

高速铁路桥上不同轨枕型式动力特性对比

高亮, 辛涛, 肖宏, 曲村

(北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要: 在对国内外多种轨枕型式调研分析的基础上, 结合我国高速铁路桥上有砟轨道结构特点, 确定了高速铁路轨枕型式的初选方案。建立车辆-轨道-桥梁耦合系统动力分析模型, 对Ⅲ型轨枕、宽轨枕、梯子式轨枕和框架式轨枕4种轨枕型式的动力性能进行了对比分析, 选出了适合桥上应用的轨枕结构方案, 并对选定的轨枕结构型式进行优化, 提出了适合我国高速铁路的桥上有砟轨道轨枕结构的选型建议。研究结果表明: 在所选轨枕型式中, 宽轨枕动力性能相对较优; 综合考虑养护维修对有砟轨道的要求, 建议高速铁路桥上有砟轨道采用Ⅲ型轨枕加宽的方案; 根据动力分析的结果, 在Ⅲ型轨枕基础上加宽2~4 cm即可以起到有效减小道床压应力和降低养护维修工作量等效果。研究结果可为高速铁路桥上轨枕结构的设计提供一定的参考。

关键词: 轨枕型式; 高速铁路; 有砟轨道; 动力分析

中图分类号: U213.3

文献标识码: A

Comparative Study on Dynamic Characteristics of Different Sleeper Types on Bridge in High Speed Railway

GAO Liang, XIN Tao, XIAO Hong, QU Cun

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Based on the investigation and analysis of different sleeper types at home and abroad, primary schemes of sleeper type on bridge in high speed railway were determined according to the structure characteristics of ballast track on bridge in high speed railway of China. The sleeper types proposed in the primary schemes including type Ⅲ sleeper, wide sleeper, ladder sleeper and frame sleeper. Then a vehicle-track-bridge coupling system dynamic analysis model was established, with which the dynamic performances of the primary selected sleeper types were compared and analyzed to select the suitable sleeper type for bridge. The selected sleeper type was optimized, and the wide sleeper is

recommended for high speed railway in China. Based on a comprehensive consideration of the track maintenance, type Ⅲ sleeper was proposed for sleeper scheme. The dynamic analysis results show that the widening sleeper with 2~4 cm type Ⅲ sleeper can well reduce ballast stress and be easy to maintain. Study results are helpful for the design of new sleeper structures on bridge.

Key words: sleeper type; high speed railway; ballast track; dynamic analysis

我国的高速铁路以无砟轨道为主, 但是有砟轨道结构的采用也不可避免。以正在建设的京沪高速铁路为例: 虽然无砟轨道比例达到90%以上, 但是在济南黄河大桥和大胜关长江大桥上仍然采用了有砟轨道。对于桥上有砟轨道结构, 列车速度的提高使得道砟粉化破坏等问题变得更加突出。德国汉诺威—维尔茨堡高速铁路就出现了桥梁上道砟损坏严重的问题, 通过总质量不到 2×10^9 t 就对该线路大部分桥梁上的道砟进行了更换^[1-2]。这就要求针对高速铁路有砟轨道结构展开深入研究。

在充分调研国内外高速铁路桥上轨枕结构应用经验及研究资料的基础上, 重点对几种典型轨枕结构进行了动力学对比分析, 结合我国高速铁路桥上有砟轨道结构特点, 进行技术经济综合比选, 给出了高速铁路桥上轨枕结构选型的初步建议。

1 研究思路

为对高速铁路桥上轨枕结构的动力特性进行研究, 首先对国内外常用轨枕结构进行分类, 从轨枕应用情况、技术特性、经济性、养护维修等多方面进行对比分析, 初步确定适合桥上应用的轨枕结构型式, 然后运用耦合动力学思想^[3-4], 建立车辆-轨道-桥梁

耦合系统动力分析模型. 利用自编的仿真计算程序, 对列车高速通过桥上有砟轨道时车辆、轨道和桥梁结构的动力特性进行对比研究, 选出适合桥上应用的轨枕结构方案. 最后针对选定的轨枕结构方案, 对主要结构参数进行优化, 提出适合我国高速铁路的桥上有砟轨道轨枕结构的选型建议.

2 桥上轨枕结构方案初选

国内外轨枕型式繁多, 具有代表性的轨枕型式主要有如下几种: III型轨枕、弹性轨枕、宽轨枕、梯子式轨枕、框架式轨枕、德国 B 系列轨枕及法国双块式轨枕.

对于德国的 B 系列轨枕, 除宽轨枕 BBS1 外, 其余结构型式基本与我国 III 型轨枕相似. 同时由于我国高速铁路建设的特殊性, B 系列轨枕无法直接应用于我国高速铁路桥上有砟轨道结构中, 但可借鉴德国 B 系列轨枕的发展趋势, 对我国高速铁路桥上有砟轨道轨枕结构进行优化设计.

对于法国双块式轨枕, 法国以及瑞典有砟线路上曾大量采用, 但后来由于使用中出现较多的问题, 也逐渐推广整体式轨枕^[5], 可见其结构不够成熟和完善. 因此, 不建议在高速铁路上采用双块式轨枕.

对于弹性轨枕, 随着铁路的长期运营, 胶垫老化的问题比较突出, 必须定期更换, 这给运营后线路的养护维修带来了较大的困难. 对于高速铁路这样高速度、高密度运营的线路, 桥上有砟轨道养护维修的难度大, 经济成本也较高, 在下面轨枕型式的动力计算分析中也不予考虑.

因此, 主要对 III 型轨枕、宽轨枕、梯子式轨枕和框架式轨枕 4 种典型轨枕型式进行动力学分析.

3 模型建立和参数选取

3.1 动力分析模型的建立

建立的车辆-轨道-桥梁耦合系统动力分析模型由车辆模型、轨道模型、桥梁模型、轮轨相互作用模型、轨道不平顺模型组成, 建模方法如下:

(1) 在车辆模型中, 将车体、转向架、轮对视为刚体, 彼此之间通过弹簧阻尼器元件连接, 共有 31 个自由度, 其中车体和转向架各有 5 个自由度, 即沉浮、点头、横移、侧滚和摇头; 每个轮对具有 4 个自由度, 即沉浮、横移、侧滚和摇头.

(2) 在轨道模型中, 充分考虑钢轨、轨枕和道床

的力学特点分别进行建模. ①对于钢轨, 钢轨单元在横向和垂向上均看作弹性点支承等截面梁, 每个钢轨节点有 4 个自由度. ②对于轨枕结构, 根据本身力学特点分别建模, 如对于 III 型轨枕和宽轨枕, 在垂向上按欧拉梁处理, 而在横向上可视为质量块. 与 III 型轨枕和宽轨枕不同, 梯子式轨枕是“纵向型”轨枕, 框架式轨枕是“纵横交叉型”轨枕. 在建模时, 梯子式轨枕视为纵向欧拉梁, 而框架式轨枕视为纵横交叉的欧拉梁. ③对于道床, 道床在模型中被离散为质量块, 并通过道床质量块之间的剪切刚度和阻尼模拟道砟的啮合作用. ④钢轨和轨枕、轨枕与道床、道床与桥梁之间均通过线性弹簧-阻尼系统来连接.

(3) 对于轮轨相互作用模型, 轮轨之间的耦合作用通过轮轨接触来实现. 根据 Hertz 非线性弹性接触理论计算轮轨法向力, 根据 Kalker 线性蠕滑理论计算蠕滑力, 并用沈氏理论进行非线性修正.

(4) 对于桥梁模型, 以简支箱梁为例进行建模, 针对箱梁的力学特点, 建模时将梁体简化为欧拉梁, 且不考虑桥墩的参振.

(5) 在轨道不平顺模型中, 考虑了随机不平顺的影响. 需要将轨道的不平顺功率谱转换为时域样本, 将时域样本输入到系统中作为激励. 采用三角级数法生成时域样本, 随机样本函数如式(1)所示:

$$\xi(x) = \sqrt{2} \sum_{k=1}^N \sqrt{S(\omega_k) \Delta \omega} \cos(\omega_k x + \phi_k) \quad (1)$$

式中: $\xi(x)$ 为不平顺序列, x 为不平顺位置; $S(\omega_k)$ 为功率谱密度, ω_k 为所考虑的频率, $k=1, 2, \dots, N$; $\Delta \omega$ 为频率间隔; ϕ_k 为相位, 服从 $[0, 2\pi]$ 间的均匀分布.

以 III 型轨枕为例, 车辆-轨道-桥梁耦合系统动力分析模型的示意图如图 1.

将车辆模型和轨道模型通过轮轨接触耦合在一起, 轨道模型和桥梁模型通过道床的作用联系在一起, 并考虑轨道不平顺的激励作用, 可得车辆-轨道-桥梁耦合系统动力分析模型, 振动方程为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{vv} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{M}_{tt} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{M}_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\boldsymbol{\delta}}_v \\ \ddot{\boldsymbol{\delta}}_t \\ \ddot{\boldsymbol{\delta}}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{vv} & \mathbf{C}_{vt} & 0 \\ \mathbf{C}_{tv} & \mathbf{C}_{tt} & \mathbf{C}_{tb} \\ 0 & \mathbf{C}_{bt} & \mathbf{C}_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\boldsymbol{\delta}}_v \\ \dot{\boldsymbol{\delta}}_t \\ \dot{\boldsymbol{\delta}}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{vv} & \mathbf{K}_{vt} & 0 \\ \mathbf{K}_{tv} & \mathbf{K}_{tt} & \mathbf{K}_{tb} \\ 0 & \mathbf{K}_{bt} & \mathbf{K}_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \boldsymbol{\delta}_v \\ \boldsymbol{\delta}_t \\ \boldsymbol{\delta}_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{P}_v \\ \mathbf{P}_t \\ \mathbf{P}_b \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{K}, \mathbf{P}$ 分别表示质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵和荷载向量; $\boldsymbol{\delta}$ 为位移向量; 下标 v, t, b 分别表示车辆、轨道和桥梁.

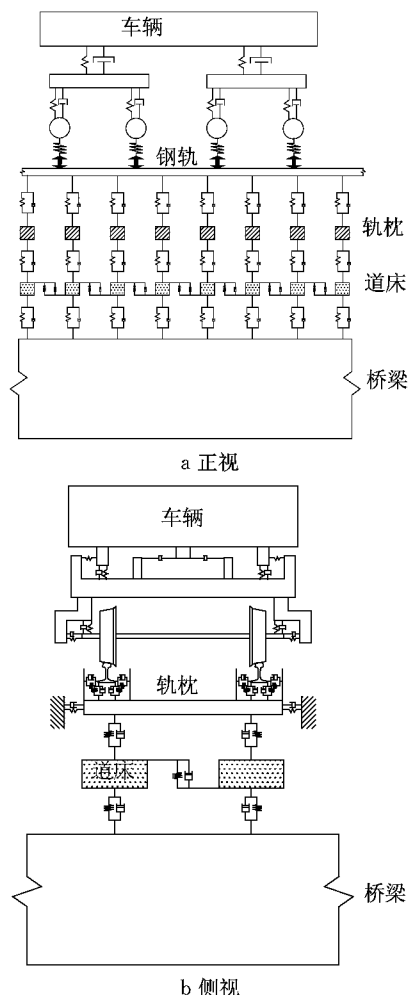


图1 车辆-轨道-桥梁耦合系统动力分析模型示意

Fig.1 Vehicle-track-bridge coupling system dynamic analysis model

利用 FORTRAN 语言编写了动力仿真计算程序 VTBDSS (Vehicle-Track-Bridge Dynamic Simulation System), 利用 NEWMARK 方法求解系统运动方程。

表1 不同轨枕型式下系统的动力响应最大值

Tab.1 Maximum system dynamic responses under different sleeper types

轨枕型式	加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)					动位移/mm			动应力		轮轨作用力/kN
	车体	钢轨	轨枕	道床	桥梁	钢轨	轨枕	桥梁	轨下/MPa	道床/kPa	
Ⅲ型轨枕	0.75	533.62	93.77	56.80	1.26	1.14	0.47	0.12	1.80	114.32	198.57
宽轨枕	0.86	531.87	84.82	53.95	1.23	1.13	0.50	0.12	1.66	66.29	189.33
梯子式轨枕	0.90	490.90	146.65	49.37	1.18	2.42	1.10	0.14	3.53	275.26	206.77
框架式轨枕	0.88	653.48	89.74	59.00	1.43	1.24	0.56	0.24	1.80	77.18	215.92

从表1可以看出,相对Ⅲ型轨枕:

(1)在车辆动力响应和轮轨相互作用方面,宽轨枕、梯子式轨枕和框架式轨枕条件下的车体加速度均有增加,但均在限值范围内;宽轨枕条件下的轮轨

3.2 计算参数的选取

采用国产动车组 CRH3 车辆参数,车辆全长 26.3 m,定距 17.4 m,轴距 2.5 m,车体质量 40 t,构架质量 3.2 t,轮对质量 2.4 t,列车运行速度取 $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$;采用 $60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$ 钢轨;扣件间距 0.6 m,扣件系统垂向动刚度取 $60 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$,垂向阻尼取 $75 \text{ kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$,横向动刚度取 $30 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$,横向阻尼取 $60 \text{ kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$;Ⅲ型轨枕、宽轨枕、梯子式轨枕和框架式轨枕的相关参数取自铁道部发布的标准和相关文献^[6-7].桥梁梁体采用 C50 混凝土,弹性模量为 $3.45 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$,钢筋混凝土密度取为 $2500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,桥梁截面如图2所示。

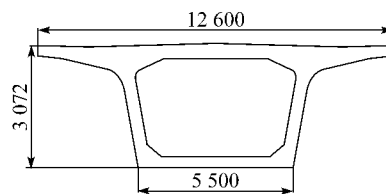


图2 桥梁截面(单位:mm)

Fig.2 Bridge body section (unit: mm)

对于轨道不平顺参数,由于国内现在还没有非常成熟的高速铁路轨道不平顺谱,考虑到德国低干扰谱较为成熟并且可适用于德国时速 250 km 以上的高速铁路,因此本文采用德国低干扰谱作为系统的激励,不平顺波长范围取为 1~150 m。

4 桥上轨枕结构动力特性对比研究

利用车辆-轨道-桥梁耦合系统动力分析模型对选定的4种轨枕结构的动力特性进行对比研究,对车辆、钢轨、轨枕、道床和桥梁多种动力响应指标进行筛选,确定轨枕选型的关键指标.表1给出了上述4种轨枕结构对应的系统动力响应最大值。

作用力有所减小,梯子式轨枕和框架式轨枕条件下的轮轨作用力有所增大,分别增大约 4.1%,8.7%。

(2)在钢轨动力响应方面,宽轨枕、梯子式轨枕条件下的钢轨加速度变化不大,而框架式轨枕条件

的钢轨加速度约增大 22.5%;宽轨枕、框架式轨枕条件下的钢轨动位移差别不大,而梯子式轨枕条件下的钢轨动位移增大明显,这可能与梯子式轨枕的有效支承面积较小有关。

(3)在轨枕动力响应方面,宽轨枕和框架式轨枕条件下的轨下动应力、轨枕加速度和轨枕动位移变化较小,而梯子式轨枕条件下的轨枕动力响应均明显增大。

(4)在道床动力响应方面,宽轨枕和框架式轨枕表现出了较强的优势,分别使道床动应力减小 42.0%,32.5%,而梯子式轨枕反而使道床动应力增大,这同样与梯子式轨枕的有效支承面积较小有关。

(5)在桥梁动力响应方面,轨枕型式的影响不明显,桥梁加速度和动位移均较小,在规范要求的限值之内。

从轨枕型式对车辆、钢轨、轨枕、道床和桥梁动力响应指标的影响程度上可以看出,其影响主要体现在钢轨、轨枕、道床的动力响应上,尤其是对道床动应力的影响。道砟粉化一般认为是道砟间接触压力较大而道砟强度相对不足而引起,道床压应力是道砟粉化的直接表征。有文献表明,轨道状态的恶化速率与道床应力的 3~4 次方成正比^[8]。德国的试验结果也表明,当道床应力减小约 10%时,线路状态恶化速率就降低 21%~46%^[9]。所以,很多国家把减少道床动应力作为减少线路变形及养护维修工作量的一种重要措施。本文将道床压应力作为轨枕选型的最主要指标。

在这些动力响应指标中,宽轨枕均表现出了良好的动力学性能,是 4 种轨枕型式中性能最优的。在

降低道床动应力方面,宽轨枕的优势最为显著。

需要指出的是,与Ⅲ型轨枕相比,框架式轨枕并无明显优势,且只在奥地利的试验线上铺设过,还没有在运输繁忙的高速铁路线上使用过,缺少实践经验^[10];而梯子式轨枕力学性能与Ⅲ型轨枕相比力学性能稍差,也缺乏在高速铁路上大规模应用的经验。

Ⅲ型轨枕结构合理,强化了轨道结构,提高了轨枕的强度,减小了轨枕的纵横向移动,有利于保持轨道的几何形位,减少养护维修工作量^[7]。但Ⅲ型轨枕最初是按重载轨道条件设计的,其能否应用于高速铁路还未定论,能否直接用作于高速铁路桥上有砟轨道结构更是不得而知。

宽轨枕虽然力学性能较优,但是由于轨枕宽度大、轨枕之间的间隙小,难以采用大型机械对道砟进行捣固作业,不能满足高速铁路养护维修的需要,无法直接在高速铁路上使用。鉴于宽轨枕的性能优势和Ⅲ型轨枕的成熟经验,可以尝试将二者的优点结合,采用Ⅲ型轨枕加宽的方案。

5 桥上轨枕结构动力优化研究

利用车辆-轨道-桥梁耦合系统动力分析模型研究轨枕宽度对系统动力响应的影响。从表 2 可以看出:轨枕宽度对车辆、钢轨、轨枕和桥梁动力响应指标的影响程度较小,最大的影响体现在道床动应力上。轨枕宽度从 32cm 增大到 34,36,38cm 时,道床动应力大约分别减小 5.5%,10.3%,14.7%。轨枕加宽可以显著地减缓轨道状态的恶化,进而降低养护维修工作量,符合高速铁路少维修的要求。

表 2 不同轨枕宽度下系统的动力响应最大值
Table2 Maximum system dynamic responses under different sleeper widths

枕宽/m	加速度/(m·s ⁻²)					动位移/mm			动应力		轮轨作用力/kN
	车体	钢轨	轨枕	道床	桥梁	钢轨	轨枕	桥梁	轨下/MPa	道床/KPa	
0.32	0.75	533.62	93.77	56.8	1.26	1.14	0.47	0.12	1.80	114.32	198.57
0.34	0.75	539.41	91.52	56.6	1.25	1.14	0.46	0.12	1.81	108.02	198.80
0.36	0.75	559.82	88.97	56.36	1.25	1.14	0.45	0.12	1.82	102.49	198.80
0.38	0.75	566.14	85.41	56.11	1.24	1.14	0.45	0.12	1.82	97.50	198.70

当然,轨枕的加宽是有限的。根据规范要求,捣固净空范围不小于 200 mm,允许偏差为±20 mm^[11-12]。因此,轨枕净距应大于 240 mm(200 mm+20 mm+20 mm),轨枕宽应小于 360 mm(600 mm-240 mm)。考虑大型养路机械捣固需要一定的富余量,轨枕宽度一般不超过 34 cm。

因此,在轨枕间距 0.6 m 的条件下,Ⅲ型轨枕尚有 2 cm 的允许加宽值。但是,随着新型养路机械的

开发,捣固作业需要的轨枕间距可能减小,使轨枕有更大的加宽空间。另外,适当增大轨枕间距,也可增大轨枕允许加宽值。总之,建议至少对Ⅲ型轨枕加宽 2 cm,条件允许的情况下加宽 4 cm。

6 结论与建议

针对高速铁路桥上轨枕结构的选型问题,在调

研分析的基础上,初步选定轨枕备选方案,然后建立相应的车辆-轨道-桥梁耦合系统动力分析模型进行动力特性的分析,结合我国高速铁路特点,选出了适合桥上应用的轨枕结构方案。最后,对选定轨枕结构进行动力优化,提出了适合我国高速铁路的桥上有砟轨道轨枕结构的选型建议。主要结论如下:

(1)从轨枕应用情况、技术特性、经济性、养护维修等多方面对Ⅲ型轨枕、弹性轨枕、宽轨枕、梯子式轨枕、框架式轨枕、德国B系列轨枕及法国双块式轨枕7种典型轨枕型式进行了深入的分析和比较,初步选出Ⅲ型轨枕、宽轨枕、梯子式轨枕和框架式轨枕4种轨枕型式作为动力计算分析方案。

(2)利用车辆-轨道-桥梁耦合系统动力分析模型,对Ⅲ型轨枕、宽轨枕、梯子式轨枕和框架式轨枕的动力特性进行了对比。综合来看,宽轨枕均表现出良好的动力学性能,是4种轨枕型式中性能最优的。尤其在降低道床动应力方面,宽轨枕优势非常显著。

(3)宽轨枕虽然力学性能较优,但是由于轨枕宽度大、间距小,制约了大机作业的进行,无法在高速铁路上使用。鉴于宽轨枕的性能优势和Ⅲ型轨枕的成熟经验,建议采用Ⅲ型轨枕加宽的方案。

(4)轨枕加宽的优势主要体现为明显地减小了轨枕振动加速度和道床动应力,缓解道砟粉化趋势,降低道砟液化的可能性,在降低线路状态恶化速率、减少维修工作量方面可以起到较好的效果。

(5)在满足养护维修对有砟轨道要求的基础上,根据动力分析的结果,在Ⅲ型轨枕基础上加宽2~4 cm即可以起到有效减小道床压应力和降低养护维修工作量等效果。

随着新型养路机械的开发,捣固作业间距可能减小,使轨枕有更大的加宽空间。另外,适当增大轨枕间距也可增大轨枕允许加宽值。总之,建议至少对Ⅲ型轨枕加宽2 cm,条件允许的情况下加宽4 cm。

参考文献:

- [1] 卢祖文. 高速铁路轨道技术综述[J]. 铁道工程学报, 2007, 100(1): 41.
LU Zuwen. Overall comments on track technology of high-speed railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2007, 100(1): 41.
- [2] 阎红亮. 客运专线轨道结构选型研究[J]. 铁道建筑, 2005 (2): 26.
YAN Hongliang. Research on track structures selection in passenger dedicated lines [J]. Railway Engineering, 2005 (2): 26.
- [3] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002.
ZHAI Wanming. Vehicle-track coupling dynamics [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2002.
- [4] 翟婉明. 车辆-轨道垂向系统的统一模型及其耦合动力学原理[J]. 铁道学报, 1992, 14(3): 10.
ZHAI Wanming. The vehicle model of vehicle-track system and its coupling dynamics [J]. Journal of the China Railway Society, 1992, 14(3): 10.
- [5] 钱立新. 世界高速铁路技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2003.
QIAN Lixin. World high speed railway technology [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2003.
- [6] 中华人民共和国铁道部. 新建时速300~350公里客运专线铁路设计暂行规定[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2008.
Ministry of Railways of the P R China. Provisional rules for railway design of newly built 300~350 km/h passengers dedicated lines [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2008.
- [7] 李成辉. 轨道[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2005.
LI Chenghui. Track [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2005.
- [8] 赵国堂. 高速铁路无砟轨道结构[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2006.
ZHAO Guotang. High speed railway ballastless track structure [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2006.
- [9] 范俊杰. 现代铁路轨道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.
FAN Junjie. Modern railway track [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004.
- [10] 国际铁道工程编辑部. 使用寿命更长的框架式轨枕轨道[J]. 国际铁道工程, 2002(6): 11.
Editorial Office of International Railway Engineering. Using frame sleeper track of longer service life [J]. International Railway Engineering, 2002(6): 11.
- [11] 中华人民共和国铁道部. 大型养路机械使用管理规则[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2007.
Ministry of Railways of P R China. Management code for using large track maintenance machines [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2007.
- [12] 中华人民共和国铁道部. 客运专线铁路轨道工程施工质量验收暂行标准[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.
Ministry of Railways of P R China. Temporary code for Construction quality acceptance of railway track Engineering of passengers dedicated lines [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2005.