

上海浦东机场旅客捷运系统关键技术

张悦

(上海机场(集团)有限公司,201207,上海//高级工程师)

摘要 上海浦东机场旅客捷运(MRT)系统采用的是钢轮钢轨A型车,不同于目前机场常用的APM(自动旅客运输)系统,其建设有一些独特之处。重点介绍了浦东机场MRT系统中的信号系统、轨道结构、集约用地设计和精细化建设管理方面采用的一系列关键技术。浦东机场MRT系统的信号系统具有满足全天候运行、区分不同流程客流、有限距离精准进站等技术特点,其轨道结构采用了超大线间距道岔区钢弹簧浮置板、新型液压缓冲式车挡和超薄道床等技术。

关键词 旅客捷运系统;信号系统;轨道结构;集约用地设计;精细化管理

中图分类号 V354

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.05.010

Key Technology of MRT at Shanghai Pudong International Airport

ZHANG Yue

Abstract The steel wheel and rail type A cars are adopted in MRT (Mass Rapid Transit) system of Shanghai Pudong Airport. Different from APM (Automated People Mover) system that is commonly applied in airports nowadays, the construction of MRT possesses unique features. A series of key technologies used in the signal system, track structure, intensive land use design and delicacy construction management of Pudong Airport MRT system were emphatically introduced. The signal system of Pudong Airport MRT system has technical characteristics such as adaptive round-the-clock operation, distinguishing different categories of passengers, and the train accurately arriving at station within safety distance limitation. The track structure adopts technologies such as steel spring floating slab in turnout area with extra large line space, new hydraulic stop buffer, and ultra-thin track bed.

Key words MRT system; signal system; track structure; intensive land use design; delicacy management

Author's address Shanghai Airport Authority, 201207, Shanghai, China

上海浦东国际机场(以下简称“浦东机场”)是我国主要门户枢纽机场,近年来旅客吞吐量(2019

年突破7 600万人次)和货邮吞吐量(稳居世界第三,全国第一)持续增长,设施设备相对不足的矛盾日益突出。2019年9月16日以卫星厅工程为主体的三期扩建工程建成投入运行,为浦东机场航空业务量的增长创造了良好的航站区、飞行区设施设备条件,进一步提高了浦东机场航空业务的服务水平。

卫星厅与航站楼之间的距离超过了通常的旅客步行距离(其中T1航站楼—S1卫星厅站中心距离1.86 km、T2航站楼—S2卫星厅站中心距离1.65 km),客流运输量超过了机场大巴的运输能力和地面交通能力,因此通过同步建设的全封闭的地下旅客捷运(MRT)系统服务航站楼与卫星厅之间的旅客和工作人员运输。浦东机场MRT系统采用了钢轮钢轨A型车系统,不同于国内外机场常见的APM(自动旅客运输)系统,其建设中采用了一些新技术及管理方法。本文重点介绍浦东机场MRT系统的信号系统新技术、轨道结构的新技术、集约用地的设计和精细化建设管理的特点。

1 浦东机场MRT系统简介

浦东机场MRT系统采用成熟的轨道交通技术,实行相对独立的运行服务;规划设计、工程筹划、现场管理等满足主体工程的总体要求;24 h不间断运行,严格区分不同流程客流;与卫星厅工程同属于浦东机场三期工程的两大控制性关键节点工程,在浦东机场高负荷运行条件下实施。在浦东机场一期工程(以T1航站楼为主体)、二期工程(以T2航站楼为主体)等项目建设时,对MRT系统的T1航站楼站、T2航站楼部分区间等做了土建预留。浦东机场MRT系统按照城市轨道交通A型车方案实施,针对不停航情况下保障施工安全、预留工程适应性对策等方面进行了一系列研究,完成了相关的技术和管理研究课题。

浦东机场MRT系统(见图1)共设4座车站(T1航站楼站、T2航站楼站、S1卫星厅站、S2卫星

厅站)和一座车辆基地,东线(T2 航站楼站—S2 卫星厅站)、西线(T1 航站楼站—S1 卫星厅站)独立运行,分别采用双线穿梭模式运行。列车为 4 节编组,两节为国际车厢,两节为国内车厢,国际车厢设返流区。信号系统采用全自主知识产权的 CBTC(基于通信的列车自动控制)系统。供电系统采用分散供电方式,从浦东机场 35 kV 变电站引入两路独立 10 kV 电力线;正线采用接触轨受电,车辆基地也采

用接触网受电。通信系统包括公务及专用通信、专用无线通信、车地无线通信、视频监控、广播、乘客信息、时钟等子系统。轨道正线采用 60 kg 无缝线路,航站楼、卫星厅上部结构投影范围采用钢弹簧浮置板道床以提高乘客环境质量。车辆基地承担均衡修、日常维护和临修工作,由出入场线、道岔区和检修综合楼组成。控制中心设在车辆基地办公区。

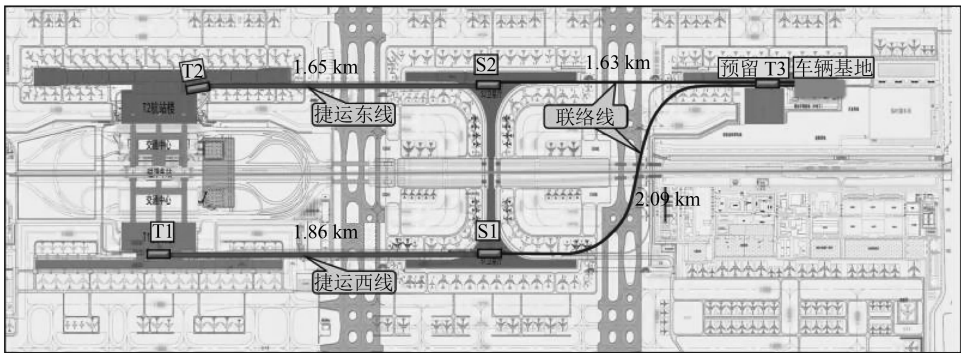


图 1 浦东机场 MRT 系统工程总图

2 浦东机场 MRT 系统信号系统关键技术

2.1 满足全天候运行的信号系统技术

浦东机场 MRT 系统东线和西线分别采用双线穿梭运行模式,昼夜不间断运行。夜间客流底峰时段停运一条线进行线路设备检修,另一条线正常运行。运行时如果一条线出现设备故障,另一条线也可正常运行。

信号系统采用冗余设计方案,包括区域控制器冗余设计方案、A/C 线与 B/D 线(A、B、C、D 线划分参见图 2)两个联锁控制区域划分方案、后备系统方案和两级控制方案。冗余设计方案能够保障信号设备故障情况下 MRT 系统的正常运行,提高了 MRT 系统在不同运行工况条件下的可靠性和适用性。其中,两个联锁控制区域的划分方案可保证一个控区的信号设备故障情况下不影响整个 MRT 系统的正常运行。

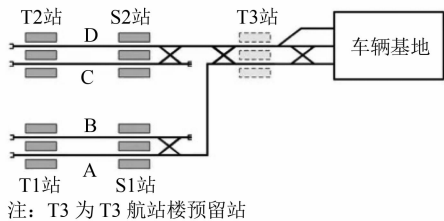


图 2 浦东机场 MRT 系统配线图

2.2 区分不同流程客流的车门(站台门)控制技术

浦东机场 T1、T2 航站楼和 S1、S2 卫星厅都有国际、国内航空业务,MRT 系统需要运输国际、国内的出发、到达旅客。根据运行服务和空防管理的要求,机场应严格区分国际出发、国际到达和国内混流的不同客流。与洛杉矶、慕尼黑和莫斯科等国际机场的 MRT 系统相比,浦东机场 MRT 系统的客运组织更加复杂。T1、T2 航站楼站和 S1、S2 卫星厅站采用“一岛两侧、岛上侧下”的站台设置方式区分出发和到达流程的旅客,站台中间采用物理隔离措施区分国际和国内旅客;航站楼站—卫星厅站方向是运输出发流程的旅客,反之则是运输到达流程的旅客。为防止发生混流,列车到站后采取先下(国际旅客必须全部清空)后上的措施;在列车的国际车厢设置有返流区,服务于到达卫星厅但因故不能成行的国际出发旅客由卫星厅返回航站楼。由此可见,浦东机场 MRT 系统对列车车门及站台门的控制要求非常严格,控制流程也非常复杂。浦东机场 MRT 系统采用了信号级的车门(站台门)控制技术,在正常运营条件下,车门(站台门)的开关顺序由信号系统自动控制,列车到站后,信号系统自动打开侧式站台侧车门(站台门),下客时间到,列车自动关门;工作人员确认清客完成后,驾驶员按换端按钮,信号系统自动打开岛式站台车门(站台

门),上客时间到,系统自动关门。信号系统不仅对正常载客区域车门进行自动控制,同时对返流区车门进行自动控制,以确保不发生混流,车门控制流程如图3所示。

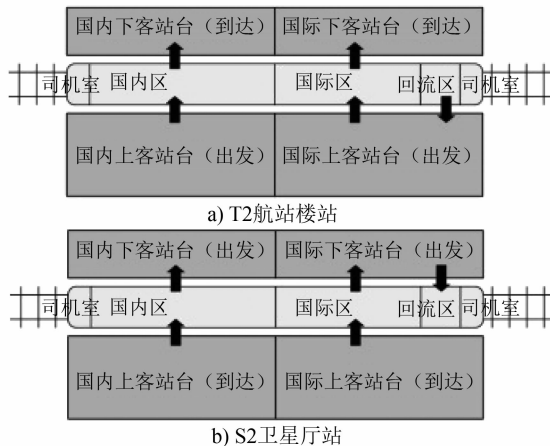


图3 浦东机场 MRT 系统车站车门控制流程示意图

2.3 有限安全防护距离精准进站技术

T1 和 T2 航站楼站受既有预留结构条件限制,线路尽头安全防护距离最小仅 18.3 m(见图4),如果按照传统的信号系统设计模式,列车采用恒定制动率制动模式进站,将会导致出现列车进站时间过长、MRT 系统运行效率低的情况,乘客体验会非常差。

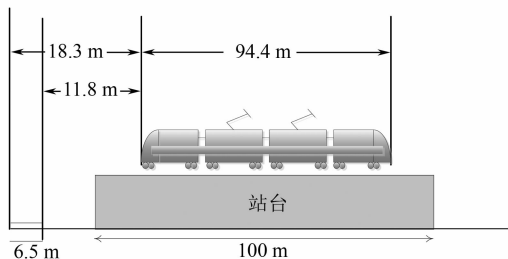


图4 浦东机场 MRT 系统 T1 和 T2 航站楼站站台长度示意图

1) 改进方案研究。在保证从 S1/S2 卫星厅站—T1/T2 航站楼站列车进站的运行时间、列车与车挡的安全边际、乘客的舒适度的前提下,研究了三阶段安全制动模型(见图5)中在 ATO(列车自动运行)模式、ATP(列车自动保护)模式下,列车安全精准进站、系统运行效率、乘坐舒适度间的关系;研究了采用 6.5 m 液压缓冲式车挡和 2 m 固定式车挡条件下的安全和效率。

2) 改进方案实训线验证。根据理论计算的数据,在上海轨道交通张江实训线进行了现场试验,模拟验证浦东机场 MRT 系统的特殊工况。现场实

验验证了列车以 ATO 方式进站直至停稳的进站时间和停站精度;验证了列车在 ATP 人工驾驶模式下分别以高速和低速进站时全牵引触发紧急制动后列车的行驶距离;验证了制动率为 0.95 m/s^2 、列车

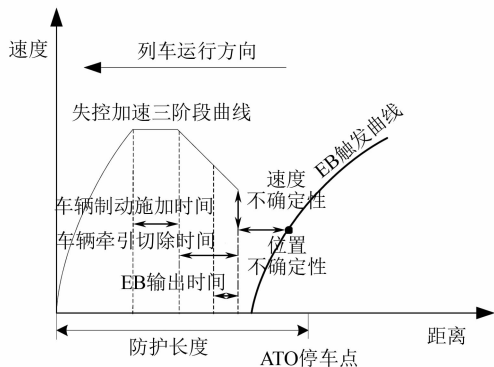


图5 三阶段安全制动模型图

距车挡分别为 11.8 m 和 16.3 m 时的制动情况,对比验证制动率为 1.3 m/s^2 、列车距车挡 11.8 m 的制动情况。测试验证了理论分析计算与测试验证的一致性、可操作性,以及真实情景下列车 ATO 模式行车的可控制性和 ATP 模式失控加速时列车制动的安全性。理论计算和现场验证结果表明:改进方案的列车进站运行时间能够满足 MRT 系统对运行效率、安全性和舒适度的要求;6.5 m 液压缓冲式车挡比 2 m 固定式车挡的效率略低,但安全性更高。

3) 改进方案现场实施。根据前期的理论论证和实训线验证,在车辆和信号系统的联合调试阶段,进行了现场模拟段测试,在保证安全的前提下由远到近逐级调节到设计防护距离,由低速到高速逐级调节到设计速度,直到列车安全精准进站、系统运行效率、乘坐舒适度等指标全部达到设计和系统预期目标。并提出了列车的最小制动率不低于 0.95 m/s^2 、人工驾驶时列车以不超过 10 km/h 速度运行等精确控制指标,提出了轨道防滑等运维要求。

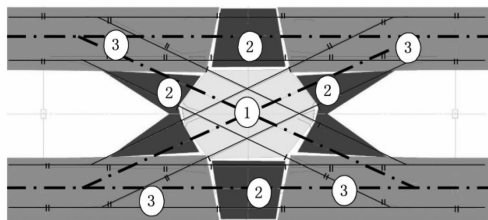
2.4 特有驾驶模式研究

为了满足 MRT 系统特有的穿梭运行、清客管理、S1/S2 卫星厅站自动存车等运行需求,在 ATO 自动驾驶模式、ATP 限速人工驾驶模式、ATP 监控下人工驾驶模式、非限制人工驾驶模式(ATC 切除)的基础上,MRT 系统增加了限制人工向后驾驶模式、自动穿梭驾驶模式、全自动无人驾驶出入存车线模式等,提高了运行的自动化标准,大幅减少了人工操作的工况,提高了运行的效率和安全性。

3 浦东机场 MRT 系统轨道工程关键技术

MRT 系统轨道专业要克服既有预留结构限制、大量钢弹簧浮置板在不同工况应用等难题,研究实施了超大线间距道岔区钢弹簧浮置板设计、特殊组合道岔设计、既有段长距离薄型轨道结构、高减振降噪要求的空侧轨道结构设计、有限空间的大能力车挡和系统化的轨道排水设计等技术。

1) 超大线间距道岔区钢弹簧浮置板技术。S1/S2 卫星厅站台宽度为 20 m,站后均设交叉渡线,线间距达到 23 m,因该区域均在卫星厅建筑范围内,为了保证卫星厅楼内安静的候车环境,该区域轨道全部采用钢弹簧浮置板。设计和施工方没有现成的经验可循,在克服平衡性(不对称荷载)差、板块划分异形板较多、隔振器布置与基底水沟冲突点多、结构受力一致性差等难点后,进行了结构配筋设计,以及钢轨变形、剪力胶强度、隔振器位置浮置板抗冲切和隔振器强度及疲劳寿命验算,形成了完整齐全的技术方案。施工采用“散铺法”,严格落实设计的各项指标和施工顺序(见图 6),特别是对道岔定位、隔振器与水沟冲突、分级顶升等关键工序进行控制,最终道岔轨道误差控制在 1 mm 内,振动和噪声均达到国家标准,排水功能全部实现。

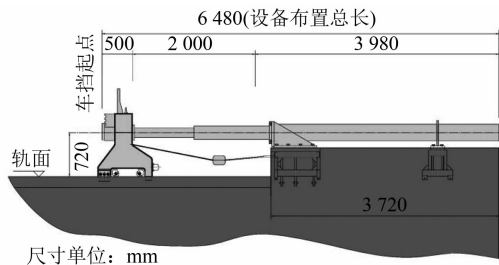


注:按照1、2、3顺序施工

图 6 卫星厅站区域交叉渡线道岔施工顺序示意图

2) 6.5 m 新型液压缓冲式车挡研制。液压缓冲式车挡标准长度为 8 m,为适应 T1/T2 航站楼站的站后有限防护距离,研制应用了 6.5 m 长度的液压缓冲式车挡(见图 7),在总长度极其有限的情况下多留了 1.5 m 防护距离,显著提高了安全性和运行效率。车挡包括 1 台撞击引导小车、2 套长行程液压缓冲器、1 套钢结构基础预埋件和 1 座混凝土后座基础,可满足列车运行速度 15 km/h、4 辆重载 A 型车、256 t 撞击荷载的撞击工况要求。该车挡具有自动复位功能,液压缓冲器通过压力能的释放推动系统自动复位,可大大缩短事故工况下车挡的恢复和恢复时间。

3) 超薄道床技术。针对既有段最小轨道结构高度 360 mm 的条件,进行了无枕式整体道床科研专项研究。经过垂向整体受力计算与配筋计算、纵横向整体受力和变形分析、关键部位局部受力分析



尺寸单位: mm

图 7 6.5 m 液压缓冲式车挡纵断面图

和轨道结构动力响应分析,制作了等比例的轨道板,在实验室进行了静载、疲劳、螺栓抗拔、植筋剪力小试块等仿真试验。最终形成了包括理论研究、计算分析和实验室试验成果的专题研究报告,并组织设计、科研、建设、运行等方面的专家进行了方案评审。在吸收专家意见基础上,采取了选用减振性能较好的低高度扣件、在既有结构底板上植筋与道床连接、提高道床混凝土强度(C40 混凝土)、混凝土掺加复合纤维等组合措施,形成了最终的设计方案。施工中采取的防控措施有:采用“钢轨支撑架法”“一次灌注”法实施道床施工,满足扣件安装条件,保证新老混凝土粘结完好,浇筑道床板时确保混凝土振捣密实,保证道床结构达到设计强度,做好道床植筋胶和杂散电流防护控制。在今后的运行过程中,还需要进一步的观测道床结构的变化情况。

4 浦东机场 MRT 系统集约用地设计

1) 车辆基地集约设计。MRT 系统车辆基地具备均衡修等功能,根据 MRT 系统车辆配置数量少、车辆在基地维修检修频次比较低的特点,采取集约整合设计措施,将列检线、均衡修、洗车线进行整合,将临修线、车辆吊装线进行整合,既提高了设施设备的整体使用效率,又在保证使用功能的条件下有效控制了总建筑面积和用地面积,车辆基地节约建筑面积 5 500 m²。

2) 控制中心集约设计。MRT 系统控制中心设在车辆基地二楼,同时具备 OCC(运营控制中心)和 DCC(车辆基地控制中心)功能,控制中心可对包括正线和车辆基地在内的全部运行业务进行统一管理,提高了运行指挥效率。

3) 采用正线进行车辆试车。MRT 系统 T2 航站楼站—T3 航站楼预留站的 D 线线路平顺,可满足试车线的全部技术要求。试车线结合正线 D 线设置,可节约 7 000 m²土地面积。可在夜间客流底峰时段,停运 D 线,在 D 线组织车辆试车;同时可根据高速试车要求,选择不同的区段,保证更长的防护距离,以进一步提高试车作业的安全性。

5 浦东机场 MRT 系统精细化管理

1) 车辆、信号系统联合调试精细化管理。从建设工程项目全寿命周期考虑,车辆基地采用了集约设计,但也对建设阶段的车辆调试、信号系统调试,特别是车辆、信号系统联合调试工程管理提出了挑战。MRT 系统共配置 7 列电客列车,车辆基地检修线可以设 2 列位、临修线设 1 列位(无接触网)、S1/S2 卫星厅存车线分别设 1 列位。调试期间的停车位存在缺口,因为正线调试时包括存车线在内的正线要求清空,停车位缺口比理论上更大,因此从第 4 列列车进场开始就存在停车位不足情况,而利用弓靴转换区停车会影响列车出入库。针对 MRT 系统的特有停车位条件,根据工程总体筹划,统筹车辆、信号系统联合调试、列车型式试验、列车静调动调、运行验收交接等计划,以车辆、信号系统联合调试为主、车辆型式试验次之、其余作业为辅的原则,编制实施了列车分阶段进场方案、多车调试停车位腾挪方案、正线各专业施工方案等系列组合方案,轨行区作业采取了“5+2”(周日到周四连续 5 d 动车作业,周五和周六连续 2 d 人工点作业)、“白加黑”(昼间、夜间安排不同单位专业的动车作业)的模式以减少施工转换,提高施工安全和效率。施工过程中根据出现的新情况、新问题不断调整方案,终于提前完成了工程总体筹划的各项关键节点工程。2019 年 4 月 8 日提交了信号系统安全证书,轨行区管理权提前向运行移交,为不载客运行赢得了宝贵的时间,为 MRT 系统高标准开通创造了良好的基础条件。

2) 精确测量控制技术。三期工程区间需与 T2 航站楼站既有段区间的预留结构联接,在采取接触轨受电模式、特殊的道床结构外,原土建结构理论上允许建筑空间误差仍非常有限,工程实施过程中,提升了工程测量和调线调坡的管理措施。在闭合段施工前,以轨道专业为主导,确保供电、给排水专业的安装要求,首先进行调线调坡测量和线路设计,对后续结构施工提出 1 cm 的误差要求,结构外边界适当外放;

后续结构施工特别是关键控制点的中隔墙施工采用轨道专业的精度要求,应用轨道线路平面控制网(CPⅡ)测量技术进行结构施工的放样、复核,进行精细化的管控;结构全部完成后,进行第二次调线调坡测量和线路设计,对部分区段直线线路调整为 7 000 m 半径曲线线路,在保证限界的前提下,平衡了敷设管道、线缆和疏散功能的实现。

3) 不停航施工管理。浦东机场三期工程是在机场正常运行的条件下实施的,MRT 系统的各项工程也不同程度的不停航的严格条件下实施。比如:T1 航站楼站全部在航站楼覆盖区域,只能通过唯一要穿越轨行区的出口进入车站施工;对于 T2 航站楼站以及 T2 航站楼站—S2 卫星厅站空侧施工等,给工程建设带来难度的增加、效率的降低等课题,在建设过程中,通过周密筹划,统筹组织空侧施工的内容和作业时间,对必不可少难以预见的空侧施工加强协调,最终保证了在不停航施工条件下的机场运行安全和施工安全。

6 结 语

通过建设、代建、设计、施工、科研等单位 3 年多的共同努力,实现了浦东机场 MRT 系统的全部需求,在信号系统、轨道结构等方面进行了一系列的创新,如:信号系统满足全天候运行、区分不同流程客流、有限距离精准进站需求,轨道结构采用了超大线间距道岔区钢弹簧浮置板、新型液压缓冲式车挡,以及集约用地设计和精细化管理等,大大提高了工程建设的安全和效率。随着航空业务的发展,国内各大枢纽机场建设卫星厅及 MRT 系统已经启动前期工作,浦东机场 MRT 系统建设过程中的一些经验可供借鉴。

参考文献

- [1] 戴晓坚.浦东国际机场卫星厅及捷运系统工程[M].上海:上海科学技术出版社,2019.
- [2] 李文沛,刘武君.机场旅客捷运系统规划[M].上海:上海科学技术出版社,2015.
- [3] 陈祥,田杰.上海浦东国际机场旅客捷运系统设计特点[J].交通与运输,2017(4):18.
- [4] 林晨,毛亮,唐炜,等.浦东机场捷运系统运输组织研究[G].上海空港(第21辑),2015:39.
- [5] 谢斌.特定安全距离进站方案[R].上海:上海机场(集团)有限公司,2017.

(收稿日期:2019-12-25)