

# 高速磁浮数智化顶层设计研究<sup>\*</sup>

孟川舒

(中国铁道科学研究院集团有限公司电子计算技术研究所, 100081, 北京)

**摘要** [目的] 数智化是轨道交通高质量发展的必由之路, 高速磁浮数智化顶层设计目前尚处空白, 需就此开展研究, 以满足高速磁浮高质量建设、运营及可持续发展的需要。

[方法] 介绍了我国铁路和城市轨道交通数智化进展, 总结了当前轨道交通领域数智化的特点。结合高速磁浮技术特点, 从技术基础、时间窗口及社会需要等方面分析了高速磁浮数智化具有的现实基础, 从技术、业务、管理及社会等四个层面归纳了高速磁浮数智化的内涵。提出高速磁浮数智化的基本路径, 围绕开展顶层设计、建设技术底座、深化智能应用、优化组织管理及构建智慧循环等五个环节进行阐述。采用系统工程方法设计高速磁浮数智化总体框架, 将整个系统抽象成服务、功能、逻辑、技术、物理、数据及安全等七个子框架。[结果及结论] 高速磁浮数智化不是一个单纯的技术概念, 而是一个持续发展演进的过程。其基本路径以数据为主线, 分为演进和实施两个维度。其总体框架是开放、弹性、多维度、多层次的, 包括系统工程方法、系统抽象、数据体系及智慧循环四个方面。概念内涵、基本路径及总体框架共同构成了高速磁浮数智化顶层设计的基础。

**关键词** 高速磁浮; 数智化; 顶层设计

**中图分类号** U237

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2024.08.002

## High-speed Maglev Digitization and Intelligentization Top-level Design

MENG Chuanshu

(Institute of Computing Technologies, China Academy of Railway Sciences Group Co., Ltd., 100081, Beijing, China)

**Abstract** [Objective] Digitization and intelligence (D&I) is essential for rail transit high-quality development. Currently, there is a lack of top-level design for high-speed maglev D&I, necessitating research to meet the requirements for the high-quality construction, operation, and sustainable development of high-speed maglev system. [Method] The progress of D&I advancements for railway and urban rail transit in China is introduced, and the characteristics of current D&I development in rail transit sector are summarized. Considering its unique technological characteristics, the practical foundation for high-

speed maglev D&I are analyzed from aspects such as technological basis, time window, and social needs. The connotations of high-speed maglev D&I are identified from four levels of technology, business, management, and society. A basic evolution path for high-speed maglev D&I is proposed, elaborating on five key aspects: top-level design, technology-based construction, intelligent application deepening, organizational management optimization, and intelligent cycle establishment. Based on system engineering methods, the overall framework for high-speed maglev D&I is designed, abstracting the entire system into seven sub-frameworks: service, function, logic, technology, physics, data, and security. [Result & Conclusion] High-speed maglev D&I is not a simple technical concept, but a continuous process of development and evolution. Revolving around data as the main thread, the basic path is divided into two dimensions: evolution and implementation. Its overall framework is open, flexible, multi-dimensional, and multi-level, including four aspects: system engineering method, system abstraction, data system, and smart cycling. The conceptual connotation, basic path, and overall framework collectively constitute the foundation for high-speed maglev D&I top-level design.

**Key words** high-speed maglev; digitization and intelligentization; top-level design

随着信息技术的飞速发展, 数字化、智能化已经突破技术范畴, 与物理世界深度融合, 对社会、经济及文化等产生了广泛而深远的影响, 在此背景下数智化概念应运而生。从狭义上来看, 数智化可认为是数字化与智能化在技术层面的有机融合, 其由数字化所产生的数据支撑智能化实现, 使计算机系统具有一定智能, 由智能所产生的“智慧”的累积又使数据实现价值的增长或数量的增加, 并使数字化过程更加智能, 形成正向循环。从广义上来看, 数智化可以看作是在人的参与下, 通过物理世界实现数字化和智能化的复杂系统工程, 是利用先进信息

<sup>\*</sup> 中国铁道科学研究院集团有限公司科研开发基金项目 (2022YJ077)

技术实现人与物理世界双向适应融合、协同发展演进的进程。

轨道交通是当今社会的基本组成部分,数智化是轨道交通发展的必然进程,近年来智能高速铁路、智慧城市轨道交通(以下简称“城轨”)概念相继提出并启动建设。高速磁浮是一种全新技术制式的轨道交通系统,与传统轮轨的本质区别是车辆依靠电磁力悬浮于轨道之上无接触运行。我国完全自主知识产权的高速磁浮系统已经具备了技术基础,正在进入工程化阶段。同步开展高速磁浮数智化顶层设计及相关研究,将对构建安全绿色、高效便捷、舒适人文的高速磁浮系统,实现高速磁浮高质量建设运营和可持续发展发挥重要支撑作用。目前,针对此方面的研究还基本处于空白。本文以可持续发展为目标,初步探讨了高速磁浮数智化的基础、内涵、基本路径及总体框架。

## 1 轨道交通领域数智化进展

### 1.1 铁路领域

数字化、智能化已经成为世界各国铁路的发展方向,欧美多个国家相继提出了铁路数字化与智能化发展规划,并制定了实施路线图和重点任务<sup>[1]</sup>。我国从2017年全面启动智能京张高速铁路建设,为我国高速铁路智能创新拉开了序幕<sup>[2]</sup>。同时,启动了智能高速铁路战略研究,形成了我国智能高速铁路发展的顶层设计。目前,我国智能高速铁路研究应用已经进入2.0阶段<sup>[3,4]</sup>。另一方面,随着我国数字经济、数字化转型战略的提出,铁路数字化转型也顺势开启。以往铁路数字化研究多偏于技术应用,对数字技术同工作流程、组织及业务模式深度融合以实现创新和转型的研究尚不充分。对此,文献[5]较为系统地分析了铁路数字化转型的必要性和挑战。文献[6]结合运输企业实际情况,提出铁路运输企业数字化转型的总体思路。

### 1.2 城轨领域

城轨领域提出了智慧城轨的概念和发展目标。2020年,中国城市轨道交通协会发布了《中国城市轨道交通智慧城轨发展纲要》<sup>[7]</sup>,形成了我国城轨智慧化发展的指导性文件。同时,各地也在积极探索开展智慧城轨建设,如北京市地铁运营有限公司发布了《首都智慧地铁发展白皮书》,上海申通地铁股份有限公司提出了上海智慧地铁“1135X”架构等。相较于铁路,城轨自动化程度较高,具备更好

的数智化实现基础。

### 1.3 我国轨道交通领域数智化特点

无论是铁路还是城轨,现阶段数智化进程都具有如下主要特点:

1) 顶层设计方面。面向智能化的顶层设计框架已初步形成,覆盖了轨道交通建设、运营、维护及改造等全生命周期,以及人、机、物、环、法全要素,这与近年来人工智能技术的迅速发展有关,但对数字化转型以及数智化的认识、研究及顶层设计还有待深入。

2) 具体应用方面。以智能化应用为主,但在具体应用中还处于以单点智能应用来适应和改造业务的初级阶段,信息化属性偏强,整体水平有限。数字化方面,以数字技术应用为主,数字化程度尚浅,数据价值及运用水平还不高。整体而言,数智化属性尚弱。

3) 数智化基础方面。铁路和城轨在构建统一的基础支撑平台方面具有共识,该平台主要包括数据平台、基础能力平台及共性应用平台。

我国高速磁浮尚未开展工程建设,数智化应用还处于技术研究阶段,与系统性应用还相距甚远,因此,更应充分借鉴轮轨系统数字化和智能化实际经验,结合高速磁浮的特点,从初期就开始统筹规划推进高速磁浮数智化进程。

## 2 高速磁浮数智化顶层设计的现实基础与内涵

### 2.1 高速磁浮数智化顶层设计的现实基础

#### 2.1.1 高速磁浮系统组成与特点

高速磁浮系统是基于磁悬浮技术所构建的高速轨道交通系统,这决定了其与轮轨系统在技术实现上的巨大差异。高速磁浮系统可分为运行系统和运营系统。运行系统是指能够支撑高速磁浮基本运行的最小化技术系统,由列车车辆、线路轨道、牵引供电及运控通信等四个专业子系统组成。依据不同的悬浮原理,高速磁浮系统可分为常温常导电磁悬浮、常温永磁电动悬浮、低温超导电动悬浮及高温超导钉扎悬浮等四种制式<sup>[8]</sup>,不同制式在车辆结构、轨道结构、牵引定子结构、悬浮导向及测速定位等方面有所不同。运营系统是指能够满足运营需要的完备系统,除此之外还包括各专业运维、安全保障、运输调度、客运服务、能效管理及网络信息等业务。高速磁浮系统组成如图1所示。

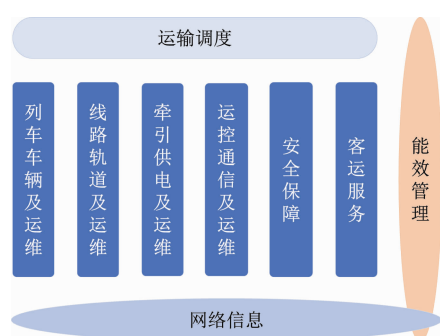


图1 高速磁浮系统组成

Fig. 1 Composition of high-speed maglev system

高速磁浮系统主要具有以下特点：

1) 列车:高速磁浮列车依靠电磁力悬浮运行,与轨道无机械接触。

2) 线路轨道:高速磁浮线路对轨道的平顺度要求高,对电磁线圈布设的精度要求也高。

3) 牵引供电:高速磁浮系统采用同步直线电机牵引,将定子布设在轨道上,将列车作为动子牵引制动,并对列车进行无接触供电。牵引控制系统与运行控制系统之间存在紧耦合关系,它们都采用了分区供电的方式,并共同参与控车过程。

4) 运控通信:高速磁浮列车采用地面控车模式和FAO(列车全自动运行)模式,对通信动态性、实时性要求高,采用毫米波通信。

5) 安全保障:高速磁浮系统运行速度非常高,因此对环境异常状态及系统异常状态感知反应的灵敏度、准确度要求高。

6) 总体上,整个高速磁浮系统对精密度、控制、感知及通信等的要求都很高。

### 2.1.2 现实基础

1) 技术基础。通过以上特点不难发现,高速磁浮系统是一个完全依靠电能的精密分布式机电控制系统,可通过电磁数学关系和电学测量数据进行表征和智能监控,从而发挥车轮作用的悬浮导向功能。例如,文献[9]提出基于数据辨识磁浮列车悬浮系统参数的方法,文献[10]提出基于智能传感网络和人工智能技术实现悬浮系统的在线智能监控。此外,牵引、运控等关键功能也都可以进行数字化表征。整个系统依靠数据信息和智能算法实现精确控制,具有实现全面数字化、智能化的先天技术基础,这与轮轨系统有很大区别。

2) 时间窗口。传统轨道交通在信息化、数字化及智能化过程中,由于缺乏前期统筹,加之轨道交

通各专业垂直独立的管理特点,往往出现数据不能充分融合共享、信息传递效率不高、数据效用发挥存在瓶颈,以及进行二次升级改造困难较多等现实问题。高速磁浮刚刚步入工程化阶段,此时将数智化前置考虑,有利于从初期就构建优化的系统和高效的运营体系,从而少走弯路,充分利用数据价值,真正发挥数智化的降本、提质及增效作用,实现高速磁浮的可持续发展。

3) 社会需要。高速磁浮是填补高速铁路与航空空白速度等级的新兴交通系统,其以时间换空间的社会服务属性更为鲜明,同属地社会与经济业态的融合程度将更深,因此数字经济、智慧城市的发展建设是高速磁浮数智化的社会现实需要和外部驱动力,应突破交通系统的范畴,从社会协同发展层面认识和推动高速磁浮数智化进程。

### 2.2 高速磁浮数智化顶层设计的内涵

高速磁浮数智化不是一个单纯的技术概念,而是一个持续发展演进的过程,其内涵是不断丰富发展的,主要体现在四个层面:

1) 技术层面。针对高速磁浮的技术特点,持续利用先进技术进行应用创新,推进高速磁浮物理系统、业务组织、管理决策及社会服务的全面数字化和智能化,充分实现数据融合共享与价值挖掘,进一步支撑高速磁浮系统从智能向智慧发展,最终具备自感知、自判断、自适应及自进化的能力。

2) 业务层面。在数智化技术的赋能下,使运输组织、运用维护等业务由传统的流程环节驱动向数据驱动转变。数据成为生产要素,数据反映的状态决定业务过程。而业务过程本身也实现了数字化和智能化,同时持续推进人员经验知识的数字化和智慧化,使系统智能持续进化。

3) 管理层面。发挥数据的穿透作用,精简管理组织和流程,提高管理效率。发挥数据的关联作用,实现专业从分立管控向综合协同管理转变,创新管理模式。基于数据智能和智慧数据,实现基于经验的决策向基于数据的智能辅助决策转变。

4) 社会层面。高速磁浮数智化是社会数智化进程的组成部分,高速磁浮通过数智化演进,实现从人适应系统向人与系统双向适应转变,从满足旅客交通服务需求向满足人在出行条件下的社会服务需求转变,使交通服务与社会服务相融合,形成以人为本、开放互联的创新服务模式,最终促进高速磁浮可持续发展。



### 3 高速磁浮数智化顶层设计的基本路径

高速磁浮数智化基本路径可分为演进和实施两个维度,其中:顶层设计的环节,数据是贯穿进程的主线。高速磁浮数智化演进的基本路径如图2所示。高速磁浮数智化演进主要包括规划设计、技术能力建设、数字化微智能、大数据强智能及人机融合智慧体五个阶段。

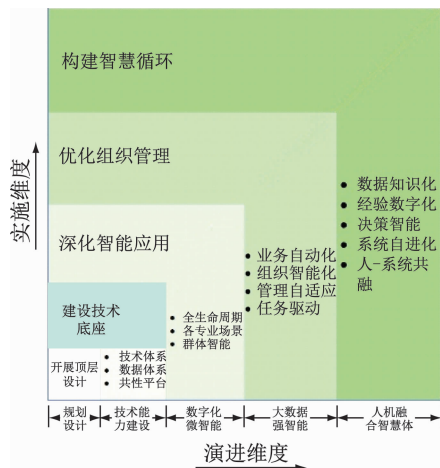


图2 高速磁浮数智化演进的基本路径

Fig. 2 Basic evolution path of top-level design for high-speed maglev digital intelligence

1) 开展顶层设计。通过顶层设计明确高速磁浮数智化的目标、范畴、框架、路线及任务等一系列问题,形成指导纲要,使数智化进程从初期就科学、规范、有序及高效地推进。

2) 建设技术底座。构建与高速磁浮系统适配、开放的技术体系,定义标准的技术接口和系统接口,支持技术持续创新,以及对各类应用的持续赋能;构建全面的数据体系,定义标准的数据格式和接口,使数据特别是悬浮、牵引及运控等系统原始物理数据充分共享融合,支持对数据资源的统一管理、调度及运用;构建统一的共性支撑平台,为数智化应用提供高精度时空基准、基础模型及算力支撑。

3) 深化智能应用。深化各专业、各场景全生命周期智能应用,结合高速磁浮技术特点实现全面智能化。同时,发挥大数据的智能分析作用,从专业单点智能向群体协同智能发展。

4) 优化组织管理。利用数据智能,提升专业特别是运维的自动化和智能化程度,精简业务组织和管理层级,降本增效。同时促进整个组织管理实现智能化,使其由业务驱动向任务驱动转变。

5) 构建智慧循环。通过整个系统的运转所积累的数据进行知识化处理,从而产生智慧,同时实现人员经验知识的数字化,补强系统智慧,形成人-智慧-数据-系统循环,构成人与系统的共融智慧体,实现决策智能和系统自进化,使高速磁浮系统可持续发展。

### 4 高速磁浮数智化顶层设计的总体框架

高速磁浮数智化是一项复杂长期的系统工程,需按照系统工程方法组织推进。而总体框架是实现高速磁浮数智化的路径、方法和要素的归纳提炼,是开放、弹性的,而非限定性的;也是具有层次结构的,可逐级分解的;更是多维度、多层次的。高速磁浮数智化顶层设计的总体框架如图3所示。

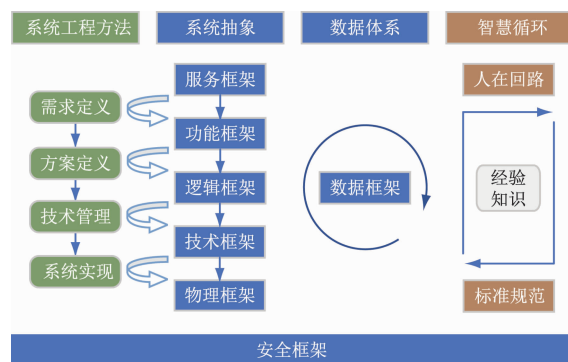


图3 高速磁浮数智化顶层设计的总体框架

Fig. 3 Overall framework of for high-speed maglev digital intelligence top-level design

1) 系统工程方法。系统工程方法是保障高速磁浮数智化实施演进的科学手段,可分为需求定义、方案定义、技术管理及系统实现等四个阶段。通过需求定义明确系统功能等预期目标,通过方案定义将功能进行逻辑分解,明确技术需求,进一步开展技术规划、控制、评估等技术管理工作,确定技术实现方案,最终在物理上实现系统目标。通过系统工程方法可以有效辨识风险,分清系统层次,确保系统成功构建。

2) 核心框架。结合系统工程方法,高速磁浮系统可层次化抽象成服务、功能、逻辑、技术、物理、数据及安全等七个子框架。其中:数据框架是数据体系构建的核心,安全框架是整个数智化实施演进的保障基础。① 服务框架。通过服务框架可以明确高速磁浮数智化的内外部用户主体、服务主体、场景需求及服务期望等。② 功能框架。功能框架可

在原始服务需求分析的基础上逐级映射,明确服务功能、系统功能及对应能力等。③ 逻辑框架。逻辑框架是将功能继续做逻辑分解,明确各功能点间的逻辑关系和数据流向,定义实现该功能和数据流转的技术需求和指标要求等。④ 技术框架。技术框架是高速磁浮数智化所涉及的技术体系集合,主要包括传感器技术、时空技术、通信技术、网络技术、数据处理与计算技术、大数据技术及人工智能技术等。技术框架是开放性的,新技术经过评估后将纳入该框架,以适应内外部技术发展创新的需要。⑤ 物理框架。物理框架根据功能、逻辑及技术来定义实现数智化应用的物理子系统及其交互关系,包括设备实体、物理部署及数据整合等。⑥ 数据框架。数据框架是构建全面的数据体系,包括数据规划、数据管理、数据运用及数据融合等方面,实现系统-数据映射、物理数据-业务数据-知识数据循环等重要基础功能。⑦ 安全框架。安全框架为所有环节提供安全保障,包括物理安全、技术安全、系统安全、应用安全、网信安全等。

3) 智慧循环。智慧循环既是数智化的实施环节,也是目标愿景,其中人在回路是实现智慧循环的关键因素,标准规范是这些共识和经验知识的阶段性固化。

## 5 结语

数智化是轨道交通高质量发展的必由之路,高速磁浮先天具有实现数智化的技术基础,其顶层设计对高质量实现高速磁浮数智化进程,助力我国完全自主化的高速磁浮成功建设运营,促进数智经济发展具有重要意义。本文分析总结了高速磁浮数智化的现实基础和内涵,提出了演进实施基本路径,从系统工程角度设计了总体框架,初步形成了高速磁浮数智化顶层设计基础,可为相关研究和具体应用提供参考。

## 参考文献

- [1] 李平,邵赛,薛蕊,等. 国外铁路数字化与智能化发展趋势研究[J]. 中国铁路, 2019(2): 25.  
LI Ping, SHAO Sai, XUE Rui, et al. Railway digitalization and intelligent railway development in other countries[J]. China Railway, 2019(2): 25.
- [2] 何华武,朱亮,李平,等. 智能高铁体系框架研究[J]. 中国铁路, 2019(3): 1.

- HE Huawu, ZHU Liang, LI Ping, et al. Study on the system framework of intelligent high-speed railway[J]. China Railway, 2019(3): 1.
- [3] 王同军. 智能铁路总体架构与发展展望[J]. 铁路计算机应用, 2018, 27(7): 1.  
WANG Tongjun. Overall framework and development prospect of intelligent railway[J]. Railway Computer Application, 2018, 27(7): 1.
- [4] 王同军. 中国智能高速铁路 2.0 的内涵特征、体系架构与实施路径[J]. 铁路计算机应用, 2022, 31(7): 1.  
WANG Tongjun. Connotation, architecture and implementation path of China Intelligent High-speed Railway 2.0[J]. Railway Computer Application, 2022, 31(7): 1.
- [5] 伍业君,李朝飞. 中国铁路数字化转型思考[J]. 综合运输, 2021, 43(6): 66.  
WU Yejun, LI Zhaoifei. Reflections on the digital transformation of China's railway[J]. China Transportation Review, 2021, 43(6): 66.
- [6] 武勇. 铁路运输企业数字化转型路径探索[J]. 中国铁路, 2022(11): 1.  
WU Yong. Analysis on the path to digital transformation of railway transport enterprises[J]. China Railway, 2022(11): 1.
- [7] 中国城市轨道交通协会. 中国城市轨道交通智慧城轨发展纲要[J]. 城市轨道交通, 2020(4): 8.  
China Association of Metros. Development outline of smart city urban rail transit in China[J]. China Metros, 2020(4): 8.
- [8] 梁建英. 中国高速磁浮交通系统发展现状与展望[J]. 科学, 2022, 74(5): 31.  
LIANG Jianying. Development status and future prospects of the high-speed maglev transportation system in China[J]. Science, 2022, 74(5): 31.
- [9] 宋一峰,佟来生,倪菲,等. 基于数据驱动的磁浮列车悬浮系统参数辨识[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(4): 857.  
SONG Yifeng, TONG Laisheng, NI Fei, et al. Data-driven parameter identification for levitation system of maglev train[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(4): 857.
- [10] 荣立军,梁涛,朱跃欧,等. 磁浮列车智能监控技术研究[J]. 中国科技成果, 2021, 22(24): 34.  
RONG Lijun, LIANG Tao, ZHU Yueou, et al. Research on maglev train smart monitoring technology[J]. China Science and Technology Achievements, 2021, 22(24): 34.

· 收稿日期:2023-06-05 修回日期:2023-06-21 出版日期:2024-08-10  
Received:2023-06-05 Revised:2023-06-21 Published:2024-08-10  
· 作者:孟川舒,高级工程师,15910653021@126.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license