

## 防内悬浮内拉线抱杆倾倒的监控系统研制\*

黄明祥

(国网福建省电力有限公司建设分公司, 福建 福州 350012)

**摘要:** 内悬浮内拉线抱杆组塔工艺容易因倾角和拉力超限导致抱杆倾倒事故, 利用物联网技术研制一套抱杆倾角和拉线拉力监测系统, 以提高抱杆的可靠性。以两轴倾角和应力传感器感知抱杆倾角和拉线拉力, 由 ZigBee 无线网络将数据传输至现场监测系统中, 并通过 5G 网络将现场数据传输到省公司安监系统。该系统可实时掌握抱杆和拉线状态, 提高内悬浮内拉线施工安全性和效率。

**关键词:** 内悬浮内拉线; 抱杆; 监测系统; 状态信息; 安全性

中图分类号: TN02

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.191324

中文引用格式: 黄明祥. 防内悬浮内拉线抱杆倾倒的监控系统研制[J]. 电子技术应用, 2020, 46(8): 117-120, 125.

英文引用格式: Huang Mingxiang. Anti-dumping system design of force and dip angle for ISIB[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(8): 117-120, 125.

### Anti-dumping system design of force and dip angle for ISIB

Huang Mingxiang

(State Grid Fujian Electric Power Co., LTD., Construction Branch, Fuzhou 350012, China)

**Abstract:** Since the angle and the force of the derrick are easy to exceed the threshold, inner suspension & inner backstay (ISIB) for power tower always result in fall. Here, the monitoring system of the angle and force is designed by interned of things to improve the ISIB safety, including perception layer of angle and stress by  $x$ - $y$  axis tilt angle sensor and stress sensor, ZigBee wireless network to sending the datum to local monitoring system, and 5G network to send monitoring datum from monitoring system to provincial safety monitoring system. This system can check the dip angle of the derrick and the force in real time, to improve the production safety and efficiency of ISIB.

**Key words:** inner suspension & inner backstay; derrick; monitoring system; state information; safety

#### 0 引言

内悬浮拉线抱杆组塔施工方法在电力铁塔建设中得到了广泛应用, 具有结构简单且经济实用等优点, 在山区环境中优势更明显<sup>[1]</sup>。铁塔高度一般为几十米且呈梯形状, 铁塔高度越高导致拉线角度越小, 就增大了高空组塔难度, 容易造成抱杆倾倒意外。例如 2017 年, 某施工单位在某  $\pm 500$  kV 直流输电铁塔组立过程中, 因拉线突然塑性变形, 致使抱杆倾倒, 造成了人员伤亡。为提高内悬浮拉线技术施工方案的安全性和可靠性, 诸多科研工程人员对此展开了研究<sup>[2-7]</sup>。

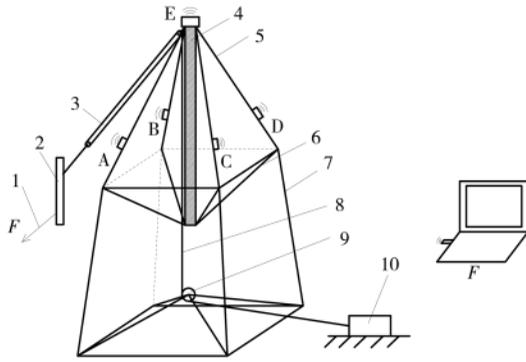
内悬浮内拉线 (Inner Suspension & Inner Backstay, ISIB) 工艺在使用过程中, 对拉线的松紧度调整、抱杆倾角等阈值设置, 依然靠施工人员肉眼观测, 未对关键构件实现实时监测和参数信息化, 无法实时掌握抱杆状态信息<sup>[8]</sup>。本文针对 ISIB 工艺, 引入物联网技术<sup>[9]</sup>, 研制一

套抱杆倾角和拉线拉力实时状态监测系统, 可掌握抱杆状态, 有助于提升 ISIB 工艺的可靠性和安全性, 具有很强工程实际应用价值。该系统在福建某施工工地得到了试用, 在现场施工过程中, 地面指挥人员能够实时掌握 ISIB 工艺的抱杆和拉线的实时状态信息, 方便现场指挥协调, 提高了现场施工的安全性和效率。

#### 1 ISIB 结构分析

ISIB 利用已安装好的铁塔当作支撑架, 来固定抱杆。在抱杆上配上滑车组, 将铁塔构件吊到已装配好的铁塔上部吊装, 其机械结构如图 1 所示。ISIB 主要由控制绳、吊件、滑车组、抱杆、两侧 4 根拉线、4 根承托绳、塔架、牵引绳、转向滑车、机动绞磨等部件组成。吊件布置在铁塔断面中心线位置, 与受力侧拉线的合力  $F$  在同一平面内; 抱杆布置在铁塔正轴心位置, 一部分抱杆插入铁塔里面, 大部分抱杆露在铁塔上面, 抱杆由 8 根钢丝绳牵引直立在铁塔内部, 底部 4 根钢丝绳为承托绳, 顶部 4 根为内拉绳, 抱杆拉线与铁塔断面对角线布置在同一垂

\* 基金项目: 2020 年国网福建省电力有限公司科技项目 (521301200001)



1-控制绳; 2-吊件; 3-滑轮组; 4-抱杆; 5-内拉线; 6-承托绳; 7-塔架; 8-牵引绳; 9-转向滑车; 10-机动绞磨

图1 ISIB 结构图

直平面内。抱杆倾角  $\delta$  和 4 根拉线拉力  $P$  是关键因素, 对这些物理量需要实现实时监测, A、B、C、D 为拉力传感模块, E 为倾角传感模块, 实现现场可视化施工, 提高 ISIB 施工安全性。

## 2 抱杆状态监测物联网系统

### 2.1 数据感知传输模块

将数据感知模块和局部无线传输模块集成为一个节点, 为数据感知传输模块, 如图 2 所示, 主要由传感器、51 单片机、ZigBee、天线等构成。该模块工作原理为单片机发送指令启动传感器采集倾角和拉力数据, 单片机收集到倾角和拉力数据后, 由串口通信将传感器数据传输给 ZigBee 模块, 并启动 ZigBee 将数据发送给现场监测系统。

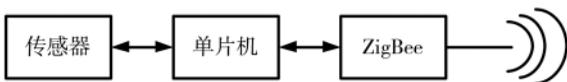


图2 数据感知传输模块

#### 2.1.1 抱杆倾角检测模块设计

采集抱杆在空间任意方向的倾斜角度采用两轴倾角传感器, 型号为 ZCT230M1-LTQ, 是上海直川电子科技有限公司的一款高精度、低功耗的双轴倾角传感器, 在通信铁塔、高压电塔等领域广泛应用。倾角测量范围为  $-30^\circ \sim +30^\circ$ , 分辨率为  $0.01^\circ$ , 满足抱杆倾角测量范围要求。倾角检测模块硬件设计如图 3 所示。倾角传感器采用 RS485 差分信号传输方式, 要使得单片机通过串口接收数据, 需要在传感器与单片机之间连接上 MAX485 接口芯片, 将 RS485 电平转换成单片机可接收的 TTL 电平信号, 而一般的 51 系列单片机只提供一个串口。选择 P1.1 和 P1.0 两个引脚作为输入输出模拟串口, 单片机接收到的数据通过模拟串口传输给局部无线收发模块, 局部无线传输模块采用 ZigBee 无线网络实现局部本地网络层设计, 实现与地面监测系统之间的数据通信。ZigBee 无线收发模块芯片型号为 DL-20, 工作在  $2.4\text{ GHz} \sim 2.45\text{ GHz}$  的公用频道下, 将模块配置在符合

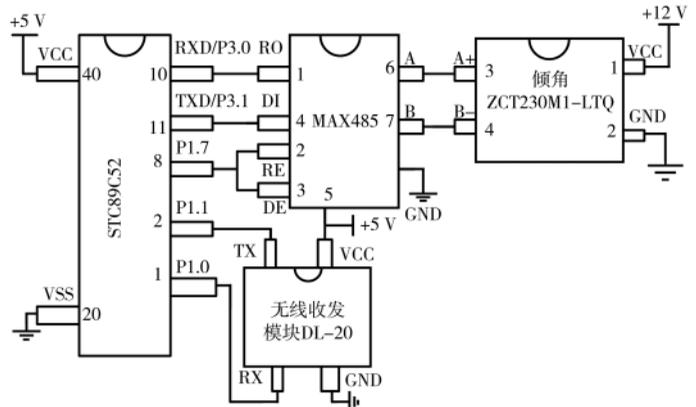


图3 倾角检测模块硬件设计

IEEE.802.15.4 协议的工作信道, 采用广播模式实现多对一传输数据, 无线传输距离可达 300 m, 满足现场施工覆盖区域, 达到高效可靠的数据传输。

倾角检测模块软件设计如图 4 所示。单片机初始化串口, 设置定时器工作方式及初值, 开放中断并设置优先级, 配置串口波特率为 9 600, 传感器启动工作, 单片机按照串口通信协议接收数据并传输给无线收发模块 DL-20, 启动 DL-20 模块, 由模拟串口通信接收数据。

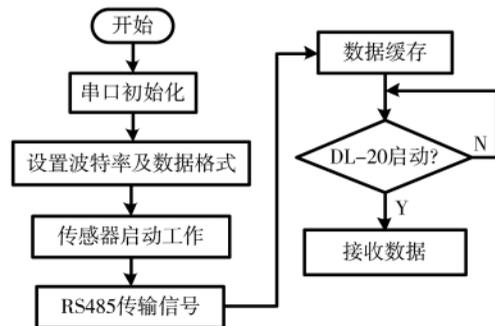


图4 倾角检测模块软件设计

#### 2.1.2 抱杆拉力检测模块设计

拉力检测模块硬件设计如图 5 所示, 采用振弦式钢板应变计, 型号为 VWS-10B。要让应变计启动工作, 需采用扫频激振电路, 通过单片机和 D/A 转换芯片 AD558 产生一锯齿波电压信号, 送入函数加法器 ICL8038, 函数发生器产生相应的标准频率的扫频方波, 通过方波来激励振弦传感器可靠起振。传感器输出的频率信号经放大、衰减、整形及滤波电路后变成一个标准的 TTL 信号, 加在单片机的计数端, 完成频率检测; 温度信号经过 A/D 转换芯片 TLC0832, 通过软件对转换芯片进行通道选择和输入端配置, 用一根线连接到单片机一个准双向口进行控制。由采集到的频率信号和温度信号计算出抱杆拉力, 由无线收发模块完成数据传输。

倾角检测模块软件设计如图 6 所示。单片机开定时器通过 I/O 口输出数字信号, 经 D/A 转换, 启动传感器工作, 输出频率信号和温度信号。获取锯齿波电压信号

# 计算机技术与应用 Computer Technology and Its Applications

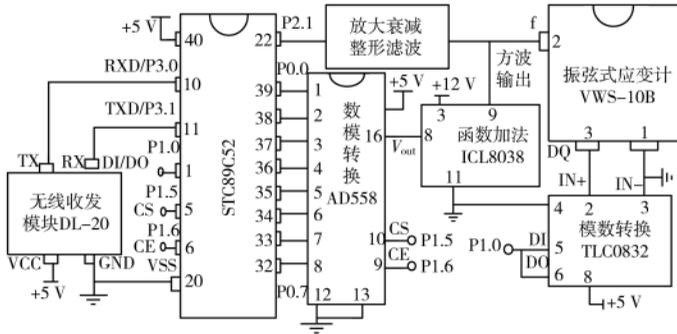


图5 拉力检测模块硬件设计

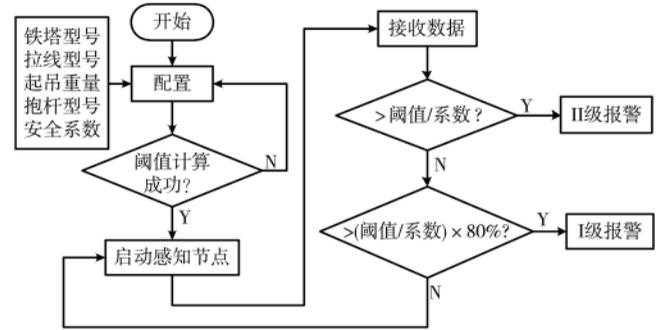


图7 地面监测平台流程

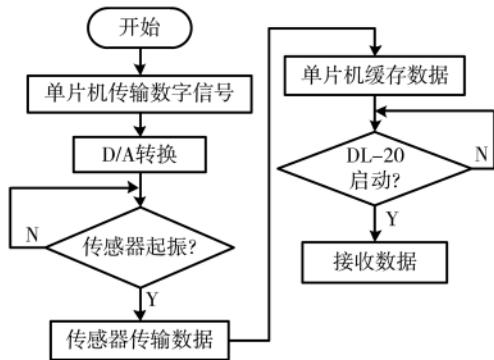


图6 拉力检测模块软件设计

传数据、显示、阈值计算等功能,如图8所示。应用软件中,分别显示A、B、C、D号拉力实时值,以及拉线的水平夹角、抱杆倾角等信息。

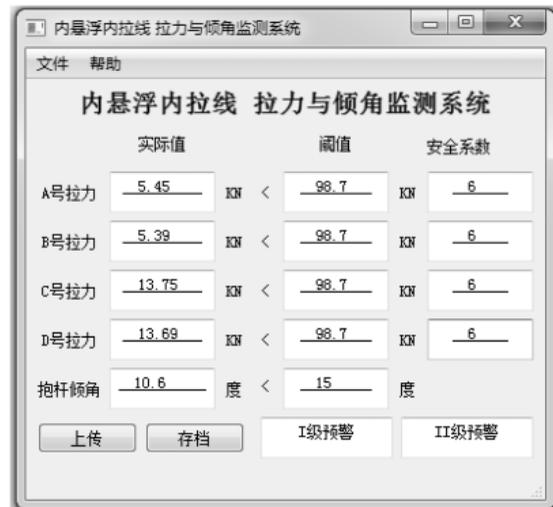


图8 监测软件人机界面

起振传感器是软件设计的主要部分,代码实现如下:

```

unsigned char i;
TMOD = x;
for(i=0;i<=i++;) //形成锯齿波
{
    AD = i; //D/A 转换输出
    delay();
}
    
```

## 2.2 地面监测平台层设计

地面监测平台由一台计算机、ZigBee 无线模块和 5G 网络模块构成平台层,实现无线接收传感器数据,在计算机的数据监测系统软件中显示,并且能够通过 5G 网络将现场施工实时数据传输到省安监中心。地面监测平台层重点是由 VC++ 开发编程开发的现场监测应用软件,运行在计算机 Windows 操作环境中。现场监测应用软件两个关键模块为:(1)监测人机交互界面;(2)拉力和倾角阈值计算分析模块。地面监测平台的工作流程图如图 7 所示。应用软件开始时,先进行铁塔及抱杆参数配置,然后软件自动进行拉力与倾角阈值计算。配置成功后,启动感知节点进行数据采集,当采集的数据大于阈值/安全系数时,系统发出 II 级报警提示;当采集的数据大于(阈值/安全系数)×80%时,系统发出 I 级报警提示;否则,系统进入下一个循环数据采集监测。

### 2.2.1 监测人机交互界面

由 VC++ 语言自主开发了数据监测应用软件,实现 ISIB 拉力与倾角监测系统,包括数据接收、存储数据、上

### 2.2.2 拉力与倾角阈值计算分析

对图 1 所示立体图的吊件与受力侧拉线合力所形成的平面进行受力分析。控制绳拉力为  $F$ ,其水平夹角为  $\omega$ ;起吊绳拉力为  $T$ ,其竖直夹角为  $\beta$ ;受力侧拉线合力为  $P_1$ ,其水平夹角为  $\alpha_1$ ;承托绳可调整各绳受力,使抱杆底部位置保持不变,右侧承托绳拉力合力为  $S_1$ ,左侧承受绳拉力合力为  $S_2$ ,其竖直夹角均为  $\phi$ ;牵引绳拉力为  $T_C$ ;抱杆重力为  $G_1$ ,垂直倾角为  $\delta$ ;吊件重力为  $G$ 。在已知吊件重力  $G$  条件下,分别吊件和抱杆进行受力分析。

(1)以吊件为受力研究对象,控制绳和起吊绳挂点以及吊件尺寸如图 9 所示。

保持吊件垂直时,控制绳静拉力  $F$  为:

$$F = \frac{\sin\beta}{\cos(\omega+\beta)} G \quad (1)$$

式中: $\omega$  为水平角度, $\beta$  为滑车组拉线垂直夹角。

当吊件保持垂直时,控制绳水平夹角为  $\omega$ ,则求得  $\beta$  为:

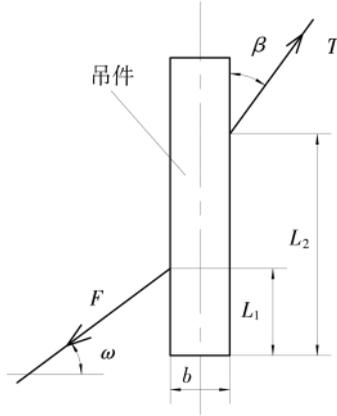


图9 吊件挂点尺寸图

$$\beta = \arctan\left(\frac{b \sin 2\omega}{2L_2 \sin \omega - 2b - 4L_1 \sin \omega + 2b \cos \omega}\right) \quad (2)$$

式中： $L_1$  为控制绳离吊件底部距离， $L_2$  为起吊绳离吊件底端距离， $b$  为吊件宽度。

起吊滑车组所受拉力  $T$  为：

$$T = \frac{\cos \omega}{\cos(\omega + \beta)} G \quad (3)$$

牵引绳所受张力  $T_C$  为：

$$T_C = \frac{\cos \omega}{\cos(\omega + \beta) \cdot \eta_\Sigma} G \quad (4)$$

式中： $\eta_\Sigma$  为滑轮组综合效率系数， $\eta_\Sigma = \eta^n \cdot n$ ； $n$  为有效受力绳的股数； $\eta$  为单滑轮的效率系数，对于青铜轮套，取值 0.971。

(2) 以抱杆为研究对象，由图 10 抱杆和起吊绳所在的平面对抱杆受力分析，抱杆受力如图 10 所示， $G_1$  为抱杆重力。

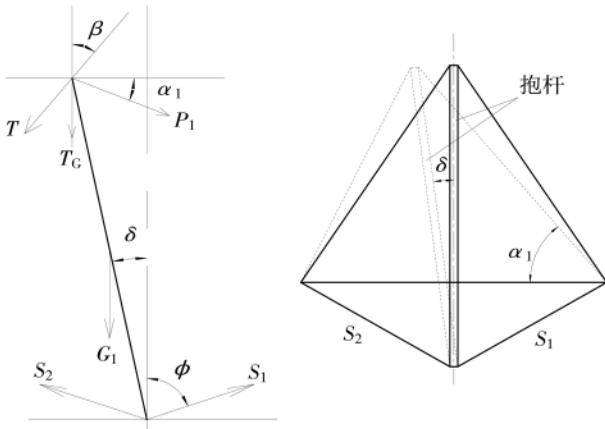


图10 抱杆受力分析图

当抱杆倾斜  $\delta$  角度后，处于平衡状态，其横向、纵向受力平衡，对杆上任意一点的转矩也处平衡状态。以抱杆底部为支点，根据力矩平衡方程得到受力侧绳子所受合力  $P_1$  为：

$$P_1 = \frac{2T \sin(\beta + \delta) + (2T_C + G_1) \sin \delta}{2 \cos(\alpha_1 + \delta)} \quad (5)$$

假设  $P_1$  为受力侧两根拉线拉力  $P$  均匀合力，且  $P$  与  $P_1$  之间的夹角为  $\theta$ ，则受力侧单根绳所受拉力  $P$  为：

$$P = \frac{2T \sin(\beta + \delta) + (2T_C + G_1) \sin \delta}{4 \cos \theta \cos(\alpha_1 + \delta)} \quad (6)$$

式中： $\theta$ 、 $\alpha_1$  可由  $\delta$  表示。

当抱杆垂直时，即  $\delta = 0$ ，则  $P_1 = T \sin \beta / \cos \alpha_1$ ， $P = T \sin \beta / (2 \cos \theta \cos \alpha_1)$ 。虽然  $P_1$  和  $P$  减小了，但抱杆垂直时，吊件难以保持垂直上升且容易刮碰铁塔底部。当抱杆向吊件方向倾斜角度为  $\delta$ ，抱杆长度为  $L$ ，且抱杆露出已组塔段的长度与插入已组塔段上平面的长度的比例为  $a/d$ ，铁塔截面边长为  $l$ ，如图 10 所示，则式(6)中的  $\theta$  和  $\alpha_1$  分别为：

$$\alpha_1 = \arccos\left(\frac{l + 2L \sin \delta}{2C}\right) \quad (7)$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{2C}{\sqrt{4C^2 + l^2}}\right) \quad (8)$$

式中：

$C =$

$$\sqrt{\left(\frac{Ld \tan \delta}{a+d} + \frac{l}{2}\right)^2 + \left(L - \frac{Ld}{(a+d) \cos \delta}\right)^2 + 2L\left(\frac{Ld \tan \delta}{a+d} + \frac{l}{2}\right)\left(L - \frac{Ld}{(a+d) \cos \delta}\right) \sin \delta} \quad (9)$$

由式(5)和式(6)可看出， $P_1$  和  $P$  与吊件产生的拉力  $T$  与牵引力  $T_C$ ，以及抱杆自重有关系，也与抱杆倾角  $\delta$  和抱杆露出与插入铁塔比值有关系。由于在吊装过程中倾角会因受力不同而改变，当优化好抱杆露出与插入比值后，需要对抱杆倾角和拉线拉力进行实时监测，全过程掌握倾角与拉力状态信息，确保施工安全性。

### 2.2.3 远程 5G 通信

该地面监测平台系统可由 5G 通信将现场施工实时数据上传到省电力公司基建管理信息系统和信息平台。省电力公司基建管理部门、省公司级单位和建设管理单位可利用该平台展开实时动态作业监督。

## 3 案例分析与验证

福建某公司在建 220 kV 线路工程中，铁塔类型为 2222J1，总高度为 83 m，共分为 13 段，第 1 段~第 4 段为塔顶的横担部分，第 5 段~第 13 段为其塔身部分，序号 1~13 从顶依次往下递增。采用 ISIB 工艺对铁塔进行组塔施工，抱杆规格为 300 mm×300 mm×16 m，即  $L=16$  m，其重量  $G_1=5.97$  kN；抱杆承托钢丝绳规格为  $\Phi 22 \times 18$  m；受力侧拉线钢丝绳规格为  $\Phi 13 \times 25$  m，许用拉力  $P_s=98.7$  kN；吊件重量  $G=14.7$  kN；控制绳与水平夹角  $\omega=45^\circ$ ；起吊绳拉线竖直夹角  $\beta=10^\circ$ 。

### 3.1 拉力与倾角关系仿真分析

对第 10~第 13 段铁塔组塔时（铁塔边长分别为  $l_{10}=7.88$  m， $l_{11}=10.02$  m， $l_{12}=11.8$  m 和  $l_{13}=11.56$  m），拉力与倾角关系采用 MATLAB 仿真分析。当比值  $a/d=7/3$  时，

(下转第 125 页)

# 嵌入式技术 Embedded Technology

西南交通大学, 2011.

[6] 朱超. 基于 FPGA 的 SDI 视频格式转化系统设计[D]. 长春: 中国科学院研究生院, 2010.

(收稿日期: 2020-04-10)

作者简介:

钱宏文(1975-), 男, 本科, 研究员级高级工程师, 主要

研究方向: 集成电路应用和微系统领域设计。

王毅(1991-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 图像处理、DSP 和 FPGA 应用等方面的数字硬件开发与研究。

刘会(1988-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 视频分析、图像处理等相关方面的 FPGA 软件开发与设计。

(上接第 120 页)

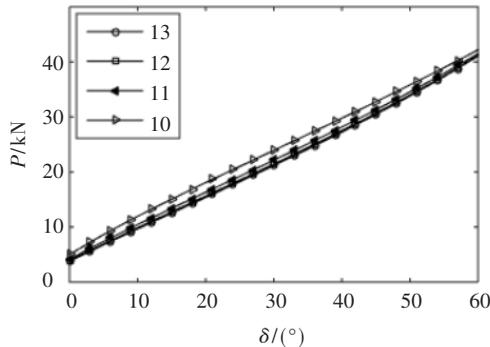


图 11  $a/d=7/3$  时, 拉力  $P$  与倾角  $\delta$  的关系

第 10~13 段组塔抱杆  $\delta$  对  $P$  影响如图 11 所示,  $P$  随  $\delta$  增大而增加; 铁塔越高时,  $P/\delta$  斜率与预应力将越大; 当  $\delta < 15^\circ$  时, 拉力  $P < 20$  kN。第 12 段, 当  $a/d$  分别为 16/0, 15/1, 7/1, 13/3, 7/3 时,  $\delta$  对  $P$  影响如图 12 所示, 比值  $a/d$  越大,  $\delta$  对  $P$  影响越大, 即  $P/\delta$  斜率极剧增大; 当  $a/d=7/3$  时,  $P/\delta$  斜率小且线性度好。因此, 选取  $\delta < 15^\circ$  和  $a/d=7/3$  时,  $P/\delta$  斜率较小。第 10~13 段的拉线拉力  $P < 20$  kN, 拉绳许用拉力为  $P_s=98.7$  kN, 则安全系数  $k=P_s/P \approx 5$ , 可保证使用安全性。

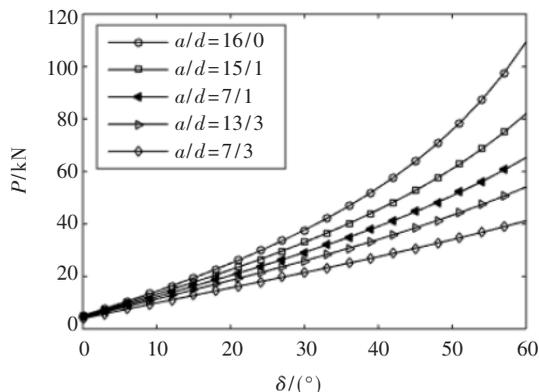


图 12  $a/d=16/0, 15/1, 7/1, 13/3, 7/3$  时,  $P$  与  $\delta$  的关系

### 3.2 拉力与倾角监测系统应用

以第 12 段组塔为例, 当期望抱杆  $\delta=10^\circ$  和  $a/d=7/3$  时, 吊件重量  $G=14.7$  kN, 由式(1)、式(3)、式(4)和式(6)分别得到控制绳静张力  $F=4.45$  kN, 起吊绳拉力  $T=$

18.12 kN, 牵引绳张力  $T_c=9.61$  kN, 受力侧单根绳所受拉力  $P=13.27$  kN, 实际安全系数  $k=7$ , 完全满足设计要求。在图 8 中的应用监测平台软件中, 设置倾角阈值  $\delta=15^\circ$ , 拉线许用应力为 98.7 kN。在界面中实时显示 4 根拉线拉力值和倾角角度。拉绳拉力, 受力侧为 13.75 kN 和 13.69 kN; 非受力侧为 5.45 kN 和 5.39 kN; 倾角为  $10.6^\circ$ 。拉力与倾角监测值与设计值非常接近, 满足工程需求。

### 4 结论

本文针对传统的 ISIB 抱杆系统进行信息化智能化改造, 基于物联网技术设计一套无线传输的抱杆倾角与拉力实时监测系统, 以提升 ISIB 施工工艺的安全性。该系统已在福建某线路工地试用, 工程应用结果表明在确定了倾角和拉力的优化阈值后, 使用该系统可实时掌握倾角与拉力状态, 可更直观地指导 ISIB 施工工艺的抱杆调节设置, 提升该施工工艺的可靠性与效率。

### 参考文献

- [1] 赵世兴, 李新民, 张存有. 750kV 送电线路铁塔内悬浮外拉线抱杆施工工艺与控制[J]. 中国电力, 2009, 42(6): 89-91.
- [2] 张珂, 周焕林, 徐金城, 等. 某内悬浮外拉线抱杆倾角角度的安全性分析[J]. 特种结构, 2015, 32(4): 44-47.
- [3] 王光祥, 吴开贤, 景文川, 等. 内悬浮抱杆的优化设计[J]. 四川电力技术, 2010, 33(4): 46-47.
- [4] 孙云, 陈宏学. 抱杆的受力计算研究[J]. 湖北电力, 2009, 33(6): 27-29.
- [5] 汪瑞, 周焕林, 秦大燕, 等. 扣塔组立用抱杆的非线性有限元分析[J]. 钢结构, 2012, 27(6): 54-57.
- [6] 丁仕洪, 周焕林, 叶建云, 等. 某大跨越高塔抱杆的非线性有限元静力分析[J]. 特种结构, 2011, 28(3): 46-49.
- [7] 李庆林, 莫衍毅, 褚玉杰. 内悬浮内(外)拉线抱杆分解组塔索具受力计算的通用图表法[J]. 电力建设, 2013, 34(10): 124-128.
- [8] 张姍, 刘笑凯, 王超, 等. 基于国产化平台监控软件的设计与实现[J]. 电子技术应用, 2018, 44(10): 140-143.
- [9] 邱欢, 乔坤. 基于物联网系统的 NOMA 与 SWIFT 结合的研究[J]. 电子技术应用, 2018, 44(9): 17-21.

(收稿日期: 2019-12-04)

作者简介:

黄明祥(1971-), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向: 电网智能化建设策略与方法。

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所