

# 600 km/h 高速磁浮牵引系统的配置及其关键参数的选择\*

林 滢 秦 峰

(同济大学磁浮交通工程技术研究中心, 201804, 上海//第一作者, 工程师)

**摘 要** 目的:目前上海磁浮列车示范运营线设计的最高运行速度为 505 km/h,为适应 600 km/h 的高速运行,须对既有常导高速磁浮牵引系统的配置进行分析和优化设计。方法:站在牵引供电系统的角度,从直线电机稳态数学模型出发,在不改变直线电机基本结构和参数的前提下,提出了 600 km/h 高速磁浮牵引系统的优化方向:提高变流器的输出电压及容量,以及适当缩短牵引分区和定子段长度。基于以往工程可行性研究,对既有磁浮系统中牵引供电系统的相关边界条件进行了分析,认为馈电电缆和定子电缆限制了既有电机的输入电压和电流,而列车长度和定子开关站的数量又限制了定子段的长度,进一步明确了 600 km/h 高速磁浮牵引系统关键参数的选取原则,并给出了建议的参数。以一条平直轨道的线路为例设计了牵引系统,并以此为基础进行了牵引仿真计算。结果及结论:对于 5 节编组的常导高速磁浮列车,适当缩短分区长度至 20 km,定子段长度至 800 m,采用 32 MVA 的变流器,则列车可在加速运行 35 km 后达到 600 km/h 的运行速度。

**关键词** 600 km/h 高速磁浮;牵引系统配置优化;长定子直线同步电机

**中图分类号** U266.23:U237

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2023.08.019

## Configuration for 600 km/h High-speed Maglev Traction System and Selection of Key Parameters

LIN Ying, QIN Feng

**Abstract** Objective: The current design of Shanghai maglev train demonstration line has a maximum operational speed of 505 km/h. To adapt to the high-speed operation at 600 km/h, the configuration of existing normal conducting maglev traction system needs to be analyzed and optimized in design. Method: From the perspective of traction power supply system, based on the steady-state mathematical model of linear motors, the optimization direction for the 600 km/h high-speed maglev

traction system is proposed without altering linear motor basic structure and parameters; i. e., increasing the output voltage and capacity of converter, as well as appropriately shortening the traction sections and stator segments. Based on previous engineering feasibility studies, an analysis of the relevant boundary conditions of the traction power supply system in the existing maglev system is conducted. It is found that the feeding cables and stator cables limit the input voltage and current of the existing motors, while the train length and the number of stator switch stations limit the length of stator segments. This further clarifies the principles for selecting key parameters of the 600 km/h high-speed maglev traction system and provides recommended parameters. A traction system is designed based on a straight track and traction simulation calculations are performed consequently. Result & Conclusion: For a 5-car formation normal conducting maglev train, by appropriately reducing section length to 20 km and stator segment length to 800 m, and adopting a 32 MVA inverter, the train can reach an operating speed of 600 km/h after accelerating for 35 km.

**Key words** 600 km/h high-speed maglev; traction system configuration optimization; long stator linear synchronized motor

**Author's address** Maglev Transportation Engineering and Technology R & D Center, Tongji University, 201804, Shanghai, China

## 0 引言

科技部于“十三五”国家重点研发计划中设立了“高速磁浮交通系统关键技术研究课题”,致力于将常导高速磁浮列车的最高运行速度提高至 600 km/h。而国家发展和改革委员会在 2018 年印发的《增强制造业核心竞争力三年行动计划(2018—2020)》的通知中,也将研制新一代速度为 600 km/h

\*“十三五”国家重点研发计划项目(2016YFB1200602)

高速磁浮列车,列为轨道交通装备关键技术产业化的重点内容之一<sup>[1]</sup>。2020年6月21日,设计最高运行速度为600 km/h高速磁浮试验样车在同济大学嘉定试验线上完成了运行试验,标志着600 km/h高速磁浮车辆系统的研制工作已取得了阶段性成果。随着“十三五”的结束,600 km/h高速磁浮技术各子系统的研制工作已完成阶段性目标,开始进入应用研究阶段。

600 km/h以上常导高速磁浮技术可通过重新设计长定子直线电机、改变其结构参数和电气参数来实现,也可在既有的长定子直线电机基础上,通过优化升级外围系统来实现。经过前期三个五年计划的研制,我国相关行业已基本具备了既有常导高速磁浮核心装备的供货能力<sup>[2]</sup>。为避免既有产能和研究成果的巨大浪费,也为了缩短研究周期,“十三五”阶段600 km/h高速磁浮技术的研究在保持既有常导高速磁浮直线电机的特性参数不变的前提下,通过优化升级外围系统来提高电机使用的效率,以实现600 km/h的最高运行速度。

本文以长定子直线同步电机的数学模型为基础,对600 km/h高速磁浮牵引系统的配置进行分析,从高速磁浮系统工程项目的需求出发,结合既有高速磁浮牵引系统的结构特性和边界条件,在工程可实现的范围内对变流器的容量和参数选择进行了分析计算,以期对600 km/h高速磁浮技术的工程应用提供技术支撑。

## 1 长定子同步电机数学模型

上海磁浮列车示范运营线的列车设计最高运行速度为505 km/h<sup>[3]</sup>,试验测得的实际最高运行速度为501 km/h。若要实现600 km/h的运行速度,需要在各系统的设计和设备配置上对相关指标进行优化。

优化前,要确认既有大功率直线电机系统能否满足驱动的要求。从工作原理上说,高速磁浮列车所采用长定子直线同步电机与一般直线同步电动机的牵引控制工作原理类似。在转子磁场定向控制策略下,为了达到与悬浮磁场解耦的目的,直线同步电机的 $d$ 轴(即直轴)电流近似被控制为0。因此,长定子直线同步电机稳态时的电压方程为<sup>[4-5]</sup>:

$$\begin{cases} U_d = -\frac{\pi}{\tau_s} v L_q I_q \\ U_q = R I_q + \frac{\pi}{\tau_s} v L_{sm} I_m \end{cases} \quad (1)$$

$$U_d^2 + U_q^2 = U_s^2 \quad (2)$$

推力方程为<sup>[5-6]</sup>:

$$F_x = \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau_s} L_{sm} I_m I_q \quad (3)$$

式中:

$U_d$ 、 $U_q$ ——变流器输出端的 $d$ 轴及 $q$ 轴(即交轴)电压分量;

$\tau_s$ ——直线电机的极距;

$R$ ——直线电机定子绕组的电阻;

$v$ ——列车速度;

$U_s$ ——直线电机定子端输入电压;

$L_q$ ——直线电机 $q$ 轴电感;

$L_{sm}$ ——直线电机定子绕组与励磁绕组的互感;

$I_q$ ——直线电机 $q$ 轴定子电流;

$I_m$ ——励磁电流;

$F_x$ ——列车牵引力。

其中, $L_q$ 、 $R$ 分别为包含了馈电电缆和定子电缆上的漏感、电阻。

由式(1)和式(2),结合电机输入侧的电压可计算得到 $I_q$ ;根据 $F_x$ ,用牛顿第二运动定律可计算列车的加速度和速度。

## 2 牵引系统的配置优化

仔细分析式(1)和式(2)可以看出,电机的端电压与 $v$ 直接相关。在电机馈电电压一定的条件下,端电压限制了列车的最高运行速度。这是因为电机的反电势与转子速度成正比。电机电压须先克服反电势,才能产生定子驱动电流。由此,提高列车运行速度上限的优化有两个方向:优化方向一是提高变流器输出电压,即尽量提高直线电机的馈电电压;优化方向二是降低电机的漏抗和电阻压降,进而提高电机电压的使用率。

### 2.1 优化方向一

对于优化方向一,提高电机的馈电电压是有上限的。既有常导高速长定子直线电机目前采用的电压等级为20 kV<sup>[3,6]</sup>,其馈电电缆和定子绕组电缆的电压等级均为20 kV线电压(对应11.55 kV相电压)。若要突破该电压等级的限制,则需将系统电压等级提高到下一等级,即35 kV等级。此时的电机定子绕组电缆的绝缘情况和尺寸必然有较大变化,直线电机结构尺寸也会相应有较大变化。这与保持既有常导高速磁浮直线电机的特性参数不变的基本原则相矛盾。由此可见,电机馈电电压的调

整不能突破 20 kV 的电压等级限制。

上海磁浮列车示范运营线的高功率变流器输出模式为变压器模式时,输出相电压为 4.31 kV,电流为 1 200 A<sup>[3,5]</sup>。对应于 20 kV 等级线电压,变流器输出的变压器变比最高可提升至 2.6。考虑到要为电缆绝缘提供裕量,故将变压器变比提升至 2.5。此时,相应的输出电压升至 10.78 kV(对应 18.66 kV 线电压),而最大输出电流却随变比的升高而降至 480 A,进而直接影响了电机的牵引力。可见,为了保证在高电压下还能具备同样的牵引性能,必须增加变流器的容量。既有馈电电缆的最大工作电流有效值为 2 000 A,在双端供电<sup>[6]</sup>条件下,每组变流器的输出电流最大允许值为 1 000 A,换算输出变压器原边(即逆变器输出端)电流为 2 500 A。此时变流器的容量约为 32 MVA。该容量为目前常导高速磁浮长定子直线同步电机理论上的最大可承载容量。

## 2.2 优化方向二

在优化方向二上,电机漏抗和电阻压降同馈电电缆和定子绕组的长度关系密切。在列车覆盖区域外,裸露的定子段和馈电电缆是漏抗的主要来源。因此,主要通过缩短分区和定子段的长度来进行优化。但是,缩短分区必然导致分区数量和定子段数量增加,从而增加相关设备数量及投资。此外,在采用两步法换步时,左右两侧定子段是交替排列的。理论上,左右定子段重叠的长度必须考虑车长、牵引控制系统响应时间和设备动作时间,以保证在同一时间左右两侧定子段对同列车而言最多只有一侧在换步<sup>[6]</sup>。因此,分区和定子段长度的减小也是有限制的。

上海磁浮列车示范运营线的定子段平均长度为 1 200 m,正线分区长度约为 28 km<sup>[3]</sup>。根据 CJJ/T 310—2021《高速磁浮设计标准》<sup>[6]</sup>,牵引分区的长度可根据具体工程项目的实际需求和条件进行设定,但不宜超过 40 km。这里将分区长度缩短至 20 km,将定子段长度缩短至 800 m,并通过牵引仿真计算来检验其是否满足 600 km/h 的运行要求<sup>[7]</sup>。

## 3 牵引仿真计算

牵引仿真计算的前提条件为:线路全程为平直轨道,站间距为 80 km,全程配置 4 个牵引分区,分区长为 20 km,定子段长为 800 m;每个分区均采用

双端供电的模式为定子线圈提供电流;定子段换步方式为两步法;列车为 5 节编组;电机最大工作电流为 2 000 A(若换算至变流器输出变压器之前的电流值,则为 2 500 A);电机相电压有效值最高为 10.78 kV(为使控制系统在实际应用时留有一定的裕量,计算时按电压上限的 0.9 倍取值);变流器容量为 32.34 MVA;计算时的阻力参数和列车参数均参考 TR08 型磁浮列车的数据<sup>[3]</sup>;电流分配按照列车所在的位置距离前后两个牵引变电站之间的距离按比例分配<sup>[5]</sup>。

经仿真计算,最大承载容量下的列车运行速度及加速度曲线如图 1 所示。由于采用了两步法,故图 1 中加速度在换步时有波动。仿真计算得到最大承载容量下的沿线变流器输出功率曲线如图 2 所示。图 2 中的前站功率和后站功率分别指的是双端供电中位于分区首、末两端牵引变电站内变流器的输出功率。

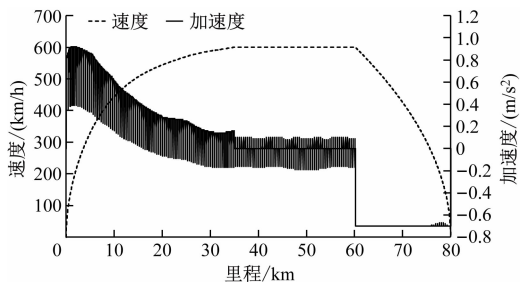


图 1 最大承载容量下的列车运行速度及加速度曲线  
Fig. 1 Train operating speed and acceleration curve under maximum load capacity

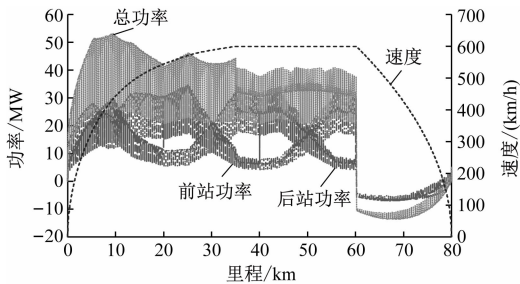


图 2 最大承载容量下的变流器输出功率曲线  
Fig. 2 Curve of inverter output power under maximum load capacity

由仿真计算结果可知,在最大承载容量下,当定子段平均长度为 800 m,分区长度为 20 km 时,列车运行速度、加速度及变流器输出功率均能满足设计速度为 600 km/h 的 5 节编组列车满载时运行要求(采用 TR08 列车参数)。由于存在运行阻力,故

磁浮列车的制动能力应大于加速能力。出于舒适度的考虑,仿真计算中将平均制动加速度设置为  $0.7 \text{ m/s}^2$ ,由此可得制动距离约为  $20 \text{ km}$ 。由图1可知,加速距离约为  $35 \text{ km}$ ,平均加速度为  $0.4 \text{ m/s}^2$ 。由此可见,既有常导高速磁浮的直线电机系统,在优化配置后可以满足  $600 \text{ km/h}$  的运行需要。

## 4 结语

本文以直线同步电机的稳态模型为基础,在不改变直线电机基本结构和参数的前提下,针对  $600 \text{ km/h}$  高速磁浮牵引系统的配置优化需求,建议提高变流器的输出电压及容量,并适当缩短牵引分区和定子段长度;通过对既有常导高速磁浮直线同步电机边界条件的分析,明确了既有常导高速磁浮长定子直线同步电机的最大承载容量。以此为基础适当调整牵引系统结构参数,并通过仿真计算结果证明了建议的有效性。

本文的分析和结论可以为  $600 \text{ km/h}$  高速磁浮牵引系统方案设计提供技术支撑。在具体工程的可行性研究时,应根据实际的线路条件在本文结论的基础上对牵引系统配置进行详细的计算分析和优化,进而得到满足最高运行速度为  $600 \text{ km/h}$  的高速磁浮牵引系统方案。

## 参考文献

- [1] 国家发展和改革委员会.《增强制造业核心竞争力三年行动计划(2018—2020)》的通知[EB/OL].(2017-11-29)[2021-10-01].[http://www.gov.cn/xinwen/2017-11/29/content\\_5243125.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2017-11/29/content_5243125.htm).  
National Development and Reform Commission. Notice on Three-year Action Plan for Enhancing Manufacture Industry Core Competency (2018—2020) [EB/OL]. (2017-11-29) [2021-10-01].  
[http://www.gov.cn/xinwen/2017-11/29/content\\_5243125.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2017-11/29/content_5243125.htm).

- [2] 陈小鸿.“十二五”国家科技支撑计划高速磁浮交通工程集成系统研究总报告[R].上海:同济大学,2017.  
CHEN Xiaohong. Summary report on '12 th Five Year Plan' national science and technology support plan of high-speed maglev transportation engineering integrated system [R]. Shanghai: Tongji University, 2017.
- [3] 吴祥明. 磁浮列车[M].上海:科学技术出版社,2003.  
WU Xiangming. Maglev train [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2003.
- [4] 刘金鑫. 高速磁浮交通多分区牵引控制关键技术研究[D].北京:中国科学院大学,2015.  
LIU Jinxin. Research on key technologies of multi-zone traction control for high-speed maglev traffic [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [5] 王立天,李力鹏. 高速磁悬浮牵引供电系统[M].北京:北京交通大学出版社,2014.  
WANG Litian, LI Lipeng. High-speed maglev traction power supply system [M]. Beijing: Beijing Jiaotong University Press, 2014.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高速磁浮交通设计标准: CJJ/T 310—2021[S].北京:中国建筑工业出版社,2021.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Standard for design of high-speed maglev transit: CJJ/T 310—2021 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2021.
- [7] LIN Y, WANG X, CHI H, et al. General design methodology of the propulsion and power supply system in high-speed maglev transportation projects and a computer-aided design tool [C]//CO-TA (Chinese Overseas Transportation Association) International Conference of Transportation Professionals (CICTP 2015). Beijing: American Society of Civil Engineers, 2015.
- [8] 刘金鑫,葛琼璇,王晓新,等. 双端供电模式下高速磁浮列车牵引控制策略研究[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(6): 16.  
LIU Jinxin, GE Qiongquan, WANG Xiaoxin, et al. Traction-system research for high-speed maglev based on double-end supply [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(6): 16.

(收稿日期:2021-11-16)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821