

doi:10.13756/j.gtxyj.2016.02.010

光纤光缆技术与应用

光电复合海缆载流量计算参数修正算法

陈相至, 安博文

(上海海事大学, 上海 201306)

摘要:介绍了一种通过有限元软件进行温度场建模计算载流量的方法。对温度场建模时,由于材料参数的不确定性,会导致建模结果存在误差,文章提出一种根据弦截法原理来修正载流量计算参数的算法,通过与分布式光纤传感测温设备获得的实测数据比对,得出参数修正后的误差小于修正前,验证了该算法的有效性。

关键词:海缆;采油平台;载流量;温度场建模

中图分类号:TN818

文献标志码:A

文章编号:1005-8788(2016)02-0030-03

An Algorithm for Correcting Optic/electric Composite Submarine Cable Ampacity Calculation Parameters

CHEN Xiang-zhi, AN Bo-wen

(Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: This paper describes a method to calculate the ampacity through thermal modeling using finite element modeling software. In the thermal modeling, the uncertainty of material parameters may cause error. In order to reduce the error, we propose an algorithm to amend the ampacity calculation parameters according to the principle of secant method algorithm. By comparing with the real data measured by the distributed optical fiber sensing temperature measurement equipment, the error of corrected data is less than that of uncorrected data, which confirms the validity of the algorithm.

Key words: submarine cable; oilplatform; ampacity; thermal modeling

0 引 言

为了确保光电复合海缆的使用寿命,预防海缆发生过热故障,业界制定了最大载流量来保证其寿命和可靠性,且海缆的长期最高工作温度不能超过 90°C ^[1]。海缆的载流量与其导体温度有着密不可分的关系,想要最大限度地发挥海缆传输电能的能力,需在不超过其长期工作温度的情况下,尽量提高工作电流(即载流量),因此载流量的计算有着重要的意义。

1 载流量计算现状

1985 年,IEC(国际电工委员会)发布了标准 60287 来计算电缆的载流量^[2],但该标准只能对特征代表性下运行状态的载流量进行计算。为解决这一问题,人们通过有限元建模软件模拟电缆结构进行温度场建模来获取其载流量。相较于标准 IEC60287,该方法可以对复杂多样的敷设环境进行模拟,突破了它的局限性。

求解载流量的数值计算方法有两种,即有限差分法^[3]和有限元法^[4]。有限差分法需对每一个节点写出微分方程,并且在处理偏微分方程上,使用差分

方程代替,由此建立线性方程组。有限差分法在处理简单问题上效率很高,历史上最初采用此方法来解决简单几何形状中的流动与换热问题。

相较于有限差分法,有限元法更适合处理复杂边界条件及多载荷的情况。随着计算机技术的普及,有限元分析在热传导、电磁学和应力分析等工程应用中崭露头角,许多大型的有限元分析软件也应运而生,如 ANSYS、ABAQUS 等。本文将介绍一种利用 ANSYS 软件计算载流量的方法^[5]。

2 有限元建模计算载流量

有限元建模计算载流量的主要步骤如下:根据海缆结构参数与敷设环境,建立复合海缆几何模型;输入海缆各组成材料的物理性能参数;对海缆进行网格划分,建立复合海缆的有限元模型;根据海缆的敷设环境条件,设置环境温度取值范围为 $[T_1, T_2]$,温度间隔为 ΔT ;对流换热系数的范围为 $[h_1, h_2]$,间隔 Δh ;设定初始环境温度 T 为 T_1 ,初始对流换热系数 h 为 h_1 ;设定海缆工作电流 I 的初始值为 I_0 ;输入 I 、 T 和 h ,通过 ANSYS 软件建模获取温度场分布^[6],得到光纤温度 T_0 与导体温度 T_c ;判断 $|T_c - t|$ 是否大于 ϵ , t 为海缆绝缘材料允许持续工作的最高

温度值, ϵ 为实际工程所允许的误差; 判断 $T_c - t$ 是否大于 0, 并根据结果调整 I_0 值; 取最后符合条件的工作电流 I 为此环境条件下的载流量 I_z 。

上述方法有效地解决了标准 IEC 60287 的局限性, 能够根据季节和环境变化灵活地计算海缆的载流量, 最大限度地发挥其传输电能的能力。但建模所用的海缆组成材料参数、环境温度以及对流换热系数等边界条件的不准确均会导致误差, 虽然环境温度、对流换热系数等因素均为变量, 但可通过外接仪表测得, 因此获得准确的海缆组成材料参数至关重要。

3 参数修正算法

3.1 参数选取及修正条件

在温度场建模中, 海缆材料的物理性能参数主要包括: 材料密度、材料比热容和导热系数, 其中导热系数对热稳态分析结果影响较大。

考虑到边界条件以及材料参数过多导致的复杂性, 首先选取对结果影响较大的填充层以及外披层的导热系数进行误差分析, 暂时忽略影响较小的其他因素。填充层导热系数取值范围为 $[0.135, 0.315]$ (单位为 $W/(m \cdot ^\circ C)$), 在其他条件一定的情况下, 改变填充层的导热系数 K , 通过 ANSYS 建模输出结果, 得到光纤温度 T 。

令 $T = f(K)$, 实际光纤温度值为 T_0 , 则修正参数的条件为: 判断 $|T - T_0|$ 的值是否在允许误差范围内, 误差限为 ϵ , 若 $|T - T_0| \leq \epsilon$, 则 K 为准确值; 若 $|T - T_0| > \epsilon$, 则修正 K 值, 重新建模获取新的 T 值, 重复上述步骤, 直至 $|T - T_0| \leq \epsilon$ 。

由于 $T = f(K)$ 的具体形式无法得知, 可通过建模获取各个节点的函数值来修正参数, 其参数修正流程图如图 1 所示。

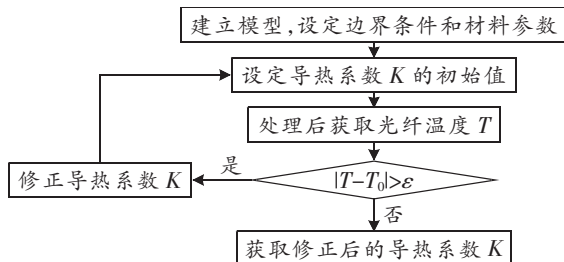


图 1 参数修正流程图

3.2 弦截法

令 $g(K) = f(K) - T_0$, 上述问题可转化为求解方程 $g(K) = 0$ 时的解。考虑到 $f(K)$ 的未知性, 利用弦截法进行迭代求解^[7]。

利用 $f(x_k)$ 、 $f(x_{k-1})$ 构造一次插值多项式 $p_1(x)$, 并用 $p_1(x) = 0$ 的根作为 $f(x) = 0$ 的新的近似根 x_{k+1} 。由于

$$p_1(x) = f(x_k) + \frac{f(x_k) - f(x_{k-1})}{x_k - x_{k-1}}(x - x_k), \quad (1)$$

式中, x_k, x_{k-1} 为 $f(x) = 0$ 的近似根, 因此弦截法的迭代公式为

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{f(x_k) - f(x_{k-1})}(x_k - x_{k-1}), \quad (2)$$

式中, x_{k+1} 为迭代后近似根, 其弦截法几何意义如图 2 所示, 曲线 $y = f(x)$ 上横坐标为 x_k, x_{k-1} 的点分别记为 P_k 和 P_{k-1} , 则弦线 $\overline{P_k P_{k-1}}$ 的斜率等于差商值 $\frac{f(x_k) - f(x_{k-1})}{x_k - x_{k-1}}$ 。

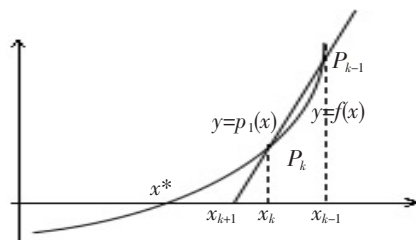


图 2 弦截法几何意义

因此, 按式(2)求出的 x_{k+1} 实际上是 $\overline{P_k P_{k-1}}$ 与 x 轴交点的横坐标。

若设每次修正后的参数为 $K_i (i = 0, 1, 2, \dots)$, 迭代形式如下:

$$K_{i+1} = K_i - \frac{g(K_i)}{g(K_i) - g(K_{i-1})}(K_i - K_{i-1}) = K_i - \frac{f(K_i) - T_0}{f(K_i) - f(K_{i-1})}(K_i - K_{i-1}), \quad (3)$$

式中, K_{i+1} 为修正后参数值, $f(K_i)$ 为 K_i 时的建模温度值, T_0 为实际温度值, $g(K_i)$ 为建模输出温度与实际温度之差。由于参数在允许的误差范围内即可, 因此只需要当 $|f(K_i) - T_0| \leq \epsilon$ 时, 即可停止迭代。

3.3 利用分布式光纤传感技术获取光纤温度

进行参数修正的标准即建模获取的光纤温度与实际测得的光纤温度值是否在误差范围内。而获取光纤温度的实测值需要用到分布式光纤传感技术, 目前分布式光纤传感器主要有拉曼光纤传感器和布里渊光纤传感器两类, 其中, 布里渊散射对温度的灵敏度较高, 散射强度较强。因此实验采用 BOTDA (布里渊光纤时域分析) 技术对温度进行测量^[8]。

3.4 实验结果及分析

在实验室中, 设置水槽温度即环境温度为 $20^\circ C$, 通过大电流发生器调节输入电流, 分别对工

作在 500 和 700 A 电流下的海缆进行分析。对于导热系数初始值,在 $[0.135,0.315]$ 范围内随机选取,实验中选取 $K_0=0.15$,误差限 $\epsilon=0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。分别用 $f_1(K)$ 、 $f_2(K)$ 表示 500 和 700 A 电流下的光纤温度 T 值,对应光纤实际温度分别为 19.378、22.169 $^{\circ}\text{C}$,代入式(2)得到迭代表如表 1 和表 2 所示。

表 1 电流为 500 A 的迭代表

迭代次数	K	$f_1(K)$	$ f(K_i)-T_0 $
0	0.150	19.625	0.247
1	0.196	19.423	0.045
2	0.210	19.379	0.001

表 2 电流为 700 A 的迭代表

迭代次数	K	$f_2(K)$	$ f(K_i)-T_0 $
0	0.150	22.648	0.479
1	0.195	22.258	0.089
2	0.210	22.171	0.002

可以看出电流在 500 和 700 A 的情况下,迭代两次即可达到精度要求,误差在 0.01 $^{\circ}\text{C}$ 以下。数值准确的收敛于 0.210 W/(m· $^{\circ}\text{C}$)。表 3 为参数修正前后以及实际光纤温度数据表。在其余边界条件稳定的情况下,将修正后和修正前的数值分别代入 ANSYS 建模分析,并通过 MATLAB 软件做出不同导热系数下光纤温度 T 与电流 I 的散点图,对比实际温度做误差分析。修正前后数据表及散点图分别如图 3、图 4 所示。

表 3 参数修正前后以及实际光纤温度数据表

输入 电流/A	修正前光纤 温度/ $^{\circ}\text{C}$	修正后光纤 温度/ $^{\circ}\text{C}$	实际光纤 温度/ $^{\circ}\text{C}$
100	16.602	16.587	16.587
200	16.980	16.935	16.935
300	17.609	17.517	17.516
400	18.491	18.331	18.330
500	19.625	19.379	19.378
600	21.011	20.657	20.655
700	22.648	22.171	22.169
800	24.609	23.914	23.911
900	26.679	25.891	25.888
1 000	29.073	28.101	28.097

由图 3、图 4 可看出,当输入电流较低时,填充层的导热系数对温度影响较小,随着电流增大,误差也不断增大。而参数修正后,误差也随着电流的增加而增加,但上升速度比修正前有明显的降低,当电流增加到 1 000 A 时,误差依然稳定在较小值。验证了该参数修正方法的有效性。

利用得到的新参数值建立复合海缆几何模型,进行温度场建模,获取光纤温度与铜芯温度的映射

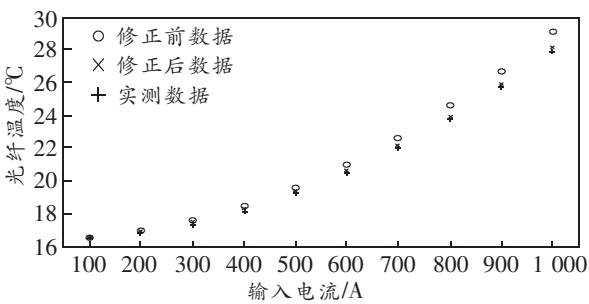


图 3 参数修正前后数据及实测数据散点图

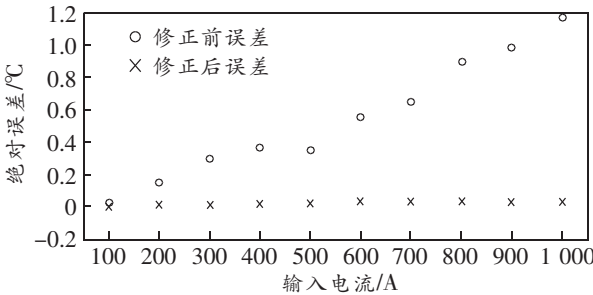


图 4 修正前后误差对比散点图

表。依据有限元建模计算载流量的方法可得到更为精确的值。

4 结束语

利用有限元建模和 BOTDA 实测海缆光纤温度数据,采用弦截法迭代修正得到的参数值,通过与实际数据对比,进行误差分析,验证了该算法的有效性。该算法能够提高海缆载流量计算的准确性,且易于实现,能够更好地保障海缆高效、安全地运行。

参考文献:

[1] 周腊吾. 电线电缆技术(1)电线电缆材料的种类及应用 [J]. 大众用电,2013,(10):43—45.

[2] IHS. IEC 60287-1-2001, Calculation of the current rating-part1:current rating equations (100% load factor) and calculation of losses [S].

[3] 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, 2003,18(3):59—63.

[4] 孟凡凤,李香龙,徐燕飞,等. 地下直埋电缆温度场和载流量的数值计算 [J]. 绝缘材料,2006,39(4):59—61.

[5] 李毅,安博文,陈元林,等. 复合海缆载流量计算方法: 中国,2013102085851 [P]. 2013-10-02.

[6] 刘频频. 复合海缆在线监测系统温度场建模 [D]. 上海:上海海事大学,2013.

[7] 李菊,余加丽,覃燕梅,等. 弦截法在非线性方程组的推广 [J]. 保山学院学报,2012,(5):53—55.

[8] 钟丽娜,王晓峰,安博文. 基于 BOTDA 技术的电缆温度监测 [J]. 电子设计工程,2012,20(2):88—89.