

考虑气候变化因素的桥梁设计与抗震性能研究

邬旭伟

四川省公路规划勘察设计研究院有限公司

摘要：气候变化已成为全球关注的重要议题，其对工程结构尤其是桥梁的影响逐渐显现。随着温度升高、降雨模式改变和极端天气事件频发，桥梁承受的环境压力不断增加，传统设计方法对此类变化考虑不足。桥梁不仅需要承载交通负荷，还必须经受自然环境的严峻考验，因此，桥梁设计必须考虑到气候变化因素，以确保其安全性和耐久性。本文旨在探讨气候变化对桥梁结构的影响，分析其带来的挑战，并探讨应对这些挑战的设计策略和技术创新。

关键词：气候变化；桥梁设计；抗震性能

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.21.090

引言全球气候变化对基础设施的影响日益显著，尤其是桥梁这种关键的交通设施面临的挑战愈加严峻。气候变化导致的温度升高、降雨模式变化及极端天气事件的频发，对桥梁的结构稳定性和耐久性构成了重大威胁。首先，随着全球气温不断上升，桥梁材料的热胀冷缩现象将变得更加频繁，钢材和混凝土的不同膨胀特性会在结构内部产生额外应力，影响整体稳定性。此外，高温也会加速材料的老化，如混凝土的碳化和钢筋锈蚀，导致材料强度下降。其次，极端降雨和洪水事件的增多，对桥梁基础的安全性提出了新的考验。桥墩和桥基常位于河流或海洋中，频繁的泥沙流失和水蚀作用会大大削弱基础的稳定性。同时，湿润环境下材料更易腐蚀，降低桥梁使用寿命。极端天气事件，如台风和飓风，也对桥梁的抗风性能提出了更高要求，强风和冰冻融化循环会对结构完整性造成破坏。

在此背景下，桥梁设计需要顺应气候变化的新要求，通过引入高性能材料、创新设计原则、先进施工技术及智能监测系统等多种手段，提高桥梁的耐久性和适应性，以确保其在日益复杂和恶劣的环境条件下仍能安全稳定地发挥功能。因此，基于综合多灾害背景的桥梁设计研究显得尤为迫切和重要。

一、气候变化对桥梁的影响

气候变化对桥梁的影响正逐渐成为全球工程界关注的重点。随着全球气候变暖和极端天气事件的频发，桥梁结构面临的环境条件正在发生重大变化，这对桥梁的设计、维护和长期使用提出了新的挑战。

首先，温度升高是气候变化中最显著的因素之一。随着全球平均气温的上升，桥梁结构材料的热胀冷缩现象将更加频繁。钢材和混凝土是桥梁最常用的材料，它们的热胀冷缩特性不同，这种差异会导致桥梁结构内部产生额外的应力，影响连接件和支撑结构的稳定性。此

外，高温还可能加速混凝土的碳化和钢筋的锈蚀，削弱材料的强度和耐久性。

其次，降雨模式变化也是一个关键因素。极端降雨和洪水事件的增多对桥梁的基础构成严重威胁。桥墩和桥基常常位于河流或海洋中，洪水和暴雨可能导致泥沙流失和冲刷，使桥梁基础不再稳固。另外，在高湿环境下，桥梁材料更容易受到腐蚀，尤其是钢结构桥梁。频繁的水蚀和化学腐蚀会降低桥梁的使用寿命和安全性。

极端天气事件的增多也是气候变化影响的重要方面。强风、台风和飓风等极端天气事件对桥梁的结构完整性和抗风性能提出了更高的要求。强风不仅会施加额外的横向力和振动，还可能对桥面的交通运输构成危险。在极端情况下，风剪力效应可能导致桥梁构件断裂或变形。此外，极端天气下的冰冻和融化循环也会对桥梁结构造成破坏，尤其是在温度经常在冰点上下波动的地区，冰冻膨胀和融化收缩会导致材料疲劳和裂缝扩展。

综合来说，气候变化对桥梁的负载承受能力和耐久性产生了多方面的影响。温度的升高、降雨模式的改变以及极端天气事件的频发都可能导致桥梁结构的疲劳加剧和耐久性降低。这就要求工程师在桥梁设计过程中考虑更多的气候因素，采用更加耐久和抗腐蚀的材料，加强桥梁结构的监测和维护。在设计阶段，可以通过提高桥梁的弹性设计、采用可调整的伸缩缝设计等手段来应对温度变化；通过增强基础的防冲刷设计和加强排水系统来应对降雨模式变化；通过优化结构形态和抗风设计来减轻极端天气的影响。

二、气候变化因素下桥梁设计中的抗震技术

桥梁设计中的抗震技术是保障桥梁在地震中保持结构完整和功能的关键。现有的抗震设计方法和技术多种多样，以下是几种主要的方法和其实际应用中的评估。

首先，基于性能的抗震设计（PBD）是当前主流的设计方法之一。PBD通过定义在不同地震强度下桥梁的性能目标，设计出能够满足这些性能目标的结构。这种方法强调桥梁在不同地震烈度下的功能性和安全性，采用多级抗震设防措施，包括弱化部分构件以便地震能量释放，从而保护整个桥梁结构。

其次，位移控制设计（DDBD）是另一种常用的抗震设计方法。DDBD强调通过控制结构的位移反应来实现抗震目标。设计师首先确定桥梁在地震作用下的最大允许位移，然后根据这一目标设计结构的强度和刚度，使其在地震中能够保持预期的位移范围。该方法适用于长跨度桥梁和高墩桥梁等对位移敏感的结构。

另外，减震和隔震技术也在桥梁设计中得到了广泛应用。减震装置如阻尼器和能量吸收器可以有效降低地震时的结构振动，减小内力和变形。隔震技术通过在桥梁支座处安装隔震垫层，隔离地震波的传递，从而减轻对桥梁上部结构的冲击。这些技术在现代大跨度桥梁和重要交通枢纽中尤其常见。

然而，这些抗震技术在应对气候变化时仍有局限性。首先，气候变化带来的极端温度变化可能影响隔震材料的性能，如某些橡胶隔震垫在高温或低温下的力学性能变化，可能削弱其隔震效果。其次，气候变化引发的次生灾害，如洪水和台风，可能与地震共同作用，复杂的多灾害背景增加了抗震设计的难度。现有的抗震设计主要针对地震单一因素，如何有效地综合考虑地震与气候变化引发的多种环境因素仍是一个挑战。

综上所述，现有的抗震设计方法和技术提供了有效的手段来增强桥梁在地震中的抗震性能，但在气候变化背景下，还需要进行多灾害综合评估和设计，提高桥梁的整体韧性和适应性。这可能需要新材料、新技术的开发以及更为复杂的设计和分析方法的应用，以确保桥梁在未来更加恶劣和复杂的环境条件下仍然安全可靠。

三、气候适应性桥梁设计的创新方案

随着全球气候变化加剧，桥梁设计面临新的挑战。极端天气事件的频发、温度和降雨模式的变化，以及海平面上升，都是对桥梁结构耐久性和安全性的重要威胁。这些环境变化要求我们在桥梁设计中引入更多的适应性和创新性方案，以确保桥梁能够在未来几十年中保持功能和安全。

（一）新型材料选择

1. 高性能混凝土和钢材

高性能混凝土（HPC）和耐候钢材是未来桥梁建设中应优先考虑的材料。HPC具有更加优异的抗压强度和耐久性，能够更好地抵抗由于温度变化、盐碱腐蚀等气候条件导致的损害。耐候钢材在暴露于大气中时会形成一层稳定的氧化物保护膜，减少了对环境的依赖，且不需要频繁的维护和涂装。

2. 先进复合材料

碳纤维增强复合材料（CFRP）是另一类值得关注的材料。这种材料具有重量轻、高强度、高耐腐蚀性的特点，适用于桥梁的关键受力构件和易腐蚀部位。CFRP的应用能够显著提高桥梁的耐久性和维修周期，减少长期维护成本。

（二）设计原则的调整

1. 自适应设计

自适应设计原则强调桥梁在设计阶段即考虑未来气候变化的不确定性，通过可调节、可扩展的设计来增强桥梁的适应性。例如，可调节的支座系统能够根据温度变化自动调节桥梁的长度变化，减小温度变化带来的内力应力。此外，采用模块化设计也能方便未来的调节和维护。

2. 韧性设计

韧性设计旨在使桥梁在极端条件下能够通过变形或部分损坏来吸收能量，从而避免结构整体崩溃。例如，可以引入耗能装置如黏滞阻尼器和金属阻尼器，在地震或台风作用下吸收大部分能量，保护主结构不受到严重影响。同时，设计冗余结构例如多重剪力墙和多级支撑系统，确保局部损坏不会导致整体失效。

（三）施工技术的创新

1. 预制拼装技术

预制拼装技术能够提高施工效率，减少施工现场的环境影响。这种技术在工厂内预制桥梁构件，然后运至现场进行拼装，大大缩短了施工时间，也减小了对现场环境的依赖。尤其在复杂地形和气候条件严酷的地区，该技术能够显著降低施工风险和成本。

2. 智能施工和监测

智能施工技术包括无人机勘测、自动化施工机械、以及智能监测系统等。无人机勘测能够在施工前提供精准的地形和环境数据，帮助优化设计和施工方案。自动化施工机械提高了施工精度和效率，减少了人工误差和施工时间。智能监测系统在施工过程中实时监控结构应力、变形等数据，确保施工质量。

（三）长期维护和管理

1. 智能管理系统

气候适应性桥梁设计需要结合智能管理系统，采用传感器网络和物联网技术，实现桥梁全生命周期的监测和管理。这些系统可以实时监测桥梁的健康状态，包括结构应力、变形、温度变化等，并通过大数据分析和预测模型，预判可能的结构问题。及时采取维护措施，减少突发性故障和维修成本。

2. 耐久性维护策略

维护策略的调整应基于气候适应性设计原则。例如，定期进行防腐和防水处理，利用新型抗菌涂层减少生物腐蚀，应用表面纳米涂层增强材料耐久性。此外，建立动态维护计划，根据智能监测系统的数据调整维护频率和范围，确保桥梁在极端气候条件下仍能保持最佳状态。

未来的桥梁设计必须在充分考虑气候变化的前提下，采用新型材料、自适应设计和智能施工技术，结合智能管理和维护系统，以实现结构的长效性和安全性。这不仅保护了桥梁资产的投资价值，更重要的是确保桥梁在极端天气条件下的人命安全和交通畅通。通过创新设计和技术的综合应用，我们能够建造出更多具有气候适应性的桥梁，迎接未来环境变化的挑战。

四、案例研究

（一）荷兰的 Zeeland Bridge（泽兰大桥）

泽兰大桥是荷兰最长的桥梁之一，连接斯考登岛和北贝弗兰岛。这座桥不仅是交通要道，更是荷兰应对气候变化、提高基础设施适应性的重要试验场。荷兰受海平面上升和极端天气的威胁严重，因此在泽兰大桥的设

计和改造中采用了多种气候适应性技术。

气候设计理念的应用：

1. 防洪设计：大桥的设计充分考虑了海平面上升带来的影响，桥基加固并采用了防水材料，以应对高水位和洪水的冲击。桥墩的设计包括防波堤结构，能有效减少波浪的侵蚀作用。

2. 灵活的结构设计：泽兰大桥的结构设计充分考虑了气候变化带来的不确定性。例如，桥梁的伸缩缝和支座系统允许一定程度的位移和变形，能够在极端温度变化和风力作用下保持结构完整性。

3. 实时监测系统：泽兰大桥配备了先进的桥梁健康监测监测系统，利用物联网（IoT）和智能传感器实时监控桥梁的应力、振动和位移变化。该系统能够提前发现潜在的结构问题，进行预防性维护，避免重大事故的发生。

优化方向：

1. 综合环境保护：尽管大桥在防洪和防风方面非常成功，但其对周边生态环境的影响需要更综合的评估和缓解措施，如设置更多的鱼类通道和鸟巢保护设施。

2. 能源自给：引入可再生能源系统，如太阳能和风能发电装置，为桥梁的监测系统和照明供电，提升桥梁的能源自给能力和可持续性。

（二）中国的杭州湾跨海大桥

杭州湾跨海大桥连接上海和宁波，全长36公里，是世界上最长的跨海大桥之一。该桥梁不仅面临频繁的台风和强潮影响，还有沿海腐蚀的挑战。为了提高桥梁的气候适应性，设计中引入了多项创新技术。

气候设计理念的应用：

1. 抗风措施：杭州湾跨海大桥对抗台风进行了专门设计。桥梁采用了钢箱梁和混凝土组合结构（如图一），具备较高的抗风性能。在桥塔和桥面之间安装了大跨度的拉索系统，可以有效分散和承受强风的冲击。



图一：正在架设钢箱梁的杭州湾跨海大桥

2. 排水设计：为应对极端暴雨天气，大桥配备了高效的排水系统，确保桥面不会积水，保证车辆行驶安全。排水系统包括桥面的纵向和横向排水沟，以及桥墩间的雨水收集管道。

优化方向：

1. 生态保护：尽管桥梁设计考虑了气候适应性，但在施工和长期使用过程中对海洋生态系统的影响需要进一步减缓。可在桥梁周围设置人工珊瑚礁，促进海洋生物多样性。

2. 智能监测拓展：目前的大桥监测系统主要关注结构健康，可以增加环境监测功能，实时监控气象和海洋条件，提供更加综合的安全预警。

上述案例表明，气候适应性桥梁设计的成功在于系统化的设计理念和综合技术应用。高性能材料、抗风抗震设计、先进的监测系统以及巧妙的排水处理措施是成功的关键。然而，面对不断变化的气候条件和未来不可预测的环境挑战，桥梁设计依然有巨大的改进空间。

结语

面对日益严峻的气候变化挑战，桥梁设计必须进行系统性的调整和创新。通过选择高性能材料、自适应和韧性设计以及先进施工技术，桥梁可以在极端环境条件下保持其功能和安全。此外，通过智能监测系统的应用和不断优化环境适应性措施，桥梁的长期耐久性得到保障。未来的研究应着力于开发更高性能的材料和智能监测技术，并结合多灾害综合评估，推动桥梁设计朝着更可持续、更安全的方向发展。只有通过持续创新和技术进步，才能确保桥梁在未来几十年内依然能够安全、可靠地服务于社会。

参考文献

- [1] 吴明杰, 颜燕祥, 蔡恒. 大跨度连续曲线箱梁桥地震反应计算分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2024, 57(05): 601-607.
- [2] 杨哲. 高烈度区高墩连续刚构桥抗震性能研究[J]. 中国铁路, 2024, (04): 36-41.
- [3] 甄国君. 桥梁设计中的安全性及耐久性研究[J]. 交通科技与管理, 2023, 4(19): 161-163.
- [4] 张一山. 桥梁设计中隔震设计的重要性研究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2023, (25): 138-140.
- [5] 彭建新, 廖鹏飞, 王斌, 等. 气候变化影响下钢筋混凝土碳化损伤不确定性分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(08): 3181-3191.

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，研究方向为桥梁勘察设计。