

高速铁路贯通线电缆温升效应分析*

陈 凯

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430067, 武汉//高级工程师)

摘 要 目的:为了保障高速铁路供电安全,需要对高速铁路贯通线电缆的运行状态进行实时监测。温度是电缆安全运行的重要指标,要正确判断贯通线电缆的运行状态,需对贯通线电缆的温升效应进行研究。**方法:**利用有限元分析法对贯通线电缆正常和故障状态时的温升效应进行了仿真计算,分析了外界大气压、环境温度、太阳辐照、敷设条件等外部条件对电缆温升效应的影响,研究了单相接地、相间短路、绝缘电弧击穿、电缆头接触不良、金属屏蔽层引入牵引回流等典型故障条件下电缆的温升效应;并分别进行了流经故障电流情况下和不同电缆敷设方式下电缆金属屏蔽层温升试验,以验证仿真结果的正确性。**结果及结论:**外界大气压和环境温度对电缆温升影响不大,太阳辐射会增大电缆温升,直埋敷设方式下的电缆温升明显高于泡水敷设;除单相接地故障的电缆金属屏蔽层温升不明显外,其余故障情况下电缆金属屏蔽层均有明显温升。

关键词 高速铁路;贯通线电缆;温升效应;金属屏蔽层

中图分类号 U223.2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.09.027

Analysis of Temperature Rise Effect in High-speed Railway Continuous Through Line Cable

CHEN Kai

Abstract **Objective:** In order to ensure the safety of high-speed railway power supply, it is necessary to conduct real-time monitoring of the through line cable operation status for high-speed railways. Temperature is an important indicator for the safe operation of cables, and studying the temperature rise effects in the continuous through line cable is necessary for accurately assessing its operational status. **Method:** Finite element analysis method is used to simulate and calculate the temperature rise effects in the continuous through line cables under normal and fault conditions. The influence of external factors such as atmospheric pressure, ambient temperature, solar radiation, and installation conditions on the temperature rise effects of the cables is analyzed. The aforementioned effects are inves-

tigated under typical fault conditions such as single-phase grounding, interphase short-circuit, insulation arc breakdown, poor cable head contact, and introduction of traction return current through the metal shielding layer. Temperature rise tests are conducted to validate the simulation results, including tests on the temperature rise of cable metal shielding layer under circulating fault current or under different cable installation methods. **Results&Conclusion:** Atmospheric pressure and ambient temperature have little impact on the temperature rise of cables, while solar radiation increases the temperature rise. The temperature rise of cables installed in direct burial mode is significantly higher than those installed submerged in water. Except for the cable metal shielding layer in the case of single-phase grounding fault, noticeable temperature rises are observed in the cable metal shielding layer under other fault conditions.

Key words high-speed railway; cable of through line; temperature rise effect; metal shielding layer

Author's address China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 430067, Wuhan, China

0 引言

为保障高速铁路供电安全,需对贯通线电缆的运行状态进行实时监测,而温度是电缆安全运行的重要指标^[1]。处于正常工作状态下的电缆,温升处于正常范围以内,根据载流量的不同会有一定的差异;短期过载的电缆,尽管短期内温升不会有明显的变化,但能够检测到线芯内过额的电流,长期过载的电缆内部则会产生明显的温升;电缆绝缘的逐步恶化最终将导致绝缘击穿从而发生电缆短路,在绝缘恶化的过程中伴随着局放的增大^[2],在主绝缘被击穿的一瞬间,绝缘与金属屏蔽层之间会出现明显的电弧,产生大量的热量从而导致金属屏蔽层温度迅速升高;此外,电缆压接不良时存在的接触电阻将在持续通流作用下发热,外皮破损时,附近牵

* 国家铁路集团科研项目(J2017Z057)

引回流会汇入电缆金属屏蔽层而导致发热^[3],这些情况都将导致电缆对应结构处产生异常的温升。

对于敷设距离长、敷设环境复杂的电力贯通线电缆,如何监测其温度,监测何处的温度能够对电缆正常和故障状态下的温升均有较为明显的反映,进而实现对电缆运行状态的判断,是亟需解决的问题。

1 基本原理

假设贯通线电缆为各向同性均质的连续体,其物性参数包括材料导热系数 λ 、材料密度 ρ 及材料比热容 c ,这些都是常量;线芯损耗、金属屏蔽损耗分别均匀恒定地分布在导体层和金属屏蔽层,单位时间单位体积内热元生产热即内热源强度为 H 。根据热力学第一定律,分析导热过程中微元体的能量收支情况,建立微元体的热平衡方程式,得到导热微分方程式^[4]:

$$\alpha \Delta t + \frac{H}{\rho c} = \frac{\partial t}{\partial \tau}$$

式中:

Δt ——拉普拉斯算子,在直角坐标系中, $\Delta t = \partial^2 t / \partial x^2 + \partial^2 t / \partial y^2 + \partial^2 t / \partial z^2$, x 为横坐标值, y 为纵坐标值, z 为竖坐标值;

α ——材料的热扩散率;

H ——内热源强度;

t ——时间;

τ ——时间常数。

根据贯通线电缆的物理参数、敷设方式及运行状态即可确定对应的几何、物理、时间和边界条件,进而求解得到特定条件下的电缆各层的温升。

2 电缆有限元模型

有限元分析利用简单而又相互作用的元素(即单元),就可以用有限数量的未知量去逼近无限未知量的真实系统^[5]。在待求解电缆各个域内剖分出离散的网格,根据差分导热微分方程式,就可以求得各工况下电缆各处温升变化情况的近似结果。在 COMSOL(多物理场仿真软件)平台中分别搭建了截面面积为 50 mm^2 的单芯和三芯电缆剖面模型,在温度梯度较大处,如绝缘层内侧和金属屏蔽层周围,应将网格划分得密集一些;在温度梯度较小处,如导体层内部以及接近恒温边界的空气域外部,应将网格划分得稀疏一些,这样既能提高计算

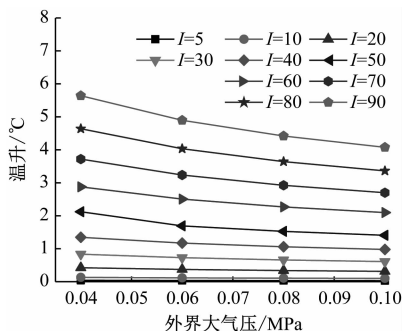
速度,又能保证计算精度。

3 电缆正常运行时温升效应

贯通线电缆正常运行时,影响电缆稳态通流温升的外界因素包括外界大气压、环境温度、太阳辐照及敷设条件等。

3.1 外界大气压影响

外界大气压对不同通流情况下电缆金属屏蔽层温升的影响如图1所示。当外界温度 $T = 20^\circ\text{C}$ 时,线芯通流越大,金属屏蔽层基础温升越高;外界大气压越低,电缆与外界热交换越慢,金属屏蔽层温升越大,但总体变化不大。



注: I 为芯线流通电流,单位为A。

图1 外界大气压对电缆金属屏蔽层温升的影响

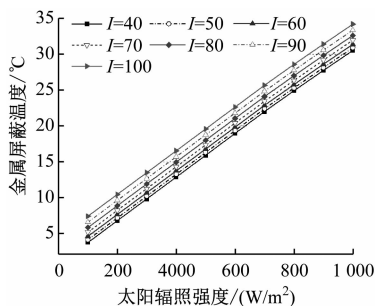
Fig. 1 Impact of atmospheric pressure on temperature rise of cable metal shielding layer

3.2 环境温度影响

当外界大气压恒定时,电缆与外界热交换效率不变,外界温度对电缆内部温升基本无影响。

3.3 太阳辐照影响

当外界气压、环境温度恒定时,不同电缆通流和辐照强度下的金属屏蔽层温升结果如图2所示。金属屏蔽层温升与辐照强度基本呈线性关系,这种



注: I 为芯线流通电流,单位为A。

图2 太阳辐照对电缆金属屏蔽层温升的影响

Fig. 2 Impact of solar radiation on temperature rise of cable metal shielding layer

关系并不受到线芯通流大小的影响,主要是由于辐射本身的热效应造成电缆温升。

3.4 敷设条件影响

不同敷设条件下,电缆与外界换热条件不同,造成电缆内部温升不同。泡水电缆换热条件最好,温升最小;沿壁电缆的换热条件和穿管电缆类似,等同于空气中换热,温升居中;直埋电缆的换热环境最差,温升最大。

4 电缆故障时温升效应

4.1 单相接地故障

由于受调压器中性点小电阻限制,贯通线电缆单相短路电流最大不超过 500 A。仿真时长为 5 s,短路电流持续时间为 0.5 s,在 COMSOL 多物理场仿真软件中得到电缆金属屏蔽层温度随时间变化曲线,如图 3 所示。初始环境温度为 20 °C,电缆金属屏蔽层在短路发生时温度开始上升,最后的温升最大值为 0.588 °C,温升不明显。

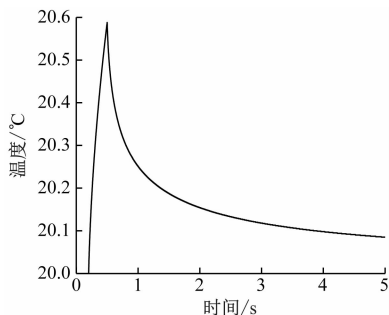


图 3 单相接地短路时电缆金属屏蔽层温升变化曲线

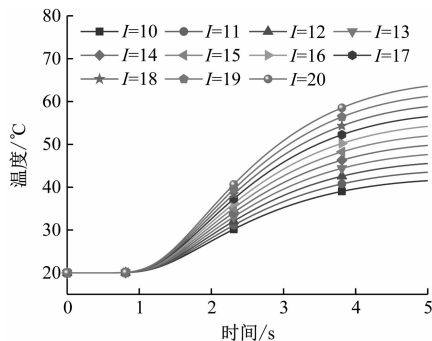
Fig. 3 Temperature rise of cable metal shielding layer in case of single-phase grounding short circuit

4.2 相间短路故障

不同电流(约为 10 ~ 20 kA)水平下,10 kV 三芯电缆相间短路时电缆金属屏蔽层温升变化情况如图 4 所示。短路从 0.2 s 开始,持续 0.5 s。由图 4 可知,由于电缆线芯与金属屏蔽层中间隔着一定厚度的绝缘层,导致温升出现明显的延迟,在短路发生 0.8 s 后,金属屏蔽层可以感受到明显的温升。

4.3 绝缘电弧击穿故障

电缆绝缘击穿电弧产生的热源用一个截面积为 20 mm² 的正方形、贯穿主绝缘的线热源等效模拟,电弧持续时间为 0.01 s。热源功率取电缆绝缘材料着火点所需的单位体积热功率,约为 7 × 10¹⁰ W/m³。分别在金属屏蔽层、绝缘层和外护套的 0.1



注: I 为芯线流通电流,单位为 kA。

图 4 三芯电缆发生相间短路时电缆金属屏蔽层温升变化情况

Fig. 4 Temperature rise of metal shielding layer in case of interphase short circuit of the three-core cable

m、0.3 m、0.5 m、0.7 m 和 0.9 m 处布置测温点,监测的温升变化情况如图 5 所示。当电缆绝缘层烧毁时,屏蔽层的最大温升为 31.89 °C,位于金属屏蔽层不同位置的测温点的温升差异很小,外护套几乎没有温升。

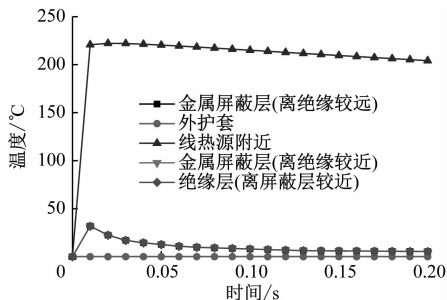


图 5 绝缘层烧毁时电缆金属屏蔽层温升变化情况

Fig. 5 Temperature rise of cable metal shielding layer in case of burnt insulation layer

4.4 电缆头接触不良故障

仿真电缆接头压接工艺缺陷导致的接头发热故障,持续发热的热源长度为 2 cm,热源中心位于电缆芯层 0.5 m 处。分别在线芯层、屏蔽层、外护套的 0.1 m、0.3 m、0.5 m、0.7 m 和 0.9 m 处布置测温点。当线芯温度达到 10 °C、20 °C、40 °C、80 °C 和 120 °C 时,电缆各层温升如图 6 所示。电缆头接触不良故障,导致的温升变化是一个存在热量持续累积效应的稳态过程,同一层不同分布的测温点,距离故障点最近测温点的温升最高;不同层测温点,距离线芯较近的金属屏蔽层测温点的温升比外护套测温点的温升高,但差异不明显。

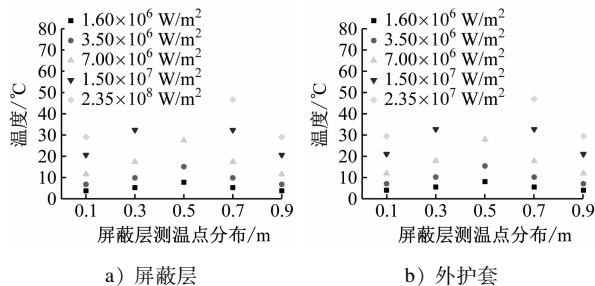


图 6 电缆头接触不良时电缆各测点的温升

Fig. 6 Temperature rise at each measuring point in case of poor cable head contact

4.5 引入牵引回流故障

牵引供电电路模型可简化为接触网与大地形成一个回路,轨道与大地形成另一个回路。当贯通线电缆的外绝缘发生破损接地时,金属铠装层和金属屏蔽层就会替大地分担铁路牵引供电回流系统中的部分电流。牵引供电系统电流从 100 ~ 1 000 A 变化时,贯通线电缆金属屏蔽层和外护套的温升变化情况如图 7 所示。随着牵引供电系统电流不断增大,金属屏蔽层和外护套的温升都逐渐增大。

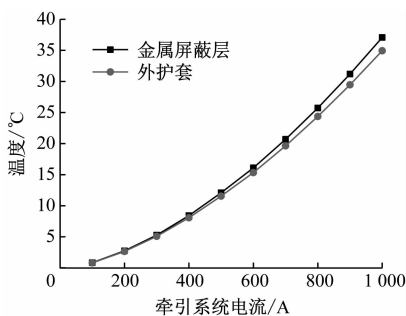


图 7 引入牵引回流时电缆金属屏蔽层温升变化情况

Fig. 7 Temperature rise of cable metal shielding layer when introducing traction return current

5 温升效应试验

采用单相调压器 + 3 000 A 升流器作为电流源,取 1 m 待测电缆,每隔 120°角在屏蔽层布设一个热电偶,并在引出端设一个热电偶;平均每隔 40 s 输入一次 500 A 故障电流,共进行 10 次,电缆金属屏蔽层的温升变化情况如图 8 所示。整个过程中,3 组屏蔽层热电偶测温点温升曲线轮廓大致保持一致,初始温度平均值为 18.83 °C,最终温度平均值为 22.64 °C,则每一次冲击引起的温升约为 0.38 °C,与图 3 仿真结果基本一致。

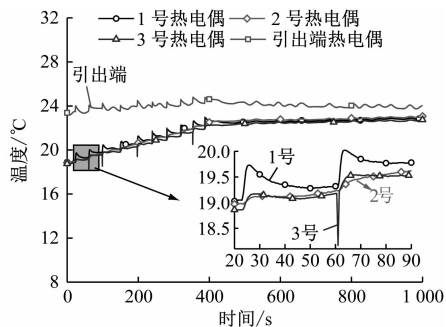


图 8 故障电流下电缆金属屏蔽层温升变化情况试验结果

Fig. 8 Temperature rise test results of cable metal shielding layer passing through fault current

取一段 5 m 截面为 50 mm² 单芯电缆,在电缆 3 个位置共布设 6 个热电偶(外护套处的编号为 1 号,屏蔽层处的编号为 2 号),试验过程中保持一处泡水,一处暴露在空气中,一处直埋于土壤之中。电缆线芯中每 0.5 h 增加 20 A 的持续通流,共持续 10 h,电流增加至 200 A,此过程中的电缆金属屏蔽层温升变化情况如图 9 所示。电缆直埋敷设时,屏蔽层温度及温升最大;暴露在空气中时,次之;泡水时,最小。

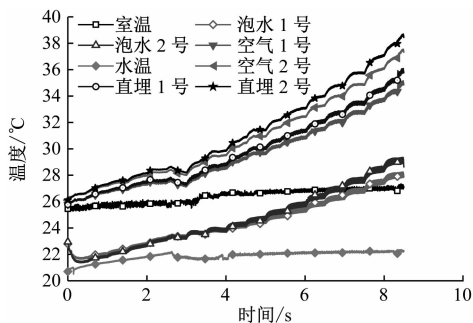


图 9 电缆不同敷设方式时电缆金属屏蔽层温升变化情况试验结果

Fig. 9 Temperature rise test results under different cable laying modes

6 结语

本文对铁路电力贯通线电缆正常和故障状态时的温升效应进行了仿真计算和试验验证,得到了不同外界条件和故障情况下电缆的温升效应,可为后续电缆状态监测提供理论依据和数据支撑。相较于电缆外护套层,金属屏蔽层靠近线芯且发生故障流经故障电流情况下,金属屏蔽层的温度更能反映电缆的运行状态,且该处温度不受大气压和环境温度影响,因此,结合光纤复合电缆和光纤测

温技术,有望实现对长大距离、敷设环境多变、故障类型复杂的电力贯通线电缆进行实时状态监测和故障判断。

参考文献

- [1] 梁永春. 高压电力电缆温度场和载流量评估研究动态[J]. 高电压技术, 2016, 42(11): 3760.
LIANG Yongchun. Technological development in evaluating the temperature and ampacity of power cables[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(11): 3760.
- [2] 张苏. 高速铁路电力电缆局部放电在线监测与模式识别[J]. 高压电器, 2020, 56(10): 104.
ZHANG Su. Power cable partial discharge monitoring and pattern recognition for high-speed railway[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(10): 104.
- [3] 徐志强, 李冰, 张海波, 等. 贯通线故障定位的区间算法研究[J]. 铁道工程学报, 2010, 27(7): 64.
XU Zhiqiang, LI Bing, ZHANG Haibo, et al. Study on the interval algorithm for locating fault of railway continuous power transmission Line[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010, 27(7): 64.
- [4] 潘文霞, 谢晨, 赵坤, 等. 计及护层环流的电缆温升分析与故障定位方法研究[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(1): 38.
PAN Wenxia, XIE Chen, ZHAO Kun, et al. Cable temperature rise analysis and fault location considering sheath circulation[J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(1): 38.

- [5] 郭文强, 张梦梦, 李清华, 等. 基于有限的电力电缆芯温度预测方法研究[J]. 电子器件, 2020, 43(1): 46.
GUO Wenqiang, ZHANG Mengmeng, LI Qinghua, et al. Research on temperature prediction method of power cable core based on FEM[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2020, 43(1): 46.
- [6] 牛海清, 郑文坚, 雷超平, 等. 基于有限元和粒子群算法的电缆周围土壤热特性参数估算方法[J]. 高电压技术, 2018, 44(5): 1557.
NIU Haiqing, ZHENG Wenjian, LEI Chaoping, et al. Estimation method for thermal parameters of soil around the cable based on finite element and particle swarm optimization[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(5): 1557.
- [7] 孙汝杨. 高速铁路全电缆电力贯通线相关研究[J]. 电气化铁道, 2021, 32(1): 29.
SUN Ruyang. Research on all-cable railway power transmission line of high-speed railway[J]. Electric Railway, 2021, 32(1): 29.
- [8] 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.
LIU Jiajun, LIU Chuang, HAN Bin, et al. A monitoring and protection device of power cable joints for the railway electrified section[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 141.

(收稿日期: 2022-12-14)

(上接第 154 页)

4) 利用有限元分析软件 ANSYS 对冻结过程中温度场的变化、冻结帷幕的形成过程进行分析, 计算出冻土交圈所需时间及有效厚度范围内的冻土平均温度。该冻结工程的冻土交圈时间为 30 d, 积极冻结时间为 45 d, 冻土平均温度达到了 -14.80°C 。计算结果与实测数据基本吻合, 误差在工程允许范围之内, 说明运用数值模拟计算冻结施工温度场是可行的, 计算所用参数是可靠的。

参考文献

- [1] 刘巍, 张进鹏, 刘立民, 等. 袁大滩煤矿风化岩土体冻结热参数及单轴压缩试验研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2019, 38(5): 31.
LIU Wei, ZHANG Jinpeng, LIU Limin, et al. Experimental study on freezing thermal parameters and uniaxial compression of weathered rock and soil in Yuandatan coal mine[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 38(5): 31.

- [2] 陈军浩, 刘桐宇, 李栋伟. 人工三圈管冻结模型试验及冻结方案研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(12): 94.
CHEN Junhao, LIU Tongyu, LI Dongwei. Study on artificial three-tube freezing model test and freeze program[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(12): 94.
- [3] 张玉伟, 谢永利, 李又云, 等. 基于温度场时空分布特征的寒区隧道冻胀模型[J]. 岩土力学, 2018, 39(5): 1625.
ZHANG Yuwei, XIE Yongli, LI Youyun, et al. A frost heave model based on space-time distribution of temperature field in cold region tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(5): 1625.
- [4] 龙小勇, 岑国平, 蔡良才, 等. 道面结构不均匀冻胀水热耦合模型试验及现场验证[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(3): 172.
LONG Xiaoyong, CEN Guoping, CAI Liangcai, et al. Hydro-thermal coupling model test and field validation of uneven frost heave of pavement structure[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(3): 172.

(收稿日期: 2021-07-10)