

动车组制动计算方法研究

朱文良, 吴萌岭

(同济大学 铁道与城市轨道交通研究院, 上海 201804)

摘要: 根据动车组制动系统的制动减速度特性, 运用列车牵引制动计算和运动学的相关理论, 研究了动车组的制动计算方法, 对动车组的制动近似算法产生的误差进行分析. 基于目标减速度、单位基本阻力和单位坡道阻力等相关参数, 给出了适用于动车组的制动计算方法, 通过与 CRH6A 型动车组制动系统的性能型式试验实测数据进行对比分析, 验证了计算方法的正确性. 研究结果表明, 该方法理论上能够计算出制动时间和制动距离的准确值, 计算结果与试验结果具有良好的 consistency, 可满足制动计算的要求, 为动车组制动系统的研发设计和系统优化提供依据.

关键词: 动车组; 制动计算; 制动距离; 制动时间

中图分类号: U270.35

文献标志码: A

Braking Calculation of Electric Multiple Units (EMUs)

ZHU Wenliang, WU Mengling

(Institute of Rail Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The traction and braking calculation and kinematics related theories were used in the study of the electric multiple units (EMUs) braking calculation method. According to the deceleration characteristic of the EMUs braking system, the error of the approximate braking calculation was analyzed. The EMUs calculation method was proposed based on target deceleration, unit basic resistance, gradient resistance, and other related parameters. This method is proved correct in comparison with the system performance type test data of CRH6A EMUs. The result shows that the calculated braking time and braking distance are consistent with the test result, which is effective to support the design and development of EMUs.

Key words: electric multiple units (EMUs); braking calculation; braking distance; braking time

常规普通客货列车制动距离的计算是根据《列车牵引计算规程》(以下简称《牵规》)中的方法, 由列车管减压量求出单位制动力, 然后采用分段累计法来计算制动距离和制动时间. 国内动车组的制动技术大多是从国外引进, 鉴于商业机密, 不能获取其制动计算的算法和思路. 动车组综合应用多种制动方式, 根据国外及我国合资生产的动车组制动特性的现有资料, 制动计算中的某些参数无法确定, 不能使用既有公式进行计算.

当前我国没有适用于动车组的统一制动计算规程, 文献[1-3]等根据动车组的制动减速度参数, 套用《牵规》中的公式, 运用匀减速运动原理, 在一个速度间隔内按照算术平均减速度对应的单位制动力来计算整个速度间隔内的有效制动距离. 但根据动车组的制动特性可知其制动过程是变减速运动, 因此这种近似计算方法会造成较大误差^[4].

本文根据动车组的制动减速度特性, 运用变减速的运动学原理, 对动车组的制动计算进行研究, 分析近似计算方法中误差产生的原因, 并给出制动距离、制动时间准确值的理论计算公式, 为动车组制动系统的设计提供参考依据.

1 列车制动计算方法原理

通常情况下, 制动计算时将整个列车视为一个刚性系统, 则按动能定律(系统动能的微分等于该系统合力做功的微分)可推导出列车运动的微分方程. 对列车制动过程来说, 其动能的减少量等于作用于列车的总制动力所做的功^[4]. 由此可得列车在速度间隔 $[v_1, v_2]$ 内的有效制动时间 Δt 和有效制动距离 Δs 为

$$\Delta t = \int_{t_1}^{t_2} dt = -\frac{1000(1+\gamma)}{3.6g} \cdot \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{b + \omega_0 + i_j} \quad (1)$$

收稿日期: 2016-03-14

基金项目: 国家自然科学基金(U1534205);“十二五”国家科技支撑计划(2015BAG12B01)

第一作者: 朱文良(1980—), 男, 博士生, 主要研究方向为轨道车辆制动与控制技术. E-mail: zhu_wenliang@126.com

通讯作者: 吴萌岭(1959—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为轨道车辆制动与安全技术. E-mail: wuml_sh@163.com

$$\Delta s = \int_{s_1}^{s_2} ds = -\frac{1\,000(1+\gamma)}{3.6^2 g} \cdot \int_{v_1}^{v_2} \frac{v dv}{b + \omega_0 + i_j} \quad (2)$$

式中: v_1, v_2 为速度间隔的初速和末速, $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$; t_1, t_2 为 v_1, v_2 对应的时间, s ; γ 为回转质量系数; $g \approx 9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; b 为列车单位制动力, $\text{N} \cdot \text{kN}^{-1}$; ω_0 为列车单位基本阻力, $\text{N} \cdot \text{kN}^{-1}$; i_j 为坡道单位阻力(含加算坡道), $\text{N} \cdot \text{kN}^{-1}$.

列车的空走距离按下式计算^[5]:

$$S_k = \frac{v_0 t_k}{3.6} \quad (3)$$

式中: S_k 为空走距离, m ; v_0 为制动初速度, $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$; t_k 为空走时间, s ;

由此可得列车制动时间和制动距离为

$$t_z = t_k + t_e = t_k + \sum \Delta t \quad (4)$$

$$S_z = S_k + S_e = S_k + \sum \Delta s \quad (5)$$

式中: t_z, t_e 分别为列车制动时间和有效制动时间, s ; S_z, S_e 分别为列车制动距离和有效制动距离, m .

2 常规列车的制动计算

由于式(1)、式(2)中单位制动合力是随工况和速度而变的复杂函数, 常规列车制动计算时通常是把列车速度范围划分为若干个速度间隔, 采用分段累计法代替直接积分法, 并假定在每个速度间隔内单位制动合力为常数. 计算时回转质量系数统一规定取平均值 $\gamma=0.06$ ^[5], 单位制动力 b 和单位基本阻力 ω_0 分别按下式计算^[6]:

$$b = 1\,000 \vartheta_h \varphi_h \quad (6)$$

$$\omega_0 = A + Bv + Cv^2 \quad (7)$$

式中: ϑ_h 为列车换算制动率; φ_h 为闸瓦换算摩擦系数; A, B, C 均为随列车类型而异的常数.

这样, 由式(1)和式(2)可得常规列车在每个速度间隔内的有效制动时间和有效制动距离分别为

$$\Delta t = \frac{30(v_1 - v_2)}{1\,000 \vartheta_h \varphi_h + \omega_0 + i_j} \quad (8)$$

$$\Delta s = \frac{4.17(v_1^2 - v_2^2)}{1\,000 \vartheta_h \varphi_h + \omega_0 + i_j} \quad (9)$$

由此可得常规列车制动时间和制动距离为

$$t_z = t_k + t_e = t_k + \sum \Delta t = t_k + \sum \frac{30(v_1 - v_2)}{1\,000 \vartheta_h \varphi_h + \omega_0 + i_j} \quad (10)$$

$$S_z = S_k + S_e = S_k + \sum \Delta s = S_k + \frac{4.17(v_1^2 - v_2^2)}{1\,000 \vartheta_h \varphi_h + \omega_0 + i_j} \quad (11)$$

式(10)、式(11)即为《牵规》中常规列车的制动时间和制动距离计算公式.

3 动车组制动计算方法

动车组空走距离的计算方法与普通列车相同, 对其制动距离的计算主要是针对有效制动距离. 目前动车组的制动系统采用速度黏着控制方式, 充分利用黏着特性, 按照预定的目标减速度合理匹配动力制动和空气制动进行制动, 不存在常规列车制动距离计算公式中的列车换算制动率、换算摩擦系数、常用制动系数等概念, 这样就不能直接套用《牵规》中的计算公式, 必须寻求新的方法进行计算.

3.1 动车组制动距离的近似计算方法

目前, 我国对动车组的制动计算尚未有确切的规范. 文献[1-2]介绍了一种动车组制动距离的近似计算方法, 即根据动车组的目标减速度分为多个速度间隔, 按照每个速度间隔内制动初末速度的算术平均值来近似计算目标减速度和单位基本阻力 ω_0 , 根据下式计算出有效制动距离(回转质量系数取值为 $\gamma=0.1$):

$$S_e = \sum \Delta s = 0.038\,6 \sum \frac{v_1^2 - v_2^2}{a + 0.008\,9(\omega_0 + i_j)} \quad (12)$$

式中: a 为制动目标减速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$, 由制动系统的设计资料给出, 在每个速度间隔内为速度的一次函数, 可表示为

$$a = kv + q \quad (13)$$

式中: k, q 为一次函数系数, 不同的速度间隔内取值不同. 若 $k=0$ 时, 列车为匀减速运动; 若 $k \neq 0$ 时, 列车为变减速运动.

但是运用式(12)进行动车组制动距离计算具有较大的误差, 现对其误差进行分析. 由式(13)可知, 动车组制动过程的速度-时间曲线 $v=v(t)$ 如图 1 所示.

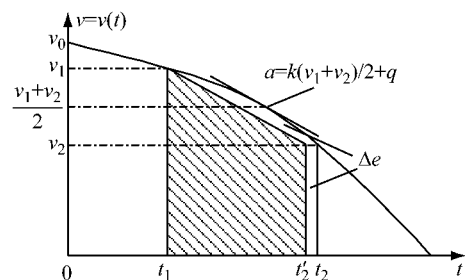


图 1 动车组制动过程的速度时间曲线

Fig. 1 Speed-time curve of EMUs braking process

由图 1 可知,制动过程中从时刻 $t=t_1$ 到时刻 $t=t_2$ (对应速度 $v=v_1$ 到 $v=v_2$),列车经过的有效制动距离 S_e 的准确值等于区间 $[t_1, t_2]$ 上由曲线 $v=v(t)$ 和 t 轴围成的曲面梯形的面积. 而式(13)使用一个速度间隔 $[v_1, v_2]$ 内速度的算术平均值来计算减速度作为速度间隔内的平均减速度,进而来近似计算有效制动距离,则其大小即为图 1 中的阴影面积. 若式(13)中一次函数系数 $k=0$,则阴影面积等于曲面梯形的面积,其值即为有效制动距离的准确值(不考虑单位基本阻力的情况下二者相等);若 $k \neq 0$,其值小于有效制动距离的准确值,两者之间的差值为 Δe ,如图 1 中所示. Δe 的大小与速度间隔大小 v_2-v_1 和 k 值有关;速度间隔越大, k 值越大,则误

差 Δe 越大. 这种方法可视为积分运算的近似计算,存在误差在所难免.

3.2 动车组制动计算的积分方法

由于动车组采用微机控制的制动方式,通过查询目标减速度-速度特性曲线获得目标减速度,按照预定的制动级位、目标减速度和车重进行制动力计算和电空制动力分配,制动系统更为高效、准确. 目标减速度以式(13)的形式给出,因此可将制动系统引发的单位制动力表示为:

$$b = \frac{1\,000Ma}{Mg} = \frac{1\,000(kv+q)}{1+\gamma} \quad (14)$$

将式(7)和式(14)分别代入式(1)、(2),对其进行运算,整理可得列车在每个速度间隔内的有效制动时间和有效制动距离的准确值分别为:

$$\left. \begin{aligned} & \left. \begin{aligned} \Delta t &= \frac{1}{3.6l} \cdot \frac{\sqrt{n-m^2}}{v_1v_2+m(v_1+v_2)+n} \arctan \frac{v_1-v_2}{\sqrt{n-m^2}} \\ \Delta s &= \frac{1}{2 \times 3.6^2 l} \cdot \ln \left| \frac{v_1^2+2mv_1+n}{v_2^2+2mv_2+n} \right| - \frac{m\Delta t}{3.6} \end{aligned} \right\}, n > m^2 \\ & \left. \begin{aligned} \Delta t &= \frac{1}{2 \times 3.6l} \cdot \frac{v_1-v_2}{v_1v_2+m(v_1+v_2)+n} \\ \Delta s &= \frac{1}{3.6^2 l} (\ln |v_1+m| - \ln |v_2+m|) - \frac{m\Delta t}{3.6} \end{aligned} \right\}, n = m^2 \\ & \left. \begin{aligned} \Delta t &= \frac{1}{2 \times 3.6l \sqrt{m^2-n}} \left(\ln \left| \frac{v_1+m-\sqrt{m^2-n}}{v_1+m+\sqrt{m^2-n}} \right| - \ln \left| \frac{v_2+m-\sqrt{m^2-n}}{v_2+m+\sqrt{m^2-n}} \right| \right) \\ \Delta s &= \frac{1}{2 \times 3.6^2 l} \cdot \ln \left| \frac{v_1^2+2mv_1+n}{v_2^2+2mv_2+n} \right| - \frac{m\Delta t}{3.6} \end{aligned} \right\}, n < m^2 \end{aligned} \quad (15)$$

式中: $l = \frac{0.009\,81C}{1+\gamma}$, $m = \frac{B+101.94k}{2C}$, $n = \frac{A+101.94q+i_j}{C}$.

由式(15)计算出各个速度间隔内的有效制动时间 Δt 和有效制动距离 Δs ,根据式(4)和式(5)可以计算得到动车组制动时间和制动距离的准确值.

4 两种计算方法比较分析

为更精确阐述上述两种方法产生误差的原因及

误差大小,本文以 CRH2 型动车组为例,以文献[1]中的计算参数代入式(15)进行计算,并与文献[1]中的计算结果进行对比分析.

4.1 CRH2 型动车组制动距离计算的相关参数

4.1.1 目标减速度特性参数

CRH2 型动车组的制动目标减速度特性曲线由 3 段直线组成, $0 \sim 70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 减速度为常数, $70 \sim 118 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $118 \sim 200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 减速度为速度的一次函数,见表 1.

表 1 CRH2 型动车组制动目标减速度特性参数

Tab.1 Parameters of desired deceleration of CRH2 EMUs

制动级位	目标减速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)			
	$0 \sim 70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	$70 \sim 118 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	$118 \sim 200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	
常用制动	1 级	0.166 7	0.207 2-0.000 578 7v	0.176 5-0.000 318 5v
	2 级	0.263 9	0.328 7-0.000 925 9v	0.277 9-0.000 495 4v
	3 级	0.361 1	0.450 2-0.001 273 1v	0.381 4-0.000 690 0v
	4 级	0.458 3	0.575 8-0.001 678 2v	0.478 0-0.000 849 3v
	5 级	0.552 8	0.690 5-0.001 967 6v	0.579 4-0.001 026 2v
	6 级	0.650 0	0.812 0-0.002 314 8v	0.682 9-0.001 220 8v
	7 级	0.747 2	0.933 6-0.002 662 0v	0.784 4-0.001 397 7v
紧急制动	1.122 2	1.401 7-0.003 993 1v	1.179 0-0.002 105 4v	

4.1.2 制动计算其他相关参数

CRH2 型动车组单位基本阻力公式如下： $\omega_0 = 0.880 + 0.00744v + 0.000114v^2$ ，常用制动时空走时间 $t_k = 2.3$ s，紧急制动时空走时间 $t_k = 1.5$ s，回转质量系数 γ 取值为 0.10。

4.2 CRH2 型动车组制动距离计算

本文的制动距离计算方法称为方法一，将文献 [1] 中的制动计算方法称为方法二。分别对 CRH2 型动车组在平直道上(即 $i_j = 0$) 的制动距离进行计算，紧急制动和常用制动 7 级停车的制动距离计算结果见表 2，两种方法计算结果的差值如图 2 所示。

表 2 两种方法计算结果及其差值

Tab.2 Calculation results comparison of two methods

制动初速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	制动级位					
	常用制动 7 级			紧急制动		
	方法一	方法二	差值	方法一	方法二	差值
200	2 745	2 531	214	1 823	1 714	109
180	2 191	2 015	176	1 466	1 362	104
160	1 704	1 564	140	1 145	1 055	90
140	1 283	1 176	107	863	792	71
120	926	847	79	621	570	51
100	634	584	50	425	390	35
80	408	377	31	273	252	21
60	239	222	17	160	148	12
40	115	107	8	77	71	6

注：方法二中的计算结果部分数据似有误，因此表 2 中对方法二的部分计算结果进行了更正。

由表 2 可以看出，对于相同的制动级位，方法一的计算结果大于方法二的计算结果。这是由于方法二使用每个速度间隔内的制动初速和制动末速的平均值来计算目标减速度，从而在每个速度间隔内将目标减速度作为常数进行处理，进而采用累加的方法来计算制动距离和制动时间，因而计算结果偏小。在速度区间 $[0, 70]$ 的范围内，目标减速度的一次函数系数 $k=0$ ，若不考虑单位基本阻力，方法一和方法

二的计算结果是相同的，但是由于单位基本阻力的存在，两种方法的计算结果并不相同，方法一略大于方法二的计算结果。并且随着制动初速度的增加，两种方法的计算结果之间的差值会越来越大，如图 2 所示，这与 3.1 中 Δe 的结果分析是一致的。因此，随着制动初速度的增大，采用近似计算方法得出的制动距离偏差较大，不适合动车组的制动计算^[7]。

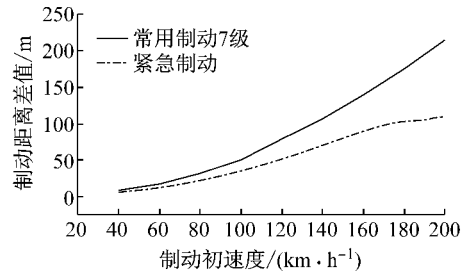


图 2 两种方法在相同工况下制动距离的计算差值

Fig.2 Deference value of two methods in the same condition

5 实例分析

为了进一步验证本文提出制动计算方法的正确性，以 CRH6A 型动车组为例进行制动计算，并与试验数据进行对比分析。

5.1 CRH6A 型动车组制动距离计算的相关参数

5.1.1 目标减速度特性参数

制动目标减速度特性曲线由 5 段直线组成， $0 \sim 5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $20 \sim 70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 目标减速度为常数， $5 \sim 20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $70 \sim 118 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $118 \sim 200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的目标减速度为速度的一次函数，如表 3 所示。

5.1.2 制动计算其他相关参数

单位基本阻力的公式如下： $\omega_0 = 0.551 + 0.001v + 0.000166v^2$ ，制动时空走时间 $t_k = 1.5$ s，回转质量系数 γ 取值为 0.05。

表 3 CRH6A 型动车组制动目标减速度特性参数

Tab.3 Parameters of desired deceleration of CRH6A EMUs

制动级位	目标减速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$					
	$0 \sim 5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	$5 \sim 20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	$20 \sim 70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	$70 \sim 118 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	$118 \sim 200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	
常用制动	1 级	0.123 3	$0.1088 + 0.002893v$	0.166 7	$0.1844 - 0.0002529v$	$0.1921 - 0.000318v$
	2 级	0.247 0	$0.2180 + 0.0057956v$	0.333 9	$0.3694 - 0.0005066v$	$0.3847 - 0.000637v$
	3 级	0.370 7	$0.3272 + 0.0086979v$	0.501 1	$0.5543 - 0.0007602v$	$0.5774 - 0.000956v$
	4 级	0.494 3	$0.4363 + 0.0116002v$	0.668 4	$0.7393 - 0.0010139v$	$0.7701 - 0.001274v$
	5 级	0.618 0	$0.5455 + 0.0145025v$	0.835 6	$0.9243 - 0.0012676v$	$0.9627 - 0.001593v$
	6 级	0.741 7	$0.6547 + 0.0174048v$	1.002 8	$1.1093 - 0.0015212v$	$1.1554 - 0.001912v$
	7 级	0.865 4	$0.7639 + 0.0203071v$	1.170 0	$1.2942 - 0.0017749v$	$1.3480 - 0.002231v$
紧急制动	0.999 0	$0.8820 + 0.0234000v$	1.350 0	$1.3879 - 0.0005418v$	$1.8752 - 0.004672v$	

使用本文提出的制动计算方法分别对 CRH6A

型动车组在平直道上(即 $i_j = 0$) 的制动时间和制动

距离进行计算,常用制动直至停车的理论计算值和 试验值见表4.

表4 CRH6A型动车组常用制动计算值和试验值

Tab.4 Comparison of calculation results with test results of CRH6A

制动级位	制动初速度/(km·h ⁻¹)		制动距离			制动时间		
	目标初速度	实际初速度	计算值/m	实测值/m	误差/%	计算值/s	实测值/s	误差/%
7级	200	198.7	1 525.6	1 527.9	-0.15	54	52.6	2.66
		200.3	1 551.6	1 526.8	1.62	54.5	52.4	4.01
		199.7	1 541.8	1 560.5	-1.2	54.3	53.8	0.93
		199.3	1 535.3	1 570.6	-2.25	54.2	53.0	2.26
		199.9	1 545.1	1 531.5	0.89	54.4	51.9	4.82
		199.4	1 537.0	1 556.5	-1.25	54.2	53.0	2.26
7级	160	159.9	969.2	953.0	1.70	42.9	41.0	4.63
		160.5	976.7	951.8	2.62	43.0	41.4	3.86
		160.7	979.2	983.4	-0.43	43.1	42.6	1.17
		159.5	964.2	977.4	-1.35	42.8	42.0	1.90
		161.0	983.0	996.3	-1.33	43.2	42.0	2.86
6级	140	139.5	844.8	827.4	2.10	43.2	42.0	2.86
		140.7	859.7	828.9	3.72	43.6	40.5	7.65
5级	120	120.7	746.1	694.8	7.38	44.5	41.0	8.54
		121.2	752.4	771.5	-2.48	44.7	43.8	2.05
4级	100	100.9	642.9	603.4	6.55	46.4	42.8	8.41
		99.6	626.7	609.8	2.77	45.8	42.2	8.53
3级	80	82.0	559.9	563.1	-0.57	50.3	46.4	8.41

5.2 CRH6A型动车组制动计算结果分析

由表4可见,本文给出的计算方法对CRH6A常用制动停车工况下的制动距离和制动时间的计算和实测结果相当接近,制动距离误差最大为7.38%,制动时间误差最大为8.54%,平均误差低于5%.计算结果与实际试验结果具有良好的一致性,表明本文提出的计算方法本身具有较高的精度,可满足制动距离和制动时间理论计算的要求.

从表4中可以看出,随着制动初速度的减小,制动距离和制动时间的误差越来越大,主要原因是由于实际制动过程中摩擦副的摩擦系数随速度的减小而呈现增大趋势^[8].当前动车组主要采用速度黏着制动控制模式,制动控制装置按照目标减速度计算所需的制动力,采用设定的平均摩擦系数,计算得到所对应的制动缸压力来实施控制.随着制动初速度的减小,摩擦副的实际平均摩擦系数越来越大,导致实际制动力大于所需制动力,实际的制动距离和制动时间小于理论的计算结果,采用减速度控制模式可以很好地解决这一问题^[9-10].

6 结论

(1) 动车组与常规列车在速度、牵引和制动性能上有很大差异,现有的《牵规》不能满足动车组制动计算的要求.常规列车的制动计算不适用动车组,套用其计算公式进行制动时间和制动距离的近似计

算,会产生较大误差.

(2) 本文给出的制动计算方法可以计算出有效制动时间和有效制动距离的准确值,通过对CRH6A的实例计算,结果表明与实际试验结果具有良好的一致性,满足动车组制动计算的要求,并可为动车组制动系统的设计提供参考.

(3) 当前动车组的制动控制主要采用速度-黏着控制模式,由于实际闸瓦(闸片)摩擦系数和列车运行区间路况(如坡道、弯道等)的不确定性,这种控制模式具有一定的局限性,导致制动距离和制动时间的理论计算结果与实际试验结果有所差异,采取减速度控制模式可以弥补其不足之处,使精确停车成为可能.

参考文献:

- [1] 张子健,邓亚伟,杨清祥,等. CRH型动车组制动距离计算与监控装置制动模式曲线设计[J]. 铁道机车车辆, 2007, 27(6): 1. ZHANG Zijian, DENG Yawei, YANG Qingxiang, et al. Computation of braking distance and supervisory device braking mode curve design for CRH electric multiple unit[J]. Railway Locomotive & Car, 2007, 27(6): 1.
- [2] 张中央,马金法. 200 km/h动车组制动距离计算方法探讨[J]. 郑州铁路职业技术学院学报, 2007, 19(3): 2. ZHANG Zhongyang, MA Jinfa. Discussion of braking distance calculation of 200 km/h EMUs [J]. Journal of Zhengzhou Railway Vocational & Technical College, 2007, 19(3): 2.

(下转第134页)