

中低速磁浮交通系统工程造价优化^{*}

王向灿 邱 冰 戴 旺 邓娟红 杨朝琴

(湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 410200, 长沙//第一作者, 工程师)

摘 要 目前我国中低速磁浮交通建设项目较少,设计经验相对薄弱,在设计过程中造价往往难以控制。针对中低速磁浮交通项目,做到既满足项目功能需求又能达到造价最优是业界面临的难题。依托我国某中低速磁浮项目,对该项目中造价控制的主要影响因素进行全面分析。结合中低速磁浮交通的特征,从不同线路敷设方式、车站站间距、车站规模、区间桥梁结构、轨道工程、机电系统、车辆基地等方面通过对比提出优化措施,形成一套系统的工程造价控制参考体系。结果表明:通过合理确定站间距、增加路基敷设长度,以及控制车站规模能有效降低工程造价;桥梁墩柱尺寸优化及并置轨道梁的选用可节约大量建筑材料;竞争性招投标,以及标准化、模块化的轨排研究与设计是轨道工程造价控制的关键;机电系统设计中应充分运用价值工程的理念;应对车辆基地总平面及竖向布置设计进行有效优化。

关键词 中低速磁浮交通系统;工程造价;影响因素;优化措施

中图分类号 F530.31:U237

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.06.029

Project Cost Optimization of Medium-low Speed Maglev Transit System

WANG Xiangcan, QIU Bing, DAI Wang, DENG Juanhong, YANG Chaoqin

Abstract Currently, China has relatively few medium-low speed maglev transit construction projects, causing relative lack of design experience, and difficulty in cost control through design process. For medium-low speed maglev transit project, how to meet project function demands with optimal cost is an industry-wide challenge. Based on a medium-low speed maglev transit project in China, the main influencing factors of cost control in the project are comprehensively analyzed. Considering characteristics of medium-low speed maglev transit, optimization measures are proposed from different aspects such as different line laying modes, station spacing, station size, interval bridge structure, track engineering, electromechanical system and vehicle base, forming a systematic reference system

for cost control. Results show that measures including reasonable station spacing, increasing subgrade laying length, and controlling station size can effectively lower project construction cost; bridge pier size optimization and selection of parallel track beams can save a significant amount of building materials; competitive bidding, standardized and modularized track design are key factors in controlling the cost of track engineering; the concept of value engineering should be fully utilized in electromechanical system design; and vehicle base layout design should be optimized in both general layout and vertical arrangement.

Key words medium-low speed maglev transit system; construction cost; influencing factor; optimization measure

Author's address Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., 410200, Changsha, China

目前,我国中低速磁浮交通项目较少,若能总结其建设中的经验和教训,降低后续磁浮交通项目的工程造价,必将为磁浮交通的快速发展带来可观的经济和社会效益。

文献[1-2]从城市轨道交通建设的各个阶段出发,全面研究各阶段工程造价控制中存在的问题及其影响因素,确定了城市轨道交通综合工程造价控制的具体措施。文献[3]综合分析中低速磁浮交通唐山试验线研发过程中的主要创新内容,为施工和推广应用提供了参考。文献[4-5]对中低速磁浮交通系统在各类城市的适用性以及不足之处进行了详细介绍,研究了中低速磁浮交通的技术特点和经济性,探索了中低速磁浮交通今后发展的方向。

本文基于我国某磁浮快线,通过现场调研及设计资料分析,对中低速磁浮交通系统工程造价影响进行分析,提出合理优化措施,有效降低了工程造价,为后续磁浮交通项目的建设提供参考。

^{*} 湖南省科技创新计划资助项目(2022GK4033);湖南省交通运输厅科技进步与创新计划项目(202014)

1 中低速磁浮交通系统的技术特点

目前应用的中低速磁浮列车主要是依靠车上安装的可控电磁铁对钢质轨道的吸引力与车辆重力平衡的原理使列车悬浮在轨道上方。当车辆与轨道的纵向中心线发生横向偏移时,电磁铁与轨道悬浮面发生横向错位,电磁吸引力的边缘效应形成横向分力,促使车辆纵向中心线回复到轨道纵向中心线上,由此实现列车轨道导向。列车的牵引则依靠直线感应电机推动。中低速磁浮车辆利用电磁力的相互作用实现牵引,不以传统轮轨间摩擦力为牵引动力,突破摩擦力的限制使其有更大的爬坡能力。同时采用直线电机直接驱动方式,无减速齿轮等驱动装置,使其具有良好的曲线通过能力,且转弯半径较小。磁浮车辆利用电磁力的相互作用使车辆悬浮于轨道上方,车辆运行过程中不存在车轮与钢轨接触产生的振动和噪声,具有良好的舒适性。中低速磁浮列车环抱在轨道上运行,无脱轨危险;同时磁浮列车能通过电制动、机械制动、“落车”辅助制动等方式进行制动,因此其具有更高的安全性能。中低速磁浮交通系统的高科技属性及其独特性能使其在未来轨道交通领域具有良好的发展空间。

2 中低速磁浮交通系统工程造价优化

本文选取我国某磁浮快线作为研究对象。该线路全长 18.55 km,其中高架区间长约 16 km,全线设置 3 座高架车站,新建车辆段与综合基地 1 处。该项目总投资 46 亿元,技术经济指标为正线 2.48 亿元/km。根据中低速磁浮交通系统的特征及工程费用的组成,从线路敷设方式、站间距、车站规模、桥梁结构、轨道、机电系统及车辆基地等 7 个方面对项目工程造价的影响进行分析并提出优化措施。

2.1 线路敷设方式

中低速磁浮交通线路的敷设方式分为 3 种:

1) 路基敷设。结合沿线地形采用路基敷设时,具有施工进度较快、投资较为节省、风险因素小等优点;但缺点是对于路基的变形控制要求较高,涉及的征地占地面积较大。

2) 高架敷设。采用高架线路敷设时,线路运行与地面交通互不干扰,其工程造价一般介于地面线和地下线之间,能有效节约城市土地资源,选线较为灵活。但其对于市容市貌影响较大,施工工序较

为复杂。

3) 地下敷设。地下线路设置于隧道中,与地面交通完全分离,基本上不受气候变化的影响。但其需要较大的工程投资、较高的施工技术,施工周期长、风险大。

该磁浮快线项目正线高架桥长约 16 km,占正线长度的 87%,其技术经济指标如表 1 所示。除大跨高架桥外,该项目的技术经济指标每双延米约为 5.3 万元。低置路基段长 1.4 km,占正线长度的 7.5%,工程造价约 3 600 万元,技术经济指标每双延米为 2.6 万元。

表 1 某磁浮快线高架区间的技术经济指标
Tab.1 Technical and economic index of a maglev express elevated interval

区间	长度/m	造价/万元	技术经济指标/(万元/m)
1 号高架区间	7 107	37 067	5.2
大跨高架桥	280	3 244	11.5
2 号高架区间	8 696	46 068	5.2

由表 1 中的数据分析:低置路基段每延米工程造价相对高架桥段减少约 50%,即每延米减少 2.6 万元。当地基条件较好、填方高度不大,在比较空旷且道路和建筑物稀少的地带,可适当增加路基段线路长度占比,以降低工程造价。该工程桥梁占比为 87%,若能结合地形及周边环境条件,将其占比降低 10%,即增加长 1 855 m 的路基,就可节约工程造价 4 823 万元,降低正线技术经济指标 260 万元/km。

2.2 站间距

中低速磁浮交通工程车站一般以高架车站为主,为了最大限度吸引客流并方便乘客,车站一般设置在商业中心、文化娱乐中心及交通枢纽等处。若站间距设置过短,会降低线路运营速度,增加能耗、配车数量及车站投资,同时不利于运营效率的提高;若站间距设置过长,又会给乘客带来不便,增大车站负荷,降低对客流的吸引力。

该磁浮快线项目设车站 3 座,平均站间距为 9.3 km。以长 18.55 km 的正线为例,当车站数量变化时,折算到每 km 技术经济指标(含土建及机电费用)变化如表 2 所示。

由表 2 中的数据可以看出,工程技术经济指标与车站数量成线性递增关系,对工程造价影响很大。该项目为枢纽间的快速运输通道,较大的站间

表 2 某磁浮快线车站技术经济指标

Tab.2 Technical and economic index of a maglev express station

车站数量/座	平均站间距/km	技术经济指标/(万元/km)
3	9.3	1 535
9	2.3	4 607
18	1.1	9 213

距不仅能满足乘客对于节约时间的需求,更能大幅提高运营效率,同时也能节省投资。因此,针对具体建设项目,应根据功能定位充分进行现场调研、科学预测客流需求、合理确定站间距,从而达到节省投资的目的。

2.3 车站规模

城市轨道交通车站可分为高架车站、地面车站和地下车站,车站的规模、装修标准直接影响其工程造价。该项目共设 3 座高架车站,由于线路定位性质,线路起、终点枢纽换乘车站为本省对外的门户窗口,所采用的服务标准高于一般车站标准。3 座车站均采用 3 辆编组、长 50 m 的有效站台,每个站房建筑物长度按超过 2 列列车的有效站台,总建筑面积约 2.5 万 m²,采用封闭式站台中央空调系统。

通过现场调研,部分车站空间利用率不高,可在满足功能需求的前提下,通过优化流线、调整空间布局来控制建筑物长度,减少建筑面积。同时对车站装修采取限额设计、控制站前广场面积等优化措施。经初步分析,采取上述各项优化措施后预估节约工程造价 2 800 万元,降低正线技术经济指标 151 万元/km。

2.4 桥梁结构

2.4.1 墩柱结构

根据现场调研及设计资料,与某在建磁浮项目高架区间桥梁结构的桥墩相比,该项目高架区间桥梁结构所采用的桥墩尺寸偏大,因此,对桥墩尺寸进行优化设计(见图 1)。该设计不仅能节省工程材料,同时还能够减少用地、灵活选线,提高了社会效益。

墩柱按优化图纸设计时,可节约工程量 7 903 m³、节约投资约 1 475 万元,正线技术经济指标减少 80 万元/km。

2.4.2 梁型

磁浮工程通常采用的梁型包括:

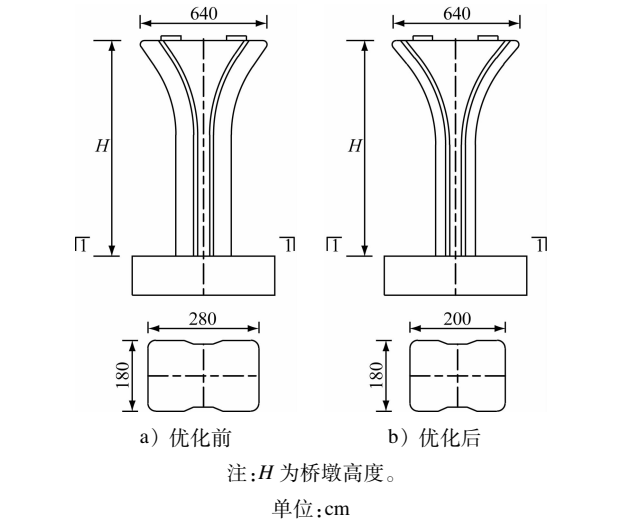


图 1 墩柱结构优化前后尺寸图
Fig. 1 Dimensional drawing of pier column structure before and after optimization

1) 并置轨道梁。并置轨道梁的主要优点为体积小、质量轻,工程量相对较少;但缺点是其截面尺寸较小、施工工艺复杂、模板成本较高、施工精度控制要求高。

2) 整体箱梁。整体箱梁上层为承轨梁、下层为桥梁结构。其主要优点为整体受力性能较好,外观简洁、美观,线间距易调整,结构适应性较强;但也存在梁体较重、工程量较大,以及道路运输较困难而需要架桥机运架施工的缺点。

通过设计图纸计算,上述两种梁型的工程量对比如表 3 和表 4 所示。

表 3 桥梁上部结构工程量汇总
Tab.3 Summary of bridge superstructure construction quantities

名称	工程量		
	混凝土/m ³	钢绞线/t	钢筋/t
整体箱梁	111 800	4 450	23 580
并置轨道梁	89 600	3 030	20 040

表 4 桥梁下部结构工程量汇总
Tab.4 Summary of bridge substructure construction quantities

名称	工程量	
	基础/m ³	墩柱/m ³
整体箱梁	48 300	62 700
并置轨道梁	43 500	58 300

由表 3 和表 4 可见,并置轨道梁与整体箱梁均采用预制安装方案,且其单位指标差异不大。桥梁

上部结构综合技术经济指标为 4 600 元/m³,基础、墩柱综合技术经济指标分别为 2 900 元/m³ 和 1 900 元/m³。因此,合理考虑设计盈余,采用并置轨道梁替代整体箱梁,可节约混凝土约 31 400 m³,降低工程造价约 12 300 万元,降低正线技术经济指标 664 万元/km。

2.5 轨道

中低速磁浮轨道是磁浮交通工程中与车辆最密切相关与核心的部分,也是车辆磁浮控制系统和牵引系统的重要组成部分。该项目轨道工程造价为 5.0 亿元,正线技术经济指标为 2 700 万元/km,约占工程总投资的 11%。区别于普通轮轨,磁浮工程轨排和道岔还未进入批量化生产,且对制造安装精度的要求较高,故工程造价相对较高。

通过对国内主要磁浮轨道生产厂家的调研,经生产工艺及采购途径优化,轨排及道岔预期技术经济指标如表 5 所示。

表 5 中低速磁浮轨道相关技术经济指标
Tab.5 Relevant technical and economic index of medium-low speed maglev transit track

不同铺轨技术经济指标/ (万元/km)		不同类型道岔技术经济指标/ (万元/组)		
直线段	曲线段	单开	渡线	三开
975	1 075	450	900	510

该项目总铺轨里程约为 38.3 km,道岔共计 7 组。通过上述技术经济指标与概算指标对比,经生产工艺优化及竞争性招投标措施,轨道工程造价可降低约 5 100 万元,正线技术经济指标降低 275 万元/km。

通过对该项目的调研,结合与生产厂家就生产工艺及制造安装成本的研讨,采取下述优化建议,预计可降低工程造价约 5%:

1) 轨排采用标准化、模块化设计。通过轨排优化设计,可实现不同线路纵坡条件下直线段、相同圆曲线半径的曲线段轨排的标准化与通用性,大幅提升设计、制造、存放管理和施工效率。

2) 针对中低速磁浮交通道岔结构等可能发生的车轨耦合振动或自激振动开展深入研究,减小道岔钢梁结构尺寸,降低道岔系统工程造价。

3) 优化资源配置,集中建立本地化轨排制造基地。

2.6 机电系统

机电系统投资主要为机电设备及其安装费用,

项目工程造价优化的关键在于设备价格与技术方 案。通过对初步设计的深入研究和实地考察,采取如下优化措施降低工程造价:充分运用价值工程的理念和方法合理降低机电设备的规格、技术经济指标及数量;优化线路供电方式,合理设置牵引变电所;考虑既有设备共用及资源共享。

2.7 车辆基地

车辆基地是一种大型、专业化较强的车辆和设备的维修场所,其工程造价控制的关键在于车辆基地选址及其建设规模。车辆基地选址应保证其与接轨点之间有适当的距离,在满足线路坡度、平面曲线半径和信号要求的前提下,尽量缩短出入线的长度,既要保证正常运营作业的需要,又要尽量减少工程投资。同时还应注意选址的地形、地貌和周围环境,避免出入线因穿越建筑物、构筑物或跨越河流、水域而增加工程量和投资。车辆基地建设规模应以各类设施、功能布局满足生产和安全为前提,严格按照既有规范执行,控制列位总规模、车库长度及列位间距,优化总平面及竖向布置设计,与规划地块相契合,功能布局清晰紧凑,同类库房采用一体化、立体化建设,最大程度控制未利用土地,减少占地面积。

2.8 优化结果

结合上述七方面中低速磁浮项目的工程造价优化措施,通过计算得出优化后项目总投资约 42.6 亿元,较概算减少 3.4 亿元,工程造价降低比例约 7.4%,正线技术经济指标为 2.3 亿元/km,效果较为明显。

3 结语

1) 通过对工程实例的分析,相关优化措施能有效降低中低速磁浮交通系统的工程造价。

2) 根据项目功能定位、客流需求及建设条件,通过合理确定站间距、增加路基敷设长度,以及控制车站规模能有效降低工程造价。

3) 中低速磁浮交通高架桥区间结构尺寸优化,以及桥梁墩柱及并置轨道梁的选用可节约大量建筑材料,工程造价得以降低。

4) 竞争性招投标,标准化、模块化轨排研究及设计,以及本地化轨排制造是中低速磁浮交通轨道工程造价控制的关键。

5) 中低速磁浮交通机电系统设计中应充分运用价值工程的理念,同时考虑既有设备共用与资源

共享以节省工程造价。

6) 应对车辆基地总平面及竖向布置设计进行优化,以控制列位总规模、车库长度,最大程度减少占地面积,控制工程造价。

参考文献

- [1] 刘丹. 城市轨道交通工程造价控制分析[J]. 铁道工程学报, 2014, 31(6): 104.
LIU Dan. Analysis of cost control of urban rail transportation construction[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014, 31(6): 104.
- [2] 李鹏. 城市轨道交通工程造价控制措施探讨[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(8): 89.
LI Peng. Discussion on the construction cost control measures for urban rail transit[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(8): 89.
- [3] 张佩竹. 我国中低速磁浮交通工程的自主创新技术研究[J]. 铁道工程学报, 2009, 26(10): 90.
ZHANG Peizhu. Research on the technology for the self-innovation of low/medium-speed maglev traffic engineering[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009, 26(10): 90.
- [4] 曾国保. 中低速磁浮交通的适应性及工程化发展方向[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(10): 111.
ZENG Guobao. The adaptability and the improvement in engineering of the lower-medium speed maglev transit system[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(10): 111.
- [5] 肖飞. 中低速磁浮交通的技术经济性分析[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(3): 99.

XIAO Fei. Techno-economic analysis of low and medium-speed maglev transport[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(3): 99.

- [6] 梁潇, 陈峰, 傅庆湘. 160 km/h 中速磁浮交通系统的关键技术问题[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(9): 21.
LIANG Xiao, CHEN Feng, FU Qingxiang. Key technical issues on 160 km/h medium-speed maglev transit system[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(9): 21.
- [7] 周晓明, 刘万明. 长沙中低速磁浮工程建设中的重要举措[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(5): 1.
ZHOU Xiaoming, LIU Wanming. Key technologies in the construction of medium and low speed maglev in Changsha city[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(5): 1.
- [8] 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 城市轨道交通工程项目建设标准: 建标 104—2008[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
Ministry of Construction of the People's Republic of China, National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. JB 104—2008[S]. Beijing: China Planning Press, 2008.
- [9] 湖南省住房和城乡建设厅. 湖南省中低速磁悬浮交通设计标准: DBJ 43/T007—2017[S]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2018.
Hunan Provincial Department of Housing and Urban-Rural Development. Standard of Hunan for design of medium and low speed maglev transit: DBJ 43/T007—2017[S]. Changsha: Hunan Science & Technology Press, 2018.

(收稿日期: 2021-01-08)

(上接第 160 页)

- [2] CENELEC. Railway Applications-the specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS) part 1: generic RAMS process: CEI EN 50126-1: 2017[S]. Brussels: CENELEC, 2017.
- [3] CENELEC. Railway applications-the specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS) part 2: systems approach to safety: CEI EN 50126-2: 2017[S]. Brussels: CENELEC, 2017.
- [4] 香港机电工程署. 港铁荃湾线新信号系统测试事故调查报告[R]. 香港: 香港机电工程署, 2019.
Hongkong Electrical and Mechanical Services Department (EMSD). Investigation report on incident of the new signalling system testing on MTR Tsuen Wan Line[R]. Hongkong: Hongkong EMSD, 2019.

- [5] Project Management Institute. 项目管理知识体系指南(PMBOK 指南)[M]. 6 版. 北京: 电子工业出版社, 2018.
Project Management Institute. Project management body of knowledge (PMBOK guide)[M]. 6th ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2018.
- [6] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 质量管理体系要求: GB/T 19001—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Quality management systems—requirements: GB/T 19001—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.

(收稿日期: 2020-12-23)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821