

文章编号:1005—0523(2003)05—0018—05

金华东站驼峰惯性脱轨的理论分析与对策研究

李海峰¹, 贾耀军²

(1. 同济大学沪西校区 铁道建筑系, 上海 200331; 2. 上海铁路局 金华工务段, 浙江 金华 321001)

摘要:针对金华工务段存在的驼峰惯性脱轨的问题,采取现场调查分析、现场实测与理论计算分析三者相结合的方法,找出产生问题的原因,并有针对性地提具体的解决措施.实践证明,理论分析、现场实测与现场调查的情况基本吻合,措施合理、有效,达到了预期的目的.

关 键 词:铁路车站;驼峰;脱轨;模型;测试
中图分类号:U213.213 **文献标识码:**A

金华东区段站是浙赣线东段主要区段站.该区段站自 1997 年 4 月第一期工程(一级三场)开通投入运营以来,日编组量逐年上升,从开站之初的二千多辆增加到目前的四千多辆,作业量成倍增加.2000 年下半年至 2001 年上半年,驼峰下对称道岔区域连续发生 4 起惯性脱轨事故,且事故发生的周期一次比一次短,每次掉道的现场情况都很类似,但原因却不很明确.

频发的事故不仅直接影响运输生产,更是给安全生产造成了不利影响,因此,上海铁路局杭州分局、金华工务段金华东站联合上海同济大学对驼峰惯性脱轨问题做了详细的理论分析和现场测试对比研究,并提出了解决方案.本文将针对脱轨概况及相应的理论分析、现场测试和解决方案等内容作一介绍.

1 现状调查

金华东站驼峰区域共有 18 组 P50—1/6 对称风动道岔,脱轨都发生在 N227、N239 道岔,该种类型道岔转辙器为半割线型曲线尖轨,尖轨采用 4.5 m 长 AT 轨制造,道岔全长 17.457 m,道岔导线曲线半径 180 m,导曲线外股设 6 mm 超高,道岔前连接曲线半径 200 m,连接曲线与道岔之间没有夹直线.脱轨位置的平面如图 1 所示(图中以 N239 为例, N227 与 N239 条件一致).

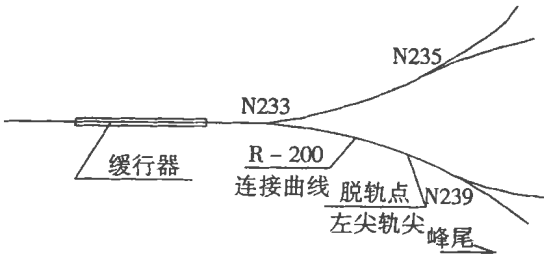


图 1 脱轨位置平面示意图

通过调查与分析,归纳驼峰惯性脱轨的情况如表 1 所示.

表 1 驼峰惯性脱轨的典型情况

脱轨时间	脱轨道岔	脱轨位置	脱轨车辆情况	原因
2000.8.9	N227	左尖轨尖附近爬上,辙跟部位脱落	共 10 辆,6 位后台、7 位前台车脱轨	不明
2001.1.3	N227	左尖轨尖附近爬上,辙跟部位脱落	共 9 辆,第 7 位前台脱轨	不明
2001.4.7	N239	左尖轨尖附近爬上,辙跟部位脱落	共 3 辆,第 3 位前台脱轨	不明
2001.4.9	N239	左尖轨尖附近爬上,辙跟部位脱落	共 9 辆,第 3 位前台脱轨	不明

2 原因分析

通过道岔与前后线路几何尺寸和结构、车辆的调查以及线路设计标准和设计规范的对照,可以发现,掉道的车辆的状态就车辆本身标准来说是符合要求的,原设计也符合设计规范要求。

但是,在道岔和前后线路的平面、纵断面位置复核时,发现尖轨尖附近的导曲线半径急剧变小,而此时离心力也会突然加大,形成了脱轨的可能。同时,线路纵断面在经过多年的运营后,发生了不均匀沉降,和原设计也有较大出入。纵断面的波浪形状状态直接影响了车辆通过的平稳性,也在客观上造成了脱轨的可能。

结合调查资料,进一步的分析表明,由于线路的纵断面起伏不平顺,使得车辆在过岔时一转向架的四个车辆不在同一平面上,又由于曲线阻力而导致前后车辆之间互相挤压而顶起,可以导致车轮减载浮离钢轨顶面。同时,车辆在通过 N227、N239 道岔时,受到突然加大的离心力(即横向的惯性力)的作用,使得浮离轮极易爬上尖轨并掉道。

因此,不良纵断面和不利平面的组合,使得车辆在通过道岔时不在一个平面上,曲线阻力的影响导致了中间车辆的车轮减载浮起;半径的突变使得离心力突然加大,是导致车辆脱轨的直接原因。

3 整治措施

根据调查分析得出的惯性脱轨的原因,针对性地采取了整治措施:

- 1) 调整线路平面,拨正线路方向;
- 2) 调整线路纵断面,使其满足调整后的平顺性要求;
- 3) 在尖轨尖前面位置,侧磨尖轨对侧及右尖轨前面加装导向护轨,在尖轨前安装导向护轨以减缓轮对对尖轨尖的撞击;
- 4) 强化道岔及前后线路的轨道结构,采取诸如尖轨尖涂油、加装中间绝缘轨距拉杆、加装防横移轨撑等措施。

4 轨道结构强化前后的理论分析

4.1 计算原理

车辆/轨道相互作用问题是铁路轮轨系统中

基本的问题,也是确保铁路运输安全高效的基本前提。轮轨间的动态相互作用关系可用钢轨振动模型、轮轨接触关系模型、车辆振动模型等来表达。

1) 车辆一轨道垂向作用力计算模型

本文利用车辆一轨道垂向模型计算轮轨之间的垂向作用力,以分析由于道岔尖轨处轨面不平顺引起的轮轨垂向作用力增大。车辆一轨道模型采用参考文献^[5]中的统一模型,在模型中,轨道被当作连续支承无限长 Euler 梁,但在实际处理过程中,常将钢轨视为有限长简支梁。事实上,当轨道计算长度取得足够长时,这样的处理可以获得令人满意的效果。根据梁振动的动力平衡条件,可列出钢轨振动微分四阶偏微分方程。为了进行数值分析,需将其转化为二阶常微分方程组,引入钢轨正则振型坐标,应用简支梁的正则振型函数,最后可得钢轨振型坐标微分方程组的详细形式为:

$$\begin{aligned} \ddot{q}_k(t) + \sum_{i=1}^N C_{pi} Y_k(x_i) \dot{q}_h(t) + \frac{EI}{m_r} \left(\frac{k\pi}{l} \right)^4 q_k(t) + \sum_{i=1}^N K_{pi} Y_k(x_i) \sum_{h=1}^{NM} Y_h(x_i) q_h(t) - \sum_{i=1}^N C_{pi} Y_k(x_i) \dot{Z}_{si}(t) - \sum_{j=1}^N K_{pj} Y_k(x_j) Z_{sj}(t) = \sum_{j=1}^N G_j(t) Y_k(x_{Gj}) \end{aligned} \quad (k=1 \sim NM) \quad (1)$$

式中 l 为轨道计算长度; N 为长度 l 范围内轨枕支点总数; $q_k(t)$ 为钢轨正则振型函数; C_{pi} 为轨下垫层阻尼, NM 模态阶数; EI 为钢轨垂向刚度; m_r 为单位长度钢轨质量; x_{Gi} 为轮载位置坐标; x_i 为轨枕位置坐标; $F_{rsi}(t)$ 为第 i 根轨枕反力; $Z_{si}(t)$ 为第 i 轨枕振动位移; $p_j(t)$ 为轮轨间总的作用力; p_0 为静轮载; K_{pi} 为轨下垫层刚度; $Z_r(t)$ 为钢轨垂向位移, $Z_r(x, t) = \sum_{k=1}^{NM} Y_k(x) q_k(t)$ 。

2) 轮轨接触关系

在垂向平面内,车辆子系统和轨道子系统之间的耦合作用是通过轮轨接触而实现的。轮轨垂向作用力由赫兹非线性弹性接触理论来确定,并可表示为:

$$p_j(t) = \begin{cases} \{P_0^{2/3} + \frac{1}{G} [Z_{wj}(t) - Z_r(x_{Gj}, t) - \eta(t)]\}^{3/2} \\ 0 \end{cases} \quad \begin{matrix} \text{(轮轨脱离时)} \\ (j=1 \sim 4) \end{matrix} \quad (2)$$

式中 G 为轮轨接触常数,对于锥形踏面车轮, $G=4.57 R^{-0.149} \times 10^{-8} (\text{m}/\text{N}^{2/3})$,对于磨耗型踏面车轮, $G=3.86 R^{-0.115} \times 10^{-8} (\text{m}/\text{N}^{2/3})$, R 为车轮半径, $Z_{wj}(t)$ 为 t 时刻第 j 位车轮的动位移; $Z_r(x_{Gj}, t)$ 为 t 时刻第 j 位车轮下钢轨的动位移; $\eta(t)$ 为轮轨表面

几何不平顺。

$$\text{轮轨接触应力: } \sigma(t) = S[p(t)]^{1/3} \quad (3)$$

式中 S 为由 Hertz 理论决定的应力常数 ($\text{N}^{2/3}/\text{m}^2$)。

3) 车辆横向模型

由于垂向模型无法计算轨道方向不良引起的轮轨作用力变化,所以本文利用车辆—轨道横向动力学模型计算分析曲线尖轨处方向不良引起的轮轨作用力的变化。计算结果表明,在 N239 道岔区的最不利横向力可达 60 kN,并据此轮轨横向力的变化,计算钢轨的扭转和横向位移,并以此来对比分析道岔加固前后的轮轨受力变化和轨道弹性位移的量,同时以此评价车辆运行的安全性。

根据车辆动力学理论,建立车辆动力模型,计算中为使模型充分反映化车车体和转向架的结构特点,将研究对象分成车体、前后摇枕、前后转向架、左右侧架和轮对第 33 个刚体。

各自由度上的振动方程组合起来,得到车辆系统的振动方程:

$$[M]\{\ddot{\eta}\} + [C]\{\dot{\eta}\} + [K]\{\eta\} = \{F\} \quad (4)$$

式中 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 分别是由各刚体组成的质量阵、阻尼阵和刚度阵,

$\{\ddot{\eta}\}$ 、 $\{\dot{\eta}\}$ 、 $\{\eta\}$ 由各刚体的加速度、速度和位移所组成的加速度阵、速度阵和位移阵;

$\{F\}$ 为外力列阵。

4) 钢轨横向位移和扭转计算模型^[2]

车轮在轨头上作用有垂直力和横向力,由于垂直力的作用点偏离钢轨垂向中心线,所以钢轨除承受垂向荷载外,还要承受扭矩。此外轮轨横向力作用在轨头上,此横向力也对钢轨产生扭矩。在横向力和扭矩的作用下,钢轨要产生平移和扭转,而这部分形成轨头的横向位移,也即造成轨距扩大。

4.2 计算条件

轨道结构:50 kg/m 钢轨,木枕线路,碎石道床;轨道支承系数: $6 \times 10^7 \text{ N/m}$;道床阻尼系数: $C_b = 5.88 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{s/m}$;货车轴距: $0-1.75 \text{ m}-0$,轴载 220 kN;计算车辆:我国的主型货车 C62a,空车和重车。列车速度按 17.5、20.0 及 22.5 km/h 考虑。计算钢轨扭转时考虑最不利横向力组合:第一轮对 $H_1 = 60 \text{ kN}$, $H_2 = 20 \text{ kN}$,第二轮对 $H_1 = 10 \text{ kN}$, $H_2 = 5 \text{ kN}$ 。

同时,顾及到轨道的曲线状态直接影响车辆运行的安全性,故除建立车辆—轨道动力模型外,在理论仿真计算时,轨道曲线状态按图 2 所示考虑。轨道结构加固前后对轨道结构几何形位的影响,主

要考虑轨道结构的轨距、水平的变化。加固前,轨道结构几何尺寸状态如图 3 所示。

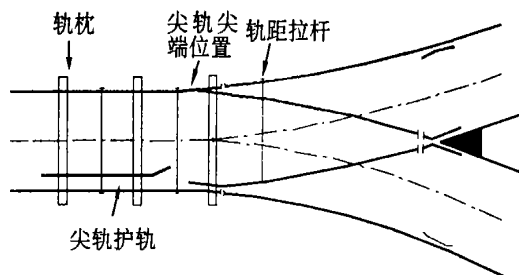


图2 车辆动力仿真计算时的轨道曲线状态

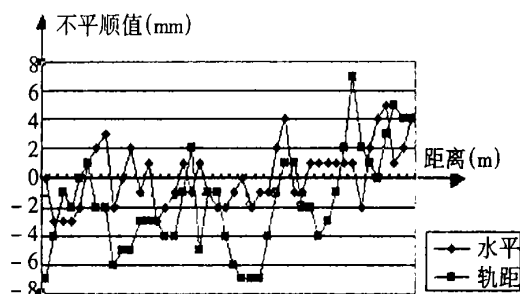


图3 加固前轨道结构的几何状态

4.3 仿真计算内容

轮轨作用力动力仿真计算时分两种状态:一是轨道结构未加固前的计算,也即在轨道加固位置,将钢轨的弹性扩大和扭转计算结果作为轨道附加不平顺加入到轨道的不平顺测量值中;二是轨道结构加固后的计算,对两种计算结果进行对比分析。

仿真计算的主要内容包括钢轨位移和扭转、轮轨垂直力和横向力、脱轨系数和轮重减载率以及轮轴横向力等。

4.4 计算结果及分析

钢轨扭转和仿真计算的输出波形如图 4~图 6 所示。其中图 4 表明钢轨在轮载作用下的扭转角与距离的关系;图 5 则表明了钢轨的横向位移与距离的关系;图 6 和图 7 是 C62a 重车,溜放速度为 22.5 km/h 时的仿真计算得出的内外轨脱轨系数和轮重减载率波形图。

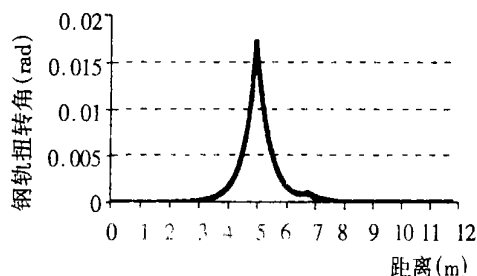


图4 轮轨横向力作用下钢轨的扭转角

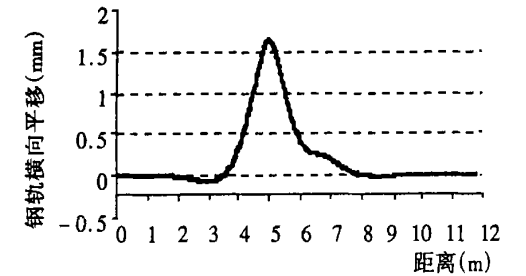


图 5 钢轨的横向平移

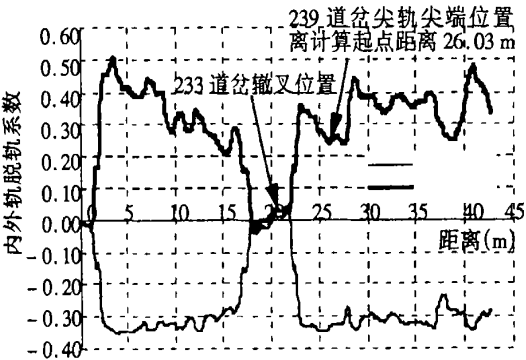


图 6 内外轨脱轨系数(C62a 重车,速度 22.5 km/h)

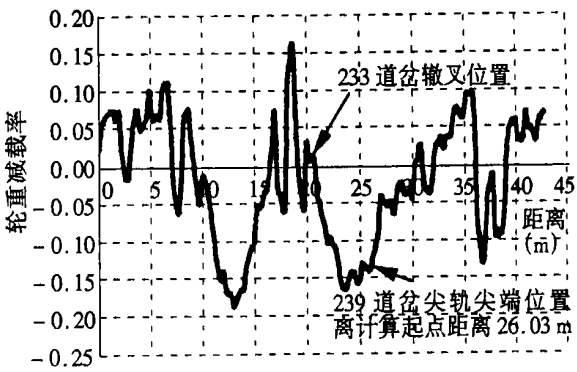


图 7 轮重减载率(C62a 重车,速度 22.5 km/h)

根据轨道加固前后轨道几何形位的变化(表 2 中的 0、1.5、3 mm)和车辆速度的不同,可仿真计算各种状态下的轨轮垂直力、轮对横向力、脱轨系数、偏载系数、轮轨横向力等仿真计算结果,如表 2 所示.尖轨尖端值是指在输出结果波形中,在尖轨尖端位置的计算值,最大值和平均值是指整个输出结果波中的最大值和平均值.根据计算结果,可对车辆各种状态下运行的轮轨力和车辆的安全性进行评价.

综合比较表 2 中的各项计算结果,可知:

		表 2 C62a 空、重车轮轨动力学参数的仿真计算数据								
货车类型		空 车			重 车					
速度(km/h)		17.5			22.5			22.5		
高低水平不平顺增幅		0 mm	1.5 mm	3 mm	0 mm	1.5 mm	3 mm	0 mm	1.5 mm	3 mm
最 大 值	外轨垂直力(kN)	26.45	26.45	26.45	26.75	26.75	26.75	118.40	118.40	118.40
	内轨垂直力(kN)	27.74	26.74	26.74	26.98	26.98	26.98	122.66	122.66	122.66
	外轨横向力(kN)	11.60	11.59	11.59	12.52	12.52	12.52	48.94	48.94	48.94
	内轨横向力(kN)	9.64	9.64	9.64	9.57	9.57	9.57	39.99	9.99	39.99
	轮轴横向力(kN)	4.24	4.24	4.24	5.50	5.50	5.50	14.89	14.62	14.31
	外轨脱轨系数	0.54	0.54	0.54	0.56	0.56	0.56	0.50	0.50	0.50
	内轨脱轨系数	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.35	0.35	0.35
	轮重减载率	0.18	0.18	0.18	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19

- 1) 由于货车速度相对较低(相对于区间的列车运行速度而言),线路的方向和高低变化增大,对内外轨的垂直力也基本没有影响;
- 2) 内外轨横向力的大小随轨道不平顺幅值增大而增大,但增幅不十分明显.在尖轨所在位置的外轨横向力随速度增大而有所增大;
- 3) 在尖轨尖端叠加附加不平顺以后,对于空车,外轨脱轨系数有所增大;在尖轨尖端附近的脱轨系数随车辆溜放速度提高而稍有提高,但都小于安全限值 0.8;
- 4) 轮重减载率不随附加不平顺的增大而增大,且处于较低水平,小于安全允许值 0.6;
- 5) 轮轴横向力处于较低水平,小于安全限值.

5 轨道加固前后的现场测试结果

根据现场测试的实际情况,测试项目及其位置如图 8 所示,与之相对应的北股线路加固前后测试结果对比如表 3 所示.图 9 是拉杆处的尖轨侧磨速率,从图中可知,道岔整治前后,尖轨的侧磨速率大大下降.

表 3 线路加固前后北股线路测试结果对比

速度(km/h)	17.58		17.84		17.59		17.83	
	最大值	i^{*2}	最大值	i^{*2}	最大值	i^{*2}	最大值	i^{*2}
测试项目 ^{*1}								
轨枕位移	2.00	2	1.40	1	0.62	2	0.67	1
钢轨头位移	3.82	1	3.16	3	1.55	1	2.54	3
钢轨垂直力	86.3	1	71.4	1	92.3	2	136.0	1
钢轨横向力	32.2	1	48.6	2	25.0	2	60.7	2
拉杆力	/	/	/	/	11.3	1	13.0	1
轨撑反力	/	/	/	/	18.0	2	12.4	1
脱轨系数	0.46	1	0.88	2	0.30	2	0.68	2

注: ^{*1}各测试项目见图 8; ^{*2}表示最不利位置的编号见图 8.

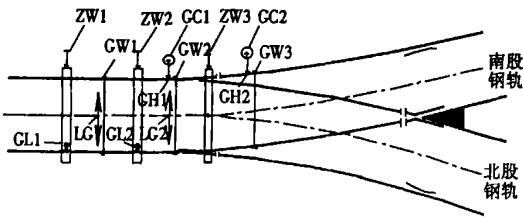


图 8 测试项目位置示意图

ZWi—轨枕位移 i ; GWi—钢轨头位移 i ; GCi—钢轨垂直力 i ; GHi—钢轨横向力 i ; LGi—拉杆作业力 i ; GLi—轨撑反力 i

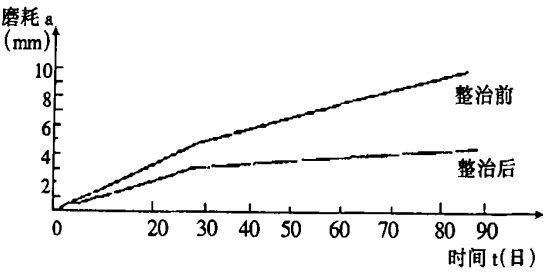


图 9 拉杆处的尖轨侧磨速率

6 结 论

从计算结果(表 2),可得出如下结论:

- 1) 空车的脱轨系数要比重车脱轨系数大,轮重减载率也较大,因此,空车运行时的安全性要低于重车时的安全性.
- 2) 整治后轨道结构的稳定性提高,各项技术指标均得到了不同程度的改善与提高,因此整治效果明显.

3) 采取整治措施后,轨距拉杆最大受力为 13.0 kN,轨撑水平受力最大值约可达 13.0 kN,故设置轨距拉杆和轨撑及护轨对保持轨道结构动态几何尺寸具有明显效果,整治后几何尺寸变化较整治前慢.从表 3 可知,轨道加固后,轨道的稳定性大大提高.

4) 尖轨磨耗减缓及尖轨侧磨点内移.整治前距离尖轨尖端 2 cm 处就开始侧磨,而整治后在 15 cm 处才开始侧磨,整治后尖轨的磨耗速度大大降低,如图 9 所示.

5) 整治后最大脱轨系数为 0.68,未超过 0.8 的规范标准,与进行整治后至今已近一年再未发生脱轨事故的事实相吻合.

基于以上结论,建议必要时在轨枕下安装道碴板,提高轨枕与道床之间的阻力,从而进一步提高轨道结构的稳定性.

参考文献:

[1] 金华东站长驼峰惯性脱轨整治报告[R].上海:同济大学铁道建筑系,2003.
[2] 练松良,刘丽波,Joe·Kalousek.荷载作用下轨距扩大的理论分析[J].铁道学报,2005.
[3] 王午生.铁道线路工程[M].上海:上海科学技术出版社,1999.
[4] 雷晓燕.轨道力学与工程新方法[M].北京:中国铁道出版社,2002.
[5] 翟婉明,著.车辆—轨道耦合动力学[M].北京:中国铁道出版社,1997.

Analysis and Countermeasure Research on the Railway Hump Free-digression in Jinhua East Station

LI Hai-feng¹, JIA Yao-jun²

(1. Department of Railway Engineering, Tongji University, Shanghai 200331; 2. Jinhua Pemanent Way Department, Shanghai Railway Bureau, Zhejiang 321001, China)

Abstract: Aiming at the railway hump free-digression problem in Jinhua permanent way department, this paper takes the combined method of the investigation on site and analysis, testing on the spot and theoretical calculational anaylsis to find out the real reason to the problem, and brings forward some solid solutions accordingly. It has proved that the theoretical analysis, testing and ivestigation are all consistent and the solution is reasonable and efficient. In the end the anticipated objectives is obtained.

Key word: railway station; hump; free digression; model; testing