

桥梁支座更换工程同步顶升控制技术研究与应用

张撞撞

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南郑州 450000

DOI: 10.12238/ems.v7i11.16065

[摘要] 支座在桥梁工程中具有传递荷载、协调结构变形等关键作用,但随着使用年限的增加,支座老化、损伤会使桥梁受力失衡,威胁运营安全,此时就需要及时更换桥梁支座。同步顶升控制技术作为桥梁支座更换施工中最为关键的一项技术手段,其施工效果直接影响整体工程的施工安全与结构完整性。本文就基于同步顶升的力学机理,分析同步顶升的关键影响因素,进一步论述桥梁支座更换工程同步顶升控制技术应用流程及施工注意事项。本研究旨在为复杂桥型支座更换提供精准化、智能化的解决方案,以推动桥梁养护技术的不断升级。

[关键词] 桥梁支座更换; 同步顶升; 控制技术; 结构安全; 工程应用

引言

桥梁支座与整个桥梁结构的受力稳定性密切关联,但随着服役时间的增长,支座易出现橡胶老化、钢板锈蚀、位移超限等病害,导致荷载传递不均,易引发梁体开裂、墩台沉降等连锁问题。同步顶升作为支座更换的核心环节,需精准控制多支点位移与荷载协调,避免结构产生附加应力。目前,国内外同步顶升技术存在控制精度不足、复杂工况适应性差、安全预警滞后等问题。为此,本文就同步顶升控制技术的应用进行了简要论述,旨在为桥梁支座更换提供高精度、高可靠性的施工技术支持,助力既有桥梁养护水平提升。



图1 桥梁支座更换同步顶升施工现场

1 桥梁支座更换同步顶升的力学机理

桥梁支座更换同步顶升技术其实就是通过多支点协调控制实现结构受力平衡与变形可控(图1)。实际顶升过程中是以梁体作为弹性体,其内力(弯矩、剪力)随支点反力重分布动态变化,各项升点荷载需与梁体自重、附加荷载匹配,避免局部应力超限导致混凝土开裂或钢结构屈服。多支点同步性直接影响结构安全性,当位移差超过限值(通常 $\leq 1.5\text{mm}$),会产生附加扭矩与偏心力,引发梁体扭曲变形,尤

其连续梁桥因支座约束条件复杂,易因同步精度不足导致相邻跨内力突变。临时支撑系统需承担顶升阶段的竖向荷载,其刚度匹配性决定梁体挠度曲线是否符合设计预期——刚性支撑过强会增大局部压力,柔性支撑则可能引发不均匀沉降^[1]。此外,顶升速率与结构固有频率需避开共振区间,防止振动荷载加剧结构损伤。由此可以看出,同步顶升施工中需统筹考虑力与位移的耦合关系、结构刚度特性及动态响应,通过精准控制实现荷载平稳传递与变形协调。

2 桥梁支座更换工程同步顶升的关键影响因素

2.1 结构参数

结构参数设置是否科学合理对桥梁支座同步顶升控制具有极大的影响,顶升点的布置数量与间距必须与桥梁跨度紧密结合,大跨度桥梁还需适当增加顶升点以分散荷载,但多点协同难度随点数增加呈指数级上升,易因控制延迟导致位移偏差累积。同时,结构刚度决定了顶升过程中桥梁的弹性变形量,刚度较低的连续梁桥在顶升时会因局部受力产生较大挠度,施工人员需通过预压补偿或分段顶升策略减小变形差异。此外,自重分布的复杂性则要求顶升系统具备动态荷载识别能力,例如在空心板梁桥中,各片梁的自重差异可能导致顶升时荷载集中于部分千斤顶,需通过压力实时监测与均载算法调整输出力^[2]。另外,桥梁的支座形式(如盆式支座、板式支座)也会影响顶升接触面的受力均匀性,需针对性设计顶升托架结构以避免应力集中。

2.2 设备参数

为了保障同步顶升施工作业的高效有序推进,必须根据施工要求配备相应的机械设备,且所有设备性能均处于良好的运行状态,这是保证同步顶升精度与可靠性的物质基础。首先,千斤顶的额定荷载需与桥梁设计荷载匹配,若选型过小可能导致顶升失效,过大则增加系统惯性与能耗。其次,

行程精度直接影响位移同步性，液压千斤顶的行程误差通常需控制在±0.05mm以内，否则在长距离顶升中会累积成厘米级偏差。再次，传感器灵敏度是闭环控制的关键，位移传感器分辨率应达到0.01mm级，压力传感器需具备0.1%FS的精度，以实时捕捉微小变化并反馈至控制系统。此外，设备的响应速度与通信延迟也至关重要，分布式控制系统中各节点通信周期需小于10ms，否则难以满足动态工况下的实时调整需求。设备的耐久性与维护便捷性同样影响工程效率，例如采用模块化设计的液压站可缩短故障排查时间，而自带自检功能的传感器能提前预警设备老化问题。

2.3 环境因素

环境条件主要是指外界环境温度、湿度、风荷载等，温度变化会引发桥梁结构热胀冷缩，导致顶升过程中位移基准漂移，例如在昼夜温差超过15℃的地区，混凝土桥梁的伸缩量可达数毫米，需通过温度补偿算法修正目标位移。施工振动干扰通常来自邻近交通、打桩作业或顶升设备自身运行，振动频率若接近桥梁固有频率会引发共振，加剧位移波动，需采用隔振基座或低频振动过滤器降低影响。此外，风荷载对高墩桥梁的侧向位移影响显著，需在顶升过程中同步监测风速并限制顶升速度。环境湿度与腐蚀性气体可能影响设备电气性能，例如传感器线路在潮湿环境中易短路，需采用密封防护设计。雨雪天气还会降低顶升作业面摩擦系数，需通过防滑涂层或增加配重确保稳定性。

3 桥梁支座更换工程同步顶升控制技术施工要点

3.1 前期准备

前期准备是保障桥梁支座工程同步顶升安全与精度的基础保障，施工前需做好以下几个方面的准备工作：首先，开展详细的桥梁结构检测与建模，通过静载试验、动载试验及三维激光扫描获取桥梁跨度、刚度、自重分布等参数，并建立有限元模型分析顶升过程中的应力应变分布，以此确定顶升点数量、位置及荷载分配方案。其次，合理挑选与调试设备，根据桥梁荷载需求选择额定压力匹配的液压千斤顶，配置高精度位移传感器（分辨率≤0.01mm）与压力传感器，搭建分布式控制系统并完成通信协议测试，确保各设备间数据交互延迟<10ms。同时制定环境应对预案，监测施工期间温度、风速等参数，预估热胀冷缩对位移基

准的影响，并在顶升区域设置防振隔离带以减少交通振动干扰。此外，还需进行现场试顶升验证，通过小位移加载测试系统同步性，调整控制算法参数直至位移偏差≤±0.05mm，最终形成包含设备清单、操作流程、应急预案的施工方案并完成专家论证。

3.2 施工实施

3.2.1 搭建临时支撑系统

临时支撑系统的设计需兼顾承载力、刚度与稳定性。施工人员首先应根据桥梁跨度、自重及顶升高度确定支撑形式，大跨度连续梁桥通常采用型钢组合支架或装配式钢桁架，确保竖向承载力≥1.5倍顶升荷载；高墩桥梁需增设横向连系杆件以抵抗风荷载与施工振动。然后对支撑基础进行地基加固处理，若地质条件较差（如软土层），还需采用钻孔灌注桩或扩大基础，避免顶升过程中发生不均匀沉降。并且在支撑顶部设置调平装置，通过楔形钢板或液压调平器消除桥梁底面不平整度，确保顶升时接触面受力均匀^[3]。此外，支撑系统需预留足够的操作空间，便于支座更换与传感器布设，同时设置防坠落安全网与警示标识，防止高空坠物风险。施工前需进行预压试验，验证支撑系统变形量是否在设计允许范围内（通常≤L/500，L为支撑跨度）。

3.2.2 分级同步顶升

分级同步顶升施工需严格遵循“试顶升→正式顶升→支座更换→落梁”四阶段操作，整个过程都要安排专人记录每级顶升的位移-压力曲线，为后续结构评估提供数据支持。

试顶升阶段需以5%-10%设计荷载进行短时加载，监测各顶升点位移同步性（偏差≤±0.2mm）及系统压力稳定性，验证控制算法参数是否合理；正式顶升阶段应采用“小位移、多循环”策略，单次顶升高度控制在5-10mm，每级顶升后暂停3-5分钟进行数据采集与设备检查，确保梁体转角<0.005rad、支座反力变化率<5%；支座更换阶段需在顶升到位后立即安装临时限位装置，防止桥梁横向滑移，同时采用机械千斤顶或液压垫块保持荷载稳定，避免因设备卸载导致结构回弹^[4]；落梁阶段应分级卸载，每级下降高度与顶升阶段对应，通过压力传感器与位移传感器双向反馈控制下降速度（≤2mm/min），直至桥梁完全落至新支座上，具体如下表1所示。

表1 桥梁支座分级同步顶升施工四阶段操作流程表

阶段	试顶升	正式顶升	支座更换	落梁
核心目标	验证系统可靠性，检测结构响应	安全抬升梁体至设计高度	拆除旧支座，精准安装新支座	同步平稳回落梁体至新支座

操作步骤	启动控制系统, 同步加压至设计荷载 10-20%; 持荷 5-10 分钟; 检查系统/结构无异常后 卸载归零	分多级 (3-5 级) 同步顶升; 每级抬升 3-5mm; 每级持荷 5min, 插入临时支撑垫块; 循环至设计高度 (通常 5-50mm)	卸载旧支座; 清理垫石表面; 测量放样定位; 安装调平新支座; 验收安装精度 ($\pm 1\text{mm}$)	分多级同步回落; 每级撤除对应垫块; 每级回落速度 $\leq 1\text{mm}/\text{min}$; 最终坐浆密贴
关键控制指标	压力波动 $\leq 5\%$ 位移同步差 $\leq \pm 0.5\text{mm}$ 结构裂缝监测	位移同步差 $\leq \pm 0.5\text{mm}$ 相邻墩台高差 $\leq L/2000$ (L 为跨径) 梁体倾斜度 $\leq 1/1000$	支座中心偏差 $\leq 2\text{mm}$ 四角高差 $\leq 1\text{mm}$ 垫石平整度 $\leq 0.5\text{mm}/\text{m}^2$	回落同步差 $\leq \pm 0.3\text{mm}$; 无支座脱空现象
安全措施	设置初始支撑垫块 实时预警阈值设定	每级顶升后立即锁紧千斤顶; 垫块堆叠高度 \leq 单块厚度 3 倍	设置防梁体滑移限位装置; 操作区隔离防护	回落全程保持千斤顶保压; 最后 3mm 采用点动回落

3.2.3 实时监测与调整

实时监测是同步顶升控制的“眼睛”，实践中需重点监控梁体转角、支座反力变化及设备运行状态。梁体转角监测可通过全站仪或倾角传感器实现，在桥梁两端及跨中布置监测点，实时计算转角值并反馈至控制系统，当转角接近预警值（通常为 0.01rad ）时，自动调整对应顶升点输出力以纠正偏位；同时，支座反力监测需在旧支座底部与新支座顶部安装压力盒，监测反力分布是否均匀，若某点反力超过设计值 20%，需暂停顶升并分析原因（如支座安装倾斜、结构局部刚度突变）；此外，设备状态监测包括液压系统压力波动、传感器信号稳定性及通信延迟等，通过中央控制平台实时显示各参数阈值，当出现异常时（如压力突降、位移停滞）立即触发报警并启动应急预案^[5]。另外，还需建立监测数据动态分析模型，结合历史数据预测结构响应趋势，提前调整控制策略，例如在温度骤变时增加温度补偿系数，确保顶升过程始终处于可控状态。

3.3 验收标准

桥梁支座更换工程同步顶升控制成效的验收通常围绕位移同步精度与结构安全性两大核心指标展开。位移同步精度是衡量顶升系统控制性能的直接依据，验收时应通过高精度全站仪或激光位移传感器，对所有顶升点的实际位移进行同步采集，要求各点位移偏差不得超过设计顶升高度的 $\pm 0.5\%$ ，且最大偏差值 $\leq 2\text{mm}$ ；同时需验证位移-时间曲线的平滑性，排除因设备抖动或控制滞后导致的阶跃式变化，确保顶升过程符合“匀速、平稳、连续”的控制要求。

除此之外，桥梁结构安全性复核则需从宏观变形与微观损伤两个层面开展。宏观上，工作人员可以借助水准仪与测斜仪监测顶升前后桥梁线形变化，要求梁体竖向挠度变化 $\leq L/1000$ (L 为跨径)，横向偏移 $\leq 10\text{mm}$ ，且无肉眼可见的不均匀沉降；微观上则采用超声波检测仪与裂缝测宽仪对顶升区

域混凝土进行全面扫描，确认无新增裂缝或原有裂缝扩展超过 0.05mm ，同时通过应变计与压力盒采集关键截面应力数据，验证顶升过程中最大应力值不超过混凝土抗压强度设计值的 70%、钢结构应力不超过屈服强度的 85%^[6]。此外，结合有限元模型对顶升工况进行反向验算，确保验收指标覆盖极端荷载组合下的结构安全储备，最终形成包含监测数据、分析报告与影像资料的完整验收文件，为工程交付提供科学依据。

结束语

总而言之，桥梁支座更换施工中，同步顶升控制技术是保障桥梁结构安全与运营畅通的核心手段，通过高精度位移同步控制、多参数实时监测与动态调整策略，有效解决了传统施工方法中易出现的结构损伤、荷载失衡等难题。该技术的成功应用不仅延长了桥梁使用寿命，降低了全生命周期维护成本，更为同类工程提供了可复制的技术范式，对推动桥梁养护智能化发展具有重要意义。

[参考文献]

- [1] 吕小兵. PLC 液压同步顶升控制系统在桥梁支座更换中的应用研究[J]. 价值工程, 2024, 43 (21): 91-93.
- [2] 高正勇. 同步顶升技术在桥梁支座更换施工中的应用[J]. 交通世界, 2024, (17): 131-133.
- [3] 祁朝相. 公路桥梁支座病害分析及更换选取解决方案探析[J]. 北方交通, 2024, (03): 26-29.
- [4] 乔禹. 大跨径斜拉桥同步顶升支座更换施工技术分析[J]. 安徽建筑, 2023, 30 (08): 26-27+98.
- [5] 卢文华. 桥梁支座更换同步顶升技术的应用[J]. 运输经理世界, 2023, (21): 102-104.
- [6] 李龙彬. 国外大型桥梁支座修复施工技术[J]. 工程建设, 2023, 55 (05): 49-56.