲，线路设计时考虑的测量误差只能是这个

总误差的一部分。

测量每隔 5m，即每隔 7~8 根轨枕或支承点间距进行一次。检查轨道相对于周围建筑物的几何尺寸的测量工作，没有必要在 10m 之内的每个支承点（或每个轨枕）处进行。因为轨道自身的几何尺寸标准要求轨道方向在各支承点之间有足够的平顺性，从而可以保证满足与相邻建筑物之间的几何关系。

2. 高程测量

为了满足轨道的平顺性，需要做好两个控制，一个是路基的工后沉降量不能大于 15mm，一个是轨道铺设时轨道的纵向高低偏差必须满足表 2-1 的要求。《客运专线无砟轨道铁路工程测量暂行规定》根据这两个要求，高程控制网可分级进行，首级采用二等水准网，为全线统一的高程控制网；次级水准网为精密水准网，水准点距离为 1km。

六、 无碴轨道测量评估

(一) 评估验收指标

1. 外业测量数据的精度指标

(9) GPS 测量（CP I 和 CP II）

表 6-1 GPS 测量的精度指标

级别	a （mm）	b （mm/km）	级别	a （mm）	b （mm/km）
B	≤ 8	≤ 1	D	≤ 10	≤ 10
C	≤ 10	≤ 5	E	≤ 10	≤ 20

注： a ——固定误差（mm）； b ——比例误差系数；

各级 GPS 网相邻点间弦长精度用下式表示：

$$\sigma = \sqrt{a^2 + (b \times d)^2} \tag{6-e}$$

式中， σ ——标准差（mm）； d ——相邻点间距离（km）。

GPS 不同时段观测的基线边较差不大于接收机标称精度的 $2\sqrt{2}$ 倍。GPS 异步环闭合差应满足：

$$\begin{aligned} w_x, w_y, w_z &\leq 3\sqrt{n}\sigma \\ w &\leq 3\sqrt{3n}\sigma \end{aligned} \tag{6-f}$$

式中 w_x, w_y, w_z ——坐标分量闭合差；

w ——环的全长闭合差；

n ——闭合环的边数。

(10) 导线测量等级（CP II 和 CPIII）

表 6-2 导线测量水平角观测的技术要求

控制网等级	仪器型号	测回数	半测回归零差	一测回中 2c 值较差	同一方向各测回间较差
CP II	DJ1	6	6"	9"	6"

	DJ2	4	8"	13"	9"
CPⅢ	DJ1	2	6"	9"	6"
	DJ2	4	8"	13"	9"

表 6-3 距离和竖直角观测限差

仪器精度等级	测距中误差 (mm)	同一测回各次读数互差 (mm)	测回间读数较差 (mm)	往返测平距较差
I	<5	5	7	$2\sqrt{2} \frac{m_D}{\sqrt{N}}$
II	5~10	10	15	

注： m_D 为标称精度， N 为单向测回数。

2. 平面控制网的可靠性指标

各级平面控制网的平均可靠性：

$$\bar{r} = \frac{r}{n} > 0.25 \tag{6-g)}$$

式中： r —控制网的多余观测数；
 n —控制网的总观测数。

3. 平面控制网的点位精度指标

各级控制点的可重复性测量精度和相邻点位的相对精度应符合表 6-4 的要求，表中数据为 X、Y 坐标方向的中误差。

表 6-4 平面控制点的精度要求 (mm)

控制点	可重复性测量精度	相对点位精度
CP I	10	8+1ppm
CP II	15	10
CPⅢ	6	5

任意 3 个相邻 CPⅢ控制点通过完整的坐标协方差阵反算的角度中误差不得大于 8"；

高程测量等级如表 6-5 所列。

表 6-5 各等级水准测量精度要求（mm）

水准测量等级	每千米水准测量偶然中误差 M_{Δ}	限差				
		检测已测段高差之差	往返测不符值	附和路线闭合差	环闭合差	左右路线高差不符值
二等水准	≤ 1.0	$6\sqrt{R}$	$4\sqrt{R}$	$4\sqrt{L}$	$4\sqrt{F}$	——
精密水准	≤ 2.0	$12\sqrt{R}$	$8\sqrt{R}$	$8\sqrt{L}$	$8\sqrt{F}$	$4\sqrt{R}$
三等水准	≤ 3.0	$20\sqrt{R}$	$12\sqrt{R}$	$12\sqrt{L}$	$12\sqrt{F}$	$8\sqrt{R}$
四等水准	≤ 5.0	$30\sqrt{R}$	$20\sqrt{R}$	$20\sqrt{L}$	$20\sqrt{F}$	$14\sqrt{R}$

注：表中 R 为测段长度， L 为附和路线长度， F 为环线长度，均以千米计。

每条水准路线应以测段高差不符值，按下式计算每千米水准测量的偶然中误差 M_{Δ} 。

$$M_{\Delta} = \sqrt{\frac{1}{4n} \left[\frac{\Delta\Delta}{R} \right]}$$

(6-h))

式中 Δ ——测段高差不符值（mm）；
 n ——测段数。

表 6-6 水准测量的主要技术标准

等级	每千米高差全中误差（mm）	路线长度（km）	水准仪的型号	水准尺	观测次数		往返较差或闭合差	
					与已知点联测	附和或环线	平地（mm）	山地（mm）
二等	2	≤ 400	DS ₁	铟瓦	往返	往返	$4\sqrt{L}$	—
精密水准	4	2~4	DS ₁	铟瓦	往返	往返	$8\sqrt{L}$	—
三等	6	≤ 150	DS ₁	铟瓦	往返	往测	$12\sqrt{L}$	$4\sqrt{n}$

			DS ₃	双面		往返		
四等	10	≤30	DS ₃	双面	往返	往返	$20\sqrt{L}$	$6\sqrt{n}$

注：①结点之间或结点与高级点之间，其路线的长度，不应大于表中规定的0.7倍。② L 为往返测段，附和或环线的水准路线长度（km）， n 为测站数。

表 6-7 各等级水准观测主要技术要求

等级	水准尺类型	水准仪型号	视距(m)	前后视距差(m)	任意测站上前后视距累积差(m)	视线高度(m)
二等	铟瓦	DS ₁	≤50	≤1.0	≤3.0	下丝读数
		DS ₀₅	≤60			≥0.3
精密水准	铟瓦	DS ₁	≤60	≤2.0	≤4.0	下丝读数
		DS ₀₅	≤65			≥0.3
三等	双面	DS ₃	≤65	≤3.0	≤6.0	三丝能读数
	铟瓦	DS ₁ /DS ₀₅	≤80			
四等	双面	DS ₃	≤80	≤5.0	≤10.0	三丝能读数
	铟瓦	DS ₁	≤100			

各级高程控制点的可重复性测量精度和相邻点位的相对精度应符合下表的要求。

表 6-8 高程控制点的精度要求（mm）

控制点类型	可重复性测量精度	相对点位精度	水准测量等级
勘测高程控制点	$4\sqrt{L}$	$4\sqrt{L}$	二等
	$20\sqrt{L}$	$20\sqrt{L}$	四等
水准基点	$4\sqrt{L}$	$4\sqrt{L}$	二等
控制基桩点	$8\sqrt{L}$	$8\sqrt{L}$	精密

（二）、 评估验收内容

1. 精密工程控制网测量评估

(1) 平面控制网测量检查评估

① 技术设计评估

平面控制网布设、构网的合理性，测量方案、测量精度设计是否经济可靠，起算基准是否合理。

② 控制点埋设检查评估

控制点的位置是否满足勘测设计、施工测量及运营维护的要求，控制点埋设是否稳定可靠和有利于长期保存。对特殊土质、地质地段的控制点埋设是否采取了相应的措施。

③ 外业测量作业检查评估

外业测量作业使用的仪器精度指标及检定情况，作业方法是否正确、外业观测记录是否齐全，各项限差是否满足要求。

④ 平差计算数据处理检查评估

数据处理平差计算软件是否鉴定，数据处理方法的正确性和可靠性。

⑤ 各种资料是否完整齐全。

(2) 平面控制测量数据质量评估

外业观测数据的质量检验，如果存在超限观测值，则要摒弃相关数据。

通过分析评估程序对测量数据进行处理来检验测量数据的可靠性。

(3) 平面控制网平差计算数据处理质量评估

① 对平差计算数据处理起算基准、起始数据进行检验。

首级 CP I 网，GPS 观测量应在 WGS-84 坐标系统中进行 3 维无约束平差，然后把 WGS-84 的 3 维坐标转换为全线统一的独立工程平面坐标系统。选择转换模型的尺度误差不大于 10mm/1km。独

立的工程平面坐标系以沿线路敷设的控制基桩对应的轨道设计高程为投影面，并引入 54 北京坐标系或 80 西安坐标系。二级 CP II 网，应附合到首级 CP I 网上，采用固定数据平差基准。

②对平差计算数据处理所采用的数学模型和计算软件进行验证。

通过采用不同数据处理数学模型和计算软件，对 CP I 和 CP II 控制网重新平差计算，对照比较控制网点位坐标，进行精度评定。

③用合格的起算数据和相同的数学模型对平差计算成果进行验算。

采用合格的起算数据和原设计院相同的数学模型软件，独立解算，检验控制网的平差结果。

(4) 平面控制网数据处理结果的整理和质量验证

计算各级控制网的验后精度，包括 GPS 测量的同步环、异步环闭合差，基线边平面相对中误差和方向中误差，导线测量的方位角闭合差、全长相对闭合差、测角中误差，控制网的点位和相邻点位误差椭圆参数。

通过对误差统计结果整理，明确和清楚地得出测量误差的变化曲线和分布情况，从而对平面控制网的质量作出评价。

(5) 平面控制网测量评估验收报告

完成上述检查评估项目后，编写评估验收报告：

- ① 平面控制网设计方案评估报告；
- ② 平面控制网布网埋石评估报告；
- ③ 外业测量数据质量评估报告；
- ④ 平差计算数据处理评估报告；
- ⑤ 测量成果精度及可靠性评估报告；
- ⑥ 资料完整性评估报告。

2. 高程控制网测量检查评估

(1) 高程控制网测量技术方案评估

高程控制网测量技术设计、选点埋石、仪器精度指标及检定情况、外业观测、平差计算和资料完整齐全等检查评估内容与平面控制网测量检查评估相同。

(2) 高程控制测量数据质量评估

外业观测数据检验和测段往返测高差不符值检验。

(3) 高程控制网平差计算数据处理质量评估

- ③ 对平差计算数据处理起算基准、起始数据进行检验；
- ④ 对平差计算数据处理所采用的数学模型和计算机软件进行验证；
- ⑤ 用合格的起算数据和相同的数学模型对平差计算成果进行验算。

(4) 高程控制网数据结果的整理和质量验证

计算各级控制网的验后精度，包括测段往返测高差不符值、水准路线（或环线）闭合差、每千米水准测量高差中数偶然中误差 $M\Delta$ 点及每千米水准测量全中误差 MW 、最弱点高程中误差、相邻点高差中误差等。

通过对误差统计结果整理，得出测量误差的变化曲线和分布情况从而对高程控制网的质量作出评价。

(5) 高程控制网测量评估验收报告

完成上述检查评估项目后，编写评估验收报告，内容包括：高程控制网设计方案评估、高程控制网布网埋石评估、外业测量数据

质量评估、平差计算数据处理评估、测量成果精度及可靠性评估和资料完整性评估等。

3. 路基、桥涵、隧道工程沉降观测评估

(1) 沉降观测要求

①主要技术指标

沉降观测网采用二等水准精度施测，主要技术要求列于下表：

表 6-9 沉降变形观测网的主要技术要求

等级	相邻基准点高差中误差(mm)	每站高差中误差(mm)	往返较差、附和或环线闭合差(mm)	监测已测高差较差(mm)	仪器	观测方法
三等	±1.0	±0.3	$\leq 0.6\sqrt{n}$	$\leq 0.8\sqrt{n}$	DS ₀₅ 、DS ₁	二等水准测量

沉降变形观测点采用国家一等水准精度进行观测，主要技术要求列于下表：

表 6-10 沉降变形观测点的精度要求和观测方法

等级	高程中误差(mm)	相邻点高差中误差(mm)	观测方法	往返较差、附和或环线闭合差(mm)
二等	±0.5	±0.3	按国家一等水准测量	$\leq 0.3\sqrt{n}$

不同等级水准测量的测量仪器及主要技术应符合表 6-11 和表 6-12 的规定。

表 6-11 水准测量的主要技术要求（单位：mm）

等级	每公里高差中数偶然中误差	每公里高差中数全中误差	测区往返高差不符值	附和路线闭合差	环闭合差	检测已测测段高差之差	最弱点的高程中误差（相对于起算点）
一等	$\leq \pm 0.5$	$\leq \pm 1.5$	$\leq \pm 2\sqrt{K}$	$\leq \pm 2\sqrt{L}$	$\leq \pm 2\sqrt{F}$	$\leq \pm 3\sqrt{R}$	≤ 10
二等	$\leq \pm 1.0$	$\leq \pm 2.0$	$\leq \pm 4\sqrt{K}$	$\leq \pm 4\sqrt{L}$	$\leq \pm 4\sqrt{F}$	$\leq \pm 6\sqrt{R}$	≤ 10

注： 1、两种每公里高差中数中误差的计算方法见后；

2、 K 为测段长度， L 为符合路线长度， F 为环线长度， R 为检测测段长度，均以 km 计；

3、水准环线由不同等级水准路线构成时，闭合差的限差应按各等级路线长度分别计算，然后取其平方和的平方根为限差；

表 6-12 一、二等水准测量仪器及主要技术要求(单位：m)

等级	水准尺类型	仪器类型	视线长度	前后视距差	在任一测点上前后视距差累计	视线高度(下丝读数)
一等	铟瓦	DS ₁ DS ₀₅	≤ 30	≤ 0.5	≤ 1.5	≥ 0.5
二等	铟瓦	DS ₁ DS ₀₅	DS ₁ ≤ 50 DS ₀₅ ≤ 60	≤ 1.0	≤ 3.0	≥ 0.3

注：下丝为近地面的视距丝。

②仪器设备

为确保整个工程质量和精度要求，应使用 DS05 和 DS1 的电子水准仪或光学水准仪，以及与之相配套的精密铟瓦钢尺，并使用至少 5kg 重的尺垫和撑杆。

③外业测量

应有 30%的平行观测进行实测评估。水准路线应与施工方的监测一致，精密水准网按二等水准测量的要求进行施测。在工作期间，工作基点应定期与水准基点进行校核。当对沉降观测成果发生怀疑时，应随时进行复测校核。

平行观测作业前应检验以下项目：

1)水准仪检验项目

- a)水准仪的检视；
- b)水准仪上概略水准器的检校；
- c)光学测微器隙动差和分划值的测定；
- d)气泡式水准仪交叉误差的检验；
- e)i 角检校。

2)水准尺检验项目

- a)标尺的检视。
- b)标尺上的圆水准器的检校。
- c)标尺分划面弯曲差的测定。
- d)标尺名义米长及分划偶然中误差的测定。
- e)一对水准标尺零点不等差及基辅分划读数差的测定。
- f)水准尺在观测前、观测中、观测后应按规定要求作全面检验。仪器检验方法见《国家一、二等水准测量规范》GB12897—91 附录 B，仪器技术指标见其第 6 章表 6。其它未阐述的检验项目、方法和要求可参照《国家一、二等水准测量规范》GB12897—91 第 6 章的有关规定执行。

④水准网平行观测

1).观测方式

采用单线路往返观测。一条线路的往返测，须由同一组观测人员，使用同一类型的仪器和尺垫，沿同一道路进行。

在一区段内，先连续进行所有测段的往测（或返测）随后再连

续进行该区段的返测（或往测）。

同一测段的往测（或返测）或返测（或往测）应分别在上午与下午进行。在日间气温变化不大的阴天或观测条件较好时，若干里程的往返测可同在上午或下午进行。但这种里程的总站数，不应超过该区段总站数的 30%。

2).观测的时间、气象条件和观测中应遵守的事项

a)水准观测应在标尺分划线成像清晰而稳定时进行。在下列情况下，不应进行观测：

日出后与日落前 30 分钟内；

太阳中天前后各约 2 小时内；

标尺分划线的影像跳动而难于照准时；

气温突变时；

风力过大而使标尺与仪器不能稳定时；

在道路上施测时，有大车或重车驶过时。

b)观测中应遵守的事项：

观测前 30 分钟，应将仪器置于露天阴影下，使仪器与外界气温趋于一致。观测时应用测伞遮蔽阳光。

对气泡式水准仪，观测前应测出倾斜螺旋的置平零点，随着气温的变化，应随时调整零点的位置。如果是带附合水准器的仪器，还应将附合水准气泡严格对齐。

在连续各测站上安置水准仪的三脚架时，应使其中两脚与水准路线的方向平行，而第三脚轮换置于路线方向的左侧与右侧。

除线路转变处外，每一测站上仪器与前后标尺的三个位置，应接近一条直线。禁止为了增加标尺读数，而把尺桩（台）安置在壕坑中。

光学水准仪在同一测站上观测时，不得两次调焦。转动仪器的倾斜螺旋和测微鼓时，其最后旋转方向，均应为旋进。电子水准仪的读数原理形同于照像原理，要求在每一测站上任何一次读数都须

精确调焦。

每一测段的往测与返测，其测站数均应为偶数。由往测转返测时，两根标尺必须互换位置，并重新整置仪器。

观测间歇时，尽量在水准点上结束。否则，应在最后一站选择两个坚稳可靠、光滑突出、便于放置标尺的固定点，作为间歇点加以标记。间歇后应对两个间歇点的高差进行检测，检测结果如符合限差要求（ $\leq 0.7\text{mm}$ ），即可从间歇点起测，若超过限差，可变动仪器再观测一次，如仍超限，则须从前一水准点起测。

为了消除系统误差（其中包括人差、仪器差，及其他综合测量误差）的影响，各期水准测量全部由同一观测员、同一仪器、同一标尺，沿同一路线进行，并尽可能在往返测采用同一类型的转点。

3). 观测方法

光学水准仪采用光学测微法，进行往返观测。

观测顺序如下：

b) 往测奇数站的读数顺序为：

- a) 后尺下丝；
- b) 后尺上丝；
- c) 后尺中丝基本分划；
- d) 前尺中丝基本分划；
- e) 前尺下丝；
- f) 前尺上丝；
- g) 前尺中丝辅助分划；
- h) 后尺中丝辅助分划。

c) 往测时，偶数站的读数顺序为：

- a) 前尺下丝；
- b) 前尺上丝；
- c) 前尺中丝基本分划；
- d) 后尺中丝基本分划；
- e) 后尺下丝；
- f) 后尺上丝；
- g) 后尺中丝基本分划；
- h) 前尺中丝辅助分划。

返测时，奇数站按往测时偶数站的顺序读数，偶数站按往测时奇数站的顺序读数。其中，上、下丝读四位数，中丝读五位数。

电子水准仪可任意选择常见的 8 种测量模式：BF,BFFB,BFBF,BBFF, aBF, aBFFB, aBFBF,aBBFF（B 表示后尺，F 表示前尺，a 表示带有奇偶转换）。在本次水准网的观测中选择 aBFFB 模式。各项限差、点号、点名、线名、线号、读数的取位等均可方便地输入到仪器中。可直接设置正、倒尺测量模式。

⑤平行观测记录方法和要求

为了减少人为计算错误，提高观测速度，外业观测记录中拟采用 PDA 小型计算机。其中编写有一等水准观测记录程序，其主要功能要求如下：

- 1) 对输入的各项观测数据，能够按《规范》要求进行逐项检查，出现超限数据时，能提示作业员调整测站或重新观测；
- 2) 能够纪录并存储各路线和各测段的标题信息（如水准路（环）名称、等级、观测方向）和观测条件信息（温度、天气、成像、太阳方向）；
- 3) 能存储每个测站的前、后视标尺基、辅分划面的中丝读数。计算并存储每个测段的视距和、高差和。电子水准仪使用机带的 PCMCIA 记录卡自动记录，由机载程序检查超限情况。

观测记录的内容包括测量的标题信息、观测数据、观测条件信息，细部要求如下：

- 1) 每测站需记录上、下丝在前后标尺的读数，中丝在前后标尺基、辅分划面的读数；
- 2) 每五个测站记录一次标尺温度；
- 3) 每测段的始末，工作间歇的前后及观测中气候变化时，应记录观测日期、时间、温度、天气、云量、成像、太阳方向、道路土质、风向及风力等内容。

任何原始观测数据必须按规定形式实时输入到记录器上，不允许人工进行记录、删除、修改或决定数据的存取。数据输入到记录器后，禁止采用任何方法删改数据。

每天观测结束，应将数据传输至计算机，并做备份。用程序处理后按规定的格式打印出观测记录手簿。

⑥平行观测限差规定

1) 视线长度、前后视距差、视线高度的规定

表 6-13 视线长度、前后视距差、视线高度的规定(m)

视距长度		前后视距差	任一测站前后视距累积差	视线高度（下丝读数）
仪器类型	视距			
DS ₀₅	≤35	≤0.5	≤1.5	≥0.3
DS ₁				

注：在作业前，电子水准仪可测定*i*角并存贮到仪器中，仪器将自动进行计算并改正由于*i*角而引起的读数改正数。因此，用电子水准仪施测时可以不考虑前后视距差，此仪器测距较便捷，智能化较高，由于现行规范无电子水准仪的作业要求，为使精度更高，更可靠，本工程仍按光学仪器的相关规定进行。

2) 测站观测限差

表 6-14 测站观测限差(mm)

上下丝读数平均值与中丝读数的差		基、辅分划读数之差	基、辅分划所测高差之差	检测间歇点高差之差
0.5cm 刻划尺	1cm 刻划尺			
≤1.5	≤3.0	≤0.3	≤0.4	≤0.7

注：电子水准仪为中丝读数法，各项限差按光学测微法执行。

⑦数据处理及精度评定

平差计算采用专用测量平差软件进行处理。平差计算前，先绘出平差网图，注明线路方向、高差和长度，检查各环线闭合差是否符合限差要求。拟用平沉降量的中误差等精度信息。用严密的整体平差方法求出各监测点的高程及相对上仪器和第一期的沉降量。

(2) 变形监测评估内容

① 监测网评估

变形监测网的布设是否合理，基准点、工作基点的埋设是否满

足变形观测的要求；

② 变形观测点（观测断面）评估

点位布置是否满足要求。

③ 变形观测的方法评估

采用的观测方法，所用仪器设备是否满足要求。

④ 变形观测的精度评估

采用计算复核和平行观测的方法，评定监测精度是否满足要求。

⑤ 变形观测的频度评估

根据变形量大小，评估观测周期是否满足要求。

⑥ 变形观测的数据处理方法评估

对变形监测的统计结果进行分析，评估所用数据处理满足要求。

⑦ 工后变形的分析与评估

根据置信误差椭圆对监测对象的稳定性进行分析评估。

4. 工程控制网复测维护评估

(1) 复测方法评估；

(2) 复测使用的仪器检查评估；

(3) 复测结果的可靠性评估。

七、京沪高速铁路执行新测量技术有关建议

建议：

- 1、设计单位如采用分带投影的方式，必须妥善处理好相邻投影带之间的控制点接边问题，制定具体的方案和措施，并经过轨道和测量专家论证，切实保证轨道平顺性达到规范要求；
- 2、设计单位应提出轨道设计参数的施工地坪参考面，方便施工单位正确施工，建设单位组织验收；
- 3、长大曲线叠加较大的纵向坡度、长大隧道和桥梁等工程地段，必须建立独立的控制网，并与线路控制网正确对接，并由轨道和测量专家充分论证方案的可行性，保证轨道的平顺性达到施工规范要求；
- 4、建立全线的高速铁路坐标框架，方便建设和运营期间的控制网复测和轨道现状的维护测量；
- 5、施工单位应对各级控制网的坐标系统，平差基准，控制点方差阵等数据资料正确理解和掌握，使各阶段的施工组织 and 测量工作符合设计意图和规范规定；
- 6、保证轨道平顺性的测量技术关键，是各个测量过程、坐标系统、施工区段之间的平顺对接，施工单位应经常性地与设计单位交流，取得一致意见；
- 7、施工单位的放样，应根据轨道的施工地坪参考面，对放样元素进行高程改化，保证轨道施工的正确可靠。
- 8、监理单位需要熟识无碴轨道施工测量工作，按照《客运专线无碴轨道铁路测量技术暂行规定》的要求，除完成必要的监理工作外，还应参与专家评估组的工作，与他们一起制订测量评估验收的细则，参与评估验收。

参考文献

- [1] 铁道第二勘察设计院主编. 客运专线无碴轨道铁路工程测量暂行规定. 北京, 中国铁道出版社, 2006.10
- [2] 何华武. 无碴轨道技术. 北京, 中国铁道出版社, 2005
- [3] 赵国堂. 高速铁路无碴轨道结构. 北京, 中国铁道出版社, 2006
- [4] 徐绍铨. GPS 测量原理及应用. 武汉, 武汉大学出版社, 2003
- [5] 王广运等. GPS 精密测地系统原理. 北京, 测绘出版社, 1988
- [6] 王兆祥, 傅晓村, 卓健成. 铁路工程测量. 测绘出版社, 1986, 6
- [7] 卓健成. 考虑原始数据误差的影响时, 工程测量多级控制网精度优化设计的一个方法. 四川测绘, 1987, (2)
- [8] 卓健成. 原始数据误差对工测多级电磁波测距导线(网)精度的影响. 测绘学报, 1988, (3)
- [9] 卓健成. 原始数据误差对工程测量多级平面控制网精度的影响. 西南交通大学学报, 1985, (1)
- [10] 卓健成. 工程控制测量建网理论. 西南交通大学出版社, 1995, 7
- [11] 黄维彬. 近代平差理论及其应用. 解放军出版社, 1992, 7
- [12] 熊介. 椭圆大地测量学. 解放军出版社, 1988, 3
- [13] 同济大学测量系译. 测量作业最优化. 测绘出版社, 1988, 2
- [14] 彭先进. 测量控制网的优化设计. 武汉测绘科技大学出版社, 1991
- [15] 岑敏仪. G 市地下铁道测量控制网的优化设计研究, 西南交通大学硕士论文, 1990, 4
- [16] 岑敏仪. 整数规划在整数规划在施工控制网观测精度优化设计中的应用. 测绘学报, 1992.21(1), 34-41
- [17] Lu Baixiang, Cen Minyi. A Problem in the Application of the Error Ellipsoid. Survey Review, Oct.1993, 239-243
- [18] 顾利亚, 岑敏仪. 施工控制网的优化设计. 西南交通大学学报 97. (2), 162-164
- [19] 陈新焕. 高速铁路控制测量的精度研究. 铁道勘察, 2004, 30(1), 29-31
- [20] 路伯祥等. 隧道导线网测量误差对贯通误差影响值的严密估算方法. 铁道学报, 1989, 11(2)
- [21] 卢建康. 铁路客运专线测量方法探讨. 铁道勘察, 2005, (6), 1-4

- [22]梅熙. GPS 技术建立铁路客运专线平面控制网若干问题探讨. 铁道勘察, 2005, (5), 3-8
- [23]芮东升, 赵陆青. 德国高速铁路轨道技术简介. 铁道标准设计, 2006(增刊), 144-146
- [24]隧渝线无碴轨道综合实验段无碴轨道设计技术条件 (送审稿)
- [25]卢建康等. 无碴轨道工程测量控制网精度研究报告. 2006.7
- [26]朱颖, 米隆, 吴明友主编. 《客运专线无碴轨道铁路工程测量暂行规定》宣贯培训教材. 2007.1.
- [27]铁道第二勘察设计院主编. 新建铁路工程测量规范 (TB10101). 中国铁道出版社, 1999, 5
- [28]铁道第二勘察设计院译. 德铁 DS833.0020 标准.
- [29]铁道第二勘察设计院译. 德铁 885.0120 标准.
- [30]铁道第二勘察设计院译. 德铁 885.1102 标准.
- [31]铁道第二勘察设计院译. 德铁 885.1103 标准.
- [32]铁道第二勘察设计院译. 德铁 RIL 883 标准.