

基于车辆制动延时的列车自动防护系统防护距离优化

布登兵 陈绍文

(卡斯柯信号有限公司, 200071, 上海//第一作者, 工程师)

**摘 要** 简要阐述了城市轨道交通 ATP(列车自动防护)系统防护距离计算原理,计算分析了车辆制动延迟时间参数优化前后的列车 ATP 系统最小防护距离。经对实际项目计算,当车辆制动延时减少 30% 时,列车的 ATP 系统最小防护距离缩短 24.7%,单条停车线长度实际可减少 6 m。研究结果表明:通过缩短车辆制动延时,可有效减少列车的 ATP 系统最小防护距离,进而缩短停车线长度,减小停车列检库的占地面积。

**关键词** 城市轨道交通; 列车自动防护; 防护区段; 车辆参数; 延迟

**中图分类号** U231.6

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2022.04.023

ATP System Protection Distance Optimization Based on Vehicle Braking Delay

BU Dengbing, CHEN Shaowen

**Abstract** The urban rail transit ATP (automatic train protection) system protection distance calculation principle is expounded briefly. The ATP system minimum protection distance before and after optimization of vehicle braking delay time parameter is calculated and analyzed. Through calculation of actual project, when the vehicle braking delay is reduced by 30%, the ATP system minimum protection distance is shortened by 24.7%, and single parking line length can actually be reduced by 6.00 m. Research results show that by shortening vehicle braking delay, the ATP system minimum protection distance can be effectively shortened, further reducing parking line length and the area of parking inspection garage.

**Key words** urban rail transit; ATP (automatic train protection); protection section; vehicle parameter; delay

**Author's address** CASCO Signal Ltd., 200071, Shanghai, China

在全自动运行线路的自动化停车场或车辆段(以下简为“场段”)中,若要实现列车在停车列检库内自动准确停车,则停车列检库长度应能满足列车防护距离的要求。由于前期规划时尚未确定车辆

型号及信号制式,故停车场停车列检库长度设计中会考虑常规性预留。然而,在设计后期:如停车列检库长度过长,则会造成浪费;如停车列检库长度不能满足信号防护距离的要求,则会降低轨道的使用效率,并给实际运营过程增加了诸多限制。因此,应在规划前确定最小列车防护距离,可在满足信号系统防护距离的基础上,使线路规划更加精确。本文以自动化场段为例,对列车的 ATP(列车自动防护)系统防护距离进行优化,为提前精确确定最小停车列检库长度提供依据。

1 ATP 防护原理

在信号系统中,ATP 系统是保障列车安全的重要子系统,主要为线路上的列车提供安全防护。ATP 系统通过设置于线路中的 ZC(区域控制器)为每列列车计算其在最不利条件下也不会突破的 ATP 包络线。在列车实际运行中,如果列车运行速度曲线紧贴着 ATP 包络线,则会经常触发紧急制动,降低列车运行的平稳性。由于车辆制动存在延时,故可能出现超出前方限制点的危险场景。为了提高安全运行效率和舒适性,信号系统以 ATP 防护曲线为基础,根据列车能够输出的最小牵引制动加速度和制动延时,计算 ATP 紧急制动曲线、紧急制动触发曲线、ATO(列车自动运行)最佳命令曲线和 ATO 接近曲线,如图 1 所示。

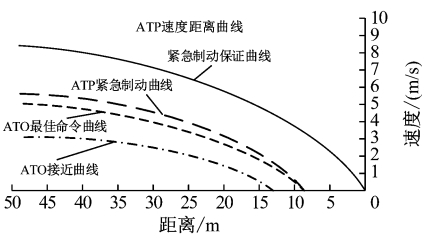


图 1 ATP 防护速度-距离曲线图

Fig.1 Speed and distance curve of ATP

## 1.1 ATP 紧急制动保证曲线

信号系统提供的列车安全运行保障,主要是防护列车在最不利条件下不能越过前方列车末端、禁止信号、未受控制的道岔及线路末端的车挡等限制点。假设车辆提供的保障制动加速度为  $a_1$ ,列车经过紧急制动后确保最终停在限制点前方,则 ATP 紧急制动保证曲线为:

$$v_1 = \sqrt{-2D_1(a_1 + a_2)} \quad (1)$$

式中:

$v_1$ ——紧急制动时的初速度,一般等于线路最高限速;

$D_1$ ——列车的紧急制动距离;

$a_2$ ——线路坡度产生的加速度。

## 1.2 列车紧急制动触发曲线

### 1.2.1 列车紧急制动延时分析

根据文献[1],列车执行紧急制动的过程可以划分为3个阶段:①列车响应切除牵引命令延时阶段,列车仍按照最高加速度运行,该阶段延时  $t_1$  约为 0.18 s;②列车施加制动延时的惰行阶段,列车处于惰行状态,该阶段延时  $t_2$  约为 0.35 s;③列车施加制动阶段,该阶段延时  $t_3$  约为 1.50 s,主要为车辆制动力从 0 增至 90% 最大制动力  $F_{\max}$  时的延时时间。

### 1.2.2 紧急制动触发曲线计算

紧急制动触发曲线以 ATP 紧急制动触发速度为上限。根据前文分析,从紧急制动命令发出至车辆牵引切除这段时间内,列车速度增加值为:

$$v_2 = t_1(a_1 + a_2) \quad (2)$$

式中:

$v_2$ ——车辆响应紧急制动命令延时时间后的列车速度。

列车从牵引切除到开始施加制动的过程中,列车处于减速运行状态,故仅考虑线路坡度带来的加速度  $a_2$ ,则这段时间列车速度增加值为:

$$v_3 = t_3 a_2 \quad (3)$$

式中:

$v_3$ ——车辆施加制动过程中列车速度。

为保证列车在延时时间内虽列车速度增加,却不触发紧急制动速度,结合式(1)、式(2)及式(3),设定列车紧急制动触发速度为:

$$v_4 = v_1 - (a_1 + a_2)t_1 - a_2 t_3 \quad (4)$$

式中:

$v_4$ ——列车紧急制动触发速度。

为保证列车不触发紧急制动,如列车速度达到

$v_4$ ,则 ATP 系统将先发出紧急制动提示,而列车继续增速则将会触发紧急制动。由此,ATP 紧急制动触发曲线为:

$$D_2 = D_1 + (v_4 t_1 + 0.5(a_1 + a_2)t_1^2) + (v_4 + (a_1 + a_2)t_1)t_3 + 0.5a_1 t_3^2 \quad (5)$$

式中:

$D_2$ ——列车制动过程中行驶的距离。

### 1.2.3 ATO 最佳命令曲线和 ATO 接近曲线

为提高列车运行效率,改善列车运行平稳性和乘客舒适度,列车一般在 ATO 系统自动驾驶模式下运行。ATO 系统根据 ATP 系统发送的紧急制动触发曲线信息和来自车辆的实时速度信息,实时计算列车最优 ATO 曲线,并给列车发送牵引制动命令,控制列车在正常情况下紧贴着紧急制动触发曲线运行。

由于车辆对 ATO 命令的延时响应,以及列车能输出的最小牵引制动加速度有限,故在列车自动运行中,ATO 系统需要根据 ATP 紧急制动曲线,计算出适合列车运行的 ATO 接近曲线,即按 ATP 最高运行速度减去因延时响应带来的列车增速。根据式(1)到式(5)计算,ATO 接近曲线为:

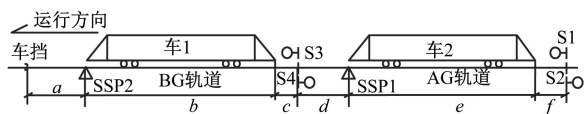
$$D_3 = \{[-v_1^2/(2(a_1 + a_2))]\} + (v_4 t_1 + 0.5(a_1 + a_2)t_1^2) + ((v_4 + (a_1 + a_2)t_1)t_3 + 0.5a_2 t_3^2) + (t_1 + t_3)\{v_1 - t_1(a_1 + a_2) - t_3 a_2\} \quad (6)$$

其中, $D_3$  为 ATO 列车最小停车距离。

## 2 防护距离优化

### 2.1 自动化场段信号系统的最小防护距离要求

图 2 为某停车列检库中双列位停车线的布置图,其中  $a$ 、 $d$  分别为车 1 及车 2 在运营停车点的最小 ATP 防护距离, $b$ 、 $e$  分别为车 1 及车 2 的列车实际长度, $c$ 、 $f$  分别为车 1 及车 2 车尾到折返信号机间最小距离。



注:S 为信号灯;SSP 为停车点。

图 2 双列位自动化停车场信号平面布置图

Fig. 2 Signaling layout plan of double stop tracks automated parking lot

为保证列车能在 AG 轨道上连续自动精确停车,AG 轨道长度需满足信号专业最低防护距离要

求,即在自动化停车场双列位停车线上,能满足列车在停车线上自动停车要求的最小轨道长度为:

$$L = 2(D_4 + D_5 + D_6) \tag{7}$$

式中:

- $L$ ——停车线最小长度;
- $D_4$ ——列车长度;
- $D_5$ ——ATP 防护距离;
- $D_6$ ——列车悬挂距离,取 2.5 m。

2.2 实际项目的最小防护距离优化

某全自动运行线路的列车长度为 140 m,场段内均采用双列位停车线配置。场段内线路坡度为 0,车辆提供的保障制动加速度为 0.85 m/s<sup>2</sup>,ATP 系统最小防护距离为 13.58 m,相关车辆延时参数见表 1。

表 1 某项目的车辆延时参数表

Tab.1 Vehicle delay parameters of certain project	
参数名称	时间/s
车辆响应制动命令延时	0.18
列车牵引切除延时	0.35
车辆制动力从 0 到 10% $F_{max}$ 时间	0.35
车辆制动力从 0 到 90% $F_{max}$ 时间	1.50

由表 1、式(6)及式(7)可得,该项目双列位停车线中单个股道长度至少为 312.16 m。在其他条件不变情况下,如果车辆的制动延时优化后缩短 30%,则列车防护距离相关计算参数如表 2 所示。

表 2 制动延时优化前后的 ATP 防护距离计算相关参数  
Tab.2 Parameters related to ATP protection distance calculation before and after braking delay optimization

参数	优化前	优化后
车辆保障制动加速度/(m/s <sup>2</sup> )	0.85	0.85
车辆最小输出制动加速度/(m/s <sup>2</sup> )	0.3	0.3
车辆响应制动命令延时/s	0.180	0.126
列车牵引切除延时/s	0.350	0.245
车辆制动力从 0 到 10% $F_{max}$ 时间/s	0.350	0.245
车辆制动力从 0 到 90% $F_{max}$ 时间/s	1.50	1.05
车辆最大牵引加速度/(m/s <sup>2</sup> )	1.564	1.564
停车线线路坡度/%	0	0
ATP 最小防护距离/m	13.58	10.22

由表 2、式(6)、式(7)可得,优化后列车停车线轨道最小长度为 305.44 m。

综上所述,在其他条件不变情况下,当车辆制

动延时缩短 30% 时,ATP 防护距离可降低 24.7%,单条停车线长度理论上能缩短 6.72 m,实际可减少 6 m。按照场段内有 55 条停车线的规模计算,根据土建测量结果,场地宽度可减少约 366 m,整个项目能节约占地面积约 2 460 m<sup>2</sup>。

3 结语

地铁建设尤其是车辆基地的建设,需占用大量土地资源。本文基于信号系统防护距离原理,探讨优化车辆制动延时参数对防护距离的影响。实际项目计算结果显示,当车辆制动延时减少 30% 时,基于 ATP 系统的列车防护距离缩短 24.7%,单条停车线长度实际可减少 6 m。进一步分析可知,在地铁建设前期,提前优化车辆制动延时,进而优化列车防护距离,可有效减少项目占地面积,提高土地利用率,进而有效缓解在地铁建设中因线路长度造成的社会和经济影响。

参考文献

[1] 黄苏苏,王芃,郑伟. 相对速度模式下的列车自动防护(ATP)紧急制动安全模型分析[J]. 城市轨道交通研究,2015(4):68. HUANG Susu, WANG Fan, ZHENG Wei. Analysis of ATP safety emergency braking model in velocity related mode[J]. Urban Mass Transit, 2015(4):68.

[2] 徐金祥,冲蕾. 城市轨道交通信号基础[M]. 北京:中国铁道出版社,2010. XU Jinxiang, CHONG Lei. Urban rail transit signaling basics [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2010.

[3] 中华人民共和国建设部. 地铁车辆通用技术条件:GB/T 7928—2003[S]. 北京:中国标准出版社,2003. Ministry of Construction of People's Republic of China. General technical specification for metro vehicles; GB/T 7928—2003[S]. Beijing: Standards Press of China, 2003.

[4] 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(增刊 2):76. YANG Zhi, WANG Donghai. The evaluation of vehicle parameters related to train emergency braking in CBTC signaling system[J]. Railway Signalling & Communication, 2016(S2):76.

[5] 邵洪民,段晨宁,尹逊政. 城轨交通 CBTC 关键技术——列车自动防护车载(ATP)子系统[J]. 现代城市轨道交通,2011(5):7. GAO Hongmin, DUAN Chenning, YIN Xunzheng. Urban transit CBTC key technologies: ATP onboard subsystem[J]. Modern Urban Rail Transit, 2011(5):7.

(收稿日期:2020-05-25)