

文章编号 :1006 - 2106(2006)09 - 0027 - 04

无碴轨道施工平面控制主要技术标准的研究^{*}

贺挨宽^{**}

(铁道第三勘察设计院 , 天津 300251)

摘要 研究目的 通过理论研究 ,对无碴轨道施工平面控制测量的主要技术标准提出适宜的建议。

研究方法 结合无碴轨道平顺性铺设精度指标要求 ,从 10 m 弦正矢不超过 2 mm 的限差分析入手 ,依据误差理论 ,对平面控制的主要技术标准进行理论分析和估算。

研究结果 得出了客运专线无碴轨道铺轨控制基标、施工精密导线以及 GPS 平面控制的主要技术标准 ,并提出投影变形控制及施工坐标系统设计的建议。

研究结论 客运专线对无碴轨道铺设精度标准的较高要求 ,进而对施工平面控制测量技术标准要求也显著提高。系统建立适宜精度标准的平面控制基准 ,是保障无碴轨道铺设精度指标顺利实现的前提。

关键词 无碴轨道 平面控制 技术标准

中图分类号 U212 **文献标识码** A

Research on the Main Technical Standards of Horizontal Control for Ballastless Track Construction

HE Ai - kuan

(The Third Survey and Design Institute of China Railway , Tianjin 300251 , China)

Abstract **Research purposes** :Through the theoretical research ,this paper puts forward some suitable suggestions on the main technical standards of horizontal control survey for ballastless track construction.

Research methods :This paper analyzes and estimates the main technical standards of horizontal control based on error theory. Firstly ,it has analyzed the limiting error of 10 m - bowstring versine ,which should be less than 2 mm ,while considering the required precision of regularity of ballastless track laying.

Research results :This paper concluded the main technical standards of the control points for ballastless track laying on passenger dedicated railway lines ,and the horizontal control of precise construction traverse and GPS survey. And the paper also puts forward some suggestions on projection deformation control and the design of construction coordinate system. **Research conclusions** :The passenger dedicated railway lines need higher precision standards on ballastless track laying ,and then the technical standards of horizontal construction control survey should be enhanced. So the establishing of horizontal control datum with appropriate precision standards systematically is the precondition to make sure the precision of ballastless track laying.

Key words :ballastless track ;horizontal control ;technical standards

无碴轨道具有结构连续、平顺、稳定、耐久和少维修的特点 ,我国相继开工建设的京津城际轨道交通工

程等铁路客运专线 ,将广泛应用无碴轨道结构型式。由于客运专线对无碴轨道平顺性铺设精度指标提出

* 收稿日期 2006 - 09 - 27

** 作者简介 贺挨宽 ,1966 年出生 男 高级工程师。

了较高的标准要求,因此合理制定与其要求相匹配的施工平面控制测量技术标准,是需要系统研究解决的问题。

1 无碴轨道平顺性铺设精度指标及误差理论分析

1.1 无碴轨道平顺性铺设精度指标

《京沪高速铁路设计暂行规定》对正线无碴轨道平顺度铺设精度指标的一般规定如表 1 所示。

表 1 无碴轨道平顺度铺设精度指标

| | 高低 | 轨向 | 水平 | 轨距 |
|-------|----|----|----|----|
| 幅值/mm | 2 | 2 | 1 | ±1 |
| 弦长/m | 10 | | | |

指标中 10 m 弦正矢幅值不超过 2 mm 的轨道平面位置要求,是直接影响了施工平面控制技术标准制定的要素。要满足 10 m 弦正矢不超过 2 mm,则理论上轨道任意相邻 5 m 测点,沿轨向上的相对点位误差绝对值不超过 2 mm。

1.2 轨向误差的主要来源

依据无碴轨道的施工工序,轨道竣工后每相邻 5 m 测点的相对点位中误差来源可归纳由以下 3 部分组成:

(1) 用于轨道施工定位的铺轨控制基标引起的误差 m_J 。

(2) 轨道板定位安装引起的误差 m_B 。

(3) 钢轨铺设调校引起的误差 m_G 。

设无碴轨道竣工后,每 5 m 测点的相对点位中误差为 m ,根据误差传播理论,则有:

$$m_J^2 + m_B^2 + m_G^2 = m^2 \quad (1)$$

1.3 m_J 、 m_B 、 m_G 的误差配赋比例

从 m_J 、 m_B 、 m_G 三项误差对轨向误差影响的性质分析,铺轨控制基标作为轨道施工定位测量的直接基准,其引起的误差将以系统误差的表现形式传递至轨向误差之中。而轨道板定位安装及钢轨铺设调校引起误差,更多的是以偶然误差形式传递至轨向误差之中,施工中可以通过相对精密测量及调校手段,来显著地削弱其影响。因此上述 3 类误差中,铺轨控制基标测量引起的误差 m_J ,应作为显著影响予以控制。

在估算上本着偏于安全的原则,按近似等影响配赋 m_J 、 m_B 、 m_G 三者的影响比例,即:

$$m_J = m_B = m_G \quad (2)$$

联合(1)、(2)算式可得,铺轨控制基标对每相邻 5 m 测点的相对点位中误差的影响值为:

$$m_J = \frac{m}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

2 平面控制测量主要技术标准研究

2.1 平面控制网布测原则及分级方案

无碴轨道线路作为狭长的线性工程,施工平面控制应遵循从整体到局部、分级布网,逐级控制的原则进行布设,因此建议控制网布测应按首级 GPS 控制网、加密 GPS 控制网,施工精密导线、铺轨控制基标四级进行。

首级 GPS 控制网为采用长基线构建的全线骨干控制网,其主要作为加密 GPS 控制测量的起算依据。

加密 GPS 控制网在首级 GPS 控制网基础上加密布测,直接作为施工精密导线的起算依据。

施工精密导线为附合在加密 GPS 上的直伸导线,直接作为铺轨控制基标测量和施工放样的依据。

铺轨控制基标为在精密导线基础上,在线路中线附近加密测设的轨道施工控制点,直接作为无碴轨道板定位及轨道调校的依据。

2.2 铺轨控制基标精度估算

铺轨控制基标的设置密度,应便于测量引导无碴轨道定位铺装和轨道误差调校,参照我国地下铁道轨道施工经验,铺轨控制基标平均按边长 $l = 60$ m 设置一个。要保证轨向误差不超出幅值的要求,控制基标相邻点的相对点位中误差 m_l 应满足:

$$m_l = \frac{m}{\sqrt{3}} \sqrt{12} = 2m \quad (4)$$

由于任意相邻 5 m 测点的相对点位中误差 m ,理论上包含了沿线路方向上的纵向分量 m_l 和垂直于线路方向的轨向分量 m_u ,即:

$$m = \sqrt{m_l^2 + m_u^2} \quad (5)$$

m_l 和 m_u 均以 10 弦长轨向幅值($\Delta = 2$ mm)的 $1/2$ 取值,即 $m_u = m_l = \Delta/2 = \pm 1$ mm,代入(5)式得:
 $m = \pm \sqrt{2}$ mm,联合(4)式计算,铺轨控制基标相邻点的相对点位中误差 $m_l = \pm 2\sqrt{2}$ mm。

2.3 施工精密导线精度分析估算

2.3.1 精密导线点相对点位精度

施工精密导线作为铺轨控制基标测设的起算点,考虑便于施工应用、导线最弱点点位中误差控制(± 10 mm)以及有利于电磁波测距精度等因素,根据附合导线测量有关理论,建议施工精密导线以直伸形状沿线路方向布设,导线按边长 $s = 250$ m、边数 $N = 8$ 条、全长 $S = 2\,000$ m 设计。

由于铺轨控制基标为相邻精密导线点间加密测量的控制点,宜采用两端点放样后截距法测设,当铺轨控制基标平均间距 60 m 时,则相邻导线点范围内设

置的铺轨控制基标边数 $n = 250/60 \approx 4$, 则连接精密导线两端点铺轨控制基标的相对点位中误差 m_L 应满足:

$$m_L = \sqrt{4}m_1 = 2m_1 \quad (6)$$

将 $m_1 = \pm 2\sqrt{2}$ mm 代入(6)式得 $m_L = \pm 4\sqrt{2}$ mm;

该误差包含了精密导线起始误差的影响和铺轨基标本身测量误差的影响,按近似等影响的原则,精密导线相对点位中误差 m_s 应满足:

$$m_s = \frac{m_L}{\sqrt{2}} = \pm 4 \text{ mm}$$

2.3.2 精密导线全长相对闭合差

不考虑精密导线两端附合的 GPS 点起始误差的影响,认为精密导线相对点位中误差是由测距中误差 m_d 和测角中误差 m_β 引起的,精密导线相对点位中误差 m_s 可表示为:

$$m_s = \sqrt{m_d^2 + \frac{m_\beta^2 s^2}{\rho^2}} \quad (7)$$

导线经角度闭合差调整,端点的误差为:

$$m_s = \sqrt{Nm_d^2 + \frac{m_\beta^2 s^2}{\rho^2} \left[\frac{N(N+1)(N+2)}{12} \right]} \quad (8)$$

按等影响估算测距中误差 m_d 和测角中误差 m_β 得 $m_d = \pm 2.83$ mm, $m_\beta = \pm 2.33''$, 同时将 $N = 8$, $s = 250$ m 代入(8)式,计算得 $m_s = \pm 23.29$ mm。将其转换为导线全长相对中误差形式,用 f_s 表示:

$$f_s = \frac{23.29}{2\,000\,000} = \frac{1}{85\,873}$$

以2倍的中误差作为限差,则导线全长相对闭合差 $f_w = 1/42\,937$,取整得 $f_w = 1/43\,000$ 。

2.3.3 精密导线测距、测角中误差

对于精密导线两端附合的 GPS 点起始误差的影响,取 GPS 起始数据引起的误差 m_{s_0} 和导线测量本身引起误差 m_{s_1} 影响之比为:

$$\frac{m_{s_0}}{m_{s_1}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (9)$$

则可计算得:

$$m_{s_0} = \frac{1}{\sqrt{3}}m_s \quad (10)$$

$$m_{s_1} = \sqrt{\frac{2}{3}}m_s \quad (11)$$

将 $m_s = \pm 23.29$ mm 代入(11)式得,导线测量本身引起端点误差 $m_{s_1} = \pm 19.02$ mm。根据电磁波测距仪器精度水平的状况,导线测距按采用标称精度为 $2 + 2$ ppmD 全站仪考虑,当导线边长为 250 m 时,仪器对中误差按仪器数据考虑,边长测距中误差 m_{d_1} 为:

$$m_{d_1} = \sqrt{1^2 + 1^2 + 2^2 + (2 \times 0.25)^2} = \pm 2.5 \text{ mm}$$

将 $m_{d_1} = \pm 2.5$ mm, $m_{s_1} = \pm 19.02$ mm 对应代入(8)式,计算得导线测角中误差 $m_{\beta_1} = 1.88''$,取整后 $m_{\beta_1} = \pm 1.8''$ 。

将 $m_{d_1} = \pm 2.5$ mm, $m_{\beta_1} = \pm 1.8''$ 重新代入(8)式,计算得出导线测量本身引起的端点误差为 $m_{s_1} = \pm 18.32$ mm,则 GPS 起始数据误差影响为 $m_{s_0} = \pm 14.38$ mm。

2.3.4 加密 GPS 边长及起始方位精度及首级 GPS 网精度估算

根据精密导线布设形式要求,加密 GPS 网应沿线路方向,每 2 000 m 布设一对相互通视的点对。GPS 点起始误差对导线端点误差的影响,包含导线两端连线 GPS 点的边长误差 m_{SAB} 和导线两端点附合的已知 GPS 边的方位误差 m_α ,其引起导线端点的纵向误差 m_{t_0} 和横向误差 m_{u_0} 可表示为:

$$m_{t_0} = m_{SAB} \quad (12)$$

$$m_{u_0} = \frac{m_\alpha N s}{\rho \sqrt{2}} \quad (13)$$

$$m_{t_0}^2 + m_{u_0}^2 = m_{s_0}^2 \quad (14)$$

式中 N ——导线边数;

s ——导线边长;

m_{s_0} ——GPS 起始数据误差对导线端点误差的影响值。

按近似等影响估算纵、横向误差,即 $m_{t_0} = m_{u_0} = \frac{m_{s_0}}{\sqrt{2}}$,计算得 $m_{t_0} = m_{u_0} = \pm 10.17$ mm,分别代入(12)、

(13)式可得 $m_{SAB} = \pm 10.17$ mm, $m_\alpha = \pm 1.48''$ 。将导线两端连线 GPS 点的边长误差 m_{SAB} 转换为相对精度形式,则相对精度 f_{SAB} 为:

$$f_{SAB} = \frac{10.17}{2\,000\,000} = \frac{1}{196\,656}$$

取整得 $f_{SAB} = 1/200\,000$ 。

根据起始 GPS 边的方位误差 m_α ,GPS 起始边相对精度 $f_{\text{始}}$ 估算为:

$$f_{\text{始}} = \frac{m_\alpha \sqrt{2}}{\rho} = \frac{1.48}{206\,265 \sqrt{2}} = \frac{1}{98\,548}$$

取整后 $f_{\text{始}} = 1/100\,000$ 。

以对加密控制网误差不产生显著影响为原则,估算首级 GPS 网精度,基线相对精度应满足 $1/500\,000$,兼顾加密 GPS 网应用,首级 GPS 网平均基线长度 20 km 为宜。

2.3.5 精密导线最弱点精度验算

精密导线经平差后,由导线测量本身引起的最弱

点的点位中误差为：

$$m_{弱_1} = \sqrt{\frac{Nm_{d_1}^2}{4} + \frac{s^2 m_{\beta_1}^2 N(N+2)(N^2+2N+4)}{\rho^2 192(N+1)}} \tag{15}$$

由于 GPS 点起始误差引起的导线最弱点的点位

中误差为 $m_{弱_0} = \sqrt{\frac{m_{SAB}^2}{4} + \frac{m_{\alpha}^2 N^2 s^2}{8\rho^2}} \tag{16}$

将 $N=8$ $m_{d_1} = \pm 2.5$ mm $s=250$ m $m_{\beta_1} = \pm 1.8''$,
 $m_{SAB} = \pm 10.17$ mm $m_{\alpha} = \pm 1.48''$ 分别代入(15)、
(16)式计算得 $m_{弱_1} = \pm 5.57$ mm $m_{弱_0} = \pm 7.18$ mm ,
精密导线最弱点点位中误差为：

$$m_{弱} = \sqrt{m_{弱_0}^2 + m_{弱_1}^2} = \pm 9.09$$
 mm

验算结果表明导线最弱点点位中误差满足设计
要求 ,对线路平面设计位置及施工构筑物限界不发生
显著影响。

3 平面控制测量主要技术标准建议

综合理论研究推算得出的平面控制测量数据指
标并适当取整 ,对无碴轨道平面控制的主要技术标准
提出建议 ,如表 2 所示。

表 2 无碴轨道平面控制的主要技术标准建议

| 平面控制类别 | 项目 | 标准 |
|----------|----------------------------------|-----------|
| 铺轨控制基标 | 相对点位中误差/mm | ±2.8 |
| 施工精密导线 | 导线长度/km | 2 |
| | 平均边长/m | 250 |
| | 边数 | 8 |
| | 测距中误差/mm | ±2.5 |
| | 测角中误差/(") | ±2.0 |
| | 方位角闭合差限差/(") | ±12 |
| 加密 GPS 网 | 导线全长相对闭合差 | 1/43 000 |
| | 精密导线两端连线 GPS 点基线长/m | 2 000 |
| | 精密导线两端连线 GPS 点 的基线边长相对精度 | 1/200 000 |
| | 精密导线两端点附合的 GPS 点对起始方位精度/(") | ±1.4 |
| | 精密导线两端点附合的 GPS 起始边相对精度 | 1/100 000 |

续表 2 无碴轨道平面控制的主要技术标准建议

| 平面控制类别 | 项目 | 标准 |
|----------|-----------|-----------|
| 首级 GPS 网 | 平均基线长度/km | 20 |
| | 基线边长相对精度 | 1/500 000 |

注 :导线测角中误差考虑了水平角观测误差和起始方位误差的综合影响。

4 结束语

结合无碴轨道平顺性铺设精度指标要求 ,依据误
差理论对平面控制测量主要技术标准的研究估算表
明 ,由于客运专线对无碴轨道平顺性铺设精度标准
的较高要求 ,进而对施工平面控制测量标准的要求
也显著提高 ,在施工前系统建立适宜精度标准的首
级 GPS 网、加密 GPS 网、施工精密导线和铺轨控
制基标 ,是保障无碴轨道铺设精度指标顺利实现
的前提。

此外 ,由于平面控制测量精度标准要求的显著
提高 ,还需要注意在施工坐标系设计中 ,严格控制
投影变形的影响。对于线路纵断面起伏较大而导
致投影变形影响不易控制的段落 ,施工坐标系宜设
计为较窄投影带宽 ,以此来严格控制高斯投影变
形 ,而高程归化投影变形的影响 ,应通过在施工测
量 ,放样中进行正、反改化予以解决。

参考文献：

[1] 铁建设[2004]157 号 ,京沪高速铁路设计暂行规定 [S] .
[2] 李青岳 ,陈永奇 . 工程测量学[M] . 北京 :测绘出版社 ,
1997 .
[3] 孔祥元 ,梅是义 . 控制测量学[M] . 武汉 :武汉大学出版
社 2003 .
[4] 王兆祥 ,宋卓民 . 铁道工程测量学[M] . 北京 :中国铁道出
版社 ,1999 .
[5] TB 10101—99 ,新建铁路工程测量规范 [S] .
[6] GB 50308—1999 ,地下铁道、轻轨交通工程测量规范
[S] .

(编辑 马 丽 张 滨)

无砟轨道施工平面控制主要技术标准的研究

作者: [贺挨宽](#), [HE Ai-kuan](#)
作者单位: [铁道第三勘察设计院, 天津, 300251](#)
刊名: [铁道工程学报](#) [ISTIC](#) [PKU](#)
英文刊名: [JOURNAL OF RAILWAY ENGINEERING SOCIETY](#)
年, 卷(期): 2006(9)
被引用次数: 9次

参考文献(6条)

1. [京沪高速铁路设计暂行规定](#). 铁建设[2004]157号
2. [李青岳](#); [陈永奇](#) [工程测量学](#) 1997
3. [孔祥元](#); [梅是义](#) [控制测量学](#) 2003
4. [王兆祥](#); [宋卓民](#) [铁道工程测量学](#) 1999
5. [TB 10101-1999](#). 新建铁路工程测量规范
6. [GB 50308-1999](#). 地下铁道、轻轨交通工程测量规范

引证文献(9条)

1. [徐桂弘](#), [徐浩](#), [王平](#), [代丰](#) 无砟轨道连续梁桥与道岔纵向相互作用规律的研究[期刊论文]-[铁道建筑](#) 2011(5)
2. [徐小左](#), [刘成龙](#), [杨友涛](#) 无砟轨道精调中CPⅢ网点稳定性检测方法的研究[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2008(9)
3. [郝亚东](#), [赵杰](#), [樊廷春](#) 基于GRP1000的无砟轨道精调测量研究[期刊论文]-[测绘通报](#) 2013(4)
4. [郝亚东](#), [李聚方](#), [刘利](#) 高铁无砟轨道控制网测设和精度控制[期刊论文]-[测绘通报](#) 2011(8)
5. [刘成龙](#), [杨友涛](#), [徐小左](#) 高速铁路CPⅢ交会网必要测量精度的仿真计算[期刊论文]-[西南交通大学学报](#) 2008(6)
6. [彭仪普](#), [应力军](#), [曾群峰](#) 客运专线无砟轨道德国几何尺寸验收标准的测量误差分析[期刊论文]-[铁道科学与工程学报](#) 2008(6)
7. [郝亚东](#), [周建郑](#), [孙请娟](#), [马建设](#) 高铁无砟轨道CPⅢ控制网测量[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2010(11)
8. [陈海军](#), [刘成龙](#), [付恒友](#), [杨峰](#), [杨雪峰](#) 高速铁路轨道基准网平面网构网测量及严密平差方法研究[期刊论文]-[铁道科学与工程学报](#) 2011(4)
9. [黄志伟](#), [刘成龙](#), [王化光](#), [何波](#), [赵梦杰](#) 高速铁路CPⅢ平面控制网相邻区段搭接方法研究[期刊论文]-[铁道科学与工程学报](#) 2010(6)

引用本文格式: [贺挨宽](#). [HE Ai-kuan](#) 无砟轨道施工平面控制主要技术标准的研究[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2006(9)