DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.06.012　　文章编号：1000-128X(2023)06-0099-07

基于牵引制动特性的地铁车辆启动策略优化研究

吴云飞，陆远基，牟　蓉，王　龙，刘　雄
（株洲中车时代电气股份有限公司，湖南 株洲　412001）

摘　要：地铁车辆启动控制策略需确保车辆在全线路启动不发生后溜，并且启动冲击在满足不大于0.75 m/s^{3}基础上尽可能小，启动时长尽可能短。文章基于现有整车牵引力达到一定阈值后需发送保持制动缓解指令的控制策略，根据车辆牵引制动特性参数提出了当牵引级位达到一定阈值时发送保持制动缓解指令的优化控制策略，通过建立车辆启动加速度模型与后溜时刻车辆受力模型求解发送保持制动缓解指令时刻的级位值。理论分析与现场测试结果表明，在满足车辆全线路启动不后溜的前提下，文章提出的优化策略使得车辆启动冲击明显降低，启动效率明显提升。该优化方案可为地铁车辆启动控制策略提供参考，根据不同的牵引制动特性可求解出不同的保持制动缓解指令发送时的级位阈值。

关键词：地铁车辆；启动控制；牵引制动特性；优化；保持制动缓解
中图分类号：U231　　**文献标识码：**A

A study on optimization of starting strategy for metro trains based on traction and braking characteristics

WU Yunfei, LU Yuanji, MOU Rong, WANG Long, LIU Xiong

(Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: It is necessary for the starting control strategy of metro trains to ensure that there will be no backward sliding when the train starts in the whole line, and that the starting impact is as small as possible and shall be not more than 0.75 m/s^3, and the starting time is as short as possible. Based on the existing control strategy that a train braking mitigation command should be sent when the train traction reaches a certain threshold, an optimized control strategy for sending such command was proposed when the traction reached a certain threshold according to the train traction brake characteristic parameters and worked out the level value when the train braking mitigation command was sent by creating the starting acceleration model and the force model of the train at the time of backward sliding. The theoretical analysis and site test show that the optimized strategy proposed herein can significantly reduce the vehicle starting impact and improve the starting efficiency under the premise that the train will not slide backward when it starts in the whole line. This optimized strategy can be used as a reference for the starting control strategy of metro trains. According to the different traction brake characteristics, different level thresholds for the sending of holding brake mitigation command can be worked out.

Keywords: metro trains; starting control; traction brake characteristics; optimization; brake mitigation

0　引言

地铁车辆作为城市公共交通工具，其运行安全性与乘坐舒适性一直以来都是车辆设计的两大重要评价指标[1-3]。车辆在启动过程中需满足在最大坡道启动不溜车，启动冲击在满足不大于0.75 m/s^{3}的基础上尽可能小，启动时间尽可能短[4-6]。车辆的启动同时涉及运

通信作者：吴云飞（1992—），男，硕士，主要从事城市轨道交通牵引辅助变流系统设计工作；E-mail: 15151810914@163.com
引用格式：吴云飞, 陆远基, 牟蓉, 等. 基于牵引制动特性的地铁车辆启动策略优化研究[J]. 机车电传动, 2023(6): 99-105.
Citation：WU Yunfei, LU Yuanji, MOU Rong, et al. A study on optimization of starting strategy for metro trains based on traction and braking characteristics[J]. Electric drive for locomotives,2023(6): 99-105.

行安全性与乘坐舒适性，其控制策略是车辆设计的重点。

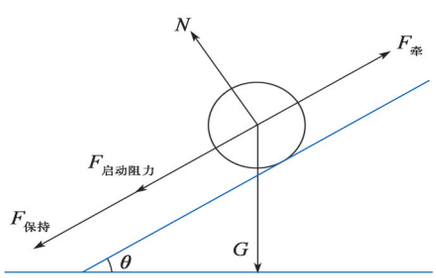
目前，地铁车辆常见的启动控制策略是车辆控制单元通过车载网络发送牵引指令与级位信息到牵引控制单元，牵引控制单元根据牵引指令与级位控制牵引变流器输出三相变压、变频交流电驱动牵引电机。当车辆控制单元检测到整车牵引力达到一定阈值时，通过车载网络给制动系统发送保持制动缓解指令，实现保持制动的缓解[7-9]。该启动策略在列车实际牵引力达到一定水平后发送保持制动缓解指令，确保列车处于最大坡道启动时不会发生溜车风险[10-11]。由于从发出保持制动缓解指令到列车保持制动缓解动车需要一定时间[12-13]，在该时间段内牵引力随着级位的上升一直上升。随着保持制动力减小，当列车启动时较大的水平牵引力快速释放，容易造成启动瞬时冲击过大，影响乘坐舒适性。

基于目前地铁车辆启动控制策略，本文根据网络系统级位传递延时、牵引励磁时间、牵引力上升速率、保持制动机械延时、保持制动缓解速率等车辆特性参数制定了一种优化的车辆启动控制策略，在保证车辆在最大坡道启动不溜车的同时，降低列车启动冲击，提高列车启动效率。

1 车辆启动分析

1.1 车辆启动受力分析

将运行的地铁车辆等效为1个单质点[14]，地铁车辆启动时车辆受力如图1所示，列车牵引力、保持制动力与启动阻力是沿钢轨方向作用于列车的3个基本力。



$F_{牵}$— 列车牵引力；$F_{保持}$— 列车保持制动力；$F_{启动阻力}$— 列车启动阻力；G—列车重力；N—轨道对列车的支撑力；θ—轨道坡度。

图1 列车单质点受力模型

Fig. 1 Single particle force model of train

地铁车辆启动加速度为

$$a_{启动}=\frac{F_{牵}-F_{保持}-F_{启动阻力}-G\cdot\sin\theta}{M_{换算}} \tag{1}$$

式中：$a_{启动}$为地铁车辆启动加速度；$M_{换算}$为地铁车辆换算质量，为车辆当前整备质量与旋转质量之和。

地铁车辆在平直道启动时牵引力与保持制动力方向相反，而在上坡启动时，在启动初期保持制动力与地铁车辆牵引力方向相同，二者共同作用确保地铁车辆不会出现后溜；随着牵引力逐渐增大，保持制动力开始逐渐减小，并变为与牵引方向反向，当按式(1)使得地铁车辆启动加速度大于最小启动加速度0.083 3 m/s²[15]时，地铁车辆完成启动。

启动冲击可采用启动加速度的变化率（简称“启动冲击率”）量化，地铁车辆的启动冲击率为

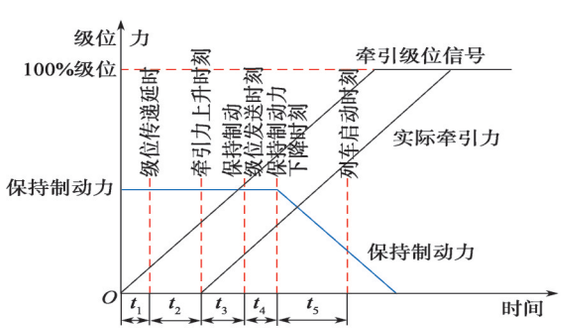
$$J=\frac{\mathrm{d}\left(\left(F_{牵}-F_{保持}-F_{启动阻力}-G\cdot\sin\theta\right)/M_{换算}\right)}{\mathrm{d}t} \tag{2}$$

式中：J为列车启动冲击率。

通过分析式(1)和式(2)可知，列车启动冲击大小、上坡启动是否会产生后溜与牵引力、保持制动力大小以及其变化率等有关。

1.2 车辆启动时序分析

地铁车辆在启动过程中牵引控制单元接收到车辆控制单元通过网络系统发送的牵引指令与级位信息，控制牵引变流器输出三相变压变频交流电，驱动牵引电机产生转矩，通过齿轮箱将牵引力传递到车辆轮对，同时车辆控制单元在接收到牵引力达到一定水平后，给车载空气制动系统发送保持制动缓解指令，制动系统收到指令后缓解保持制动。当车辆纵向合力使得列车加速度大于0.083 3 m/s²时，地铁车辆完成启动。地铁车辆的启动时序图如图2所示。



t_1—级位传递延时，表示车辆发出牵引级位，经历t_1延时后级位信息传递到牵引控制单元；t_2—牵引励磁延时时间，表示经历t_2励磁延时后牵引力开始上升；t_3—保持制动缓解指令发送时间，表示经历时间t_3后牵引力上升到保持制动缓解指令发送阈值，车辆控制单元给制动系统发送保持制动缓解指令；t_4—空气制动机械延时，经历时间t_4后保持制动力开始下降；t_5—地铁车辆启动时间，表示从保持制动力开始下降，经历时间t_5后地铁车辆完成启动。

图2 列车启动时序图

Fig. 2 Train starting time sequence diagram

需要说明的是，$t_1\sim t_4$为车辆特性参数，t_5与目前所处坡道、载荷等有关。

从车辆发出级位到车辆控制单元发出保持制动缓解指令所需的时间为

$$t_{缓解}=t_1+t_2+t_3 \tag{3}$$

列车完成启动的总用时为

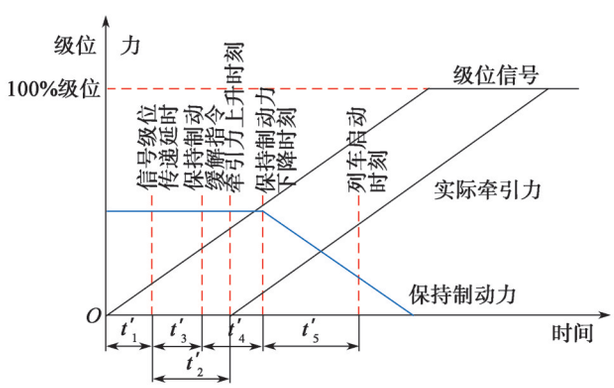
$$t_{启动}=t_1+t_2+t_3+t_4+t_5 \tag{4}$$

2　车辆启动策略优化研究

基于目前地铁车辆启动策略，本文研究在确保车辆在线路最大上坡启动不发生溜车的同时，降低启动冲击且缩短启动时间的控制策略。通过式(2)可知，降低牵引力和保持制动力的变化率可降低冲击率。由于地铁车辆启动时牵引力已经达到一定水平，启动瞬间随着牵引力的快速释放，会导致列车产生瞬时冲击，因此降低启动时刻牵引力值能起到降低启动冲击的作用。减小保持制动缓解速率，防止车辆启动时牵引力的快速释放，同样具备降低启动冲击的作用，但延长保持制动缓解时间，会影响车辆启动效率。分析式(3)和式(4)可知，车辆启动时长与级位传递延时、牵引励磁延时等有关，缩短相关时间才能缩短车辆启动时间，提升启动效率。

2.1　车辆启动优化策略分析

对比现有的车辆启动策略，本文提出一种基于车辆特性参数（级位传递延时、牵引励磁时间、牵引力的上升速率、制动机械延时、保持制动力下降速率等）的启动优化策略。以最大坡道启动情况为临界条件，确定当牵引级位达到一定值，车辆控制单元即可发送保持制动缓解指令，实现列车在最大坡道启动不溜车的前提下，降低列车启动冲击，缩短车辆启动时间。优化策略的启动时序如图3所示。



t'_1—级位传递延时，表示车辆发出牵引级位，经历t'_1延时后级位信息传递到牵引控制单元；t'_2—牵引励磁延时时间，表示经历t'_2励磁延时后牵引力开始上升；t'_3—保持制动缓解指令发送时间，表示经历时间t'_3后牵引级位上升到保持制动缓解指令发送阈值，车辆控制单元给制动系统发送保持制动缓解指令；t'_4—空气制动机械延时，表示经历t'_4延时后保持制动力开始下降；t'_5—地铁车辆启动时间，表示从保持制动力开始下降，经历时间t'_5后地铁车辆完成启动。

图3　优化策略启动时序

Fig. 3　Starting time sequence of optimized strategy

如前文所述，$t'_1 \sim t'_4$为车辆特性参数，t'_5与目前所处坡道、载荷等有关。

采用优化策略后，从车辆发出级位信息到车辆控制单元发出保持制动缓解指令时间为

$$t'_{缓解}=t'_1+t'_3 \tag{5}$$

列车完成启动的总用时为

$$t'_{启动}=t'_1+t'_3+t'_4+t'_5 \tag{6}$$

图2与图3中的级位信息传递延时、牵引励磁时间、空气制动机械延时、牵引力上升斜率、保持制动力下降斜率等与车辆特性有关，优化前后保持一致。采用优化策略后，列车启动时刻的牵引力为

$$F_{牵引}=\left(t'_3+t'_4+t'_5-t'_2\right)\left[\left(\frac{F_{牵引\,max}}{0.75M_{换算}}\right)^{-1}\cdot F_{牵引\,max}\right] \tag{7}$$

式中：$F_{牵引\,max}$为当前载荷下列车100%级位下的牵引力，与车辆载荷成正比。

列车启动时刻的保持制动力为

$$F_{保持}=F_{制动\,max}\left(P_{保持}-\frac{t'_5\times 0.75M_{换算}}{F_{制动\,max}}\right) \tag{8}$$

式中：$P_{保持}$为保持制动力级位。

联立式(1)、式(7)和式(8)可知，优化后的启动加速度为

$$a_{启动}=\frac{\left(t'_3+t'_4+t'_5-t'_2\right)\left(F_{牵引\,max}\Big/\left(0.75M_{换算}\right)\right)^{-1}F_{牵引\,max}}{M_{换算}}-\frac{F_{制动\,max}}{M_{换算}}\times\left(P_{保持}-\frac{t'_5F_{制动\,max}}{0.75M_{换算}}\right)-\frac{M_{换算}g\theta}{M_{换算}}-\frac{F_{启动阻力}}{M_{换算}} \tag{9}$$

同时，为保证列车在坡道启动不发生溜车，启动全过程还需满足下式

$$F_{牵引}+F_{保持}+F_{启动阻力}\geqslant M_{换算}g\sin\theta \tag{10}$$

当牵引力小于坡道下滑力时，列车有后溜趋势，牵引力与保持制动力、列车启动阻力方向相同。车辆发生溜车的临界点是列车牵引力、列车保持制动力和列车启动阻力之和等于列车坡道下滑力。

取地铁车辆在AW3工况位于35‰坡道处于后溜临界点时的车辆启动加速度为0，联立式(9)和式(10)可得出t'_3和t'_5临界值。临界保持制动缓解级位为

$$P_{缓解}=t'_{缓解}\Big/\left(\frac{F_{牵引\,max\,AW3}}{0.75M_{换算\,AW3}}\right)=\left(t'_1+t'_3\right)\Big/\left(\frac{F_{牵引\,max\,AW3}}{0.75M_{换算\,AW3}}\right) \tag{11}$$

式中：$F_{牵引\,max\,AW3}$为AW3载荷下列车100%级位下的牵引力；$M_{换算\,AW3}$为AW3载荷下列车100%级位时的换算质量。

计算出级位后，考虑地铁车辆启动加速度需大于0.083 3 m/s^2，并保留一定安全裕量，可估算出地铁车辆发送保持制动缓解时的级位；缓解级位值确定后，即可确定t'_3；根据式(9)，得到t'_5；再根据式(6)，得到列车启动总时长。

2.2　案例分析

以国内某开通运营的地铁线路车辆作为研究对象，该线路地铁车辆采用中国标准地铁B型车，列车编组

为 4 动 2 拖，最高运行速度为 80 km/h，平均旅行速度不小于 35.2 km/h，列车纵向冲击率不大于 0.75 m/s^3，最大坡道 35‰，AW0 工况下的地铁车辆换算质量为 219.1 t，AW3 工况下的地铁车辆换算质量为 345.1 t，加速度满足 AW2 载荷及以下工况：车辆从 0 加速到 40 km/h，其加速度不小于 0.95 m/s^2；列车从 0 加速到 80 km/h，其加速度不小于 0.60 m/s^2。以 AW0 工况平直道启动与 AW3 工况最大坡道启动情况为例进行分析，其他工况的牵引力、制动力和列车启动力等与载荷成比例，启动情况基本一致。根据车辆特性参数，根据式(11)取发送保持制动指令时的牵引级位为 40%。

2.2.1 AW0 工况平直道启动分析

原保持制动缓解逻辑的启动过程为：当整车牵引力达到 60 kN 后，车辆控制单元给制动系统发送保持制动缓解指令，牵引级位传递延迟时间为 0.10 s，电机定子励磁时间为 0.80 s，即级位发送 0.90 s 后牵引力以冲击率 0.75 m/s^3 上升，级位信息发出约 1.27 s 后整车牵引力上升至 60 kN，车辆控制单元发送保持制动缓解指令，机械延时 0.40 s 后保持制动力开始以冲击率 0.75 m/s^3 下降，保持制动力为当前载荷最大常用制动力的 50%，即 110 kN；当历时 0.05 s 之后，牵引力上升至 133 kN，保持制动力下降至 103 kN，考虑到列车 AW0 启动阻力为 9.90 kN，列车以加速度 0.083 3 m/s^2 启动。此时，距离车辆发送牵引力级位指令时间为 1.72 s，整车牵引力为 133 kN。

优化保持制动缓解逻辑的启动过程为：当牵引级位达到 40% 级位后，车辆控制单元给制动系统发送保持制动缓解指令，牵引力开始上升的时间与未优化前的上升时间保持一致，为 0.90 s，从牵引级位发出到牵引级位达到 40% 的时间约为 0.51 s，此时车辆控制单元发送保持制动缓解指令，历时 0.91 s 后保持制动开始缓解，此时实际牵引力为 1.6 kN，0.41 s 后牵引力上升至 69 kN，保持制动力下降至 41 kN，列车以加速度 0.083 3 m/s^2 启动。此时，距离车辆发送牵引力级位指令时间为 1.32 s，整车牵引力为 69 kN。

在 AW0 工况下，相比于平直道未优化逻辑的列车启动时间，平直道优化逻辑的列车启动时间提前了 0.40 s，启动时的牵引力降低了 64 kN，这既提升了启动效率，又降低了启动冲击。

2.2.2 AW3 工况 35‰ 坡道启动分析

考虑 AW3 工况，在线路最大上坡 35‰ 坡道启动，坡道阻力为 112 kN，启动阻力为 16.9 kN。

原保持制动缓解逻辑的启动过程为：当整车牵引力达到 60 kN 后，车辆控制单元给制动系统发送保持制动缓解指令，牵引级位信号延迟时间为 0.10 s，电机定子励磁时间为 0.80 s，即信号发送级位 0.90 s 后牵引力以冲击率 0.75 m/s^3 上升，级位发送 1.13 s 左右后整车牵引力上升至 60 kN，车辆控制单元发送保持制动缓解指令，机械延时 0.40 s 后保持制动力开始以冲击率 0.75 m/s^3 下降，保持制动力为最大常用制动力的 50%，即 180 kN；当历时 0.33 s 之后，牵引力上升至 241 kN，保持制动力下降至 95 kN，考虑到列车 AW3 启动阻力、坡道阻力，列车以加速度 0.083 3 m/s^2 启动。此时，距离信号系统发送牵引力级位指令时间为 1.86 s，整车牵引力为 241 kN。

优化保持制动缓解逻辑的启动过程为：当牵引级位达到 40% 级位后，车辆控制单元给制动系统发送保持制动缓解指令，牵引力开始上升的时间与未优化前的上升时间原值保持一致，为 0.90 s，ATO 模式信号级位发出，到信号级位达到 40%，时间约为 0.51 s，此时发送保持制动缓解指令，历时 0.40 s 后保持制动开始缓解，此时实际牵引力为 2.5 kN，0.26 s 后保持制动力下降至 112 kN，此时列车有后溜趋势，保持制动力阻止列车后溜，0.16 s 后牵引力上升至 112 kN，此时牵引力与坡道下滑力相等，保持制动力带来的阻力在此刻与牵引力反向，0.23 s 以后牵引力上升至 172 kN，保持制动力降至 12 kN，考虑到列车 AW3 工况的启动阻力和坡道阻力，列车以加速度 0.083 3 m/s^2 启动。此时，距离牵引级位发送时间为 1.56 s，整车牵引力为 172 kN。

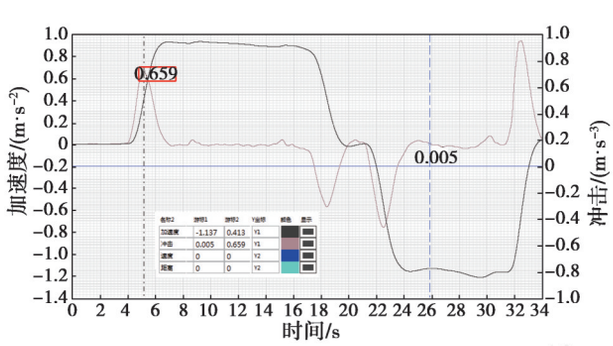
在保证 35‰ 最大坡道启动全过程不发生后溜的基本条件下，相比于坡道未优化逻辑的列车启动时间，坡道启动优化逻辑的列车启动时间提前了 0.30 s，启动时的牵引力降低了 69 kN，提升了启动效率，降低了启动冲击。

3 工程化测试验证

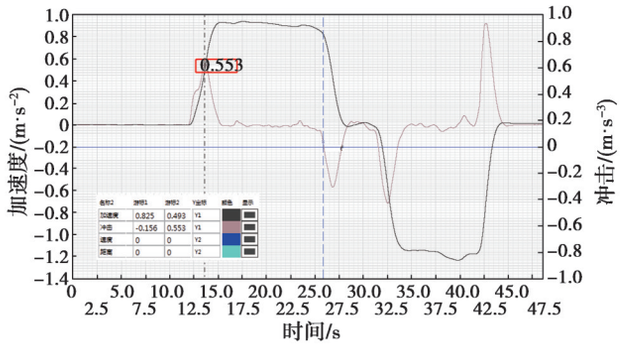
3.1 测试验证

在 AW0 工况下，地铁车辆采用 ATO 运行模式，测试启动策略优化前后车辆瞬时启动冲击，选取正线反馈冲击较大的站点进行对比测试，测试结果如图 4~图 6 所示。

由图 4~图 6 的启动冲击测试数据可知，优化前在站点 1~站点 3 的最大瞬时启动冲击率分别为 0.659 m/s^3、0.708 m/s^3 和 0.708 m/s^3，采用优化策略后测得的瞬时启动冲击为 0.553 m/s^3、0.494 m/s^3 和 0.537 m/s^3，这表明



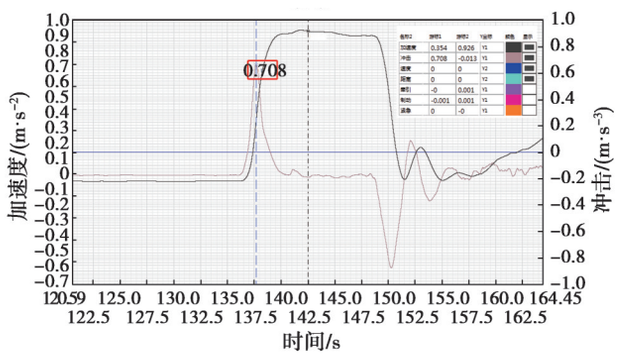
(a) 既有策略启动冲击测试曲线



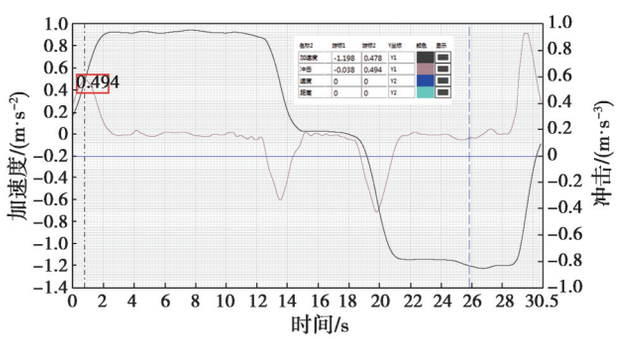
(b) 优化策略启动冲击测试曲线

图 4　站点 1 启动冲击测试曲线

Fig. 4　Starting impact test curve at station 1



(a) 既有策略启动冲击测试曲线



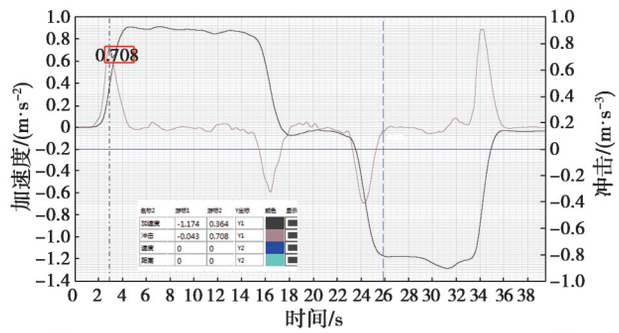
(b) 优化策略启动冲击测试曲线

图 5　站点 2 启动冲击测试曲线

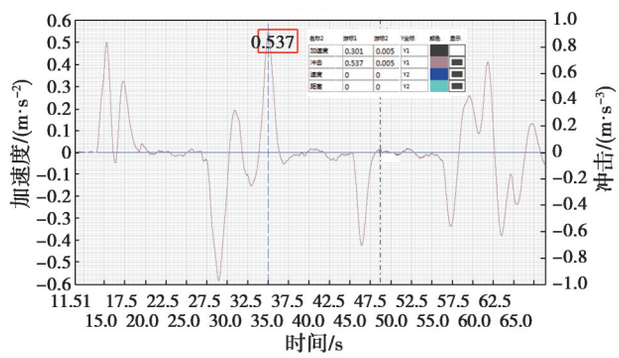
Fig. 5　Starting impact test curve at station 2

采用优化策略后可有效降低列车启动冲击。

选取站点 1 优化前后的各项启动数据进行对比分析，各项启动数据曲线图如图 7 所示。由图 7(a)可知，采用既有启动控制策略，从地铁车辆控制单元将级位发给牵引控制单元开始（以此时间开始计时），牵引系统接收到级位信息后 0.85 s 左右牵引力开始上升，在 1.25 s 左右网络系统发送保持制动缓解指令，在 1.75 s 左右列车完成启动。由图 7(b)可知，采用优化的启动控制策略，从网络系统将级位转发给牵引控制单元开始（以此时间开始计时），牵引系统接收到级位信息后 0.80 s 左右牵引力开始上升，在 0.65 s 左右网络系统发送保持制动缓解指令，在 1.35 s 左右列车完成启动。根据测试结果可知，保持制动缓解指令发送时间以车辆



(a) 既有策略启动冲击测试曲线

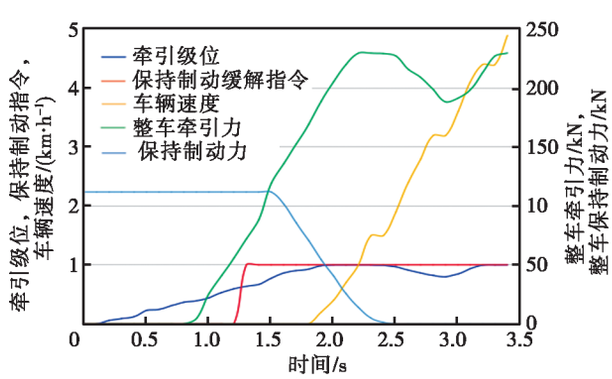


(b) 优化策略启动冲击测试曲线

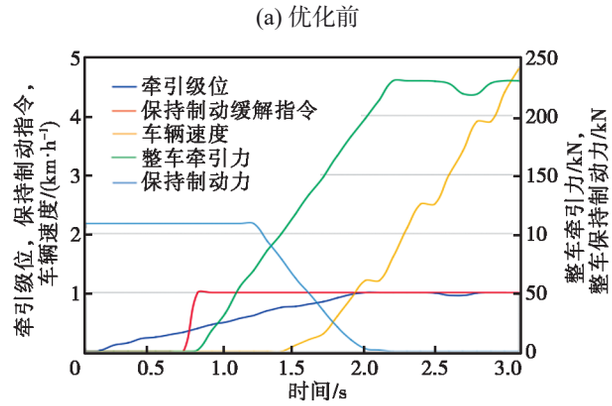
图 6　站点 3 启动冲击测试曲线

Fig. 6　Starting impact test curve at station 3

启动时间与前文提及的 AW0 工况的理论分析基本一致，采用优化的启动策略预计可节约启动时间 0.40 s 左右，优化率约为 23%。



(a) 优化前



(b) 优化后

图 7　车辆启动数据曲线

Fig. 7　Vehicle starting data curve

3.2 工程化应用

测试结果验证了优化的启动控制策略可有效降低启动瞬时冲击，同时缩短启动时间。在工程化应用中，当车辆启动级位未达到保持制动缓解级位或当任一牵引控制单元存在故障时，则车辆按既有的控制策略（整车牵引力达到60 kN时缓解保持制动）执行。实际工程应用车辆启动控制流程如图8所示。

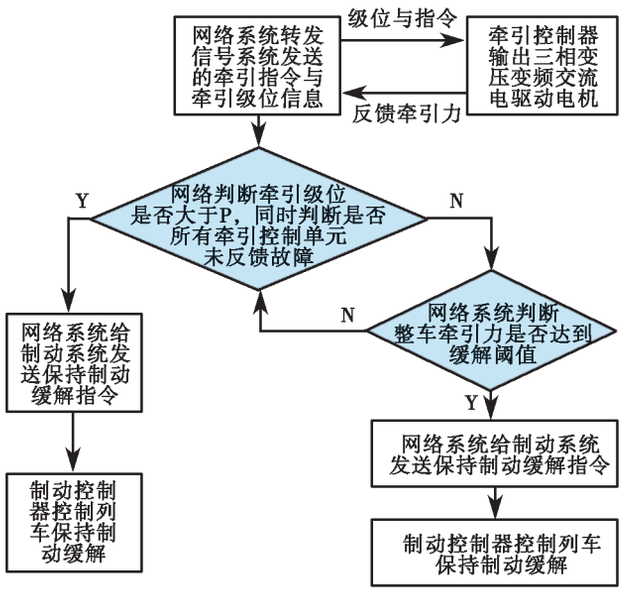


图8 车辆启动控制流程图

Fig. 8 Flow chart of vehicle starting control

采用图8所示的控制策略，在本文研究的地铁线路进行全线路试运行测试与载客运营，结果表明全线路运营不会造成车辆后溜，车辆启动冲击有所改善，启动更加平顺。

4 结论

本文根据地铁车辆牵引制动特性参数提出了一种优化的启动策略，在确保最大坡道启动不溜车的前提下启动冲击与启动时长均得到了优化，主要结论如下：

①研究表明：在AW0工况条件下，当地铁车辆在平直道启动时，采用优化策略启动时刻的牵引力比采用既有策略启动时刻的牵引力降低64 kN，启动时间缩短0.40 s；在AW3工况条件下，当地铁车辆在35‰坡道启动时，采用优化策略启动时刻的牵引力比采用既有策略启动时刻的牵引力降低69 kN，启动时间缩短0.30 s。

②AW0工况正线测试表明，在冲击较大的3站进行ATO启动测试，优化前最大瞬时启动冲击率分别为0.659 m/s^3、0.708 m/s^{3}和0.708 m/s^3，而优化后测得的瞬时启动冲击率为0.553 m/s^3、0.494 m/s^{3}和0.537 m/s^3，瞬时最大冲击明显降低；优化前启动时间为1.75 s，优化后启动时间为1.35 s，启动效率提升约23%。

③工程化应用结果表明采用优化策略后，全线路运营不会造成车辆后溜，车辆启动冲击有所改善，启动更加平顺。

本文的研究成果可为地铁车辆启动控制策略的优化提供参考。需要说明的是，由于本文是在已开通运营项目进行测试，对AW3工况线路最大坡道启动的研究只是进行了理论计算，无法在现场开展AW3工况测试，因此后续科研工作将进一步完善对AW3工况实际启动情况进行分析与测试。

参考文献：

[1] 程相勋, 赵慧阳, 关琼浩. 郑州地铁4号线车辆启动原理分析与冲击优化[J]. 铁道车辆, 2022, 60(6): 30-32.
CHENG Xiangxun, ZHAO Huiyang, GUAN Qionghao. Start-up principle analysis and impact optimization of Zhengzhou metro line 4 vehicles[J]. Rolling stock, 2022, 60(6): 30-32.

[2] 张娟, 白春光. 地铁列车ATO模式下启动时的冲动分析及改进[J]. 电力机车与城轨车辆, 2021, 44(3): 68-71.
ZHANG Juan, BAI Chunguang. Impulse analysis and improvement of metro train starting in ATO mode[J]. Electric locomotives & mass transit vehicles, 2021, 44(3): 68-71.

[3] 孙睿, 胡贤令, 王家钜, 等. 无锡地铁1号线南延线车辆启动冲动原因分析及解决措施[J]. 电力机车与城轨车辆, 2021, 44(1): 99-102.
SUN Rui, HU Xianling, WANG Jiaju, et al. Cause analysis and solutions of driving impulse for Wuxi metro line 1 south extension line vehicles[J]. Electric locomotives & mass transit vehicles, 2021, 44(1): 99-102.

[4] 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.

[5] 张小军, 胡方阳. 城轨车辆制动远程缓解功能运用探讨与分析[J]. 机车电传动, 2017(5): 98-100.
ZHANG Xiaojun, HU Fangyang. Discussion and analysis on function of remote release for the brake of urban rail vehicle[J]. Electric drive for locomotives, 2017(5): 98-100.

[6] 李如石, 任富争, 刘超. 某地铁列车ATO模式启动冲击超限故障分析与解决[J]. 铁道机车车辆, 2019, 39(4): 128-130.
LI Rushi, REN Fuzheng, LIU Chao. Analysis and solution of a ATO sunway train starting overshoot fault[J]. Railway locomotive & car, 2019, 39(4): 128-130.

[7] 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.

[8] 付建鹏, 丁锋, 曲玉涛. 金州不锈钢车辆保持制动逻辑讨

论[C]//中国智能交通协会 . 第六届中国智能交通年会暨第七届国际节能与新能源汽车创新发展论坛优秀论文集 (上册)——智能交通 . 北京: 科学技术文献出版社, 2011: 277-284.
FU Jianpeng, DING Feng, QU Yutao. Discussion on Jinzhou stainless steel vehicle holding braking logic[C]//China Intelligent Transportation Association. The Sixth China Intelligent Transportation Annual Conference and the Seventh International Energy Saving and New Energy Vehicle Innovation and Development Forum Outstanding Proceedings (Volume 1)：Intelligent Transportation. Beijing: Scientific and Technical Documentation Press, 2011: 277-284.

[9] 王华伟, 刘国梁 . 基于列车控制与管理系统的车辆制动力管理方案设计[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(2): 89-93.
WANG Huawei, LIU Guoliang. Design of braking force management scheme for urban rail transit vehicle based on TCMS[J]. Urban mass transit, 2019, 22(2): 89-93.

[10] 赵寅皓 . 某项目地铁车辆保持制动缓解控制改进探讨[J]. 技术与市场, 2018, 25(8): 61-62.
ZHAO Yinhao. Discussion on improvement of holding brake relief control for subway vehicles in a project[J]. Technology and market, 2018, 25(8): 61-62.

[11] 付建鹏, 田树坤, 项宇航, 等 . 地铁列车 2 种不同的制动力管理及电 - 空配合方案分析[J]. 铁道车辆, 2020, 58(10): 29-32.
FU Jianpeng, TIAN Shukun, XIANG Yuhang, et al. Analysis of management of 2 different braking forces and electro-pneumatic coordination scheme for metro trains[J]. Rolling stock, 2020, 58(10): 29-32.

[12] 李如石, 任富争, 宋君君 . 城市轨道车辆电制动管理方案对比分析[J]. 机车电传动, 2019(6): 110-114.
LI Rushi, REN Fuzheng, SONG Junjun. Comparison and analysis of electric brake management scheme for urban rail vehicles[J]. Electric drive for locomotives, 2019(6): 110-114.

[13] 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.

[14] 孟繁辉, 高靖添, 王雯, 等 . 标准地铁列车供风制动系统平台搭建和简统[J]. 智慧轨道交通, 2022, 59(6): 16-21.
MENG Fanhui, GAO Jingtian, WANG Wen, et al. Platform construction and simplification of air supply and braking system for standard metro train[J]. Smart rail transit, 2022, 59(6): 16-21.

[15] 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.

收稿日期：2023-06-26
修回日期：2023-08-04