

文章编号: 1000-4750(2014)10-0077-08

考虑桥塔风效应的多塔斜拉桥抖振响应分析

丁幼亮¹, 胡心一¹, 张志强¹, 宋建永², 李万恒², 张文明¹, 王玉倩²

(1 东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 南京 210096; 2. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

摘 要: 该文以6塔斜拉桥——嘉绍大桥为研究对象, 基于ANSYS瞬态动力学分析功能进行了嘉绍大桥风致抖振响应的非线性时域分析, 研究了多塔斜拉桥主梁和桥塔在强风作用下的抖振响应特性, 并详细考察了自激力和桥塔风效应对主梁和桥塔抖振响应的影响。分析结果表明: 1) 主梁与桥塔的风致抖振响应与结构的振动特性联系紧密, 其抖振响应由于主梁与桥塔的动力耦合作用呈现出一定的独特性; 2) 考虑自激力后主梁竖向抖振响应明显减小, 而对主梁横桥向和扭转抖振响应影响相对较小。同时, 自激力对桥塔的横桥向抖振响应基本没有影响, 但对桥塔的顺桥向抖振响应起到了明显的抑制作用; 3) 桥塔风效应对主梁的竖向和扭转抖振响应以及桥塔的顺桥向抖振响应基本没有影响, 但会对主梁和桥塔的横桥向抖振响应产生较大影响。

关键词: 多塔斜拉桥; 桥塔; 抖振响应; 时域分析; 自激力**中图分类号:** TU352 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.03.0270

BUFFETING RESPONSE OF MULTI-TOWER CABLE-STAYED BRIDGE CONSIDERING BRIDGE TOWER WIND EFFECTS

DING You-liang¹, HU Xin-yi¹, ZHANG Zhi-qiang¹, SONG Jian-yong², LI Wan-heng²ZHANG Wen-ming¹, WANG Yu-qian²

(1. Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structures of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

Abstract: With regard to a six-tower cable-stayed bridge- Jiashao Bridge, the nonlinear wind-induced buffeting response of the bridge was analyzed through time domain analysis based on the transient dynamics analysis of ANSYS. The buffeting response characteristics of the main girder and bridge towers under strong wind action were investigated and the influences of wind-excited force and bridge tower wind effect on the main girder and bridge towers were investigated respectively. The analysis results reveal that: 1) The wind-induced buffeting responses of the main girder and bridge towers are closely related with the structural dynamic properties. Due to the dynamic coupling action between the main girder and bridge towers, the structural buffeting responses present certain uniqueness; 2) Due to the effect of wind-excited force, the vertical buffeting response of the main girder becomes obviously smaller, but the transverse and torsional buffeting displacements have little difference. For bridge towers, the wind-excited force has no effect on the transverse buffeting response, but it plays a significant role in reducing the longitudinal buffeting response; 3) The bridge tower wind effect has no effect on the vertical

收稿日期: 2013-03-26; 修改日期: 2013-08-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178100, 51208104); 交通运输部科技项目(2011318223170, 2013319223120)

通讯作者: 丁幼亮(1979—), 男, 江苏人, 研究员, 博士, 博导, 从事结构健康监测和防灾减灾研究(E-mail: civilding@163.com).

作者简介: 胡心一(1987—), 男, 辽宁人, 硕士生, 从事大跨桥梁抗风性能研究(E-mail: 749109006@qq.com);

张志强(1969—), 男, 辽宁人, 副教授, 博士, 从事结构振动控制研究(E-mail: civilding@163.com);

宋建永(1977—), 男, 内蒙古人, 研究员, 博士, 从事桥梁结构安全与防灾减灾研究(E-mail: 623151019@163.com);

李万恒(1972—), 男, 山东人, 研究员, 硕士, 从事桥梁结构安全与防灾减灾研究(E-mail: wh.li@rioh.cn);

张文明(1983—), 男, 河南人, 讲师, 博士, 从事大跨桥梁抗风性能研究(E-mail: wenmingzhang@hotmail.com);

王玉倩(1984—), 男, 陕西人, 助理研究员, 博士, 从事桥梁结构安全与防灾减灾研究(E-mail: yuqian.wang@rioh.cn).

and torsional buffeting displacement of the main girder and the longitudinal buffeting response of bridge towers, but it makes significant difference in the transverse buffeting responses of the main girder and bridge towers.

Key words: multi-tower cable-stayed bridge; bridge tower; buffeting response; time-domain analysis; wind-excited force

随着我国沿海经济的持续高速发展,连接我国各大沿海经济区的跨海通道建设和规划正渐入高潮。在跨海工程建设方案中,多塔斜拉桥体系具有塔多联长的布置形式,可以在满足通航的基础上避免深水基础。因此,多塔斜拉桥体系越来越受到建设者们的青睐^[1]。然而,相比普通两塔斜拉桥,多塔斜拉桥体系刚度不足,已经成为发展多塔斜拉桥这一桥型所面临的关键问题^[2]。特别是我国沿海处于强台风活跃区,我国跨海工程采用多塔斜拉桥结构方案的抗风安全问题尤其突出。因此,结合多塔斜拉桥体系刚度特点,深入研究强台风作用下多塔斜拉桥结构的风致抖振性能,保障多塔斜拉桥的安全运营与抗灾能力,具有重要的学术价值和应用价值。

目前强台风作用下大跨桥梁风致抖振分析大多采用时域分析方法,即将作用于桥梁上的风荷载,包括静风力、抖振力和自激力三个部分转化为时间序列,通过动力有限元方法得到结构抖振响应的时程,可计入几何非线性和气动力非线性等各种频域方法所不能考虑的因素,由于考虑因素较为全面,时域法已成为桥梁抖振计算的发展方向。另一方面,以往大跨桥梁抖振时域分析往往忽略了桥塔风效应的影响,仅考虑主梁脉动风速场对结构的影响。随着桥梁跨度的增加以及桥塔高度的增大,桥塔与主梁的动力耦合作用更趋显著,需要在桥梁抖振分析时考虑桥塔风效应的影响^[3-4]。

综上所述,本文以嘉绍大桥为工程背景,基于 ANSYS 平台进行该桥风致抖振响应的非线性分析,研究多塔斜拉桥主梁和桥塔在强风作用下的抖振性能,详细分析多塔斜拉桥主梁和桥塔的动力耦合作用特征,以及自激力对多塔斜拉桥风致抖振响应

的影响特征,在此基础上重点研究桥塔风效应对多塔斜拉桥主梁和桥塔抖振响应的影响,所得分析结果为今后同类桥梁的设计及建设提供重要参考。

1 工程背景

1.1 嘉绍大桥工程概况

嘉绍大桥南起绍兴上虞,跨经钱塘江水域,北至嘉兴海宁,全长 10.137km,为 6 塔、独柱、4 索面斜拉桥。主桥桥长 2680m,跨径布置为 70m+200m+5×428m+200m+70m,桥塔平均高度为 170m。主桥采用分离式钢箱梁横断面,每间隔一段距离(约为 30m)设置一道箱形横梁和工字形横梁,桥面总宽度 55.6m。该桥在设计时为解决竖向刚度不足以及过长主梁所导致的温度变形等问题,采用了 4 种加劲方式和构造措施:① 索塔两侧主梁设置纵向双排支座;② 边跨设置一个辅助墩;③ 主梁跨中处设置抽屉型刚性铰;④ 次边塔处设置塔梁纵向约束。

1.2 有限元分析模型

采用 ANSYS 有限元软件建立嘉绍大桥的有限元分析模型,如图 1 所示。主梁、主塔和桥墩均采用空间梁单元模拟。主梁采用双梁式力学模型,桥面铺装、防撞栏以及主梁压重等模拟为集中质量,并考虑主梁转动惯量的影响。拉索采用空间桁架单元模拟,考虑拉索垂度效应,采用 Ernst 公式修正拉索的弹性模量。主塔、拉索和桥墩考虑恒载引起的轴力对几何刚度的影响。桩土效应采用 J. Penzien 质量-弹簧模型来模拟。在主梁跨中,以左右两联主梁梁端节点的主从约束模拟刚性铰。主梁与过渡墩、辅助墩纵向相对自由,横向主从约束。主梁与各主塔在横向主从约束,次边塔(塔 2 和塔 5)与主梁纵向固结,其余塔与主梁纵向约束释放。

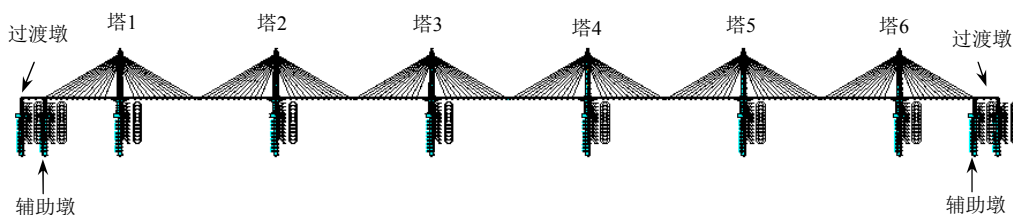


图 1 嘉绍大桥有限元模型

Fig.1 Finite element model of Jiashao bridge

2 嘉绍大桥风致抖振响应分析

2.1 风致抖振时域分析方法

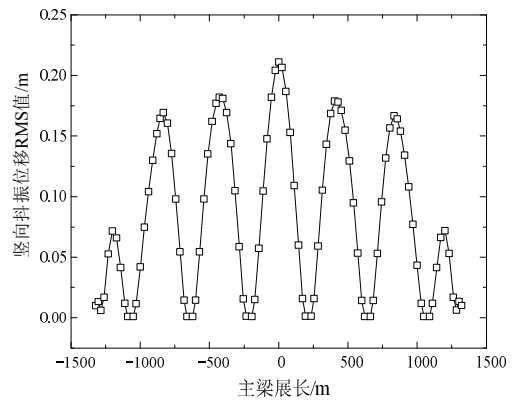
基于 ANSYS 的瞬态动力学分析功能, 进行嘉绍大桥风致抖振响应的非线性时域分析, 具体步骤包括^[5-7]: ① 嘉绍大桥三维脉动风场模拟; ② 采用实测静力三分力系数计算静风力, 抖振力计算则采用 Scanlan 抖振力修正模型; ③ 采用 Scanlan 自激力模型计算自激力, 并根据颤振导数和风速数据等确定其气动刚度项和气动阻尼项; ④ 将风荷载施加到嘉绍大桥有限元分析模型上, 进行瞬态动力学求解, 并计入几何非线性的影响; ⑤ 查看嘉绍大桥的抖振响应分析结果, 求出统计量如抖振响应 RMS 值等。为了准确计算嘉绍大桥主梁和桥塔的风致抖振响应, 将嘉绍大桥的脉动风场简化为包含主梁横桥向、竖向及 6 个桥塔横桥向在内的 8 个独立的一维多变量随机风场, 在此基础上开展嘉绍大桥主梁和桥塔的风致抖振时域分析。嘉绍大桥风致抖振响应计算时, 三分力系数、气动导数等计算参数的选取引用了文献[8]中的风洞试验数据。

2.2 主梁抖振响应分析结果

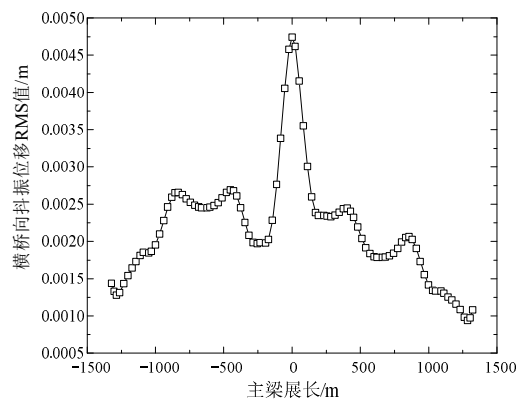
首先采用分块 Lanczos 法计算嘉绍大桥动力分析模型的自振特性, 分析结果表明: ① 嘉绍大桥的基频为 0.2274Hz, 对应于主梁一阶对称竖弯和桥塔纵向对称弯曲耦合振型; 第 2 阶频率为 0.2615Hz, 对应于主梁一阶反对称竖弯和桥塔纵向反对称弯曲耦合振型; ② 主塔一阶侧弯振型出现在第 3 阶, 其频率为 0.2894Hz, 这说明主塔的侧向刚度较小; ③ 主梁的一阶对称侧弯振型出现在第 21 阶, 并伴随有桥塔的对称侧弯, 其频率为 0.7087Hz。主梁的一阶侧弯频率大于一阶竖弯频率, 反应了主梁的面外刚度大于面内刚度; ④ 主梁的一阶扭转振型出现在第 43 阶, 频率为 1.1361Hz, 其于一阶竖弯频率的比值为 4.996, 说明结构具有良好的抗风稳定性。

在嘉绍大桥动力特性分析的基础上, 对该桥进行设计基准风速下的抖振时域分析。图 2 给出了主梁竖向、横向和扭转位移抖振响应的 RMS 值。从图 2 可以看出: ① 主梁竖向抖振位移响应的 RMS 值呈现较好的对称性, 并且两个边跨跨中的抖振响应值明显小于中间 5 跨跨中响应值; ② 主梁横向抖振位移响应的 RMS 值没有对称性, 并且主梁中跨的抖振响应值明显大于其他各跨抖振响应值。这

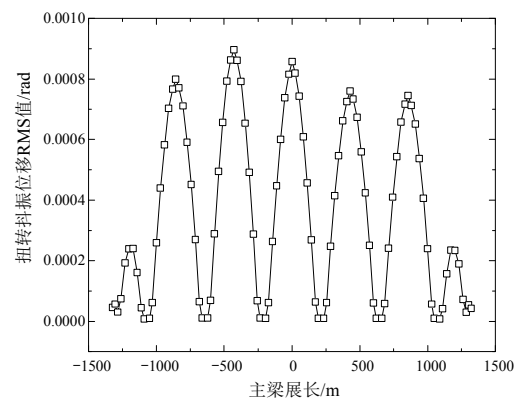
主要是由于刚性铰的设置导致主梁中跨侧弯刚度减小, 横向抖振位移相应增大; ③ 主梁扭转抖振位移响应的 RMS 值也呈现较好的对称性, 并且主梁左半部分的抖振响应值要略大于右半部分。



(a) 竖向抖振位移 RMS 值



(b) 横向抖振位移 RMS 值



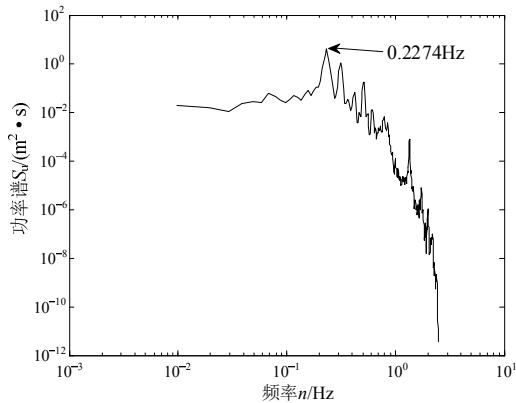
(c) 扭转抖振位移 RMS 值

图 2 嘉绍大桥主梁抖振位移 RMS 值

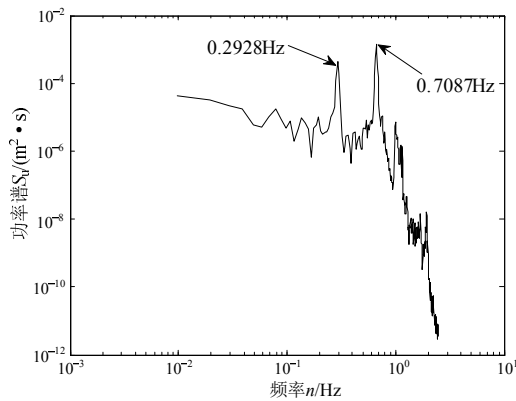
Fig.2 RMS values of buffeting displacement responses of the girder of Jiashao bridge

图 3 进一步给出了主梁中跨跨中的竖向、横向以及扭转抖振位移的功率谱曲线。可以看出: ① 竖向位移功率谱曲线前 3 个峰值分别对应于主梁前 3 阶对称竖弯振型。可见, 主梁中跨跨中点的竖向抖

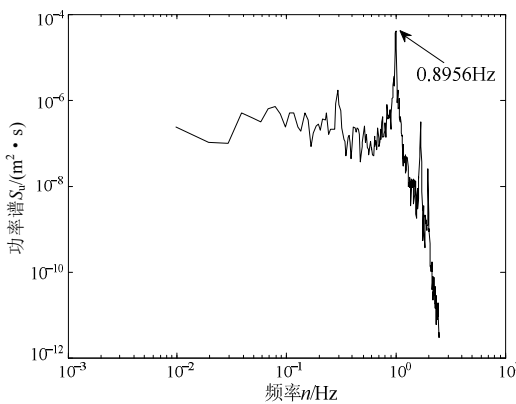
振响应主要取决于对称竖弯振型；② 横向位移功率谱曲线的前 3 个峰值分别对应于桥塔的侧弯振型、主梁第 1 阶和第 3 阶对称侧弯振型。进一步分析表明，次中跨及次边跨的跨中各节点除了激起桥塔侧弯振型和主梁侧弯振型外，还会激起主梁竖弯振型。可见，主梁的横向振动响应不仅与自身的侧弯振型有关，而且受到桥塔横桥向振动的动力耦合作用，这是导致主梁横向抖振响应没有体现出对称性的主要原因；③ 扭转位移功率谱曲线的前 2 个峰值



(a) 竖向抖振位移功率谱



(b) 横向抖振位移功率谱



(c) 扭转抖振位移功率谱

图 3 主梁跨中节点抖振位移响应的功率谱

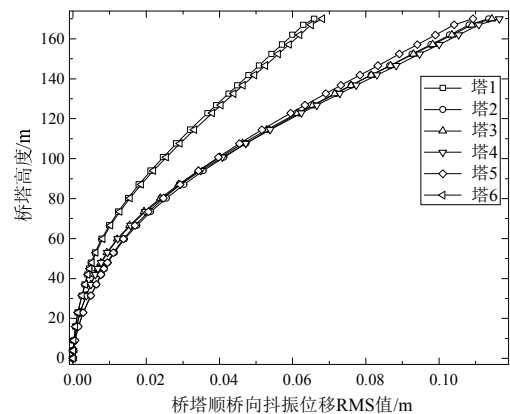
Fig.3 Power spectrum of buffeting displacement responses in the middle of the girder

分别对应于桥塔侧弯振型和主梁反对称竖弯振型。进一步分析表明，次中跨及次边跨跨中各节点除了激起桥塔侧弯振型外还激起了主梁对称竖弯振型和反对称竖弯振型，这表明主梁的扭转抖振响应受到桥塔横桥向振型和主梁竖向振型的综合影响，而不同位置的主梁节点所激起的不同形式主梁竖向振型的耦合作用是导致主梁左半部分与右半部分的抖振响应不对称的原因。

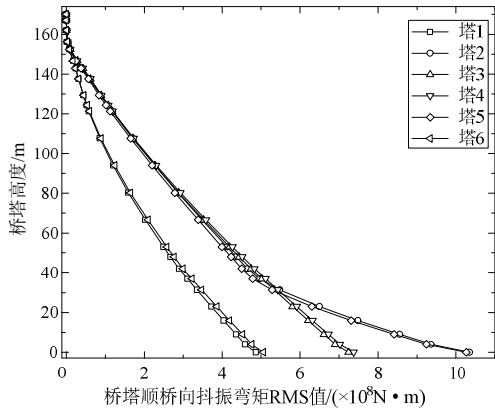
下面分析自激力对嘉绍大桥主梁抖振响应的影响。自激力体现了桥梁结构振动与脉动风场之间的动力耦合作用。分析结果表明：① 考虑自激力后主梁竖向抖振位移 RMS 值有明显的减小，在主梁中跨跨中点处，考虑自激力与否的抖振位移 RMS 值相差近 2.57 倍。一般而言，自激力对抖振响应的影响与风速有关，低风速条件下自激力的影响较小；而在较高风速下其影响不容忽视，且常常表现为抑制作用。因此，自激力对嘉绍大桥的竖向抖振响应起到了抑制作用且不容忽视；② 相比竖向抖振位移，嘉绍大桥横向和扭转抖振位移受自激力的影响相对较小，但对于主梁各跨跨中部位的影响亦不容忽视。根据上述分析，自激力对主梁抖振位移响应的影响程度由大到小依次为竖向位移、扭转位移和横桥向位移。

2.3 桥塔抖振响应分析结果

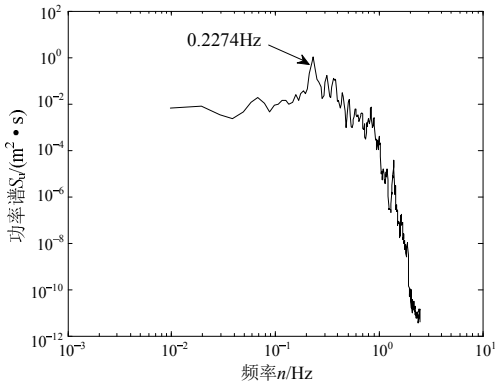
图 4 给出了 6 个桥塔顺桥向沿桥塔高度方向抖振位移和弯矩响应的 RMS 值。从图 4 可以看出，桥塔顺桥向抖振位移和弯矩响应的 RMS 值呈现较好的对称性，并且边塔(塔 1 和塔 6)的抖振响应值明显小于次边塔(塔 2 和塔 5)以及中塔(塔 3 和塔 4)，而次边塔与中塔的抖振响应值则较为接近。这是由于边塔顺桥向受拉索作用较大，次边塔和中塔的顺桥向刚度较小，符合多塔斜拉桥体系刚度的特点。此



(a) 顺桥向抖振位移 RMS 值



(b) 顺桥向抖振弯矩 RMS 值



(c) 抖振位移功率谱

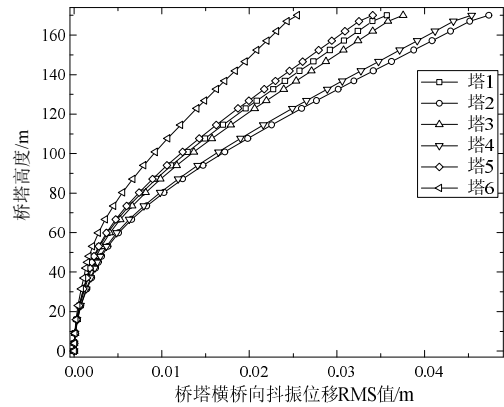
图4 桥塔顺桥向抖振响应

Fig. 4 Longitudinal buffeting responses of bridge towers

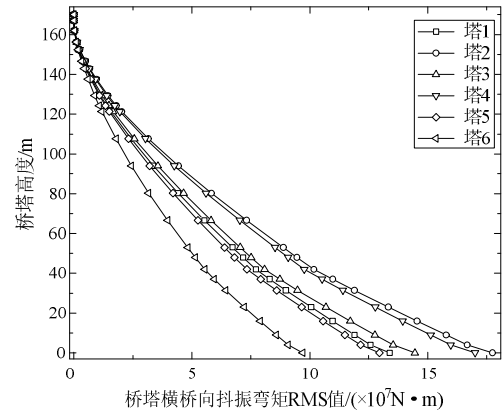
外, 由于次边塔处设置塔梁纵向约束, 因此, 次边塔塔底的顺桥向抖振弯矩 RMS 值明显大于中塔, 如图 4(b)所示。图 4(c)进一步给出了桥塔顺桥向抖振位移的功率谱。可以看出功率谱曲线的前 3 个峰值分别对应于结构第 1 阶、第 9 阶、第 10 阶振型, 均为主梁竖弯振型。这说明主梁竖向振动对桥塔顺桥向抖振响应起控制作用。

图 5 给出了 6 个桥塔横桥向沿桥塔高度方向抖振位移和弯矩响应的 RMS 值。从图 5 可以看出, 桥塔横桥向抖振位移和弯矩响应的 RMS 值没有对称性, 次边塔(塔 2)和中塔(塔 4)的抖振响应最大, 边塔(塔 1)、中塔(塔 3)和次边塔(塔 5)的抖振响应次之, 边塔(塔 6)的抖振响应最小。图 5(c)进一步给出了桥塔(塔 3)横桥向抖振位移的功率谱。可以看出, 功率谱曲线的前 5 个峰值分别对应于主塔第 2 阶对称侧弯、主梁第 5 阶、第 10 阶反对称竖弯、第 4 阶侧弯振型和第 1 阶扭转振型, 这表明桥塔侧弯振型对桥塔横桥向抖振响应的贡献最大, 但是主梁竖弯、侧弯及扭转振型的贡献也不容忽略。因此, 桥塔横桥向抖振响应不仅与桥塔横桥向振动有关, 而

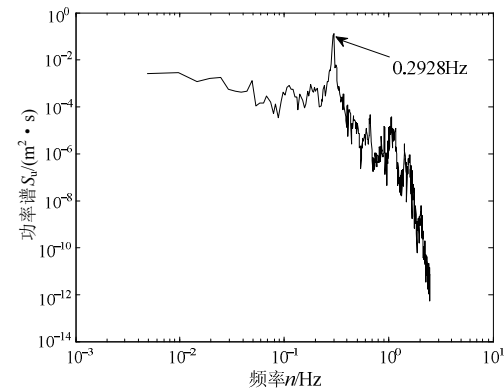
且还受到主梁竖弯、侧弯及扭转振型等的综合影响, 这是导致各桥塔横桥向抖振响应并没有因桥塔对称布置而体现出抖振响应对称性的主要原因。



(a) 横桥向抖振位移 RMS 值



(b) 横桥向抖振弯矩 RMS 值



(c) 抖振位移功率谱

图5 桥塔横桥向抖振响应

Fig.5 Transverse buffeting responses of bridge tower

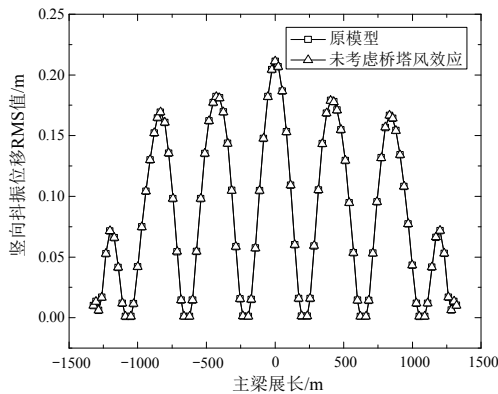
下面分析自激力对桥塔抖振响应的影响。一般而言, 自激力发生在流固耦合振动的结构表面, 相对主梁而言, 桥塔的刚度较大, 受到的自激力相对主梁要小很多, 可忽略不计。因此, 研究自激力对桥塔抖振的影响主要是看受到自激力作用的主梁的抖振响应对桥塔的影响。分析结果表明, 主梁自

激力的施加对桥塔横桥向的抖振响应基本没有影响,但对桥塔顺桥向抖振响应起到了明显的抑制作用,在设计基准风速条件下二者之间的差别达到1倍多。这是因为桥塔顺桥向的振动主要取决于主梁的竖向振动,主梁竖向抖振响应受自激力的影响较大,因此桥塔顺桥向抖振响应必须考虑主梁自激力的影响。

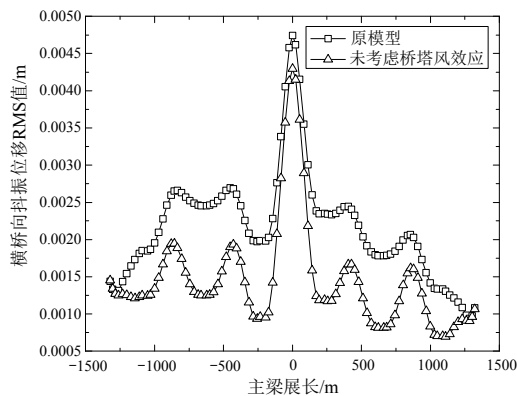
3 桥塔风效应的影响分析

为了减少计算工作量,大跨桥梁风致抖振时域分析往往忽略桥塔风效应的影响,仅考虑主梁随机脉动风场对结构的影响^[9-10]。多塔斜拉桥桥塔数量多,桥塔与主梁振型耦合特点更为明显,有必要进一步研究桥塔在强风作用下对自身以及主梁抖振性能的影响。

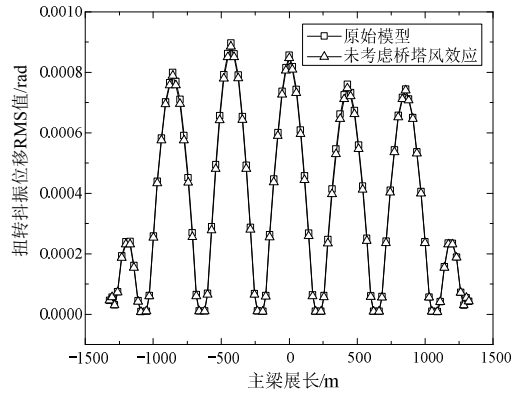
图6给出了考虑桥塔风效应与否时,主梁竖向、横向和扭转抖振位移RMS值的对比结果。从图6可以看出,桥塔风效应对主梁竖向抖振位移和扭转抖振位移基本没有影响,表明桥塔风效应对主梁竖向振动和扭转振动的影响很小,可以忽略。但是,由图6(b)可知,除了中跨以外的主梁最大横向位移(约0.0025m)相比没有考虑桥塔的最大横向位移(约



(a) 竖向抖振位移 RMS 值



(b) 横向抖振位移 RMS 值



(c) 扭转抖振位移 RMS 值

图6 主梁抖振位移RMS值的对比结果

Fig.6 Comparisons of the RMS values of buffeting displacement responses of the girder

0.0020m),增大了约25%,表明桥塔横桥向振动对主梁横向振动产生的影响不容忽视。

图7给出了考虑桥塔风效应与否时,中塔(塔3)顺桥向和横桥向抖振位移和弯矩的对比结果。从图7可以看出,桥塔风效应对桥塔顺桥向抖振响应基本没有影响,表明桥塔风效应对桥塔顺桥向抖振响应的影响很小,这是因为桥塔顺桥向的振动主要取决于主梁的竖向振动。但是,桥塔风效应对桥塔横桥向振动影响较大,在设计基准风速条件下塔根横桥向弯矩RMS值相差将近1倍。这是因为桥塔横桥向的振动主要取决于其自身的侧弯振型振动,并且桥塔风效应中考虑了横桥向的风荷载,故对其桥塔横桥向抖振响应产生较大的影响。

同时,国内一些学者针对桥塔风效应对大跨桥梁抖振响应的影响也做了相关研究。文献[3]考虑了桥塔风效应对三塔斜拉桥——京沪高铁南京长江大桥(方案)的影响,并给出了“考虑桥塔风效应会显著增大桥塔的横桥向抖振响应;桥塔的顺桥向振动依赖于主梁的振动,对桥塔脉动风作用不敏感;主梁抖振响应主要决定于主梁所受脉动风作用,桥塔脉动风作用对其影响较小”的结论。文献[4]则针对两塔斜拉桥——杭州湾跨海大桥,给出了“考虑桥塔抖振效应会显著增大桥塔的横桥向抖振响应,而对桥塔的顺桥向振动以及主梁振动影响不大”的结论。

综上分析,桥塔风效应对主梁竖向抖振位移、扭转抖振位移以及桥塔顺桥向抖振响应基本没有影响,但对桥塔横桥向振动响应影响较大。同时,由于多塔斜拉桥主梁与桥塔的动力耦合作用更为明显,故桥塔风效应对主梁横向振动的影响也不容

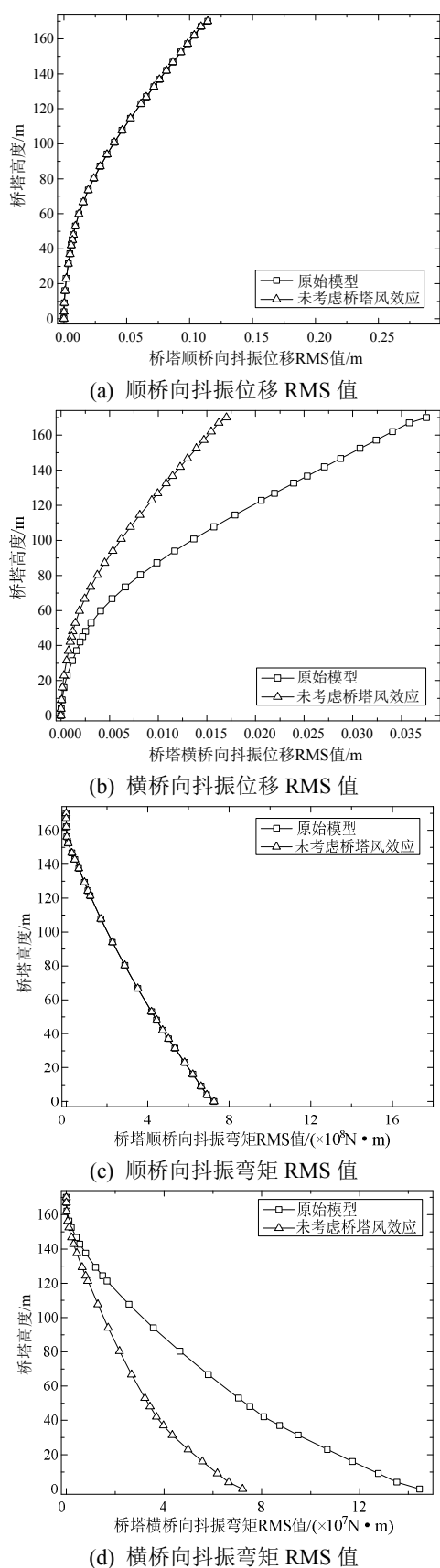


图7 中塔(塔3)抖振位移和弯矩RMS值的对比结果
Fig.7 Comparisons of RMS values of buffeting displacement and bending moment of the middle tower (Tower 3)

忽视,这一特性与一般大跨度桥梁的分析结果有较大差异,在多塔斜拉桥抗风性能分析时需要引起重视。

4 结论

本文以6塔斜拉桥——嘉绍大桥为工程背景,采用风致抖振时域分析方法研究了多塔斜拉桥主梁和桥塔在强风作用下的风致抖振响应特性,详细考察了强风作用下主梁和桥塔的动力耦合作用特征,以及自激力和桥塔风效应对多塔斜拉桥主梁和桥塔抖振响应的影响特点。分析结果表明:

(1) 主梁与桥塔风致抖振响应与结构的振动特性联系紧密,由于多塔斜拉桥自身的振型较为密集,并且主梁和桥塔振型间的相互耦合情况更为突出。因此,多塔斜拉桥风致抖振响应呈现出一定的独特性。

(2) 考虑自激力后主梁竖向抖振响应明显减小,而横桥向和扭转抖振响应受自激力的影响相对较小,但对于主梁各跨跨中部位的影响却不可忽视。自激力对桥塔横桥向抖振响应基本没有影响,但对桥塔顺桥向抖振响应起到了明显的抑制作用。因此,桥塔顺桥向抖振响应必须考虑主梁自激力的影响。

(3) 桥塔风效应对主梁竖向和扭转抖振响应以及桥塔顺桥向抖振响应基本没有影响,但对桥塔横桥向抖振响应影响较大。同时,由于多塔斜拉桥主梁与桥塔的动力耦合作用更为明显,故桥塔风效应对主梁横桥向抖振响应的影响也不容忽视。

参考文献:

- [1] Michel V. Bridges with multiple cable-stayed spans [J]. Structural Engineering International, 2001, 11(1): 61—82.
- [2] 胡建华, 廖建宏. 多塔斜拉桥关键技术研究[J]. 中外公路, 2002, 22(3): 32—36.
Hu Jianhua, Liao Jianhong. Key technology research of multi-tower cable-stayed bridge [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2002, 22(3): 32—36. (in Chinese)
- [3] 李永乐, 廖海黎, 强士中. 考虑桥塔风效应的斜拉桥时域抖振分析[J]. 空气动力学学报, 2005, 23(2): 228—233.
Li Yongle, Liao Haili, Qiang Shizhong. Effect of pylon stochastic wind field on buffeting response of long cable-stayed bridge [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2005, 23(2): 228—233. (in Chinese)
- [4] 韩万水, 陈艾荣. 考虑桥塔风场效应的斜拉桥抖振时

- 域分析[J]. 工程力学, 2007, 24(1): 123—128.
- Han Wanshui, Chen Airong. Time-domain buffeting analysis of cable-stayed bridge considering pylon wind field [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(1): 123—128. (in Chinese)
- [5] Ding Q S, Chen A R, Xiang H F. Coupled buffeting response analysis of long-span bridges by the CQC approach [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2002, 14(5): 505—520.
- [6] Scanlan R H. The action of flexible bridges under wind, II: Buffeting theory [J]. Journal of Sound and Vibration, 1978, 60(2): 201—211.
- [7] Deodatis G. Simulation of ergodic multivariate stochastic processes [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1996, 122(8): 778—787.
- [8] 李敏娜. 多塔斜拉桥抖振及风载内力分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- Li Minna. Buffeting analysis and wind-induced internal force analysis for multi-tower cable-stayed bridge [D]. Chengdu: Southeast Jiaotong University, 2010. (in Chinese)
- [9] 中交公路规划设计院. JTG/TD 62-01-2004, 公路桥梁抗风设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- CCCC Highway Consultants Company. JTG/TD 62-01-2004, Wind-resistant design specification for highway bridges [S]. Beijing: China Communication Press, 2004. (in Chinese)
- [10] Xu Y L, Sun D K, Ko J M, et al. Fully coupled buffeting analysis of Tsing Ma suspension bridge [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2000, 85(1): 97—117.

(上接第 68 页)

- [6] Huang Y N, Whittaker A S, Constantinou C M, Malushte S. Seismic demands on secondary systems in base-isolated nuclear power plants [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2007, 36(12): 1741—1761.
- [7] Wang T, Wang F. Three-dimensional base-isolated system using thick rubber bearings [C]. SPIE Smart Structures and Materials and Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, International Society for Optics and Photonics, San Diego, US, 2012.
- [8] 段安, 钱稼茹. CNP1000 核电厂安全壳模型结构抗震安全分析[J]. 工程力学, 2009, 26(4): 153—157.
- Duan An, Qian Jiaru. Aseismic safety analysis of a containment vessel model for CNP1000 nuclear power plant [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(4): 153—157. (in Chinese)
- [9] 张敏政. 地震模拟实验中相似律应用的若干问题[J]. 地震工程与工程振动, 1997, 17(2): 52—58.
- Zhang Minzheng. Study on similitude laws for shaking table tests [J]. Journal of Earthquake Engineering and Earthquake Vibration, 1997, 17(2): 52—58. (in Chinese)
- [10] 王济. MATLAB 在振动信号处理中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版, 2006: 34—56.
- Wangji. Application of MATLAB in the processing of the vibration signal [M]. Beijing: China Water Power Press, 2006: 34—56. (in Chinese)
- [11] JG 118-2000, 建筑隔震橡胶支座[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- JG 118-2000, Rubber isolation bearings for buildings [S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2000. (in Chinese)
- [12] CECS 126-2001, 叠层橡胶支座隔震技术规程[S]. 北京: 中国工程建设标准化协会, 2001.
- CECS 126-2001, Technical specification for seismic-isolation with laminated rubber bearing isolators [S]. Beijing: China Association for Engineering Construct on Standardization, 2001. (in Chinese)
- [13] Wang F, Wang T, Ding L T. Numerical and experimental study on seismic behavior of base-isolated nuclear power plant [C]. The 15 World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, 2012.
- [14] GB 50267-97, 核电厂抗震设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 1997.
- GB 50267-97, Code for seismic design of nuclear power plants [S]. Beijing: China Planning Press, 1997. (in Chinese)