电力电缆温度简便计算方法的研究

电力电缆具有占地少、输电性能稳定、维护工作量小和安全性高的优点，因此被广泛使用，而电缆的温度是决定其安全与经济运行的重要因素之一，计算电缆温度可以确定电缆是否处于安全温度以及载流量是否合理。目前，电缆温度计算主要采用以经验公式为基础的IEC标准方法和计算过程复杂的数值计算方法，存在计算准确度不高或计算时间过长等问题。基于IEC－60827标准的电缆热路，提出了通过用实测温度拟合热路参数的改进模型，推导出电缆芯线温度简便计算公式，并将简便计算公式所得温度值与有限元法计算值和实验温度进行对比，验证了电缆芯线实用温度计算式的有效性。

易满成　顾春晖　叶建斌　张　宇　卢丽琴／广州供电局有限公司电力试验研究院

易满成／工程师

关键词／Keywords
电力电缆·
电缆温度·
热路模型·
有限元分析·
简便计算式·

0　引言

随着城市电网和农村电网改造工程的进行，电力电缆在电力系统中的应用日益广泛。与架空线路相比，地下电缆具有占地空间小、受外界环境因素影响小以及不影响城市美观等一系列优点。在电力电缆的运行中，温度是决定电缆载流量与安全运行的重要因素之一。设计和选用电缆时，需保证电缆各部分损耗产生的热量不会使电缆在超过额定温度状态下运行。当电缆处于过高温度工作时，将会加速绝缘材料的老化，电缆寿命也会大大缩短。如果电缆在额定温度以下运行，则能保证它可以长期地安全运行。实际运行经验表明，电缆芯线温度受周围环境因素影响较大，如同种电缆，载流量相同而处于不同的工作环境下，其温度变化很大。因此，确定电缆的温度具有重要意义。

综合目前国内外的研究现状，分析土壤温度对电缆温升的影响主要有两种方法：第一种为基于IEC－60287标准的热路计算方法；另一种为温度场的数值计算法[1]。等效热路具有计算简便但计算准确度不高的特点；数值计算法相比而言较为准确，但计算量较大且计算过程复杂。本文基于IEC－60827标准的电缆热路，提出了通过用实测温度拟合热路参数的改进模型，推导出电缆芯线温度简便计算公式，并通过有限元法和实验进行进一步验证，具有一定的实际意义。

1　拟合热路模型的基本原理

设有一单位长度、半径为R的电缆，在半径为r处取厚度为dr的微元筒壁。若在时间dτ内流入该圆筒壁的热量为dQ_i，流出微元筒壁的热量为dQ_o，微元筒壁产热dQ_p，设微元壁筒的时间dτ的温升为Δt，则

$$\Delta t=\frac{\mathrm{d}Q_i+\mathrm{d}Q_p-\mathrm{d}Q_o}{c\mathrm{d}V} \tag{1}$$

根据傅里叶传热定律，可知流出微元的热量为

$$\mathrm{d}Q_o=-\lambda\frac{\partial t}{\partial x}\mathrm{d}A\mathrm{d}\tau \tag{2}$$

式中，dA＝2πr；负号为热源传递的方向。

微元筒壁体积dV＝2πrdr，代入式（1），化简得

$$\mathrm{d}Q_i+\mathrm{d}Q_p=2\pi r\lambda\frac{\partial t}{\partial r}\mathrm{d}\tau+2\pi r\Delta t\mathrm{d}r \tag{3}$$

两边同时除以dτ，并令dQ_i/dτ＝P_i，dQ_p/dτ＝P_p，则

项目资金来源：10 kV冷缩和热缩式电缆附件在南方湿热地区的适用性研究（K－GZM2014－097）。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$P_i + P_p = 2\pi r\lambda\frac{\partial t}{\partial r} + 2\pi rc\mathrm{d}r\frac{\Delta t}{\mathrm{d}\tau} \quad (4)$$

电缆微元壁筒的暂态热路模型如图1所示。

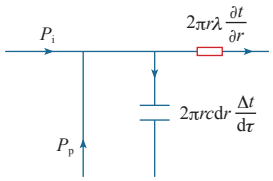

图1　电缆微元壁筒暂态热路模型

图中，$2\pi r\lambda\frac{\partial t}{\partial r}$为流入微元热阻的热量$P_R$；$2\pi rc\mathrm{d}r\frac{\Delta t}{\mathrm{d}\tau}$为存储在微元热容的热量$P_C$。

在实际应用中，需将微元模型转化为便于计算的集总参数模型。将微元圆壁筒拓展为半径r_1至r_2之间的圆壁筒（$r_1>r_2$），设r_1处温度为t_1，r_2处温度为t_2，则流经热阻的热量P_R和流经热容的热量P_C经积分可表示为

$$P_R = \frac{\int_{t_1}^{t_2}\partial t}{\frac{1}{2\pi\lambda}\int_{r_1}^{r_2}\frac{1}{r}\partial r} = \frac{t_2 - t_1}{\frac{1}{2\pi\lambda}\ln\frac{r_2}{r_1}} \quad (5)$$

式中，$\frac{1}{2\pi\lambda}\ln\frac{r_2}{r_1}$可视为$r_1\sim r_2$间热阻的集总参数$R$。

同理，存储于热容的热量P_C经积分可以表示为

$$P_C = \int_{r_1}^{r_2}2\pi rc\,\mathrm{d}r\frac{\overline{\Delta t}}{\mathrm{d}\tau} = c\pi(r_2^2 - r_1^2)\frac{\overline{\Delta t}}{\mathrm{d}\tau} \quad (6)$$

式中，$\overline{\Delta t}$为$r_1\sim r_2$之间圆壁筒在时间$\mathrm{d}\tau$内平均温升；$c\pi(r_1^2 - r_2^2)$可视为$r_1\sim r_2$间热容的集总参数C。

2　拟合热路模型的建立

2.1　简化分析对象

实验所用电缆为交联聚乙烯绝缘皱纹铝护套聚乙烯外护套纵向阻水电力电缆，电缆结构如图2所示，电缆各层所用材料如表1所示。

电缆各层材料[2]的几何参数恒定，忽略温度变化对几何参数的影响。电缆长度远大于直径，忽略轴向传热，且电缆轴对称，沿圆周方向均匀传热，只在径向存在温度梯度，将电缆热量简化为沿径向的一维热传导。导体屏蔽层、绝缘屏蔽层较薄，且热容、热阻参数与绝缘层相近，因此将两者归并到绝缘层。由于电缆铝护套层两端接地，与大地为等电位，涡流损耗忽略不计。距电缆较远处土壤温度在实验过程视为恒定值，电缆直埋时只考虑导热传热，不考虑电缆与外界环境间的对流和辐射传热。

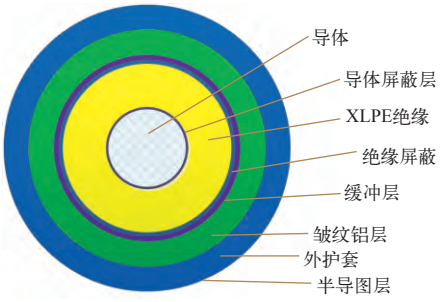

图2　电缆结构

表1　电缆材料参数

序号	项目	厚度/mm	材料名称	材料型号
1	导体	11.9	铜	—
2	导电包带	1.5	半导电尼龙带	SC37/90
	内屏蔽		超滑半导电屏蔽料	HFDA－0801
3	绝缘	17.5	超净绝缘料	HFDE4201 SC
4	外屏蔽	1	超净半导电屏蔽料	HFDA－0801
5	阻水缓冲带	3.5	半导电吸水膨胀带	GIF735
6	金属护套	2	铝带	LIM
7	外护套	4	聚氯乙烯	PVC（PE）

电缆运行时，电缆芯线温度最高，电缆载流量由芯线温度T_1决定；而电缆与外界环境导热由电缆表面温度T_2和外界温度T_0共同决定。因此在实际分析中只需要关注芯线温度、电缆表面温度和环境温度即可满足工程需求，因此将暂态热路简化为拟合法热路模型，如图3所示。

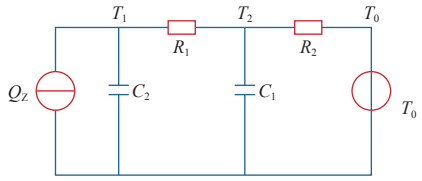

图3　拟合法热路模型

2.2　采用折算值计算

芯线热源大小正比于I^2，I为芯线电流。若计算电缆实际的发热量，将会产生一系列误差。将电缆热源大小折算为：$Q_Z = I^2/100$。在保证各节点

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

求解温度不变的前提下，求解模型中所有热阻、热容的参数。求解值为热阻、热容的实际值R、C，折算至以Q_Z为发热量下所得的折算值为R'、C'。模型参数求解时，只需要根据电流大小和实际各节点的温度求解，可以避免实际热源的计算，使模型更加精准。

3 模型参数的求解

设起始时刻各温度为T_{1_0}、T_{2_0}。图3经拉氏变换[3]后可得运算电路，如图4所示。

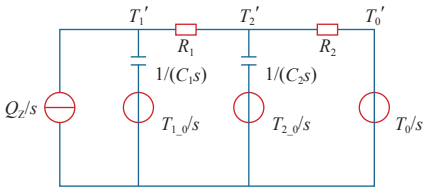

图4 运算热路模型

3.1 求解芯线温度时域表达式

节点热导矩阵$\boldsymbol{A}$为

$$\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix}\frac{1}{R_1}+C_1s & -\frac{1}{R_1} & 0\\ \frac{1}{R_1} & \frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+C_2s & -\frac{1}{R_2}\end{pmatrix} \tag{7}$$

温度矩阵$\boldsymbol{T}$为

$$\boldsymbol{T}=\begin{pmatrix}T_1'\\T_2'\\T_3'\end{pmatrix}\qquad T_3=\frac{T_0}{s} \tag{8}$$

热流矩阵$\boldsymbol{Q}$为

$$\boldsymbol{Q}=\begin{pmatrix}T_{1_0}C_1\\T_{2_0}C_2\end{pmatrix} \tag{9}$$

类比于电路节点电压方程可得

$$\boldsymbol{AT}=\boldsymbol{Q} \tag{10}$$

用Matlab求解方程，可得芯线温度频域（s）解为$T_1=F_1(C_1,C_2,R_1,R_2,s)$，电缆表面温度$T_2=F_2(C_1,C_2,R_1,R_2,s)$。调用Iaplace函数对$T_1$、$T_2$进行拉氏反变换可得电芯线时域（$t$）解为$T_1=F_1(C_1,C_2,R_1,R_2,s)$，$T_2=F_2(C_1,C_2,R_1,R_2,s)$。

3.2 计算折算热阻热容

若已知模型各节点的起始温度为T_{1_0}、T_{2_0}和T_0，t时刻芯线、电缆表面和土壤温度分别为T_1、T_2和T_0。将节点起始温度T_{1_0}、T_{2_0}和T_0代入函数$T_1'=F_1(C_1,C_2,R_1,R_2,s)$、$T_2'=F_2(C_1,C_2,R_1,R_2,s)$中，得到以时间$t$为序列，$C_1$、$C_2$、$R_1$和$R_2$为未知数的方程组。方程组是方程的个数为$2t$，未知量为4个的超定方程。求解超定方程，得到芯线温度与时间函数表达式$T_1=f_1(t)$，电缆表面温度与时间函数表达式$T_2=f_2(t)$。

4 简便计算公式的确立

设电缆芯线稳定温度为T_{1_∞}，由上述所建的电缆热路模型可知

$$\frac{T_{1_\infty}-T_0}{\sum_{i=1}^{n}R_i}=Q \tag{11}$$

式中，T_{1_∞}为芯线稳态温度；T_0为土壤温度；$\sum_{i=1}^{n}R_i$为芯线至土壤温度测量点间总的等效热阻；Q为电缆总发热量。

设$Q=kI^2$，当不考虑温度对电缆的物理参数影响时，将k、$\sum_{i=1}^{n}R_i$视为常数。则式（11）化简为

$$T_{1_\infty}=\sum_{i=1}^{n}R_ikI^2+T_0 \tag{12}$$

由式（11）可见，电缆芯线温度与芯线电流的二次方I^2、环境温度T_0呈线性相关。若选取某电流为基准，则可计算电缆在不同电流、环境温度下的稳态简便计算表达式为

$$T=K_{T_1}\Delta T_1+T_0 \tag{13}$$

$$K_{T_1}=\frac{I^2}{I_0^2} \tag{14}$$

式中，K_{T_1}为预估温差比例；I_0为基准电流；I为实际施加电流；ΔT_1为施加基准电流时，芯线稳定温度与环境的温差；T_0为电缆运行环境温度。

5 简便计算公式的验证

设置求解区域边界温度恒定为T_0，并假设模型各层有相同的起始温度T_0。求解得到稳态温度分布云图如图5所示。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

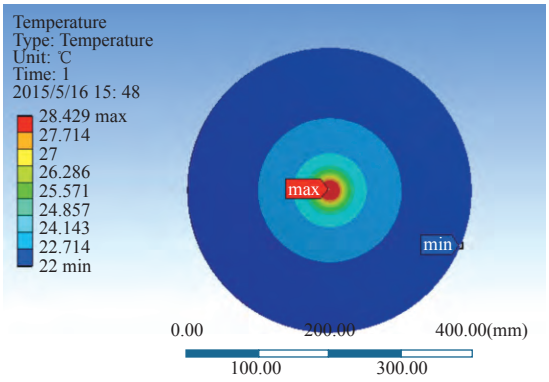

图5 稳态温度分布云图

给电缆施加不同的电流，并使其处于不同的土壤温度。分别用有限元法[4]和简便计算式计算电缆芯线温度。将简便计算式计算结果与Ansys数值计算结果对比，比较两者之间的差异，验证简便计算表达式的有效性。

用有限元法计算得到电缆芯线温度如表2所示。

表2 电缆仿真温度

序号	电流/A	土壤温度/℃	芯线计算温度/℃
1	1 000	40	53.116
2	1 000	30	43.116
3	1 000	20	33.116
4	700	40	46.427
5	700	30	36.427
6	700	20	26.427
7	400	40	40.098
8	400	30	32.098
9	400	20	22.098

选择表2中序号1作为计算的基准公式。应用式（13）、式（14）可得此电缆模型在不同土壤温度、不同加载电流下芯线温度稳态计算公式，即

$$T_1 = \frac{I^2}{1000^2} \times 13.116 + T_0 \qquad (15)$$

式中，T_1为芯线稳态温度；I为电缆加载电流；T_0为土壤温度。

将表2中2～9号电缆加载电流大小、土壤温度代入式（15）中，可得计算电缆稳态温度如表3所示。

表3 公式计算温度值

序号	电流/A	土壤温度/℃	有限元计算值/℃	公式计算值/℃	差值/℃
2	1 000	30	43.116	43.116	0
3	1 000	20	33.116	33.116	0
4	700	40	46.427	46.426	0.01
5	700	30	36.427	36.426	0.01
6	700	20	26.427	26.426	0.01
7	400	40	40.298	40.098	0.2
8	400	30	32.098	32.098	0
9	400	20	22.098	22.098	0

由表3中差值一列可见，采用实用表达式所得计算值与仿真值十分接近，可以证明实用表达式的有效性，同时表明电缆温度与土壤温度呈线性相关。

6 结束语

本文结合实际研究电缆温度简便计算方法，通过简化热路模型推导出电缆芯线温度的实用表达式，并将计算结果与有限元计算值、实验值进行对比，验证了计算方法的有效性。通过此简便计算方法可以大大地缩短计算电缆温度的时间，提高电缆温度计算的准确性。

参考文献

[1] 陶文铨．数值传热学 [M]．西安：西安交通大学出版社，1995．

[2] 刘子玉，王惠明．电力电缆结构设计原理 [M]．西安：西安交通大学出版社，1995．

[3] 雷鸣，刘刚，等．采用 Laplace方法的单芯电缆线芯温度动态计算 [J]．高电压技术，2010，36 (5)：1150-1155．

[4] 曹惠玲，王增强，李雯靖，等．坐标组合法对直埋电缆与土壤界面温度场的数值计算 [J]．电工技术学报，2003：59-63．

（收稿日期：2015－12－10）EA

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net