

文章编号:1005-0523(2021)02-0029-08

有砟轨道线路精测网控制法误差研究

许玉德^{1,2},鲁思成^{1,2},赵梓含^{1,2}

(同济大学 1. 道路与交通工程教育部重点实验室; 2. 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 上海 201804)

摘要:对有砟轨道精测网线形控制中存在的误差进行研究,分析精测网线形控制引起测站坐标轨道不平顺指标的误差大小,其误差产生来源主要包括两个方面:三维平差误差、点位变化误差。计算不同位置、不同数量的CPⅢ点发生变化时本测站、相邻测站平面坐标、高程误差,以及轨道平顺性指标受到的影响。结果表明:测站坐标误差随着CPⅢ点坐标变化量增大而增大,控制点距离测站越近,则其变化,对测站坐标的影响越大,与测站相距较远的控制点,其变化,对测站坐标的影响不敏感;本测站坐标误差最大值分别为1.732,1.668,1.626 mm,相邻测站坐标误差最大值分别为1.500,1.397,1.343 mm;轨道不平顺指标中,误差最大的为轨向,其次为轨距和水平,误差最小的为高低;距离测站最近的CPⅢ点各方向坐标变化量为1.0 mm时,轨距、水平、高低、轨向误差最大值分别为0.559,0.534,0.479,0.582 mm。

关键词:有砟轨道;线形控制;精测网;误差分析

中图分类号:U216.4

文献标志码:A

本文引用格式:许玉德,鲁思成,赵梓含.有砟轨道线路精测网控制法误差研究[J].华东交通大学学报,2021,38(2):29-36.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.20210416.014

Study on Precision Measurement Network Control Method Error of Ballasted Track Line

Xu Yude^{1,2}, Lu Sicheng^{1,2}, Zhao Zihan^{1,2}

(1.Key Laboratory for Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education; 2. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The precision measurement network control method is based on the plane coordinates of the line and the elevation of the railway line alignment control method. According to China's track precision control measurement system and the principle of the precision measurement network control method, the sources of error analysis of the precision measurement network control method mainly include two aspects of three-dimensional adjustment error and point change error. The results of calculating the plane coordinates, elevation error, and track smoothness index of the measured station and adjacent stations when the CPⅢ points change at different positions and different numbers show that the coordinate error of the measuring station increases with the increase of CPⅢ point coordinate change. The closer the control point is to the measured station, the greater the impact of its change on the coordinates of the measured station is; and the changes of the control point farther away from the measured station are not sensitive to the influence of the station coordinates; the maximum value of the coordinate error of the station are 1.732, 1.668, 1.626 mm respectively; the maximum coordinate error of adjacent stations are 1.500, 1.397, 1.343 mm; among track irregularity index, the largest error is the track direction, fol-

收稿日期:2021-01-13

基金项目:中国铁路总公司科技研究开发计划(2017G003-B)

作者简介:许玉德(1965—),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为高速铁路轨道管理与养护维修技术,城市轨道交通基础设施检测技术及安全评估。E-mail:xuyude2000@163.com。

lowed by the gauge and level, the smallest error is the height; When the coordinate change of the nearest CP III point from the station is 1.0 mm in each direction, the maximum values of track pitch, level, height, and track direction errors are 0.559, 0.534, 0.479, 0.582 mm, respectively.

Key words: ballasted track; linear control; precision measurement network; error analysis

Citation format: XU Y D, LU S C, ZHAO Z H. Study on precision measurement network control method error of ballasted track line[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(2): 29-36.

线路维护过程中,会产生精测网控制误差和弦测误差。在弦测法的研究中,程樱^[1],毛晓君^[2]分别提出了三点弦测和四点弦测法。铁路精测网是保证铁路线路施工、轨道养护维修的重要基础,采用精测网进行线路线形控制,是以线路的平面坐标、高程为基准,使线路实际线形与设计线形之间的偏差值达到最小。精测网是线路施工的基础,也是线路养护维修的重要保障。我国铁路工程精密测量控制体系包括平面控制网和高程控制网,轨道控制网(CP III)在轨道的养护维修中发挥重要作用,是轨道测量、养护维修的基础,根据轨道控制网确定自由设站点坐标,进而对线路进行观测得到不平顺值。在测站坐标计算时,通常采用三维测量方法,平差过程会产生一定的误差。另外,线路基础变化会导致 CP III 点位发生偏移,进而导致线路测量结果发生变化,带来线形控制误差。

刘文锋^[3]对高速铁路控制网测量进行了全面的介绍。宗林^[4],樊政^[5],肖伟伟^[6]探讨了 CP III 精测网及轨检小车在轨道精调和养护维修中的应用。郑磊^[7]以汉宜铁路有砟轨道为例,介绍了精测网在养护维修中的应用。王长进^[8]结合客运专线精测网的建设经验和应用效果,对于规范中尚不明确的问题,提出了具有针对性的看法。他指出了在特定条件下,建立 GPS 基站网、埋设深水准点、埋设基岩点的必要性。王智^[9]结合高速铁路精测网评估验收的工作实践,介绍了精测网评估验收的方法和工作范围、具体内容,探讨了精测网评估验收的必要性。

赵景民^[10]提出以三维精密观测网为基础,运用轨道检测小车,对轨道中线坐标及轨面高程等进行精确检测,数据处理,得出在三维精密观测网下,运用轨道检测技术进行轨道检测的可行性和实用性。周东卫^[11]从精密工程测量的几个主要方面入手,提

出精密工程测量管理的关键控制环节及对策,相关经验可对在建、待建铁路工程提供借鉴作用。郑智华^[12]分析了长度变形误差对桥梁和隧道施工测量的影响,并分析了精密控制网络施工控制网络存在的问题,提出了改善建议。何波^[13]通过对分析现有算法的分析,对 CP III 平面网的技术问题进行探讨,对 CP III 平面网平差算法进行了优化。耿中利^[14]对轨道几何位置测量值,自由设站点位置以及轨道平顺性等 3 个方面进行分析,探讨了 CP III 点位变化对于轨道线形测量值的影响。

目前针对有砟轨道的铁路精测网研究较少,与无砟轨道相比,有砟轨道的碎石道床更容易发生位移,这导致线路线形的变化更大。本文对有砟轨道精测网线形控制中存在的误差进行研究,分析精测网线形控制引起测站坐标、轨道不平顺指标的误差大小。

1 精测网误差产原因

1.1 精测网控制原理

为了保证铁路轨道的稳定性的和平顺性,满足施工、养护维修过程中的精度要求,我国建立了一套贯穿于整个线路的施工期、运营期和维护期的完整精密测量体系,即铁路工程测量控制体系,包括平面控制网和高程控制网。

1.1.1 平面控制网

铁路工程测量平面控制网在框架控制网(CPO)基础上分三级布网控制,即基础平面控制网(CP I)、线路控制网(CP II)和轨道控制网(CP III),如图 1 所示。其中,基础平面控制网主要为勘测、施工、运营和维护提供基准;线路控制网主要为勘测和线下工程提供基准;轨道控制网主要是为轨道铺设和线路维护提供基准^[15]。

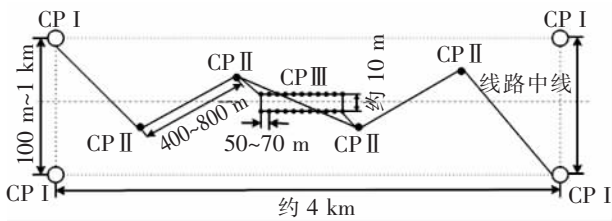


图 1 铁路工程测量平面控制网

Fig.1 Railway engineering survey plane control network

1.1.2 高程控制网

高程控制网分两级布设,第一级为线路水准基点控制网(基岩点、深埋水准点和普通水准点),第二级为轨道控制网(CP III),如图 2 所示。线路水准基点应沿线路布设成闭合路线或闭合环,每 2 km 布设一个水准基点,重点工程(大桥、长隧及特殊路基结构)地段应根据实际情况增设水准基点。点位距线路中线 50~300 m 为宜,水准基点可与平面控制点共用。水准路线一般宜与国家一、二等水准点联测,最长不应超过 400 km,线路水准基点控制网应全线一次布网测量。轨道控制网(CP III)控制点水准测量应附合于线路水准基点,水准路线附合长度不得大于 3 km。CP III 水准网与线路水准基点联测时,应按精密水准测量要求进行往返观测 CP III 控制点水准测量应对相邻 4 个 CP III 点所构成的水准闭合环进行环闭合差检核,相邻 CP III 点的水准环闭合差不得大于 1 mm。

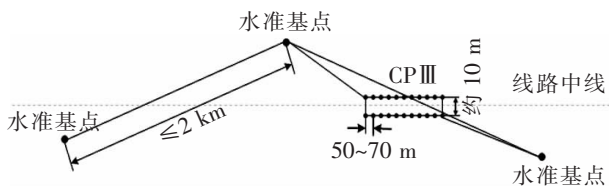


图 2 铁路工程测量高程控制网

Fig.2 Railway engineering survey elevation control network

1.2 误差产生原因分析

精测网的 CP III 点,自由设站示意图如图 3 所示,其中 y 轴为线路纵向,x 轴为横向。点 Q_1 为自由设站点,点 $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8$ 为 8 个已知坐标的 CP III 点,其中 P_1, P_2, P_3, P_4 距离自由设站点 Q_1 较近, P_5, P_6, P_7, P_8 距离较远。y 轴方向上两点间隔 60 m 左右,x 轴方向上两点间隔 10 m 左右。 P_1, P_2, P_3, P_4 与 Q_1 距离相近,均为 30 m 左右; P_5, P_6, P_7, P_8

距离自由设站点 Q_1 较远,且 P_5, P_6, P_7, P_8 与 Q_1 距离相近,均为 90 m 左右。 Q_2, Q_3 为测站 Q_1 的两个相邻测站,两点关于 Q_1 近似对称。

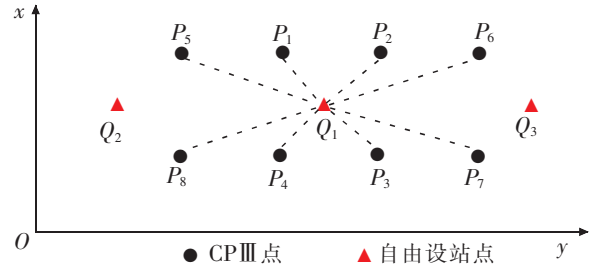


图 3 精测网示意图

Fig.3 Schematic diagram of precision measurement network

在观测过程中,从测站 Q_1 对多个 CP III 点进行观测,得到多个观测值。机械误差、环境变化等因素,导致解算的测站坐标结果会有所偏差,因此需要对计算结果进行平差。平差过程中,无法直接判断各个观测值的权重,对观测值进行定权时,当检验值未达到标准即继续平差,当检验值达到标准,即认为定权结束。因此,精测网控制线形时,一个重要的误差来源是三维平差误差。

当线路基础发生变化时,CP III 点也会随之发生一定的偏移。《高速铁路有砟轨道线路维修规则》^[6] 中规定:CP III 点复测坐标与原坐标相比,差值小于 2 mm 时,沿用原测量成果。即当 CP III 点偏移量小于 2 mm 时,仍然会按照 CP III 点原坐标进行计算,使得测站平面坐标、高程计算结果发生改变,进而导致采集的轨道点坐标发生变化。CP III 点位偏移会导致线路测量结果发生变化,带来线形控制误差。

2 测站坐标计算原理

采用精测网对有砟线路进行测量时,通常将仪器架设在测站点上,每个测站观测多个 CP III 点,对于每个 CP III 点,分别观测水平方向、天顶距、斜距 3 类观测值。根据 CP III 点与测站点之间的几何关系,进行测站坐标计算。

假定点 $P_i(X_i, Y_i, Z_i), P_j(X_j, Y_j, Z_j)$ 为坐标已知的 CP III 点, $P_k(X_k, Y_k, Z_k)$ 为坐标未知的测站。测量仪器架设在测站时,示意图如图 4 所示,此时需要采用

边角后方交会的方法求解测站坐标。在点 P_k 用测量仪器照准点 P_i, P_j , 测量得到水平方向 α_{ki}, α_{kj} 天顶距 β_{ki}, β_{kj} 和斜距 S_{ki}, S_{kj} 。

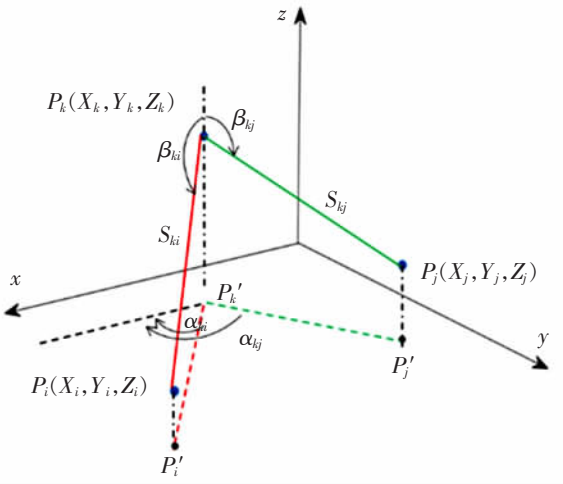


图4 仪器架设在测站示意图

Fig.4 Schematic diagram of the instrument installed at the station

根据余弦定理,得到 $\angle P_k P_i P_j$ 在 xoy 平面的投影角为

$$\angle P_k' P_i P_j' = \arccos \frac{D_{ki}^2 + D_{ij}^2 - D_{kj}^2}{2D_{ki}D_{ij}} \quad (1)$$

$$D_{ij} = \sqrt{(X_j - X_i)^2 + (Y_j - Y_i)^2} \quad (2)$$

$$D_{ki} = S_{ki} \sin A_{ki} \quad (3)$$

$$D_{kj} = S_{kj} \sin A_{kj} \quad (4)$$

则 $P_k P_i$ 边的方位角计算公式为

$$\theta_{ij} = \arctan \frac{Y_j - Y_i}{X_j - X_i} \quad (5)$$

$$\theta_{kj} = \theta_{ij} - \angle P_k' P_i P_j' \pm 180^\circ$$

因此,测站点 P_k 的坐标为

$$\begin{aligned} X_k &= X_i - (S_{ki} \sin \beta_{ki} \cos \theta_{ki} + \varepsilon_k S_{ki} \cos \theta_{ki}) \\ Y_k &= Y_i - (S_{ki} \sin \beta_{ki} \cos \theta_{ki} + \eta_k S_{ki} \cos \theta_{ki}) \\ Z_k &= Z_i - (S_{ki} \cos \beta_{ki} - \varepsilon_k S_{ki} \cos \theta_{ki} - \eta_k S_{ki} \cos \theta_{ki} + i_k - v_k) \end{aligned} \quad (6)$$

3 误差分析

3.1 计算流程

精测网控制法误差分析所需数据见表1所示,其中CPⅢ坐标及其改正值、测站三维坐标等为线路测量基础数据。使用全站仪、轨道静态几何检测小车进行测量,观测得到各类测量值,主要包括:水平方向、天顶距、斜距等3类自由设站数据,以及点

号、里程、轨距、超高、中线实测坐标、左右轨道实测坐标等轨道数据。将基础数据、自由设站数据、轨道实测数据相结合,进行误差分析。

表1 计算数据
Tab.1 Calculated data

数据类型	数据内容	数据来源
基础数据	CPⅢ坐标及其改正值、测站三维坐标等	线路设计数据
自由设站数据	水平方向、天顶距、斜距等	全站仪
轨道实测数据	点号里程、轨距、超高、中线实测坐标、左右轨道实测坐标等	轨道静态几何检测小车

精测网控制法误差的计算流程为:根据CPⅢ点坐标基础数据及其变化量计算得到CPⅢ点变化后坐标,以此为基础对测站点进行平差,得到变化后的测站点坐标,进而计算得到变化后的轨道点数据。对变化前后的测站点坐标进行对比,分析CPⅢ点坐标变化量对测站坐标的影响;对变化前、变化后的轨道数据分别进行平顺性分析,计算CPⅢ点坐标变化量对轨距、水平、垂向、横向轨道不平顺数据的影响,并总结分析其变化规律。计算流程如图5所示。

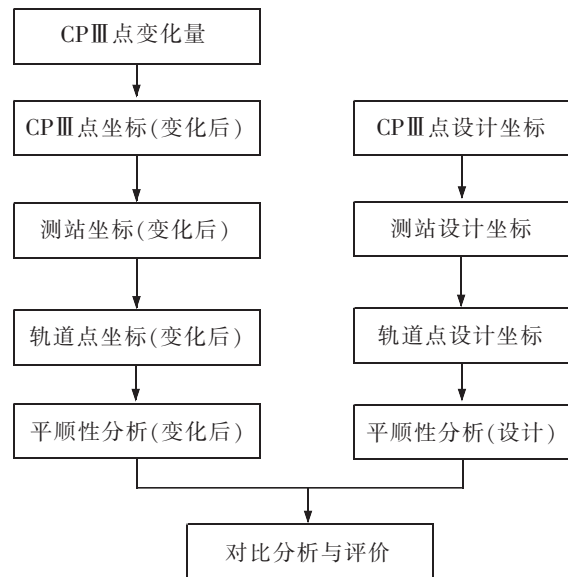


图5 精测网控制法误差分析流程图

Fig.5 Flow chart of error analysis of precision measurement network control method

3.2 测站坐标误差

CPⅢ 点位偏移导致其坐标发生变化, 会直接影响到测站坐标的计算结果。分析 CPⅢ 点位偏移所引起的本测站坐标误差, 分别讨论不同数量、不同位置的 CPⅢ 点发生平面、高程坐标偏移时, 测站坐标的误差。所选取的 8 个 CPⅢ 点中, 1, 2, 3, 4 号点与测站距离相近, 4 个点引起测站坐标误差也是相近的, 可以认为这 4 个点是等效的, 同理, 5, 6, 7, 8 号点也可以看作等效点。由此可知, 有 2 个

CPⅢ 点变化时, 1, 5 号点同时变化与 2, 6 号点同时变化引起的测站坐标误差是相同的, 可以将这两种工况视为等效工况。为了避免工况重复, 将等效工况剔除, 选取具有代表性的点位变化方式进行误差分析。

3.2.1 本测站

CPⅢ 点发生偏移时, 本测站平面、高程坐标误差计算结果见表 2, 表中分别表示测站 x, y, z 3 个方向的坐标误差(下同)。

表 2 本测站坐标误差
Tab.2 Coordinate error of the measured station

变化点号	Δx /mm				Δy /mm				Δz /mm			
	0.5	1.0	1.5	2.0	0.5	1.0	1.5	2.0	0.5	1.0	1.5	2.0
1	0.309	0.618	0.926	1.235	0.223	0.447	0.670	0.894	0.205	0.409	0.614	0.818
5	0.109	0.218	0.327	0.436	0.095	0.189	0.284	0.378	0.083	0.167	0.250	0.333
1,2	0.321	0.643	0.964	1.286	0.237	0.474	0.711	0.947	0.222	0.446	0.668	0.891
1,5	0.250	0.500	0.750	1.000	0.167	0.333	0.500	0.667	0.200	0.400	0.600	0.800
5,6	0.113	0.226	0.340	0.450	0.098	0.196	0.294	0.392	0.111	0.222	0.333	0.444
1,2,3	0.362	0.724	1.086	1.448	0.306	0.612	0.918	1.224	0.297	0.594	0.890	1.187
1,2,5	0.282	0.565	0.847	1.129	0.255	0.509	0.764	1.018	0.238	0.476	0.714	0.951
2,5,6	0.216	0.431	0.647	0.862	0.189	0.377	0.566	0.755	0.173	0.347	0.520	0.693
5,6,7	0.139	0.278	0.417	0.556	0.128	0.255	0.383	0.510	0.106	0.212	0.318	0.424
1,2,3,4	0.433	0.866	1.299	1.732	0.417	0.834	1.251	1.668	0.407	0.813	1.220	1.626
1,2,3,8	0.406	0.813	1.219	1.625	0.372	0.744	1.116	1.488	0.334	0.668	1.003	1.337
1,2,5,6	0.250	0.500	0.750	1.000	0.238	0.476	0.713	0.951	0.215	0.430	0.644	0.859
2,6,7,8	0.188	0.375	0.563	0.750	0.139	0.279	0.418	0.557	0.127	0.253	0.380	0.506
5,6,7,8	0.150	0.300	0.450	0.600	0.132	0.264	0.396	0.528	0.111	0.222	0.334	0.445

将上述计算结果整理为表 3。

表 3 本测站坐标误差最大值
Tab.3 Maximum coordinate error of the measured station

变化点个数/个	Δx	Δy	Δz
1	1.235	0.894	0.818
2	1.286	0.947	0.891
3	1.448	1.224	1.187
4	1.732	1.668	1.626

根据上述计算结果可知,当仅有1个CPⅢ点发生变化时,距离测站最近的1号点引起测站误差较大;当有2个CPⅢ点发生变化时,距离测站最近的1,2号点引起测站误差最大。当有3个、4个CPⅢ

点发生变化时,绘制各CPⅢ点 x,y,z 坐标变化2mm时,本测站 x 方向坐标误差的雷达图,如图6所示,图中标记大小代表CPⅢ点与测站点之间的距离,标记越大代表距离越大。



图6 本测站误差雷达图(单位:mm)

Fig.6 Radar chart of errors for the measured station(Unit:mm)

由图6可知,当有3个、4个CPⅢ点发生变化时,CPⅢ点与本测站距离越小,引起本测站 x 方向误差越大(y,z 方向与之变化趋势相同)。

根据对称关系,当有一个、两个点变化时,本测站与相邻测站的计算结果是相同的,故略去1个、2个点变化时的误差情况。CPⅢ点发生偏移时,相邻测站平面、高程坐标误差计算结果见表4。

3.2.2 相邻测站

表4 相邻测站坐标误差
Tab.4 Coordinate error of adjacent stations

变化点号	Δx /mm				Δy /mm				Δz /mm			
	0.5	1.0	1.5	2.0	0.5	1.0	1.5	2.0	0.5	1.0	1.5	2.0
1,2,3	0.109	0.218	0.327	0.436	0.095	0.189	0.284	0.378	0.083	0.167	0.250	0.333
1,2,5	0.250	0.500	0.750	1.000	0.167	0.333	0.500	0.667	0.200	0.400	0.600	0.800
1,4,5	0.341	0.682	1.023	1.364	0.316	0.632	0.947	1.263	0.300	0.600	0.900	1.200
1,4,6	0.113	0.226	0.340	0.450	0.098	0.196	0.294	0.392	0.111	0.222	0.333	0.444
2,5,6	0.309	0.618	0.926	1.235	0.223	0.447	0.670	0.894	0.205	0.409	0.614	0.818
2,5,8	0.321	0.643	0.964	1.286	0.237	0.474	0.711	0.947	0.273	0.545	0.818	1.091
1,2,3,4	0.113	0.226	0.340	0.450	0.098	0.196	0.294	0.392	0.111	0.222	0.333	0.444
1,2,7,8	0.250	0.500	0.750	1.000	0.167	0.333	0.500	0.667	0.200	0.400	0.600	0.800
1,2,5,8	0.313	0.625	0.938	1.250	0.288	0.576	0.863	1.151	0.276	0.552	0.828	1.104
1,4,5,8	0.375	0.750	1.125	1.500	0.345	0.690	1.034	1.379	0.336	0.672	1.007	1.343
2,3,6,7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2,3,5,8	0.272	0.543	0.815	1.086	0.237	0.474	0.711	0.947	0.222	0.445	0.668	0.891

将上述计算结果整理为表5。

表 5 相邻测站坐标误差最大值
Tab.5 Maximum coordinate error of adjacent stations
mm

变化点个数/个	Δx	Δy	Δz
3	1.364	1.263	1.200
4	1.500	1.397	1.343

根据上述计算结果,相邻测站坐标误差变化趋势与本测站相同。CPⅢ点各方向坐标变化引起本测站、相邻测站坐标误差总体趋势为:控制点距离测站越近,则其变化,对测站坐标的影响越大,与测站

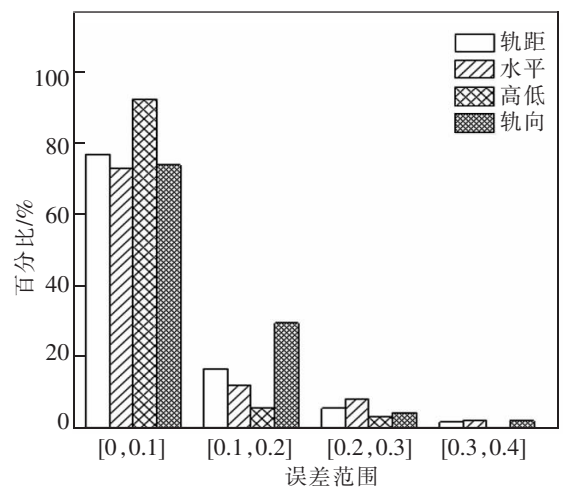
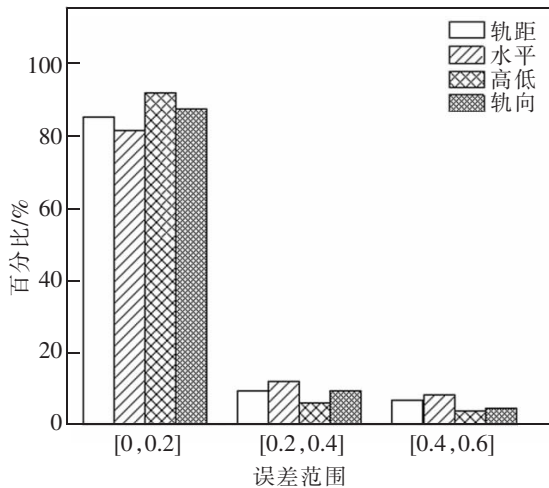
相距较远的控制点,其变化,对测站坐标的影响不敏感;其他因素不变时,测站坐标误差随着坐标变化量增大而增大;其他因素不变时,CPⅢ点横向变化引起测站坐标误差最大,纵向次之,竖向最小。

3.3 不平顺指标误差

CPⅢ点位偏移导致测站坐标发生变化,进而对轨道平顺性指标的测量值产生影响,分别讨论 1 号、5 号 CPⅢ点平面、高程坐标变化引起轨距、水平、垂向、横向测量值的误差。选取 8 个 CPⅢ点为研究范围,即以一长约 180 m 的区段为样本进行讨论分析。

表 6 轨道不平顺指标误差
Tab.6 Track irregularity index error
mm

不平顺指标	点号	最大值	最小值	均值
轨距	1	0.559	-0.583	0.008
	5	0.313	-0.332	-0.002
水平	1	0.534	-0.512	0.001
	5	0.311	-0.343	0.005
高低	1	0.479	-0.522	0.007
	5	0.251	-0.265	-0.004
轨向	1	0.582	-0.615	0.004
	5	0.324	-0.338	-0.005



(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

图 7 高低不平顺指标误差(单位:mm)
Fig.7 Irregularity indicator error (Unit:mm)

轨道不平顺指标误差变化的整体趋势为:对于任意一个单项,CPⅢ点坐标变化量相同时,与测站距离更小的CPⅢ点引起误差更大。轨道不平顺指标中,受到影响最大的为轨向,其次为轨距和水平,影响最小的为高低。

4 结论

1) 根据我国铁路精密控制测量体系及精测网控制法原理,分析得知导致精测网控制法误差产生的主要来源包括两个方面:三维平差误差、点位变化误差。

2) 精测网控制法中,测站坐标误差的整体趋势为:控制点距离测站越近,则其变化,对测站坐标的影响越大,与测站相距较远的控制点,其变化,对测站坐标的影响不敏感。其他因素不变时,测站坐标误差随着坐标变化量增大而增大。相邻测站与本测站坐标误差变化趋势相同,数值不同。

3) 轨道不平顺指标误差变化的整体趋势为:对于任意一个单项,CPⅢ点坐标变化量相同时,与测站距离更小的CPⅢ点引起误差更大。轨道不平顺指标中,受到影响最大的为轨向,其次为轨距和水平,影响最小的为高低。

4) 距离测站最近的CPⅢ点各方向坐标变化量为1.0 mm时,轨距、水平、轨向、高低误差最大值分别为0.559,0.534,0.479,0.582 mm,误差大于0.4 mm的分别占6.62%,7.97%,3.39%,4.42%。

参考文献:

[1] 程樱,许玉德,周宇,等. 三点偏弦法复原轨面不平顺波形的理论与研究[J]. 华东交通大学学报,2011,28(1):42-46.

- [2] 毛晓君,许玉德,周宇. 基于四点弦测法的轨面不平顺检测及复原方法[J]. 华东交通大学学报,2013,30(5):13-17.
- [3] 刘文锋,皮高华. 高速铁路精密轨道控制网(CPⅢ)的建立[J]. 水电施工技术,2010(4):99-105.
- [4] 戴宗林. CPⅢ精测网及轨检小车在高速铁路轨道精调和养护中的应用[J]. 上海铁道科技,2010(4):87-91.
- [5] 樊政. CPⅢ精测网及轨检小车在高速铁路养护中的应用[J]. 测绘与空间地理信息,2018,41(8):210-212.
- [6] 肖伟伟. CPⅢ精测网及轨检小车在高速铁路养护中的应用[J]. 城市建设理论研究(电子版),2016,6(8):4197.
- [7] 郑磊,黄勇. CPⅢ精测网在汉宜铁路有砟轨道养护中的应用[J]. 科技信息,2013(17):119-120.
- [8] 王长进. 高速铁路精测网建设有关问题的探讨[J]. 铁道工程学报,2007(s1):454-456.
- [9] 王智. 高速铁路精测网评估验收的必要性与工作要点[J]. 高速铁路技术,2010(5):27-30.
- [10] 赵景民. 基于三维精测网的轨道检测技术运用[J]. 煤炭技术,2010,29(9):220-221.
- [11] 周东卫. 高速铁路精密工程测量管理关键控制环节及对策[J]. 工程勘察,2015,43(6):66-72.
- [12] 郑智华. 铁路精测网与桥隧施工测量的相关性探讨[J]. 山东工业技术,2018(18):95.
- [13] 何波. 顾及系统误差改正的CPⅢ平面网优化算法研究[D]. 成都:西南交通大学,2012.
- [14] 耿中利. 桥梁段CPⅢ点位变化对轨道线形测量的影响[D]. 成都:西南交通大学,2015.
- [15] 中铁二院工程集团有限责任公司. 高速铁路工程测量规范:TB 10601-2009[S]. 北京:中国铁道出版社,2010.
- [16] 国家铁路局. 高速铁路有砟轨道线路维修规则:铁运[2013]29号[S]. 北京:中国铁道出版社,2013.