

文章编号: 1005-8451 (2015) 03-0050-04

CBTC系统中保护区段的计算与优化

孟 军, 尹逊政, 李 亮

(中国铁道科学研究院 通信信号研究所, 北京 100081)

摘 要: 本文描述了CBTC系统中保护区段的作用和设置原则, 并结合ATP/ATO速度控制曲线推导了保护区段的长度计算模型。最后, 结合工程实施中的实际情况提出了2个优化保护区段设置的解决方案。

关键词: CBTC; 保护区段; ATO制动曲线; 站台保护距离优化

中图分类号: U284.482 : TP39 **文献标识码:** A

Computing and optimization of protection section in CBTC System

MENG Jun, YIN Xunzheng, LI Liang

(Signal & Communication Research Institute, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The paper described the function and principle of settings for protection section in CBTC System. Combined with ATP/ATO speed control curve, it was inferred the length calculation model. Considering the actual situation in engineering construction, two solutions were proposed for optimizing the settings of protection section.

Key words: CBTC; protection section; ATO brake curve; optimization of platform protection distance

随着自动化控制技术和通信技术的发展, 基于通信的列车控制系统 (CBTC 系统) 已经成为城市轨道交通信号系统的主流技术制式。目前已经开通或即将开通的使用 CBTC 系统的线路已达 70 余条。CBTC 系统的大量应用, 提高了列车控制的自动化水平, 降低了列车的运行间隔, 是列车控制技术的一次重大进步。

传统的基于轨道电路的信号系统, 受限于列车位置分辨率, 保护区段的划分只能以轨道电路为单位。在 CBTC 系统中, 保护区段的设置建立在列车精确定位的基础上, 可根据列车的运行曲线和线路条件进行精确的计算。

1 保护区段的设置原则

在 CBTC 中, 保护区段的设置是为了实现以下功能。

1.1 列车过冲保护

在 CBTC 的后备模式下, 司机以信号机显示为行车凭证。为了防止列车无法在信号机前正常停车而冲过信号机, 需要设置保护区段。

区间信号机一般都会设置保护区段, 保护区段的起点在信号机处, 终点在信号机后一定距离内。该距离综合考虑了信号机的显示距离、司机的反应时间和列车制动率等因素。区间信号机的保护区段设置一般不涉及土建设计, 对其长度无严格要求, 在满足列车追踪间隔情况下, 可根据线路设备布置情况适当延长。

1.2 列车高速接近信号机

为了提高后备模式的运行效率, CBTC 系统会根据站间闭塞原则设置出站信号机。在进站过程中, 需要在保证不触发 ATP 保护速度曲线的前提下, 按照制动速度曲线平稳地控制列车运行, 并准确停站。为了保证 ATO 或司机控制列车能够不受 ATP 保护速度影响正常进站停车, 需要将安全停车点放置于站台停车点后方一定距离处, 而这个距离就是保证列车高速接近信号机的保护区段。

出站信号机和折返轨信号机都需要设置保护区段, 保护区段的起点在信号机处, 终点为列车移动授权中的安全停车点。保护区段的长度由 ATP 的保护速度曲线模型、ATO 的列车控制曲线计算模型、站台限速等条件决定。

过短的保护距离会导致 ATO 系统在控车过程中

收稿日期: 2014-08-20

作者简介: 孟 军, 助理研究员; 尹逊政, 助理研究员。

触发 ATP 保护速度引起紧急制动。过长的保护距离则会影响站后岔区和尽头线的设计，会降低运营效率并增加土建成本。在工程实施中，该保护区段的长度是 CBTC 系统的一个重要的性能指标。本文将就如何计算最优的保护距离进行讨论，并针对站场设计中无法满足该距离的情况提出合理的解决方案。

2 保护区段的计算原理

保护区段的设置实际上就是通过把安全停车点和正常制动停车点拉开合理的距离来保证 ATO 制动速度曲线始终处于 ATP 保护速度曲线下方，并间隔一定的速度缓冲区（设为 ΔV ）。因此，计算站台保护距离首先要得到 ATP 保护速度曲线和 ATO 制动速度曲线模型，之后针对两条曲线模型进行分析，推导出最小保护距离计算的方法。

2.1 速度曲线计算模型

ATP 系统根据安全制动模型，在最不利条件下（考虑 ATP 系统在施加紧急制动时，列车在切除牵引前以当时最大加速度行驶产生的速度增量，以及有效制动施加前在最大下坡上行驶产生的速度增量）计算保护速度曲线，如式（1）：

$$V_{ATP_S} = K_0 + \sqrt{V_{ATP_T}^2 - 2a_{eb}S_{ATP} + 2\frac{M_p}{M_i}gh_{ATP} + K_1} \quad (1)$$

其中：

$$K_0 = -(a_aT_a - a_{eb}T_a - a_{eb}T_c) - K_m = a_{eb}(T_a + T_c) - a_aT_a - V_m$$

$$K_1 = (a_{eb}(T_a + T_c)^2 - a_aT_a^2) \cdot (a_{eb} + a_{gmin})$$

ATO 系统根据能量守恒原理使用恒定减速度计算制动速度曲线，如式（2）：

$$V_{ATO_S} = \sqrt{V_{ATO_T}^2 - 2a_{brake}S_{ATO} + 2\frac{M_p}{M_i}gh_{ATO}} \quad (2)$$

式（1）、式（2）中的变量如表 1 所示。

2.2 站台保护距离计算模型

由速度模型可以得到 ATP 保护速度曲线和 ATO 站台制动速度曲线，当安全停车点和站台停车点重合时，会导致 ATO 制动速度曲线全部或部分处于 ATP 保护速度曲线上方，如图 1 所示。图中 ATO 触发制动曲线是通过将 ATP 的保护速度降低 ΔV （速度缓冲区）之后得到的，该曲线将作为 ATO 制动速度曲

表 1 速度曲线模型变量说明

V_{ATP_S}	ATP当前位置允许速度	M_l	动态质量
V_{ATP_T}	ATP目标点允许速度	M_p	静态质量
a_a	当前速度下列车牵引力产生的最大加速度	V_m	测速的不确定性
a_{eb}	紧急制动加速度	V_{ATO_S}	ATO当前位置目标速度
a_{gmin}	当前位置车尾与限速点之间最大下坡产生的等效加速度	V_{ATO_T}	ATO目标点的目标速度
S_{ATP}	ATP到安全点的距离	a_{brake}	ATO制动加速度
T_a	紧急制动初始化和牵引力切断之间的最大时延	S_{ATO}	ATO到站台停车点的距离
T_c	牵引力切断和有效紧急制动施加之间的最大时延	h_{ATO}	当前点和站台停车点的高度差
h_{ATP}	当前点和安全点的高度差		

线的上限。

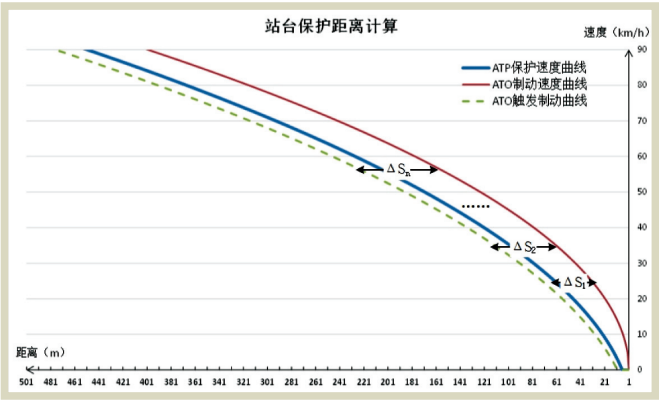


图 1 站台保护距离计算

在不同速度下，可以得到 ATO 制动速度曲线和 ATO 触发制动曲线间的一组距离差，即图 1 中的 $\Delta S_1, \Delta S_2 \cdots \Delta S_n$ ，设其中最大的一个为 ΔS_x 。如果将 ATO 制动速度曲线向左平移 ΔS_x ，可以使 ATO 制动速度曲线处于 ATO 触发制动曲线下方，移动的距离 ΔS_x 即为保护区段的长度。

因此，计算最小站台保护距离长度的问题就转换为：计算相同速度下 ATO 制动速度曲线与 ATO 触发制动曲线间最大距离差的问题。

2.3 站台保护距离的计算

根据速度曲线模型，考虑最不利情况下（车在下坡上）高度差 h_{ATP} 和 h_{ATO} 可表示坡度 α 和距离 S 的关系，当 $V_{ATP_S} = V_{ATO_S} + \Delta V$ 时，由式（1）、式（2）可得到 S_{ATP} 和 S_{ATO} 的差，如式（3）：

$$S_{ATP}-S_{ATO}=\frac{V_{ATO_T}^2-(K_0-\Delta V)^2-2(K_0-\Delta V)\sqrt{V_{ATP_T}^2-2S_{ATP}(a_{eb}-\frac{M_p}{M_i}g\alpha)+K_1}-(V_{ATP_T}^2-2S_{ATP}(a_{eb}-\frac{M_p}{M_i}g\alpha)+K_1)}{2(a_{brake}-\frac{M_p}{M_i}g\alpha)}\quad (3)$$

对实际需求提出合理的解决方案。

化简后可以得到式 (4):

$$S_{ATP}-S_{ATO}=S_{ATP}-A+B\sqrt{C+DS_{ATP}}+\frac{(C+DS_{ATP})}{E}\quad (4)$$

其中: $A=\frac{V_{ATO_T}^2-(K_0-\Delta V)^2}{E}$, $B=\frac{2(K_0-\Delta V)}{E}$,

$$C=V_{ATP_T}^2+K_1。$$

其中: $D=-2(a_{eb}-\frac{m_p}{m_i}g\alpha)$, $E=2(a_{brake}-\frac{m_p}{m_i}g\alpha)$

求式 (4) 的极值, 令 $y=S_{ATP}-S_{ATO}$, $x=C+DS_{ATP}$ 即得到式 (5):

$$y=\frac{x-C}{D}-A+Bx^{\frac{1}{2}}+\frac{x}{E}\quad (5)$$

求式 (5) 的极值点即得到式 (6):

$$x=(\frac{BDE}{2B+2E})^2\quad (6)$$

带入 S_{ATP} 即可得到式 (7):

$$S_{ATP}=\frac{(\frac{BDE}{2B+2E})^2-C}{D}\quad (7)$$

对式 (5) 求二次导, 即得到式 (8):

$$y''=-\frac{1}{4}Bx^{-\frac{3}{2}}\quad (8)$$

将各参数带入式 (8), 即可得到该值小于 0, 因此满足式 (7) 的极值点为极大值。

将式 (8) 带入式 (4) 即可得到 S_{ATP} 和 S_{ATO} 差的极大值, 若该值为正数, 即为 ATO 保护区段的长度。

如图 2 所示, 根据计算结果将 ATO 制动速度曲线向左移动最小保护区段的长度后, ATO 制动速度曲线不再受 ATP 保护速度曲线的影响。

3 工程应用中的保护区段优化策略

在实际站场设计中, 某些车站受制于站后道岔位置、尽头线长度、土建情况等因素, 实际可用的站台保护距离无法满足理论计算结果的要求, 因此需要根据计算模型分析出影响站台保护距离长度的因素, 针

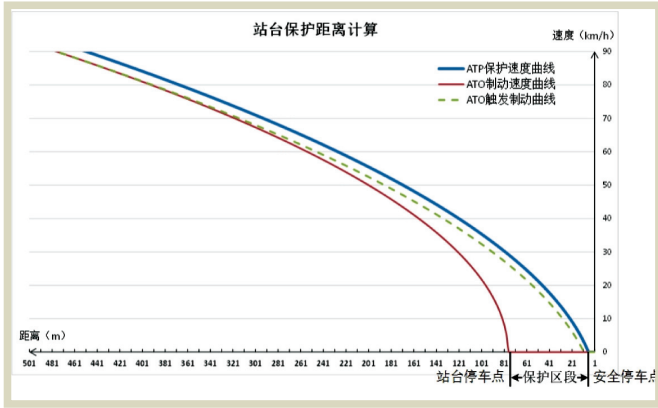


图 2 站台保护距离计算

通过对计算模型和数据的分析, 可以得到保护距离的长度主要受到 ATP 与 ATO 两条曲线的贴合程度影响, 由图 1 可知, ATP 保护速度曲线不变的情况下 ATO 制动速度曲线越平缓, ΔS_x 越短, 即最小站台保护距离越短。由图 2 可知, 若将计算范围限定在一定的速度下时, 站台保护距离还可以进一步减小。

因此有以下两种解决方案可以用来降低站台保护距离长度的要求:

- (1) 减小某些车站的进站制动率;
- (2) 降低某些车站的站台限速。

3.1 减小进站制动率

ATP 保护速度曲线模型的相关参数是基于最不利情况下导向安全而设定的, 是不可改变的。而 ATO 制动速度曲线模型中的制动率 a_{brake} 主要考虑车辆参数、控制精度、运营效率以及乘坐舒适性, 该参数根据系统设计在一定范围内是可变的。减小 ATO 停车制动率能够使图 1 中的两条曲线更加贴合, 这样做虽然会在一定程度上降低系统的运营效率, 但是可以显著地降低保护区段长度的要求。如图 3 所示, ATO 系统采用 -0.8 m/s^2 制动率时要求保护距离为 S_1 , 使用 -0.7 m/s^2 制动率时要求保护距离为 S_2 , S_2 较 S_1 有明显的缩短。

3.2 降低站台保护速度

由图 2 的数据可以看到 ATO 制动速度曲线与 ATO 触发制动曲线在大约 90 km/h 处相交, 随着速

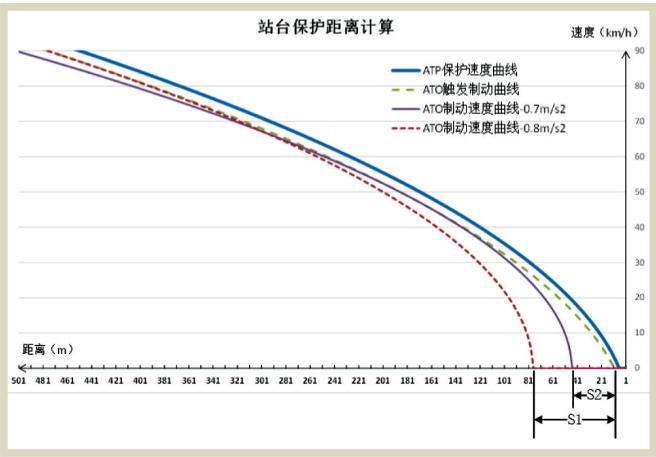


图 3 不同制动率的保护距离

度降低，两条曲线相距越远，因此当限速值小于交叉点速度值时可以缩短站台保护距离，限速越低要求的保护距离越小。如图 4 所示，站台限速为 65 km/h 时要求保护距离为 S1，站台限速为 50 km/h 时要求保护距离为 S2，S2 较 S1 有所缩短。

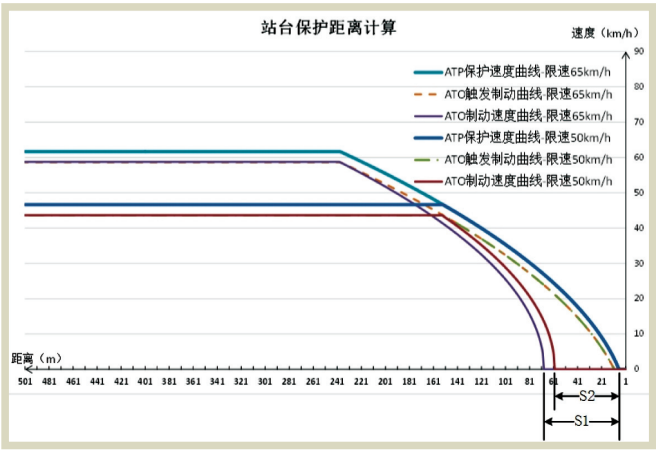


图 4 不同站台限速的保护距离

3.3 方案对比

如表 2 所示，两种方案都是通过降低运营效率来减小对站台保护距离的要求，但是降低站台制动率的方案效果更加明显（运营效率降低较小，最小保护距离减少较多），并且降低进站制动率更加有利于控车的准确性和列车运行的舒适性。因此在实际工程应用中可以优先考虑降低某些站台制动率的方案，并根据实际情况进行调整。

4 结束语

本文针对 CBTC 系统下保护区段的设置原则进

表 2 方案比较

	到站台 距离(m)	站外限速 (km/h)	140m站台 限速(km/h)	制动率 (m/s²)	制动时间 (s)	最小保护 距离(m)
原参数	300	80	80	-0.8	33.5	75
降制动率	300	80	65	-0.7	36.8	45
降限速	300	80	50	-0.8	37.1	59

行了论述，并重点对站台区域的保护距离计算原理、计算方法进行了详细计算，最终得出站台保护距离的计算模型。通过对保护距离计算结论的分析，针对实际站场设计中无法满足理论保护距离的问题提出了合理的解决方案。

本模型的提出，为保护区段长度、线路限速设计和列车运行曲线选择等相互影响的因素提供了量化评估方法。在工程实施中，可使用本模型对站台区域的保护区段长度进行评估和优化，有利于在保证运营质量的前提下合理地规划线路设计、降低土建成本。

参考文献:

[1] Rail Transit Vehicle Interface Standards Committee of the IEEE Vehicular Technology Society. IEEE 1474.1TM-2004 IEEE Standard for Communication-based Train Control(CBTC) Performance and Functional Requirements[S].the United States of America: the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2005 (2): 32-34.

责任编辑 方 圆

