



基于PI控制的永磁驱动地铁车辆 柔性启动方案研究与应用

刘智成¹, 陈希隽¹, 何 晔¹, 胡 辉²

(1. 广州地铁集团有限公司, 广东 广州 510000;

2. 株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 为进一步提高地铁的性能和运能, 缩短列车启动时间, 降低车辆启动冲击, 实现车辆快速平稳起步, 文章通过对列车启动过程的动力学分析, 基于永磁地铁车辆提出一种柔性启动方案, 用以优化启动过程中各子系统之间的配合, 在保证牵引指令有效的同时, 实现车辆保持缓解制动的柔性启动。针对车辆后溜防护控制问题, 采用增量式PI算法, 建立车辆启动过程中主动后溜防护控制系统模型, 加强车辆对坡道启动的鲁棒性。该柔性启动方案已完成全线路的性能仿真验证和整车实车测试, 仿真与试验结果表明, 该启动方案能够适应各种轨道条件, 利用现有设备即可实现永磁地铁车辆平稳快速启动。

关键词: 启动控制; 永磁电机; 地铁车辆; PI控制; 柔性启动

中图分类号: U231; TM351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-128X(2025)01-0107-07

0 引言

为满足人们日益增长的出行需要, 地铁运营采用“快走快停”的运行模式。为实现地铁车辆快速启动, 地铁车辆多采用网络系统判断整车牵引力大于阈值后, 发送保持制动缓解指令至制动系统^[1], 由于地铁车辆受牵引力冲击率和保持制动缓解冲击率^[2]的影响, 导致车辆启动冲击大、乘坐舒适性变差, 而降低车辆启动冲击、改善乘坐舒适性必然会受到多种因素制约^[3], 如信号系统的控车策略、驾驶方式等。为解决这一难题, 相关的专家学者提出了许多降低车辆启动冲击的方案^[4-5], 如通过参数优化降低车辆启动时的保持制动缓解冲击率, 这类传统方案虽然能在一定程度上降低车辆启动冲击, 但是同时降低了启动速度, 影响线路的旅行速度和运行效率^[6-8], 甚至会引起车辆坡道后溜的风险。当前, 地铁车辆亟需一种可实现车辆快速平稳启动, 并且具备后溜防护功能的新型启动方案。株洲中车时代电气股份有限公司研发团队通过对列车起步

过程的动力学进行分析, 基于永磁地铁车辆提出一种在保证牵引指令有效的同时, 实现车辆保持缓解制动的柔性启动方案。同时, 本文针对存在的车辆坡道后溜风险, 建立了车辆后溜防护模型, 实现了牵引系统主动后溜防护设计。该柔性启动方案能够适应多种轨道条件, 如坡道、直线和弯道等, 主动预防车辆后溜, 保证车辆快速平稳启动^[9-10]。

1 地铁车辆启动分析

1.1 启动阶段动力学分析

在传统的地铁车辆启动方案中, 启车过程的冲击主要由车辆牵引力冲击率和保持制动缓解力冲击率共同产生, 这导致车辆启动冲击存在组成复杂、调节困难的特点。为进一步分析车辆启动过程中受力变化, 对地铁车辆在对启动阶段进行动力学分析。

首先, 将车辆简化为刚体, 根据牵引系统的计算规范, 车辆在启动时其主要受力主要包括牵引力 F_q 、保持制动力 B 、基本阻力 w_0 和附加阻力 w_j ^[11]。其中,

通信作者: 胡 辉, 男, 主要从事城市轨道交通牵引传动控制设计的工作; E-mail: 373624755@qq.com

引用格式: 刘智成, 陈希隽, 何晔, 等. 基于PI控制的永磁驱动地铁车辆柔性启动方案研究与应用[J]. 机车电传动, 2025(1): 107-113. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.02.101.

Citation: LIU Zhicheng, CHEN Xijun, HE Ye, et al. Research and application of flexible starting method for metro trains with permanent magnet motors based on PI control[J]. Electric drive for locomotives, 2025(1): 107-113. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.02.101.

基本阻力 w_0 由车辆自身特性决定,涵盖了编组车辆的运动阻力、空气阻力和轮轨阻力等因素;附加阻力 w_j 主要由坡道附加阻力 w_i 、曲线附加阻力 w_r 和隧道附加阻力 w_s ^[12]组成。在车辆启动时,其主要阻力 F_w 为:

$$\left. \begin{aligned} F_w &= w_0 + w_j = w_0 + w_i + w_r + w_s \\ w_0 &= 0.049M \\ w_i &= \frac{i \times M \times g}{1000} \\ w_r &= \frac{600}{R} \times M \times g \times \frac{1}{1000} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: M 为整车负荷, t ; i 为坡度千分数; g 为重力加速度, 9.8 m/s^2 ; R 为曲线半径, m ; w_s 为隧道附加阻力,在车辆启动时默认为 0 kN 。

启动瞬时的加速度 a 为

$$a = \frac{F_q - B - F_w}{M} = \frac{F_q - B - w_0 - w_i - w_r - w_s}{M} \quad (2)$$

由式(2)可知,当保持制动力与牵引力之和大于基本阻力 w_0 和附加阻力 w_j 之和,且车辆启动加速度大于最小启动加速度 0.083 3 m/s^2 ^[13]时,则车辆可正常向前牵引^[14]。

整车冲击率 J_{erk} 为

$$J_{\text{erk}} = \frac{da}{dt} = \frac{1}{M} \left(\frac{dF_q}{dt} + \frac{dB}{dt} \right) \quad (3)$$

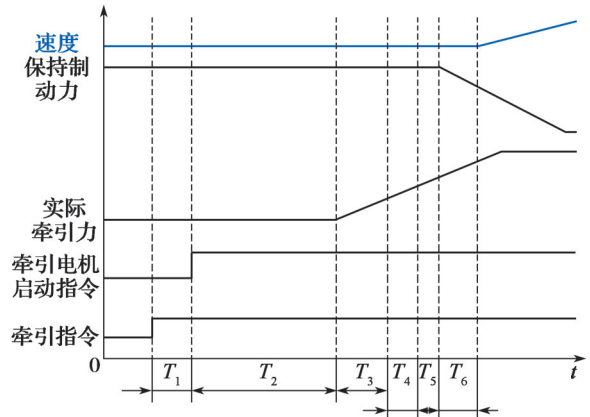
由式(3)可知,在整车启动过程中,传统车辆启动方案的冲击率为车辆牵引力冲击率和保持制动缓解力冲击率之和。

1.2 启动阶段时延分析

在地铁车辆启车过程中,传统车辆启动方案的延时受到多方面因素的影响,涉及多个子系统的通信和交互,而且保持制动缓解受到冲击率限制,导致车辆从牵引指令有效到车辆实际动车的延时时间较长。

当地铁车辆在正线运营时,一般采用信号控车模式,即整车的牵引力和制动力发挥均受信号系统控制;信号系统通过车辆硬线和网络系统将牵引指令和牵引级位传输至牵引系统,当牵引系统接收到牵引指令有效时,控制牵引逆变器给牵引电机供电,使牵引电机建立旋转磁场,当磁场建立完成后,开始按照牵引级位指令发挥牵引力,并实时将实际牵引力反馈至网络系统;当网络系统采集到整车牵引系统反馈的实际牵引力大于某一数值时,发送保持制动缓解指令至制动系统,制动系统开始缓解保持制动,根据式(2)计算可知,当车辆启动加速度大于 0.083 3 m/s^2 ^[13]后,车辆正常完成启动。整个地铁车辆 100% 牵引级位启动过程的时延分析如图1所示。

选择某标准地铁B型车在平直道启动的数据进行研究分析,其中 $T_1=200 \text{ ms}$, $T_2=1 \text{ s}$, $T_3=200 \text{ ms}$, $T_4=200 \text{ ms}$, $T_5=300 \text{ ms}$, $T_6=600 \text{ ms}$,从车辆硬线牵引指令有效至实际车辆开始启动整个时间约达到 2.5 s 。如车



T_1 —牵引系统接收到硬线牵引指令的网络延时; T_2 —牵引电机旋转磁场建立时间; T_3 —网络系统检测到实际牵引力大于某一数值后输出保持制动缓解指令的时间; T_4 —制动系统接收到保持制动缓解指令的网络延时; T_5 —制动系统开始缓解保持制动的动作时间; T_6 —整车瞬时加速度满足启动的时间。

图1 车辆启动的时延分析

Fig. 1 Delay analysis of train starting

辆在坡道上启动,其 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 基本一致,但 T_6 约延长至 1.1 s ,车辆整体启动时间约达到 3 s 。

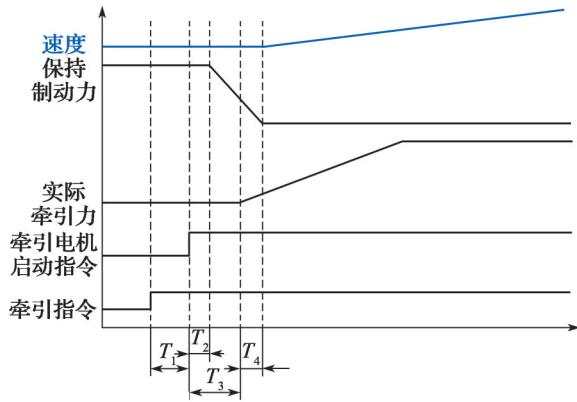
2 车辆柔性启动方案

基于对地铁车辆启动阶段的动力学和时延分析可知,造成启动冲击大和时延长的因素主要为保持制动开始缓解的时间和保持制动缓解的冲击率。为进一步减小车辆的启动延时和降低启动冲击,本文提出一种新型的车辆柔性启动方案,即当车辆牵引指令有效时,制动系统立即缓解保持制动,并且取消保持制动缓解冲击率限制,实现快速撤销保持制动力,降低牵引电机旋转磁场建立时间,尽快发挥牵引力的目的。但此方案在坡道启动时如出现牵引级位偏小将会导致车辆出现后溜现象,为进一步提高车辆的可用性,需新增主动后溜防护功能。

2.1 柔性启动方案分析

对柔性启动方案做进一步分析,当牵引指令有效后,采取开始保持制动和取消保持制动缓解冲击率限制的措施,使得车辆启动时的保持制动力较低,从而降低保持制动力变化对车辆启动过程的影响。根据式(3)可知,此时车辆的启动冲击完全由牵引力进行控制,保持制动缓解的冲击率不再叠加至整车启动冲击,该措施能够显著地降低车辆启动时的冲击,其优化后的车辆启动时延分析如图2所示。

选择某型通用永磁城市轨道交通车辆的数据进行研究分析,对预计的启动时间进行优化,其中 $T_1=200 \text{ ms}$, $T_2=300 \text{ ms}$, $T_3=300 \text{ ms}$, $T_4=500 \text{ ms}$,从车辆硬线牵引指令有效至实际车辆开始启动,整个时间约为 1 s ,



T_1 —牵引系统接收到硬线牵引指令的网络延时; T_2 —制动系统开始缓解保持制动的动作时间; T_3 —牵引电机旋转磁场建立时间; T_4 —整车瞬时加速度满足启动的时间。

图2 车辆柔性启动方案时延

Fig. 2 Delay of train flexible starting solution

比传统控制方案缩短约1.5 s。

2.2 后溜主动防护策略

传统的地铁车辆后溜防护主要由信号系统和车辆系统共同完成, 针对不同的轨道和车型设定不同的数值, 当网络系统判断整车牵引力大于一定的数值时才会启动车辆, 从而保证车辆在坡道上正常启动。但此种防护方式无法防止车辆启动后, 由于牵引级位降低或坡道增大所导致的车辆后溜, 如触发后溜, 最终以触发紧急制动作为最终防护措施^[15]。信号系统通过布置的地面设备和车载设备对车辆实时位置进行检测, 如发现车辆存在后溜现象, 会立即通过车载设备触发车辆紧急制动, 从而防止车辆继续后溜^[16]。

当车辆采用柔性启动方案后, 车辆初始启动时整车基本无保持制动力, 如车辆处在上坡状态, 牵引力小于坡道下滑力时, 车辆将出现后溜现象, 故需对后溜保护采用主动防护方案, 即当车辆发生轻微后溜后, 牵引系统会主动介入使得车辆退出后溜状态。

为了有效预防坡道启动时的后溜问题, 通过安装于电机端的旋变传感器产生的脉冲相位差对车辆实际的运行方向进行判断^[17]。当检测到的实际运行方向和方向指令存在差异, 则认为车辆出现后溜, 并通过速度积分算法实时对后溜距离进行计算, 根据后溜速度和后溜距离将后溜分为后溜防护与后溜保护两个阶段, 各阶段划分如图3所示。

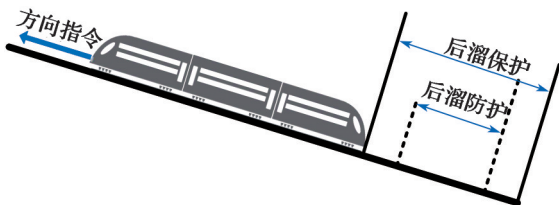


图3 车辆后溜阶段定义

Fig. 3 Definition of rollback

在后溜的不同阶段, 牵引系统处理策略分别如下:

①后溜防护阶段: 当后溜速度超过0.5 km/h或后溜距离超过100 mm时, 判定地铁车辆进入主动后溜防护模式, 此时牵引系统通过主动防护控制器, 实时调节电机牵引转矩, 使得车辆低速向前行驶^[18-19]。当牵引级位对应的牵引转矩大于控制算法的输出转矩时, 牵引系统退出主动后溜防护模式。

②后溜保护阶段: 当后溜速度超过2 km/h或后溜距离超过1 320 mm时, 判定车辆主动后溜防护模式失效, 车辆进入后溜保护阶段。为保障车辆安全, 此时牵引系统发出后溜保护信号给车辆, 车辆综合整列车牵引系统后溜保护信号, 触发紧急制动。

2.3 后溜防护控制器

针对列车牵引系统在主动后溜防护阶段的速度闭环控制方式, 可将牵引控制系统简化为单输入单输出 (Single-Input Single-Out, SISO) 系统, 为降低控制器的计算量, 提高控制系统的实时响应特性, 拟采用增量PI控制器对后溜防护阶段的车辆牵引力进行控制。

理论的PI控制微分方程为

$$u(t) = u_0 + k_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \right] \quad (4)$$

式中: $u(t)$ 为当前控制器计算输出量, 代表当前周期的PI计算值; $e(t)$ 为当前状态观测量与目标值的差值, 其中状态观测量为速度, 目标值为期望目标速度; k_p 为比例系数; T_i 为积分时间常数; u_0 为控制器初始输出。

计算PI控制器第 k 次的输出控制量增量, 具体为

$$\Delta u(k) = k_p [e(k) - e(k-1)] + k_p \frac{t_s}{T_i} e(k) \quad (5)$$

式中: $\Delta u(k)$ 为PI控制器第 k 次的输出控制量增量; $e(k)$ 、 $e(k-1)$ 分别为系统中第 k 次和第 $k-1$ 次状态观测量和目标值的差值。

在 k 时刻PI控制器的输出控制量 $u(k)$ 和期望加速度 $a(k)$ 输出分别为:

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \quad (6)$$

$$a(k) = a(k-1) + k_p \Delta u(k) + k_p \frac{t_s}{T_i} u(k) \quad (7)$$

其中, 比例系数 k_p 对期望加速度的响应速度和幅值进行控制, 积分时间常数 T_i 提升SISO控制系统的稳态响应特性。

由于车辆牵引力与车辆载荷呈线性关系, 则在 k 时刻输出的期望车辆牵引力 $F_q(k)$ 为

$$F_q(k) = M \cdot a(k) \quad (8)$$

在车辆后溜防护阶段, 由于保持制动已基本缓解, 整车冲击基本由牵引力造成的冲击率组成, 故最终控制器输出牵引力造成的冲击率应不大于 0.75 m/s^3 ^[13]。

综上所述, 后溜主动防护控制器根据目标速度和

实际速度的偏差值得到牵引系统需要发挥的转矩，实现车辆主动纠正后溜状态，保证车辆的行驶方向与控制方向一致。

3 柔性启动仿真分析

3.1 坡道启动仿真

为验证地铁车辆启动控制方案的有效性，基于某

型号的永磁地铁车辆，并使用 MATLAB/Simulink 作为仿真平台构建测试模型。考虑到低速行驶的速度要求和驾驶体验，设定主动后溜防护阶段的目标速度为 2 km/h；当仿真时间达到 1 s 时，牵引指令将被激活；针对车辆实际运行时面对不同的轨道工况进行仿真，车辆启动时手柄级位恒定为 10%，同时结合国内外地铁轨道线路现状，选取最大坡度至 55‰，其在不同坡度下的仿真结果如图 4 所示。

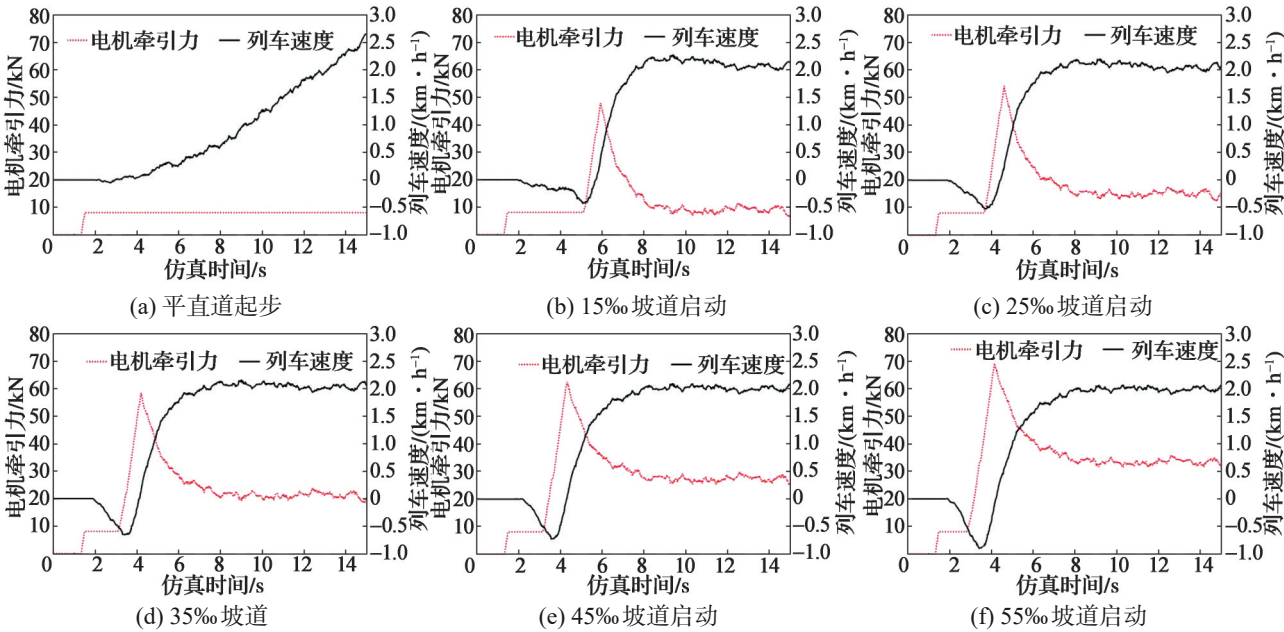


图4 平直道起步和不同坡度的坡道启动仿真结果

Fig. 4 Simulation results of starting on a straight and level track and inclined track sections with different gradients

由图4可知，当地铁车辆以10%牵引级位在坡道启动时，由于牵引力不足以克服坡道下滑力和制动系统保持制动缓解，导致车辆在坡道启动时出现后溜。当车辆后溜状态满足主动后溜防护模式的判断条件后，牵引系统实时调整电机转矩以改变车辆的后溜状态，使得车辆最终以目标速度向前行驶。在纠正地铁车辆后溜过程中，其最大后溜速度、后溜距离和后溜改出时间（从车辆出现后溜到车辆向前行驶的时间）如表1所示，车辆后溜时电机转速平缓变化、车辆牵引力导致的冲击率不大于0.75 m/s³，仿真结果表明后溜启动方案可满足车辆正常启动，并实现坡道起步运行的功能。

表1 主动后溜防护仿真关键结果

Table 1 Key simulation results of active rollback prevention

坡度/‰	后溜距离/mm	最大后溜速度/(km·h ⁻¹)	改出时间/s
0	0	0	0
15	138	0.438	5.71
25	131	0.525	4.43
35	154	0.659	4.12
45	167	0.733	4.31
55	229	0.903	4.24

3.2 方案对比仿真

为进一步比较本文提出的柔性启动方案与传统方

案在相同轨道条件下的启动情况，基于车辆模型进行仿真计算对比分析。在传统方案中，仅当牵引力达到特定阈值以上时，才允许逐步释放保持制动，因此在仿真中车辆的启动牵引级位被设置为70%。针对不同坡度的轨道条件，开展仿真计算分析，仿真计算结果如图5所示。

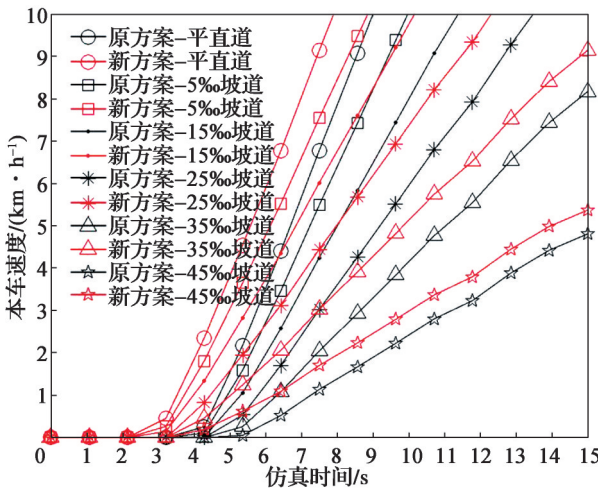


图5 不同坡道下70%级位启车仿真结果对比

Fig. 5 Comparison of simulation results of starting at 70% level across different gradients

由图5可知：①对于地铁车辆的启动速度，本文所

提的柔性启动方案显著提高了车辆的启动速度, 缩短了车辆从接收牵引指令到实际开始运行的总时间, 平均缩短了约 1.4 s, 并在坡道启动时未出现后溜情况。

②针对坡道启动过程中后溜再启动时间的问题, 本文所提的柔性启动方案通过优化操作流程, 显著缩短了后溜再启动时间, 而在实际运营场景中, 当车辆面临出现的坡道后溜现象时, 传统方案要求司机进行复杂的操作流程, 包括上报行调、手动缓解紧急制动, 再启动车辆, 这不仅耗时而且可能导致车辆停放在关键轨道上, 对线路运营效率造成了显著影响。分别对传统方案和本文所提方案的后溜再启动时间进行初步估算, 估算结果如表2所示, 后者的车辆后溜再启动时间比前者减少了约 14.5 s。另外, 在车辆出现后溜情况时, 新方案避免了紧急制动的触发, 显著提升了车辆的运行效率, 并降低了因后溜可能引发的运营风险。

表2 后溜再启动时间对比

Table 2 Comparison of restarting duration after rollback s

项目	传统方案	柔性启动方案
启动时间	3.0	2.0
触发后溜	3.0	3.0
后溜紧急制动	0.5	0
紧制缓解	10.0	0
再次启动	3.0	0
合计用时	19.5	5.0

仿真结果表明, 采用新型柔性启动方案符合设计预期, 在不同轨道情况下均可实现平稳、快速启动, 并且采用主动防护措施, 防止了车辆因后溜而触发的紧急制动, 提高了车辆线路的运行效率。

4 整车试验

4.1 平直道启车试验

对本研究提出的柔性启动方案进行实车试验验证, 试验车辆停放在试验车站的直线轨道上。司机操作牵引手柄至 100% 牵引级位, 当车辆牵引系统接收到牵引指令后开始快速释放保持制动。试验收集的现场数据如图 6 和图 7 所示。由图 6 和图 7 可知, 与传统的启动方案相比, 新的柔性启动方案使得车辆的启动时间缩短了约 1.2 s, 整车最大启动冲击率约从 0.708 m/s^3 降低至 0.535 m/s^3 。

4.2 坡道启车试验

在坡道上对后溜防护方案进行验证, 工况设置为: ①试验车辆处于 AW0 载荷, 停放在上坡道; ②司机仅给定 10% 的牵引级位, 车辆在牵引指令有效时开始缓解保持制动, 由于坡道下滑力车辆出现后溜状态, 当牵引系统检测到车辆存在后溜时, 主动调整牵引力使得车辆以 2 km/h 的速度缓慢向前爬行。

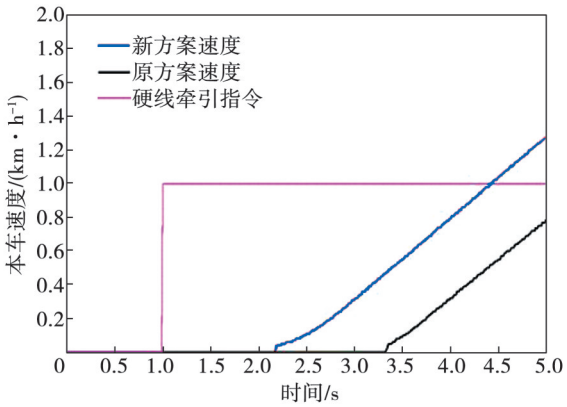


图6 平直道满级位启动测试数据

Fig. 6 Testing data of starting at 100% level on a straight and level track

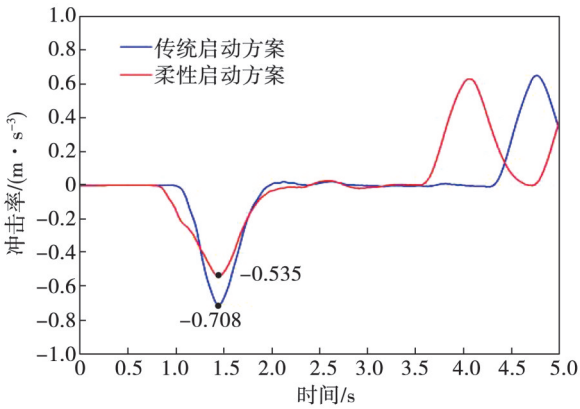


图7 启动冲击测试数据

Fig. 7 Testing data of starting jerk

当车辆在坡度为 23‰ 的坡道上以 10% 牵引级位启动时, 现场车辆测试数据如图 8 所示, 其最大后溜距离约为 11 cm, 最大后溜速度约为 0.5 km/h; 当车辆在坡道为 37‰ 以 10% 牵引级位启动时, 现场车辆测试数据如图 9 所示, 其最大后溜距离约为 13 cm, 最大后溜速度约 0.7 km/h。

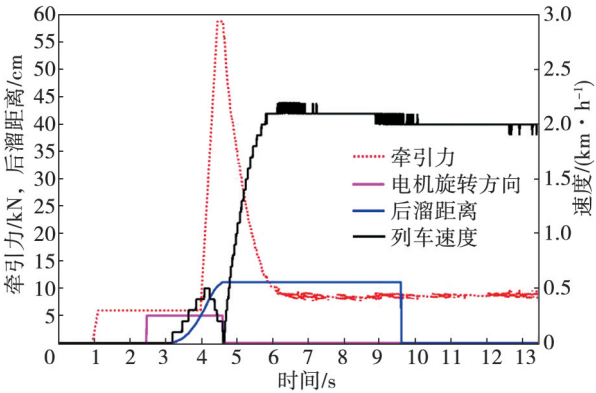


图8 23‰坡道启动测试数据

Fig. 8 Testing data of starting on 23‰ slope

整车试验结果表明, 采用新型柔性启动方案的车辆在不同坡道下均可正常启动, 并且当车辆在坡道上出现后溜状态时可主动解除车辆的后溜状态, 防止触发紧急制动, 极大地提高了车辆的安全性和可靠性。

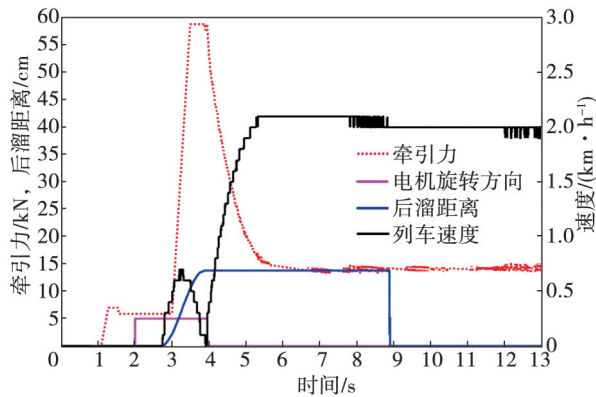


图9 37‰坡道启动测试数据

Fig. 9 Testing data of starting on 37‰ slope

5 结束语

本文通过深入分析地铁车辆启动过程中的动力学问题,设计了一个以增量PI控制器为核心的车辆启动控制系统,以实现在牵引系统接收到牵引指令时,开始缓解保持制动力,并取消保持制动缓解冲击限制的柔性启动方案。本研究利用MATLAB/Simulink软件,对地铁车辆在后溜阶段的速度、车辆牵引力和后溜距离进行仿真分析,并在实际线路上进行了实车测试对方案进行验证。测试结果表明,该启动方案不仅能够适应各种轨道条件,确保地铁车辆快速、平稳、安全地启动,而且该方案全面考虑了乘坐舒适性、安全性和成本效益,在未增加新传感器的基础上,仅利用现有设备就能实现永磁地铁车辆平滑、快速启动。鉴于该柔性启动方案在现场应用的优异性能,这一控制策略有望被扩展应用于异步电机驱动的地铁车辆、电动汽车等领域,具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 曾东亮. 地铁列车保持制动控制逻辑分析和运用[J]. 铁道机车车辆, 2020, 40(3): 111-115.
ZENG Dongliang. Control logistics analysis and application of metro train holding brake[J]. Railway locomotive & car, 2020, 40(3): 111-115.
- [2] 吴桂林, 彭驹, 肖华. 长沙地铁2号线车辆启动停车冲击优化设计[J]. 技术与市场, 2015, 22(5): 16-18.
WU Guilin, PENG Ju, XIAO Hua. Improvement design of start & stop jerk for Changsha metro line 2[J]. Technology and market, 2015, 22(5): 16-18.
- [3] 朱剑月, 朱良光, 周劲松, 等. 地铁车辆运行舒适度与平稳性评价[J]. 城市轨道交通研究, 2007, 10(6): 28-31.
ZHU Jianyue, ZHU Lianguang, ZHOU Jinsong, et al. Evaluation of riding comfort and stability index[J]. Urban mass transit, 2007, 10(6): 28-31.
- [4] 王超. 地铁车辆制动控制与纵向冲击[J]. 洛阳理工学院学报(自然科学版), 2015, 25(2): 56-58.
WANG Chao. Metro vehicle braking control and longitudinal impact[J]. Journal of Luoyang institute of science and technology(natural science edition), 2015, 25(2): 56-58.
- [5] 唐虎, 陈旭, 江腾, 等. 城市轨道交通列车保持制动的控制逻辑优化[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(7): 128-131.
TANG Hu, CHEN Xu, JIANG Teng, et al. Optimization of brake holding control logic for urban rail transit train[J]. Urban mass transit, 2023, 26(7): 128-131.
- [6] 高国飞, 杨运泽, 闫亚娜, 等. 我国城市轨道交通运营线路旅行速度和速度效率分析[J]. 都市快轨交通, 2024, 37(4): 38-45.
GAO Guofei, YANG Yunze, YAN Yana, et al. Travel speed and speed efficiency of existing urban rail transit lines in China[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(4): 38-45.
- [7] 孙林祥. 地铁运行发车间隔和旅行速度指标下降的分析[J]. 都市快轨交通, 2007, 20(2): 6-9.
SUN Linxiang. Analyses for the indices decline of departure intervals and travel speeds in metro operation[J]. Urban rapid rail transit, 2007, 20(2): 6-9.
- [8] 邓连波, 曾强, 高伟, 等. 基于弹性需求的城市轨道交通列车开行方案研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(12): 16-25.
DENG Lianbo, ZENG Qiang, GAO Wei, et al. Research on train plan of urban rail transit with elastic demand[J]. Journal of the China railway society, 2012, 34(12): 16-25.
- [9] 王旭鹏, 李锋亮. 一种防止列车无牵引动力后溜动的自动防溜器: CN202122800107.2[P]. 2021-11-16.
WANG Xupeng, LI Fengliang. An automatic anti-slipping device to prevent trains from sliding backwards when traction power is lost: CN202122800107.2[P]. 2021-11-16.
- [10] 肖伟华. 地铁列车后溜检测和保护方案[J]. 数字化用户, 2017, 23(34): 263-264.
XIAO Weihua. Detection and protection scheme for subway train sliding backward[J]. Digitization user, 2017, 23(34): 263-264.
- [11] 石红国, 彭其渊, 郭寒英. 城市轨道交通牵引计算算法[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(3): 30-33.
SHI Hongguo, PENG Qiyuan, GUO Hanying. Traction calculation of urban mass transit[J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2004, 4(3): 30-33.
- [12] 程曙, 林伟琴. 地铁牵引仿真分析[J]. 城市轨道交通研究, 2002, 5(1): 53-56.
CHENG Shu, LIN Weiqin. Analysis on computer simulation of metro traction[J]. Urban mass transit, 2002, 5(1): 53-56.
- [13] 刘雄. 系列化中国标准地铁列车牵引系统设计[J]. 机车电传动, 2022(2): 55-66.
LIU Xiong. Design of traction system for serialized China standard metro train[J]. Electric drive for locomotives, 2022 (2): 55-66.
- [14] 北京市规划委员会. 地铁设计规范: GB 50157—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Beijing Municipal Commission of Urban Planning. Code for

design of metro: GB 50157—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.

[15] 钟建, 徐绍龙, 甘韦韦. 一种车辆后溜防护方法及相关装置: CN202110667660.5[P]. 2021-06-16.

ZHONG Jian, XU Shaolong, GAN Weiwei. A method and related device for vehicle backsliding protection: CN202110667660.5[P]. 2021-06-16.

[16] 杨剑. 轨道交通信号系统溜车防护功能的应用设计研究[J]. 轨道交通, 2022(3): 26-29.

YANG Jian. Research on the application design of rolling car protection function in rail transit signal system[J]. Rail transit, 2022(3): 26-29.

[17] 邹旭. 旋转变压器信号处理与设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.

ZOU Xu. The solution for obtaining resolver angular position and speed[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.

[18] 崔海峰, 刘昭度, 王国业, 等. 基于扭矩传感器的汽车坡道起步辅助系统[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(10): 1191-1193.

CUI Haifeng, LIU Zhaodu, WANG Guoye, et al. Hill-start assist control system based on torque sensor for car[J]. Chinese journal of scientific instrument, 2006, 27(10): 1191-1193.

[19] 崔海峰, 刘昭度, 吴利军, 等. 基于ABS/ASR集成控制系统的汽车坡道起步辅助装置[J]. 农机化研究, 2006(8): 193-195.

CUI Haifeng, LIU Zhaodu, WU Lijun, et al. Hill-start assist system based on integrated control system of ABS/ASR for car[J]. Journal of agricultural mechanization research, 2006(8): 193-195.

Research and application of flexible starting method for metro trains
with permanent magnet motors based on PI control

LIU Zhicheng¹, CHEN Xijun¹, HE Ye¹, HU Hui²

(1. Guangzhou Metro Group Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000, China;
2. Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: To further improve the performance and capacity of metro systems and ensure fast and smooth train starting, typically characterized by shortened starting durations and reduced jerks during starting, this paper proposes a flexible starting method for metro trains fitted with permanent magnet motors, based on a dynamic analysis of the train starting process. This solution focuses on optimizing cooperation among various subsystems during the starting process. As a result, it facilitates flexible starting for trains that effectively maintains and releases braking, while ensuring the effective implementation of traction instructions. To address train rollback protection and control, an incremental proportional-integral (PI) algorithm was introduced, by establishing an active rollback prevention and control system model specifically for the train starting process, this approach enhanced the robustness of train starting on inclined track sections. Performance simulations and real-world testing with complete metro trains have been conducted to verify the proposed flexible starting method on the entire line. Both simulation and testing results indicate the adaptability of this solution to various track conditions and its effectiveness in achieving smooth and rapid starting of metro trains powered by permanent magnet motors, without requiring modifications to existing equipment.

Keywords: starting control; permanent magnet motor; metro train; proportional-integral (IP) control; flexible starting