

## 装配式架线施工导线精确测长设备的研制\*

李恒博<sup>1,2</sup> 唐波<sup>1,2</sup> 陈国庆<sup>1,2</sup> 李晓斌<sup>3</sup> 张龙斌<sup>1,2</sup> 尚智宇<sup>1,2</sup>

(1. 三峡大学电气与新能源学院 宜昌 443002; 2. 湖北省输电线路工程技术研究中心(三峡大学) 宜昌 443002;  
3. 广东电网有限责任公司江门供电局 江门 529000)

**摘要:**导线长度的精确测量是装配式架线施工中的关键问题。而现有装配式架线施工技术由于缺乏导线实时展放长度的精确测量技术,导致施工误差过大而无法推广应用。为此,结合装配式架线施工的工程应用需求,以导线长度精确测量和画印功能为功能目标,研制了一种适用于装配式架线施工工况的导线精确测长设备。在硬件方面,选用增量式光电编码器采集导线的长度信息,采用远距离无线电(LoRa)技术进行数据无线传输,当展放长度达到阈值时,设计驱动电路控制喷漆泵进行画印喷漆;以上功能通过专用的供电模块实现施工过程中免充电需求。在软件方面,设计了长度测量算法,开发了基于手持终端的导线实时展放测量系统。研制的测长设备已成功应用于实际工程,实测架线后的观测档弧垂与设计弧垂的偏差值为4.57%,符合工程设计要求。

**关键词:**导线长度;精确测量;装配式架线;画印;观测弧垂

**中图分类号:** TM93 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4051

## Development of prefabricated wire construction wire precision length measurement equipment

Li Hengbo<sup>1,2</sup> Tang Bo<sup>1,2</sup> Chen Guoqing<sup>1,2</sup> Li Xiaobin<sup>3</sup> Zhang Longbin<sup>1,2</sup> Shang Zhiyu<sup>1,2</sup>

(1. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;  
2. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Power Transmission Line, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. Jiangmen Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Jiangmen 529000, China)

**Abstract:** The accurate measurement of conductor length is a key issue in prefabricated wire construction. However, due to the lack of accurate measurement technology of real-time spreading length of conductors, the existing prefabricated wire construction technology is too large to be popularized. Therefore, combined with the engineering application requirements of prefabricated wire construction, and taking the function of accurate measurement of conductor length and printing function as the functional goal, an accurate length measurement equipment suitable for prefabricated wire construction conditions was developed. In terms of hardware, incremental photoelectric encoder is selected to collect the length information of the wire, and long-distance radio (LoRa) technology is used for wireless data transmission, and when the unfolding length reaches the threshold, the drive circuit is designed to control the paint spray pump for painting and painting; The above functions realize the need for free charging during construction through a dedicated power supply module. In terms of software, the length measurement algorithm was designed, and a real-time wire spreading measurement system based on handheld terminal was developed. The developed length measuring equipment has been successfully applied to actual engineering, and the deviation value between the observation file sag and the design arc sag after the measured frame line is 4.57%, which meets the engineering design requirements.

**Keywords:** wire length; precise measurement; prefabricated transmission lines; print; observation of sag

收稿日期:2022-10-18

\* 基金项目:南方电网公司科技项目(GDKJXM20200710)资助

## 0 引言

装配式架线施工直接按照导线长度进行架线,省去了繁琐的弧垂观测和紧线等步骤,在架空输电线路工程建设中具有独特优势<sup>[1]</sup>。但按照导线长度进行架线,需要实现线长的精确测量<sup>[2]</sup>,而目前缺乏有效的测量设备。因此,需要一种能够在施工中精确测量导线长度的设备。

从现有研究来看,导线长度的测长方式可分为非接触式和接触式两种<sup>[3]</sup>。其中,非接触式测长方式多依靠激光多普勒测速技术来实现<sup>[4]</sup>。文献[5]基于激光多普勒技术研制了一种导线长度测量系统。但由于绞合结构的导线表面较为粗糙,激光照射导线时产生的反射光强度大小与方向不一,难以根据收集的反射光进行线长的精确测量。因此,现有研究更倾向于采用接触式导线测长方式。

文献[6]基于接触式测量方式,采用单轮压紧与测量轮支撑相配合的机械结构,研制了一种用于导线生产过程中的长度测量设备。但该设备未采取抑制抖动的措施,无法适用于导线抖动情况较为严重的施工过程中的导线长度测量。为避免导线的抖动所带来的干扰,文献[7]通过增加压紧轮数量的方法,研制了一种输电线路导线长度测量装置。但该装置仅在移动速度小于1 km/h时能保证较高的测量精度,难以满足导线展放时的实际工程需求<sup>[8]</sup>。为此,文献[9]参考了关于光电编码器转速测量领域在软件程序上的处理方法<sup>[10]</sup>,设计了一种能自动修正测量轮的转速误差的导线长度测量系统。但该系统的算法设计过于复杂,以至于运算速度缓慢,又考虑到该算法对处理器的性能也有很高要求,因此根本无法应用于实际施工过程中,装配式架线施工中导线长度精确测量的问题至今仍未得到解决。

为此,本文结合装配式架线施工工艺及接触式测量方式的特点,通过硬件电路、软件程序和结构设计等3方面进行优化,研制了一种适用于装配式架线施工的导线精确测长设备,实现了架线施工中导线实时展放长度的精确测量,并完成了导线预设长度的动画印功能。

## 1 测长设备的设计方案

### 1.1 装配式架线施工特性

装配式架线施工是指,在架线施工中依据计算得出该线档所需的导线长度<sup>[11]</sup>,然后利用设备对导线进行精确测量。量取该段导线后,对其进行画印等预处理工作,随后将其展放至对应线档内进行挂线,即可使该线档弧垂达到设计标准。装配式架线施工相对于传统架线方式节省了弧垂观测和松线—紧线等调整工作,有着独特优势。

装配式架线施工(图1)中,虽然可根据提前确定好的导线长度直接进行架线,但在实际施工过程中,现有测长设备无法满足架线施工的工程实际应用需求,如未充分考虑导线结构特性和施工中各项干扰因素的影响,导致线长难以精确测量。倘若线长测量精度不够,根据架空输电

线路的悬链线公式<sup>[12]</sup>可知,线长微小变化都将引起弧垂的巨大变动。因此,为确保装配式架线能符合设计要求,必须要确保线长的精确测量。

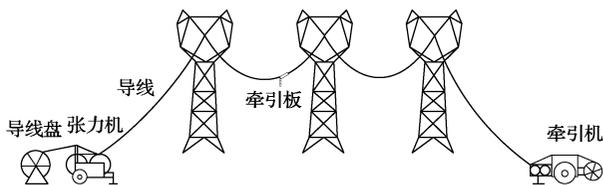


图1 输电线路架线施工现场示意图

### 1.2 现有导线测长设备存在的问题

现有导线测长设备在实际架线施工中应用较少,主要应用于导线生产过程中的长度测量<sup>[13]</sup>。测量方式可分为使用激光测长技术的非接触式测量方式和使用旋转滑轮的接触式测量方式<sup>[14]</sup>。

由于导线多为绞合结构,表面较为粗糙,当使用非接触式的测量方式测量导线长度时,激光器发出的照射光束会在导线表面产生方向不定、光强大小不一的反射光束,以致难以根据收集的反射光进行线长的精确测量<sup>[15]</sup>。并且,非接触式测量方式中所需的光学器件较为精密,成本高昂。因此,导线长度测量通常采用接触式的测量方式研制测长设备。

现有采用接触式测量方式的测长设备依靠导线与滑轮的摩擦位移,带动相连的光电编码器输出脉冲信号,从而完成导线的长度测量<sup>[16]</sup>。但由于现有测长设备多用于导线生产过程中,要想在装配式架线施工中保证测量的稳定准确,不但对数据采集、处理与传输等基础功能提出了更高要求,还对设备能结合施工特点提出了额外的功能需求。这需要对硬件电路进行新的功能设计。其次,考虑到现有对光电编码器输出脉冲信号的处理方法<sup>[17]</sup>,往往需要经过脉冲和时钟信号的计数、角线公式转换与积分换算等多项步骤,从而影响系统的处理速度。这需从软件程序上进行优化设计<sup>[18]</sup>,提高系统的运行效率。最后,考虑到在架线施工和导线展放的过程中,将面临抖动等各种因素的干扰,以及为便于施工的易于携带、布置等需求,这需要对测长设备在内部结构和外形上进行施工适用性设计。

因此,上述满足功能需求的硬件、配套用的软件,以及适用于工程需求的设备结构,这3个问题是解决装配式架线施工中导线长度精确测量的关键。

### 1.3 测长设备的设计思路

在进行测长设备的硬件电路设计时,首先需要考虑数据的采集、处理与传输等基础功能。同时,考虑到架线施工现场往往布置复杂,且多位于野外,因此,应采用无线方式进行数据传输。其次,根据导线展放的特点,还要进行预警提示与画印喷涂控制模块的电路设计,以满足临近阈值时的预警和线长测量好的标记的功能需求。最后,还要进行供电模块的设计,保障整个设备的用电需求。

在进行测长设备的软件程序开发时,首先根据各硬件模块的设计方案,确保其功能的顺利实现与稳定运行。其次,还要对测长程序的方案进行优化设计,简化计算流程,以提高处理速度,并完成程序编写。最后,为确保信息交互的顺利进行,还需完成终端接收设备界面开发和信息交互程序设计。

在进行结构设计时,需要结合装配式架线施工需求进行。如抑制导线抖动所带来的干扰、导线展放达到阈值时的自动画印,以及系列功能子模块如何融为一体等。最后,还需要整体考虑测长设备的外形设计,使其尽量小型化、轻量化,以便于施工中的集成化、便捷化需求。

最终,确定的测长设备设计方案如图2所示。

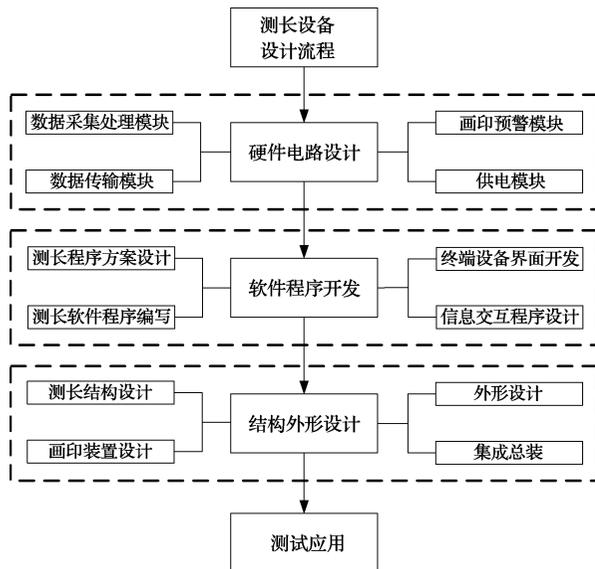


图2 测长设备设计方案

## 2 硬件电路设计

### 2.1 数据采集处理

光电编码器是完成导线长度信息数据采集的关键电子器件。常用的光电编码器主要分为增量式和绝对式两种<sup>[19]</sup>。绝对式光电编码器结构相对复杂、体积大、价格也较为昂贵,而增量式光电编码器构造简单、使用寿命长、信号稳定,且抗干扰能力强。因此,本设备选用增量式光电编码器采集导线的长度信息。

经光电编码器输出的脉冲信号需要进行处理后,才能输出至单片机进行计数。考虑到施工中有时会出现退线的情况,故需进行辨向电路设计,用于分辨编码器的旋转方向,从而进行加减计数。74HC系列芯片兼具了低功耗和高运算性能的特点,因此,选择74HC系列芯片对光电编码器输出的信号进行处理。如图3所示,当编码器正转时,INT3输出方波信号,INT4无输出;当编码器反转,INT3无输出,INT4输出方波信号。

经辨向电路处理后的数据需要由单片机来进行处理。

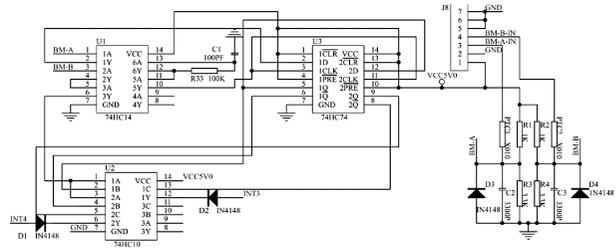


图3 编码器辨向电路

为提高系统性能,可选择两个单片机来进行数据处理工作。其中一个作为系统主控制器,负责数据的接收、处理和输出等工作;另一个作为单独的计数单片机,以保证计数处理速度。此时,为简化电路,可选择无需外部晶振和复位电路STC8G系列单片机。因此,选择STC8G1K08型单片机进行计数,STC8G2K64S4型单片机作为系统的主控单片机。

最后,为了避免数据丢失,还应对数据进行实时存储,因此选择具有接口方便、体积小,数据掉电不丢失等特点的24C02芯片进行数据存储。

综上,由光电编码器、辨向电路、计数单片机STC8G1K08、主控单片机STC8G2K64S4和24C02存储芯片等部分完成导线长度数据的采集处理。

### 2.2 无线数据传输

考虑到架线施工场所多在野外,环境恶劣干扰因素多,且单次施工段距离可达3 km以上<sup>[20]</sup>,这就使得4G、5G等基于电信公司广域网无线技术的传输方式信号质量难以保证,因此考虑设置局域网进行信号传输。目前技术比较成熟的局域网无线传输方式主要有蓝牙、WiFi、ZigBee和LoRa等,其主要参考指标如表1所示<sup>[21]</sup>。

表1 无线传输方式特性

| 传输方式   | 穿透性 | 传输速度     | 传输距离/m |
|--------|-----|----------|--------|
| 蓝牙     | 差   | 1 Mb/s   | 10     |
| WiFi   | 差   | 1 Gb/s   | 10~20  |
| ZigBee | 一般  | 100 Kb/s | 200    |
| LoRa   | 强   | 60 Kb/s  | 10 000 |

蓝牙、WiFi技术的传输距离均在20 m以内,且穿越障碍物的能力一般。ZigBee技术的传输距离在200 m左右。考虑到单次施工段的距离通常达千米级别,因此,以上3种方式均不适合场地大、遮挡物较多的架线施工现场。

LoRa技术具有多条传输信道<sup>[22]</sup>,传输距离可达10 km以上,具有较强的抗干扰性和无线穿透能力,可以满足工程需要。同时,对于监测数据仅为几个字节的展放导线长度信息来说,LoRa技术的传输速度已完全足够。因此,可选择便于集成、基于LoRa技术的M-HL10模组进行导线长度数据的无线传输。

### 2.3 预警提示与画印控制

在传统装配式架线施工方式中,通过观测弧垂进行线长调整后,要对确定的导线位置进行画印。这就对测长设备提出了能够对展放中的导线进行画印标记的功能需求。

为确保画印准确,当导线的展放长度达到相应的设定阈值时,测长设备应能够提前进行预警。因此,可采取由主控单片机通过驱动电路来控制蜂鸣器报警的方式,实现预警提示功能。预警模块可选择经常作为音频放大器的三极管 S8550 作为驱动,控制蜂鸣器报警。此外,为使导线实时的展放长度信息可以及时显示,应单独配置一个单片机用于液晶屏幕的显示控制。为便于硬件设计,可选择与主控制器同型号的 STC8G2K64S4 型单片机进行驱动控制。

根据装配式架线施工中导线展放的特点,可在测长设备上加装喷漆装置,以完成画印工作。为尽可能避免对导线长度测量的干扰,在进行喷漆装置的设计时,喷漆口应具备自动伸缩功能。这就需要有一个可控的伸缩构件,当测得数据接近设定的画印阈值时,可控制喷漆口伸出,为画印工作做准备。伸缩构件需要由电机来驱动控制,而单片机在控制电机时,需要先对输出的电压信号进行升压后才能驱动电机。电平转换器 TXS0104EPWR 无需电源排序

和方向控制信号,当接收到主控单片机的电压信号后可直接进行斜坡升压,响应速度快、简单高效,故选择 TXS0104EPWR 电平转换器进行电压转换。

当被测导线长度达到画印阈值时,需要一个驱动电路控制喷漆泵进行画印喷漆。考虑到集成电路芯片 YX-2530AM 具有抗干扰性能好、待机电流小、输出内阻低等功能优点,因此选择 YX-2530AM 芯片来控制喷漆泵完成画印喷涂工作。

### 2.4 供电模块与集成

为增加设备的使用的便捷性,选用 12.6 V 可拆卸锂电池组作为系统电源为整个设备进行供电。为降低功耗,STC8G 型单片机、24C02 存储芯片及 M-HL10 无线传输模组等采用 3.3 V 工作电压。而辨向电路的性能关系到测量精度,应采用 5 V 工作电压。由于喷漆泵工作时的性能要求高,YX-2530AM 应采用 12 V 工作电压,而性能要求不高的伸缩构件,使用 5 V 工作电压即可。同时,结合以上方案选择 NB680GD、SX1308 等电平转换器进行电压转换。

上述设计方案确定后,对以上模块进行集成化组装,从而完成整个测长设备的硬件结构设计。测长设备的硬件结构如图 4 所示。

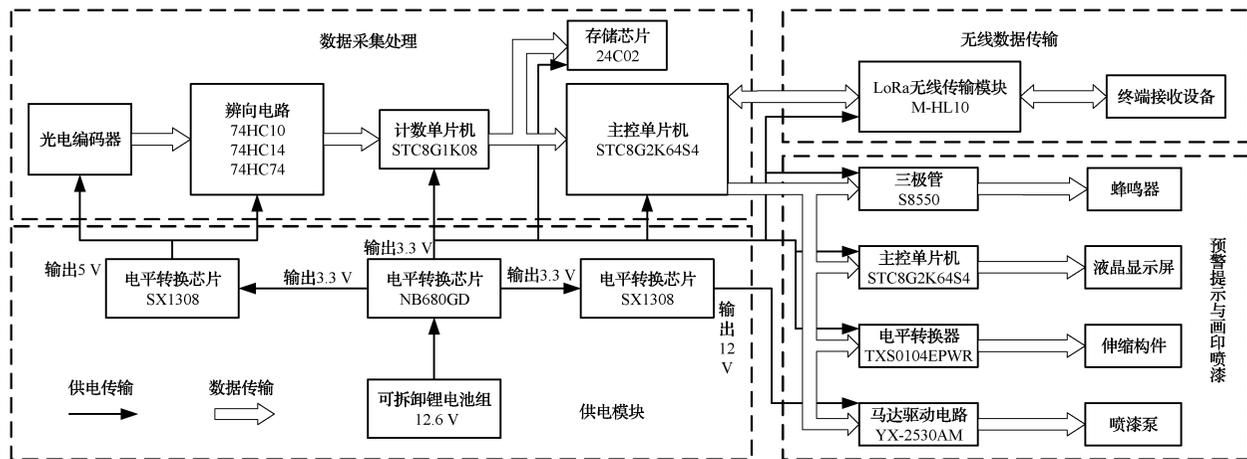


图 4 测长设备硬件结构

## 3 软件程序设计

### 3.1 测长设备软件程序设计

在完成设备的硬件电路设计后,还需要通过软件程序来驱动控制测长设备实现导线长度测量、数据传输显示和预警画印等功能。软件程序设计主要针对测长设备和终端设备两部分。其中,导线的长度测量主要通过软件程序对测长设备采集到的脉冲信号进行处理来实现。

针对测长设备的软件程序设计而言,要实现导线长度的精确测量,首先要实现采集信号快速处理。考虑到在测长设备的应用过程中,已展放导线的长度是最主要的指标,而导线的展放速度并不是主要考虑因素。因此,在进

行数据处理程序设计时,应舍去不必要的求解步骤,以简化计算流程。根据光电编码器输出脉冲信号个数与测量滑轮周长之间的关系,直接求得导线已展放长度。设测量滑轮的周长为  $S$ ,编码器每旋转一周输出的脉冲信号个数为  $N$ ,主控单片的脉冲信号计数为  $m$ 。此时,导线的展放长度  $L$  可表示为  $L = mS/N$ 。在选取编程语言进行程序编写时,应采用稳定可靠、占用内存小的汇编语言。最后,各模块之间应采用高速、稳定的串口方式进行通信。以确保数据采集和输出的快速与稳定。

### 3.2 终端设备软件程序设计

测长设备将处理后的数据进行无线传输后,需要一个终端设备对导线长度信息进行显示。与此同时,又考虑到

终端设备和测长设备之间需通过信息交互,相互配合共同完成预警、画印等功能的控制。因此,还要进行终端设备的软件程序设计与界面开发。

现行终端设备大多以手持式电子设备为载体,操作方便、易于携带。为更好贴合装配式架线施工的独有工况,还要对终端设备的显示界面进行设计。为便于进行窗口设计,可采用成熟稳定的可视化编程语言(VB)进行编程。手持终端及界面如图5所示。



图5 手持终端及界面设计

终端设备除了可显示导线展放长度信息的功能外,还具备能与测长设备进行信息交互和预警提示等功能。为确保导线长度信息的及时更新,设定每10ms传输一次导线长度数据。手持终端和测长设备之间通过无线传输方式进行信息交互,测长设备将测得的导线长度数据传输给终端设备,并进行实时显示。当已展放导线长度数据达到设定阈值后,终端设备会进行预警提示,并返回相关控制指令,从而驱动控制测长设备的相关装置按照设定程序完成画印工作。软件主程序流程如图6所示。

#### 4 测长设备的设计制造与工程应用

##### 4.1 结构设计

为实现导线的精确测量和完成测量后的画印标记,应结合装配式架线施工的实际工况和导线展放的特点对测长单元和画印单元的结构进行合理设计。

如图7所示,测长单元的主要结构由6个金属滑轮及其配套零部件组成。其中,滑轮A、B、C采用带凹槽的设计以卡紧导线;测量滑轮内侧与光电编码器相连,当导线穿过测长设备时,带动测量滑轮和光电编码器旋转,实现导线长度数据的采集。

另外,为避免滑轮与导线之间出现打滑或卡死的情况,需要对滑轮C和测量滑轮进行伸缩装置设计。滑轮C的底部与一个金属杆连接,金属杆在弹簧弹力的作用下给滑轮C施加一个向上的推力。与此同时,测量滑轮的内侧衔接一个小弹力弹簧,给其施加向下的拉力。滑轮C和测量滑轮在弹力作用下,既能保证与导线的紧密接触,又可防止因受力过大而出现卡死情况,实现导线长度的精确

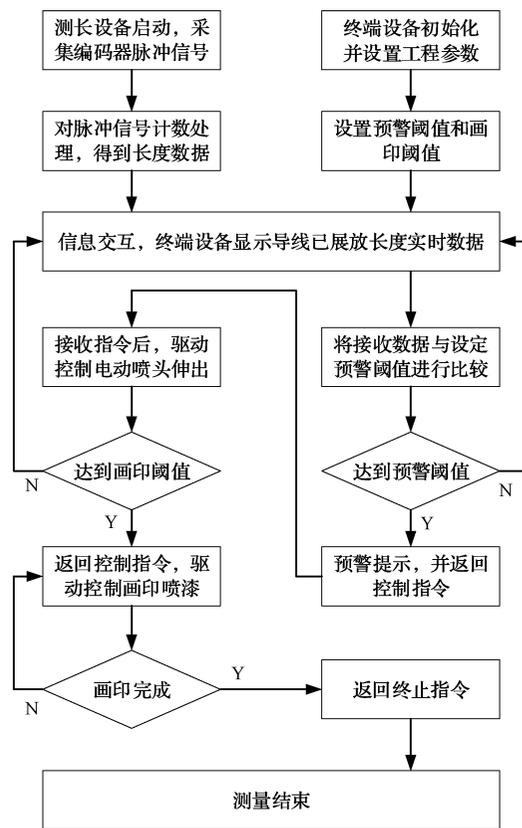


图6 主程序流程

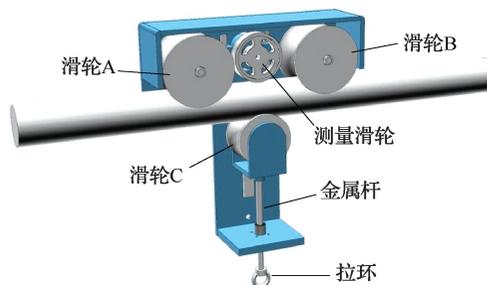


图7 测长单元结构

测量。

画印单元主要由电动控制的喷漆口和漆料存储装置组成。为避免画印后的漆料被滑轮摩擦而导致印记混乱,喷漆口应安装在测长设备的出线口处。同时,加装一个伸缩构件,在画印时驱动控制喷漆口向外伸缩,以避免漆料沾染在设备上。漆料存储装置设计在测长设备的底部,漆料存储装置与喷漆口之间通过橡胶软管相连。

##### 4.2 产品制造

考虑到装配式架线施工现场往往布置复杂,这要求测长设备应具备小型化轻型化的特点。同时,由于在导线展放过程中不可避免地出现抖动等情况,这要求设备的内部材料具备一定的强度。此外,为避免施工现场的恶劣环境影响,这要求设备材料还应具备耐腐蚀等特点。因此,可

选择铝合金作为测长设备的内部材料,以便于携带和施工现场的安装使用。

最后,为保护测长设备的内部结构,避免作业人员直接接触测长设备的铝合金部分,选择具有绝缘性能的聚碳酸酯作为外壳对内部结构进行外形包装。

制造完成的测长设备实物及尺寸参数如图8所示。其中选择的测量滑轮周长为20 cm,光电编码器每旋转一周输出的脉冲数为200个。

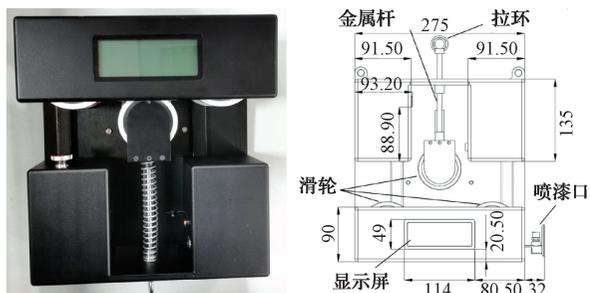


图8 测长设备实物及尺寸参数

### 4.3 工程应用

研制的测长设备于2022年9月25日在点郭线220 kV线路工程项目中成功应用。因#83、#84塔位于高速公路两侧,该档线路跨越高速公路,故将其选为观测档。工程概况如表2所示。

表2 #83~#86塔各档工程参数 (m)

| 编号      | 档距  | 高差    | 观测档架线弧垂 | 计算线长    |
|---------|-----|-------|---------|---------|
| #83—#84 | 475 | 11.10 | 15.98   | 476.496 |
| #84—#85 | 173 | 6.06  | —       | 173.175 |
| #85—#86 | 429 | 3.57  | —       | 430.003 |

根据表2的工程参数进行计算,得出每档应展放的导线长度,并在手持终端上设置相关阈值。测长设备将测得的导线实时展放长度信息传输至手持终端进行信息交互。当导线展放长度达到设定阈值时,手持终端成功进行了预警提示。作业人员通过手持终端成功控制测长设备完成了喷头伸缩和画印标记等功能。测长设备的现场应用情况如图9所示。

如表3所示,根据工程经验,应用本设备进行架线施工相较于传统的方法省去了架线过程中的弧垂观测和反复的松线紧线环节,施工效率提高约30%。

按照测长设备测得的线长架线完成后,对观测档进行弧垂观测,测得的观测档弧垂为16.71 m,同设计值的偏差为4.57%,符合该工程-2.5%~+5%的允许偏差范围。经分析产生误差的主要原因为作业人员在导线和绝缘子串等进行压接作业时,未完全按照画印标记点进行压接,且连接处的长度存在考虑不充分的问题,从而导致导线的长度出现了一定偏差。



图9 测长单元结构

表3 架线施工耗时对比 (min)

| 施工步骤 | 传统架线方法耗时 | 应用测长设备耗时 | 节省时间 |
|------|----------|----------|------|
| 展放导线 | 40       | 37       | 3    |
| 松线紧线 | 30       | 0        | 30   |
| 挂线压接 | 50       | 45       | 5    |
| 总用时  | 120      | 82       | 38   |

### 5 结论

本文考虑了装配式架线施工中导线长度测量所存在的主要问题和功能需求,设计了一种能在施工中实时测量导线长度的测长设备。并从硬件电路设计、软件程序与界面开发和机械结构设计等方面进行了详细的设计说明。研制的测长设备在点郭线220 kV线路工程中成功应用,施工效率较传统架线施工方法提高了30%,观测档弧垂同设计值的偏差为4.57%,符合该工程设计要求。实际工程应用表明,研制的测长设备能够满足装配式架线施工要求,同时也为设备的后续改进积累了工程应用经验。

#### 参考文献

- [1] 丁自强,戚柏林,姚耀明,等.连续耐张段装配式架线的工程实践[J].电力建设,2012,33(10):98-101.
- [2] LIU Y, WANG B L, ZHENG X D, et al. Fault location algorithm for non-homogeneous transmission lines considering line asymmetry [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(5): 2425-2437.
- [3] 李凌梅,张欣,常颖,等.浅析线缆计米器的检定[J].国外电子测量技术,2020,39(6):144-147.
- [4] 刘杰坤,马修水,马颢.激光多普勒测振仪研究综述[J].激光杂志,2014,35(12):1-5.

- [5] 徐伟,王珩,苏明. 钢丝绳激光测长方法研究[J]. 激光杂志,2015,36(8):67-71.
- [6] 张宁. 线缆计米器的检定方法及误差分析[J]. 计量与测试技术,2017,44(5):105-106.
- [7] 黄双得,曾小洋,杨学军,等. 一种输电线路导线长度测量及定位装置研制应用[J]. 云南电力技术,2021,49(6):90-92.
- [8] NIESCH J B, RAMBOUSK R, TKACHENKO S. Introduction of reflection and transmission coefficients for nonuniform radiating transmission lines[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2020, 57(6): 1705-1713.
- [9] 金伟清,李郁,刘笃喜. 一种卷绕系统大行程精密自动测量计米方法[J]. 传感技术学报,2021,34(8):1062-1068.
- [10] 贾兴丹,万秋华,赵长海,等. 光电编码器测速方法现状与展望[J]. 仪表技术与传感器,2018(3):102-107.
- [11] 景维立. 三维激光扫描技术在装配式架线施工中的应用[J]. 测绘通报,2018(6):153-155.
- [12] 秦剑,刘晨,齐志强,等. 基于悬链线法的张力放线连续过程计算方法及工程试验[J]. 南方电网技术,2021,15(6):36-42.
- [13] CHEN G H, WANG X, WANG J Q, et al. Damage investigation of the aged aluminium cable steel reinforced conductors in a high-voltage transmission line[J]. Engineering Failure Analysis, 2012,19(1):13-21.
- [14] 白金成,孙长库,王鹏,等. 电缆激光多普勒在线计米系统研究[J]. 红外与激光工程,2018,47(7):65-72.
- [15] SAURABH, RANJAN R, KUNDU C, et al. Real time online profile measurement system for steel wire products [J]. Diagnostyka,2019,20(4):27-35.
- [16] 齐皇仲,黄伟城. 对滚轮式计米器示值误差测量方法的探讨[J]. 中国测试,2020,46(S1):59-63.
- [17] 于晓升,许茗,王莹,等. 基于卷积变分自编码器的异常事件检测方法[J]. 仪器仪表学报,2021,42(5):151-158.
- [18] 姚佳奇,唐波,刘子怡. 基于改进 K-means 聚类算法的海外欠发达城市配电网规划[J]. 电子测量技术,2021,44(23):54-60.
- [19] 石硕,王瑞雪,李慧,韩昌彩. LDPC 码的多路并行编码器实现[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(7):83-89.
- [20] 牛晓刚. 无人动力伞在电网工程输电线路架线施工的应用研究[J]. 电网与清洁能源,2021,37(10):45-50.
- [21] 黄明祥,唐波,李枫航. 悬浮抱杆组塔无线监测系统的设计与应用[J]. 机械设计与制造,2022(7):206-212.
- [22] 李瑞,范玉刚,张光辉. 基于 LoRa 基站的滚动轴承运行状态远程监测系统设计[J]. 电子测量技术,2021,44(17):65-70.

## 作者简介

李恒博,硕士研究生,主要研究方向为输电线路工程及其新技术应用。

E-mail:lihengbo@ctgu.edu.cn

唐波,博士,教授,主要研究方向为超特高压输电技术与输变电工程电磁环境等。

E-mail:tangboemail@sina.com