

陈政清：桥梁颤振研究的发展与挑战



邓文中院士曾经讲过一件事。大意是：大家都以为中国的建桥速度很快，其实，美国金门大桥的建设速度也并不比中国慢，而且当时的机械化程度没有现在高。他的话提醒我们要认真关注信息不对称问题。信息不对称有两个原因：一个是客观原因，就是信息传播的技术手段。我们现在的技术手段相当发达了，由客观原因引起的信息不对称已经非常少了。只要认真查阅，很多中文文献都有介绍：金门大桥于 1933 年开建，1937 年通车。还有一个是主观原因，就是明知却不说或不敢说，前者是掩耳盗铃，后者是皇帝的新衣。我个人认为，这确实是我们应该正视的问题。我们写论文作报告，先想一想世界上其他国家是什么样的状态？我们是不是真的第一？总而言之，我们首先应该了解世界，才能够让世界了解我们，这就是本文的宗旨。

颤振及颤振临界风速理论

桥梁的振动有多种类型，最明显的就是风振和地震，还有车桥振动和人致振动。每一类振动还可以再分为多种振动形式。本文只讨论风致颤振问题。

颤振是长的条带状结构在横向气流作用下发生的大幅振动，并且具有以扭转振动为主的特征。最早报道的颤振是飞机机翼的失速颤振。如果飞机起飞的迎角太大，机翼会发生强烈振动甚至导致飞机因失速而坠毁。在桥梁上，我们能看到的颤振灾害就是 1940 年美国旧塔科马桥的坠毁。

颤振是一种典型的气流与结构振动强烈耦合的效应。即气流导致结构振动，结构振动反过来又导致气动力增强，于是振动更加剧烈，最终导致振动发散结构毁坏。气动弹性力学就是专门研究这种强耦合气动效应的科学。桥梁颤振，必须要用气动弹性力学才能解释。依据气动弹性力学，桥梁颤振可以表示为

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = f(u, \dot{u}, U, \omega) \quad (1)$$

 桥梁杂志

式 (1) 右端荷载项不仅与风速有关，而且与自身的运动状态即位移和速度有关，所以称为气动自激力。颤振就是一种由气动自激力引起的自激振动。结构的运动状态是待求解的未知函数，式 (1) 是一种两边都含有未知函数的微分方程，它是很难精确求解的。

现有风洞实验技术已经可以精确再现颤振的全过程：在低风速下，振动幅度很小，高于某一特定风速后，振幅突然增大，风速再增加，振幅就会增加得更大，形成振动发散状态。这个特定风速就称为颤振临界风速。塔科马桥坠毁过程就是这样一种现象，临界风速在 18m/s 左右。从抗风设计的角度来看，我们不一定需要分析颤振全过程，只要能确定颤振临界风速，并确保临界风速高于桥址处的设计检验风速就可以了。这样一来，问题得到极大的简化，因为临界风速可以归结为方程（1）的特征值问题，求解相对容易。与静力稳定荷载相比，颤振临界风速是一个动力稳定荷载。到目前为止，抗风设计一直是基于临界风速理论。

二维颤振临界风速理论的发展

旧塔科马桥事故，促使了桥梁风工程学科的创立和发展。经过若干力学大师的努力，将航空领域的颤振理论加以改造，在 1950 年代建立了二维两自由度颤振理论，这个理论把桥梁假定成无限长的等截面的一条带子，叫做“条带假定”。依据这一假定，只要研究桥梁截面的振动，可以简化为二维平面问题。考虑到桥梁的宽度远大于高度，可进一步再忽略横向振动，于是只要考虑竖向和扭转两个自由度，所以称为二维两自由度颤振理论，计算模式如图 1 所示。

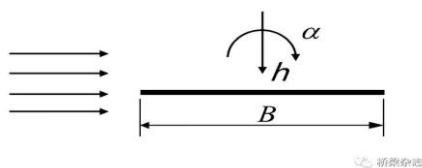


图 1 二维两自由度的桥梁颤振计算模式

这样一来。方程 (1) 就可以简化为两个方程的组合。第一个方程是竖向振动；第二个方程，就是扭转振动。接下来的问题是如何确定竖向气动力和扭转气动力矩。1935 年，希奥多尔森就把这个条带做进一步的假定，假定这个截面的厚度是无限薄，薄到没有厚度，只有宽度，称为“理想平板”，他采用复变函数的位势理论得到了理想平板自激气动力的理论解。理想平板模型有助于理解气动弹性力学特性。设想如果理想平板不动，气流沿平板宽度方向横向流过，由于理想平板的厚度为零，对流场没有任何干扰，也就不会对平板产生任何作用力；但是如果这个平板本身振动起来的话，气流就会对平板产生与运动相关的作用力了，所以它是一种气动弹性的力。

用理想平板的气动力来计算桥梁的颤振临界风速，准确度不高。因为桥梁的断面不是一个理想的平板，而是一个钝体，更具体地说，对于理想平板而言气流沿物体的轮廓流动，基本不产生分离和尾流，而气流流经钝体断面时则会出现明显的流动分离，钝体后部会产生宽阔的尾流。真正的桥梁断面的气动力是没有理论解的。于是斯坎农教授等多位学者引进了颤振导数的概念，把这个气动力假定为位移和速度的一个线性组合。那么，这个位移和速度前面有一个组合系数，这个系数就叫做颤振导数，它是随着无量纲的风速而变化的。斯坎农同时还提出了一种通过节段模型风洞试验确定桥梁颤振导数的方法，称为自由振动法。至此，一个能基本满足设计需要的二维颤振理论就基本建立了。

这个理论至今仍有很重要的指导性意义，它预示了两种基本的颤振方式：一种是钝体截面的纯扭转颤振，如旧塔科马桥颤振；第二种，当桥面很接近理想平板时，就会出现竖向和扭转耦合的颤振。现在我们仍然采用的节段模型颤振试验，就是以这个理论为依据。

1960年代，英国学者在运用二维颤振理论方面作出了杰出贡献。通过颤振研究，英国塞文桥在世界上第一次采用了扁平钢箱梁，而且计算出了施工全过程中的颤振临界风速变化曲线(图2)。这个曲线表明，当已安装梁段长度达到跨度的20%到30%之间的时候，这个状态的颤振临界风速最低，是最危险的施工状态。以后随着拼接长度的增加，它的颤振临界风速会增加。这个结论至今都对指导施工有重要意义。

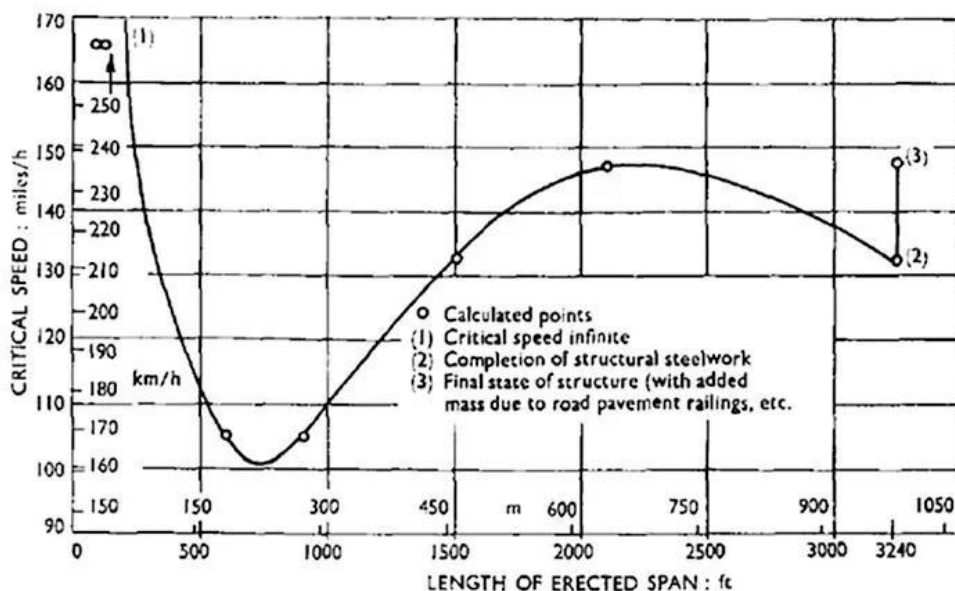


图 2 1960 年代英国计算出 severn 桥施工全过程的颤振临界风速变化曲线 (原载于 1966 年 Aerodynamics Division, National Physical Laboratory)

我国现代意义上的桥梁风致振动研究，是从 1980 年代开始的。同济大学项海帆院士团队最早在国内实现了二维颤振理论的试验和分析技术，开发了识别颤振导数的自由振动法。笔者团队 1996 年在国内开发了识别颤振导数的强迫振动法，与自由振动法比较，强迫振动法可以更为准确地、在更宽的风速范围内测定 8 个颤振导数。西南交大和长安大学也是我国早期开展桥梁风致振动研究的单位之一。

三维颤振理论的发展

二维颤振理论的局限性是很明显的，它至多考虑竖向和扭转两个纯模态的耦合，而很多桥梁如斜拉桥等，存在模态不纯和多个模态参与颤振的现象，就需要三维颤振理论。1980 年代，计算机与有限元已经很发达了，在这样的情况下，利用三维有限元，把气动力荷载加进去，就可以进行三维颤振的数值分析。美国的萨卡和斯坎隆提出在三维颤振理论中，应该进一步考虑截面横向自由度运动的气动力，于是成为三维有限元模型和三个气动自由度结合的三维颤振理论。在这个理论框架内，需要识别 18 个颤振导数。

三维颤振分析有两类方法，一类叫模态坐标法，一类叫物理坐标法。直接在三维有限元的模型上进行颤振分析，就是物理坐标法。这个方法最先由 Miyata 和 Yamada 在 1990 年提出。由于方程包含上千个甚至上万个自由度，在当时的计算机水平上，难以推广。如果用模态缩减的办法，只考虑对颤振有贡献的低阶模态，也就是前面十几阶模态，就可以把这个方程压缩到十几阶，这就是

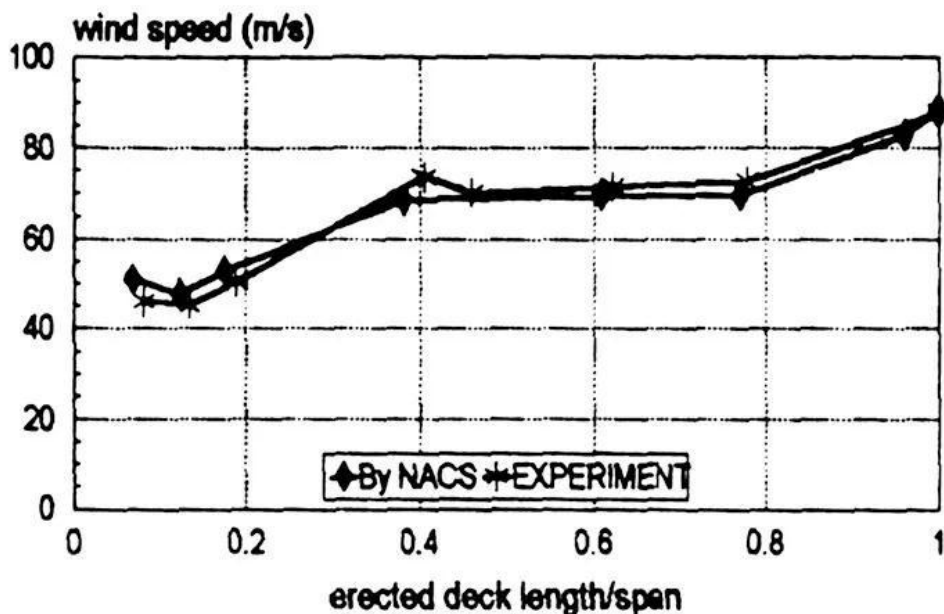
模态坐标法。所以，在当时的条件之下，最先发展的是模态坐标法，因为它的计算量相对少很多。早在 1980 年代，谢霁明和项海帆，Agar, Namini 等多人提出了各自的三维颤振的模态分析法。

笔者 1991 到 1992 年在英国学习期间，注意到前人模态坐标法的一个共同的缺点。就是它需要以风速和频率作为两个参数（因为风速和频率共同确定了描述气动力所需的颤振导数），在两个参数的平面区域内去搜索颤振解。搜索过程需要专业的判断，难以在设计人员中应用。在两个参数的一个平面上找到一个精确解，就好比要在一张大地图上找出某个地点，这是很困难的。

笔者在 1992 年提出了一种只需要对无量纲风速这一个参数搜索颤振解的模态分析法，称为 M-S 法。由于是单参数法，可以实现自动搜索，计算量和操作难度大大降低。1993 年，用这个方法计算出虎门悬索桥的施工全过程颤振临界风速，结果与同济大学气弹模型试验一致（见图 3）。与图 2 相比，曲线最低点位置基本一致，但以后一直上升，不再下降。1994 年，朱乐东又应用这一方法计算了江阴悬索桥施工全过程的颤振临界风速曲线。

2000 年，同济大学葛耀君教授在加拿大学习的时候，认为物理坐标法可以考虑全部模态，应该称为全模态法，并且用它计算了国内外多个大桥的施工全过程颤振临界风速。需要指出的是，这个全模态并不是桥梁结构真实的全模态，有限元模型中的全部模态中，只有前一部分模态可以模拟桥梁真实的模态，后面的高阶模态总是会逐渐失真的。

华旭刚在 2006 年提出了一个标准化的全模态方法。这个方法不需要自编计算程序，可以在现有的有限元商业软件如 ANSYS 上，通过定义气动力单元来实现颤振分析。这个方法发表以后，受到学者欢迎，连续几个月下载量排名第一，并且有很多国家的学者直接采用了这个方法。



桥梁杂志

图 3 虎门桥架梁全过程颤振临界风速变化曲线
(陈政清 1993)

三维颤振分析需要识别三个自由度的 18 个颤振导数，这一工作更加需要强迫振动法。笔者团队和同济大学团队合作，相继实现了 18 个颤振导数识别法，达到了国际先进水平。

最近，大桥院设计了一座跨度 600 多米的人行桥，采用悬带桥结构，桥面不是平的，而是始终与主缆曲线保持平行。风洞试验证明其颤振形态是横向弯曲和扭转的耦合，颤振分析和试验都必须考虑横向自由度和横向颤振导数。这个实例说明，随着桥型的多样化，三维颤振分析的必要性会更加明显。

提高颤振临界风速的主要途径

如果桥梁初步设计方案的颤振临界风速低于设计检验风速，就需要采取提高颤振临界风速的措施，它包括结构强化措施和气动优化措施。结构强化措施是通过提高影响颤振的结构扭转模态和其他模态的频率，来提高颤振临界风速。气动优化措施是通过改变主梁断面的外形，来优化气动性能。借鉴飞行器设计的经验，在原有断面上附加各种导流或扰流装置，如导流板、扰流板、上下稳定板等等，或者改变栏杆，检修轨道的位置、形状和尺寸，都具有气动优化效果。但目前优化过程没有定规，主要依靠经验和反复进行风洞试验，此外在优化颤振性能时还要注意保持断面抗涡振的性能不致降低。

抗风设计面临新的挑战

颤振研究的目的是为桥梁抗风设计服务。一个大跨度桥梁的抗风设计，不仅要满足颤振、涡振和抖振的多方面的要求，还要兼顾成本和施工技术等重要因素，因此需要评估-优化-再评估的多次反复。在提高抗风设计水平的道路上，我们还有很多工作要做。

变单方案单目标抗风设计

为多方案多目标优化设计

由于各种原因，我国一些桥梁在选定一个方案后，尽管抗风评估出现了大的问题，也仍然对原方案情有独钟，不愿意作出大的改变，而是修修补补，甚至存在侥幸心理，认为实验室预测的风振建成后不一定出现或可以补救。这种方式设计的桥梁建成后，往往留下了遗憾。



日本明石海峡悬索桥

日本明石海峡桥的设计过程很值得我国桥梁设计者学习研究。明石海峡桥主跨跨度 1991 米，1996 年建成，直到今天一直保持着世界最大跨度纪录。该桥在施工期遭遇阪神大地震却没有遭受破坏，建成后除出现过长吊索的局部振动外，没有其他风振问题。设计方花了非常长的时间来选择它的桥梁断面。选择的原则不仅要性能最优，还要考虑造价低、施工方便。三个因素同时兼顾，这是一个很好的设计思想。

明石海峡悬索桥设计过程中一共研究了 4 种截面，见图 4。第一种截面就是分离双箱梁。它具有造价低，颤振临界风速容易满足要求的优点，但是

即使增加稳定板，也还会有涡振。于是坚决舍弃了这一方案。第二个方案是很扁平的桁架，加了一个流线型的风嘴后颤振临界风速还是达不到要求。第三个方案是单箱钢箱梁。该方案在靠近桥塔处，用高的钢箱梁；在跨中部分，用低的钢箱梁。两者结合也可以满足全部抗风要求，而且价格也不高，于是列为备选方案。第四个方案是高桁架方案，加设上、下稳定板后可以满足颤振要求，也没有涡振问题。这个第四方案与第三方案相比，造价也相当，但是制造施工更为方便，成为最后实施方案。第三方案虽然没有实现，但是它表明，即使跨度达到两千米，单箱梁方案也是有可能满足抗风要求的。

后来，我国润扬大桥的钢箱梁也设置了上稳定板，可能是我国第一个采用气动优化措施的悬索桥。湖南矮寨大桥也是桁梁悬索桥，加装了上下稳定板。目前我国桥梁抗风设计中，应用气动优化措施已经普遍推广。

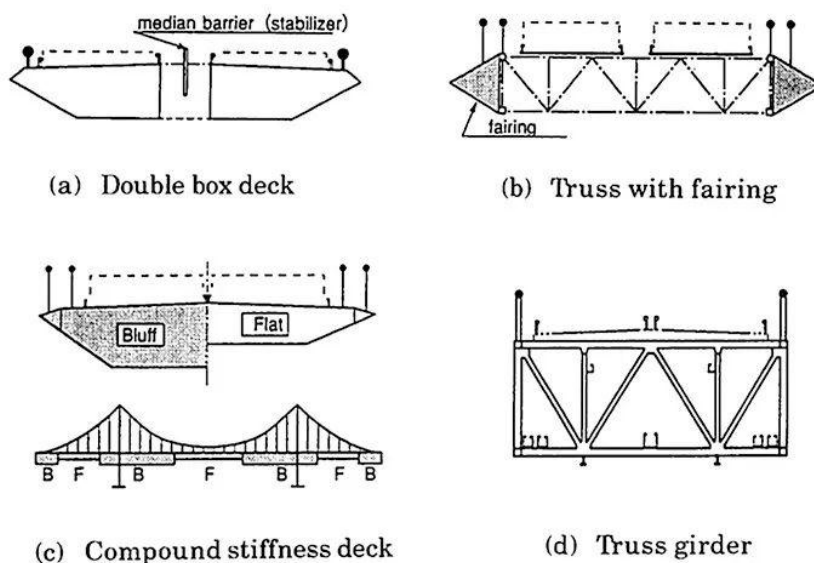


图 4 日本明石海峡悬索桥抗风研究的四种加劲梁设计方案

有必要进行超临界颤振研究

对于目前大量采用的钝体截面索支承桥，颤振风洞试验得到的风速-振幅曲线没有明显的临界风速点，具有软颤振特性。现有的基于特征值分析的颤振临界风速理论，无法描述这种软颤振特性。另一方面，金门大桥 1950 年遇到了一次大风，实际上已经超过了它的颤振临界风速，进入了颤振后状态。但实测的风速-振幅曲线远低于风洞试验曲线。说明实际桥梁在风速超过临界风速后，振幅的增长速度也没有节段模型风洞试验曲线那么快。这种现象是可以理解的，因为颤振临界风速理论没有考虑到振幅增加后，索支承桥的阻尼和刚度都可能增加，而气动自激力效应有可能下降。如果要考虑上述因素，需要深入研究桥梁超临界状态的特性，建立超临界颤振理论。这是一个很难的但是很有意义的课题。中国的桥梁研究工作者有得天独厚的条件和机会，应该在理论上有所突破，在世界桥梁发展历程中作出重要贡献。否则，我们就只不过是某些技术层面上丰富和应用了前人的成果。



美国金门大桥

积极慎重地开展颤振的主动和半主动控制研究

随着技术的进步，采用主动或半主动的振动控制手段抑制颤振也是有可能的。目前国内外也在这方面有所探索，应当积极鼓励。这种探索应该首先考虑所提出的方案，在特大风速和特大跨度桥梁上应用的可能性。例如有一种模仿飞机在桥梁两侧加装水平可变翼板的方案，由于它工作时必须按颤振频率不断改变姿态，结构刚度和技术要求比飞机襟翼还要高。如果在千米以上的桥梁上安装，成本可能大于桥梁本身，而且可靠性很难保证。