

文章编号:0258-2724(2001)05-0495-05

250 km/h 高速铁路轨道不平顺的安全管理

陈果¹, 翟婉明², 左洪福¹

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

摘要: 利用根据车辆-轨道耦合动力学思想所建立车辆-轨道垂横耦合模型, 在充分考虑多种波长并存的情况下, 仿真计算了 250 km/h 高速铁路各种轨道不平顺的管理目标值。计算结果与日本和德国高速铁路轨道不平顺的经验管理目标值基本一致。

关键词: 高速铁路; 轨道; 安全; 不平顺; 管理

中图分类号: U238 **文献标识码:** A

Safety Management of Track Irregularities of 250 km/h High-Speed Railway

CHEN Guo¹, ZHAI Wan-ming², ZUO Hong-fu¹

(1. Civil Aviation College, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. School of Eng. Sci., Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Using the vertical-lateral model of vehicle-track coupling system, which is set up based on the vehicle-track coupling dynamics, and taking the coexistence of manifold wavelengths into account, the management values of various track irregularities in 250 km/h high-speed railway are calculated by simulation. The calculation results are consistent with the management values of the high-speed railway of Japan and Germany on the whole.

Key words: rapid transit railway; track ways; safety; irregularities; management

安全和高速是高速铁路最首要、最核心的问题。轨道不平顺是引起机车车辆振动的主要根源。严重的轨道不平顺不仅会引起机车车辆剧烈振动,使轮轨作用力加大,甚至会导致列车脱轨,危及行车安全。国外的实践证明,如果轨道的平顺状态满足要求,高速列车的振动和动作用力都不太大,行车安全和平稳舒适性就能得到保证,轨道和机车车辆部件的使用周期和维修周期也会得到延长。所以无论在新线路施工、改进轨道结构、加强路基道床,还是在改进轨道状态检测、维修管理技术等方面所采取的主要技术措施都是围绕提高和保持轨道平顺状态这一核心问题进行的。

1 车辆-轨道垂横耦合模型

要深入研究在轨道不平顺的作用下车体和轨道所产生的振动,就必须建立能反映车辆和轨道两方面自由度的车辆-轨道耦合模型,传统的车辆模型由于仅考虑车辆的振动,将轨道视为刚性,所以只能通过研究车辆车体的振动来反映不平顺的影响大小,因此不能合理的判断车辆运行的安全性。有鉴于此,基于车辆-轨道耦合动力学思想^[1],文献[2]建立了车辆-轨道垂横耦合模型。在模型中,同时考虑了车辆和轨道的垂向和横向振动,将钢轨视为连续弹性点支承基础上无限长欧拉梁,并考虑其垂向、横向和扭转振动;

收稿日期:2000-08-28

基金项目:国家杰出青年科学基金(59525511)和霍英东教育基金和高等院校博士点基金(98061303)资助项目

作者简介:陈果(1972-),男,博士。

将轨枕视为刚体,考虑其垂向、横向及转动;道床被简化为刚性质量块,考虑其垂向振动和相互之间的剪切作用。

在轮轨空间动态耦合关系的研究中,充分考虑了钢轨的横向、垂向和扭转运动以及轨道不平顺对接触几何关系的影响;彻底摆脱了传统车辆动力学中运用迭代求解轮轨法向力的方法,使轮轨法向力和切向蠕滑力的计算分开,而且可以准确计算轮轨瞬时脱离的情形;在轮轨纵向、横向和自旋蠕滑率的求解中,充分考虑了轨道不平顺变化速率和钢轨振动速度的影响。因此该模型较传统车辆模型更为完善合理。

由于车辆-轨道垂横耦合系统的特点是系统自由度庞大,具有多种强非线性因素。目前求解这类大型非线性振动问题,只能采用直接数值积分法。为此,文中采用了适用于求解大型非线性动力学问题的新型显式积分法^[1]进行求解。

文献[2]中对车辆-轨道垂横耦合模型及其求解方法的正确性和有效性进行了充分验证,所以文中将依据该模型进行高速铁路轨道不平顺管理研究,以期获取更为切合实际的管理目标值。

2 高速铁路轨道不平顺的管理

2.1 计算参数的选取

选取长春客车厂生产的250 km/h高速客车辆^[2],在车体和构架之间考虑了抗蛇行减振和抗侧滚扭杆,车轮踏面为高速车辆磨损型踏面HLM,通过计算该车的失稳临界速度在400 km/h以上。轨道条件为60 kg/m钢轨普通碎石道床,随机轨道不平顺为德国高速低干扰谱^[3]。运行速度为250 km/h。

2.2 1 m以下的轨面垂向短波不平顺的安全管理

波长小于1 m的短波不平顺,随着行车速度的增长将使轨道和簧下质量产生严重的振动,并承受巨大的冲击。致使车辆、轨道负载增加,降低了结构的可靠性和安全度,同时将使轮载波动加剧,严重危及行车安全。由此可以看出,进行1 m以下的短波不平顺管理的意义是非常重大的。获取恰当的短波不平顺限值可由如下方法获得。

设1 m以下的短波不平顺为平稳随机过程,其功率谱密度^[4]形式可表示为

$$S(f) = 0.036 kf^{-3.15} \quad (1)$$

式中: $S(f)$ 单位为 $\text{mm}^2/\text{m}^{-1}$; f 为空间频率,单位为 $1/\text{m}$; k 为粗糙度系数, k 取不同的值可以得到平顺性不同的短波不平顺。又因为短波不平顺的波长设为0.011 m,所以其空间频率 $1 < f < 100 \text{ m}^{-1}$ 。由随机振动理论,在空间频率 1100 m^{-1} (即波长为0.011 m)内短波不平顺的全峰值为

$$f = 2 \times 3 \times \sqrt{2} = 6 \sqrt{\int_1^{100} S(f) df} = 0.78 \sqrt{k} \quad (2)$$

表1 短波不平顺对车辆轨道随机响应的影响

粗糙度系数	短波不平顺全峰值	车体垂向加速度	轴箱垂向加速度	单侧轮轨垂向力	动态轮重减载率	钢轨垂向加速度	轨枕垂向加速度	道床垂向加速度
0.01	0.08	0.078 g	3.461 g	102.54	0.747	9.956 g	3.175 g	2.298 g
0.02	0.11	0.078 g	4.194 g	105.0	0.765	12.70 g	4.377 g	2.556 g
0.05	0.17	0.078 g	5.690 g	111.7	0.873	18.68 g	6.690 g	3.234 g
0.10	0.25	0.078 g	7.853 g	121.0	1.000	26.18 g	9.702 g	4.553 g

注:垂向力单位为kN;短波不平顺全峰值单位为mm。

表1为1 m以下的短波不平顺大小对车辆和轨道动力学指标的影响。从表1可以看出,1 m以下的短波不平顺对车体垂向振动几乎无任何影响。但是对轴箱和轨下基础的垂向振动影响特别大,尤其是产生了很大的轮载波动,即轮轨垂向动作用力很大,从表1可见,当粗糙度系数 k 取0.1时,此时,轮重减载率为1.0,表明轮轨已经发生瞬时脱离,当粗糙度系数 k 继续增大时,显然轮轨瞬时脱离的机率将增多,而引起巨大的轮轨冲击,所以该粗糙度下的短波不平顺已不能满足高速铁路走行安全性的要求。

不难看出,用轮载波动来衡量短波不平顺的影响是比较合理的,而轮重减载率正反映了轮载的波动,所以本文中用轮重减载率来确定1 m以下的短波不平顺安全限值。文献[5]指出,轮重减载率应分为静态和动态两种,其中静态轮重减载率为由曲线超高、货物偏载等引起的较为缓和的轮重减载的变化;而动

态轮重减载率主要由包括轨面短波不平顺以及道岔等原因引起的瞬时轮重减载。动态轮重减载率可以达到很大,国外铁路标准一般限定为0.8或0.9。因此文中借用此标准,取动态轮重减载率的安全限值为0.8,则确定轨面短波不平顺的安全限值为0.13 mm,取动态轮重减载率的安全限值为0.9,则确定轨面短波不平顺的安全限值为0.19 mm。

2.3 1 m 以上的长波不平顺的安全管理

2.3.1 长波轨道不平顺最不利波长的确定

实际存在的1 m 以上的长波轨道不平顺对车辆运行品质、轮轨间的作用力,以及列车运行安全性均有重要的影响,是机车车辆和轨道部件使用寿命的控制因素,另一方面,轨道平顺性的保持又必须投入一定的养护维修费和占用经营时间,因此在制订轨道不平顺管理标准时要综合考虑行车安全,平稳舒适性和运营的经济性。保证安全是列车运行的基本条件,通常以车辆的脱轨系数、轮重减载率、横向水平力等指标作为安全性评定依据,而车辆运行的平稳性在时域一般时用车体最大振动加速度来加以评定。

由于实际中的轨道不平顺是随里程变化的随机过程,它包含有从几米到几百米的波长成份。其中,1 m 以下的轨面垂向短波不平顺在前面已经进行了研究和讨论,而1 m 以上众多波长成份的轨道不平顺不可能也没必要对每一种波长都进行管理,因为众多波长成份中,有些波长对车辆运行品质影响很大,而有的影响不大,所以只需对车体振动影响最大的不平顺波长进行管理即可。于是就产生了轨道不平顺管理中的10 m 弦法、20 m 弦法和40 m 弦法等。文献[6]对10 m 弦法、20 m 弦法和40 m 弦法进行了综合对比,提出了40 m 弦法是高速轨道不平顺管理的最佳方法。究竟用多长的波长来管理,还需对所研究的客车车辆及其运行速度来确定。文献[2]对本文所选用的高速车辆在德国高速低干扰轨道谱的作用下进行了动力学仿真计算,计算结果表明:引起车体剧烈振动的轨道不平顺波长为37.8 m(接近40 m)。所以文中依此确定40 m 波长为最不利波长进行管理。

2.3.2 用40 m 弦法仿真250 km/h 速度域的轨道不平顺目标值

在众多研究轨道不平顺管理的文献中,尽管它们采用的计算模型各不相同,计算方法也稍有差异,但它们的思路和方法都是首先找出最不利于车辆安全性和平稳性的波长,然后将该波长的不平顺理想化成一个正弦或余弦函数,最后,通过求取系统的响应来计算出控制参数达到极限值时最不利波长的幅值,从而提出相应不平顺的极限值以作为不平顺管理的标准。

事实上,由于实际存在于线路上的不平顺是多种波长成份的共存,不是单一波长的不平顺,它包含了多种波长成份,是随里程变化的随机过程。所以尽管在包含有多种波长成份的轨道不平顺中存在一种波长对车辆运行的平稳性和安全性影响最大,但其它波长同样也对车辆的振动响应具有不同程度的影响,所以在求解车辆系统响应时不可能割裂开其它波长不平顺的影响。由此看来,为了更科学地对轨道不平顺进行管理,在计算车辆响应时,不仅要考虑最不利波长的影响,而且还需考虑其它波长的影响,这样计算结果才更切合实际。前面已经确定了轨道不平顺的最不利波长为40 m。文中将对40 m 波长进行250 km/h 速度域的仿真计算,从而进行高速铁路轨道不平顺安全标准研究。下面首先介绍如何实现在众多波长成份中控制40 m 波长的幅值。

设 $\lambda_0 = 40$ m 波长不平顺的全峰值为 $2A$,车速运行速度为 v ,则 λ_0 所对应的时间频率 $f = v/\lambda_0$ 。在实现轨道不平顺的时频转换^[7]中,其主要方法就是将轨道不平顺功率谱在频域采样,转化为频谱,然后再通过傅立叶逆变换(IFFT),最后得到平稳的各态历经的时域样本。轨道不平顺时间序列的频谱为

$$|X(K)| = \text{DFT}[x(n)] = \sqrt{N_r^2 S_K(K)} = N_r \sqrt{S_K(K)} = N_r \sqrt{S_x(f)} f \quad (3)$$

式中: $X(K)$ 为轨道不平顺时间序列的频谱; N_r 为功率谱的频域采样点数; $S_x(f)$ 为轨道功率谱密度; f 为频域采样间隔; $x(n)$ 为轨道不平顺的时域样本。

设波长为 $\lambda_0 = 40$ m 的轨道不平顺为随机(初)相位的正弦函数,则

$$x(t) = A \sin(2\pi \frac{v}{\lambda_0} t + \phi) \quad (4)$$

其中: A 为波长为 $\lambda_0 = 40$ m 的不平顺的半峰值; ϕ 为在 $[0, 2\pi]$ 上均匀分布的随机变量。容易看到, $x(t)$ 是一个零均值二阶平稳过程。事实上

$$\mu_x = \frac{A^2}{2} \int_0^{2\pi} \sin(2 \frac{v}{v_0} t + \phi) d\phi = 0 \quad (5)$$

$$R_{xx}(\tau) = \frac{A^2}{2} \int_0^{2\pi} \sin(2 \frac{v}{v_0} t + \phi) \sin(2 \frac{v}{v_0} t + 2 \frac{v}{v_0} \tau + \phi) d\phi = \frac{A^2}{2} \cos(2 \frac{v}{v_0} \tau) \quad (6)$$

引用 Dirac 函数, 则 $x(t)$ 的功率谱密度函数为

$$S_x\left(\frac{2v}{v_0}\right) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{A^2}{2} \cos\left(2 \frac{v}{v_0}\right) \cos\left(2 \frac{v}{v_0}\right) + \frac{A^2}{4} \left[\cos\left(2 \frac{v}{v_0} - 2 \frac{v}{v_0}\right) + \cos\left(2 \frac{v}{v_0} + 2 \frac{v}{v_0}\right) \right] \right\} d = \frac{A^2}{4} \left\{ \left[2 \frac{v}{v_0} - 2 \frac{v}{v_0} \right] + \left[2 \frac{v}{v_0} + 2 \frac{v}{v_0} \right] \right\} \quad (7)$$

则 $S_x(\omega)$ 是位于 $\pm 2 v/v_0$ 处的两个 Dirac 函数。

由于轨道不平顺功率谱均为单边谱, 所以单边谱为

$$G_x\left(\frac{2v}{v_0}\right) = \frac{A^2}{2} \left[2 \frac{v}{v_0} - 2 \frac{v}{v_0} \right]$$

设 $\omega = 2 v/v_0$; $\omega_0 = 2 v/v_0$ 得

$$G_x(\omega) = \frac{A^2}{2} (\omega - \omega_0) \quad (8)$$

所以, 在对轨道不平顺功率谱密度采样时, 当频率 $\omega = \omega_0 = 2 v/v_0$ 时, 功率谱密度数值为式(8), 在其它频率点的数值仍由式(3)给出, 这样就可以用同样的时频转换方法来获取轨道不平顺样本, 而且可以对最不利波长 $\lambda_0 = 40$ m 的波深进行控制, 从而以期用仿真计算求得 λ_0 的波深全峰值 $2A$ 与车体加速度的关系, 并由此得出 40 m 弦轨道安全管理标准。

仿真计算中将 40 m 波长的轨道不平顺考虑为一随机相位的正弦函数, 其幅值可以进行人为控制, 这样在综合考虑其它波长不平顺并存的情况下, 分别考虑 40 m 弦轨道高低、水平、方向和轨距不平顺以及轨道三角坑全峰值 $2A$ 对车辆动力性能的影响。计算结果表明 40 m 弦轨道高低不平顺主要影响车体垂向加速度, 对轮轨横向力、脱轨系数、轮载和轮重减载率的影响很小; 40 m 水平不平顺对车体横向加速度、轮轨横向力和脱轨系数影响比较大, 过大的水平不平顺将严重威胁车辆运行安全性; 40 m 方向不平顺对车体横向加速度的影响最大, 而对车辆运行安全性也有很大的影响; 40 m 轨距不平顺对车体横向加速度基本无任何影响, 但是对轮轨横向力和脱轨系数的影响却非常显著, 其原因在于轨距不平顺对车辆的影响在横向是对称的, 因此, 车体横向加速度受其影响很弱。但是太大的轨距不平顺会使轮轨接触几何关系产生很大的变化, 当发生轮缘贴靠时其轮轨横向作用力必然增大, 从而导致脱轨系数迅速增加, 严重时可能导致脱轨; 以轴距 2.4 m 为基长的三角坑反映了线路的扭曲, 将使车轮产生严重的增减载。

作为高速铁路轨道安全标准的判别规则, 借鉴和参考国外在这方面的经验^[8], 建议:

(1) 车体垂向加速度

$a_z < 0.25 g$ (半振幅)	安全极限值
$a_z < 0.17 g$ (半振幅)	安全性管理标准
$a_z < 0.125 g$ (半振幅)	舒适性管理目标值

(2) 车体横向加速度

$a_y < 0.20 g$ (半振幅)	安全极限值
$a_y < 0.15 g$ (半振幅)	安全性管理标准
$a_y < 0.10 g$ (半振幅)	舒适性管理目标值

(3) 脱轨系数

$$\frac{Q}{P} < 1.0$$

(4) 轮重减载率

$$P < 0.8$$

通过仿真计算和分析,可以获得高速铁路各项轨道不平顺的管理目标值,如表 2 所示。与文献[8]对比,可以看出,文中的计算结果与国外高速铁路轨道不平顺管理经验目标值基本一致。这充分说明了由于文中在计算时考虑了多种波长并存,所以较仅考虑最不利波长不平顺的理想计算模型更为重要切合实际。仿真分析结果的正确性充分说明了文中计算结果的可靠性和研究方法的可行性。

表 2 高速铁路轨道不平顺管理目标值

管理类别	1 m 轨面垂向短波 不平顺/mm	40 m 弦长波不平顺/mm				三角坑/ (mm/2.4 m)
		高低	水平	轨向	轨距	
舒适度	—	10	5	4	—	—
安全性	0.13	16	8	6	16	5

3 结 语

运用车辆-轨道耦合系统垂横模型,在充分考虑最不利波长和其它波长并存的情况下,研究了高速铁路轨道高低、水平、方向和轨距不平顺,以及轨面垂向短波不平顺和轨道扭曲(三角坑)对车辆运行的平稳舒适性和安全性的影响,并且得到了与国外高速铁路轨道不平顺管理经验目标值基本一致的结论,这有力地说明文中研究方法的正确可靠性。需要指出的是,由于我国高速铁路正在筹建之中,而文中的计算对象是我国 250 km/h 高速客车和德国低干扰轨道谱,故本文中计算结果将不可避免缺乏普遍性,因此仅能作为参考,同时 40 m 弦的管理方案根据不同的车辆类型和轨道条件也有待于进一步验证确定。所以,完全可靠的我国高速铁路轨道不平顺管理目标值尚需我国高速铁路建成后方能最终确定。

参考文献:

- [1] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 北京:中国铁道出版社,1997:10-50.
- [2] 陈果. 车辆-轨道耦合系统随机振动分析[D]. 博士学位论文. 成都:西南交通大学,2000:47-133.
- [3] 铁道部科学技术司,西南交通大学. 德国联邦铁路城间特快列车 ICE 技术任务书[M]. 成都:西南交通大学出版社,1993:301-309.
- [4] 王澜. 轨道结构随机振动理论及其在轨道结构减振中的应用[D]. 博士学位论文. 铁道部科学研究院,1988:57-87.
- [5] 宫本昌幸. 车辆的脱轨机理. 国外高速列车译文集高速与车辆专集(5)[A]. 铁道部科学研究院机辆所. 国外高速列车译文集[C],1997:301-323.
- [6] Hideyuki Takai. Maintenance of track with long-wave track irregularity on shinkansen[J]. QR of RTRI. 1990; 31: 128-131.
- [7] 陈果,翟婉明. 铁路轨道不平顺随机过程的数值模拟[J]. 西南交通大学学报,1999;34(2):138-142.
- [8] 王其昌,翟婉明,蔡成标. 高速铁路轨道不平顺的安全管理[A]. 中国铁道学会. 高速铁路安全技术研讨会论文集[C]. 北京:中国铁道出版社,1995:71-77.