

文章编号:1005-0523(2014)04-0033-05

重载铁路复合不平顺的仿真计算及安全限值研究

陈睿颖¹,许玉德¹,程建平²

(1.同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 200092; 2.朔黄铁路发展有限责任公司,河北 沧州 062350)

摘要:铁路轨道几何形位不平顺是车辆振动及轮轨动力作用增大的重要激振源,而其中水平和轨向反向复合不平顺对轨道动力响应和行车安全有着极不利影响。针对重载铁路C80型铝合金敞车,用Simpack多体动力学仿真软件,建立车辆-轨道耦合模型,取水平、轨向最不利波长条件下,对复合不平顺各种幅值组合的工况进行仿真,分析各动力响应指标与列车速度、不平顺幅值的关系,并提出其安全限值,供工务管理参考。

关键词:重载铁路,复合不平顺,水平不平顺,轨向不平顺,动力响应,轮重减载率

中图分类号:U260

文献标志码:A

我国正在大力发展30 t大轴重重载铁路,而铁路轨道几何形位不平顺是车辆振动及轮轨动力作用增大的重要激振源,对行车安全有着重大影响。1963年,日本某铁路线鹤见车站发生货车脱轨事故,“鹤见事故”原因认定为“复合脱轨”,引起了最早对轨道复合不平顺的重视。日本学者认为,水平不平顺与连续的轨向不平顺逆相位组合对车辆的运行安全有不良影响^[1],我国学者也通过仿真研究得出复合不平顺是线路维修养护需要重点控制的结论^[2-3]。

本文对重载铁路C80型铝合金敞车建立车辆-轨道多体动力仿真模型,取水平、轨向最不利波长条件下,对复合不平顺各种幅值组合的工况进行仿真,分析各动力响应指标与列车速度、不平顺幅值的关系,并提出其安全限值。迄今为止,我国重载铁路尚未对轨道复合不平顺的大小规定过其安全标准,这为现场控制各种轨道复合不平顺和制定重载轨道养护维修和不平顺管理标准提供理论依据,是十分重要和必要的。

1 货车对复合不平顺动力响应的仿真计算

1.1 车辆-轨道模型建立

依据文献[4]的理论基础,用Simpack多体动力学仿真软件,建立车辆-轨道耦合模型,C80型铝合金敞车具体参数见文献[5],满车匹配 $75\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$ 轨,空车匹配 $60\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$ 轨。考虑列车速度为 $80\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, $100\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $120\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 3种情况。

1.2 复合不平顺仿真计算方案

按线路日常检查符号规定,水平(z)为负,轨向(y)为正。在文献[4,5]最不利波长分析结论的基础上,结合重载铁路用10 m弦来管理几何不平顺的经验,以及用波长=速度/频率公式估算的结果(速度约为 $100\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,频率约为1~2 Hz),取轨向不平顺最不利波长为10 m,水平不平顺最不利波长为10 m,即在左右轨设置波长 $L_y=10\text{ m}$ 的轨向不平顺的同时,对同一地段的右轨设置波长 $L_z=10\text{ m}$ 的向下的垂向不平顺,

收稿日期:2014-05-13

基金项目:国家科技支撑计划项目(2013BAG20B00)

作者简介:陈睿颖(1991—),女,硕士研究生,主要研究方向为城市轨道交通与铁道工程;许玉德(1964—),男,教授,博导,研究方向为铁道工程、工务管理。

复合不平顺形成一条空间单波余弦线形。本文取轨向和水平复合不平顺的幅值分别为0,2,4,6,8,12,16,18,20,22,24 mm组成多种工况。

1.3 评价指标

用于评价车辆运行的安全性和平稳性的指标有：脱轨系数、轮重减载率和车体垂向和横向振动加速度。

1) 脱轨系数采用我国铁道行业标准《铁道机车动力学性能试验鉴定方法及评价标准》(TB/T 2360-93)^[6]中评定等级为“良”对应的限值,即脱轨系数 $Q/P \leq 0.8$ 。

2) 轮重减载率采用国家标准《铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范》(GB5599-85)^[7]中第一限度安全标准,即轮重减载率 $\Delta P/\bar{P} \leq 0.65$ 。

3) 车体振动加速度采用GB 5599-85中的规定,即车体垂向振动加速度限值为 $0.7 g (=6.87 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2})$,横向振动加速度限值为 $0.5 g (=4.91 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2})$ ^[7]。

2 仿真计算结果分析

2.1 速度的影响

取轨向不平顺幅值 $y=14 \text{ mm}$,水平不平顺幅值 $z=-16 \text{ mm}$ 这一复合不平顺组合为例,对比C80空车80,100和 $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 3种工况。速度对各动力响应评价指标影响如图2所示。

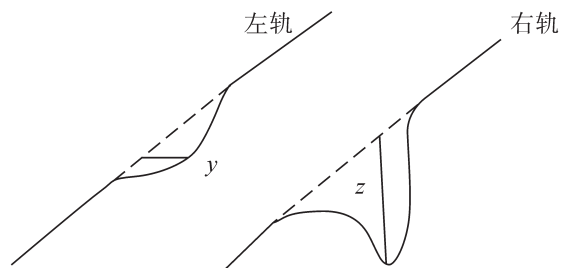


图1 轨向与水平反向复合不平顺示意图

Fig. 1 Horizontal and alignment complex irregularities

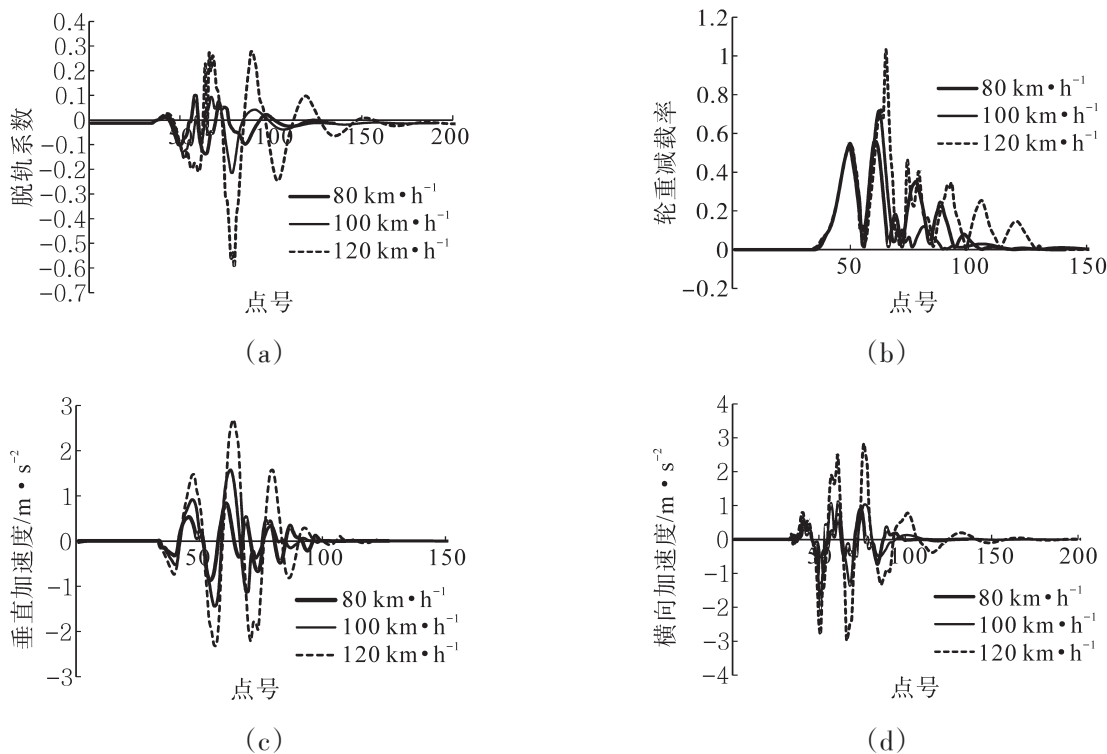


图2 速度对各项动力指标的影响

Fig. 2 Influences of speed on certain dynamic responses

从图中可以看出,在复合不平顺波长和幅值确定的情况下,空载列车的动力响应随着速度的增加而增大,速度较大时还可能造成动力响应突增的情况,在各项评价指标中,轮重减载率首先超限。

2.2 幅值的影响

考虑速度为 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 情况下 C80 空车的各项动力响应指标,计算结果如图 3 所示。

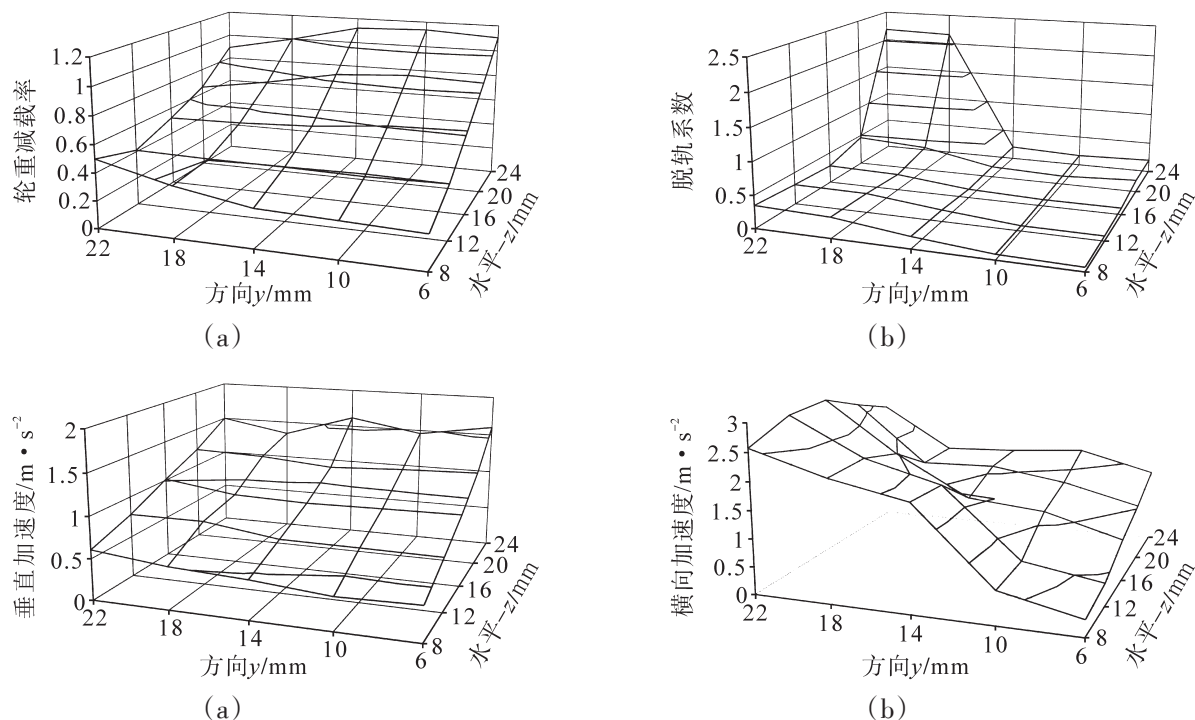


图3 不同幅值复合不平顺组合对各项动力指标的影响

Fig. 3 Influences of different amplitudes of complex irregularities on certain dynamic responses

从图3中可以看到,随着轨向不平顺幅值 y 和水平不平顺幅值 z 的增大,车辆运行的动力响应各项指标都将不同程度的增大,特别是轮重减载率变化显著,超限区域较其他指标明显大,因此将其作为决定性的控制指标。这与文献[4][5]的分析结论一致。

3 安全限值确定

在最不利条件下,即列车速度为 $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 工况时,将仿真计算得到的轨向不平顺幅值和水平不平顺幅值的散点分别进行拟合修正,再按照轮重减载率0.65进行插值,得到表1。

表1 轮重减载率为0.65时轨向-水平复合不平顺峰值对应关系

Tab. 1 The corresponding relationship of complex irregularity peak value when the rate of wheel load reduction is 0.65

X轴($-z/\text{mm}$)	0.0	4.0	8.0	12.0	14.5	15.3	15.0	14.8	16.8	18.1	18.4
Y轴(y/mm)	24.8	23.5	23.4	20.5	22.0	18.0	14.0	10.0	6.0	2.0	0.0

由轨向修正数据插值得到的 X, Y 坐标如图4中“◆”表示的散点,由水平修正数据插值得到的 X, Y 坐标如图4中“×”表示的散点。分别进行拟合,得到拟合曲线A,其方程为 $y = -0.0241x^2 - 0.0407x + 24.617$ 。拟合曲线B,其方程为 $y = -4.5523x + 83.693$ 。AB两段曲线组成安全限值曲线,即为一条分段曲线,其下方为安全区域。而 $x = -z$,复合不平顺安全限值:

$$\begin{cases} y = -0.0241x^2 + 0.0407z + 24.617, 0 \leq -z \leq 14.16 \\ y = 4.5523z + 83.693, 14.16 < -z \leq 18.38 \end{cases}$$

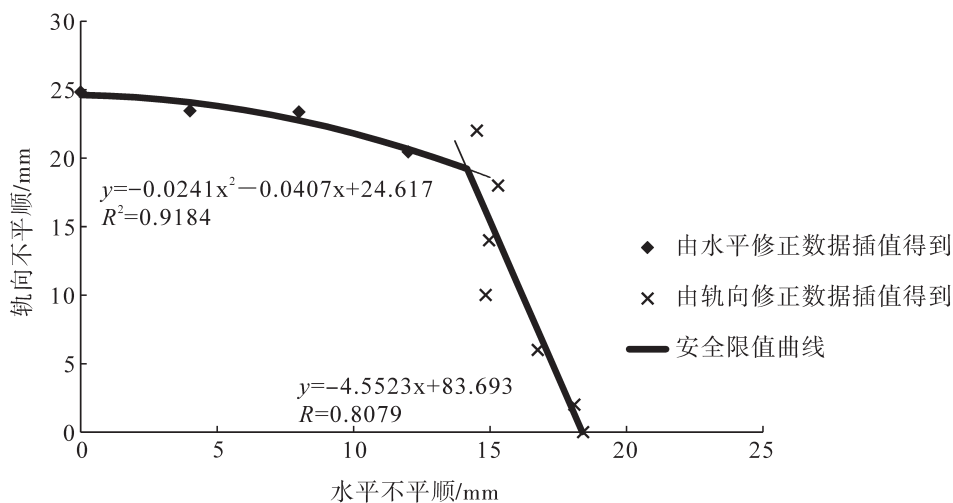


图4 轨道复合不平顺安全控制区域

Fig. 4 Safety criterion of track complex irregularities

4 结论

本文仿真计算了在轨道线形的同一位置同时出现垂向和横向不平顺时,即水平和轨向不平顺的反向复合情形时的轨道动力响应,取不同轨向和水平复合不平顺的幅值组成多种工况,考虑空车速度为80, 100和120 km·h⁻¹3种情况,结论如下。

1) 在复合不平顺波长和幅值确定的情况下,空载列车动力响应随着速度的增加而增大,速度较大时还可能造成动力响应突增的情况。

2) 随着轨向不平顺幅值 y 和水平不平顺幅值 $-z$ 的增大,车辆的动力响应各项指标都将不同程度的增大,特别是轮重减载率变化显著,因此将其作为决定性的控制指标。

3) 水平和轨向复合不平顺,按照轮重减载率为0.65确定安全控制区域如下:

当 $V=120$ km·h⁻¹时,安全限值区域:

$$\begin{cases} y = -0.0241x^2 + 0.0407z + 24.617, 0 \leq -z \leq 14.16 \\ y = 4.5523z + 83.693, 14.16 < -z \leq 18.38 \end{cases} \text{ (mm)}$$

可为现场控制各种轨道复合不平顺和制定重载轨道养护维修和不平顺管理标准提供理论依据。

参考文献:

- [1] 佐藤吉彦,等.新轨道力学[M].北京:中国铁道出版社,2001:20-39.
- [2] 芦睿泉,练松良.轨道复合不平顺对提速列车运行影响的研究[J].铁道科学与工程学报,2005,2(5):17-22.
- [3] 汪勤,吴纪才.轨道复合不平顺权重系数的求解方法[J].铁道标准设计,2005(3):69-71.
- [4] 翟婉明.车辆-轨道耦合动力学[M].北京:科学出版社,2007:312-314.
- [5] 许玉德,等.30t轴重重载铁路轨道几何不平顺管理限值研究报告[R].上海:同济大学,2014.
- [6] 中华人民共和国铁道部. TB/T 2360-1993 铁道机车动力学性能试验鉴定方法及评定标准[S].北京:中国铁道出版社,1994.
- [7] 中华人民共和国铁道部. GB/T 5599-1985 铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范[S].北京:中国标准出版社,1985.
- [8] 许玉德,李海锋,戴月辉.轨道交通工务管理[M].上海:同济大学出版社,2007:24-25.

- [9] 缪炳荣, 罗仁. SIMPACK 动力学分析高级教程[M]. 成都:西南交通大学出版社, 2010.
- [10] 铁路线路修理规则(铁运(2006)146号)[S]. 北京:中国铁道出版社, 2006.
- [11] 罗林, 罗文灿, 朱开明, 等. 干线轨道不平顺紧急补修标准的研究[J]. 中国铁道科学, 1990(2):1-24.
- [12] 蔡成标, 翟婉明. 轨道几何不平顺安全限值的研究[J]. 铁道学报, 1995, 17(4): 82-87.
- [13] 钱立新. 世界重载铁路运输技术的最新进展[J]. 机车电传动, 2010(1):3-7.
- [14] FRANK R, 邹士杰. 美国铁路重载运输[J]. 国外铁道车辆, 2006, 43(5):1-5, 26.
- [15] 雷晓燕. 轨道动力学模型与数值方法研究进展[J]. 华东交通大学学报, 2011(6):1-12.

Simulation and Safety Criterion on Complex Geometry Irregularities of Heavy Haul Railway

Chen Ruiying¹, Xu Yude¹, Cheng Jianping²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. Shuohuang Railway Development Co., Ltd., Cangzhou 062350, China)

Abstract: Track geometry irregularity is an important excitation source for the train running smoothness and dynamic response between wheel and rail. The paper establishes the dynamic model with Simpack multi-body dynamics emulation software to simulate C80-type trains running on the track. Calculations of the vibration responses for the vehicle body are made with unfavorable combination of different wavelengths of horizontal and alignment irregularities. It compares and analyzes the dynamic responses aroused by speed of the train and amplitude of the complex irregularities. Then it provides theoretical safety criterion for guidance of controlling irregularities in the railway maintenance and relevant managerial work.

Key words: heavy haul railway; complex irregularities; horizontal irregularities; alignment irregularities; dynamic response; rate of wheel load reduction