

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190142

## 铁路 10 kV 电力电缆头发热分析与安全监测

刘家军<sup>1,2</sup>, 杜智亮<sup>1,2</sup>, 李娟绒<sup>3</sup>, 段玮<sup>3</sup>

(1. 西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安市轨道交通电气控制工程技术研究中心, 陕西 西安 710048; 3. 国网陕西省电力公司电力科学研究院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 针对铁路 10 kV 电力电缆头烧损事故频发的情况, 对电力电缆头进行了发热分析与安全监测研究。基于铁路电力电缆的检修作业现状, 利用有限元分析法建立了电缆头温度场仿真模型, 通过对实际工况下电缆头温度场分布进行分析, 发现金属护层中牵引地回流过大时对主绝缘散热影响较大, 当接触电阻异常时电缆头处会形成温升异常点。在此基础上, 采用最小二乘法对温度场仿真数据进行处理, 得出了电缆最大载流值与外护套温度阈值整定公式, 为电缆负荷调整与安全监测提供理论依据。最后, 研发了基于电缆外护套温度、接地线电流、主绝缘介质损耗正切值等参数测量的在线监测装置, 实现对电缆头运行的实时监测和异常报警与事故隐患预警功能, 并为电缆头检修提供决策依据。

**关键词:** 电力电缆头; 稳态温度场; 牵引地回流; 安全监测

### Thermal analysis and safety monitoring of railway 10 kV power cable joints

LIU Jiajun<sup>1,2</sup>, DU Zhiliang<sup>1,2</sup>, LI Juanrong<sup>3</sup>, DUAN Wei<sup>3</sup>

(1. Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;  
2. Xi'an Railway Traffic Electric Control Engineering Research Center, Xi'an 710048, China;  
3. State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** In view of the frequent occurrence of 10 kV power cable joints burning accidents, the heating analysis and safety monitoring of the power cable joints are studied. Based on the current situation of railway power cable maintenance, a simulation model of the cable joints temperature field is established by finite element analysis method. By analyzing the distribution of cable joints temperature field under actual working conditions, it is found that excessive traction ground backflow in the metal sheath has great influences on the heat dissipation of main insulation, and abnormal temperature rise points will be formed at the cable joints when the contact resistance is abnormal. On this basis, the least square method is used to process the temperature field simulation data, and the formula for setting the maximum current carrying value of the cable and the temperature threshold value of the outer sheath is obtained, which provides a theoretical basis for cable load adjustment and safety monitoring. Finally, an on-line monitoring device based on the measurement of state quantities such as cable sheath temperature, grounding wire current and main insulation dielectric loss tangent value is researched and developed to realize real-time monitoring, abnormal alarm and accident hidden danger warning, and to provide decision-making basis for the maintenance of the cable joints.

This work is supported by Key Research and Development Program of Shaanxi Province (No. 2018ZDXM-GY-169), Xi'an Science and Technology Project (No. 2017080CG/RC043(XALG026)), and 2019 Science and Technology Technical Service Project of State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute (No. 2019-4-044).

**Key words:** power cable joints; steady-state temperature field; traction backflow; safety monitoring

## 0 引言

随着我国铁路事业的快速发展, 10 kV 电力电

缆线路在铁路建设中所占的比例不断上升, 特别是新建的高速铁路普遍采用全电缆贯通自闭线模式<sup>[1]</sup>。

由于长距离电力电缆线路的对地电容电流远大于架空线路、铁路运行环境复杂、牵引地回流过大、接触电阻异常等因素, 铁路 10 kV 电力电缆烧损事故频繁发生, 严重威胁铁路行车安全, 且电缆故障 90% 以上都发生在电缆头处<sup>[2-3]</sup>。

**基金项目:** 陕西省重点研发计划项目资助 (2018ZDXM-GY-169); 西安市科技计划项目资助 (2017080CG/RC043 (XALG 026)); 国网陕西电科院 2019 年科技技术服务项目资助 (2019-4-044)

目前,国内外关于电力电缆头在线监测研究大部分停留在对某一状态量的单一监测,关于数据的利用、监测阈值设定和电缆状态准确评估的研究并未深入<sup>[4-5]</sup>。铁路电缆的发热烧损问题,多直接采用电力系统中关于电力电缆的研究成果,关于铁路应用场合的特殊性导致电缆头烧损率远远大于其他应用场合的研究甚少<sup>[6-7]</sup>,且我国铁路电力电缆主要还停留在定期预防性试验阶段,不满足铁路事业快速发展、高效运行的特点,且存在盲目检修、过渡检修、检修困难等问题<sup>[8]</sup>。

针对上述问题,通过有限元分析的方法对铁路 10 kV 电力电缆头进行了温度场仿真,分析了电缆线芯电流、环境温度、牵引地回流、接触电阻对电缆头发热的影响。根据 IEC-60287 标准中电缆长期稳定运行的有关规定,分析了电力电缆安全可靠运行和调整电缆负荷提高电缆利用率问题。结合铁路电力电缆具体情况,研发了基于电缆外护套温度、接地线电流、电缆护层感应电压、电缆主绝缘介质损耗角正切值 ( $\tan\delta$ ) 等状态量监测的在线监测装置,为有效评估电缆运行状态,预判事故隐患,及时处理电缆运行异常,实现电缆头状态检修提供了决策依据。

## 1 电缆头温度场仿真分析

### 1.1 电缆头温度场仿真模型的建立

利用有限元分析软件 ANSYS Workbench 搭建了 10 kV YJLV22-3×95mm<sup>2</sup> 三芯电力电缆头温度场仿真模型如图 1 所示。该模型建立过程中作如下假设: (1) 计算条件均为稳态,各待求物理量的值及其定解条件不变; (2) 电缆各层及周围环境为均匀介质、各向同性,且数值均为常数; (3) 环境温度发生变化时,不考虑材料导热系数的改变; (4) 电缆各层理想接触。

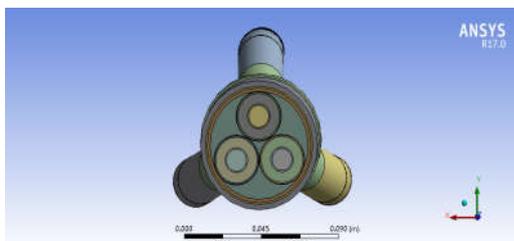


图 1 电力电缆头温度场仿真模型

Fig. 1 Temperature field simulation model of power cable joint

IEC-60287 标准中关于交联聚乙烯电缆的额定载流量是指环境温度下 40 °C 时,电缆长期稳定运行在最高允许温度的载流量。环境温度为 40 °C 时, YJLV22-3×95mm<sup>2</sup> 三芯电缆的额定载流量约为

200 A<sup>[9-10]</sup>。为了对该仿真模型进行验证,将环境温度设为 40 °C,各线芯分别施加 200 A 电流,散热边界为自然对流,得到电缆头温度分布云图如图 2 所示,线芯温度 89.186 °C、外护套温度 81.628 °C。

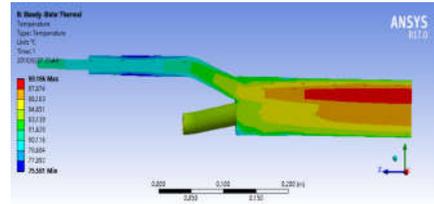


图 2 40 °C、200 A 时电缆头温度分布云图

Fig. 2 Cable joint temperature distribution at 40 °C and 200 A

通过电缆额定载流量温升实验,调节调压器给长度 3 m 的 10 kV YJLV22-3×95mm<sup>2</sup> 电缆通入 200 A 电流(室温 40 °C),导体温度上下波动≤0.3 °C/10 min 时,测得电缆线芯温度 87.6 °C、外护套温度 79.6 °C。由此可得,该电缆头温度场仿真模型具有很高的精确性。

### 1.2 理想情况下电力电缆头的发热分析

铁路电磁环境与运行工况复杂造成了 10 kV 三芯电力电缆不同于其他应用场合。当三芯电缆正常运行时,线芯电流矢量和为零,不会在电缆的屏蔽层和铠装层产生感生电动势,而铁路 10 kV 三芯电力电缆普遍采用双端接地方式,会使牵引地回流沿“电缆金属护层-大地回路”流过,且电缆接地线在焊接和缠绕捆绑过程中与金属屏蔽层、铠装层之间会形接触电阻,振动、尘埃、腐蚀、焊接缠绕不牢靠等会导致接触电阻增大<sup>[11]</sup>。

对电缆头温度场仿真模型分别施加 100 A、200 A、300 A、400 A 线芯电流,设置环境温度以 5 °C 为步长,从 -20 °C 到 50 °C,散热边界为自然对流进行温度场仿真。电缆主绝缘靠电缆线芯一侧与电缆线芯等温,电缆收缩指套与电缆外护套等温,所以仅对电缆线芯和电缆外护套处的温度数据进行处理如图 3 所示。由图 3 可知,在一定载流量下,环境

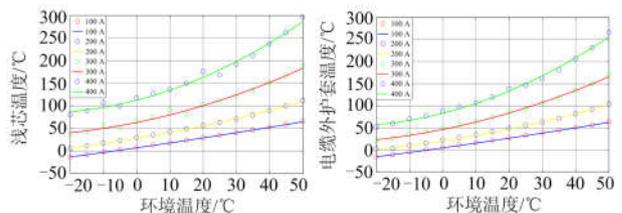


图 3 环境温度、线芯电流与线芯温度、电缆外护套温度关系曲线

Fig. 3 Ambient temperature, cable core current and cable core temperature cable outer sheath temperature relationship curve

温度越高, 电缆线芯和外护套温度越高。当温度达到 10 °C 后, 载流量高达 200 A 以上, 随着环境温度增大, 电缆线芯和外护套温度会急剧升高。

以环境温度差  $\delta T_e$  为自变量, 电缆线芯温升差  $\delta T_x$ 、电缆外护套温升差  $\delta T_w$  为因变量进行数据处理, 结果如图 4 所示。由 4 图可知, 在环境温度达到 15 °C 后, 载流量 200 A 以上, 随着环境温度变化的加快, 电缆线芯温度和电缆外护套温度的变化率几乎为指数型增长, 不同于环境温度较低时的直线型增长。

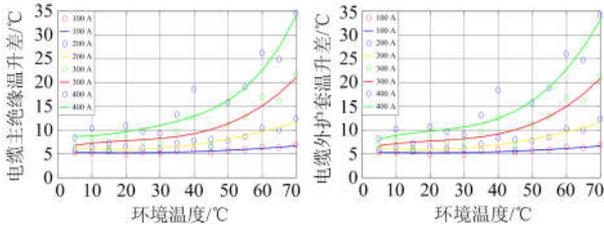


图 4 环境温度差、线芯电流与线芯温升差、  
电缆外护套温升差关系曲线

Fig. 4 Ambient temperature difference, core current and core temperature rise difference, cable outer sheath temperature rise difference curve

### 1.3 牵引地回流作用下电力电缆头的发热分析

以单线直接供电方式为例, 我国电气化铁路的牵引电流可以达到 500~1 500 A, 单线电气化区段直接供电方式中的地回流可以达到牵引电流的 30%~40%。技术人员测得某 10 kV 配电盘处电缆外皮中的电流可达 30 A<sup>[12]</sup>。

以电力机车泄流点为坐标原点, 钢轨为  $y$  轴, 其水平垂直方向为  $x$  轴, 建立坐标系。  $N(x, y)$  为与钢轨平行铺设的电缆金属护层上的某一点,  $I$  为牵引电流。忽略“电缆金属护层-大地”回路对“钢轨-大地”回路的影响, 并忽略两回路之间的互阻抗时, 埋地电缆护层上点  $N$  的对地电位  $V_N$  为<sup>[13]</sup>

$$V_N = \frac{p\gamma^2\gamma_p^2 I \lambda}{2\pi(\gamma_p^2 - \gamma^2)} \left[ \frac{1}{\gamma} \Omega(\gamma x, \gamma y) - \frac{1}{\gamma_p} \Omega(\gamma_p x - \gamma_p y) \right] \quad (1)$$

式中:  $p$  为大地电阻率;  $\gamma$  为“电缆护层-大地”回路的传播常数;  $\gamma_p$  为“钢轨-大地”回路传播常数;  $\lambda$  为钢轨屏蔽系数;  $x$  为  $N$  点距泄流点的水平距离;  $y$  为  $N$  点距泄流点的垂直距离;  $\Omega(\gamma x, \gamma y)$  和  $\Omega(\gamma_p x, \gamma_p y)$  为特种函数, 其值可查表获得。

电缆两端接地时, 流经电缆金属护层的电流为

$$I_h = \frac{U}{Z + R} \quad (2)$$

式中:  $U$  为电缆金属护层两端的电压差;  $Z$  为电缆护层的自阻抗;  $R$  为护层两端的接地电阻。

取  $I = 1000 \text{ A}$ ,  $\gamma_p = 1.35 \times 10^{-3} / \text{m}$ ,  $\gamma = 0.3 \times 10^{-3} / \text{m}$ ,  $\lambda = 0.5$ ,  $Z = (0.05 + j0.65) \Omega / \text{km}$ ,  $R = 4 \Omega$ , 由式(1)和式(2)可得, 不同土壤电阻率下, 距离钢轨位置不同时电缆护层中的电流, 如图 5 所示。

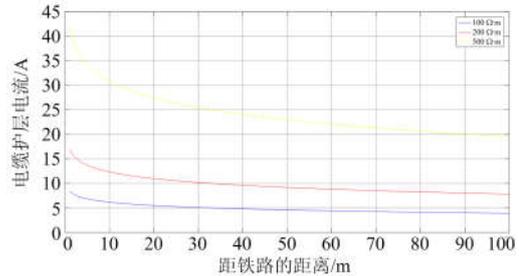


图 5 电缆护层电流

Fig. 5 Cable sheath current

对电缆头温度场仿真模型分别施加 100 A、200 A、300 A、400 A 线芯电流, 10 A、20 A、30 A、40 A、50 A、60 A、70 A、80 A、90 A、100 A 金属护层电流, 环境温度以 5 °C 为步长, 从 -20 °C 到 50 °C, 散热边界为自然对流进行了温度场仿真。

图 6 分别为环境温度在 40 °C、20 °C、0 °C、-20 °C 时电缆护层电流、电缆线芯电流与电缆线芯的温度关系曲线。由图 6 可知, 在一定环境温度和一定载流量下, 随着护层电流的增大, 电缆线芯的温度逐渐升高, 且不同环境温度下, 护层电流增大的整个过程中电缆线芯温度的增加量和变化趋势趋于相同, 说明电缆线芯温度变化主要取决于电缆的载流量和护层中电流的大小。

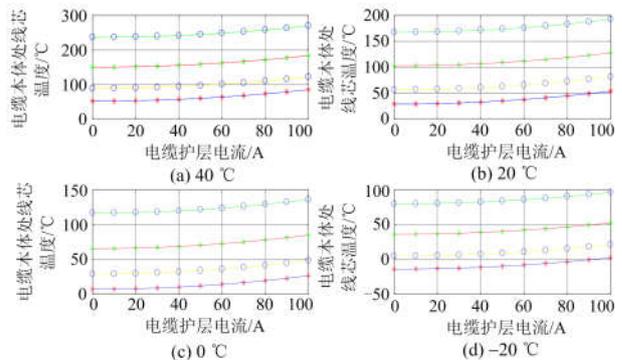


图 6 电缆护层电流、电缆线芯电流与电缆线芯温度的关系曲线

Fig. 6 Cable sheath current, cable core current and cable core temperature curve

图 7 分别为环境温度在 40 °C、20 °C、0 °C、-20 °C 时电缆护层电流与电缆线芯外护套温度差的曲线关系。由图 7 可知,在一定环境温度和一定载流量下,当电缆护层电流小于 30 A 时,随着电缆护层电流增加,电缆线芯外护套温度差变化并不明显。当电缆护层电流大于 30 A 时,随着电缆护层电流增加,电缆线芯外护套的温度差开始增大,且在不同载流量时这种温度差增长变化规律相同,说明护层电流大于 30 A 时,原有的电缆温度分布已明显改变,电缆线芯散热困难。

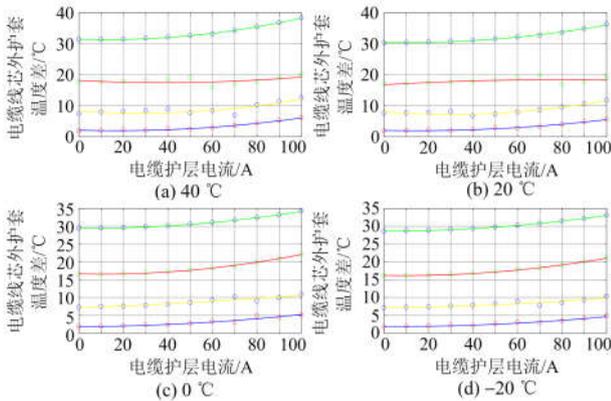


图 7 电缆护层电流与电缆线芯外护套温度差的关系曲线  
Fig. 7 Curve of cable sheath current and cable core outer sheath temperature difference

#### 1.4 接触电阻作用下电力电缆头的发热分析

对电缆头温度场仿真模型分别施加 100 A、200 A、300 A、400 A 的线芯电流,设置环境温度为 40 °C,接触电阻分别为  $0.1 \times 10^{-4} \Omega$ 、 $0.5 \times 10^{-4} \Omega$ 、 $0.1 \times 10^{-3} \Omega$ 、 $0.5 \times 10^{-3} \Omega$ 、 $0.001 \Omega$ 、 $0.005 \Omega$ ,散热边界为自然对流进行温度场仿真。

图 8 为环境温度 40 °C、电缆线芯电流 100 A 时,当接触电阻增大到  $0.005 \Omega$  的温度云图。电缆头因接触电阻引起异常发热开始明显,当线芯电流为 200 A、300 A、400 A 时,即接触电阻达到  $0.005 \Omega$  时出现上述情况。以 5 °C 为步长,将环境温度从 -20 °C 依次设置到 50 °C,在接触电阻达到  $0.005 \Omega$

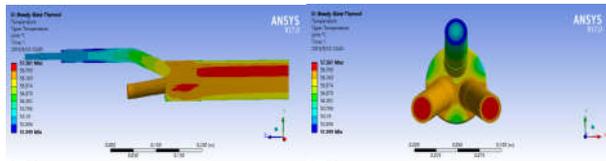


图 8 环境温度 40 °C、线芯电流 100 A、接触电阻 0.005 Ω 时  
电缆头温度场分布云图

Fig. 8 Cloud diagram of the cable joint temperature filed at the ambient temperature is 40 °C, the core current is 100 A, and the contact resistance is 0.005 Ω

时也开始异常发热明显。说明接触电阻引起的电缆头异常升温点主要取决于接触电阻本身的大小。

## 2 电缆负荷调整与温度监测阈值设定

### 2.1 理想情况下电缆负荷调整与温度监测阈值设定

电气化铁路沿线的电力电缆随着相邻并行线路的建设,施工空间有限,建设新的电力电缆线路的难度不断增加,如何保证在其可靠安全运行的同时保持合理的利用率显得非常必要。电力电缆长期运行的温度限制主要来自于对其绝缘性能可靠的要求,90 °C 温度限制的绝缘材料满足“8 °C 热老化原则”,即工作温度超过规定值 8 °C 时,寿命缩短一半左右<sup>[14]</sup>。利用最小二乘拟合对电缆运行在允许的最高温度下的温度场仿真数据进行处理,得到电缆线芯电流( $I_x$ )与电缆外护套温度( $T_w$ )随环境温度( $T_c$ )变化的关系如图 9 和式(3),即可为不同环境温度下电力电缆所能允许的最大载流值整定和不同环境温度下电缆外护套温度监测阈值提供参考。

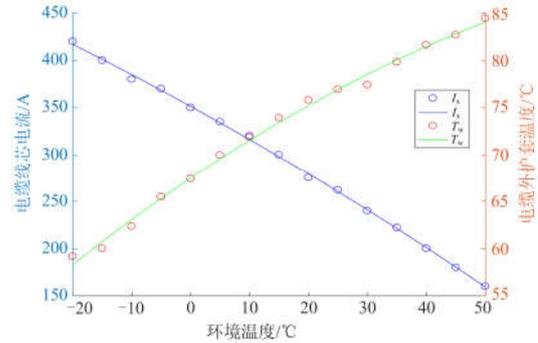


图 9 电缆线芯电流、电缆外护套温度与  
环境温度的关系曲线

Fig. 9 Cable core current, cable jacket temperature and ambient temperature relationship curve

$$\begin{cases} I_x = -0.008T_c^2 - 3.4394T_c + 351.425 \\ T_w = -0.0018T_c^2 - 0.4231T_c + 67.5148 \end{cases} \quad (3)$$

以环境温度( $T_c$ )和电缆线芯电流( $I_x$ )为自变量,电缆外护套温度( $T_w$ )为因变量,得到电缆运行在允许的最高温度下的电缆外护套温度与环境温度和电缆线芯电流的关系如图 10 和式(5),即可实现电缆外护套温度、环境温度、电缆线芯电流的相互计算,从而为电缆安全运行状况的判定提供理论依据。

对电缆运行在允许的最高温度下的温度场仿真数据进行处理,得

$$T_w = -0.002I_x^2 + 0.0099I_x + 87.169 \quad (4)$$

由式(3)、式(4)得

$$T_w \approx -0.002I_x^2 - 0.03405T_c + 90.64807 \quad (5)$$

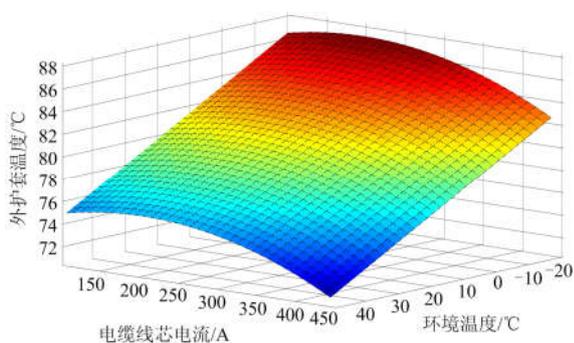


图 10 电缆外护套温度与电缆线芯电流、环境温度的变化规律

Fig. 10 Cable sheath temperature and cable core current, ambient temperature law of change

### 2.2 牵引地回流作用下电缆负荷调整与温度监测阈值设定

根据牵引地回流作用下电力电缆头的发热分析, 利用最小二乘拟合对电缆运行在允许的最高温度下的温度场仿真数据进行处理, 得到电缆线芯电流( $I_x$ )、电缆外护套温度( $T_w$ )随着环境温度( $T_e$ )变化的关系如图 11 和式(6), 即可为牵引地回流作用下, 不同环境温度时电力电缆所能允许的最大载流值整定和不同环境温度下电缆外护套温度监测的阈值提供参考。

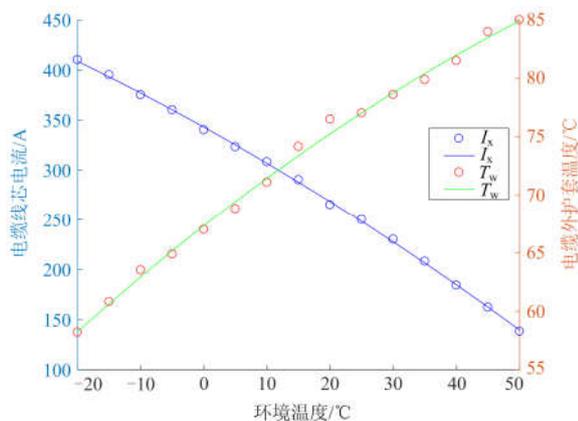


图 11 电缆线芯电流、电缆外护套温度与环境温度的关系曲线

Fig. 11 Cable core current, cable sheath temperature and ambient temperature relationship curve

$$\begin{cases} I_x = -0.0111T_e^2 - 3.512T_e + 342.9075 \\ T_w = -0.0015T_e^2 - 0.425T_e + 67.357 \end{cases} \quad (6)$$

分析在牵引地回流作用下, 电缆运行在允许的最高温度下的电缆外套温度( $T_w$ )与电缆线芯电流( $I_x$ )和环境温度( $T_e$ )的变化规律关系, 如图 12 和相应数

学关系式(8)所示, 即可实现考虑牵引地回流影响时, 电缆外护套温度、环境温度、电缆线芯电流的相互计算, 从而为电缆安全运行状况的判定提供理论依据。

对电缆运行在允许的最高温度下的温度场仿真数据进行处理, 得

$$T_w = -0.002I_x^2 + 0.0046I_x + 88.7297 \quad (7)$$

由式(6)、式(7)得

$$T_w \approx -0.002I_x^2 - 0.016155T_e + 87.15237 \quad (8)$$

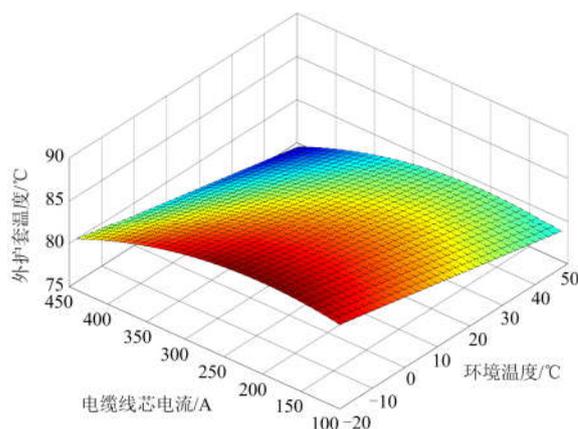


图 12 电缆外护套温度与电缆线芯电流、环境温度的变化规律

Fig. 12 Cable outer sheath temperature and cable core current, ambient temperature law of change

### 3 电力电缆头安全监测

为了准确判断电缆的运行状况, 结合铁路电力电缆的具体情况, 选取电缆外护套温度、电缆护层感应电压、电缆接地线电流、主绝缘介质损耗正切值( $\tan \delta$ )等状态量进行监测。温度是衡量电力电缆运行工况正常与否的一个重要的非电气量标志, 相关阈值整定如前文所述。电缆工程规范中规定金属护层电压不能超过  $50 \text{ V}^{[15]}$ 。铁路三芯电缆金属护层中的电流一般由三相不平衡导致的感应电流、牵引地回流、电缆主绝缘的泄露电流及充放电时的电容电流构成, 而三芯电缆正常运行时三相不平衡引起的感应电流及充放电时的电容电流在电缆接地线电流监测时均可以忽略, 又因为牵引地回流随牵引负荷周期性和波动性变化, 电缆介质损耗角正切值( $\tan \delta$ )的监测中剔除有牵引地回流存在时的数值, 即可以认为接地线中的电流主要为电缆主绝缘的泄露电流。电介质实际等效电路及电压电流向量图如图 13 所示, 其中  $\theta$  为电介质等效 RC 并联电路的功率因素角,  $\theta$  的余角  $\delta$  则为介质损耗角<sup>[16]</sup>。

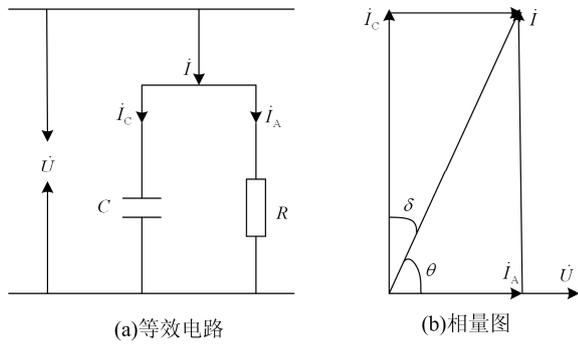


图 13 等效电路及相量关系图

Fig. 13 Equivalent circuit and phasor diagram

由图 13 可得介质损耗角正切值的计算公式为

$$\tan \delta = \frac{U/R}{U\omega C_p} = \frac{1}{R\omega C_p} \quad (9)$$

式(9)为介质损耗正切值的理论计算公式, 实际采用离散傅里叶变换, 对流经电缆接地线的电流和电缆主绝缘两侧的电电压进行傅里叶分解<sup>[17]</sup>。其表达式为

$$i(t) = I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} I_{km} \sin(k\omega t + \delta_i) \quad (10)$$

$$u(t) = U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_{km} \sin(k\omega t + \delta_u) \quad (11)$$

可得介损角的测量值为

$$\delta = \frac{\pi}{2} - |\delta_i - \delta_u| \quad (12)$$

### 3.1 监测装置硬件设计

电缆头安全监测装置的硬件结构如图 14 所示。

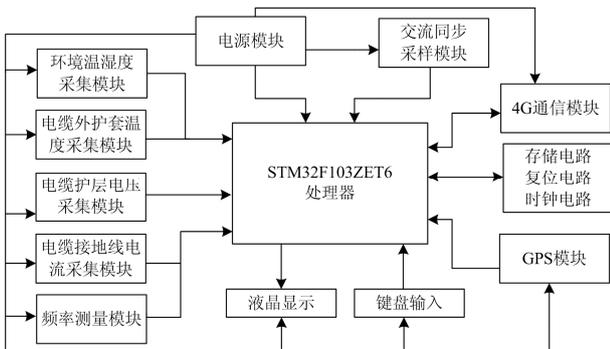


图 14 安全监测装置硬件结构

Fig. 14 Safety monitoring device hardware structure

控制芯片选用的是 32 位高性能 ARM Cortex-M3 内核的高性能、低功耗 STM32F103ZET6 处理器, 负责数据处理与数据通信, 扩展存储容量为 521K flash、64KSRAM, 可以运行大代码, 存储大容量数据和程序。

电缆外护套温度采集选采用测量精度高、性能

稳定的 PT100 铂热电阻作为温感元件, 与电缆外护套的测温点紧密接触, 通过温度变送电路将数据传至 STM32 单片机的 ADC 引脚; 环境温湿度采集使用 AM2001 温湿度采集模块; 电缆护层感应电压采用高性能的交流电压变送器 MIK-DJU/0~1 000 V, 将 0~1 000 V 的交流电压转化成 0~5 V 的直流电压输出, 经过二阶 RC 滤波电路滤除噪声后, 输出至 STM32 单片机的 ADC 引脚。

电缆主绝缘介质损耗正切值 ( $\tan \delta$ ) 的监测设计了如图 15 所示的交流同步采样电路, 该电路选用了 ADI 公司的 8 通道 16 位双极性 ADC 转换芯片 AD7606<sup>[18-19]</sup>。为了满足绝对采集精度的要求, 采用小容差、低漂移的外部精密基准电压源 ADR421, 电压信号经过二阶 RC 滤波电路滤除噪声后进入 AD7606 进行采集。电流信号经精密电流传感器变送后, 经过二阶 RC 滤波电路滤除噪声后进入 AD7606 进行采集, 再通过串行 SPI 通信方式进行数据读取, 待数据读取完成后, 采用单周傅里叶算法对每个周期采样的 64 个数据点进行处理<sup>[20]</sup>。又因电网的频率处于实时的波动中, 设计了以 AD584JNZ 精密基准电压源、LM324 运放为基础的电压比较电路, 来进行电网频率的实时跟踪测量, 保证每个工频周期内的采样点数均匀稳定, 通过实测的频率值实时更新定时器的配置来指导交流同步采样。

4G 通信采用 USR-LTE-7S4 模块, 将电缆头安全监测信息通过该模块的 GPRS 功能上传至监控中心<sup>[21]</sup>。GPS 定位采用 u-blox6 模块, 便于判别电缆头的位置信息, 使电缆头的状态监测信息和电缆头状态判定结果与实际地理位置对应。

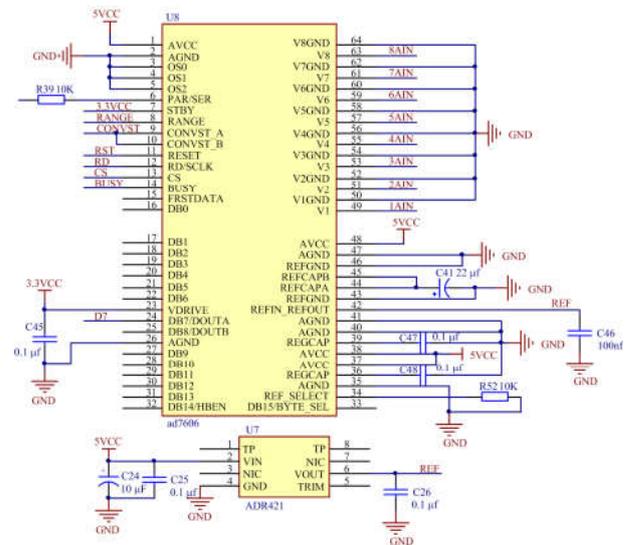


图 15 交流同步采样 AD 转换电路

Fig. 15 AC synchronous sampling AD conversion circuit

### 3.2 监测装置软件设计

本装置的核心控制系统软件开发是以 KEIL5 为平台。系统上电后, 4G 通信模块与后台服务器建立握手连接, 并对处理器的相关寄存器进行配置。待电缆头运行状态判断函数完成电缆头运行状态判定后, 将电缆头状态信息、电缆头状态判定结果及位置信息进行打包传输到远程服务器。程序整体框架如图 16 所示。

主程序主要实现电缆头监测量的采集发送与电缆头安全状况评估。程序初始化完成后进入循环, 执行电缆头安全监测量的数据采集与显示, 通过键盘输入对监测阈值进行整定更改与接收方电话更改; 等待电缆头安全状态判定完毕, 通过 4G 模块传输电缆头安全监测的状态信息与位置信息; 等待电缆头有运行异常时, 电缆头安全状态判定与信息发送函数立即执行发送命令。主程序流程如图 17 所示。

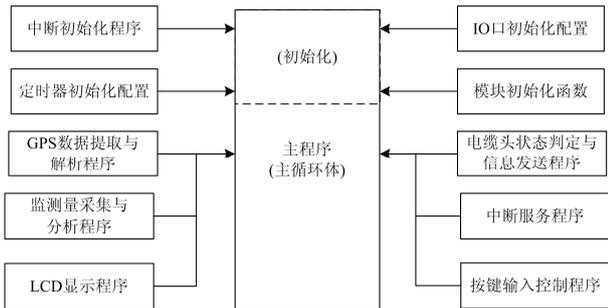


图 16 程序整体框架

Fig. 16 Program overall framework

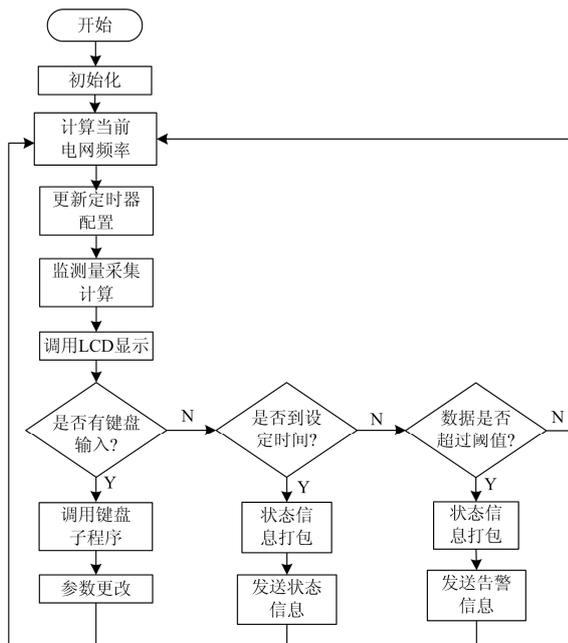


图 17 主程序流程图

Fig. 17 Main program flow chart

### 4 结论

针对铁路 10 kV 电力电缆头烧损事故的频发, 搭建了 10 kV 三芯电力电缆头温度场仿真模型, 通过 IEC-60287 标准中关于额定载流量的定义和电缆温升实验, 对模型的准确性进行验证, 并对理想情况下、牵引地回流作用下和接触电阻异常情况下的电缆头进行了发热分析, 得出了相应的发热规律和数学关系。

根据电缆长期稳定运行的温度限制, 针对如何提高电缆利用率和确定电缆外护套温度监测阈值, 对理想情况下和考虑牵引地回流的电缆发热进行了数学分析, 得出了相应的负荷调整与温度监测阈值整定公式, 从而为电缆负荷调整、安全状况评估和在线监测提供依据。

研发了基于电缆外护套温度、接地线电流、电缆护层感应电压、主绝缘介质损耗角正切值 ( $\tan \delta$ ) 等状态量的监测装置, 对电缆运行状态进行实时监测与评估, 对异常运行电缆头配合 GPS 定位系统及时报警, 并对存在隐患的电缆头进行提前预判, 从而为及时处理异常状况和实现“状态检修”提供决策依据。

### 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] EI-KADY M A, AL-SAUD M S, FINDALY R D. Accurate assessment of thermal field and ampacity of underground power cables[C] // 2006 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, May 7-10, 2006, Ottawa, Canada: 874-890.
- [3] 黄荣辉, 李勋, 张宏钊, 等. 线缆混合输电线路故障组合行波测距方法及影响因素研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 73-81.  
HUANG Ronghui, LI Xun, ZHANG Hongzhao, et al. Study on fault-collecting traveling wave ranging method and its influencing factors for cable hybrid transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 73-81.
- [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] 沈星如, 花旭, 代亚平, 等. 主流电缆在线监测方法综述[J]. 通信电源技术, 2017, 34(4): 58-59, 61.  
SHEN Xingru, HUA Xu, DAI Yaping, et al. Overview of

- mainstream cable online monitoring methods[J]. *Communication Power Supply*, 2017, 34(4): 58-59, 61.
- [6] NIU Yanhua, LIANG Wenbin, ZHANG Yinling, et al. Cross linking kinetics of polyethylene with small amount of peroxide and its influence on the subsequent crystallization behaviors[J]. *Chinese Journal of Polymer Science*, 2016, 34(9): 1117-1128.
- [7] 张海龙. 110~220 kV XLPE 电缆绝缘在线检测技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2009.  
ZHANG Hailong. Research on on-line detection technology of 110~220 kV XLPE cable insulation[D]. Wuhan: Wuhan University, 2009.
- [8] 刘创. 基于 4G 通信的铁路电力电缆头多参数在线监测装置的研制[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.  
LIU Chuang. Development of multi-parameter online monitoring device for railway power cable head based on 4G communication[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.
- [9] 刘家军, 刘创, 韩斌, 等. 一种铁路电气化区段电力电缆头的监测保护装置[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(13): 141-148.  
LIU Jiajun, LIU Chuang, HAN Bin, et al. A monitoring and protection device for power cable joints in railway electrification section[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(13): 141-148.
- [10] 阳林, 李昭红, 郝艳捧, 等. 工作温度和绝缘温差约束下的高压直流电缆接头载流量计算[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(18): 129-134.  
YANG Lin, LI Zhaohong, HAO Yanpeng, et al. Calculation of current carrying capacity of high voltage DC cable joint under working temperature and insulation temperature difference[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(18): 129-134.
- [11] 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.  
Specification for construction and acceptance of cable installation for electrical installations: GB50168 — 2006[S]. Beijing: China Planning Press, 2006.
- [12] 王欢. 牵引供电系统地回流分析及接地网交流电腐蚀问题研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.  
WANG Huan. Research on reflow analysis of traction power supply system and AC corrosion of grounding grid[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [13] 陈民武, 朱久国, 解绍锋, 等. 牵引供电系统对埋地管道阻性耦合交流干扰建模及仿真[J]. *中国铁道科学*, 2018, 39(2): 80-86.  
CHEN Minwu, ZHU Jiuguo, XIE Shaofeng, et al. Modeling and simulation of resistive coupling AC jamming of buried pipeline by traction power supply system[J]. *China Railway Science*, 2018, 39(2): 80-86.
- [14] 施围, 邱敏昌, 张乔根. 高电压工程基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [15] TEYSSEDRE G, LAURENT C. Advances in high-field insulating polymeric materials over the past 50 years[J]. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2013, 29(5): 26-36.
- [16] 金涛, 陈毅阳, 游胜强. 基于 Nuttall 窗-五点变换的改进 FFT 介质损耗角测量算法[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(增刊 2): 7-15.  
JIN Tao, CHEN Yiyang, YOU Shengqiang. Improved FFT dielectric loss angle measurement algorithm based on Nuttall window-five-point transform[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(S2): 7-15.
- [17] SCHWAB H, SCHMITZ G. Full-wave ultrasound reconstruction with linear arrays based on a Fourier split-step approach[C] // 2018 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), December 20, 2018, Kobe, Japan: 1-4.
- [18] DHARMAPANDIT O, PATNAIK R K, DASH P K. A fast time-frequency response based differential spectral energy protection of AC microgrids including fault location[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2017, 2(2): 331-358. DOI: 10.1186/s41601-017-0062-0.
- [19] PLACEK Z, KOHOUT T. The influence of mechanical stress on cable service life-time[J]. *Polymer Testing*, 2011, 30: 709-715.
- [20] 樊占峰, 白申义, 杨智德, 等. 光学电流互感器关键技术研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(3): 67-74.  
FAN Zhanfeng, BAI Shenyi, YANG Zhide, et al. Study on key technologies of optical current transformer[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(3): 67-74.
- [21] 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.

收稿日期: 2019-01-30; 修回日期: 2019-04-28

作者简介:

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

杜智亮(1991—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统的测量与控制; E-mail: 18591969790@163.com

李娟绒(1968—), 女, 高级工程师, 研究方向为高电压技术。E-mail: ljrdky@163.com

(编辑 许威)