

研
究
开
发

低速磁悬浮列车牵引计算算法研究

饶 攀, 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: 为完成低速磁悬浮列车牵引计算,建立了低速磁悬浮列车牵引计算模型,提出了一种新的牵引策略,阐述了该策略的关键技术和算法流程的设计,编制了牵引计算仿真软件,并对北京S1线进行了牵引计算。采用该算法控制列车达到了列车运行速度快、节能降耗的目的。

关键词: 磁悬浮列车; 牵引计算; 牵引策略; 算法

中图分类号: U292.91+7; U260.13+1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2012)05-0066-04

作者简介: 饶 攀 (1987-), 男, 硕士研究生, 研究方向为磁悬浮列车牵引计算。

Traction Calculation Algorithm Research for Low-speed Maglev Train

RAO Pan, LIU Shao-ke

(School of Electromechanic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: Based on a traction calculation model for low-speed maglev train, a new strategy of traction calculation was put forward. According to the strategy, key technology and flow charts of the algorithms were presented. Simulation software was formulated, by which the Beijing S1 route was calculated. With proposed algorithms, high speed and low consumption of the train were achieved.

Key words: maglev train; traction calculation; traction strategy; algorithm

0 引言

牵引计算是轨道交通运营规划的基础,传统轨道交通工具的牵引计算已经接近成熟。低速磁悬浮列车作为一种新型城市轨道交通工具,正在快速发展之中^[1],其牵引计算工作刚刚起步,有待进一步深入研究。

1 磁悬浮列车牵引计算模型

牵引计算的基础是建立列车的牵引计算模型。由于低速磁悬浮列车是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的^[2],并采用电磁导向,故车体与轨道无机械接触,不产生摩擦阻力,这些特点决定了磁悬浮列车的牵引计算模型不同于一般的轮轨列车。

1.1 受力情况

在分析磁悬浮列车的受力情况时,可将列车看成为一个质点^[3]。列车在运行方向上受到的力包括牵引力、制动力和阻力。

磁悬浮列车的牵引力 F 是由直线感应电机产生的,

根据已知的电机牵引力特性曲线,可得到相应速度时牵引力的大小。

磁悬浮列车常用的制动方式有再生制动、反接制动和机械制动,前两者合称为电制动。列车速度较高时,采用电制动,制动力 W 可以根据已知的电机制动力特性曲线得到;当列车速度低于一定值时,采用机械制动。

列车运行时的阻力 f 主要由两部分构成,基本阻力和附加阻力。其中,基本阻力包括空气阻力、电磁阻力和受流器阻力;附加阻力包括坡道附加阻力、曲线附加阻力和隧道附加阻力等。

1.2 加速度与运行工况的关系

磁悬浮列车运行工况通常可以分为牵引、惰行和制动工况。作用于列车上的合力 C 与工况有关。

当列车处于牵引工况时: $C = F - f$

当列车处于惰行工况时: $C = -f$

当列车处于制动工况时: $C = -W - f$

由于磁悬浮列车没有旋转支撑轮,故其回转质量为零。设列车总质量为 M ,则在合力 C 的作用下,列车在运动方向的加速度 $a = C/M$ 。

收稿日期: 2012-01-10; 收修改稿日期: 2012-08-04

1.3 速度与距离计算

仿真计算时, 如果时间步长 Δt 取得足够小, 则可以认为在这个时间段内, 列车受力情况、加速度一直保持不变。设 V_i 和 S_i 分别为第 i 个时间步长时列车的速度和运行距离, 则第 $i+1$ 个时间步长时列车的速度 V_{i+1} 和运行距离 S_{i+1} 分别为:

$$\begin{cases} V_{i+1} = V_i + a\Delta t \\ S_{i+1} = S_i + V_i\Delta t + 0.5a\Delta t^2 \end{cases}$$

2 牵引策略

牵引策略是牵引计算软件的核心部分, 是在建立的列车模型基础上, 根据一定的列车运行工况转换原则, 对列车区段运行的操纵方法进行假定而建立的自动化计算模型。一种优化的牵引策略应该在满足线路限速和一定的舒适度基础上, 统筹兼顾列车区间运行的时间和能耗, 达到既满足运行时间的要求, 又尽可能地降低能耗的目的。

2.1 工况转换原则

磁悬浮列车实际运行状态是非常复杂的, 运行工况在牵引、惰行和制动工况间相互转换, 参考列车实际运行过程, 列车运行工况转换要遵循以下几条原则:

牵引工况和惰行工况可以直接相互转换;

制动工况和惰行工况可以直接相互转换;

牵引工况和制动工况在相互转换时, 中间需要经历一定的转换时间, 列车在该转换时间内为惰行工况运行。

2.2 关键技术

在磁悬浮列车的3种运行工况中, 惰行工况时的能耗是最低的, 且速度衰减较慢, 因此列车在中间阶段时应尽量采用惰行工况运行。有研究表明, 列车在匀速运行时的能耗是较低的, 速度的波动范围越大, 则能耗也越大^[4]。因此, 在满足线路限速情况下, 应尽量缩小列车速度波动的范围。

2.2.1 速度阈值法

采用一种速度阈值的方法对列车运行速度进行优化: 设定运行最高速度 $V_{\max}$ 和惰行最低速度 $V_{\min}$, 前者表示列车运行过程中的最高速度约束, 后者表示列车惰行工况运行时的最低速度约束, 两者结合就规定了中间阶段列车速度波动的范围。

2.2.2 限速预判法

列车运行工况的选取与当前路段的限速和前方路段的限速关系密切。为尽量避免出现列车牵引加速至较高速度后因前方路段限速较低而立即转为制动减速运行的情况, 对列车前方一定距离(记为 L) 之内的线路限速条件进行了预判, 综合当前路段的限速和前方路段的限速来对列车的运行工况进行选取。

2.2.3 制动转换点的计算

为了求解制动转换点的计算问题, 引入一种比较

简洁的反向计算方法: 假设列车以制动结束点的速度和距离为起始状态, 将制动工况时的合力反向作用于列车, 推算反向速度距离曲线, 然后通过与正向速度距离曲线求取交点的方法来获得制动转换点。

2.3 算法

因为存在上文所述的反向制动计算的问题, 为了便于理解, 引入“反向制动工况”这一概念, 将列车运行工况分为牵引、惰行、正向制动和反向制动4种工况。算法可以分为

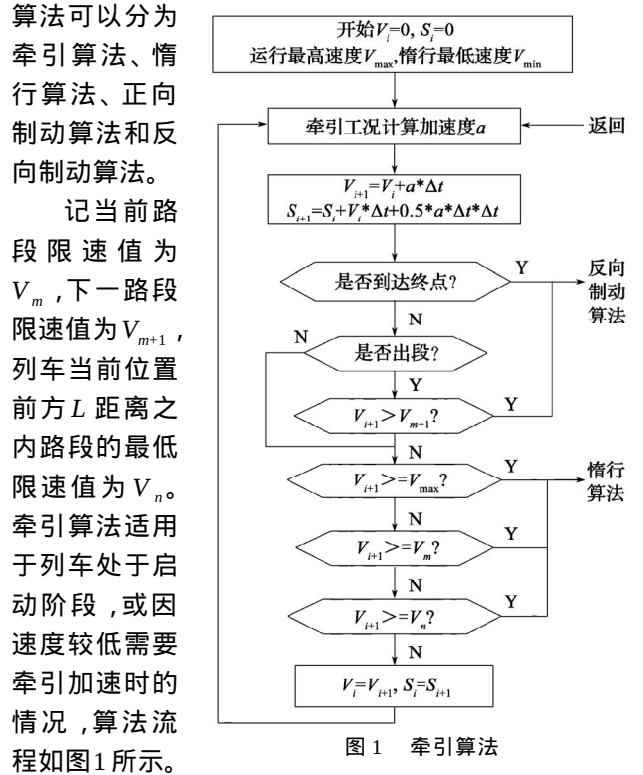


图1 牵引算法

惰行算法适用于列车在中间路段以较高的速度惰行时的情况, 算法流程如图2所示, 图中 ΔV 的值一般可以取为5~8 km/h。

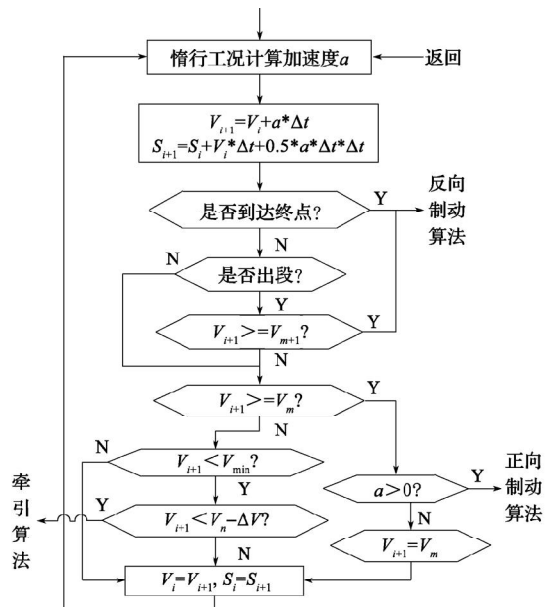


图2 惰行算法

正向制动算法适用于列车在长大下坡道运行需要制动减速时的情况,此时因为列车速度较高,制动方式为再生制动,算法流程如图3所示。

反向制动算法适用于列车处于制动停车阶段,或从限速值较高的路段驶入限速值较低的路段,需要制动调速时的情况。停车制动点可以看成是一条起点为运行线路终点,长度为0,限速为0的特殊路段。

制动过程中在不同制动方式之间切换时,列车牵引系统需要一定的切换时间,为了更好地模拟这一情况,记再生制动切换为反接制动时列车速度为 V_1 ,切换时间为 ΔT_1 ,反接制动切换为机械制动时列车速度为 V_2 ,切换时间为 ΔT_2 ,并假定列车在各切换时间内为惰行工况运行。反向制动算法流程如图4所示。

3 计算实例

根据需要编制了低速磁悬浮列车牵引计算软件,并结合北京低速磁悬浮交通S1线进行了牵引计算。

北京低速磁悬浮交通S1线西起门头沟永定新城石门营,东至苹果园,途经小园、矿务局、上岸村、石龙路、四道桥和金安桥等6站,全长10.216 km,该线为我国首条计划投入商业运营的低速磁悬浮列车轨道交通线。

仿真计算时采用我国自主研制的CMS-04型磁悬浮列车,列车设计最高运行速度150 km/h,6辆编组,全车总质量192 t。

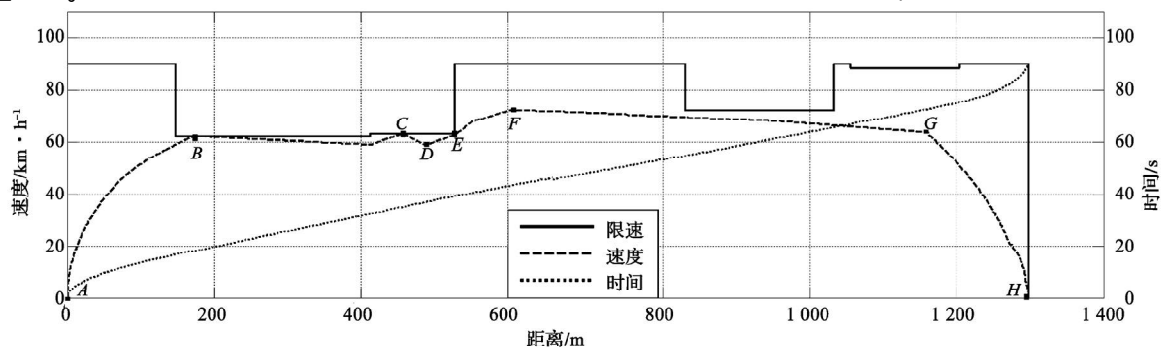


图3 正向制动算法

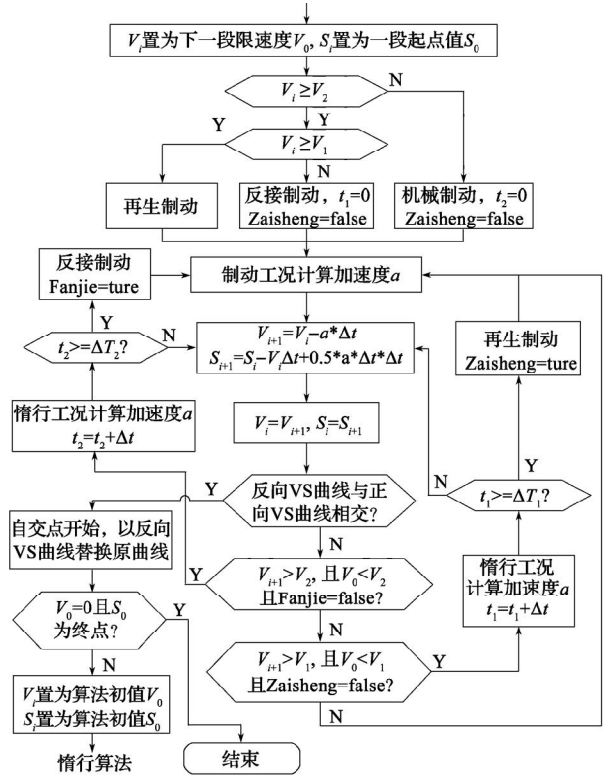


图4 反向制动算法

3.1 单个区间牵引计算

选取S1线的典型区间石门营站至小园站为计算对象,线路情况如图5所示,该区间全长1 297 m,最大坡度53‰,最小弯道半径300 m。

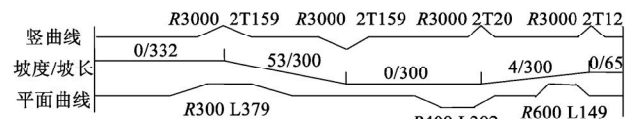


图5 石门营站至小园站线路平纵断面

计算时设定运行最高速度 $V_{\max}$ 为90 km/h,惰行最低速度 $V_{\min}$ 为70 km/h,设石门营站至小园站方向为上行方向,只计算上行方向。

列车的速度(时间)与距离的关系曲线如图6所示。列车运行的大致过程为:列车从起点A静止出发,牵引加速至B点时达到弯道限速,后转为惰行工况运行,惰行至C点时再次达到弯道限速,此时列车处于长大下坡道上,遂制动减速至D点,后惰行至E点离开弯道,后再次牵引加速至F点,此时达到前方弯道限速而转

图6 石门营至小园站运行速度(时间)—距离曲线

为惰行工况运行，惰行到达 G 点后则转入制动工况运行，最后在终点 H 点停车。全区间运行时间为 90 s ，技术速度为 51.7 km/h ，能耗为 $22.7\text{ kW}\cdot\text{h}$ 。

3.2 $V_{\max}$ 和 $V_{\min}$ 对运行参数的影响

下面分析运行最高速度 $V_{\max}$ 和惰行最低速度 $V_{\min}$ 的选取对运行参数的影响。

设定牵引最高速度 $V_{\max}$ 为 80 km/h 不变，选取不同的惰行最低速度 $V_{\min}$ ，仍以石门营站至小园站区间的上行方向为例进行牵引计算，结果如表 1 所示。

表1 惰行最低速度 $V_{\min}$ 对运行参数的影响

惰行最低 速度 / $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	运行 时间 / s	能耗 / $\text{kW}\cdot\text{h}$	技术速度 / $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$
70	90	22.7	51.7
65	90	22.7	51.7
60	95	20.6	49.4
55	95	20.6	49.4

从表 1 可知，当惰行最低速度越小时，则运行时间越长，能耗越低，技术速度越低。但如果惰行最低速度大于某一速度（如表 1 中 65 km/h ）时，由于线路限速值较低，列车惰行时的速度不满足惰行最低速度约束，则运行参数不再因为惰行最低速度的增大而变化了；如果惰行最低速度小于某一速度（如表 1 中 60 km/h ）时，由于线路长度的限制，列车速度还未衰减至惰行最低速度时已转入制动进站状态，则运行参数也不再因为惰行最低速度的减小而变化了。

设定运行最高速度 $V_{\max}$ 和惰行最低速度 $V_{\min}$ 的差值为 10 km/h 不变，选取不同的牵引最高速度，同样以石门营站至小园站区间的上行方向为例进行牵引计算，结果如表 2 所示。

表2 运行最高速度 $V_{\max}$ 对运行参数的影响

运行最高 速度 / $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	运行 时间 / s	能耗 / $\text{kW}\cdot\text{h}$	技术速度 / $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$
90	90	22.7	51.7
80	90	22.7	51.7
70	95	20.6	49.4
60	100	20.2	46.7

从表 2 可知，当运行最高速度越大时，则运行时间越短，能耗越高，技术速度越高。综合分析得到，设置

过高的运行最高速度没有意义，因为线路限速的要求使得列车速度达不到很高的速度；同时过低的牵引最高速度没有带来能耗的明显降低，反而造成运行时间的明显增加。

综上所述，选取运行最高速度为 80 km/h ，惰行最低速度为 60 km/h 比较合理，既满足了快速运行的要求，又达到了节约能耗的目的。

3.3 S1线全线牵引计算

设定石门营至苹果园方向为上行方向，运行最高速度 $V_{\max}$ 为 80 km/h ，惰行最低速度 $V_{\min}$ 为 60 km/h 时，S1 线全线上行方向牵引计算结果如表 3 所示。

表3 S1线全线上行方向牵引计算结果

运行区间	运行距 离 / m	运行 时间 / s	停站 时间 / s	能耗 / $\text{kW}\cdot\text{h}$	技术速 度 / $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	旅行速 度 / $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$
石门营至小园	1 297	95	30	20.6	49.4	
小园至矿务局	1 267	99	30	19.5	46.2	
矿务局至上岸村	1 044	71	30	27.0	52.7	
上岸村至石龙路	1 064	98	30	19.3	39.0	
石龙路至四道桥	834	66	30	22.1	45.8	
四道桥至金安桥	2 507	165	30	38.1	54.6	
金安桥至苹果园	1 651	101	65	31.9	59.0	
全线	9 664	695	245	178.5	50.1	37.0

4 结语

在低速磁悬浮列车牵引计算软件的开发中，建立了牵引计算模型，提出了一种新的牵引策略，阐述了该策略的关键技术及算法。利用编制的软件对北京 S1 线进行了牵引计算，计算结果表明，该策略实现了准确停站，耗时较短，运行速度较快，且能耗较低的目标。

参考文献：

[1] 陈贵荣，常文森. 磁悬浮列车发展综述[J] 国外铁道车辆，1993(1):17-20.
[2] 叶云岳. 直线电机原理与应用[M] 北京：机械工业出版社，2000.
[3] 饶 忠. 列车牵引计算[M] 北京：中国铁道出版社，1999.
[4] 金炜东，王自力，李崇维，等. 列车节能操纵优化方法研究[J] 铁道学报，1997，19(6)：58-59.

动态消息

《机车电传动》编辑部声明

为顺应网络环境下期刊出版的新要求，推进期刊网络出版传播，凡向本刊投稿并被本刊录用，在著作权法的框架内，该论文的复制权、发行权、信息网络传播权、翻译权、汇编权等权利在全世界范围内转让给本刊及本刊授权的相关数据库。凡被本刊录用的稿件将同时通过因特网、手机等进行网络出版或提供信息服务，根据本刊编辑部稿酬标准一次性支付作者著作权使用报酬（即稿费，包含印刷版、光盘版和网络版等各种使用方式的报酬）。