

## 内置式泵房轨道系统的轨道参数敏感性分析\*

傅承诚<sup>1</sup> 罗望<sup>2</sup> 崔信为<sup>1</sup> 时瑾<sup>2</sup>

(1. 绍兴市柯桥区轨道交通集团有限公司, 312030, 绍兴; 2. 北京交通大学土建学院, 100044, 北京//第一作者, 高级工程师)

**摘要** 采用内置式泵房后, 由于轨道型式发生了变化, 其实际服役可靠性值得关注。建立了内置式泵房轨道系统的轨道动力分析模型, 分析了内置式泵房轨道系统的轨道动力响应特征。在此基础上, 以整体道床横向弯矩和道床横向位移作为服役性能的控制指标, 选取道床弹性模量、扣件垂向刚度、扣件横向刚度和扣件横向阻尼作为随机参数, 使用  $2^k$  析因实验设计开展了参数敏感性分析; 选取整体道床横向弯矩作为目标响应, 评价了敏感参数对内置式泵房轨道系统的轨道服役可靠性的影响。

**关键词** 轨道交通; 轨道; 内置式泵房; 道床横向弯矩; 动力响应

**中图分类号** U213, U213.2

**DOI:** 10.16037/j.1007-869x.2022.01.020

## Sensitivity Analysis of Track Parameters of Built-in Pump House Track System

FU Chengcheng, LUO Wang, CUI Xinwei, SHI Jin

**Abstract** After built-in pump house is adopted, track type has been changed, therefore the service reliability of built-in pump house in practice is worthy of attention. Track dynamic analysis model of built-in pump house track system is established, and the dynamic response characteristics of the system are analyzed. On this basis, the lateral bending moment and lateral displacement of the monolithic track bed are taken as the control indexes of the service performance, and the elastic modulus of the track bed, the vertical stiffness of the fastener, the lateral stiffness of the fastener and the lateral damping of the fastener are selected as random parameters. The sensitivity analysis of parameters is carried out by adopting  $2^k$  factor experimental design, and the lateral bending moment of monolithic track bed is selected as the target response to evaluate the influence of sensitive parameters on the service reliability of built-in pump house track system.

**Key words** rail transit; track; built-in pump house; lateral bending moment of track bed; dynamic response

**First-author's address** Shaoxing Keqiao Rail Transit

Group Co., Ltd., 312030, Shaoxing, China

内置式泵房轨道系统是一种比较新颖的泵房轨道结构, 取消了隧道间的联络通道, 将废水泵房设置在道床内部, 降低了施工的风险和难度, 在复杂线路中的特殊地段有着广泛的应用。

采用内置式泵房后, 由于轨道断面发生了变化, 其实际服役可靠性值得关注。很多学者对轨道结构可靠性开展了大量研究, 文献[1]对已有的响应面分析法进行了改进, 解决了在对桥梁结构的可靠度进行分析时结构功能函数未知的问题。文献[2]分析了关键因素对桥上嵌入式轨道无缝线路力学特性的影响, 提出了桥上嵌入式轨道无缝线路可靠性评估方法, 为嵌入式轨道结构的设计提供理论指导。文献[3]建立了列车荷载与温度荷载共同作用下 CRTS II 型轨道板混凝土疲劳功能函数, 得出了一种精度较高的 CRTS II 型轨道板疲劳可靠度的计算方法。值得指出的是, 目前对内置式泵房轨道结构可靠性问题的研究较少。

鉴于当前内置式泵房轨道技术尚不成熟, 本文主要依托杭州至绍兴城际铁路工程(以下简称“杭绍线”)内径 5.9 m 盾构区间, 开展轨道关键技术和设备布局等的研究, 解决实际工程中存在的技术瓶颈。因此, 分析内置式泵房轨道系统的参数敏感性、评估其服役可靠性与安全性有着重大的工程意义。

## 1 理论模型及结果分析

### 1.1 工程背景

杭绍线起自杭州地铁 5 号线香樟路站, 终到绍兴市笛扬路站, 与绍兴轨道交通 1 号线贯通运营融入绍兴主城区。线路全长 20.3 km, 设站 10 座(其中地下站 6 座)区间风井 2 座, 地下区间 5 处。

杭绍线采用了内径 5.9 m 盾构技术<sup>[4]</sup>, 线路几

\* 绍兴市柯桥区轨道交通集团有限公司科技开发课题项目(201801-SJ-FW-002)

处最低点联络通道和废水泵房合建存在施工风险。为规避土建施工风险,拟在部分区间采用内置式泵房轨道方案。

### 1.2 有限元模型及计算参数

本文基于已有的工程背景,在建立有限元模型时,将 60 kg/m 的钢轨简化成工字型梁,扣件间距为 0.6 m;隧道内布置 3 块整体道床,每块长 12.5 m,道床间设置 0.2 mm 伸缩缝<sup>[5]</sup>。计算泵房排水能力后,设计泵房尺寸为:14.4 m(长)×0.8 m(宽)×0.6 m(高)。道床下部设置接触单元与盾构壁连接。为了更好地反映道床与盾构壁之间的相互作用,假定接触面垂向只有在压紧状态下才会传递法向力的硬接触,水平方向采用库仑摩擦系数为 0.5 的有限滑移接触<sup>[6]</sup>。

钢轨采用 60 kg/m 轨,扣件采用 TSD1 型扣件,轨枕间距为 0.6 m,隧道基础厚度 0.35 m,采用 C50 混凝土,相关参数如表 1 所示。利用有限元计算软件建立地铁盾构区间内置式泵房轨道模型,其中钢轨采用梁单元模拟,扣件采用弹簧阻尼单元模拟,整体道床和底部盾构壁均采用实体单元模拟<sup>[7]</sup>,有限元模型如图 1 所示。

表 1 轨道计算参数  
Tab. 1 Track calculation parameters

| 部件   | 弹性模量/(N/m <sup>2</sup> ) | 泊松比 | 密度/(kg/m <sup>3</sup> ) |
|------|--------------------------|-----|-------------------------|
| 钢轨   | 2.1×10 <sup>11</sup>     | 0.3 | 7.83×10 <sup>3</sup>    |
| 整体道床 | -                        | 0.2 | 2.50×10 <sup>3</sup>    |
| 隧道基础 | 3.65×10 <sup>10</sup>    | 0.2 | 2.50×10 <sup>3</sup>    |



图 1 盾构隧道区间内置式泵房轨道结构模型  
Fig. 1 Track structure model of built-in pump house in shield tunnel interval

移动荷载采用地铁 B 型车。车辆轴重为 14 t,车辆定距为 12.6 m,转向架轴距为 2.2 m,车体长度

为 19 m,车箱间距为 0.45 m,由此计算两节车中间最近的两个车轴之间的距离为 4.65 m。列车垂向荷载分布如图 2 所示。

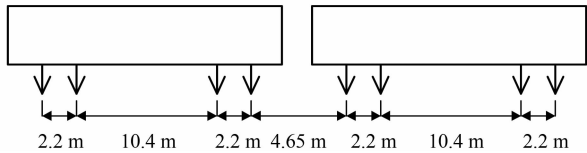


图 2 列车垂向荷载分布图  
Fig. 2 Diagram of train vertical load distribution

### 1.3 轨道动力响应分析

列车荷载作用下,钢轨和轨道板会产生一定的垂向和横向变形。采用垂向加速度与垂向位移作为轨道结构振动强弱指标。DB11/T 1714—2020《城市轨道交通工程动态验收技术规范》中指出:整体道床类减振轨道在列车动力作用下,钢轨的最大垂向位移不应大于 4 mm,垂向加速度不应大于 2 500 m/s<sup>2</sup>,整体道床的最大垂向位移不应大于 3 mm<sup>[8]</sup>。

图 3~5 为计算得到的变形图,从图中可以看出:设置内置式泵房的轨道结构,在跨中截面,钢轨的垂向位移为 0.55 mm,钢轨的垂向加速度为 20 m/s<sup>2</sup>,整体道床的垂向位移为 0.09 mm,均未超过规范限值,且具有较大的余量。这说明内置式泵房轨道结构的安全性满足使用要求。

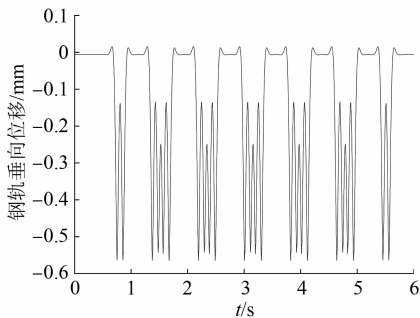


图 3 钢轨跨中截面垂向位移  
Fig. 3 Vertical displacement of rail midspan section

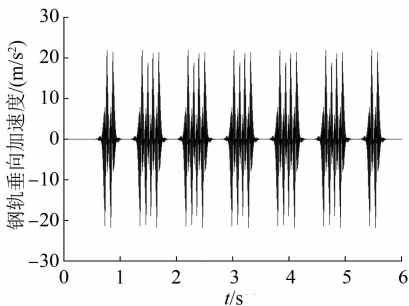


图 4 钢轨跨中截面垂向加速度  
Fig. 4 Vertical acceleration of rail midspan section

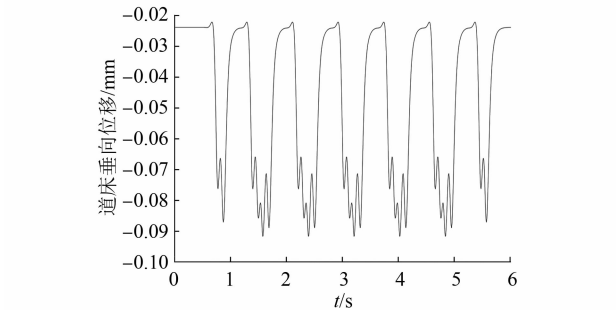


图5 道床跨中截面垂向位移

Fig. 5 Vertical displacement of track bed midspan section

## 2 轨道结构参数敏感性分析

### 2.1 随机参数选取

选取道床跨中截面的横向弯矩为评价指标,对内置式泵房轨道结构的参数敏感性进行研究。结合实际工程项目,初步拟定的随机参数为道床弹性模量、扣件垂向刚度、扣件横向刚度和扣件横向阻尼。这4个随机参数高低水平取值均根据我国常用范围选取<sup>[9-15]</sup>。

采用 $2^4$ -1析因实验设计研究内置式泵房轨道系统的参数敏感性,将筛选出的随机参数的高低水平取值罗列出来,如表2所示。

表2 内置式泵房轨道结构随机参数  
Tab. 2 Random parameters of track structure of built-in pump house

| 随机参数             | 均值                | 低水平(-)            | 高水平(+)            |
|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 道床弹性模量/MPa       | $3.0 \times 10^4$ | $2.5 \times 10^4$ | $3.5 \times 10^4$ |
| 扣件垂向刚度/(KN/m)    | $6.0 \times 10^4$ | $4.0 \times 10^4$ | $8.0 \times 10^4$ |
| 扣件横向刚度/(KN/m)    | $6.0 \times 10^4$ | $4.0 \times 10^4$ | $8.0 \times 10^4$ |
| 扣件横向阻尼/((N·S)/m) | $6.0 \times 10^4$ | $3.0 \times 10^4$ | $9.0 \times 10^4$ |

注:道床弹性模量、扣件垂向刚度、扣件横向刚度和扣件横向阻尼的变异系数分别为5.556%、11.111%、11.111%和16.667%。

对于选中的随机参数,根据表2取值进行输入,分别计算8组不同的随机变量组合下整体道床横向弯矩和整体道床横向位移的数值,计算结果如表3所示。

### 2.2 整体道床弯矩敏感性分析

将随机参数在8组不同水平下的取值代入模型中,计算在整体道床最不利位置处的最大横向弯矩,再对计算结果进行敏感性分析,得到随机参数的敏感性分析结果如图6所示。

在 $2^4$ -1析因实验效应半正态概率图中,用标准化效应值的绝对值作为横坐标,通过判断某个参数离直线的距离,判断不同因子的参数敏感性。在本

表3  $2^4$ -1析因实验设计计算结果表  
Tab. 3 Technical results of  $2^4$ -1 factor experimental design

| 实验编号 | 计算顺序 | 道床弹性模量/(MPa) | 扣件垂向刚度/(N/m) | 扣件横向刚度/(N/m) | 扣件横向阻尼/((N·S)/m) | 横向弯矩/(kN/m) | 横向位移/mm |
|------|------|--------------|--------------|--------------|------------------|-------------|---------|
| 1    | 3    | -            | -            | -            | +                | 44.44       | 0.028 7 |
| 2    | 2    | -            | +            | -            | -                | 43.12       | 0.029 1 |
| 3    | 1    | -            | -            | +            | +                | 44.69       | 0.030 2 |
| 4    | 4    | -            | +            | +            | -                | 43.41       | 0.030 6 |
| 5    | 6    | +            | -            | -            | -                | 44.36       | 0.020 5 |
| 6    | 7    | +            | +            | -            | +                | 43.18       | 0.020 8 |
| 7    | 8    | +            | -            | +            | -                | 44.66       | 0.021 5 |
| 8    | 5    | +            | +            | +            | +                | 43.42       | 0.021 6 |

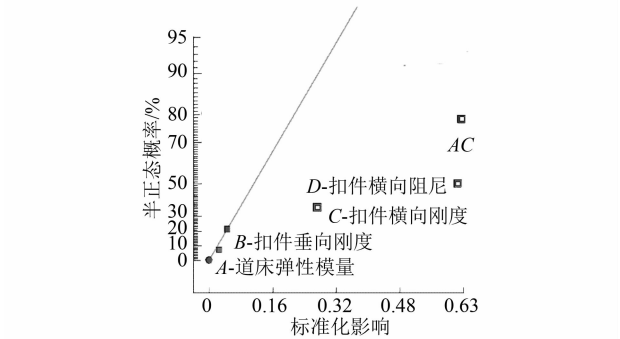


图6  $2^4$ -1析因实验效应半正态概率图  
Fig. 6 Diagram of semi normal probability of  $2^4$ -1 factor experimental effect

文选定的4个待研究参数中,对整体道床横向弯矩敏感性从高到低排序为:道床弹性模量和扣件垂向刚度为比较敏感的参数,扣件横向刚度和扣件横向阻尼为不敏感参数。

图7为表示效应 $t$ 值的帕累托图。从图中各效应所代表的柱形高度可直观地判断出各参数的敏感性:道床弹性模量、扣件垂向刚度和扣件横向刚度为敏感参数,扣件横向阻尼、道床弹性模量与扣件横向刚度的组合效应为不敏感参数。

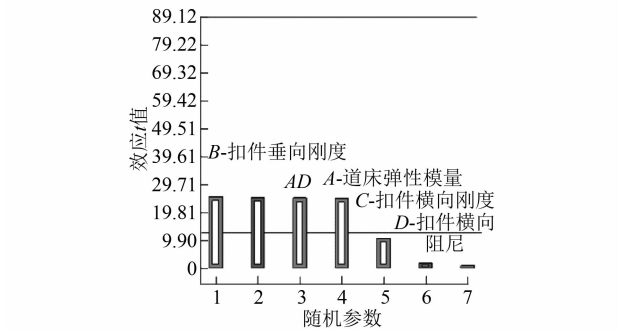


图7  $2^4$ -1析因实验帕累托图  
Fig. 7  $2^4$ -1 factor experimental Pareto diagram

综合以上分析,4个随机参数对整体道床横向

弯矩的敏感性从大到小排列为:道床弹性模量  $A$ 、扣件垂向刚度  $B$ 、扣件横向刚度  $C$  和扣件横向阻尼  $D$ 。

### 3 内置式泵房轨道系统可靠度分析

本文使用中心复合设计方法(简称 CCD 法)对内置式泵房轨道系统的可靠度进行分析。主要考虑道床弹性模量  $A$ 、扣件垂向刚度  $B$  和扣件横向刚度  $C$  这 3 个参数,分别计算有无内置式泵房时轨道系统的可靠度变化。

将随机参数取不同数值的 15 组平行试验的数据代入有限元软件中进行运算,记录每组试验中的道床横向弯矩值,通过数据分析软件拟合出道床横向弯矩的响应面,结果如图 8~9 所示。导出的响应面表达式为:

横向弯矩(有泵房)

$$= 43.84 - 0.354A + 0.14B - 0.17C - 0.055AB + 0.40AC + 0.19BC$$

横向弯矩(无泵房)

$$= 46.20 - 0.19A + 0.11B + 0.10C + 0.10AB + 0.11AC - 0.19BC$$

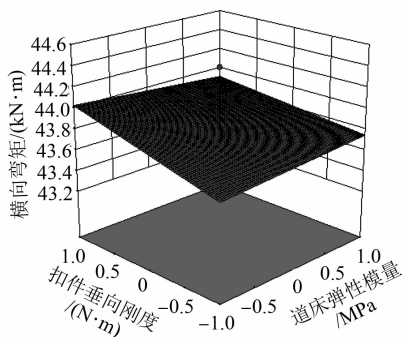


图 8 有泵房时的道床横向弯矩响应面

Fig. 8 Lateral bending moment response surface of track bed with pump house

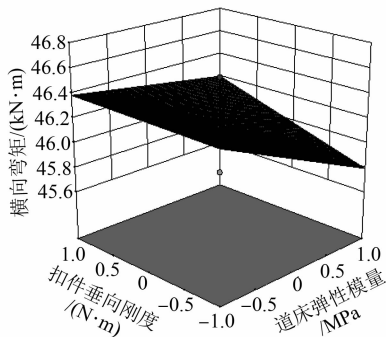


图 9 无泵房时的道床横向弯矩响应面

Fig. 9 Lateral bending moment response surface of track bed without pump house

由极限状态方程定义,当限值-横向弯矩 = 0 时,求出不同横向弯矩下对应的失效概率,相应的极限状态曲线图如图 10 所示。

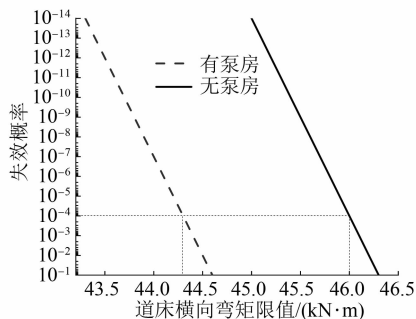


图 10 横向弯矩-失效概率示意图

Fig. 10 Diagram of lateral bending moment-failure probability

从图 10 中可以看出,在列车荷载作用下,失效概率相同时,有泵房的轨道系统比无泵房时的道床横向弯矩限值略小。根据文献[16],将失效概率控制在  $10^{-4}$ ,可以在保证工程可靠度的同时尽可能降低结构造价,故本文将  $10^{-4}$  作为结构失效概率的参考限值。此时,有泵房时的道床横向弯矩限值为 44.3 kN·m,无泵房时的道床横向弯矩限值为 46.0 kN·m,设置内置泵房使道床横向弯矩限值减少了仅 3.7%。由此可见,道床设置泵房后对整体道床服役可靠性影响不显著。

### 4 结语

本文基于杭绍城际铁路工程,建立了地铁盾构隧道区间内置式泵房轨道系统动力分析模型,并基于该模型,对内置式泵房轨道系统的轨道的可靠度进行了分析。主要结论如下:

1) 道床横向弯矩对道床弹性模量、扣件垂向刚度和扣件横向刚度比较敏感,对扣件横向阻尼不敏感,且某些参数的交互作用比某个参数单独作用的影响更大。

2) 在失效概率相同时,有内置式泵房轨道系统的轨道比没有内置式泵房时的道床横向弯矩限值仅减少了 3.7%,道床设置内置泵房后对整体道床服役可靠性影响不显著。

### 参考文献

- [1] 刘扬,鲁乃唯. 基于响应面法的连续刚构桥梁体系可靠度分析[J]. 交通科学与工程,2010(4):24.  
LIU Yang, LU Naiwei. Reliability analysis of continuous rigid frame bridges based on response surface methodology[J]. Jour-

- nal of Transport Science and Engineering, 2010(4):24.
- [2] 冯青松, 孙魁, 雷晓燕, 等. 简支梁桥上嵌入式轨道无缝线路可靠性分析[J]. 交通运输工程学报, 2020(4):70.  
FENG Qingsong, SUN Kui, LEI Xiaoyan, et al. Reliability analysis of embedded track continuous welded rail on simply supported beam bridge[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020(4):70.
- [3] 童明娜, 卢朝辉, 赵衍刚, 等. CRTS II 型无砟轨道板疲劳时变可靠度研究[J]. 铁道学报, 2020(10):92.  
TONG Mingna, LU Zhaohui, ZHAO Yangang, et al. Time-dependent fatigue reliability evaluation of CRTS II ballastless track slab[J]. Journal of the China Railway Society, 2020(10):92.
- [4] 徐彩彩. 特殊情况下地铁轨道道床兼设废水泵房的研究与思考[J]. 城市轨道交通研究, 2018(3):72.  
XU Caicai. Research on the waste water pump station set on track bed under special situations[J]. Urban Mass Transit, 2018(3):72.
- [5] 朱瑶宏. 内置式泵房在城市轨道交通工程中的创新应用[J]. 城市轨道交通研究, 2018(8):12.  
ZHU Yaohong. Innovative application of the built-in pump house in urban rail transit engineering[J]. Urban Mass Transit, 2018(8):12.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑给水排水设计标准:GB 50015—2019[S]. 北京:中国计划出版社, 2003.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Design standard for building water supply and drainage: GB 50015—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2003.
- [7] 秦银刚. 隧道区间排水内置泵房存在问题及对策分析[J]. 城市轨道交通研究, 2020(9):118.  
QIN Yin'gang. Problem analysis of tunnel interval drainage built-in pump station and countermeasures[J]. Urban Mass Transit, 2020(9):118.
- [8] 北京市市场监督管理局. 城市轨道交通工程动态验收技术规范:DB11/T 1714—2020[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2013.  
Beijing Municipal Administration for Market Regulation. Technical code for dynamic acceptance of urban rail transit engineering: DB11/T 1714—2020[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- [9] 张格明. 轨道刚度合理值评价指标的研究[J]. 中国铁道科学, 2002(1):53.  
ZHANG Geming. Research on right level of track structure stiffness and track-part stiffness[J]. China Railway Science, 2002(1):53.
- [10] 杨燕, 刘上春, 马永浪, 等. 隧道内 CRTS I 型双块式无砟轨道枕离缝修复技术研究[J]. 现代隧道技术, 2019(增刊1):196.  
YANG Yan, LIU Shangchun, MA Yonglang, et al. Research on repair technology of sleeper separation of CRTS I double block ballastless track in tunnels[J]. Modern Tunneling Technology, 2019(S1):196.
- [11] 王启好, 蔡小培, 常文浩, 等. 考虑枕下胶垫超弹性本构的弹性长枕轨道动力仿真[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020(7):2021.  
WANG Qihao, CAI Xiaopei, CHANG Wenhao, et al. Dynamic simulation of long elastic sleeper track based on hyperelastic constitutive models of rubber cushion under sleeper[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020(7):2021.
- [12] 刘学毅, 张重王, 万章博. 无砟轨道扣件刚度突变对高速列车动力的影响[J]. 铁道工程学报, 2014(9):53.  
LIU Xueyi, ZHANG Zhongwang, WAN Zhangbo. Influence of fastener stiffness mutation in ballastless track on dynamic characteristics of high-speed trains[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014(9):53.
- [13] 谷爱军, 刘维宁, 张厚贵, 等. 地铁扣件刚度和阻尼对钢轨异常波磨的影响[J]. 都市快轨交通, 2011(3):17.  
GU Aijun, LIU Weining, ZHANG Hougui, et al. Impact of rail fastenings' stiffness and damping on abnormal rail corrugation[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2011(3):17.
- [14] 韦凯, 豆银玲, 杨麒陆, 等. 钢弹簧浮置板轨道的随机振动分析及参数优化[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2017(8):115.  
WEI Kai, DOU Yinling, YANG Qilu, et al. Random vibration analysis and parameter optimization of steel-spring floating-slab track[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2017(8):115.
- [15] 张迅, 苏斌, 李小珍. 扣件刚度与阻尼对铁路箱梁车致振动噪声的影响研究[J]. 振动与冲击, 2015(15):150.  
ZHANG Xun, SU Bin, LI Xiaozhen. Effects of fastener stiffness and damping on structure-borne noise of railway box-girders[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015(15):150.
- [16] ROCHA J M, HENRIQUES A A, CALÇADA R. Probabilistic safety assessment of a short span high-speed railway bridge[J]. Engineering Structures, 2014(71):99.

(收稿日期:2021-01-25)