

跨座式单轨连续刚构轨道梁线形特点及控制技术分析

段纯

铁四院（湖北）工程监理咨询有限公司

摘要：跨座式单轨因其结构简单，转弯半径小，爬坡能力强，造价相对较低，建设周期短等优点，被越来越多中量级城市青睐。近几年跨座式单轨技术日趋成熟，随着车辆及梁体施工技术进步，更加适应城市复杂线路环境，轨道线形更加复杂多变。轨道线形决定行车舒适性，施工过程中，分析不同行车状况下轨道线形特点，研究线形控制技术，提高线形精确度，对行车平稳性、舒适性具有现实意义。

关键词：跨座式轻轨；连续刚构；轨道线形；控制技术

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.01.056

跨座式单轨为单轨交通的一种形式，车辆采用橡胶车轮跨行于梁轨合一的轨道梁上。车辆除走行轮外，在转向架的两侧尚有导向轮和稳定轮，夹行于轨道梁的两侧，保证车辆沿轨道安全平稳地行驶。跨座式单轨交通系统三大核心技术包括：车辆、道岔和轨道梁，其中轨道梁是承载列车载荷与车辆运行导向的结构，同时也是供电、信号、通信等线缆的载体，普通区段通常采用PC梁，为预应力混凝土制成，在一些特殊区段也可采用钢梁或复合梁体。

轨道梁作为承载列车载荷与车辆运行导向的结构，车辆直接跨行于梁体上，其结构线形直接影响行车安全及舒适度，本文以芜湖轻轨工程实例为基础，对跨座式单轨连续刚构轨道线形特点及控制技术在工程中的应用进行了分析与研究。

一、跨座式单轨轨道结构特点

（一）轨道梁结构形式及结构体系

轨道梁结构形式主要有四种类型：PC轨道梁、钢轨道梁、钢混叠合梁以及双层复合轨道梁。其结构形式根据造价、受力特点等适用于不同跨度，PC轨道梁跨度10m~30m，钢梁、钢混梁跨度30m~48m，复合梁跨度48m以上。实际工程中以PC轨道梁为主，钢混梁及复合梁为辅，共同组成轨道结构形式。

轨道梁结构体系：简支体系、连续刚构体系。简支体系为最早且普遍采用结构体系，轨道梁端部安装支座简支于墩顶。连续刚构体系为近几年开发的新结构体系，最早用于芜湖轻轨1、2号线，一般为2跨或3跨一联，轨道梁通过后浇段混凝土固结于墩顶；相对于简支体系，能承受更大的横桥向扭转荷载和顺桥向弯矩；伸缩缝减少，列车运行舒适度更佳；同时减少支座用量，造价更低；但因轨道梁为一次固结不可调体系，施工完成后轨道线形不可调整，对轨道线形施工精度要求更高。芜湖轻轨工程车站及车辆基地使用简支体系，其余以连续刚构体系为主。

（二）轨道走行特点

跨座式单轨走行机理，通过车辆转向架上的三种橡

胶轮胎：走行轮、导向轮和稳定轮，完成走行、导向功能。走行轮与轨道梁顶面接触，主要承受竖向荷载；导向轮和稳定轮夹持于轨道梁侧面，承受横向荷载。车辆运行转向时，转弯内侧导向轮、稳定轮受到轨道梁侧面径向压力，约束车辆沿梁体转向。

（三）轨道线形特点

跨座式单轨线形，为适应复杂城市环境，其铺设线路转弯半径小，坡度较大，轨道线形复杂多变，为空间几何曲线，线路的平、纵、竖曲线以及横向超高都直接在轨道梁线形上实现。

二、连续刚构轨道梁线形对结构要求

（一）支承体系沉降要求

轨道线形对桥梁结构沉降要求最主要技术指标为相邻墩台不均匀沉降差，芜湖轻轨对于简支轨道体系，相邻墩台不均匀沉降量之差容许值为20mm。连续刚构体系为超静定结构，对基础沉降控制更为严格，相邻墩台不均匀沉降量之差，根据不同跨度设置容许值：单跨跨度 $L > 23m$ 容许值为10mm；单跨跨度 $20.5m < L \leq 23m$ 容许值为7mm；单跨跨度 $18m \leq L \leq 20.5m$ 容许值为5mm。

（二）PC梁预制结构要求

因走行轨道即为轨道梁，其线形取决于轨道梁线形，对轨道梁尺寸精度要求极高。轨道梁线形呈空间曲线性质，预制出的轨道梁自身线形就已经是车辆运行时的最终线形，无法像其他轨道交通系统那样可以通过调节道砟、轨道配件等措施来满足车辆运行时的线形要求。而影响PC轨道梁整体线形的因素纷繁复杂，包括线路线形（曲线半径、超高、缓和曲线渐变率、纵坡）、跨度、预应力体系、预埋件、原材料性能等等。因此，仅有通常构造和结构设计图，不能准确、全面反映真实的PC轨道梁线形，因此只能在PC轨道梁的设计、制作中对尺寸精度进行严格的要求和控制，使制造出的PC轨道梁严格满足线形设计要求。

附表2-1 轨道梁制造公差表

序号	项目	公差允许范围
1	宽度公差	$690 \pm 3mm$
2	侧表面平整度（在任意3m范围内）	$\pm 3mm$
3	侧表面平整度（在任意20m范围内）	$\pm 6mm$
4	走行面横向平整度（在任意690mm范围内）	$\pm 1.5mm$
5	走行面纵向平整度（在任意3m范围内）	$\pm 3mm$
6	走行面纵向平整度（在任意20m范围内）	$\pm 6mm$
7	横断面在满足线路超高的要求下角度公差	$\pm 1/8^\circ$
8	端面与侧面角度公差	$\pm 1/8^\circ$

（三）轨道线形精度要求

连续刚构轨道梁线形，因轨道梁结构固结于墩顶，其线形在运行期不可调整，对轨道梁安装完成后线形精度要求极高。轨道线形精度要求主要体现在走行面和导向面平整度，芜湖轻轨工程轨道线形精度控制指标主要有走行面纵横向平整度、导向面纵向平整度，纵向平整度要求不超过3mm/3m，横向平整度要求不超过1.5mm/690mm。

三、连续刚构梁线形控制技术分析

（一）支承体系沉降控制技术分析

为控制墩台不均匀沉降差，主要通过减少桩基后期沉降实现。设计提高对灌注桩沉渣要求：摩擦桩，孔底沉渣厚度不大于100mm；端承桩，孔底沉渣厚度不大于50mm。同时通过预埋注浆管对桩底进行注浆，改善桩底土体，提高桩基承载力。芜湖轻轨工程对连续刚构体系墩台完工后沉降进行实测：单跨跨度 $>23\text{m}$ ，相邻墩台沉降量之差最大值实测 $3.5\text{mm} < \text{允许值}10\text{mm}$ ；单跨跨度 $20.5\text{m} < L \leq 23\text{m}$ ，相邻墩台沉降量之差最大值实测 $1.8\text{mm} < \text{允许值}7\text{mm}$ ；单跨跨度 $18\text{m} \leq L \leq 20.5\text{m}$ ，相邻墩台沉降量之差最大值实测 $1.5\text{mm} < \text{允许值}5\text{mm}$ 。实践证明，现有施工技术较容易达到支承体系沉降控制要求。

（二）PC轨道梁预制技术分析

PC轨道梁梁体结构预制分为直线梁、曲线梁，结构预制难点在于曲线梁走形面收面质量控制以及曲线梁的空间曲线线形控制。

芜湖轻轨轨道梁预制采用正置式即轨道梁走形面朝上，曲线梁横向超高、纵坡，均需通过走形面收面来实现，走形面质量不仅需满足强度、耐磨、摩擦系数等要求，同时需保证平整度符合设计要求。曲线梁横向超高、纵坡通过在两侧模板上设置标高线控制，走形面强度、耐磨、摩擦系数等通过收面时清除振捣产生的浮浆及横向刻槽拉毛控制。收面工序采用人工进行，因施工精度要求高，人工操作误差极难完全符合设计要求，叠加后期预应力张拉对梁体走行面的影响，实际施工中对轨道梁完成后走形面平整度进行测量，平整度超标情况较为普遍，需要经过打磨修整。

曲线梁空间曲线线形通过两侧的高精度可调式模板及配套设备实现。侧模整体悬挂在门型支架上，门型支架与两侧混凝土台座上预埋钢板焊接为一个刚性整体。侧模板通过门架及混凝土台座上安装的智能电动千斤顶控制，电动千斤顶分上下三层，纵向间距2m，最上层固定于门架上，下面两层固定在混凝土台座上。按照设计文件给定的曲率数据计算出各千斤顶丝杆调节刻度，从跨中向两侧依次对称调整到位。电动千斤顶具有很好的自锁性能，模板调整到位后具有足够的承载力、刚度和稳定性，施工过程中不易产生变形，能满足PC轨道梁各种曲率、尺寸精度要求。通过对成品梁线形进行测量，均能满足线形曲率要求。

（三）轨道线形控制技术分析

轨道线形在结构上可分为轨道梁段、墩顶后浇段两个部分去控制，轨道梁架设后与后浇段形成的整体线形要求与梁体结构线形要求一致。

1. 轨道梁段线形控制

连续刚构轨道梁线形需经过架梁后临时固定、精调、浇筑后浇段固结三个状态，才能形成最终线形。轨道梁架设后在侧面安装丝杠进行临时拉结固定，待连续三联或五联轨道梁全部架设完成后可开始线形联调；精调时通过丝杠伸缩功能调整轨道梁倾斜度，通过在梁端底部安装三维千斤顶调整平面位置及高程。精调完成后浇筑墩顶后浇段完成梁体最终固结。

单联轨道梁精调。轨道梁精调以三跨一联为基本单元进行线形调整，通过在梁顶端部安装测量工装，通过墩顶设站的全站仪采集轨道梁空间坐标及高程，精调过程中根据实测的平面位置及高程拟合三跨轨道梁线形，与理论线形进行对比，根据两者的偏差指导轨道梁调节方向。线形经反复调整拟合，直至与理论线形偏差在设计允许范围内停止调整。

单榀轨道梁精调。轨道梁平面位置及高程，通过千斤顶调节，先调节横桥向，再调节纵桥向，最后调节高程；轨道梁倾斜度，通过调整丝杠伸缩量来调节。千斤顶与丝杠两种调节方式需同步配合协调，即梁体平面位置或高程变化时，需同步调整丝杠，始终保证梁体倾斜度没有大的突变。平面位置及高程调节过程需按照单端多频原则进行，一次只调整一端，两端依次进行，且每次调整幅度控制在2-3mm，确保梁体重心不致发生偏移造成倾覆。精调完成后对盖梁上预埋的支撑、轨道梁上预埋的钢板、调坡块进行焊接，锁定梁体线形。

2. 墩顶后浇段线形控制

连续刚构墩顶后浇段，中间墩顶为全混凝土结构与轨道梁顺接，边墩后浇段中间预留梁缝即每联之间需使用指形板进行线形搭接。线形均按直线梁处理，后浇段顺桥纵向长度1200mm，取最小曲率半径100m，经计算后浇段中部线形偏移量为1.8mm，对轨道线形影响很小，且墩顶模板精确定位极难满足，故不考虑模板曲率，全部采用“以直代曲”形式。施工时严格控制模板刚度、平整度及接缝封堵措施，确保混凝土浇筑过程中模板不会发生变形及漏浆。

四、工程实际应用中存在的问题

（一）曲线轨道梁尺寸验收问题

芜湖轻轨工程，轨道梁制作完成后需对梁体尺寸进行验收，曲线梁为空间几何结构，在验收曲线梁梁长、梁宽、侧面及走行面平整度等参数时，相关数据不能直接测量，设计单位未给出具体测量方法。针对以上参数制定检测方案经参建各方讨论一致同意后实行。梁长，实际为弧线难以直接测量，改为测量内外侧弦长；梁宽，实际测量导向轮、稳定轮处梁宽，不是测量顶面梁宽，需用U型卡尺进行测量转换计算，测量数据受卡尺与侧面垂直度及多次读数误差影响；侧面平整度，侧面

附表4-1 轨道梁架设后走行面平整度统计表

序号	区间	墩号	走行面纵向平整度 (3mm/3m)				走行面横向平整度 (1.5mm/690mm)			
			测量总数	不合格点数	合格率	不合格最大值	测量总数	不合格点数	合格率	不合格最大值
1	赭中区间	14#-18#	106	2	98.1%	3.1	120	9	92.5	2.6
2	衡龙区间	75#—龙山路站1#	164	62	62.2%	11	270	67	75.2%	2.8
3	龙鞍区间	7#—鞍山路站1#	583	262	55%	9.2	1207	583	52%	4.3
4	鞍港区间	1#-42#	894	460	48.6%	10.7	1406	586	58.2%	7.3
5	港裕区间	5#-13#	304	17	94%	5.0	215	42	80%	2.5
6	武港区间	2#-13#	520	42	92%	6.0	1100	216	80%	6.0
7	港方区间	37#-46#	354	54	85%	7.6	220	153	30%	4.6
8	方天区间	19#-28#	223	45	80%	5.8	519	248	52%	5.8
9	天赤区间	10#-19#	164	3	98%	4.0	212	54	75%	4.0
10	赤赭区间	10#-18#、34#-39#	232	21	90%	5.6	278	187	33%	3.0
11	利红区间	9#-13#	170	33	81%	4.6	206	70	66%	2.3
12	文珩区间	5#—17#	398	146	63%	8.8	621	327	48%	7.0
合计			4112	1147	72%	11	6374	2542	60%	7.0

为弧面，采用直靠尺测量平整度需考虑梁体设计矢高；走行面平整度，走行面实际轮迹为弧线，采用直靠尺测量平整度需考虑梁体预拱值和横向超高值误差。实际尺寸验收时测量工作量极大，且多数测量均需转换计算，测量误差较大。

(二) 走行面平整度问题

轨道梁走行面平整度误差超标，其误差主要分为：制作时误差及架设时误差。制作误差主要是人工收面误差及单榀轨道梁预应力张拉造成的变形误差，架设误差主要是轨道梁架设时梁与后浇段搭接误差及单联轨道梁通长预应力张拉造成的变形误差。施工过程中各工序误差累计叠加，集中反馈到梁体最终架设后状态，造成梁体走行面平整度误差超标情况较为普遍。芜湖轻轨工程1号线，通过对架设后的区间轨道梁走行面平整度进行测量统计，走行面纵向平整度(3mm/3m)合格率约为72%，横向平整度(1.5mm/690mm)合格率约为60% (见附表4-1)。合格率不高导致后期打磨修整工作量巨大，且走行面打磨会降低摩擦系数，需在打磨部位刻槽修正。

(三) 后浇段线形问题

后浇段线形问题主要集中在与梁体搭接处及梁缝指形板处。芜湖轻轨工程部分后浇段使用木模板，与梁体搭接处常因模板刚度不够、漏浆等原因造成平整度超标。梁缝指形板安装质量是车辆运行体验关键因素，芜湖轻轨工程在试运行阶段发现部分指形板松动，经排查指形板安装存在预留锚栓孔深度不合格、锚栓锚入深度不足、锚栓缺失等问题，锚固力不足导致预埋锚固螺杆与板座之间连接产生脱漏，造成指形板松动。后浇段线

形问题主要原因是施工质量管理不到位，工艺要求未严格按设计要求落实。

结语

本文主要总结了跨座式单轨轨道结构及线形特点；结合实际工程，总结分析了轨道线形对结构体系要求，并针对轨道线形控制分析主要使用的施工技术，最后总结了实际施工中存在的问题。

综上所述，跨座式单轨连续刚构轨道梁技术首次在芜湖轻轨工程中应用，相较于传统的简支梁技术，减少了支座用量，降低了建设成本；大量使用混凝土后浇段进行梁体连接，使运行体验更佳，同时减少了后期维护工作量，其优点值得推广，但建设过程中存在的问题还需要在今后的工程实践中不断优化设计方案及施工工艺。

参考文献

[1] 薛洪卫, 刘永锋. 跨座式单轨连续刚构PC轨道梁关键设计参数研究. 铁道勘察, (2021) 05-0072-05.
 [2] 刘云龙. 重庆城市高架轻轨PC梁架设技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2005.
 [3] 桑勇. 跨座式单轨交通系统PC轨道梁线形调整技术[J]. 山西建筑, 2010, 36(10): 248-250.
 [4] 谢耀春. 研究跨座式单轨交通轨道梁定位测量及线形检测方法, 绿色交通, (2021) 01-0175-02.
 [5] 张杰, 补正发, 寇恒武. 跨座式单轨连续刚构PC轨道梁线形调整技术. 南京工程学院学报(自然科学版), 1672-2558. 2019. 04. 003.

作者简介: 段纯, 1989年3月, 男, 汉, 湖北省黄冈市英山县, 硕士, 工程师, 研究方向: 轨道工程。