

液压自平衡吊具自动化调平控制策略

张朝亮

(穆钜(上海)动力技术有限公司, 上海 201101)

摘要 为实现构件吊装过程中的精准水平控制与安全提升, 本研究基于包含油箱框架、液压泵站、电气控制单元、传感器及多个千斤顶等核心组件的液压自平衡吊具装置, 提出一种通过传感器实时监测构件姿态与千斤顶行程、由电气控制单元处理传感器信号并输出指令至液压泵站、再由液压泵站驱动千斤顶协同伸缩以动态调整构件水平的自动化调平控制策略, 旨在为大型构件安装工程提供自动化解决方案参考。应用结果表明, 该液压自平衡吊具装置结构紧凑、集成度高且成本较低。

关键词 液压自平衡吊具; 自动化调平; 电气控制单元逻辑设计; 液压执行机构; 传感器监测

中图分类号: TH211.6

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.001

0 引言

大型构件安装工程领域, 构件的水平精确调整是保证整体结构安全与工程质量的关键步骤。当前行业普遍采用的传统方法主要为起重机配合钢丝绳或独立液压千斤顶作业的方式; 使用钢丝绳吊装时存在水平调整完全依赖操作人员手动调节各绳缆长度、过程繁杂且精度难以控制、往往需要多次试错并极易导致构件倾斜或位置偏差的问题, 采用独立千斤顶方案时存在每个千斤顶需单独设置液压管路 with 动力单元、安装复杂且协同性差、千斤顶之间动作不同步可能引起构件不稳定晃动甚至局部过载的情况; 面对上述传统方法存在的挑战, 行业亟须一种可提升作业可靠性的集成化、自动化调平解决方案。本研究旨在提出一种液压自平衡吊具的自动化调平控制策略, 通过创新设计实现构件吊装过程实时监测与精准调整, 对提高施工安全性与效率及降低成本具有重要工程价值。

1 液压自平衡吊具装置组成

1.1 关键组件功能描述

液压自平衡吊具装置的核心组成部分包括油箱框架、液压泵站及若干个千斤顶, 这些组件协同实现构件的自动化调平功能(如图 1 所示)。

图 1 中标号 1 所指示的是装置底部的支撑轮, 使设备具有移动以及定位功能。标号 2 是垂直地安装在设备两侧之处的立柱式执行机构, 其内部集成了液压油缸以及活塞杆, 从而构成了顶升负载的直接动力单元, 它通过法兰和主体框架相连接, 顶端承载面用来

支撑被调平的构件。标号 3 指向设备上表面中轴线位置的液压泵站, 它集成了电机、液压泵以及控制阀组, 是系统的动力源以及控制中枢。

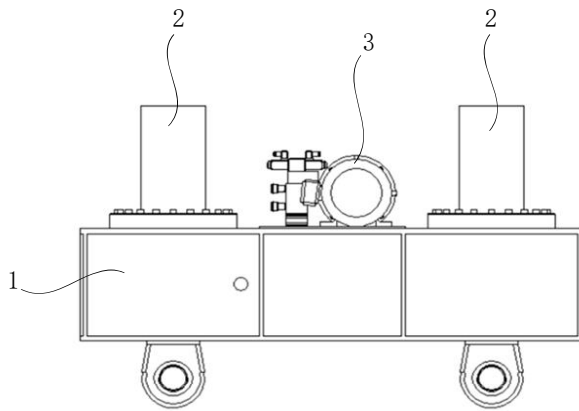


图 1 液压自平衡吊具装置

该系统的工作原理是: 液压泵站 3 按照控制方面的指令驱动液压油, 进而推动立柱执行机构 2 里面的油缸活塞进行运动, 以此来实现承载面高度的调节操作; 该装置凭借底部的支撑轮 1 移动到达工作的位置。整个整体的机械结构设计能够保障动力传递是直接的、结构响应是稳定的, 从而为自动化调平控制奠定了坚实的物理方面的基础。

1.2 装置工作原理

装置工作原理基于闭环控制逻辑, 当构件放置于千斤顶上时, 倾角传感器持续监测构件相对水平面的倾斜角度, 分辨率达 0.1° , 位移传感器同步采集每个千斤顶的伸缩行程, 精度为 $\pm 0.5 \text{ mm}$ 。电气控制单元

作者简介: 张朝亮 (1983-), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 机电液智能控制。

的功能控制单元以 100 Hz 频率采样传感器数据, 比较当前姿态与设定水平阈值, 若倾斜超限, 控制算法计算所需千斤顶调整量, 生成 PWM 信号驱动液压泵站的功能阀组。电机泵组启动, 油液从框架油箱经泵加压后, 通过功能阀组分配至目标千斤顶油缸, 阀组中的比例阀调节油液流量, 控制千斤顶伸缩速度, 位移传感器实时反馈行程形成位置闭环, 确保多个千斤顶同步动作。在调平过程中, 倾角传感器数据与位移传感器数据融合, 避免过调或振荡, 当构件水平度达到允许范围, 系统进入保持模式, 液压阀组闭锁维持压力, 这种机电液一体化设计将机械支撑、液压动力与电气控制无缝集成, 调平响应时间小于 3 秒, 支撑稳定性高, 无需人工干预^[1]。

2 自动化调平控制原理

2.1 传感器监测机制

自动化调平控制的传感器监测机制构建了系统感知层, 其核心是倾角传感器与位移传感器的数据融合。倾角传感器直接安装于油箱框架上表面, 采用 MEMS 技术, 测量范围 $\pm 10^\circ$, 分辨率 0.01° , 能够实时监测承载构件的俯仰与滚转两个轴向的倾斜角度变化, 采样频率为 100 Hz, 数据通过 CAN 总线传输。四个千斤顶顶端内部各集成一个磁致伸缩式位移传感器, 测量行程 0 mm ~ 200 mm, 线性精度 $\pm 0.1\%$ FS, 实时反馈每个千斤顶活塞杆的精确伸缩位置。传感器全行程 200 mm, 系统通过温度补偿与非线性拟合算法, 将综合线性精度提升至 $\pm 0.05\%$ FS, 分辨率达 $1\ \mu\text{m}$, 其数字信号通过菊花链式 SSI 接口同步传输, 有效消除了多通道间的时间偏移。底层硬件采用基于 IEEE 1588 协议的精确时间同步, 统一各传感器的时标; 上层算法在控制单元内构建“传感—状态”观测器, 通过卡尔曼滤波对原始的倾角与位移数据进行时空对准、去噪与状态估计, 实时解算出承载平面的三维空间姿态及各支撑点的独立高程, 其输出不仅包含高置信度的状态值, 还提供估计协方差矩阵以表征不确定性, 为后续的鲁棒控制决策提供了准确、一致且具有明确置信度的多维度状态反馈。

2.2 电气控制单元逻辑设计

电气控制单元的逻辑设计是实现智能调平的核心, 其功能控制单元采用 32 位工业级微处理器, 运行实时操作系统。控制程序以 10 毫秒为周期运行, 其核心算法基于经典的离散 PID 控制形式, 并针对液压系统固有的非线性特性(比例阀的死区、流量—压力特性以及执行机构的摩擦)进行了针对性改进。改进的核心在于引入一个与综合控制偏差量 $e(k)$ 大小相关的可变增益项 $K_{adjust}(e(k))$, 以应对大偏差范围内需快速响应

与小偏差范围内需防止超调的矛盾, 算法集成了对液压阀死区的静态补偿前馈 U_{comp} , 改进后的控制算法输出千斤顶的位移调整量 $\Delta L(k)$, 其表达式为:

$$\Delta L(k) = K_{adjust}(e(k)) \cdot [K_p \cdot e(k) + K_i \cdot T \cdot \sum_{j=0}^k e(j) + K_d \cdot \frac{e(k) - e(k-1)}{T}] + U_{comp} \quad (1)$$

式(1)中, $\Delta L(k)$ 为当前控制周期计算的千斤顶位移调整量, $K_{adjust}(e(k))$ 是可变增益系数, 为综合控制偏差量 $e(k)$ 的函数, K_p, K_i, K_d 分别为 PID 控制的比例、积分、微分增益系数, $e(k)$ 为当前采样时刻的综合控制偏差量, 由倾角偏差与位移偏差经加权融合得出, T 为控制系统的采样周期, 此处为 0.01s, $\sum_{j=0}^k e(j)$ 为从初始时刻到当前时刻 k 的综合控制偏差量的累加和。 U_{comp} 是针对比例阀死区的固定补偿量^[2]。

控制程序流程为不断地去读取倾角以及位移传感器所产生的数据, 对角度以及位移的偏差进行计算并且经过加权融合来生成 $e(k)$, 在依据改进之后的算法完成计算 $\Delta L(k)$, 按照 $e(k)$ 方向来确定需要动作起来的千斤顶的编号, 最终输出与之对应的 PWM 控制信号。在逻辑当中嵌入防振荡的算法, 当偏差进入死区的时候就自动地切换至低增益或者积分分离的模式, 以此防止系统在目标值的附近产生震荡。所有的控制参数能够通过无线手柄实现在线的修改, 从而适应不同刚度以及重量的构件所具有的调平需求。

2.3 液压执行机构控制流程

液压执行机构方面的控制流程是功能控制单元所发出的指令先是激活电机泵组, 电机启动之后带动齿轮泵自油箱框架当中吸油并且产生高压油液; 高压油液进入集成有四个独立的二位四通比例换向阀(每一个阀对应着一个千斤顶油缸)以及四个液控单向阀的功能阀组, 依据指令所指定的千斤顶编号以及伸缩方向, 相应的比例换向阀线圈通电, 阀芯移动到指定开度, 引导压力油进入目标千斤顶的无杆腔或者有杆腔。比例阀开度和 PWM 信号占空比呈线性相关, 实现油液流量精准控制, 调节千斤顶伸缩速度; 位移传感器实时监测活塞杆实际位移, 形成位置闭环, 确保位移调整量精准执行。系统采用“进油节流调速”这一方案, 压力油经过比例阀开口之后直接驱动活塞运动; 液控单向阀在比例阀失电之时立刻关闭, 形成液压锁保持位置。位置闭环实时性由位移传感器反馈予以保障, 反馈值和目标值在每一个控制周期之内进行比较, 偏差输入 PID 算法迭代计算, 动态调整 PWM 输出, 构成能够实时补偿油液压缩、泄漏以及负载变化等干扰的闭环伺服系统。针对多缸同步动作, 控制流程中嵌入了交叉耦合补偿算法, 通过实时比较各缸位移反馈,

对驱动流量进行微调,以抑制因制造误差或负载不均引起的同步误差,确保四个千斤顶在调平过程中的协同精度,最终实现构件姿态的高动态、高精度稳定调节。

3 液压自平衡吊具自动化调平控制策略实施与性能分析

3.1 系统集成与调试方法

系统集成遵循机电液一体化原则,硬件连接以油箱框架为结构基础。四个千斤顶通过法兰球铰安装于框架四角,液压管路采用高压软管连接千斤顶与泵站功能阀组,所有接头使用 24° 锥密封结构并施加 $35\text{ N}\cdot\text{m}$ 扭矩确保密封性。电气布线采用屏蔽双绞线,传感器信号线与液压泵站动力线分层敷设间距大于 150 mm ,减少电磁干扰^[3]。电气控制单元安装于防水箱内,其DI/DO模块通过航空插头连接位移传感器和倾角传感器,DO模块输出继电器信号控制电机泵组启停,AO模块输出 $\pm 10\text{ V}$ 模拟信号驱动比例阀。系统上电后执行硬件自检流程,依次检测蓄电池电压、各传感器通讯状态、液压系统压力。

软件调试在硬件集成完成后分阶段进行。第一阶段进行传感器标定,将装置置于水平平台,读取倾角传感器零点偏移值并软件补偿,对每个千斤顶执行全行程伸缩,记录位移传感器AD值与实际位移的线性关系,建立校准曲线。第二阶段测试单缸动作,通过无线手柄手动控制单个千斤顶伸缩,验证比例阀PWM控制信号与缸速的对应关系,并调整PID参数使缸体启停平稳无冲击。第三阶段进行四缸同步调试,给定相同目标位移,观测四个位移传感器反馈值的极差,通过修改PID算法中的同步补偿系数,将同步误差控制在 $\pm 0.5\text{ mm}$ 内^[4]。最终阶段进行带载测试,使用标准负载模拟实际工况,验证系统在负载变化时调平控制的稳定性与响应速度。

3.2 调平效果评估指标

调平效果评估基于重复性实验,测试条件为在坚实水平地基上放置液压自平衡吊具装置,其上承载重量 20 t 的钢结构梁,初始状态通过垫块人为设置最大倾角 2.5° 的倾斜工况。每次测试记录从系统启动到调平完成的全部数据,采样间隔 100 ms 。评估指标主要包括调平时间、调平精度、同步性误差及系统稳定性。调平时间定义为从控制指令发出到倾角传感器读数持续 3 s 稳定在目标阈值内的时间段。调平精度以最终稳定后的倾角传感器读数为准。同步性误差取调平过程中任意时刻四个千斤顶位移读数的极差最大值^[5]。系统稳定性通过连续 10 次重复测试结果的标准差来评估。测试数据记录如表1所示。

表1 液压自平衡吊具调平性能测试结果

测试序号	初始倾角 ($^{\circ}$)	调平时 间(s)	最终水平精 度($^{\circ}$)	最大同步误 差(mm)
1	2.50	8.20	0.08	1.20
2	2.50	7.90	0.06	1.00
3	2.40	8.50	0.09	1.30
4	2.60	8.10	0.07	1.10
5	2.50	7.80	0.05	0.90
平均值	2.50	8.10	0.07	1.10
标准差	0.07	0.26	0.015	0.15

数据分析表明,该液压自平衡吊具系统调平时间平均值 8.10 s ,标准差 0.26 s ,重复性良好。最终水平精度平均值 0.07° ,显著优于设计指标($\pm 0.1^{\circ}$),证明控制策略有效。最大同步误差平均值 1.10 mm ,显示四个千斤顶协同动作精度高,避免了因不同步导致的构件内部应力。所有测试批次数据标准差均处于低位,说明系统运行稳定可靠,具备工程应用价值。

4 结束语

本研究所提出的液压自平衡吊具及其自动化调平控制策略通过高度集成油箱框架、液压泵站、电气控制单元、传感器与执行千斤顶构建完整机电液一体化调平系统,基于倾角与位移传感器实时数据融合并经由电气控制单元智能算法处理精准驱动液压执行机构实现四缸协同动作,成功实现大型构件吊装过程中快速高精度自动化调平,有效克服传统调平方法精度低、风险高、效率差的固有缺陷,显著提升施工安全性与作业效率,为大型构件安装工程提供创新且具广泛应用前景的解决方案。

参考文献:

- [1] 林朝,王衍英,张耀东,等.基于IGWO-BP-PID的管廊吊具液压缸同步控制研究[J].机床与液压,2024,52(07):80-86.
- [2] 田政平,王朝辉,刘健,等.铝扁铰液压吊具液压系统的研发[J].上海电气技术,2023,16(04):68-71.
- [3] 王刚锋,杨军康,侯润锋,等.基于改进PSO模糊PID的管廊吊具同步控制[J].液压与气动,2023,47(12):115-123.
- [4] 王志金,张义,田世宽,等.高空精调吊具的设计与应用研究[J].公路,2023,68(10):49-56.
- [5] 王明华.基于液压比例驱动的双摇臂抱杆姿态自适应调节[J].轻工科技,2026,42(01):90-92,135.