

文章编号:1001-8360(2011)08-0069-04

# 基于 CBTC 的车载 ATP 安全制动曲线计算模型研究

林 颖, 王长林

(西南交通大学 信息科学与技术学院, 四川 成都 610031)

**摘 要:**车载 ATP 系统是保证列车运行安全的系统,其中的关键技术之一是安全制动曲线计算模型。根据 IEEE 1474.1<sup>TM</sup> 标准的规定<sup>[1]</sup>,车载 ATP 安全制动曲线由 GEBR 制动曲线和 ATP 紧急制动触发曲线组成。GEBR 制动曲线是根据 GEBR 计算得出的,而 ATP 紧急制动触发曲线则是根据 GEBR 制动曲线计算出来的。针对该问题,本文分析了各种影响列车制动距离的因素和 GEBR 制动曲线与 ATP 紧急制动触发曲线的关系,建立了 CBTC 车载 ATP 安全制动曲线的计算模型。仿真证明,本文提出的计算模型满足 IEEE 1474.1<sup>TM</sup> 基于 CBTC 的车载 ATP 安全制动模型的要求。

**关键词:**车载 ATP; GEBR 制动曲线; ATP 紧急制动触发曲线

**中图分类号:** U283.1 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-8360.2011.08.012

## Computational Model of Safe Braking Curve of Onboard ATP Based on CBTC

LIN Ying, WANG Chang-lin

(School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The onboard ATP system is the system which protects train running safety. One of its key technologies is the computational model of the safe braking curve. According to IEEE 1474.1<sup>TM</sup>, the on-board ATP safe braking curve is made up of the GEBR braking curve and the ATP emergency brake triggering curve. The GEBR braking curve is calculated by GEBR and the ATP emergency brake triggering curve is calculated by the GEBR braking curve. This paper analyzes various factors influencing the train braking distance and the relationship between the GEBR braking curve and the ATP emergency brake triggering curve, and establishes the computational model of safe braking curve of onboard ATP based on CBTC. Simulation proves that the model of this paper satisfies the IEEE 1474.1<sup>TM</sup> requirements for the safe braking model of onboard ATP based on CBTC.

**Key words:** Onboard ATP; GEBR braking curve; ATP emergency brake triggering curve

车载 ATP 系统是保证列车运行安全的系统。安全制动曲线的计算模型是其中的关键技术之一。安全制动曲线是根据列车制动性能、线路条件等因素采用列车牵引计算得到的。通过列车安全制动曲线,车载 ATP 能够实时地监控列车的运行速度,保障列车的安全运行。根据 IEEE 1474.1<sup>TM</sup> (IEEE Standard for Communications-Based Train Control (CBTC) Per-

formance and Functional Requirements)标准规定,车载 ATP 安全制动曲线由 GEBR (Guaranteed Emergency Brake Rate) 制动曲线和 ATP 紧急制动触发曲线组成,如图 1 所示。

GEBR 制动曲线是根据 GEBR 计算的。GEBR 是指综合一系列环境条件和列车在行驶条件确定最坏情况下制动设备失效时,列车在正线行驶所达到的最小紧急制动水平,其中包括了对最大载客量(合理的冰雪路面条件)、最小黏着力和最大顺风等因素的考虑<sup>[1]</sup>。

收稿日期:2009-10-10;修回日期:2009-12-24  
基金项目:国家自然科学基金资助项目(60776832)  
作者简介:林 颖(1983-),男,四川成都人,博士研究生。  
E-mail:linyng19830130@163.com

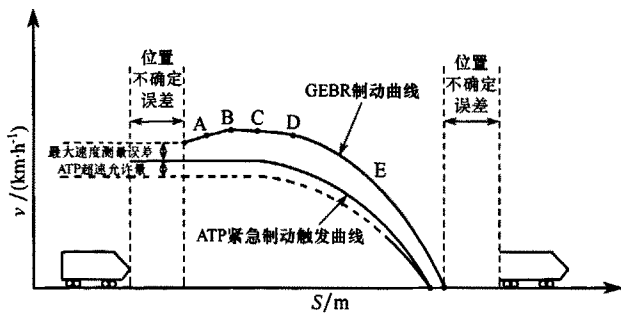


图 1 CBTC 安全制动模型示意图

ATP 紧急制动触发曲线则是根据 GEBCR 制动曲线计算出来的。当列车速度超过 ATP 紧急制动触发曲线时,列车开始制动,并使列车能够在 GEBCR 制动曲线以下制动运行,保障列车的运行安全。

### 1 GEBCR 制动曲线计算模型

GEBCR 制动曲线是列车安全制动模型的关键组成部分之一,它以 GEBCR 作为计算依据。GEBCR 是指综合一系列环境条件和在列车行驶条件确定的最不利情况下制动设备失效时,列车在正线行驶所达到的最小紧急制动水平,其中包括了对最大载客量(合理的冰雪路面条件)、最小黏着力和最大顺风等因素的考虑<sup>[1]</sup>。

设列车牵引计算速度步长为  $\Delta v$  (km/h),列车的满载质量为  $M$  (t),列车制动力为  $f$  (kN),列车基本阻力为  $w$  (N/kN),列车坡道附加阻力为  $w_i$  (N/kN),列车曲线附加阻力为  $w_r$  (N/kN),列车隧道附加阻力为  $w_s$  (N/kN),由于顺风造成的阻力为  $w_w$  (N/kN),列车回转质量系数为  $\gamma$ ,列车最不利情况下的黏着系数为  $\mu$ ,重力加速度为  $g$ ,列车制动初速度为  $v_1$  (km/h),列车制动末速度为  $v_2$  (km/h)。根据列车牵引计算,GEBCR 制动曲线计算模型如下:

#### (1) 判断当前制动力下的列车运行状态

通过列车受力分析可知,此时列车所受的制动力  $F_{\text{合}}$ ,轮轨间的黏着力  $F_{\text{黏}}$  分别为

$$F_{\text{合}} = \frac{f}{Mg} + w + w_i + w_r + w_s + w_w \quad (1)$$

$$F_{\text{黏}} = 1\,000 \cdot \psi \cdot M \quad (2)$$

若  $F_{\text{合}} < F_{\text{黏}}$ ,列车处于正常运行状态;若  $F_{\text{合}} \geq F_{\text{黏}}$ ,列车处于滑行状态。

其中,列车的黏着系数可由黏着系数计算模型求得。当列车在曲线半径  $R$  小于 600 m 的线路上运行时,需要对黏着系数进行修正。

$$\psi' = \psi \cdot (0.67 + 0.00055R) \quad (3)$$

#### (2) 列车正常运行状态下的速度、时间变化计算

若列车处于正常运行状态,则此时列车的制动力为  $F_{\text{合}}$ 。假设列车在一个速度间隔  $\Delta v$  ( $v_2 - v_1$ ) 内

制动力不随速度变化而变化,根据列车牵引计算<sup>[2]</sup>可得列车的距离增量  $\Delta S$  和时间增量  $\Delta t$  为

$$\Delta S = \frac{1\,000 \cdot (1 + \gamma) \cdot (v_2^2 - v_1^2)}{25.92 \cdot g \cdot \left( \frac{f}{Mg} + w + w_i + w_r + w_s + w_w \right)} \quad (4)$$

$$\Delta t = \frac{1000 \cdot (1 + \gamma) \cdot (v_2^2 - v_1^2)}{3.6 \cdot g \cdot \left( \frac{f}{Mg} + w + w_i + w_r + w_s + w_w \right)} \quad (5)$$

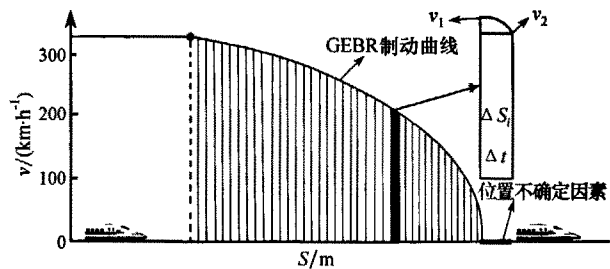


图 2 GEBCR 制动曲线计算原理

#### (3) 列车滑行状态下的速度、时间变化计算

现在高速动车组列车的制动系统一般都有防滑装置,当列车出现滑行时,该装置就会启动。再生制动控制单元是通过控制再生制动的模式曲线(减小制动力),而空气制动控制单元则采用降低增压缸压力的方法来进行滑行再黏着的控制<sup>[3]</sup>。

当列车所受制动力大于黏着力时,列车发生滑行,此时防滑装置启动。防滑装置会逐渐减小列车所施加的制动力,直到列车所受制动力小于等于黏着力,恢复轮轨间的黏着状态。此后该状态保持一定时间后制动系统恢复通常控制。若制动力再次大于黏着力,防滑装置又将再次启动<sup>[3]</sup>。

当车载 ATP 下达制动指令之后,若列车制动力大于黏着力,列车滑行状态与正常运行状态将交替出现。在该种运行工况下,列车所受的制动力在  $F_{\text{滑}} \sim F_{\text{黏}}$  范围内不停地改变<sup>[3]</sup>。此时列车所受制动力合力受到黏着力、防滑装置、线路条件等因素的影响,很难针对这种情况建立相应的数学模型。

列车发生滑行时所受的制动力为滑动摩擦力,其对列车产生的制动效果要远远小于正常制动时的效果。因此,为了保证列车的安全运行,考虑最不利情况,本文假设一旦列车的制动力大于黏着力时,列车就一直处于滑行状态,直到制动力小于等于黏着力时才恢复正常制动。因此,当列车出现滑行时,列车所受制动力即为列车的滑动摩擦力  $F_{\text{滑}}$ 。

$$F_{\text{滑}} = F_{\text{滑}} = \Phi \cdot M \cdot g \quad (6)$$

式中,  $\Phi$  为列车滑动摩擦系数。

列车的滑动摩擦系数一般与接触物体的材料、表

面光滑程度、干湿程度、表面温度、相对运动速度等都有关系,目前国内一般取列车滑动摩擦系数  $\Phi = 0.002$

此时,根据列车牵引计算<sup>[2]</sup>可得列车的距离增量  $\Delta S$  和时间增量  $\Delta t$  为

$$\Delta S = \frac{1\,000 \cdot (1 + \gamma) \cdot (v_2^2 - v_1^2)}{25.92 \cdot g \cdot \Phi \cdot M \cdot g} \quad (7)$$

$$\Delta t = \frac{1\,000 \cdot (1 + \gamma) \cdot (v_2^2 - v_1^2)}{3.6 \cdot g \cdot \Phi \cdot M \cdot g} \quad (8)$$

#### (4) GEBR 制动距离计算

列车的制动过程是一个连续变化的过程,本文使用迭代法按照取速度步长的方式计算列车在不同速度间隔内的走行距离,将这些走行距离相加即可得到 GEBR 制动距离为

$$S = \sum_{i=0}^n \Delta S_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

## 2 ATP 紧急制动触发曲线计算模型

根据 IEEE 1474.1<sup>TM</sup> 规范可知,ATP 紧急制动触发曲线是根据 GEBR 制动曲线计算得来的。如图 1 所示,ATP 紧急制动触发曲线和 GEBR 制动曲线之间的距离随着速度的降低而减小。为了保证列车速度超过 ATP 紧急制动触发曲线后能在 GEBR 制动曲线下安全制动运行,必须考虑列车速度的误差来计算 ATP 紧急制动触发曲线<sup>[4]</sup>。

设 ATP 超速允许量为  $v_p$ , 最大速度测量误差为  $\lambda$ , ATP 设备反应时间为  $t_{ATP}$ , 牵引切除时间为  $t_q$ , 制动建立时间为  $t_z$ , 制动建立额外时间为  $t_e$ , 最大牵引加速度为  $a_q$ , 最大惰行加速度为  $a_d$ , GEBR 制动曲线的速度集合为  $\{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$ , 与速度对应的位置集合为  $\{s_1, s_2, s_3, \dots, s_n\}$ , 由此可得 ATP 紧急触发曲线计算模型如下:

设 GEBR 曲线上一点速度为  $v_i$ , 对应的位置为  $s_i$ , 则考虑在最不利的情况下,通过 GEBR 曲线上的速度和位置反算该点对应 ATP 紧急制动触发曲线上的速度  $v_i^{ATP}$  为

$$v_i^{ATP} =$$

$$v_i + a_d \cdot (t_z + t_e) - (a_q + a_d) \cdot (t_{ATP} + t_q) \quad (10)$$

根据公式(10)可计算该点对应 ATP 紧急制动触发曲线上的位置  $s_i^{ATP}$  为

$$s_i^{ATP} = s_i - \left[ v_i(t_z + t_e) + \frac{1}{2} a_d(t_z + t_e)^2 \right] - \left[ [v_i + a_d(t_z + t_e)] \cdot (t_{ATP} + t_q) - \frac{1}{2} a_q \cdot (t_{ATP} + t_q)^2 \right] \quad (11)$$

根据 GEBR 制动曲线速度集合  $\{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$ ,

位置集合  $\{s_1, s_2, s_3, \dots, s_n\}$  以及式(10)、式(11),可计算出 GEBR 曲线对应的 ATP 紧急制动触发曲线速度集合为

$$\{v_1^{ATP}, v_2^{ATP}, v_3^{ATP}, \dots, v_n^{ATP}\}$$

与之对应的位置集合为

$$\{s_1^{ATP}, s_2^{ATP}, s_3^{ATP}, \dots, s_n^{ATP}\}$$

最后根据速度、位置集合可得 ATP 紧急制动触发曲线。

## 3 仿真与分析

为了验证模型的可用性,本文在自主研发的车载三取二安全平台上以 CRH3 型动车组做了模型仿真。仿真参数由动车组生产厂商提供,具体如下:列车定员质量为 408.5 t,回转质量系数 0.08,紧急制动建立时间 2.0 s,紧急制动建立额外时间 1.5 s,ATP 响应延迟 0.8 s,牵引切除时间 0.8 s,黏着特性曲线、紧急制动特性曲线如图 3 和图 4 所示。

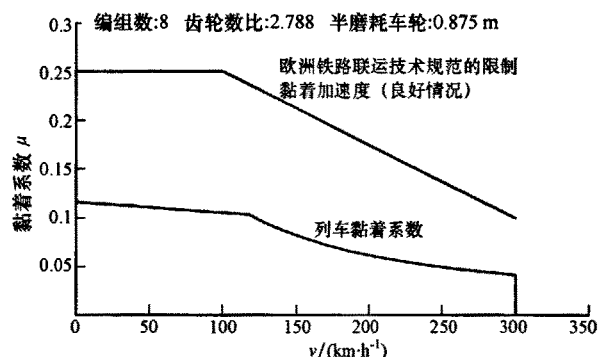


图3 CRH3 型动车组黏着特性曲线

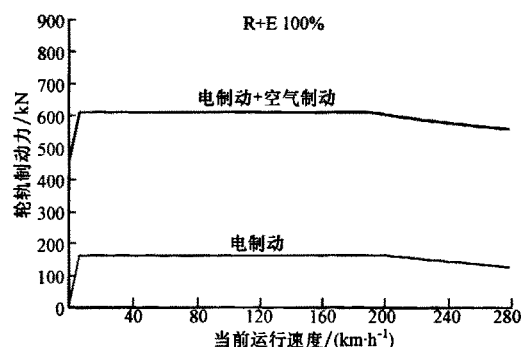


图4 CRH3 型动车组紧急制动特性曲线

本模型采用对 CRH3 型动车组进行仿真,得到 GEBR 制动曲线以及 ATP 紧急制动触发曲线如图 5 所示。

从图 5 可以看出,随着速度的增加,ATP 紧急制动触发曲线与 GEBR 曲线之间的距离也越来越大,满足了 IEEE 1474.1<sup>TM</sup> 标准提供的安全制动模型的要求。

为了验证模型的可用性,将仿真计算的 GEBR 曲线制动距离、未考虑滑行影响的制动距离与动车组厂

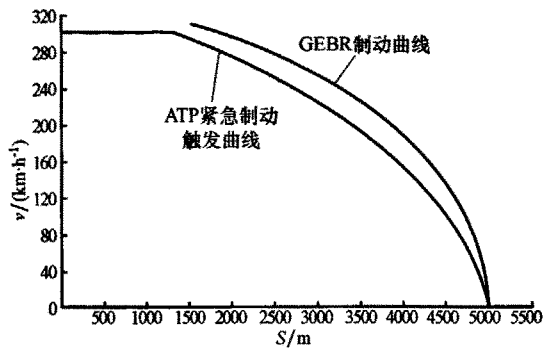


图 5 CRH3 型动车组仿真曲线

商提供的紧急制动距离数据在 6 个速度等级下进行比较,结果见表 1。从表 1 可以看出,考虑了列车滑行影响的计算模型所计算的列车制动距离与列车的实际制动距离误差更小,且控制在 1% 的范围内,从而可以缩短列车安全防护距离,缩短列车追踪间隔时间,提高铁路运输效率。

表 1 仿真结果

制动初速 /(km·h <sup>-1</sup> )	厂商提供 的制动距 离/m	考虑了滑 行影响 的制动距离/m	与厂商提 供的数据 误差/%	未考虑滑 行影响 的制动距离/m	与厂商提 供的数据 误差/%
300	3 470.00	3 495.00	+0.720	3 410.00	-1.730
260	2 595.73	2 614.50	+0.723	2 565.50	-1.165
200	1 475.56	1 484.00	+0.572	1 455.50	-1.360
160	960.62	967.50	+0.716	948.50	-1.262
120	569.71	572.50	+0.490	561.50	-1.441
80	275.74	277.00	+0.460	272.00	-1.356

## 5 结束语

车载 ATP 安全制动曲线的计算是车载 ATP 安全制动模型的重要组成部分之一,其关键是列车牵引计算的准确性。当列车发生滑行时,列车所受制动力减小,制动距离延长,使列车安全制动曲线与列车实际制动曲线产生较大的误差。针对该问题,本文提出基于滑行补偿的计算模型来修正当列车可能出现滑行时所造成的误差,保证列车的运行安全。仿真证明,本模型考虑了列车发生滑行对列车牵引计算的影响,所计算的安全制动距离与列车实际制动距离的误差更小。由于不同的滑行程度对列车牵引计算造成的影响不同,本文未对此进行进一步探讨,这是本文不足之处,将在后续工作中做进一步研究。

## 参考文献:

- [1] Rail Transit Vehicle Interface Standards Committee of the IEEE Vehicular Technology Society. IEEE 1474.1™ IEEE Standard for Communications-based Train Control (CBTC) Performance and Functional Requirements[S], the United States of America; the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2005. 2: 18-19.
- [2] 中华人民共和国铁道部. TB/T 1407—1998 列车牵引计算规程[S]. 北京:中国铁道出版社,1998: 2-12.
- [3] 彭俊彬. 动车组牵引与制动[M]. 北京:中国铁道出版社, 2007:49-51,97.
- [4] Siemens Ltd. China TS. TRAINGUARD® MT ATC System For Chengdu Metro Line 1 BOOK II: ATP & ATO [Z]. Guangzhou, China. Siemens Ltd. China TS, 2006: 44-47.

(责任编辑 魏京燕)

基于CBTC的车载ATP安全制动曲线计算模型研究



作者：[林颖](#)，[王长林](#)，[LIN Ying](#)，[WANG Chang-lin](#)  
作者单位：[西南交通大学信息科学与技术学院, 四川成都, 610031](#)  
刊名：[铁道学报](#) [ISTIC](#) [EI](#) [PKU](#)  
英文刊名：[Journal of the China Railway Society](#)  
年，卷(期)：2011, 33(8)  
被引用次数：2次

参考文献(4条)

1. [Rail Transit Vehicle Interface Standards Committee of the IEEE Vehicular Technology Society](#) [IEEE 1474.1TM IEEE Standard for Communications-based Train Control \(CBTC\)Performance and Functional Requirements](#) 2005  
2. [中华人民共和国铁道部](#) [TB/T 1407-1998. 列车牵引计算规程](#) 1998  
3. [彭俊彬](#) [动车组牵引与制动](#) 2007  
4. [Siemens Ltd, China](#) [TS TRAINGUARD\(R\) MT ATC System For Chengdu Metro Line 1 BOOK II :ATP &-ATO](#) 2006

本文读者也读过(8条)

1. [刘芳](#) [论地铁信号ATS系统的功能](#)[期刊论文]-[城市建设理论研究（电子版）](#) 2011(22)  
2. [列车自动保护系统](#)[期刊论文]-[中国仪器仪表](#)2011(8)  
3. [周嘉煜](#) [列车通过曲线限制速度浅析](#)[期刊论文]-[广西大学学报（哲学社会科学版）](#) 2008, 30(z1)  
4. [赵博](#) [移动闭塞模式下越江区间列车最小追踪间隔研究](#)[期刊论文]-[铁道通信信号](#)2011, 47(9)  
5. [何泳斌](#) [基于移动闭塞的列车自动保护系统的安全设计](#)[期刊论文]-[交通世界（运输车辆）](#) 2009(9)  
6. [陈志英](#) [移动闭塞条件下列车运行](#)[学位论文]2000  
7. [曹建堂](#), [黄磊](#), [高元生](#), [毛耀](#) [关于北京地铁大兴线信号系统及与4号线一次贯通运营无线CBTC移动闭塞ATO系统的工程实践](#)[期刊论文]-[城市轨道交通研究](#)2011, 14(7)  
8. [孙震铎](#), [SUN Zhen-shuo](#) [列车安全速度防护曲线的分析与仿真](#)[期刊论文]-[电脑知识与技术](#)2009, 5(1)

引证文献(2条)

1. [胡臣](#), [王长林](#) [车载紧急制动触发曲线计算模型分析](#)[期刊论文]-[交通科技与经济](#) 2013(3)  
2. [邓子渊](#) [城轨车载ATP系统的仿真设计与实现](#)[期刊论文]-[铁道通信信号](#) 2013(2)

本文链接：[http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_tdx201108012.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_tdx201108012.aspx)