

文章编号: 1001-8360(2001)02-0017-10

根据车轮抬升量评判车辆脱轨的方法与准则

翟婉明¹, 陈 果²

(¹西南交通大学 列车与线路研究所, 四川 成都 610031; ²南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 210016)

摘 要: 分析比较了目前国际上常用的车辆脱轨评价标准的特点及其不足, 指出我国现行国家标准 GB 5599—85 评判车辆脱轨所存在的突出问题, 在此基础上提出直接根据车轮抬升量评判脱轨的原理与方法。运用车辆-轨道耦合动力学理论, 对单轮对爬轨脱轨和跳轨脱轨过程进行了计算仿真, 得出脱轨系数超限时间与车轮抬升量之间的关系, 提出最大允许超限时间为 35 ms 的安全准则, 并进行了实际线路工况下整车轮轨相互作用脱轨仿真验证。最后提出针对我国车辆脱轨评判的建议标准及其实施细则。

关键词: 脱轨; 脱轨准则; 车轮抬升量; 脱轨系数; 轮轨动力学

中图分类号: U 211.5 **文献标识码:** A

Method and criteria for evaluation of wheel derailment based on wheel vertical rise

ZHAIWanming¹, CHENGuo²

(¹Train & Track Research Institute, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

²Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: After comparing the worldwide commonly used evaluation criteria for wheel derailment with that given in the China's national standard, GB 5599—85, some limitations were pointed out in the paper. A principle and the method were then proposed to evaluate the wheel derailment based on the variation of wheel vertical rise. Wheel derailment courses were simulated both for a single wheelset derailment and for a full-scale vehicle derailment from the point of view of vehicle-track coupling dynamics. Results obtained show that if the wheel vertical rise height is smaller than the wheel flange height, the wheel derailment can be avoided, no matter whether the derailment coefficient (Q/P) is larger than the Nadal value or not. A proposed derailment criterion for evaluation of railway vehicle safety is given in the last part of the paper.

Keywords: derailment; derailment criterion; wheel vertical rise; derailment coefficient; wheel-rail dynamics

列车脱轨是危及铁路行车安全的主要因素。近 10 年来, 脱轨事故在我国铁路行车重大、大事故中的比率高达 70% 左右, 严重影响铁路运输的经济效益和社会效益。

长期以来, 世界各国铁路部门和科研人员开展了大量的脱轨理论与试验研究, 取得了丰硕成果。然而, 由于脱轨问题的复杂性及研究的困难性, 直到今天, 这一问题仍未得到很好解决, 脱轨事故的原因往往难以查明, 甚至连评判脱轨的准则还存在一些问题。

以我国铁路为例, 近年来货物列车脱轨事故屡有发生, 而且在直线段也出现了较频繁的脱轨事故。自 1997 年 5 月 9 日至 8 月 6 日, 仅 3 个月时间, 在京沪线徐州以南津浦线十里堡至桃山集间, 当列车运行速度在 63~77 km/h 之间时, 就连续发生了 7 起货物列车直线脱轨事故。调查发现, 脱轨车辆和事故发生地点线路状态均符合各自运用安全标准, 因而找不出脱轨原因, 这就对现行脱轨安全标准提出了质疑。实际上, 车辆脱轨不单单是车辆本身的问题, 也不一定就是线路尺寸超限的结果, 而是车辆与轨道相互作用的结果。即使是车辆和轨道均符合运用安全要求, 二者在特定条件下组合起来也可能产生最不利的耦合作用效果, 从而引发脱轨。铁道科学研究院对该路段(南津浦

收稿日期: 1999-11-25; 修回日期: 2000-12-01
基金项目: 铁道部科技研究开发计划项目(98J29); 高等学校骨干教师资助计划项目; 国家杰出青年科学基金项目(59525511)
作者简介: 翟婉明(1963—), 男, 江苏靖江人, 特聘教授, 博导。

线)货车脱轨试验的结果已初步说明了这一点^[1]。

鉴于此,本文拟采用车辆-轨道耦合动力学理论方法^[2],综合考虑车辆、轨道及动态轮轨关系,对脱轨过程进行详细的动态仿真研究。具体针对现行脱轨评判准则中存在的一些不足,通过引入车轮抬升量这一直观参数,来寻求更为合理的评判方法,最终提出对我国 GB 5599—85 脱轨评判规范的修改建议。

1 现行脱轨评判标准及其缺陷

国内外评判车辆脱轨的基本指标是脱轨系数 Q/P ,即轮轨横向力 Q 与垂向力 P 之比。日本和中国等国家除采用脱轨系数之外,还将轮重减载率 $\Delta P/P$ 作为辅助的评价指标。各国根据自身情况及研究成果与应用经验,采用了不尽相同的脱轨评价标准。

1.1 Nadal 公式

最早开始研究脱轨的是法国科学家 M. J. Nadal。早在 1896 年,Nadal 根据爬轨车轮出现爬轨趋势的静力平衡条件,定义了车轮爬轨所需要最小 Q/P 值,即著名的 Nadal 公式^[3]

$$\frac{Q}{P} = \frac{\tan\delta - \mu}{1 + \mu \tan\delta} \quad (1)$$

可见,Nadal 准则仅取决于最大轮缘接触角 δ 和轮轨间的摩擦系数 μ 。因此,车轮踏面形状不同,脱轨系数临界值也就不同。许多国家为此制定了各自的防脱轨安全性标准。国际铁路联盟 UIC 规定 $Q/P \geq 1.2$;德国 ICE 高速列车试验标准为 $Q/P \geq 0.8$;而日本新干线提速试验标准也为 $Q/P \geq 0.8$;北美铁路则规定 $Q/P \geq 1.0$ 。

尽管 Nadal 准则一直被广泛采用,然而它具有很大的保守性。试验中发现,脱轨系数超过了 Nadal 临界值,但并未出现明显的车轮爬轨危险^[4,5]。在这些情况下,一般冲击力的持续时间都很短。实际上,脱轨通常需要一个过程,即轮轨冲击力需要一个持续作用的时间历程,否则,即使超过限值也不会引发脱轨。因此,Nadal 公式在许多情况下并非是充分有效的脱轨判据,它仅仅表示开始爬轨时的脱轨系数下限值,而不是说“ Q/P 一旦达到这个值即引起脱轨”。

1.2 美国 Weinstock 标准

1984 年,美国国家运输试验中心 H. Weinstock 博士观测到,脱轨并不仅仅决定于轮缘贴靠侧车轮的力平衡关系,综合考虑轮缘贴靠轮和非贴靠轮上的横向力与垂向力之比 Q/P ,可以更好地判断脱轨是否发生。为此他建议采用同轴两侧车轮 Q/P 绝对值之和作为评判指标。他提出的准则是,整轴两轮脱轨系数之和不超过 Nadal 临界值(轮缘贴靠侧车轮)和轮轨摩擦系

数(非轮缘贴靠侧车轮)之和,即^[6]

$$\sum |Q/P| \leq \mu + \text{Nadal 限度} \quad (2)$$

Weinstock 准则被认为在小的或负的冲角下比 Nadal 公式具有较少的保守性,并且对摩擦系数的变化不敏感^[5]。然而,对于瞬时出现的 $\sum |Q/P|$ 极大值,Weinstock 准则评判脱轨仍然回避不了冲击力的作用时间问题。

自 1987 年起,AAR 在进行货车安全鉴定试验中,综合采用了单轮限度和整轴 Weinstock 限度:

$$\begin{cases} Q/P < 1.0 \\ \sum |Q/P| < 1.5 \end{cases} \quad (3)$$

这一规定假设同一轴轮缘接触侧与非轮缘接触侧轮轨摩擦系数均为 0.5。由于式(2)中 μ 是指非轮缘接触侧车轮摩擦系数,因此,如果试验是在非轮缘接触侧 μ 小于 0.5 的情况下进行,则有可能在整轴 Q/P 小于 1.5 时发生脱轨。然而,如果因此而将整轴 Q/P 限度从目前的水平降低,整轴 Q/P 限度将可能比单轮 Q/P 限度更保守,这样也就失去了引入 Weinstock 指标的本来意义。这是目前 AAR 脱轨评判标准之缺陷。

1.3 日本 JNR 准则

日本在国铁时代特别是 60 年代末、70 年代初,开展了大量、系统的理论与试验研究,区分了稳态爬轨脱轨和动态跳轨脱轨的不同作用性质,考虑了横向力作用时间对脱轨的影响,得到如图 1 所示的 JNR 脱轨评判标准,用公式表示为

$$\frac{Q}{P} \begin{cases} \lambda & t \geq 0.05 \text{ s} \\ 0.05\lambda & t < 0.05 \text{ s} \end{cases} \quad (4)$$

式中, t 是横向力的作用时间, s; λ 是脱轨系数的目标值,并由此区分危险限度($\lambda = 0.8$)和最大容许限度($\lambda = 1.0$)两类标准。

由图 1 可见,JNR 标准以横向力作用时间划分为爬轨脱轨($t \geq 0.05 \text{ s}$)和跳轨脱轨($t < 0.05 \text{ s}$)两部分。对于长时间的爬轨脱轨,JNR 标准本质上与 Nadal 公式一致;而对于瞬时跳轨脱轨,JNR 标准可以允许脱轨系数大于 Nadal 极限,且作用时间 t 越短,允许 Q/P 越大。由此可见,JNR 标准突破了经典的稳态脱轨评判准则,没有 Nadal 公式和 Weinstock 指标的保守性。但随之而来的问题是,JNR 标准对动态脱轨的评判是否太松? Sweet 等^[7]在缩尺模型试验中确实发现,在动态条件下有时已发生了脱轨,但按 JNR 标准预报为不脱轨。这里涉及到的问题是究竟允许脱轨系数持续大于目标值多久较合适?近年来,日本铁道综合技术研究所^[8,9]利用仿真方法进行了一系列分析研究,并提出了



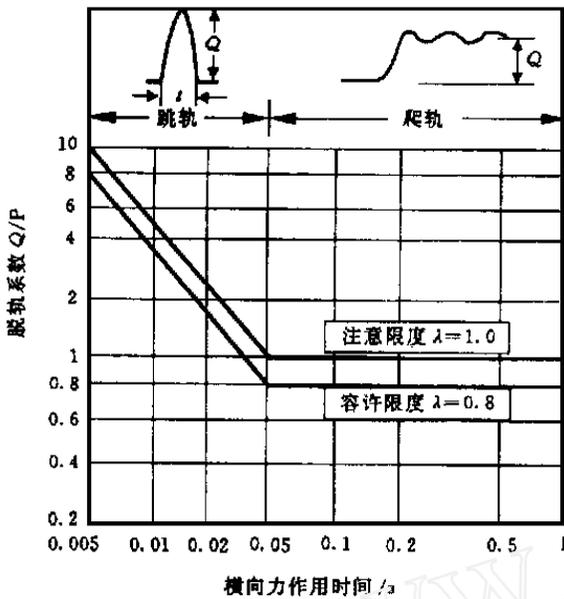


图 1 日本 JNR 脱轨评判标准

一种新的脱轨评判建议方案, 即 Q/P 持续超过 0.8 的作用时间小于 0.015s, 比 JNR 标准又要严得多。

1.4 我国车辆脱轨评判规范

我国“铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范”(GB 5599—85)规定的脱轨系数安全标准是^[10]

$$\frac{Q}{P} \begin{cases} 1.2 & \text{(第一限度)} \\ 1.0 & \text{(第二限度)} \end{cases} \quad (5)$$

式中, 第一限度为合格标准, 第二限度是增大了安全裕量的标准。

式(5)是 Nadal 公式在我国铁路的具体应用结果, 实质上它只适用于稳态爬轨脱轨, 只有当脱轨系数长时间超过目标值才有可能发生脱轨。实际中, 车轮常常会受钢轨表面的微小幅度的凹凸不平顺激励产生高频冲击振动, 引起轮轨垂向力甚至横向力在极短时间内产生较大波动, 从而导致脱轨系数在短时间内大幅度增大, 有时可达脱轨系数安全目标值的几倍, 然后又迅速恢复正常, 并无脱轨危险性。我国铁道科学研究院在大秦线、南津浦线货物列车脱轨试验中曾大量测出脱轨系数超出目标值 1.2 的例子^[1, 11], 其中最大脱轨系数高达 4.98, 但整个试验过程中被测列车均安全无恙, 并未出现脱轨事故。

因此, 现有国标规定的脱轨系数安全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加以适当调整。事实上, 我国近几年进行的几次大规模脱轨试验乃至提速试验如文献[1, 11, 12], 均未完全执行 GB 5599—85, 已不得不参考日本标准或作相

应调整, 否则大量工况将被鉴定为脱轨工况, 试验将不能顺利进行下去。所以, 修改国标, 势在必行, 甚至刻不容缓。本文拟就此开展一些基础性探索研究, 旨在推进国标 GB 5599—85 的修改工作。

1.5 关于轮重减载率用于脱轨评判的标准

一些国家在评定车辆运行安全性时除采用脱轨系数这一重要指标外, 还采用了轮重减载率指标, 实践表明是有意义的。因为当车轮大幅度减载(轮轨垂力很小)时, 相应的轮轨横向力往往也小, 受测量误差的影响, 难以求出正确的脱轨系数, 特别是当轮载减至零时将无法测出脱轨系数, 这就给采用脱轨系数评定车辆运行安全带来严重困难。所以, 将轮重减载率与脱轨系数兼用可以综合有效地评定车辆运行的脱轨稳定性。日本新干线现场试验结果表明, 轮重减载大的时候往往比脱轨系数大的时候更容易发生脱轨。我国货物列车直线脱轨试验也得出了车轮悬浮(轮重减载至零)脱轨可能性大的结论。

我国 GB 5599—85 规定的轮重减载率安全标准是^[10]

$$\frac{\Delta P}{\bar{P}} \begin{cases} 0.65 & \text{(第一限度)} \\ 0.60 & \text{(第二限度)} \end{cases} \quad (6)$$

式中, ΔP 是减载侧车轮的轮重减载量; \bar{P} 是减载和增载侧车轮的平均静轮重。

这一标准规定的试验工况是车辆通过 9 号单开道岔及低速通过小半径曲线, 实质上测量的是稳态减载率, 因而不适用于实际车辆运行试验中经常测出的因轨缝、轨面局部凹凸不平而引起的动态轮重减载率之评判。后者的数值常常超出 0.65, 甚至达到 1.0(车轮悬空)。例如在南津浦线货车脱轨试验中, 由地面图象监控系统测出的车轮悬浮数量已不是个别现象, 严重时占车轮总数的 10%~20%^[1]。因此, 利用轮重减载率评定车辆运行安全性时, 有必要将稳态和动态减载率区分开来, 并分别加以限制。

日本已规定, 静态轮重减载率限度为 0.6, 动态轮重减载率限度为 0.8。德国在高速列车试验中, 采用的轮重减载率限度达 0.9。

2 根据车轮抬升量判定脱轨的原理

车辆脱轨, 顾名思义就是由于车轮脱离钢轨导致车辆不能继续在轨道上正常运行的现象。因此, 不妨直接从轮轨接触几何状态来判断车辆是否脱轨。如图 2 所示, 定义车轮抬升量为车轮踏面名义接触点与钢轨顶面最高点之间的垂向距离, 它是车轮爬升量 Z_1 与跳动量 Z_2 (车轮与钢轨分离时) 之和, 即 $Z_{up} = Z_1 + Z_2$ 。对

低速爬轨脱轨(图 3), $Z_2 = 0$, 车轮抬升量即为车轮爬升量($Z_{up} = Z_1$); 而对于跳轨脱轨, 一般伴随有爬轨过

程, 特殊情形下, 车轮可能直接从正常接触状态瞬时脱离钢轨(如图 4), 此时 $Z_{up} = Z_2$ 。

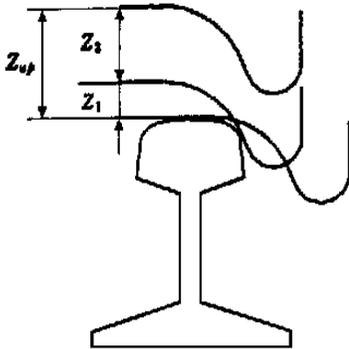


图 2 车轮抬升量的定义

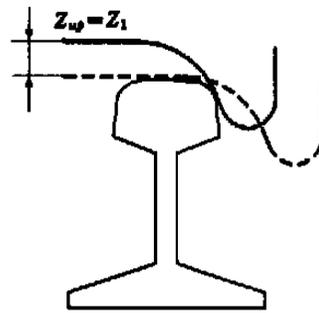


图 3 车轮爬轨示意图

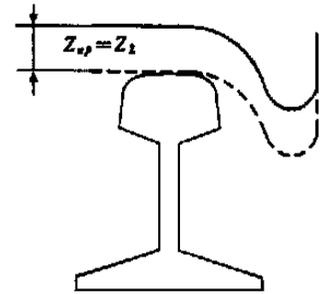


图 4 车轮瞬时脱离钢轨示意图

但是, 不管何种情形, 只要车轮抬升量小于车轮轮缘高度 h_f , 理论上可判定此时车辆未脱轨, 因为轮缘最低点仍低于轨面最高点, 车轮尚不能摆脱钢轨约束。例如, 对于图 4 所示车轮悬浮状态, 只要车轮抬升量 Z_{up} 不继续增大, 车轮最终还会回复到轮轨正常接触状态, 这也就解释了为什么试验中经常测得轮重减载率大于安全标准($\Delta P/P > 0.6$)甚至等于 1.0 而车辆毫无脱轨危险的原因。然而, 一旦车轮抬升量等于轮缘高度, 车轮随时便有脱轨危险, 因为此时轮缘底部已完全跃升至钢轨顶面最高点, 若有微小的横向扰动即刻发生脱轨, 因此这种状态属于脱轨临界状态。而当 $Z_{up} > h_f$ 时, 则应判定车辆已脱轨。综上所述, 采用车轮抬升量直接评判车辆不脱轨的安全准则是

$$Z_{up} < h_f \quad (7)$$

就我国铁道车辆而言, 锥形踏面(TB)车轮轮缘高度 $h_f = 25 \text{ mm}$, 磨耗形踏面(LM)车轮 $h_f = 27 \text{ mm}$ 。

文献[13]曾在实验室内单轮对滚动试验台上成功地进行了实物轮对脱轨模拟试验, 实测出车轮爬轨过程中各阶段的车轮悬浮量(与车轮抬升量定义相近)。然而, 在线路运行试验中直接测量车轮抬升量是很困难的, 也是不现实的。为此可以寻求间接测量办法。受日本 JNR 标准之启发, 我们选择脱轨系数超限时间 t 作为替代参量, 若能找到车轮抬升量与脱轨系数作用时间之间的关系, 则可通过测量作用时间来间接得到车轮抬升量大小, 从而制定有关准则来判断车辆是否脱轨。而目前在连续测量轮轨力的试验中, 已能获得脱轨系数随时间的连续变化曲线, 由此可以得到脱轨系数持续超过目标值的时间, 从而可望根据新的评判规范进行脱轨评判。

3 单轮对脱轨仿真

为了定量研究脱轨系数作用时间(Q/P 持续超过

1.0 的时间)与车轮抬升量之间的关系, 日本铁路采用了单轮对-钢轨模型进行脱轨仿真研究^[8], 其中钢轨被简化为“等效质量钢轨”和“无质量钢轨”两种模型, 针对新干线轮对及钢轨条件的仿真结果表明, 如果脱轨系数作用时间在 15 ms 以下, 则车轮抬升量仅约 1 mm, 可确保车轮不脱轨。美国 AAR 采用 NUCARS 软件对车轮爬轨脱轨进行了动态仿真, 仿真结果与轨道加载车爬轨试验结果吻合良好^[5]。

3.1 单轮对脱轨仿真模型

基于日本和美国的成功经验, 本文针对我国轮轨系统情况开展较为详细的单轮对/轨道相互作用脱轨仿真分析。单轮对脱轨研究是整车脱轨研究之基础, 它避开了整车脱轨研究中的众多复杂影响因素, 因而便于分析脱轨机理并构造脱轨准则。

根据车辆-轨道耦合动力学思想, 建立如图 5 所示单轮对-轨道相互作用模型。模型中考虑了轮对的横向、垂向、侧滚和点头运动自由度, 但未考虑其摇头运动以便于简化研究工作, 详细考虑了轮轨动态接触关系。与文献[8]模型不同, 本模型中轮对所承受的荷载是通过两侧悬挂点传递的(并非轮对质心), 轨道模型采用了弹性点支承梁而非集中质量块。为了使车轮能够脱轨, 必须要人为地给轮对施加一横向力 F_y (认为该力是一系悬挂横向力之和)和一绕 x 轴的力矩 M_x , 以帮助其爬上或跳上钢轨, 如图 5 所示。

3.2 爬轨脱轨仿真分析

为反映我国客、货车辆情况, 分别计算了不同轴重和不同运行速度条件下车轮抬升量与脱轨系数持续超过 1.0 的作用时间以及与轮重减载率持续超过 0.6 的作用时间之关系。轨道条件为 60 kg/m 钢轨、混凝土轨枕、普通碎石道床干线铁路轨道。在轮对脱轨仿真计算中, 施加横向力 F_y 和力矩 M_x 时考虑了实际运行中

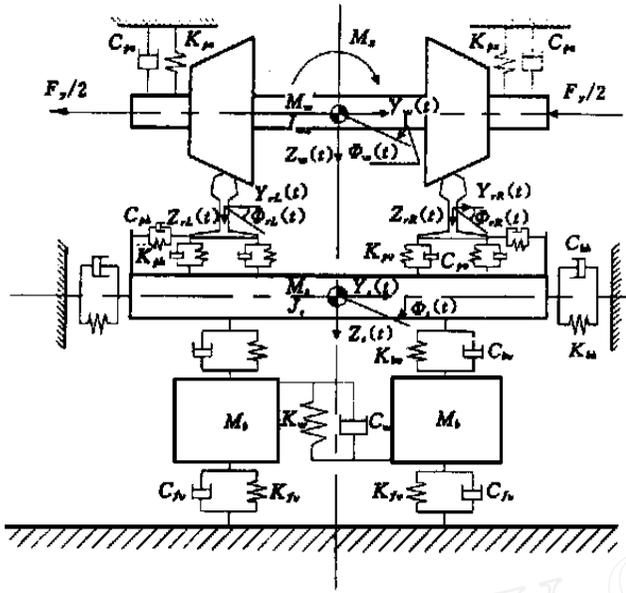


图 5 单轮对-轨道相互作用脱轨仿真模型

可能出现的最不利状态,并参考了日本单轮对脱轨仿真条件^[8],取:稳定的轮重减载率为 40%~50%,横向力为轴重的 0.3~0.4 倍,最大冲角为 0.02 rad,静态轮重为 35~105 kN,力矩为一半波正弦冲击波,即

$$\begin{cases} F_y = 0.35 \times (2P_0) \\ M_x = M_0 \sin\left(\frac{\pi}{T_s} t\right) \end{cases} \quad (8)$$

式中, P_0 为静轮载; M_x 为所施加的最大力矩,与轴重成正比; T_s 为力矩作用时间宽度。在具体计算中,首先将横向力 F_y 施加在轮对上,使脱轨侧车轮轮缘贴靠钢轨,然后再对轮对施加力矩 M_x 以使车轮爬上或跳上钢轨。

图 6 是仿真得出的脱轨系数作用时间与车轮抬升量之间的关系,随着作用在车轮上的力和力矩的冲击时间 T_s 增加,脱轨系数大于 1.0 的时间增大,车轮的爬升量也随之增大,但当冲击时间 T_s 增加到某一程度上,则尽管车轮抬升量继续增大,但脱轨系数大于 1.0 的时间反而有所减小,随后车轮抬升量在极短时间内急速增大至轮缘高度值,成为短时间的脱轨。高速运行(200 km/h 以上)条件下更是如此。由图 6 还可发现,运行速度对车轮脱轨有一定影响。当速度较低($V < 100$ km/h)时,车轮抬升量随着脱轨系数超限时间的增大而逐渐增大,且速度越低,脱轨所需持续时间越长。当列车高速运行($V > 200$ km/h)时,脱轨所需作用时间较短,亦即脱轨系数超限后在较短时间内车轮抬升量即可超过轮缘高度(图示为 25 mm)。由此可见,列车运行速度越高,车轮脱轨危险性越大。

需要说明的是,在仿真计算中,由于首先施加横向力 F_y 将车轮推至轮缘根部,此时车轮已有一定抬升量

(约为 2.35 mm),而脱轨系数尚未超限,亦即脱轨系数作用时间为零,因而图 6 中抬升量起点不为零。

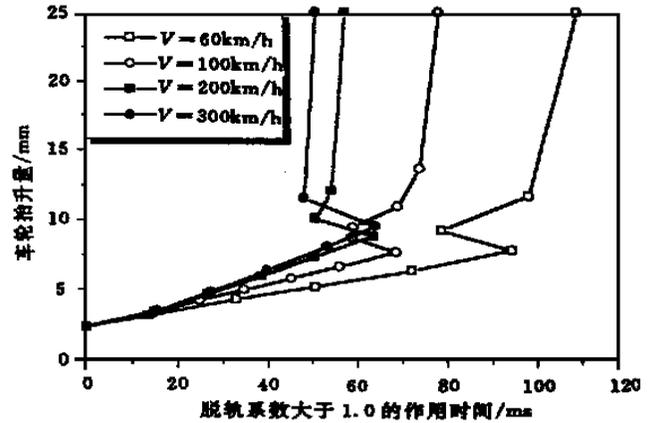


图 6 脱轨系数作用时间与车轮抬升量的关系 ($P_0 = 55$ kN)

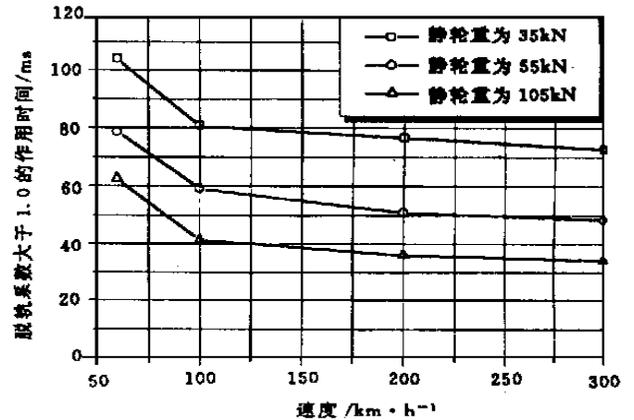


图 7 不同静轮重下运行速度与脱轨系数作用时间的关系

图 7 给出了不同轴重和不同速度下轮对脱轨时所对应的脱轨系数超限时间。由图可见,在相同速度下,轴重对轮对脱轨有较大影响,轴重越大,所允许的脱轨系数超限时间越短。这一结果是基于爬轨脱轨而得出的,与日本单轮对仿真结果规律一致^[8],原因是在仿真条件中假设横向力与轴重成比例增加。由图 7 可以确定单轮对脱轨判别准则。对于货物车辆,其最大运行速度一般可以设定为 120 km/h,但其静轮重变化很大,以最大静轮重考虑,可以得到货车车辆的脱轨限度是脱轨系数大于 1.0 的作用时间小于 0.04 s;对于客车车辆,取其最大运行速度为 300 km/h,其静轮重一般在 55 kN 左右,且变化不大,以静轮重 55 kN 考虑,可以得到客车车辆的脱轨限度是脱轨系数大于 1.0 的作用时间小于 0.048 s。如果综合客车和货车的速度和静轮重,并考虑一定的安全裕量,最后得到车辆的脱轨限度为脱轨系数大于 1.0 的作用时间小于 0.035 s(即 35 ms)。

3.3 跳轨脱轨仿真

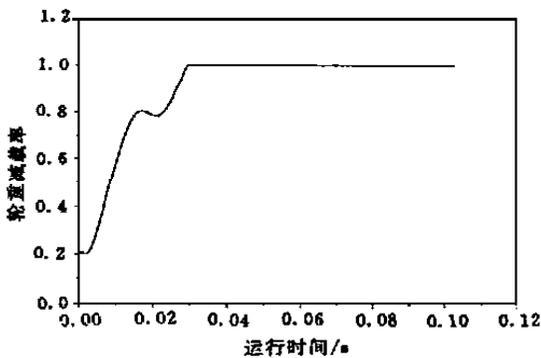
多次线路试验表明,我国主型货车 C_{62A} 空车的脱轨原因是由于在 70 km/h 以上速度运行时所出现的强烈蛇行运动所致。当车辆出现蛇行失稳,车轮的横向冲击和轮重减载将变得十分严重,车轮将产生跳轨。

所以有必要针对 C_{62A} 的脱轨特点来研究其跳轨脱轨的安全限度,显然,此时应该用轮重减载率超过目标值 0.6 的持续作用时间来加以衡量。为了只计算跳轨脱轨,而不考虑爬轨,将不考虑横向力 F_y 的作用,而仅考虑绕 x 轴的力矩 M_x ,为了使轮载减到零,需要加大该力矩的作用。故设定施加于轮对的横向力 F_y 和绕 x 轴的力矩 M_x 为

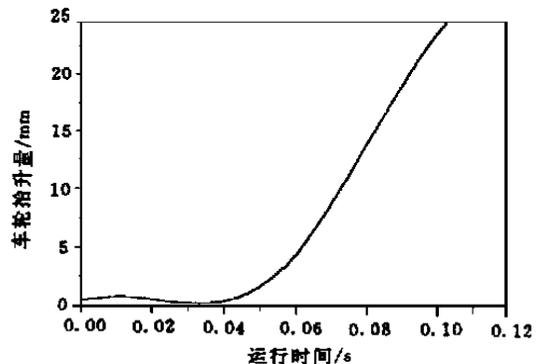
$$\begin{cases} F_y = 0 \\ M_x = kM_0 \sin\left(\frac{\pi}{T_s}t\right) & 0 \leq t < \frac{T_s}{2} \end{cases} \quad (9)$$

表 1 轮重减载率大于 0.6、脱轨系数大于 1.0 的时间与车轮抬升量的关系 ($k=1.5, P_0=35\text{ kN}$)

力矩冲击时间 T_s/s	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14
轮重减载率大于 0.6 的时间/m.s	32.6	56.4	76.8	94.8	111.2	126.1	93.4
脱轨系数大于 1.0 的时间/m.s	30.8	53.7	72.4	89.7	97.3	110.0	72.7
车轮抬升量/mm	3.89	8.32	12.9	17.0	20.7	24.2	25.0



(a) 轮重减载率



(b) 车轮抬升量

图 8 跳轨脱轨过程中脱轨参数的变化

从表 1 中不难发现,轮重减载率大于 0.6 的作用时间与脱轨系数大于 1.0 的作用时间基本相当,前者略大于后者。由此说明,当发生跳轨脱轨时,轮重减载率从 0.6 到 1.0 的变化时间很短,对整个脱轨过程不起主要作用。所以,如果将轮轨脱离考虑为脱轨系数超限的情况,那么,也可以用脱轨系数大于 1.0 的作用时间来对跳轨脱轨进行评判,这样便可与爬轨脱轨的评判标准取得一致,而且若将此标准引用于轮重减载率超限时间的评判会更偏于安全。

图 9 表示不同静轮重下脱轨系数超限时间与车轮抬升量的关系,从图中不难看出,将脱轨系数超限时间

式中,系数 k 的取值将决定力矩的大小,显然 k 越大,力矩 M_x 也越大。考虑到实际运行中, $k=1.0$ 已为轮重减载的最不利情形,这里为留有安全裕度,取 $k=1.5$ 。

表 1 是静轮重 P_0 为 35 kN (对应于 C_{62A} 空车)时,轮重减载率大于 0.6 的作用时间与车轮抬升量的关系。由于轮轨脱离(轮重减载率等于 1.0)时脱轨系数理论上为无穷大值,因之也考虑为脱轨系数超限(大于 1.0)的情况,所以在表中也可得到脱轨系数超限的作用时间。图 8 为 $k=1.5$ 、静轮重 35 kN、轮对冲角 0.02 rad、力矩冲击时间 $T_s=0.14$ s 的条件下,车轮的跳轨脱轨过程中关键脱轨参数随时间的变化历程。从图中可以看到,在车轮抬升的整个过程中,轮重减载率达到最大值 1.0,即在整個脱轨过程中均出现轮轨脱离现象,故定义为跳轨脱轨。

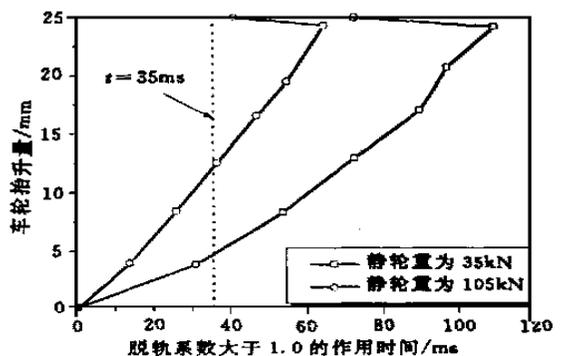


图 9 脱轨系数大于 1.0 的作用时间与车轮抬升量的关系 ($k=1.5$)

(或轮重减载率超限时间)确定为 0.035 s, 可确保车轮的抬升量远小于轮缘高度(25 mm)。需要指出的是, 该计算前提与实际情况不一定完全相符, 较整车实际情况要恶劣得多。

总之, 根据单轮对脱轨仿真计算, 可得如下结论: 无论是爬轨或跳轨, 如将轮轨脱离也考虑为脱轨系数超限的情形, 那么, 可用脱轨系数大于 1.0 的持续作用时间小于 35 ms 来作为车轮脱轨的统一安全限度。

4 整车轮轨相互作用脱轨仿真

为了验证由单轮对脱轨仿真得到的脱轨准则是否合适, 有必要进一步开展实际运行条件下整车脱轨仿真研究。鉴于我国铁路货车空车脱轨几率较大, 故选择

C_{62A} 空车进行整车脱轨仿真计算。

整车脱轨仿真研究的基本思路是基于车辆-轨道耦合动力学理论, 系统考虑整个车辆系统与轨道结构之间的动态相互作用特征, 运用经过试验验证的货车-轨道空间耦合动力学模型^[14], 输入我国自行测得的三大提速干线轨道谱^[15], 对不同运行速度条件下车辆空车直线脱轨安全性指标(包括车轮抬升量)进行详细的仿真计算。主要结果列于表 2。

由表 2 可见, 当 C_{62A} 货车空车以常用速度 60 km/h 运行时, 各位轮对左右车轮的脱轨系数均在 0.5 以下, 轮重减载率在 0.9 以下, 车轮抬升量在 1.5 mm 以下, 显然此种情况下, 车辆运行状态良好, 无明显的蛇行运动, 所以无脱轨危险。

表 2 C_{62A} 货车空车脱轨安全性指标的仿真结果

速度 /km · h ⁻¹	轮位	脱轨系数		轮重减载率		脱轨系数超限时间/ms		车轮抬升量/mm	
		左轮	右轮	左轮	右轮	左轮	右轮	左轮	右轮
60	I	0.429	0.433	0.873	0.779	0.000	0.000	1.235	0.792
	II	0.476	0.466	0.771	0.703	0.000	0.000	0.532	0.688
	III	0.415	0.497	0.618	0.687	0.000	0.000	0.737	0.627
	IV	0.368	0.417	0.699	0.635	0.000	0.000	0.546	0.623
80	I	1.042	1.821	1.000	1.000	86.96	28.94	0.933	-0.676
	II	1.229	1.113	1.000	1.000	13.22	34.17	-0.801	-0.708
	III	1.014	0.786	1.000	1.000	3.318	40.67	-0.239	0.301
	IV	0.899	0.694	0.838	1.000	0.000	19.75	2.405	0.054
90	I	2.551	2.130	1.000	1.000	59.96	63.10	11.52	11.40
	II	2.042	2.041	1.000	1.000	51.46	57.25	10.20	9.244
	III	1.932	2.156	1.000	1.000	59.08	131.5	13.30	9.881
	IV	1.931	1.790	1.000	1.000	73.21	73.59	15.13	13.49
100	I	5.812	3.914	1.000	1.000	58.97	61.03	22.63	15.62
	II	3.467	4.084	1.000	1.000	67.47	52.89	20.52	16.74
	III	4.762	3.914	1.000	1.000	79.48	50.93	11.97	12.80
	IV	3.332	6.988	1.000	1.000	77.12	77.83	15.82	12.40

当速度为 80 km/h 时, 车辆出现了明显的蛇行运动, 各位轮对左右车轮的最大脱轨系数基本均在 1.0 以上, 脱轨系数大于 1.0 的作用时间在 0~90 ms 范围内变化, 轮重减载率的最大值也都达到 1.0, 表明已出现车轮脱离钢轨的现象。车轮抬升量很小, 均在 3 mm 以下, 说明车辆的蛇行运动还不强烈, 车轮与钢轨的横向冲击较小, 车轮的爬升量和跳动量都不大, 所以车辆在此速度下运行并无显著的脱轨危险, 但其运行品质已大大下降。

随着速度增加, 车辆的蛇行运动变得越来越剧烈。当速度为 90 km/h 和 100 km/h 时, 所有车轮的最大脱轨系数均远远超过 1.0, 轮重减载率均达到最大值

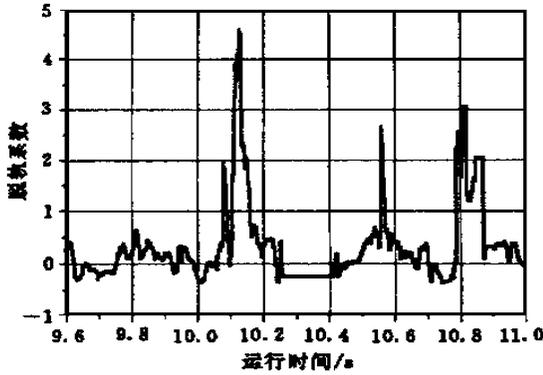
1.0, 脱轨系数大于 1.0 的作用时间在 50~150 ms 范围内变化。车轮抬升量已大大增加, 车辆出现了脱轨的危险。当速度为 100 km/h 时, 第一位轮对左轮抬升量达到 22.63 mm, 已非常接近脱轨的边缘。

在由车辆蛇行失稳所引起的脱轨中, 由于轮对相对钢轨有很大的横向位移和速度, 所以整个脱轨过程将以爬轨和由轮缘与钢轨发生横向冲击所产生的跳轨两种形式并存的方式表现出来。图 10 给出一个计算实例, 从中不难看出车轮表现出“爬轨-跳轨-爬轨-跳轨”的交替运动形式。

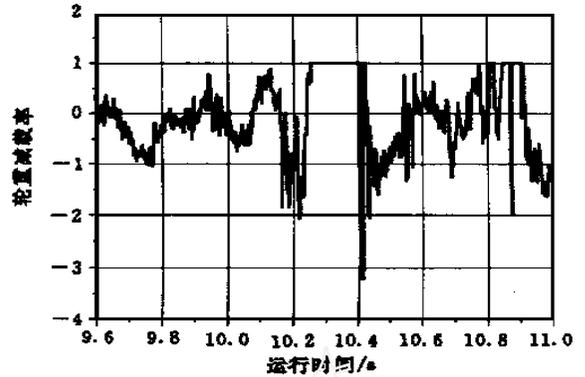
从表 2 的整车仿真结果可以看出, 脱轨系数大于 1.0 的作用时间变化范围很大, 根据单轮对脱轨准则,

如将其限制在 35 m/s 之内, 则各种速度下车轮抬升量均远小于轮缘高度, 表明车辆没有任何脱轨危险。可

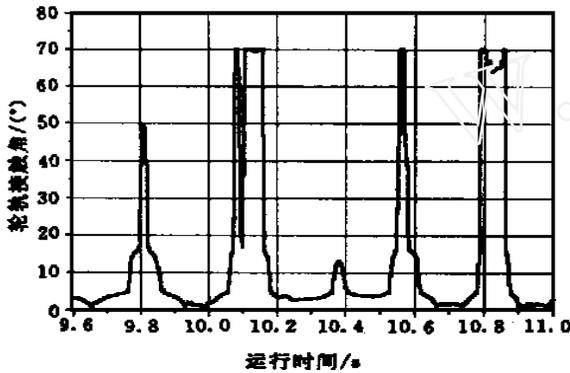
见, 由单轮对脱轨仿真得到的防脱轨安全限度是偏于安全的。



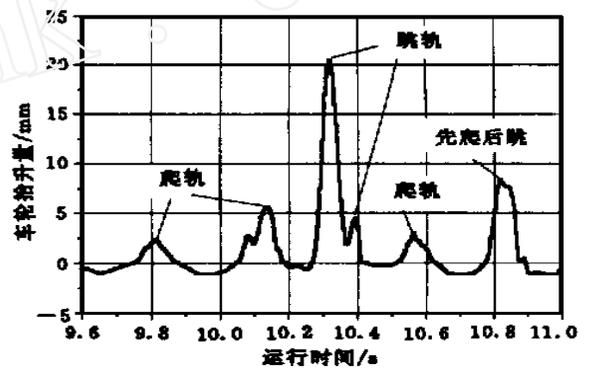
(a) 脱轨系数



(b) 轮重减载率



(c) 轮轨接触角



(d) 车轮抬升量

图 10 车辆蛇行失稳后脱轨指标的变化过程

5 车辆脱轨评判的建议准则

综上分析研究结果, 针对我国铁路目前情况, 提出如下脱轨评判准则。

5.1 脱轨系数评判准则

脱轨系数用于鉴定试验车辆其车轮轮缘在轮轨力作用下是否爬上或跳上轨头而导致脱轨。试验中应利用测力轮对连续测量车轮横向力 Q 和垂向力 P , 则脱轨系数 Q/P 应符合以下条件

$$\frac{Q}{P} \begin{cases} 1.0 & t \geq t_0 \\ 1.0 \times \frac{t_0}{t} & t < t_0 \end{cases} \quad (10)$$

式中, t 为横向力的持续作用时间, s ; t_0 为脱轨系数超过目标值 $\lambda(1.0)$ 时所允许的最大持续作用时间, s ; 且 $t_0 = 0.035 s$ 。

进行鉴定试验时, 至少应将车辆运行前方转向架的第一轴设置为测力轮对, 以保证测得车辆通过曲线时的最大脱轨系数。若条件许可时还可在转向架后轴布置测力轮对。

基本评判步骤如下:

- (1) 连续测量并记录左、右轮轨垂向力 P , 单位为 kN 。
- (2) 连续测量并记录左、右轮轨横向力 Q , 单位为 kN 。
- (3) 计算各采样时刻的 Q/P 得到脱轨系数连续变化波形, 如图 11 所示。

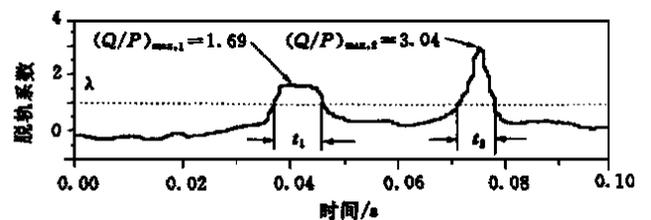


图 11 脱轨系数的安全评判示意图

(4) 判别脱轨系数有无超出目标值 λ , 若无, 则可评定脱轨系数满足安全标准; 若有, 则需分别找出脱轨系数大于 λ 值的各发生位置。

(5) 对超 λ 值的每一处, 如图 11 所示, 读出脱轨系数最大值, 并读出脱轨系数大于 λ 值的持续时间 t , 若 $t \geq t_0$, 则可判定脱轨系数不满足安全标准; 若 $t < t_0$,

则按式(10)评判其是否符合允许限度。

5.2 轮重减载率评判准则

轮重减载率是货车在特定工况下因轮重减载而脱轨的另一种防脱轨安全性指标,是判定车辆是否会因一侧车轮减载过大而导致脱轨的依据。试验鉴定时车辆轮重减载率 $\Delta P/\bar{P}$ 应符合以下条件

$$\begin{cases} \frac{\Delta P}{\bar{P}} < \eta & 0.60 \\ \frac{\Delta P}{\bar{P}} > \eta & t < t_0 \end{cases} \quad (11)$$

式中, t 为轮重减载率持续超过目标值 η (0.60)的作用时间, s; t_0 为轮重减载率超标时所允许的最大持续时间, s; 且 $t_0 = 0.035$ s。

基本评判步骤如下:

- (1) 连续测量并记录左、右侧车轮的轮重 $P_{左}$ 、 $P_{右}$ 波形。
- (2) 分别计算并记录左、右侧轮重减载率变化曲线, 这里

$$\begin{cases} \left\{ \frac{\Delta P}{\bar{P}} \right\}_{左} = \frac{\bar{P} - P_{左}}{\bar{P}} \\ \left\{ \frac{\Delta P}{\bar{P}} \right\}_{右} = \frac{\bar{P} - P_{右}}{\bar{P}} \end{cases} \quad (12)$$

- (3) 判别轮重减载率(只考虑正值减载率情形, 负值表示增载不予关心)有无大于目标值 η 。若无, 则可评定轮重减载率符合相应限度的安全要求; 若有, 则分别找出轮重减载率大于 η 值的各发生位置。

- (4) 对轮重减载率超目标值的各处, 如图 12 所示, 读出 $\Delta P/\bar{P}$ 大于 η 值的作用时间 t , 若 $t < t_0$, 则可评定轮重减载率满足安全标准; 若 $t > t_0$, 则不满足规范要求。

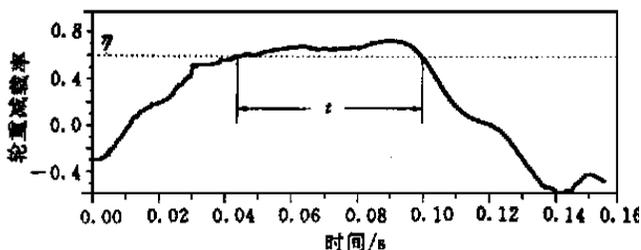


图 12 轮重减载率的安全评判示意图

5.3 分析讨论

作者建议的脱轨安全评判准则与 GB 5599—85 的主要不同之处在于, 允许被测车辆瞬时脱轨系数大于原有目标值 λ (1.2 或者 1.0), 也允许被测车辆的轮重减载率有瞬时超过其目标值 η (0.65 或 0.6) 的现象存在, 但一旦出现上述情况, 同时需要采用脱轨系数(或轮重减载率)超限时间按式(10)或式(11)进行评

判。这就解决了目前我国列车提速试验、脱轨试验中 GB 5599—85 不能满足试验需要的矛盾, 可以进一步适应今后我国铁路提速及快速运输发展的需要。

该准则在很大程度上参考了日本铁路理论研究成果与应用实践经验, 但所建议的安全标准是针对我国车辆与线路情况而得出的, 二者之间具有一定差异。日本长期使用的 JNR 标准规定脱轨系数目标值为 0.8, 脱轨系数超限时间是 0.05 s; 而本文标准取脱轨系数目标值为 1.0, 脱轨系数超限时间是 0.035 s。一方面, 脱轨系数目标值增大了; 另一方面, 脱轨系数作用时间减小了。关于脱轨系数目标值, GB 5599—85 规定了第一限度(合格标准)1.2 和第二限度(安全标准)1.0, 根据国际上有关脱轨评判标准, 一般为 0.8 和 1.0, 很少采用 1.2, 因此本文从安全性考虑, 建议取 1.0, 而不再区分为两种限度。事实上, 在实际执行中, 第一限度、第二限度的区分并未有多少实际意义。关于脱轨系数作用时间, 如前(1.3 节)所述, 日本已通过仿真研究拟将其标准从 0.05 s 降至 0.015 s^[8,9], 这样的标准是很严的, 从文献[8]仿真结果来看, 如 $t = 0.015$ s, 则车轮最大抬升量仅 1 mm, 与其安全限值相差甚远。我国铁道科学研究院在南津浦线进行的货车直线脱轨试验结果显示^[1], 在 65~85 km/h 速度范围内, 被试货车(装用转 8A 型转向架)脱轨系数最大持续作用时间约为 0.025 s, 已大于日本拟用新标准 0.015 s, 而小于本文建议标准 0.035 s。实际试验表明被试车辆均处于未脱轨的安全状态, 这也从一个侧面验证了本文所建议准则的合理性。

关于轮重减载率的评判标准, 建议也不必区分第一限度(0.65)和第二限度(0.60), 而采用一种目标值($\eta = 0.60$), 但允许出现轮重减载率大于 0.60 甚至达到 1.0 的情况, 即考虑了动态减载现象, 只要符合式(11)准则即可。实际上, 近年来我国几次大规模试验已突破了 GB 5599—85 标准, 例如南津浦线脱轨试验中规定 $\eta = 0.8$ ^[1], 又如大秦线脱轨试验及郑武线 240 km/h 高速试验均已采用动态轮重减载率目标值 $\eta = 0.9$ 的临时标准^[11,12], 均确保了行车试验安全性。

最后需要指出的是, 由于脱轨是一个非常复杂的轮轨相互作用过程, 受车辆、轨道等众多因素的影响, 因而难于用一个统一的标准加以评判, 但应该可以找出尽可能合理的脱轨评判准则以满足具体应用需求。本文研究提出的建议方案仅属一家之言, 其目的是抛砖引玉, 使大家有一个研讨基础, 还需要通过更多的试验实践和应用经验不断检验和完善, 最终实现对国家标准 GB 5599—85 修订之共同目标。

参考文献:

- [1] 铁道部科学研究院, 济南铁路局 徐州分局南津浦线货物列车脱轨试验报告 [R]. 北京: 铁道部科学研究院, 1997.
- [2] 翟婉明 车辆-轨道耦合动力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1997.
- [3] Nadal M J. Theorie de la stabilite des locomotives, Part 2 Mouvement de L'acet[J]. Annales des Mines, 1896, 10: 232
- [4] Koci H H, Swenson C A. Locomotive wheel-rail loading—A systems approach[A]. Proceedings of the Heavy Hual Railway Conference [C]. Perth: Western Australia, 1978
- [5] Shust W C, Thompson R, Elkins J. Controlled wheel climb derailment tests using a force measuring wheelset and AAR's track loading vehicle[A]. Proceedings of 12th International Wheelset Congress [C]. Qingdao, China: 1998
- [6] Weinstock H. Wheel climb derailment criteria for evaluation of rail vehicle safety[A]. Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting [C]. 84-WA/RT-1, 1984
- [7] Sweet L M, Karnel A, Moy P. Wheel climb derailment criteria under steady rolling and dynamic loading conditions[A]. Proceedings of 6th AVSD Symposium on Vehicle System Dynamics [C]. Swets & Zeitlinger Publishers, 1980
- [8] 石田弘明, 手冢和彦, 植木健司, 深泽香敏, 松尾雅树 脱轨稳定性评定指标的研究[J]. 铁道综研报告, 1995, 9(8): 49—54
- [9] 宫本昌幸 车辆的脱轨机理[J]. 铁道综研报告, 1996, 10(3): 31—38
- [10] GB 5599—85 铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范[S]. 1985
- [11] 铁道部科学研究院, 北京铁路局 大秦线C_{63A}货物列车脱轨试验报告[R]. 北京: 铁道部科学研究院, 1997.
- [12] 铁道部科学研究院, 郑州铁路局 郑武线最高速度 240 km/h 高速列车综合运行试验研究报告[R]. 北京: 铁道部科学研究院, 1998
- [13] 俞展猷, 李富达, 李谷 车轮脱轨及其评价[J]. 铁道学报, 1999, 21(3): 33—38
- [14] 翟婉明, 等 货物列车动力学性能试验评判规范的研究及建议方案[R]. 成都: 西南交通大学列车与线路研究所, 2000
- [15] 铁道部科学研究院 我国干线轨道不平顺功率谱的研究[R]. 北京: 铁道部科学研究院, 1999

(责任编辑 田克平)

《铁道学报》入编《中国学术期刊(光盘版)》 及网上期刊的启事

为了扩大学术交流渠道和范围, 本刊加入了《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社创办的《中国学术期刊(光盘版)》和《中国期刊网》中国科技信息研究所万方数据网络中心编辑制作的“Chinainfo 网络信息资源系统《电子期刊》”。《铁道学报》是上述光盘版理工C辑和网络版的全文收录期刊。光盘版和网络版的作者著作权使用费与本期刊酬一次性付给。如作者不同意将文章编入上述数据库, 请在来稿中声明, 本刊将做适当处理。

Chinainfo 电子期刊网址: <http://www.chinainfo.cn.net>

<http://www.chinainfo.gov.cn>

中国期刊网网址: <http://www.cnki.net>

<http://www.chinajournal.net.cn>

本刊E-mail: tdxb@public.sti.ac.cn

欢迎来信、来电话提出您的意见、建议。

《铁道学报》编辑部