

文章编号: 1006 - 2106(2010)04 - 0053 - 05

沿海铁路桥梁动力性能分析^{*}

王德志^{**}

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430063)

摘要:研究目的:沿海铁路甬台温线和温福线是我国最早开工建设的客运专线项目之一,目前已正式投入运营。受复杂自然和地理条件的影响,软土地基桥梁和复杂特殊结构桥梁众多。通过有代表性桥梁工点的动态测试,将测试结果与计算结果进行对比研究,分析评价桥梁结构的动力性能。

研究结论:通过实桥的动态检测试验,分析研究桥梁结构的变形、变位、自振频率及加速度等动力性能指标,表明沿海铁路桥梁结构横、竖向刚度较大,动力性能较好,能够满足 120 km/h 试验货物列车、250 km/h CRH2 - 010A 综合检测车运行安全性和平稳性的要求,可以开行 250 km/h 动车组。

关键词:客运专线;桥梁;动力性能

中图分类号:U441 **文献标识码:**A

Analysis of Dynamic Performance of Coastal Railway Bridges

WANG De - zhi

(China Railway Siyuan Survey and Design Group Co. Ltd., Wuhan, Hubei 430063, China)

Abstract: Research purposes: The coastal railways of Ningbo - Taizhou - Wenzhou and Wenzhou - Fuzhou are the passenger dedicated lines constructed in the first batch project in China, and now open to traffic. There are lots of the bridges built on soft soil foundation with special and complicated structures for these two railways due to the complicated natural and geographic conditions. The dynamic tests are done to the typical bridge and the comparison is made between the tested results and calculation results for analysis and evaluation of the dynamic performance of the bridge structure.

Research conclusions: From doing the dynamic test to the bridges and making analysis and evaluation of the indexes of dynamic performance of the bridge structure, such as deformation, displacement, natural vibration frequency and acceleration, it is shown the coastal railway bridges are good in lateral and vertical stiffness and the dynamic performance. The Ningbo - Taizhou - Wenzhou and Wenzhou - Fuzhou can meet the requirements of the safety and stability performance for running 120 km/h test freight train, 250 km/h CRH2 - 010A comprehensive monitoring train and 250 km/h EMU.

Key words: passenger dedicated line; bridge; dynamic performance

1 概况

沿海通道甬台温铁路和温福铁路为我国率先开工的高标准沿海铁路,双线电气化,客货共线,旅客列车运行时速 250 km/h,货物列车最高时速 120 km/h,沿线跨越浙江、福建两省,线路全长 580.5 km,其中桥

梁长度 168.5 km。

本线位于东南沿海地区,受台风、洪水、潮水等自然条件的影响显著,软土为本线主要特殊地质,分布于沿线冲海积、海积平原区,地层主要为流塑的淤泥、淤泥质粘土,地质条件很差,且应用了较多的大跨复杂特殊结构,其结构的强度、刚度及动力性能能否满足运行

^{*} 收稿日期: 2009 - 12 - 10

^{**} 作者简介:王德志,1968年出生,男,高级工程师。

250 km/h速度目标值的要求,值得关注。

2009年 6月 15日至 8月 24日对沿海铁路(甬台温、温福)进行了联调联试及检测工作,主要桥梁完成了动车组 180、200、220、230、240 km/h和 250 km/h动力学性能监测和货物列车 80、90、100、110、120 km/h运行时桥梁动力学性能监测,并对全线进行了拉通试验。本文主要针对实桥测试结果进行分析研究,分析

评价桥梁结构的动力性能。

2 检测桥梁工点

根据全线桥梁工程特点,选择全线有代表性的多个特殊结构桥梁工点进行测试,分析其桥梁结构的受力及行车动力性能,其中 5个主要桥梁工点如表 1所示。

表 1 试验桥梁工程特点

检测工点	测试梁型	结构特点	墩高 /m	主墩基础 /m	主桥长度 /m
雁荡山特大桥主桥	2 - 90 m 钢箱叠合拱	钢箱叠合拱桥	8	13 ϕ 1.5	184
瓯江特大桥主桥	(70 + 3 - 120 + 70) m 连续梁	深水大跨结构	28	12 ϕ 2.5	501
昆阳特大桥主桥	(64 + 136 + 64) m 连续梁梁拱	连续梁拱	13	12 ϕ 2.5	265
白马河特大桥主桥	(80 + 3 \times 145 + 80) m 刚构连续梁	深水大跨结构	39	12 ϕ 2.5	596
白马河特大桥引桥	64 m 简支箱梁	大跨简支梁	35	12 ϕ 2.5	66

3 测试目的及检测内容

3.1 测试目的

通过测试桥梁自振特性和试验货物列车、CRH2 - 010A 综合检测车以各种速度通过桥梁时的动力响应,与空间振动分析模型计算结果对比,分析理论计算与实测差距,据以判断结构在动载作用下的工作状态,判断桥梁是否具有足够的竖向和横向刚度,分析、评价试验货物列车和 CRH2 - 010A 综合检测车通过桥梁时的安全性。

3.2 试验列车

试验货物列车采用 25 t 轴重 C80 系列货车、23 t 轴重 C70 (H) 系列货车,空重混编,试验动车采用 CRH2 - 010A 综合检测车。

3.3 试验速度

通过桥梁时的试验速度试验货物列车 79.4 ~ 119.4 km/h, CRH2 - 010A 综合检测车 180.0 ~ 251.2 km/h。

3.4 检测内容

主要包括自振频率、竖向挠跨比、挠度动力系数、梁端竖向转角、梁体跨中横向振幅、墩顶横向振幅、跨中竖向振动加速度及活动支座横向位移等。

3.5 评判标准

评判标准采用《新建时速 200 ~ 250 公里客运专线铁路设计暂行规定》(以下简称《250 暂规》),《新建时速 200 公里客货共线铁路设计暂行规定》(以下简称《200 暂规》)和《铁路桥梁检定规范》,以下简称《桥检规》。

4 检测结果及分析

4.1 自振频率

《250 暂规》和《200 暂规》规定简支梁竖向自振频

率 (Hz) 不应小于 n_0 :

$$n_0 = \begin{cases} \frac{80}{L} & 4 \text{ m} < L < 20 \text{ m} \\ 23.58L^{-0.592} & 20 \text{ m} < L < 96 \text{ m} \end{cases} \quad (1)$$

对于特殊结构,通过建立空间分析模型计算得出。

从表 2 看出,各桥实测梁体竖向自振频率与计算自振频率存在一定的差异,但都在合理的范围内,与国内外类似原型桥梁试验结果吻合。

表 2 梁体竖向自振频率汇总表

检测工点	第一阶竖向自振频率 /Hz		第一阶横向自振频率 /Hz	
	实测值	计算值	实测值	计算值
2 - 90 m 叠合拱	2.75	2.16	2.90	2.34
(70 + 3 - 120 + 70) m 连续梁	1.14	0.91	2.21	0.84
(64 + 136 + 64) m 连续梁梁拱	1.76	1.62	0.55	0.50
(80 + 3 \times 145 + 80) m 刚构连续梁	1.11	0.94	0.71	0.57
64 m 简支箱梁	2.92	2.01	1.92	2.30

4.2 跨中竖向挠跨比

跨中竖向挠跨比按《250 暂规》控制,规定梁体在 ZK 活载静力作用下,梁体的竖向挠度不应大于表 3 所列数值。

表 3 梁体的竖向挠度限值

跨度 L/m	L \leq 24	24 < L \leq 40	40 < L \leq 96
单跨	L/1 300	L/1 000	L/1 000
多跨	L/1 800	L/1 500	L/1 200

试验货物列车、CRH2 - 010A 综合检测车以 5 km/h 准静态通过时,实测挠度(扣除支座竖向位移)推算试验货物列车、CRH2 - 010A 综合检测车双线加载时跨中最大挠度,换算至中 - 活载的跨中竖向挠跨比如表 4 所示,试验货物列车与综合检测车挠跨比基本接

近 ,与设计静力计算值相差较远 ,但都大于《250暂规 》 的竖向挠度限值。

表 4 梁体竖向挠跨比汇总表

检测工点	挠跨比 (换算至中 - 活载)		静力计算值	《250暂规 》
	试验货列	综合检测车		
2 - 90 m 叠合拱	1/4 170	1/4 811	1/2 727	-
(70 + 3 - 120 + 70) m 连续梁	1/3 859	1/4 365	1/1 974	-
(64 + 136 + 64) m 连续梁梁拱	1/6 647	1/6 513	1/3 885	-
(80 + 3 ×145 + 80) m 刚构连续梁	1/5 074	-	1/1 502	-
64 m 简支箱梁	1/4 898	1/5 709	1/2 940	1/1 200

4 3 挠度动力系数

动力系数有运营动力系数和设计动力系数。实测动力系数不宜大于运营动力系数 ,即:

$$1 + \mu_{\text{实测}} \leq 1 + \mu_{\text{运营}} \tag{2}$$

《250暂规 》规定设计弯矩动力系数按下式计算:

$$1 + \mu_{\text{设计}} = \frac{1.494}{\sqrt{L_{\phi} - 0.2}} + 0.851 \tag{3}$$

式中 L_{ϕ} ——加载长度 (m)。

由于运营荷载的竖向动力作用不宜大于设计荷载的竖向动力作用 ,所以实测 $\mu_{\text{实测}}$ 乘以试验列车静荷载

竖向效应 ($P_{\text{运营}}$)不宜大于 $\mu_{\text{设计}}$ 乘以设计活载竖向效应 ($P_{\text{设计}}$) ,即:

$$\mu_{\text{实测}} \times P_{\text{运营}} \leq \mu_{\text{设计}} \times P_{\text{设计}} \tag{4}$$

雁荡山特大桥 2 - 90 m 叠合拱在 CRH2 - 010A 综合检测车作用下实测动力系数均小于运营动力系数 ,试验货列作用下个别点有超出运营动力系数的现象 ,如图 1所示 ;昆阳特大桥 (64 + 136 + 64) m 梁拱组合连续梁实测挠度动力系数有部分超出运营动力系数的现象 ,如图 2所示。其余各桥实测动力系数均小于运营动力系数。

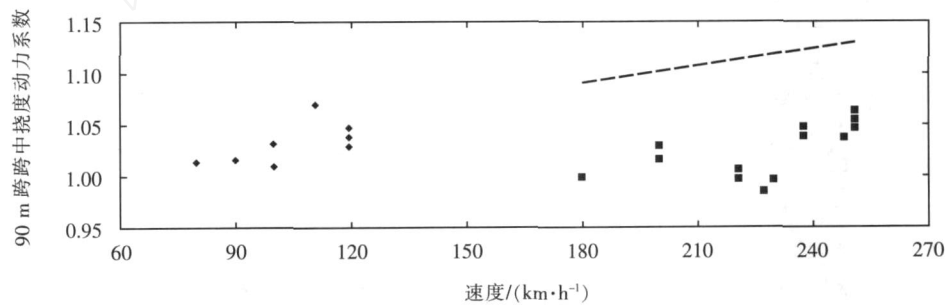


图 1 雁荡山特大桥 2 - 90 m 叠合拱实测与运营动力系数关系图

注: • 试验货列 ■ CRH2-010A 综合检测车
 —— 试验货列运营动力系数 - - - - CRH2-010A 综合检测车运营动力系数

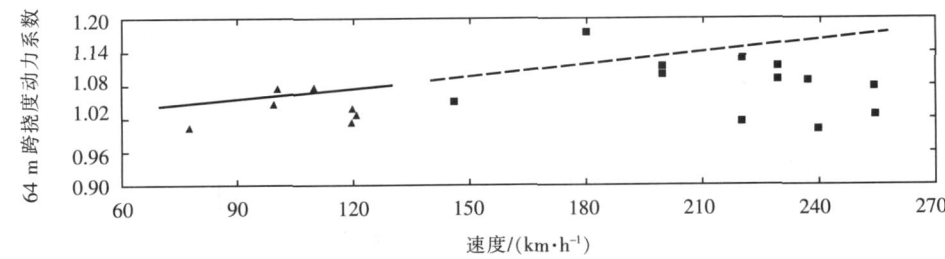


图 2 昆阳特大桥实测与运营动力系数关系图

注: ▲ 试验货列 ■ CRH2-010A 综合检测车
 —— 试验货列运营动力系数 - - - - CRH2-010A 综合检测车运营动力系数

试验货物列车、CRH2 - 010A 综合检测车作用下 , 用 ,如表 5所示 ,说明结构是安全的。实测竖向动力作用全部小于设计荷载的竖向动力作

表 5 竖向动力作用比较

检测工点	试验列车	《200暂规》
	$\mu_{\text{实测}} \times P_{\text{运营}}$	$\mu_{\text{设计}} \times P_{\text{设计}}$
2 - 90 m 叠合拱跨中	$0.03P_{\text{中活}} (110.3)$	$0.22P_{\text{中活}}$
(70 + 3 - 120 + 70) m 连续梁边跨	$0.05P_{\text{中活}} (120.3)$	$0.12P_{\text{中活}}$
(64 + 136 + 64) m 梁拱组合边跨	$0.06P_{\text{设计}} (120.3)$	$0.13P_{\text{设计}}$
64 m 简支箱梁	$0.05P_{\text{设计}} (118.6)$	$0.13P_{\text{设计}}$

4.4 梁端转角

测试列车以 5 km/h 速度通过桥梁时的梁端竖向转角,换算至中 - 活载下的梁端竖向转角,以评定是否满足梁端转角限值的要求。

试验货物列车、CRH2 - 010A 综合检测车准静态双线加载时按梁端竖向转角按暂规不应大于 2‰ 控制。实桥动测结果表明,各梁端竖向转角均小于计算值,并满足《250 暂规》要求,如表 6 所示。

表 6 换算到中 - 活载梁端转角汇总表 (单位: ‰)

检测工点	实测值		静力计算值	《250 暂规》
	试验货列	综合检测车		
2 - 90 m 叠合拱	1.53	1.33	1.67	2
(70 + 3 - 120 + 70) m 连续梁	0.31	0.30	1.01	2
(64 + 136 + 64) m 连续梁拱	0.48	0.49	1.20	2
64 m 简支箱梁	1.31	1.12	1.25	2

4.5 跨中横向振幅

梁体横向参数评价标准《桥检规》规定:预应力混凝土梁横向刚度的通常值:跨中横向振幅: $L/7.0B$ (mm) (货车: $v \leq 80$ km/h), $L/14.7B$ (mm) (客车参考值: $160 < v \leq 200$ km/h)。

实测试验货物列车、CRH2 - 010A 综合检测车作用下,梁体跨中横向振幅实测结果见表 7,远小于《桥检规》横向振幅通常值的要求。在试验车速范围内,均未发生共振现象。

表 7 实测梁体跨中横向振幅汇总表

(单位: mm)

检测工点	试验货列	《桥检规》货车通常值	CRH2 - 010A 综合检测车	《桥检规》客车通常值
2 - 90 m 叠合拱	0.330	1.15	0.032	0.55
(70 + 3 - 120 + 70) m 连续梁	0.108	2.79	0.047	1.33
(64 + 136 + 64) m 连续梁梁拱	0.214	1.49	0.038	0.71
(80 + 3 × 145 + 80) m 刚构连续梁	0.20	2.44	0.05	1.16
64 m 简支箱梁	0.18	1.22	0.05	1.02

车桥动力分析计算结果表明,各桥均具有良好的动力特性,各工况下均能够保证列车运行的安全性和舒适性要求。各桥梁体跨中横向动位移计算值见表 8。可以看出,理论计算结果与检测结果规律基本一致,但数值相差较大,这主要是因为理论计算结果为动位移,包含了因偏载所导致的静力偏心位移,而实测横向振幅只含振动位移,因此两者结果差异较大。

表 8 车桥分析梁体跨中横向动位移汇总表

(单位: mm)

计算工点	C80 货车 (80 ~ 120 km/h)	CRH2 旅客列车 (160 ~ 250 km/h)
2 - 90 m 叠合拱	1.56	0.71
(64 + 136 + 64) m 连续梁梁拱	1.51	0.66
(80 + 3 × 145 + 80) m 刚构连续梁	2.79	1.02

4.6 墩顶横向振幅

《桥检规》规定的墩顶横向振幅通常值如表 9 所示。

表 9 墩顶横向振幅通常值表

墩身尺寸特征	基础类型	墩顶横向振幅 /mm $v > 60$ km/h
低墩 $H_1/B < 2.5$	桩基础	$\frac{H}{25} + 0.4$
中高墩 $H_1/B \geq 2.5$	桩基础	$\frac{(H + h)^2}{100B} + 0.2$

注: H 为墩全高 (自基底或桩承台底至墩顶) (m); B 为墩身横向平均宽度 (m); h 为地基土特征,检测工点全部取 1。

实测试验货列、CRH2 - 010A 综合检测车作用下墩顶横向振幅汇总见表 10,均远小于《桥检规》通常值。在试验车速范围内,均未发生共振现象。

车桥动力分析的墩顶最大横向动位移计算值见表 11,计算结果表明理论计算结果与检测结果规律基本一致,但数值相差较大,这主要是因为理论计算结果为动位移,包含了因偏载所导致的静力偏心位移,而实测横向振幅只含振动位移,因此两者结果差异较大。

表 10 实测墩顶横向振幅汇总表 (单位 : mm)

检测工点	墩号	试验货列	CRH2 - 010A 综合检测车	《桥检规》通常值
2 - 90 m 叠合拱	32号 (边墩)	0.087 (119.4 km/h)	0.016 (220.4 km/h)	0.40
(70 + 3 - 120 + 70) m 连续梁	102号 (中墩)	0.090 (120.3 km/h)	0.017 (242.7 km/h)	1.41
(64 + 136 + 64) m 连续梁梁拱	47号 (中墩)	0.102 (100.5 km/h)	0.021 (240.1 km/h)	0.45
(80 + 3 × 145 + 80) m 刚构连续梁	11号 (中墩)	0.07 (117.6 km/h)	0.01 (251.3 km/h)	2.58
64 m 简支箱梁	29号 (中墩)	0.14 (118.6 km/h)	0.01 (254.2 km/h)	1.51

表 11 车桥分析墩顶横向动位移汇总表

(单位 : mm)

计算工点	C80货车 (80 ~ 120 km/h)	CRH2旅客列车 (160 ~ 250 km/h)
2 - 90 m 叠合拱	0.97	0.40
(64 + 136 + 64) m 连续梁梁拱	1.63	0.62
(80 + 3 × 145 + 80) m 刚构连续梁	1.87	1.03

4.7 梁体跨中振动加速度

梁体跨中竖向振动加速度实测结果见表 12,在试验货物列车、CRH2 - 010A 综合检测车作用下,实测梁体跨中最大竖向加速度 (20 Hz 低通数字滤波后)均满足《暂规》不应大于 3.50 m/s^2 的要求。

表 12 梁体跨中竖向加速度实测结果汇总

(单位 : m/s^2)

梁型	试验 货列	CRH2 - 010A 综合检测车	《250暂规》 限值
2 - 90 m 叠合拱	0.411	0.172	3.50
(70 + 3 - 120 + 70) m 连续梁	0.368	0.058	3.50
(64 + 136 + 64) m 连续梁梁拱	0.340	0.177	3.50
(80 + 3 × 145 + 80) m 刚构连续梁	0.15	0.10	3.50
64 m 简支箱梁	0.29	0.13	3.50

车桥动力分析的梁体跨中竖向加速度计算结果见表 13,计算表明理论计算结果与检测结果规律基本一致。

表 13 梁体跨中竖向加速度计算结果汇总 (单位 : m/s^2)

计算工点	C80货车 (80 ~ 120 km/h)	CRH2旅客列车 (160 ~ 250 km/h)
2 - 90 m 叠合拱	0.53	0.36
(64 + 136 + 64) m 连续梁梁拱	0.47	0.21
(80 + 3 × 145 + 80) m 刚构连续梁	0.31	0.17

4.8 活动支座横向位移

《200暂规》规定支座横向位移不大于 $\pm 1\text{ mm}$ 。

活动支座横向位移汇总如表 14 所示,试验货列、CRH2 - 010A 综合检测车作用下,实测活动支座的上、下摆最大相对横向位移均满足要求。

表 14 活动支座横向位移汇总表 (单位 : mm)

梁型	试验 货列	CRH2 - 010A 综合检测车	限值
(64 + 136 + 64) m 连续梁梁拱	0.05	0.04	± 1
(80 + 3 × 145 + 80) m 刚构连续梁	0.02	0.01	± 1
64 m 简支箱梁	0.02	0.01	± 1

5 结论

通过实桥动态检测结果表明,在试验货物列车、250 km/h CRH2 - 010A 综合检测车作用下,桥梁横、竖向刚度较大,动力性能较好,能够满足 120 km/h 运行安全性和平稳性的要求,可以开行 250 km/h 动车组条件。同时也表明我国目前桥梁技术规范可以满足 250 km/h 客运专线的运营要求,另一方面,实际测试结果与理论计算、设计暂规之间存在一定差异,设计标准还需要进一步通过运营实践来优化和检验。

参考文献 :

[1] TB 100002.5—2005,铁路桥涵设计基本规范[S].
TB 100002.5—2005, Code for Design of Foundation for Railway Bridges and Culverts[S].
[2] 铁运函[2004]120号,铁路桥梁检定规范[S].
TY[2004]No.120, Code for Rating Existing Railway Bridges[S].
[3] 铁建设函[2005]285号,新建时速 200 公里客货共线铁路设计暂行规定[S].
TJ[2005]No.285, Temporary Design Code for a New 200 km/h Passenger and Freight Railway[S].
[4] 铁建设函[2005]140号,新建时速 200 ~ 250 公里客运专线铁路设计暂行规定[S].
TJ[2005]No.140, Temporary Design Code for a New 200 - 250 km/h Passenger Railway[S].

(下转第 75 页)

- [5] 杨照辉. 高速铁路电力系统中性点接地方式探讨 [J]. 电气化铁道, 2007(1): 10 - 13.
Yan ZhaoHui. Study on Neutral Grounding Mode in High - speed Railway Power System [J]. Electric Railway, 2007(1): 10 - 13
- [6] 刘庆, 等. 关于 10kV 配电系统中性点经小电阻接地方式的探讨 [J]. 电气开关, 2007(3): 5 - 7.
Liu Qing, etc. Discussion on Grounding Way of 10kV Distribution System Neutral Point Through Low Resistance [J]. Electric Switcher, 2007(3): 5 - 7.
- [7] 廖宇. 全电缆贯通线低电阻接地系统的设计研究 [J]. 铁道工程学报, 2009(8): 88 - 92, 95.
Liao Yu. Research on the Design of Low Resistance Grounding System for Entire Cable Power Line along the Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009(8): 88 - 92, 95
- [8] 赵冉. 配电网中性点接地方式分析 [J]. 继电器, 2007(4): 22 - 25.
Zhao Ran. Analysis of Neutral Grounding Operation Modes for Distribution Network [J]. Relay, 2007(4), 22 - 25.
- [9] 成健, 等. 基于 10 kV 中性点经小电阻接地的启示 [J]. 山西电力, 2006(1): 14 - 16.
Cheng Jian, etc. Piration Based on 10 kV Neutral - point Earthing Through Minute Resistance [J]. Shanxi Electric Power, 2006(1): 14 - 16
- (编辑 梅志山)

(上接第 57 页)

- [5] 铁建设函 [2005] 47 号, 新建时速 300 ~ 350 公里客运专线铁路设计暂行规定 [S].
TJ [2007] No 47, Temporary Design Code for a New 300 - 350 km / h Passenger Railway [S].
- [6] 杨宜谦, 孟鑫, 等. 甬台温、温福铁路动态检测报告 [R]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2009.
Yang Yiqian, Meng Xin, et al Dynamic Detection Report of Ningbo - Taizhou - Wenzhou Railway [J], Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2007.
- [7] 杨宜谦, 刘鹏辉, 等. 温福 (浙江段、福建段) 铁路动态检测报告 [R]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2009.
Yang Yiqian, Liu Peng, et al Dynamic Detection Report of Wenzhou - Fuzhou Railway (in Zhejiang province and Fuzhou province) [J]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2009.
- [8] 卫星, 等. 大跨度铁路无砟轨道桥梁动力性能试验研究 [J]. 中国铁道科学, 2008(5): 40 - 45.
Wei Xing, et al Test Study on the Dynamic Performance of Long - span Railway Bridge with Ballastless Track [J], China Railway Science, 2008(5): 40 - 45.
- [9] 杨宜谦, 等. 常用跨度无砟轨道铁路桥梁动力性能试验研究 [J]. 中国铁道科学, 2008(4): 47 - 51.
Yang Yiqian, et al Experimental Study on the Dynamic Behaviors of Ballastless Track Railway Bridge with Common Spans [J]. China Railway Science, 2008(4): 47 - 51.
- [10] 徐升桥, 等. 铁路客运专线桥梁的动力性能研究 [J]. 铁道标准设计, 2005(7): 26 - 29.
Xu Shengqiao, et al Dynamic Performance Research of Passenger Railway [J]. Railway Standard Design, 2005(7): 26 - 29.
- (编辑 梅志山)