# 某工程车四向过道岔动力学性能对比分析

#### 梁志慷, 黄志辉, 秦晓特, 林柄宏

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室,四川 成都 610031)

摘要:通过 SIMPACK 建立某工程车动力学模型和 12 号右开道岔模型,仿真计算该工程车 在道岔限速条件下以侧向、侧逆向、直向和逆向 4 种不同形式通过 12 号道岔时的动力学性能并 进行对比分析。结果表明,工程车在道岔限速条件下四向通过 12 号道岔时,各项动力学指标均 满足标准要求;针对同一线路,工程车正向运行和反向运行工况下的动力学性能相近,且相较于 正向过道岔,该车反向过道岔时的轮轴横向力较大,轮轨垂向力较小;工程车侧向、侧逆向过道 岔比直向、逆向过道岔时的动力学性能差,且该车侧向、侧逆向运行时,均在刚进入道岔时最危 险,直向、逆向运行时,均在辙叉区最危险。

关键词:工程车;12号道岔;辙叉区;动力学性能;对比分析

中图分类号:U270.1 文献标志码: A 文章编号: 2095 - 0373(2023)02 - 0096 - 09

## 0 引言

道岔区内轨道不平顺会使机车车辆过道岔时动力学性能恶化,容易发生轮轨碰撞,甚至会发生脱 轨<sup>[1]</sup>。国内许多学者针对道岔进行了研究,周橙等<sup>[2]</sup>建立了轻轨低地板车辆-道岔耦合模型,对独立轮对 过道岔时的动力学性能进行了分析研究;樊美娟等<sup>[3]</sup>建立了直线电机列车机电耦合模型,运用 Kik-Piotrowski法构建了岔区轮轨接触模型,通过输入实测廓形数据组,分析了列车侧向过道岔动力学特性; 杨逸航等<sup>[4]</sup>建立了车辆-道岔轮轨接触模型和动力学模型,对比了不同曲线半径下个性化打磨高速道岔和 传统打磨高速道岔对车辆过道岔的动力学性能的影响;司道林等<sup>[5]</sup>建立了道岔辙叉动力学模型,验证了 一定的翼轨抬高值可以抑制轮对垂向位移,减小轮轨间的动力作用;周宇等<sup>[6]</sup>测量了 18 号单开道岔的实 测廓形数据,并将此数据放入动力学模型中进行分析,计算出车辆过岔时曲尖轨接触区域的法向应力及 疲劳裂纹指数,并解释了道岔曲尖轨裂纹形成原因。

目前关于道岔的研究大多都是针对机车车辆以一种方式通过道岔时的动力学性能分析,而工程车一 般在各种线路上承担维修工作,会经常通过各种型号的道岔,因此对工程车过道岔的行车安全性研究必 不可少。现利用 SIMPACK 建立某工程车动力学模型,并结合 CAD 所绘制的 12 号右开道岔的断面廓形 文件建立道岔模型;在此基础上,仿真计算该工程车以侧向、侧逆向、直向和逆向 4 种不同的方式通过道 岔时的安全性指标并对比分析。

# 1 工程车动力学模型及评价标准

#### 1.1 动力学模型及主要参数

利用 SIMPACK 多体动力学软件建立该工程车动力学模型,包括1个车体、前后2个构架、4个轮对 和8个轴箱共计15个刚体。该工程车轴箱采用双拉杆定位方式,轴箱两侧各设置一组圆钢簧,车体采用 心盘承载方式,两侧设置常接触弹性橡胶旁承,并设置横向减振器、抗蛇行减振器和横向止挡等。车体、 构架及轮对均考虑伸缩、横移、浮沉、侧滚、点头、摇头6个自由度,轴箱考虑点头自由度,整车共计50个自

**收稿日期:**2023-02-05 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.20230026

基金项目:国家自然科学基金(U19A20109)

作者简介:梁志慷(1998一),男,硕士研究生,研究方向为车辆系统动力学。E-mail:841964130@qq.com

梁志慷,黄志辉,秦晓特,等,某工程车四向过道岔动力学性能对比分析[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2023,36(2):96-104.

由度。该工程车整车动力学模型如图 1 所示,主要动力学计算参数见表 1。

表 1 二	工程车	主要动力	学计算参数
-------	-----	------	-------

主要	车体	轴重/	定距/	轴距/	轨距/	轮径/	轮对内侧	车轮滚动圆
参数	质量/t	t	mm	mm	mm	mm	距/mm	横向跨距/mm
数值	53.53	17	14 500	2 100	1 435	840	1 353	1 493



#### 图 1 工程车动力学模型

# 1.2 动力学性能评价标准

工程车属特种车辆范畴,对其动力学性能评价时主要参考文献[7],由于此标准未对轮轨垂向力做出规定,故参考文献[8]。根据文献[9]、文献[10]指出"现行标准规定轮重减载率限度值为 0.65,不能完全适应实际运用要求,并建议调整评价指标",因此在评价轮重减载率时,考虑单轮脱轨准则<sup>[10]</sup>,即若被测车辆的轮重减载率(脱轨系数)有瞬时超过限值,但超限时间≪0.035 s时,并不具备脱轨风险。评定限值见表 2。

主要评价指标	评价标准
脱轨系数	第一限值≪1.2,第二限值≪1.0
轮重减载率	限值≪0.65,超限时间≪0.35 s
轮轴横向力	83.55 kN
轮轨垂向力	<i>v</i> ≪160 km/h 时为 200 kN

#### 表 2 动力学性能评定限值

#### 2 道岔模型

#### 2.1 道岔结构及主要参数

道岔作为一种线路连接设备,可以分为单开道岔、对称道岔、三开道岔、交叉道岔和复式交分道岔 5 种。单开道岔在线路上最为常用,主要由 3 部分组成:转辙器区、连接区及辙叉区。工程车过道岔的 4 种 工况如图 2 所示,其中工程车侧向通过道岔时,车轮将依次驶过尖轨、导曲线轨、辙叉区,最终回到基本轨 上。以 12 号单开道岔为例进行建模,其尖轨长 13 m,导曲线半径 350 m,辙叉长 4 m,护轨长 4.8 m,主要 参数见表 3,尺寸如图 3 所示。





图 3 道岔尺寸图(单位:mm)

#### 2.2 道岔模型的建立

由于道岔截面是不断变化的,可利用 CAD 绘制 12 号单开道岔不同的特征截面,将其廓形数据导入 SIMPACK 通过插值原理自动生成模型,工程车直向通过该道岔时断面如图 4 所示。图 4(a)~图 4 (c)为 右侧车轮从基本轨逐步过渡到尖轨上过程,图 4 (d)~图 4 (f)为右侧车轮从一侧翼轨滚动到心轨位置的 轮轨接触变化,图 4 (e)为车轮在心轨上行驶,明显可以看出轨面具有一定的倾角,可平衡通过曲线时产 生的离心力,利于工程车安全通过曲线。



图 4 工程车直向过道岔断面图

# 3 工程车四向过道岔仿真分析

工程车过道岔时速度较低,为确定轨道激励对工程车 过道岔时的影响,分别仿真该工程车在无轨道激励、有美 国五级谱轨道激励的工况下,以 50 km/h(最高允许速度) 侧向通过 12 号道岔时的轮重减载率,一位轮对轮重减载 率随距离变化曲线如图 5 所示。由图 5 知,无激励工况下 轮重减载率曲线在 60~80 m 范围(道岔区)波动明显;施 加美国五级谱后,轮重减载率曲线在整条线路上均有所波 动,且保持在无激励曲线附近,数值变化较小;2 种工况下 工程车轮重减载率均符合评定限值。因此,可以认为低速 运行时轨道激励对工程车过道岔的安全性影响较小,为更





以 12 号单开道岔为例,工程车侧向(侧逆向)通过道岔时必然存在曲线对工程车动力学性能的叠加 影响,为了区分曲线的叠加影响,在进行工程车侧向(侧逆向)过 12 号道岔动力学性能分析时,设置 350 m 半径的右(左)曲线进行对比分析。

#### 3.1 侧向通过性能分析

12 号单开道岔侧向容许通过最高速度为 50 km/h,因此仿真计算该工程车分别以 50、40、30、20、10 km/h 通过曲线半径为 350 m 的右曲线和 12 号道岔。各项评价指标的最大值见表 4,可知该工程车侧向 通过 12 号右开道岔时安全性满足标准,无脱轨风险。

98

表 4 侧向通过 12 号道岔动力学性能指标最大值

速度/(km・h <sup>-1</sup> )	脱轨系数	轮重减载率	超限时间/s	轮轴横向力/kN	轮轨垂向力/kN
50	0.91	0.72	0.020	72.48	155.23
40	0.85	0.67	0.015	68.60	141.24
30	0.76	0.58		63.37	129.51
20	0.70	0.52	_	59.60	113.22
10	0.66	0.45	—	47.70	109.85

工程车侧向通过道岔时,左侧车轮会先后经过尖轨和辙叉有害空间,一位轮对左侧车轮的各指标随 车轮行驶距离变化趋势分别如图 6~图 10 所示。









由图 6 可知,一位轮对左侧车轮进入尖轨区后,轮轨横 向力迅速升高,中部波动平缓,之后又呈现上升状态,这与 尖轨结构相关。尖轨前端为一小段直线贴靠基本轨,之后 为曲线伸入导曲线区,即车轮先贴近尖轨,导致轮轨横向力 立即升高,之后平缓过渡;车轮行驶完直线刚进入导曲线 时,轮轨横向力先继续增加,然后逐渐降低;车轮在辙叉区 中部轮轨横向力出现显著变化,主要是由于该区域心轨高 度及宽度逐渐变化,轮轨接触点和接触位置变化较大,表现 为该车轮轮轨横向力出现突变。

由图 7 可知,轮轨垂向力在尖轨区前端波动平缓,后逐 渐变大,进入导曲线后趋于平缓,在辙叉区轮轨垂向力波动



图 7 一位轮对左侧车轮轮轨垂向力



图 9 一位左轮脱轨系数(道岔工况)



再次变大。产生此现象的主要原因:尖轨前端轨面高度较低且轨顶宽度较窄,并不承受车轮载荷,当尖轨 轨顶宽度为 35.5 mm 左右时,逐渐承受车轮载荷,此时轮轨垂向力变化剧烈;导曲线区轨道结构不同于尖 轨区存在轨道过渡,在该区域运行时轮轨垂向力变化较平缓;在辙叉区有害空间的作用下,辙叉心部出现 冲击,左侧车轮轮轨垂向力波动剧烈,且轮轨力变化趋势同文献[2]结果相似,具有可信性。

脱轨系数用于鉴定车轮轮缘在横向力作用下是否会因逐渐爬上轨头而脱轨,因此其变化与轮轨横向 力密切相关。由图8可知,脱轨系数变化大致可分为5处。I、II区脱轨系数的增大主要是由于工程车一 位轮对从直线转入曲线,在曲线轨道运行时外轮轮缘必定贴靠外轨,导致轮轨横向力增加;II、IV区脱轨 系数的减小则是由于此时一位轮对从曲线向直线过渡,轮轨横向力降低所致;在IV、V区时一位轮对已经 处于直线线路上,脱轨系数仍然有明显的变化,是由于此时后转向架仍然处于曲线段,三、四位轮对会出 现和一、二位轮对过曲线时相似的轮轨横向力增减变化,从而导致前转向架轮轨横向力出现同步增减变 化,表现为脱轨系数先增大后减小;当整车驶出曲线后,一位轮对左侧车轮脱轨系数趋于平稳。

由图9可知,道岔工况下一位轮对左侧车轮脱轨系数 I 区为尖轨区, II 区为导曲线起始区, II 区为导 曲线结束区, N 区为辙叉区, V 区为基本轨区。与曲线工况对比可知, II、II、V 区变化趋势为工程车过曲 线时一位轮对左侧车轮脱轨系数的固有变化;道岔结构对工程车动力学性能的影响主要表现在 I 区和 N 区,在 I 区时, 左侧车轮会从基本轨过渡到尖轨上, 在 N 区时, 左侧车轮会从导曲线轨过渡到心轨上。根 据图 6 可知, 这 2 段区域内轮轨横向力变化较大, 表现为道岔工况下脱轨系数在 I 区和 N 区出现突变。

轮重减载率用于鉴定工程车是否会因一侧车轮减载过大而导致脱轨,因此其变化与轮轨垂向力密切相关。根据图 10 和图 7 可以看出,轮重减载率同轮轨垂向力一样在尖轨区和辙叉区波动较大。当工程车分别以 50、40 km/h 的速度行驶时,一位轮对的轮重减载率在辙叉区出现分别为 0.72、0.67 的最大值,持续时间分别为 0.02、0.015 s,但均未超过轮重减载率超限持续时间,无脱轨风险。

#### 3.2 侧逆向通过性能分析

仿真计算该工程车分别以 50、40、30、20、10 km/h 通过曲线半径为 350 m 的左曲线和 12 号道岔。各项评价指标的最大值见表 5,可知该工程车侧逆向通过 12 号右开道岔时安全性满足标准,无脱轨风险。

速度/(km・h <sup>-1</sup> )	脱轨系数	轮重减载率	超限时间/s	轮轴横向力/kN	轮轨垂向力/kN
50	0.81	0.78	0.025	80.96	134.73
40	0.83	0.64	—	81.25	125.18
30	0.75	0.62		56.23	116.61
20	0.70	0.58		62.25	112.23
10	0.64	0.35		44.82	98.22

表 5 侧逆向通过 12 号道岔动力学性能指标最大值

工程车侧逆向通过道岔时,右侧车轮会先后经过辙叉心部有害空间和尖轨,一位轮对右侧车轮的各项指标随车轮行驶距离的变化趋势分别如图 11~图 15 所示。





图 13 一位右轮脱轨系数(曲线工况)

由图 11、图 12 可知,工程车侧逆向通过道岔时,右侧车 轮先进入辙叉端部轮轨横、垂向力剧增;当进入辙叉中部 时,由于有害空间的存在,轮轨出现冲击,波动较大;刚进入 导曲线轨时右侧车轮轮轨横、垂向力均先迅速升高,后逐渐 降低;当车轮从导曲线末端进入直线和从尖轨进入基本轨 时,轮轨接触发生较大变化,故轮轨横、垂向力均出现 2 次 突变。

对比图 8 和图 13 可以看出,该工程车一位轮对左、右侧车轮的脱轨系数曲线关于横坐标轴对称,各曲线拐点位置与峰值绝对值几乎一致。因此该工程车通过相同条件下的左曲线与右曲线,其动力学性能相近,不再对左曲线工况下的脱轨系数进行分析。



图 15 侧逆向过岔时一位轮对轮重减载率

对比图 13 和图 14 可知,道岔工况下脱轨系数显著变化位置主要分布在 3 个区域。 I 区脱轨系数有 2 个峰值点,这是由于一位轮对右侧车轮从直线进入辙叉端部后,轮轨横向力发生剧增,运行到辙叉中部 时轮轨横向力又出现一个峰值,致使脱轨系数增加;在 II 区车轮从导曲线末端进入直线,在 III 区车轮从尖轨前端进入基本轨,这 2 个区域中轮轨横向力均出现短暂的增加,脱轨系数也相应地变化。

根据图 12 和图 15 可知,轮重减载率同轮轨垂向力一样在尖轨区和辙叉区波动较大。当工程车以 50 km/h 的速度行驶时,一位轮对的轮重减载率在辙叉区出现 0.78 的最大值,持续时间为 0.025 s,但未超过 轮重减载率的超限持续时间,无脱轨风险。

### 3.3 直向通过性能分析

工程车最高试验速度、运行速度分别为 132、120 km/h,故仿真计算该车分别以 132、120 km/h 直向 通过道岔时的动力学性能,各项评价指标的最大值见表 6,可知该工程车直向通过 12 号道岔时安全性满 足标准,无脱轨风险。

速度/(km・h <sup>-1</sup> )	脱轨系数	轮重减载率	轮轴横向力/kN	轮轨垂向力/kN
132	0.36	0.52	40.96	128.25
120	0.31	0.51	33.81	125.66

表 6 直向通过 12 号道岔动力学性能指标最大值

工程车直向通过道岔时,右侧车轮会经过辙叉心部有害空间,故主要分析一位轮对右侧车轮动力学性能,其各项指标随行驶距离变化趋势分别如图 16、图 17 所示。可以看出,2 种速度工况下一位轮对右侧 车轮的轮轨横、垂向力均在尖轨区波动较小,在辙叉区波动较大,这是因为在此区域车轮从基本轨过渡到 心轨,轮轨接触位置变化较大存在冲击;相应地,一位轮对右侧车轮的脱轨系数和一位轮对的轮重减载率 均在尖轨区波动较小,在辙叉区波动较大。



#### 3.4 逆向通过性能分析

仿真计算该车分别以 132、120 km/h 逆向通过道岔时的动力学性能,各项评价指标的最大值见表 7, 可知该工程车逆向通过 12 号道岔时安全性满足标准,无脱轨风险。

逆向通过 12 号道岔动力学性能指标最大值

速度/(km・h <sup>-1</sup> )	脱轨系数	轮重减载率	轮轴横向力/kN	轮轨垂向力/kN
132	0.58	0.59	48.22	121.35
120	0.56	0.46	45.31	123.66

工程车逆向通过道岔时,左侧车轮会经过辙叉心部有害空间,故主要分析一位轮对左侧车轮动力学性能,其各项指标随行驶距离变化趋势分别如图 18、图 19 所示。可以看出,2 种速度工况下一位轮对左侧 车轮的轮轨横、垂向力均在尖轨区波动较小,在辙叉区波动较大,是因为在此区域车轮刚从基本轨进入辙 叉时出现冲击,产生较大的轮轨横、垂向力,后过渡到基本轨之前,心轨高度变低逐渐不承受垂向载荷,轮 轨垂向力出现第 2 次突变;相应地,一位轮对左侧车轮的脱轨系数和一位轮对的轮重减载率均在尖轨区 波动较小,在辙叉区波动较大。



# 4 工程车动力学性能指标对比分析

通过仿真计算工程车以4种方式通过道岔时的轮轴横向力、轮轨垂向力、脱轨系数和轮重减载率,可 以看出针对同一个动力学性能指标,在不同工况下具有一定的变化规律,故对其4个动力学性能指标进 行对比分析。该工程车轮轴横向力和轮轨垂向力在各工况下的计算结果分别见表8、表9。

表 8 侧向、侧逆向工况下轮轴横向力和轮轨垂向力最大值

	轮轴横[	句力/kN	轮轨垂向	轮轨垂向力/kN		
速度/(km・h <sup></sup> )	侧向	侧逆向	侧向	侧逆向		
50	72.48	80.96	155.23	134.73		
40	68.60	81.25	141.24	125.18		
30	63.37	56.23	129.51	116.61		
20	59.60	62.25	113.22	123.23		
10	47.70	44.82	109.85	98.22		
表 9	表 9 直向、逆向工况下轮轴横向力和轮轨垂向力最大值					
· 」 由 / ( ]	轮轴横向力/kN		轮轨垂向力/kN			
速度/(km•h <sup>-</sup> )	直向	逆向	直向	逆向		
132	40.96	48.22	128.25	121.35		
120	33.81	45.31	125.66	123.66		

由表 8、表 9 可以看出,针对同一线路,工程车正向运行(侧向、直向)与反向运行(侧逆向、逆向)时的 动力学指标接近;相较于正向过道岔,工程车在反向过道岔工况下的轮轴横向力最大值普遍较高;相较于 反向过道岔,工程车在正向过道岔工况下的轮轨垂向力最大值普遍较高。当工程车均以最高速度运行, 相较于直向、逆向过道岔,工程车侧向、侧逆向过道岔工况下的轮轴横向力和轮轨垂向力均较高,即侧向、 侧逆向过道岔时,工程车运行安全性较差。

脱轨系数和轮重减载率均用于判断工程车在运行过 程中是否会脱轨,下面以脱轨系数为例对比分析其变化 规律,绘制工程车以 50 km/h 侧向和侧逆向分别通过道 岔和曲线的计算结果,以 132 km/h 直向和逆向通过道岔 的计算结果如图 20 所示。

分析图 20 可知,当工程车以最高速度侧向通过道岔时,脱轨系数最大值在尖轨区,侧逆向通过道岔时,脱轨 系数最大值在辙叉区,即工程车侧向和侧逆向过道岔最 危险的时刻均为刚进入道岔时,同过曲线一样(工程车刚 进入曲线时最危险);当工程车以最高速度直向和逆向通 过道岔时,脱轨系数最大值均在辙叉区,即在此区域运行 最危险,与运行方向无关。轮重减载率变化情况同脱轨 系数一致,不再赘述。



## 5 结论

以 12 号右开道岔为例,利用 SIMPACK 仿真计算了某工程车以 4 种方式通过道岔时的动力学性能, 对比分析得出以下结论:

(1)该工程车在道岔限速条件下侧向、侧逆向、直向、逆向通过12号道岔时,脱轨系数、轮重减载率、 轮轴横向力和轮轨垂向力均满足标准要求,无脱轨风险;

(2)针对同一线路,该工程车正向运行与反向运行时的动力学性能相近,但该车正向过 12 号道岔时 的轮轨垂向力普遍较高,反向过 12 号道岔时的轮轴横向力普遍较高;

(3)该工程车侧向、侧逆向过道岔比直向、逆向过道岔时更危险,且该车侧向、侧逆向运行时,均在刚进入道岔时最危险,直向、逆向运行时,均在辙叉区最危险。

# 参考文献

[1]高杰卿,潘振. 重载条件下 60 kg/m 钢轨 12 号单开道岔的改造与应用[J]. 铁道建筑, 2018, 58(6): 129-132.

- [2]周橙,池茂儒,梁树林,等.不同轮对结构城市轻轨低地板列车通过道岔区动力学行为分析[J].机械工程学报,2019, 55(2):98-106.
- [3] 樊美娟,关庆华,李伟,等. 直线电机列车侧向通过小号道岔动力学响应分析[J]. 铁道机车车辆, 2021, 41(2): 70-76.
- [4]杨逸航,肖乾,蔡林珊,等.个性化道岔廓形打磨对动车组动力学性能影响[J].华东交通大学报,2021,38(2):82-87.

[5]司道林,杨东升,王树国,等.高速道岔辙叉结构不平顺动力学特性分析[J].铁道建筑,2018,58(1):67-69.

[6]周宇,张聪聪,王树国,等.高速道岔曲尖轨疲劳裂纹成因分析[J].同济大学学报(自然科学版),2020,48(12): 1770-1781.

[7]国家质量技术监督局.铁道特种车辆和轨行机械动力学性能评定及试验方法:GB/T 17426—1998[S].北京:中国标准 出版社,1999.

[8] International Union of Railway. Testing and approval of railway vehicles from the point of views of their dynamic behavior-safety-track fatigue-ride quality: UIC 518-2009 [S]. 4th ed .Paris: UIC, 2009.

[9]田葆栓.铁路长大货物车轮重减载率评定标准分析研究[J].铁道技术监督,2021,49(3):10-14.

[10] 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(2):17-26.

# Comparative Analysis of Dynamic Performance of an Engineering Vehicle with Four-Way Crossing Turnout

Liang Zhikang, Huang Zhihui, Qin Xiaote, Lin Binghong

(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The dynamics model of an engineering vehicle and the model of No.12 right-opening turnout were established by SIMPACK, and the dynamic performance of the engineering vehicle was calculated and compared when it passed through No.12 turnout in four different ways: lateral, lateral reverse, straight and reverse under the speed limit condition of turnout. The results show that: when the engineering vehicle passes the No.12 turnout in four directions under the speed limit of turnout, all the kinetic indexes met the standard requirements; for the same line, the kinetic performance of the engineering vehicle was similar under the operating conditions of forward and reverse, and compared with the forward crossing, the wheel axle transverse force was larger and the wheel-rail vertical force was smaller when the vehicle crossed the turnout in reverse. The engineering vehicle passed the turnout in lateral and the dynamic performance of the engineering vehicle was most dangerous when it entered the turnout in the straight or reverse direction, and most dangerous in the rutted fork area when it ran in the straight or reverse direction.

Key words: engineering vehicle; No.12 turnout; frog area; dynamic performance; comparative analysis