

大跨度桥梁设计要点及优化措施研究

贾培栋

郑州市交通规划勘察设计研究院有限公司，河南 郑州 450000

[摘要]文章介绍了大跨度桥梁的设计要点与优化方式，在针对桥梁结构特点和力学反应、施工方面的基础上，从悬索桥、斜拉桥以及拱桥的不同结构体系中，探讨设计要点；同时说明了合理选型、静动态分析、抗风抗震设计、施工过程控制对于大跨度桥梁安全运行的重要性。通过以结构体系创新、高性能材料运用、施工工艺提升、气动性能改善为基础，再结合非线性分析和全过程监测的方法，实现了桥梁结构在安全保障、经济效益、耐久性等方面全面提升，并为此类大跨桥梁工程提供技术支持。

[关键词]大跨度桥梁；设计要点；结构优化；抗风设计；施工控制

DOI: 10.33142/ec.v8i9.17978 中图分类号: U442.5 文献标识码: A

Research on Design Points and Optimization Measures of Large Span Bridges

JIA Peidong

Zhengzhou Transportation Planning Survey, Design and Research Institute Co., Ltd., Zhengzhou, He'nan, 450000, China

Abstract: The article introduces the design points and optimization methods of large-span bridges. Based on the structural characteristics, mechanical reactions, and construction aspects of bridges, the article explores the design points from different structural systems of suspension bridges, cable-stayed bridges, and arch bridges; At the same time, it explains the importance of reasonable selection, static and dynamic analysis, wind and seismic design, and construction process control for the safe operation of large-span bridges. Based on structural system innovation, high-performance material application, construction technology improvement, and aerodynamic performance improvement, combined with nonlinear analysis and full process monitoring methods, the comprehensive improvement of bridge structures in terms of safety assurance, economic benefits, durability, etc. has been achieved, and technical support has been provided for such large-span bridge projects.

Keywords: large span bridges; design points; structural optimization; wind resistant design; construction control

引言

大跨度桥梁是当代桥梁工程中的重要组成内容，在跨越沟壑、江河湖海、峡谷等各种地形时起到了无法替代的作用。伴随着经济社会发展以及科学技术的进步，我国大跨度桥梁建设飞速发展，建成无数世界级的大跨度桥梁。但是当前我国对于大跨度桥梁的设计在结构体系的选择、受力分析、材料的应用以及施工方面还存在着一些问题，那么针对这些问题可以提出怎样的解决措施才能使大跨度桥梁的设计更为完善呢？因此，在文章中通过介绍大跨度桥梁的设计要点来对上述问题展开具体的讨论，希望对于提高大跨度桥梁的设计质量以及工程的经济性、安全性、耐久性等方面有所帮助。

1 大跨度桥梁结构体系及特点分析

1.1 主要结构体系类型及适用范围

大跨度桥梁以悬索桥、斜拉桥、拱桥、梁桥及刚构桥结构体系为主，综合考虑跨径、地形地质条件和经济因素确定桥梁选型方案，具体为：悬索桥跨径为800~1500m，适用于深水或海峡等超大跨径工程，主缆承拉、吊杆传力，结构柔度大，自重轻；斜拉桥跨径为400~800m，借助斜

拉索将主梁荷载直接传至索塔上，具有较高的刚度、较好的抗风能力、施工适应性强的特点；拱桥跨径一般取200~400m，荷载通过压力经拱肋传至拱脚，要求基础有足够的强度来承受水平推力；梁桥及刚构桥跨径分别为100~200m、150~300m，前者以受弯为主，后者则靠刚节点实现整体现浇，具有较强的连续性和抗震能力，各种体系受力相差较大，在工程应用过程中根据实际情况选择对应的体系是最优的选择，如图1所示。

1.2 大跨度桥梁结构受力特点

大跨桥梁因其轻薄且结构自振频率低（悬索桥约为0.05~0.2Hz），其在风荷载和地震作用下的动力响应较大；桥体受力表现为典型的几何非线性，在大变形条件下，主缆/斜拉索初始状态形状与荷载响应呈非线性相关关系，此时不可用线性弹性分析方法来计算桥梁荷载作用下的挠度等几何变量，而应采用非线性有限元分析方法。大跨桥梁悬索桥主缆在荷载作用下形状的重新分布以及内力的重新调整均应计入设计之中。

此外，大跨度桥梁因受三维空间荷载耦合作用的影响较大，竖向、横向风力和纵向地震力叠加构成空间受力复

杂, 加之索结构空间布置增加了受力的复杂程度, 需要精细化的空间结构分析。因桥跨较长, 会出现较大的温度变形, 为了控制混凝土以及钢-混组合结构桥的温度变形, 需要设置有效的伸缩装置或采取温度补偿措施。动力效应显著, 在分析中应重点考虑颤振及涡激振动等气动失稳问题, 并通过动力时程分析与风洞试验来控制其危害程度。

2 大跨度桥梁设计要点分析

2.1 静力设计要点

大跨度桥梁静力设计重点体现在桥的结构布置和荷载分析上, 涉及大跨桥梁的跨径分配、桥塔高度、主梁高宽比、索距、矢跨比等几何参数对受力的影响, 在此基础上通过桥位处的地质条件和所处的荷载情况来确定最优方案。例如, 悬索桥矢跨比可控制为 $1/8 \sim 1/12$, 塔高与跨径比可控制为 $1/5 \sim 1/6$; 斜拉桥主梁高跨比一般取 $1/60 \sim 1/100$ 。对于恒载, 一般为桥跨结构本身质量等的重力加载, 活载与恒载比重约为 $1:5$, 对这两种荷载需准确计算, 在确定活载过程中要考虑温度作用、风荷载影响及施工工况, 计算分析桥梁各工况在全寿命周期内的安全受力状态。

运用考虑几何非线性和材料非线性的有限元方法对结构开展分析, 可以较为真实地反映大变形及索结构非线性响应; 对悬索桥应进行主缆找形和成桥索力计算, 对斜拉桥则需进行索力优化及施工状态调整, 在成桥状态下实现桥梁合理的内力分布; 对于主梁、桥塔、锚碇、索鞍、索夹以及锚固等局部区域应力较大部位, 应建立局部细部模型进行应力验算, 并完善构件构造、明确节点传力路径、保证安全裕度充足。

2.2 动力设计要点

首先应对大跨度桥梁的动力设计重点关注风振效应和地震激励下的结构响应, 抗风设计应以 100 年一遇的基本风速为依据开展静力风荷载计算, 保证桥梁主梁的最大静风位移不大于 $L/400$, 并进行气动稳定性验算, 利用风洞试验获得气动导数, 确保桥梁颤振临界风速不小于 1.5

倍的设计风速, 避免发生气动失稳。对于涡激振动以及抖振现象, 可对主梁断面气动外形进行优化, 并在主梁上安装中央稳定板或导流板等被动控制装置, 再配合 TMD 等减振措施提高结构阻尼, 以减小结构的振动幅度。

进行抗震设计应考虑大跨度桥梁长周期特性和地震动频谱的耦合效应, 在设防烈度下采用非线性时程分析或反应谱法计算桥梁的动力响应值, 合理设置隔震支座和粘滞阻尼器等耗能构件, 并将位移及内力的最大值控制在允许范围之内。服务水平应满足舒适性要求, 即桥面竖向及横向加速度不得大于 $0.1g$, 以免引起人体共振, 进而避免造成行车效果差和车辆抖动; 对于震动频率在 $1 \sim 3\text{Hz}$ 范围内可能引起的共振, 不应引发人体的明显共振反应, 以提升行车体验感, 如表 1 所示。

表 1 大跨度桥梁抗风设计关键参数表

设计参数	控制指标	优化方法
基本风速	100 年重现期风速	精确气象数据分析
静力风荷载	最大静风位移 $< L/400$	结构刚度调整
颤振临界风速	临界风速 > 1.5 倍基本风速	截面气动外形优化
涡激共振风速	涡激共振幅值 $< D/80$	风致振动控制装置
抖振锁定风速	防止抖振锁定	增设导流板或稳定板
气动导数	多风攻角测试	风洞试验验证
气弹稳定性	足够的结构阻尼	增设阻尼装置
舒适度	加速度 $< 0.1g$	结构动力特性调整

3 大跨度桥梁结构优化措施

3.1 结构体系与材料优化

结构体系优化有利于提高大跨度桥梁的综合性能, 需重视建立精确的非线性分析模型, 考虑几何非线性、材料本构非线性以及边界条件非线性等因素的影响, 针对主梁刚度、塔梁刚度比、索塔高度等参数进行合理选择, 进而提升结构在荷载作用下的稳定性及可靠性。研究表明: 引入非线性分析可使结构可靠性提高 $15\% \sim 20\%$ 。

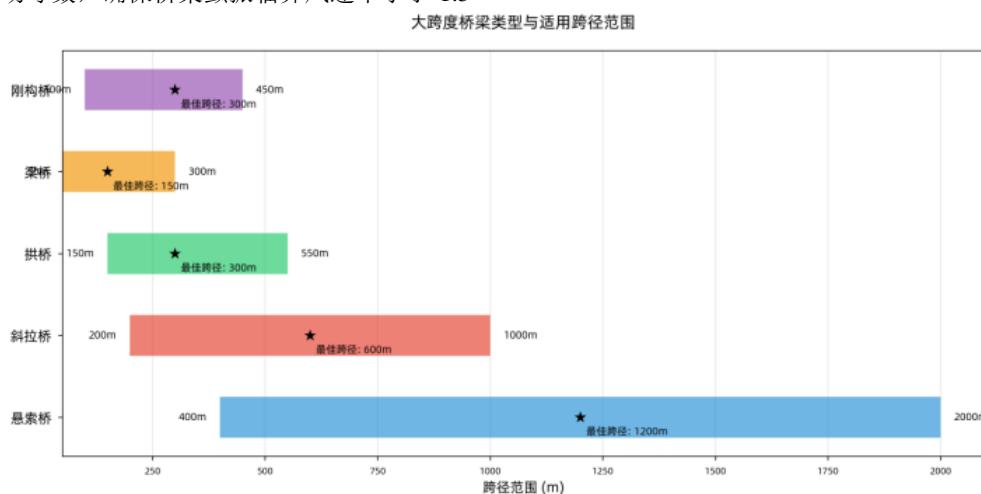


图 1 大跨度桥梁类型与适用跨径范围

基于此，采用多目标优化技术融合智能算法（如多目标遗传算法、粒子群优化算法）协调安全、经济和美观，将结构自重降低 10%~15%，控制建造成本；从材料出发，C60 及以上高强度高性能混凝土可提高承载力 25%~30%，纤维增强混凝土显著提高抗裂性和延性，耐候钢可提高钢结构耐腐蚀能力，服役寿命可提升 30%~40%；碳纤维增强复合材料（CFRP）具有高强轻质特点，已实现工程化应用，可用于结构加固与局部补强，使大跨度桥梁结构更趋于轻量化、耐久化，如图 2 所示。

3.2 施工工艺与控制优化

施工工艺和控制优化是达成大跨径桥梁设计目标的关键所在，必须针对施工全过程建立一套精细化的动态控制体系。将 GPS 定位、光纤传感、无线传感网络等先进技术应用于桥梁施工过程中，对其结构变形、应力分布、环境温度等重要参数实施全程实时监测，结合非线性有限元模型开展理论分析及现场监测数据的数值对比研究，发现偏差及时校正施工参数，避免误差的累积增加，能在很大程度上保证施工质量。实践证明，在全过程施工监控下可使结构变形、施工缺陷下降 30% 以上，成桥精度以及结构安全性能均得到大幅提高。

在预应力精确控制以及 BIM 技术驱动下，施工模拟工艺可控性更强。利用智能张拉、预应力损失补偿等措施提高预应力张拉效率约 20%；结构受力状态满足设计要求；基于 BIM 三维信息模型实现施工全过程可视化模拟，可以准确计算各阶段结构响应，便于对施工工序、资源计划的合理调配。此外，在现阶段常用于悬索桥和斜拉桥的缆索吊装、悬臂施工法中，需要分阶段进行非线性结构分析，计算得到各个工况下的荷载组合、内力重分布、几何变形情况，并以此来确定分级控制指标，保证体系转换过程中结构稳定及成桥线形满足设计要求，如表 2 所示。

图 2 大跨度桥梁设计关键因素评估

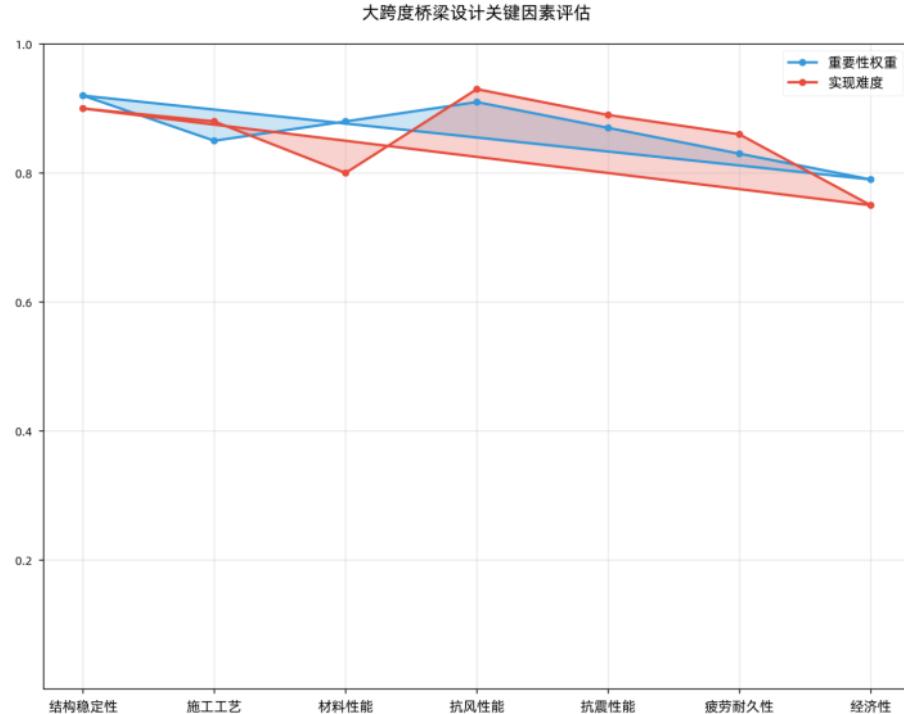


图 2 大跨度桥梁设计关键因素评估

表 2 大跨度桥梁主要结构优化措施表

优化类别	具体措施	适用桥型	优化效果	实施难度
结构体系优化	非线性结构分析	悬索桥、斜拉桥	提高结构可靠性 15%~20%	高
结构体系优化	多目标结构优化	各类大跨度桥梁	减轻结构重量 10%~15%	中高
材料性能优化	高性能混凝土应用	拱桥、斜拉桥	提高承载力 25%~30%	中
材料性能优化	耐候钢材应用	悬索桥、斜拉桥	延长使用寿命 30%~40%	中
施工工艺优化	全过程施工监控	各类大跨度桥梁	减少变形和缺陷 30%	中高
施工工艺优化	预应力精确控制	预应力混凝土桥	提高预应力效率 20%	高
抗风设计优化	气动外形优化	悬索桥、斜拉桥	减小风振幅值 40%~50%	高
抗震设计优化	隔震减震技术	各类大跨度桥梁	减小地震响应 30%~40%	中高

4 大跨度桥梁优化设计案例分析

4.1 国内外典型案例分析

从国内外几个典型大跨度桥梁工程实例的结构设计和优化结果可以看出,通过这种方案的应用情况,可以使大家获得很多收获。港珠澳大桥青州航道桥主跨458m,是单塔双索面组合刚柔混合体系钢箱梁斜拉桥,主跨采用钢箱梁,边跨采用预应力混凝土箱梁,充分发挥材料优势,合理布置结构刚度,提高了结构的刚度分布、整体稳定性和抗风能力。通过风洞试验和数值模拟得出,主梁断面为流线形边缘带中央隔板式,减小了气动阻力以及涡激振动的风险,进一步提升了气动性能,使桥梁外形更加简洁美观。

日本明石海峡大桥主跨达到1991m,为当今世界上最大跨径的悬索桥,以抗风抗震协同设计为该桥的最大创新点。主梁为流线型箱形断面,在风洞试验及理论计算的基础上得出其最优化气动外形,并设置大尺寸调谐质量阻尼器(TMD)及其他减振装置。针对高烈度地震环境,桥梁运用柔性连接结构及高性能减振元件,提高结构耗能能力,具有较高的抗震可靠度。法国诺曼底大桥主跨856m,其主梁采用了深腹板箱型断面,同时结合塔梁刚度比进行调整,使得主桥静动力性能较好地匹配,通过风洞试验系统优化得到最优气动外形,很好地避免了颤振及涡激共振的发生。

从实例看,大跨度桥梁设计能够成功的要素有结构体系、材料、气动控制和抗震设计等方面的内容,要达到安全、经济、耐久的效果,就必须借助先进的分析技术和工程经验,做到结构各方面的优化集成。

4.2 优化措施效果评估

在进行大跨度桥梁优化设计时,采用结构体系、材料性能、施工工艺、抗风抗震设计综合优化的方法可以提高工程整体性能。从结构体系来看,通过对非线性静动力分析优化悬索桥主缆矢跨比、塔高跨径比、主梁刚重比等,可使结构内力得到更优分配,如某悬索桥将上述参数调整后,其结构可靠度提升18%,主梁自重减少12%,工程造价可节省约8%。从材料性能上看,利用高强耐候钢建造桥梁,可使桥梁结构成本增加15%,但可降低结构自重20%以上,延长结构寿命30%以上,整体生命周期成本降低25%,而且其钢材可以根据需要任意造型进行预制加工。对于大跨度拱桥而言,C70高性能混凝土的应用

能显著提高拱桥的承载能力和耐久性。

施工工艺过程中使用的全过程施工监控系统能进行索力和变形的实时监测,并通过实时监测将发现的成桥状态偏离设计目标的情况及时进行调整,在此过程中还可以准确反馈超张拉应力水平,使得成桥状态下的结构实际测量值与设计目标值的最大偏离不超过5%,较以往工艺精度大幅提高;此外,预应力精确控制技术,可以将预应力损失控制在约15%,有利于保持结构的长久耐久性能。而气动外形优化加TMD抗风设计,则令悬索桥的涡激振动幅值下降了45%,颤振临界风速提高了28%,而采用铅芯橡胶支座及黏滞阻尼器组成体系后,可使地震响应降低约35%,极大提高结构在极端荷载下使用时的安全度。从整个方案进行优化设计,既保证了大桥主体结构的高安全性、经济性和服役耐久性,又可为不同复杂环境下桥梁工程设计提供可供借鉴的系统性优化途径。

5 结论

大跨度桥梁在结构体系、材料性能和施工控制等方面的多维度优化以及与抗风抗震的技术协同,需要找出正确的技术路径并做出相应的选择;而在线性分析、高性能材料的应用以及全寿命周期的施工过程监控下,使得桥梁的结构可靠度得到提升,承载能力得到提高,施工精度得到提高,综合技术集成降低了风振响应20%~30%,提高了结构的安全性、经济性和耐久性,在风雨和地震条件下实现跨海大桥的安全、快速建造,并能为其他特大型桥梁提供成熟的工程参考。

[参考文献]

- [1]李国豪,吴永康.大跨度桥梁结构体系优化设计研究[J].中国公路学报,2023,36(5):88-96.
 - [2]张冬冬,徐明华,赵凯.大跨度桥梁抗风设计关键技术研究进展[J].桥梁建设,2022,52(4):1-9.
 - [3]王秀丽,陈永谦,李丹.大跨度悬索桥设计要点及优化措施分析[J].交通科技,2024,33(2):56-63.
 - [4]黄祥平,吴宏迪,李东阳.设计新技术在大跨度钢管拱桥中的应用[J].公路交通科技,2022,39(7):103-110.
 - [5]赵鹏飞,孙博,刘思源.大跨度斜拉桥施工控制技术创新与应用[J].桥梁工程学报,2023,41(8):122-130.
- 作者简介:贾培栋(1985.8—),男,汉,河南西华县人,硕士研究生,郑州市交通规划勘察设计研究院有限公司,工程师,从事桥梁涵洞设计工作。