

考虑冲击限制的地铁列车牵引计算算法

曲健伟^{1,2}

(1. 西南交通大学电气工程学院, 611756, 成都; 2. 南京恩瑞特实业有限公司, 211106, 南京//工程师)

摘要 地铁列车牵引计算往往沿用铁路列车的牵引计算方法, 忽略了地铁车辆对控制加速度的“缓变式”处理过程, 给牵引计算的控制加速度、速度和运行时间计算带来偏差。给出了考虑冲击限制情况下, 地铁列车最大能力运行及节能运行时的牵引计算算法, 并采用实际列车和线路数据对算法进行了验证。计算结果表明, 考虑冲击限制的地铁列车牵引计算算法可以提高牵引计算中列车速度、加速度和时间的仿真精度, 使速度和加速度的仿真计算结果更符合地铁列车运行实际, 区间运行时间的计算精度可提高2%以上。

关键词 地铁列车; 牵引计算; 冲击限制

中图分类号 U260.13⁺1

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.05.014

Traction Calculation Algorithm of Metro Trains Considering Jerk Limitation

QU Jianwei

Abstract The traction calculation of metro trains is usually based on the method of railway train traction calculation, and the jerk limitation process of the control acceleration of metro trains is ignored, which brings deviation to the calculation of control acceleration, speed and running time. The traction calculation algorithms of flat-out run and energy-saving operation were given considering the jerk limitation of train, and the algorithm was verified by using the actual train and line data. The calculation results show that the traction calculation algorithm of metro trains considering jerk limitation can improve the simulation accuracy of train speed, acceleration and time in the traction calculation to get more realistic results, and the calculation accuracy of interval running time can be increased by more than 2%.

Key words metro trains; traction calculation; jerk limitation

Author's address School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, 611756, Chengdu, China

地铁列车牵引计算对列车运行过程进行仿真研究, 以解决地铁设计和运营方面的相关技术和经济问题^[1]。目前的地铁列车运行仿真大多基于传

统的铁路列车牵引计算方法^[1-5], 没有考虑地铁车辆自身对控制加速度的冲击限制约束, 给控制加速度、速度和运行时间计算带来偏差。在列车操纵示意图的自动计算中, 文献[6]考虑了列车运行状态迁移原则和运行状态保持原则, 但这种处理方式与地铁列车处理冲击限制的实际情况不相符, 并不适用于地铁列车牵引计算。

本文在既有地铁列车牵引计算模型及算法的基础上, 考虑地铁列车冲击限制约束, 构造考虑冲击限制的列车牵引计算算法。通过与无冲击限制的牵引计算结果对比, 证明在牵引计算中考虑冲击限制可提高对控制加速度、速度和时间的仿真精度。

1 地铁列车的冲击限制约束

地铁列车的控制加速度对时间的变化率称为车辆冲击率, 车辆对冲击率的约束称为冲击限制。冲击率影响列车运行的稳定性和舒适性, GB/T 7928—2003《地铁车辆通用技术条件》对列车的牵引和制动系统应满足的冲击限制做出了规定, 要求最大冲击率不能超过 1 m/s^3 ^[7]。而在实际的地铁项目车辆招标文件中, 对列车在牵引和制动(不包括紧急制动)的冲击限制要求为 0.75 m/s^3 ^[8]。当列车的牵引或制动系统接收到“阶跃式”的控制加速度指令时, 会根据车辆自身的冲击限制将该指令转换为“缓变式”^[9]。

令 J 表示地铁列车的冲击率, 列车施加的控制加速度为 a_c , t 为时间, 则冲击限制的最大冲击率 J_{\max} 可表示为:

$$J = \frac{da_c}{dt} \leq J_{\max} = 0.75 \text{ m/s}^3 \quad (1)$$

2 考虑冲击限制的最大能力运行计算

在进行最大能力运行的牵引计算时, 为确定制动的起始点, 需要先对制动过程进行制动反推计算, 得到制动曲线后, 再进行牵引正算, 使速度曲线

与限速或制动曲线相交,从而得到最大能力运行速度曲线^[3-4]。对于最大能力运行,列车运行工况包括最大牵引、恒速(牵引或制动)、最大制动3种。列车冲击率发生突变的位置一般位于运行工况发生转换的区域,如图1中制动反算速度段的A(最大制动转停车)、B(恒速转最大制动)区域,和牵引正算速度段的C(停车转最大牵引)、D(最大牵引转恒速)、E(最大牵引转最大制动)区域,需要在上述区域对控制加速度进行冲击限制处理。下文分析制动反算和牵引正算情况下考虑冲击限制的最大能力计算方法。

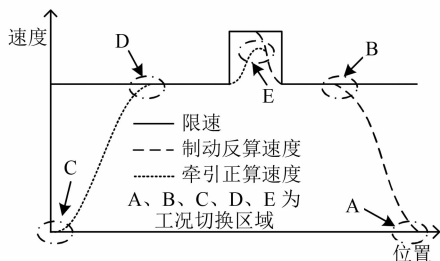


图1 最大能力运行牵引计算示意图

2.1 制动反算

制动反算示意图如图2所示。

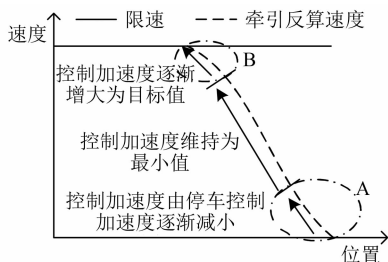


图2 制动反算示意图

在制动反算过程中,需要根据距离步长 Δs 、位置 i 的速度 v_i 、加速度 a_i 、控制加速度 $a_{c,i}$ 计算位置 $i-1$ 的 v_{i-1} 、 a_{i-1} 、 $a_{c,i-1}$,计算公式为:

$$\begin{cases} v_{i-1} = \sqrt{v_i^2 - 2a_i\Delta s} \\ \Delta t = (v_i - v_{i-1})/a_i \\ a_{c,i-1} = \begin{cases} a_{c,i} + J_{\max}\Delta t, & \text{当 } a_{c,i-1} \geq a_{c,i} \\ a_{c,i} - J_{\max}\Delta t, & \text{当 } a_{c,i-1} < a_{c,i} \end{cases} \\ a_{i-1} = a_{c,i-1} - d_{l,i-1} - d_b(v_{i-1}) \end{cases} \quad (2)$$

式中:

Δt ——位置 i 到位置 $i-1$ 的运行时间;

d_l ——线路阻力减速度;

d_b ——基本阻力减速度。

当 i 为运营停车点或低限速起点时(如图2中

A区域的制动反算起点),由于 i 位于恒速段,有 $a_i = 0$,因此式(2)中的第2个算式无法使用。为方便分析和计算,此时用 a_{i-1} 代替 a_i ,并用 $d_b(v_i)$ 代替式(2)第4个算式中的 $d_b(v_{i-1})$ 进行计算。

根据式(2),在进行制动反算时需要判断控制加速度的变化趋势。如图2所示,在制动反算过程中,控制加速度由停车时的初始值按冲击限制逐渐减小,直至达到最小控制加速度(即最大制动减速度),该阶段对应图1中的A区域;之后控制加速度维持为最小值。待反算进入B区域,控制加速度开始按冲击限制逐渐向位于限速段上的目标加速度过渡。由于列车最大常用制动能力可以保证在任何线路条件下停车,维持限速恒速需要的控制加速度必然大于最小控制加速度,故控制加速度在B区域的变化趋势是逐渐增大的。

为获得进入B区域的起点,需要在制动反算完成A区域的前几步计算后,在接下来的每一步制动反算过程中,都假设当前控制加速度将要开始向限速目标控制加速度变化,额外做一次制动反算试算,并根据试算结果判断当前试算起点是否为B区域的起点。若当前试算的控制加速度、加速度、速度曲线能与限速段的控制加速度、加速度、速度曲线相交,则从当前试算起点开始,进入控制加速度逐渐过渡的计算过程。

2.2 牵引正算

牵引反正算示意图如图3所示。

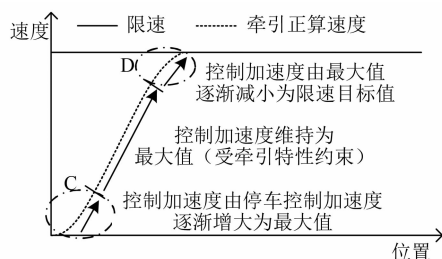


图3 牵引正算示意图

在牵引正算过程中,根据位置 i 的速度 v_i 、加速度 a_i 、控制加速度 $a_{c,i}$ 计算位置 $i-1$ 的 v_{i-1} 、 a_{i-1} 、 $a_{c,i-1}$ 。计算公式为:

$$\begin{cases} v_{i+1} = \sqrt{v_i^2 + 2a_i\Delta s} \\ \Delta t = (v_{i+1} - v_i)/a_i \\ a_{c,i+1} = \begin{cases} a_{c,i} + J_{\max}\Delta t, & \text{当 } a_{c,i+1} \geq a_{c,i} \\ a_{c,i} - J_{\max}\Delta t, & \text{当 } a_{c,i+1} < a_{c,i} \end{cases} \\ a_{i+1} = a_{c,i+1} - d_{l,i+1} - d_b(v_{i+1}) \end{cases} \quad (3)$$

当 i 为运营起点或低限速起点时 (如图 3 中 C 区域的牵引正算起点), 有 $a_i=0$, 式 (3) 的第 2 个算式无法使用。为方便分析和计算, 此时用 a_{i+1} 代替 a_i 来计算, 并用 $d_b(v_i)$ 代替式 (3) 第 4 个算式中的 $d_b(v_{i+1})$ 进行计算。

根据式 (3), 在进行牵引正算时也需要判断控制加速度的变化趋势。如图 3 所示, 在牵引正算过程中, 控制加速度由停车时的初始值按冲击限制逐渐增大, 直至达到最大控制加速度, 该阶段对应图 1 中的 C 区域; 之后控制加速度维持为当前速度下的最大值。待正算进入 D 区域, 控制加速度开始按冲击限制逐渐向位于限速段上的目标加速度过渡。由于列车最大牵引可以使列车在任何线路条件下加速, 维持限速恒速需要的控制加速度必然小于最大控制加速度, 故控制加速度在 D 区域的变化趋势是逐渐减小的。

为获得进入 D 区域的起点, 需要在牵引正算完成 C 区域的前几步计算后, 在接下来的每一步牵引正算过程中, 都假设当前控制加速度将要开始向限速目标控制加速度变化, 额外做一次牵引正算试算, 并根据试算结果判断当前试算起点是否为 D 区域的起点。若当前试算的控制加速度、加速度、速度曲线能与限速段的控制加速度、加速度、速度曲线相交, 则从当前试算起点开始, 进入控制加速度逐渐过渡的计算过程。对图 1 中的 E 区域, 其牵引加算的目标点为制动段上的点。

3 考虑冲击限制的节能运行计算

地铁列车的节能运行工况序列一般为最大牵引—惰行—最大制动, 或惰行与该工况序列的交叉组合形式。故本节以最大牵引—惰行—最大制动的工况序列计算为例, 分析考虑冲击限制情况下的节能运行计算方法。

图 4 为惰行计算示意图。由图 4 可见: 列车在惰行起点位置由牵引工况开始转入惰行工况, 在 F 区域控制加速度由牵引值根据冲击限制逐渐减小为 0; 经过一段纯惰行运行后, 进入 G 区域, 控制加速度由 0 逐渐过渡到制动曲线上的目标值。为获得区域 G 的起点位置, 需要在完成 A 区域的计算后, 在接下来的每一步惰行计算过程中, 都假设当前控制加速度将要开始按冲击限制减小, 额外做一次惰行试算。惰行试算的计算方法与制动试算和牵引试算方法类似, 此处不再赘述。

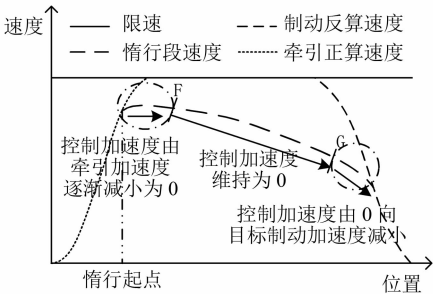


图 4 惰行计算示意图

4 算例分析

根据前文提出的考虑冲击限制的最大能力运行及节能运行牵引计算算法, 以哈尔滨地铁 3 号线的实际列车及线路数据进行仿真分析。哈尔滨地铁 3 号线列车车辆为 B 型车, 列车长 119.32 m, 列车 AW2 (定员载荷) 工况下的动态质量为 306.12 t, 列车惯性质量为 16.9 t, 列车牵引特性曲线如图 5 所示, 列车最大制动减速度为 1.12 m/s^2 , 基本阻力公式为 $W=4.97+0.040\ 54v+0.000\ 86v^2$ (式中, W 单位为 kN, v 单位为 km/h)。线路数据采用哈尔滨地铁 3 号线一期工程城乡路站—哈尔滨西站上行区间的数据。该区间长 1 178.83 m, 线路坡道、曲线和限速见表 1~3。牵引计算的计算距离步长为 0.01 m, 节能运行方案的惰行起点距运行起始点 330 m 处。

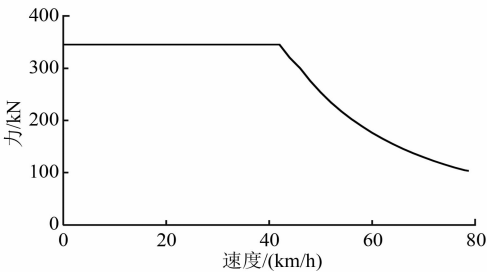


图 5 列车牵引特性曲线

表 1 哈尔滨地铁 3 号线城乡路站—哈尔滨西站上行区间
线路坡道数据

坡道起点位置/m	坡道终点位置/m	坡度‰
0	75.32	2
75.32	290.32	-21
290.32	580.39	-3.8
580.39	932.28	28
932.28	1 178.83	2

图 6、图 7 分别为最大能力运行计算、节能运行计算的速度在不考虑冲击限制和考虑冲击限制情况下的结果对比。从图中可以看出, 两种运行模式

表 2 哈尔滨地铁 3 号线城乡路站—哈尔滨西站上行区间
线路曲线数据

曲线起点位置/m	曲线终点位置/m	曲线半径/m
13.69	174.66	350
329.96	435.05	2 500

表 3 哈尔滨地铁 3 号线城乡路站—哈尔滨西站上行区间
线路限速数据

限速起点位置/m	限速终点位置/m	限速值/(km/h)
0	119.64	45
119.64	293.97	60
293.97	1 030.16	70
1 030.16	1 178.83	45

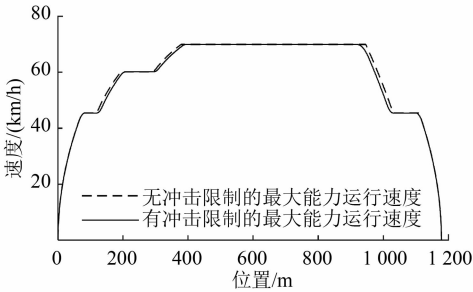


图 6 最大能力运行时速度结果对比

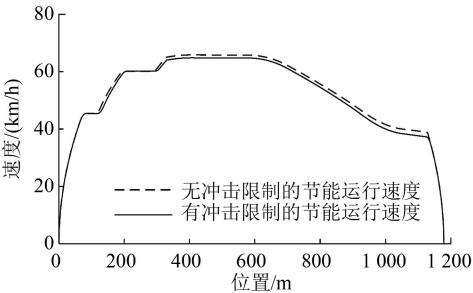


图 7 节能运行时速度结果对比

下考虑冲击限制的速度曲线均低于无冲击限制的情况,且冲击限制对节能运行时速度的影响要大于最大能力运行时的速度。由于冲击限制减缓了控制加速度变化,在工况转换处的列车速度与无冲击限制情况相比要更加平缓。

图 8、图 9 分别为最大能力运行计算、节能运行计算的控制加速度在不考虑冲击限制和考虑冲击限制情况下的结果对比。与不考虑冲击限制的牵引计算相比,有冲击限制约束的牵引计算可以得到缓变的控制加速度,更符合地铁列车的实际运行情况。

图 10、图 11 分别为不考虑冲击限制、考虑冲击限制情况下最大能力运行计算和节能运行计算的

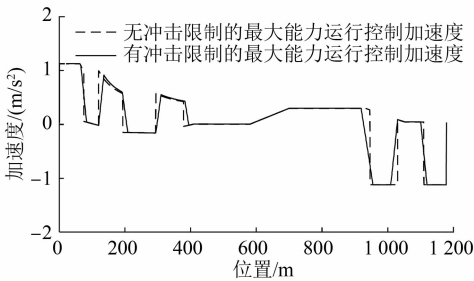


图 8 最大能力运行时控制加速度结果对比

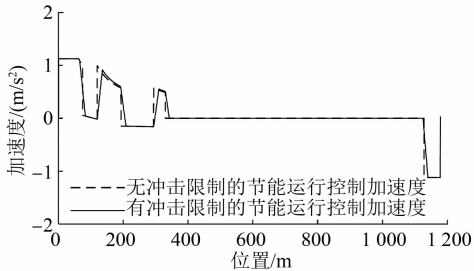


图 9 节能运行时控制加速度结果对比

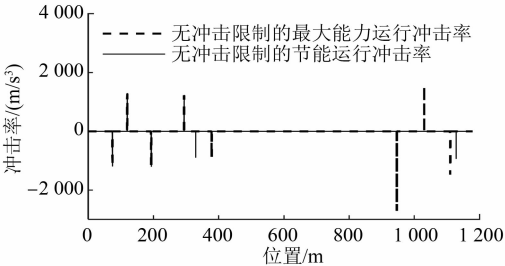


图 10 无冲击限制时最大能力运行与节能运行时的冲击率

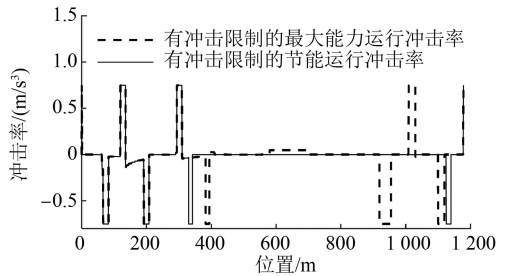


图 11 有冲击限制时最大能力运行与节能运行时的冲击率

冲击率。由图 10 可知,不考虑冲击限制时的列车运行冲击率在工况切换时会非常大,这是实际列车运行所不允许的。最大能力运行时的超大冲击率发生在牵引转恒速、恒速转牵引、恒速转制动、制动转恒速的工况切换瞬间;节能运行时的超大冲击率发生在牵引转恒速、恒速转牵引、牵引转惰行、惰行转制动的瞬间。由图 11 可以看出,考虑冲击限制的牵引计算算法得到的冲击率在所有情况下都满足车辆最大冲击率要求,最大冲击率发生在工况切换处。

有冲击限制和无冲击限制情况下,最大能力运行和节能运行时计算的区间运行时间如表 4 所示。在牵引计算中考虑冲击限制时,由于对工况的切换过程进行了限制,使有冲击限制的速度曲线要低于无冲击限制的速度曲线,故区间运行时间会相应增加。

表 4 不同冲击限制情况下采用不同运行方式时的
区间运行时间

冲击限制情况	区间运行时间/s	
	最大能力运行	节能运行
无冲击限制	82.62	90.70
有冲击限制	84.57	93.72

注:最大能力运行时区间运行时间精度提高 2.36%;节能运行时
区间运行时间精度提高 3.33%

5 结语

本文在目前地铁牵引计算模型和算法的基础上考虑地铁车辆对控制加速度的变化率限制过程,以最大能力运行和节能运行时为例,构造了考虑冲击限制的牵引计算算法。算例结果表明,该算法可

以使控制加速度的计算值更符合实际情况,并能提高牵引计算仿真精度。

参考文献

[1] 丁勇.列车运行计算与设计[M].北京:北京交通大学出版社,2011: 2.

[2] 饶忠.列车牵引计算[M].北京:中国铁道出版社,2010: 24.

[3] 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.

[4] 石红国,彭其渊,郭寒英.城市轨道交通牵引计算模型[J].交通运输工程学报,2005,5(4): 20.

[5] 朱晓敏,徐振华.基于单质点模型的城市轨道交通列车动力学仿真[J].铁道学报,2011,33(6): 14.

[6] 冯晓云,何鸿云,朱金陵.列车优化操纵原则及其优化操纵策略的数学描述[J].机车电传动,2001(4): 13.

[7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.地铁车辆通用技术条件: GB/T 7928—2003 [S]. 北京: 中国标准出版社,2004.

[8] 张安.北京昌平线地铁车辆[J].机车电传动,2011(3): 56.

[9] 马沂文.《地铁车辆通用技术条件》(GB/T 7928—2003) 标准解读(待续)[J].电力机车与城轨车辆,2005,28(6): 64.

(收稿日期:2018-08-08)

(上接第 58 页)

划和选型,从而实现城市轨道交通票务系统的高效、安全与便捷运行。

4 结 语

随着城市轨道交通网络化运营和客流量的不断增长,售检票系统架构及运维工作量也越来越大,传统票卡凭证的弊端不断凸显,将智能化的二维码技术、NFC 技术、生物感知技术等融入到城市轨道交通票务系统中,采用多种票卡凭证结合使用的模式,一方面有利于高效实施城市轨道交通票务系统管理,降低票务系统的运维成本,提高票务结算的公平性;另一方面也可以提高乘客出行效率,使乘客获得更舒适的乘车体验。

参考文献

[1] 梁笛.城市轨道交通自动售检票系统车票选型探讨[J].机电工程技术,2013,42(4): 88.

[2] 李煜平.二维码支付技术在城市轨道交通中的应用[J].城市轨道交通研究,2018(6): 125.

[3] 张甲文.NFC 移动支付技术在地铁自动售检票系统中的应用[J].铁道通信信号,2016,52(12): 77.

[4] 杜东阳,路利军,符端阳,等.手掌静脉识别:基于端到端卷积神经网络方法[J].南方医科大学学报,2019,39(2): 207.

[5] 钱玥,李云飞,陈良.物联感知和生物识别在实名制票务中的研究[J].计算机工程与应用,2013,49(7): 199.

[6] 邓先平,陈凤敏.我国城市轨道交通 AFC 系统的现状及发展[J].都市快轨交通,2005(3): 18.

[7] 徐高峻.脱机二维码支付在城市轨道交通售检票系统中的应用[J].城市轨道交通研究,2018(8): 146.

[8] 胡畅,龚云海.轨道交通虚拟票务支付模式探讨[J].都市快轨交通,2016,29(3): 52.

[9] 陈彤.掌静脉识别技术在轨道交通中的应用探讨及趋势展望[J].城市轨道交通,2019(5): 53.

[10] 龚锐,丁胜,章超华,等.基于深度学习的轻量级和多姿态人脸识别方法[J].计算机应用:kns.cnki.net/kcms/detail/Detail.aspx? dbname =CAPJLAST&filename =JSJY20191025009&v =

(收稿日期:2019-12-10)