

冗余度理念在桥梁结构设计中的应用研究

文 / 杨文 临汾市住房和城乡建设局

张子瑞 中国市政工程华北设计研究总院有限公司

摘要：本文围绕冗余度理念在桥梁结构设计中的理论分析与实际应用，展开了探讨。首先系统阐述冗余度的概念及其对桥梁结构稳定性的重要影响。其次，从现代桥梁的设计需求出发，分析冗余度理念对提升桥梁安全性、抗毁性，以及全寿命周期性能的重要意义。最后，以山西省临汾市河汾一路跨汾河大桥为例，详细阐述冗余度理念在实际工程中的应用，并以此提出在桥梁结构设计中，实现冗余度理念的具体方法。本文旨在通过冗余度理论与实践的结合，为现代桥梁的设计工作，提供科学参考和技术支撑。

关键词：冗余度理念；桥梁结构设计；应用

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.10.094

引言

随着社会经济的快速发展，桥梁工程建设的规模和复杂性持续增长，传统的设计方法，已经难以满足现代化桥梁对于安全性、抗毁性以及全寿命周期性能的要求。桥梁结构的安全性，不仅取决于构件的承载能力，还与结构的内力重分布能力、承载能力储备密切相关。因此，在现代桥梁的设计中，引入冗余度理念，将会成为提升桥梁结构安全性、抗毁性以及全寿命周期性能的一个重要举措。

一、冗余度理念的理论分析

（一）冗余度理念

冗余度直接影响桥梁结构的系统稳定性，是桥梁结构设计时强度储备、承载能力储备的重要指标之一。通过计算冗余度，可以确保桥梁在局部结构发生破坏的情况下，整体承载能力维持在可承受的范围内。冗余度从安全的角度出发，反映了结构承载能力的储备比率。合理的冗余度设计能够使结构的内力分布与变形更加均匀，从而在局部构件受损时，仍能在一定时间内保持整体结构的几何形态与基本功能的稳定性。

（二）桥梁结构中的冗余度种类

桥梁结构的冗余度，在桥梁设计中具有重要意义，主要分为内部冗余度、结构冗余度以及系统冗余度三种类型。

1. 内部冗余度

内部冗余度与单个构件或材料在局部损伤后的荷载重分布能力相关。通过优化材料特性、调整受力面的分布范围、选择合理的连接形式，均能够增强结构的内部冗余度。例如，钢结构采用栓接连接，能有效阻止裂纹扩展，避免局部断裂传递至相邻部件，而使用焊接，则可能导致裂纹扩展至相邻构件，进而引发更大范围的破坏。

2. 结构冗余度

结构冗余度是指桥梁在部分构件失效的情况下，通过内力重新分配，以维持整体稳定性的能力。连续结构

或超静定结构具有较高的冗余度，其多路径荷载传递特性，使内力能够在局部失效时转移至相邻构件，从而避免结构整体失效。相比之下，简支结构及连续结构的边跨，则会因为内力重分布的能力不足，导致冗余度较低。

3. 系统冗余度

系统冗余度与桥梁整体的荷载传递路径和内力调节能力密切相关。在多梁式桥梁中，当桥面板和隔板具有较高的内力重分布能力时，整体结构能够在局部构件失效时，依然保持功能性，从而表现出较高的系统冗余度。系统冗余度通过荷载路径的多样性与调节机制，有效提高了桥梁结构的安全性和可靠性。

（三）冗余度系数

冗余度系数(R)是桥梁结构设计中，衡量其承载能力和荷载重分布能力的一个重要参数。在桥梁设计过程中，可通过将结构分解为局部构件与整体体系两部分，对冗余度进行定量计算与分析，综合评估桥梁的承载能力与荷载再分配的能力，为桥梁结构的设计和优化，提供科学依据。

二、冗余度理念在桥梁结构设计中的重要性

传统桥梁的工程设计，主要依赖于经验借鉴和既有设计方法，关注桥梁结构钢筋、混凝土等关键材料的选择，并通过对桥梁的内力、应力、变形进行力学验算，确保设计方案的安全性和合理性。这种设计方式，以构件的承载能力为核心，侧重于局部区域的静态性能分析。然而，其研究重点主要集中在桥梁结构处于完整的状态下，对于局部构件失效后的力学行为，以及整体结构的荷载再分配能力关注不足。此外，传统设计在复杂工况下的非线性动态分析、极端条件下的抗毁性研究，以及桥梁全寿命周期的性能评估方面，存在明显不足。

随着社会经济与科技的快速发展，桥梁工程的规模和复杂性不断提升，传统设计方式已无法完全满足现代化建设的的要求。在现代桥梁设计中，需要引入精细化、模块化、系统化设计理念，并结合数字化建模、有限元仿真以及其他先进技术手段，对桥梁的整体受力进行更

为系统的分析。这不仅可以提高桥梁的设计精度，还能更好地应对复杂工况和多种环境因素的挑战。

作为桥梁结构设计中的关键理念，冗余度的引入为提升桥梁结构的安全性和抗毁性提供了重要支撑。桥梁结构作为由大量构件共同组成的结构，其核心目标是在部分构件失效的情况下，通过结构内力的重新分配，避免整体结构的崩塌。冗余度理念正是通过量化桥梁系统的承载能力储备比，优化设计方案，以确保桥梁具备足够的强度储备。现代设计利用冗余度分析，不仅可以预测桥梁在局部损伤或失效后的力学行为，还能提升桥梁的耐久性与抗疲劳性能，使其在复杂的外部条件下保持长期稳定。

因此，在桥梁结构设计的过程中，将冗余度作为重要的设计评价指标，可有效提升桥梁的抗毁性与全寿命周期性能。这一理念的应用，充分体现了现代桥梁设计向精细化、安全化，以及系统化发展的趋势，也为桥梁工程的建设，提供了科学的技术保障。

三、冗余度理念在桥梁结构设计中的实际应用

（一）项目介绍

山西省临汾市河汾一路跨汾河大桥是全省首座采用人车分离式设计的双层城市景观拱桥，位于临汾市北部。该大桥全长 320 米，桥宽 40 米，采用下承式系杆拱桥设计，呈现非对称的三连拱结构，跨径布置为 100m+140m+80m。上层为双向八车道机动车道，下层为 6 米宽的非机动车道和人行道。

（二）冗余度理念的应用

1. 内部冗余度

河汾一路跨汾河大桥在内部冗余度设计中，通过对材料和构件的优化提升了桥梁的可靠性。高强度钢材和高性能混凝土的应用，使得桥梁在长期荷载和复杂环境条件下，具备更高的抗疲劳性和耐久性。与此同时，关键构件如拱肋和系杆预留了额外的承载能力，即使局部受损，整体仍能保持安全运行。除此之外，桥梁表面涂层的防腐处理以及抗风性能设计，进一步降低了环境因素，对桥梁使用寿命的影响，为内部冗余度提供了有力保障。

2. 结构冗余度

在结构冗余度方面，该大桥采用了非对称的三连拱结构，各个拱之间相互独立，又相互支撑，有效分散了荷载，增强了桥梁的整体稳定性。与此同时，通过使用减震支座等技术手段，确保桥梁在地震等极端条件下具备高可靠性，避免单点失效，对结构整体的连锁影响。

3. 系统冗余度

在系统冗余度方面，双层人车分离式的设计，有效避免了车辆与行人的交通冲突，上层机动车道和下层非机动车道及人行道之间，可相互独立运行，即使一层功能受限，另一层仍能保持畅通。桥面宽 40 米的双向八车

道布局，提供了充足的交通冗余，即使局部车道封闭，也不影响整体通行能力。与此同时，双层人车分离式的设计，与双向八车道的布局，也避免桥梁后期的维护工作，对整体交通功能造成重大影响。

四、冗余度理念在桥梁结构设计中的实现

（一）建立计算模型

冗余度理念的引入，为桥梁结构设计提供了科学性与可靠性的理论支持，是提升桥梁结构设计水平的重要手段。在计算模型构建的过程中，应当以优化桥梁结构设计方案、提升桥梁的承载能力、延长桥梁全生命周期为目标。

首先，需要根据桥梁结构的实际需求，进行合理的材料配比设计，以确保计算模型的科学性与适用性。在桥梁结构设计的过程中，借助先进的信息化设计平台，对桥梁的整体结构及其关键构件，进行科学测试与数据分析，构建完整且精准的计算模型，为优化设计方案提供坚实的数据支撑与理论基础。

其次，应当在初步设计阶段，明确桥梁结构的荷载分布规律与各构件间的受力传递关系，对计算模型进行全局性分析与优化。通过整合局部结构模型，并利用非线性分析技术，对桥梁关键部位的承载能力进行评估，确保设计方案能够在复杂受力工况下，表现出良好的冗余性能。

与此同时，为验证模型的可靠性，应当结合施工计划，对桥梁结构设计方案进行分段分析。通过动态模拟桥梁施工过程中，荷载传递与受力变化的规律，识别设计中的潜在问题，并提前制定优化对策，以确保施工过程与后续运营阶段的安全性与可靠性。



图 1 桥梁结构三维模型

（二）完善可行性评估方案

桥梁结构冗余度设计的核心在于，对整体安全性与经济性的综合把控，而可行性评估方案的建立，则是实现这一目标的重要环节。通过整合多种设计方案并进行系统性比选，可优选出兼具较高经济效益与较强施工可行性的方案，从而最大限度的满足桥梁工程建设的功能需求与实际要求。

在可行性评估中，应当将桥梁整体结构及其关键构件的冗余度，作为评估的重点。使用计算模型，对桥梁在运营过程中，可能出现的受力失效问题，进行科学预测。通过动态分析各构件的冗余响应能力，对设计方案的细节进行优化，确保其符合工程运营与维护的要求。与此同时，应当重点评估设计方案，在实际施工条件下的可操作性，明确桥梁各构件之间的协调关系，确保方案在全生命周期内具备较高的安全冗余度与运营可靠性。

（三）优化桥梁结构冗余度设计流程

在桥梁结构的设计中，冗余度的优化，是保障工程安全性与耐久性的一个关键环节。设计流程的优化，应当以冗余度的量化计算为基础，结合桥梁关键构件的失效模式与整体结构的安全性要求，全面提升桥梁设计的科学性与可靠性。

首先，应当对桥梁整体的承载能力进行精确计算，明确关键构件的受力分布及其对结构整体安全性的影响，为优化设计提供科学依据。在此基础上，运用非线性分析技术，分别计算完整桥梁结构与受损桥梁结构的承载能力，从而评估冗余度是否符合设计标准。如果发现冗余度未达标，则需要通过调整桥梁整体结构的形态，或者优化特殊构造细节，来提升系统安全性。例如，增加横向连接件或调整主梁的几何形态，均可有效提高桥梁在抗震与抗风工况下的冗余性能。

其次，应当对桥梁的几何形态、构件尺寸、力学特性进行全面分析，验证其在受力极限状态下的安全冗余度。通过对设计流程中，各个关键节点的优化，确保桥梁结构在承受局部损伤或突发荷载时，仍能够保持整体功能的完整性。

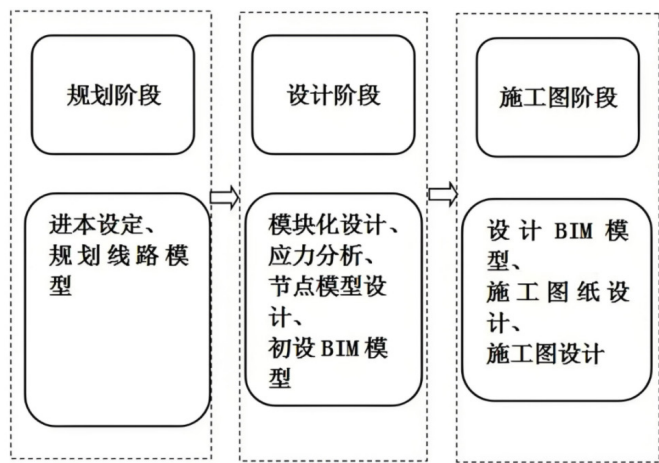


图2 桥梁冗余设计流程

（四）遵循桥梁结构设计原则

在冗余度理念的指导下，桥梁结构设计应当严格遵循科学性、综合性，以及连续性原则，以确保设计方案的全面性和合理性。

1. 科学性原则：桥梁结构设计需要基于科学的计算

与分析方法，结合桥梁具体工程需求，选择合理的设计手段。通过优化结构设计，达到降低桥梁自重，提升桥梁整体性能的目的。

2. 综合性原则：桥梁结构的设计需要从整体出发，将材料的选取、构件的设计，以及施工的工艺相结合，全面提升桥梁的承载能力与耐久性能，最终实现桥梁结构功能的最优化。

3. 连续性原则：在设计过程中，应当特别关注桥梁结构的整体连续性，避免局部失效对整体功能的完整性与稳定性，造成不利的影响。通过扩大受力面的分布范围，可有效提升桥梁整体的稳定性，确保其在长期运行条件下的可靠性与安全性。

结语

冗余度理念是现代桥梁结构设计的核心理论之一，为提升桥梁结构的安全性、抗毁性，以及全寿命周期性能，提供了科学依据。本文基于冗余度的基本概念，以实际的工程项目为例，明确了冗余度在桥梁结构设计中的关键作用，并以此提出了，在桥梁结构设计中，实现冗余度理念的具体方法。研究表明，将冗余度作为桥梁结构设计的重要评价指标，能够有效应对复杂工况和极端条件下的挑战，为桥梁结构设计向精细化、安全化、系统化方向发展，提供了理论基础和实践支持。

参考文献

[1] 卢彭真, 杨柳, 李登国. 基于ADDIE模型的“组合结构桥梁”课程思政教学设计[J]. 宁波工程学院学报, 2024, 36(04): 109-115.

[2] 潘国庆. 多层分离式桥梁基础结构设计及施工优化研究[J]. 四川建材, 2024, 50(11): 174-175+184.

[3] 葛海芳, 杨乐, 陈强, 等. 预制桥面板钢板组合梁桥合理结构体系设计研究[J]. 市政技术, 2024, 42(11): 143-155.

[4] 李国桢. 基于抗倾覆稳定性分析的桥梁结构设计研究[J]. 科技资讯, 2024, 22(21): 159-161.

[5] 林本清. 大跨筒支高强钢管混凝土组合桁梁桥设计研究[D]. 福建农林大学, 2022.

[6] 郭凯斌. 高速公路桥梁设计冗余度应用[J]. 运输经理世界, 2022, (01): 77-79.

[7] 缪卫清, 宋华, 常军. 基于极限承载与局部破坏冗余度的桥梁优化设计[J]. 中外公路, 2021, 41(05): 126-131.

[8] 潘玉刚. 冗余度在桥梁设计阶段的应用[J]. 交通世界, 2021, (22): 23-24.

[9] 王立勇, 刘莉芬. 基于极限载荷与局部损伤的箱体梁桥冗余度优化计算设计探究[J]. 城市道桥与防洪, 2020, (12): 186-189+23.

[10] 吴艳丽. 桥梁细部设计对耐久性的影响分析[J]. 建筑技术开发, 2020, 47(12): 137-138.