DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2022.06.011

铁道机车车辆

基于标准EN 14363规定的扭曲线路防脱轨安全性研究

冯　扬，周　橙，梁海啸，张志波，薛　源

（中车青岛四方机车车辆股份有限公司，山东 青岛　266111）

摘　要：当铁道车辆在线路上运行时，行经因轨道超高、三角坑、轨缝、道岔、轨道几何不平顺等因素造成的扭曲线路是不可避免的。当车辆以低速通过处于平面极小半径曲线的扭曲线路时，脱轨风险会增大，但目前国内对扭曲线路防脱轨的安全性评估尚无标准的方法，因此本文对标准EN 14363规定的扭曲线路防脱轨安全性评估方法进行了研究，以某市域车辆为例，分别基于标准规定的3种方法进行评估。其中，方法1要求在扭曲线路且处于*R*150 m的平面曲线上测量车轮上升量，以车轮上升量不超过5 mm为评估限值；方法2要求在扭曲线路直线段测试轮轨垂向力，在平面曲线*R*150 m处测量外侧车轮的轮轨横向力，按照公式计算曲线外轨侧轮轨横向力和垂向力比值*Y*/*Q*，以*Y*/*Q*值不超过1.2为评估限值；方法3要求在试验台上测量回转阻力系数，在扭曲线路上测量轮重减载率，以回转阻力系数不超过0.1，轮重减载率不超过0.6为评估限值。结果表明，相比较于方法1和方法2，方法3的线路扭曲程度最恶劣，线路扭曲时的车轮垂向位移最大值为80.1 mm；对于车辆方面，由于空气弹簧失气工况时的二系垂向刚度增大近10倍，导致车辆通过扭曲线路时车轮减载量增大，因此空气弹簧失气工况相比较于充气工况，车辆适应扭曲线路的能力降低，最大限值比为98%。为便于仿真与试验对比，按照标准EN 14363评估扭曲线路防脱轨安全性时建议采用方法2进行评估，即在直线段测量轮轨垂向力，而在曲线半径为*R*150 m处测量轮轨横向力。

关键词：扭曲线路；安全性；EN 14363；仿真

中图分类号：U211.5　　**文献标识码：**A

文章编号：1000-128X(2022)06-0074-06

A study on safety against derailment of twisted track based on EN 14363 standard

FENG Yang, ZHOU Cheng, LIANG Haixiao, ZHANG Zhibo, XUE Yuan

(CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266111, China)

Abstract: When a railway vehicle is running on the track, it is inevitable that it will pass through the twisted track caused by factors such as track superelevation, twist warp, rail gaps, turnouts and geometric irregularity of track. When a vehicle passes through a twisted track on a minimum plane radius curve at low speed, the risk of derailment increases. However, there is no standard method for assessment of safety against derailment on a twisted track in China at present. Therefore, in this paper, the method for assessment of safety against derailment on a twisted track stipulated in the EN 14363 standard was researched. A city vehicle was taken as an example, and the assessment was made based on three methods specified in the standard. For method 1, the wheel lift was required to be measured on a twisted track and a plane curve with *R*150 m, and the wheel lift of no more than 5 mm shall be regarded as the assessment limit. For method 2, the vertical wheel-rail force was required to be measured on the straight section of the twisted track, and the lateral wheel-rail force of the outer wheel to be measured at *R*150 m on a plane curve. The ratio *Y*/*Q* of the lateral wheel-rail force to the vertical wheel-rail force on the outer rail side of the curve shall be calculated according to the formula, and the value of *Y*/*Q* not exceeding 1.2 shall be re-

收稿日期：2022-02-25；修回日期：2022-07-22
基金项目：国家重点研发计划项目（2022YFB4300604）
通信作者：冯　扬(1991—)，男，硕士，工程师，主要从事车辆系统动力学研究；E-mail: swjtufy@163.com

garded as the assessment limit. For method 3, the slewing resistance coefficient was required to be measured on the test bench and the rate of wheel load reduction to be measured on the twisted track. The slewing resistance coefficient not exceeding 0.1 and the rate of wheel load reduction not exceeding 0.6 shall be regarded as the assessment limit. The results show that compared with method 1 and method 2, method 3 results in the worst track twist, and the maximum vertical displacement of the wheel during the track twist is 80.1 mm. For a vehicle, the wheel load reduction increases when the vehicle passes through the twisted track due to the fact that the vertical stiffness of the secondary system increases nearly 10 times in the deflated condition of the air spring. The deflated condition of the air spring results in a lower ability to adapt to the twisted track compared with the inflated condition, and the maximum limit ratio is 98%. For the convenience of simulation and test comparison, it is recommended that when assessing the safety against derailment on the twisted track according to EN 14363, method 2 should be used. That is, the vertical wheel-rail force shall be measured on the straight section while the lateral wheel-rail force measured at *R*150 m.

Keywords: twisted track; safety; EN 14363; simulation

0　引言

当铁道车辆运行在线路时，由于线路存在超高、三角坑、轨缝、道岔、轨道几何不平顺等因素，导致同一转向架或同一辆车的不同车轮轮轨接触点不在同一水平面，在铁路坐标系垂直方向车轮出现增减载，而在横向由于轮对发生横移和摇头运动导致轮轨横向力增加。当减载的车轮受到较大的轮轨横向力时，车轮脱轨系数会增大，严重时发生脱轨事件，因此在车辆设计时需进行扭曲线路防脱轨安全性评估，保证车辆运行安全。

车辆通过扭曲线路的能力一方面与线路扭曲程度相关，另一方面与车辆适应扭曲线路能力相关。线路运维部门通过轨道综合检测车定期对轨道不平顺、三角坑、超高进行检测，按照轨道动态不平顺管理值分别计算峰值和均值，其中对于峰值管理，按照线路（含道岔及调节器范围）各项偏差等级分为4级；计算线路轨道质量指数和单向标准差，评价线路是否合格[1]，并对超标点进行线路维护。在车辆方面，通过优化车辆参数降低车辆通过扭曲线路时轮重减载率和降低曲线通过时轮轨横向力，提高车辆适应扭曲线路的能力。

目前，相关国家和组织为保证车辆行车安全制订了各项标准。我国制订了标准GB 5599—2019，该标准规定了机车车辆在线路上进行动力学性能试验鉴定的方法和评价指标，线路区段分为直线、大半径曲线、小半径曲线、直向通过道岔和侧向通过道岔[2]，但标准未明确定义通过扭曲线路的工况及其评价方法。国外标准，如EN 14363、GM/RT 2141、澳大利亚铁路ROA指南和AAR M1001等标准，提出了评估车辆通过扭曲线路防脱轨安全性的评估方法[3-6]。

标准EN 14363中关于扭曲线路防脱轨安全性评估是TSI评估体系重要组成部分。该评估方法适用于一般两轴两级悬挂常规车辆，同时适用于铰接车、转向架轴数大于2的车辆、悬挂大于两级的车辆、径向转向架车辆，基本覆盖了铁道车辆所有转向架型式。对于特定转向架进行评估时，重点关注线路扭曲率和计算工况的设置，评价指标与常规转向架相同。本文基于3种EN 14363规定的扭曲线路防脱轨安全性评估方法，进行仿真分析，为后期车辆通过TSI体系评估提供支撑。

1　线路扭曲率

在评估车辆通过扭曲线路（见图1）时，通常将超高、三角坑、轨缝、道岔、轨道几何不平顺等通过扭曲率（或斜度）定义为转向架扭曲和车辆扭曲。澳大利亚铁路ROA指南规定了2种扭曲线路工况：一种为常规扭曲线路，当车辆定距大于9 m时，车辆扭曲定义为1:190斜坡；另一种为组合扭曲线路，由转向架扭曲（1:100表征）和车辆扭曲（1:250表征）叠加实现[3]。英国铁路技术标准GM/RT 2141: 2000规定了扭曲线路，包括直线、缓和曲线和圆曲线，其中缓和曲线斜度为1:300，用于表征车辆扭曲，在出缓和曲线（run-off transition）上设置1个长6 m、深20 mm的三角坑，用于表征转向架扭曲[4]。

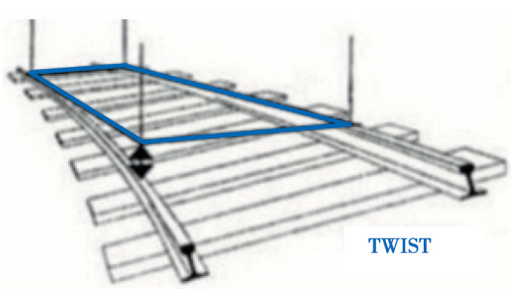

图1　扭曲线路

Fig. 1　Twisted track

当评估扭曲线路防脱轨安全性时，欧盟标准EN 14363: 2016提供了3种方法，均采用车辆扭曲叠加转向架扭曲的方法，不同评估方法对应了不同扭曲设定值，具体如表1和表2所示。

EN 14363定义的线路扭曲可通过抬高一侧车轮至

规定位置实现，在满足标准规定的扭曲线路工况下，各车轮位置如图2所示，其中红线表示左侧车轮，黑线表示右侧车轮。当车辆通过有线路扭曲的左曲线时，车辆左侧车轮抬升，左侧车轮增载，右侧车轮仍然在轨面上，右侧车轮减载，此时右侧车轮轮重减载率和脱轨系数增大，同时由于轮对的摇头和横移运动导致右侧车轮轮轨横向力增大，导致脱轨系数进一步增大。

表1　转向架扭曲率

Table 1　Bogie twist rate

评估方法	轴距$2a^+$/m	转向架扭曲率g^+/‰
方法1	≤4	7
	>4	$2+20/2a^+$
方法2	<4	$7-5/2a^+$
	≥4	$2+15/2a^+$
方法3	<5.45	6.67
	≥5.45	$3+20/2a^+$

表2　车辆扭曲率

Table 2　Vehicle twist rate

评估方法	车辆定距$2a$/m	车辆扭曲率g^*/‰
方法1	≤4	7
	4<$2a$≤20	$2+20/2a$
	20<$2a$≤30	3
	$2a>30$	$90/2a$
方法2	<4	$7-5/2a$
	4<$2a$≤20	$2+15/2a$
	20<$2a$≤30	$3-5/2a$
	$2a>30$	$85/2a$
方法3		$3+20/2a$

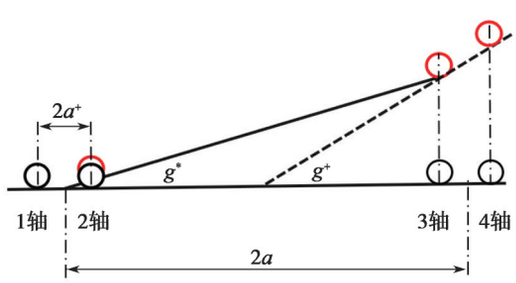

图2　扭曲线路车轮垂向位移

Fig. 2　Vertical wheel displacement of twisted track

2　EN 14363规定的扭曲线路防脱轨安全性评估

标准EN 14363规定的3种方法均可评估车辆扭曲线路的防脱轨安全性，可选择其中1种方法进行评估。若评估指标小于标准限值要求，即满足扭曲线路防脱轨安全性要求。3种评估方法具体流程如下：

①方法1：在曲线半径为150 m且有扭曲线路的线路上进行测试，测量车轮上升量，并记算脱轨系数。评价指标为车轮上升量不大于5 mm；脱轨系数不作为评价指标，但应在报告中记录脱轨系数值。

②方法2：在曲线半径为150 m的线路上测试轮轴横向力。在试验台上通过给车轮施加不同的抬升量测量轮轨垂向力，计算曲线外轨侧轮轨横向力和垂向力比值Y/Q，评估扭曲线路防脱轨安全性。评价指标为Y/Q值不超过1.2。

③方法3：测试过程分为2个阶段，第一阶段要求在试验台测量回转阻力系数，在扭曲线路上测试轮重减载率；当第一阶段评估不能通过时，进行第二阶段测试，按标准附录B的要求进行脱轨系数计算，如果第二阶段评估也不通过，可选择方法1或方法2重新进行评估。方法3评价指标为回转阻力系数不超过0.1，轮重减载率不超过0.6，脱轨系数不超过1.2。

3　动力学模型

基于多体动力学软件Simpack，建立某市域车辆动力学仿真模型。模型包括车体、构架、轮对和轴箱，共计50个自由度，动力学模型如图3所示，车辆主要参数如表3所示。

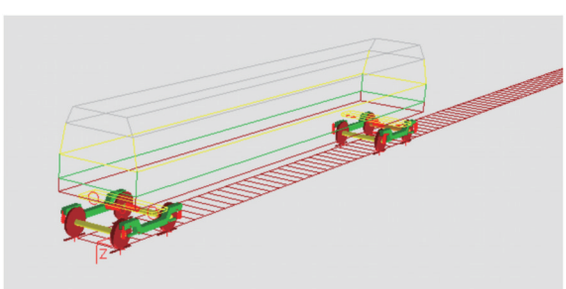

图3　车辆动力学模型

Fig. 3　Vehicle dynamic modal

表3　某市域车辆主要参数

Table 3　Main parameters of a urban vehicle

参数名称	参数值
车辆定距/m	17.3
轴距/m	2.45
轴重/t	14
一系悬挂中心距轨面高/m	0.75
轨距/m	1.435
轮轨接触点横向跨距/m	1.493

结合表3的参数，根据表1和表2的公式，计算3种方法对应的外侧车轮垂向位移，计算结果如图4所示。由图4可知，采用方法1所得的车轮最大垂向位移为63.2 mm，等效顺坡率为3.2‰；采用方法2所得的车轮最大垂向位移为55.7 mm，等效顺坡率为2.82‰；采用方法3所得的车轮最大垂向位移为80.1 mm，等效顺坡率为4.06‰。采用方法1和方法2所得的车轮垂向位移基本接近，采用方法3所得的车轮垂向位移远大于采

用方法 1 和方法 2，因此采用方法 3 定义的线路扭曲程度相对于采用方法 1 和方法 2 更加恶劣。

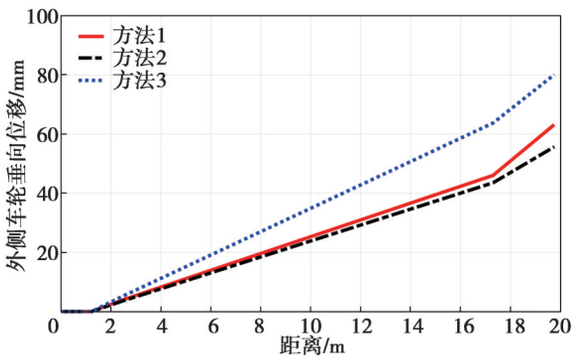

图 4　采用 3 种方法所得车轮垂向位移比较

Fig. 4　Comparison of vertical wheel displacements obtained by three methods

4　仿真分析

对车辆以 10 km/h 的速度通过不同的扭曲线路的工况进行仿真。按照标准的要求当二系悬挂采用空气弹簧时，需分别评估空气弹簧处于正常和失气的 2 种工况。为保证车辆完全通过扭曲线路，计算距离足够长。由于仿真速度低，轨道谱对安全性影响较小，本次仿真不采用轨道谱激励。

采用方法 1 仿真时，在空气弹簧正常的工况下车轮上升量为 1.67 mm、脱轨系数为 0.81，而在空气弹簧失气工况下车轮上升量为 1.84 mm，脱轨系数为 1.06。仿真结果如图 5 和图 6 所示。

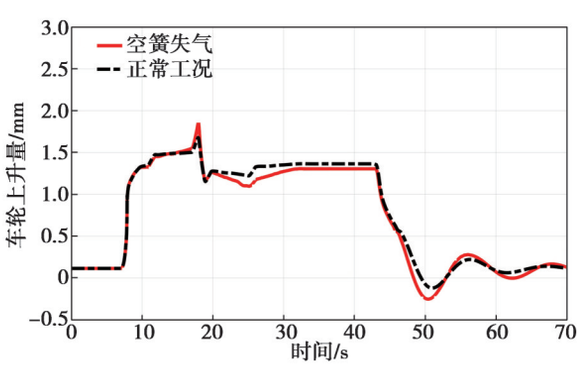

图 5　车轮上升量(方法 1)

Fig. 5　Wheel lift(method 1)

采用方法 2 仿真时，在空气弹簧正常工况的条件下外轨侧轮轨横向力和垂向力比值 Y/Q 为 0.71，而在空气弹簧失气工况的条件下 Y/Q 为 0.85。仿真结果如图 7 所示。

采用方法 3 仿真时，在空气弹簧正常工况的条件下回转阻力系数为 0.069、轮重减载率为 0.24、脱轨系数为 0.84，而在空气弹簧失气工况回转阻力系数为 0.015、轮重减载率为 0.56、脱轨系数为 1.17。仿真结果如图 8 和图 9 所示。

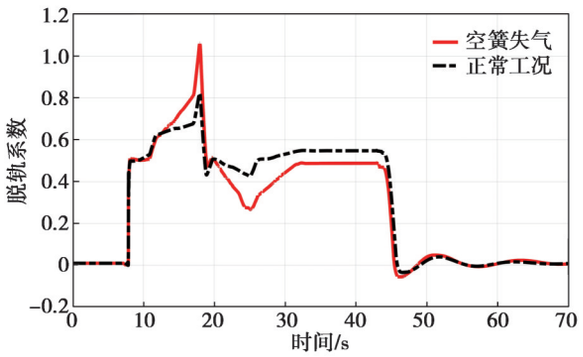

图 6　脱轨系数曲线(方法 1)

Fig. 6　Curve of derailment coefficient (method 1)

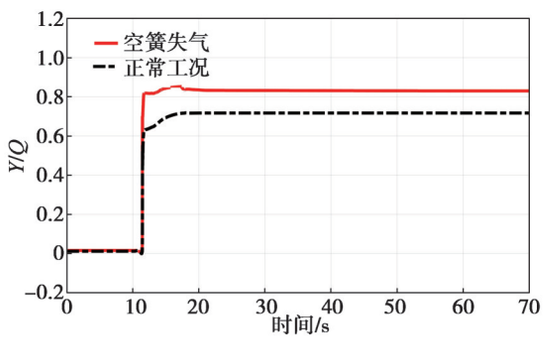

图 7　外轨侧轮轨横向力和垂向力比值 Y/Q(方法 2)

Fig. 7　Ratio Y/Q of the lateral wheel-rail force to the vertical wheel-rail force on the outer rail side (method 2)

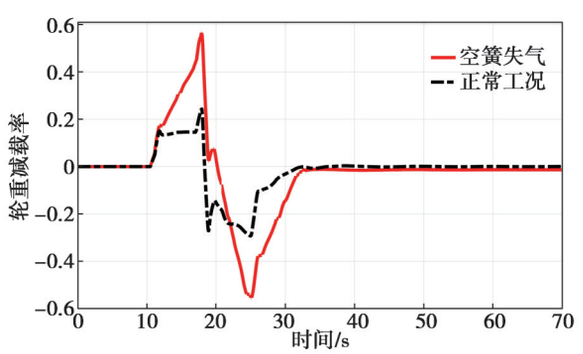

图 8　轮重减载率曲线(方法 3)

Fig. 8　Curve of rate of wheel loading reduction (method 3)

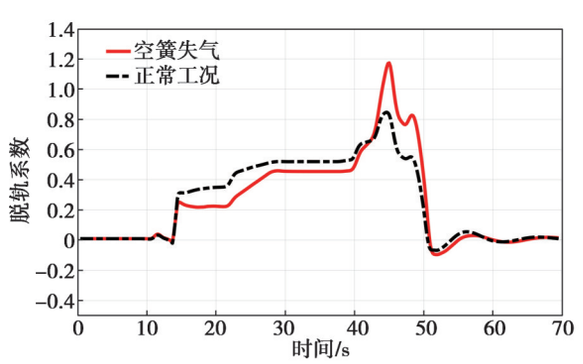

图 9　脱轨系数曲线(方法 3)

Fig. 9　Curve of derailment coefficient (method 3)

由于不同评估方法的评价指标与限值不同，为方便对比，进行归一化处理，定义计算结果与评估限值的比值为限值比，限值比越大表明该指标越趋近于限

值。对空气弹簧正常和失气2种工况，采用3种评估方法所得的评价指标和限值进行归一化处理，处理结果如表4和表5所示

表4　空气弹簧正常工况

Table 4　Normal condition of air spring

评估方法	评价指标	计算结果	限值	限值比/%
方法1	车轮上升量	1.67	5.00	33.4
	脱轨系数	0.81	1.20	67.5
方法2	*Y*/*Q*	0.71	1.20	59.2
方法3	回转阻力系数	0.069	0.100	69.0
	轮重减载率	0.24	0.60	40.0
	脱轨系数	0.84	1.20	70.0

表5　空气弹簧失气工况

Table 5　Deflated condition of air spring

评估方法	评价指标	计算结果	限值	限值比/%
方法1	车轮上升量	1.84	5.00	36.8
	脱轨系数	1.06	1.20	88.3
方法2	*Y*/*Q*	0.85	1.20	70.8
方法3	回转阻力系数	0.015	0.100	15.0
	轮重减载率	0.56	0.60	93.3
	脱轨系数	1.17	1.20	97.5

根据表4和表5的数据可知：

①在正常工况下，限值比最大值为70.0%，对应的是采用方法3仿真计算的脱轨系数；限值比最小值为33.4%，对应的是采用方法1仿真计算的车轮上升量。在空气弹簧失气工况下，限值比最大值为97.5%，对应的是采用方法3仿真计算的脱轨系数；限值比最小值为36.8%，对应的是采用方法1仿真计算的车轮上升量。相较而言，采用方法1更容易满足评估要求。

②空气弹簧失气工况的回转阻力系数相比较于正常工况有明显改善，主要原因是由于当空气弹簧失气时，应急橡胶簧与上盖板接触，当车辆通过曲线时，转向架与车体发生相对转动，二系回转刚度由应急橡胶簧与上盖板的摩擦力提供，该摩擦力随回转角度增大基本不变；而在正常工况下，二系回转刚度随回转角度增大而增大，因此在空气弹簧失气工况下回转阻力系数较小。

③空气弹簧失气工况相比较于空气弹簧正常工况，车辆的脱轨系数和轮重减载率均明显恶化，主要是由于当空气弹簧失气时，垂向刚度增加近10倍，在车辆通过扭曲线路时，减载侧车轮垂向减载加剧，导致轮重减载率和脱轨系数均增大，因此空气弹簧失气时车辆适应扭曲线路能力较弱。

④采用方法3的线路扭曲程度较大，导致在空气弹簧失气工况下车辆的轮重减载率、脱轨系数限值比大，标准规定“采用方法3评估超过限值后，可采用方法1或者方法2进行评估，如果采用方法1或方法2评估通过，车辆同样满足EN 14363扭曲线路防脱轨安全性评估要求”。因此，常规项目如无明确要求采用方法3时，车辆扭曲线路防脱轨安全性评估可直接采用方法1或方法2进行。

5　结论

为满足TSI评估体系对扭曲线路防脱轨安全性要求，通过分析EN 14363: 2016标准3种评估方法，分别对空气弹簧正常工况和空气弹簧失气工况进行评估，结论如下：

①采用回转阻力系数、轮重减载率和脱轨系数作为评价指标的方法3的线路扭曲程度相较于方法1和方法2更大，车轮垂向位移最大值为80.1 mm。

②车辆在空气弹簧失气工况下适应扭曲线路能力降低，最大限值比为97.5%，对应的是采用方法3仿真计算的脱轨系数。

③安全性评估可直接采用方法1或者方法2进行，鉴于采用方法1仿真计算的车轮上升量测试相比较于采用方法2测试轮轨力难度大，为便于仿真与试验对比，建议采用轮轨横向力与垂向力比值的方法2进行EN 14363扭曲线路防脱轨安全性评估。

参考文献：

[1] 铁道部运输局工务部. 高速铁路无砟轨道线路维修规则(试行): TG/GW 115—2012[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2012.
Transport Bureau Public Works Department of Railways Ministry. Rules for maintenance of ballastless tracks for high-speed railway (trial implementation): TG/GW 115—2012[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2012.

[2] 国家铁路局. 机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范: GB/T 5599—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
State Railway Administration. Specification for dynamic performance assessment and testing verification of rolling stock: GB/T 5599—2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.

[3] 张良威, 刘爱文, 姜瑞金. 铁路集装箱平车通过扭曲线路的减载安全性分析[J]. 铁道车辆, 2015, 53(7): 1-3.
ZHANG Liangwei, LIU Aiwen, JIANG Ruijin. Safety analysis of reduction rate of wheel load for container flat cars in negotiation of twist line[J]. Rolling Stock, 2015, 53(7): 1-3.

[4] 陆冠东, 徐荣华. 线路扭曲与脱轨安全性分析方法介绍[J]. 铁道车辆, 2008, 46(7): 1-4.
LU Guandong, XU Ronghua. Description of the analysis method of track twisting and derailment safety[J]. Rolling Stock, 2008, 46(7): 1-4.

[5] 张良威, 唐应文, 伏铁军, 等. 出口沙特32.5 t轴重磷酸盐漏斗车线路扭曲适应特性分析[J]. 铁道车辆, 2010, 48(12): 11-13.

ZHANG Liangwei, TANG Yingwen, FU Tiejun, et al. Analysis of the adaptability features of the phosphate hopper car with an axle load of 32.5 t exported to Saudi Arabia on twisted track[J]. Rolling Stock, 2010, 48(12): 11-13.

[6] CEN/TC 256. Railway applications-Testing and simulation for the acceptance of running characteristics of railway vehicles-Running behaviour and stationary tests: EN 14363: 2016[S]. Brussels: CEN, 2016.

[7] 鹿中华, 于连玉, 柳文豪, 等. 欧洲标准铁路货车运行安全性研究[J]. 铁道机车车辆, 2022, 42(1): 51-55.
LU Zhonghua, YU Lianyu, LIU Wenhao, et al. Study on operation safety standard of wagons exported to Europe[J]. Railway Locomotive & Car, 2022, 42(1): 51-55.

[8] 李培行. 二轴转向架构架扭曲载荷试验方法研究[J]. 铁道车辆, 2019, 57(10): 1-5.
LI Peixing. Research on test method for torsional load on 2-axled bogie frame[J]. Rolling Stock, 2019, 57(10): 1-5.

[9] 陆铭. 时速 200 公里轴箱内置式转向架动力学性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
LU Ming. Research on dynamics performance of the 200 km/h inner axle-box bogie[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.

[10] PACANA A, SIWIEC D. An analysis of the causes of track twist at high speed of driving[J]. Production Engineering Archives, 2019, 22(22): 11-15.

[11] 吴兴文. 地震条件下车辆脱轨安全性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
WU Xingwen. Running safety assessment of railway vehicles under the eartqhuake excitations[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.

[12] 魏来. 高速列车相关运行安全性问题研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
WEI Lai. Study on related running safety problems for high speed trains[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.

[13] 杜子学, 曹丹婷. 跨座式单轨车辆空气弹簧失效对行车安全性能的影响研究[J]. 机车电传动, 2016(5): 76-80.
DU Zixue, CAO Danting. Influence of air spring failure on operation safety for straddle-type monorail vehicle[J]. Electric Drive for Locomotives, 2016(5): 76-80.

[14] 冯陈程, 关庆华, 赵鑫. 偏载对重载货车运行安全性的影响[J]. 机车电传动, 2019(2): 20-23.
FENG Chencheng, GUAN Qinghua, ZHAO Xin. Influence of partial load on running safety of heavy haul train[J]. Electric Drive for Locomotives, 2019(2): 20-23.

[15] MASTORIS I, NUQALI A, TADURU S S, et al. Left ventricular assist device outflow track twist masquerading as RV failure[J]. Journal of the American College of Cardiology, 2020, 75(11 Suppl 1): 3372.

[16] BATCHELOR G H. Paper 3: the influence of track twist on vehicle design[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Conference Proceedings, 1965, 180(6): 86-98.