

中低速磁浮列车运行速度区间 对能耗影响分析

矫岩峻, 黄号凯, 刘少克

(国防科学技术大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 阐述了磁浮列车运行特性和牵引效率与速度的关系, 提出列车平均阻力这一概念, 用平均速度和平均阻力反映在固定长度平直道上运行能耗和运行耗时的大小。通过试验数据分析了列车不同的运行速度上下限对列车运行能耗和运行耗时的影响, 并得出对磁浮列车在平直道上节能驾驶具有指导意义的3点结论。

关键词: 磁浮列车; 节能驾驶; 牵引节能; 运行能耗; 平均阻力

中图分类号: U292.91⁺7; U268.6

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2017.01.026

Analysis of Impact of Speed Range on Energy Consumption of Low-speed Maglev Train

JIAO Yanjun, HUANG Haokai, LIU Shaokai

(College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: The relationship of the maglev train speed was analyzed with its operating characteristic and traction efficiency respectively, the concept of the average resistance of the maglev train was put forward, and the average speed and the average resistance were used to reflect its size of energy consumption and running time on the flat-straight road with fixed-length. According to the experimental data, the influence of different running speed limit of the maglev train on operation energy consumption and running time consuming was also analyzed, and three conclusions were drawn which were instructive to the energy-saving drive of the low-speed maglev train on the flat-straight road.

Keywords: maglev train; energy-saving drive; traction energy-saving; operation energy consumption; average resistance

0 引言

磁浮列车运行时, 车体与轨道无接触, 其运行阻力较小^[1-2], 当磁浮列车启动加速到一定速度时, 就可以长时间处于惰行状态, 惰行时间越长, 平均能耗越低, 但惰行太久则无法满足快速性的要求。要协调磁浮列车运行时间和运行能耗的关系, 需要从两个层面分析: 一是以列车的动力系统——电机为研究对象, 分析电机效率与速度的关系, 根据磁浮列车电机工作

特性, 其工作在不同的速度时, 功率和效率将有所不同, 因此电机工作特性曲线将影响运行能耗; 二是以整个列车为研究对象, 分析列车在特定路段中不同的牵引速度上限和惰行速度下限, 使列车的平均速度和平均功率不同, 故而影响运行时间和运行能耗。本文以现有工程化中低速磁浮列车样车在平直道上运行为背景, 研究平直道上的节能驾驶。

1 磁浮列车运行基本特性

1.1 磁浮列车牵引特性

中低速磁浮列车目前在国内正在建设的商业运行路线有北京 S1 线和长沙线, 这 2 条线路上运行的磁浮

列车的电机的调速方式均是采用恒转差频率调速^[2-3]，采用这种调速方式电机工作在转折速度以下时，电机产生恒定推力，在高于转折速度工作时，功率和推力均随速度增加而减少^[4-6]。电机的推力和功率随速度变化特点如图1。

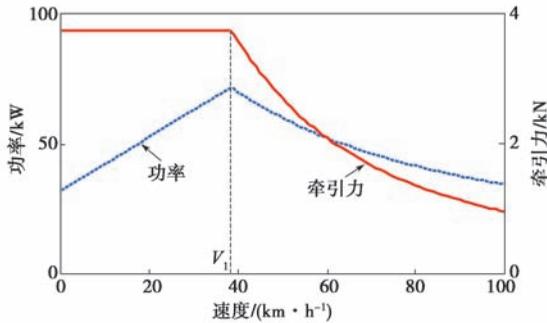


图1 牵引功率及牵引力与速度关系图

1.2 磁浮列车运行阻力特性

磁浮列车在线路上运行时所受的基本阻力包括空气阻力、涡流阻力和受流器阻力。日本HSST-100L型列车阻力计算公式如下：

$$D = \begin{cases} 16n + 3.354WV + (1.652 + 0.572N)V^2 & V < 5.6 \text{ m/s} \\ 16n + (18.22 + 0.074V)W + (1.652 + 0.572N)V^2 & V \geq 5.6 \text{ m/s} \end{cases} \quad (1)$$

式中： D 为列车基本阻力，N； W 为列车重量，t； V 为运行速度，m/s； N 为车辆数； n 为受流器数目。

国内现有中低速磁浮列车运行阻力计算大部分采用上式。

2 磁浮列车牵引系统效率与速度关系的分析

磁浮列车工作在牵引工况时，直线电机的输入功率为 $P_{入}$ 。其中一部分为电机中损耗 $P_{损}$ 转化为热能散发到空气中，另一部分转化为机械功率 $P_{机}$ 。

在列车运行过程中，克服基本阻力做功的功率为 $P_{阻}$ ，提高列车动能的功率为 $P_{加}$ 。

电机输入输出功率关系为

$$P_{入} = P_{损} + P_{机} \quad (2)$$

机械功率转化关系为

$$P_{机} = P_{阻} + P_{加} \quad (3)$$

在已知电机输入功率随速度变化关系和牵引力随速度变化关系的情况下，可求出电机机械功率为

$$P_{机} = FV \quad (4)$$

电机中损耗的功率为

$$P_{损} = P_{入} - P_{机} \quad (5)$$

由式(1)可计算出阻力，进而计算出列车运行中阻力的功率为

$$P_{阻} = DV \quad (6)$$

用于列车加速的功率为

$$P_{加} = P_{入} - P_{损} - P_{阻} \quad (7)$$

电机效率为

$$\eta_{有} = (P_{机} / P_{入}) \times 100\% \quad (8)$$

则电机损耗、列车运行基本阻力和用于为列车提供加速度功率占输入功率百分比分别为

$$\eta_{损} = (P_{损} / P_{入}) \times 100\% \quad (9)$$

$$\eta_{阻} = (P_{阻} / P_{入}) \times 100\% \quad (10)$$

$$\eta_{加} = (P_{加} / P_{入}) \times 100\% \quad (11)$$

效率与速度关系如图2所示。

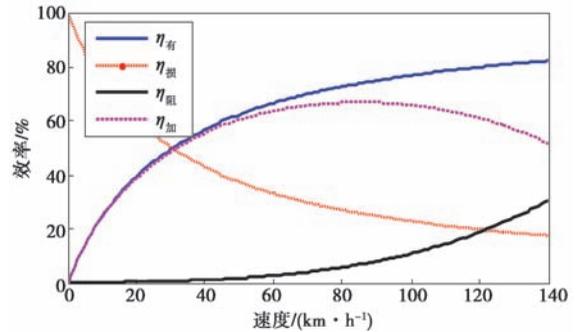


图2 效率与速度关系图

观察图2可以发现：速度较小的时候，电机损耗功率占总输入功率的比例比较大，随速度变大，电机损耗占输入功率比下降；基本阻力在运行过程中消耗的功率占输入功率随速度变大而变大；电机效率随速度变大而变大，但是由于电机的机械能要克服基本阻力做功和转换成列车动能，所以电机效率无法直接反应电能转换成列车动能的能力；用于列车加速度的功率占输入功率比例的大小可以反应电能转换成动能的能力，这个效率（即 $\eta_{加}$ ）随速度的变大先变大后变小，所以对列车而言，存在一个速度，在这个速度附近其电能转换成列车动能的效率最高。

3 磁浮列车运行速度区间对能耗影响的分析

3.1 磁浮列车运行过程说明

磁浮列车在一段只有最高运营速度限制的平直道上运行的过程是：首先车速从0开始启动加速，当速度达到预设速度上限 V_{max} 时进入惰行工况，当速度惰行到预设速度下限 V_{min} 时再次牵引加速，之后一直反复重复惰行、牵引的工况，直到临近终点制动停车^[4]。运行速度的上限和下限就是列车运行速度区间。磁浮列车在平直道上运行过程如图3所示。

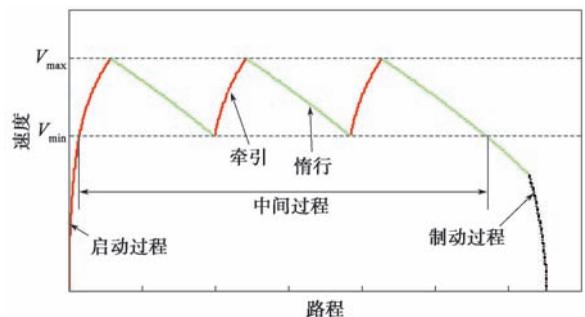


图3 速度与路程关系图

3.2 速度上下限对运行时间能耗影响分析

磁浮列车在一段平直道上运行，过程如图3，设置

不同的速度上下限时, 其启动过程和制动过程都相同, 但其中间运行过程所用的时间和能量不同。从节时、节能的角度出发, 希望列车在运行过程中, 可以通过设置合理的速度上下限, 使得列车运行时间短、消耗能量少。

图 3 里的中间运行过程中的一段, 列车以速度 V_{\min} 开始加速, 加速到速度为 V_{\max} 开始惰行, 惰行到速度为 V_{\min} , 这个过程运行距离为 S_0 , 运行耗时 T_0 , 牵引系统运行能耗为 Q_0 , 则这个过程的平均运行速度和平均功率为

$$\bar{V}_0 = S_0 / T_0 \quad (12)$$

$$\bar{P}_0 = Q_0 / T_0 \quad (13)$$

由于列车在平直路上运行的初始速度和末速度相同, 没有动能的变化和重力势能的变化。所以有如下关系

$$Q_0 = \int_0^{T_0} P_{\text{损}} dt + \int_0^{T_0} P_{\text{阻}} dt \quad (14)$$

将电机损耗的功率看成是电机内部一种阻力做功, 这种力称为电机阻力。

$$P_{\text{损}} = F_{\text{损}} V \quad (15)$$

将式 (6)、式 (15) 带入式 (14) 可得

$$Q_0 = \int_0^{T_0} (F_{\text{损}} + D) V dt = \int_0^{S_0} (F_{\text{损}} + D) ds \quad (16)$$

设列车在这个过程的平均阻力为

$$\bar{F}_0 = \frac{1}{S_0} \int_0^{S_0} (F_{\text{损}} + D) ds \quad (17)$$

式 (17) 分别带入式 (16) 和式 (13) 可得

$$\bar{F}_0 = Q_0 / S_0 \quad (18)$$

$$\bar{P}_0 = \bar{F}_0 \bar{V}_0 \quad (19)$$

现假设图 3 的中间过程距离为 S , 以 V_{\max} 为运行速度上限, V_{\min} 为运行速度下限, 运行过程中的平均速度和平均阻力分别为 \bar{V}_0 和 \bar{F}_0 , 则中间过程的运行耗时和运行能耗为

$$T = S / \bar{V}_0 \quad (20)$$

$$Q = \bar{F}_0 S \quad (21)$$

根据式 (20) 和式 (21) 可知, 平均速度越大, 则运行耗时越少; 平均阻力越小, 则运行能耗越少。耗时和能耗越少越好, 但是耗时少就需要平均速度大, 平均速度对平均阻力又有影响, 所以需要权衡耗时和能耗两方面因素, 寻找合理的运行速度上下限, 达到既节省运行时间又降低运行能耗的效果。

3.3 数据分析与结论

为了全面比较不同的运行速度上下限对平均速度和平均阻力的影响, 现针对工程化中低速磁浮列车样车 (6 辆编组) 进行仿真分析。设列车以速度 V_{\min} 开

始加速, 加速到速度为 V_{\max} 开始惰行, 惰行到速度为 V_{\min} 为止。设置 V_{\min} 的范围为 20~70 km/h, V_{\max} 的范围为 40~100 km/h, 为防止工况反复快速更换, 令 $V_{\max} > V_{\min} + 10$ 为有效运行速度区间, V_{\min} 和 V_{\max} 变化的步长为 1 km/h。针对不同运行速度下限和运行速度上限的组合, 计算出每一种组合的 \bar{V}_0 和 \bar{F}_0 , 结果如图 4 和图 5 所示。

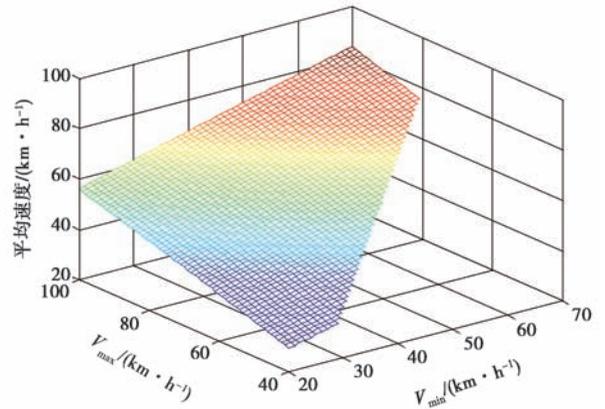


图 4 平均速度与不同速度上下限关系

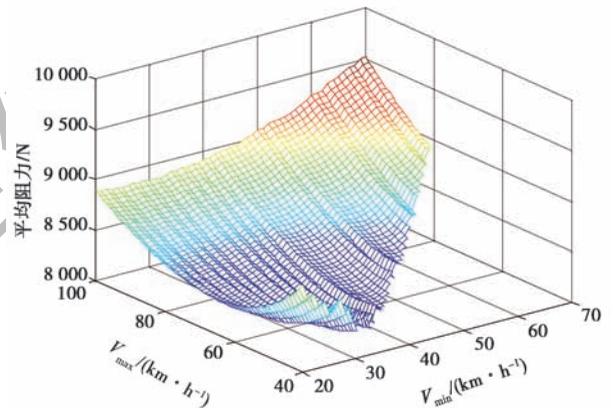


图 5 平均阻力与不同速度上下限关系

通过数据分析和观察图 4 与图 5 可知, 平均阻力并非与平均速度呈线性关系变化。图 4 和图 5 中速度上限和下限变化的平面内, 存在平均阻力随着平均速度的增大而减小的数据。也就是存在一些速度上下限的组合, 可以使列车运行时间短, 运行能耗少。

现从不同速度上下限组合中选取 10 组数据, 平均速度近似相等的每 2 组为 1 对, 共 5 对, 列入表 1 中。

表 1 优劣运行速度上下限对比

对数	优组		劣组		对比系数 η_{FQ}
	速度 / (km·h ⁻¹), V_{\min}, V_{\max}	\bar{V}_0, \bar{F}_0	速度 / (km·h ⁻¹), V_{\min}, V_{\max}	\bar{V}_0, \bar{F}_0	
1	[32,49]	40.24 8 143	[20,62]	39.98 8 360	2.97%
2	[45,56]	50.42 8 036	[20,86]	50.31 8 568	6.59%
3	[46,64]	54.74 8 106	[20,98]	55.27 8 840	9.06%
4	[55,66]	60.40 8 232	[27,100]	60.21 8 869	7.74%
5	[62,78]	69.82 8 603	[44,100]	70.04 8 960	4.15%

注: 平均速度相近情况下, 平均阻力较小的速度区间为优组, 平均阻力较大的速度区间为劣组。

上表中的 η_{FQ} 表示同一对数据里, 劣组的平均阻力

比优组平均阻力多出的百分比,也表示在同样的距离上用近似相同的时间,优组运行比劣组运行所节约的能量。横向对比表 1 可以发现,平均速度近似相同,速度上下限差值越小,则平均阻力越小。即在同样长度路段上运行,平均速度近似相同时,运行速度上下限差值越小,运行能耗越低。

结论:中间运行过程速度波动越小越有利于节能。

分别选取 V_{\min} 为 25 km/h、35 km/h、37 km/h、40 km/h、50 km/h,分析平均阻力随 V_{\max} 的变化情况,如图 6。

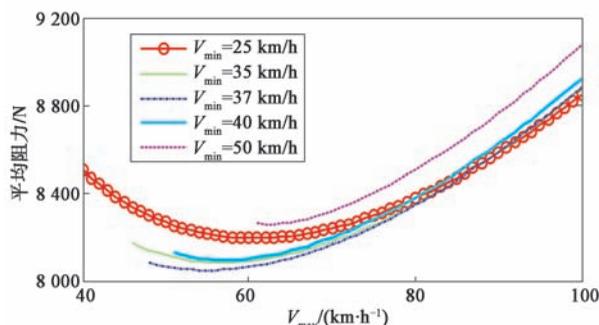


图 6 平均阻力与速度上限关系

观察图 6,固定速度下限时,平均阻力随速度上限的变大先变小后变大,即存在最小值。由图 6 可知,最小值多在 50~70 km/h 的区间里。

结论:当速度下限为定值时,存在平均阻力最小的速度上限,使得列车运行过程能耗最低。

选取 V_{\max} 为 60 km/h、70 km/h、80 km/h、90 km/h,分析平均阻力随 V_{\min} 的变化情况,如图 7。

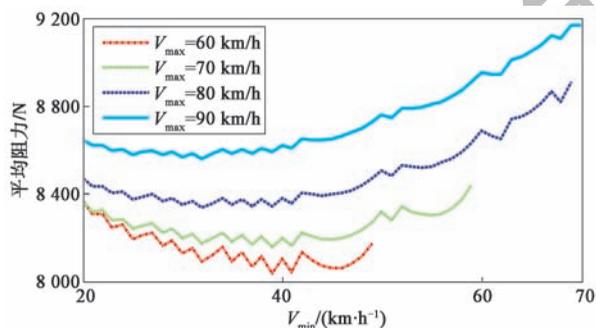


图 7 平均阻力与速度下限关系

观察图 7 中不同速度上限的 4 条曲线可知,平均阻力随速度下限变大有先变小后变大的趋势,即在固定速度上限时,存在平均阻力最小的运行速度下限,由图 7 可知,最小值在 30~50 km/h 的区间中。

结论:运行速度下限太低不利于运行节能,适当提高运行速度下限可提高平均速度,降低列车平均阻力,进而节省运行时间,降低运行能耗。

4 结语

本文在分析了磁浮列车用于加速度的功率与速度关系的基础上,分析了列车运行速度上下限对列车运行能耗和运行耗时的影响,得出 3 点结论:中间运行过程速度波动越小越有利于节能;当速度下限为定值时,存在平均阻力最小的速度上限,使得列车运行过程能耗最低;运行速度下限太低不利于运行节能,适当提高运行速度下限可提高平均速度,降低列车平均阻力,进而节省运行时间,降低运行能耗。本文的研究方法不仅适用于磁浮列车运行节时节能研究,而且可将本文研究方法推广到其他的轨道交通运行节时节能的研究中,指导运行过程速度区间的选择。

参考文献:

- [1] 饶樊,刘少克.低速磁浮列车牵引计算算法研究[J].机车电传动,2012(5):66-69.
- [2] 矫岩峻,文艳晖,刘少克.中低速磁浮列车上坡牵引策略优化[J].机车电传动,2016(2):37-39.
- [3] 罗京,胡伟,刘豫湘.中低速磁浮列车牵引特性分析和计算[J].电力机车与城轨车辆,2010,33(6):21-26.
- [4] 陈贵荣,刘少克.唐山中低速磁浮列车试验线地面再生制动能量吸收装置的设计[J].机车电传动,2008(2):38-43.
- [5] 尹力明,岑兆奇,张晓杰.对中低速磁浮列车的直线牵引电机特性设定的初步意见[J].上海电气技术,2011,4(1):36-48.
- [6] 李娜,杨俭.城市轨道交通车辆运行节能方法优化研究[D].上海:上海工程技术大学,2010:19-25.

作者简介:矫岩峻(1991-),男,硕士,主要从事磁悬浮直线传动技术及轨道交通牵引节能相关研究工作。

动态消息

长株潭城际铁路正式开通运营

2016年12月26日早上6时30分,一趟C6952次列车从城铁湘潭站发出,开往长沙。这是长株潭城际铁路发出的第一趟列车,标志着长株潭城际铁路正式开通运营,这将加速长株潭经济社会“大融城”。长沙至湘潭、长沙至株洲的最快车程为39 min。

长株潭城际铁路使用中车四方股份公司研制,具有完全自主知识产权的CRH6F动车组,首批共5列投入运营。CRH6F型动车组有“铁路公交”之称,具有“速度快、载客量大、快启快停、快速乘降”等优点,适合城际铁路公交化运营需求。动车组采用动力分散型4动4拖的8辆编组结构,定员载客量达1470人,超员载客量达1950人。设计上,充分考虑到城际客流实际,每节车设有3对大宽度车门,乘客可快速乘降,减少车站时间。

(朱一迪)