

文章编号:1671-1637(2015)04-0052-09

## 动车低速脱轨的动态响应

郭力荣<sup>1</sup>,王开云<sup>1</sup>,王惠琼<sup>2</sup>,张 兵<sup>1</sup>,林建辉<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室,四川 成都 610031; 2. 萍乡学院 机械电子工程系,江西 萍乡 337055)

**摘 要:**在动车轴箱下方安装防护装置,进行线路低速脱轨试验。车辆借助脱轨器完成脱轨,利用应变片、加速度和位移传感器采集脱轨车辆的动态响应,采用高速摄像机和视频摄像机分别记录了脱轨车辆的运动姿态。基于试验数据,评估了脱轨条件下钢轨抗倾翻能力,验证了脱轨安全防护装置的性能,分析了动车脱轨后的动态响应和脱轨速度、车辆质量和线路对动态响应的影响。试验结果表明:当动车低速脱轨时,防护装置撞击钢轨的最大横向力为 177.18 kN,小于钢轨横向抵抗力 510.00 kN,因此,脱轨安全防护装置可以扣住钢轨外侧,有效限制脱轨车辆的横向移动。车辆的脱轨过程分为惰行、轨上运动、落地和路基滑行 4 个阶段,各阶段的动态响应均随脱轨速度和车辆质量的增大而增大。当动车脱轨速度为  $22 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  时,CRTS II 型双块式无砟轨道的脱轨距离约为 15.80 m,CRTS I 型板式无砟轨道的脱轨距离约为 20.87 m,因此,CRTS II 型双块式无砟轨道的轨枕可以起到减速带的作用,减小脱轨距离。

**关键词:**动车;脱轨试验;安全防护装置;动态响应;无砟轨道

**中图分类号:**U270.11

**文献标志码:**A

## Dynamic responses of motor vehicle in low-speed derailment

GUO Li-rong<sup>1</sup>, WANG Kai-yun<sup>1</sup>, WANG Hui-qiong<sup>2</sup>, ZHANG Bing<sup>1</sup>, LIN Jian-hui<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;

2. Department of Mechanical and Electronic Engineering, Pingxiang University, Pingxiang 337055, Jiangxi, China)

**Abstract:** The low-speed derailment experiment of signal motor vehicle with post-derailment safety device under axle box was carried out. The derailer was installed on the rail to force the vehicle to derail. Acceleration sensors, displacement sensors and strain gauges were used to detect the dynamic responses of derailed vehicle. The motion attitude of derailed vehicle was recorded by using high-speed cameras and surveillance cameras. According to the test data, the ability of overturning resistance for rail and the performance of derailment safety device were verified. The dynamic responses of derailed vehicle and the effects of derailment speed, vehicle mass and track on the responses were studied. Test result indicates that in low-speed derailment, the biggest lateral force between rail and post-derailment safety device is 177.18 kN that is less than the lateral resistance of 510.00 kN, so the post-derailment safety device has the ability to limit the lateral displacement of derailed vehicle by catching the outside of rail after derailment. The derailment process is divided into four stages, including idling, running on the derailer, falling and coasting on the track, at which the dynamic responses of derailed vehicle are increasing

收稿日期:2015-02-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51405400);国家 973 计划项目(2013CB036206);高等学校博士学科点专项科研基金项目(20110184120004)

作者简介:郭力荣(1990-),男,甘肃甘谷人,西南交通大学工学博士研究生,从事车辆动力学研究。

导师简介:王开云(1974-),男,江西萍乡人,西南交通大学教授,工学博士。

with the increase of derailment speed and vehicle mass. When derailment speed is  $22 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ , the derailment distance of CRTS II bi-block sleepers ballastless track is about 15.80 m, while that of CRTS I slab ballastless track is about 20.87 m. Accordingly, the bi-block sleepers of CRTS II bi-block sleepers ballastless track resemble the speed bump and decrease the derailment distance. 4 tabs, 13 figs, 25 refs.

**Key words:** motor vehicle; derailment experiment; post-derailment safety device; dynamic responses; ballastless track

**Author resumes:** GUO Li-rong(1990-), male, doctoral student, +86-28-87600773, jd\_glr@163.com; WANG Kai-yun(1974-), male, professor, PhD, +86-28-87600773, kywang@swjtu.edu.cn.

## 0 引言

机械故障或地震等原因造成动车组车辆脱轨时,由于失去了钢轨的约束和导向作用,车辆会在惯性作用下逸出轨道,造成巨大损失。据统计,铁路行车事故中约 70% 为列车脱轨事故<sup>[1]</sup>。世界各国为防止列车脱轨采取了多种行之有效的措施,如磁轨制动和改良转向架等<sup>[2-3]</sup>。这些措施均为防止车辆脱轨,对车辆脱轨后次生灾害的防治收效甚微,大量事实证明脱轨引起的次生灾害才是造成重大人员伤亡和经济损失的主要原因<sup>[4-5]</sup>。

自 1896 年 Nadal 首次提出脱轨判断准则以来,各国学者不断将其完善并提出了轮重减载率、车轮抬升量与轮轨相对横移量等脱轨判别准则<sup>[6]</sup>。然而由于脱轨过程的复杂性与研究的困难性,车辆脱轨问题至今仍未有有效的解决办法。在脱轨判别标准仍不完善的今天,研究减小车辆脱轨后损失显得尤为重要。Brabie 等在研究了大量的脱轨事故后得出低位制动盘和构架可以有效减小脱轨灾害,并利用多体系统模型和有限元模型研究了车辆脱轨后的动态行为和轮对与混凝土轨枕间的撞击情况<sup>[7-10]</sup>; Kajitani 等研究表明 L 型导向板装置可在车辆脱轨后勾住钢轨,避免车辆偏离轨道中心线,限制车辆横向位移,减小脱轨事故损失<sup>[11-12]</sup>; Sunami 等发明了一种脱轨限制器,可在车辆脱轨后撞击护轨,限制脱轨车辆偏离轨道中心线<sup>[13]</sup>;杨春雷等利用轮轨空间动态耦合关系,提出了一种根据轮轨接触点位置进行脱轨评定的方法,用于对机车车辆安全性分析评价<sup>[14]</sup>;Wang 等建立了一种新的轮轨接触力模型和动态脱轨模型,分析了 CRH 的动态脱轨过程<sup>[15]</sup>;楚永萍等设计了防溜逸颠覆导向挡板装置,并建立了有限元模型验证其可靠性<sup>[16]</sup>;Wu 等建立了列车动态脱轨模型,研究了车辆在桥上脱轨后的动态响应,并设计了一种横向限位装置<sup>[17-19]</sup>,可以限制脱轨车

辆的横向运动,减小脱轨事故造成的损失。上述研究主要是基于软件仿真与台架试验,并不能真实反映车辆脱轨的全过程,L 型导向板虽然已经被安装在新干线列车上,但是否适合中国高速列车仍需通过试验验证,因此,研究中国高速列车脱轨后车辆动态响应,减小脱轨后次生灾害的损失具有重要意义。

本文通过单辆动车低速脱轨试验,验证了脱轨安全防护装置(以下简称防护装置)的性能,分析了脱轨后车辆动态响应过程与相关参数的影响,评估了轨道的破坏情况。

## 1 基本原理

车辆脱轨后,必将产生很大的横移量,偏离轨道,脱离钢轨的约束。若能抑制脱轨车辆的横向移动,使其脱轨后仍受钢轨的约束和导向,防止其冲出路基,可有效避免次生灾害的发生,减少脱轨事故造成的损失<sup>[20-21]</sup>,因此,限制脱轨车辆的横向位移有利于减小脱轨事故损失。

在单辆动车轴箱下方安装防护装置,进行线路低速脱轨试验,其原理见图 1,车辆正常运行时防护装置悬挂在轴箱下方不影响运行;在脱轨后,防护装置钩住钢轨减小车辆横移量,迫使车辆仍沿钢轨方向滑行,防止车辆逸出颠覆,避免次生灾害的发生,减小事故损失。

### 1.1 力学分析

在车辆脱轨后,防护装置与钢轨外侧面碰撞,产生巨大的横向冲击力,车辆超常载荷下轮轴最大横向力<sup>[16]</sup>为

$$F_{1\max} = F_{2\max} = \frac{F_{\max}}{2} = F_{\min} + \frac{(M+P)g}{12}$$

式中: $F_{1\max}$ 、 $F_{2\max}$ 分别为作用在轮轴 1、2 上的最大横向力; $F_{\max}$ 、 $F_{\min}$ 分别为作用在转向架上的最大、最小横向力, $F_{\min}$ 取  $10^4 \text{ kN}$ ;  $P$  为车辆的超常载质量(取 2 倍的定员载质量); $M$  为车辆空载质量; $g$  为重

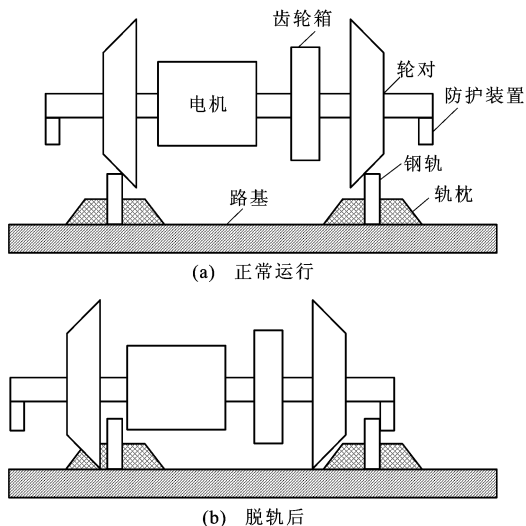


图 1 防护装置工作原理

Fig. 1 Working principle of derailment safety device

力加速度,取  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

基于表 1 试验车辆参数得最大横向力  $F_{1\max}$ 、 $F_{2\max}$  为 67.5 kN,这与国内动车组车辆的试验测试数据较吻合,但考虑到脱轨是非常复杂的过程,难以以常态的极限横向冲击力来评估,本文取其碰撞横向冲击力为 200 kN<sup>[16]</sup>。

表 1 试验车辆主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of test vehicle

空车质量/t	52
载客质量/kg	8 000
整备质量/kg	1 000
转向架质量/kg	7 500
定员时轴重(100%定员)/t	13.7
轴距/mm	2 500
轮径/mm	850

## 1.2 钢轨可靠性分析

由牛顿定律可知,钢轨外侧面会受到 200 kN 的反向冲击力,这就要求钢轨必须承受 200 kN 以上的横向力而不致倾覆。WJ-7 型和 WJ-8 型扣件抗横向力均大于 85 kN。其中,WJ-7 型扣件预埋套管抗拔力不小于 100 kN,WJ-8 型扣件预埋套管抗拔力不小于 60 kN<sup>[22-25]</sup>。

以 WJ-7 型扣件为例,假设在车辆脱轨后,同一转向架的同侧防护装置均与钢轨碰撞,则钢轨所承受的最大横向冲击力  $F_{\max} = 2 \times 200 = 400 \text{ kN}$ ,该冲击力通过钢轨传递到扣件和预埋套管上。试验车辆固定轴距为 2 500 mm,扣件安装间距不大于 650 mm,则承受钢轨最大横向冲击力  $F_{\max}$  的最小扣件数  $N_{\min} = 2\,500 \div 650 = 3.85$ ,取整为 4。由于转向架长

度外两侧适当范围内的扣件均具有良好的防护作用,取转向架长度外两侧前后各一个扣件计算,则撞击时最小有效扣件数  $N = 1 + 4 + 1 = 6$ ,因此,钢轨所能承受的最小横向力  $F_{\min} = 6 \times 85 = 510 \text{ kN} > F_{\max} = 400 \text{ kN}$ ,轨道有能力承受 200 kN 的最大横向冲击力,不会倾覆。

## 2 试验方案

### 2.1 试验条件

#### 2.1.1 试验车辆

试验动车由 2 个动力转向架和完整车体组成,车辆主要技术参数见表 1。转向架主要由焊接构架、一系悬挂、二系悬挂、牵引电机、转向架制动装置与转向架配管配线装置等构成。此外,试验车辆轴箱下方安装脱轨安全防护装置。对试验车辆一端与机车端部进行改造,以使二者虚连接,即机车可推动试验车前进,但又可在机车制动后实现二者快速分离。

#### 2.1.2 线路条件

如图 2 所示,脱轨区段为长约 70 m 的直线段,并在前段设置防撞墙,18 m 处安装脱轨器,见图 3。试验区段前 45 m 铺设 CRTS I 型板式无砟轨道,后 25 m 铺设 CRTS II 型双块式无砟轨道。

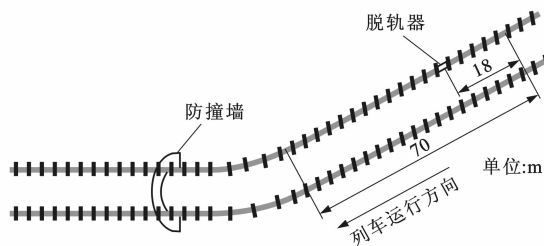


图 2 试验线路

Fig. 2 Test line

### 2.2 测试方法

试验测试内容主要包括:脱轨速度、钢轨横向力、脱轨距离、一系和二系悬挂的相对位移、车辆各部件和防护装置的动应力及振动冲击。利用具有自动采集功能的数字采集设备记录脱轨时轮轨和整车的运动状态,采集频率为 5 000 Hz,保证了测试信号的准确性和完整性。在试验开始前,利用物理同步触发器同步钢轨冲击载荷测试信号与车辆测试信号。选择大量程传感器测试振动加速度与位移,可以采集脱轨时巨大的冲击信号。采用  $120 \Omega$  的应变片组成的全桥应变电路测试车辆动载荷,利用  $120 \Omega$  应变仪,按照 TB/T 2489—94《轮轨水平力、垂直力地面测试方法》标准规定组成电桥,并在试验



图 3 脱轨器

Fig. 3 Derailer

前进行标定,以测试轮轨力。采集时数采设备均采用直流电池供电,避免 50 Hz 工频干扰,保证数据真实、有效。考虑脱轨时巨大的冲击和振动,所有设备均做了抗振缓冲处理。为了做好运动轨迹记录,需在部分位置(如防护装置等)喷刷红色油漆。

2.3 试验过程

在直线加速区段,机车将试验车辆推动至试验

速度,之后机车制动停车,并与试验车辆迅速脱离。随后,试验车辆惰行进入脱轨区段。在 18 m 处(脱轨器位置),爬上脱轨器冲出轨道掉落,完成脱轨过程。待试验车辆完全停稳后,停止数据采集,并进行相关测量记录。

3 试验结果分析

3.1 防护装置可靠性

试验证明防护装置不会影响车辆正常运行,脱轨后钩住钢轨限制车辆横移量,防止逸出轨道,迫使车辆沿着轨道方向滑行,有效避免车辆脱轨后溜逸颠覆,减小次生灾害损失。

表 2 给出了不同工况的各轴箱防护装置最大动载荷,可以看出,防护装置的动载荷与脱轨速度、质量正相关,即脱轨速度与载质量越大,防护装置与钢轨的相互作用越强烈,防护装置承受的冲击载荷越大。脱轨速度影响车辆的横向速度分量,脱轨速度越大,横向速度分量越大,车辆横向动能越大。在同样工况下,防护装置在 CRTS II 型轨道脱轨比 CRTS I 型轨道脱轨时承受的载荷小的多,这是因为 CRTS II 型轨道具有较高的挡肩,承受了最初的冲击,并起到了减速带作用,可有效降低车辆的速度。二位轴箱防护装置承受的冲击载荷远远大于其他轴箱的防护装置,这是因为二位轴箱防护装置是第 1 个与钢轨相互作用,承受了车辆脱轨时最初的能量。

表 2 不同工况防护装置最大动应力

Tab. 2 Maximum dynamic stresses of protective device under different conditions

脱轨速度/(km·h <sup>-1</sup> )		15.30	22.39	29.82	21.38	19.83
轨道类型		CRTS I	CRTS I	CRTS I	CRTS II	CRTS I
车辆载荷		重载	空载	空载	空载	重载
动应力/MPa	二位轴箱	201.95	222.05	343.63	92.77	230.63
	四位轴箱	3.26	5.39	6.95	23.47	4.42
	六位轴箱	1.03	3.50	136.18	1.65	1.29
	八位轴箱	0.67	2.66	5.09	1.17	1.07
脱轨情况	一位端	完全脱轨	完全脱轨	完全脱轨	完全脱轨	完全脱轨
	二位端	未脱轨	部分脱轨	完全脱轨	未脱轨	未脱轨

3.2 车辆动态响应

3.2.1 脱轨过程的动态

试验车辆脱轨过程可分为惰行、轨上运动、落地和路基滑行 4 个阶段,见图 4,以某次试验为例,分析车辆的动态响应过程。试验工况见表 3,车辆主要部件和防护装置的振动信号和轴箱垂向加速的频

谱见图 5,车辆主要部件的应变信号和位移信号分别见图 6、7,虚线划分的 4 个区域依次对应脱轨的 4 个阶段。

在试验开始阶段,车辆惰行,对应测试信号中的 I 区域,车辆的各项指标变化很小,均在正常范围内。之后,车辆一位端一位侧车轮爬上脱轨器(图 4(a)、

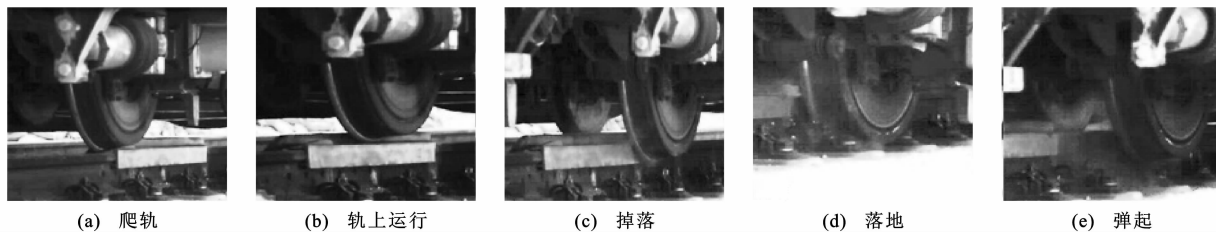


图 4 脱轨过程

Fig. 4 Derailment process

表 3 试验工况

Tab. 3 Test conditions

脱轨速度/( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	脱轨距离/m	脱轨时间/s	脱轨情况
29.82	26.18	$<0.1$	整车全部脱轨

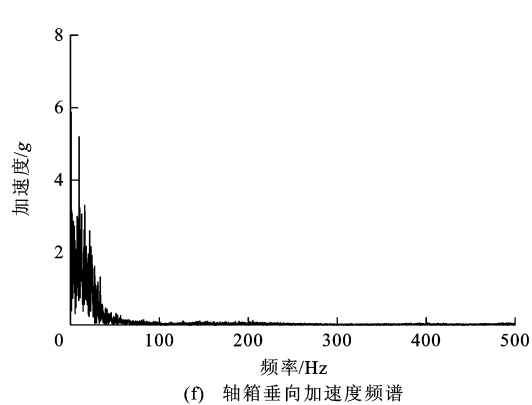
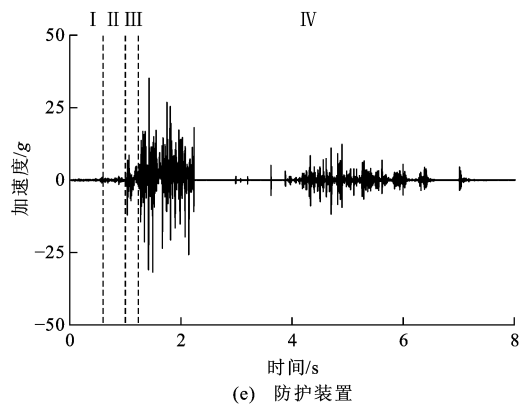
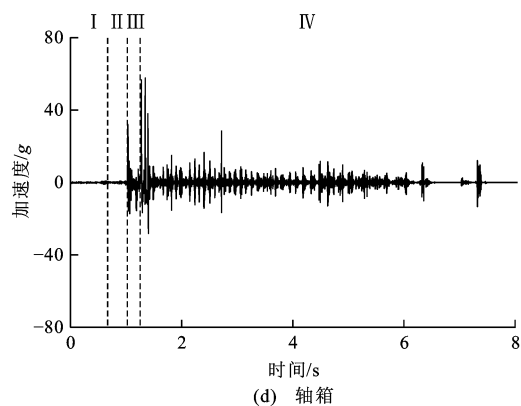
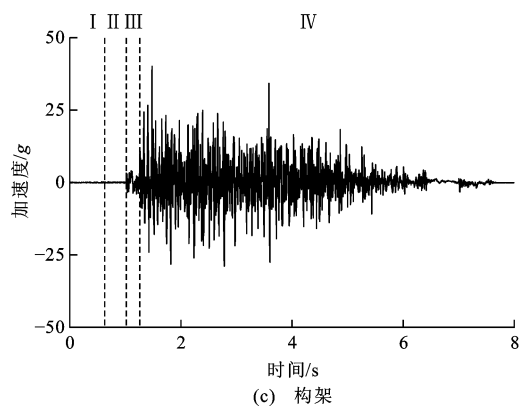
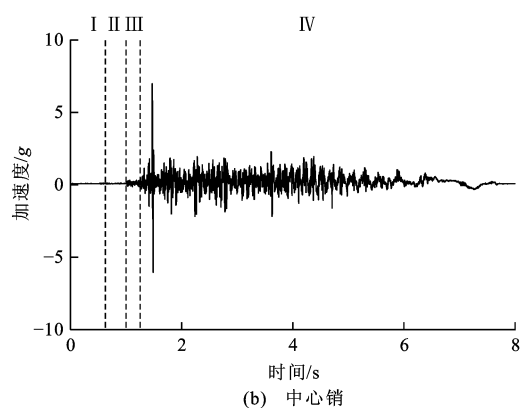
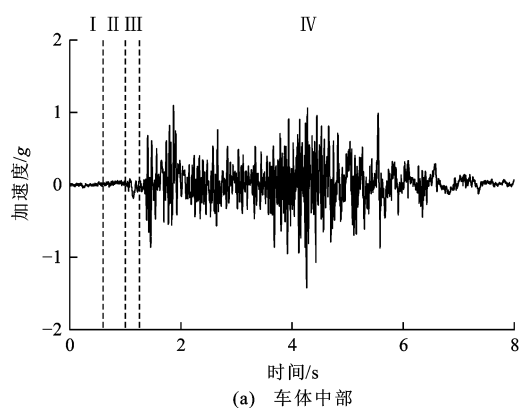


图 5 加速度响应

Fig. 5 Acceleration responses

(b)), 二位侧逐渐偏离轨道, 对应测试信号中的 II 区域。与 I 区域相比, II 区域响应并无明显变化, 只有轴箱和防护装置响应有微小的变化, 这是由于一位侧车轮抬升量大于二位侧车轮抬升量, 轮轨间

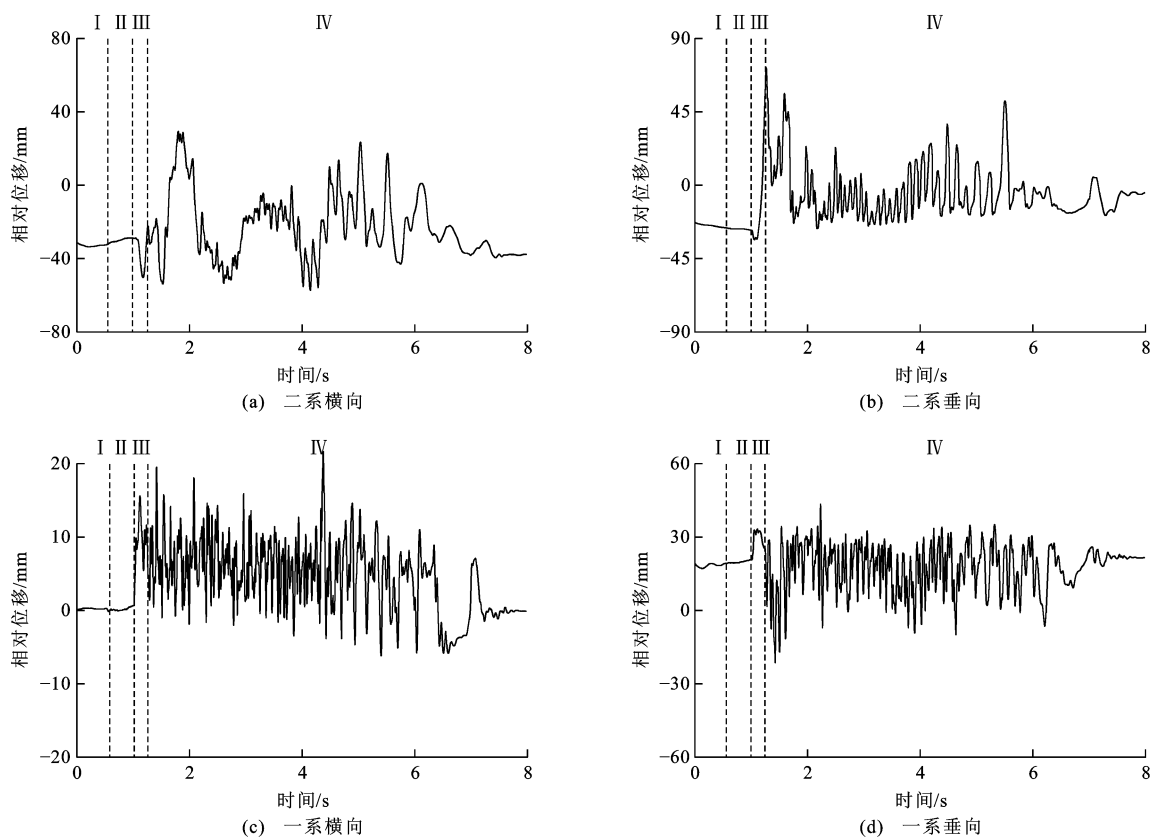


图 6 位移响应  
Fig. 6 Displacement responses

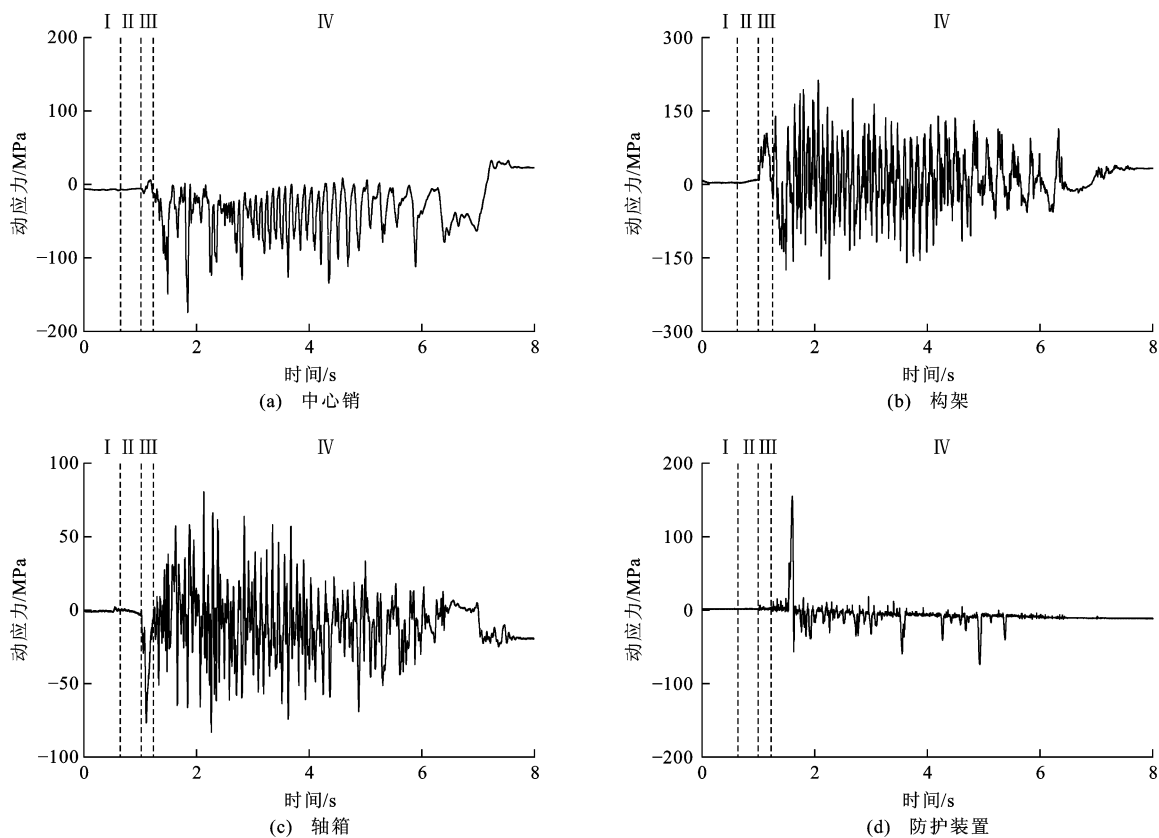


图 7 动应力响应  
Fig. 7 Dynamic stresses responses

作用力变大,但并不影响车辆整体的平稳性。

随后,车辆结束轨上运动,冲出脱轨器,从钢轨掉落砸向路基(图 4(c)、(d)),即脱轨后落地运动,对应测试信号中的Ⅲ区域。与Ⅰ、Ⅱ区域相比,Ⅲ区域车辆各部件响应均有十分显著的变化。该阶段又可分为下落和落地 2 个过程。下落过程类似抛物线运动,分水平和竖直 2 个方向。在水平方向,车辆以脱轨前速度水平前进;在竖直方向,车辆在重力作用下竖直下落,另外,跟据电机和齿轮箱的试验数据与视频监控分析,还有电机、齿轮箱等与钢轨的碰撞。在下落过程中,车辆的各部件响应急剧变化,轴箱、构架和中心销的应力与一系和二系悬挂的位移逐渐增大,并趋向该阶段的峰值。在下落过程结束后,一位侧车轮与路基碰撞,即落地过程。由于剧烈的碰撞,车辆各部件的振动冲击达到了峰值,随即车轮与水平方向成一定夹角( $\theta$ )斜向上弹起(图 4(e))。碰撞过程会产生巨大能量,影响脱轨后车辆在路基上的运行。分析防护装置的试验数据可得,在脱轨过程中,其横向加速度和应力均未出现剧烈的跳变,这是由于车辆脱轨初期横移量相对较小,防护装置还未有效作用于钢轨。

最后是滑行运动,对应测试信号中的Ⅳ区域。该阶段的试验数据和视频监控分析表明,其实际运动是伴有滑行的跳跃前进运动,即不断地与路基碰撞弹起,再碰撞,最后滑行直至停止,其运行轨迹见图 8。该过程与落地过程类似,可分解为若干个落地过程的不断重复,伴随着动能和势能的不断转换与消耗,包括摩擦耗能。该过程中防护装置有效作用于钢轨,其与钢轨外侧剧烈碰撞,作用开始点为其最大动应力处,之后逐渐减小,防护装置紧扣钢轨外侧滑行,见图 9。

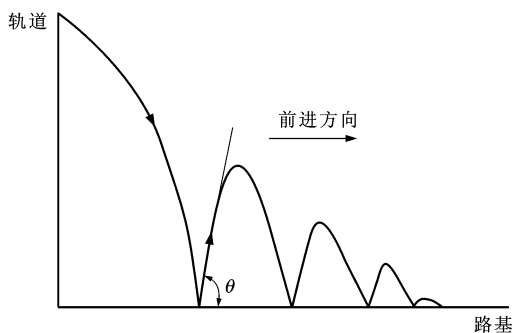


图 8 车辆脱轨后运行轨迹

Fig. 8 Running track of vehicle after derailment

### 3.2.2 速度和载质量的影响

不同工况下试验车辆主要承载件的最大动载荷



图 9 防护装置作用于钢轨

Fig. 9 Protective device acting on rail

和冲击容限见表 4。在相同工况下,脱轨速度越大,脱轨距离和各部件的振动和动载荷越大,横向尤为明显,这是由于速度越大其横向分量越大,横向的振动越明显;在相同速度级下,重载车辆比空载车辆的各部件的振动和冲击载荷大,但脱轨距离较小,这是由于重载车辆的摩擦耗能比空载车辆大。

### 3.2.3 线路的影响

由表 4 可知,在相同工况下,车辆在 CRTS I 型轨道和 CRTS II 型轨道的脱轨情况基本相同,但轴箱和车体的垂向振动变化明显,这是因为 CRTS II 型轨道有较突出的挡肩,车辆脱轨掉道后车轮撞击在挡肩上(图 10),产生巨大的垂向振动,而 CRTS I 型轨道没有挡肩,车辆脱轨时车轮直接撞击扣件和路基(图 11)。此外,由于挡肩起到类似汽车减速



图 10 CRTS II 型轨道的碰撞情况

Fig. 10 Collision situation of CRTS II track

表 4 不同工况下各承载件的强度和冲击容限  
Tab. 4 Strengths and impact tolerances of each carrier under different conditions

脱轨速度/(km·h <sup>-1</sup> )			15.30	22.39	29.82	21.38	19.83
轨道类型			CRTS I	CRTS I	CRTS I	CRTS II	CRTS I
车辆载荷			重载	空载	空载	空载	重载
脱轨距离/m			10.78	20.87	26.18	15.80	14.85
一位端构架	加速度/g	垂向	37.01	54.41	40.11	57.05	63.46
		横向	21.16	18.67	23.61	41.02	29.10
		纵向	8.37	42.61	35.52	17.91	14.85
	动应力/MPa		274.63	295.18	337.71	282.83	452.95
一位轴箱	加速度/g	垂向	55.59	109.27	110.33	109.29	142.28
		横向	16.83	12.04	205.47	13.91	26.49
		纵向	47.15	72.77	200.76	10.62	93.79
	动应力/MPa		134.77	114.85	106.76	166.14	145.96
二位防护装置	横向加速度/g		47.39	38.46	54.80	35.64	54.19
	动应力/MPa		201.95	222.05	343.63	92.77	230.63



图 11 CRTS I 型轨道的碰撞情况  
Fig. 11 Collision situation of CRTS I track

带的作用,所以 CRTS II 型轨道的脱轨距离也较 CRTS I 型轨道小。在相同情况下,CRTS II 型轨道能快速消耗脱轨后的能量,滑行距离较短,其次生灾害的发生概率较 CRTS II 型轨道小。

3.3 钢轨倾覆分析

在试验后,检查钢轨与路基破坏情况,扣件被车轮砸落,路基板面破坏严重,特别是 CRTS II 型轨道挡肩损毁严重,钢轨未发现明显横移、弯曲与倾覆。图 12 为钢轨各断面(测点位置 0 对应脱轨器处)最大横向力,左侧钢轨(二位侧)最大横向力为 177.18 kN,右侧钢轨(一位侧)最大横向力为 104.42 kN,均小于之前分析的最大横向力 200 kN,钢轨不会出现扭曲与倾覆。图 13 为脱轨后钢轨与路基破坏情况。

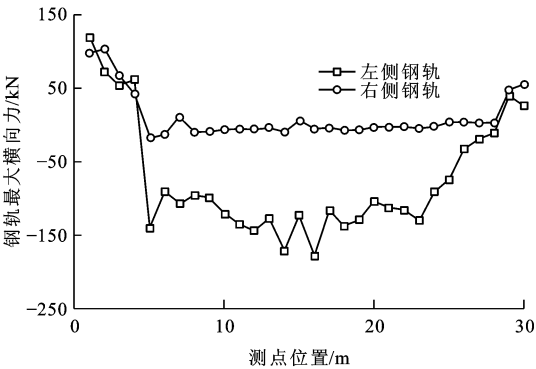


图 12 钢轨横向力  
Fig. 12 Rail lateral forces



图 13 破坏情况  
Fig. 13 Damaged condition



## 4 结 语

(1) 车辆脱轨安全防护装置能限制车辆横移量, 防止冲出轨道, 有效避免脱轨次生灾害的发生。

(2) 脱轨后, 车辆动态响应与脱轨速度和车辆质量正相关, 在路基上的运动轨迹为滑行弹跳运动, CRTS II 型双块式无砟轨道脱轨后次生灾害发生概率较 CRTS I 型板式无砟轨道小。

(3) 由于受试验条件的限制, 仅进行了低速脱轨试验(不超过  $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ), 高速情况下车辆脱轨动态响应和脱轨安全防护装置性能还有待进一步的研究。

## 参 考 文 献 :

## References :

- [1] 向 俊, 周智辉, 曾庆元. 列车脱轨研究最新进展[J]. 铁道科学与工程学报, 2005, 2(5): 1-8.  
XIANG Jun, ZHOU Zhi-hui, ZENG Qing-yuan. Recent developments in train derailment research[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2005, 2(5): 1-8. (in Chinese)
- [2] 王开云, 王少林, 杨久川, 等. 地震环境下铁路轮轨动态安全性及脱轨研究进展[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(6): 82-94.  
WANG Kai-yun, WANG Shao-lin, YANG Jiu-chuan, et al. Progress in study on wheel/rail dynamic safety and derailment of railway during an earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012, 32(6): 82-94. (in Chinese)
- [3] 阳建鸣, 刘春雨. 日本上越新干线列车脱轨事故探究[J]. 中国铁路, 2006(8): 42-45.  
YANG Jian-ming, LIU Chun-yu. Research on derail accident on Jyoetsu-Shinkansen[J]. Chinese Railways, 2006(8): 42-45. (in Chinese)
- [4] 金学松, 郭 俊, 肖新标, 等. 高速列车安全运行研究的关键科学问题[J]. 工程力学, 2009, 26(增 II): 8-22, 105.  
JIN Xue-song, GUO Jun, XIAO Xin-biao, et al. Key scientific problems in the study on running safety of high speed trains[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(SII): 8-22, 105. (in Chinese)
- [5] 周诗广, 郑 健. 日本高速铁路的地震对策[J]. 铁道工程学报, 2008(增 2): 35-43.  
ZHOU Shi-guang, ZHENG Jian. Earthquake countermeasures of Japan's high-speed railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008(S2): 35-43. (in Chinese)
- [6] 肖新标. 复杂环境状态下高速列车脱轨机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.  
XIAO Xin-biao. Study on high-speed train derailment mechanism in severe environment[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013. (in Chinese)
- [7] BRABIE D, ANDERSSON E. Dynamic simulation of derailments and its consequences[J]. Vehicle System Dynamics, 2006, 44(S1): 652-662.
- [8] BRABIE D, ANDERSSON E. Post-derailment dynamic simulation of rail vehicles-methodology and applications[J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 46(S1): 289-300.
- [9] BRABIE D, ANDERSSON E. An overview of some high-speed train derailments: means of minimizing consequences based on empirical observations[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2008, 222(4): 441-463.
- [10] BRABIE D, ANDERSSON E. On minimizing derailment risks and consequences for passenger trains at higher speeds[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2009, 223(6): 543-566.
- [11] KAJITANI Y, KATO H, ASANO K. Development of a L-shaped guide to prevent deviation from rails[J]. JR East Technical Review, 2010(15): 53-56.
- [12] NISHIMURA, K, TERUMICHI Y, MORIMURA T, et al. Development of vehicle dynamics simulation for safety analyses of rail vehicles on excited tracks[J]. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2009, 4(1): 1-9.
- [13] SUNAMI H, MORIMURA T, TERUMICHI Y, et al. Model for analysis of bogie frame motion under derailment conditions based on full-scale running tests [J]. Multibody System Dynamics, 2012, 27(3): 321-349.
- [14] 杨春雷, 翟婉明. 车辆动力学仿真中评判脱轨的直接方法[J]. 交通运输工程学报, 2002, 2(3): 23-26.  
YANG Chun-lei, ZHAI Wan-ming. Direct method for evaluation of wheel derailment in simulation of railway vehicle dynamics[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2002, 2(3): 23-26. (in Chinese)
- [15] WANG Wei, DING Jie-xiong. Research on dynamical derailment system for CRH[J]. Engineering Sciences, 2011, 9(4): 51-54.
- [16] 楚永萍, 韩玉忠, 宫相太, 等. 铁路客车防溜逸颠覆导向挡板研究[J]. 中国铁道科学, 2012, 33(增 1): 127-131.  
CHU Yong-ping, HAN Yu-zhong, GONG Xiang-tai, et al. Research on the guide baffle against runaway and subversion of railway passenger car[J]. China Railway Science, 2012, 33(S1): 127-131. (in Chinese)
- [17] WU Xing-wen, CHI Mao-ru, GAO Hao, et al. Post-derailment dynamic behavior of railway vehicles travelling on a railway bridge during an earthquake[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2014, DOI: 10.1177/0954409714543338.
- [18] WU Xing-wen, CHI Mao-ru, GAO Hao. The study of post-derailment dynamic behavior of railway vehicle based on running tests[J]. Engineering Failure Analysis, 2014, 44: 382-399.
- [19] WU Xing-wen, CHI Mao-ru, GAO Hao, et al. The study of post-derailment measures to limit the extent of a derailment[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F:

(下转第 68 页)

- [20] ROBINSON J W C. Block backstepping for nonlinear flight control law design[C]//BATES D, HAGSTRÖM M. Nonlinear Analysis and Synthesis Techniques for Aircraft Control, Volume 365 of the Series Lecture Notes in Control and Information Sciences. Berlin: Springer, 2007: 231-257.
- [21] CHANG Yao-te. Block backstepping control of MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2011, 56(5): 1191-1197.
- [22] RUDRA S, BARAI R K, MAITRA M. Design of nonlinear state feedback control law for underactuated two-link planar robot: a block backstepping approach[C]//ACM. Proceedings of 2013 Conference on Advances in Robotics. New York: ACM, 2013: 1-6.
- [23] DO K D. Global inverse optimal stabilization of stochastic nonholonomic systems[J]. Systems and Control Letters, 2015, 75: 41-55.
- [24] 万磊,董早鹏,李岳明,等.非完全对称欠驱动高速无人艇轨迹跟踪控制[J].电机与控制学报,2014,18(10):95-103.  
WAN Lei, DONG Zao-peng, LI Yue-ming, et al. Trajectory tracking control of incomplete symmetry underactuated USV at high speed[J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(10): 95-103. (in Chinese)
- [25] DO K D, PAN J. Global robust adaptive path following of underactuated ships[J]. Automatica, 2006, 42(10): 1713-1722.

(上接第 60 页)

- Journal of Rail and Rapid Transit, 2014, DOI: 10.1177/0954409714526586.
- [20] 王伟.高速车辆脱轨非线性动力学及其动态仿真[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.  
WANG Wei. Dynamical simulation of highspeed vehicle derailment and its nonlinear dynamical[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese)
- [21] 向俊,曾庆元.列车-轨道(桥梁)时变系统横向振动稳定性与失稳临界车速分析方法[J].交通运输工程学报,2011,11(1):19-24.  
XIANG Jun, ZENG Qing-yuan. Analysis method of stability and critical speed for train-track (bridge) time-variable system under lateral vibration condition[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(1): 19-24. (in Chinese)
- [22] 于春华.铁路钢轨扣件发展综述[J].铁道标准设计,2006(增):188-191.  
YU Chun-hua. Summary for development of railway steel track fastenings[J]. Railway Standard Design, 2006(S): 188-191. (in Chinese)
- [23] 辛学忠,吴克俭.铁路客运专线无砟轨道扣件探讨[J].铁道工程学报,2006(2):1-4.  
XIN Xue-zhong, WU Ke-jian. Exploration on rail fastenings for ballastless track of passenger dedicated railway line[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2006(2): 1-4. (in Chinese)
- [24] 伍曾,李洁青,黄伟,等.WJ-7型无砟轨道扣件扣压力损失的室温蠕变试验研究[J].铁道标准设计,2014,58(8):60-63.  
WU Zeng, LI Jie-qing, HUANG Wei, et al. Experiment research on room temperature creep affecting clamping force loss of WJ-7 type ballastless track fastener[J]. Railway Standard Design, 2014, 58(8): 60-63. (in Chinese)
- [25] WANG Kai-yun, HUANG Chao, ZHAI Wan-ming, et al. Progress on wheel-rail dynamic performance of railway curve negotiation[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(3): 209-220.