

香港机场自动旅客运输系统轨道设计创新

刘聪灵¹ 王嘉鑫¹ 张 倩²

(1. 中车浦镇庞巴迪运输系统有限公司, 241060, 芜湖; 2. 中设设计集团股份有限公司, 210014, 南京//第一作者, 工程师)

摘要 新建的香港机场自动旅客运输 (APM) 系统工程地质条件复杂, 穿越填海区, 未来不均匀沉降大, 可能会造成 APM 行车面和导向轨错台。梳理了香港地方标准与国标的差异, 结合 APM 系统特点, 拟定适用于本工程的轨道技术标准, 介绍了典型的行车面、导向轨、道岔设计。针对项目不均匀沉降的特点, 创新设计采用“预制钢行车面+特殊扣件”的轨道组合结构, 以实现远期的沉降调节目标。对导向轨支架设计进行了方案比选, 采用新型钢支架取代 T 型板设计, 取得降本增效成果。

关键词 自动旅客运输; 轨道; 行车面; 导向轨; 沉降

中图分类号 U213.2; U239.8

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2019.10.022

Guideway Design of Hong Kong Airport APM System and Innovation

LIU Congling, WANG Jiaxin, ZHANG Qian

Abstract Since the engineering geological conditions of the newly-built Hong Kong Airport APM which crosses the reclamation area are complex, the differential settlement will be significant, possibly causing the running plinth and guide-beam stagger in the future. In this paper, the difference between local standards and national standards is compared, applicable standards to the project are set up according to the characteristics of APM system. Then, the typical design of running plinth, guide-beam, switch and buffer is introduced. Combined with the project features of differential settlement, the innovative design of guideway composite structure adopts prefabricated steel running plinth+special clips to achieve the goal of long-term settlement adjustment. Through comparative selection of the guide-beam support designs, the new steel support is recommended instead of the T-shaped plate design, in order to gain more effect with less cost.

Key words APM; track; running surface; guide rail; settlement

First-author's address CRRC Puzhen Bombardier Transportation Systems Ltd., 241060, Wuhu, China

年 7 月起投用, 连接 T1 航站楼西端、T1 航站楼东端和 T2 航站楼, 经过两次扩建后, 东面延伸至海天码头、西面延伸至中场客运廊。2016 年 8 月, 为与新建的机场第三跑道及其客运大厅 (TRC) 配套, APM 系统进行了第三次扩建。该工程内容含 AIS 站和 TRC-E 站 2 个车站及站间线路、1 个车辆段。新建段在 AIS 站与既有 APM 系统进行换乘接驳。按照建设规划, 新建段在近期为正线“3 线并行、2 用 1 备”运行方式, 长度约 3 km; 在远期, APM 系统还将进一步延伸至 TRC-W 车站, 并采用“4 线并行、3 用 1 备”运行方式。

1 香港机场 APM 系统扩建的特点与挑战

本次扩建的工程条件复杂, 技术难度高。如图 1 所示, 其线路需要跨越既有的航站楼、停机坪、地面车道、新填海隧道、高架道路匝道等建筑物, 且在局部区段与行李系统地下隧道并行。线路建设的内外部环境复杂, 控制条件多。

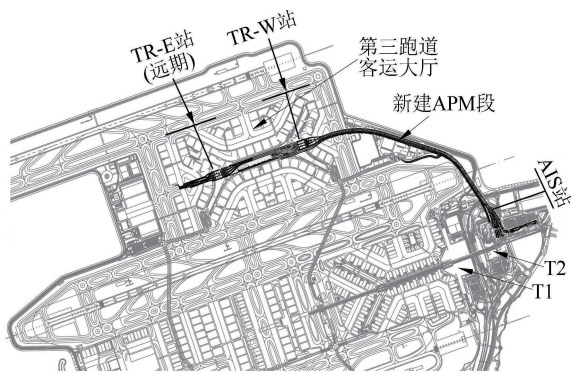


图 1 香港机场新建 APM 线路的周边示意图

APM 系统需满足隧道因不均匀沉降引起的线路纵坡差值最大为 $1/317^{[1]}$ 的变化 (在 12 m 范围内)。但经设计测算, 在填海段隧道区间风井和 TRC-E 站附近共 5 处线路的纵坡变化将超过 $1/317$, 对系统运营安全、可靠性及乘坐舒适度产生重大影响。为此, 需对该区段的行车面和导向轨进行

特殊设计,以实现后期对轨道高度的调节,适应隧道不均匀沉降的变化。

在设计标准上,本项目在香港当地的《静载及附加荷载应用规程》、《混凝土结构应用规程》、《钢结构应用规程》指导下开展其工程设计,并结合 APM 系统的特点进一步细化适合本工程的技术标准。

2 轨道设计标准

2.1 香港标准和内地标准的对比

本项目的轨道结构设计主要依据上文所述的香港当地的混凝土、钢结构设计规范。与 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》相比,二者的差异主要包括以下方面:

1) 荷载分项系数不同:根据香港混凝土结构设计规范,极限承载力设计所采用的永久荷载分项系数为 1.4,可变荷载分项系数为 1.6,其取值大于 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》的规定。据此分项系数确定本项目行车面和导向轨基座的混凝土强度等级为 C45。

2) 混凝土保护层厚度要求:混凝土保护层的厚度随混凝土等级的提高而减小。香港混凝土设计规范规定的取值略大于相似条件下 GB 50010—2010 的规定。在本项目的执行过程中,根据防火的

要求,混凝土保护层厚度采用 55 mm,大于国内同类工程设计要求的 35 mm。

2.2 本项目的主要技术要求

结合 APM 系统和工程特点,拟定本项目主要技术要求包括^[2]:车辆最高运行速度 80 km/h、车辆轴重 ≤ 14 t、轴距 7.58 m、车场及道岔曲线半径 22 m、允许的不平衡离心加速度 0.5 m/s^2 、最大纵坡 60‰、轨道曲线采用半超高(以轨道中线为旋转轴,外轨抬高、内轨降低)且不超过 6‰、超高顺坡率不大于 4.2‰。

3 APM 系统的轨道典型设计

3.1 行车面设计

行车面为现浇混凝土结构,标号 C45。本工程的正线和出入线主要采用双基面混凝土结构,单条行车面宽度为 500 mm,轨距为 2 050 mm,高度为 350~550 mm,如图 2 所示;在车辆基地采用单基面结构,便于运维人员通行;局部设置检修地沟,满足车底检查需求。

行车面与隧道底板通过预埋钢筋连接。行车面设置伸缩量不大于 25 mm 的垂缝,以及伸缩量介于 25~127 mm 的 45°斜交缝。同时,为减少混凝土固化时水化热引起的混凝土表面裂纹,在行车面表面每隔 3 m 设置一条切缝,并在保护层内设置钢丝网片。

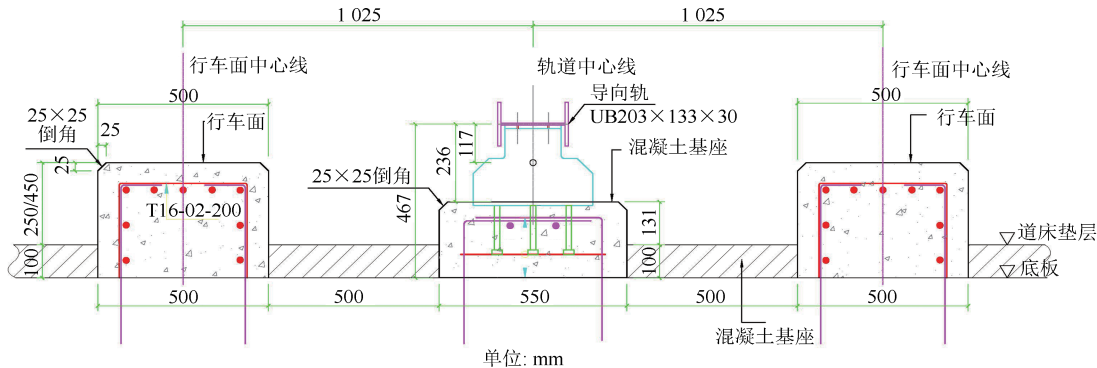


图 2 轨道结构典型断面图(正线双基面)

除道岔区外,APM 线路的小曲线共设置 3 种超高规格,相关的技术指标如表 1 所示。由于采用现浇结构的行车面超高段施工难度较大,且与导向轨的匹配精度要求高,因此,结合以往 APM 项目经验,在欠超高小于 5%的地段不再设置超高,允许适当欠超高。

3.2 导向轨典型设计

APM 车辆采用中间导向,每辆车设 2 个转向

表 1 轨道超高设计的部分技术指标

曲线编号	半径/m	速度/(km/h)	超高/%	横向不平衡加速度/ (m/s^2)	横向冲击率/ (m/s^3)
JD1	250.0	48	3.0	0.42	0.37
JD3	1 250.0	80	0.0	0.40	0.44
JD5	464.2	76	5.0	0.47	0.28
JD7	300.0	56	4.0	0.41	0.32

注:曲线编号中列出了该新建段所有曲线中超高的 4 条曲线,其编号来自于设计文件

架,每个转向架设置 4 个导向轮,导向轮横抱导向梁完成车辆的导向。导向轨的腹板与钢支架使用 4 组 M20 高强螺栓连接,钢支架利用底部焊接的剪力钉锚固在混凝土基座上,将车辆导向轮的荷载传递到结构底板。导向轨腹板的 2 个支架之间均匀布置 $\phi 15$ mm 圆孔,间距为 152 mm,是供电轨安装的基础。

标准导向轨的长度为 12.5 m,每根导向轨在直线段设 5 组支架、在曲线段设 6 组支架,支架间距分布均匀,轨端悬挑长度不超过 0.6 m。导向轨混凝土基座的材料规格与行车面相同,基座长 \times 宽的规格为 550 mm \times 500 mm,同样采用预埋钢筋与结构底板连接,每个基座含 4 对 $\phi 16$ mm 的带肋钢筋。导向轨伸缩缝与行车面伸缩缝相似,设置斜交缝或垂缝。

3.3 道岔

道岔由控制装置、驱动装置、导向装置、锁定装置、指示灯、滚动板等构成,如图 3 所示。其中,导向装置分为道岔固定梁、道岔曲梁和道岔直梁,利用驱动电机和转动传动机构带动活动梁(曲梁和直梁)旋转,在道岔梁端部和中部设锁定装置,并设道岔梁位置及状态信息采集装置。滚动板表面有粗糙度比较高的耐磨层防护涂料,保证通过车辆的

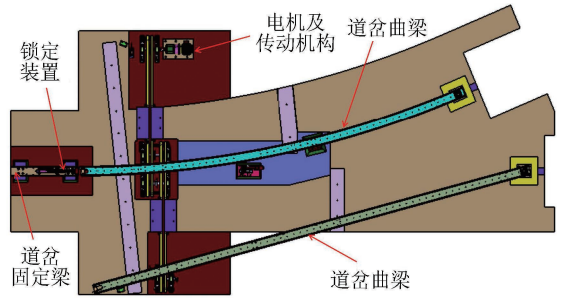


图 3 APM 系统道岔构造示意图

橡胶轮胎有足够的摩擦力^[3]。

4 APM 系统的轨道设计创新

4.1 行车面沉降设计

在以往 APM 项目的应用中,大多采用现浇混凝土结构。当发生不均匀沉降时,该走行面无法调节,可能会产生错台,进而影响乘坐舒适度和靴轨运行的稳定性。本项目的设计在一般区段采用常规做法,而在局部沉降地段采用钢结构行车面,采用特制扣件、垫板、化学锚栓,与混凝土基座锚固,通过可拆卸锚固方式和垫板的调整可预留出轨道垂直 50 mm 的调节空间(见图 4),从而抵消因差异沉降对行车面平整度的影响。

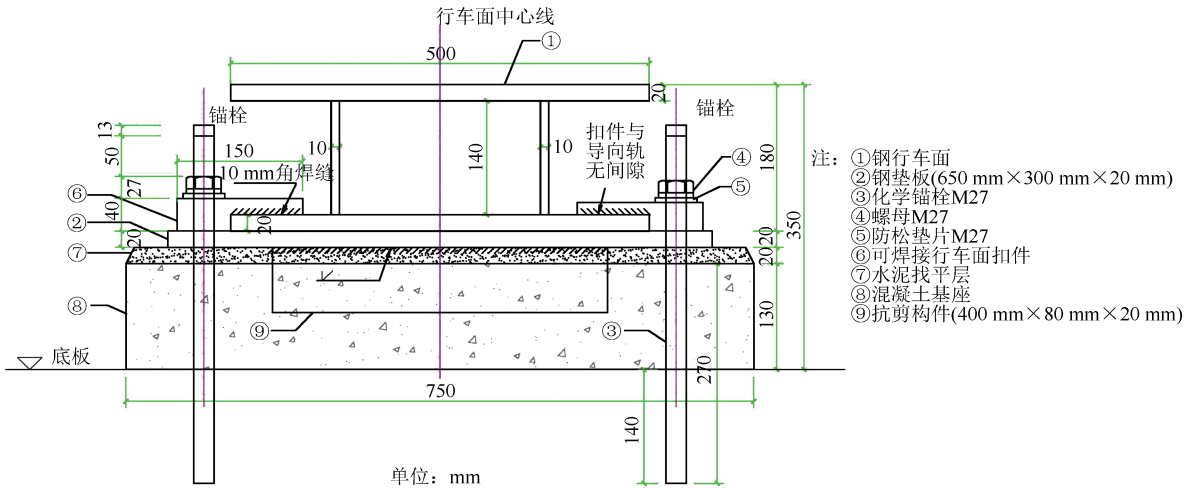


图 4 钢行车面大样图

1) 钢行车面。整体为箱型钢梁结构,材质采用 S355J0,顶板和底板设计厚度均为 20 mm,竖板厚度为 10 mm,接口采用全熔透坡口对接焊工艺。钢行车面宽度为 500 mm,单根钢行车面的长度为 12.5 m,表面进行耐磨、防滑、防腐涂装。钢行车面上表面摩擦系数应不低于 0.5。

2) 锚栓和扣件。钢行车面在每个混凝土基座

上利用 2 套化学锚栓和扣件进行锚固。化学锚栓规格为 M27,长度为 440 mm,在隧道底板内锚入深度为 140 mm,锚栓上部外露丝扣长度为 63 mm,满足预设最大 50 mm 的调节空间。扣件与底面紧贴,在锚栓紧固后与底板进行角焊连接。

3) 混凝土基座。基座混凝土标号为 C45,其长 \times 宽为 750 mm \times 500 mm,在直线段的间距为 3 m,在

曲线段的间距 2.4 m。基座从下到上包含混凝土结构、高强水泥浆找平层和支撑垫板 3 部分。其中:基座的混凝土结构与隧道底板通过预留钢筋连接;找平层的设计厚度为 20 mm,可以吸收混凝土结构表面施工误差;顶部支撑垫板的长×宽为 650 mm×300 mm,厚度为 20 mm,在混凝土基座浇筑前预埋;垫板下部设计了剪力板,与混凝土结构连为一体,避免支撑钢板受力时发生滑移。

4) 调节垫板与橡胶板。钢行车面的高度调节通过在扣件和混凝土基座之间增减垫板及橡胶板实现,最大调节量为 50 mm。当高度调节量不大于 5 mm 时,可完全采用橡胶板;当调节量大于 5 mm 时,应采用“橡胶板+钢垫板+橡胶板”的组合,此时橡胶板的厚度为 2 mm。橡胶板可提高界面间的摩擦力,防止钢垫板与支撑钢板滑移,同时起到隔振作用。隧道发生不均匀沉降时,变形缝会上翘或下凹。根据隧道沉降分析报告,在上翘点行车面初始安装时预先安装一定厚度的垫板,在不均匀沉降发生时逐步用较薄的垫板替代;而在下凹点行车面,初始安装不设置垫板,在发生不均匀沉降后,逐步加入较厚的垫板予以调节。表 2 列出了隧道不均匀沉降发生的时间和轨道调节量。为了保障车辆正常通行,需要对关键点进行监测,及时调整垫板的厚度。垫板宜按照 2 mm 为一个梯度进行调整。

表 2 预期的轨道维护计划

线路 里程	隧道建成后 时间/年	行车面最大 调节量/mm	行车面调整 长度/m
CH 1+100	6	10 (下降)	20
CH 1+364	5	10 (下降)	20
CH 1+414	5	10 (上调)	25
	1	25 (上调)	65
CH 2+420	4	25 (上调)	65

注:线路里程数据来自原设计文件

5) 伸缩缝。钢结构行车面的膨胀系数比混凝土结构的膨胀系数稍大。为解决钢行车面热胀冷缩问题,对于一般区段相邻的 2 个钢行车面采用垂缝形式,设缝宽为 10 mm;在结构变形缝处设置 45°斜交伸缩缝,使车轮平顺过渡,缝宽设置为 35 mm。在行车面钢结构与混凝土交界的界面同样设置 10 mm 宽度的接缝,用沥青麻丝填充且表面密封。

4.2 导向轨沉降设计

一般导向轨与可调节导向轨的区别在于钢支架与混凝土基座的连接方式不同,前者钢支架利用底部的剪力钉锚固到混凝土基座中,使钢支架与基

座成为整体;后者使用 4 组化学锚栓将钢支架固定在基座上,保持钢支架在竖向高度可调。

与钢行车面的构造和调节原理相似,导向轨和钢支撑技术规格与常规非差异沉降区段相同,混凝土基座的间距在直线段为 2.95 m,在曲线段为 2.4 m,每个基座包含 4 套 M27 化学锚栓。沉降调节所用的钢垫板和橡胶板规格,以及高度调整时间均与钢行车面相同,如图 5 所示。

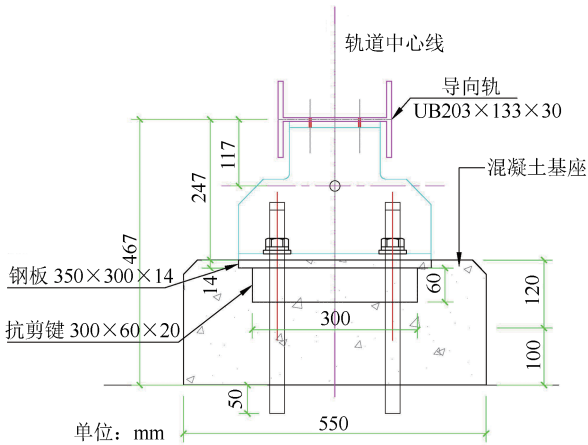


图 5 可调节导向轨大样图

4.3 导向轨支撑设计优化

以往项目的导向轨支撑结构采用 2 个非标 T 型板通过螺栓加焊接的方式固定。当采用焊接结构 T 型板时,焊缝质量较难控制,且面临现场焊接作业时空间狭小问题,施焊难度大,探伤检测困难。同时,在焊接过程中,易破坏支架焊缝以外区域的防腐涂层,从而影响支架使用寿命。除焊接问题外,在支架 2 侧肩部易形成应力集中,在运营中存在应力释放、螺栓松动的风险,增加了轨道检查和维修工作负荷。

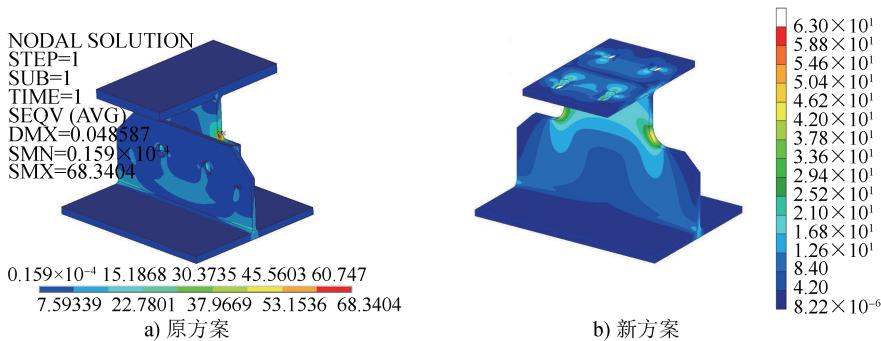
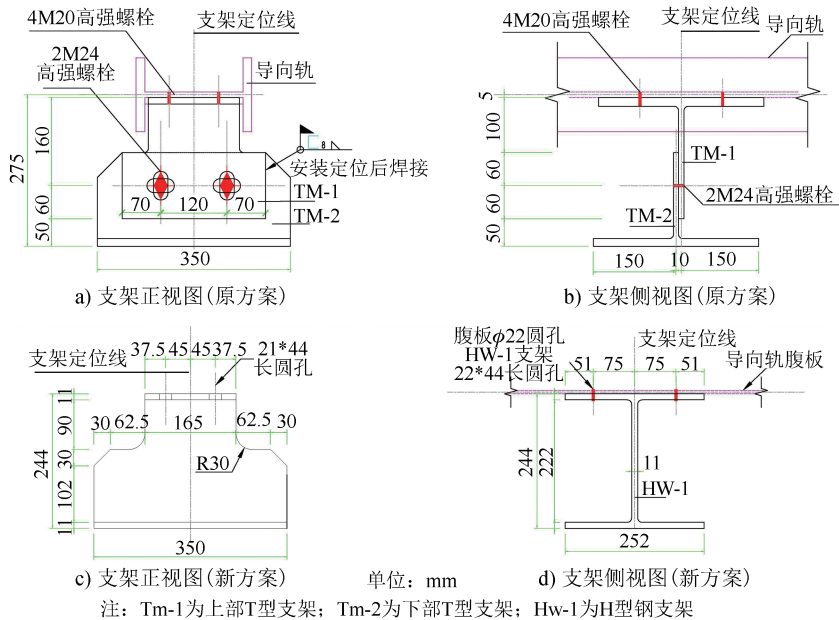
本项目对导向轨的支撑结构进行了改进设计,选取国标热轧 H 型钢(244 mm×252 mm×11 mm×11 mm)切割成型,优化前后的对比方案如图 6 所示。新方案结构简单、力学性能较好,与原设计采用相同的支架间隔,能够满足强度的要求。

对以上 2 种方案进行应力分析。如图 7 所示,与原设计相比,新方案的支架应力分布更加均匀,肩部最大应力值由原方案的 63 MPa 降低到 55 MPa。新方案中,竖板没有螺栓孔,减少了应力集中点;竖板和底板的圆角应力降低,且该圆角由原焊缝改为热轧,有利于延长支架的疲劳寿命。

另外,钢支架加工工艺简单,切割、开孔、表面

清理及防腐等工艺全部在工厂完成,现场只需组装即可,可有效地提高支架生产和安装环节的质量,

极大降低了生产成本,缩短制造工期。



本项目在车辆段重修线设计了可拆卸导向轨,用以新车卸车上线。可拆卸导向轨采用铝合金 6063-T6 材质,以减轻质量;采用插销式结构,方便快速拆装。此外,在架车区域设计了异形导向轨,适当缩小导向轨的宽度,便于架车时可对准落车。

5 结语

APM 系统在国内尚未形成统一的设计标准,本文对 PBTS 胶轮路轨 APM 系统轨道工程设计进行了总结,阐述了其轨道的主要设计标准和典型设计。针对本项目隧道工程在填海后建造引起的不均匀沉降问题,提出采用混凝土和钢结构多种形式的轨道结构,实现对差异沉降区段轨道高度的调节。另外,对导向轨钢支架结构进行了优化,从用

户需求角度改进了车场重修区的导向轨断面和安装方式。

目前,项目处于详细设计阶段。这种新型轨道结构还有待进行样品试制,对其结构强度、疲劳、耐久性及调节性能等进行试验验证。

参考文献

[1] Mott Macdonald. Presentation to TSD-Maintenance for APM Tunnel Settlement[R]. Hong Kong: Mott Macdonald, 2018.

[2] 中车浦镇庞巴迪运输系统有限公司. 轨道设计总体技术规范: 第 2 部分 线路设计: CV 3042039[S]. 安徽芜湖: 中车浦镇庞巴迪运输系统有限公司, 2017: 6.

[3] 刘永星, 元元, 赵传允. 广州旅客自动输送线专用道岔的试制[J]. 城市轨道交通研究, 2014(6): 126.

(收稿日期: 2019-05-27)