

# 大跨径拱桥设计中的挠度控制与风荷载分析

邬旭伟

四川省公路规划勘察设计研究院有限公司

**摘要：**大跨径拱桥是现代桥梁工程中的重要类型，其设计和施工面临复杂的技术挑战。挠度控制和风荷载分析作为确保桥梁结构安全性和使用舒适性的关键环节，涉及材料、结构力学和施工技术等多个方面。本文旨在探讨大跨径拱桥设计中挠度控制与风荷载分析的相关理论和实践，通过案例研究揭示成功的设计策略，并展望未来发展趋势。

**关键词：**大跨径拱桥；挠度控制；风荷载分析

**【DOI】** 10.12254/j.issn.2096-6539.2024.22.095

## 引言

大跨径拱桥由于其结构特点和应用场景，如跨越宽阔水域或深谷，对设计与施工提出了极高的技术要求。这类桥梁往往面临巨大的挠度控制和风荷载挑战。挠度控制涉及材料的选择、结构设计优化以及先进技术的应用，如预应力技术和合理的拱形设计，这些都是确保桥梁安全性和功能性的关键因素。另一方面，风荷载分析对于大跨径拱桥同样至关重要，因为这些桥梁轻盈的结构特点使它们特别容易受到风的影响，风荷载的不恰当处理可能导致结构不稳定甚至失稳。因此，风洞实验和计算流体力学模拟等方法常被用来准确评估风荷载对桥梁的影响，并据此优化设计以提高结构的抗风能力。如此综合性的技术挑战不仅要求设计者具备深厚的专业知识，还需要灵活运用现代工程技术和创新解决方案。

## 一、挠度控制

在大跨径拱桥的设计中，挠度控制是确保桥梁结构安全性、耐久性和使用舒适性的关键环节。挠度是指结构在荷载作用下产生的垂直变形，它直接影响桥梁的运营安全和使用体验。如果挠度过大，不仅会损坏桥梁的结构元件，影响整体稳定性，还可能导致桥面振动明显，影响行车舒适度。

### （一）影响因素

影响大跨径拱桥挠度的主要因素包括材料选择、拱形设计、荷载分布及支撑条件等。首先，材料选择对挠度控制至关重要。应用高强度、低密度材料，如高强度钢、预应力混凝土和新型复合材料，可以有效减小结构自重，进而控制挠度。此外，材料的弹性模量和疲劳性能也直接影响桥梁的变形特性。使用弹性模量高的材料有助于提高桥梁刚度，从而降低挠度。

### （二）技术方法

常用的挠度控制技术和方法包括预应力技术、结构优化设计和支撑体系改进等。预应力技术通过在桥梁关键部位施加预应力来增强结构刚度，抵消部分外部荷载引起的变形。例如，在混凝土拱桥中，通过在受拉区施加预应力钢筋，可以大幅减少结构挠度。结构优化设计则通过计算机仿真和优化算法，调整结构几何形状和材料分布，找到最优解以控制挠度和其他结构性能。

另一种有效的方法是优化支撑体系。合理设计和布置桥墩和桥台，增强支撑刚度，有助于减小桥梁的变形。例如，采用刚性支座或通过桥台处增加横向支撑，提高支点约束条件，可以显著降低桥梁挠度。同时，使用减震和隔震装置，如弹簧支座和阻尼器，能够有效控制因动荷载（如风载、地震等）引起的变形。

总之，控制大跨径拱桥的挠度是一项系统工程，涉及材料科学、结构力学和施工技术等诸多方面。通过合理选择材料、优化拱形设计和采用先进的预应力和支撑技术，可以有效控制桥梁挠度，确保结构的安全性和耐久性。随着工程技术的不断进步，挠度控制将变得更加精准和高效，为大跨径拱桥设计提供有力保障。

## 二、风荷载分析

风荷载是指风作用在桥梁结构上的力，它主要包括风的静态作用（如平均风压）和动态作用（如阵风和颤振）。在大跨径拱桥设计中，风荷载分析至关重要。由于大跨径拱桥通常跨越宽阔的水域或深谷，其结构形式高大而轻盈，容易受到风荷载的显著影响。未充分考虑风荷载的设计可能导致结构不稳定、过度振动、甚至灾难性坍塌。如位于塔科马海峡大桥美国华盛顿州的塔科马海峡大桥，通车四个月后却在18m/s的低风速下颤振而破坏，造成巨大损失。

进行风荷载分析时，首先需要建立合适的风荷载模型。常用的方法包括风洞实验和数值模拟。风洞实验通过在缩尺模型上进行物理实验，模拟真实风环境下的风压分布和流场特征。这种方法能够直观地展示风的作用效果，提供高精度的数据。然而，风洞实验成本较高，时间周期较长。

数值模拟方法，如计算流体力学（CFD），则通过计算机仿真风环境中的流体力学行为来预测风荷载。CFD模型能够详细描述风的速度场、压力场和涡流结构，灵活性强且成本相对较低。但其精度依赖于模型的准确性和计算能力的强大支持。结合风洞实验和CFD仿真可以提升风荷载分析的准确性和效率。

在风荷载计算中，常用的基本方法包括静态分析和动态分析。静态分析主要关注风的平均效应，即在一定时间内恒定的风压作用下的结构响应。依据《建筑结构荷载规范》等标准，通过公式和经验数据计算桥梁各部分的风压分布和作用力。这种方法简便而实用，适用于初步设计阶段。

动态分析则考虑风的随机性和时间变动特性，通过时域和频域分析方法，研究风引起的桥梁振动和共振现象。时域分析通常采用直接积分法或状态空间法，逐步求解风荷载下的动态响应。频域分析通常采用傅里叶变换，将时间信号转换为频率信号，分析频谱特点和共振响应。这种方法可以深入理解风致振动机制，优化结构抗风设计。

为减少风荷载对桥梁的不利影响，可通过以下设计优化手段：

### 1. 优化桥梁形状

流线型设计能够减少风的阻力，降低风压。例如，通过设计桥面横截面为流线型，减少涡流和风的乱流生成，从而降低风荷载。在拱形设计中，采用较为平滑的曲线形态，有助于风流顺畅通过，减少局部压力集中和涡流现象。

### 2. 增加结构刚度和阻尼

提高桥梁整体及局部刚度可以有效降低变形和振动。通过设置阻尼器、风致振动吸能装置（如调谐质量阻尼器）等，可以减小风致振动幅度，抑制结构的共振现象。

### 3. 使用高性能材料

高强度、轻质材料的使用能够减轻结构自重，同时增加刚度，减少风荷载的作用效果。例如，碳纤维复合材料在拱桥结构中的应用，既提高了材料强度，又减轻了自重，提升了抗风性能。

### 4. 调整结构布局

合理布局桥塔、拱脚等关键部位的结构形式，增强整体稳定性。例如，在塔吊布置时，利用多塔结构提升风载分散效果。布置较为密集的横梁和支撑，有效分散风荷载，减少局部应力集中。

总之，风荷载分析是大跨径拱桥设计中的关键环节，通过精确的风荷载模型和分析方法，结合优化设计手段，可以有效控制风荷载的影响，确保桥梁的安全性和可靠性。随着技术的不断进步，风荷载分析将越来越精细和科学，为大跨径拱桥的建设提供坚实保障。

## 三、面临的挑战与对策

大跨径拱桥设计中，挠度控制与风荷载分析是两个至关重要的方面，这两者关系到桥梁结构的安全性、耐久性和使用舒适性。然而，要在实际工程中有效解决这些问题，设计者面临诸多技术和施工挑战。本文将探讨这些挑战，并提出相应的对策。

### （一）材料选择与结构刚度

大跨径拱桥需要材料不仅具有高强度和高刚度，还需要在重量上保持合理，以减小自重挠度。然而，传统钢和混凝土材料在大跨径结构中的应用存在局限性，特别是在同时兼顾强度、刚度与重量的要求时。

面对上述挑战，可以采用新型高性能材料如预应力混凝土和碳纤维复合材料，可显著提高桥梁的整体刚度和抗风性能。预应力技术的应用能够在桥梁受拉区域增强抗拉性能，减少变形。碳纤维复合材料不仅具有高强度和高刚度，且重量轻，有助于减轻桥梁自重，降低挠度。同时，在具体设计中，通过多次模拟和实验（包括风洞实验和计算流体力学模拟）验证材料性能，确保其在实际应用中的有效性和可靠性。

### （二）复杂的风荷载条件

大跨径拱桥通常处于高速风和复杂风环境中，风荷载作用具有极大的不确定性和随机性。这需要详细的风荷载分析以确定风压分布和风致振动效应。而风荷载的动态特性（如阵风、涡振和颤振）对桥梁安全的影响尤

为复杂，增加了设计难度。

面对上述挑战，可以采用综合利用风洞实验和计算流体力学（CFD）模拟技术，建立精确的风荷载模型。风洞实验能提供直观可靠的实验数据，而CFD模拟则具有灵活性和高效性，通过两者结合，可以高精度地预测不同风况下的风荷载。为了减小风荷载的不利影响，可以采用流线型设计减少风阻和涡流。此外，安装风致振动控制装置如调谐质量阻尼器（TMD）和其他吸能设备，通过增加结构阻尼，显著减小风致振动。

### （三）施工技术与质量控制

大跨径拱桥的施工过程复杂，对施工技术和质量控制提出高要求。施工过程中的误差、应力集中及不均匀沉降等都可能引起挠度和结构稳定性问题。此外，高空作业和复杂地形对施工组织和安全管理也带来诸多挑战。

面对上述挑战，可以采用先进的施工技术和精准的质量控制手段。例如，在拱桥施工中，使用缆索吊装和分段拼装技术，可以有效减小施工过程中产生的二次应力和变形。施工过程中的精确监测和控制是关键，通过使用高精度测量仪器和实时监控系統，确保施工质量和结构的准确安装。此外，建立严格的质量管理体系，制定标准化的施工流程，进行全过程的质量检查和验收，确保每个施工环节都达到设计要求。

## 四、案例研究

在大跨径拱桥设计与施工中，挠度控制和风荷载分析至关重要。本文将通过两个著名的大跨径拱桥项目——中国上海的卢浦大桥和中国武汉长江大桥，具体分析它们如何处理挠度控制和风荷载问题，并提供实际数据和分析结果，说明所采取措施的效果。

### （一）卢浦大桥

卢浦大桥是中国上海的一座重要跨江拱桥，总长度约为3,900米，主桥跨径为550米，是世界上采用钢拱桥形式跨度最长的拱桥。该桥在设计 and 施工中面临重大技术挑战，其中挠度控制与风荷载分析尤为重要。

卢浦大桥采用了以下挠度控制措施：

1. 高性能钢材：采用Q370qE级高强度钢材，提高了桥梁的整体刚度与强度，减少了挠度。

2. 预应力技术：在桥梁关键位置的抗拉部位施加预应力，提高结构的抗弯能力，减少了由于荷载引起的挠度。

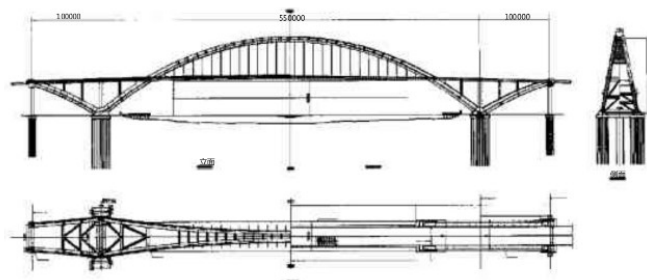
3. 合理拱形设计：采用优化的拱形设计，以确保桥梁在受力后的形变最小。设计人员通过多次模拟和试验，确定最优的拱形参数。

风荷载是卢浦大桥设计中的一个关键考虑因素，设计团队采取了以下措施：

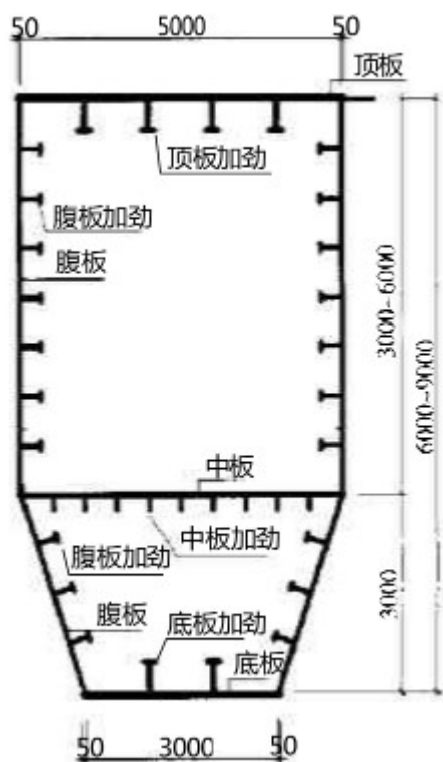
1. 风洞实验和数值模拟：采用风洞实验和计算流体力学（CFD）模拟技术，对大桥所在区域的风环境进行详细分析。实验结果和模拟数据显示，主桥拱肋部分在高速风环境下可能会产生涡振和颤振现象。

2. 流线型设计：卢浦大桥通过优化拱肋和桥面板的形状，使其具备更好的空气动力性能，从而减少风阻和涡振效应。例如，采用了流线型截面设计，减少了风荷

载作用下的涡流产生。整体结构示意图与拱肋示意图如下：（图一、图二）



图一：桥面整体结构示意图



图二：拱肋截面

3. 调谐质量阻尼器（TMD）：在大桥的关键位置安装TMD系统，通过增加结构的阻尼比，显著抑制了风致振动。

### （二）中国武汉长江大桥

武汉长江大桥是连接中国武汉市武昌与汉阳的一座重要大桥，全长1,670米，主跨跨度467.5米，是中国早期采用现代化技术建设的典范之一。尽管建成于1957年，其在挠度控制和风荷载分析方面的成功经验至今仍具借鉴意义。

武汉长江大桥在设计时采取了以下措施以控制挠度：

1. 材料选择：采用优质钢材与混凝土组合结构，确保桥梁具有足够的刚度和强度。

2. 桥梁结构布置：合理安排拱桥的支撑体系，通过

增加桁架结构的密度，增强整体刚度，从而有效控制挠度。例如，通过在主跨两侧增加对桁架的支撑点，减小单跨跨度的挠度。

3. 抗变形措施：施加额外的支撑梁和内部加强筋，限制结构在荷载作用下的变形。

在风荷载分析方面，武汉长江大桥也采取了先进的措施：

（1）风洞实验：尽管当时的实验设备有限，设计团队仍通过建立缩尺模型进行风洞实验，分析大桥在不同风速和风向下的受力情况。

（2）结构加强：在分析结果基础上，设计人员对容易产生涡振和颤振的部位进行了加固处理。通过在桥面与拱肋间增加横撑和支架，增强了整体结构的抗风能力。

（3）保护措施：设置防风装置和风力隔离板，减少大风对关键部位的直接冲击。

### 4. 分析与效果

两座桥梁项目的成功实施表明，科学的挠度控制与风荷载分析对于大跨径拱桥的安全和耐久性至关重要。卢浦大桥通过采用高性能材料和现代化计算方法，结合预应力技术和阻尼器安装，实现了显著的挠度和风致振动控制。据项目监测数据，桥梁最大挠度控制在设计允许范围内，风振幅度显著降低。

通过对这两个著名大跨径拱桥项目的分析，我们看到，在处理挠度控制和风荷载方面，合理的材料选择、优化的结构设计、先进的计算和模拟技术以及科学的实验验证，都是确保桥梁安全和耐久性的重要手段。这些成功经验不仅为现有工程提供了宝贵的技术参考，也为未来更多大跨径拱桥建设奠定了坚实的基础。

### 结语

挠度控制和风荷载分析在大跨径拱桥设计中具有关键作用。通过合理材料选择、优化结构设计、先进计算模拟技术及科学实验验证，可以有效应对设计与施工中的技术挑战。卢浦大桥和武汉长江大桥的案例表明，科学的设计与施工策略是确保桥梁安全性和耐久性的有效手段。未来，随着新材料及智能技术的应用，桥梁设计将变得更加精确和高效，推动桥梁工程实现更大的技术突破。

### 参考文献

[1] 蔡大江. 桥梁工程中大跨径连续桥梁施工技术研究[J]. 运输经理世界, 2023, (18): 84-86.  
 [2] 刘争刚. 大跨度预应力混凝土T构挂篮悬浇施工要点及挠度控制[J]. 工程建设与设计, 2021, (07): 152-154.  
 [3] 龙华. 连续刚构桥施工监控及挠度控制探究[J]. 四川建材, 2020, 46(10): 128-129.  
 [4] 黄浩. 风荷载作用下悬索桥受力分析与静风稳定性研究[J]. 公路工程, 2019, 44(04): 98-102+148.  
 作者简介：邬旭伟，1991年，男，汉族，四川彭州，硕士研究生，四川省公路规划勘察设计研究院有限公司，工程师，研究方向：桥梁勘察设计。