

城市轨道交通全自动运行线路核心系统工程 投资影响因素

陈光宇 李江莉

(上海申通轨道交通研究咨询有限公司, 200070, 上海//第一作者, 高级工程师)

摘 要 直接影响城市轨道交通 FAO(全自动运行)线路运营安全与效率的关键在于其核心系统。从定义需求角度出发,科学合理地制定 FAO 核心系统的投资计划是新线建设面临的重点问题。通过对比分析哈尔滨地铁 2 号线、南京地铁 7 号线、南宁轨道交通 5 号线、福州地铁 4 号线、徐州轨道交通 6 号线等 GOA4(无人干预列车运行)级 FAO 核心系统的概算,从系统、安全等需求出发,提出影响 FAO 核心系统投资的关键技术因素。通过分析发现,FAO 核心系统建设的目标和定位以及运营需求将直接影响工程投资的高低,宜选择满足运营需求的最基本、最必要、最关键的 FAO 核心系统。

关键词 城市轨道交通;全自动运行线路;核心系统;工程投资;影响因素

中图分类号 F530.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.02.006

Influencing Factors of Urban Rail Transit FAO Line Core System Engineering Invest- ment

CHEN Guangyu, LI Jiangli

Abstract The direct influence on urban rail transit FAO (fully automatic operation) line operation safety and efficiency is mainly from its core system. From the standing point of defining requirements, to formulate FAO core system investment plan scientifically and reasonably is the main issue faced by new line construction. Through comparative analysis of the estimates of Harbin Metro Line 2, Nanjing Metro Line 7, Nanjing Metro Line 5, Fuzhou Metro Line 4, Xuzhou Rail Transit Line 6, and other GOA4 grade FAO core systems, the key technical factors influencing FAO core system investment is proposed considering requirements such as system and safety. It is discovered that the goal, positioning and operation requirements of FAO core system construction will directly affect the project investment amount. It is optimal to choose the FAO core system that is both meeting the operation requirements and the most basic, the most necessary, the most crucial.

Key words urban rail transit; FAO line; core system; pro-

ject investment; influencing factor

Author's address Shanghai Shentong Rail Transit Research & Consultancy Co., Ltd., 200070, Shanghai, China

城市轨道交通 FAO(全自动运行)线路的建设与系统装备技术的应用已成为未来城市轨道交通发展的主流。在此趋势下,FAO 线路的建设既要满足我国现行标准规范对 GOA4(无人干预列车运行)级 FAO 核心系统的基本要求,又需从符合城市轨道交通的运营需求出发,理性分析 FAO 核心系统的技术要求与经济投入的合理性。因此,迫切需要对 GOA4 级 FAO 核心系统的技术因素与工程投资之间的关系展开分析,探索适合我国国情的 FAO 核心系统的建设思路,为后续 FAO 核心系统的投资与建设提供有益的借鉴。

1 FAO 核心系统概算投资分析

以哈尔滨地铁 2 号线一期工程、南京地铁 7 号线二期工程、南宁轨道交通 5 号线一期工程、福州地铁 4 号线一期工程、徐州轨道交通 6 号线一期工程等 5 条典型 FAO 线路工程(见表 1)为例,研究其核心系统初步设计概算综合指标,其对比结果如表 2 所示。

由表 2 分析可得:

1) 考虑到通信、信号系统中的个别子系统划分互有交叉,5 条 FAO 线路中 2 个系统的概算总和相近。

2) 5 条 FAO 线路中综合监控和站台门系统的概算基本保持同等水平。

3) 车辆基地与控制中心,因线路共享、功能定位、系统组成、工程环境及水文地质条件等差异使得其相应概算差别很大。概算中选用的指标宜按照具体线路项目特点区别对待。

表 1 典型 FAO 线路工程概况

Tab.1 Engineering overview of typical FAO lines

线路工程	车辆段及综合基地	线路 全长/km	车站 总数/座	平均站 间距/km	车辆选型及编组	工程费用概算/ (万元/km)
哈尔滨地铁 2 号线一期工程	1 座定修段	28.70	19	1.590	B 型车、6 辆编组	38 800
南京地铁 7 号线二期工程	1 座定修段、1 座停车场	35.49	27	1.350	B 型车、6 辆编组	45 600
南宁轨道交通 5 号线一期工程	1 座架修段	20.21	17	1.219	B 型车、6 辆编组	51 900
福州地铁 4 号线一期工程	1 座定修段、1 座停车场、 1 座大架修基地扩容改造	28.40	23	1.260	B 型车、6 辆编组	45 700
徐州轨道交通 6 号线一期工程	1 座定修段、1 座停车场	22.91	16	1.496	B 型车、4 辆编组	47 200

注:表中各条线路均为地下线,且车站均为地下站;工程费用概算中不含车辆购置费。

表 2 典型 FAO 线路各核心系统初步设计概算单位投资及其所占比例对比

Tab.2 Investment per km and their proportion comparison of preliminary design estimates of typical FAO line all core systems

线路工程	通信系统		信号系统		综合监控系统		车站站台门	
	单位投资/ (万元/km)	占比/%	单位投资/ (万元/km)	占比/%	单位投资/ (万元/km)	占比/%	单位投资/ (万元/km)	占比/%
哈尔滨地铁 2 号线一期工程	1 246.93	10.55	1 605.27	13.59	294.15	2.49	327.83	2.77
南京地铁 7 号线二期工程	1 417.98	9.68	1 561.79	10.66	248.77	1.70	372.23	2.54
南宁轨道交通 5 号线一期工程	1 553.17	10.73	1 589.01	10.97	267.27	1.84	374.53	2.59
福州地铁 4 号线一期工程	1 480.98	12.31	1 576.08	13.11	326.41	2.71	350.50	2.91
徐州轨道交通 6 号线一期工程	1 360.34	12.52	1 457.03	13.41	304.32	2.80	301.70	2.78

线路工程	运营控制中心	车辆基地		车辆购置费		核心系统 单位总投资/ (万元/km)	总单位总投资/ (万元/km)	核心系统 单位总投资 占比/%
	单位投资/ (万元/km)	单位投资/ (万元/km)	占比/%	单位投资/ (万元/km)	占比/%			
哈尔滨地铁 2 号线一期工程	25.08	2 319.88	19.64	6 020.91	50.96	11 814.97	73 050.70	16.17
南京地铁 7 号线二期工程	664.72	3 875.88	26.47	7 168.22	48.95	14 644.87	91 251.51	16.05
南宁轨道交通 5 号线一期工程	958.62	5 637.77	38.94	5 057.88	34.93	14 479.63	81 573.19	17.75
福州地铁 4 号线一期工程	38.73	2 591.51	21.54	5 704.23	47.42	12 029.71	81 925.95	14.68
徐州轨道交通 6 号线一期工程	491.33	4 173.64	38.41	3 268.16	30.08	10 865.19	72 717.90	14.94

注:运营控制中心概算受既有运营控制中心改造、网络线路共享等因素影响离散性较大,故在统计核心系统总概算时,未包含运营控制中心;福州地铁 4 号线一期工程车辆基地投资数值为与 4 号线二期工程分摊。

4) 单列列车同为 B 型车,因设备配置差异,其单节车辆单价为 710 万~800 万元不等,价格差异幅度约 12%。但对整条轨道交通线路中的车辆购置费概算而言,因列车数量、编组差异,概算投资单价为 3 200 万~7 200 万元/km,投资差异幅度高达 125%。

5) FAO 线路各核心系统投资占比:车辆购置费占比最大,约占 30%~51%;车辆基地占比次之,约占 20%~39%;信号系统和通信系统占比约 10%~14%;综合监控系统和车站站台门系统占比最小,均在 3%以内;而控制中心占比的离散性较

大。因此,为控制 FAO 核心系统的费用,应将控制车辆购置费和车辆基地建设费用作为重点。

2 影响 FAO 核心系统投资的系统需求分析

通过案例类比可以看出,同类型车辆 FAO 线路的通信、信号、综合监控及站台门系统综合造价指标差异较小,而控制中心投资差别较大。控制中心投资受多种变化因素的影响,如是否增设备用控制中心、控制中心是否资源共享、线网指挥中心与数据中心是否同步建设、建设投资是否采用多线路分摊等技术。从案例中 FAO 核心系统投资占比来看,

车辆购置费和车辆基地工程费是核心系统的主要支出,是影响 FAO 系统总投资不可忽视的重要组成部分。本文以徐州轨道交通 6 号线一期工程为例(初期运营采用 24 列 4 辆编组列车)进行分析。

2.1 车辆

2.1.1 功能需求对投资的影响

城市轨道交通车辆系统及其所有子系统首先应完全响应 FAO 的相关标准和规范,其技术规格应满足 GB 50157—2013《地铁设计规范》的相关规定,并应同时满足 GB/T 32590.1—2016《轨道交通 城市轨道交通运营管理和指令/控制系统 第 1 部分:系统原理和基本概念》、GB/T 32588.1—2016《轨道交通 自动化城市轨道交通(AUGT)安全要求 第 1 部分:总则》中关于 GOA4 级 FAO 相关功能的要求。但不同 FAO 线路运营场景的设计不同,对列车智能运维系统、障碍物及脱轨检测装置、受电弓状态监测装置、轮轨关系监测装置、走形部监测装置等车辆配置的选择,以及对列车健康状态的实时在线监测评估和远程控制、列车故障远程复位等功能的实现要求亦存在差异,导致单列列车投资概算不同程度地增加。

2.1.2 非功能需求对投资的影响

T/CAMET 04017.7—2019《城市轨道交通 全自动运行系统规范 第 7 部分:运营管理》中要求,FAO 线路的列车服务可靠度应不低于 200 万车·km/次,车辆、信号、供电、站台门等影响列车运行的设备故障率及可靠度应与之相匹配^[2]。不同城市在 FAO 线路建设初期对列车服务可靠度的选择,会影响 FAO 系统运营可靠性的次要目标,即 5~15 min 运营延误及清客事件等故障的次数。列车服务可靠度指标越高,对车辆的可靠性指标要求越高,进而对车辆关键部件的冗余性要求就越高,则直接影响单列列车投资概算指标。

此外,车辆整车的防火性能等级、列车地板结构防火隔离能力、客室电气设备柜防火能力等性能指标亦是影响车辆单列列车概算的重要因素。

上述两项因素使得单列列车投资概算增加约 100 万~150 万元/辆。

2.1.3 车辆编组对投资的影响

初步设计批复时,车辆初期运营采用 23 列 6 编组 B 型列车方案。通过对初期客流的进一步分析,结合徐州轨道交通 3 号线一期工程的车辆编组(4

辆编组 B 型车)和运营组织情况,最终决定将徐州轨道交通 6 号线一期工程车辆编组调整为初期运营采用的 24 列 4 辆编组 B 型列车方案,节省投资约 3.08 亿元。

2.2 车辆基地

2.2.1 功能需求对投资的影响

车辆基地根据规划线路功能定位分为车辆段和停车场。车辆段根据检修作业范围分为架(厂)修段和定修段。车辆基地除应满足 CJJ/T 306—2020《城市轨道交通车辆基地工程技术标准》等相关标准、规范要求外,还应满足城市轨道交通 FAO 需求、安全要求及功能需要。如:FAO 线路车辆基地应合理划分 FAO 区域和非自动运行区域,FAO 区域可视作正线的延伸部分;两个区域之间应严格分区,区域间采用围栏、建筑物或其他设施隔离;FAO 区域应设置人员安全防护开关、门禁等设施。作业人员进入防护分区生产作业期间,由系统建立逻辑防护保障人员人身安全等。不同功能车辆基地的占地面积、库房大小、设备配置差别很大,投资差异也很大。

由于徐州轨道交通 6 号线近、远期采用 4/6 辆编组列车混跑模式运营,故停车列检库每股道均需兼顾 4/6 辆编组列车的停放,固定式架车机、洗车机、静调电源柜、检修作业平台等设备亦需满足 4/6 辆编组列车的作业需求,这些功能性需求的提出使得车辆基地的投资增加约 100 万元。

2.2.2 非功能需求对投资的影响

车辆编组及修程修制决定了车辆基地各类功能的库房、场区的规模大小。以汪庄车辆段设计方案为例,根据车辆 4 日检制度的规定,可调整停车列位与列检列位的设置比例,仅在列检列位设置检查坑和低位作业地坪;通过优化停车列位的线间距,并充分利用车站站线(配线)停车,运用库库房宽度由原先的 139.2 m 调整为 114.1 m,缩减 25.1 m。运用库占地面积的减少使得车辆段上盖盖体缩小,减少投资约 8 000 万元,加上柱式检查坑减少 12 列位、停车位减少 6 列位,直接工程总投资减少约 1.1 亿元。此外,为保障及配合车辆 4 日检制度的有效实施,车辆的可靠性指标需进一步提高。在车辆基地入段(场)线咽喉区增设车辆智能轨旁检测设备可降低车辆运行时的故障率,提升车辆 4 日检的可靠性;增设的受电弓及轮对动态检测系统和全车

360°动态图像智能检测系统增加投资约 1 200 万元。因此,可靠性指标等非功能需求亦是增加车辆基地投资的主要因素之一。

综上,GOA4 级 FAO 核心系统投资的关键组成是车辆系统及车辆基地。车辆系统和车辆基地投资除了满足 GOA4 功能外,客户特定的功能需求如智能维护、车辆编组、车辆修程修制以及车辆基地的功能定位等技术因素对 FAO 核心系统投资起到重要的影响作用。

3 影响 FAO 核心系统投资的安全需求分析

3.1 FAO 全系统安全评估需求对投资的影响

T/CAMET 04017. 5—2019《城市轨道交通 全自动运行系统规范 第 5 部分:工程安全评估》要求:“FAO 系统工程安全评估范围由业主根据项目特点确定,应开展设备系统级安全评估,包括核心系统中的信号、车辆、站台门等系统;宜对核心系统中的综合监控系统进行设备系统级安全评估;宜开展 FAO 系统级安全评估^[3]。”

随着城市轨道交通工程建设安全意识的不断提高,越来越多的城市在建设 FAO 线路时均选择第三方安全评估机构开展 FAO 全系统安全评估,评估系统应至少涵盖核心系统,即信号系统、通信系统、综合监控系统、站台门系统、车辆和车辆基地。据此,每条线路增加投资约 700 万~1 000 万元。

3.2 FAO 系统安全功能与安全等级目标对投资的影响

3.2.1 车辆系统

在 FAO 核心系统的安全评估活动中,建设方应重点关注系统新增安全功能。通过对 FAO 系统各危害事件的风险分析,进一步明确合理的系统安全功能,制定系统的安全功能清单,进行安全功能的危害分析,并根据运营可接受的风险矩阵制定明确的 SIL(安全完整性等级)目标。

以徐州轨道交通 6 号线列车的一个新增安全功能为例,由于缺乏司机瞭望,FAO 线路载客列车在运行过程中,更易发生与轨道上侵限物品相撞的危害事件,严重时可能存在脱轨的安全风险。因此,建设方组织相关方对车辆障碍物与脱轨检测装置的安全功能进行危害分析,确定该系统装置的 SIL 目标为 SIL2。大多数城市轨道交通工程采用的被动式障碍物探测系统的 SIL 为 SIL2,但个别城市还

在此基础上增设了主动障碍物检测系统,其 SIL 可达 SIL4。基于不同技术的主动障碍物检测系统造价亦不相同,以目前使用较多的激光雷达技术为例,其每列车增加的投资约为 100 万元。

主动障碍物检测技术目前大多还处于研究或小范围试用阶段,主动障碍物检测系统及其对应装备的可靠性和安全性还有待于进一步验证。因此,建设方可在满足安全需求的前提下,选择合适的障碍物检测系统,从而减少不必要的车辆成本支出。

3.2.2 综合监控及通信系统

T/CAMET 04017. 2—2019《城市轨道交通 全自动运行系统规范 第 2 部分:核心设备产品》对核心系统的安全性要求进行了定义,其中综合监控系统的 SIL 宜达到 SIL2^[4]。T/SHJX 0019—2020《城市轨道交通全自动运行线路初期运营前安全评估技术规范》对核心系统的安全性核验进行了定义,其中专用无线通信系统的 SIL 宜达到 SIL1^[5]。如果建设方采纳了上述规范建议,可选择第三方安全评估机构开展综合监控及通信系统的设备系统级安全评估,但这将为设备投资带来一定幅度的增加。

在 FAO 核心系统要求具有系统的、完整的安全需求条件下,系统安全功能及 SIL 目标除应满足国家、行业或企业相关标准外,还需依据不同线路的运营场景、运营管理及运营环境所对应的隐患风险可接受程度做出调整。否则,相应的工程投资会因此而成倍增加。

综上,通过对不同 FAO 线路核心系统投资概算指标的对比分析,从核心系统的功能需求、非功能需求及安全需求等 3 个方面,对影响核心系统投资的关键技术因素进行总结,如图 1 所示。

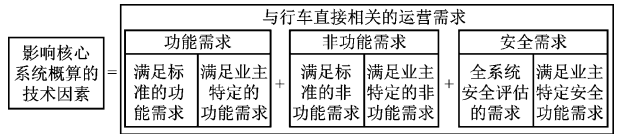


图 1 影响 FAO 核心系统投资的关键技术因素

Fig. 1 Key technical factors affecting FAO core system investment

由图 1 可见,满足业主特定的运营需求是 FAO 核心系统投资变化的直接原因。徐州轨道交通 6 号线特定的运营需求与核心系统投资变化情况,如表 3 所示。

表 3 徐州轨道交通 6 号线核心系统投资变化表

Tab.3 Changes in core system investment of Xuzhou Rail Transit Line 6

名称	影响因素	投资变化/万元	需求类型
车辆	增加 GOA4 级功能	<i>a</i>	功能需求
	可靠性、防火性能提升	<i>b</i>	非功能需求
	车辆编组调整	- 30 800	非功能需求
车辆基地	4/6 辆编组设计	100	功能需求
	运用库停车方案调整	- 11 000	非功能需求
	4 日检可靠性的提高	1 200	非功能需求
信号、通信、综合监控、站台门、车辆和车辆基地	FAO 全系统安全评估	700	安全需求
合计		- 27 300	

注: $a + b = 12\,500$ 。

4 结语

对 FAO 线路而言,在其工程建设前期,建设方可结合本文提出的三方面运营需求要素进一步深入分析,理性制定 FAO 核心系统投资计划。FAO 核心系统建设的目标和定位以及运营需求将直接影响工程投资的高低,宜选择满足运营需求的最基本、最必要、最关键的 FAO 核心系统。如过于追求“先进性”“大而全”或“过度冗余”都将对工程投资的经济技术指标产生影响。总之,FAO 核心系统的建设与投资应与所在城市的经济发展相适应,与线路运营需求相匹配,力求实现成本和效益双丰收。

参考文献

[1] 韩宝明,李亚为,鲁放,等. 2021 年世界城市轨道交通运营统计与分析综述[J]. 都市快轨交通, 2022, 35(1): 5.
HAN Baoming, LI Yawei, LU Fang, et al. Statistical analysis of urban rail transit operations in the world in 2021: a review[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2022, 35(1): 5.

[2] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 全自动运行系统规范 第 7 部分:运营管理:T/CAMET 04017. 7—2019 [S]. 北京:中国铁道出版社,2019.
China Association of Metros. Urban rail transit — fully automatic

operation system specification—part 7: operation management: T/CAMET 04017. 7—2019[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2019.

[3] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 全自动运行系统规范 第 5 部分:工程安全评估:T/CAMET 04017. 5—2019 [S]. 北京:中国铁道出版社,2019.
China Association of Metros. Urban rail transit — fully automatic operation system specification—part 5: engineering safety assessment: T/CAMET 04017. 5—2019 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2019.

[4] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 全自动运行系统规范 第 2 部分:核心设备产品:T/CAMET 04017. 2—2019 [S]. 北京:中国铁道出版社,2019.
China Association of Metros. Urban rail transit—fully automatic operation system specification—part 2: core equipment product: T/CAMET 04017. 2—2019[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2019.

[5] 上海市交通运输行业协会. 城市轨道交通全自动运行线路初期运营前安全评估技术规范: T/SHJX 0019 — 2020 [S]. 上海:上海市交通运输行业协会,2020.
Shanghai Transportation Trade Association. Urban rail transit—fully automatic operation line—technical acceptance specification for trial operation: T/SHJX 0019—2020[S]. Shanghai: Shanghai Transportation Trade Association, 2020.

(收稿日期:2022 - 09 - 16)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》
投稿网址:tougao. umt1998. com