

流线断面涡激力发展规律研究

陈海兴 赵林 郭增伟

(同济大学土木工程国家重点实验室 上海 200092)

1 引言

涡激振动是大跨度桥梁较低风速下容易出现的一种风致振动。这种振动具有自激性质,对旋涡脱落形成的反馈作用又使得振幅限定在一定范围内。虽然涡振不像颤振会引起桥梁毁灭性破坏,但发生频率较高,振幅较大,可能引起行车安全,造成构件疲劳。大跨度桥梁涡振问题已引起普遍关注。

有些文献^[1-2]中借用颤振研究中“气动阻尼”概念解释涡激力与振幅的关系:当振幅较小时,涡激力产生的是气动负阻尼,结构从气流中吸取能量,振幅逐渐增大;涡振振幅较大时,涡激力产生的是气动正阻尼,结构在振动中耗散能量,振幅逐渐减小。这使得在锁定区内的任意风速情况下,涡振振幅将收敛于一个稳定值,以这个振幅振动时,气动负阻尼和结构正阻尼的总和为零。目前尚没有学者从这种解释进行试验论证。表面压力包含了丰富的信息,不仅能够反映断面气体绕流情况,而且通过积分也能获得气动力变化的整体过程。Francesco^[3]在压力均值和脉动值两方面对涡振前后的情形进行了详细比较,许福友^[4]通过分析气动措施对流线型钢箱梁表面压力的影响,认为扭转涡振的根本原因是上表面上游的分离使得中游和下游区域强烈的压力脉动;杨立坤^[5]采用 POD 分解方法对杨浦大桥拱肋表面气动力进行了分析,认为下游拱肋的气动波动是引起涡振的主要原因。表面涡激力分布能直观描述气动力现象,但对解释涡振自激自锁定等机理缺乏说服力。

本文将针对流线型主梁断面,通过风洞试验表面测压方法,研究涡振发生发展过程中,涡激力空间分布的变化规律;通过同步测力测振试验分离出涡激气动力研究其与运动的关系,通过对整体气动力发展规律的研究探讨涡激力随时间的演变特点,探讨涡振发生及振幅随风速变化的机理。

2 风洞试验概况

本文研究对象为大跨度桥梁主梁中常见的带风嘴流线型闭口箱梁,中部横断面布置了一圈测压孔,断面及测点布置编号如图 1 所示。试验使用 Scanivalve 电子扫描阀测量表面压力。模型两端分别通过两个自行研制的高精度微型动态天平与吊臂连接,再用弹簧将吊臂与支架连接形成弹性悬挂系统。吊臂中点布置激光位移计以测量竖向位移信号,位移信号与天平力信号同步采集,采样频率均为 100Hz,四个天平所测力的竖向分量的和即为气动力与惯性力的合力。试验于同济大学 TJ-3 边界层风洞中完成。节段模型测振弹性悬挂系统的自振频率为 5.664Hz。

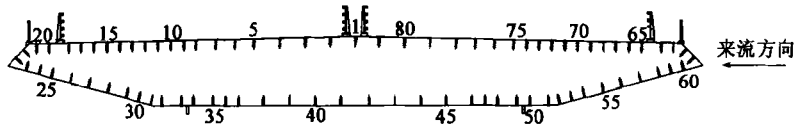


图 1 流线型箱梁断面及测压点分布

基金项目:国家自然科学基金项目(90715039、50978203 和 5102114005)联合资助。

+3°攻角下对模型进行吹风试验,6.2m/s 风速时涡振最大;涡振锁定区间为 4.7~6.5m/s。本文分析了涡振前、锁定区上升段、峰值点、锁定区下降段和涡振后不同风速下模型表面压力分布特性(对应风速 4.5m/s、5.4m/s、6.2m/s、6.4m/s、6.6m/s);通过表面压力积分得到涡激力,分析锁定风速区涡激力卓越频率及幅值变化规律;通过动态天平测得涡激气动力与惯性力合力,减去惯性力分离出气动力,研究气动力与运动的相位关系随风速变化规律。

3 涡激力发展演化规律研究

3.1 箱梁表面压力系数均值随风速的变化

压力系数均值可以显示气流在模型表面分布情况,从而初步判断气流在箱梁表面的分离与再附。图 2 给出了涡振发生发展过程中均值变化情况。模型除了上游风嘴上部及下部前端为正压区,其余均为负压,可以想象气流在箱梁上游与模型接触后分离,未能在模型上形成再附,整个模型后部处于负压包围中;涡振发生前,表面压力系数绝对值更大,分布更“紊乱”;峰值点风速前,随风速增大,压力系数绝对值变小,锁定区下降段及涡振后,表面压力分布稳定,基本保持不变。

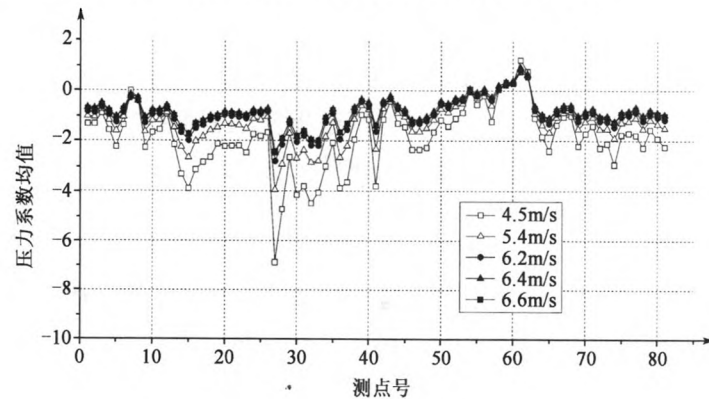


图 2 压力系数均值随风速变化

3.2 表面压力根方差随风速的变化

涡振中压力均值提供静力,动荷载则由脉动部分提供,压力根方差表征断面上压力脉动强弱。图 3 给出了压力根方差的发展规律。涡振发生前,桥梁表面压力脉动分布比较均匀;进入涡振锁定区,至峰值点前,上表面下游、下表面与下游风嘴的转角附近的根方差较大,且增长迅速,峰值点时达到最大;锁定区下降段,压力脉动逐渐减弱;涡振后,桥梁表面的压力脉动又基本分布均匀。由此可以看出上表面下游、下表面与下游风嘴转角的压力脉动对涡振比较敏感,对涡激力贡献大。

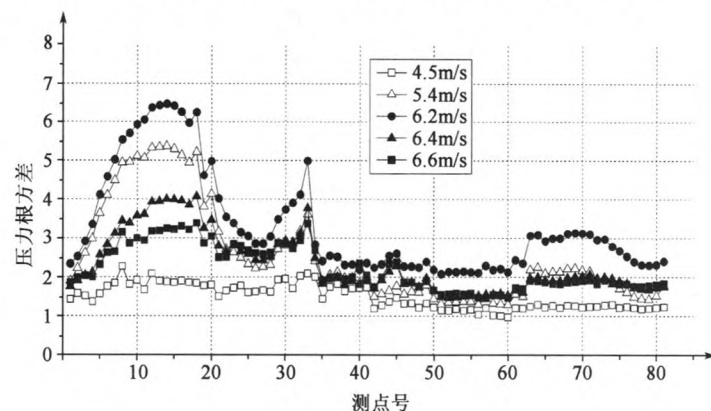


图 3 压力根方差随风速变化

3.3 涡激气动力随风速的变化

本试验中涡激气动力可由两种方法求得:一种通过天平力减去惯性力,这是完整的气动力,但由于气动力很小,两个比较大的力相减的导致幅值信息误差较大,而对相位信息影响不大;另一种是通过表面压力积分求得。这种方法因栏杆等附属设施上的涡激力未知,其结果不是完整的涡激力,不过附属设施的权重面积很小对总体涡激力的影响有限,可认为这种方法求得的涡激力幅值更接近真实情况。本文用同步测力测振试验求涡激力与运动的相位差,用压力积分方法求涡激力幅值。

图4是涡激力与位移的相位差与位移风速幅值的对比,涡激力与位移的相位差变化趋势与振的变化趋势一致,峰值点以前,相位差由 13° 逐渐增大到峰值点时 82° ,进入锁定区下降段,相位差又逐渐减小至 15° 。黏滞阻力与速度同相位,领先位移 90° ,由气动力与位移相位差可看出,气动力与阻尼力的相位越接近,涡激共振的振幅越大,气动力与阻尼力相位一致的分量即为气动负阻尼,负阻尼越大,相当于结构整体的阻尼越小,结构振动幅度就越大。

图5是涡激力振幅与位移随风速幅值的对比,涡激力随风速变化的幅值与位移随风速变化趋势一致。涡激力是决定涡振振幅的重要因素。综合图4和图5,越接近涡振峰值位移,气动负阻尼力越大。

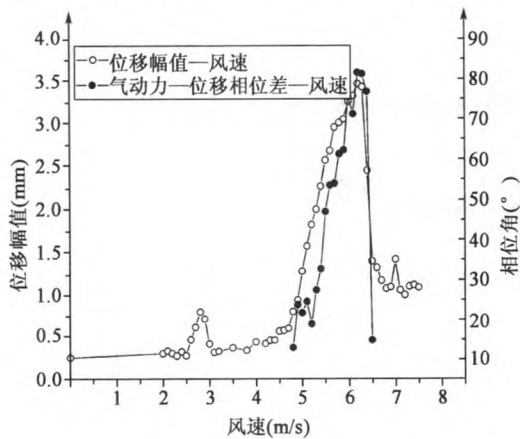


图4 涡激力与位移相位差、位移幅值—风速关系图

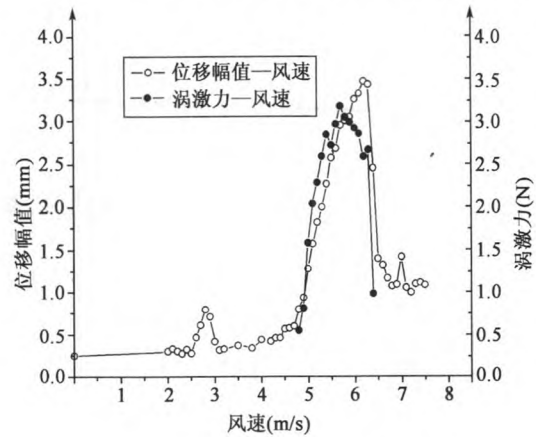


图5 涡激力幅值、位移幅值—风速关系图

3.4 各测点气动力与涡激气动力相关性随风速的变化

箱梁表面各测点所受的气动力是指每个测点的压力与其所占权重面积的乘积,其与涡激气动力的相关系数综合反映两者的频率和相位特性。

图6给出了箱梁表面各测点气动力与涡激力相关性的发展规律,两个风嘴顶角以下所有测点相关性小于0表示对气动力有正的贡献。上表面下游、下表面后 $2/3$,及下游风嘴对涡激力有较大的贡献;锁定区上升段至峰值点,5~20、28~33测点相关系数 R 值在0.8以上,且比较稳定。峰值点5~20测点、28~33测点相关性迅速减弱,这些位置后锁定区相关系数最大值只在0.6左右;而涡振前及涡振后的相关系数值普遍在0.6以下,分布比较均匀。可见,上表面下游5~20测点,下表面与下游风嘴转角附近测点表面压力对涡激力起主要贡献。

3.5 表面各测点所受气动力对涡振力贡献随风速变化

箱梁表面各测点所受气动力对涡振的贡献同时取决于作用于箱梁表面各测点的气动力脉动的大小以及各测点所受气动力与涡激力的相关性。箱梁表面各测点所受气动力对涡振的贡献可以用各测点的压力根方差与各点所受气动力与涡激力相关系数的乘积来表示。

图7给出了各测点气动力对涡激力的贡献变化关系。上表面下游部分、下游风嘴上部下表面与下游风嘴转角附近对涡激力贡献比较显著;特别是5~22测点及27~34测点,在涡振不同时期贡献差异显著,涡振前后对涡激力贡献有限,在涡振锁定区对涡激力的贡献与振幅正相关。箱梁上表面后面部分,下游风嘴上部及下表面与后风嘴下部贡献了大部分涡激力,是影响涡激力的主要原因。

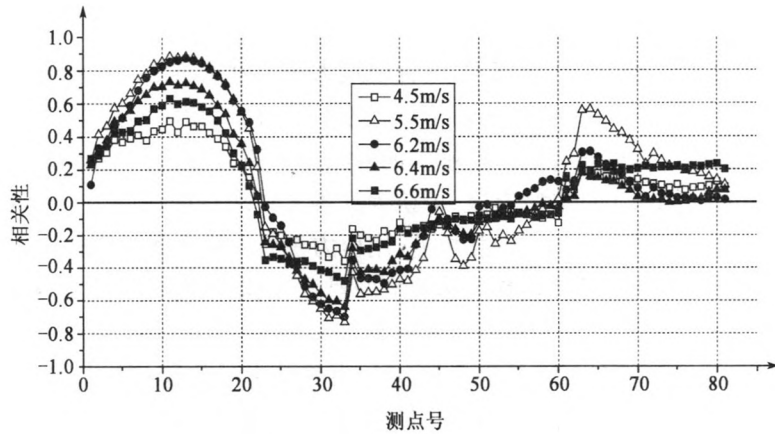


图6 各测点气动力与涡激力相关性变化

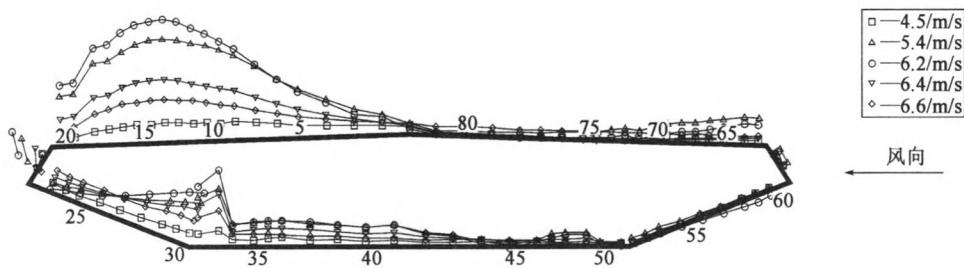


图7 各测点气动力对涡激力贡献的变化

4 结论

(1) 根据测压试验获得主梁竖弯涡振时表面压力脉动时程数据,研究了竖弯涡振发生前、锁定区上升段、峰值点、锁定区下降段及涡振后的表面压力分布情况,从表面压力分布研究了涡激力随风速变化空间分布的发展规律。

(2) 气流在上游风嘴顶部与主梁分离后,将整个模型大部分包围在负压中;主梁断面上下表面下游及下游风嘴强烈的压力脉动及与涡激力的高度相关性对涡激力起决定影响。

(3) 涡振锁定区气动力幅值、涡激力与位移的相位差随风速变化的趋势一致,涡激力幅值和相位是影响涡振振幅的原因。涡激力幅值越大振动幅值也越大,涡激力与速度相位越接近,涡激振动幅值越大。涡激力中与速度一致的分量是激发涡振、决定涡振振幅的主要因素。

参考文献

- [1] 李永君,葛耀君,杜柏松. 大跨度桥梁质量阻尼参数对涡激振动的影响[G]//第十一届全国结构风工程学术会议论文集.
- [2] 徐泉. 大跨度桥梁涡激振动及其气动减振措施研究[D]. 成都:西南交通大学,2004.
- [3] Francesco Ricciardelli, Enrico T. de Grenet, Horia Hangan. Pressure distribution, aerodynamic forces and dynamic response of box bridge sections[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90: 1135-1150.
- [4] 许福友,林志兴,李永宁,等. 气动措施抑制桥梁涡振机理研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(1).
- [5] 杨立坤. POD与RVM相结合对桥梁涡振颤振的探讨[D]. 上海:同济大学,2009.