

文章编号:1005—0523(2006)05—0058—05

快速线路轨道刚度合理值的研究

段桂平,练松良,刘 扬

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室,上海 200092)

摘要:轨道动态几何形位直接对行车安全、轮轨作用力、车辆振动产生影响.轨道动态几何形位的变化与众多因素相关.轨道刚度变化同时影响着轮轨动荷载和轨道动态几何形位的变化.将沪宁线轨检车实测动态不平顺输入动力仿真软件,分别计算不同垂向和横向刚度时的轮轨动荷载和钢轨的垂向、横向动位移,并改变车辆速度和输入不平顺的大小,分析轨道不平顺、轮轨动荷载和钢轨动位移之间的关系.利用正态分布的原则统计不同状态下动轮载和动位移的最大值,分析对比钢轨动态变形和轮轨动荷载随刚度和速度的变化趋势,提出了合理的轨道刚度取值范围,并分析了初始不平顺大小对轨道动态位移的影响.

关键词:铁路轨道;轨道刚度;动态几何形位;轮轨动荷载

中图分类号:TU375,U21

文献标识码:A

0 引言

轨道动态几何形位是由静态几何形位与列车在轨道上运行时轨道各组成部分受力变形叠加而成^[1],影响其变化的因素有轨道结构类型、车辆类型、运行工况、行驶速度等.在竖直方向上,轨道变形由路基、道床、轨枕、轨下垫层和钢轨的变形共同组成;横向则主要由轨枕、橡胶垫和钢轨变形叠加形成.从理论上讲结构的变形随着它所受到力的增大而增大,随刚度的增大而减小.但从轮轨动力作用的分析可知,刚度的增大会导致轮轨动力作用增大,力的增大又导致轨道动态变形的增大.所以,轨道刚度必须有一个合理的范围,以保证轮轨力和轨道动态变形都在合理范围内.以往对轨道刚度的研究主要是从轮轨之间的动力作用和钢轨、轨枕振动考虑,而本文则主要研究轨道结构刚度、车辆行驶速度以及轨道初始不平顺输入与轮轨动荷载和轨道动态几何形位变形之间的关系,并给出轨道刚度的合理范围.

1 车辆—轨道动力学模型和钢轨位移计算方法

由于所用的动力仿真软件对轨道考虑较少,不能分析钢轨动态位移,所以在计算时采用动力学仿真软件与解析计算方法相结合的方法.利用动力学仿真软件建立车辆—轨道模型,将计算所得的垂向和横向轮轨力输出,然后根据弹性地基梁理论编制程序计算动态轮轨力作用下钢轨的位移.

首先利用动力仿真软件建立车辆实体模型和轨道模型,其中轨道模型采用双层弹簧轨道结构模型,垂向刚度由橡胶垫板的刚度 D_1 与道床路基刚度 D_2 组成.轨道横向弹性考虑两部分,横向一部分为轨下垫层剪切刚度和扣件的横向刚度 k_1 ,另一部分为道床和路基的横向刚度 k_2 ^[4].进行动力仿真计算,计算不同刚度下轨道的动态轮轨力,将其输出.由于当车辆在轨道上行驶时,实际上机车车辆的垂直轮载不是作用在钢轨中心线上,横向力也不是作用在钢轨截面的剪力中心上,则钢轨上作用有扭矩.钢轨的垂向、横向位移和转角相互之间无影响,可以线性叠加,所以三种情况可以分开考虑^[5],如

收稿日期:2006—03—26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50478111);同济大学道路与交通工程教育部重点实验室资助项目.

作者简介:段桂平(1982—),女,山东聊城人,同济大学城市轨道交通与铁道工程系硕士研究生.

图 1. 本文在计算时为简便忽略扭转产生的影响. 然后根据弹性地基梁理论编制程序, 利用输出的轮轨力计算轨道的横向和垂向位移详细, 计算方法见参考文献[2]、[3]、[6].

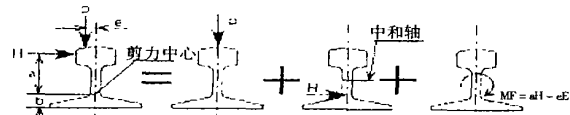


图 1 钢轨受力的组成

2 计算方案和分析方法

2.1 仿真计算方案

车辆模型为客车车辆, 轴重为 17.5t, 60 kg/m 钢轨, 轨枕间距 570 mm, 直线轨道, 长度为 500 m. 轨道不平顺激励选取沪宁线轨检车实测数据, 包括左右轨的高低和方向不平顺. 道床路基垂向弹性系数 D_2 取为常数, 依次改变橡胶垫板的弹性系数 D_1 , 使钢轨支点弹性系数 D 依次取为 10~150 kN/mm. 横向, 扣件刚度 k_1 取为常数, 道床路基横向弹性系数 k_2 为 10~150 kN/mm 依次改变. 列车速度 140, 160, 180 km/h. 为分析轨道不平顺大小对轮轨作用力和动态几何形位的影响, 在计算中将轨检车测得的轨道不平顺值分别乘以系数 0.75、1.25 和 1.5, 并与原始不平顺条件下的计算结果比较.

2.2 计算方法和结果分析方法

输入的不平顺为随机不平顺, 仿真计算所得的轮轨动荷载和计算所得的钢轨动位移都具有随机性, 所以本文采用正态分布的 3σ 原则对结果进行统计, 即将 $\bar{X} + 3\sigma$ 作为统计对象的理论最大值, 分析轨道刚度和不平顺对轮轨动荷载和钢轨动位移的影响.

3 结果分析

3.1 垂向

1) 空间波形分析

图 2 是速度为 180 km/h、钢轨支点刚度为 100 kN/mm 时, 轨道初始高低不平顺、轮轨动荷载和钢轨位移的空间域函数. 输入的轨道高低随机不平顺幅值在 -4 mm 到 4 mm 范围内变化. 计算所得的轮轨动荷载也是一随机函数, 动轮载作用下的钢轨动态位移在初始输入的轨道随机不平顺上下波动. 可知初始输入轨道随机不平顺、动轮载和钢轨动态位

三者之间的变化关系密切, 初始输入不平顺变化剧烈的地方, 相应的轮轨荷载也较大、变化较为剧烈, 随之引起的钢轨动态位移也较大. 图 3 是在图 2 的计算条件下分别把刚度改为 60 kN/mm 和将轨检车实测不平顺乘以系数 1.25 时钢轨动态位移曲线, 对比图 2 可以知, 刚度小, 钢轨动位移增大; 输入轨道不平顺大, 钢轨动位移也增大.

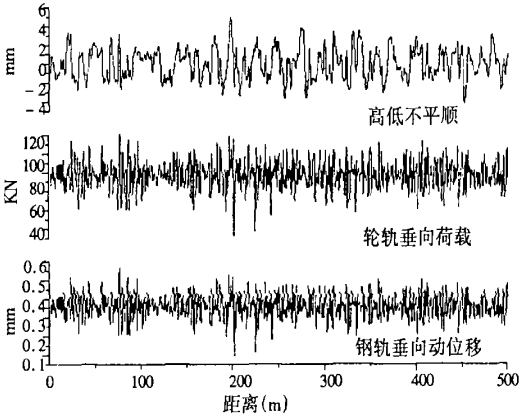


图 2 高低不平顺、垂向动轮载和钢轨动位移空间曲线

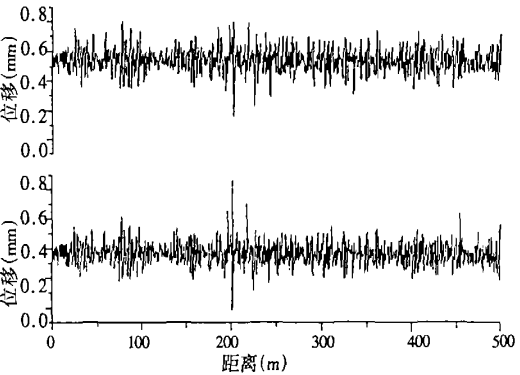


图 3 钢轨垂向动位移曲线

(2) 动轮载、动位移随刚度变化的最大值分析

图 4 为三种速度状态下轮轨动荷载和钢轨动位移的最大值随刚度变化的曲线, 其变化率如图 5 所示. 图 6 为速度 180 km/h, 刚度 100 kN/mm 状态下轮轨荷载和钢轨位移随不平顺系数的变化趋势图. 从图可以得出如下规律:

1) 从总体趋势来看, 轨道刚度增大, 轮轨动荷载增大, 钢轨动位移减小, 但两者的变化梯度并不一致, 在不同的刚度范围, 两者的动力响应也不同. 钢轨支点刚度小于 20 kN/mm 时, 轮轨附加动荷载较小, 但变化率较大; 此时的钢轨位移较大, 变化率也较大. 刚度大于 80 kN/mm 时, 三种速度状态下轮载和钢轨位移的变化率都已趋近于零, 说明此时刚度变化对钢轨位移的影响已经较小, 此时钢轨位移最小, 但轮轨力却是最大.

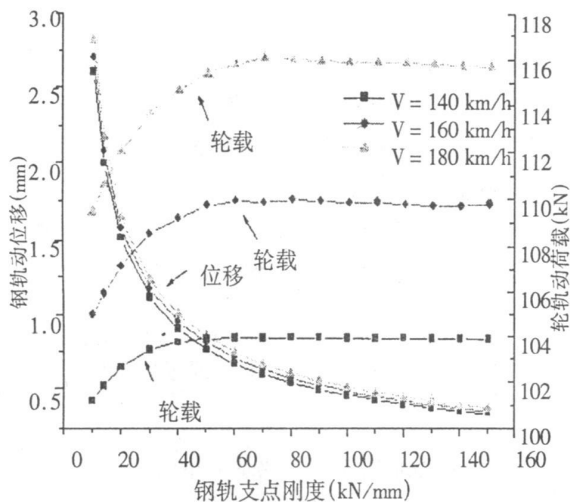


图4 垂向轮轨荷载和钢轨位移随刚度的变化

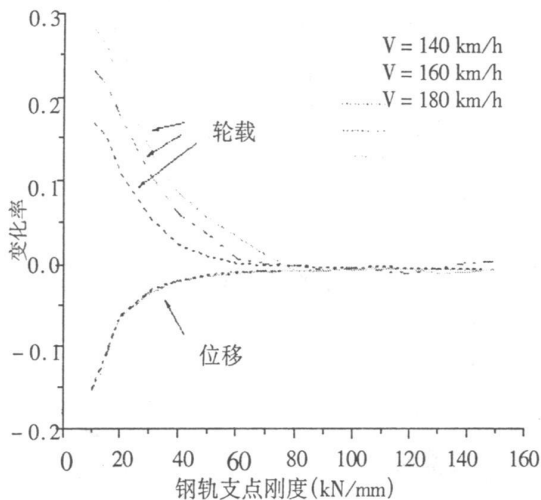


图5 垂向轮轨荷载和钢轨位移的变化率

2) 其它条件相同,速度越大,动轮载越大,轮载的变化率也较大。速度为 180 km/h,刚度在 60 kN/mm 左右变化率趋于零,而速度为 160 km/h 和 140 km/h 时刚度变化率在 80 kN/mm 左右趋于零,说明高速条件下对轨道刚度的要求应与低速时并不完全相同。相同刚度条件下速度对位移的影响较小,在大于刚度 50 kN/mm 时,速度对位移的影响才较为明显,速度越大引起的钢轨位移也稍大。三种速度状态下钢轨位移的变化率曲线基本重合,说明位移随刚度的变化规律是一致的,所以,速度对于轮轨动荷载的影响较为明显,对位移的影响稍小。

3) 轮轨动荷载和钢轨动位移随轨道不平顺幅值的增大呈线性变化。当不平顺系数从 1 增大到 1.25 时,轮轨荷载和垂向位移分别增加了 9.2% 和 9.3%。所以,对轨道静态几何形位也需严格控制,以降低其对轮轨系统的激扰。

对于轨道结构来讲,理想状态是附加动轮载和

钢轨的动位移都不太大,而轨道刚度对于这两项的影响是相反的,所以刚度必须控制在合理范围内。结合上面的分析,认为钢轨支点弹性系数的范围应控制在 5 080 kN/mm 之间,对于不同速度要求,还应再做出具体的控制范围。

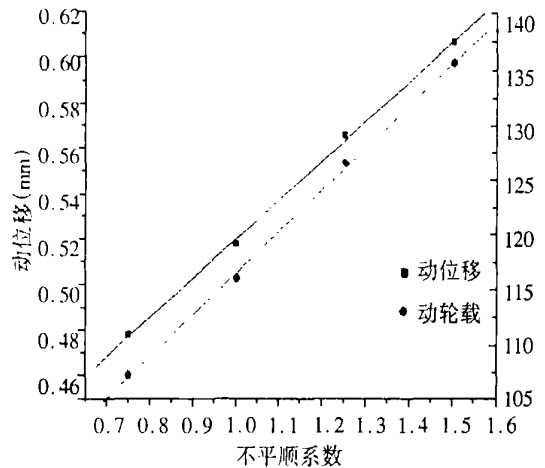


图6 垂向动轮载和动位移随不平顺系数的变化

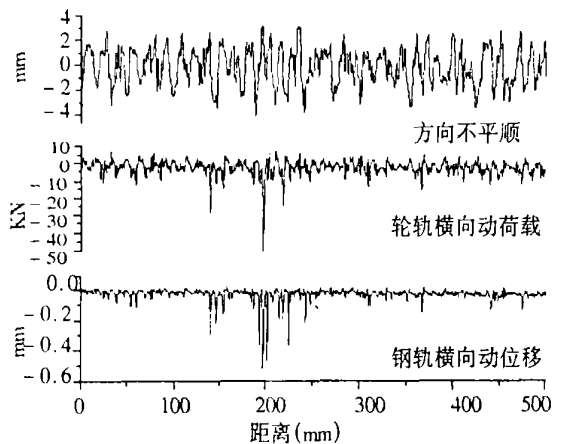


图7 方向不平顺、横向动轮载和钢轨横向动位移空间曲线

3.2 横向

(1) 空间波形分析

图7是速度为 180 km/h、道床路基横向刚度为 80 kN/mm 状态下,轨向动态不平顺、轮轨横向动荷载和钢轨横向动位移的空间域函数。轨向不平顺在 -3 mm 到 3 mm 之间波动,轮轨动荷载在零值上下波动,钢轨动态横移也在零值上下波动。可以看出在距离 200 m 处,轮轨横向荷载和钢轨横移出现峰值,此时对应的初始不平顺的波长较短波幅较大,很明显,三者之间直接相关。在轮轨荷载的峰值处轮轨力的方向主要朝向钢轨外侧,相应的钢轨横移也是朝向外侧,也即轮轨横向荷载主要会引起轨距扩大。

图8中第一条曲线是速度为 180 km/h、道床路

基刚度为 40 kN/mm 时钢轨横移曲线,第二条是刚度为 80 kN/mm,不平顺系数为 1.25 时钢轨横移曲线,将这两条曲线与上图钢轨横移曲线比较,一条是减小刚度,一条增大不平顺值.可以看出,刚度减小时,钢轨横移增大,增大不平顺也使得钢轨横移增大.

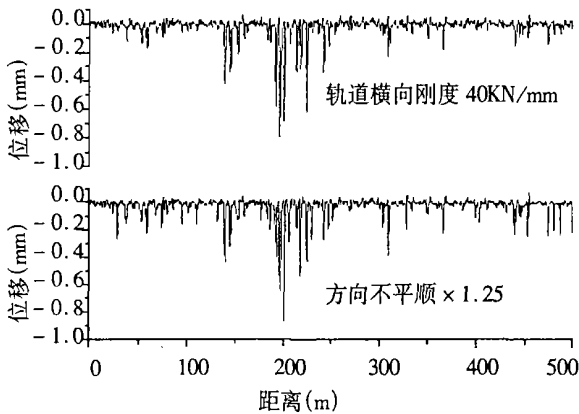


图 8 钢轨横向动位移曲线

(2) 横向轮载和位移最大值随刚度变化分析
图 9 为三种速度状态横向动轮载和钢轨动位移随刚度变化的曲线.图 10 为相应轮轨荷载和钢轨横移的变化率曲线.图 11 为速度 180 km/h,刚度为 80 kN/mm 时,横向动轮载和动位移随不平顺系数的变化趋势.根据计算结果,可得出以下规律:

1) 轨道横向刚度增大,横向动轮载随之增大,钢轨横向动位移减小.轨道横向刚度小于 30 kN/mm 时,横向动轮载较小,变化率大于 0.01,此时动位移较大,位移变化率的绝对值也大于 0.01.当刚度大于 100 kN/mm 时,轮载和位移的变化都趋于平稳,此时虽然钢轨横向动位移较小,但是轮轨横向力却较大.

2) 其它条件相同,速度越大,引起的动态轮轨荷载越大,钢轨横移也较大.与垂向不同,横向时,速度大时轮轨荷载和钢轨横移的变化率反而小.说明速度大时虽然轮轨荷载和钢轨位移较速度低时大,但是它们的随刚度的变化较速度低时慢.速度对于轮轨横向荷载的影响大于由刚度引起轮轨荷载的变化.

3) 初始不平顺对横向轮轨荷载和位移的影响也较大,与垂向相同也还是大致呈线性变化.当输入不平顺值为测量值的 1.25 倍时,钢轨横向动位移和横向动轮载分别增加了 62%和 52%,所以要减小行车过程中钢轨横向动位移,减小轨距的扩大,降低轨道的方向不平顺极为重要.

为使轮轨横向动轮载和钢轨横向动位移都在

合理范围内,认为道床路基横向刚度的范围应控制在为 30 kN/mm~50 kN/mm 之间.

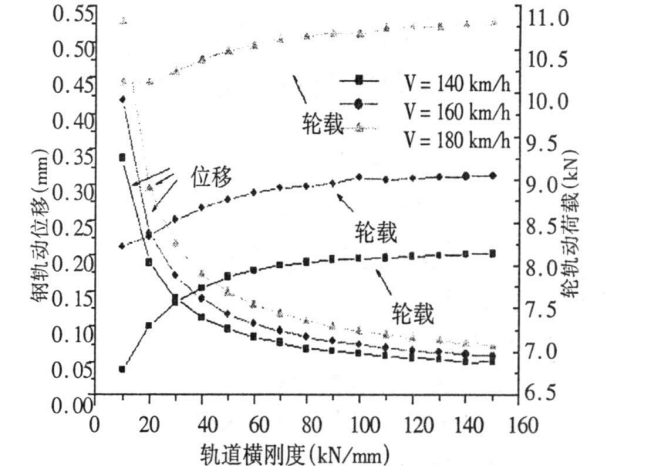


图 9 横向轮轨荷载和钢轨位移随刚度的变化

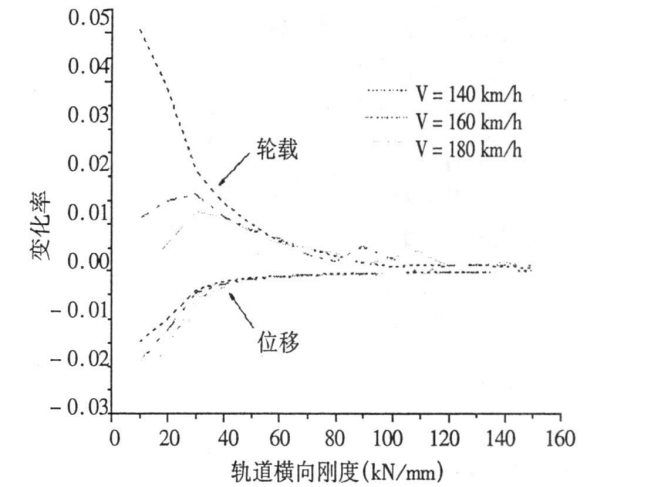


图 10 横向轮轨荷载和钢轨位移值的变化率

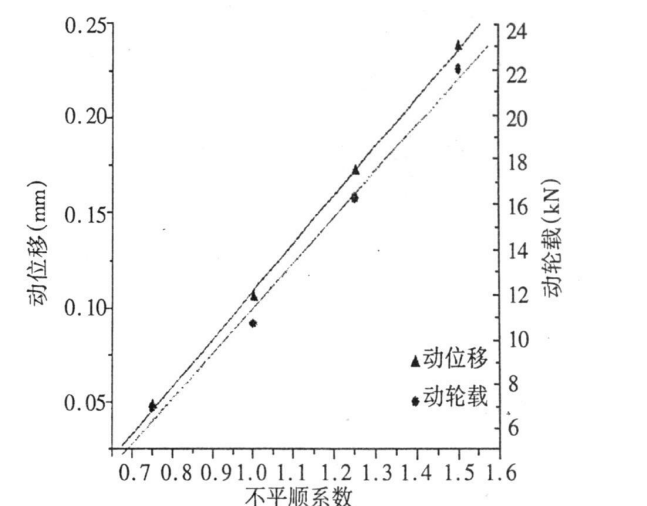


图 11 横向动轮载和钢轨横向动位移随不平顺系数的变化

4 结论

不同线路,对轨道结构的要求也不一样,如城市轨道交通,对轨道结构的减振和降噪的要求较高;对于重载铁路,则轨道强度就是主要问题;对于高速铁路,则轨道的动静态平顺性和弹性就是主要问题,所以合理的轨道结构必须根据线路的运行条件确定.本文主要是考虑在快速列车运行条件下,如何降低轮轨之间的附加动力作用和保证线路的动态平顺性.根据以上分析,可得出以下结论:

1) 轨道刚度变化对轮轨荷载和轨道动态几何形位的变化影响都比较明显,由于轮轨动荷载增大使得轨道动态几何形位变化相应增大,影响行车的平稳性和舒适性,加快轨道结构和车辆损伤的速率,所以也要轨道刚度值也要合理,既要使得动轮载增加较小,同时又要考虑轨道垂横向动位移较小.通过计算分析认为,在列车速度 $140\sim 180\text{ km/h}$ 条件下,钢轨弹性支点系数的合理范围为 $50\sim 80\text{ kN/mm}$,轨道横向刚度的范围为 $30\sim 50\text{ kN/mm}$.

2) 通过改变初始输入轨道不平顺对动轮载和

轨道动位移影响的分析,可以看出初始不平顺输入对于钢轨动态位移的影响也很明显.对于实际线路来讲,线路静态几何形位不平顺和线路的弹性不均匀是轮轨系统初始主要激扰之一,并直接影响轨道动态几何形位的变化.轨道静态几何不平顺标准的制定要涉及轮轨作用力、车辆运行平稳性、养护维修能力、检测手段等诸多方面的因素,所以对于快速线路来说,应尽量提高线路的平顺性.

参考文献:

- [1] 卢祖文.客运专线铁路轨道[M].北京:中国铁道出版社,2005.
- [2] 练松良,刘丽波.荷载作用下轨距扩大的理论分析[J].铁道学报,2000,22(增刊):30—35.
- [3] 王午生.铁道线路工程[M].上海:上海科技出版社,1999.
- [4] 苗彩霞,练松良.轨道结构弹性与钢轨横向位移关系的动力分析[J].华东交通大学学报,2004,21(4):21—25.
- [5] 练松良.轨道动力学[M].上海:同济大学出版社,2003.
- [6] 佐藤吉彦.新轨道力学[M].北京:中国铁道出版社,2001.

Research of the Fast-speed Railway Track Reasonable Stiffness

DUAN Gui-ping, LIAN Song-liang, LIU Yang

(The Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai, 200092)

Abstract: Running safety, wheel-rail interaction forces and vehicle vibration are directly affected by railway track dynamic geometry, which is related with many elements. The changing of track stiffness affects wheel-rail dynamic forces and track dynamic geometry performance simultaneously. Vertical and lateral dynamic wheel-rail forces, vertical and lateral track displacement at different track stiffness are calculated using dynamic vehicle-track simulation software, taking the actual railway track geometry data from the track inspection car on Shanghai-Nanjing railway as excitation. Vehicle velocity and track geometry are changed as well. The relationship among track geometry, wheel-rail dynamic forces and track dynamic displacement are analyzed. The maximum value of dynamic wheel-rail forces and dynamic geometry are calculated using method of normal school. The development trend of track deformation and wheel rail forces caused by changing of track stiffness and track geometry are contrasted and analyzed, and more reasonable range of track stiffness values are put forward.

Key words: railway track; track stiffness; track dynamic geometry; wheel-rail dynamic forces