

高铁测量控制网及无砟轨道精调施工研究

蒋钰斌 曹洪兴 崔彦阳

中铁三局集团线桥工程有限公司 河北 廊坊 065200

【摘要】：高速铁路的运营安全与乘坐舒适性，根植于轨道几何状态的毫米级精度。无砟轨道结构作为现代高铁的核心技术，其刚性强、后期调整难度大的特性，对施工阶段的精度控制提出了近乎严苛的要求。基础测量控制网的精度，作为整个线路工程的“基骨”，直接决定了轨道板铺设、轨道精调等后续所有工序的最终质量。任何源头上的微小偏差都可能在施工链中被放大，对行车平顺性和结构耐久性构成潜在威胁。因此，本文的研究旨在深入研究高铁测量控制网及无砟轨道精调施工，为同类型复杂地质条件下的高速铁路工程建设提供有益的参考，以促进我国高铁建造技术的精细化与标准化发展。

【关键词】：高铁；测量控制网；无砟轨道；精调施工

DOI:10.12417/2811-0528.25.20.060

引言

高速铁路的建设与运营对轨道几何状态的精度要求达到了毫米级，这一目标的实现依赖于科学严密的测量控制体系与高标准的轨道施工技术。测量控制网作为线路工程的空间基准，是贯穿设计、施工、验收全过程的核心环节。它承担着将国家坐标与高程基准精确传递至施工现场的任务，还为轨道板铺设、精调等工序提供了稳定的参照框架^[1]。在无砟轨道结构中，由于其整体刚性高、后期调整难度大，任何初期施工偏差都可能在运营中被放大，从而影响列车运行的平顺性与结构的耐久性。因此，建立高精度、长期稳定的测量控制网，并配合闭环化的精调施工工艺，是保障高速铁路质量与安全的关键路径。

1 高铁测量控制网的建立方法

1.1 首级控制网的选点与埋石

选点工作是一项系统性的地质与环境评估，勘测人员需沿线进行地毯式踏勘，甄选出那些基岩完整、构造稳定、能够最大限度规避断裂带、滑坡体及未来城市规划影响的理想位置。点位间的布局同样考究，需要构成边长适宜、形态优良的几何网形，确保 GNSS 观测的解算强度与精度均匀分布于整个线路走廊。一旦点位敲定，接踵而至的埋石工艺是对工程质量的终极考验。标石通常采用双层隔离式钢筋混凝土结构，其主桩基础深植于稳定岩土层之下，与地表浮土及测量人员站立的观测台完全脱开，以此从物理构造上消除地面振动、季节性冻融等

带来的微小位移干扰。桩顶则固化了高精度的强制对中基座，为测量仪器提供了一个几乎绝对稳固的“零点”。这种从选址到构造的极致追求，可以形成一个超高稳定性的三维坐标框架，为后续 CPII、CPIII 等各级加密控制网的布设与联测提供唯一且可靠的溯源基准。

1.2 加密控制网的布设与测量

在高速铁路建设的精密工程测量中，加密控制网的布设与测量可确保线路平顺、结构精确。这一过程始于对既有高等级控制点的复核与引接，通过严密的静态 GPS 观测和精密三角高程测量，将国家或区域坐标系与高程基准精确传递至线路沿线。随后，在线路两侧根据地形地貌、通视条件和施工需求，以大约 200 至 500 米的间距，采用强制对中设备布设 GPS-B 级或更高精度的加密控制点，形成一个贯穿全线的、由高精度边角网和高程网构成的统一测量基准。为保证网形的强度与可靠性，点位选取需充分考虑其长期稳定性，避开路堤、软土等易变形区域。

在实际测量作业中，除了利用全球导航卫星系统（GNSS）进行三维坐标的快速获取，还需要联合使用高精度全站仪进行边角观测，并配合精密水准仪进行高程传递，形成多源数据融合与一体化平差。整个过程在于通过严密的观测方案、精良的仪器设备以及基于最小二乘法原理的网平差计算，对观测数据进行处理，精确评定网点成果精度，消除或削弱各种系统误差与偶然误差的影响，最终建立起一个满足高速铁路毫米级施工精度要求、长期稳定可靠的测量控制体系。

作者简介：姓名：蒋钰斌；出生年月：1985 年 7 月；性别：男；民族：汉；籍贯：四川省蒲江县（省、县级名）；学历：大学本科；职称：高级工程师；从事的研究方向或工作领域：铁路工程。

1.3 高程控制网的建立

高铁工程对于精度有着毫米级的要求,而这一要求的基础在于要有一个稳定且可靠的高程控制网,它就如同整个工程测量方面的骨架一样,建立这个高程网时,需要沿着线路去布设一系列高精度的高程基准点,也就是水准点。此外选址也非常关键,这些基准点要深埋在地质稳固、不容易受到施工或者环境扰动影响的区域,同时还要考虑通视条件,以此来保证后续水准测量路线可顺利连接。基准点的密度需要进行科学规划,一般在关键构筑物附近会加密设置,并且在沿线按照规范的间距来布设,形成覆盖全线的严密网络。

高程数据的获取依靠高精度的几何水准测量,普遍采用国家二等水准标准执行。测量队伍使用经过严格检定的精密电子水准仪或光学水准仪,配合因瓦条码水准尺,以“后-前-前-后”或类似高精度观测程序,沿规划路线进行往返观测。整个过程中,需实时关注视线长度、前后视距差、仪器*i*角误差等关键指标,确保将系统误差控制在极低水平。每一测段的往返观测闭合差需要满足严格的限差要求(例如每公里不超过±1毫米),这是数据可靠性的硬性门槛。此外,所有原始观测值都需经过严密的环境改正,然后进行整体或分区的严密平差计算。

2 高铁无砟轨道精调施工的关键技术

2.1 轨道状态数据采集

高铁无砟轨道的精调作业,其核心本质是一个以高精度轨道状态数据为驱动,实现轨道几何形态从“实然”到“应然”的精确回归过程。此过程的成败,直接悬于轨道状态数据采集的精度与效率。它并非简单地测量与记录,而是构建了一个从物理轨道到数字模型的完整映射,并以此为基准进行闭环控制的技术体系。具体实施中,首先需依托CPIII等高等级控制网,利用全站仪等测量设备对轨道板或轨道扣件的预埋套筒进行绝对坐标的布设与复核,这为整个精调作业提供了统一且可靠的空间基准,是确保轨道长波平顺性的根本前提。在此基础上,搭载有高精度传感器的轨道检查小车(例如GRP系统)则扮演着“扫描仪”的角色,它沿着轨道线连续、快速地采集轨道的实际几何状态参数,包括轨距、水平、超高、方向以及高低等关键指标,形成描述轨道当前姿态的连续三维数据流。

这些海量的现场实测数据随即被导入专门的轨道精调分析软件中,软件会自动将其与设计线路的理论几何数据进行空间对位与偏差计算。这一步是整个技术链条的“大脑”,它输出的不再是原始数据,而是针对每一个轨道板或扣件调整点的、具有明确指向性的三维空间调整量(例如,左右、高低方向的移动毫米数)。施工人员依据这份精确的“作业指导书”,

使用专用工具对轨道进行细微调整。调整完成后,并非大功告成,而是需要再次运用轨道检查小车进行复测,将调整后的新数据与设计值进行再次比对,验证调整效果是否达到验收标准。这一“测量-计算-调整-复核”的循环作业模式,通过数据流将设计、施工与验收紧密耦合,直至轨道的各项几何参数偏差收敛于亚毫米级的严苛公差范围内,最终确保了高速列车运行所必需的极致平顺性与稳定性。

2.2 数据处理与分析

在高铁无砟轨道精调施工里,针对海量测量数据展开深度挖掘以及精准分析属于一项融合测量学、数据科学以及工程实践的系统工程,精调工作起始于对控制网复测数据以及轨道板粗调后几何状态的全面采集,首先要对这些原始数据实施严格预处理,借助设定合理阈值以及运用统计学方法,像拉依达准则或者局部离群因子算法,以此来识别并剔除那些因为仪器晃动、外界干扰或者人为失误而产生的异常“噪点”数据^[2]。这一步的数据清洗十分关键,其直接决定了后续分析的准确性与可靠性,完成数据净化后,便会进入核心的解算与分析阶段。

在这个阶段,关键任务是依照设计好的线路平面以及纵断面参数构建精确的轨道几何状态数学模型,借助专门的计算软件把现场采集到的成千上万个离散坐标点和设计线路的理论中心线运用最小二乘法进行拟合,解算出每一块轨道板、每一个扣件位置在水平以及高程方面的具体偏差值。这个过程并非只是单纯的数值对比,还涉及复杂的空间坐标转换以及误差传播理论的运用,分析的要点在于要留意单个点的静态偏差,运用差分、傅里叶变换等算法剖析轨距、水平、高低、方向等几何参数的变化率与连续性,识别出潜在的、有可能影响列车高速平稳运行的波形缺陷,比如特定波长的周期性不平顺。分析结果会以三维可视化图表以及精细化的调整量清单的形式呈现,为现场施工人员提供直观且量化的“导航图”,指引他们对每一个扣件进行毫米级的精确调整,直到轨道各项几何参数的误差收敛于设计规范允许的极小范围,以此铸就安全、平稳、舒适的高速运行基础。

2.3 轨道精调方案制定

一份周全细致且科学精确的精调方案是指导整个精调作业的纲领性文件,方案制定的首要工作,是对轨道几何状态开展一次全面的“CT扫描”,借助先进的轨道检测设备,像轨道检查小车或者惯性导航检测系统,可精准捕捉到轨道在静态状况下的每一处细微偏差,包含轨距、水平、高低以及方向等关键几何参数。这些数量众多的原始数据构成了方案制定的基础,随后结合线路的设计标准、速度目标以及结构特点,对偏差数据进行深入分析,判断其产生的原因、发展趋势以及对行车安全性和舒适性的潜在影响。这考验的是技术人员的经验与

智慧,要求他们从繁杂的数据中洞察问题的本质,准确识别出需要重点整治的“病害”区段。

精准定位问题完成后,精调方案就步入了实质的“手术方案”设计环节,方案得明确每个调整点具体的“手术”办法,像针对高低与方向的调整,一般会采用“起道”跟“拨道”相结合的形式,方案要详细规定每次起道或者拨道的量值,这要依据前期的数据分析以及力学计算,以此保证调整的精确程度以及轨道结构的稳定状况。调整顺序的规划也是相当关键的,一般依照“先大后小、先粗后精”的准则,优先处理影响较大的偏差区段并且按照从控制点到一般区段的顺序逐步推进,防止调整过程中出现相互干扰以及误差累积,另外方案还得明确所使用的工具 and 材料,比如专用的液压起拨道器、精密水准仪、激光准直仪等高精度测量和作业工具,以及不同规格和材质的调高垫板或者填充树脂等。每一项工具的挑选、每一种材料的运用都要经过严谨的论证,保证其可契合精调作业的精度和耐久性要求。

2.4 施工质量验收

从施工质量验收方面来看,精调作业实际上是一场动态且闭环的“测量-调整-复测”博弈,其关键技术主要体现在对轨道几何状态的精细打磨以及对结构连接的精心考量上,整个过程起始于对轨道静态几何尺寸的充分掌握,借助高精度全站仪或者轨道检测小车,要对轨距、水平、高低、方向以及三角坑等核心参数展开全面排查。这需要结合设计标准和现场环境深入理解数据背后所反映的轨道状态,当检测数据与设计标准出现偏差时启动精调程序。

此时,技术的关键之处如何“恰如其分”地施加调整量就需

要作业人员熟悉扣件系统的结构原理,并且对垫板的级配以及使用有精确的把握,一般是借助更换不同厚度的调距垫片以及调高垫片来达成,而处理高低和方向不平顺的情况,则要对轨道板下面的充填层或者支撑层进行细微调整,这是一项牵一发而动全身的精细工作。在这一环节,从质量验收的角度来看,要关注扣件的安装状态,保证每一颗螺栓的扭矩可达到设计值,避免因应力不均或者虚扭致使后期轨道发生变形。垫板的选择和放置也是验收的重点,错误的垫板组合没办法有效修正偏差,反而有可能引入新的应力集中点,给日后的运营埋下隐患。

完成一轮调整之后,要马上进行复测,借助数据对比来验证调整效果,直到各项几何参数完全锁定在设计允许的误差范围之内,这样循环往复的作业流程可把理论计算和现场实践紧密结合起来,最终将设计蓝图上的完美线路精确地复制到大地之上,为高速列车的平稳飞驰奠定牢固的基础。

3 结语

本研究针对高铁测量控制网的构建以及无砟轨道精调施工展开了全面且深入的系统探讨,探讨内容涉及了从首级控制网与加密控制网的建立,到高程控制体系的完善,之后又涉及轨道状态数据的采集以及数据的处理与分析等多个方面,最终形成了一套贯穿整个过程的技术路径。研究得出的结果显示,精准且稳定的测量控制网是无砟轨道精调的基础保障所在,而有闭环特性的数据采集与分析体系则为毫米级轨道几何精度的达成提供了强有力的支撑,凭借把理论模型与现场实测进行深度融合,优化了施工工序以及调整策略,而且还提升了轨道的平顺性与结构稳定性,为高速铁路的安全运营以及长期耐久性奠定了坚实的基础。

参考文献:

- [1] 安然,齐春雨,黄大中等.适应多工况的高铁无砟轨道精调算法研究[J].铁道工程学报,2024,41(12):60-70.
- [2] 黄德辉,罗阳明,王平波.BIM+GIS 技术在高铁无砟轨道斜拉桥中的应用研究[J].西部交通科技,2023(3):107-108.