

DOI: 10.7667/PSPC171399

一种铁路电气化区段电力电缆头的监测保护装置

刘家军¹, 刘创¹, 韩斌², 杜智亮¹, 苑正阳¹

(1. 西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安铁路局安康供电段, 陕西 安康 725200)

摘要: 针对近年铁路电气化区段电缆头烧毁事故频发的情况, 分析了引起铁路电气化区段电缆头烧毁的原因, 设计了以 PTC 热敏电阻为核心的电缆头过流保护装置和电缆头运行状态在线监测装置。PTC 过流保护装置和护层过压保护器配合, 防止电缆因护层中电流过大而急剧升温甚至烧毁或出现暂态过电压发生击穿。同时, 多参数实时在线监测电缆头的运行状态, 供工作人员及时准确判断电缆头状况, 做到提前预警、调整电缆负荷和合理制定电缆头检修计划。该监测装置已在襄渝线挂网使用, 运行效果良好。

关键词: 地回流; 电缆头烧毁; PTC 保护; 监测装置

A monitoring and protection device of power cable joints for the railway electrified section

LIU Jiajun¹, LIU Chuang¹, HAN Bin², DU Zhiliang¹, YUAN Zhengyang¹

(1. Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
2. The Power-feed Section of Ankang, Xi'an Railway Administration, Ankang 725200, China)

Abstract: This paper analyzes the cause of cable-joint burning in railway electrified section considering frequent fire accidents in this section in recent years, followed by the design of a cable-joint online monitoring device for the running state and an overcurrent protection device, with PTC thermistor as the core. PTC overcurrent protection device can cooperate with the sheath-overpressure protector to prevent cables from heating rapidly even burning out by excessive current and from a transient overvoltage breakdown. Meanwhile, the cable-joint online monitoring device can monitor the running state online in real-time based on multi-parameter, thus enabling the staff to accurately evaluate cable-joint condition, make timely warning, adjust the cable load, and rationally develop the cable head maintenance plan. The monitoring device has been applied in the Xiangyu-Line, and it works well.

This work is supported by Science and Technology Program of Xi'an (No. 2017080CG/RC043 (XALG026)).

Key words: feedback current through ground; cable-joint burned out; PTC protection; detection devices

0 引言

近年来, 随着电力电缆制造工艺的提高, 满足铁路施工建设要求的电力电缆在铁路建造中获得了广泛的应用, 特别是 10 kV 电力贯通线中电力电缆的使用比例不断增加^[1]。由于铁路运行环境复杂、地回流过大、电缆的分布电容远大于架空线路, 其对地电容电流增大等原因, 铁路沿线的电力电缆频繁发生故障, 且在实际运行中发现电缆故障 90% 以上都发生在电缆头处^[2]。所以, 分析电缆头事故的成因, 有效地防止电缆头发生故障, 对铁路沿线负

荷的正常供电和行车安全具有重要意义。

目前, 我国对于 10 kV 电力贯通线电缆实行定期预防性试验, 单纯的定期检修铁路沿线电缆头必须停电且工作量大, 已经不能满足我国铁路事业的快速发展对设备状态安全可靠高效运行的要求。因此, 采用在线监测的方法监测电缆头安全状况, 能够有效避免传统检修作业的盲目性, 工作人员根据监测信息的诊断结果制定合理的检修计划, 从而提前消除隐患、及时处理故障^[3-5]。

我国电气设备在线监测大多停留在针对单一参数的简单监测, 大量实际工程经验表明单一参数的在线监测不能及时发现该监测参数以外的影响因素对设备安全状况的危害, 很难及时做到对设备安全状况的有效评估。对于三芯电缆一般不考虑其使用

基金项目: 西安市科技计划项目 (2017080CG/RC043 (XALG026))

环境,并且 GB50168—2006《电气装置安装工程电缆线路施工及验收规范》要求三芯电缆终端必须良好接地^[6],但铁路附近电磁环境复杂,由接触网感生的电缆护层接地线电流和地回流均以“电缆护层—大地”回路为通道,导致电缆接地线中电流明显增大。据统计,由电缆绝缘电阻降低导致绝缘击穿的故障逐年递增,电缆绝缘电阻高低已然成为衡量电缆好坏的重要指标。有实验数据表明,随着湿度的提高,材料的离子和电子迁移的速度也会加快,电流愈大,体积电阻就愈小,绝缘性能愈差;环境温度越高,绝缘电阻就会下降,反之亦然^[7]。因此,针对铁路电磁环境,研发电缆安全状况的保护装置和多参数在线监测装置对电缆安全运行具有重要意义。

本文对 10 kV 三芯电缆金属护层接地线中电流进行了建模,并利用 Matlab 对电缆金属护层的感应电压和“护层—大地”回路电流进行了仿真分析,研制了一套以 PTC 热敏电阻为核心元件的电缆头过流保护装置。当电缆头护层接地线电流过大导致温度急剧上升时,过流保护装置动作,断开“护层—大地”回路,以阻止电缆护层的温度进一步升高,若此时电缆头感应电压过高,达到过压保护器动作值,过压保护器动作,对电缆头进行保护;待电缆护层的温度降低到正常时,过流保护装置恢复“护层—大地”回路,电缆头护层接地线可靠接地。同时,研发了一套电缆头多参数在线监测装置,该装置实时采集电缆头运行数据以及运行环境参数并判断电缆是否正常运行,配合 GPS 定位系统快速确定发生故障的电缆头位置,以便工作人员及时掌握电缆运行状态并采取有效措施,保障铁路供电系统的安全、可靠运行。

1 电缆金属护层接地线中电流的建模

电气化铁路 10 kV 供电系统主要是对铁路沿线的负荷进行不间断供电,具有接入点多,负荷小的特点。一般来说,铁路沿线铺设的 10 kV 三芯电缆在距铁路 100 m 范围之内与铁路钢轨平行铺设。电缆双端接地时,护层出现的暂态过电压为单端接地时的 10%,能够有效地防止冲击过电压或工频过电压危害电缆安全运行。

铁路电磁环境中的电缆接地线电流具有明显的周期性和波动性并且会产生金属护层损耗,加剧电缆发热和绝缘老化,长此以往甚至会导致绝缘击穿或电缆烧毁。

电缆头多位于电缆接线箱或箱变中,空气的导热系数远小于土壤,电缆头处的温度高于埋在土壤

中的电缆的温度。各个方面因素的叠加,导致铁路电气化区段的电力电缆头较一般电力电缆头发热更严重,烧毁的概率更大^[8-9]。

1.1 牵引电流对电缆护层的影响

牵引供电系统一般由接触网、机车、钢轨等组成。电力贯通线大体沿铁路平行铺设,接触网、钢轨产生的交变磁场会在沿线平行铺设的电缆、管道等处产生很大的感应电压。针对单线直接供电方式铁路,使用基于钢轨模型的电磁感应电压计算模型得出牵引电流在电缆护层上的感应电压^[10]。牵引系统和贯通线电缆正常带电时,接触网和钢轨会在电缆护层上产生感应电压。护层上的感应电压为在 3 个回路中产生的感应电压的叠加结果,其中“接触网—地”为第 1 回路,大地与两条钢轨之间的回路分别构成“钢轨 1—地”第 2 回路和“钢轨 2—地”第 3 回路。

由 3 个回路的耦合关系得电缆护层的感应电动势为

$$E_n = 2\pi f M_n I_G \quad (1)$$

式中: $M_n = (4.6 \lg(D/d_n) - j\pi/2) \times 10^{-4}$ 为接触网与电缆护层的互感系数, $D = 0.2085/\sqrt{f\sigma} \times 10^{-9}$ 为等效地回线入地深度, σ 为大地电导率, d_n 为接触网与电缆的平行接近距离; l 为接触网与电缆的平行长度; I_G 为钢轨中的感应电流。

又因为牵引电流与钢轨回流始终方向相反,于是得到每条钢轨的电流为

$$\dot{I}_{G1} = \dot{I}_{G2} = -0.5KI \quad (2)$$

式中, $K = Z_{12}/Z_2$ 为感应系数, Z_{12} 为“接触网—大地”回路与“钢轨—大地”回路之间的单位长度互阻抗(Ω/km), Z_2 为“钢轨—大地”回路单位长度自阻抗(Ω/km)。

电缆护层上的总感应电势为

$$E = \sum E_n \quad (3)$$

取 $f = 50 \text{ Hz}$, $\sigma = 1 \text{ S/km}$, $Z_2 = (0.198 + j0.56) \Omega/\text{km}$, $Z_{12} = (0.05 + j0.319) \Omega/\text{km}$, $I = 1000 \text{ A}$, 得到电力电缆在金属护层单端接地时与牵引网不同平行长度和接近距离下的护层感应电压曲线,如图 1 所示。

由图 1 可以看出,单端接地时电缆护层上的感应电压较大,随着电缆长度的增加,电缆护层上的感应电压值呈上升趋势;电缆与牵引网平行接近距离在 100 m 范围内变化明显,随着平行接近距离的增大,感应电压值呈下降趋势。当电缆长度为 1 km 时,距铁路 100 m 处的电缆护层感应电压可以达到 100 V。

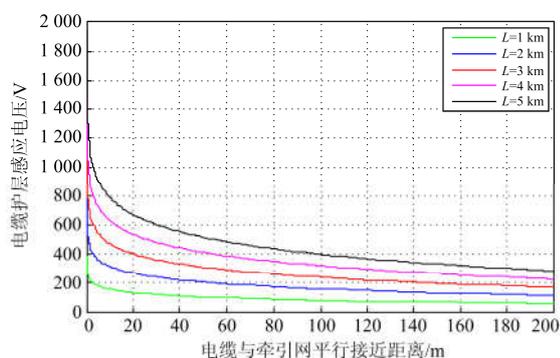


图 1 电缆护层感应电压

Fig. 1 Induced voltage on the metal sheath of cable

当电力电缆在金属护层双端接地时, 电缆护层上感应电流表达式为

$$I = \frac{E}{Z + R} \quad (4)$$

式中: Z 为电缆护层的自阻抗; R 为护层两端的接地电阻。

电缆护层自阻抗 $Z = (0.05 + j0.65) \Omega/\text{km}$, 接地电阻 $R=4 \Omega$, 得到电力电缆在双端接地时与牵引网不同平行长度和平行接近距离下的护层感应电流曲线, 如图 2 所示。

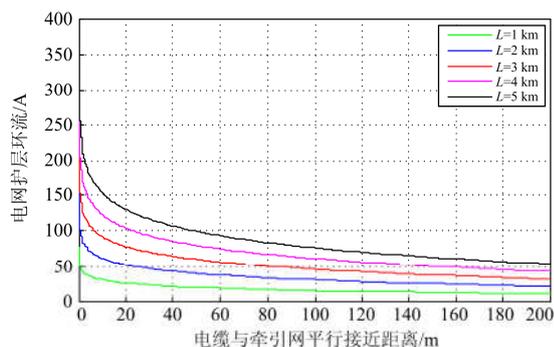


图 2 电缆护层电流

Fig. 2 Induced current of the metal sheath of cable

由图 2 可知, 随着电缆长度的增加, 流过电缆护层接地线的电流值呈上升趋势; 电缆与牵引网平行接近距离在 100 m 范围内变化明显, 随着平行接近距离的增大, 护层感应电流值呈下降趋势。当接触网、贯通线正常运行时, 电缆长度为 1 km, 在距铁路 100 m 处, 电缆护层上的电流最高可以达到 25 A 左右。

1.2 地回流对电缆护层的影响

直接供电方式下地回流分布情况如图 3 所示。

单线电气化区段, 直接供电方式中地回流可以达到牵引电流的 30%~40%^[11], 如图 4 所示, 正对牵引电流入地点, 流过护层的电流最大。

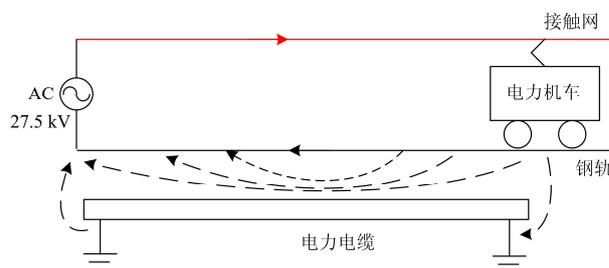


图 3 直供方式下地回流分布示意图

Fig. 3 Distribution of the feedback current through ground in direct power supply

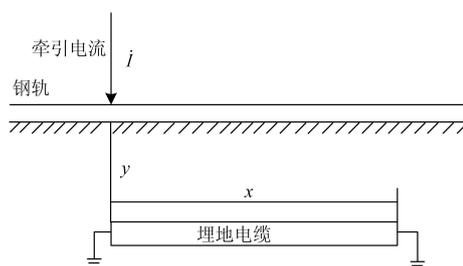


图 4 地回流对临近电缆护层影响示意图

Fig. 4 Effect of the feedback current through ground on the cable sheath

钢轨杂散电流在临近电缆接地点形成的电位对无限远处的电位的表达式为^[12]

$$U = \frac{\rho i \gamma \lambda}{2\pi} \Omega(\gamma x, \gamma y) \quad (5)$$

式中: ρ 为土壤电阻率; i 为牵引电流; γ 为“护层—大地”回路的传播常数; y 为埋地电力电缆与铁轨的平行间距; λ 为钢轨屏蔽系数; $\Omega(\gamma x, \gamma y)$ 为特种函数, 其值可通过查表得到^[13]。取 $I=1000 \text{ A}$, $\gamma=1.35 \times 10^{-3}$, $\lambda=0.5$ 。得到在不同土壤电阻率下, 距离钢轨不同位置时电力电缆护层两端的电压, 如图 5 所示。

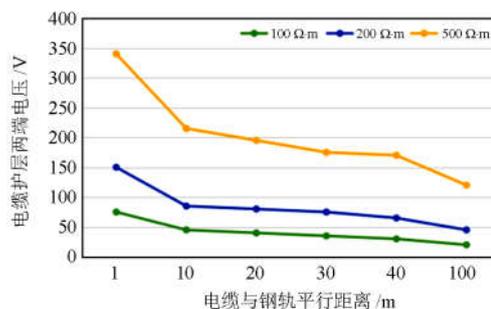


图 5 电缆护层阻性耦合电压

Fig. 5 Resistance coupling voltage of the metal sheath of cable

由图 5 可知, 距铁路 10 m 以外, 距离已不是影响贯通线电缆护层接地端电位的主要原因。此时,

电缆护层电位大小的影响因素主要是入地电流的大小和大地电阻率。针对某一区域的大地电阻率认为是固定的，所以关键影响因素在于地回流的大小。

电缆在双端接地时，地回流在电缆护层上形成的环流为

$$I = \frac{U}{Z + R} \quad (6)$$

式中： Z 为电缆护层的自阻抗； R 为护层两端的接地电阻。取电缆护层自阻抗 $Z = (0.05 + j0.65) \Omega/\text{km}$ ，接地电阻 $R = 4 \Omega$ 。得到如图 6 所示电缆护层分流地回流曲线图。

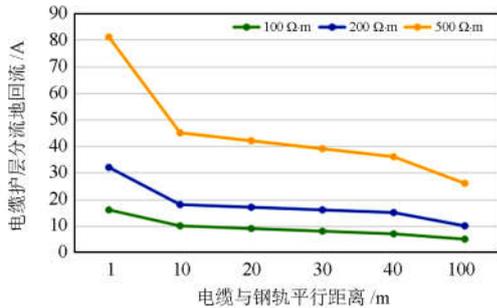


图 6 电缆护层分流地回流曲线图

Fig. 6 Feedback current through ground of the metal sheath of cable

由图 6 得距铁路距离 100 m 时，电缆护层电流的大小主要取决于入地电流和大地电阻率，通常取铁路周围的大地电阻率在 $100 \Omega \cdot \text{m}$ 以内，此时地回流沿电缆护层分流的数值可达到 10 A 左右。

2 电缆头发热保护

PTC 热敏电阻材料具有正温度系数和非线性电阻特性，能减缓因流过电缆护层电流过大而引发的电缆头升温过高的问题。当电缆双端接地，流过 PTC 热敏电阻的感应电流很小时，接地线温度较低，PTC 呈低阻态；当有大电流流过接地线时，引起 PTC 热敏电阻材料发热膨胀，PTC 热敏电阻的发热大于散热，温度迅速增加，并在微秒级时间内使 PTC 热敏电阻的阻值急剧增加，从而起到限流的作用，并使电缆由双端接地变成单端接地；当电流减小，且 PTC 热敏电阻的散热大于发热时，PTC 热敏电阻由高阻态恢复成导通状态，此时电缆又由单端接地变成双端接地，从而达到对电缆头发热保护的目的。PTC 过流保护装置工作流程图如图 7 所示。

通过上一节得到的牵引电流和地回流对电缆护层的影响来整定不同电缆长度的保护装置的动作电流值，如表 1 所示，其中 A 为电缆与接触网的平行接近距离， B 为电缆与接触网的平行长度。

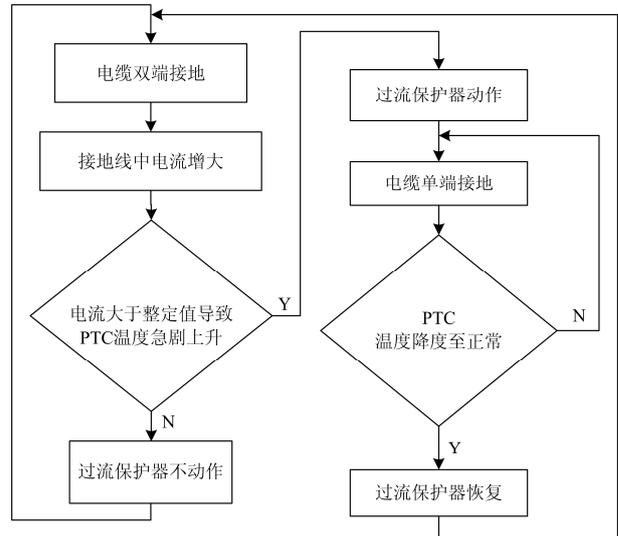


图 7 保护装置动作流程图

Fig. 7 Movement of protection device flowchart

表 1 保护装置动作电流整定值

Table 1 Protection device action current setting

A/m \ B/km	10	20	30	50	60	70
1	45 A	40 A	35 A	30 A	—	—
2	65 A	60 A	55 A	50 A	45 A	40 A
3	90 A	80 A	70 A	60 A	50 A	45 A

保护装置中 PTC 热敏电阻的数量和型号需要根据电力电缆与铁路之间的平行距离和平行接近长度来进行选取。安装方法为选取电力电缆其中一端的接地线，将保护装置串入电缆护层接地线中。同时，当电缆护层遭遇过电压时，如若单端接地可能会导致绝缘击穿，所以在 PTC 过流保护器旁并联氧化锌避雷器作为过电压保护。安装时选取双端接地电力电缆方便维护与安装的一侧，将保护装置串入该侧接地线，确保连接可靠。安装方式如图 8 所示。



图 8 保护装置安装图

Fig. 8 Installation diagram of protection device

3 电缆头在线监测

电缆头的发热保护装置在一定程度上避免了电缆头因铁路电磁环境引起的急剧发热，但影响电缆

头运行状态的因素复杂, 通过对电缆头运行状态重要参数的监测和评估可以更好地掌握电缆头的安全状况。

接地线中电流可以反映铁路电磁对电缆护层的影响和电缆主绝缘的泄流情况。接地线中电流发生明显变化时可能是受到了外界电磁的干扰, 也可能是主绝缘遭到了破坏, 可以根据电流数值的大小进行计算判断属于上述哪种情况。但是国内目前并没有根据接地线中电流判断电缆运行状态的定量标准, 只有部分企业要求电缆正常运行时接地线中电流不应超过负荷电流的 5%或 10%^[14]。

当交联聚乙烯(XLPE)电缆的工作温度超过允许值的 8%时, 电缆寿命会减半; 如果超过 15%, 电缆寿命将只剩下 1/4^[15]。电缆头绝缘层温度升高主要是由电缆线芯发热引起的, IEC60287 标准规定交联聚乙烯电缆导体的长期工作的温度限值为 90 °C。又因为空气的热阻大于土壤, 空气敷设的电缆导体、绝缘、屏蔽、钢带铠装、外护套的温度比直埋敷设、穿管敷设的温度要高, 所以选用空气敷设方式下型号为“YJLV22-10 kV-3*95 mm²”电缆进行温升实验, 根据额定载流和阶跃电流下的温升实验结果和 XLPE 电缆工作环境温度设定电缆外护套温度监测的限值为 50°C。电缆金属护层的感应电压在相关工程规范中明确要求不能超过 60 V。同时, 电力电缆运行环境的温、湿度也直接影响对电缆运行状态正常与否的判定。

综上所述, 电缆接地线电流、外护套温度、护层电压、环境温、湿度等 5 个量综合反映电缆头运行状态的在线监测实现了电缆头运行状态的多参数监测, 比以往单一参数的电气设备监测更可靠。本监测装置自动采集电缆接地线电流、外护套温度、护层电压、环境温、湿度等信息, 并根据这些信息判定电缆运行状态是否异常, 采集到的信息超过限定值则发出报警信息, 配合 GPS 定位系统快速确定发生故障的电缆头位置, 通过无线网络 GPRS/GSM发送给生产调度信息收集装置以及指定的相关工作人员的手机, 为生产管理提供一种有效的电缆头状态监测方法以及故障预警手段, 有效防止因电缆头过热损毁电缆事故的发生。

3.1 装置硬件设计

监测装置的硬件结构如图 9 所示。

控制芯片选用的是 ATmega1280 微处理器, 它具有 10 位精度的 ADC 和 4 个 USART 接口, 能够同时满足监测装置的数据采集对处理器 I/O 口资源的要求以及外设模块对 USART 接口数量的要求。监测装置中, 外护套温度采集采用测量精度高、性

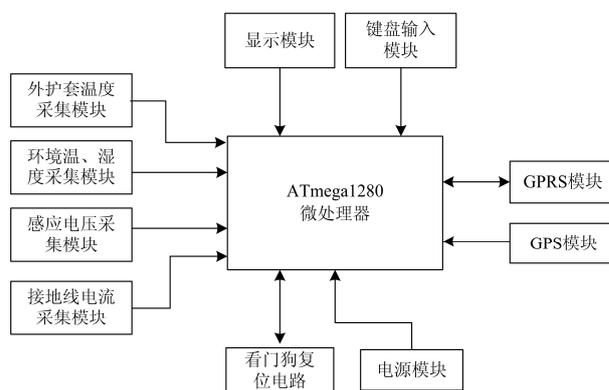


图 9 监测装置硬件结构示意图

Fig. 9 Hardware structure of the monitoring device

能稳定、使用方便的 PT100 温度传感器; 环境温、湿度采集使用 AM2001 温、湿度采集模块; 接地线电流采集使用 AD736 真有效值转换芯片处理电流互感器二次侧经采样电阻转换后的交流电压; 护层感应电压采集使用 AD637 真有效值转换芯片处理经霍尔电压传感器变送后的交流电压。分别将采集到的数据输入至芯片的 ADC 引脚, 将模拟量经模数转换后读出。上述使用的 AD637 和 AD736 真有效值转换芯片对于失真波形都可以高精度测量其有效值, 其中 AD637, 对于标准正弦波的转换误差为 0.0475%^[16]。GPRS 无线通信模块采用 SIM900A 模块, 将采集到的数据通过该模块的 GPRS 通信功能上传给监控中心。为了能在后台系统的 GIS 地理地图上有效监测、显示电缆头的运行状态和定位运行异常的电缆头的位置, 在监测装置中加入了 GPS 定位模块。GPS 定位模块采用硬件简单, 易于开发的 u-blox6 模块。上述两个模块与芯片连接图, 如图 10 所示。

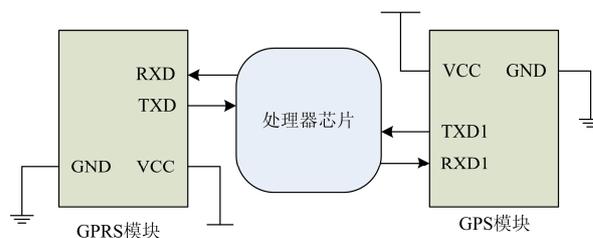


图 10 外接模块连接原理图

Fig. 10 Diagram of external modules connection principle

3.2 装置软件设计

图 11 所示为程序整体框架, 由初始化和主循环组成。

本文的程序主要实现了电缆头运行状态数据的采集与发送和电缆头状态异常的告警功能。在执行

完初始化任务之后，循环执行数据的采集任务，并在 LCD 显示屏上实时显示，可通过键盘输入更改告警设定值与接收方号码；等待定时发送电缆头数据函数状态中断并执行；当电缆头运行状态异常时，执行发送告警信息函数状态中断。主程序流程图如图 12 所示。

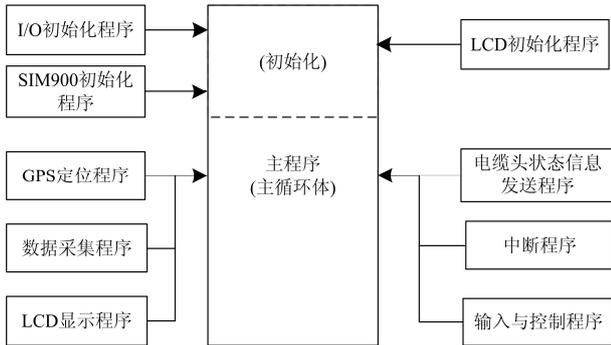


图 11 程序整体框架

Fig. 11 Overall program framework

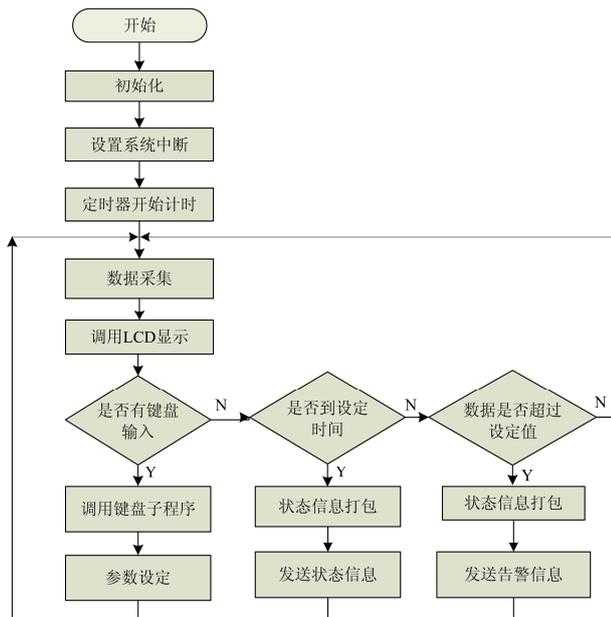


图 12 主程序流程图

Fig. 12 Main program flow chart

3.3 采样试验分析

主要针对电缆头护层电压、接地线电流、外护套温度进行了采样试验。试验数据如表 2—表 4 所示。

由表 2—表 4 中数据可得，本装置的电压采集、电流采集和温度采集 3 个模块的采集平均绝对误差分别为 0.229、0.357、0.557。试验结果证明本装置采样数据可靠性较高。

3.4 现场数据处理

电缆头异常发热甚至烧毁的直观表现为外护

表 2 电压数据

Table 2 Voltage data

示波器测得电压/V	监测装置测得电压/V	误差
35.6	35.5	-0.1
44.0	44.2	+0.2
52.8	52.7	-0.1
72.6	73.0	+0.4
87.5	87.9	+0.4
102.9	103.1	+0.2
120.3	120.1	-0.2

表 3 电流数据

Table 3 Current data

电流表测得电流/A	监测装置测得电流/A	误差
10.2	10.5	+0.3
26.3	26.0	-0.3
35.4	35.5	+0.1
43.8	44.2	-0.4
54.7	54.2	-0.5
77.5	77.8	+0.3
83.4	84.0	+0.6

表 4 温度数据

Table 4 Temperature data

温度计测得温度/°C	监测装置测得温度/°C	误差
20.1	22.0	+0.9
29.6	28.6	-1.0
38.4	37.8	-0.6
47.7	47.5	-0.2
57.2	57.8	+0.6
63.2	63.8	+0.5
75.2	75.1	-0.1

套温度过高。考虑到电缆头接地线电流、外护套温度、护层感应电压、环境温、湿度对电缆头外护套温度的影响，对电缆外护套温度进行多元线性回归处理。利用本装置实时传回的监测数据，抽取其中任意时段内所得的 1 649 组数据，使用 Matlab 软件做多元线性回归，仿真结果如图 13 和图 14 所示。

```

[ b, bint, r, rint, stats ] = regress(T, X);
regplot(r, rint);
b, bint, stats;

b =
    18.8847
     0.4537
     0.0089
    -1.7041
     0.0081

bint =
    15.4808  19.3785
     0.3990  0.5095
    -0.0002  0.0179
    -2.1956  -1.3926
    -0.0743  0.0006

>> stats

stats =
    1.0e+003 *
    0.0008    1.9561     0     0.0007
    
```

图 13 多元线性回归结果

Fig. 13 Multiple linear regression results

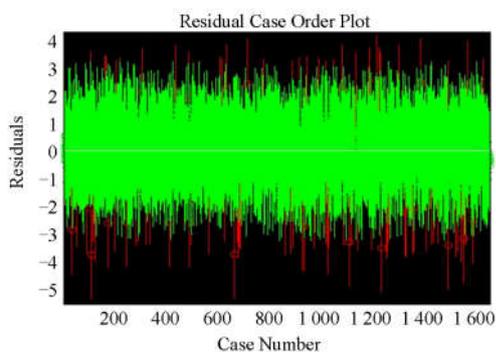


图 14 回归系数残差及置信区间

Fig. 14 Regression coefficient residuals and confidence intervals

图 13 中 b 为回归系数矩阵。其中 b1 是修正系数, b2、b3、b4、b5 分别为环境温度 T_0 , 环境湿度 Rh, 接地线电流 I 以及护层感应电压 U 的回归系数, bint 是回归系数的区间估计, r 为残差, rint 为置信区间, stats 则为用于检验回归模型的统计量, 有三个数值: 相关系数 $r^2=0.8$, $F=1\ 556.1$, 与 F 值对应的概率 $p=0$ 。当 r^2 越接近于 1, 回归方程越显著, $p<0.05$ 时回归成立。

此时, 电缆外护套温度为

$$T = 16.8647 + 0.4537T_0 + 0.0089Rh - 1.7941I + 0.0081U \quad (7)$$

从图 14 中可以看出, 随机抽取的 1 649 组现场数据大部分都处于该仿真模型的置信区间中。当因温度传感器故障而出现监测数据异常时, 该回归模型可作为电缆正常运行时外护套温度的一种补偿计算方式。

4 结论

铁路电气化区段大量使用 10 kV 电缆作为贯通线向沿线负荷不间断供电, 其运行状况的良好与否直接影响到铁路运输生产和行车安全, 单纯的预防性试验已经不能适应铁路事业的快速发展。铁路电气化区段电力电缆相比一般的电力电缆而言, 要受到铁路电磁环境对其运行状态的影响, 轻者引起发热, 加剧绝缘老化, 重者将导致电缆烧毁。针对铁路 10 kV 供电系统适用的 XLPE 三芯电缆, 研制了基于 PTC 热敏电阻的电缆头过热保护装置。当流过电缆护层的电流大于整定电流值导致温度迅速升高时, PTC 过流保护装置动作, 达到抑制护层电流, 防止电缆头绝缘层过热的目的。开发了以 ATmega1280 为控制芯片的电缆头运行状况的多参数在线监测装置, 通过与电缆运行环境参数的比照,

当电缆接地线电流、外护套温度或护层感应电压超过设定值时发送告警信息, 便于工作人员及时了解电缆头运行状况, 同时, 工作人员可以根据电缆头状态的历史记录信息判断电缆的运行状况, 做到提前预警、调整电缆负荷、制定合理的电缆头检修计划。

本装置挂网使用半年以来运行可靠, 达到了预期的效果。

参考文献

- [1] 李国. 高速铁路 10 kV 全电缆电力贯通线的调压技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
LI Guo. Study on the pressure regulating technology of the high-speed railway 10 kV all-electric power line[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [2] 李艳秋, 曹钟中, 靳涛. 电力电缆火灾监测及防火预警系统的研制[J]. 华北电力技术, 2001(2): 23-24.
LI Yanqiu, CAO Zhongzhong, JIN Tao. Development of power cable fire monitoring and fire alarm system[J]. North China Power Technology, 2001(2): 23-24.
- [3] 邓建峰. 高速铁路牵引变电所 220 kV 干式电流互感器介质损耗值在线监测研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 125-129.
DENG Jianfeng. High-speed rail traction transformer 220 kV dry current transformer medium loss worth online monitoring[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 125-129.
- [4] BO Zhiqian, LIN Xiangning, WANG Qingping, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 1-8. DOI: 10.1186/s41601-016-0012-2.
- [5] 刘家军, 刘梦娜, 安源. 基于 GIS 的网络化接触网检修挂接地线信息管理系统的设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 134-139.
LIU Jiajun, LIU Mengna, AN Yuan. The design and implementation of the information management system of the network access network maintenance and grounding line based on GIS[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 134-139.
- [6] 电气装置安装工程电缆线路施工及验收规范: GB50168—2006[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.
Electrical equipment installation project cable line construction and acceptance specification: GB50168—2006[S]. Beijing: China Planning Press, 2006.
- [7] 周阳. 影响电缆绝缘性能的因素研究及其对策[D]. 大连: 大连理工大学, 2015: 34-44.
ZHOU Yang. The influencing factors of cable insulation

performance research and its countermeasures[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015: 34-44.

[8] 刘让雄. 电气化铁路牵引变电所回流装置存在的缺陷与改进方案探讨[J]. 铁道机车车辆, 2012, 32(1): 105-109.
LIU Rangxiong. Defects in the backflow device of electrified railway traction substation and the improvement scheme[J]. Railway Locomotive and Rolling Stock, 2012, 32(1): 105-109.

[9] 程乐峰, 余涛. 基于 PSCAD/EMTDC 的配网检修线路临时挂接地线仿真模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 75-85.
CHENG Lefeng, YU Tao. Study on the simulation model of the temporary grounding line of the PSCAD/EMTDC distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 75-85.

[10] 汪可. 基于钢轨模型的电磁感应电压计算[J]. 电气技术, 2013(5): 62-64.
WANG Ke. The calculation of the electromagnetic induction voltage based on rails' model[J]. Electrical Engineering, 2013(5): 62-64.

[11] 龙建霞. 株洲北牵引变电所地回流过大的原因及对策[J]. 电气化铁道, 2007(3): 19-21.
LONG Jianxia. Causes and countermeasures of return flow in the north of Zhuzhou[J]. Electric Railway, 2007(3): 19-21.

[12] 高攸刚, 石丹. 电磁兼容总论[M]. 2 版. 北京: 北京邮电大学出版社, 2011.

[13] 刘连光, 马成廉. 基于有限元方法的直流输电接地极多层土壤地电位分布计算[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 1-3.
LIU Lianguang, MA Chenglian. The finite element method of HVDC grounding potential distribution calculation based on multi-layer soil[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 1-3.

[14] 喻世根. 高压电缆护层环流监测系统的设计及其电磁耦合特性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
YU Shigen. A study on the design and electromagnetic coupling characteristics of the monitoring system of high voltage cable sheath[D]. Changsha: Hunan University, 2011.

[15] 薛强. 电力电缆光纤测温及载流量监测的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
XUE Qiang. Study on the monitoring of optical fiber measurement and load flow in power cables[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009.

[16] 陈仁伟, 朱长青, 岳夕彪. 高准确度有效值转换电路的设计与实现[J]. 电子测量技术, 2010, 33(6): 20-22, 26.
CHEN Renwei, ZHU Changqing, YUE Xibiao. Design and realization of measurement circuit on precise true RMS[J]. Electronic Measurement Technology, 2010, 33(6): 20-22, 26.

收稿日期: 2017-09-19; 修回日期: 2017-11-01

作者简介:

刘家军(1967—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统监控与调度自动化; E-mail: liujiajun-88@163.com

刘创(1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统的测量与控制;

韩斌(1970—), 男, 工程师, 从事铁路电力设备运行与检修工作。

(编辑 周金梅)