

沪昆绕行线轨道几何状态检测数据分析

叶锦煜

中国铁路上海局集团有限公司杭州工务段, 中国·浙江 杭州 310009

摘要: 基于某工务段轨检仪 2024 年 6 月对沪昆绕行线约 7.5 km 线路的检测数据, 从 TQI、几何参数、线路特征、超限及曲线圆顺性五个方面进行统计分析。结果表明: TQI 均值 10.59, 8 个区段超限 ($TQI > 13$), 最差区段 TQI 达 70.59, 主要由轨向和正矢劣化引起; 正矢差超限占全部超限的 69.0%, 86.2% 的超限点位于曲线区段; 全部 10 条曲线实测半径均大于设计半径, 最大偏差 12.8%。据此提出加强曲线区段养护、重点整治正矢超限等建议。

关键词: 轨道; 轨道质量指数 (TQI); 统计分析; 沪昆绕行线; 轨检仪; 曲线正矢; 养护维修

Analysis of Track Geometry Condition Inspection Data for the Shanghai-Kunming Railway Bypass Line

Ye Jinyu

Hangzhou Track Maintenance Depot, China Railway Shanghai Group Co., Ltd., China Zhejiang Hangzhou 310009

Abstract: Based on the inspection data of about 7.5 km of the Shanghai-Kunming Railway bypass line measured with a portable track inspection instrument by a track maintenance depot in June 2024, the track geometry condition was statistically analysed from five aspects: track quality index (TQI), geometric parameters, track feature sections, over-limits of planned maintenance and curve circularity. The results show that the mean TQI is 10.59; 8 sections exceed the limit ($TQI > 13$), and the worst section reaches 70.59, which is mainly caused by the deterioration of track alignment and curve versine; versine-difference over-limits account for 69.0% of all over-limits, and 86.2% of the over-limit points are located in curve sections; the measured radii of all 10 curves are larger than the design radii, with a maximum deviation of 12.8%. Accordingly, suggestions such as strengthening the maintenance of curve sections and rectifying versine over-limits are put forward.

Keywords: Track; Track quality index (TQI); Statistical analysis; Shanghai-Kunming railway bypass line; Track inspection instrument; Curve versine; Maintenance

0 引言

轨道是铁路行车的基础设备, 其几何状态直接关系到行车安全性和旅客舒适度^[1]。随着列车速度的提高和运量的增长, 轨道几何状态劣化速度加快, 如何科学利用检测数据评估轨道状态、指导养护维修, 已成为工务部门面临的重要课题。

轨检仪 (轨道检查仪) 是普速铁路工务段进行轨道几何状态检测的主要设备, 其检测数据包括轨距、水平、三角坑、轨向、高低、正矢等参数, 可生成 TQI、计划维修管理值报告、曲线正矢报告等多种成果, 为线路质量评价提供量化依据。目前, 针对高速铁路的轨道状态研究较多, 但对普速铁路基于实际检测数据的系统分析相对较少, 特别是在曲线圆顺性与 TQI 超限机理方面。轨道几何状态的退化预测与状态修决策是近年来的研究热点^[2], 而基于在

役检测数据的现场分析仍显不足^[3]。

本文以沪昆绕行线上下行线路 2024 年 6 月轨检仪检测数据为基础, 系统分析轨道几何状态分布规律、超限特征及曲线状态, 为工务段针对性养护维修提供参考。

1 检测概况与数据来源

1.1 线路概况

沪昆绕行线为单线 (含上下行检测), 检测范围覆盖上行 K1+147~K6+947、下行 K3+102~K6+860, 累计约 7.5 km (检测区段合计)。线路以碎石道床为主, 沿线分布多处曲线, 曲线半径 411~3800 m, 包含缓和曲线和圆曲线, 另含少量道岔区段。

1.2 检测设备与数据

检测采用便携式轨检仪, 检测日期为 2024 年 6 月 2 日~13 日。轨检仪作为轨道平顺性检测的专用仪器, 其检

测方法及限差指标需经检测场标定验证^[4]。主要检测数据包括：

(1) TQI 报告：按 200 m 为单元计算 TQI 值及各单项参数标准差（轨距、轨距变化率、水平、三角坑、左右轨向、左右高低、左右正矢），共 46 个检测单元；

(2) 线路检查报表：按 25 m 间隔逐点检测轨距、水平、三角坑、轨向、高低，每点含 4 次采样，共 344 个测点。轨道测量数据的处理与分析通常需借助专用系统实现，相关系统研制与应用已有较成熟经验^[5]；

(3) 计划维修管理值报告：记录超过计划维修管理值的超限点及峰值、延长量，共 29 处超限记录；

(4) 曲线正矢报告：对 10 条曲线进行正矢检测，含设计 / 实测半径、正矢差、连续差、超高及偏差等数据。各类检测数据的综合管理应用可依托工务检测数据平台实现^[6]。

数据处理方法：将上述四类检测报表整理为统一数据表，从区段整体质量（TQI）、局部几何尺寸（25 m 测点）、线路特征差异、计划维修超限及曲线圆顺性五个方面进行统计与对比分析，超限判定参照现行《普速铁路线路修理规则》相关管理值执行。

1.3 评价标准

参照现行《普速铁路线路修理规则》（TG/GW 102—2019）及工务段管理规定^[1]，结合本线允许速度等级（80 km/h < v max ≤ 120 km/h），本文采用以下评价标准。

(1) TQI 评价：按表 6.3.4，允许速度 80~120 km/h 线路的 TQI 管理值为 11~13，故以 TQI ≤ 11 为均衡、11 < TQI ≤ 13 为需关注、TQI > 13 为超限（应列入维修计划）。

(2) 静态几何尺寸评价：按表 6.2.1-1（80 km/h < v max ≤ 120 km/h 正线，混凝土枕），作业验收容许偏差为：轨距 +6/-2 mm，水平、高低（10 m 弦）、轨向（直线，10 m 弦）及三角坑均为 4 mm；计划维修容许偏差为：轨距 +7/-4 mm，水平、高低、轨向及三角坑（直线和圆曲线）均为 6 mm，三角坑（缓和曲线）5 mm；临时补修容许偏差为：轨距 +14/-7 mm，水平 14 mm，高低 15 mm，轨向 12 mm，三角坑（直线和圆曲线）11 mm、三角坑（缓和曲线）7 mm。

(3) 曲线正矢评价：轨检仪正矢检测采用 10 m 弦。参考《普速铁路线路修理规则》表 3.1.10-1 作业验收标准（20 m 弦）按弦长平方比折算，10 m 弦对应正矢差管理值约为 20 m 弦标准的 1/4；同时结合轨检仪设备软件的计划

维修管理值判定超限。

2 结果与分析

2.1 TQI 总体分布特征

对 46 个 200 m 检测区段的 TQI 进行统计分析：均值 10.59，中位数 5.96，标准差 13.25，最小值 3.14、最大值 70.59，四分位数区间 4.53~9.95。TQI 作为轨道几何状态的综合评价指标，其分布特征可直观反映线路质量水平^[1]。基于检测数据的轨道状态分析方法已在铁路工务部门得到广泛应用^[7]。

TQI 分布呈明显的右偏形态，大部分区段（69.6%）TQI 不超过 11（均衡状态），表明该线路整体轨道质量好；但存在 8 个超限区段（TQI > 13，占 17.4%），其中 2 个区段 TQI 超过 60，属严重超限，需重点整治。从上下行对比看，下行 TQI 均值（11.49）略高于上行（9.90），且下行最大 TQI（70.59）高于上行（61.26），下行线路整体状态略差于上行。

2.2 TQI 超限区段分析

8 个超限区段（TQI > 13）明细如表 1 所示。

表1 TQI超限区段明细（TQI > 13）

序号	行别	里程区段(m)	TQI	主要劣化指标
1	下行	4301.8~4501.7	70.59	轨向(8.06/8.08)、正矢(22.93/23.32)
2	上行	4400.0~4599.9	61.26	轨向(6.90/7.32)、正矢(18.36/18.96)
3	下行	4101.8~4301.8	26.62	多项指标偏高
4	下行	6760.6~6860.0	22.79	水平、高低、正矢
5	上行	6869.9~6947.4	22.40	水平(2.91)
6	上行	2546.7~2746.7	20.92	轨距(2.20)、轨向
7	下行	4501.7~4701.8	19.48	轨距、高低
8	下行	6560.5~6760.6	14.85	水平、正矢

由表 1 可见，超限最严重的两个区段（TQI>60）位于上下行 K4+300~K4+600 附近，其主要劣化指标为轨向和正矢，单项标准差分别达 8 mm 和 23 mm，远超其他指标水平。上下行 TQI 沿里程分布如图 1 所示，超限区段在里程上的集聚特征明显。结合曲线正矢报告可知，该位置为小半径曲线（设计半径 666 m）区段，说明曲线区段是 TQI 超限的主要来源，曲线圆顺性差直接导致 TQI 急剧增大。相关研究表明，曲线区段的几何状态退化速率显著高于直线区段，小半径曲线尤为突出^[2]。

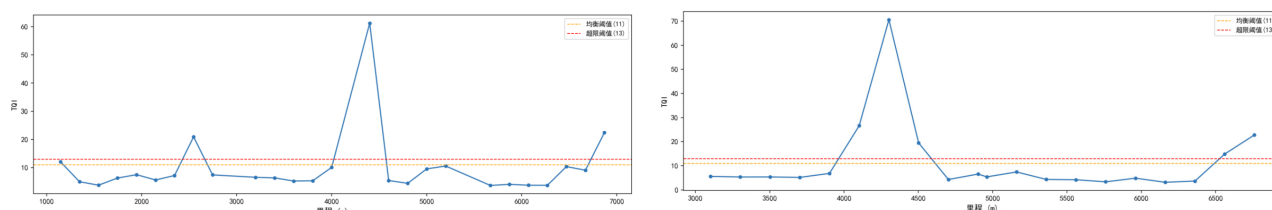


图1 沪昆绕行线上下行TQI沿里程分布

2.3 单项几何参数分析

各单项参数中,以轨向(左 1.05 mm、右 0.97 mm)和正矢指标的标准差均值最大,其次为水平(0.87 mm)和三角坑(0.79 mm),轨距(0.65 mm)和高低(0.63/0.66 mm)较小。正矢指标虽未列入 TQI 的 7 项组成,但其标准差明显大于其他指标(最大 23.32 mm),反映曲线区段的圆顺性问题突出。

25 m 测点的线路检查报表显示:各参数平均偏差均较小(绝对值 ≤ 0.64 mm),绝大多数测点满足作业验收标准。按表 6.2.1-1(80~120 km/h 正线)作业验收标准判定,轨距、水平各有 1 个测点超限(轨距 K2+697 处 -2.65 mm、水平 K6+870 处 -5.80 mm),高低、轨向、三角坑均无超限。整体而言,该线路的单项几何尺寸偏差控制良好,主要质量问题集中于曲线正矢。

2.4 不同线路特征区段对比

将测点按线路特征分为直线、缓和曲线、圆曲线、道岔四类,对比各几何参数均值。

结果表明:

(1) 水平偏差在曲线段明显大于直线段:缓和曲线(-0.87 mm)和圆曲线(-0.89 mm)的水平均值约为直线段(-0.46 mm)的 2 倍,与曲线超高设置有关,反映曲线段在水平方向的几何状态控制难度更大;

(2) 道岔区轨向偏差最大(0.98 mm),显著高于其他区段,且高低(0.39 mm)也为各区段最大,说明道岔区是轨道几何状态薄弱环节,与其结构复杂、框架刚度不均匀有关;

(3) 曲线段(含缓和曲线)轨距偏差整体为负值(-0.45、-0.11 mm),与曲线段轨距加宽和钢轨侧磨有关。

2.5 计划维修管理值超限分析

本次检测共记录超限点 29 处,超限类型分布如图 2 所示。其中:正矢差超限 20 处(左 10 处、右 10 处,占 69.0%),三角坑 3 处,水平 3 处,右高低 2 处,轨距 1 处。超限判定依据轨检仪软件内置的计划维修管理值(10 m 弦)执行。

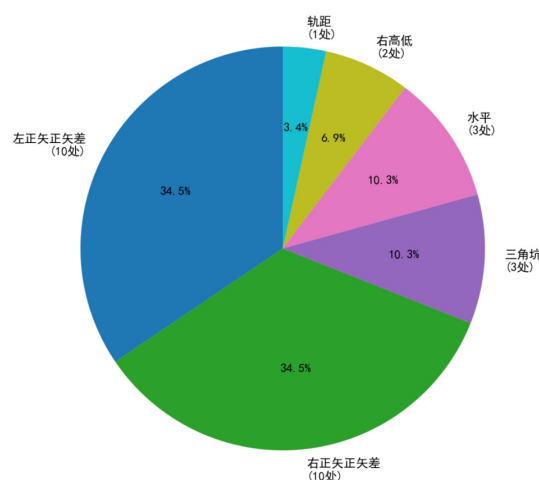


图2 计划维修超限点类型分布

从超限点所处线路特征看:缓和曲线上 20 处(69.0%)、圆曲线上 5 处(17.2%)、直线上仅 4 处(13.8%),即 86.2% 的超限点位于曲线区段,进一步印证了曲线圆顺性问题的主导地位。

从空间分布看,超限点明显集聚:上行 K3+401~K3+463、K4+079~K4+095 及 K6+868~K6+931 区段超限点集中,下行 K4+258~K4+481、K6+619~K6+634 区段集中,其中 K6+868~K6+931(上行)区段连续出现三角坑、水平、高低、正矢多类超限,且峰值较大(水平 -9.4 mm、正矢差 -12.7 mm),属于重点病害区段,应优先安排综合整治。需要指出的是,检测数据中的里程与现场实际里程往往存在一定偏差,实际作业中需结合曲线、桥涵等设备标记进行校正,以实现病害的精确定位^[8]。针对历史检测数据间的里程偏差,可利用钢轨焊缝等固定标记结合动态时间规整算法进行系统修正,以保证多次检测数据的可比性^[9]。

2.6 曲线正矢与圆顺性分析

本次共检测曲线 10 条,设计半径 411~3800 m。正矢差统计:均值 -0.70 mm,最大绝对值 14.10 mm;连续差均值 0.01 mm,最大绝对值 12.20 mm。按 10 m 弦检测及轨检仪软件管理值判定,正矢差超限测点 12 个(2.8%),连续差超限测点 9 个(2.1%),主要分布在小半径曲线区段。曲线圆顺性状态直接关系到行车平稳性与轮轨动力作用,

是曲线养护的核心控制指标^[10]。

设计半径与实测半径对比如表 2 所示。全部 10 条曲线的实测半径均大于设计半径，其中：

- (1) 设计半径 1700 m 曲线实测 1917 m，偏差达 +12.8%，为该线偏差最大者；
- (2) 设计半径 666 m 曲线实测 702 m，偏差 +5.4%，该曲线恰为 TQI 严重超限区段所在位置；
- (3) 其余曲线偏差在 +1.0%~+3.2% 之间。

表2 曲线设计半径与实测半径对比

设计半径(m)	实测半径(m)	偏差
411	424	+3.2%
446	455	+2.0%
491	497	+1.2%
594	604	+1.7%
645	656	+1.7%
666	702	+5.4%
1163	1190	+2.3%
1644	1660	+1.0%
1700	1917	+12.8%
3800	3875	+2.0%

实测半径普遍大于设计半径，说明曲线在长期运营中发生了一定程度的“曲线外移”（线形向曲线外侧发展），小半径曲线因横向力大、养护难度高而偏差更显著。曲线半径的增大将使未平衡超高增大、行车平稳性下降，需通过拨道作业恢复设计线形。该现象与轨道几何状态随时间累积退化的规律一致^[2]，建议结合后续多期检测数据开展退化趋势预测，实现预防性养护^[9]。

3 结论与建议

3.1 结论

- (1) 沪昆绕行线检测区段整体轨道质量良好，69.6% 的 200 m 区段 TQI 处于均衡状态（ $TQI \leq 11$ ），单项几何尺寸偏差大多满足作业验收标准。
- (2) 存在 8 个 TQI 超限区段（ $TQI > 13$ ，占 17.4%），最严重区段 TQI 达 70.59，主要由轨向和正矢指标劣化引起，集中在曲线区段。
- (3) 曲线圆顺性是为本线最突出的质量问题：正矢差超限占全部超限的 69.0%，86.2% 的超限点位于曲线区段（缓和曲线为主），全部 10 条曲线实测半径均大于设计半径，最大偏差 +12.8%。
- (4) 道岔区轨向、高低偏差显著大于其他区段，是轨道几何状态的薄弱环节。

3.2 建议

- (1) 优先整治 TQI 严重超限区段：对上下行 K4+

300~K4+600 区段（ $TQI > 60$ ）安排专项调查，查明轨向、正矢劣化原因，及时进行曲线拨正和起道捣固作业。

- (2) 加强曲线正矢管理：对正矢差超限集中的缓和曲线区段（K3+401~K3+463 等）安排拨道，恢复设计线形；对实测半径偏差较大的 1700 m、666 m 曲线重点核查。
- (3) 强化道岔区养护：针对道岔区轨向、高低偏差大的问题，加强道岔框架尺寸检查和维修，保证查照间隔与护背距离。
- (4) 建立 TQI 预警机制：对 TQI 处于 11~13（接近管理值上限）的区段加密检测频次，动态跟踪其演变趋势，结合退化预测模型实现预防性养护^[2]。

参考文献：

[1] 中国国家铁路集团有限公司. 普速铁路线路修理规则: TG/GW 102—2019[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2019.

[2] Truong-Ba H, Rebello S, Cholette M E, et al. Bayesian multivariate track geometry degradation modelling and its use in condition-based inspection[J]. Railway Engineering Science, 2026, 34(2): 217-241.

[3] Alisjahbana I. Using in-service train vibration for detecting railway maintenance needs[J]. arXiv: 2405.09560, 2024.

[4] 钟昊然. 轨道几何状态测量仪检测方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.

[5] 谷思文. 铁路轨道测量数据处理与分析系统研制[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.

[6] 刘俊. 铁路工务检测数据综合信息平台研究及实现[D]. 北京: 北京交通大学, 2006.

[7] 吴霞. 铁路轨道状态分析方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.

[8] 李立军, 全研. 静态检查和动态检测数据相结合应用指导高速线路维修工作[C]// 第十五届京、港、沪铁道学会学术年会暨第八届世界轨道交通发展研究会年会论文集. 北京, 2011.

[9] 汪振辉. 轨道不平顺历史数据应用分析研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2019.

[10] 罗林, 张格明, 吴旺青等. 轮轨系统轨道平顺状态的控制[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2006.

作者简介：叶锦煜（1998-），男，汉族，浙江建德人，大学本科，助理工程师，线路工，中国铁路上海局集团有限公司杭州工务段，研究方向：铁道线路。