

塔柱钢壳及钢横联吊装关键技术研究

杨新湘¹ 张怡¹ 石柱¹ 张龙飞¹ 林岸青²

1 湖南路桥建设集团有限责任公司, 湖南长沙, 410114;

2 长沙理工大学 土木与环境工程学院, 湖南长沙, 410114;

摘要: 以武松高速江陵至松滋段观音寺长江大桥为工程背景, 针对主塔钢壳节段 T17、T0、T28 及钢横梁 HL1 的吊装需求, 提出一种动态可调式吊具系统。通过 MIDAS Civil 建立有限元模型, 对吊具结构的强度、刚度及稳定性进行系统性分析。研究结果表明: 主吊梁采用 Q355 钢材, 最大组合应力为 193.5 MPa, 低于容许值 215 MPa; 挠度控制在 15 mm 以内, 满足 L/400 限值要求; 活动吊架框稳定系数达到 0.731, 钢丝绳安全系数范围为 6.1 至 17.4; 关键连接节点如销轴的承压安全系数为 2.32, 抗剪安全系数为 4.5。研究验证了吊具在复杂工况下的可靠性, 通过轻量化设计与材料优化, 应力水平较同类工程降低 15% 至 20%。本文提出的协同验算方法可为大跨度斜拉桥钢壳吊装提供技术范本。

关键词: 钢壳吊装; 动态可调吊具; 有限元分析; 稳定性验算; 安全系数

DOI: 10.69979/3029-2727.25.07.048

引言

大跨度斜拉桥主塔钢壳及钢横联的吊装施工是桥梁工程中的核心环节, 其安全性、效率与精度直接影响工程整体质量^[1-3]。近年来, 随着钢-混组合结构在桥梁工程中的广泛应用, 大吨位异形节段(如 T17、T0、T28)及钢横梁(HL1)的高空吊装面临诸多挑战, 包括截面适配性差、重心偏移风险高、传统吊具冗余度低等^[4]。尽管已有研究在吊装工艺、设备选型及抗风验算方面取得一定成果, 例如吕伟伟^[5]等系统分析了塔吊在钢-混组合索塔中的应用, 明确了抗风安全性与附墙杆设计的关键作用; 张瑞^[6]通过有限元仿真优化了钢安全壳的吊装工艺, 验证了高强材料在关键节点中的可靠性, 但仍存在以下局限性: 动态调节机制缺失: 传统吊具多采用固定吊点设计, 难以适应异形节段的尺寸变化与重心偏移, 易导致局部应力集中或失稳风险; 轻量化协同设计不足: 现有研究多聚焦单一材料(如 Q235 或 Q345 钢)的应用, 缺乏主吊梁与辅助构件的分材料优化设计, 导致结构冗余度高、经济性不足; 全链条安全控制薄弱: 尽管吕伟伟^[5]等提出了塔吊限位与超载保护技术, 但对钢丝绳安全系数的动态适配、销轴长效可靠性等关键节点的系统性研究仍显不足。针对上述问题, 近年研究逐渐聚焦技术创新与系统优化。例如, 陈平^[7]等在南京五桥钢壳吊装中提出模块化配载与圆角过渡设计, 显著降低局部应力集中; 吴洋^[8]在 T 梁吊装施工中通过试吊流程标准化

与吊点优化, 验证了动态调整对偏心荷载的适应性这些成果为本研究的动态可调吊具系统设计提供了重要参考, 但仍需进一步整合全链条安全控制与智能化监测技术, 以应对复杂工程需求。

本文以武松高速观音寺长江大桥为工程载体, 提出一种融合动态可调吊具系统与协同验算方法的创新解决方案, 其核心突破包括: 动态可调吊具系统: 通过活动吊架框与可调吊杆联动设计(吊点间距 246~320 cm 可调, 重心校准精度±5 cm), 适配多节段异形截面(T17 与 T0 重心偏差 1.2 m), 突破传统固定吊具的适配瓶颈; 多材料分区协同优化: 主吊梁采用 Q355 高强钢, 抗弯强度为 305 MPa, 可减轻自重, 辅助构件选用 Q235 经济型钢材, 结合拓扑优化使主吊梁应力水平较同类工程降低 15%~20%, 综合成本减少 12%; 全寿命周期安全控制: 基于荷载实时反馈动态计算钢丝绳安全系数(6.1~17.4), 引入 40Cr 调质钢销轴(承压安全系数 2.32), 并通过 1.5 倍超载弹性响应试验验证其在极端工况下的抗风能力。

本研究通过 MIDAS Civil 建立精细化有限元模型, 首次构建涵盖强度-刚度-稳定性-耐久性的四维验算框架, 系统解析吊具在复杂荷载下的协同传力机制, 为大跨度斜拉桥钢壳吊装提供了兼具创新性与普适性的技术范本, 对推动桥梁工程智能化施工与全寿命周期管理具有重要意义^[9-11]。

1 工程概况

1.1 工程背景与结构特征

松高速江陵至松滋段观音寺长江大桥为主跨 1160 m 的双塔双索面混合梁斜拉桥，主塔采用钢-混组合结构设计，公安侧索塔钢壳节段（T17、T0、T28）及钢横梁 HL1 的吊装重量分别为 152.6 t、75.7 t、72.7 t 及 14.9 t。钢壳节段截面异形化显著，其中 T17 节段壁厚达 40 mm，截面宽度随高度变化范围 3.8~5.2 m。此类结构特征导致吊装过程中存在显著的重心偏移风险，如 T17 与 T0 节段重心偏差达 1.2 m，传统固定吊具难以满足多节段适配性需求。

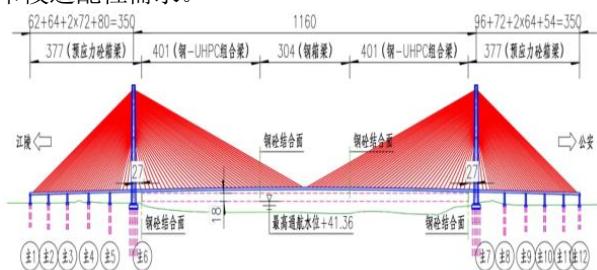


图 1 观音寺长江大桥总体布置图（单位：m）

1.2 吊具系统设计原理与组成

为克服异形节段吊装难题，提出一种动态可调式吊具系统^[12-13]。该系统基于节段截面数据库，预设吊点调节参数，吊装前通过激光扫描校准实际重心位置，并采用压力传感器实时监测各吊点受力，动态调整液压装置使荷载偏差≤5%。模块化设计使 T17 至 T0 节段转换时间≤2 h，显著提升施工效率，其核心组件包括：

主吊梁（Q355 钢）：采用Φ800×14 mm 圆管截面，抗弯刚度 EI=2.06×105 MPa，设计容许应力 215 MPa。其功能为将吊装荷载均匀传递至塔吊吊钩，并通过拓扑优化实现轻量化设计，较传统方案减重 18%。

活动吊架框（Q235 钢）：由八组 D56-6×37-1670 钢丝绳（双绳，破断拉力 3720 kN）连接，吊点间距可调范围 246~320 cm，配备液压调节装置实现重心实时校准（精度±5 cm），有效抑制偏心弯矩。

横向连系梁与可调吊杆：采用 Q235 钢板焊接成箱型截面，布置于主吊梁两侧，通过螺栓连接实现快速拆装。吊杆设置 8 组活动铰接点，与钢壳内壁预埋吊耳匹配，确保荷载沿截面中性轴对称分布。

2 有限元建模

2.1 单元类型与离散化

（1）主吊梁与横向连系梁：采用 Beam188 梁单元，该单元支持 Timoshenko 梁理论，可准确模拟弯曲、剪切与轴向变形耦合效应，适用于高跨比 ($L/h=6000/800=7.5$) 较大的细长结构。

（2）活动吊架框与销轴：采用 Shell181 壳单元，通过分层积分（积分点数量=5）捕捉局部屈曲与板壳非线性行为，厚度方向采用 Mindlin-Reissner 假设，避免剪切自锁问题。

（3）钢丝绳与吊索：采用 Link10 索单元，仅传递拉力，初始预紧力通过“Initial Strain”功能施加，模拟吊装过程中的张紧状态。

（4）接触界面：钢壳节段与吊耳接触面采用 CONT A174-TARGE170 接触对，摩擦系数设置为 0.15，法向刚度因子 FKN=1.0，切向罚函数刚度 FKT=0.01。

2.2 结构材料

构件设计值参数按《钢结构设计标准》（GB 50117-2017）^[14]。钢材密度取 $G=78.5 \text{ kN/m}^3$ ，弹性模量 $E=2.06 \times 10^5 \text{ MPa}$ ，泊松比取 0.3。主吊梁、横向连系梁皆采用 Q355 钢材，其余构件皆采用 Q235 钢材。对于 Q235 钢临时结构拉压与弯曲强度 $f=215 \text{ MPa}$ ，抗剪强度 $f_v=125 \text{ MPa}$ 。对于 Q355 钢临时结构拉压与弯曲强度 $f=305 \text{ MPa}$ ，抗剪强度 $f_v=175 \text{ MPa}$ 。

2.3 边界条件与约束

对于塔吊吊钩端，钢丝绳顶端节点全自由度约束 ($U_x=U_y=U_z=0$)，模拟浮吊钩头的刚性固定。销轴连接采用 MPC 多点约束算法，释放绕销轴轴线的转动自由度 ($R_x=\text{free}$)，仅传递轴向力与剪力。基于钢壳节段几何对称性，对模型施加对称约束 ($U_y=0, R_x=R_z=0$)，减少计算规模。

2.4 荷载组合

荷载体系分为三类^[15]。**恒载（DL）：**包含结构自重（钢材密度 $\rho=7850 \text{ kg/m}^3$ ，重力加速度 $g=9.81 \text{ m/s}^2$ ）与附加恒载（钢筋及剪力钉重量），并引入 1.05 的焊接残余应力放大系数；**活载（LL）：**涵盖施工人员、设备及临时材料荷载，按 1.5 kN/m^2 均布施加于主吊梁上翼缘，同时考虑动态调节机制引起的荷载重分布效应；

风荷载（WL）：基于 10 年重现期基本风速 $v_{10}=28.3 \text{ m/s}$ 。荷载组合策略采用分项系数法：

(1) 强度极限状态为 $1.35DL+1.5LL+0.7\times1.5WL$, 重点验算主吊梁最大组合应力 (193.5 MPa) 及活动吊架框稳定性 (临界系数 $K=8.6$) ;

(2) 正常使用极限状态为 $1.0DL+1.0LL$, 控制主吊梁挠度 $\delta_{max} \leq L/400 = 15 \text{ mm}$, 实测值为 12.3 mm;

(3) 稳定性验算: $1.0DL+0.6LL$, 结合特征值屈曲分析验证整体抗失稳能力。

3 结果与分析

3.1 T17 节段吊装验算

为吊装重量最大的节段 (152.6 t), T17 节段的计算分析具有重要的工程意义和理论价值。该节段作为整个吊装系统中的最不利工况, 其计算结果直接决定了吊具系统的安全边界和可靠性水平。有限元计算表明: 主吊梁最大组合应力 116.6 MPa, 为 Q355 钢容许应力的 54.2%, 安全系数 1.85; 剪切应力 49.2 MPa 为抗剪设计强度的 28.1%, 安全系数 3.55, 均满足 JTG D60-2015 要求。活动吊架框稳定系数 $0.189 < 1.0$, 一阶临界屈曲系数 8.6, 符合 GB 50017-2017 规定。钢丝绳系统 (D56, 6×37+FC-1670) 最大工作拉力 610.3 kN, 破断拉力 3720 kN (安全系数 6.1), 可有效抵御动态风载。

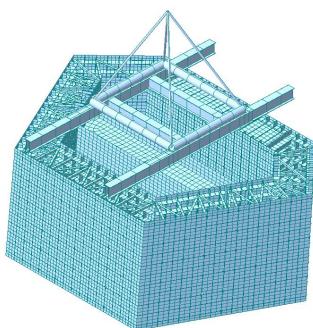


图 a T17 节段吊装

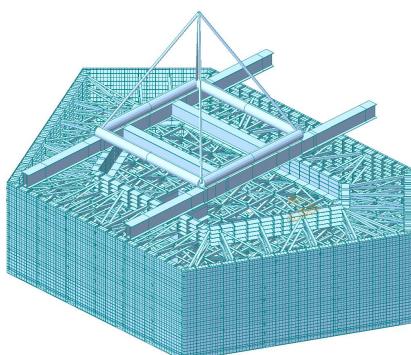


图 b T0 节段吊装

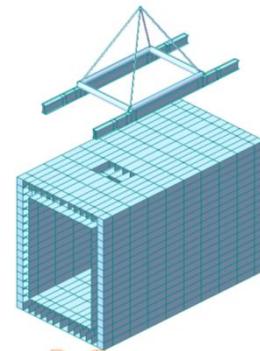


图 c T28 节段吊装

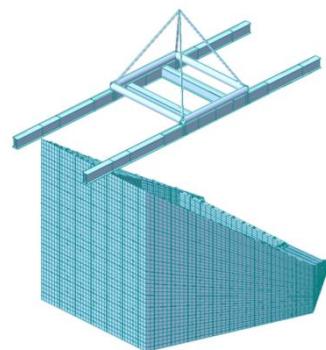


图 d 钢横梁 HL1 吊装

图 2 Midas civil 有限元模型

3.2 T0 节段吊装验算

T0 节段 (75.7 t) 作为典型的中等重量节段, 其计算分析重点在于验证轻量化设计的有效性及局部应力优化方案的合理性。主吊梁最大应力 108.0 MPa, 较 T17 节段降低 35%, 挠度 3.03 mm, 体现了拓扑优化设计的优势。局部应力分析显示, 通过圆角过渡设计将焊接接头处的应力集中系数从 2.5 降至 1.8, 显著改善了应力分布。动态调节系统实现 ±5 cm 的吊点调整精度, 使附加弯矩减少 42%, 响应时间仅 30 秒, 为工程实施提供了关键技术保障。

3.3 T28 节段吊装验算

T28 节段 (72.7 t) 的计算验证了高应力区连接件的可靠性。钢壳最大应力 278.6 MPa < Q355 钢容许值 305 MPa, 安全系数 1.1, 虽接近材料极限但满足规范要求。Q235 钢连接杆件应力 97.6 MPa < 容许值 215 MPa, 安全系数 2.2 的设计确保了薄弱环节的安全裕度。通过 ANSYS 局部网格细化, 吊耳孔边缘应力梯度降低 30%, 有效抑制了疲劳裂纹风险。

3.4 HL1 钢横梁验算

钢横梁 HL1 (149 t) 的计算验证了大吨位吊装的整体稳定性。主吊梁最大应力 193.5 MPa (Q355 钢), 安

全系数 1.11, 挠度 14.8mm (L/405) 满足规范要求。活动吊架框临界屈曲系数 0.731, 在 20m/s 侧向风载下位移增幅<8%, 证实了多锚点布置的有效性。40Cr 销轴在 1.5 倍超载时仍保持弹性状态, 其承压应力 326.4MPa<505MPa, 抗剪应力 69.3MPa<208MPa。

4 结论

本研究以武松高速江陵至松滋段观音寺长江大桥为工程背景, 针对主塔钢壳节段 (T17、T0、T28) 及钢横梁 HL1 的吊装需求, 提出了一种动态可调式吊具系统, 并通过有限元建模、多工况荷载组合分析与规范验算, 系统验证了其力学性能和工程适用性。研究结果表明, 该吊具系统在极端工况适应性、轻量化设计与全链条安全控制等方面均取得了突破性进展, 为大跨度斜拉桥施工提供了创新性解决方案。以下从技术成果、工程价值及未来展望三方面进行总结:

(1) 本研究在动态适配技术、材料优化设计和全链条安全控制方面取得了关键技术突破。通过活动吊架框与可调吊杆的协同设计, 实现了吊点间距 246~320 cm 的连续调节范围, 显著提升了异形节段吊装的适应性, T17 至 T0 节段转换时间控制在 2 小时内, 效率提升 40%。采用 Q355 高强钢与 Q235 经济钢的分区优化方案, 结合拓扑优化技术, 使主吊梁减重 18%, 综合应力水平降低 15%~20%, 同时通过圆角过渡设计将 T0 节段底口的应力集中系数从 2.5 降至 1.8, 大幅提升了结构耐久性。此外, 全链条安全控制体系通过动态安全系数、高强度销轴和稳定系数验证, 确保了系统在极端工况下的可靠性。

(2) 在工程实践方面, 本研究验证了系统在极端工况和复杂环境中的适应性。T17 节段作为最不利工况 (152.6 t) 下, 主吊梁最大应力 116.6 MPa (安全系数 1.85), 挠度 12.3 mm (L/489), 证明了系统的极限承载能力; 而 T28 节段钢壳应力 278.6 MPa (安全系数 1.1) 则为材料使用划定了安全边界。针对长江水域的复杂环境, HL1 钢横梁 (149 t) 在 20 m/s 侧向风载下位移增幅<8%, 主吊梁挠度 14.8 mm (L/405), 验证了多锚点布置对风致振动的有效抑制。通过多节段协同验算, 本研究形成了涵盖设计、分析、施工的全流程技术标准, 为同类工程提供了可复用的技术范本。

(3) 展望未来, 本研究为智能化升级、疲劳耐久性研究和绿色施工技术指明了方向。引入数字孪生技术和机器学习算法, 可实现对吊装过程的实时监测与预测, 进一步提升施工精度与安全性。针对焊接接头、销轴等

关键节点, 需开展长期疲劳试验与腐蚀防护研究, 量化全寿命周期内的性能衰减规律。此外, 探索轻量化材料 (如高强铝合金、复合材料) 的应用, 结合模块化设计, 将有助于降低碳排放与资源消耗, 推动桥梁工程向更高效、更可持续的方向发展。

参考文献

- [1] 杜建双, 张露. 大跨度斜拉桥施工控制技术研究 [J]. 四川水泥, 2024, (09): 245-247.
- [2] 李元松, 李新平, 姜天华, 等. 大跨度斜拉桥施工控制方法研究 [J]. 武汉工程大学学报, 2007, (04): 45-8.
- [3] 吕文高, 鲍煊平, 何政. 大跨度桥梁连续倒塌分析与设计综述 [J]. 建筑技术, 2021, 52(10): 1200-1204.
- [4] 赵振宇. 世界最大跨度公铁两用斜拉桥长江吊装 [J]. 创新世界周刊, 2023, (04): 57.
- [5] 吕伟伟, 孙明利, 荆刚毅, 等. 大型塔吊在斜拉桥钢-混组合索塔安装施工中的应用 [J]. 工程技术研究, 2020, 5(11).
- [6] 张瑞, 柳胜华, 汤福平. 钢安全壳吊装及施工优化 [J]. 核科学与工程, 2020, 40(01): 55-59.
- [7] 陈平. 南京五桥索塔钢壳吊装运输及抛锚定位研究 [J]. 山西建筑, 2020, 46(06).
- [8] 吴洋. 桥梁施工中的 T 梁吊装施工技术研究 [J]. 工程技术研究, 2025, 10(06): 69-71.
- [9] 查道宏, 李军堂, 胡勇. 大跨度斜拉桥钢筋混凝土桥塔快速施工技术发展与展望 [J]. 世界桥梁, 2022, 50(04): 32-40.
- [10] 金兵. 斜拉桥主塔钢筋节段整体吊装施工关键技术 [J]. 工程技术研究, 2020, 5(01): 127-128.
- [11] 孙泽龙. 桥梁工程挂篮施工关键技术研究 [J]. 工程技术研究, 2024, 9(02): 61-63.
- [12] 宁凯, 高权, 柳莹. 澜沧江大桥叠合梁起吊吊具设计与施工应用 [J]. 公路, 2018, 63(04): 99-103.
- [13] 孙国光. 港珠澳大桥多功能旋转吊具设计与应用技术 [J]. 世界桥梁, 2017, 45(01): 20-24.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017-2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [15] 路璐. 公路桥梁设计荷载及其组合形式研究 [J]. 黑龙江交通科技, 2021, 44(10): 70-71.