

文章编号:1671-1637(2013)03-0047-06

# 机车关键参数对车钩转角与机车运行安全性的影响

许自强, 罗世辉, 马卫华, 吴 庆

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031)

**摘 要:**针对列车车钩承压偏转行为,分析了机车结构参数与车钩转角之间的关系,通过建立由3节新型33 t轴重 $C_0-C_0$ 轴式重载机车与2组具有钩肩特性、缓冲器迟滞特性的圆销钩缓装置组成的列车动力学模型,研究承压工况下机车结构参数对车钩转角与列车运行性能的影响。计算结果表明:在列车车钩自由转角为 $8^\circ$ 时,承压时车钩的实际转角达不到 $8^\circ$ ,此时车钩钩肩不发生作用,稳钩力由机车二系止挡提供,车钩横向力全部传递至轮对,导致机车的轮轴横向力超标;提高二系止挡间隙或降低止挡间距等参数,可以增加车钩的转角,减小车钩横向力,降低轮轴横向力,提高列车的运行安全性;在重载机车车钩选型中,应该考虑机车结构参数与车钩自由转角的匹配关系。

**关键词:**重载机车;动力学模型;车钩转角;轮轴横向力;结构参数

中图分类号:U260.34

文献标志码:A

## Influence of locomotive key parameters on coupler rotation angle and locomotive running safety

XU Zi-qiang, LUO Shi-hui, MA Wei-hua, WU Qing

(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

**Abstract:** Aimed at coupler rotation performance under compressive condition, the relationship between locomotive structure parameters and coupler rotation angle was analyzed, a train dynamics model consisting of three new-type 33 t axle-load  $C_0-C_0$  configuration heavy-haul locomotives and two round-pin coupler systems with coupler shoulder characteristic and hysteretic draft gear was established, and the effect of locomotive key structure parameters on coupler rotation angle and train running performance was studied under compressive condition. Calculation result shows that when coupler free rotation angle is  $8^\circ$ , its actual rotation angle is less than  $8^\circ$  under longitudinal compression, coupler shoulder does not work, the coupler-stabilized force is provided by secondary stop, so locomotive suffers a significant lateral component force, which leads to wheelset lateral force out of limit. Increasing the clearance of secondary stop or decreasing the distance between front and rear stops can increase the rotation angle of coupler, decrease wheelset lateral force, at last improve the running safety of train. So the matching relationship between locomotive key structure parameters and coupler free rotation angle should be considered in the selecting couplers of heavy-haul train. 3 tabs, 8 figs, 16 refs.

**Key words:** heavy-haul locomotive; dynamics model; coupler rotation angle; wheelset lateral force; structure parameters

**Author resumes:** XU Zi-qiang(1984-), male, doctoral student, +86-28-87601973, 87602193@163.

收稿日期:2012-12-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51005190);霍英东教育基金项目(122014)

作者简介:许自强(1984-),男,江西南昌人,西南交通大学工学博士研究生,从事车辆系统动力学研究。

导师简介:罗世辉(1964-),男,江西赣州人,西南交通大学教授,工学博士。

com; LUO Shi-hui(1964-), male, professor, PhD, +86-28-86466203, shluo@swjtu.edu.cn.

## 0 引 言

随着重载运输的发展,列车运行时由牵引、制动等因素引起的列车纵向冲动也越来越大。在车钩承受大压力的情况下,车钩将产生偏转行为<sup>[1-2]</sup>,车钩的偏转将使得车钩力产生横向分力,影响列车的运行性能,过大的车钩偏转角甚至会威胁列车的运行安全性<sup>[3]</sup>。由车钩偏转行为造成的列车脱轨事故时有发生,中国大秦运煤专线在万吨级列车牵引制动试验时就曾先后发生3次由车钩偏转导致横向力过大而造成的机车脱轨事故<sup>[4]</sup>,同类事故在其他国家也有发生<sup>[5-6]</sup>。

国内外对重载列车钩缓装置行为与其对列车的运行性能影响进行了很多的研究。Geike 使用线性刚度与阻尼的组合建立缓冲器模型,研究地铁列车出现过大大纵向力的原因<sup>[7]</sup>;阳光武等将钩缓装置简化为只有单一转动自由度的直杆,研究列车曲线通过时车钩偏转对列车的影响<sup>[8]</sup>;El-Sibaie 提出大车钩摆角在纵向压力下会影响列车运行安全性<sup>[9]</sup>;Cole 等研究了不同钩缓装置下列车的车钩力与车钩缓冲器的参数对列车的影响<sup>[10-11]</sup>;王开云等运用大系统动力学理论研究了重载机车钩缓装置偏转角对轮轨动态作用<sup>[12]</sup>。以上的研究将钩缓装置简化为线性弹簧阻尼系统或将车钩的影响以力的形式输入列车模型,不能实时研究钩缓装置的运行性能,也不能对车钩运动进行限制。马卫华等在此基础上建立了考虑了车钩自由摆角、缓冲器部分阻抗特性、车钩止挡的钩缓动力学子模型,将此模型输入列车模型,分析了列车电制动工况安全问题,并研究了车钩的运行行为与缓冲器阻抗特性对机车动力学的影响<sup>[3,13-14]</sup>。

本文完善了马卫华等的钩缓子模型,设计了详细考虑车钩间隙、钩肩结构特性、缓冲器加卸载迟滞特性的圆销钩缓装置,建立了由3节33 t轴重机车、2组钩缓装置组成的列车动力学模型,通过动力学计算研究机车各结构参数对车钩转角与机车轮轴横向力的影响,为车钩自由偏转角的设置提供参考。

## 1 机车与车钩

由于提高机车轴重可以显著提高机车的牵引力,增大列车的载重,所以大轴重货运机车是近年来的发展重点。本文以某机车厂最新设计的33 t大

轴重重载机车为研究对象。机车一系悬挂采用钢圆弹簧配合端轴垂向减振器的方案,二系悬挂系统采用3个橡胶堆式承载垫结构。同时每个转向架还设置有1个横向减振器与2个抗蛇行减振器。轴箱采用单拉杆定位方式。交流电动机和齿轮传动系统组成的驱动单元采用抱轴式悬挂,并且采用吊杆将电动机单点悬挂在转向架构架横梁上。车体和转向架之间采用浮动中心销牵引方式,机车采用踏面制动方式。机车主要技术参数见表1。

表1 机车主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of locomotive

参数	取值	参数	取值
二系止挡自由间隙/mm	35	车钩长度/mm	711
二系止挡最大弹性压缩量/mm	15	一系横向刚度/(kN·mm <sup>-1</sup> )	0.69
从板凸肩至钩销距离/mm	135	二系横向刚度/(kN·mm <sup>-1</sup> )	0.4
一系横向弹性间隙/mm	8	二系止挡刚度/(kN·mm <sup>-1</sup> )	7
二系横向止挡纵向间距/mm	13 298	轮对自由横移量/mm	8
车钩自由偏转角/(°)	8	后转向架中心至钩销的距离/mm	3 788

机车采用圆销钩肩限制车钩,见图1,钩尾销与钩尾框孔皆为圆形,车钩可以绕钩尾销自由转动,自由转动角度被称为车钩自由角。但是,由于前从板设置有支撑凸块,当车钩自由偏转一定的角度后,钩尾凸肩将与从板凸块接触,提供稳钩力阻止车钩出现更大的偏转。在与从板接触前车钩自由偏转角为车钩自由偏转角,是由车钩的结构决定的。如中国的FT车钩、DFC-E100车钩、102车钩、美国的LAF车钩等都属于圆销车钩。

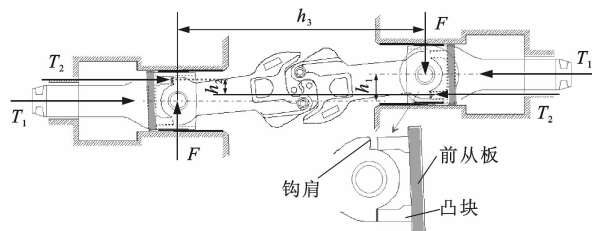


图1 圆销车钩结构与受力分析

Fig. 1 Structure of round-pin coupler and its stress analysis

由图1可以得到车钩的力矩平衡方程为

$$T_1 h_1 = T_2 h_2 + F h_3 \quad (1)$$

式中: $T_1$ 、 $T_2$ 分别为压钩力和钩肩力; $F$ 为稳钩力,由机车一、二系悬挂提供; $h_1$ 、 $h_2$ 、 $h_3$ 分别为3个力的

力臂长度。

由于钩肩的刚度远大于机车二系悬挂刚度,稳钩力矩主要由钩肩力提供, $F$  的值较小,即产生的额外轮轴横向力比较小。

如果车钩自由偏转角设置得很大,则会出现钩肩与从板未接触,车体被二系止挡挡住的情况。此时,车钩不会发生更大的偏转,并且  $T_2=0$ ,则

$$T_1 h_1 = F h_3 \quad (2)$$

$F$  将由机车二系止挡与二系悬挂产生的横向力提供,这样机车将受到由止挡产生的巨大的额外横向力,机车运行安全性能得不到保障。

图2为纵向压力下,车体与车钩偏转的相互关系,其中  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  分别为二系止挡纵向间距、二系止挡横向间距、后转向架二系止挡至车钩的距离; $\alpha$ 、 $\beta$  分别为车体偏转角与车钩偏转角; $F_B$ 、 $F_A$  分别为二系前后止挡的横向力。偏转关系为

$$\alpha = \arctan(L_2/L_1) \quad (3)$$

$$\sin(\alpha) = h/(L_3 + L_1/2) \quad (4)$$

$$\beta = \arcsin[(h + S_1 + S_2)/L] \quad (5)$$

式中: $S_1$ 、 $S_2$  分别为轮对横移量与一系弹性间隙; $L$  为车钩长度; $h$  为车体偏转,是车钩端的横移量。

根据表1与结构参数和式(3)~(5)计算可得,机车碰到二系止挡时车钩的转角约为  $6^\circ$ ,而机车各部分止挡间隙用尽,车钩的最大转角为  $7.7^\circ$ ,还没有达到车钩自由偏转角的设计值  $8^\circ$ ,所以该机车在承压时容易出现式(2)的情况,导致轮轴横向力较大。

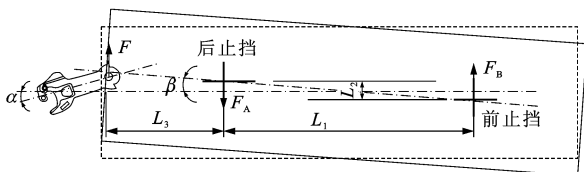


图2 车体与车钩偏转关系

Fig. 2 Rotation relationship between carbody and coupler

## 2 动力学模型

### 2.1 钩缓装置模型

采用的弹性胶泥缓冲器在加载、卸载曲线上考虑初压力、最大行程、最大阻抗力、吸收率及缓冲器压死后的刚性冲击等特性<sup>[15]</sup>。由于车钩间隙在缓冲器模型中已有考虑,现将相连挂两车钩简化为一连杆。车钩与从板直接相连并具有绕  $z$  轴旋转的自由度,从板通过缓冲器与车体相连,具有  $x$  向位移自由度。在钩销处用包含钩肩非线性特性的力元进行约束,模拟钩肩的稳钩作用,形成

图3的车钩模型。

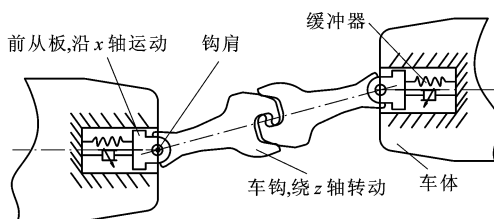


图3 车钩模型

Fig. 3 Coupler model

### 2.2 列车模型

根据机车的结构与参数建立了机车动力学模型。单车模型由1个车体、2个转向架、6个轮对、6个电机、6个电机吊杆等刚体组成。通过一系、二系悬挂系统将上述21个刚体连接并与减振器一起,组成了机车的动力学模型。机车的轨距为标准轨距1435 mm,采用磨耗型踏面与75 kg钢轨。

在建立列车模型前首先对机车的临界速度和直线、曲线通过性能进行了校核。机车的非线性临界速度为  $170 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,满足实际最大运行速度  $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  的要求。机车的直线、曲线运行性能分别见表2、3,可以看出机车具有良好的运行性能,可以在较差轨道上安全运行。直线的运行速度为  $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,曲线的未平衡离心加速度为  $0.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

表2 直线运行性能

Tab. 2 Running performance on tangent track

横向平稳性	垂向平稳性	轮轴横向力/kN	轮轨垂向力/kN
2.55	2.63	35	203

表3 曲线运行性能

Tab. 3 Running performance on curved track

曲线半径/m	轮轴横向力/kN	脱轨系数	轮重减载率	摇头角/(°)
300	75	0.45	0.51	0.64
400	73	0.40	0.49	0.50

本文的列车模型由3节机车连挂组成,各车辆之间采用相同型号的圆销车钩连接。列车前2节机车采用集中牵引的模式,第3节采用了机车而不是货车是为了防止货车结构对计算结果的影响。列车编组结构见图4。

## 3 计算工况与评价指标

由于在大秦1+1编组牵引万吨试验中,压钩力最大值已经达到了  $2193 \text{ kN}$ <sup>[16]</sup>,所以本文将机车平直道运行受到的最大压钩力定为  $2500 \text{ kN}$ 。列车受到的压钩力以力的形式施加于前2节机车各轮对

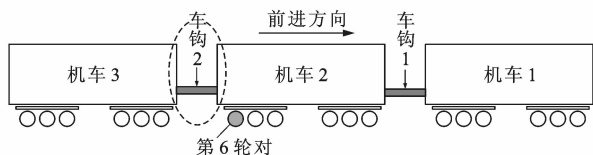


图4 列车模型

Fig. 4 Train model

上,压钩力从2 s开始施加,10 s后达到最大值,方向与列车运行方向相反。这样,前2节机车每车轴受到208.3 kN的压力。计算时列车的运行速度为 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

由于第2个车钩受到的压钩力最大,以第2个车钩与靠近第2个车钩的机车2的第6轮对为研究对象,以车钩偏转角与轮轴横向力作为评价指标,分析机车结构参数的变化对列车动力学性能的影响。其中轮轴横向力采用UIC518标,限制值 $F_{\text{lim}} = 1.0(10 + 2Q_0/3)$ ,其中 $Q_0$ 为机车轴重,所以机车的轮轴横向力限制值为120 kN。虽然评价机车的运行性能不能只用轮轴横向力一个指标,但是该指标受机车结构参数变化影响最为明显,同时,相比脱轨系数与轮重减载率,该指标最差,所以本文仅以轮轴横向力评价机车的性能。

#### 4 机车结构参数对车钩偏转角与列车承压性能的影响

在研究机车结构参数的影响时,车钩的自由偏转角为 $8^\circ$ ,列车在平直道运行,采用了德国高干扰轨道不平顺。

##### 4.1 二系止挡间隙

机车二系止挡设计自由间隙为35 mm,在其他条件不变的情况下,改变机车的二系止挡的自由间隙,变化范围为20~60 mm,变化步为5 mm,计算结果见图5。

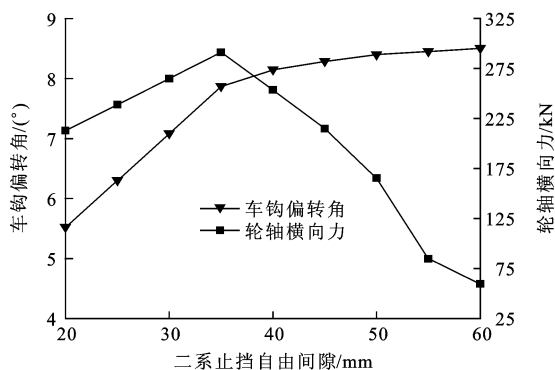


图5 二系止挡自由间隙的影响

Fig. 5 Influence of secondary stop's free clearance

随着二系止挡自由间隙的增大,车钩的最大偏转角也随之增大,这是因为二系止挡自由间隙的增大使得车体偏转更大的角度才会碰到止挡,所以车钩转角也相应增大。但是只要车钩的偏转角小于 $8^\circ$ ,即车钩与从板未发生接触,机车的轮轴横向力都将非常大,与第1节的推断相符。当止挡自由间隙达到40 mm,车钩偏转角将超过自由角,达到 $8.15^\circ$ ,此后车钩偏转角几乎不再增大,这是因为此时车钩与从板发生了接触,钩肩提供了较大的稳钩力矩,阻止了车钩的进一步偏转。

从图5中还可以看出,机车轮轴横向力随着二系止挡自由间隙的增大呈先增大后减小的趋势,当二系止挡自由间隙为35 mm时,轮轴横向力最大,达到了291 kN。这是因为二系止挡自由间隙小于35 mm时,车钩偏转角较小,由压钩力产生的横向分力也较小,所以附加的轮轴横向力也较小。当二系止挡自由间隙大于35 mm时,车钩偏转角超过了自由角,车钩稳钩力大部分将由钩肩提供,所以轮轴横向力显著降低。当二系止挡自由间隙为55 mm时,机车轮轴横向力最大值为85 kN,满足安全标准要求。

##### 4.2 二系止挡纵向间距

相邻转向架二系止挡纵向间距的设计值为13.298 m,在其他参数不变的情况下改变止挡间距,变化范围从11.298~15.298 m,每变化0.5 m计算一次,第2个车钩的偏转角与第2辆机车第6轮对轮轴横向力见图6。

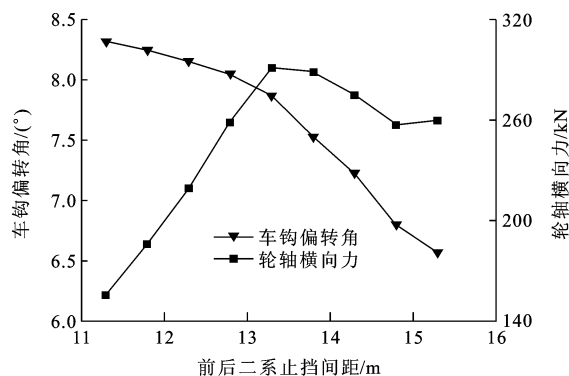


图6 二系止挡纵向间距的影响

Fig. 6 Influence of secondary stop's longitudinal distance

当二系止挡纵向间距小于初始值13.298 m时,车钩偏角将超过自由角,钩尾与从板接触,车钩的稳钩力主要由钩肩提供,机车的轮轴横向力较小;当二系止挡间距等于初始值13.298 m,车钩偏转角小于自由角,稳钩力矩主要由二系止挡提供,最终会

导巨大的轮轴横向力,最大值为 291 kN。如果继续增大二系止挡间距,则车钩的偏转角不断减小,车钩力的横向分力也不断减小,降低了机车的轮轴横向力,但最大值仍然很大。

### 4.3 后转向架止挡至钩尾销的距离

后转向架止挡至钩尾销距离的设计值为 3.79 m,只改变此参数,计算范围为 2.79~4.79 m,每变化 0.5 m 计算一次,第 2 个车钩偏转角与第 2 辆机车第 6 轮对的轮轴横向力见图 7。从图 7 可以看出,随着止挡至钩尾销距离的增大车钩转角不断加大。但是轮轴横向力并不是线性增加,而是先增大后减小。这是由于在止挡至钩尾销距离小于初始值 3.79 m 时,车钩转角小于自由角,由机车二系止挡提供稳钩力,当车钩偏转角较小时车钩力的横向分力较小,轮轴横向力也较小;但是当止挡至钩尾销距离大于 3.79 m 时,钩肩开始提供稳钩力矩,此时止挡至钩尾销距离越大,车钩偏转角越大,轮轴横向力反而越小。

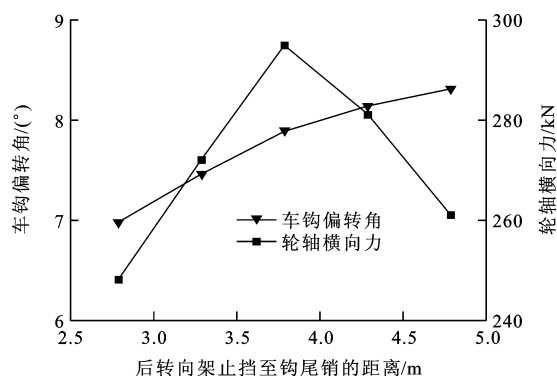


图7 转向架至钩尾销距离的影响

Fig. 7 Influence of distance between bogie and coupler-pin

### 4.4 机车横向刚度

图8为变化机车二系水平刚度与车钩自由偏转角对机车第6轮对轮轴横向力与后转向架二系止挡力的影响。从图8可以看出,在车钩自由偏转角较小时,车体未碰到二系止挡或轻微碰到二系止挡,由机车二系水平刚度提供一部分稳钩力(主要的稳钩力由从板与钩肩提供);随着二系水平刚度的增大,二系止挡提供的稳钩力矩增大,即轮轴横向力随着二系水平刚度的增大而增大;当车钩自由偏转角达到 $8^{\circ}$ ,由于止挡刚度较大,此时主要由二系止挡提供稳钩力矩,二系水平刚度对轮轴横向力的影响很小。

机车一系横向刚度变化对机车动力学的影响很小,因为在受到 2 500 kN 的压钩力后,大多数情况

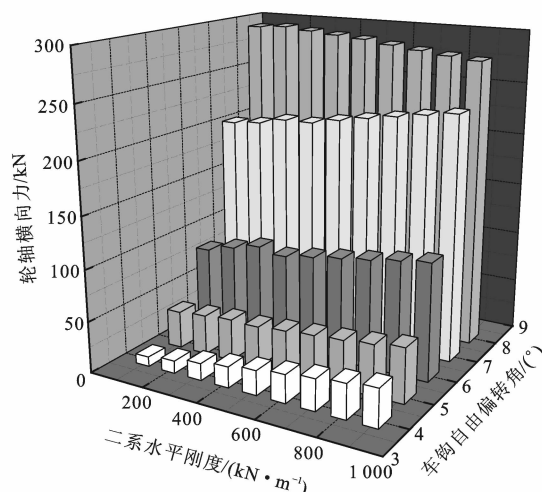


图8 二系水平刚度的影响

Fig. 8 Influence of secondary suspension's horizontal stiffness

下轴箱都已经碰到了一系止挡,横向力主要由止挡传递,所以一系刚度变化的影响较小,这里不再给出计算数据。

## 5 结 语

(1)机车结构参数对车钩转角有较大影响,在车钩自由偏转角不变的情况下,可以通过改变机车结构参数减小机车承压时的轮轴横向力。

(2)若钩肩止挡发生作用,机车的二系水平刚度增大会导致机车轮轴横向力的增大;如果钩肩止挡不发生作用,则二系水平刚度变化将不会影响机车的轮轴横向力。

(3)在重载机车车钩选型中,机车结构与车钩自由偏转角的匹配关系不应被忽略,以避免出现由于车钩自由偏转角过大而导致的列车运行安全问题。在后续的工作中将着重分析曲线运行时车钩的行为与安全性,并结合线路试验,开展工程应用研究。

### 参考文献:

#### References :

- [1] MA Wei-hua, LUO Shi-hui, SONG Rong-rong. Coupler dynamic performance analysis of heavy haul locomotives[J]. Vehicle System Dynamics, 2012, 50(9): 1435-1452.
- [2] 杨俊杰,刘建新,罗世辉,等.重载组合列车机车车钩稳定控制试验[J].西南交通大学学报,2009,44(6):882-886.  
YANG Jun-jie, LIU Jian-xin, LUO Shi-hui, et al. Test study on stability control of locomotive coupler in heavy haul combined train[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, 44(6): 882-886. (in Chinese)
- [3] MA Wei-hua, LUO Shi-hui, SONG Rong-rong. Dynamics characteristic analysis of coupler and buffer system of heavy haul train[C]//International Heavy Haul Association. The

- 2011 IHHA Specialist Technical Session. Calgary: International Heavy Haul Association, 2011: 162-168.
- [4] 中国铁道科学研究院. HX<sub>D</sub>2 型机车装用 DFC-E100 型钩缓装置试验总结报告[R]. 北京:中国铁道科学研究院,2008.  
China Academy of Railway Sciences. The test report on DFC-E100 coupler systems in HX<sub>D</sub>2 locomotive[R]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2008. (in Chinese)
- [5] Transportation Safety Board of Canada. Railway investigation report R02C0050[R]. Ottawa: Transportation Safety Board of Canada, 2002.
- [6] CHERKASHIN U M, ZAKHAROV S M, SEMECHKIN A E. An overview of rolling stock and track monitoring systems and guidelines to provide safety of heavy and long train operation in the Russian railways[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2009, 223(2): 199-208.
- [7] GEIKE T. Understanding high coupler forces at metro vehicles[J]. Vehicle System Dynamics, 2007, 45(4): 389-396.
- [8] 阳光武,肖守讷,张卫华. 列车曲线上制动时的安全性分析[J]. 铁道学报,2009,31(1):35-39.  
YANG Guang-wu, XIAO Shou-ne, ZHANG Wei-hua. Analysis on safety of train braking on curves[J]. Journal of the China Railway Society, 2009, 31(1): 35-39. (in Chinese)
- [9] EL-SIBAIE M. Recent advancements in buff and draft testing techniques[C]//China Railway Society. Fifth International Heavy Haul Railway Conference. Beijing: China Railway Society, 1993: 115-119.
- [10] COLE C. Improvements to wagon connection modelling for longitudinal train simulation[C]//OGHANNA W. Conference on Railway Engineering Proceedings: Engineering Innovation for a Competitive Edge. Rockhampton: Central Queensland University, 1998: 187-194.
- [11] COLE C, SUN Y Q. Simulated comparisons of wagon coupler systems in heavy haul trains[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2006, 220(3): 247-256.
- [12] 王开云,翟婉明,封全保,等. 重载机车车钩自由角对轮轨动态安全性能的影响[J]. 中国铁道科学,2009,30(6):72-76.  
WANG Kai-yun, ZHAI Wan-ming, FENG Quan-bao, et al. Effect of the coupler free angle on wheel/rail dynamic safety performance of heavy haul locomotive[J]. China Railway Science, 2009, 30(6): 72-76. (in Chinese)
- [13] 马卫华,宋荣荣,揭长安,等. 缓冲器阻抗特性对重载列车动力学性能的影响[J]. 交通运输工程学报,2011,11(2):59-64.  
MA Wei-hua, SONG Rong-rong, JIE Chang-an, et al. Influences of buffer impedance characteristics on dynamics performances for heavy haul train[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(2): 59-64. (in Chinese)
- [14] 马卫华,杨俊杰,罗世辉,等. SS<sub>3B</sub>电力机车长大下坡道稳钩能力分析[J]. 铁道学报,2010,32(2):109-113.  
MA Wei-hua, YANG Jun-jie, LUO Shi-hui, et al. Study on the coupler stability of locomotive SS<sub>3B</sub> running on the long heavy down grade[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(2): 109-113. (in Chinese)
- [15] 吴 庆,罗世辉,魏冲锋,等. 货运机车车钩缓冲装置动力学仿真模型[J]. 交通运输工程学报,2012,12(3):37-43.  
WU Qing, LUO Shi-hui, WEI Chong-feng, et al. Dynamics simulation models of coupler systems for freight locomotive[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(3): 37-43. (in Chinese)
- [16] 杨俊杰. “1+1”两万吨组合列车模式下机车钩缓装置的承载特性与结构参数优化研究[D]. 北京:北京交通大学,2010.  
YANG Jun-jie. Study on carrying characteristic and parameter optimization of locomotive coupler-draft gear based on “1+1” 20 kt combined train mode [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010. (in Chinese)