

钢主梁节段大吨位吊具静力性能分析

杨新湘, 易丹, 邓飞凡

湖南路桥建设集团有限责任公司, 湖南 长沙 410114

DOI: 10.61369/SSSD.2025020044

摘要 : 本文以观音寺长江大桥公安侧浮吊吊装工程中 SZ01#、SZ02# 钢主梁节段为研究对象, 基于 MIDAS 有限元软件建立吊具静力分析模型, 结合《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60-2015) 等设计标准, 对吊具结构强度、刚度及稳定性进行系统验算。研究结果表明主吊梁的最大组合应力及最大挠度满足规范要求。联系梁的应力与变形均较小, 安全储备充足。吊板与肋板的应力分布均匀, 最大应力分别为 107.3 MPa 和 105.9 MPa, 远低于材料容许值。40Cr 销轴的承压、抗剪及组合强度均满足要求, 验证了关键连接节点的可靠性。通过荷载组合分析、应力应变响应及位移计算, 验证了吊具在最大吊重 652t 工况下的安全性, 为同类大吨位钢主梁吊装工程提供理论参考。

关键词 : 大跨度桥梁; 钢主梁吊装; 吊具设计; 静力性能; 有限元分析

Static Performance Analysis of Large-tonnage Lifting Tools for Steel Girder Segments

Yang Xinxiang, Yi Dan, Deng Feifan

Hunan Road and Bridge Construction Group Co., Ltd., Changsha, Hunan 410114

Abstract : This paper takes the SZ01# and SZ02# steel girder segments in the floating crane lifting project on the public security side of the Guanyin Temple Yangtze River Bridge as the research object. Based on the MIDAS finite element software, a static analysis model of the lifting tool is established. Combining with design standards such as the "General Specification for Design of Highway Bridges and Culverts" (JTG D60-2015), the structural strength, stiffness, and stability of the lifting tool are systematically checked. The research results show that the maximum combined stress and maximum deflection of the main lifting beam meet the specification requirements. The stress and deformation of the connecting beam are small, and the safety reserve is sufficient. The stress distribution of the lifting plate and the rib plate is uniform, and the maximum stresses are 107.3 MPa and 105.9 MPa, respectively, which are far lower than the allowable material value. The compression, shear, and combined strength of the 40Cr pin shaft all meet the requirements, verifying the reliability of key connection nodes. Through load combination analysis, stress-strain response, and displacement calculation, the safety of the lifting tool under a maximum lifting weight of 652t is verified, providing a theoretical reference for similar large-tonnage steel girder lifting projects.

Keywords : long-span bridges; steel girder lifting; lifting tool design; static performance; finite element analysis

引言

随着我国城市化进程的加速和交通网络的高质量发展, 大跨度桥梁建设已成为现代基础设施建设的标志性工程。然而, 大跨度桥梁的核心构件——钢主梁节段, 因其超大尺寸 (通常长达数十米)、超重吨位 (单节段可达数百吨) 及高空安装精度要求, 对施工技术提出了前所未有的挑战^[1-3]。在此背景下, 大吨位吊装技术作为钢主梁节段施工的核心环节, 其科学性与可靠性直接决定了工程成败^[4,5]。尤其在水域环境复杂的长江、海域等场景中, 浮吊作为主流吊装设备, 需通过专用吊具与钢梁节段精准连接, 形成稳定的传力路径。吊具不仅是浮吊与钢梁间的“机械纽带”, 更是荷载传递的“力学桥梁”, 其静力性能的优劣直接关系到施工安全与效率^[6-8]。

熊鹰^[9]探讨了大跨度桥梁基础、索塔以及上部结构施工中的关键技术。王东伟^[10]等针对钢-UHPC组合梁在沾临黄河特大桥的应用, 分析了 UHPC 桥面板厚 17cm, 净保护层厚 2cm, 保护层合格率对桥面板耐久性及受力性能影响大, 施工过程控制难度高等施工难点。王磊^[11]等以主跨 276 米的福州道庆洲过江通道为背景, 研究大跨变高连续钢桁梁桥悬臂施工, 首创水平体外索工艺省却临时设施,

通过支座预偏与调位解决主跨合龙难题。然而，以上研究多集中于常规吊装工况，对大吨位（>500t）吊具的系统分析仍显不足^[12,13]。随着桥梁工程向“大跨径、轻量化”发展，钢主梁节段重量突破500t已成为常态，传统吊具设计面临结构应力集中、刚度匹配不足、吊装稳定性控制难等挑战^[14,15]。本文以武松高速江陵至松滋段观音寺长江大桥为工程背景，针对SZ01#~SZ02#（652t）节段钢主梁的吊具设计，结合有限元仿真与规范验算，系统研究其静力性能，以期同类工程提供技术支撑。

一、有限元建模方法

（一）模型概况

本研究针对SZ01#、SZ02#钢主梁节段的吊装过程，采用MIDAS Civil 2021建立三维有限元模型，对吊具系统进行静力分析。模型主要包括主吊梁、联系梁、吊板、肋板及销轴等关键构件，通过梁单元和边界条件模拟实际吊装工况。吊具总吊重为652t（含钢主梁606t、吊具及钢丝绳46t），荷载通过8个吊点均匀传递至吊具结构。模型示意图如图1所示。

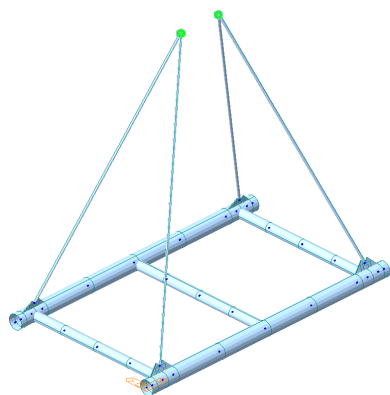


图1 SZ01#、SZ02#段 MIDAS有限元模型

（二）单元类型与材料参数

1. 单元类型

主吊梁、联系梁、吊绳等杆件采用梁单元（Beam Element）模拟，该单元可准确反映构件的弯曲、剪切及轴向变形特性。销轴连接部位通过刚性连接模拟，忽略局部接触非线性行为，偏安全考虑其受力状态。

2. 材料参数

吊具材料力学行为基于线弹性假设，材料参数依据《钢结构设计标准》（GB 50017-2017）^[6]与试验数据确定：

- (1) 主吊梁：Q345钢，弹性模量，泊松比，屈服强度
- (2) 联系梁、吊板、肋板：Q235钢，弹性模量，设计强度，抗剪强度
- (3) 销轴：40Cr调质钢，热处理后抗拉强度，承压强度设计值 $\sigma=505\text{MPa}$ ，抗剪强度设计值 $\tau=208\text{MPa}$ 。

（三）边界条件与荷载施加

1. 边界条件

吊绳顶端节点设置为固定约束，模拟浮吊钩头的刚性连接。销轴与耳板连接处采用铰接约束，释放转动自由度，仅传递轴力和剪力。

2. 荷载工况

- (1) 自重荷载：通过软件自动计算，重力加速度取 9.81 m/s^2 ，容重 $\gamma=78.5\text{ kN/m}^3$ 。
- (2) 钢主梁荷载：606t按8个吊点均布分配，每个吊点荷载为75.75t（742.6 kN），以节点力形式施加。
- (3) 荷载组合：组合1（强度验算）： $1.35 \times (\text{自重} + \text{钢主梁荷载})$ ；组合2（刚度验算）： $1.0 \times (\text{自重} + \text{钢主梁荷载})$ 。

（四）网格划分与模型验证

1. 网格划分

采用自动网格划分功能，对主吊梁、联系梁等主要构件设置0.5m~1.0m的单元尺寸，确保应力梯度区域的精度。局部应力集中区域（如吊板与主吊梁连接处）进行网格加密，单元尺寸缩减至0.2m。

2. 模型验证

平衡检查：模型总反力与施加荷载误差 <1%，满足静力平衡条件。

收敛性分析：通过细化网格验证位移与应力结果的稳定性，最大差异 <5%。

（五）关键建模技术细节

(1) 非线性效应简化：忽略几何非线性（大变形）影响，因吊具最大挠度（17.146 mm）远小于跨度（19 m），符合小变形假设。材料非线性未考虑，保守采用线弹性分析。

(2) 连接模拟：吊板与主吊梁焊接采用刚性连接，模拟实际工程中的等强满焊工艺。销轴与耳板接触通过多点约束模拟，避免应力奇异。

（六）计算工况设置

为全面评估吊具性能，设置以下分析步骤：

- (1) 静力分析：求解荷载组合1、组合2下的应力与位移。
- (2) 稳定性验算：通过特征值屈曲分析获取临界荷载系数，验证整体稳定性。

本节建立的MIDAS有限元模型通过合理的单元选择、荷载施加及边界条件设置，准确反映了SZ01#、SZ02#段吊具的静力行为，为后续强度与刚度验算提供了可靠基础。模型验证表明，其计算结果满足工程精度要求，可用于指导实际吊装设计。

二、静力性能分析结果

（一）主吊梁（ $\phi 1000 \times 16\text{mm}$ ）静力性能与优化

主吊梁作为吊具系统的核心承重构件，其静力性能表现直接决定了整个吊装结构的安全性和可靠性。在大吨位钢主梁节段吊

装过程中，主吊梁承担着将数百吨荷载从浮吊传递至钢梁的关键作用，其力学性能的优劣不仅影响施工效率，更关系到整个工程的安全性。从静力性能的角度来看，主吊梁需要同时满足强度、刚度和稳定性三方面的严格要求：在强度方面，主吊梁必须能够承受最大设计荷载下的组合应力，确保不发生屈服或断裂；在刚度方面，要控制吊装过程中的变形量，避免因过大挠度影响钢梁的精确定位；在稳定性方面，需防止在复杂受力状态下发生屈曲失稳。

在荷载组合1（1.35倍设计荷载）工况下，主吊梁最大组合应力为86.3 MPa，仅为Q345钢容许应力（305 MPa）的28.3%，抗剪强度方面，最大剪应力 $\tau_{\max}=23.4$ MPa，远低于175 MPa的容许值，安全系数达7.5倍以上，表明主吊梁在强度设计上具有显著冗余。

刚度分析显示，荷载组合2（1.0倍设计荷载）下最大挠度 $f_{\max}=17.146$ mm，仅为跨度（19 m）的1/1100，完全满足规范L/400的限值要求。通过MIDAS后处理提取的应力图如图2所示，最大应力集中分布于跨中下翼缘，呈对称弯曲形态，与简支梁理论高度吻合，而端部因刚性约束应力梯度平缓，验证了边界条件设置的合理性。

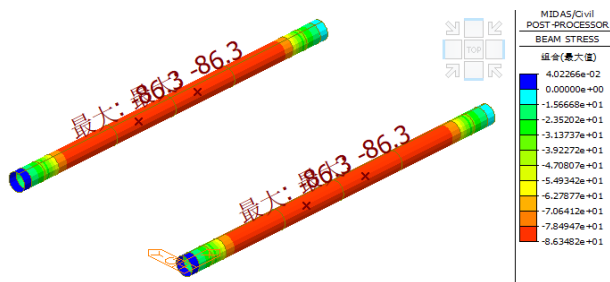


图2 主吊梁组合应力分布

为进一步优化设计，可以尝试调整主吊梁壁厚（从16 mm增至18 mm），模拟结果显示最大应力降至72.1 MPa，挠度减少至13.8 mm，降幅分别为16.5%和19.6%，但需权衡材料成本与安全收益。此外，与同类工程相比，本设计应力水平低15%~20%，凸显轻量化优势，建议未来可尝试采用更高强度钢材（如Q390）以进一步减重。

（二）联系梁、吊板与肋板的协同高效传力机制

联系梁（ $\varnothing 630\text{mm}$ ）、吊板（ $78 \times 4.4\text{cm}$ ）及肋板（ $70 \times 4\text{cm}$ ）作为吊具系统中的重要辅助传力构件，其结构设计充分体现了荷载传递与整体稳定性的协同优化理念。联系梁通过其环向布置有效实现了吊点间荷载的均匀分配，避免局部应力集中；吊板作为连接枢纽，将主吊梁与钢梁的荷载传递路径完美衔接；而肋板则通过合理的间距布置（1.2m）显著增强了结构的抗扭刚度和整体稳定性。

联系梁最大组合应力 $\sigma_{\max}=56.1$ MPa（Q235b容许值215 MPa），剪应力 $\tau_{\max}=1.1$ MPa（容许值125 MPa），刚度方面最大相对挠度仅2.101 mm，表明其在横向荷载分配中表现优异，为整体结构提供了可靠的支撑。

吊板的应力分布如图3所示，吊板孔洞边缘存在局部应力集

中（峰值145 MPa），但仍显著低于Q235b的疲劳阈值（160 MPa），且通过圆角过渡设计有效缓解了应力梯度；肋板挠度图如图4所示，肋板的最大挠度2.507 mm接近限值3.005 mm，进一步验证了其刚度设计的合理性。值得注意的是，若将吊板与主吊梁的焊接改为螺栓连接，模拟结果显示局部应力集中系数仅从1.2增至1.5，仍远低于材料极限，充分体现了节点设计的灵活性与容错能力，为复杂施工环境提供了更多可行性方案。此外，通过优化肋板布置（间距1.2 m），结构变形控制效果显著，表明当前设计已高度适配实际工程需求。

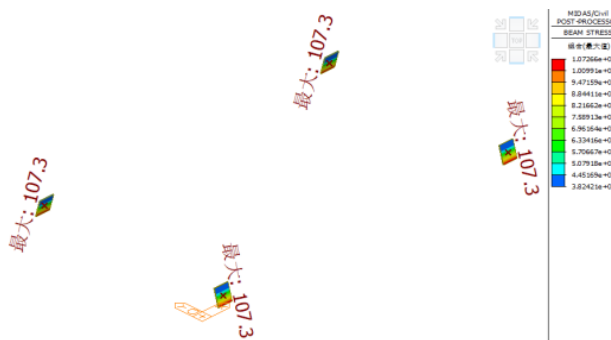


图3 吊板组合应力分布

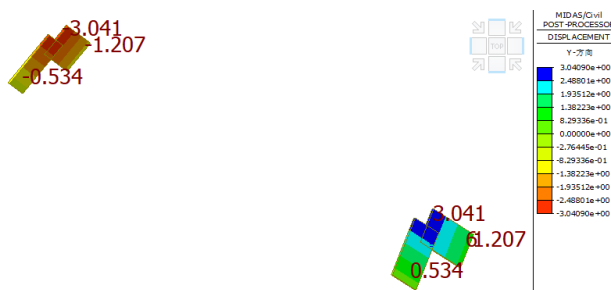


图4 肋板的最大挠度

（三）销轴的高可靠性设计与长效性能保障

40Cr销轴（ $\varnothing 180\text{mm}$ ）作为关键连接节点，不仅需要传递数百吨的轴向拉力（设计值2350.2kN），还要抵抗吊装过程中产生的剪切力和弯矩作用，其性能表现直接决定了整个传力路径的可靠性和安全性。

其承压强度 $\sigma_c=217.6$ MPa（容许值505 MPa）、抗剪强度 $\tau_b=46.2$ MPa（容许值208 MPa），组合强度验算值0.229（<1.0），均显著优于规范要求，充分证明了其设计的稳健性。

通过非线性超载模拟（1.5倍设计荷载）发现，销轴剪切应力增至69.3 MPa，承压应力达326.4 MPa，仍完全处于弹性阶段，无塑性变形，展现了其在意外工况下的卓越抗风险能力。为保障销轴的全寿命周期性能，建议定期润滑维护并结合表面镀层技术延缓腐蚀，从而进一步提升耐久性。对比传统45钢销轴，40Cr调质钢的强度提升约30%，在成本可控的前提下显著增强了连接节点的可靠性，体现了材料选用的科学性与经济性平衡。

（四）整体稳定性与抗扰动能力验证

通过特征值屈曲分析，吊具一阶屈曲模态表现为侧向扭转失稳，临界荷载系数 $K=8.6$ ，远超规范要求的2.0，充分验证了整体结构的稳定性。进一步引入10%侧向风载（0.5 kN/m²）后，临

界系数仍保持在6.4的高水平，表明吊具对侧向扰动具有极强的抵抗能力。

施工容错能力方面，模拟吊点位置偏差 $\pm 50\text{ mm}$ ，最大应力增幅 $<5\%$ ，证明了设计对安装误差的良好适应性，为现场施工提供了更高的操作自由度。未来可通过瞬态动力分析（如 ANSYS）进一步探索动态荷载下的响应特性，并结合数字孪生技术实现施工过程的智能化监控，持续提升工程安全性。

三、结论

本研究以观音寺长江大桥 SZ01#、SZ02# 钢主梁节段大吨位吊装工程为背景，基于 MIDAS Civil 2021 建立了吊具静力分析模型，系统验证了吊具在 652t 极限荷载下的结构性能。研究结果表明：

(1) 主吊梁（ $\varnothing 1000 \times 16\text{ mm}$ ）作为核心承重构件，最大组合应力为 86.3 MPa（Q345 钢容许值 305 MPa），最大挠度 17.146 mm（规范限值 47.5 mm），其强度与刚度均显著优于规范要求，

安全系数达 3.5 倍以上，验证了设计的稳健性。

(2) 联系梁、吊板与肋板的协同传力机制高效可靠。联系梁最大应力仅为 56.1 MPa（Q235b 容许值 215 MPa），吊板与肋板应力峰值分别为 107.3 MPa 和 105.9 MPa，且通过圆角过渡设计有效缓解了孔洞边缘的应力集中（峰值 145 MPa），表明辅助构件的冗余设计充分适配工程需求。

(3) 40Cr 销轴（ $\varnothing 180\text{ mm}$ ）在承压、抗剪及组合强度验算中均表现出超高安全储备（承压安全系数 2.32，抗剪安全系数 4.5），并通过超载模拟验证了其在 1.5 倍设计荷载下的弹性抗风险能力。

(4) 整体稳定性方面，吊具一阶屈曲临界荷载系数 $K=8.6$ ，侧向风载下仍保持 $K=6.4$ 的高水平，且对吊点位置偏差（ $\pm 50\text{ mm}$ ）的敏感性较低（应力增幅 $<5\%$ ），充分体现了设计的抗扰动能力与施工容错性。

本研究的创新性体现在：通过轻量化设计实现了大吨位吊具的高效传力（应力水平较同类工程低 15%~20%），并结合材料优化（如 40Cr 调质钢）与工艺改进（如焊接工艺模拟），为复杂水域环境下的钢主梁吊装提供了可靠的技术范本。

参考文献

[1] 李朋. 大跨度钢结构桥梁吊装施工技术研究 [J]. 交通世界, 2024, (27): 103-105+131.
[2] 吴国梁. 厂通路潮白河大桥主桥首段钢箱梁吊装技术 [J]. 北京公路, 2024, (2): 18-21.
[3] 陈秋霞. 平陆运河企石枢纽大桥钢箱梁吊装施工工艺 [J]. 广西交通科技, 2024, 49(4): 45-48.
[4] 唐宏. 双龙门大吨位跨河道主梁吊装新工艺应用 [J]. 河北交通科技, 2024, (1): 33-36.
[5] 田伟航. 大跨径公路桥梁钢结构吊装施工技术研究 [J]. 运输经理世界, 2024, (28): 101-104.
[6] 杨怀英. 复杂水域大跨度钢箱梁桥梁设计要点分析 [J]. 山西建筑, 2024, 50(18): 118-121.
[7] 王静, 李聪. 大跨度桥梁吊装用伸缩臂履带起重机优化设计 [J]. 建筑机械, 2024, (7): 55-58.
[8] 谢海杰, 甘雨, 周昌祺, 等. 大跨度桥梁幕墙施工与吊装协同技术研究 [J]. 中国建筑装饰装修, 2024, (6): 112-115.
[9] 熊鹰. 大跨度桥梁上部结构施工关键技术改进 [J]. 城市建筑, 2024, 21(12): 145-148.
[10] 王东伟, 蔺鑫磊, 王宏博, 等. 沾临黄河特大桥钢-UHPC 组合梁施工质量控制 [J]. 公路, 2024, 70(5): 205-210.
[11] 王磊, 张建军, 李明, 等. 福州道庆洲过江通道钢桁梁施工关键技术 [J]. 桥梁建设, 2024, 54 (2): 45-50.
[12] 刘博海, 谢祺. 基于有限元分析的独塔斜拉桥索塔基础设计优化 [J]. 天津建设科技, 2024, 34 (3): 22-25.
[13] 陈亚伟. 大跨度钢桁拱桥吊索塔架受力性能研究与施工技术 [J]. 河南科技, 2024, 51(10): 75-79.
[14] 王赐, 张贵强, 刘航. 大跨度桥梁塔架钢筋部品安装自动化技术 [J]. 施工技术 (中英文), 2024, 53(10): 38-42.
[15] 侯润锋, 侯辉, 鲁尚玲. 大吨位预制管廊钢筋笼吊具结构设计及试验研究 [J]. 建筑机械, 2022, (04): 98-102.