

市域快线安全线长度计算新方法<sup>\*</sup>彭磊<sup>1</sup> 陈佳倩<sup>2</sup> 张慧<sup>2</sup>

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司交通规划所, 510010, 广州;

2. 北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室, 100044, 北京//第一作者, 高级工程师)

**摘要** 通过分析城市轨道交通安全线设置的相关需求, 结合市域快速轨道交通的特点, 分析了影响安全线长度的主要因素, 提出了安全线长度计算新方法, 以解决安全线的有效长度对于具体线路缺乏针对性的问题。并以福州机场线大鹤站为例进行计算, 计算得到安全线理论长度为 55.00 m, 比实际站场设置的安全线长度缩短 1.64 m, 验证了该计算方法的可行性。

**关键词** 市域快线; 安全线长度计算; 制动失效; 紧急制动触发曲线

**中图分类号** U239.52

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2022.08.011

## New Method of Safety Line Length Calculation for Suburban Express

PENG Lei, CHEN Jiaqian, ZHANG Hui

**Abstract** Targeting the problem of effective length of safety line lacks specificity in each line, by analyzing relevant requirement of urban rail transit safety line setting, considering suburban rapid rail transit characteristics, the main factors influencing safety line are analyzed. Taking Dahe Station of Fuzhou Airport Line as an example, the theoretical length of safety line is calculated to be 55.00 m, which is 1.64 meters shorter than that of the actual station. The feasibility of the calculation method is verified.

**Key words** suburban express; safety line length calculation; braking failure; emergency brake triggering curve

**First-author's address** Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., 510010, Guangzhou, China

市域快线采用城市轨道交通制式, 承载中心城区与周边新城间、组团式城镇间, 以及与大中城市具有同城化需求的城镇间的“中距离”旅客运输, 主要服务于通勤、通学、通商等规律性客流, 具有快速、高密度、公交化的特点<sup>[1]</sup>。市域快线的列车设

计运行速度达 100 ~ 160 km/h, 设计安全线是为防止列车由于某种原因冒进另一进路而与其他列车发生冲突<sup>[2-4]</sup>。T/CCES 2—2017《市域快速轨道交通设计规范》仅规定“安全线的有效长度不应小于 50 m”, 但未详细描述如何选取不同情况下的安全线长度。本文将提出一种合理的安全线长度计算方法, 为实际线路中安全线长度的设计提供理论支持。

## 1 安全线长度影响因素

设置安全线的目的是为了不影响邻线列车的正常行车作业, 以及降低本线列车发生事故的损失<sup>[4]</sup>。如安全线过短, 则无法保证本线列车安全; 如安全线过长, 则会增加工程投资和施工难度。本文从安全线设置规范和列车进入安全线的原因两个方面分析, 进行安全线长度计算。

由 T/CCES 2—2017 可知, 安全线的基本设置有 3 类: ① 联络线、出入线、停车线等特殊用途线路在站内接轨时, 需在接轨处设置安全线(如图 1 所示); ② 支线接轨正线时, 接轨点道岔处的警冲标至站台端部距离小于 50.00 m 时需设置安全线(如图 2 所示); ③ 列车折返线与停车线末端均应设置安全线(如图 3 所示)。

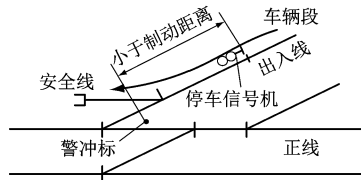


图1 出入段线接正线的形式

Fig. 1 The form of inbound and outbound lines connecting main line

由此可知, 安全线一般设置于站内线路接轨处

<sup>\*</sup> 广州地铁设计研究院股份有限公司科研项目(KY-2018-61)

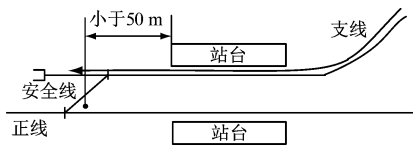


图2 岔线接轨正线的形式

Fig. 2 The form of a bifurcation connecting to the main line

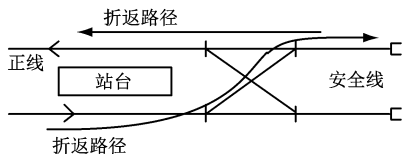


图3 站后折返形式

Fig. 3 The form of turn-back line behind the station

或线路末端。线路接轨处设置的安全线主要用于防护列车冒进信号的情况,折返线与停车线末端设置的安全线作用及安全防护距离与之相同<sup>[5]</sup>。

规范对安全线的纵坡设计和平面曲线部分设计均有要求。纵坡设计在列车上坡道时会消耗动能,需考虑坡度对安全线长度的影响。安全线的平面曲线布置需考虑曲线半径对安全线长度的影响。

根据以上设置条件,主要考虑由于制动失效或司机操作失误而导致列车冒进信号<sup>[6]</sup>。当列车因制动系统失效而冲入安全线时,制动距离大于原所需制动距离。为保证列车运行安全,安全线终点应延伸至列车停车点。可见,安全线的长度实质上与列车制动距离有关。列车制动距离主要由制动系统及 ATP(列车自动防护)系统决定<sup>[6]</sup>。若列车运行中车载 ATP 系统发生故障,则列车将采用人工驾驶模式。在人工驾驶模式下,列车运行速度不超过 25 km/h<sup>[7]</sup>,若因为司机操作不当而使列车冲入安全线,则此时应考虑列车启动紧急制动系统的反应时间以及列车制动系统的工作情况;若 ATP 系统完好而制动系统发生故障,则列车会因损失部分制动力而导致制动距离增加,进而冲入安全线。

综上所述,安全线主要设置于站内线路接轨处或线路末端,列车进站速度、线路限速、道岔限速、安全线设计曲线半径和坡度、列车制动系统工作状态等均对安全线设置有影响。

## 2 安全线长度计算方法

### 2.1 设计思路

根据对安全线长度影响因素的分析,以速度为主导,辅以线路条件和车辆条件所提出的安全线长度计算方法具有极大的灵活性且符合市域线路高

效运营的需求。对于列车制动失效,由于司机操作等人为因素占主导,其情况复杂不好量化,则主要以 ATP 系统完好而制动系统失效情况下的列车制动距离对安全长度进行计算。

在列车即将进站的情况下,列车达到起模点(控车曲线的匀速曲线与减速曲线的交点)并启动制动,由于列车制动系统突发故障损失了制动力,故列车无法在 MA(移动授权)终点前安全停车而是冲入安全线。在实际站场中,考虑到工程需求和成本造价,安全线只是在一定限度上为列车提供 1 个缓冲距离。因此,只要安全线长度满足一般情况下列车制动失效后的制动距离,就可以在避免影响正线运行列车的同时将事故后果降至最低。

本文以列车速度-位移曲线为基础,结合列车制动系统发生故障的情况,提出安全线长度计算方法。将列车制动系统发生故障时损失的制动力与原有制动力的比值,称为制动失效比  $N$ 。本文以现场常见的制动失效比作为最大允许失效比,进行安全线长度计算。

### 2.2 安全线长度的计算

在起模点前,列车制动系统尚未工作,列车运行不受影响。若列车在匀速控制曲线范围内启动了制动,当制动系统发生故障时,列车在部分制动力的作用下速度会减小,因该部分的限制速度为常量,必然不会触发紧急制动。起模点后,减速控制曲线的限速减小,若此时车速无法降至允许范围内,则会触发紧急制动。因此,本文从起模点开始来计算安全线长度,如图 4 所示。

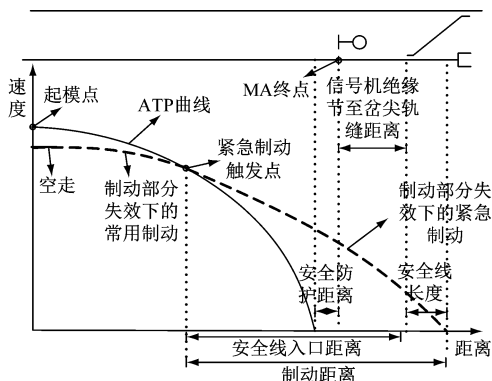


图4 安全线长度计算方法示意图

Fig. 4 Diagram of the safety line length calculation

如图 4 所示,当列车运行至起模点时施加常用制动,若制动系统发生故障,则列车运行一段时间后其实际速度将超过 ATP 紧急制动触发曲线的限

制速度,触发紧急制动<sup>[6]</sup>。ATP曲线与列车实际制动曲线的交点即为紧急制动的触发点。以该触发点为计算起点,可求得列车的紧急制动距离 $S_{\text{紧急制动}}$ 。于是,安全线的长度 $S_{\text{安全线}}$ 为:

$$S_{\text{安全线}} = S_{\text{紧急制动}} - S_{\text{入口}} \quad (1)$$

其中, $S_{\text{入口}}$ 为紧急制动触发点至安全线入口处的距离,包括列车正常制动停车的距离、安全防护距离和停车信号机至安全线道岔前端基本轨缝处的距离(该距离需结合实际站场而定)。

由于列车的实时运行情况不同,故其发生制动失效的情况和列车实际触发紧急制动的速度也不同。该计算方法的关键在于确定紧急制动的触发条件和制动失效比 $N$ 。

为了克服计算的不确定性,提出一种静态的计算方法,如图5所示。从起模点开始,以 $\Delta t$ 为时间步长,分别以不同的 $N$ 来计算列车以该点速度触发紧急制动到停车所需的制动距离,以消除触发点计算存在不确定性因素的影响。此时,不再考虑常用制动距离,以ATP曲线上某一点起的紧急制动距离减去对应的安全线入口的距离即为 $S_{\text{安全线}}$ ,所有 $S_{\text{安全线}}$ 的最大值即为最不利情况下的 $S_{\text{安全线}}$ 。

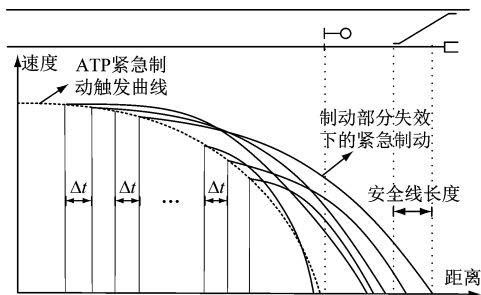


图5 静态 $S_{\text{安全线}}$ 计算方法

Fig. 5 The static safety line length calculation method

### 2.3 $S_{\text{安全线}}$ 计算

对于ATP曲线,本文采用文献[7]中的ATP紧急制动触发曲线计算方法,根据GEBR(保障性紧急制动率)制动曲线进行计算。当列车超速,触发紧急制动时,列车在GEBR制动曲线下制动运行,能保障列车的运行安全<sup>[8]</sup>。

列车故障制动曲线为:

$$s = \frac{v_m^2 - v_0^2}{2a} \quad (2)$$

式中:

$s$ ——列车行走距离;

$v_m$ ——列车行驶末速度;

$v_0$ ——列车行驶初速度;

$a$ ——列车加速度。

且有

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{F_{\text{合}} mg}{m(1 + \gamma)} = \frac{F_{\text{合}} g}{1 + \gamma} \quad (3)$$

式中:

$F_{\text{合}}$ ——列车运行中所受合力,包含列车的制动力、列车所受基本阻力、曲线附加阻力、坡度附加阻力和隧道附加阻力<sup>[9]</sup>;

$m$ ——列车质量;

$g$ ——重力加速度;

$\gamma$ ——列车回转质量系数。

市域快线的车站一般位于地面,不需考虑隧道阻力对 $S_{\text{安全线}}$ 的影响。在 $\Delta t$ 内,假设列车所受单位基本阻力不变,则:

$$F_{\text{单合}} = w + w_i + w_r + f_{\text{制}} = (a_1 + b_1 v + c_1 v^2) + i + \frac{600}{R} + f_{\text{制}} \quad (4)$$

式中:

$F_{\text{单合}}$ ——列车运行中所受的单位合力,N/kN;

$a_1, b_1, c_1$ ——基本阻力参数;

$v$ ——列车速度,km/h;

$R$ ——线路曲线半径,m;

$i$ ——线路坡度,‰(上坡取正,安全线设计中均为上坡);

$w$ ——列车单位基本阻力,N/kN;

$w_i$ ——坡度单位附加阻力,N/kN;

$w_r$ ——曲线单位附加阻力,N/kN;

$f_{\text{制}}$ ——制动系统失效后剩余的单位制动力,N/kN。

按 $\Delta t$ 取得不同时刻点 $\{t_1, t_2, t_3, \dots, t_{(i-1)}, t_i\}$ ,并取得相应时刻点的列车速度 $\{v_1, v_2, v_3, \dots, v_{(i-1)}, v_i\}$ ,结合不同的 $N$ 计算紧急制动曲线。

在计算中,以列车紧急制动时每个车轮上的闸瓦压力为最小制动失效单位,1列列车有8个车轮,若 $N=1/8$ ,则表明损失了某一个车轮上的制动力。根据车轮上的闸瓦压力 $K$ 计算列车单位制动力<sup>[9]</sup>,有:

$$f_{\text{制}} = \frac{\sum KN}{mg} = \frac{\sum (K_n \varphi_{K_n}) N}{mg} \quad (5)$$

式中:

$K_n$ ——单个车轮闸瓦压力;

$\varphi_{K_n}$ ——单个车轮闸瓦摩擦系数。

结合式(2)一式(5),列车在 1 个速度间隔  $\Delta v$  的计算步长内,运行距离  $\Delta S_i$  为:

$$\Delta S_i = \frac{v_i^2 - (v_i - \Delta v)^2}{2(1 + \gamma)} F_{\text{合}} g, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

由此,列车某一时刻点  $t_i$  以 1 个随机的  $N$  进行制动至停止的位移集合  $S = \{s_{i1}, s_{i2}, s_{i3}, \dots, s_{i(n-1)}, s_{in}\}$ ,与之对应的速度集合为  $V = \{v_{i1}, v_{i2}, v_{i3}, \dots, v_{i(n-1)}, v_{in}\}$ 。

由集合  $S$  及  $V$  可得到列车制动失效情况下的紧急制动曲线。按同样方法,计算下一个  $t_{i+1}$  时刻的列车紧急制动曲线,直至计算完毕。

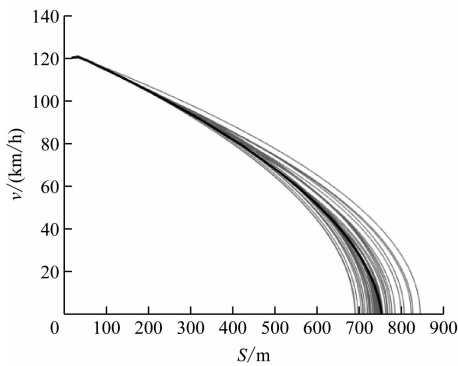
### 3 实例验证及结果分析

本文采用市域快线福州机场大鹤站的实际数据进行算例验证。该站停车信号机至安全线道岔前端基本轨缝处的距离为 6.36 m,安全防护距离取 50.00 m。列车为 A 型 6 辆编组(4 辆动车+2 辆拖车)。在该编组情况下,若 1 辆动车发生故障,则列车丧失 1/4 制动力;若 2 辆动车发生故障,则列车丧失 2/4 制动力,以此类推。实际上,当 2 辆及以上动车发生故障时,安全线仅能保证失控列车不影响邻线正常作业。由此并结合现场经验确定,安全线的长度应满足列车制动系统出现 1/4 制动失效时仍能安全停车的需求。

根据实际情况,  $m = 335.4 \text{ t}$ ,  $\gamma = 0.08$ ,  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ ,  $a_1 = 2.755 \text{ 1}$ ,  $b_1 = 0$ ,  $c_1 = 0.000\ 428\ 6$ ,  $K = 25 \text{ kPa}$ ,换算  $\varphi_{Kn} = 0.156$ ,最小制动失效单位为车轮闸瓦压力,所对应  $N$  最小值为 1/32,  $N$  最大值为 1/4。取  $\Delta t = 0.1 \text{ s}$ ,  $\Delta v = 0.5 \text{ km/h}$ ,以 120 km/h 为列车最高运行速度,使用 MATLAB 软件进行计算。

本文以列车紧急制动时每个车轮上输出的  $K$  为最小制动失效单位,使用随机函数取得列车的不同  $N$  值进行计算,计算结果如图 6 所示。

从图 6 中可看出,当紧急制动触发点速度较低时,列车停车点仍位于 ATP 曲线终点内;当紧急制动触发点速度较高时,列车停车点将越过 ATP 曲线终点。为保证列车运行安全,  $S_{\text{安全线}}$  需保证列车冲入安全线后在安全线尾部车挡前停车。根据最不利原则,应取制动距离中最大值进行  $S_{\text{安全线}}$  的计算。由于每次计算情况均存在随机因素,因此在相同速度条件下进行多次  $S_{\text{安全线}}$  计算。多次计算得到



注:深灰色线为 ATP 紧急制动触发曲线,浅灰色线为不同  $\Delta t$  的紧急制动触发点为起点所计算得到的列车制动失效的紧急制动曲线。

图 6 不同  $t_i$  与不同  $N$  下列车的制动曲线

Fig. 6 Braking curves of trains at different time and failure ratios

$S_{\text{安全线}}$  最大值为 55.00 m,而实际大鹤站  $S_{\text{安全线}}$  设置为 56.64 m,计算结果比实际长度缩短 1.64 m。

由于安全线设置场景多样,安全线长度计算方法需满足不同场景条件下的计算需求。使用大鹤站线路数据和车辆数据,计算得到 3 种基本设置类型的  $S_{\text{安全线}}$ ,见表 1。

表 1 不同场景下的安全线长度

Tab. 1 Length of safety line in different scenarios

安全线设置场景	综合限速最小值/ (km/h)	$S_{\text{安全线}}$ 最大值/m
车辆段出入线接轨正线	35	6.61
支线接轨正线	120	55.00
站后折返线末端	45	14.90

不同设置场景对列车的限速不同;在同一场景中对列车的限速包括线路限速,道岔限速,站内限速等,需综合考虑当前线路上所有的速度限制条件,并取其中的最小值作为起模点速度。结合式(6)分析可知,在  $N$  相同情况下,列车速度减小使得列车制动距离减小,  $S_{\text{安全线}}$  也随之减小。

### 4 结语

针对既有安全线设计规范不能满足实际需求现状,本文从安全线的设置目的出发,考虑列车制动系统失效,分析  $S_{\text{安全线}}$  计算影响因素,提出了一种安全线长度计算方法。使用大鹤站实际线路数据和车辆参数对提出的安全线长度计算方法进行算例验证,结果表明,使用该计算方法,在最高限速 120 km/h 和  $N$  最大值为 1/4 的最不利情况下,计算

得到  $S_{\text{安全线}}$  为 55.00 m,比实际站场设置的  $S_{\text{安全线}}$  缩短了 1.64 m。

本文提出的市域快线安全线长度计算方法可与实际数据紧密结合,计算得到的  $S_{\text{安全线}}$  既能发挥安全线的隔开作用,又能在一定程度上减小事故的发生,可为市域快线实际工程设计提供理论支持。

参考文献

[1] 中国土木工程学会. 市域快速轨道交通设计规范: T/CCES 2—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.  
China Civil Engineering Society. Code for design of metropolitan rapid transit system: T/CCES 2—2017 [S]. Beijing: China Building & Architecture Press, 2017.

[2] 李英,周立新,宋贤林. 城市轨道交通安全线配置条件分析[J]. 城市轨道交通研究, 2004(2): 74.  
LI Ying, ZHOU Lixin, SONG Xianlin. Analysis on the configurable condition of safety track in urban mass transit[J]. Urban Mass Transit, 2004(2): 74.

[3] 吴学全. 铁路安全线的设计研究[J]. 高速铁路技术, 2012(3): 11.  
WU Xuequan. Study on design of railway safety siding[J]. High Speed Railway Technology, 2012(3): 11.

[4] 高纯敏. 铁路安全线空间线形设计方案研究[J]. 铁道标准设计, 2015(10): 49.  
GAO Chunmin. Study on the design scheme of railway safety sid-

ing spatial alignment [J]. Railway Standard Design, 2015(10): 49.

[5] 郑子涛. 高速铁路安全线及延续进路设置问题的探讨[J]. 铁路运输与经济, 2014(1): 14.  
ZHENG Zitao. Discussion on problems existing in setting up of safety siding and successive route of high-speed railways[J]. Railway Transport and Economy, 2014(1): 14.

[6] 林颖,王长林. 基于 CBTC 的车载 ATP 安全制动曲线计算模型研究[J]. 铁道学报, 2011(8): 69.  
LIN Ying, WANG Changlin. Computational model of safe braking curve of onboard ATP based on CBTC[J]. Journal of the China Railway Society, 2011(8): 69.

[7] Rail Transit Vehicle Interface Standards, IEEE Vehicular Technology Society. IEEE 1474. 1—2004 IEEE standard for Communications-based Train Control (CBTC) performance and functional requirements: IEEE 1474. 1—2004[S]. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2005: 18.

[8] 朱吉敏. 城市轨道交通 ATP 的研究与仿真[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.  
ZHU Jimin. Study and simulation of urban rail transit ATP[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.

[9] 尧辉明. 城市轨道交通车辆制动系统[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2018.  
YAO Huiming. Braking system of urban rail transit vehicles[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2018.

(收稿日期: 2020-05-21)

(上接第 46 页)

程序、报告的测试数据、正常条件和特殊条件、综合结果、所需的签名、测试报告附录等。

4 结语

机电核心系统是实现城市轨道交通统一指挥调度、保证列车运行安全、提高运输效率和质量的关键技术设备。电磁干扰可能会导致机电核心系统设备故障,从而影响运营的安全和效率。如今,多个城市都在积极推进全自动无人驾驶线路(GOA4 级别,即自动化等级为 4 级)的建设,对各专业系统设备的可靠性和安全性都提出了更高的要求。为了避免既有线运营中日益增多的 EMC 问题在未来建成的新线中重复出现,本文梳理并探讨了招标采购阶段 EMC 标准的选择和工程实施阶段的 EMC 管理,对新线建设中机电核心系统设备的电磁兼容性管理有一定借鉴意义。

参考文献

[1] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 全自动运行系统规范

第 2 部分: 核心设备产品: T/CAMET 04017. 2—2019[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2019.  
China Association of Metros. Specification for fully automatic operation system of urban rail transit-Part 2: core equipment products: T/CAMET 04017. 2—2019[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2019.

[2] European Committee for Electrotechnical Standardization. Railway applications-Electromagnetic compatibility-Part 3-2: rolling stock-apparatus: EN 50121-3-2: 2015 [S]. London: BSI Standards Limited, 2015.

[3] European Committee for Electrotechnical Standardization. Railway applications-Electromagnetic compatibility-Part 3-2: rolling stock-apparatus: EN 50121-3-2: 2016 + A1: 2019 [S]. London: BSI Standards Limited, 2019.

[4] ICNIRP. ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz). [J]. Health Physics 1998, 74(4): 494.

[5] 张亮. 电磁兼容(EMC)技术及应用实例详解[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.  
ZHANG Liang. Electromagnetic compatibility (EMC) technology and application examples[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014.

(收稿日期: 2020-09-22)