



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104776938 A

(43) 申请公布日 2015. 07. 15

(21) 申请号 201510173829. 6

(22) 申请日 2015. 04. 14

(71) 申请人 武汉大学

地址 430072 湖北省武汉市武昌区珞珈山武汉大学

(72) 发明人 阮江军 刘超 黄道春

(74) 专利代理机构 武汉科皓知识产权代理事务所(特殊普通合伙) 42222

代理人 胡艳

(51) Int. Cl.

G01K 13/00(2006. 01)

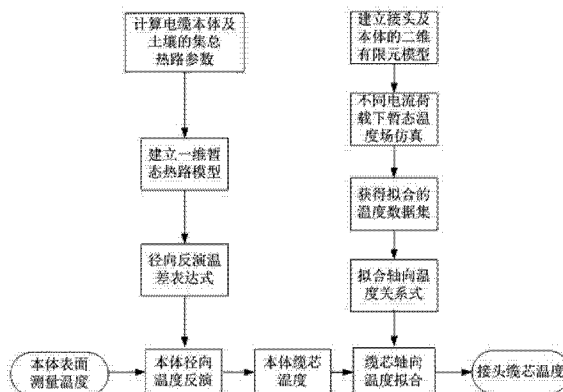
权利要求书2页 说明书6页 附图4页

(54) 发明名称

基于电缆表面温度的电缆接头缆芯温度反演方法及系统

(57) 摘要

本发明提供了一种基于电缆表面温度的电缆接头缆芯温度反演方法及系统,包括:步骤1,根据电缆一维暂态热路模型和电缆本体的表面测温点温度进行径向温度反演,获得缆芯拟合点反演暂态温度;步骤2,采用有限元温度场仿真法构建电缆二维温度场仿真模型,并在不同加载电流和不同时刻下仿真缆芯接触点和缆芯拟合点的暂态温度,获得暂态温度仿真数据集;步骤3,以缆芯接触点暂态温度为自变量、缆芯拟合点暂态温度为因变量,对暂态温度仿真数据集进行拟合,获得缆芯轴向温度函数;步骤4,结合缆芯拟合点反演暂态温度和缆芯轴向温度函数获得缆芯接触点温度。本发明利用电缆本体表面温度通过反演和拟合,即可获得准确的缆芯接触点温度,简单便捷。



1. 基于电缆表面温度的电缆接头缆芯温度反演方法,其特征是,包括步骤:

步骤 1,根据电缆一维暂态热路模型和电缆本体的表面测温点温度进行径向温度反演,获得缆芯拟合点反演暂态温度,缆芯拟合点即表面测温点在缆芯上的径向投影位置;

步骤 2,采用有限元温度场仿真法构建电缆二维温度场仿真模型,并在不同加载电流和不同时刻下仿真缆芯接触点和缆芯拟合点的暂态温度,获得暂态温度仿真数据集;

步骤 3,以缆芯接触点暂态温度为自变量、缆芯拟合点暂态温度为因变量,对暂态温度仿真数据集进行拟合,获得缆芯轴向温度函数;

步骤 4,结合缆芯拟合点反演暂态温度和缆芯轴向温度函数获得缆芯接触点温度。

2. 如权利要求 1 所述的基于电缆表面温度的电缆接头缆芯温度反演方法,其特征在于:

所述的表面测温点设于距电缆接头 2.5m 的同侧电缆本体表面。

3. 如权利要求 1 所述的基于电缆表面温度的电缆接头缆芯温度反演方法,其特征在于:

所述的缆芯拟合点数量为 2~6。

4. 如权利要求 1 所述的基于电缆表面温度的电缆接头缆芯温度反演方法,其特征在于:

步骤 1 进一步包括子步骤:

1.1 根据电缆本体各层及土壤各层的结构参数和材料参数,获得电缆本体各层和土壤各层的热阻和热容,其中,材料参数包括热导率、密度和比热容;

1.2 根据热阻和热容分别获得电缆本体各层和土壤各层的集总热阻和集总热容;

1.3 基于集总热阻和热容构建电缆的一维暂态热路模型;

1.4 基于一维暂态热路模型,通过复频域变换和节点电压方程求解获得反映电缆本体表面温度和缆芯温度之差的径向温差函数;

1.5 结合电缆本体表面测温点温度和径向温差函数获得缆芯拟合点反演暂态温度。

5. 如权利要求 1 所述的基于电缆表面温度的电缆接头缆芯温度反演方法,其特征在于:

步骤 2 中所述的加载电流为一系列逐渐增大、但不大于电缆最大工作电流的电流值序列。

6. 如权利要求 1 所述的基于电缆表面温度的电缆接头缆芯温度反演方法,其特征在于:

步骤 2 进一步包括子步骤:

2.1 根据电缆接头、电缆本体和土壤的结构,采用有限元分析法构建电缆二维温度场仿真模型;

2.2 输入环境温度、加载电流、电缆和土壤的各层的材料参数,采用有限元分析法对电缆二维温度场仿真模型进行温度场仿真,获得不同加载电流和不同时刻下缆芯接触点和缆芯拟合点的暂态温度,其中,材料参数包括密度、比热容和热导率。

7. 如权利要求 1 所述的基于电缆表面温度的电缆接头缆芯温度反演方法,其特征在于:

步骤 3 中所述的拟合为非线性拟合。

8. 基于电缆表面温度的电缆接头缆芯温度反演系统,其特征在于,包括:

第一模块,用来根据电缆一维暂态热路模型和电缆本体的表面测温点温度进行径向温度反演,获得缆芯拟合点反演暂态温度,缆芯拟合点即表面测温点在缆芯上的径向投影位置;

第二模块,用来采用有限元温度场仿真法构建电缆二维温度场仿真模型,并在不同加载电流和不同时刻下仿真缆芯接触点和缆芯拟合点的暂态温度,获得暂态温度仿真数据集;

第三模块,用来以缆芯接触点暂态温度为自变量、缆芯拟合点暂态温度为因变量,对暂态温度仿真数据集进行拟合,获得缆芯轴向温度函数;

第三模块,用来结合缆芯拟合点反演暂态温度和缆芯轴向温度函数获得缆芯接触点温度。

基于电缆表面温度的电缆接头缆芯温度反演方法及系统

技术领域

[0001] 本发明属于电力电缆防灾减灾在线监测技术领域,尤其涉及一种基于电缆表面温度的电缆接头缆芯温度反演方法及系统。

背景技术

[0002] 电力电缆是电力系统中不可或缺的重要组成部分,承担着电能传输的重任。由于电缆接头绝缘老化导致部分区域局放电流变大,特别是在高负荷情况下,使得电缆接头内部出现急剧温升,以及由此产生的接头爆炸,对输电线路安全稳定运行构成了威胁,所以电力电缆防灾减灾在线监测技术亟待完善。目前国内外常用的电力电缆在线监测技术主要包括直流分量法、直流叠加法、低频叠加法、在线介质损耗角正切法、局部放电在线监测法、接地电流监测、接地容性电流监测、电缆护层综合监测、电缆分布式光纤在线测温、电缆终端红外和紫外在线检测。

[0003] 直流分量法是通过检测电缆绝缘体中的直流分量来判断电缆绝缘老化的方法,但是由于直流分量法中测得的电流极微弱,在现场进行支流分量法的测量时,微小的干扰电流就会引起很大的误差。直流叠加法由于绝缘电阻与电缆的残余寿命的相关性并不好,分散性太大,又因绝缘电阻与很多因素有关,很难测量其绝缘电阻值并预测电缆的老化程度。低频叠加法将低频电压接入电缆高压回路的高压端与地之间,从电缆的接地线上测出低频电流。由于电缆绝缘层可看作 RC 的并联等值电路,当施加的电压为低频时,流过绝缘层的容性电流较工频时小得多,而阻性电流却无明显的变化,较易从接地线总低频电流中分离出阻性分量。在线介质损耗角正切法通过电压互感器将运行电缆的电压信号取出,同时运用电流互感器将流过电缆绝缘的工频电流信号取出,比较两者的相位!便可得电缆绝缘的介质损耗角正切从而判断绝缘老化程度。局部放电在线监测法常用的几种局部放电检测方法有:内置耦合电容法)脉冲电流法)空间超高频法及超声波法等,分析局部放电水平和电压的关系,以判断局部放电的性质。接地电流监测通常采用在接地线上安装电流互感器来实现,无需改变接地线的连接方式,适合 110kV 及以上电压等级电缆线路。接地容性电流监测通过接地电流中容性分量的增量 ΔI_g ,反映 XLPE 电缆绝缘老化前后的电容量变化。电缆护层综合监测通过对金属护层的感应电势、接地电流、电磁力及应力应变等的全面分析研究,得到各类故障或缺陷的表征现象及特征量。电缆分布式光纤在线测温主要依据光纤的光时域反射原理及光纤的背向拉曼散射温度效应。基于所测温度,可对电缆的载流量进行计算,进一步获得电缆运行信息。电缆终端红外和紫外在线检测是利用红外探测器、光学成像物镜和光机扫描系统接收被测目标的红外辐射,将其能量分布图形反映到红外探测器的光敏元件上,再转换成标准视频信号通过电视屏或监测器显示。该项技术虽然效果较为理想,其优点是测量灵敏度高、结果直观及可靠性好,但测量结果难以对缺陷程度准确判断,是需要进一步解决的问题。

[0004] 通过对电缆故障数据分析,电缆附件和弯曲敷设的部位是电力系统安全运行中的最薄弱环节。由于电缆本身特性,附件(终端、接头)需要在敷设完成后现场安装,制作时

受现场环境不利因素的影响以及制作工艺的限制,而电缆中间接头的压接质量,只能在运行中得以检验。其运行时间越长附件越容易发生过热烧穿事故。同时,经过一段时间的大电流(过负荷)运行后,往往在压接点处产生过热、氧化,使接触电阻逐渐增大,接点温度逐渐升高,使绝缘老化,最终导致绝缘层损坏而造成事故发生。而现有的上述技术主要是对电缆老化状态的一种间接监测,不能直接对电力电缆故障进行及时预警,容易造成电缆事故的发生。

发明内容

[0005] 针对现有技术存在的不足,本发明提供了一种结合有限元分析和热路模型的、基于电缆表面温度的电缆接头缆芯温度反演方法及系统,采用本发明可直接获得电缆接触处缆芯接触点温度,从而实现缆芯接触点温度的实时监控。

[0006] 本发明思路为:基于有限元温度场分析和热路模型,结合径向温度反演和轴向温度拟合,根据电缆本体表面温度获得电缆接头处缆芯接触点温度。

[0007] 为解决上述技术问题,本发明采用如下技术方案:

[0008] 一、基于电缆表面温度的电缆接头缆芯温度反演方法,包括步骤:

[0009] 步骤 1,根据电缆一维暂态热路模型和电缆本体的表面测温点温度进行径向温度反演,获得缆芯拟合点反演暂态温度,缆芯拟合点即表面测温点在缆芯上的径向投影位置;

[0010] 步骤 2,采用有限元温度场仿真法构建电缆二维温度场仿真模型,并在不同加载电流和不同时刻下仿真缆芯接触点和缆芯拟合点的暂态温度,获得暂态温度仿真数据集;

[0011] 步骤 3,以缆芯接触点暂态温度为自变量、缆芯拟合点暂态温度为因变量,对暂态温度仿真数据集进行拟合,获得缆芯轴向温度函数;

[0012] 步骤 4,结合缆芯拟合点反演暂态温度和缆芯轴向温度函数获得缆芯接触点温度。

[0013] 上述表面测温点设于距电缆接头 2.5m 的同侧电缆本体表面。

[0014] 上述缆芯拟合点数量为 2~6。

[0015] 步骤 1 进一步包括子步骤:

[0016] 1.1 根据电缆本体各层及土壤各层的结构参数和材料参数,获得电缆本体各层和土壤各层的热阻和热容,其中,材料参数包括热导率、密度和比热容;

[0017] 1.2 根据热阻和热容分别获得电缆本体各层和土壤各层的集总热阻和集总热容;

[0018] 1.3 基于集总热阻和热容构建电缆的一维暂态热路模型;

[0019] 1.4 基于一维暂态热路模型,通过复频域变换和节点电压方程求解获得反映电缆本体表面温度和缆芯温度之差的径向温差函数;

[0020] 1.5 结合电缆本体表面测温点温度和径向温差函数获得缆芯拟合点反演暂态温度。

[0021] 步骤 2 中所述的加载电流为一系列逐渐增大、但不大于电缆最大工作电流的电流值序列。

[0022] 步骤 2 进一步包括子步骤:

[0023] 2.1 根据电缆接头、电缆本体和土壤的结构,采用有限元分析法构建电缆二维温度场仿真模型;

[0024] 2.2 输入环境温度、加载电流、电缆和土壤的各层的材料参数,采用有限元分析法对电缆二维温度场仿真模型进行温度场仿真,获得不同加载电流和不同时刻下缆芯接触点和缆芯拟合点的暂态温度,其中,材料参数包括密度、比热容和热导率。

[0025] 步骤 3 中所述的拟合为非线性拟合。

[0026] 二、基于电缆表面温度的电缆接头缆芯温度反演系统,包括:

[0027] 第一模块,用来根据电缆一维暂态热路模型和电缆本体的表面测温点温度进行径向温度反演,获得缆芯拟合点反演暂态温度,缆芯拟合点即表面测温点在缆芯上的径向投影位置;

[0028] 第二模块,用来采用有限元温度场仿真法构建电缆二维温度场仿真模型,并在不同加载电流和不同时刻下仿真缆芯接触点和缆芯拟合点的暂态温度,获得暂态温度仿真数据集;

[0029] 第三模块,用来以缆芯接触点暂态温度为自变量、缆芯拟合点暂态温度为因变量,对暂态温度仿真数据集进行拟合,获得缆芯轴向温度函数;

[0030] 第三模块,用来结合缆芯拟合点反演暂态温度和缆芯轴向温度函数获得缆芯接触点温度。

[0031] 和现有技术相比,本发明具有如下优点和有益效果:

[0032] 1、无需在电缆接头内敷设温度传感器,利用电缆本体表面温度通过反演和拟合,即可获得准确的缆芯接触点温度,简单便捷;

[0033] 2、可反演电缆接头处缆芯接触点温度,从而可及时了解电缆接头的温度异常,实现电缆接头状态的无损监测,为电缆接头状态识别提供参考依据;相关人员可根据温度异常合理安排检修及更换,避免或减少故障产生,从而保证电缆安全运行。

附图说明

[0034] 图 1 为本发明的原理示意图;

[0035] 图 2 为本发明的具体流程图;

[0036] 图 3 为实施例中构建的电缆一维暂态热路模型;

[0037] 图 4 为实施例中径向温度反演示意图;

[0038] 图 5 为实施例中电缆本体二维温度场模型;

[0039] 图 6 为实施例中电缆缆芯轴向温度拟合示意图;

[0040] 图 7 为仿真得到的 3 个测温点的暂态温度数据曲线;

[0041] 图 8 为不同方法获得的缆芯接触点暂态温度曲线。

[0042] 图中,1- 电缆接头;2- 电缆本体;3- 缆芯;4- 缆芯接触点;5- 土壤层;6- 砂石层;7- 缆芯热流源;8- 环境温度;U1- 缆芯层温度;U2- 绝缘层温度;U3- 半导电电阻水层温度;U4- 铝护套温度;U5- 外护套温度;U6- 砂石层温度;C1- 缆芯层热容;C2- 绝缘层热容;C3- 半导电电阻水层热容;C4- 铝护套热容;C5- 外护套热容;C6- 砂石层热容;R1- 缆芯层热阻;R2- 绝缘层热阻;R3- 半导电电阻水层热阻;R4- 铝护套热阻;R5- 外护套热阻;R6- 砂石层热阻。

具体实施方式

[0043] 下面将结合附图和具体实施例进一步说明本发明技术方案。

[0044] 图 1 为本发明原理示意图,从中可以看出来本发明特点在于结合径向温度反演和轴向温度拟合获得电缆接头处缆芯接触点(4)温度。所谓缆芯接触点指电缆接头内部两段缆芯的接触面,该处由于存在相对较大的接触电阻,所以温度最高。

[0045] 图 2 是本发明的具体流程图,主要包括径向温度反演和轴向温度拟合两部分。径向温度反演即:根据电缆本体结构和材料参数、以及土壤结构及材料参数,构建对应的电缆一维暂态热路模型,基于电缆一维暂态热路模型进行径向温度反演,获得反映电缆本体表面温度和缆芯温度之差的径向温差函数,结合电缆本体表面测温点实测温度即可获得各测温点在缆芯径向对应处的反演温度,各测温点在缆芯径向对应处即缆芯拟合点。轴向温度拟合即:通过有限元温度场仿真获得缆芯接触点(4)和缆芯 n 个拟合点的暂态温度仿真数据集,对暂态温度仿真数据集进行拟合,得到反映缆芯接触点温度和缆芯拟合点温度间联系的缆芯轴向温度函数。结合缆芯拟合点反演温度和缆芯轴向温度函数获得缆芯接触点温度。

[0046] 下面以 110kV 单芯直埋式电缆为例,阐述其径向温度反演和轴向温度拟合过程。

[0047] 一、径向温度反演

[0048] 本实施例的具体实施中,径向温度反演利用 MATLAB 实现。

[0049] 首先,计算电缆本体各层及土壤各层的集总热路参数,包括热阻和热容。从电缆本体的缆芯层到土壤的土壤层共 7 层,电缆本体各层和土壤各层的结构参数和材料参数见表 1,其中,电缆本体从内向外依次为缆芯层、交联聚乙烯层、半导电阻水带层、铝护套层、外护套层;土壤包括砂石层和土壤层。

[0050] 表 1 电缆本体各层和土壤各层的结构参数及材料参数

[0051]

参数 各层	厚度 mm	热导率 W/(m ² ·K)	密度 kg/m ³	比热容 J/(kg·K)
缆芯层	15	383	8889	390
交联聚乙烯层	19	0.4	920	2500
半导电阻水带层	5	0.6	600	2000
铝护套层	5	218	2780	883
外护套层	5	0.5	950	1842
砂石层	101	0.58	1600	920
土壤层	650	1.2	2650	2405

[0052] 根据表 1 参数,采用集总热路参数计算公式获得各层的集总热阻和集总热容,见表

[0053] 表 2 电缆本体各层和土壤各层的集总热路参数

[0054]

热路参数 各层	热阻(K/W)	热容(kJ/K)
缆芯层	0.0001	2.45
交联聚乙烯层	0.3256	6.73
半导体阻水带层	0.0364	1.38
铝护套层	0.0001	3.2
外护套层	0.0343	2.56
砂石层	0.307	92.9
土壤层	0.222	12364

[0055] 根据表 2 中电缆本体各层和土壤各层的集总热路参数构建电缆的一维暂态热路模型,热路模型是采用电路形式表示电缆本体各层和土壤各层的温度及热流情况,电缆本体各层及土壤各层的热阻分别用一个其结构和材料参数有关的集总热阻表示,电缆本体各层及土壤各层的热容分别用一个与其结构和材料参数有关的集总热容表示。假设环境温度为 30℃,电流为负载电流为 1050A 的单阶跃电流,从 t = 0 时刻开始,构建图 3 所示的电缆一维暂态热路模型。

[0056] 根据电缆一维暂态热路模型,通过复频域变换和求解节点电压方程进行径向温度反演,获得径向温差函数,如下:

[0057]
$$\Delta T = 0.00000000000000026e^{-8.96t} - 0.0035e^{-0.0033t} - 0.021e^{-0.000013t} - 8.92e^{-0.0006t}$$

[0058] (1)

[0059]
$$-1.87e^{-0.00068t} - 0.00067e^{-0.015t} + 10.82 \approx 10.82 - 8.92e^{-0.0006t} - 1.87e^{-0.00068t}$$

[0060] 式 (1) 中, ΔT 为径向温差;t 表示时刻,单位:s。

[0061] 本具体实施例中,见图 4,电缆本体 (2) 表面 A、B、C 处设为测温点,在各测温点分别敷设温度传感器,A、B、C 处测量温度分别用 T_a、T_b和 T_c表示;A、B、C 在缆芯的径向投影分别记为 A'、B'、C',即缆芯拟合点,缆芯拟合点温度分别用 T₁、T₂、T₃表示。采用径向温差函数对 T₁、T₂和 T₃进行径向温度反演:

[0062]
$$T_a = T_1 + \Delta T \quad (2)$$

[0063]
$$T_b = T_2 + \Delta T \quad (3)$$

[0064]
$$T_c = T_3 + \Delta T \quad (4)$$

[0065] 已知电缆本体表面温度,采用径向温差函数即可获得缆芯拟合点温度。

[0066] 二、轴向温度拟合

[0067] 2.1 采用有限元温度场仿真法采集暂态温度仿真数据集。

[0068] 根据电缆接头、电缆本体及土壤的结构,在有限元分析软件中建立电缆的二维温度场仿真模型,见图 5。本实施例 110kV 单芯电缆的长时间允许最大工作电流为 1350A,因此,具体实施时,从 100A 到 1350A 每隔 100A 取一电流值构成加载电流集,在加载电流集中各加载电流下分别对电缆二维温度场仿真模型进行暂态温度仿真。本实施例中,需要进行

13次暂态温度仿真,每次仿真时长20小时,每6分钟采集一组暂态温度数据,即每次仿真可提取200组暂态温度数据,经13次暂态温度仿真可提取2600组暂态温度仿真数据,即暂态温度仿真数据集。

[0069] 暂态温度仿真数据集的采集可利用有限元分析软件中的温度场仿真功能获得,输入环境温度、加载电流、电缆本体各层和土壤各层的材料参数,基于电缆二维温度场仿真模型仿真缆芯接触点和缆芯拟合点的暂态温度。上述材料参数包括密度、比热容和热导率。

[0070] 2.2 根据暂态温度仿真数据集进行轴向温度拟合。

[0071] 暂态温度仿真数据集中各组暂态温度仿真数据包括缆芯接触点和缆芯拟合点的暂态温度。图6为缆芯轴向温度拟合示意图,电缆接头处缆芯接触点温度表示为 T_0 ,3个缆芯拟合点A'、B'、C'的温度分别表示为 T_1 、 T_2 和 T_3 ,缆芯拟合点A'、B'、C'距电缆接头端部分别为0.1m、0.4m和0.8m。

[0072] 进行轴向温度拟合时,以缆芯接触点暂态温度为因变量、缆芯拟合点暂态温度为自变量,对暂态温度仿真数据集进行非线性拟合得到因变量关于自变量的非线性函数。对该非线性函数进行泰勒级数展开,可近似等效为关于 T_1 、 T_2 和 T_3 的 n 次幂级数组成的多项式, n 为缆芯拟合点数量,本实施例中 n 为3,则该多项式共10项。以2600组暂态温度仿真数据集为拟合数据源,获得缆芯轴向温度函数,如下:

$$[0073] \quad T_0 = 0.0032T_1^3 - 0.0082T_2^3 + 0.005T_3^3 - 0.38T_1^2 + 0.96T_2^2 - 0.57T_3^2$$

$$[0074] \quad (5)$$

$$[0075] \quad +29.9T_1 - 62.8T_2 + 33.8T_3 - 0.44$$

[0076] 轴向温度拟合采用非线性函数拟合软件1stopt进行。

[0077] 缆芯拟合点数量并不限于3,拟合点数量取2~6均可获得较高的准确度。缆芯拟合点为电缆本体表面测温点在缆芯上的径向投影位置。电缆表面测温点可根据实际情况在距电缆接头2.5m的同侧电缆本体表面选择,测温点温度利用温度传感器获取。

[0078] 三、结合缆芯拟合点反演温度和缆芯轴向温度函数,获得缆芯接触点温度。

[0079] 将缆芯拟合点反演温度代入缆芯轴向温度函数,即可获得缆芯接触点温度。

[0080] 为验证本发明方法的准确性,本实施例反演得到的缆芯接触点暂态温度曲线见图8中曲线2,采用有限元温度场仿真获得的缆芯接触点暂态温度曲线见图8中曲线1,从图8可以看到,本发明方法具有较高的准确度,可满足工程需要。

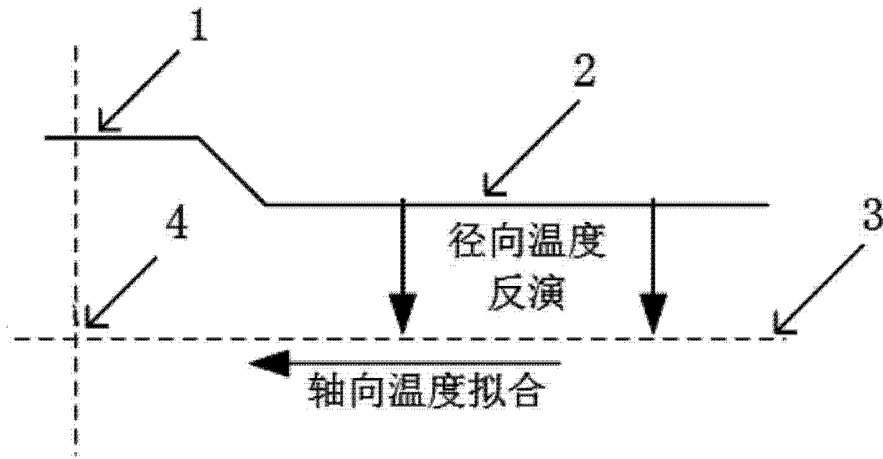


图 1

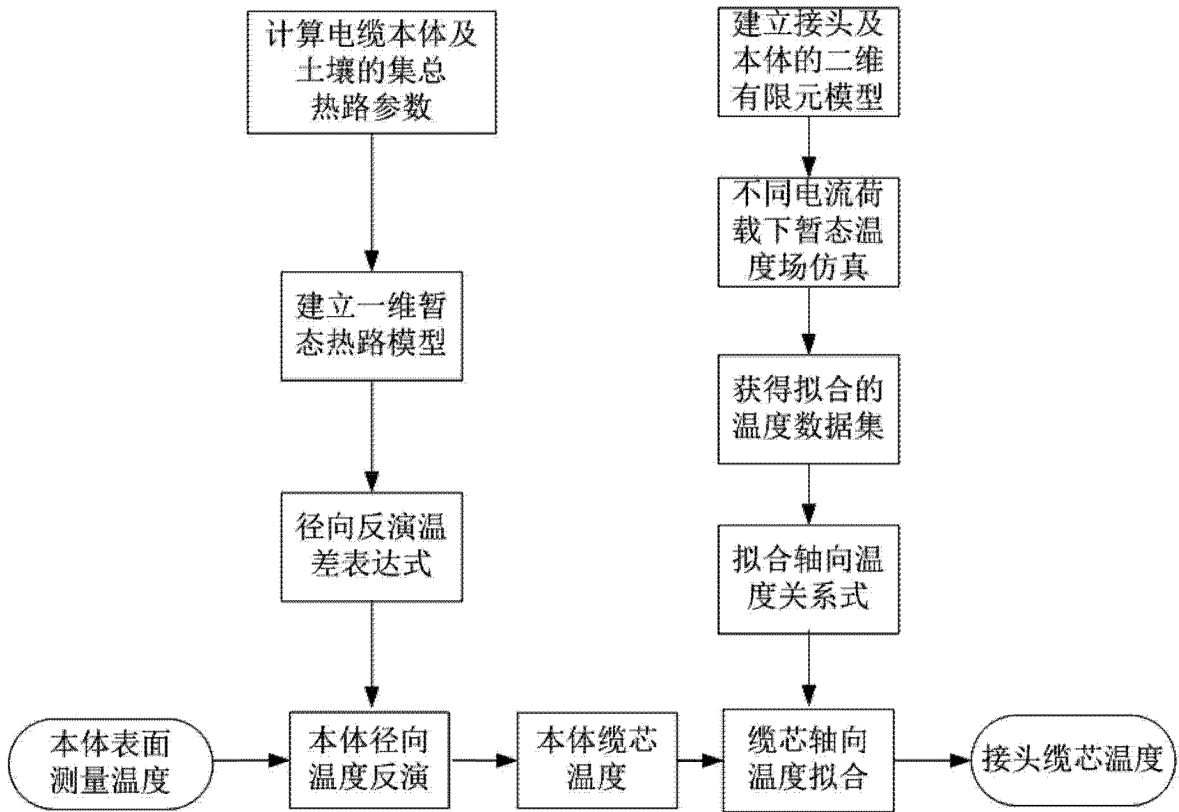


图 2

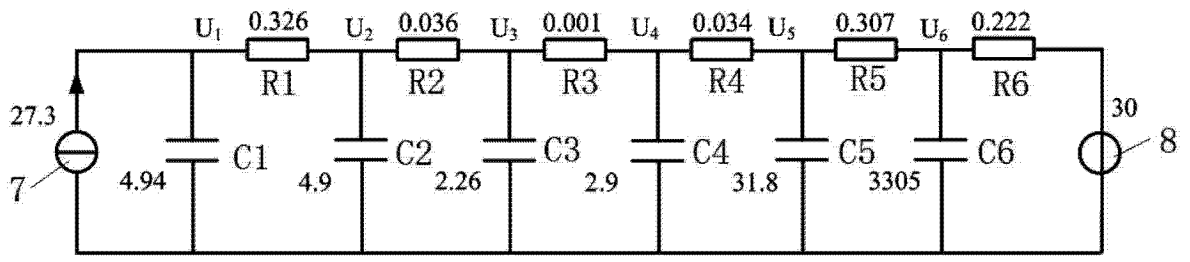


图 3

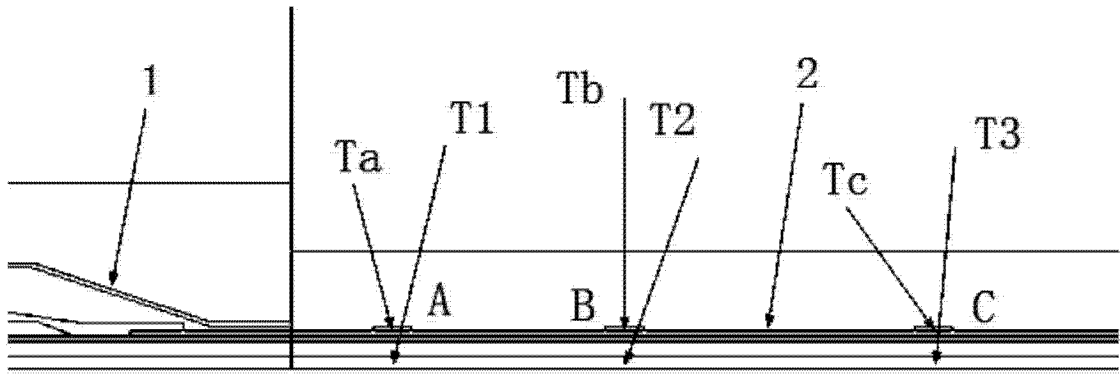


图 4

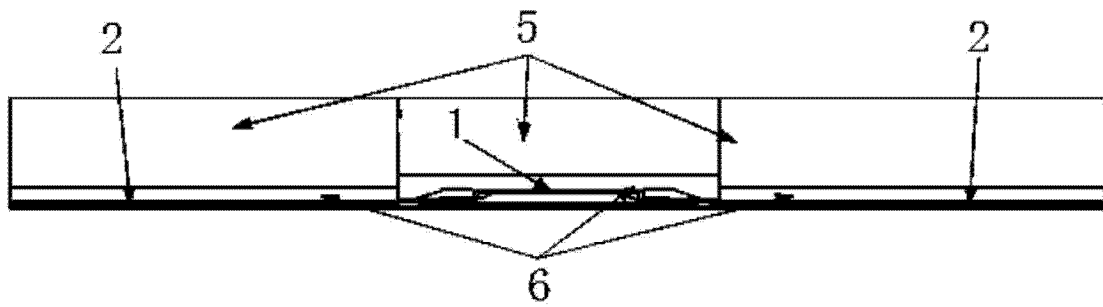


图 5

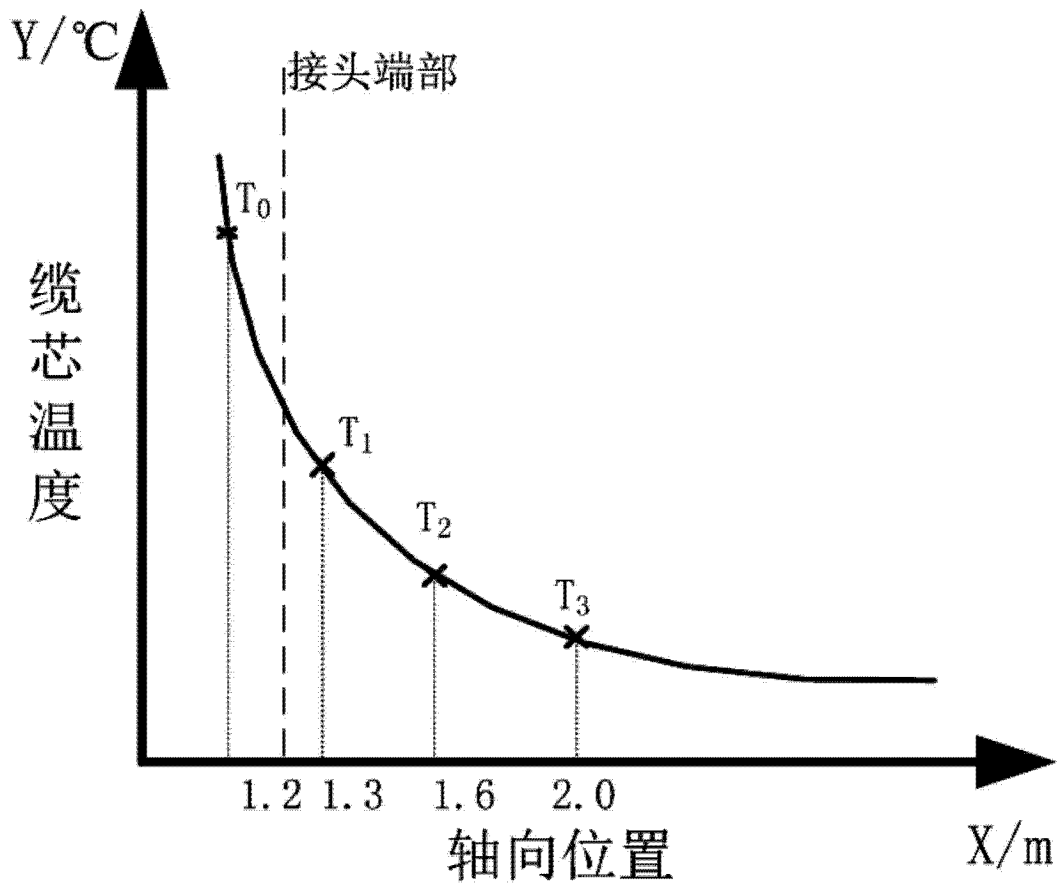


图 6

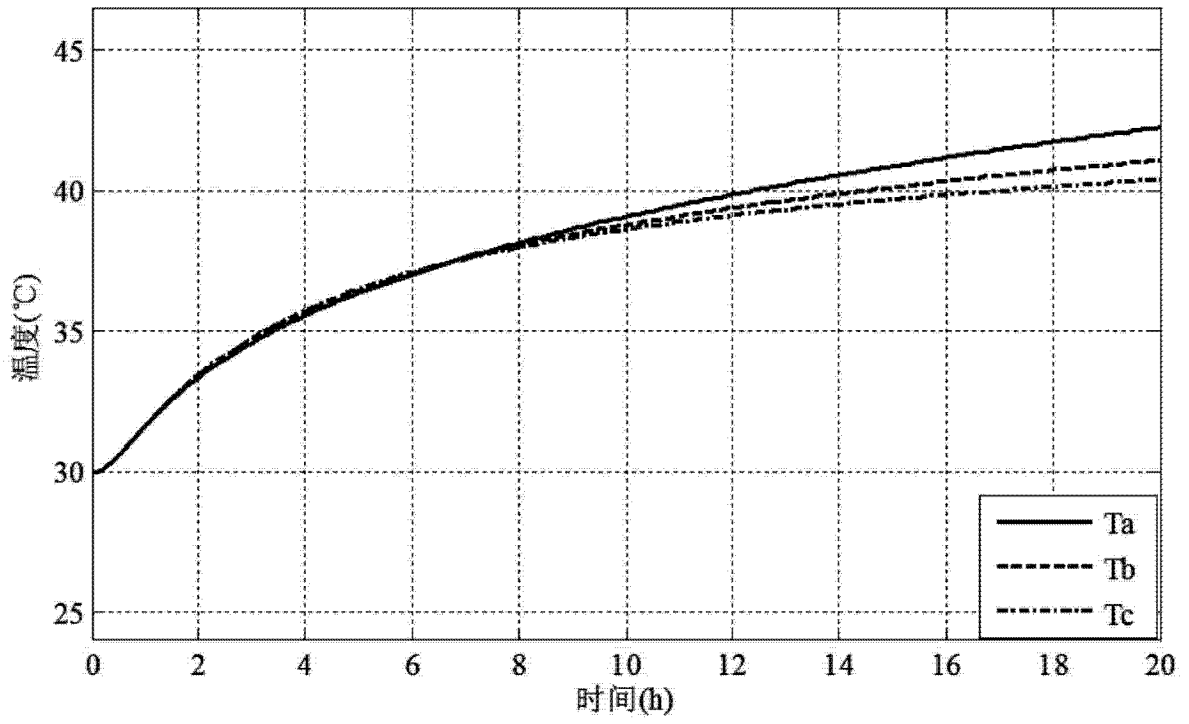


图 7

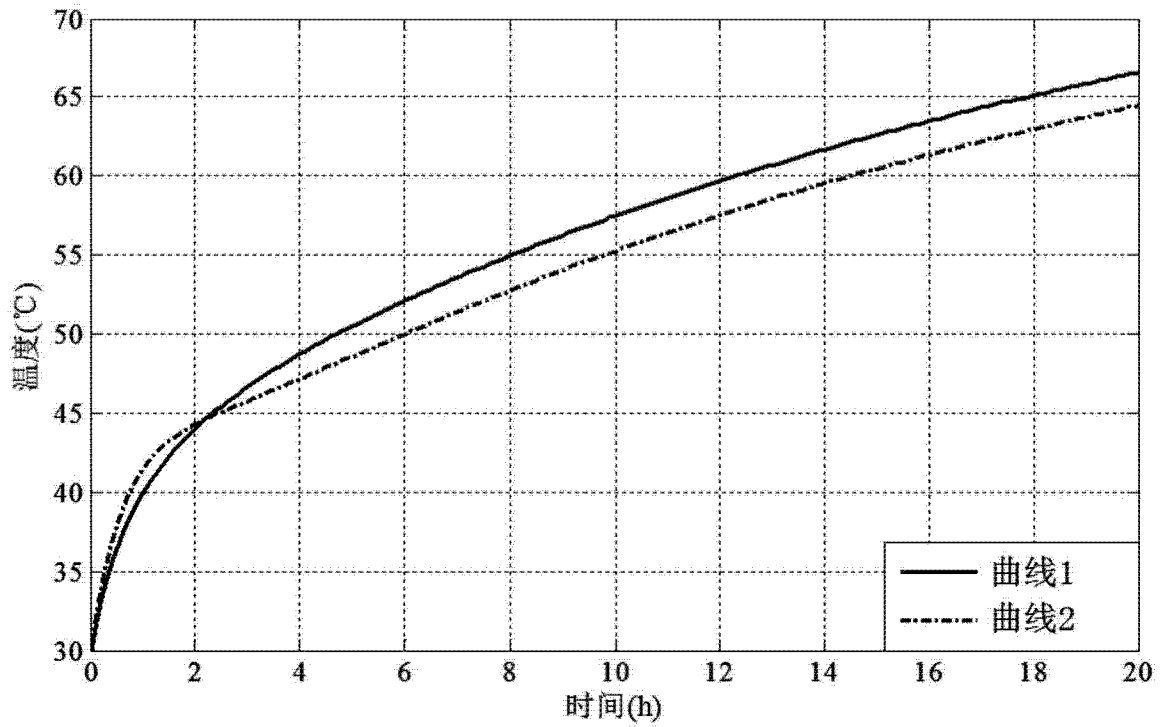


图 8