

张硕, 周孝法, 方宇, 等. 架空输电线路弧垂检测自动调平平台与控制系统[J]. 智能计算机与应用, 2025, 15(3): 120-124.
DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.250317

架空输电线路弧垂检测自动调平平台与控制系统

张硕¹, 周孝法², 方宇¹, 张爱华¹, 范狄庆¹, 陈树藩², 忻渊中², 茹天云²

(1 上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620; 2 国网上海市电力公司, 上海 200122)

摘要: 为了解决架空输电线路弧垂智能检测仪在工作时需要始终保持水平状态的问题, 设计了一种自动调平平台及其控制系统。该平台采用三点支撑、两点逐高、角度误差粗调、位置误差微调的调平方法, 用3个球铰支撑、2个丝杆步进电机进行平台角度调节, 平台倾角由双轴倾角传感器进行实时监测和反馈, 控制系统采用可编程逻辑控制器, 调节速度快、精度高。样机实验结果表明, 在小角度范围内该平台可在100 s内实现精度为 $\pm 0.05^\circ$ 的调平, 可配合三脚架应用于各种复杂地面, 实现快速高精度自动调平, 满足架空电力线路弧垂智能检测仪性能指标要求。

关键词: 输电线路; 弧垂检测; 自动调平平台; 调平方法; 可编程逻辑控制器

中图分类号: TP272 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-2163(2025)03-0120-05

Automatic leveling platform and control system for sag measurement of overhead transmission lines

ZHANG Shuo¹, ZHOU Xiaofa², FANG Yu¹, ZHANG Aihua¹, FAN Diqing¹, CHEN Shufan², XIN Yuanzhong², RU Tianyun²

(1 School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2 State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200122, China)

Abstract: An automatic leveling platform and its control system are designed for intelligent sag measuring instrument of overhead transmission lines. The platform adopts a three-point support, two-point-by-height leveling method, with three ball-hinged supports and two filament stepper motors for platform angle adjustment. The platform's tilt angle is monitored and fed back by the dual-axis tilt sensor in real time, and a programmable logic controller is used for the control system to achieve fast adjustment speed and high precision. Prototype experimental results show that the leveling platform can be leveled within 100 s with an accuracy of $\pm 0.05^\circ$ in the small angle range, and can achieve fast and high-precision automatic leveling on various complex surfaces in coordination with a tripod, meeting the performance index requirements of intelligent sag measuring instrument of overhead transmission lines.

Key words: transmission lines; sag measurement; automatic leveling platform; leveling method; PLC

0 引言

随着科学技术的发展,越来越多的领域开始应用自动调平技术,例如光电追踪设备^[1]、雷达探测设备^[2]、架空电力线路弧垂检测仪^[3]等。自动调平技术可以提高调平精度、减少调平时间、降低对操作人员的要求。目前架空电力线路弧垂检测方法大都需要借助全站仪、经纬仪或水平仪等设备的人工手动调节来保证观测基准水平^[4-5],以提高弧垂检测精度。朱冠旻等学者^[6]基于等长法设计了一款搭载在手动调平基座的弧垂观测仪。徐振海等学

者^[7]基于传统绑扎弧垂的方法,设计了带有水平观测板,可以通过铰链结构调节弧垂板水平度的弧垂观测装置。王礼田等学者^[8]设计了一种基于双目视觉的弧垂测量方法,在固定水平基线的基础上对弧垂进行点云重建以计算出弧垂。刘仁钊等学者^[9]结合全站仪设备对弧垂测量方法进行研究,编写了架空线路弧垂测量机载应用软件。

目前大多数调平平台采用液压调平^[10-11],液压调平的结构复杂、成本高,结合机电控制技术设计的自动调平平台^[12-13]更具优势。调平平台支撑结构多为三点支撑和四点支撑^[14-16],由于3个点就可以

作者简介: 张硕(1998—),男,硕士研究生,主要研究方向:分布式控制系统。

通信作者: 张爱华(1986—),女,博士,讲师,主要研究方向:机电传动控制,分布式控制系统。Email: aihua100yi@163.com。

收稿日期: 2023-09-23

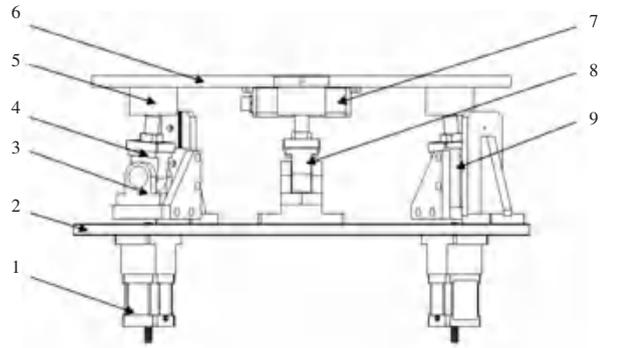
确定一个平面,并且三点独立支撑可以保证平台有足够的稳定性和抗倾倒能力。四点支撑易出现虚腿,调平过程繁杂。针对上述问题,设计一种应用于架空电路弧垂检测仪的三点支撑自动调平平台及其控制系统,通过角度误差粗调与位置误差微调的方法平衡调平速度和精度。而对于机械机构导致无法避免电机空回问题,采用两点逐高的调平方法^[17],即高点不动低点向高点看齐的模式实现平台快速准确自动调平。

1 调平系统总体设计

目前,自动调平平台从支撑结构方面分为三点、四点、多点支撑等。其中,四点和多点支撑在调平过程中容易出现虚腿,且调平复杂、不易实现。三点支撑只需使用 3 个支撑腿调平,调节方便,结构简单,采用两点逐高的调平方法只需要控制 2 个支撑点运动,另一个支撑点固定为最高点,极大地节约了设计成本,降低了控制难度。相较于液压控制系统,机电控制系统更快速、更准确,所以设计了三支撑,两点逐高的机电控制自动调平平台。

自动调平平台结构如图 1 所示,上平台为稳定平台,用来搭载工作设备;采用三点支撑的方法,由 3 组球铰和虎克铰提供支撑与下支撑平台连接;其中,2 个可移动支撑腿分别连接 2 个丝杆步进电机,两个丝杆步进电机为自动调平平台的原动件,驱动平台的升降;另一个支撑腿是固定的,不需要对其进

行控制,自动调平开始前通过调节搭载调平平台的三脚架将其调整为最高点。稳定平台上 2 个可移动支撑腿的支撑点连线为 X 轴,与 X 轴垂直相交于中点的线为 Y 轴,双轴倾角传感器安装于 X 轴与 Y 轴交点正下方。



1—丝杆步进电机;2—支撑平台;3—支撑腿 2;4—虎克铰;5—球铰;6—稳定平台;7—双轴倾角传感器;8—支撑腿 1;9—支撑腿 3

图 1 自动调平平台结构

Fig. 1 Automatic leveling platform structure

本系统采用汇川 H5U-A8 型可编程逻辑控制器(Planar Lightwave Circuit)作为控制器,发送脉冲作为步进驱动器的控制信号,通过倾角传感器返回的角度实现闭环控制,通过步进驱动器实现对步进电机的速度、位移的精确控制,结合三铰链支撑平台和三脚架实现平台的自动调平,并通过汇川 IT7070E 触摸屏搭建控制界面。控制系统框架如图 2 所示。

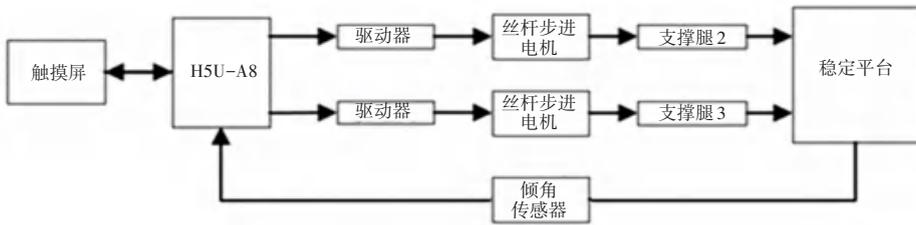


图 2 控制系统框架图

Fig. 2 Control system framework diagram

2 调平策略

目前,自动调平的方法主要有位置误差调平法和角度误差调平法,2 种方法都是根据倾角传感器返回的倾角进行调节。其中,位置误差调平法利用倾角传感器监测 X 轴和 Y 轴倾角,通过控制各支撑腿升降对应的位移进行调平;角度误差调平法是根据倾角传感器监测的倾角判断支撑腿的高低,然后控制相应的支撑腿以一定速度进行升降,使两轴倾

角趋近于零进行调平。采用位置误差进行自动调平的系统较为复杂,但是调平速度快、精度高;采用角度误差进行自动调平的系统较为简单,但是调平速度慢、精度低。本系统将 2 种调平方法进行结合,采用了角度误差调平法粗调、位置误差调平法微调的调平策略,如图 3 所示。

自动调平平台有 3 个支撑点,其中 2 个支撑点是由丝杆步进电机可控制的,剩下的 1 个支撑点是固定的。按照只升不降的原则,采用两点逐高的调

平技术,根据倾角传感器可以判断3个支撑点的高低,由于有1个支撑点是固定的,不可控,所以需要调整底部三脚架的高度保证固定的支撑点处于最高点,然后通过 PLC 控制 2 个丝杆步进电机实现支撑点的精准调节,根据两轴倾角传感器反馈的 X 与 Y 轴角度判断支撑点调节顺序,采用角度误差调平法把 2 个可控支撑点与固定支撑点粗调至同一水平面,最后通过位置误差调平法进行微调减小误差。自动调平流程如图 4 所示。



图3 自动调平策略

Fig. 3 Automatic leveling strategy

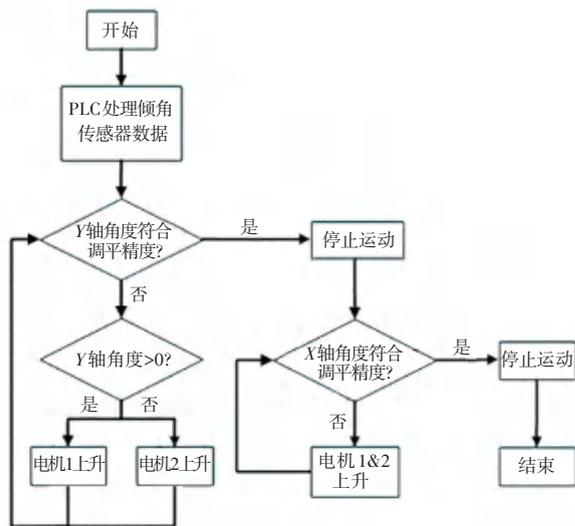


图4 自动调平流程

Fig. 4 Automatic leveling process

3 自动调平控制系统

3.1 自动调平控制系统硬件设计

自动调平控制系统硬件由控制、采集、执行三部分组成。其中,控制模块选用汇川 H5U-A8 可编程逻辑控制器(PLC)作为控制器,汇川 IT7070E HMI 作为触摸屏进行可视化操作;采集模块选用北微 BWS2700E 高精度双轴倾角传感器对调平台倾角进行检测,通过 RS485 通讯接口传输给 PLC 控制器;执行模块选用 2 组脉冲方向型微型步进电机驱动器和丝杆步进电机,PLC 控制器通过两路高速输出对执行模块进行驱动。硬件连接如图 5 所示。

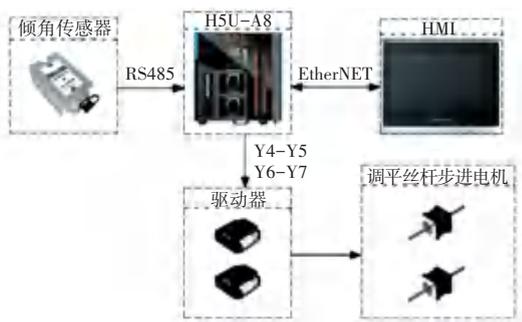


图5 控制系统硬件连接图

Fig. 5 Control system hardware connection diagram

3.2 自动调平控制系统程序设计

系统程序包括采集、转换以及调平三部分。其中,采集部分是对双轴倾角传感器建立连接并采集角度数据输入给 PLC 控制器内部地址;转换部分是对采集到的数据进行转换处理,方便参与计算和显示;调平部分是对调平过程进行控制,对执行机构发出指令,让其自动运行实现调平。

3.2.1 采集程序

双轴倾角传感器通过 RS485 Modbus RTU 协议将角度数据传输给 PLC,通信参数为波特率 9 600;数据位 8 位;停止位 1 位;无奇偶校验;双轴倾角传感器返回的角度数据分为 4 个部分: X 轴角度的整数位、X 轴角度的小数位、Y 轴角度的整数位、Y 轴角度的小数位,将其分别以整数形式存储在 PLC 的 4 个寄存器中。

3.2.2 转换程序

采集到的双轴倾角传感器数据分别以 16 位整数形式存储在 4 个地址中,需要先对读取到的角度数据按下式进行解析:

$$A = (H - 10\ 000) + (L - 10\ 000) \times 0.001(1)$$

其中, A 表示实际显示的角度; H 表示读取到的角度数据高 2 字节整数位角度; L 表示低字节小数位角度。

然后将其转换为浮点数后进行组合,从而得到 X 和 Y 两轴的实际角度。

步进电机是将电脉冲信号转换为角位移或线位移的开环控制元件。当步进电机驱动器接收到一个脉冲信号,就驱动步进电机按设定的方向转动一个固定的角度,称为步距,其旋转是以固定的角度一步一步运行的。可以通过控制脉冲个数来控制角位移量,从而达到准确定位的目的;同时可以通过控制脉冲频率来控制电机转动的速度和加速度,从而达到调速的目的。自动调平控制系统选用的丝杆步进电机参数见表 1。

表 1 丝杆步进电机参数

Table 1 Screw stepper motor parameters

步距角/(°)	步长/mm	螺杆导程/mm	细分数
1.8	0.007 9	1.587 5	32

丝杆电机移动一定距离 L 所需接收到的脉冲数 Q 计算公式为:

$$Q = \frac{360^\circ F}{\delta K} L \quad (2)$$

其中, F 表示丝杆电机细分数; δ 表示步距角; K 表示螺杆导程。由以上数据可以看出, 丝杆步进电机可以达到非常高的控制精度, 完全满足高精度调平的控制需求。

3.2.3 调平程序

根据自动调平策略设计自动调平控制程序, 分

为粗调和微调两部分。粗调部分, PLC 根据角度数据转换部分得到的 Y 轴角度, 判断 2 个丝杆步进电机驱动的支撑腿高低, 控制低位丝杆步进电机按照角度误差调平法以固定转速驱动低位支撑腿快速上升至与高位支撑腿同一高度, 此时 Y 轴角度应满足粗调精度 $\pm 0.1^\circ$; 然后 2 个丝杆步进电机同步上升至 X 轴角度满足粗调精度。

粗调完成后, 平台基本水平, 但是还不能满足高精度要求, 需要 PLC 控制低位丝杆步进电机按照位置误差调平法不断以固定微小位移缓慢上升, 使 Y 轴角度逼近微调精度 $\pm 0.05^\circ$ 。 X 轴角度的微调节同 Y 轴类似, 不同点在于 X 轴角度的微调节是以固定支撑腿为最高点, 需要同步控制 2 个丝杆步进电机上升。控制程序部分梯形图如图 6 所示。

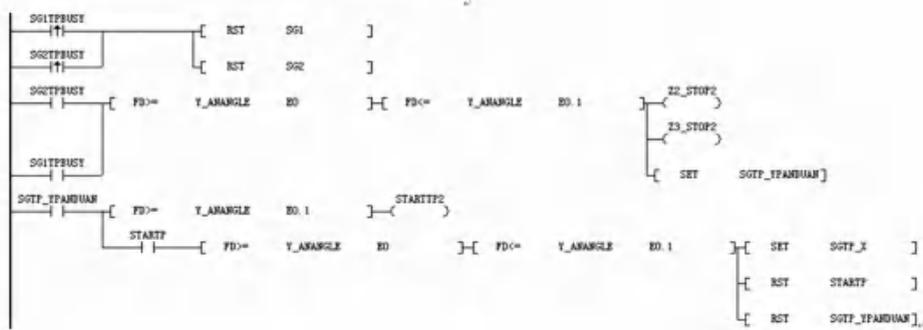


图 6 控制程序部分梯形图

Fig. 6 Control program section ladder diagram

4 实验验证

为验证本文设计的自动调平平台的调平方法和机电式三点支撑控制系统的有效性, 实验验证 3 种不同的初始状态(支撑腿不同的高低)下的自动调

平精度和时间。设 X 轴倾角为 α , Y 轴倾角为 β , 由于采用两点逐高的调平方法, 调平精度为 $\pm 0.05^\circ$, 固定支撑腿处于最高点, 所以 α 初始一定小于零, 只需要考虑 β 处于不同初始状态时的调平过程, 实验数据见表 2。

表 2 自动调平实验记录

Table 2 Automatic leveling experiment records

实验条件	初始 $\alpha/(\circ)$	初始 $\beta/(\circ)$	调平后 $\alpha/(\circ)$	调平后 $\beta/(\circ)$	调平时间/s
$\beta < -0.05$	-2.339 8	-1.868 2	-0.005 4	-0.013 6	54
$\beta > 0.05$	-2.290 2	0.858 2	0.025 2	0.030 4	39
$-0.05 < \beta < 0.05$	-1.820 6	0.002 6	0.011 4	-0.013 4	26

在 α 角小于零, 固定支撑腿处于最高点, β 角小于零且不满足调平精度时, 稳定平台向上向左倾, 经过角度误差逐高自动调平 54 s 后 α 和 β 角均达到调平精度, 调平过程中 X 、 Y 轴倾角变化如图 7(a) 所示; 在 α 角小于零, 固定支撑腿处于最高点, β 角大于零且不满足调平精度时, 稳定平台向上向右倾, 经

过角度误差逐高自动调平 39 s 后 α 和 β 角均达到调平精度, 调平过程中 X 、 Y 轴倾角变化如图 7(b) 所示; 在 α 角小于零, 固定支撑腿处于最高点, β 角满足调平精度时, 稳定平台只向上倾, 经过角度误差逐高自动调平 26 s 后 α 和 β 角均达到调平精度, 调平过程中 X 、 Y 轴倾角变化如图 7(c) 所示。

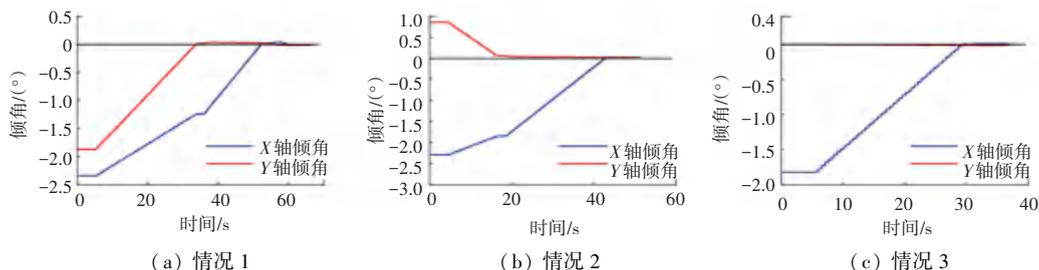


图7 调平过程X、Y轴倾角曲线

Fig. 7 X and Y axis inclination curves during leveling

5 结束语

本文设计了一种用于架空电力线路弧垂智能检测仪的自动调平平台及其控制系统,采用三点支撑、两点逐高的调平方法,来提高调节速度与精度。样机实验证明,采用机电式三点支撑结构可完全不用考虑虚腿问题,且两点逐高的角度误差调平法粗调、位置误差调平法微调的策略在大幅简化平台结构设计的同时也使得自动调平只需通过控制2个支撑点的运动即可,既简单又快速。在平台处于3种不同的初始倾斜状态下均可在100 s内实现自动调平,精度达到 $\pm 0.05^\circ$,满足架空电力线路弧垂智能检测仪性能指标要求,具有工程应用推广价值。

参考文献

- [1] 王磊,卢聪慧,张新棋,等. 光电精测仪分层自动调平装置的研究与应用[J]. 机床与液压,2019,47(7):62-66.
- [2] 郭亚奎,吴影生,吴显奎. 基于大型车载雷达平台的调平控制系统[J]. 西华大学学报(自然科学版),2021,40(5):76-81.
- [3] 李立学,刘冰,彭海超,等. 基于微波测距的架空输电线路弧垂检测方法[J]. 现代信息科技,2019,3(20):31-34.
- [4] 陈凯,罗兆楠,江海涛. 特高压变电站软母线弧垂测量方法[J]. 山东电力技术,2019,46(1):10-13.
- [5] 李党学,李锐. 架空输电线路弧垂检测方法综述[J]. 电力与能

源,2019,40(6):664-668.

- [6] 朱冠旻,万华翔,刘勇等. 便携式塔上弧垂观测仪在输电线路工程中的运用[J]. 建筑技术开发,2019,46(17):103-105.
- [7] 徐振海,王树军,徐硕. 架空输电线路导线弧垂观测装置的研制与应用[J]. 科技与创新,2018(5):132-133.
- [8] 王礼田,邵凤莹,萧宝瑾. 基于双目视觉稀疏点云重建的输电线路弧垂测量方法[J]. 太原理工大学学报,2016,47(6):747-751.
- [9] 刘仁钊,马星. 架空线路全站仪机载测量软件研制[J]. 地理空间信息,2017,15(4):85-88.
- [10] 周伯俊,于传强,谭立龙,等. 基于干扰补偿的车载平台快速调平控制技术研究[J]. 北京航空航天大学学报,2023,49(10):1-13.
- [11] 张强,何雪莹,周振东等. 高空作业平台液压调平机构的优化研究[J]. 机械设计与制造,2023(4):187-190.
- [12] 徐爱群,杜浩然,王名宏,等. 高精度工作平台调平技术[J]. 现代制造工程,2022(12):69-74.
- [13] 吴海志,朱少杰,张帆,等. 机电式支承平台自动调平控制系统设计[J]. 山东理工大学学报(自然科学版),2021,35(4):29-35.
- [14] 罗振元,田育民,马小辉. 一种高精度自动调平工作台设计[J]. 现代电子技术,2010,33(5):107-109.
- [15] 王超,高云国,乔健. 三点支撑平台的快速调平研究[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(8):1216-1223.
- [16] 杨红军,姚金. 小型平台机电式自动调平系统的研究[J]. 制造业自动化,2014,36(14):98-100.
- [17] 肖克,徐世许,刘镔震,等. 基于STC89C51的液压自动调平系统设计[J]. 工业仪表与自动化装置,2022(1):25-28.