

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2020.05.020

基于风车桥耦合振动分析的刚构拱桥优化设计

何建梅¹, 郭敏¹, 郭向荣², 陈亮¹

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 广州 510010; 2. 中南大学 土木工程学院, 长沙 410075)

摘要: 以广州地铁 14 号线大跨度 150 m 刚构拱桥为例, 建立风荷载作用下大跨度刚构拱桥的车桥耦合动力分析模型, 并根据势能驻值原理及形成结构矩阵的“对号入座法则”, 采用计算机模拟的方法, 计算与分析该桥列车通过时的桥梁动力响应和列车走行性, 通过多方案比选, 分别得出各桥梁方案的行车安全性及舒适性指标, 最终提出优化设计方案。研究结果可为大跨度刚构拱桥的动力设计提供理论依据。

关键词: 城市轨道交通; 风荷载; 车桥动力分析

中图分类号: U231.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2020)05-0118-05

Wind-Vehicle-Bridge Coupling Dynamic Analysis of Rigid Frame Arch Bridge

HE Jianmei¹, GUO Min¹, GUO Xiangrong², CHEN Liang¹

(1. Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510010;

2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075)

Abstract: Taking the long span rigid frame arch bridge of Guangzhou rail transit as an example, a vehicle-bridge dynamic analysis model under wind load was established. This model was based on the principle of total potential energy with stationary value in an elastic system and the “set in right position” rule for the formulation of system matrixes. By using a computer simulation method, the bridge dynamic response and train running performance were calculated and analyzed in detail when trains run over the bridge to identify an optimum design scheme, and the results provided a theoretical basis for the dynamic design of a rigid frame arch bridge.

Keywords: urban rail transit; wind load; vehicle-bridge dynamic analysis

轨道交通具有运量大、速度快、安全舒适等优势, 在经济社会发展中发挥重要作用。高架桥是轨道交通的主要结构形式之一, 其穿越或者位于居民区, 相关研究表明, 列车通过曲线桥时, 产生的振动相对于直线桥梁而言, 更加复杂。列车会承受侧向风力和倾覆力矩的作用, 风力引起的桥梁响应对车辆产生激励作用, 车辆由于风的作用而产生的响应同时也会对桥梁的振动产生影响, 车桥耦合振动特性必然因风的参与而发生改变^[1]。因此, 轨道交通大跨度曲线桥梁风-

车-桥耦合振动及其影响分析研究具有十分重要的理论意义和工程实用价值。

1 工程概况

广州市轨道交通 14 号线 150 m 大跨连续刚构拱桥, 全长 310 m, 以 150 m 为主跨斜跨广从公路。该桥平面位于半径 500 m 的圆曲线及圆缓曲线上, 竖曲线上的线路坡度由梁体形成, 为(80+150+80) m 连续刚构拱桥, 全长 310 m, 全桥结构布置如图 1 所示。上部结构采用单箱单室斜腹板箱梁截面, 梁顶宽 10 m, 中跨主梁底板宽 4.0 m, 边跨梁底宽由 2.4 m 渐变为 4.0 m。梁截面布置如图 2 所示。桥墩采用矩形截面, 桩基础。墩截面布置如图 3 所示。14 号线最高运行速

收稿日期: 2019-11-24 修回日期: 2020-05-06

第一作者: 何建梅, 女, 硕士, 从事轨道交通桥梁设计理论与技术的研究, 13553610@qq.com

度为 120 km/h, 本桥靠近车站且处于曲线段, 列车最高运行速度 85 km/h, 按惯例计算最高速度外延 20%

后为 105 km/h。列车编组: 初、近、远期采用 6 辆编组, 列车采用 B 型车, 轴重 140 kN。

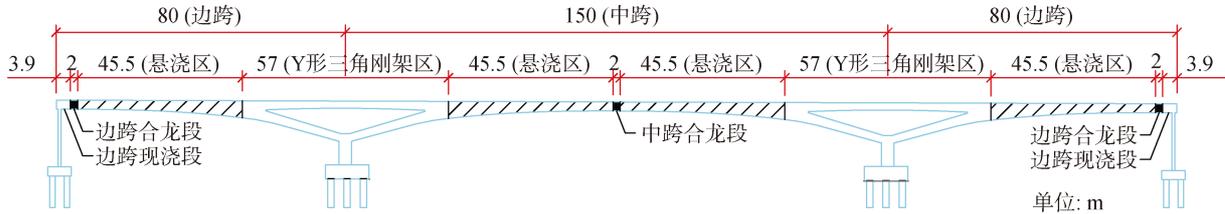


图 1 全桥结构布置
Fig. 1 Structural layout

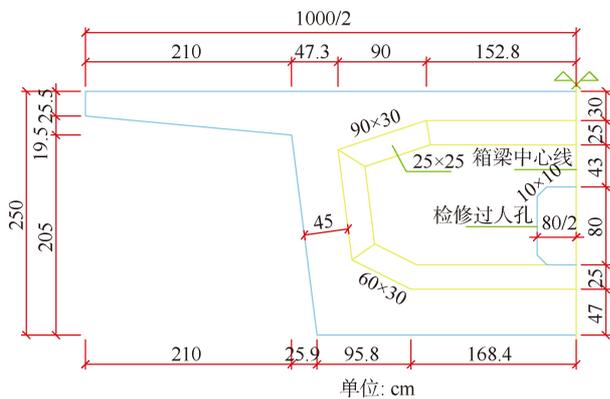


图 2 跨中梁截面布置
Fig. 2 Midspan section layout

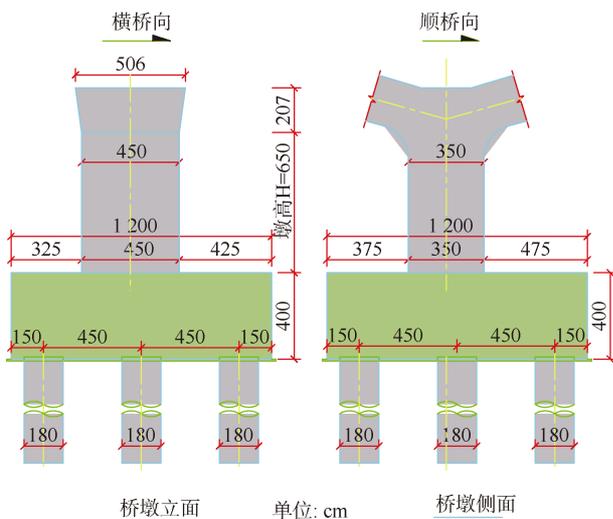


图 3 大跨度刚构拱中墩
Fig. 3 Middle pier of rigid frame arch

针对 150 m 大跨连续刚构拱桥的原始方案和改进方案分别进行动力特性及列车走行性分析与计算, 提出最优方案。

经计算发现原设计方案存在动力响应偏大、部分安全性及舒适性指标不满足要求的现象, 为此在原设

计方案的基础上进行了大量的改进方案试验计算, 并将第 4 种改进方案作为推荐方案, 各改进方案如下:

方案 1: 主梁所有底板由 4.0 m 宽修改为 5.0 m; 其他尺寸同原方案。原方案梁截面布置见图 2。

方案 2: 在方案 1 的基础上, 将边墩墩顶截面横桥向长度修改为 5.0 m, 墩底截面横向长度修改为 4.5 m, 中墩墩顶横桥向长度修改为 5.0 m, 墩底截面横向长度修改为 4.5 m。其他尺寸同原方案。如图 3 所示。

方案 3: 在方案 2 的基础上, 将边墩桩距增加到如图 4 所示。其他尺寸同原方案。

方案 4(推荐): 在方案 2 的基础上, 将右边墩(位于曲线半径较小的一端)在横桥向增设一排直径为 1.5 m 的桩, 如图 4 所示。其他尺寸同原方案。

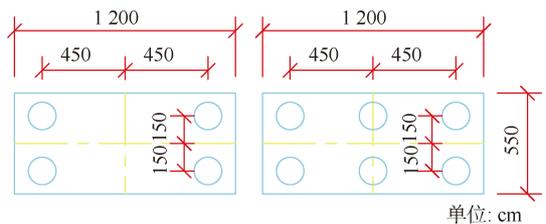


图 4 桩基布置
Fig. 4 Pile foundation layout of improved scheme

2 刚构拱桥梁空间振动分析模型

对于全桥采用梁、板单元建模, 桩基础采用空间梁元建模, 采用 m 法考虑桩土共同作用。分析模型确定后, 就可由动力学势能驻值原理及形成矩阵的“对号入座”法则^[2], 建立桥梁刚度、质量、阻尼等矩阵。桥梁的有限元空间分析模型^[3]如图 5 所示。

3 列车安全、舒适和平稳性运行指标

采用脱轨系数、轮重减载率判断列车运行安全性, 用 Sperling 指标判断乘坐舒适性(或运行平稳性)。

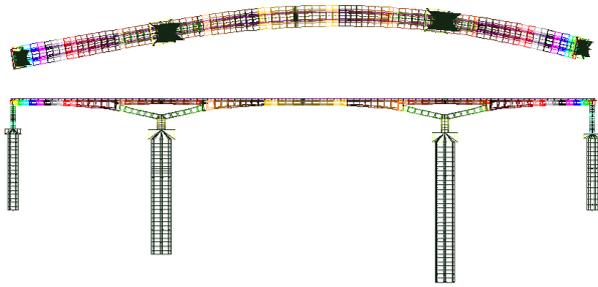


图 5 刚构拱桥梁空间振动分析模型
Fig. 5 Spatial vibration analysis model

根据《铁道机车动力学性能试验鉴定方法及评定标准》(TB/T 2360—93)^[4]、《铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范》(GB 5599—85)^[5]，并参考历次提速试验所采用的评判标准，在车桥动力仿真分析中，列车运行安全性与舒适性(平稳性)的评定指标选取见表 1。

表 1 列车运行安全性与舒适性评定指标
Tab. 1 Train operation safety and comfortable evaluation index

列车安全性指标	乘坐舒适性指标	舒适性评价指标
脱轨系数 ≤ 0.8	竖向 $\leq 0.25g$	优良 ≤ 2.5
轮重减载率 ≤ 0.6	横向 $\leq 0.20g$	良好 $\leq 2.50 \sim 2.75$
		合格 2.75~3.00

4 计算结果

根据前述计算模型与计算原理，本报告针对上述桥梁的全桥分析模型，当 B 型车通过桥梁时的风-车-桥系统空间耦合振动动力响应进行了仿真计算与分析研究，该桥设计车速为 85 km/h，检算为 105 km/h，列车编组及计算工况见表 2。

表 2 列车编组及计算工况

Tab. 2 Train formation and calculation conditions

列车	列车编组	计算车速/(km/h)	轨道不平顺
B 型车	6 辆编组 动+拖+动+动+拖+动	65, 75, 85, 95, 105	美国六级谱模拟轨道不平顺

采用全桥分析模型分别计算了系统在无风、风速为 15、20、25、30 和 35 m/s 情况下，桥梁的竖向与横向位移、车辆竖向与横向加速度、轮对最大横向力、轮对脱轨系数、轮重减载率等。计算中轨道不平顺函数采用了美国六级谱不平顺标准^[6]。直线电机车辆对轨道冲击作用产生振动，通过结构(桥梁墩台、轨道、轨道梁)传递，诱发二次振动。

4.1 刚构拱桥桥梁自振特性分析

蛇行运动是列车行驶导致桥梁横向振动的最主要原因之一。正常情况下，车轮轮缘在横向始终被钢轨约束在一定的“游间”内蛇形运动前进，轮缘始终不爬上(或冲上)钢轨顶部，列车不脱轨，车轮这种蛇形运动状态是稳定的，列车-桥梁(轨道)时变系统的横向振动是稳定的。当桥梁横向自振频率与列车蛇形运动频率接近，列车、桥梁(包括桥梁的上部结构、墩台和基础)及其线路整个系统共同耦合作用，列车及桥梁将出现大振幅的剧烈振动，表现出桥梁横向振幅超限。此时，车轮轮缘一旦爬上(或冲上)钢轨顶部，则车轮横向运动失去钢轨约束，迅速冲至轨外而脱轨掉道，列车-桥梁(轨道)时变系统的横向振动出现失稳，影响行车安全^[7-8]。

为确保行车的舒适性及安全性，轨道交通桥梁在设计上应使桥梁结构横向自振频率尽可能避开列车蛇形运动频率(0.6~0.8 Hz)^[9-10]。

根据前述 4 个桥梁方案的计算模型，对广州市轨道交通 14 号线 150 m 大跨连续刚构拱桥的自振特性进行了计算，桥梁的主要振型特点见表 3。

表 3 连续刚构拱桥 4 个方案自振频率

Tab. 3 Natural frequency of rigid frame arch bridge

序号	自振频率/Hz				
	原方案	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
1	0.677 4	0.722 5	0.765 6	0.767 5	0.768 4
2	0.878 2	0.890 0	0.952 3	0.953 5	0.953 5
3	0.926 9	0.954 1	1.079 6	1.090 2	1.094 6
4	0.985 0	1.011 0	1.108 9	1.236 1	1.237 8
5	1.026 1	1.038 3	1.199 0	1.384 9	1.385 9

4.2 风-车-桥系统动力特性计算分析

表 4 给出了原设计方案及方案 4 在无风状态和各风速下的桥梁响应最大值，表中振动位移值均为相对于初始平衡位置而言。

计算结果表明，桥梁动力响应总体随着行车速度的提高而增加，如桥墩墩顶最大横向及竖向动位移、梁端转角都呈现出随车速增加而增大的趋势。有风工况下的桥梁响应均大于无风工况，桥梁的动力响应均在容许值以内。在给定车速下，桥墩墩顶桥梁横向最大位移和加速度随着风速的增加呈单调递增。

方案 4 的桥梁动力响应小于原设计方案的动力响应。

表 4 桥梁响应最大值汇总

Tab. 4 Summary of maximum values

方案	风速/(m/s)	桥墩墩顶横向位移/mm	桥墩墩顶横向加速度/(m/s ²)	梁端转角/(10 ⁻⁴ rad)	
				竖向	横向
原方案	无风	13.14	0.72	9.12	1.13
	20	13.97	0.66	9.36	0.87
	25	14.34	0.64	9.67	0.92
	30	14.73	0.61	10.02	0.99
方案 4	无风	3.23	0.29	6.33	1.05
	20	3.25	0.28	6.32	0.96
	25	3.28	0.28	6.47	1.01
	30	3.31	0.28	6.65	1.07

4.3 车辆动力响应

表 5 给出了无风状态下和各风速下的动车车辆响应最大值。

表 5 动车动力响应最大值

Tab. 5 Maximum dynamic response of motor vehicle

方案	风速/(m/s)	脱轨系数 Q/P	轮重减载率 ΔP/P	竖向加速度/(m/s ²)	横向加速度/(m/s ²)	舒适性	
						竖向	横向
原方案	无风	0.40	0.47	0.98	0.99	2.97	2.94
	20	0.49	0.55	1.08	1.20	3.03	3.01
	25	0.60	0.61	1.19	1.26	3.09	3.16
	30	0.77	0.80	1.33	1.34	3.23	3.36
方案 4	无风	0.36	0.42	0.87	0.88	2.71	2.69
	20	0.44	0.49	0.96	1.07	2.76	2.75
	25	0.53	0.54	1.06	1.12	2.82	2.88
	30	0.69	0.71	1.18	1.19	2.95	3.07

表 6 给出了无风状态和各风速下的拖车车辆响应最大值。

表 6 拖车动力响应最大值

Tab. 6 Maximum dynamic response of trailer

方案	风速/(m/s)	脱轨系数 Q/P	轮重减载率 ΔP/P	竖向加速度/(m/s ²)	横向加速度/(m/s ²)	舒适性	
						竖向	横向
原方案	无风	0.36	0.54	1.01	1.03	2.93	2.94
	20	0.67	0.61	1.19	1.18	2.97	2.98
	25	0.63	0.65	1.22	1.28	3.04	3.04
	30	0.95	0.83	1.39	1.31	3.31	3.16
方案 4	无风	0.32	0.48	0.90	0.92	2.68	2.69
	20	0.60	0.54	1.06	1.05	2.72	2.73
	25	0.56	0.58	1.09	1.14	2.78	2.78
	30	0.85	0.74	1.24	1.17	3.03	2.89

计算结果表明如下：

1) 原方案及 4 个改进方案在无风条件下具有良好的动力特性及列车走形性，能满足安全性和舒适性的各项要求，计算结果详见表 4、5、6 及图 6、图 7。

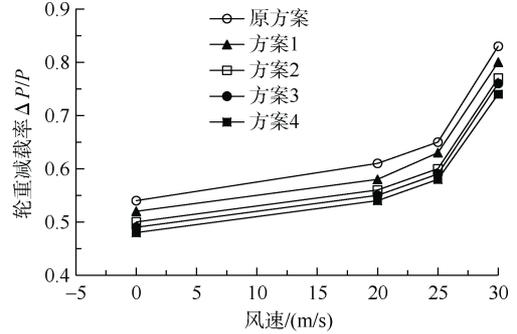


图 6 刚构拱桥轮重减载率

Fig. 6 Wheel load reduction rate

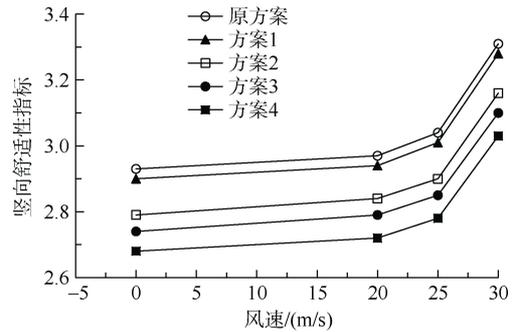


图 7 刚构拱桥竖向舒适性评价指标

Fig. 7 Vertical comfort evaluation index

2) 原方案、方案 1 在风速 25 m/s 作用下的行车安全性不满足要求；方案 2、方案 3 在风速 25 m/s 作用下的某些指标接近容许值，建议优化设计方案，计算结果详见图 6。

3) 方案 4 当桥面平均风速等于或低于 20 m/s，B 型车以 65~105 km/h 通过该桥时，桥梁的动力响应均在容许值以内，列车行车安全性满足要求，列车的车体竖、横向振动加速度满足限值要求，列车乘坐舒适性除个别以外基本达到“良好”标准以上，故可畅通运行。

4) 方案 4 当桥面平均风速达到 25 m/s(即八级风)，B 型车以 65~85 km/h 通过该桥时，桥梁的动力响应均在容许值以内，列车行车安全性满足要求，以 95~105 km/h(检算速度)通过该桥时，列车行车安全性不满足要求，可限速 70 km/h 通行(按 85 km/h 作为检算速度反算其最高运营速度约 70.8 km/h)。

5) 方案4当桥面平均风速达到30 m/s(即九级风), B型车以65~105 km/h通过该桥时, 桥梁的动力响应均在容许值以内, 但列车行车安全性不满足要求, 故不能通行, 列车停运。

6) 由于该桥是变半径曲线连续刚构桥, 右侧边墩处的半径最小, 会在此处产生较大的离心力效应, 方案4(推荐)是在方案1及方案2的基础上, 将右侧墩(位于曲线半径较小的一端)在横桥向增设一排直径为1.5 m的桩基(详见图4), 使得方案4与原方案相比, 桥梁刚度尤其是曲线半径较小一端的桥梁刚度得到了较大提高, 降低了轮重减载率和舒适度指标计算结果, 显著地改善了列车的走行性。

5 结语

通过对广州轨道交通150 m大跨度刚构拱桥的优化设计, 并进行风-车-桥耦合振动分析, 得到以下结论:

1) 通过风车桥耦合振动分析优化原150 m大跨度拱桥的设计(方案4), 将梁底、墩顶横向宽度由2.4 m(4 m中墩)调整为5 m, 墩底横向宽度由3.5 m调整为4.5 m, 边墩底横向增加一排桩基, 由4Φ1.5 m调整为6Φ1.5 m。

2) 方案4(推荐方案)列车在有风条件下通过桥梁时, 当桥面平均风速等于或低于20 m/s时可畅通运行, 当桥面平均风速达到25 m/s时, 可限速70 km/h通行, 当桥面平均风速达到30 m/s, 禁止通行。

参考文献

- [1] 曾庆元, 郭向荣. 列车桥梁时变系统振动分析理论与应用[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999.
ZENG Qingyuan, GUO Xiangrong. Theory and application of train-bridge time-variant system vibration analysis[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1999.
- [2] 曾庆元, 杨平. 形成矩阵的“对号入座”法则与桁段有限元法[J]. 铁道学报, 1986, 8(2): 48-59.
ZENG Qingyuan, YANG Ping. The “set-in-right-position” rule for formulating matrix and the truss finite element method for spatial truss analysis[J]. Journal of the railway society, 1986, 8(2): 48-59.
- [3] 王柳, 郭向荣. 三塔悬索桥风-车-桥耦合动力分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2012, 9(1): 24-29.
WANG Liu, GUO Xiangrong. The wind-vehicle-bridge coupling dynamic analysis of three tower suspension bridge[J]. Journal of railway science and engineering, 2012, 9(1): 24-29.
- [4] 王宗林, 高庆飞, KOH Chan Ghee, 等. 移动车辆荷载作用下大跨径连续梁桥动力响应研究[J]. 桥梁建设, 2015, 45(2): 46-52.
WANG Zonglin, GAO Qingfei, KOH Chan Ghee, et al. Dynamic responses of long span continuous girder bridges under action of moving vehicle loads[J]. Bridge construction, 2015, 45(2): 46-52.
- [5] 铁道机车动力学性能试验鉴定方法及评定标准: TB/T 2360—1993[S]. 北京: 中国铁道出版社, 1993.
Railway locomotives - specification for evaluation the dynamic performance and accreditation test: TB/T 2360—1993[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 1993.
- [6] 机动车辆动力学性能评定及试验鉴定规范: GB/T 5599—2019[S]. 北京: 中国铁道出版社, 1993.
Specification for dynamic performance assessment and testing verification of rolling stock: GB/T 5599—2019[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 1993.
- [7] 曾庆元, 周智辉, 赫丹, 等. 列车-轨道(桥梁)系统横向振动稳定性分析[J]. 铁道学报, 2012, 34(5): 86-90.
ZENG Qingyuan, ZHOU Zhihui, HE Dan, et al. Study on Stability of Lateral Vibration of Train-track (bridge) System[J]. Journal of China railway society, 2012, 34(5): 86-90.
- [8] 周智辉, 曾庆元, 向俊. 桥梁横向刚度对列车走行安全性的影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2005, 2(2): 30-33.
ZHOU Zhihui, ZENG Qingyuan, XIANG Jun. Influence on security of moving train on bridge caused by bridge lateral rigidity[J]. Journal of Railway Science and engineering, 2005, 2(2): 30-33.
- [9] 池茂儒, 张卫华, 曾京, 等. 蛇行运动对铁道车辆平稳性的影响[J]. 振动工程学报, 2008, 21(6): 639-643.
CHI Maoru, ZHANG Weihua, ZENG Jing, et al. Influence of hunting motion on ride quality of railway vehicle[J]. Journal of vibration engineering, 2008, 21(6): 639-643.
- [10] 程潜, 张楠, 夏禾, 等. 轮对蛇形运动及对车-桥耦合振动的影响[J]. 北京交通大学学报, 2013, 37(1): 95-101.
CHENG Qian, ZHANG Nan, XIA He, et al. Wheel-set hunting movement and its contribution to coupling vibration of vehicle-bridge system[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2013, 37(1): 95-101.

(编辑: 郝京红)