



中低速磁浮列车能耗影响因素 评估与改善建议

温 鹏^{1,2}, 边 涛²

(1. 西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室, 四川 成都 610031;
2. 湖南凌翔磁浮科技有限责任公司, 湖南 长沙 410008)

摘 要: 在当前“碳达峰”“碳中和”战略目标背景下, 交通领域能耗的快速增长已成为亟待解决的重要问题。中低速磁浮列车凭借无磨损、污染小及低运维成本等优势, 中低速磁浮交通有望成为城市轨道交通及市域市郊交通的主流方式。为明确其能耗特征, 文章以牵引系统和车辆系统为研究对象, 基于两者间的关联特性建立牵引-车辆耦合模型。通过仿真获取运行过程中的牵引能耗与悬浮能耗数据, 分析两者的变化规律及主要影响因素, 并提出了相应的能耗优化建议。

关键词: 中低速磁浮交通; 牵引能耗; 悬浮能耗; 耦合模型; 优化建议

中图分类号: U237

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2025)06-0180-12

0 引言

在“碳达峰”“碳中和”战略目标的推动下, 交通领域能耗的快速增长已成为亟待解决的关键问题, 社会对高速、绿色、经济的交通运输系统提出了迫切需求。相较于传统轮轨交通, 磁浮列车实现了无机械传动的牵引与无接触的悬浮支撑, 突破了轮轨黏着极限等物理制约, 具有无磨损、污染小、运维成本低、安全可靠等优势, 已成为多国抢占轨道交通技术制高点的关键方向^[1-2]。

中低速磁浮列车既是大型城市内部轨道交通体系的重要补充, 也可作为市域及市郊交通的主流制式。然而, 受国内运营经验与设计积累不足的制约, 其能耗水平仍存在优化空间。在商业运营的磁浮线路能耗实测数据方面, 目前仅有北京S1线和长沙磁浮快线公布了部分数据, 尚未公开具体明细。针对能耗特性的理论研究, 已有学者开展了多方面探索。文献[3-4]分析了列车运行速度区间及曲线条件对能耗的影响。文

献[5]探讨了悬浮系统及其电流与能耗的关系。文献[6-7]基于牵引特性定量分析了磁浮列车运行速度对能耗的作用, 同时开展了多列车制动能量回收等节能策略的研究。文献[8-9]分析了空气阻力、涡流阻力及受流器阻力等基本运行特性, 并提出了牵引节能方法。文献[10]以牵引电机为研究对象, 基于遗传算法计算了运行能耗, 提出以工况转换点为优化解群的能耗计算方法。此外, 文献[11-15]分别围绕不同目标开展了节能运行图的优化研究。

综上所述, 现有针对中低速磁浮列车能耗的研究多集中于牵引系统的牵引特性理论分析, 缺乏对静态与动态悬浮能耗的深入探讨, 且尚未考虑牵引系统与车辆系统之间的耦合特性, 导致其难以准确评估与适应不同工况下的牵引能耗与悬浮能耗变化。为此, 本文从能耗角度出发, 针对牵引系统和悬浮系统建立两者耦合的能耗评估模型, 结合实测运营数据, 开展多工况下牵引能耗与悬浮能耗的分析, 明确并量化阻力、运行速度、列车质量等因素对牵引及悬浮功耗的影响机理与影响程度。在此基础上, 通过定量分析提出降

基金项目: 湖南创新型省份建设专项经费资助 (2020GK4064)

通信作者: 温 鹏, 男, 博士研究生, 主要从事磁悬浮直线传动技术、轨道交通牵引节能及悬浮系统方面的研究; E-mail: 1414418238@qq.com

引用格式: 温鹏, 边涛. 中低速磁浮列车能耗影响因素评估与改善建议[J]. 机电传动, 2025(6): 180-191.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.06.021.

Citation: WEN Peng, BIAN Tao. Evaluation of energy consumption influencing factors of medium and low speed maglev trains and optimization strategy[J]. Electric drive for locomotives, 2025(6): 180-191.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.06.021.

低牵引能耗与悬浮能耗的节能优化方法, 为磁浮列车线路设计与车辆设计提供参考依据。

1 基本概述

中低速磁悬浮交通系统主要由磁浮线路、磁浮车辆及车站3部分构成^[16-17], 采用电磁悬浮与直线感应电机驱动相结合的运行方式。系统运行过程中的能耗主要包括牵引能耗、悬浮能耗和辅助能耗, 如图1所示, 可表示为式(1)。

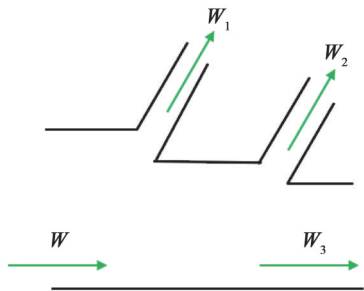


图1 中低速磁浮交通列车主要能量去向流程图

Fig. 1 Flow chart of energy flow directions of medium and low speed maglev trains

$$W = W_1 + W_2 + W_3 \tag{1}$$

式中: W 为运行总能耗; W_1 为牵引能耗; W_2 为悬浮能耗; W_3 为其他能耗。

根据北京S1线能耗实测数据(表1), 牵引系统和悬浮系统是磁浮列车两大核心能耗单元, 其中牵引能耗约占总能耗的60%以上, 悬浮能耗约占20%以上。牵引能耗占比较高主要归因于以下因素: 首先, 直线电机功率因数及效率较低; 其次, 中低速磁浮列车采用的直线电机气隙较大, 且与悬浮间隙存在耦合关系, 在轨道不平顺等扰动作用下, 车辆随机振动进一步加剧了效率损失, 导致牵引能耗增加; 第三, 当前列车运行策略采用ATO系统追踪固定运行曲线, 未能充分考虑高峰与平峰时段等实际运营因素的影响; 第四,

现有运行曲线在规划过程中尚未系统考虑牵引工况序列(如启动频次、制动功率)、线路线型及平顺性等因素对牵引能耗的影响, 致使能耗水平偏高; 此外, 线路中的坡道区段也在一定程度上加剧了牵引能耗的上升。

表1 北京S1线能耗占比统计表
Table 1 Energy consumption shares of Beijing Subway Lines S1

项点	S1线	项点	S1线
牵引能耗/总能耗	65%	辅助能耗/总能耗	10%
悬浮能耗/总能耗	25%	再生能耗/牵引能耗	8%

本文以牵引能耗与悬浮能耗为主要研究对象, 结合牵引系统与悬浮系统之间的耦合特性, 建立牵引-车辆耦合模型, 如图2所示。该模型由牵引系统模型与车辆系统模型两部分构成, 其中, 牵引系统模型包括预充电单元、中间直流回路等模型, 以及牵引能耗计算模块, 用于模拟包含短定子直线电机与牵引变流器在内的牵引系统运行过程; 车辆系统模型则涵盖悬浮控制器、电磁铁、悬浮传感器、车辆动力学、轨道动力学及悬浮能耗计算模块。牵引系统与车辆系统之间通过车辆运动学模型实现耦合, 该模型接收直线感应电机输出的牵引力, 结合线路信息、气动载荷及车辆参数, 进行牵引特性计算; 并将输出的位移、速度及加速度数据传递至车辆动力学模型, 以模拟列车沿运行方向的纵向动力学行为, 进而分析动态运行工况下的悬浮能耗特性, 实现对静态与动态悬浮能耗的区分与对比。

2 牵引系统能耗模型

基于MATLAB-Simulink软件搭建了牵引系统模型, 如图3所示, 主要包括预充电模型、中间直流回路

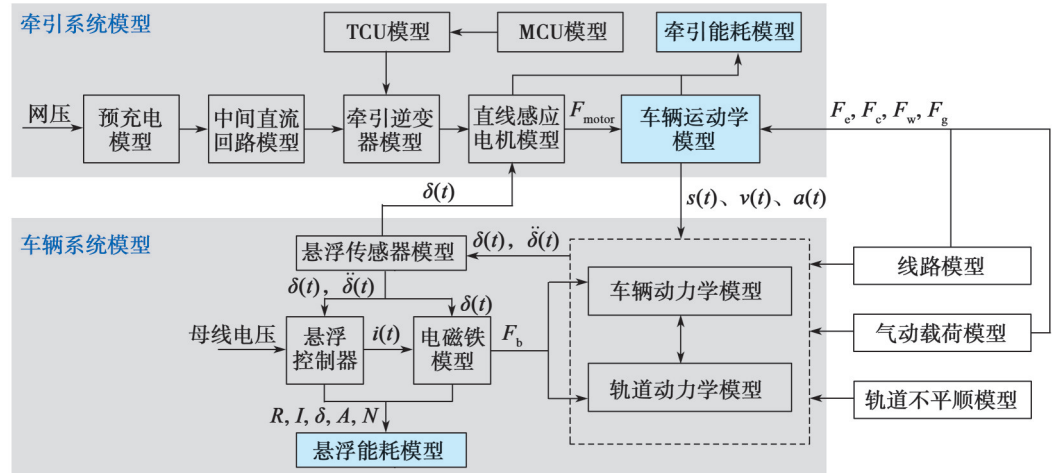


图2 中低速磁浮列车牵引和悬浮能耗模型系统架构框图

Fig. 2 Block diagram of the traction and levitation energy consumption models

模型、制动斩波电路模型、逆变器模型、牵引电机模型、辅助变流器与负载模型以及牵引能耗模型，各模型参数及输入输出接口定义见表2。本文重点研究中低速磁浮列车的直线感应电机模型、车辆运动学模型及牵引能耗模型，其余模型不作详细阐述。

2.1 直线电机模型

直线感应电机模型采用 d - q 坐标系统下的电压方程、磁链方程和电机牵引力方程进行描述。基于电机学与坐标变换原理，电机电压平衡方程可表示为式(2)。

$$\left. \begin{aligned} U_{ds} &= i_{ds} R_s + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega \varphi_{qs} \\ U_{qs} &= i_{qs} R_s + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} - \omega \varphi_{ds} \\ U_{dr} &= i_{dr} R_r + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega - \omega_r) \varphi_{qr} \\ U_{qr} &= i_{qr} R_r + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} - (\omega - \omega_r) \varphi_{dr} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中： U_{ds} 、 U_{qs} 分别为定子电压在同步旋转坐标系下的直轴和交轴分量； U_{dr} 、 U_{qr} 分别为转子电压在同步旋转坐标系下的直轴和交轴分量，在直线电机中，通常 $U_{dr}=U_{qr}=0$ ； φ_{ds} 、 φ_{qs} 分别为定子侧 d 轴、 q 轴磁链； φ_{dr} 、 φ_{qr} 分别为转子侧 d 轴、 q 轴磁链； i_{ds} 、 i_{qs} 分别为直线电机定子 d 轴、 q 轴电流； i_{dr} 、 i_{qr} 分别为直线电机转子 d 轴、 q 轴电流； R_s 、 R_r 分别为电机定子电阻和转子电阻； ω 为参考旋转坐标系角速度； ω_r 为转子电角速度。

电机磁链方程如式 (3)。

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{ds} &= L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \varphi_{qs} &= L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \varphi_{dr} &= L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \\ \varphi_{qr} &= L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \\ L_s &= L_{ls} + L_m \\ L_r &= L_{lr} + L_m \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中： L_s 、 L_r 分别为定子侧、转子侧电感； L_m 为互感； L_{ls} 为定子侧自感； L_{lr} 为转子侧自感。

电机输入总功率可表示为

$$P_e = \frac{3}{2} (u_d i_q + u_q i_d) \quad (4)$$

式中： P_e 为输入总功率； u_d 、 u_q 分别为 d - q 旋转坐标系下定子电压的 d 轴、 q 轴分量； i_d 、 i_q 分别为 d - q 旋转坐标系下定子电流的 d 轴、 q 轴分量。

电机输出牵引力方程可表示为

$$F_{motor} = \frac{P_e}{v_m} = \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} (\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}) \quad (5)$$

式中： F_{motor} 为直线电机牵引力； v_m 为电机动作线速度，即列车运行速度； τ 为电机极距。

2.2 车辆运动学模型

车辆运动学模型主要用于耦合牵引系统与车辆系统，实现牵引作用下车辆纵向、垂向及横向动力学的耦合。车辆运动学模型的输入与输出信号如图4所示，其中 F_{motor} 为直线电机牵引力， F_e 为电磁阻力， F_c 受流器阻力， F_w 为空气动力学阻力， F_g 为坡道阻力， m 为列车总质量， $s(t)$ 、 $v(t)$ 和 $a(t)$ 分别为牵引作用下车辆实时运行的里程、速度和加速度。

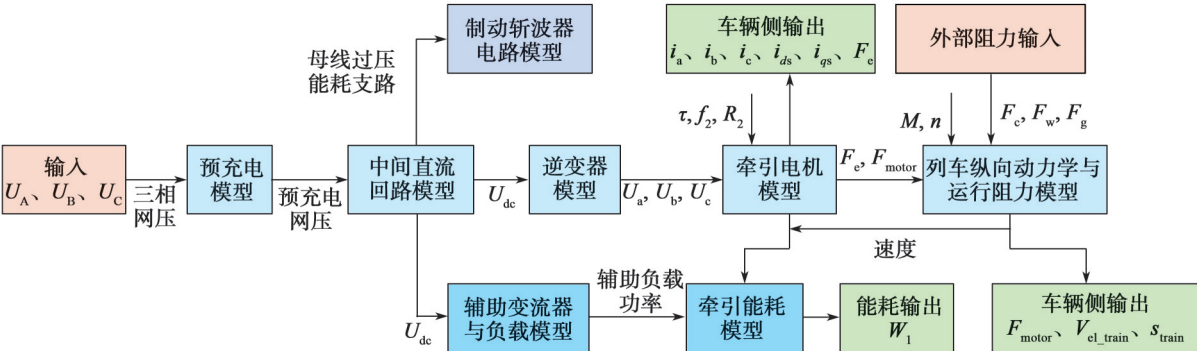


图3 中低速磁浮列车牵引系统模型

Fig. 3 Traction system model for medium and low speed maglev trains

表2 牵引系统模型信号表

Table 2 Signals in the traction system model

模型参数		输入信号		输出信号	
名称	含义	名称	含义	名称	含义
M	列车质量	U_a, U_b, U_c	网压	i_a, i_b, i_c	电机三相电流
τ	电机极距	F_e	电磁阻力	F_{motor}	电机牵引力
f_2	转差频率	F_c	受流器阻力	i_{ds}, i_{qs}	电机 d 、 q 轴电流
R_2	转子侧电阻	F_w	空气动力学阻力	V_{el_train}	车辆速度
n	车辆编组	F_g	坡道附加阻力	S_{train}	车辆位移
I_1	定子侧电流	W_1	牵引能耗		

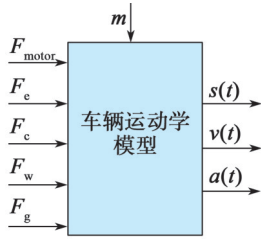


图4 车辆运动学模型框图

Fig. 4 Block diagram of the vehicle kinematics model

基于微分方程构建车辆运动学模型, 如式(6)和式(7)所示。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial s}{\partial t} &= v(t) \\ \frac{\partial^2 s}{\partial t^2} &= a(t) \\ ma(t) &= F_{\text{Sum}}(t) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$F(t) - F_R(v(t)) - F_b(t) = F_{\text{Sum}}(t) \quad (7)$$

式中: $F_{\text{Sum}}(t)$ 为运行总合力; $F(t)$ 为牵引力; $F_R(v(t))$ 为运行总阻力; $F_b(t)$ 为制动力; s 为运行里程; $v(t)$ 、 $a(t)$ 分别为列车的运行速度和加速度; t 为运行时间。

由于线路条件和运行状态的不同, 运行总阻力可表示为电磁阻力 F_e 、受流器阻力 F_c 、空气动力学阻力 F_w 和坡道附加阻力 F_g 之和, 中低速磁浮列车的曲线附加阻力可忽略, 见式(8)。

$$F_R(v(t)) = F_e + F_c + F_w + F_g \quad (8)$$

2.2.1 电磁阻力

在轨道内部钢结构的影响下, 悬浮电磁铁会受到与运行速度相关的固有磁阻力^[8], 如式(9)所示。

$$F_e = \begin{cases} (0.3n + 0.46)mv, & v \leq 5 \text{ m/s} \\ m[(1.196n + 1.724) + (0.05n + 0.1266)v - 0.0016(n-1)v^2], & v > 5 \text{ m/s} \end{cases} \quad (9)$$

式中: m 为单节列车质量; n 为列车编组数; v 为列车运行速度。

2.2.2 受流器阻力

受流器阻力可近似为恒定值, 如式(10)所示。

$$F_c = 50n_{ds} \quad (10)$$

式中: n_{ds} 为电刷个数。

2.2.3 空气动力学阻力

空气动力学阻力由压差阻力和摩擦阻力组成, 其大小与车辆截面积、车辆长度、列车运行速度、风速、风向与列车运行方向的夹角等因素有关。文献[9]采用有限元法对 CMS-04 中低速磁浮列车的空气动力学特性进行计算, 并基于有限元计算数据分析和拟合了列车在不同运行速度、不同风速及不同风向时的空气动力学公式, 因此本文采用式(11)进行建模与分析。

$$F_w(v_1, v_2) = (51.84 - 10.3v_1 + 46.76v_2 + 2.087v_1^2 + 2.478v_1v_2 - 7.166v_2^2 + 0.1017v_1^2v_2 - 0.2802v_1v_2^2 + 0.3977v_2^3) \quad (11)$$

式中: $F_w(v_1, v_2)$ 为列车空气动力学阻力; v_1 为列车相对运行速度, 即风速与列车运行速度在 x 方向上的合成速度; v_2 为 z 方向上的风速分量, 简称横风速度。

当风速方向不垂直于列车前进方向时, 对风速进行正交分解, 设风速 v_{wind} 与 v 的夹角为 β , 则可表示为式(12)^[9]。

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= v - v_{\text{wind}} \cos \beta, & 0 < \beta < 180^\circ \\ v_2 &= v_{\text{wind}} \sin \beta, & 0 < \beta < 180^\circ \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

2.2.4 坡道附加阻力

磁浮列车的运行阻力可分为两类: 一类是由线路线型所决定的附加阻力, 另一类是基本阻力。列车行驶在弯道、坡道及隧道中时, 通常会受到附加阻力的影响。与轮轨车辆不同的是, 磁浮列车在弯道上的转向由悬浮电磁铁完成, 因此其附加阻力仅取决于线路的坡道。图5为列车在坡道上的单点受力模型, 其中 F_{total} 为列车运行总阻力; N 为列车抵抗自重的支撑力。

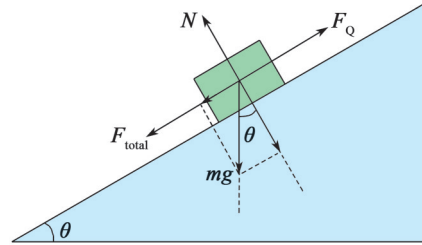


图5 列车单点受力模型

Fig. 5 Single-point force model of the train

附加阻力模型可表示为

$$F_g = mg \cdot \sin \theta \quad (13)$$

式中: F_g 为列车在坡道运行时的附加阻力; θ 为线路坡道角度; m 为列车重量。

2.3 牵引能耗模型

牵引能耗模型计算框图如图6所示。

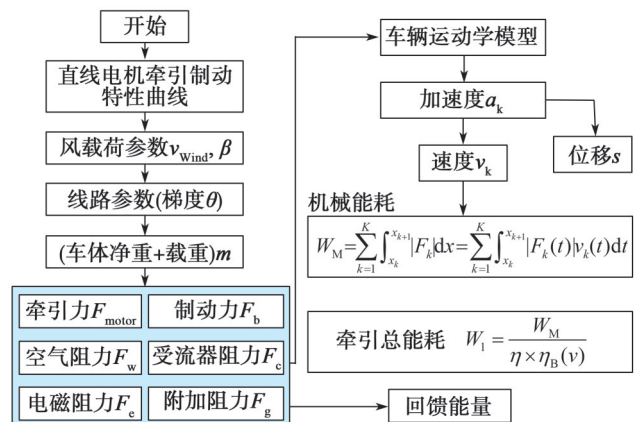


图6 中低速磁浮列车牵引功耗计算框图

Fig. 6 Calculation workflow for traction power consumption

基于直线电机牵引特性曲线、风载荷参数、线路参数及车体质量等参数, 通过车辆运动学模型可计算

出列车的位移、速度及加速度数据；结合直线电机模型所计算的列车在 t 时刻第 k 区间的牵引力，其机械能耗即可表达为

$$W_M = \sum_{k=1}^K \int_{x_k}^{x_{k+1}} |F_k| dx = \sum_{k=1}^K \int_{t_k}^{t_{k+1}} |F_k(t)| v_k(t) dt \quad (14)$$

式中： W_M 为列车牵引端的机械能耗； x_k 为列车在第 k 区间初始的运行位置； t_k 为列车在第 k 区间运行的初始时刻； $F_k(t)$ 为列车在 t 时刻第 k 区间的牵引力； $v_k(t)$ 为列车在 t 时刻第 k 区间的运行速度。

在电网端电能输入至直线电机的过程中，牵引逆变器的内部损耗及直线电机自身损耗均会消耗能量，本文取牵引逆变器的电能转换效率 $\eta = 0.95$ 。实际运行中，随着速度的增加，直线电机励磁损耗、边端效应及风载荷等阻力的影响更为明显，致使直线电机牵引效率随速度发生变化。为提高计算精度，本文以 CMS-04 磁浮列车电机机械效率与速度的关系曲线（如图 7 所示）为建模依据，拟合得到机械效率与速度的数学模型，如式(15)所示。

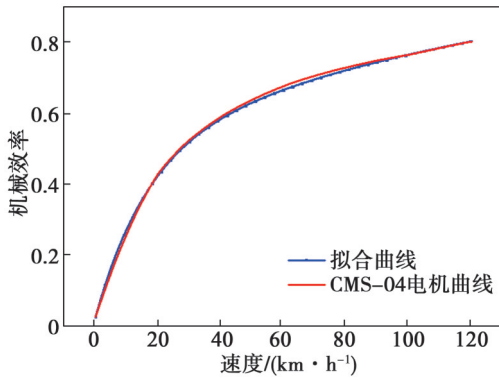


图 7 直线电机速度-效率曲线

Fig. 7 Speed-efficiency curves of the linear induction motor

$$\eta_B(v) = k_0 + k_1 \left[1 - e^{\left(\frac{-3.6v}{t_1} \right)} \right] + k_2 \left[1 - e^{\left(\frac{-3.6v}{t_2} \right)} \right] \quad (15)$$

式中： $\eta_B(v)$ 为对应速度下直线电机的效率； k_0 、 k_1 、 k_2 、 t_1 、 t_2 均为拟合系统，取值见表 3。

表 3 拟合公式参数表

Table 3 Parameters for fitting formula

参数项目	k_0	k_1	k_2	t_1	t_2
参数值	-9.82×10^{-6}	0.604	172.92	0.478	16.64

综上，牵引总能耗可表示为

$$W_1 = \frac{W_M}{\eta \times \eta_B(v)} \quad (16)$$

式中： W_1 为牵引总能耗。

3 悬浮系统能耗模型

3.1 悬浮系统总能耗

中低速磁浮列车依靠悬浮电磁铁与铁磁性轨道之

间的电磁吸力克服重力实现悬浮，其能量消耗主要集中于悬浮电磁铁的电阻热损耗、悬浮斩波模块损耗及气隙中的磁场磁能。其中，电磁铁电阻热损耗和悬浮斩波模块损耗属于有功消耗，而磁场磁能属于无功消耗。悬浮系统总能耗计算如式(17)。

$$W_2 = W_R + W_{IGBT} \quad (17)$$

式中： W_2 为悬浮总能耗； W_R 为悬浮电磁铁的电阻热损耗； W_{IGBT} 为 IGBT 开通、关断及导通损耗。

本文将 W_{IGBT} 视为定值，并采用文献[18]中的数据代入悬浮总能耗进行计算，如式(18)所示。

$$W_{IGBT} = P_{IGBT} \times t = 483.13t \quad (18)$$

式中： t 为 IGBT 工作运行时间； P_{IGBT} 为悬浮斩波模块中 IGBT 模块的平均功率损耗，包括开通损耗、关断损耗和导通损耗。

3.2 悬浮电磁铁能耗模型

中低速磁浮列车的悬浮能耗与悬浮间隙密切相关，而悬浮间隙又与列车运行速度有关。因此，下文将从静态悬浮能耗和动态悬浮能耗两个方面展开分析。

在不考虑列车运动，即悬浮系统处于静态悬浮状态时，电压平衡方程为

$$u(t) = Ri(t) + \frac{d(L_m i(t))}{dt} \quad (19)$$

式中： $u(t)$ 为线圈电压； R 为电磁铁线圈内阻； $i(t)$ 为电磁铁线圈输入电流； L_m 为电磁铁线圈电感，可按式(20)进行计算。

$$L_m = \frac{\mu_0 N^2 A}{2\delta} \quad (20)$$

式中： μ_0 为真空磁导率，取 $4\pi \times 10^{-7} \text{ NA}^{-2}$ ； N 为电磁铁线圈匝数； A 为磁极面积； δ 为悬浮间隙。

基于麦克斯韦公式，电磁铁悬浮力 F_δ 可表示为

$$F_\delta = \frac{B_0^2 A}{\mu_0} \quad (21)$$

式中： B_0 为悬浮电磁铁在静止悬浮时的气隙磁通密度，具体计算见式(22)。

$$B_0 = \frac{\mu_0 Ni(t)}{2\delta} \quad (22)$$

列车在静态悬浮时，垂向动力学方程可表示为

$$F_\delta = \frac{mg}{n} + \frac{mg}{n} \frac{d^2 \delta}{dt^2} \quad (23)$$

式中： n 为单节车的电磁铁数量，取值为 10； $\frac{mg}{n}$ 为静态悬浮时单个电磁铁的承载力 $F_{\delta 1}$ ，假定其对应的悬浮电流为 $i_1(t)$ ， $\frac{mg}{n} \frac{d^2 \delta}{dt^2}$ 为静态悬浮时列车在额定悬浮间隙上下振动惯性引起的附加承载力 $F_{\delta 2}$ ，假定其对应的悬浮电流为 $i_2(t)$ 。

结合式(21)和式(22)，可将式(23)拆解如下：

$$\left. \begin{aligned} \frac{mg}{n} &= F_{\delta_1} = \frac{\mu_0 AN^2 i_1^2(t)}{4\delta_1^2} \\ \frac{mg}{n} \frac{d^2 \delta_2}{dt^2} &= F_{\delta_2} = \frac{\mu_0 AN^2 i_2^2(t)}{4\delta_2^2} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

式中: δ_1 为静态悬浮时的列车悬浮间隙; δ_2 为列车在额定悬浮间隙上下振动的位移。

根据式(24)解算出 $i_1(t)$ 、 $i_2(t)$ 并将其代入式(19), 可得到

$$u(t) = Ri(t) + \frac{d(L_m i(t))}{dt} = Ri_1(t) + \frac{\mu_0 AN^2}{2\delta_1} i_2(t) - \frac{\mu_0 AN^2 i_1(t)}{2\delta_1^2} \delta_2 \quad (25)$$

在列车静态稳定悬浮时, 由于悬浮间隙波动非常小, 因此将式(25)右边第三项省略, 其静态悬浮能耗可表示为

$$W_R = \int_0^T P(t)dt = \int_0^T u(t)i(t)dt = \int_0^T \left(Ri_1(t)^2 + \frac{\mu_0 AN^2}{2\delta_1} i_2(t) \cdot i_1(t) \right) dt \quad (26)$$

基于上述分析, 悬浮能耗可根据列车质量、悬浮间隙、运行速度及运行位移等参数进行计算, 计算流程如图8所示。

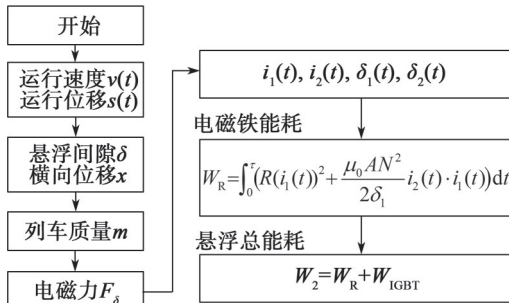


图8 悬浮能耗计算流程图

Fig. 8 Calculation workflow for levitation energy consumption

上述分析均基于列车静止状态, 即悬浮电磁铁处于静止悬浮条件下的情况。继而对运动状态下的悬浮电磁铁进行分析, 运动状态下, 单块悬浮电磁铁的磁通密度 $b(x, z)$ 分布情况如下:

$$\left. \begin{aligned} b(x, z) &= B_0 + \sum_{n=1}^{\infty} X_n(x) \cos(\lambda_n z), \quad 0 \leq x \leq L_{\text{Mag}} \\ b(x, z) &= \sum_{n=1}^{\infty} X_n(x) \cos(\lambda_n z), \quad x < 0, x > L_{\text{Mag}} \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

其中:

$$X_n(x) = \begin{cases} c_n B_0 \frac{\alpha_n}{\alpha_n - \beta_n} \left[e^{-\beta_n x} - e^{-\beta_n (x - L_{\text{Mag}})} \right], & x < 0 \\ c_n B_0 \frac{1}{\alpha_n - \beta_n} \left[\beta_n e^{-\alpha_n x} - \alpha_n e^{-\beta_n (x - L_{\text{Mag}})} \right], & 0 \leq x \leq L_{\text{Mag}} \\ c_n B_0 \frac{\beta_n}{\alpha_n - \beta_n} \left[e^{-\alpha_n x} - e^{-\alpha_n (x - L_{\text{Mag}})} \right], & x > L_{\text{Mag}} \end{cases} \quad (28)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_n &= \frac{1}{2} \left(-K + \sqrt{K^2 + 4\lambda_n^2} \right) \\ \beta_n &= \frac{1}{2} \left(-K - \sqrt{K^2 + 4\lambda_n^2} \right) \\ K &= \frac{\mu_0 \sigma v d}{\delta} \\ \lambda_n &= \frac{(2n-1)\pi}{2a} \\ c_n &= \frac{4}{\pi(2n-1)} \sin \left(\frac{(2n-1)\pi}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

式中: $b(x, z)$ 为运动状态下单块悬浮电磁铁在空间点 (x, z) 处产生的磁通密度; B_0 为静止悬浮条件下电磁铁极面平均磁密; $X_n(x)$ 为第 n 阶空间谐波沿 x 方向的幅值函数; λ_n 为第 n 阶空间谐波波数; x 为列车运行方向坐标; z 为电磁铁极面宽度方向坐标; L_{Mag} 为电磁铁极长; c_n 为第 n 阶傅里叶展开系数; α_n 、 β_n 为第 n 阶空间谐波对应的特征根; K 为中间系数; μ_0 为真空磁导率; σ 为导轨的电导率; v 为电磁铁与导轨直接相对运动速度; a 为电磁铁极宽的 $1/2$; d 为导轨宽度的 $1/2$ 。

运动状态下, 单块悬浮电磁铁的吸力计算公式如(30)所示。

$$\left. \begin{aligned} F_a &= F_a^* \sum_{n=1}^{\infty} c_n^2 f(n) \\ F_a^* &= \frac{B_0^2 S}{\mu_0} = \frac{B_0^2 \cdot 2aL}{\mu_0} \\ f(n) &= \frac{1}{2L} \left[L + \frac{\beta_n}{\alpha_n(\alpha_n - \beta_n)} \left(2 + \frac{\beta_n}{\alpha_n - \beta_n} \right) (1 - e^{-\alpha_n L}) + \right. \\ &\quad \left. \frac{\alpha_n}{\beta_n(\alpha_n - \beta_n)} \left(2 - \frac{\alpha_n}{\alpha_n - \beta_n} \right) (1 - e^{-\beta_n L}) + \right. \\ &\quad \left. \frac{2\alpha_n \beta_n}{(\alpha_n - \beta_n)^2 (\alpha_n + \beta_n)} (e^{-\alpha_n L} - e^{-\beta_n L}) \right] \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

式中: F_a 为悬浮电磁铁产生的吸力; F_a^* 为悬浮电磁铁内单点的基准吸力; S 为电磁铁极面面积; L 为电磁铁极长; $f(n)$ 为运动状态下考虑边缘效应的修正函数。

计算动态运行时的电磁铁悬浮能耗时, 将对应悬浮力数值代入, 并考虑由速度引起的悬浮间隙波动导致的额外能耗, 则电磁铁悬浮能耗可表达为式(31)。

$$W_R = \int_0^T P(t)dt = \int_0^T u(t)i(t)dt = \int_0^T \left(R(i_1(t))^2 + \frac{\mu_0 AN^2}{2\delta_1} i_2(t) \cdot i_1(t) - \frac{\mu_0 AN^2 (i_1(t))^2}{2\delta_1^2} \delta_2 \right) dt \quad (31)$$

式中: W_R 为运动状态下的电磁铁悬浮能耗; $P(t)$ 为瞬时功率; $u(t)$ 为电磁铁的端电压; $i(t)$ 为电磁铁电流; R 为电磁铁电阻。

4 能耗影响因素评估与节能优化

4.1 阻力对牵引能耗影响分析及优化

直线电机在不同速度下的阻力变化曲线如图9所

示。当直线电机处于启动加速阶段时，其阻力呈线性增加；当速度介于2.78~19.44 m/s时，阻力达到饱和，可近似视为恒定值，运行速度对该区间内阻力的影响可忽略不计；当列车速度超过19.44 m/s后，阻力随速度提高而下降，运行能耗也逐步降低。因此，减少列车启动与减速频次，可有效降低牵引运行能耗。

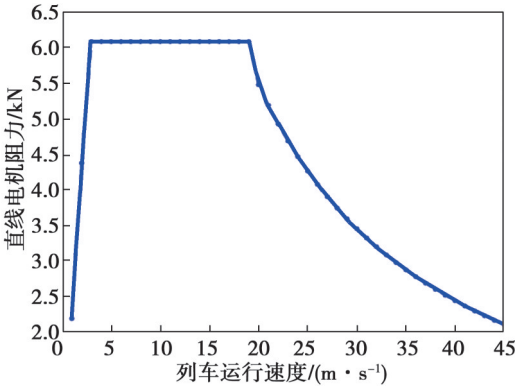


图9 不同速度下直线电机阻力

Fig. 9 Resistance characteristics of the linear induction motor at varying speeds

悬浮电磁铁沿轨道运行时，与轨道内部钢材质框架及轨道之间产生涡流效应，从而形成磁阻力，不同速度下的悬浮电磁铁磁阻力变化曲线如图10所示。该磁阻力随运行速度增加先呈线性增长趋势，当速度超过5 m/s后，磁阻力增长速率减缓，至42 m/s时达到最大值，此后趋于稳定。从定量角度分析，随着列车提速，悬浮能耗增加，直线电机阻力所消耗的能耗降低，且悬浮能耗的增加量小于直线电机阻力能耗的减少量。因此，从牵引节能角度出发，应采用“最大牵引-惰行-最大制动”3种工况组合的最优速度曲线对列车运行曲线进行优化。在启动阶段，以最大加速度将列车速度提升至最高速度，随后转入惰行状态；在制动阶段，以最大减速度在最短时间内将列车减速至目标速度或零速。

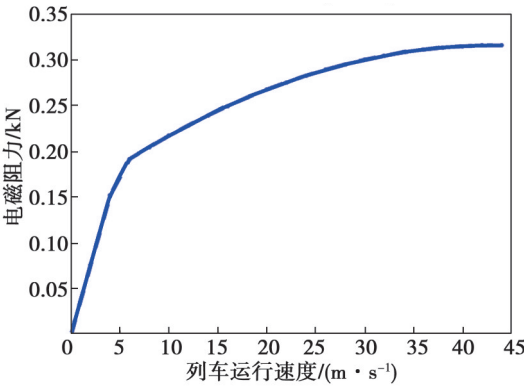


图10 不同速度下悬浮电磁铁磁阻力

Fig. 10 Magnetic drag of the levitation electromagnet at varying speeds

4.2 牵引能耗分析及优化

以清远磁浮车辆及线路为分析对象，模拟列车在

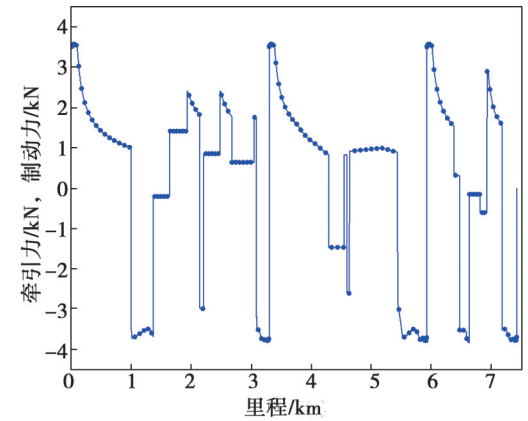
无惰行满功率运行条件下的牵引系统能耗情况。往牵引系统模型导入相关计算参数及牵引/制动力曲线、里程-坡道曲线、线路区间段长度、坡道梯度及曲线半径，相关计算参数见表4，牵引/制动力曲线如图11、图12所示。

分别对上行全程与下行全程进行模拟计算，得到速度/加速度、总运行阻力、电机电流、主电路输入电流、电机瞬时功率及能耗曲线，结果如图13~图16所示。

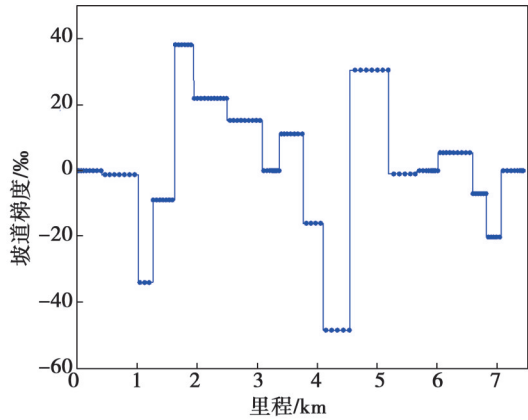
图13为在清远磁浮车辆在区间段的车辆运动学模

表4 牵引系统模型参数表
Table 4 Parameters of the traction system model

序号	输入类别	输入参数
1	列车编组	Mc+M+Mc
2	车辆自质量/t	Mc 车为 25.4
		M 车为 24.2
3	列车总质量/t	105.00 (AW3)
		94.32 (AW2)
		75.00 (AW0)
4	计算网压/V	牵引/再生制动：DC 1 500
5	列车运行最大速度/(km·h ⁻¹)	120
6	运行区间	上行：银盏站—莲湖站—长岗站—长隆站
		下行：长隆站—长岗站—莲湖站—银盏站



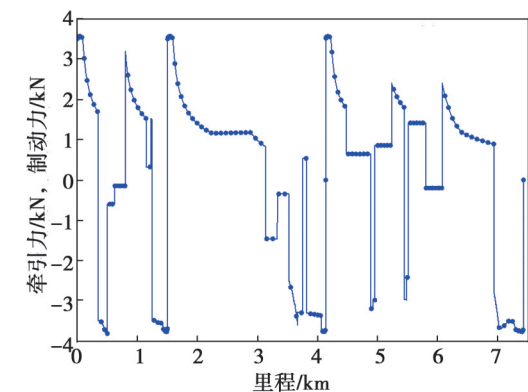
(a) 里程-牵引力/制动力曲线



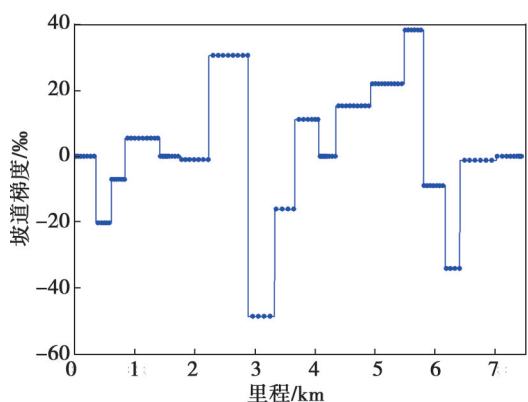
(b) 上行段里程-坡道曲线

图11 上行段牵引力/制动力及坡道梯度输入曲线

Fig. 11 Traction/braking force and ramp input curves for the uplink segment



(a) 下行段里程-牵引力/制动力曲线



(b) 下行段里程-坡道曲线

图12 下行段牵引力/制动力及坡道梯度输入曲线

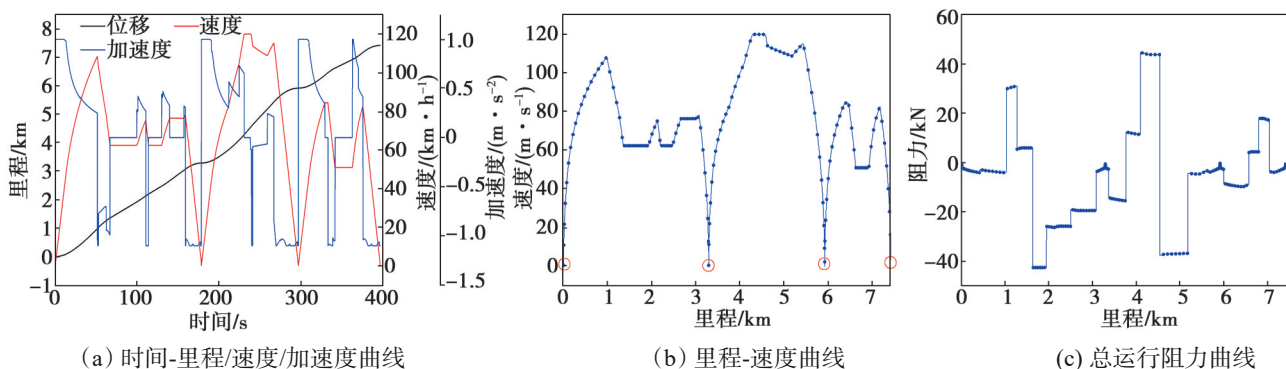
Fig. 12 Traction/braking force and ramp input curves for the downlink segment

型计算结果, 包括时间-里程曲线、时间-速度曲线、时间-加速度曲线、里程-速度曲线及总运行阻力曲线。在恒速加速段, 列车总运行阻力相对较小且呈下降趋势, 与实际运行路况相符; 在减速段, 由于线路条件变化, 运行总阻力急剧上升, 最大阻力达45 kN, 此时牵引总能耗达到最大值。该结果验证了仿真计算模型的准确性和适用性。

图15(a)和图16(a)分别为清远磁浮上行段与下行段车辆运行时的电机电流曲线及主电路输入电流曲线, 电机电流与主电路输入电流的变化趋势基本一致, 二者之间的差值随速度升高而增大。图15(b)和图16(b)为电机瞬时输入功耗和瞬时输出功耗曲线, 随着速度增大, 电机输出功耗与输入功耗的比值升高, 即电机损耗占输入功耗的比例下降, 这表明在运行过程中, 克服阻力做功的功耗占电机输入功率的占比随速度增加而提高, 电机效率也随之上升。结合图14~图16可知, 对于中低速磁浮列车而言, 在某一速度下, 电机输出功率转换为列车动能的能力达到最优。

4.3 静态悬浮能耗分析及优化

中低速磁浮列车在AW0状态下的质量为25 t, AW3状态下的质量为35 t。如图17~图18所示, 分别计算了列车质量在25~35 t内、悬浮间隙在6~12 mm内时, 单块电磁铁的静态悬浮电流与静态悬浮能耗。计算结果表明, 随着车辆质量增加, 悬浮电流呈线性增



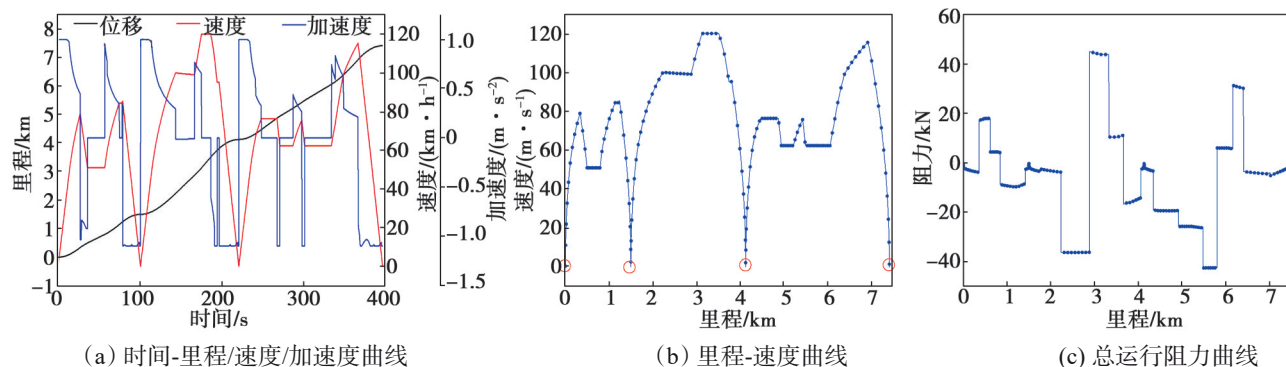
(a) 时间-里程/速度/加速度曲线

(b) 里程-速度曲线

(c) 总运行阻力曲线

图13 上行段车辆动力学计算输出曲线

Fig. 13 Calculated vehicle dynamics output curves for the uplink segment



(a) 时间-里程/速度/加速度曲线

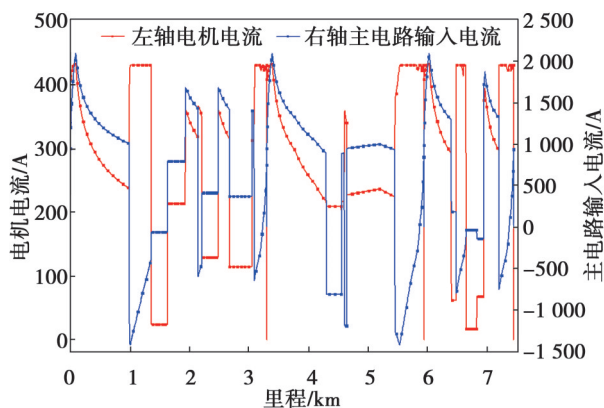
(b) 里程-速度曲线

(c) 总运行阻力曲线

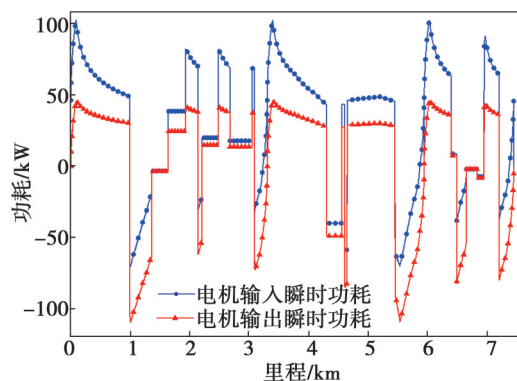
图14 下行段车辆动力学计算输出曲线

Fig. 14 Calculated vehicle dynamics output curves for the downlink segment

长, 悬浮能耗也呈线性增加。



(a) 电机电流、主电路输入电流曲线



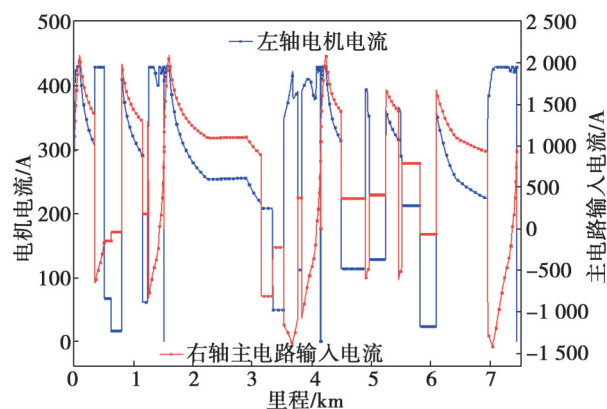
(b) 电机瞬时功率曲线

图 15 上行段电流和功率曲线

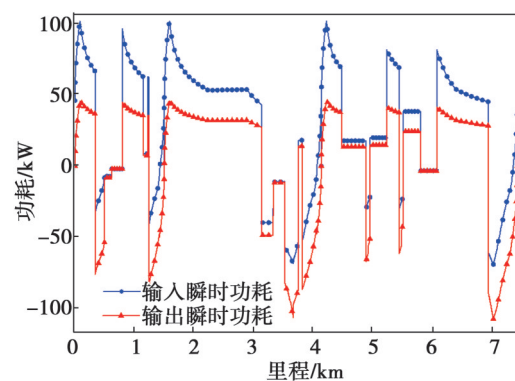
Fig. 15 Current and power curves for the uplink segment

列车质量对电磁铁悬浮电流和悬浮能耗的影响数据如表 5 所示。当列车质量从 25 t 增加至 35 t 时, 在悬浮间隙为 6 mm 条件下, 悬浮电流由 16.87 A 增加至 19.93 A, 差值为 3.06 A; 悬浮能耗由 5.350 kWh 增加至 7.469 kWh, 差值为 2.119 kWh。在悬浮间隙为 8 mm 条件下, 悬浮电流由 22.49 A 增加至 26.58 A, 差值为 4.09 A; 悬浮能耗由 9.511 kWh 增加至 13.280 kWh, 差值为 3.769 kWh, 可见, 由列车质量变化所引起的悬浮电流与悬浮能耗差值均相对有限。相比之下, 在同一列车质量条件下, 由悬浮间隙变化所带来的悬浮电流与悬浮能耗变化则更为显著。以 25 t 列车质量为例, 悬浮间隙 8 mm 与 6 mm 对应的悬浮电流差值为 5.62 A, 悬浮能耗差值为 4.161 kWh。因此, 悬浮间隙对能耗的影响远大于列车质量对悬浮能耗的影响。

由式(25)可知, 悬浮电流与悬浮间隙的二次方成正比, 悬浮间隙减小时悬浮电流相应减小。根据式(28)可计算调整悬浮间隙时静态悬浮能耗的缩减比例, 因此, 在列车停站期间减小静态悬浮间隙, 可有效降低悬浮能耗。图 19、图 20 分别计算了不同悬浮间隙与不同列车质量条件下的静态悬浮电流和悬浮能耗曲线。由图 19、图 20 可知, 在列车质量一定时, 悬浮电流随悬浮间隙增加呈线性增长。当列车质量为 25 t、28 t、32 t 和 35 t 时, 相应的比例系数分别为 2.83、2.94、3.16、



(a) 电机电流、主电路输入电流曲线



(b) 电机瞬时功率曲线

图 16 下行段电流和功率曲线

Fig. 16 Current and power curves for the downlink segment

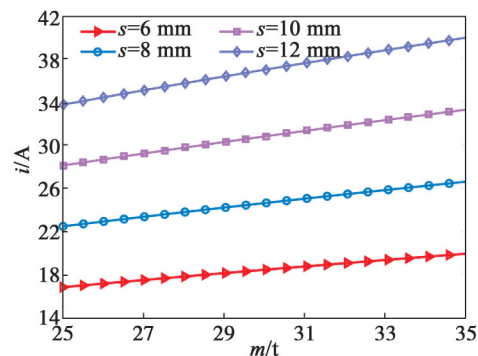


图 17 不同列车质量及不同悬浮间隙时单悬浮电磁铁对应的静态悬浮电流

Fig. 17 Static levitation current of a single levitation electromagnet under various vehicle masses and levitation gaps

3.33, 表明悬浮间隙对悬浮电流的影响较为显著。若将悬浮间隙从额定值 8 mm 降低至 6 mm, 悬浮电流可缩减 25%, 悬浮能耗将缩减 48.5%。需要注意的是, 中低速磁浮列车的直线电机初级与次级之间的气隙与悬浮电磁铁和轨道之间的悬浮间隙存在耦合关系。降低悬浮间隙将增大电机气隙, 从而降低直线电机牵引效率, 导致牵引能耗的增加。因此, 通过降低悬浮间隙减小悬浮能耗的方法通常适用于列车停站阶段, 在动态运行阶段需对直线电机与悬浮电磁铁之间的耦合关系进行解耦处理。

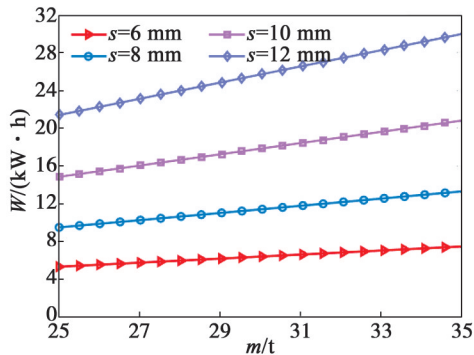


图 18 不同列车质量及不同悬浮间隙时单电磁铁对应的静态悬浮能耗曲线(此悬浮能耗未加入悬浮斩波模块的能耗值)

Fig. 18 Static levitation energy consumption curves of a single levitation electromagnet under various vehicle masses and levitation gaps (Excluding the energy consumption of the chopper module)

表 5 列车质量对电磁铁悬浮电流和悬浮能耗的影响数据表

Table 5 Impact of vehicle mass on electromagnet levitation current and levitation energy consumption data

工况	25 t	27 t	29 t	31 t	33 t	35 t
6 mm 时悬浮电流/A	16.87	17.51	18.18	18.77	19.38	19.93
8 mm 时悬浮电流/A	22.49	23.34	24.24	25.07	25.87	26.58
电流差值/A	5.62	5.83	6.06	6.30	6.49	6.65
6 mm 时悬浮能耗/(kWh)	5.350	5.782	6.215	6.626	7.058	7.469
8 mm 时悬浮能耗/(kWh)	9.511	10.280	11.010	11.780	12.540	13.280
电流差值/A	4.161	4.498	4.7950	5.154	5.482	5.811

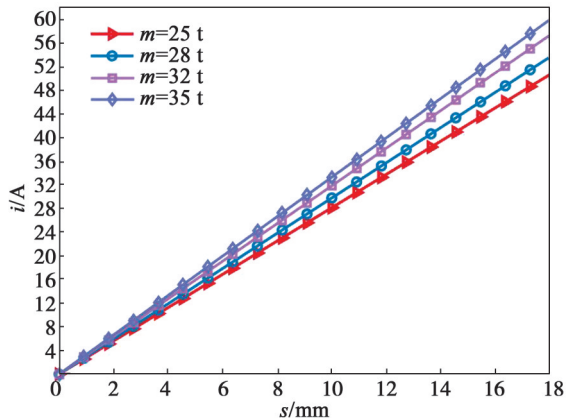


图 19 不同车辆质量及不同悬浮间隙时的静态悬浮电流曲线

Fig. 19 Static levitation current curves under various vehicle masses and levitation gaps

4.4 动态悬浮能耗分析及优化

北京 S1 线磁浮列车在静态悬浮与动态运行时悬浮间隙实测曲线如图 21 所示。由图 21 可知，中低速磁浮列车在静态悬浮时，悬浮间隙基本维持在 8 mm 左右，动态偏差不超过±1 mm。列车运行过程中，悬浮系统根据线路情况（如二型接头、三型接头等不平顺激励）对悬浮间隙进行动态调整，在恶劣工况下动态偏差可达 4 mm。

表 6 统计了北京 S1 线磁浮列车静态悬浮能耗与动态悬浮能耗值。结合图 22 可知，动态悬浮能耗高于静态悬浮能耗值。

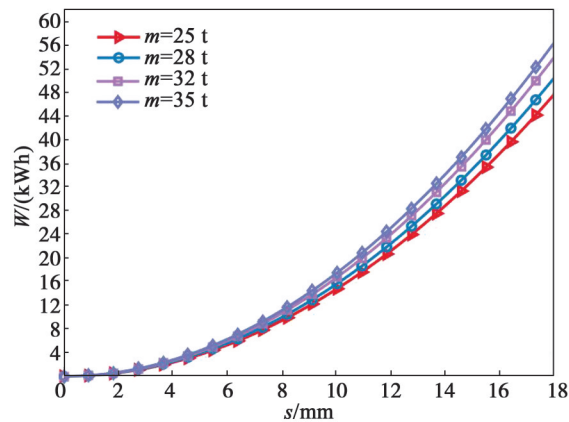
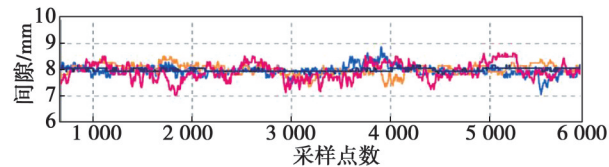
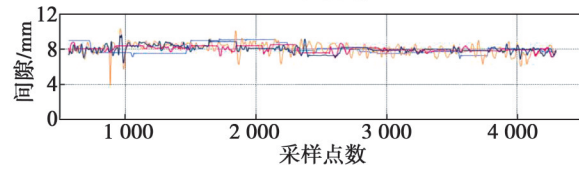


图 20 不同车辆质量及不同悬浮间隙时的静态悬浮能耗曲线

Fig. 20 Static levitation energy consumption curves under various vehicle masses and levitation gaps



(a) 静态悬浮工况下悬浮间隙实测曲线



(b) 动态运行工况下悬浮间隙实测曲线

图 21 静态悬浮、动态运行时悬浮间隙实测曲线

Fig. 21 Measured levitation gap curves under static levitation and dynamic operation conditions

态悬浮能耗。根据表 6 中的 7 组实测数据计算，动态悬浮单耗较静态悬浮单耗平均高出约 11.5%。

表 6 静态悬浮时悬浮能耗理论值与实测数据表

Table 6 Comparison of theoretical and measured levitation energy consumption during static levitation

参数	实测 1	实测 2	实测 3	实测 4	实测 5	实测 6	实测 7
静态能耗/(kWh·h ⁻¹)	98.0	102.8	97.4	102.6	103.8	101.4	99.4
动态能耗/(kWh·h ⁻¹)	112.8	110.6	110.4	113.8	112.4	119.8	107.6

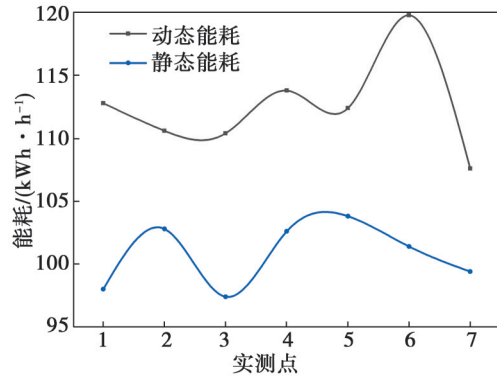


图 22 静态与动态悬浮能耗对比曲线

Fig. 22 Comparison curves of static and dynamic suspension energy consumption

降低动态悬浮能耗是缩减磁浮列车总能耗的重要途径之一。由上文分析可知,影响动态悬浮能耗的主要因素包括:一是线路不平顺引起的车-轨-桥耦合振动所导致的附加损耗;二是悬浮控制系统主动控制能力不足所带来的额外损耗。针对上述问题,可从以下3方面着手降低动态悬浮能耗:其一,提高线路平顺性,减小外部扰动;其二,增强悬浮控制系统对不同线路及工况的主动适应能力,即引入主动学习与自适应控制策略;其三,探索永磁与电磁混合悬浮方案,将电磁铁定常电流偏置改为永磁偏置,以降低附加损耗。

5 结论

本文以中低速磁浮列车牵引系统与悬浮系统为主要研究对象,构建了牵引系统与车辆系统的耦合模型,建立了牵引能耗及悬浮能耗模型,并基于电机阻力、牵引能耗、悬浮能耗开展了运行特性分析。主要结论如下:

①随着中低速磁浮车辆运行速度增加,电机输出功耗与输入功耗的比值增大,电机损耗占输入功耗比例下降,克服阻力做功的功耗占电机输入功率的比重增加,电机效率随之提高。

②悬浮间隙对能耗的影响远大于列车质量对悬浮能耗的影响,相较于悬浮间隙,由列车质量引起的悬浮能耗增量可忽略不计。当悬浮间隙从额定值8 mm降低至6 mm时,悬浮电流缩减25%,悬浮能耗缩减48.5%,减小悬浮间隙是降低悬浮能耗的有效途径。

③动态悬浮能耗高于静态悬浮能耗,根据实测数据计算动态悬浮单耗较静态悬浮单耗平均高出约11.5%。

参考文献:

- [1] 徐飞, 罗世辉, 邓自刚. 磁悬浮轨道交通关键技术及全速度域应用研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(3): 40-49.
XU Fei, LUO Shihui, DENG Zigang. Study on key technologies and whole speed range application of maglev rail transport[J]. Journal of the China railway society, 2019, 41(3): 40-49.
- [2] 金鑫. 磁浮交通技术的发展及应用现状简述[J]. 四川建筑, 2018, 38(5): 73-75.
JIN Xin. Development and application of maglev transportation technology[J]. Sichuan architecture, 2018, 38(5): 73-75.
- [3] 陈祎格. 中低速磁浮列车不同工况下的牵引仿真计算[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(6): 77-80.
CHEN Yige. Traction calculation simulation on medium and low speed maglev vehicle in different operation conditions [J]. Urban mass transit, 2018, 21(6): 77-80.
- [4] 崔杰. 中低速磁浮列车运行速度曲线的计算[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
CUI Jie. Calculation of operating speed curve on medium and low speed maglev vehicle[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [5] 李小庆, 刘帅. 中低速磁浮车辆悬浮系统吸力、电流与能耗研究[J]. 交通世界, 2021(28): 5-9.
LI Xiaoqing, LIU Shuai. Research on suction, current and energy consumption of medium and low speed maglev vehicle suspension system[J]. Transpo world, 2021(28): 5-9.
- [6] 矫岩峻. 中低速磁浮列车节能运行研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
JIAO Yanjun. Research on energy-saving operation of medium-low-speed maglev vehicle[D]. Changsha: Nation University of Defense Technology, 2016.
- [7] 矫岩峻, 刘思恺, 马啸, 等. 中低速磁浮交通多车协同利用制动能量的研究[J]. 机车电传动, 2017(4): 85-90.
JIAO Yanjun, LIU Sikai, MA Xiao, et al. Research on multi-train cooperative utilization of regenerative braking energy for low-speed maglev traffic[J]. Electric drive for locomotives, 2017(4): 85-90.
- [8] 莫双鑫. 中低速磁浮列车运行阻力及牵引节能研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015.
MO Shuangxin. Analysis of the drag and energy conservation on mid-low speed maglev train[D]. Changsha: Nation University of Defense Technology, 2015.
- [9] 莫双鑫, 刘少克. 中低速磁浮列车空气阻力计算[J]. 机车电传动, 2015(4): 49-52.
MO Shuangxin, LIU Shaoke. Calculation of the aerodynamic drag for middle-low speed maglev train[J]. Electric drive for locomotives, 2015(4): 49-52.
- [10] 安邦. 中低速磁浮列车再生制动及运行能耗仿真[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
AN Bang. Simulation of mid-to-low speed maglev train regenerative braking and movement energy consumption[D]. Changsha: Nation University of Defense Technology, 2014.
- [11] 赖晴鹰. 中速磁浮运控电一体化运行策略优化[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
LAI Qingying. Operation strategy optimization of medium-speed maglev integrating operation, train control, and linear motor control[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [12] 丁文亮. 中速磁浮列车追踪间隔时间计算方法及供电分区划分优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
DING Wenliang. Study on calculation method of train tracking interval and optimization of power supply partition of medium speed maglev[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [13] 柴晓凤. 中速磁浮节能运行图优化方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
CHAI Xiaofeng. Study on optimization method of the medium-speed maglev train timetable for energy saving[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [14] 柴晓凤, 刘军, 赖晴鹰, 等. 考虑辅助停车区约束的中速磁

浮列车速度曲线节能优化方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(6): 1499-1506.

CHAI Xiaofeng, LIU Jun, LAI Qingying, et al. Optimal energy-efficient trajectory planning for middle-speed maglev considering constraint of auxiliary stopping area[J]. Journal of central south university (science and technology), 2019, 50(6): 1499-1506.

[15] 周浩然. 面向多目标的中速磁浮列车运行图优化方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.

ZHOU Haoran. Study on multi-objective optimization method of medium-speed maglev timetable[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.

[16] 李睿豪. 基于同步电机的新型中低速磁浮列车牵引问题研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.

LI Ruihao. Research on the problem of traction for the new mild-to-low speed maglev train using synchronous motor [D]. Changsha: Nation University of Defense Technology, 2014.

[17] 李晓春. 中低速磁浮列车关键电气系统研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.

LI Xiaochun. Pivotal electric system analysis for medium-low speed maglev train[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.

[18] 何昱. 中低速磁浮列车悬浮斩波器优化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.

HE Yu. Research on optimization of maglev chopper[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.

Evaluation of energy consumption influencing factors of medium and low speed maglev trains and optimization strategy

WEN Peng^{1,2}, BIAN Tao²

(1. State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;
2. Hunan Lingxiang Maglev Technology Co., Ltd., Changsha, Hunan 410008, China)

Abstract: Against the backdrop of China’s goals of carbon peaking and carbon neutrality, the rapid growth of energy consumption in the transportation sector has emerged as an urgent issue. Due to their advantages of non-contact operation, low pollution, and low maintenance costs, medium and low speed maglev trains are expected to become a key development direction for urban and suburban transit. To reveal their energy consumption patterns, the traction system and the vehicle system were investigated, and a traction-vehicle coupled model was established based on their inherent coupling relationships. Simulation data penetrating to traction and levitation energy consumption during train operation were subsequently obtained to analyze their evolution characteristics and primary influencing factors. Furthermore, corresponding energy-saving optimization strategy was proposed.

Keywords: medium and low speed maglev train; traction energy consumption; levitation energy consumption; coupling model; optimization strategy