

基于轮轨位移的列车运行安全评价方法研究

马增强 刘俊君 陈明义

(石家庄铁道大学电气与电子工程学院, 河北省石家庄市 050043)

摘要: 随着列车不断提速, 列车动力学问题越来越突出, 如何评价和预测列车运行安全性是目前研究的一个重点。本文分析了目前国际上常用的车辆脱轨评价标准的特点及不足, 在研究传统安全性评价准则的基础上, 通过分析轮轨间几何位置和传统安全评价标准之间的联系, 提出了根据轮轨相对横向位移与垂向位移以及横向位移与垂向位移比值的限值, 来判定列车运行安全的评价指标, 并通过仿真分析进行了验证, 仿真结果表明了所提新的评判方法的可行性。

关键字: 脱轨系数, 轮重减载率, 横向位移, 垂向位移, 安全性评价

1 引言

随着列车运行速度的不断提高, 列车动力学问题越来越突出, 如何评价和预测列车运行安全性是目前研究的一个重点。近年来, 高铁发展迅速, 各国列车都在大提速, 列车运行速度越高, 车辆脱轨的可能性越大。为了避免脱轨, 各国已经研究了很长时间。美国运输试验中心的 Weinstock 博士研究了整个轴两个车轮的脱轨, 他综合考虑轮缘两侧(即轮缘贴靠侧和非贴靠侧)的横向力和垂向力的比值, 提出了一根轴上两个车轮脱轨系数的相加值不大于 Nadal 脱轨评价标准与轮轨间摩擦系数的相加值^[1]。TTCI(美国运输技术中心)在 2000 年提出了一项爬轨准则, 是首次将冲角明确包含在内的爬轨准则, 实验和仿真结果均表明: 脱轨的距离限值是冲角的函数。但是该准则局限于特定的车辆和轨道润滑状态^[2]。Princeton 大学的 Sweet 教授和 Karmel 博士对直线上的脱轨现象做了很详细的研究, 并在试验研究方面使用了 1:5 单轮对模型, 建立了二自由度和三自由度的动态轮对模型^[3], 分析了非线性蠕滑现象, 但还有一些没考虑的因素。李国伟^[4]采用 DEA 对列车的运行安全进行了评价, 并通过实例分析验证了该方法的可行性。车玉龙^[5]分析了 CTCS-3 级列控系统的安全性, 通过识别系统中的潜在危险, 分析了各危险模式导致事故的概率和后果, 最后基于 BN 提出了一种安全风险评估方法。西南交通大学的翟婉明教授, 经过分析大量的国内外对脱轨的研究试验和研究数据, 指出了传统脱轨评价指标的不足。并运用车辆-轨道耦合动力学理论研究单个轮对, 还对爬轨脱轨和瞬时跳轨情况进行了仿真^[6], 得出了车轮超限时间与车轮抬升高度之间的联系, 提出最大允许的安全超限时间为 35ms。孙丽霞等^[7-10]研究分析了高速铁道车辆蛇行失稳后的蛇行脱轨过程及其影响因素, 提出了高速铁道车辆的蛇行脱轨安全性应根据轮对横移速度限值并考虑车辆的横向运行稳定性来进行评判。当高速铁道车辆分别表现为“超临界”和“亚临界”的蛇行失稳极限环分岔形式时, 可分别采用转向架横向加速度移动均方根值和转向架横向加速度限值对其横向运行稳定性进行评判。然而由于影响高速铁道车辆蛇行脱轨因素的复杂性, 仿真计算结论有待于通过试验验证。虽然近年来国内外学者对脱轨进行了大量的研究, 但车辆脱轨至今仍难以解决, 直到现在对脱轨机理的认识还很模糊。针对传统脱轨评判标准的局限性, 本文开展车辆动态脱轨研究, 建立适合脱轨的动力学模型, 进行车辆动态脱轨仿真。进行轮轨间几何位置(轮轨间横垂向位移及其比值)和脱轨安全性之间的研究, 以此来找到一种新的评定脱轨的准则^[11]。

2 基于轮轨相对位移的脱轨评判方法

在列车脱轨安全性评价方面, 大部分国家都在使用脱轨系数 Q/P , 即轮轨横向力 Q 与垂向力 P 之比, 只有少部分国家用脱轨系数和轮重减载率 ($\Delta P/P$) 两项指标。但它也有很大

基金资助: 国家自然科学基金项目(11372199, 11572206); 河北省自然科学基金项目(A2014210142)。

作者简介: 马增强(1975-), 男, 河北省石家庄市, 汉, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为图形图像处理, 计算机测控; 刘俊君(1994-), 男, 河北省保定市, 汉, 硕士, 研究方向为计算机测控

的局限性：在轮对横向力为零或接近于零时，脱轨系数就很难评定脱轨现象。现有的脱轨安全评判标准已不能适应当前试验鉴定需要，有必要根据国内外运用实践和最新轮轨相互作用理论研究结果，对脱轨安全评判标准适当调整。表征脱轨危险程度最直观、准确的特征是轮轨接触点位置，但一般难以精确测量。故选取轮轨型面上几个特征点，以接触线上特征点的空间轨迹来描述车轮相对钢轨的空间位置，以此为基础探讨脱轨判别的动态方法，提出利用轮轨相对横向位移判别脱轨的几何准则。

如图 1 所示，车轮型面上点 C（最大轮缘角）、D（接近轮缘顶端）和 F（踏面端点）相对于钢轨型面上点 E 的横、垂向相对坐标差为

$$\begin{cases} l_i = y(i) - y(E) \\ h_i = z(i) - z(E) \end{cases}, (i=C, D, F) \quad (1)$$

式中 l_i 和 h_i 为轮轨相对横移和垂向函数。

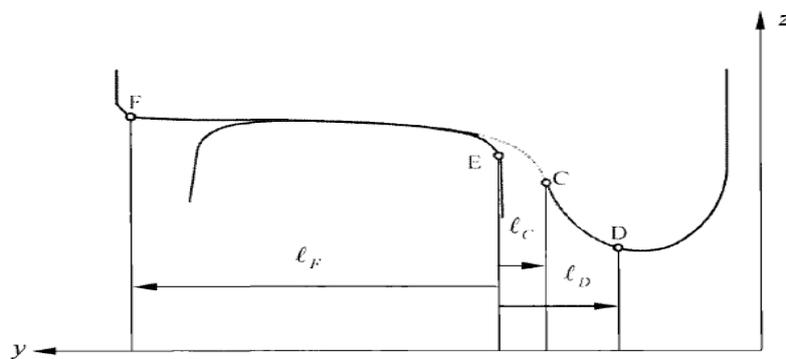


图 1 轮轨接触示意图



图 2 横向相对位置分析

图 2 是列车运行过程中轮轨发生横向位移（爬轨脱轨）的过程示意图，如果在 D 点增加点微小的横向扰动就会发生跳轨脱轨，一般认为 D 点为脱轨临界状态时的点。图 3 描述轮轨间垂向位移即为车轮抬升量，车轮踏面名义接触点与钢轨顶面最高点之间的垂向距离，是车轮爬升量 Z1 与跳动量 Z2(车轮与钢轨分离时)之和，即 $Z_{max}=Z_1+ Z_2$ [12-13]。

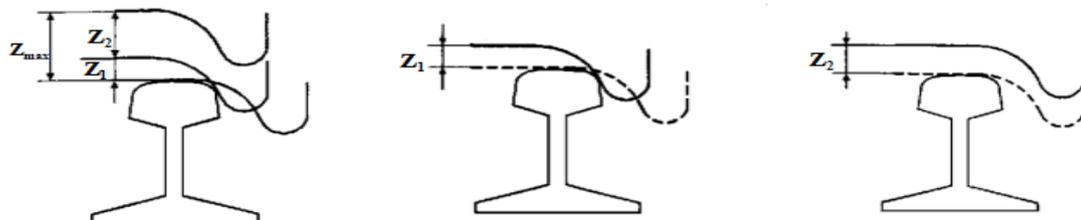


图 3 垂向相对位置分析

3 构建仿真模型

ADAMS/Rail 是一款铁道机车车辆专用的动力学仿真软件，可实现模块化建模，然后在

装配界面进行集成模型组装，可视化效果较好，仿真效果明显并支持交互式仿真。

建立动车组拖车模型的步骤：首先在 ADAMS/Rail 专家界面中建立转向架模版，再建立车体模版^[14]；然后在 ADAMS/Rail 标准界面中建立前转向架子系统、后转向架子系统和车体子系统；最后完成整车组装。转向架模版所需的部分参数如表 1 和 2 所示，车体模版的主要参数如表 3 所示。图 4 是按照表 1 中给定参数所建立的转向架模型，图 5a 与图 5b 分别是建立的整车模型与轨道模型。

表 1 转向架主要参数

构架参数	数值	轮对参数	数值
构架宽/mm	2 000	轴距/mm	2 500
侧架宽/mm	150	滚动圆半径/mm	430
侧架高/mm	200	滚动圆横向距离/mm	1 493
质量/t	2.6	质量/t	1.97
侧滚转动惯量/ $t \cdot m^2$	2.106	侧滚转动惯量/ $t \cdot m^2$	0.623
点头转动惯量/ $t \cdot m^2$	1.424	点头转动惯量/ $t \cdot m^2$	0.078
摇头转动惯量/ $t \cdot m^2$	2.600	摇头转动惯量/ $t \cdot m^2$	0.623

表 2 悬挂系统参数表

悬挂参数(每轴箱)	数值	悬挂参数	数值
一系横向刚度 (MN/m)	0.98	二系横向刚度 (MN/m)	0.178 4
一系纵向刚度 (MN/m)	0.98	二系纵向刚度 (MN/m)	0.178 4
一系垂向刚度 (MN/m)	1.176	二系垂向刚度 (MN/m)	0.193 1
一系垂向阻尼(N s/m)	19 600	二系垂向阻尼系数 (N s/m)	9 800
轴箱转臂的横向刚度 (MN/m)	6.5	横向减振器的阻尼系数 (kN s/m)	58.8
轴箱定位的垂向刚度 (MN/m)	3.267	抗蛇行减振器的阻尼系数 (kN s/m)	13.2
轴箱定位的纵向刚度 (MN/m)	14.7	抗蛇行减振器的刚度 (kN s/m)	8 820

表 3 动车组拖车车体的主要参数

参数	数值
车体长/mm	25 000
车体宽/mm	3 380
车体高/mm	3 000
质量/t	33.2
侧滚转动惯量/ $t \cdot m^2$	107.568
点头转动惯量/ $t \cdot m^2$	1 626.8
摇头转动惯量/ $t \cdot m^2$	1 402.7

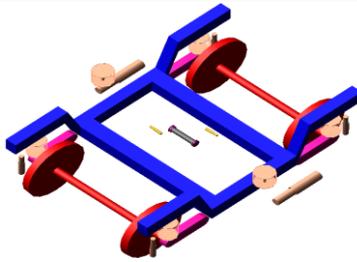


图 4 转向架模型

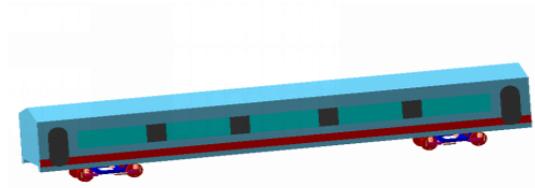


图 5a 整车模型

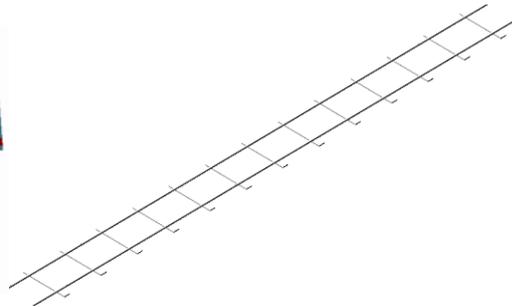


图 5b 轨道模型

本文采用的轨道为 UIC60 型钢轨[15]。轨距为 1435 mm，轨头部分由两段半径为 13 mm 的圆弧、两段半径为 80 mm 的圆弧和一段半径为 300 mm 的圆弧组成，轨头宽 72 mm。文中使用的是预算表格接触模型，在轮轨接触时，它用已经计算好的联系表进行有关参数的模拟和运算。

4 基于爬轨与跳轨的轮轨几何位置关系与脱轨的动力学分析

4.1 基于爬轨的轮轨几何位置关系

下面使用所建的车体做仿真并进行时域分析，通过改变初始横向激励，让列车处于脱轨临界状态^[16]，再对整车进行仿真分析，从 VI-Rail 中导出数据，在 MATLAB 中处理得到图 6、图 7，接下来进行分析。

图 6 是轮轨垂向位移的时间变化规律，可知在仿真 1s 前垂向位移基本没变，1s 后列车运行到横向激励处，垂向位移突然升高，逐渐升到最大值，此时轮缘应在轨道面之上，由于轮轨的约束作用，垂向位移会慢慢下降，逐渐维持在一个平衡状态，此时轮轨接触点应在临界接触点和最高点之间来回移动，如果横向激励足够大，列车就会有脱轨的危险。

图 7 是轮轨接触角的时间变化规律，可见在初始激励前轮轨接触角增加很小，列车运行到横向激励处，接触角会发生陡变，增加到轮缘接触角最大值，然后会逐渐下降，如果轮轨接触点刚好到达轨道面之上，此时的接触角应为 0 值。

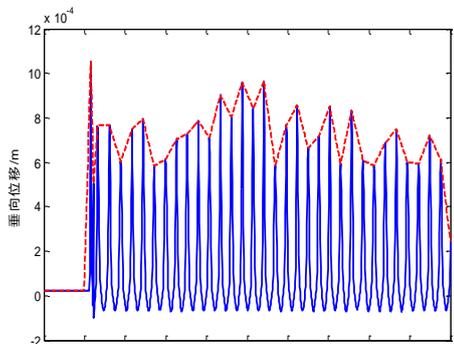


图 6 轮轨垂向相对位移与时间的变化规律

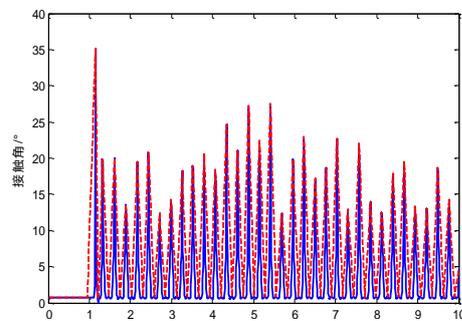


图 7 轮轨接触角随时间的变化规律

4.2 基于跳轨的轮轨几何位置关系

跳轨脱轨表现为钢轨与车轮的剧烈横向碰撞致使车轮脱离钢轨,它也是列车横向失稳的结果。钢轨与轮缘的剧烈碰撞,会造成列车横向失稳,随着碰撞过程中能量积累,在列车惯性力下会产生跳轨脱轨。对列车横向失稳过程中车轮的垂向相对位移,分别以时速 120、263、365 和 450 km 进行仿真。

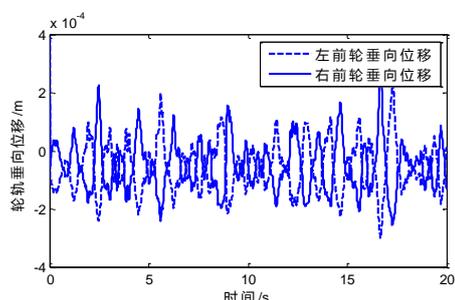


图 8 速度 120 km/h 时轮轨垂向相对位移变化

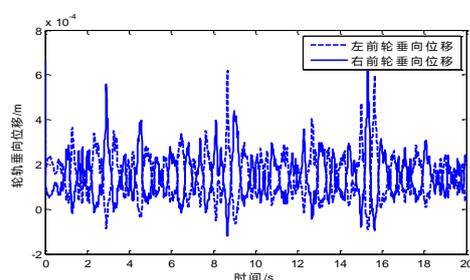


图 9 速度 263 km/h 时轮轨垂向相对位移

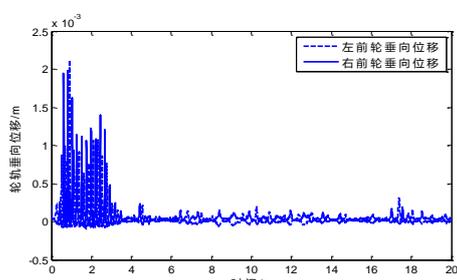


图 10 速度 365 km/h 时轮轨垂向相对位移

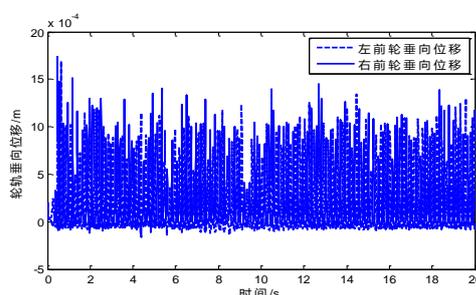


图 11 速度 450 km/h 时轮轨垂向相对位移

从图 8~11 中可以看出,在速度为 120 km/h 时,列车运行状态良好,轮轨垂向相对位移在安全范围内变化;在速度为 263 km/h 时,车轮与钢轨会有轻微碰撞,图中有些线陡增;在速度为 365 km/h 时轮轨垂向位移在横向激励处陡变的非常后慢慢地趋于平衡状态,说明此时列车有脱轨的危险,但如果轮轨间横向作用不强还会趋于平衡;在速度为 450 km/h 时,轮轨垂向位移值都变得很大,说明此时列车处于脱轨状态。

通过分析可知轮轨垂向位移与跳轨脱轨有联系,随着列车速度增高,最大轮轨垂向相对位移值也会变大,当垂向相对位移达到轮缘高度时,如果再增加速度就会有脱轨的危险。

5 轮轨间相对横垂位移对安全性的影响分析

本文主要研究轮轨几何位置与列车运行安全性之间的联系,下面根据轮轨间几何位置与列车运行安全性指标之间的联系在不同的轨道谱上进行分析。

用所建列车模型,分别以 72、144、216、288、360 和 432 km 时速运行,仿真结果如图 12 和图 13 所示。

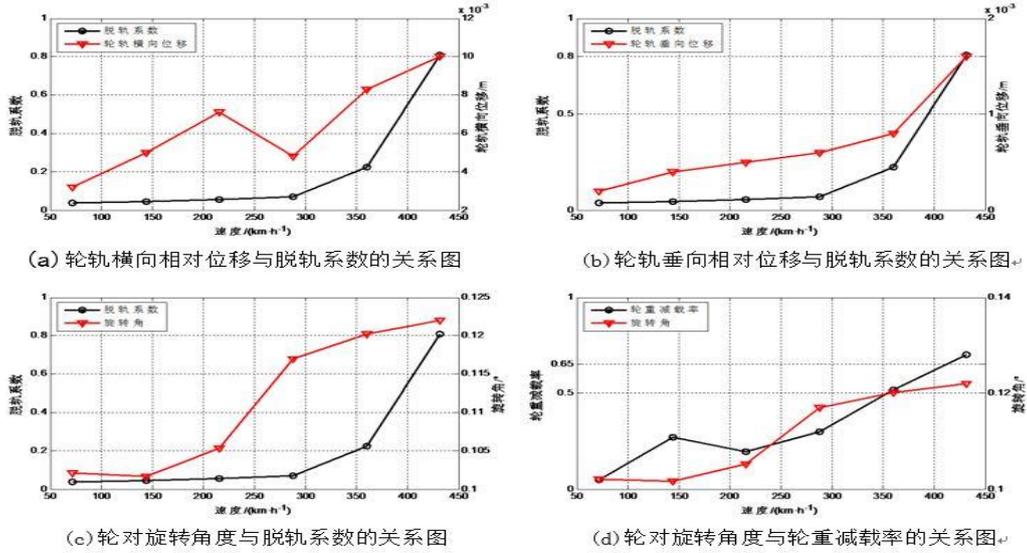


图 12 轮轨几何位置与脱轨系数之间关系

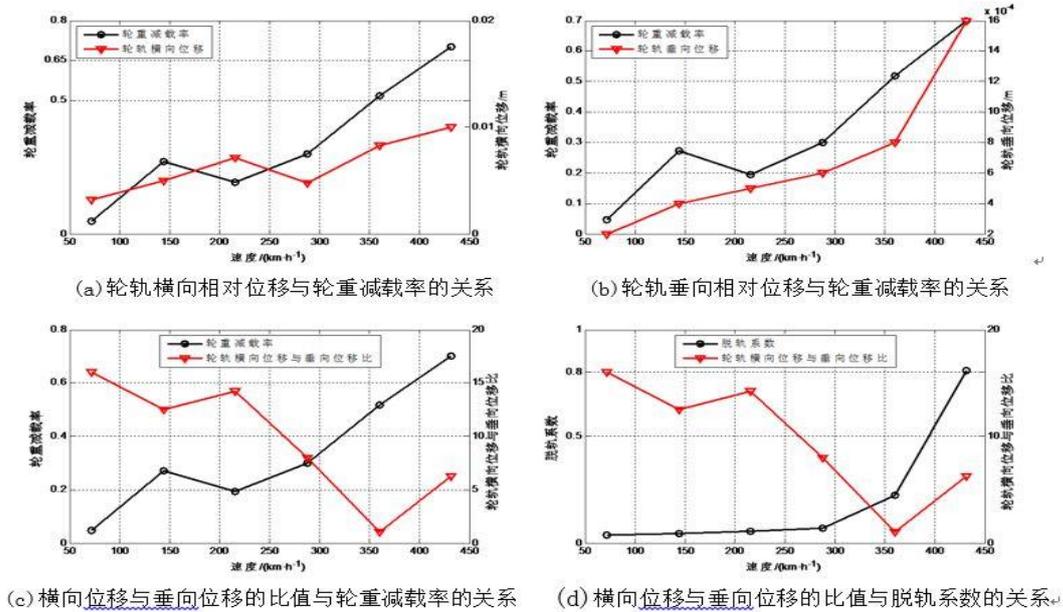


图 13 轮轨几何位置与轮重减载率之间关系

由图 12(a)可知，轮轨横向位移曲线在脱轨系数曲线上方，随着速度的提高，两条曲线都一直上升。其中在速度为 288 km/h 时，轮轨横向位移最大值降低，但总体趋势仍是上升的，且都是正相关关系。图 12(b)中轮轨垂向位移曲线在脱轨系数曲线上方，随着提速两条曲线都一直上升，呈正相关关系。图 12(c)中轮对旋转角度曲线在脱轨系数曲线上方，随着提速两条曲线呈上升状态，是正相关关系。图 12(d)显示随着速度的提高，轮对旋转角度曲线与轮重减载率曲线都一直上升，两条曲线有 3 个交点，它们是正相关关系。

由图 13(a)可知，随着速度的提高，轮轨横向位移曲线与轮重减载率曲线都一直上升，两条曲线有 3 个交点，它们是正相关关系。由图 13(b)可知轮轨垂向位移曲线与轮重减载率曲线都一直上升，二者正相关。在图 13(c)中轮轨横向位移与垂向位移的比值曲线呈下降状态，轮重减载率曲线是上升状态，两条曲线有一个交点，它们是负相关关系。图 13(d)图显示轮轨横向位移与垂向位移的比值曲线呈下降状态，脱轨系数曲线是上升状态，两条曲线有一个

交点，它们是负相关关系。

由以上 8 个图可知，轮轨横向位移、轮轨垂向位移、轮对旋转角度和脱轨系数都随速度增加而增大，只有轮轨横向相对位移在速度为 70 m/s 时有一个不同的值，在各子图中脱轨系数与它们都是正相关关系。轮轨横向位移、轮轨垂向位移、轮对旋转角度和轮重减载率随速度增加的变化趋势基本都是增大的，在各子图中轮重减载率与它们都是正相关。轮轨横向相对位移与垂向相对位移的比值与轮重减载率和脱轨系数都是负相关关系，可见用轮轨横向位移与垂向位移的比值作为评价指标是可行的。通过以上仿真结论可以判断，在德国低干扰谱下分析的轮轨几何位置与传统脱轨评价指标是有一定联系的，验证了德国高干扰谱下两者关系的正确性。可见用轮轨几何位置参数代替传统脱轨评价标准进行脱轨判定是可行的。下面用两个表格来分析，如表 4 和表 5 所示。

表 4 轮轨间几何位置参数与脱轨系数评定值比对比表

轨道谱	脱轨系数 评判标准值	轮轨间 垂向相对位移 /mm	轮轨间 横向相对位移 /mm	旋转 角度/ $^{\circ}$	比值
德国高干扰谱（直线）	0.8	1.9	11.5	0.197 6	7
德国低干扰谱（直线）	0.8	1.6	10	0.122	6

表 5 轮轨间几何位置参数与轮重减载率评定值比对比表

轨道谱	轮重减载率 评判标准值	轮轨间 垂向相对位移 /mm	轮轨间 横向相对位移 /mm	旋转 角度 ($^{\circ}$)	比值
德国高干扰谱（直线）	0.65	0.9	9.8	0.173	11
德国低干扰谱（直线）	0.65	1.25	8.8	0.121	5

从表中 4 和表 5 中可以看出轮轨横向相对位移都在 9 mm 附近变化，与轮轨间隙 9 mm 吻合。相对于横向位移的变化垂向位移变化不大，而且垂向位移的值也很小，可见垂向位移对脱轨影响不大。对脱轨影响较大的是轮轨横向相对位移，其值变化很明显可用来评判脱轨。而旋转角度的值很小，用它作为脱轨评价标准误差会很大，不实用。对于轮轨横向相对位移与垂向相对位移的比值，结合两个表，可以把比值 5 作为脱轨评价指标。

6 结论

本文研究了以轮轨接触关系作为评判列车运行安全的方法，分析了轮轨几何位置参数与传统脱轨评价指标的联系，考虑了高速列车不同脱轨情况的差异，通过对不同轨道谱的仿真分析，发现轮轨横向相对位移比垂向相对位移变化更明显，与轮轨间隙基本吻合，轮轨几何位置参数和传统脱轨评价指标之间正相关。提出了运用轮轨相对横垂向位移及轮轨横向位移与垂向位移的比值评价列车运行安全性的方法。并验证了轮轨几何位置参数作为脱轨评价标准的可行性。

本文仿真采用的是单节车体模型，而且只采用了轮轨垂向位移、横向位移和旋转角 3 个轮轨几何参数，为更加符合实际，今后可采用 8 节编组列车模型进行仿真，而且可选取更多轮轨接触参数对列车进行脱轨评价研究，以期更精确地对列车脱轨做出预判。

参考文献：

- [1] 孙永福. 中国高速铁路的成功之路[J]. 铁道学报,2009,31(06):139+135.
- [2] Shust W C, Thompson R, Elkins J. Controlled wheel climb derailment tests using a force measuring wheelset and AAR's track loading vehicle[C]. Proceedings of 12th International Wheelset Congress, 1998:5-15.
- [3] 王悦明, 董孝卿, 任尊松, 等. 轮轨动力学与安全特性阶段研究报告[J]. 科技创新导报,2016,(29):183-188.
- [4] 李国伟, 牛林杰, 李新琴. 基于 DEA 的列车运行安全评价[J]. 交通科技与经济,2013,15(3):114-116.
- [5] 车玉龙. CTCS-3 级列控系统的可靠性与安全性研究[D]. 兰州交通大学电力电子与电力传动,2014.
- [6] 翟婉明, 陈果, 根据车轮抬升量评判车辆脱轨的方法与准则[J]. 铁道学报, 2001, 23(2): 17-26.
- [7] 孙丽霞, 姚建伟. 高速铁道车辆蛇行脱轨安全性评判方法研究[J]. 中国铁道科学, 2013 (5): 82-92.
- [8] 孙丽霞, 姚建伟, 侯福国. 轮轨干摩擦下的轮对横向自激振动机理[J]. 中国铁道科学, 2012,33(5).60-67.
- [9] 向俊, 曾庆元. 列车脱轨机理与脱轨分析理论研究[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(1): 127-129.
- [10] KOO J S, CHOI S Y. Theoretical Development of a Simplified Wheelset Model to Evaluate Collision-Induced Derailments of Rolling Stock [J]. Journal of Sound and Vibration, 2012,331(13):3172-3198.
- [11] 孙善超, 王成国, 李海涛. 轮轨接触几何参数对高速客车动力学性能的影响[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(5): 93-98.
- [12] 孙丽霞, 高速列车横向运动稳定性和动态脱轨理论分析及评价方法研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2014.
- [13] 张卫华, 李艳, 宋冬利高速列车运动稳定性设计方法研究[J]. 西南交通大学学报.2013,48(1): 1-9.
- [14] 赵洪伦. 轨道车辆结构与设计[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2009.
- [15] 左言言, 常庆斌, 耿烽, 等. 轨道高低不平顺激励下的车体振动仿真[J]. 江苏大学学报, 2011, 32(06): 648-651.
- [16] 曾庆元, 周智辉, 赫丹, 等. 列车-轨道(桥梁)系统横向振动稳定性分析[J]. 铁道学报,2012,34(05):86-90.

论文作者简介:

马增强, 42岁, 男, 教授, 博士, 博士生导师。主要研究方向为图形图像处理、故障诊断。

刘俊君, 23岁, 硕士, 主要研究方向为计算机测控。

On Evaluation of Train Operation Safety Based on Wheel / Rail Displacement

Ma Zengqiang, Liu Junjun, Chen Mingyi

**(School of Electrical and Electronic Engineering Shijiazhuang Tiedao University,
Shijiazhuang, 050043, China)**

Abstract: With continuous speed up, the train dynamic problems become more and more prominent, and how to evaluate and predict the safety of train operation is a focus of the current study. This paper analyzes the characteristics and shortcomings of the commonly used vehicle derailment evaluation standard in the world. On the basis of studying the traditional safety evaluation criterion, the relationship between the geometric position about wheel and rail and the standard of traditional safety evaluation are analyzed. The evaluation index of the train running safety is determined according to the relative horizontal displacement and vertical displacement of the wheel and rail and the limit of the lateral displacement and the vertical displacement ratio. The simulation results show that the new judgment Method of feasibility.

Keywords: derailment factor, derailment factor, lateral displacement, vertical displacement, safety evaluation