

文章编号: 1674—8247(2018)01—0070—06

兰新高速铁路精密工程测量技术体系及特点

周东卫

(中铁第一勘察设计院集团有限公司, 西安 710043)

摘要:高速铁路精密工程测量技术体系已成为高速铁路建设成套技术的一个重要组成部分,在高速铁路设计、施工和运维中具有决定性的作用。兰新高速铁路作为我国较早一次性建成的世界里程最长的高速铁路,其修建具有十分重要的意义。本文结合兰新高速铁路的设计难点,从起算基准统一、工程独立坐标系建立、控制网布设及数据处理、标石埋设及定期复测与维护等方面对兰新高速铁路精密测量技术体系及特点进行了系统论述,以便于广大铁路测量工作者对高速铁路工程测量技术的掌握和使用。

关键词:高速铁路;兰新高速铁路;精密工程测量;技术体系

中图分类号:P228

文献标志码:A

Precise Engineering Survey Technology System and Characteristic for Lanzhou-Urumqi High-speed Railway

ZHOU Dongwei

(China Railway First Surveying and Design Institute Group Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: The precise engineering survey technology system for high-speed railways have become an important part of the complete set of technology for high-speed railway construction, and plays a decisive role in design, construction, operation and maintenance of high-speed railway. Lanzhou-Urumqi Railway, which has been built in one time earlier in China and is the longest high-speed railway in the world, is of great significance. Combined with design difficulties of Lanzhou-Urumqi Railway, this paper systematically has discussed the precise engineering survey technology system and characteristic from the aspects of baseline unification, independent engineering coordinate system, control network layout and data processing, markstone burial and periodic re-measurement and maintenance, which is convenient for the railway surveyors to master and use the engineering measurement technology of high-speed railway.

Key words: high-speed railway; Lanzhou-Urumqi high-speed railway; precise engineering surveying; technology system

高速铁路列车行驶速度 250 ~ 350 km/h, 轨道必须具有非常高的平顺性和精确的几何线性参数、精度要求保持在毫米级范围内的特点, 要求我们必须建立一套与之相适应的、能满足高速铁路勘测设计、施工建设和运营维护各个阶段要求且十分完整、高效、高精度的精密工程测量体系^[1-3]。高速铁路精密工程测量技

术体系已成为高速铁路建设成套技术的一个重要组成部分, 在高速铁路勘测设计、施工建设和运营维护中起到了决定性的作用。以下将对新建兰州至乌鲁木齐第二双线铁路(以下简称“兰新高铁”)精密工程测量技术体系和标准的建立方法及特点进行论述。

收稿日期: 2017-07-04

作者简介: 周东卫(1981-), 男, 高级工程师。

引文格式: 周东卫. 兰新高速铁路精密工程测量技术体系及特点[J]. 高速铁路技术, 2018, 9(1): 70-75.

ZHOU Dongwei. Precise Engineering Survey Technology System and Characteristic for Lanzhou - Urumqi High - speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(1): 70-75.

1 兰新高速铁路精密工程测量设计难点

兰新高铁行经甘肃省、青海省、新疆维吾尔自治区三省区,线路正线全长 1 776.885 km。路基长 1 176.80 km(含站场),路基长度占线路总长度的 66.2%。隧道共计 63 座,长 184.57 km,约占线路总长的 10.4%,其中特长隧道 3 座,长 38.97 km,长隧道 17 座,长 94.16 km。全线采用 CRTS I 型双块式无砟轨道,设计速度为 250 km/h。兰新高铁精密工程测量技术设计主要存在以下难点:

(1)线路长、地区跨越幅度大且控制网沿高速铁路呈带状布设。沿线虽然分布有很多国家 GPS A、B 级点,但由于国家 GPS A、B 级点分布位置、间距、密度、精度兼容性差等各种原因,如直接作为基础平面控制网 CP I 的起算点,将会使 CP I 控制网产生一定的非线性变形,从而降低控制网点位之间的相对精度,无法满足勘察设计、施工和运营维护各阶段的精度要求。

(2)对边长投影变形值要求高,要求边长投影变形值不大于 10 mm/km。兰新高铁自西向东依次穿过陇西黄土高原区、祁连山中高山区和河西走廊山前冲、洪积平原区。祁连山、大板山等山区地势陡峻、山高谷深、地形复杂,山区高差起伏大,边长投影变形按照不超过 10 mm/km 进行控制存在诸多不利因素,投影变形设计难度大。

(3)控制网规模大,如何保证全线控制网的精度均匀一致、无缝衔接将是决定无砟轨道能否实现平顺衔接的重要条件。

(4)部分地段穿越陇西黄土高原区和祁连山中高山区,地势陡峻、山高谷深、地形复杂,海拔最高处达到 4 400 m。高原和高山地区垂线偏差、大气旁折光和隧道实际贯通误差对长大隧道洞内贯通 CP II 导线网测量和平差的影响呈现系统性,对高速铁路工程施工控制很不利。

(5)地处西北严寒地区,土壤冻结深度较大,沿线分布的特殊岩土主要为湿陷性黄土(粉质黏土)、盐渍土、软土、松软土等。在上述地区如何设计、埋设控制点标石,如何保证标石的长期稳定,为勘测设计、施工、运营提供长期稳定可靠的控制基准,从而为实现“三网合一”奠定良好的基础也是项目实施过程中的一个难点。同时实施埋桩时在冬季,如何保证桩橛埋设的深度和稳定性也是一个难点。

(6)建设工期长,从全面开工到交付运营时间跨度长达五年,要实现“三网合一”必须做好施工期间精密测量控制网的复测与维护工作,加强精密测量控制网的桩位补测、成果更新与加密点测量工作,施工期间的精测网复测与维护工作也是项目能否顺利建成的重要条件。

2 兰新高速铁路精密工程测量技术体系的建立及特点

2.1 建立“三网合一”精密工程测量技术体系

兰新高铁线路长度长,从勘测设计到交付运营时间跨度较长,各级平面高程控制网不仅需要满足勘测设计的要求,还必须能够满足线下工程施工、线上轨道施工以及运营养护维修的要求,在勘测设计、施工建设和运营维护各阶段均能确保高速铁路轨道空间几何形位的一致性、高平顺性和精确的几何线性参数^[4]。考虑到兰新高铁工程建设和日后运营的需要,全线在勘测设计阶段建立了完整、统一的平面坐标系统和高程基准,并且将其应用于施工建设和运营维护过程中,实现了勘测设计控制网、施工建设控制网和运营维护控制网“三网合一”。全线平面坐标系统通过与沿线国家 GPS A、B 级点进行联测统一纳入 CGCS2000 国家大地坐标系统,建立基于 CGCS2000 坐标系统基本椭球参数、满足边长投影变形值 ≤ 10 mm/km 投影变形的高斯窄带任意中央子午线和抵偿高程面的工程独立坐标系统;全线高程系统通过与沿线国家一、二等水准点进行联测统一纳入 1985 国家高程基准,后续线下工程施工、线上无砟轨道铺设以及精测网复测维护采用与勘测设计完全相同的坐标高程系统和起算基准,确保了坐标和高程系统统一、起算基准统一。

兰新高铁全线按照分级布网、逐级控制的原则建立了带状平面和高程精密测量控制网,主要包括基础框架平面控制网(CP0)、基础平面控制网(CP I)、线路平面控制网(CP II)、线路水准基点网和轨道控制网(CP III),并将其应用于高速铁路工程勘测设计、施工、竣工验收及运营维护测量全过程。依据 GB/T 18314—2009《全球定位系统(GPS)测量规范》^[5]以及哈大客专工程经验进行 CP0 框架控制网的设计、施测和数据处理,CP0 控制网 GPS 测量按照四个时段、每个时段 300 min 设计,基线边方向中误差 $\leq 0.7''$,最弱边相对中误差 $\leq 1/1\,000\,000$ 。依据铁建设[2006]189号《客运专线无砟轨道铁路工程测量暂行规定》^[6]要求进行

CPI、CPⅡ平面控制网的施测。其中,CPI按照铁路B级网要求施测,基线边方向中误差要求不超过 $1.3''$,最弱边相对中误差不超过 $1/170\,000$;CPⅡ按照铁路C级网要求施测,基线边方向中误差不超过 $\pm 1.7''$,最弱边相对中误差不超过 $1/100\,000$ 。依据TB 10601-2009《高速铁路工程测量规范》^[7]要求进行CPⅢ平面控制网的施测,相邻点的相对中误差不超过 1 mm ,可重复测量精度不超过 $\pm 3\text{ mm}$ 。线路二等水准基点控制网依据GB 12897-2006《国家一、二等水准测量规范》^[8]中二等水准测量的技术要求施测。CPⅢ高程控制网采用精密水准测量等级进行施测。各级控制网的设计实现了测量精度的协调统一。

兰新高铁按照分级布网、逐级控制的原则首次建立了长度超过 $1\,700\text{ km}$ 大规模高速铁路精密测量控制网,利用CPⅠ基础平面控制网进行线路走向控制、利用线路水准基点网进行线路标高控制,从而使得勘测设计、施工建设和运营维护各阶段平面和高程系统统一、起算基准统一、测量精度协调统一,达到无砟轨道控制网“三网合一”的目标。

2.2 建立边长投影变形值不大于 10 mm/km 的工程独立坐标系统

高速铁路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一致,即所谓的尺度统一。边长投影变形值太大对高速铁路工程施工控制很不利,对工程施工的影响呈系统性。因此,高速铁路工程测量不能采用国家统一坐标系统,必须建立基于一定抵偿高程面的工程独立坐标系统。依据铁建设[2006]189号《客运专线无砟轨道铁路工程测量暂行规定》的要求,边长投影变形值需控制在 10 mm/km 之内,即把高程投影与高斯投影引起的边长变形值之和控制在 $1/100\,000$ 才能满足高速铁路工程建设的需要。

兰新高铁自西向东依次穿过陇西黄土高原区、祁连山中高山区和河西走廊山前冲、洪积平原区。祁连山、大阪山等山区地势陡峻、山高谷深、地形复杂,山区高差起伏大,边长投影变形值按照不大于 10 mm/km 进行控制存在诸多不利因素,投影变形设计难度大。为了最大限度的削弱投影变形,使其满足工程测量的精度要求,兰新高铁平面坐标系统通过与国家GPS A、B级点进行联测统一纳入CGCS2000国家大地坐标系统,使之成为国家控制网的组成部分;然后通过设置任意抵偿高程投影面、移动中央子午线及压缩投影带宽

相结合的方法来控制高程归化变形和高斯投影变形,并采用椭球膨胀法构建基于CGCS2000基本椭球参数的工程椭球,即参考椭球长半轴直接加投影面大地高并保持其扁率、定位和定向条件不变,这种方法已在高速铁路工程中得到应用。长度综合变形是高程归化变形和高斯投影变形的代数和。为了控制长度综合变形,根据最小二乘原理,在使得长度综合变形 V_s 平方之和为最小的条件下直接求得相应的抵偿高程面 H'_m 和抵偿零点 Y_0 ,求得最佳的抵偿效果,将长度变形的抵偿转换为一种合理平差。这比选择测区平均高程面作为抵偿高程面、选择测区平均中心线作为投影中央子午线的常规做法更加科学、合理,能最大限度的控制长度投影变形,减少全线的投影分带数量。兰新高铁兰州至乌鲁木齐段平面坐标系统采用基于CGCS2000基本椭球参数的工程独立坐标系,任意中央子午线和抵偿高程面的高斯正形投影,投影分带位置设计在直线上,使长度投影变形值小于 10 mm/km 。全线共划分为79个投影带,相邻带重叠处的边长较差相对精度较高,能够很好地保证相邻投影带放样同一点位的一致性,投影带划分与抵偿高程面的选择合理,满足了无砟轨道施工测量的要求。

2.3 精密测量控制网的分级布网与整体平差

兰新高铁按照分级布网、逐级控制的原则建立了长度超过 $1\,700\text{ km}$ 的大规模带状平面和高程精密测量控制网,其中平面控制网共分为四级,分别为基础框架控制网(CP0)、基础平面控制网(CPⅠ)、线路平面控制网(CPⅡ)和轨道控制网(CPⅢ),为高速铁路工程勘察设计、施工建设和运营维护各阶段提供平面坐标控制基准;高程控制网分为两级,分别为线路水准基点网和CPⅢ精密水准网,为高速铁路工程勘察设计、施工建设和运营维护各阶段提供高程控制基准。

兰新高铁线路长、地区跨越幅度大且平面控制网沿线路呈带状布设,为了确保CPⅠ满足高速铁路各阶段定位的精度要求,结合哈大客专工程经验,并参照GB/T 18314-2009《全球定位系统(GPS)测量规范》中A级网的要求,采用GPS精密定位测量方法全线一次建立了高精度的CP0框架控制网,作为高速铁路平面控制测量的起算基准,也为平面控制网复测提供了一套稳固的、高精度的起算基准,克服了国家三角点精度和兼容性差以及点位分布不均的问题。框架平面控制网(CP0)点按 50 km 左右设置一座,距线路在 10 km 以内,在交通便利处及便于长久保存处,全线共设置

CP0 控制桩 43 座,点位布设时直接利用沿线能满足 CP0 点位要求的国家 GPS A、B 级点和国家三角点,确保了 CP0 桩位的能长久保存和长久稳定可靠。框架网基线解算时采用 GAMIT 10.34 高精度解算软件,采用基准站技术,将乌鲁木齐(URUM)、乌兰巴托(ULAB)、拉萨(LHAZ)和武汉(WUHN)IGS 连续运行参考站为基准点进行基线解算,并采用 AUTO CLEAN 周跳自动修复技术探测与修复周跳,从而获取精确的基线解算结果^[9-11]。框架基线网平差时选择了 10 个兼容性较好的国家 GPS A、B 级点进行约束平差,将其它 CP0 点均作为未知点,在国家 CGCS2000 系统下进行三维整体平差处理,保证了控制网的相对精度,解决了收集的部分已知点精度偏低问题,获得了高精度的 CP0 成果,确保了控制网基准统一、精度均匀一致。

兰新高铁 CP I 控制点沿线路走向布设,约小于 4 km 布设一个,隧道长度大于 1 km 时,隧道口 CPI 布设一对点,对点间距离至少大于 800 m,困难时不小于 700 m;线路控制网(CP II)点沿线路走向布设,点间距宜为 800~1 000 m。全线布设了统一的线路二等水准基点高程控制网,分为深埋(基岩)水准点和普通水准点两种。深埋(基岩)水准点在路线 1 km 范围内沿线路走向每隔 20 km 左右布设一个,布设在交通便利处及便于长久保存处,并将深埋(基岩)点与沿线国家一、二等水准点进行联测,统一纳入 1985 国家高程基准。普通水准点大部分和 CP I、CP II 点共用,部分山区水准点单独埋设,普通水准点每 2 km 左右设置一个。全线共埋设 CP I 点 564 个,CP II 点 1649 个,深埋(基岩)水准点共设置 52 座,二等水准路线长度单程共计 3 900 km。CP I 控制网基线解算采用广播星历为起算数据,采用徕卡公司的商用软件 LGO 7.0 进行基线解算,解算采用双差固定解,加入了电离层和对流层改正模型,解算完毕进行了同步环、异步环和重复基线的基线质量检验,基线质量满足规范要求后,以联测的 CP0 三维空间直角坐标作为起算数据对 CP I 基础控制网进行全线三维整体约束平差,CP II 基线网平差以联测的 CP I 为起算数据进行分段三维约束平差,然后将三维空间直角坐标进行分带投影转换成二维平面坐标供勘测设计和施工使用。全线二等水准基点高程控制网也进行了整体贯通和严密平差。通过采用上述先进的数据处理方法,获得了高精度的 CP I、CP II 和二等水准测量成果,实现了全线控制网的基准统一、精度均匀一致和无缝衔接,满足了高精度工程定位的

要求。

兰新高铁完成了长度超过 1 700 km 大规模高速铁路精密测量控制网的建设,控制网建设采用了整体施测以及全线平面网三维整体平差、分带投影转换二维平面坐标和全线二等水准网的整体贯通平差的先进数据处理方案,实现了全线控制网的精度均匀一致、无缝衔接。

2.4 建立隧道洞内 CP II 导线控制网

兰新高铁部分地段穿越陇西黄土高原区和祁连山中高山区,地势陡峻、山高谷深、地形复杂,海拔最高处达到 4 400 m。高海拔长隧道工程主要有高家山隧道、陈家山隧道、福川隧道、达坂山隧道和祁连山隧道等。隧道施工时需要根据隧道相邻两开挖洞口间的长度来对洞内施工导线测量的等级进行设计,建立隧道洞内控制网以指导隧道贯通施工,但隧道贯通过程中建立的施工导线一般精度较低,无法满足高速铁路轨道铺设的要求。因此,为了满足无砟轨道铺设的精度要求,专门整体贯通建立隧道洞内 CP II 控制网,以此作为 CP III 轨道控制网测设的起算基准,从而有效控制无砟轨道的铺设精度。隧道洞内 CP II 控制网在隧道整体贯通、沉降变形稳定后测设,CP II 导线网的布设等级、网型根据隧道长度来确定。垂线偏差、大气旁折光和隧道实际贯通误差对长大隧道洞内贯通 CP II 导线网测量和平差的影响呈现系统性,对高速铁路工程施工控制很不利。为此,兰新高铁在制定测量方案时综合考虑了垂线偏差、大气旁折光和隧道实际贯通误差对 CP II 导线网测量和平差的影响,并在测量和数据处理过程中采取了必要的改进措施及误差修正方法,测量成果满足了隧道建筑限界和无砟轨道铺设平顺性的要求。

在建立隧道洞内 CP II 贯通导线控制网过程中

(1)为了减弱垂线偏差对洞内 CP II 导线网测量的影响,通过外业观测时将 GPS 洞外平面控制点尽量埋设在洞口等高面上,必要时在原 CP I 控制点的基础上重新布设与洞口基本等高的加密点,在引测进洞测量时采用徕卡 0.5"级高精度全站仪,并在置镜点使用 7"甚至更精确的水准泡,且在测量前作好检校,以便削弱垂线偏差的影响。

(2)为了减弱旁折光的影响,观测视线要远离隧道侧壁,隧道控制点布设时,从曲线隧道开始设计控制点的布设位置,不仅需要考虑 CP II 点位距侧壁的距离,曲线隧道更要注意使曲线内侧的两点间的视线应

远离侧壁在1.5 m以上,有时还需将CPⅡ点位设在隧道中间的排水沟顶。在数据处理过程中发现角度闭合差超限不能满足要求时,剔除受大气折光影响的观测方向、保留边长,避免了多次重测、返工影响工期,削弱了旁折光的影响,提高了控制网成果的可靠性。

(3)为了使得隧道洞内贯通CPⅡ导线网测设的隧道中线与实际隧道施工中线偏差较小,在测量过程中除了采取一切措施要尽量提高CPⅡ测量的精度以外,还将洞内CPⅡ与洞内施工导线点进行联测并分析两者的差异情况,并将部分洞内施工导线点作为坐标约束点,制定了洞内CPⅡ合理的平差方案,在保证满足隧道建筑限界的前提下,同时也满足了无砟轨道铺设平顺性的要求。

2.5 大规格标石与深埋钻孔桩相结合埋设标石

兰新高铁地处西北严寒地区,冻土深度较大,控制网点基础的稳定性决定了成果的精度和可靠性。本项目控制网点桩橛根据不同等级进行分别制作、埋设,其中,CPⅠ、CPⅡ平面控制网点以及线路水准基点网控制点均采用大规格标石(顶面200 mm×200 mm、底面300 mm×300 mm、高950 mm),标石埋深在冻土深度下0.5 m。线路沿线冻土深度从兰州的1.03 m延伸至玉门的2.21 m,再延伸到乌鲁木齐的1.62 m。桩橛为加钢筋混凝土预制桩,预制桩周边及底部浇筑混凝土,埋设深度达1.5~2.7 m。

兰新高铁沿线分布的特殊岩土主要为湿陷性黄土(粉质黏土)、盐渍土、软土、松软土等,在上述地段间隔20 km左右布设了深埋水准点,深埋水准点距离中线1 km以内,共设置52座,深埋水准点采用钻孔、套管的工艺,深埋水准点标底均进入稳定的持力层或微风化基岩1~2 m,最浅埋深为17.6 m,最深埋深达52.4 m。

兰新高铁首次在西北严寒地区采用大规格标石与深埋钻孔方式埋设控制点标石,保证了标石的长期稳定,使勘测、施工、运营维护以及全线沉降观测使用相同的控制点,为勘测设计、施工、运营提供了长期稳定可靠的控制基准,为实现“三网合一”奠定了良好的基础。

2.6 精密测量控制网施工期间定期复测与维护

高速铁路“三网合一”精密测量技术体系要求勘测设计控制网、工程施工控制网、运营维护控制网坐标高程系统统一、起算基准统一和测量精度的协调统一。兰新高铁线路长度长,从全面开工到交付运营时间跨

度达五年多之久,要实现“三网合一”必须做好施工期间精密测量控制网的复测与维护工作,加强精密测量控制网的桩位补测、成果更新与加密点测量工作。通过将补测控制点和点位更新后的新成果合理无缝地纳入到原有控制体系中,实现与原有控制网坐标高程系统统一、起算基准统一和测量精度协调统一,是实现“三网合一”的基础。

兰新高铁在CPⅢ建网前,根据施工需要对全线控制网进行了全面复测,外业观测及数据处理于2012年6月至2013年2月完成。施工期间的不定期复测由设计单位会同施工单位实施完成。工程静态验收前,按照业主和路局要求,对兰新高铁全线控制网进行了全面复测并完成了竣工静态验交,外业观测及数据处理于2014年4月至2014年7月完成。补桩点全部参与复测网平差计算,复测成果与原控制网成果比较后,CPⅠ、CPⅡ控制点复测坐标与原控制网坐标差值满足点位坐标差小于20 mm和15 mm的要求及相邻点坐标差之差的相对精度满足1/130 000和1/80 000的精度要求时,采用原测成果;CPⅠ补桩点采用相邻稳定的CPⅠ点作为约束点进行平差处理,CPⅡ补桩点采用相邻稳定的CPI和CPII点作为约束点进行平差处理,采用同精度内插方法计算新成果。新补设的高程控制桩点,在水准复测时纳入复测附和水准路线,以深埋水准点为基准,计算附和路线高差闭合差,在满足二等水准高差闭合差的前提下,检查复测水准点的稳定性,对新补设的高程控制桩点采用附和水准路线两端联测的复测稳定水准点为起算点,同精度内插的方法平差计算新点高程成果。通过全面系统的复测维护了全线精密控制测量体系的完整性,满足了高速铁路施工建设和运营管理的需要。

3 结束语

作为国内开工较早、世界一次性建成里程最长的高速铁路,兰新高铁具有建设周期长、技术标准高、建设工期紧和工程建设难度大等特点,精密测量涵盖了“三网合一”精密测量技术体系、工程独立坐标系统、超大规模精密测量控制网建设、特殊地区控制点标石埋设以及精密测量控制网定期复测与维护等高速铁路修建测量关键技术,将精密控制测量技术运用于如此庞大的系统工程中,对于测量技术的发展、提升和创新具有重要意义,也为高速铁路工程测量规范的修订与完善提供了必要参考。

通过技术创新、严密筹划、精心施测和多方案比
算,确保了兰新高铁精密测量建网和复测成果满足线
下工程施工、线上无砟轨道铺设和精调、构筑物结构变
形监测的需要,实现了勘测设计、施工建设和运营维护
各阶段控制网的“三网合一”,按时完成了各项任务,
成果正式交付使用后,经兰新高铁甘青公司和新疆公
司组织的测量咨询评估单位评估验收,证明测量精度
满足要求,成果正确可靠,效果良好。

参考文献:

[1] 卢建康,刘华. 高速铁路精密工程测量技术体系的建立及特点
[J]. 铁道标准设计, 2010,54(S1): 70-73.
LU Jiankang, LIU Hua. Establishment and Characteristics of Precise
Engineering Survey Technology System and Characteristic for High -
speed Railway [J]. Railway Standard Design, 2010, 54 (S1):
70-73.

[2] 卢建康,任自珍,岑敏仪. 客运专线无砟轨道施工平面控制网优化
设计[J]. 铁道工程学报, 2007,24(8):49-52.
LU Jiankang, REN Zizhen, CEN Minyi. Optimum Design of Plane
Control Net for Construction of Ballastless Track of Passenger
Dedicated Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society,
2007, 24(8):49-52.

[3] 安国栋. 高速铁路精密工程测量技术标准的研究与应用[J]. 铁道
学报, 2010,32(2):98-104.
AN Guodong. Study on Technical Standard for Precise Engineering
Surveying of High - speed Railways and Its Applications [J]. Journal
of the China Railway Society, 2010, 32(2): 98-104.

[4] 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.
ZHOU Dongwei. The Key Control Elements for Precise Engineering
Surveying Management of High-speed Railway [J]. Geotechnical

Investigation & Surveying, 2015, 43(6): 66-72.

[5] GB/T 18314-2009 全球定位系统(GPS)测量规范[S].
GB/T 18314-2009 Code for global position system (GPS) surveys
[S].

[6] 铁建设[2006]189号, 客运专线无砟轨道铁路工程测量暂行规
定[S].
Tie Jian She[2006] No. 189, Provisional Regulations for Survey of
Ballastless Track Engineering Surveying for Passenger Dedicated Line
[S].

[7] TB 10601-2009 高速铁路工程测量规范[S].
TB 10601-2009 Code for Engineering Survey of High Speed Railway
[S].

[8] GB/T 12897-2006 国家一、二等水准测量规范[S].
GB/T 12897-2006 Code for The First and Second Order Leveling
[S].

[9] 任晓春,周东卫. 高速铁路 CP0 基线解算中天顶对流层参数估计
研究[J]. 铁道标准设计, 2014,58(11): 36-40.
REN Xiaochun, ZHOU Dongwei. Research on Estimation of
Parameters of Zenith Troposphere with CP0 Baseline Resolution for
High - speed Railway [J]. Railway Standard Design, 2014,
58(11): 36-40.

[10] 周东卫. 高速铁路 CP0 基线解算中起算点坐标精度研究[J]. 铁
道标准设计, 2014,58(12): 40-44.
ZHOU Dongwei. Research on Accuracy of Initial Point Coordinate in
CP0 Baseline Resolution for High-speed Railway [J]. Railway
Standard Design, 2014, 58(12): 40-44.

[11] 周东卫. 高速铁路 CP0 框架控制网数据处理模式与方法研究
[J]. 铁道标准设计, 2015,59(3): 11-16.
Zhou Dongwei. Research on Data Processing Mode and Method for
CP0 Frame Control Network of High-Speed Railway [J]. Railway
Standard Design, 2015, 59(3): 11-16.

(编辑:车晓娟 张红英)

(上接第 65 页)

[2] TB 10002-2017 铁路桥涵设计规范[S].
TB 10002-2017 Code for Design on Railway Bridge and Culvert
[S].

[3] 彭坤,陶连金,高玉春,等. 盾构隧道下穿桥梁引起桩基变位的数
值分析[J]. 地下空间与工程学报,2012,8(3):485-489.
PENG Kun, TAO Lianjin, GAO Yuchun, et al. Numerical Analysis of
Bridge Pile Deformation Caused by Shield Tunnel Construction [J].
Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8 (3):
485-489.

[4] 江帆,胡群芳,黄宏伟. 盾构隧道施工 Plaxis 2D 数值模拟分析
[J]. 现代隧道技术,2010,(S1):366-369.

JIANG Fan, HU Qunfang, HUANG Hongwei. Plaxis 2D Numerical
Simulation Analysis of Shield Tunneling Construction [J]. Modern
Tunnelling Technology, 2010,(S1):366-369.

[5] 费康,张建伟. ABAQUS 在岩土工程中的应用[M]. 北京:中国水
利水电出版社,2010.
FEI Kang, ZHANG Jianwei. Applications of ABAQUS in Soil
Engineering[M]. Beijing: China WaterPower Press,2010.

[6] TB 10002.3-2005 铁路桥涵钢筋混凝土和预应力混凝土结构设
计规范[S].
TB 10002.3-2005 Code for Design on Reinforced and Prestressed
Concrete Structure of Railway Bridge and Culvert[S].

(编辑:车晓娟 苏玲梅)