

10 kV 及以下电缆附件的数值计算和应力锥优化辅助设计

李喆¹, 贾贤², 尹毅¹

(1. 上海交通大学电气工程系, 上海 200030; 2. 上海飞航电力器材有限公司, 上海 201600)

Assistant Design of Numerical Calculation and Electrical-stress-optimizing on Cable Accessories up to 10 kV

LI Zhe¹, JIA Xian², YIN Yi¹

(1. School of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;
2. Shanghai Feihang Electrical Equipment Ltd., Shanghai 201600, China)

摘要: 对电缆附件的复杂结构进行数值计算, 并通过计算结果对应力锥形状进行优化设计, 从而改善附件场强集中部分的电场分布, 提高电缆附件的使用寿命。开发的软件包对不同的应力锥形状下的场强采用有限元方法进行计算并提供以下功能: 画出任意电位的等位线; 用不同颜色填充附件内部, 通过颜色深浅显示场强大小; 对附件内部任意一点提供用鼠标点击显示该点坐标、该点电位和该点场强; 给出整个附件内部区域切向场强和径向场强的最大值和坐标值。

关键词: 有限元; 电缆附件; 应力锥; 切向场强; 径向场强
中图分类号: TM151 文献标识码: A

Abstract: The complex structure of electric cable accessory is calculated by finite element method. In order to improve the distribution of electric field and increase the operating life of electric cable accessory, optimization designing of stress cone shape has been carried out based on the calculation results. This software package can calculate electric field in different stress cone shape by finite element method, and can present following functions: drawing equi-potential line; displaying electric field value with different color; displaying coordinate, voltage and electric field value of any point pointed by mouse; displaying maximum and minimum of the tangential and radial electric field in whole area.

Key words: finite element method; power cable accessory; electric stress cone; tangential field; radial field

0 引言

随着计算技术的飞速发展, 有限元计算方法在各个工程领域得到了广泛的运用, 特别在电磁场领域。运用电磁场有限元计算方法计算各种复杂结构的

电磁场分布的软件包相继推出, 这些软件包各有各的特点、各有各的功能, 它们解决了很多实际工程中无法直接测量而必须用数值计算方法计算的问题。有限元计算方法是一门过程十分复杂的科学, 在计算时需要针对不同的边界条件和拓扑条件, 并且按照不同的工程需要给出不同的功能。因此, 根据不同的计算要求和工程目的, 各种不同实物结构和不同功能的软件包相继推出。介绍了所开发软件包的各个功能块, 并且对电缆附件应力锥的不同形状进行优化设计。在实际的生产过程当中, 由于生产的工艺问题, 优化的结果并不一定能实现, 结合工艺问题提出了一些电缆附件开发, 特别是应力锥形状方面的建议。

1 电缆附件软件包的研制与功能

1.1 有限元方法的实现

有限元方法的计算过程分为几个部分: ①前处理(剖分、边界条件的确立、有限元方程的建立); ②计算(调整刚度矩阵、解方程); ③后处理(画等位线、计算场强)。图1为软件流程图。

输入电缆附件的尺寸参数和电缆绝缘与附件绝缘的介电常数; 计算机进行网格剖分(采用三角形剖

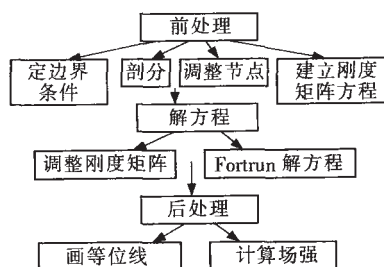


图1 有限元计算软件流程图

收稿日期: 2006-03-08

作者简介: 李喆(1978-), 男, 博士研究生, 主要从事高电压工程与电气绝缘技术研究工作。

分方法);建立有限元方程的刚度矩阵[K];调整刚度矩阵;采用LDT方法解方程,得到各节点电压值。利用插值函数^[1]:

$$U=a_1+a_2x+a_3y$$

其中: a_1 为一常数; $a_2=E_x=\sum_1^3 b_i$; $a_3=E_y=\sum_1^3 c_i$; b_i, c_i 为单元的三顶点按逆时针顺序的径向、切向坐标差值,可求得各单元的切向和径向场强分别为 E_x 和 E_y ,合成场强即为它们的矢量和。通过式(1)可得到任一点(x, y)的电位值。按横坐标 x 取等间隔的值 ($x=5, 10, 15 \text{ mm}, \dots$), 可由式(1)对给定的 U 值解出 y 值, 这样即可得到一系列给定电位的坐标, 通过拟合的方法连成等位线。

1.2 本软件的功能

本软件包的功能主要是根据电缆附件设计人员最关心的几个要素来给出的。软件包利用 Visual Basic 6.0 嵌套 Fortran 生成的动态链接“.DII”程序开发而成, 其中的 Fortran DII 程序(即前面提到的 LDT 方程解法)作为一个动态链接库供主程序调用, 它只完成解方程的功能, 这充分发挥了 Fortran 语言的优越性。界面的设计和功能的开发完全由 Microsoft 公司的 Visual Basic 强大的面向对象功能完成, 功能界面见图 2。

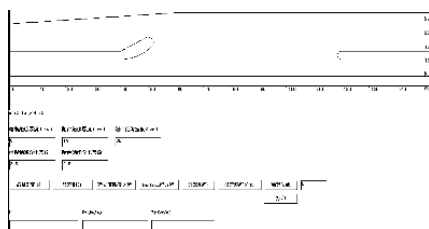


图2 软件包功能显示图

这样既能得到人性化的设计, 又保证了计算的高效率。当程序计算完成, 点击“计算场强”, 每个单元的切向场强和径向场强都通过插值函数进行计算, 并存储在内存当中。在界面的 Text 控件上显示出最大切向场强值、该场强值的坐标位置和该位置的径向场强值。这样附件设计人员可直接判断最大场强值是否超过绝缘的耐受场强, 并且知道最大场强出现的区域。点击“显示场强分布”按钮, 计算机则会按照场强的大小由深到浅匹配上不同的颜色填充三角形单元, 设计人员可直接看出场强集中的部分。如果希望知道某一点的确切场强和电位, 则只要用鼠标点击该点即可显示该点确切的坐标、切向场强、径向场强和确切电位, 提高了设计人员的效率, 而且直观方便。点击“画等位线”, 即可在计算机上显示 5%、10%、15%~95% 线电压电位的等位线。从等位线的分布上, 设计人员也能看出场强集中的区域, 等位线密的地方场强高, 疏的地方场强低。中间接头的等位线分布见图 3。

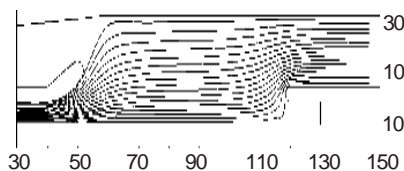


图3 中间接头等位线分布图

2 不同应力锥形状下电缆附件的电场分布及优化

电缆附件主要有电缆终端和电缆中间接头盒。通过计算, 发现没有应力锥的附件的最高切向场强可达到 $3 \times 10^6 \text{ V/m}$ 以上, 这已达到空气击穿场强, 如果在安装的时候电缆本体绝缘与附件绝缘接触不够紧密而存在空气间隙的情况下, 很有可能出现沿绝缘界面的放电击穿现象; 而有应力锥的附件在同样位置的最高切向场强却只有大约 $1 \times 10^5 \text{ V/m}$, 这样避免了绝缘界面的放电现象。然而从计算结果中发现, 电缆附件中间连接盒的结构比较复杂, 设置了应力锥的连接盒, 最高切向场强并不出现在两边的应力锥区域, 而是出现在中间的屏蔽管区域, 所以屏蔽管的形状对电缆附件的影响也不可忽视。实际使用当中, 很少有人去关心屏蔽管区域的场强, 然而从计算出来的结果显示, 屏蔽管区域的最高场强也可达到 $1 \times 10^6 \text{ V/m}$ 的数量级, 这对于硅橡胶绝缘来说应该不会造成击穿^[2]。但是如果从电缆附件的使用寿命上来考虑, 这个场强不容忽视, 因为它会加速硅橡胶绝缘的电老化, 最终导致附件本体绝缘的击穿, 从而加速电缆附件寿命的快速终结。由此可见, 电缆附件屏蔽管部分的形状改善应该值得仔细研究。

以下是用该软件包计算的几种带有不同形状的屏蔽管的电缆附件的电场分布, 从计算的结果可以发现最高场强的值是不一样的。一种是在内半导体层使用半圆弧作为屏蔽管形式, 见图 4(a); 另一种为 1/4 圆弧向上翘的屏蔽管, 见图 4(b); 还有一种是 1/4 圆弧向下弯曲的形式见图 4(c)。在实际的生产工艺上往往很难实现小弧度的设计生产, 电缆附件内电极与金属连接盒之间存在空气间隙(此处的空气间隙处在一个法拉第笼当中)也不可避免, 那么如何改善屏蔽管的形式, 使得等位线的分布在此区域

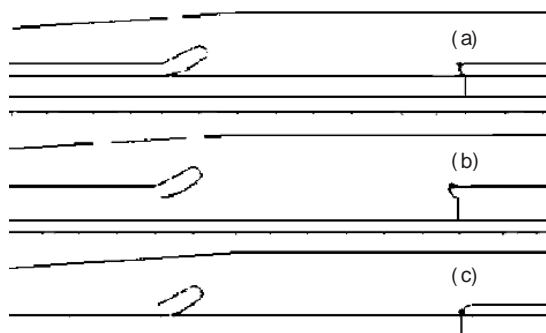


图4 不同屏蔽管形式设计比较

能够更稀疏是值得探讨的问题。由表 1 可知,图 4 (c) 作为中间半导电层的应力锥时最大切向场强的值最小,图 4(b) 的值最大,然而作为工艺上的实现来说,更多的生产厂家把这部分设计成图 4(a) 或图 4(b) 的形状。国外很多电缆附件厂家也常常用一个很简洁的方式处理,即把中间的半导电层两头削成一个锐角,其实那样并不能够改善场强,只是一种经济上的处理。如果更科学地考虑电缆附件的使用寿命,那么屏蔽管形式应该引起大家的重视。

表 1 3 种不同屏蔽管形式的电缆附件最高场强的比较

	$E_{\text{max}}/(V \cdot m^{-1})$	坐标/mm	$E_r/(V \cdot m^{-1})$
(a)	1.878×10^6	(118.47, 10.89) A 点	2.920×10^6
(b)	2.624×10^6	(117.23, 12.90) B 点	1.664×10^6
(c)	1.340×10^6	(120.33, 11.20) C 点	6.733×10^5

E_{max} ——最大切向场强 坐标——最大切向场强处的坐标位置
 E_r ——该位置的径向场强 (a), (b), (c)——分别为图 4 所示的应力锥形状的附件类型

3 电缆附件尺寸设计要求

不同电压等级的电缆附件在设计时需要考虑各尺寸参数的匹配问题。应力锥与屏蔽管的距离是一个不可忽视的参数,见图 5。表 2 列出了当 d 分别取

80, 50, 35 cm 时点 A 与 B 的场强大小。由此可见, d 值减小会使得应力锥和屏蔽管附近的场强值增加。因此,在电缆附件设计时不能为了节省用料而缩短 d 的值。当然,无谓的增大 d 的值也是不科学的。在电缆附件行业里, d 值有专门的标准规定,不同电压等级的冷缩预制式电缆附件 d 值都有所不同。

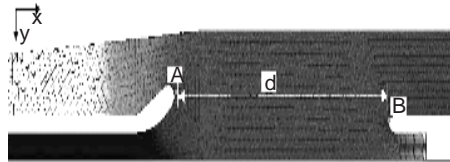


图 5 电缆附件场强分布(场强大小随颜色由深到浅显示)

表 2 取不同 d 值时 A, B 点的场强大小比较

d/cm	A 点场强 $/(V \cdot m^{-1})$	B 点场强 $/(V \cdot m^{-1})$
80	3.287×10^5	1.084×10^6
50	3.369×10^5	1.098×10^6
35	3.760×10^5	1.148×10^6

参考文献:

- [1] 盛剑霓. 工程电磁场数值分析 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1999.
- [2] 江 汛, 王仲奕. 复合高压套管的电场计算和分析 [J]. 高压技术, 2004, 30(3): 17-21.
- [3] 游一民, 陈德桂, 孙志强, 等. 基于动态分析的永磁机构最佳设计参数的选择 [J]. 电工电能新技术, 2004, 23(1): 43-46.
- [4] 钱家骊, 徐国政, 奚晓峰. 中压断路器用永磁机构中线圈不同布置的分析 [J]. 高压电器, 2000, 36(2): 25-28.
- [5] 胡 双, 左全璋, 左才科. 永磁操动机构设计参数的调整 [J]. 华通技术, 2003(4): 3-6.
- [6] E. Dullni, H. Fink, M. Heimbach, et al. A Family of Vacuum Circuit Breakers with Worldwide Applications Using Common Components [C]// 16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, IEE Conf. Publ. No. 482, London, 2001.
- [7] 马少华, 王季梅. 72.5 kV 高压真空断路器永磁操动机构的研究与设计 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 109-114.
- [8] 朱学贵, 王毅. 为提高分闸能力的永磁操动机构的研究与设计 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(7): 163-168.
- [9] 王双红, 周理兵. 永磁操作机构电磁设计及其动态特性分析 [J]. 华中科技大学学报, 2003, 31(5): 75-77.
- [10] 林 莘, 高会军, 铁 韧. 永磁操动机构磁场数值计算 [J]. 高压电器, 2000, 36(3): 3-6.
- [11] 林 莘, 徐建源, 高会军. 永磁操动机构动态特性计算与分析 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(6): 85-88.
- [12] 胡 双, 左全璋, 左才科. 永磁机构计算方法的改进 [J]. 低压电器, 2003(1): 10-13.
- [13] 李 岩, 王胜辉, 林 莘, 等. 真空断路器永磁机构计算与分析 [J]. 高压电器, 2003, 39(1): 34-36.
- [14] LIU Fugui, GUO Hongyong, YANG Qingxin, et al. An Improved Approach to Calculate the Dynamic Characteristics of Permanent Magnetic Actuator of Vacuum Circuit Breaker [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2004, 14(2): 1918-1921.
- [15] Kyung Il Woo, Byung Il Kwon. Characteristic Analysis and Modification of PM-type Magnetic Circuit Breaker [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(2): 691-694.
- [16] Philippe Wendling, Vincent Leconte, Patrick Lombard, et al. 3D Motion in Magnetic Actuator Modelling [C]// 39th IAS Annual Meeting, Industry Applications Conference, Seattle: 2004(3): 2105-2110.
- [17] 张俊民, 徐国政, 钱家骊, 等. 一种永磁操动机构的智能控制与电子驱动装置的研制 [J]. 高压电器, 2003, 39(1): 27-29.
- [18] 黄瑜珑, 王静君, 徐国政, 等. 配永磁机构真空断路器运动特性控制技术研究 [J]. 高压电器, 2005, 41(5): 321-323.
- [19] 梁慧敏, 翟国富, 罗福彪. 基于有限元法的极化磁系统永磁回复线起始点的虚拟设计 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(9): 148-152.
- [20] Li Z, Renforth L A, Auckland D W, et al. Computer Aided Optimal Design of Magnetic Actuator for Autorecloser Application [C]// Fifth International Conference on Trends in Distribution Switchgear: 400 V ~ 145 kV for Utilities and Private Networks, Conf. Publ. No. 459, IEE, London, 1998.
- [21] 孙海涛, 陈德桂, 李兴文, 等. 真空断路器永磁操动机构的三维有限元分析 [J]. 电工技术杂志, 2001(7): 8-10.
- [22] 李 岩, 王胜辉, 林 莘, 等. 真空断路器永磁机构设计与分析软件的开发 [J]. 高压电器, 2003, 39(1): 34-36.
- [23] 朱朝敏, 刘 凯, 刘新广. 永磁机构在真空断路器上的应用 [J]. 电力设备, 2004, 5(12): 60-62.
- [24] 游一民, 陈德桂, 罗文科, 等. 关于永磁机构中永磁工作点的讨论 [J]. 高压电器, 2002, 38(4): 39-41.

(上接第 374 页)

- [5] 值计算和结构分析 [J]. 高压电器, 2002, 38(1): 11-13.
- [6] 游一民, 陈德桂, 孙志强, 等. 基于动态分析的永磁机构最佳设计参数的选择 [J]. 电工电能新技术, 2004, 23(1): 43-46.
- [7] 钱家骊, 徐国政, 奚晓峰. 中压断路器用永磁机构中线圈不同布置的分析 [J]. 高压电器, 2000, 36(2): 25-28.
- [8] 胡 双, 左全璋, 左才科. 永磁操动机构设计参数的调整 [J]. 华通技术, 2003(4): 3-6.
- [9] E. Dullni, H. Fink, M. Heimbach, et al. A Family of Vacuum Circuit Breakers with Worldwide Applications Using Common Components [C]// 16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, IEE Conf. Publ. No. 482, London, 2001.
- [10] 马少华, 王季梅. 72.5 kV 高压真空断路器永磁操动机构的研究与设计 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 109-114.
- [11] 朱学贵, 王毅. 为提高分闸能力的永磁操动机构的研究与设计 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(7): 163-168.
- [12] 王双红, 周理兵. 永磁操作机构电磁设计及其动态特性分析 [J]. 华中科技大学学报, 2003, 31(5): 75-77.
- [13] 林 莘, 高会军, 铁 韧. 永磁操动机构磁场数值计算 [J]. 高压电器, 2000, 36(3): 3-6.
- [14] 林 莘, 徐建源, 高会军. 永磁操动机构动态特性计算与分析 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(6): 85-88.
- [15] 胡 双, 左全璋, 左才科. 永磁机构计算方法的改进 [J]. 低压电器, 2003(1): 10-13.
- [16] 李 岩, 王胜辉, 林 莘, 等. 真空断路器永磁机构计算与分析 [J]. 高压电器, 2003, 39(1): 34-36.
- [17] LIU Fugui, GUO Hongyong, YANG Qingxin, et al. An Improved Approach to Calculate the Dynamic Characteristics of Permanent Magnetic Actuator of Vacuum Circuit Breaker [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2004, 14(2): 1918-1921.