

# 基于温度场的单芯电缆载流量研究

谢光彬, 谢 伟

(宜宾电业局, 四川 宜宾 644002)

**摘 要:** 导体温度是电力电缆载流量幅值变化的最直接特征量, 电缆表面温度和线芯温度是反应电缆运行情况的重要参量。在简化内热源的基础上, 建立单芯交联聚乙烯电力电缆的传热模型; 通过研究稳态时电缆温度场分布, 分析温度参量之间的关系和影响载流量的因素; 基于这个传热模型, 优化影响因素, 对提高电缆安全运行的可靠性和载流量最优配置有重要的指导意义。

**关键词:** 电缆; 表面温度; 线芯温度; 实时监测

**Abstract:** The conductor temperature is the most direct characteristic for amplitude changing of the power cable ampacity. The surface temperature and conductor temperature is the important parameters representing the operating condition of the cable. The heat transfer model of the single-core crosslinked polyethylene cable is established on the basis of simplifying inner heat source. The relationship between the temperature parameters and the influencing factors of ampacity are analyzed by researching the stable temperature field distribution of cables. The influencing factors are optimized based on the heat transfer model which possesses an important guiding significance for improving reliability of the safe operation of cables and the optimal collocation for ampacity.

**Key words:** cable; surface temperature; cable-conductor temperature; real-time monitoring

**中图分类号:** TM757 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)01-0086-03

电缆正常运行时, 导体允许的长期最高工作温度决定了额定载流量的大小。导体温度是载流量幅值变化的最直接特征量。电缆导体由于电阻的焦耳热及在交变电场中的介质损耗, 传递到绝缘层、护层等, 引起表面温度变化。电缆传热过程受材料的热物性、负载、电缆铺设方式和环境条件影响。电力电缆在运行中, 过负荷、局部过热、绝缘损坏等原因会逐渐老化, 稳态温度场能反映电缆的绝缘情况和载流量。

针对电缆的稳态导热, 根据几何和物性特征, 建立传热数学模型, 研究在稳态温度场分布中, 线芯温度、表面温度、环境温度三者之间的关系和载流量的影响因素, 对提高电缆的额定载流量提出了切实可行的建议, 对提高电缆安全运行的可靠性和载流量最优配置有重要的指导意义。

2) 内热源发热均匀, 热流由里向外流。不考虑外部热源。

3) 电缆材料的热物性为常数。

4) 线芯、绝缘层及复合层之间的热接触良好, 无接触电阻。

## 1.2 单芯电缆的稳态传热模型

电缆分为线芯、绝缘层、内垫 (包括金属护套) 及外护层 (包括铠装)。对交流电缆来说, 热源包括电缆载流导体损耗、绝缘损耗、护套和铠装损耗<sup>[1]</sup>。均匀内热源以热流形式注入相邻界面节点到绝缘层、屏蔽及护层, 通过电缆表面传至外界环境。稳态下的等效热路图用集中参数表示, 如图 1。

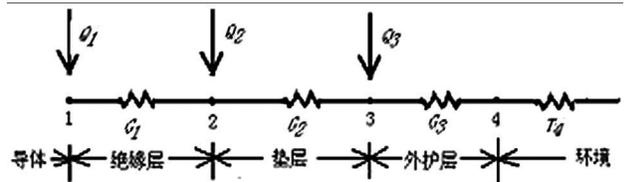


图 1 单芯电缆稳态等效热路图

用矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} G_1 & -G_1 & 0 \\ -G_1 & G_1 + G_2 & -G_2 \\ 0 & -G_2 & G_2 + G_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ 0.5Q_2 \\ Q_3 - G_3 \cdot t_4 \end{bmatrix} \quad (1)$$

## 1 传热模型

### 1.1 模型的基本假设

1) 稳态一维导热。热量的传递仅沿径向传播, 温度分布不随时间变化, 不考虑电缆分布电容对温度分布的影响。

$Q_1$  为导体损耗;  $Q_2$  为绝缘介损;  $Q_3$  为护套损耗, 包括护套涡流损耗和环流损耗;  $t_i$  是导体、绝缘、屏蔽和外护层的分界点温度;  $T_i$  是对应各层单位长度导热热阻;  $G_i = \frac{1}{T_i}$ 。

$T_i$  和  $Q_i$  根据 IEC 287 标准推荐的公式进行计算, 其结构参数应采用相应产品国家标准中的规定值。  $t_i$  可通过温度传感器紧贴电缆表面或者用红外测温仪测得。

通过上面的矩阵可以算出各个分界点处的温度值, 作为边界条件代入下面的微分方程。

具有内热源的导热微分方程 (柱坐标) 为

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \left( r \cdot \frac{dt}{dr} \right) + \frac{Q}{K} = 0 \quad (2)$$

边界条件:  $r=r_i, t=t_i$

分离变量积分两次:

$$t(r) = -\frac{Q \cdot r^2}{4\lambda} + c_1 \ln r + c_2 \quad (3)$$

代入边界条件解出两个积分常数, 对各层进行计算, 从而得到整个电缆内部的稳态传热模型。

例如线芯导体内部的温度分布函数为

$$t(r) = -\frac{Q_1 \cdot r^2}{4\lambda} \left[ 1 - \frac{r^2}{R^2} \right] + t_i \quad (4)$$

线芯中心的最高温度是

$$t(r=0) = -\frac{Q_1 \cdot R^2}{4\lambda} + t_i \quad (5)$$

## 2 环境温度、表面温度和线芯温度的关系

### 2.1 线芯温度和表面温度

由矩阵的第一、二行可见, 线芯温度和表面温度之间的温差为

$$\Delta \theta_1 = t_i - t_i = f(G_i, Q_i) \quad (6)$$

$G_i$  已经由电缆各层半径、材料及结构确定, 载流量决定热源大小, 所以  $\Delta \theta_1 = f(I)$ 。

### 2.2 表面温度和环境温度

在电缆正常运行或者过载的时候, 表面温度和环境温度相差很大, 它们之间的关系如下。

$$\Delta \theta_2 = t_i - t_i = T_i \cdot \Sigma Q_i = f(G_i, \Sigma Q_i) \quad (7)$$

从式 (7) 可以看出, 热量从电缆表面传至外界环境过程中, 外部热阻和热源共同作用于表面温度和环境温度之间的温差, 在环境温度确定的情况下, 有

$$t_i = t_i + \Delta \theta_1 = t_i + \Delta \theta_2 + \Delta \theta_1 \quad (8)$$

稳态情况下, 电缆温度场分布由环境温度、各层热阻、热源决定。

## 3 影响额定载流量的因素及提高措施

电缆正常运行时导体允许的长期最高工作温度取决于绝缘材料的电气性能和机械性能。当导体达到最高温度时的载流量, 就是电缆传输的最大连续载流量, 也称为额定载流量。对交联聚乙烯电缆,  $t_i$  最高温度为 90°C。由传热模型得

$$t_i = f(I, G_i, T_i, t_i) \quad (9)$$

针对不同的铺设方式和运行环境, 同一型号的电缆最大允许载流量也是不同的。在不同的地理环境和季节, 根据环境温度的变化, 额定载流量的大小也会随之变化。额定电缆载流量主要考虑以下几个因素。

1) 环境温度。它随地域, 气候影响, 具有一定的周期性。

2) 外部热阻。它与电缆的铺设方式 (直埋、管道铺设等)、散热机制、环境参数 (土壤类型、空气对流系数、周围温度、湿度) 有关。

3) 电缆型号。内部热阻和介质损耗受电缆设计参数及材料决定, 有无钢丝铠装, 金属护套的互联接地方式都影响热源大小。

4) 导体材料, 标称截面。导体损耗是内部热源的主要部分,  $Q_1 = I^2 \cdot R$  其中交流有效电阻随温度变化。

对电力运行部门来说, 环境温度 and 电缆内部热阻是不能改变的, 因此提高额定载流量切实可行的措施是增大外部热阻和减少热源。在电缆的铺设方式、空气对流情况等方面改进, 电缆与周围物质直接接触比紧贴墙壁或天花板, 热传递散热比大气对流散热有效的多, 比如在管道里填充介质。采用非磁性材料铠装电缆, 采用金属护套交叉互联接地都可以减少热源。

## 4 仿真计算

在传热模型的微分方程式中, 代入实验电缆的物性参数, 采用有限元分析软件 Fem lab 进行仿真, 得到稳态时的温度分布场; 分别以载流量和环境温度为变量, 验证传热模型的合理性及 3 个温度参数之间的关系; 在满足导体允许的长期最高工作温度的情况下, 拟和出不同外部热阻对应的额定载流量。

选用 8.7/15 kV YJV 1×400 mm<sup>2</sup> 交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套电缆, 以电缆屏蔽两端互连接地, 直

埋于土壤中, 额定载流量为 680 A 进行计算。

表 1 8.7/15 kV YJV 电缆结构

名称	数值
导体直径 /mm	23.8
绝缘直径 /mm	26.6
屏蔽平均直径 /mm	35.8
护层厚度 /mm	2.3
电缆外径 /mm	41.0

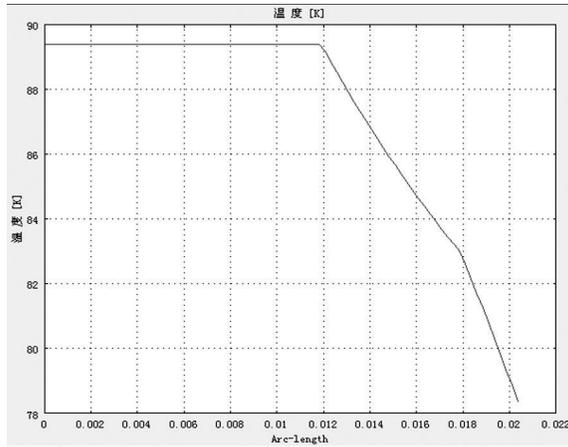


图 2 额定载流量时电缆径向温度分布

#### 4.1 环境温度

选取电缆额定载流量, 外部参数  $h$  为  $5W/m^2 \times K$  时, 环境温度改变对电缆稳态温度分布的影响。从表 2 中可以看出, 当环境温度升高时, 电缆表面温度和线芯温度随之升高, 但是温差  $\Delta\theta_1$  和  $\Delta\theta_2$  分别都是恒定的。这说明环境温度影响温度场分布, 但是并不影响温差。

表 2 额定载流量时电缆温度随环境温度变化

名称	数值				
环境温度	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0
表面温度	66.28	71.28	76.28	81.28	86.28
线芯温度	77.57	82.57	87.57	92.57	97.57
$\Delta\theta_1 / ^\circ C$	11.29	11.29	11.29	11.29	11.29
$\Delta\theta_2 / ^\circ C$	56.28	56.28	56.28	56.28	56.28

#### 4.2 外部热阻

敷设在空气中时, 外部热阻  $T_1 = \frac{1}{\pi \cdot d \cdot h}$ ,  $h$  是复合换热系数, 由电缆外半径、铺设方式和环境参数等修正。由图 3 可见, 电缆在额定载流量、环境温度为  $25^\circ C$  的情况下,  $h$  对电缆表面温度的影响成非线性。同样, 当电缆埋设在土壤中时, 土壤的热阻系数和水分是否迁移都会直接影响外部热阻。就是说, 选择恰当的铺设方式、改进电缆周围的散热等措施来减小外部热阻, 完全可以保证电缆长期运行的绝缘要求。

#### 4.3 载流量

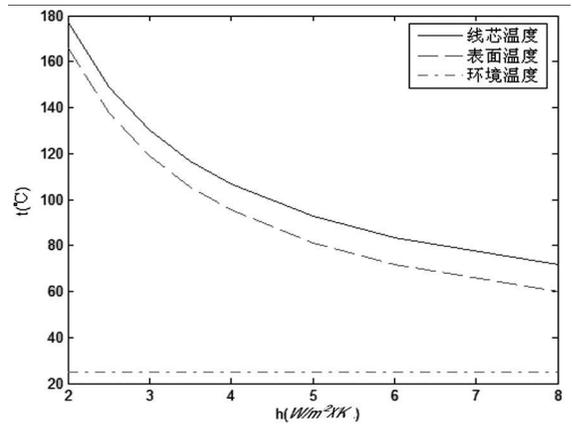


图 3 恒定载流量时电缆随  $h$  温度变化曲线

电缆铺设在空气中,  $h=5.3W/m^2 \times K$ , 环境温度为  $25^\circ C$  时, 电缆稳态温度场随载流量变化曲线如图 4。当载流量较小的时候, 表面温度更易受环境温度影响。

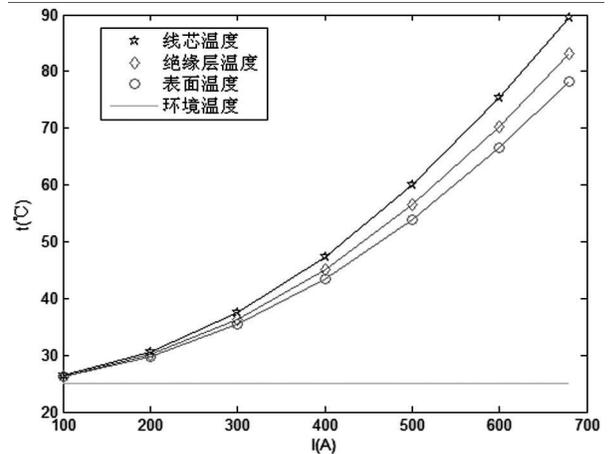


图 4 电缆温度随载流量变化曲线

## 5 结论

1) 对模型热源的简单处理, 经仿真计算验证, 可满足工程需要。

2) 电缆表面温度的测取受接触热阻, 测温传感器和后续单元的影响, 尤其是在小载流量较小的时候, 受环境温度影响较大。

3) 电缆线芯温度、表面温度和环境温度之间的关系, 通过 Fem lab 软件仿真数据得到验证。对提高额定载流量和保证电缆的安全运行有重大意义。

## 参考文献

[1] 马国栋. 电线电缆载流量 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.  
[2] 赵建华, 袁宏永, 范维澄, 等. 基于表面温度场的电缆线芯温度在线诊断研究 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19 (1): 53-54.

(收稿日期: 2009-12-10)