

基于分段能量计算法的列车安全防护方法

王许超¹ 吕新军¹ 常 鸣¹ 洪海珠²

(1. 卡斯柯信号有限公司, 200071, 上海; 2. 上海申通地铁集团有限公司, 201103, 上海)

摘 要 [目的] 为了缩短安全防护距离, 提高列车运营效率, 提出一种基于分段能量计算法的列车安全防护方法。[方法] 从列车紧急制动过程的阶段划分出发, 深入阐述了列车超速防护计算的方法及计算过程。基于实际案例的相关数据, 根据列车速度条件和轨道情况, 采用分段能量计算法计算列车安全制动距离, 并以固定减速度法的计算结果进行对比。[结果及结论] 分段能量计算法能够明显减少制动距离, 从而缩短列车安全防护距离, 使运营效率得到明显提升。

关键词 城市轨道交通; 列车自动防护; 分段能量计算

中图分类号 U284.44

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.11.007

Train Safety Protection Method Based on Segmental Energy Calculation Method

WANG Xuchao¹, LYU Xinjun¹, CHANG Ming¹, HONG Haizhu²

(1. CASCO Signal Ltd., 200071, Shanghai, China; 2. Shanghai Shentong Metro Co., Ltd., 201103, Shanghai, China)

Abstract [Objective] To shorten the safety protection distances and enhance train operational efficiency, a safety protection method based on segmental energy calculation method is proposed. [Method] Starting from the phase division of the train emergency braking process, the method and calculation process for train overspeed protection are expounded in depth. Using relevant data from practical cases and considering train speed and track conditions, the segmental energy calculation method is employed to compute the train safe braking distance. The results are compared with those calculated by fixed deceleration method. [Result & Conclusion] The segmental energy calculation method significantly reduces braking distance, thereby shortening the train safety protection distance, and improving operational efficiency significantly.

Key words urban rail transit; train automatic protection; segmental energy calculation

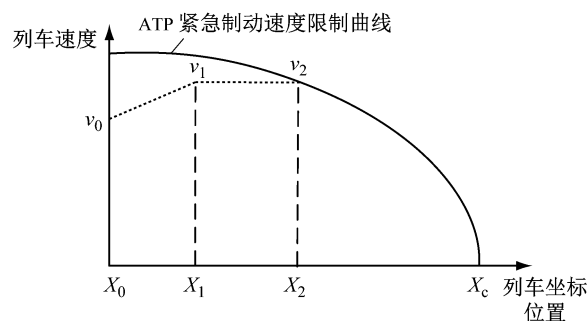
车载 ATP(列车自动防护)系统为城市轨道交通 CBTC(基于通信的列车控制)系统中必备的子系统,能有效保证列车运行安全。车载 ATP 系统严格

遵循故障导向安全原则,对列车运行进行监控和防护,可保证列车在安全间隔下行驶。当列车超速时,车载 ATP 系统会进行超速防护,自动启动紧急制动。当前车载 ATP 系统计算的安全防护距离较大,列车间隔也较大,影响了列车运行效率。对此,本文提出基于分段能量计算的列车安全防护方法,以期缩短安全防护距离。

1 紧急制动过程

ATP 系统在进行超速防护时,需要根据自身当前速度、列车制动能力及线路坡度等因素,计算启动紧急制动后列车速度能否满足限制点要求。ATP 紧急制动曲线如图 1 所示。图 1 中, X_0 、 X_1 、 X_2 、 X_c 为不同阶段分界点的对应坐标位置。

由图 1 可见,列车紧急制动过程可分为车载 ATP 设备制动切除反应阶段(X_0 — X_1 段)、惰行阶段(X_1 — X_2 段)及制动施加阶段(X_2 — X_c 段)^[1-3]。在 X_0 — X_1 段,列车在牵引力和重力共同作用下继续加速,持续时间为 t_1 ;在 X_1 — X_2 段,列车只受重力影响,持续时间为 t_2 ;在 X_2 — X_c 段,列车在制动力和重力共同作用下减速。



注: v_0 为列车紧急制动施加时的初始速度; v_1 为列车牵引切除时的速度; v_2 为列车制动施加时的速度。

图 1 ATP 紧急制动曲线

Fig. 1 ATP emergency braking curve

2 列车超速防护的计算

2.1 列车超速防护计算的方法

目前,列车超速防护的计算方法主要为基于速

度曲线法和基于能量守恒法。

基于速度曲线法的计算中,首先,将 X_0-X_c 段按照步长划分,根据步长内的列车加速度(牵引加速度为正,制动减速度为负,上坡时重力加速度为负,下坡时重力加速度为正),迭代计算列车制动过程中列车运行至各位置时的速度。迭代计算方法包括正推法、逆推法及双向推法^[4-5]。然后,根据迭代计算结果得到紧急制动触发曲线。最后,比较列车当前速度和紧急制动触发速度,进而判断列车是否超速。

基于能量守恒法的计算中,先计算列车制动过程中各力所做的功,再根据能量守恒定律来计算限制点是否有超能。在 X_0-X_1 段,牵引力和重力总体做正功;在 X_1-X_2 段,上坡时重力做负功,下坡时重力做正功;在 X_2-X_c 段,制动力和重力总体做负功。之后,比较列车运行到限制点 X_c 时的能量和限制点最大允许动能——若列车运行到 X_c 时的动能大于 X_c 处允许动能,则认为列车处于危险状态,须立即施加紧急制动。

相对于基于速度曲线的方式,基于能量守恒方式的列车自动防护计算更快速且精度更高^[6]。为简化计算,采用基于能量守恒方式的既有列车自动

防护在制动过程中仅采用最小紧急制动保障率来计算制动力所做的功。简化计算后,车速越高,制动黏着系数就越低^[7],紧急制动保障率就越小,安全制动距离就越远^[8],列车运营效率也就越低。对此。本文提出基于分段能量计算的列车安全防护方法,在制动过程中可根据不同的列车运行速度来使用不同的制动减速度,进而计算制动力所做的功,既提高了基于能量守恒的列车自动防护计算的准确性,又提升了列车的运营效率。

2.2 列车超速防护计算的基本条件

CBTC 系统将列车的移动授权终点设置在前车的车尾处,相应的限速采用撞硬墙方式(即限制速度为 0)^[9]。后车的每个计算周期都需要根据当前自身的速度和位置,在假定当前立即施加紧急制动的条件下,计算列车最终能否在移动授权终点前停车——若能则继续正常运行,若不能则须立即施加紧急制动。

CBTC 系统的追踪列车间隔计算示意图如图 2 所示。当前 T1 车的车头最大位置为 X_0 ,计算从 X_0 到 X_c ,在最大牵引力、坡度、最小紧急制动等共同作用下的列车最终停车位置。

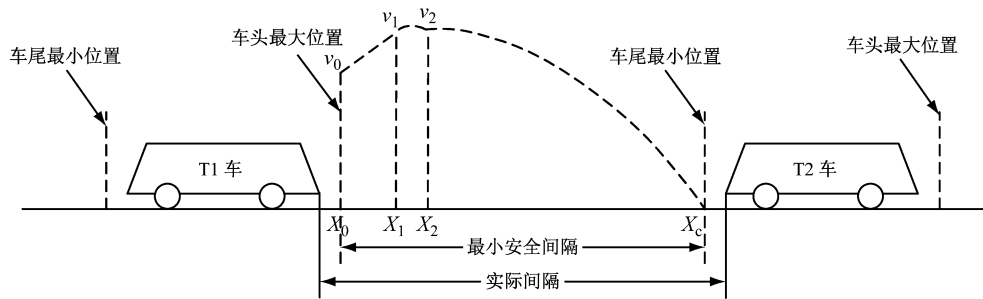


图 2 列车间隔示意图

Fig. 2 Diagram of train intervals

2.3 基于能量守恒法的列车超速防护计算

在列车触发紧急制动直至停车的过程中,列车自位置 X_0 处运行到任意位置 X 处时,其能量为 X_0 处的动能,最大牵引力做的正功,以及紧急制动过程中重力、阻力和制动力做功之和,即:

$$E_X = E_{X_0} + W_G + W_{tc} + W_b \quad (1)$$

式中:

E_X ——列车在 X 处的动能;

E_{X_0} ——列车在 X_0 处的初始动能;

W_G ——列车自 X_0 处运行到 X 处时重力做的功;

W_{tc} ——列车自 X_0 处运行到 X 处时牵引力做的功;

W_b ——列车自 X_2 处运行到 X 处时制动力做的功。

其中:

$$E_{X_0} = \frac{1}{2}mv_0^2 + \frac{1}{2}\frac{J}{R^2}v_0^2 \quad (2)$$

$$W_G = mg \int_{X_0}^X i_x dx \quad (3)$$

$$W_{tc} = \int_{X_0}^X \left(ma_{tc} + \frac{J}{R^2}a_{tc} \right) dx \quad (4)$$

$$W_b = \int_{x_2}^x \left(ma_b + \frac{J}{R^2} a_b \right) dx \quad (5)$$

式(2)一式(5)中:

m ——列车质量;

J ——列车转动惯量;

R ——车轮半径;

a_{tc} ——列车的牵引加速度;

g ——重力加速度;

a_b ——列车的制动减速度;

i_x ——线路在 x 处的坡度。

若列车在 X 点处限制速度为 v_x , 则基于能量守恒法中, 该处的限制动能 E_{limit} 为:

$$E_{limit} = \frac{1}{2} m v_x^2 + \frac{1}{2} \frac{J}{R^2} v_x^2 \quad (6)$$

基于能量守恒法的列车自动防护中, 需要触发紧急制动的判断条件为:

$$E_{limit} > E_k = E_{x_0} + W_G + W_{tc} + W_b \quad (7)$$

若式(7)成立, 则判断列车运行正常, 无需触发紧急制动; 否则将立即触发紧急制动。

若 $E_{limit} = 0$, 且列车动能最小为 0, 则式(7)可表示为:

$$E_{x_0} + W_G + W_{tc} + W_b = 0 \quad (8)$$

为保证实际应用安全, 在制动力做功的简化计算中, 列车运行速度和轨道情况均按最不利工况考虑。

3 分段能量算法

3.1 分段制动能量计算

本文主要研究制动过程中不同列车运行速度及轨道情况对制动距离的影响, 故可认为列车从 X_0 到 X_2 的过程是完全相同的, 即假定 X_0 点列车速度均为 v_0 , 经过牵引力做功 W_{tc} 、重力做功 $W_{G(X_0-X)}$ 到达 X_2 时其 v_2 也是相同的, 根据 X_2 点的动能 E_2 为:

$$E_2 = \frac{1}{2} m v_2^2 + \frac{1}{2} \frac{J}{R^2} v_2^2 = E_{x_0} + W_{G(X_0-X_2)} + W_{tc} \quad (9)$$

以 X_2 为分隔点, 将 W_g 分成两部分则有:

$$W_g = W_{G(X_0-X_2)} + W_{G(X_2-X_c)} \quad (10)$$

式中:

$W_{G(X_0-X_2)}$ 、 $W_{G(X_2-X_c)}$ ——列车自 X_0 处至 X_2 处及自 X_2 处至 X_c 处时重力做的功。

将式(10)代入式(9)中, 结合式(3)、式(5)及

式(8)可得:

$$\frac{1}{2} m v_2^2 + \frac{1}{2} \frac{J}{R^2} v_2^2 = mg \int_{x_2}^{x_c} i_x dx + \int_{x_2}^{x_c} \left(ma_b + \frac{J}{R^2} a_b \right) dx \quad (11)$$

引入列车的回转质量系数 β , 令 $\beta = 1 + \frac{J}{mR^2}$, 则

式(12)可以简化为:

$$\frac{1}{2} \beta v_2^2 = g \int_{x_2}^{x_c} i_x dx + \beta \int_{x_2}^{x_c} a_b dx \quad (12)$$

若 X_2 到 X_c 之间的坡度 $i_{X_2-X_c}$ 为固定值, a_b 也采用固定值, 则根据式(12)转换得到固定减速度:

$$\frac{1}{2} \beta v_2^2 = (g i_x + \beta a_b) S_{X_2-X_c} \quad (13)$$

式中:

$S_{X_2-X_c}$ —— X_2 到 X_c 的距离。

若 X_2 到 X_c 过程中, 在不同列车运行速度和不同轨道情况下, 列车减速度不同, 设减速度区间 j 起始减速度为 $a_{b,j}$, 结束减速度为 $a_{b,j+1}$; 则在此减速度区间 j 内列车的起始速度为 v_j , 结束速度为 v_{j+1} ; 列车在该减速度区间内行驶过的距离为 ΔS_j , 则式(13)可转换为分段能量计算:

$$\begin{cases} \frac{1}{2} \beta v_2^2 = \sum_j (g i_x + \beta a_{b,j}) \Delta S_j = \\ \sum_j \left(\frac{1}{2} \beta v_j^2 - \frac{1}{2} \beta v_{j+1}^2 \right) \\ S_{X_2-X_c} = \sum_j \Delta S_j \end{cases} \quad (14)$$

3.2 案例计算

某列车在不同速度、不同轨道情况下分段计算紧急制动时的 βa_b 如表 1 所示。其中干轨情况下的黏着系数不小于 0.14, 湿轨情况下的黏着系数小于 0.14。

在仿真计算中, v_2 按表 1 取值, $g = 10 \text{ m/s}^2$, i_x 取 3% 及 -3% 分别表示上坡和下坡。出于安全考虑, βa_b 需使用列车提供的最小制动减速度来计算, 结合上述条件按表 1 取值, 干轨、湿轨情况下的 βa_b 分别取 0.77588 m/s^2 和 0.54190 m/s^2 。

将上述计算条件参数代入式(13)可得固定减速度法的制动距离计算结果, 如表 2 所示。

将上述计算条件参数代入式(14), 可得分段能量算法的制动距离计算结果, 如表 3 所示。

表 1 列车紧急制动时的 βa_b

Tab. 1 βa_b during train emergency braking

分段的初始速度/ (km/h)	不同轨道情况下的 $\beta a_b / (\text{m/s}^2)$	
	干轨	湿轨
10	0.999 00	0.999 00
30	1.350 00	1.311 70
50	1.350 00	1.290 40
70	1.350 00	1.171 30
90	1.305 37	1.037 40
110	1.260 79	0.931 00
130	1.200 50	0.844 40
150	1.129 73	0.772 60
170	1.058 96	0.712 00
190	0.988 19	0.660 20
210	0.917 42	0.615 40
230	0.846 65	0.576 40
250	0.775 88	0.541 90

对比表 2 和表 3 可知:当 v_2 为 10 ~ 250 km/h 时,无论轨道情况如何,采用分段能量计算法的制动距离均比采用固定减速度法的制动距离更短;从

坡度对两种方法计算结果的影响来看,下坡的影响最大,其次是上坡的影响,平坡的影响最小;在 $v_2 = 250 \text{ km/h}$ 且下坡时,干轨和湿轨情况下,采用固定减速度法和分段能量计算法的制动距离差值分别为 1 519.133 m 和 3 350.152 m,且采用分段能量计算法的列车制动距离明显更小。

4 结语

为缩短安全防护距离,本文从列车紧急制动过程的阶段划分出发,基于实际案例的相关数据,根据列车速度条件和轨道情况,采用分段能量计算法计算列车安全制动距离,并以固定减速度法的计算结果进行对比。

由对比结果可知:分段能量计算法能够明显减少制动距离,从而缩短列车安全防护距离,使列车能够以更高的速度运行,进而提升运营效率。

此外,与基于速度曲线法的列车超速防护计算相比,基于能量守恒法的列车超速防护制动曲线计算更为简单,可有效提高 ATP 的工作效率。

表 2 固定减速度法的制动距离计算结果

Tab. 2 Braking distance calculation results by constant deceleration method

阶段 j 的初始速度/ (km/h)	不同轨道情况下的制动距离/m					
	干轨			湿轨		
	$i_x = 0$	$i_x = 3\%$	$i_x = -3\%$	$i_x = 0$	$i_x = 3\%$	$i_x = -3\%$
10	4.972	3.634	7.871	7.119	4.663	15.059
30	44.752	32.708	70.838	64.075	41.955	135.535
50	124.311	90.855	196.771	177.986	116.541	376.487
70	243.650	178.075	385.672	348.853	228.420	737.915
90	402.769	294.369	637.540	576.675	377.591	1 219.818
110	601.667	439.736	952.374	861.452	564.056	1 822.198
130	840.344	614.176	1 330.175	1 203.185	787.814	2 545.053
150	1 118.801	817.691	1 770.943	1 601.874	1 048.865	3 388.384
170	1 437.038	1 050.278	2 274.678	2 057.518	1 347.209	4 352.191
190	1 795.055	1 311.939	2 841.380	2 570.118	1 682.845	5 436.474
210	2 192.851	1 602.673	3 471.048	3 139.673	2 055.775	6 641.232
230	2 630.426	1 922.481	4 163.684	3 766.184	2 465.998	7 966.467
250	3 107.781	2 271.362	4 919.286	4 449.650	2 913.514	9 412.178

表 3 分段能量计算法的制动距离计算结果

Tab.3 Braking distance calculation results by segmental energy calculation method

$v_j/(km/h)$	不同轨道情况下的制动距离/m					
	干轨			湿轨		
	$i_x = 0$	$i_x = 3\%$	$i_x = -3\%$	$i_x = 0$	$i_x = 3\%$	$i_x = -3\%$
10	3.862	3.003	5.409	3.862	3.003	5.409
30	27.538	22.417	35.752	27.986	22.720	36.482
50	73.263	60.155	93.752	75.648	61.768	97.634
70	141.850	116.762	180.752	152.361	123.787	198.182
90	235.681	193.852	300.614	268.178	215.110	356.477
110	357.072	292.966	457.200	429.893	339.548	587.399
130	509.212	416.179	656.024	644.314	500.650	907.957
150	697.652	567.022	907.036	918.222	701.705	1 337.614
170	853.905	688.210	1 125.838	1 182.789	884.031	1 801.330
190	1 098.843	877.453	1 472.173	1 562.209	1 146.433	2 476.694
210	1 533.875	1 216.512	2 081.752	2 164.991	1 574.400	3 526.350
230	1 927.015	1 511.894	2 669.455	2 744.911	1 964.100	4 659.631
250	2 394.178	1 855.266	3 400.153	3 418.374	2 407.282	6 062.026

参考文献

- [1] IEEE. Communications-based train control (CBTC) performance and functional requirements; IEEE Std 1474.1-2004 [S]. New York: IEEE, 2004.
- [2] 胡臣, 王长林. 车载紧急制动触发曲线计算模型分析[J]. 交通科技与经济, 2013, 15(3): 84.
HU Chen, WANG Changlin. Curve calculation model based on on-board emergency brake triggering[J]. Technology & Economy in Areas of Communications, 2013, 15(3): 84.
- [3] 杨志, 王冬海. 地铁 CBTC 信号系统列车紧急制动相关车辆参数评估[J]. 铁道通信信号, 2016, 52(增刊2): 76.
YANG Zhi, WANG Donghai. Evaluation of vehicle parameters related to train emergency braking in subway CBTC signal system [J]. Railway Signalling & Communication, 2016, 52(S2): 76.
- [4] 高心瑜. 城市轨道交通 ATP 安全制动曲线模型研究[J]. 中国科技期刊数据库 工业 A, 2022(1): 241.
GAO Xinyu. Research on urban rail transit ATP safety braking curve model[J]. China Science and Technology Database Industry A, 2022(1): 241.
- [5] 向美柱, 张铭瑶, 郑杰良. ATP 安全制动模型在地铁列车三维仿真中的应用[J]. 铁道通信信号, 2018, 54(9): 70.
XIANG Meizhu, ZHANG Mingyao, ZHENG Jieliang. Application of ATP safe baking model in three-dimension simulation of metro train [J]. Railway Signalling & Communication, 2018, 54(9): 70.
- [6] 陈荣武. CBTC 系统列车运行仿真与优化策略[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
CHEN Rongwu. Train operation simulation and optimization strategy of CBTC system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [7] 邓洁. CBTC 系统安全制动模型中 GEBR 确定方法研究[J]. 铁道通信信号, 2021, 57(9): 64.
DENG Jie. Research on method of determining value of GEBR in safety braking model of CBTC system[J]. Railway Signalling & Communication, 2021, 57(9): 64.
- [8] 黄雷. CBTC 系统典型安全制动模型解析[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(增刊2): 37.
HUANG Lei. Analysis of typical CBTC safety braking model[J]. Urban Mass Transit, 2015, 18(S2): 37.
- [9] 路飞, 宋沐民, 田国会. 地铁列车的追踪间隔控制模型与仿真[J]. 信息与控制, 2006, 35(5): 641.
LU Fei, SONG Mumin, TIAN Guohui. Model and simulation for tracking interval control of subway trains [J]. Information and Control, 2006, 35(5): 641.
- 收稿日期:2024-05-28 修回日期:2024-07-12 出版日期:2024-11-10
Received:2024-05-28 Revised:2024-07-12 Published:2024-11-10
- 通信作者:王许超,工程师, wangxuchao@casco.com.cn
- ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license