

中低速磁浮列车上坡牵引策略优化

矫岩峻, 文艳晖, 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: 在建立中低速磁浮列车牵引计算模型的基础上, 提出了一种新的上坡牵引策略, 该策略相比于传统牵引策略有节时节能的优点。重点分析了该策略节能原理, 并以工程实例进行了仿真验证。结果表明: 以路段的惰行速度下限为列车到达坡顶的速度, 比其他到达坡顶的速度更节时节能。

关键词: 中低速磁浮列车; 上坡牵引; 牵引计算; 优化策略

中图分类号: U292.91⁺7; U260.13⁺1 **文献标识码:** A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2016.02.009

Uphill Traction Strategy Optimization of Middle/Low-speed Maglev Train

JIAO Yanjun, WEN Yanhui, LIU Shaoke

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

Abstract: Based on the establishment of a middle/low-speed maglev train traction calculation model, an innovative kind of uphill traction strategy was presented, which was benefit to reduce energy and save time in comparison to the traditional traction strategy. The principle of time and energy saving was analyzed, and the optimization algorithm was verified through simulation program on the base of engineering background. The practical simulation results showed if the low-limit of the coasting speed for trains was regarded as the one that reached the top of the hill, this speed was more time and energy saving than others.

Keywords: middle/low-speed maglev train ; uphill traction calculation; traction calculation; algorithm strategy

0 引言

中低速磁浮列车是一种新兴的城市轨道交通工具。中低速磁浮列车利用电磁力将车体悬浮在轨道之上, 利用直线电动机来牵引列车运行, 并采用电磁导向, 因此车体与轨道无机械接触, 噪声小。此外, 磁浮列车还具备安全性高、爬坡能力强、转弯半径小、使用维护简单等优点。基于以上优点, 磁浮列车势必将会成为城市轨道交通的发展方向之一, 所以研究中低速磁浮列车运行节能控制具有十分重要的实际意义。

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 线和长沙磁浮线, 在这 2 条线路上运行的磁浮列车的电机的调速均是采用“恒滑差频率”调速, 采用这种调速方式的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^[1-2]。电机的推力和功率随速度变化特点如图 1。

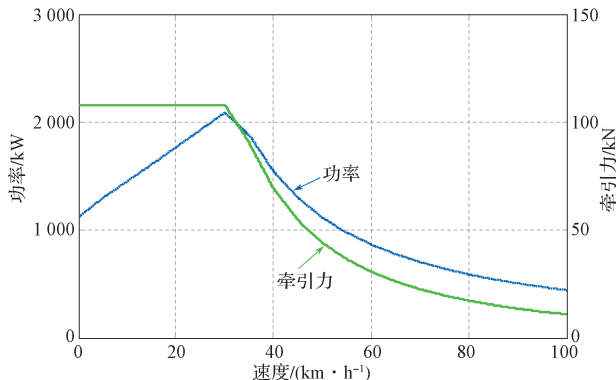


图1 牵引功率、牵引力与速度关系图

收稿日期: 2015-10-28

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划重点项目子课题(2012 BAG7B01-01-04)

1.2 磁浮列车运行阻力特性

磁浮列车在平直线路上运行时所受的基本阻力包括风阻力、涡流阻力和受流器阻力。现有工程化低速磁浮试验列车基本阻力计算公式沿用日本 HSST-100L 型列车阻力计算公式:

$$D = \begin{cases} 41.67 + 3.354WV + (1.652 + 0.572N)V^2 & V < 5.6 \text{ m/s (20 km/h)} \\ 41.67 + (18.22 + 0.074V)W + (1.652 + 0.572N)V^2 & V \geq 5.6 \text{ m/s (20 km/h)} \end{cases} \quad (1)$$

式中: D 为列车基本阻力, N; W 为列车质量, t; V 为运行速度, m/s; N 为车辆数。

磁浮列车在坡路上运行时除基本阻力外, 还有坡道附加阻力, 大小即为列车重力在当前坡道方向上的分量, 计算公式为:

$$f_g = 1000Wg\sin\theta \quad (2)$$

式中: f_g 为坡道附加阻力, N; θ 为坡道的角度。

在实际应用中, $\sin\theta$ 不容易得到, 而 $\tan\theta$ 在工程设计中已经给出。在实际线路中, 坡道夹角 θ 都比较小, 坡度最大不超过 70‰, 可以用 $\tan\theta$ 近似地代替 $\sin\theta$ 。

2 磁浮列车牵引计算模型

2.1 磁浮列车加速度计算模型

磁浮列车在运行过程中分为 3 种工况: 牵引工况、惰行工况、制动工况。

磁浮列车加速度公式为

$$a = \frac{k_1 F - D - k_2 B - f_g}{W} \quad (3)$$

式中: a 为列车加速度, m/s^2 ; F 为牵引力, N; B 为制动力, N; 在牵引工况时: $k_1=1, k_2=0$; 在惰行工况时: $k_1=0, k_2=0$; 在制动工况时: $k_1=0, k_2=1$ 。

2.2 速度与距离计算模型

运行速度和距离的计算公式为

$$\left. \begin{aligned} V_{i+1} &= V_i + a\Delta t \\ S_{i+1} &= S_i + V_i\Delta t + 0.5a\Delta t^2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: V_i 和 V_{i+1} 分别为第 i 步和第 $i+1$ 步车辆的运行速度; S_i 和 S_{i+1} 分别为第 i 步和第 $i+1$ 步车辆运行距离^[3]。

3 上坡牵引策略优化

3.1 磁浮列车常规运行过程说明

磁浮列车常规牵引策略中不区分坡道运行与平直道运行, 在没有限速要求的轨道上运行的过程是: 首先列车从 0 速度开始启动加速, 当速度达到预设速度上限 $V_{\max}$ 时进入惰行工况, 当惰行速度到达预设速度下限 $V_{\min}$ 时再次牵引加速, 之后一直反复重复惰行、牵引, 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。磁浮列车运行过程如图 2 所示。

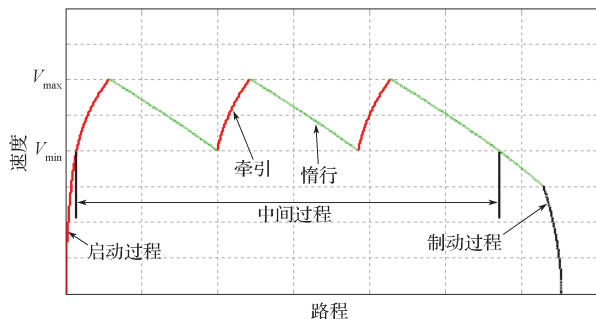


图2 常规牵引策略列车运行速度与路程关系图

3.2 节时节能上坡运行策略

磁浮列车运行在坡度不同的路段上时, 希望满足运行时间需求的情况下, 尽量减少运行能耗。列车通常选择平直路段或者下坡路段进行牵引加速, 因为上坡过程中牵引加速消耗能量较多^[5]。当上坡距离较长, 无法从坡道底部惰行到坡道顶部时, 研究在坡道的何处进行加速牵引, 可使列车运行过程更节时节能, 具有重要意义。

假设有一段坡度为 $\alpha\%$, 长度为 S 的上坡路段。磁浮列车车重为 W , 运行速度上下限分别为 $V_{\max}$ 、 $V_{\min}$, 基本阻力和附加阻力按照式(1)、式(2)计算, 且规定列车以速度 $V_{\max}$ 进入坡道路段。

3.2.1 常规牵引策略运行

常规牵引策略运行: 如图 3 所示, 列车从 A 点进入坡道开始惰行, 惰行到速度为 $V_{\min}$ 时到达 D 点, 然后转入牵引工况, 加速到速度为 $V_{\max}$ 时到 F 点, 正好运行距离为 S , 驶出上坡路段。如果上坡更长亦可是其他速度惰行出段。本文为便于理论分析, 只取了常规牵引策略里面的一种特殊情况。

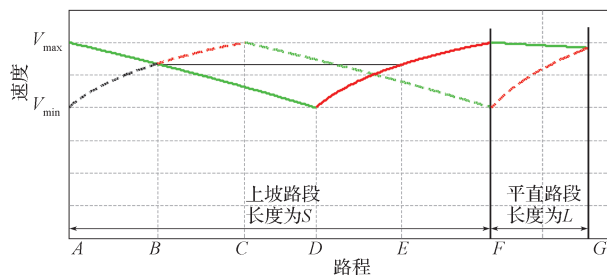


图3 速度与路程关系图

3.2.2 节时节能运行策略

为了研究上坡运行节时节能策略, 使列车正好以最低运行速度驶出上坡路段, 本文提出反向推导法, 包括反推惰行和反推牵引。即在已知列车受力大小和终点速度的情况下, 根据终点速度推导初始速度的过程。针对前面所假设的情况, 采用节时节能上坡运行策略运行, 如图 3 中虚线, 令列车车速在坡道终点 F 为 $V_{\min}$, 开始反推惰行, 当速度为 $V_{\max}$ 时到达 C 点, 从 C 点开始反推牵引, 直到与惰行过程 AD 段相交于 B 点, 设在 B 点时速度为 V_x 。则节时节能上坡运行过程从 A 点以速度为 $V_{\max}$ 进入坡道开始惰行, 惰行到速度