

文章编号: 1005—0523(2005)05—0005—04

车辆脱轨机理及预防脱轨的对策

郑明新¹, 肖 矜², 何志勇², 胡永乐², 蒋金平²

(1. 华东交通大学 道桥与岩土工程研究所, 江西 南昌 330013; 2. 南昌铁路局, 江西 南昌 330000)

摘要:通过现场调研,在阐述三种脱轨机理,即爬轨脱轨、滑轨脱轨和跳轨脱轨的基础上,系统总结分析了目前各种车辆脱轨的安全评判标准及有待解决的问题,进而通过对脱轨试验情况分析并提出了五种车辆脱轨的类型及其脱轨预防对策。

关 键 词:脱轨机理;安全评判标准;脱轨类型;预防对策

中图分类号: TP391.4

文献标识码: A

依据国内外脱轨研究理论,结合铁科院、成都、北京、济南等铁路局所做的现场货物列车脱轨试验,对货物列车空车脱轨的原因和特点进行分析,进而为铁路工务部门防止列车脱轨提供评判准则和预防措施。

1 脱轨机理及判别

1.1 脱轨机理

脱轨是一种作用在轮对上的力导致轮缘爬上钢轨,且轮缘——钢轨接触面与钢轨表面的夹角达到最大的工况。在车轮进一步爬轨时,轮缘顶部就在轨顶面上运行,并很快走向钢轨外侧完成脱轨过程即爬轨脱轨。此外,还有滑轨脱轨和跳轨脱轨。滑轨脱轨是车轮轮缘在离开钢轨的方向运动时,当产生有过大的横向力(或称轮轨力)则可能使车轮滑下钢轨,导致钢轨破坏或轨距加宽发生脱轨。而跳轨脱轨指当有急剧的横向力作用到轮对上,轮对与钢轨间形成很大的相对速度,车轮冲击钢轨,产生过大的车体力矩,导致车辆与轨道分离,发生弹跳现象以致脱轨。仅仅在特殊工况下发生,如冲撞等外力作用或严重的线路缺陷和障碍等。

1.2 脱轨判别准则

由于轮轨系统的实际运行行为复杂,影响脱轨的因素众多,至今对脱轨机理尚未完全掌握,车轮的爬轨脱轨也只是脱轨的一种重要形式,主要发生在曲线轨道上,通常是由

较大的轮轨横向力或较大的轮重减载率所造成,车轮爬轨判断多采用著名的 Nadal 公式。

1.2.1 Nadal 判别准则

在车轮与钢轨的接触点上,车轮受到钢轨的 3 个方向的作用力,即垂直力 P 、横向力 Q 及纵向力在接触点处垂直平面内的投影——横向蠕滑力,接触点处法向力用 N 表示,接触平面与轨平面的夹角又称为轮缘接触角。

在此三种力中与脱轨直接有关的是垂直力 P 和横向力 Q ,称 Q/P 为脱轨系数。1896 年法国人 M. J. Nadal 据车轮爬轨接触点处的磨擦饱和得到力的平衡关系,即 Nadal 临界准则: $Q/P = \frac{\mu \alpha}{1 + \mu \tan \alpha}$, μ 是磨擦系数。而作用在轮对上的力除横向力外,还有左右轮重差产生的力矩。由于这些力和力矩作用,在轮缘接触侧的车轮产生横向力的同时还引起轮重的减少。轮重的减少量与静态轮重的比值称为轮重减载率,即

$$\frac{\Delta P}{P_{st}} = \frac{P_{st} - Pd}{P_{st}}$$

P_{st} 是左右车轮静轮重的平均值; Pd 是轮重的实时测量值轮重越小,即轮重减载率越大,则越易脱轨。

缺陷是此判别准则仅考虑了最大轮缘接触角和轮轨间的磨擦。

1.2.2 整轴 Q/P 比之和

1984 年美国人 H. Weinstock^[1]提出,车轮轮缘接触点处力的平衡关系不仅取决于轮缘接触的车轮,故建议采用同轴两车轮 Q/P 绝对值之和作为判别准则,即“整轴 Q/P 比之

收稿日期: 2005—08—18

作者简介: 郑明新(1966—),男,教授,博士,从事道路与铁道工程的教学,主研道路工程与路基病害防治。

和”。

研究表明,Nadal 准则在小的或负的冲角下具有较小的保守性,并且对磨擦系数 μ 不敏感。

但由于以上二者均是根据轮轨间力的静态平衡关系得出,在实际动态测量中经常出现超过其临界值而未爬轨的现象,故目前研究对脱轨系数的测量和计算进行了修正,并充分考虑减载率对横向力的影响,提出以下判别指标。

1.2.3 以准静态脱轨系数和减载率作为判别指标^[2](俄罗斯、中国为代表)

主要是以 Nadal 公式为基础给出了脱轨系数和减载率的安全限值: $\frac{Q}{P}=1.0, \frac{\Delta P}{P_{st}}=0.6$

在同一工况下,仅计算超标 3 次以上的最大值。此方法指标简单易用,适用车辆低速行驶和通过曲线时的安全评价,但在高速时不太适用,常超过限值并未发生爬轨。

1.2.4 以脱轨系数和减载率(轮对抬升量)持续作用时间为评价指标(以日本为代表)

日本国铁(JR)^[3]首先引入横向力作用时间的概念,给定的限度为:

$$Q/P=(\lambda), \quad (t \geq 0.05s)$$

$$Q/P=0.05\lambda/t, \quad (t < 0.05s)$$

式中: λ 一般取 0.8, t 是横向力作用时间

取静态轮重减载率限度 $\frac{\Delta P}{P_{st}} < 0.6$, 动态时 $\Delta P/P_{st} < 0.8$

所谓静态轮重减载率指在缓和曲线上轨道因轨面不平顺,货物偏载、曲线上过超高等引起比较缓和的轮重载荷变化。动态轮重减载率则指因为车辆摆动等引起的比较短时间的轮重减载,包括由于轨缝、道岔的冲击以及主要轮对振动惯性力等引起的轮重减载。轮重减载对脱轨的影响与横向力的关系很大,当横向力很大时,即使轮重减载为负,也有可能达到脱轨极限。

1.2.5 以引起危险脱轨系数和减载率的力的作用距离为评判指标^[4](以欧美为代表)

ORE 专业委员会规定下面的数据分析方法作为 UIC 进行脱轨评价:算出窗口长 2m,步长为 0.5m 的脱轨系数移动平均值等,综合采用单车轴 $Q/P=1.0$ 的限度和整轴 $Q/P=1.5$ 的限度,而在瞬态脱轨中规定了 50 ms 的横向作用时间。

1.2.6 西南交大曾京^[5]等提出考虑轮轨间的非线性蠕滑力作用的轮轨稳态爬轨脱轨的判别准则

$$L_v + \left(\frac{\lg \delta_L - \mu}{1 + \mu \lg \delta_L} + \frac{\delta_R + \mu}{1 - \mu \delta_R} \right) \eta - \frac{\lg \delta_L - \mu}{1 + \mu \lg \delta_L} + \frac{\delta_R + \mu}{1 - \mu \delta_R} \geq 0$$

式中: L_v 为轮轴横向力 F_s /轴重 $2p_0$,即轮轴脱轨系数, F_s 可由轮轨横向力求得; η 为轮重减载率; δ_L 和 δ_R 分别为左、右轮轨接触角; μ 为左右轮轨的踏面和轮缘的磨擦系数。

若该式满足则轮对可能出脱轨,若小于零则不脱轨。该式综合考虑了一个轮对的轮轴脱轨系数及轮重减载率对脱轨的影响;也反映轮轴脱轨系数 L_v 与轮重减载率 η 是线性关系,综合采用二者来评判更为合理。计算表明,减小轮轨磨

擦系数、增大轮缘角、减小轮对冲角有利于防止脱轨的发生。

总之,各种判别准则有其适用条件,完全反映货车脱轨安全的评判标准尚需做深入地研究。

2 目前脱轨试验情况及其结论

2.1 宝成宝天线小半径曲线上货车脱轨安全性研究^[6]

1985—1986 年铁科院应郑州铁路局委托,对宝成北段、宝天线货车脱轨进行了现场模拟试验。表明:

1) 货车脱轨成因分析

外轮在缓和曲线上的减载和侧压力在缓和曲线上增大是导致脱轨系数显著增大、脱轨稳定性显著下降的主要原因。分析脱轨应从小半径曲线或减载率着手,减载是由于外轨超高按顺坡率逐渐减低,从而使之具有很大扭曲刚度的车辆在线路上形成三点支承,前端外轮减载。

现行规章允许范围内,线路、车辆、装载或机车操纵任何一项单一因素都不致构成脱轨。只有各种运营条件形成不利组合时可能构成脱轨危险。故分析脱轨应从多因素出发:① 线路的超高顺坡率;② 车辆的结构尺寸和扭曲刚度;③ 转向架结构和弹簧刚度;④ 旁承间隙;⑤ 线路不平顺量值;⑥ 装载量和偏载情况。

2) 脱轨分析模型

考虑上述因素,以静力分析为基础,建立了定量确定各种工况下在园缓点后缓和曲线上车辆第一轴外轮的减载量和减载率公式及脱轨分析模型。

$$\text{① 减载量: } \Delta P = \frac{b_0^2}{8S^2} (L \cdot i + \delta_2 - \delta_1 \cdot \frac{S}{b_1}) \frac{K_B \cdot B \cdot K_i}{K_B + K_i} (W_0 \cdot H_0 + W \cdot H) \left(\frac{h}{2S} - \frac{V^2}{127R} \right) + \frac{We_x}{8S} + \frac{\delta_2 W \cdot l}{8L}$$

$$\text{② 减载率公式: } \frac{\Delta P}{P} = \frac{8\Delta P}{W_0 + W}$$

式中: i —缓和曲线上的超高顺坡率(‰); δ_2 —线路高低不平顺幅值(mm); δ_1 —车辆旁承对角间隙之和(mm); $2b_1$ —旁承中心横向跨距(mm); $2b_0$ —侧架横向跨距(mm); L —车辆定距(mm); $2S$ —轮对滚动圆间距(mm); W_0 —车辆自重(KN); W —货物载重(KN); K_B ——车体在枕簧处的扭曲垂直刚度(KN/m); K_i —转向架一侧的枕簧刚度(KN/m); H_0 、 H —分别为车辆自重和装载货物的重心高度(m); V —运行速度(Km/h); R —曲线半径(m); h —外轨超高(mm); e_y —货物重心横向偏移量。

$$\text{3) 脱轨系数计公式: } \frac{Q}{P} = \frac{\lg(\alpha_2 + \Phi) + f_2}{1 - f_2 \cdot \lg(\alpha_2 + \Phi)}$$

α_2 —爬轨车轮的轮缘角; Φ —轮对的侧滚角; f_2 —轮轨磨擦系数; μ —车轮与钢轨磨擦系数

进而建立了单一棚车车辆在曲线动态运行的脱轨分析数学模型^[7],计算可得到曲线设计参数和脱轨稳定性的关系,推荐圆曲线超高,运行速度、缓和曲线外轨超高顺坡率之间不利工况见表 1。

表 1 缓和曲线各方案情况及结论比较表

方案号	园曲线半径 /m	园曲线超高 /mm	园曲线轨距 加宽/mm	超高坡 (‰)	缓和曲线长 /m	通过速度 /m/s	载重 /t	货物偏心/m			评价结论
								纵向	横向	垂向	
1	300	120	15	2	60	5	20	0	0	0	较危险
2	300	120	15	2	60	10	20	0	0	0	较安全
3	300	120	15	2	60	20	20	0	0	0	较安全
4	300	120	15	2	60	10	10	0	0	-0.05	很危险
5	300	120	15	2	60	10	30	0	0	0.05	安 全
6	300	120	15	2	60	10	30	1.306 8	0.1	0.05	很安全
7	300	120	15	1	120	10	20	0	0	0	很安全
8	300	120	15	3	40	10	20	0	0	0	脱 轨

2.2 大秦线和南津浦线空车脱轨试验^{[8][9]}

1997 年 9~11 月在大秦线和南津浦线上进行了大型动力学试验,对空车脱轨现象进行现场调研、监测。被试车为装用转 8A 型转向架的敞车、平车和罐车。线路主要为隧道内和普通线路的直线段。初步得到:

1) 图像监控系统证实:① 旅客列车车轮轨接触状态良好,即使运行速度达 110 km/h 也无车辆悬浮现象;② 重载货车比空载的货车车轮轨接触关系要好,说明空载货车在运行中更易悬浮。

2) 空车的脱轨系数远比重车大,车轮悬浮的可能性也大,且随着速度从 65 km/h→80 km/h 增速,悬浮车轮比率显著增大,达 50%以上。

3) 车辆状态较差者(接近安全临界者),如心盘磨耗超限时,车辆运行中蛇行主频很明显,即使较低速度下在直线段上也发生较强的蛇运动,具有较大的脱轨可能性。

4) 车辆的技术装备对车辆运行安全性有很明显的影响。70 km/h 速度时部分车辆心盘螺旋处于松动状态与拧紧状态的脱轨系数 1.43→0.36,即脱轨系数明显下降。

5) 车辆在列车编组中的位置对车辆脱轨性能有较大影响,同一车辆在相同速度、相同路段下置于前部安全性相对较高,这可能与直线区段车辆发生蛇行运动产生激振有关,即车辆蛇行运动频率,钢轨本身迫振频率的某种耦合有关,有必要做进一步的研究。列车一旦进入曲线地段,激振被有效地抑制。

6) 列车运行状态,如牵引加速、制动状态等对脱轨均有一定影响,尤其是列车制动使脱轨系数增大 0.1~0.5,轮重减载将增大 0.1~0.4,且后部车辆影响更明显,尤其处于下坡走向上坡地段的变坡地段。牵引状态能抑制车辆蛇行运动,但处于惰行状态时在直线段却产生强烈的蛇行运动,脱轨系数增大。

3 脱轨类型及预防对策

3.1 脱轨类型

依据上述脱轨试验时钢轨变形特征并结合已有研究成果,将车辆可分为以下 5 类:

1) 轨道推移而造成脱轨^[2]:指轮像弹性挤压一根钢轨的头部,使车轮跌落于另一根钢轨的内侧。主要发生在轨枕破裂或螺钉松弛路段;另外在紧急制动循环作用地段,循环作用使车轮内侧边间距可能累积增加,加之在曲线段侧磨

可能使轨内侧距加宽,车轮有跌落可能。

2) 转向架走行部挤出造成脱轨:由于车轮轮缘爬上钢轨或尖轨头部,随后同一轮对的另一车轮跌落在轨道内侧。常发生在空车通过侧磨过限的钢轨或尖轨头部时。

3) 不允许的轨道错动造成脱轨:由于在列车制动情况下“失控的”转向架车轮作用或由于温度变化钢轨“外胀”而引起轨道错动而造成脱轨。即出现一个车轮的轮缘从扭曲钢轨头部爬上线路的同时,另一轮对的另一个车轮跌落在轨道内侧。

4) 爬上尖轨端部造成脱轨:主要由于尖轨与基本轨不密贴时,“失控的”转向架车轮轮缘被啃伤,车轮爬上基本轨(或说轮缘滚压上倾斜的尖轨侧面)和尖轨端部而发生脱轨。

5) 钢轨折断而造成脱轨:钢轨折断主要由于钢轨头部内部形成纵向垂直疲劳裂纹,造成曲线内侧钢轨折断(也包括道岔曲线)或轨头内侧部分脱轨,造成车辆脱轨。

3.2 脱轨预防对策

引起脱轨的因素众多,且多是综合因素引起的。故必须对每一种脱轨因素均应提出预防对策。

3.2.1 工务方面

1) 及时检查轨枕的完整性和扣件的松紧度。

2) 在曲线段上,当外轨头部侧向磨耗及其过超高时,空车极易被挤出。注意正确设置曲线超高,及时更换侧向磨耗过量钢轨。注意无缝线路外胀造成轨道扭曲,轨排外移有造成脱轨之可能。

3) 消除轨道中轨距、水平、高低、方向等引起的复合不平顺,尤其是在缓和曲线中的三角坑的存在,会引起车轮增减载不均,加大了减载率,特别是空车对其更为“敏感”,应避免“失控的”转向架爬轨。曲线宜定期涂油,既可减缓钢轨侧磨又可减少脱轨系数,对防止脱轨有积极意义。

4) 对有脱轨史地段,应认真检查是否有路基翻浆、暗坑吊板等问题,如有应进行根治。

5) 轮缘与尖轨动力响应分析可知,降低轮缘与尖轨和基本轨侧边的磨擦系数,可控制空车失重转向架受挤时爬上尖轨端部。要求:① 从尖轨尖端起 2~3 m 的基本轨侧边和类轨两端注意涂油;② 当尖轨尖端的基本轨头部侧磨达 6 mm 时应及时更换;③ 消除尖轨(尖端)与基本轨之间的间隙,不得超过 2 mm;④ 不允许在 50 mm 及以外处的尖端截面低于基本轨 2 mm 以上。

6) 严格轨检制度:每年列车作用下钢轨折断可达数百起,少数未被发现者可能造成脱轨。

3.2.2 车辆方面

1) 加强对车辆旁承检查和整修. 车辆同一转向架左右旁承游间之和不能小于 2 mm 和对角压死, 可减少车辆经过扭曲线路时对车轮减载率的影响, 降低轮轨之间的磨擦力矩和侧向力, 减少车轮脱轨系数.

2) 确保轮缘的整修质量. 我国车辆轮缘角标准是 $69^{\circ}12'$, 一旦轮缘磨损, 钢轨外倾, 则侧磨加剧, 使轮缘与钢轨接触角减小、增大了减载车轮的脱轨系数. 故规定接触角一般在 $68^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 间.

3) 装配刚度小、挠度大的转向架, 可使车辆通过曲线能适应线路扭曲、降低减载率. 据广州局在曲线上 71 次试验中^[7], 装配旧转 6 转向架的 P60 棚车第一轮对外轮产生悬浮占试验 71 次的 53%, 而装配新转 8 转向架的 P60 棚车未发生悬浮现象.

3.2.3 车务方面

1) 空车状态: 空车比重车容易脱轨是由于空车时弹簧挠度较重车小, 对线路扭曲适应能力较差.

2) 装载状态: 货物装向一侧或一端偏移, 会影响各车轮重新分配. 如果减小或消除此影响, 可降低 $\frac{\Delta P}{P} < 0.06$, 增大安全可靠度. 合理装载降低货物的装载重心, 每降低 100 mm, 则可减少偏载率 0.09%.

因此杜绝偏载、超载、集重, 降低重心, 认真按规定采用加固和防滑措施对安全重要意义.

3.2.4 机务方面

不同速度对车辆脱轨有不同影响, 特别是低速运行在小半径曲线的缓和曲线上的轻重混编的货物列车易引起悬浮脱轨. 为此要严格操作规程, 不得超速, 在曲线、长大下坡道地段, 应平稳操作避免列车冲动.

4 结论与认识

1) 现行规章允许范围内, 线路、车辆、装载和机车操作任何一项单因素都不可能造成直接脱轨, 脱轨是多因素不利组合的“综合脱轨”, 故防止脱轨事故应各方面齐抓共管,

综合整治.

2) 针对脱轨机理和脱轨临界条件, 除分析综合因素对脱轨的影响外, 尚应对各种因素的安全极限如最大不平顺、最小旁承间隙、最大偏载和最大顺坡率开展深入研究, 对现有“规范”进一步修正和检证.

3) 文中对脱轨试验总结并提出了五种车辆脱轨的类型, 进一步应从列车动力学出发, 结合现场试验, 利用现代化图像采集系统来分析各种工况下列车运行状态, 通过计算脱轨概率来预防脱轨.

4) 非稳态理论“横向阶跃力的瞬态响应”, 提出车轮爬轨取决于车辆前进力的作用距离而不是时间. 是否存在非稳态下车轮蛇行运动频率与作用一定长度钢轨产生的迫振频率有关? 今后均需深入的研究.

参考文献:

- [1] Weinstock H. Wheel Climb Derailment Criteria for Evaluation of Rail Vehicle Safety [R]. ASME Paper No. 84 WA/RT-1, 1984.
- [2] 俄罗斯 B.C.H., 铁道部科学研究院译. 车辆脱轨的主要原因和机理, 铁路行车安全译文集——脱轨研究专辑[R]. 1998
- [3] [日本]手冢和彦, “脱轨与运行安全性”, 铁路行车安全文集——脱轨研究专辑[R]. 铁道部科学研究院, 1998.
- [4] “欧洲关于脱轨问题的研究”, 铁路行车安全译文集——《脱轨研究专辑》铁道部科学研究院, 1998.
- [5] 曾京. 轮对稳态脱轨原则的研究[J]. 铁道学报, 1999, 21(6): 1-7.
- [6] 铁道部科学研究院. 宝成宝天线小半径曲线上货车脱轨安全性研究[R]. 1987.
- [7] 冯毅杰. 从棚车脱轨稳定性研究曲线线路的设计系数[R]. 铁道部科学研究院研究报告, 1988.
- [8] 铁道部科学研究院, 等. 徐州分局南津浦线货物列车脱轨试验报告[R]. TY No. 1163, 1997.
- [9] 铁道部科学研究院等. 大秦线 G63A 货物列车脱轨试验报告[R]. TY No. 1162, 1997.

Study on Derailment Mechanism of Railway Wheelset and its Protection Countermeasures

ZHENG Ming-xin¹, XIAO Jin², HE Zhi-yong², HU Yong-le², JIANG Jin-ping²

(1. Institute of Bridge & Road and Geotechnical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013; 2. Bureau of Nanchang Railway, Nanchang, 33000, China)

Abstract: Based on the in-situ investigation, three derailment mechanisms of railway wheelset are discussed. Then, the various derailment criteria are summarized and the problems of derailment criteria are put up. Moreover, the experiments of derailment are analyzed and five types of derailment are forwarded. Finally, protection countermeasures of derailment are put up.

Key words: derailment mechanism of railway wheelset; derailment criteria; type of derailment; protection countermeasures