

大跨径悬索桥抗风措施研究综述

张新军, 应磊东

(浙江工业大学建筑工程学院 杭州市 310014)

摘 要: 设计和建造跨海连岛大桥将面临着许多技术方面的挑战,其中超大跨径悬索桥的抗风稳定问题是一个十分突出和必需关注的问题。本文系统地回顾了国内外在大跨径悬索桥抗风措施方面的研究进展,包括结构措施、空气动力学措施和机械措施等三个方面,并评述了各种措施的优缺点及其适用性。

关键词: 大跨径悬索桥; 抗风稳定性; 结构措施; 空气动力学措施; 机械措施

风对桥梁结构的作用主要表现为风诱发的桥梁振动,按振动的机理可分为颤振、抖振、涡激振动、桥塔驰振等。其中的颤振是由于风与结构相互作用形成的一种重要的空气动力失稳现象,一旦发生将会在短时间内给桥梁结构带来摧毁性的破坏作用,因此,必需在悬索桥的施工和运营阶段避免。1940 年美国旧 Tacoma 海峡桥因风的作用而倒塌后,人们开始意识到抗风稳定性(颤振稳定性或气动稳定性)是一个控制悬索桥设计的重要因素。从此以后,国内外众多学者对颤振及其控制的理论和工程应用方法进行了数十年卓有成效的研究。正是因为这些研究成果,自 1940 年以来,至今未出现过悬索桥因颤振而倒塌的事故。

进入 21 世纪后,世界桥梁工程将进入跨海连岛的超大跨径桥梁建设新时期,悬索桥跨径将会超过 2 000 m 甚至达到 5 000 m。随着悬索桥跨径的不断增大,结构更趋于轻柔,对风的作用更加敏感,其最关键的问题就是在设计风速下的抗风稳定性。目前,悬索桥的加劲梁主要有扁平状流线型钢箱梁和钢桁架梁两种型式。与钢桁架梁相比,钢箱梁质量更轻,更容易制造和架设,因而在悬索桥中广泛应用。但是超过一定的跨径极限后,钢箱梁就不能保证足够的抗风稳定性,在明石海峡大桥的设计中就发现了这个问题。已有的抗风研究表明对于典型流线型加劲梁断面而言,2 000 m 似乎是悬索桥这种桥型气动稳定不可逾越的极限跨径。也就是说,对于主跨跨径超过 2 000 m 的悬索桥,就必须采用相应的措施来

提高其气动稳定性,而这样的大跨径悬索桥也是通航净宽与深水条件所要求的^[1]。因此,开展超大跨径悬索桥的颤振控制研究,仍是一个非常具有理论和工程现实意义的课题。

从控制方式来看,目前实际应用的方法主要有 3 类,即结构措施、空气动力学措施和机械措施等。本文将系统地介绍已有研究获得的各种抗风措施的构造及其控制原理,并评述它们各自的优缺点及适用性。

1 结构措施

传统的单箱加劲梁悬索桥,由于抗风稳定性的原因,其跨径似乎止步于 2 000 m。其中最重要的一个原因就是其扭转刚度随着跨径的增加而骤减,从而导致其扭转振动频率及其颤振临界风速的大幅度下降。为了提高主跨 2 000 m 以上超大跨径悬索桥的扭转刚度,国内外学者提出了若干结构体系调整方案,特别是主缆系统的调整方案。结构措施的主要是为了提高结构的扭转刚度,增大结构的扭转振动频率,以此提高结构的抗风稳定性。

1.1 交叉吊索系统

目前,研究中所采用的交叉索形式,主要有如图 1 所示的竖向交叉索、水平交叉索以及竖向与水平索的联合运用等^[2]。

竖向交叉索方式是用细的拉索将悬索桥的加劲梁和主缆横向连接。当主梁扭转时,由于横向拉索的约束,使主梁的扭转运动总是伴随着主缆的运动和加劲梁的侧向水平运动,使加劲梁的扭转振动同侧

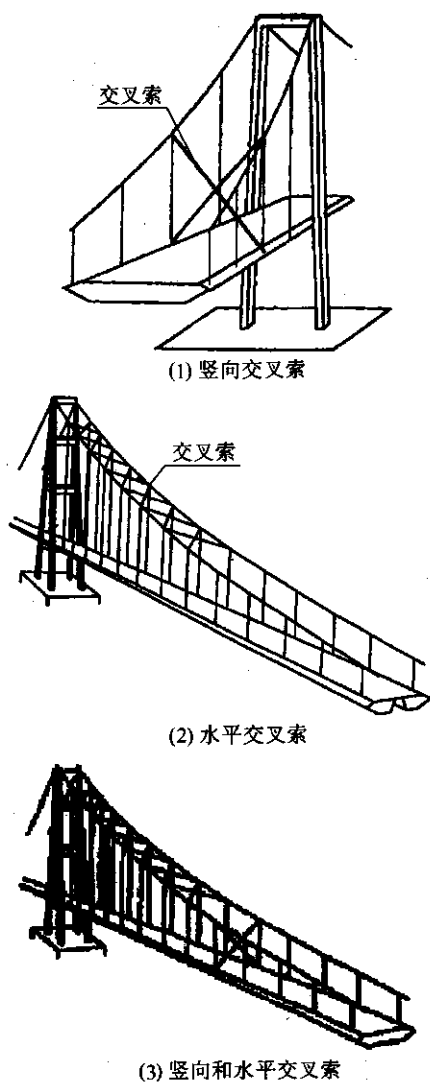


图 1 交叉索系统

向水平振动在一定程径上耦合起来,从而提高结构的抗扭刚度。悬索桥的颤振形态由传统的竖向与扭转耦合为主的形态转变为竖向、扭转以及侧向三向耦合形态,并提高了耦合颤振的临界风速。此外,竖向交叉索的布置位置是一个需要认真考虑的问题,通常布置在主跨的 $0.3L$ 处或边跨的跨中,但是同时在中跨和边跨布置竖向交叉索的效果不如单独在一跨内布置^[3]。

当悬索桥对称扭转振动时,2根主缆做异向振动,表现为沿着桥梁轴线的反对称运动,此时运用水平交叉索能有效地抑制这种主缆的反对称运动,从而提高结构的抗扭刚度及其对称扭转振动频率,其效果类似于桥塔抗扭刚度的增强。而且水平交叉索设置区间越长,约束作用就越强,扭转振动频率的提

高也就越显著。而当悬索桥反对称扭转振动时,此时2根主缆在桥轴方向几乎不运动,水平交叉索几乎不能使反对称扭转频率提高,因而不能充分发挥作用。此时,应采用如图1(3)的竖向和水平交叉索联合运用的方式,通过竖向交叉索提高反对称扭转频率。

1.2 空间缆索系统

Astiz 对 1 600~6 000 m 范围内的悬索桥构思了如图 2(1)所示的空间缆索系统^[4],其中包含单主缆体系(1C)、双主缆体系(2C、2C1 和 2C2)、单一双主缆体系(2C3)、3 主缆体系(3C)以及 4 主缆体系(4C1、4C2 和 4C3)等,并分析了各种体系的颤振临界风速,如图 2(2)所示。

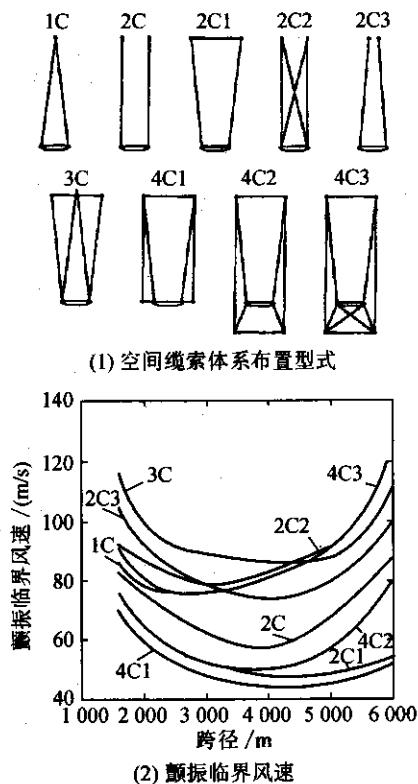


图 2 空间缆索体系及其颤振临界风速

可以看到,方案 1C、2C2、3C、2C3 和 4C3 等的颤振临界风速值相对比较大,其最低的颤振临界风速都在 80 m/s 左右,而且在整个跨径范围内都表现出了良好的抗风稳定性。

1C 方案即单主缆悬索桥体系,如图 3 所示,单主缆通过双倾斜吊索与加劲梁连接,加劲梁和吊索组成一个稳定的三角形,加劲梁通过类似钟摆的反应来产生回复力,从而提高整体扭转刚度。在实际应用中,这种方案比较经济,但由于主缆居中,考虑到交通净空的需要无法在跨中将主缆同桥面做刚性连

接(即中央扣),而这是大跨径悬索桥提高扭转和侧向刚度的一个非常有效的结构措施。

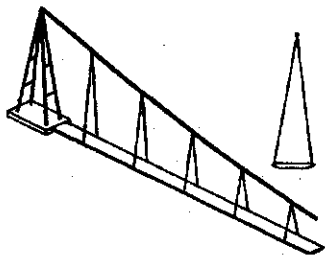


图 3 单主缆悬索桥

图 4 所示的 2C2 方案,是在普通双主缆悬索桥的横断面上增加了竖向交叉索,从而使扭转振动同侧向振动耦合起来而提高扭转刚度。这种方案不仅能提高颤振稳定性,而且施工也很简便。主缆和桥面可按照普通悬索桥的方法步骤来施工,而竖向交叉索可以根据实际要求,既可在施工过程中充当施工临时索,也可一并在桥面安装完成后布设。此外,这一方案还留有进一步改进的余地,如将竖向交叉索扩展到全跨或将两主缆连接起来,可进一步提高抗扭刚度和颤振稳定性。

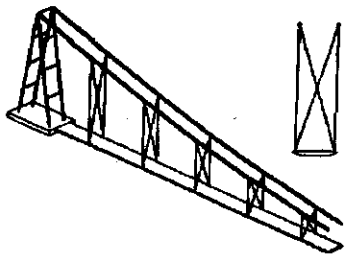


图 4 2C2 悬索桥方案

图 5 所示的 2C3 方案是将 2 根主缆在桥塔附近集束成 1 根的双缆单鞍座方式,并可以采用 A 形桥塔。这种方式虽然几乎不能改变竖向弯曲振动频率,但由于 A 形桥塔能有效地约束桥塔沿桥轴方向的反对称振动,因而提高了悬索桥的扭转刚度及颤振临界风速。与之相反,日本学者 Kubo 提出了双—单主缆悬索桥方案,该方案中 2 根主缆在桥塔处分开,而在靠近跨中处合并为 1 根,并针对一主跨为 3 000 m 的悬索桥设计方案进行了分析,结果表明:与传统的双主缆悬索桥相比,这种方案的颤振临界风速可以提高约 30%,若进一步在主跨适当位置设置 2 道竖向交叉索,则颤振临界风速将提高 100%^[5]。

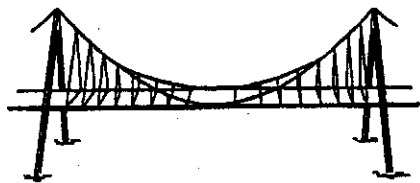


图 5 双缆单鞍座悬索桥方案

图 6 所示的 3C 方案即三主缆体系,是一种单主缆与双主缆的结合体系,位于两侧的主缆索面既可以是竖向的,也可以是斜向的,使得没有横向水平运动时梁体不能转动。这种体系的结构刚度比较大,颤振稳定性也比较好,但由于主缆位于不与桥面正交的倾斜面内,给施工带来了很大的困难。

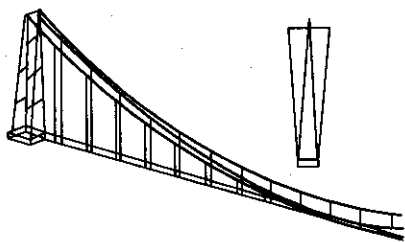


图 6 三主缆悬索桥

4C3 方案的结构刚度和抗风稳定性都比较好,但是缆索用量较大(估计比通常悬索桥增加 120%),而且桥面下的 2 根主缆也有可能影响桥下的通航净空。

从提高颤振临界风速的效率以及造价、施工等各方面综合比较而言,方案 2C2 是一种比较可行的选择。

1.3 斜拉—悬吊协作体系

悬索桥与斜拉桥之间既有竞争又有协作,将 2 种体系集合为一体则可以取长补短,提高结构的刚度,改善其抗风稳定性,并增大跨越能力。

1.3.1 迪辛格体系

图 7 显示了 Dischinger 在 1938 年提出的一种斜拉—悬吊协作体系。中跨跨中部分采用悬吊体系,可以解决斜拉桥悬拼过程中的静力稳定、气动稳定和主梁压力过大的问题;两侧采用斜拉体系可以减小悬吊部分长度,从而可以提高悬索桥的刚度,并降低主缆拉力和锚碇规模,尤其对深水和软土地基情况意义重大。在国内外许多跨海大桥的设计方案中就采用了这种体系,如土耳其伊兹米特海湾桥、伶仃洋大桥和印尼 Bali 海峡大桥等。

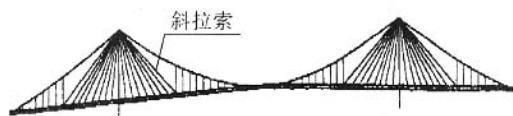


图7 迪辛格体系

本文作者对主跨为 1 400 m 的斜拉—悬吊协作体系方案桥进行了系统的颤振稳定性研究^[6], 分析发现, 这种体系要比悬索桥具有更好的抗风稳定性, 其原因是由于斜拉部分提高了桥梁的整体刚度, 结构的振动频率尤其是扭转频率有了明显的提高。此外, 减小悬吊部分长度、采用外倾的斜索面布置形式以及混凝土与钢的混合截面设计等都能显著提高这种体系的颤振临界风速。人们对这种体系还存在以下担忧: 斜拉悬吊结合部位的吊杆疲劳、传力不明确、视觉不连续等。但随着人们对这种体系优良特性认识的加深, 相信斜拉—悬吊体系在新世纪将会有很大发展。

1.3.2 混合双悬臂组合体系

林同炎在直布罗陀海峡桥设计中, 提出带有斜撑的多跨 5 000 m 混合双悬臂组合体系方案^[7], 见图 8 所示。其特点是用双悬臂来支承距桥墩 1 000 m 范围内的桥面, 以降低主缆的荷载, 并起着对 3 000 m 跨中部分的支承作用。分析表明, 无论是在静力学或动力学方面, 5 000 m 跨径均可降到相当于一般的 3 000 m 的悬索桥。

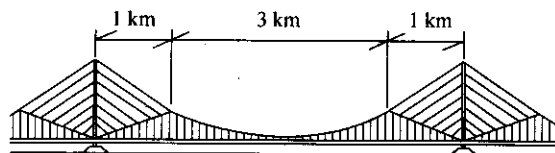


图8 多跨混合双悬臂组合体系

1.3.3 垂直悬索与倾斜拉索组合体系

瑞士学者 Menn 教授提出一种适用于超大跨径桥梁或宽跨比很小的桥梁的新结构体系构思^[8], 见图 9 所示。该体系中传统框架式桥塔由带面外斜拉索塔的倒 Y 形塔柱代替, 中央塔柱通过斜拉索支撑面外斜拉索塔, 面外斜拉索塔再通过斜拉索支撑加劲梁。中央塔柱、面外斜拉索塔和加劲梁通过斜拉索相连, 组成了一个稳定的空间体系。竖向荷载主要由垂直悬索系统承担, 而桥梁的气动稳定、静风稳定及静力稳定则通过设于加劲梁两侧倾斜的斜拉索体系来保证。如果需要限制加劲梁内的压力, 也可以将部分斜拉索地锚, 形成部分地锚斜拉体系。

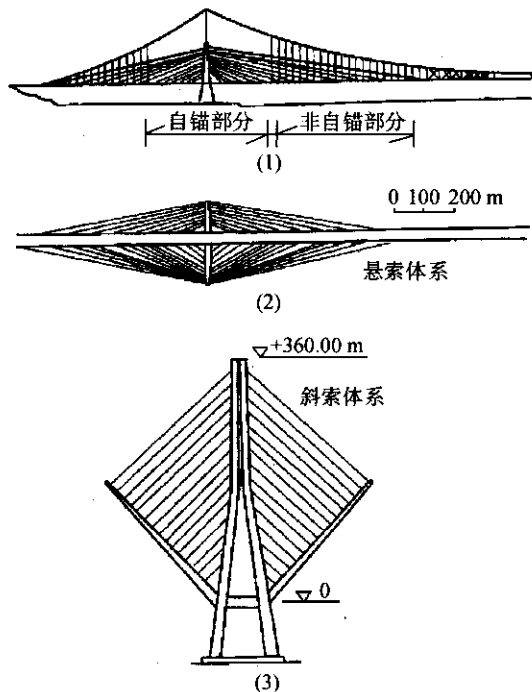


图9 垂直悬索与倾斜拉索组合体系

1.4 其他方法

1.4.1 分裂型悬索桥方案

这种方案主要是为了提高悬索桥的横向稳定性, 2 个分离的桥面分别悬吊在 2 个分离的桥塔和缆索系统, 并用横向连接系连接 2 个分离的桥面^[9], 见图 10 所示。日本学者野林国腾曾对跨径 1 900 m 的这种悬索桥方案进行了分析, 发现在设计风速下, 分裂型悬索桥的扭转角仅为传统悬索桥的 1/5, 因而说明了这种体系具有更大的扭转刚度。同时, 风洞试验表明这种悬索桥方案也具有良好的气动稳定性。

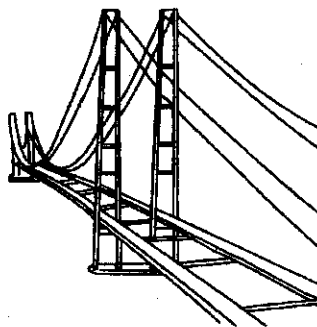


图10 分裂型悬索桥

1.4.2 刚性吊杆

传统悬索桥设计中, 基本都采用高强钢丝或钢绞线组成的柔性吊杆。采用刚性吊杆主要是为了减少 2 根平行主缆之间的竖向相对位移, 约束桥面的

扭转振动,从而提高悬索桥的扭转刚度。文献[10]对如图11所示的3种刚性吊杆形式进行了动力特性和颤振分析,结果表明刚吊杆、铰链架、刚吊架3种吊杆形式的气动稳定性基本一致,当刚性吊杆布置在中跨的1/3处附近时,能够有效地提高悬索桥的扭转频率,颤振临界风速也可以提高到原来的60%左右。日本学者Iwamoto对主跨为2 500 m的3跨连续悬索桥在中跨的0.36和0.64处设置了2个刚吊架,通过计算也发现采用刚吊架后结构的颤振临界风速得到了显著的提高[11]。

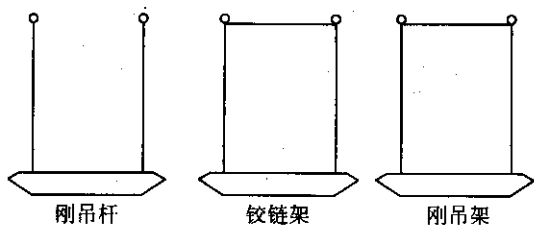


图 11 刚性吊杆

2 空气动力学措施

气流绕过桥梁截面时,发生相互作用而产生空气作用力,而截面气动外形的改变势必会影响到空气力。因此,改善气动稳定性的另一途径是通过改善桥梁断面的外形来减小气动力。

2.1 边缘风嘴措施

在加劲梁截面两端设置风嘴,可以改善气流绕流的流态,减少涡脱,使截面趋向流线型。颤振分析和试验研究表明,这种措施能有效地提高悬索桥的颤振稳定性,而且风嘴的尖端角度越小,对颤振稳定性的改善越大;而在尖端角度相同的情况下,尖端长度较大的风嘴的气动性能就越好[12]。

2.2 中央开槽措施

传统的流线型箱形断面中间开槽,可以增加透风率,减小加劲梁顶底面的压力差。试验和分析都显示中央开槽的闭口箱梁的颤振临界风速将得到一定程度的提高,而且随着开槽宽度的增加桥梁的颤振临界风速会继续上升。已建成的香港青马大桥为主跨1 337 m的悬索桥,采用了开槽箱形断面。在Messina海峡桥方案的研究中,理论分析和风洞实验的结果都表明,采用开槽箱形主梁断面,可得到令人满意的抗风性能。

2.3 分离箱梁方案

分离式箱梁设计,实际上是箱梁中心开槽思想

的拓展,即通过分离箱梁间的开放空间增加透风率,减小加劲梁顶底面的空气压力差从而增加气动稳定性。同时这一方案保持了传统闭口箱梁结构的优点,如空气阻力系数小、涡振性能好等。

有关的计算和试验结果表明,这种方案对提高超大跨径悬索桥的抗风稳定性是卓有成效的。主跨为3 300 m的墨西拿海峡桥采用如图12所示的总宽度为60 m的3主梁方案,其颤振临界风速达到80 m/s[13]。在直布罗陀跨海工程的方案竞赛中,如图13所示的多跨双主梁的悬索桥方案被采用,对于主跨3 550 m和5 000 m的2种方案,其颤振临界风速分别为76 m/s与67 m/s[14]。同时,随着箱梁间距的增大,颤振临界风速随之明显上升。但是,随着开槽宽度的增加,这种解决方案将比传统的单箱梁方案消耗更多的材料,造价更昂贵。

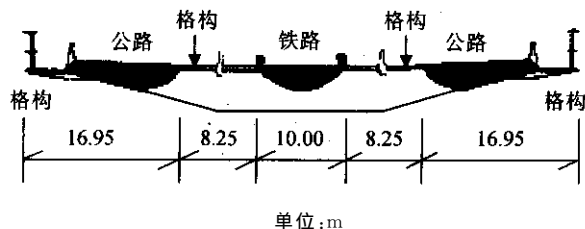


图 12 墨西拿海峡桥的3主梁方案

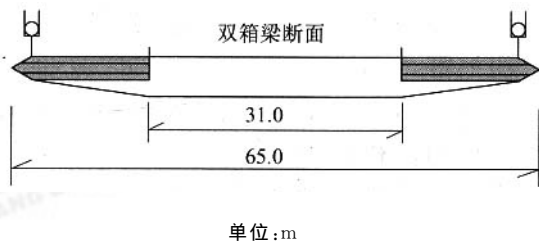


图 13 直布罗陀跨海桥的双主梁方案

2.4 垂直与水平稳定板

日本学者研究了加劲梁上附加中央稳定板(中央风障)和水平稳定板(导流片)措施,以进一步提高中央开槽断面悬索桥气动性能的作用。对主跨2 500 m的悬索桥在中央开槽、中央开槽加中央稳定板(图14(1))和中央开槽加中央稳定板及水平稳定板(图14(2))等3个方案的节段模型风洞试验结果表明:从中央开槽方案到中央开槽加中央稳定板方案,其颤振临界风速提高35%并达到62 m/s。在此基础上再加上水平稳定板后,其颤振临界风速又进一步提高了33%而达到82.15 m/s[15]。此外,主跨为3 000 m的悬索桥加上中央稳定板与水平稳定板后,风洞试验结果表明其颤振临界风速也提高了38%[16]。因

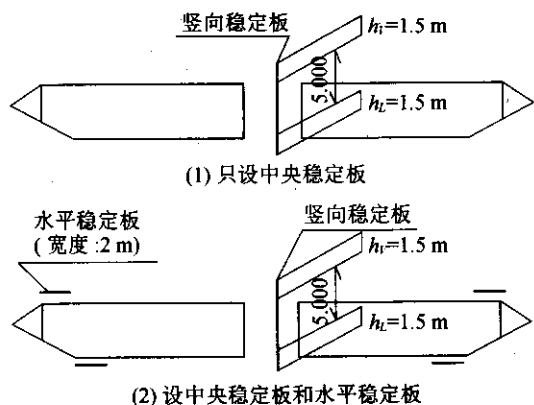


图 14 开槽加劲梁加垂直与水平稳定板

而,说明了竖向和水平稳定板是提高超大跨径悬索桥气动稳定性的一种有效可行的措施。

3 机械措施

机械措施主要是在加劲梁上安装一些辅助装置来增大结构的阻尼,并减小作用在结构上的气动力,从而达到提高悬索桥气动稳定性的目的。这种装置主要有 2 类,一类是阻尼器,另一类是在加劲梁断面的迎风、背风边缘安装的控制面。当加劲梁在气流作用下发生振动时,利用作用在控制面上的气动力来增大结构振动的阻尼,从而提高颤振临界风速。根据控制原理的不同又可分为主动控制和被动控制。

3.1 阻尼器

为了间接地提高结构的阻尼,调谐质量阻尼器(TMD)(图 15)在土木结构中得到了广泛的应用。TMD 是由质量块、弹簧和阻尼器组成的一个复杂的机械装置,是一种不需要能量供给的减振装置,其制振减振原理是将主结构的振动能量传递到频率相近的阻尼器上,然后加以耗散,从而达到减小结构振动的目的。调质阻尼器除了可以有效改善大跨桥梁的抖振和涡振性能外,还能提高桥梁的颤振稳定性。顾明通过试验进行了调质阻尼器对颤振控制的研究,结果表明:调质阻尼器可以有效地提高悬索桥的颤振临界风速,而且对于低阻尼钢箱梁的控制效率比较好^[17]。调质阻尼器的优点还在于它的低造价和简便性。

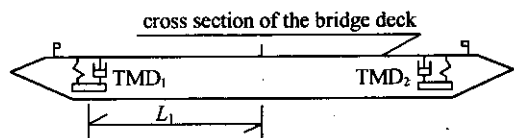


图 15 调谐质量阻尼器 TMD

3.2 主动控制措施

控制面的主动控制措施是在加劲梁的迎风、背风边缘安装上控制面,如图 16 所示。这些控制面完全与加劲梁分离,以避免造成二者之间的气动干扰。通过合理地反馈控制,利用主动输入的能量调整控制面运动的振幅和相位,以产生对系统振动起稳定作用的气动力,来达到抑制颤振发生的作用。为了保证超大跨径悬索桥的抗风稳定性,已有研究中提出了如图 17 所示的各种控制方法,主要有在主梁上安装可动翼板、在桥梁的迎风侧安装竖直可动板以及在主梁的迎风和背风面安装可动板或可动风嘴等^[2]。

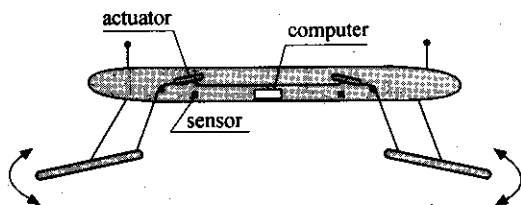


图 16 主动控制原理示意

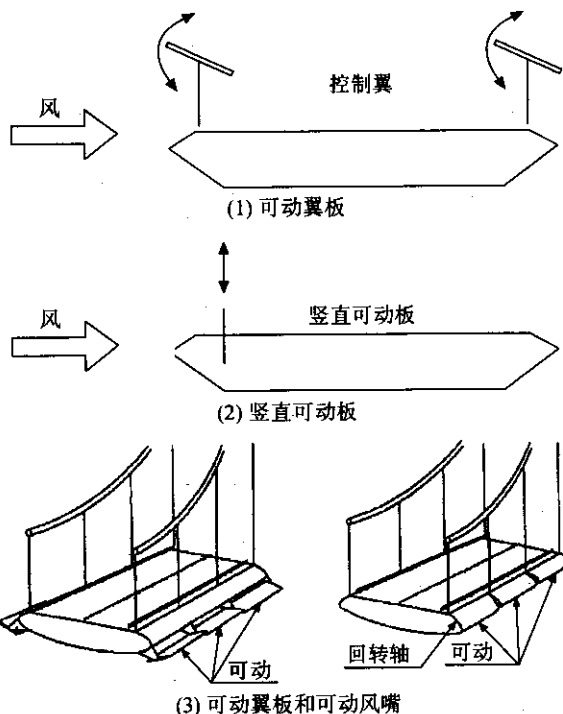


图 17 主动控制方法

控制面主动控制的优点是几乎可对任意风速都能进行反馈控制抑制颤振发生,其缺点是需要致动器、传感器、控制设备(执行、实现控制流)和外部能量输入等较复杂的控制系统。此外,采用主动控制措

施需要2~3个并行的工作控制系统以保证其可靠性,因为控制系统的失灵很可能导致桥梁结构的毁坏。目前主动控制措施还没有用于实际结构,但已有学者在工程可行性研究阶段提出采用主动控制措施。然而必需指出,即使主动控制措施具有非常好的效果,在应用到实际工程之前,必需先考虑其工程可行性。

3.3 被动控制措施

被动控制措施都采用固定在桥梁迎风或者背风面的翼板形式,如图18所示,以此来增加扭转或垂直振动阻尼,同样也可增加耦合振动阻尼。

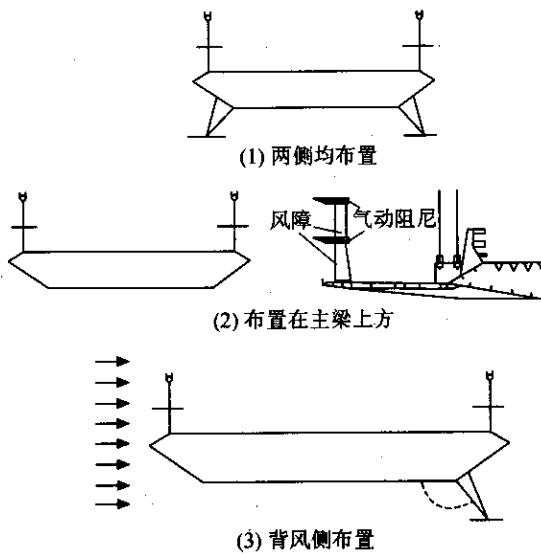


图18 被动控制方法

分析表明,在主梁上方和背风侧布置翼板,可以明显提高悬索桥的颤振临界风速。但在迎风侧和背风侧都布置翼板的方案,对提高悬索桥的气动稳定性效果却不大^[18]。为了解决墨西哥海峡桥的颤振问题,Brown领导的设计组提出了在分离梁基础上,再在主梁上方安装翼板(其与主梁上的外侧风屏连接在一起),由于翼板可对扭转振动与弯曲振动提供非常大的气动阻尼,故该桥的颤振稳定性还有大幅度的提高,临界风速将超过100 m/s^[19]。因此,在墨西哥海峡桥的最终设计中,两种气动措施均被采用^[20]。

采用控制面进行被动控制的方法,虽然不像主动方法那样可对任意风速都能解决颤振问题,但这种方法显然更为简便、可靠,易于为桥梁工程师所接受。

4 结语

本文从结构措施、空气动力学措施和机械措施

等3个方面系统地回顾了数十年来国内外在大跨径悬索桥抗风措施研究方面的进展,对各种措施的构造、控制原理及其适用性进行了评述。已有的抗风措施研究取得了卓有成效的成果,当中有些还被实际工程采用。但我们应该清楚地意识到这些措施中的大多数还只停留在理论或试验研究阶段,要真正达到实际工程应用则还有并不太短的距离。因此,需要我们再深入细致地开展研究,优化各种控制措施,探索更为有效的控制原理,通过不断的试验验证和完善,为早日运用到实际工程中去而努力。

参考文献:

- [1] 项海帆,葛耀君. 悬索桥跨径的空气动力极限[J]. 土木工程学报, 2005, 38(1).
- [2] 刘健新,译. 超长大桥建设序幕—技术者的新挑战[M]. 北京:人民交通出版社, 2002.
- [3] Yoneda M, Ohno K, Tamaki Y. On the best cross stay location for super long span suspension bridge. In Larsen, Larose&Livesey(eds), Wind engineering into 21st century, Rotterdam, Balkema, 1089-1094, 1999.
- [4] Astiz M A. Flutter Stability of Very Long Suspension Bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 1998, 3 (3).
- [5] Kubo Y, Sasaki M, Nakagiri H, Sakata T. Dynamic and flutter characteristics of long-span suspension bridges with 3-dimensional cable system[C]. Proc. Bridges into the 21st Century, Hong Kong, 1995.
- [6] Zhang X J, Sun B N. Aerodynamic stability of cable-stayed-suspension hybrid bridges[J]. J Zhejiang Univ SCI 2005, 6A(8).
- [7] Lin T Y, Chow P. Gibraltar Strait CrossingOA Challenge to Bridge and Structural Engineers [J]. Structural Engineering International, 1991, (2).
- [8] Menn C, Billington D P. Breaking Barriers of Scale: a Concept for Extremely Long Span Bridges [J]. Structural Engineering International, 1995, (1).
- [9] 周孟波. 悬索桥手册[M]. 北京:人民交通出版社, 2003.
- [10] 马如进,陈艾荣. 辅助结构对悬索桥的颤振稳定性的影响[J]. 结构工程师, 2001, (3).
- [11] Iwamoto M, Morizono Y, Nagai M, etc. Coupled flutter behavior of ultra long-span suspension bridges [C]. Proc. IABSE Symposium Long-Span and High-Rise Structures, Japan, 1998.
- [12] 项海帆,等. 现代桥梁抗风理论与实践[M]. 北京:人

民交通出版社, 2005.

- [13] Larsen A, Vejrums T, Esdahl S. Vortex models for aeroelastic assessment of multi element bridge decks [C]. Bridge Aerodynamics, Larsen & Esdahl (eds.), Balkema, Rotterdam, 1998.
- [14] Larsen A, Astiz M A. Aeroelastic considerations for the Gibraltar Bridge feasibility study [C]. Bridge Aerodynamics, Larsen & Esdahl (eds.), Balkema, Rotterdam, 1998.
- [15] Ueda T, Tanaka T, Matsushita Y. Aerodynamic stabilization for super long-span suspension bridges [C]. Proc. IABSE Symposium Long Span and High Rise Structures, Japan, 1998.
- [16] Sato H, Toriumi R, Kusakabe T. Aerodynamic characteristics of slotted box girders [C]. Proc. Bridges into the 21st Century, Hong Kong, 1995.
- [17] Gu M, Chang C C, Wu W, Xiang H F. Increasing of critical flutter wind speed of long-span bridges using tuned mass dampers[J]. J. of WEIA, 1998, 73.
- [18] Cobo del Arco D, Aparicio A C. Improving suspension bridge wind stability with aerodynamic appendages[J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(12).
- [19] Brancaleoni F. The construction phase and its aerodynamic issues. In: Larsen, A. (eds.). Aerodynamics of large bridges, Copenhagen, Balkema, Rotterdam, 1992.
- [20] Zasso A, Cigada A, Negri S. Flutter derivatives identification through full bridge aeroelastic model transfer function analysis [J]. Wind Engineering and Industrial Aero-dynamics, 1996, 60.

A Summary of Wind-Resistant Measures of Long Span Suspension Bridges

ZHANG Xin-jun, YING Lei-dong

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: A Large number of technological challenges are presented in the design and construction of crossing sea and linking islands bridges, in which the aerodynamic stability of extra long span suspension bridges is a dominant concern. The advance in the research on wind-resistant measures of long span suspension bridges at home and abroad is comprehensively reviewed, including the structural, aerodynamic and mechanical measures, and the merits and demerits of each measure and their applicability are also evaluated.

Key words: long span suspension bridge; wind-resistant stability; structural measure; aerodynamic countermeasure; mechanical measure

济广高速公路商荷段通车

2006 年 9 月 28 日, 历经三年建设的济南至广州高速公路商丘至菏泽(省界)段建成通车。这是河南省高速公路网“十五”期间重点建设项目之一, 也是商丘市境内建成通车的第三条高速公路。

该段高速公路南起商丘至亳州(省界)高速公路商丘北互通处, 与同时建成通车的安徽省境内亳阜高速公路相接; 北止于豫、鲁交界处的黄河故道, 与正在建设的山东德商高速公路相接, 全长 12.033 km。

商荷高速公路的建成通车, 拉近了商丘与京津塘地区经济圈之间的时空距离, 加快了国家高速公路网项目济南至广州高速公路的全线贯通, 对完善国家高速公路网和河南省高速公路网, 提高豫东地区公路运输能力将起到重要作用。