

架空导线动态增容的环境测量解耦模型及其实验验证

陈春宏¹, 许智贤¹, 曾衍淇², 彭瑞东², 彭向阳³, 王锐³

(1. 广东电网有限责任公司阳江供电局, 广东 阳江 529500; 2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640;
3. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东 广州 510080)

摘要: 动态增容技术通过实时评估架空导线的载流量来挖掘导线的潜在电能输送能力, 但现有的动态增容模型存在所需传感器数目较多或传感器安装维护困难等问题, 为此, 提出环境测量解耦的动态增容模型。首先, 该模型建立铝球的暂态降温数据与环境变量的关联方程组; 然后, 从灵敏度的角度分析各环境变量的求解精度, 并给出不同灵敏度的环境变量的求解方法, 实现导线载流量的评估; 最后, 通过实验对环境测量解耦模型进行验证。实验结果表明, 与 IEEE Std 738-2012 标准的计算结果相比, 模型的计算结果误差不超过 4%。

关键词: 架空导线; 动态增容; 等效散热装置; 环境测量解耦模型; 载流量评估

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.06.022 中图分类号: TM726.3 文章编号: 1673-9140(2023)06-0206-09

An environmental measurement decoupling model for dynamic capacity increasing of overhead conductors and experimental validation

CHEN Chunhong¹, XU Zhixian¹, ZENG Yanqi², PENG Ruidong², PENG Xiangyang³, WANG Rui³

(1. Yangjiang Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Yangjiang 529500, China; 2. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 3. Electric Power Research Institute, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China)

Abstract: The dynamic capacity increasing technique exploits the potential power transmission capacity of overhead conductors by assessing ampacity in real-time. However, the existing dynamic capacity increasing models face challenges such as the requirement for a large number of sensors or difficulties in the installation and maintenance of sensors. To address these issues, a dynamic environmental measurement decoupling model is proposed. Firstly, the model establishes the associated equations between transient temperature data of aluminum spheres and environmental variables. Subsequently the solution accuracy of each environmental variable from the perspective of sensitivity is analyzed, and the solution methods of environmental variables with different sensitivities are given. Finally, experiments are carried out to validate the accuracy of the environmental measurement decoupling model. The experimental results show that the calculation error of the model is less than 4% compared with the calculation results of IEEE Std 738-2012.

Key words: overhead transmission line; dynamic capacity increasing; equivalent heat transfer equipment; environmental measurement decoupling model; ampacity assessment

收稿日期: 2022-06-27; 修回日期: 2023-04-20

基金项目: 中国南方电网有限责任公司科技项目 (GDKJXM20210873; GDKJXM20185588)

通信作者: 曾衍淇 (2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事输电线路热评估的研究; E-mail: 2650297818@qq.com

随着社会经济的快速发展,中国的用电需求也在不断增加^[1],但中国的电能生产与电能消费仍然呈现出区域不平衡的特点,这种特点对架空输电线路的电能输送能力提出了更高的要求^[2]。动态增容技术通过挖掘现有输电线路的电能输送能力,能够在不需要架设新的输电线路的情况下提高现有架空线路的运行效率,具有重要的研究价值。

架空导线动态增容方法的核心在于对导线的实时载流能力进行评估,并以此作为评价基准对导线实施动态增容。工程上常使用载流量这一概念表征导线的载流能力,其意义是稳态温度为 70℃ 时通过导线的电流值。因此,对导线载流能力的评估可以通过对导线载流量的评估得以实现。

目前国内外已有众多进行载流量评估的动态增容模型,这些模型利用不同的输入量对导线的载流量进行求解,通过设置相应的传感器可以对这些输入量进行采集进而完成模型的求解过程。根据所依赖输入量的不同,这些模型大致可分为 2 类:①需要监测导线的状态相关变量,具体有导线温度^[3]、导线张力^[4]、导线弧垂^[5]以及热路模型^[6]等;②不需要监测导线的状态变量,包括气候、实况比拟、等效换热以及等效散热暂态测量模型等。第 1 类模型需要在导线上安装相应的传感器,存在传感器的安装及维护困难的问题;第 2 类中的实况比拟模型在导线上安装一个参考导体用以监测环境对导线散热的影响,同样存在着安装与维护困难的问题^[7]。气候模型需要测量风速、风向、环境温度以及日照强度^[8-9],所需传感器数目较多,并且目前市面上长期使用的风速传感器精度较低^[10-11],对载流量计算精度有很大影响;而等效换热模型与等效散热暂态模型分别使用参照物(铝球)的稳态及暂态温度参数对风的影响进行表征,但仍需要测量环境温度以及日照强度,所使用的传感器数目仍然较多,计算结果过分依赖于传感器的工作状态^[12-13]。若某一传感器出现故障,将影响模型载流量的计算,并且,目前中国的智能电网技术正日渐发展,智能电网中通信网络的存在实现了电网中各类设备的网络集成以及信息共享^[14],因此,通信网络的性能对智能电网的运行效率有很大影响。这类不需要监测导线状态

变量的动态增容模型所需传感器较多,输入通信网络中的数据量也较大,不利于提升通信网络的性能以及智能电网的运行效率。现有动态增容模型的不足之处如图 1 所示。

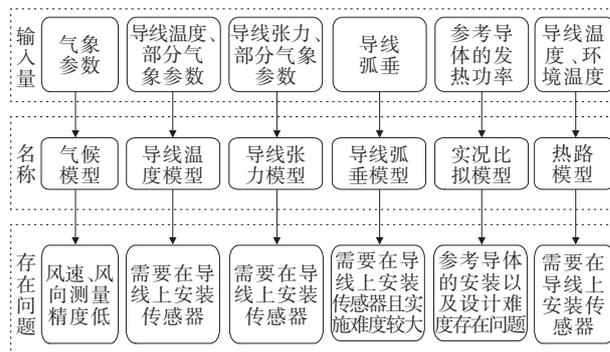


图 1 现有动态增容模型的不足之处

Figure 1 Disadvantages of current dynamic capacity increasing models

因此,需要一种既不用测量环境变量值,也不用在导线上安装传感器的动态增容模型。前期研究工作中提出的等效散热装置即利用一个与架空导线处于相同环境下的发热铝球,实现通过铝球的热行为对导线的热行为进行评估的目的^[12],如图 2 所示。

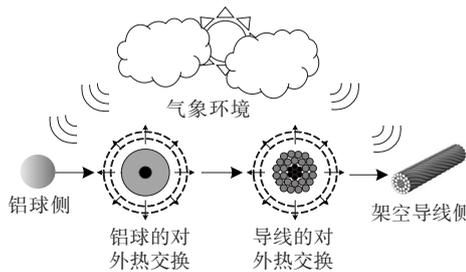


图 2 等效散热装置

Figure 2 Diagram of equivalent heat transfer equipment

本文在等效散热装置的基础上提出环境测量解耦动态增容模型,该模型通过建立导线与装置中铝球对环境热行为的关联关系,从而得到导线所处环境的日照强度、风速以及环境温度,实现对导线载流量间接计算的目标。最后,通过实验验证模拟等效散热装置的运行,并将模型的计算结果与相同环境条件下 IEEE 标准的计算结果进行对比,验证环境测量解耦模型的准确性。

1 架空导线的载流量计算

架空导线的载流量直接与其发散热行为相关。

在传热学上通常使用热平衡方程对物体的发散热行为进行描述,因此,为了对导线的载流量进行定量计算,需要对导线的热平衡方程进行分析^[15]。

运行过程中当导线温度达到稳态时,其稳态热平衡方程为

$$I^2 R(T_c) + q_s = q_r + q_c \quad (1)$$

式中, I 为导线运行时通过的电流,A; q_s 为架空导线的日照吸热功率,W/m; q_r 为架空导线的辐射散热功率,W/m; q_c 为架空导线的对流散热功率,W/m; $R(T_c)$ 表示导线温度为 T_c 时单位长度的交流电阻,具体计算公式^[16]为

$$R(T_c) = \beta R_d \quad (2)$$

式中, R_d 为架空导线的直流电阻, Ω/m ; β 为导线的交直流电阻比, $\beta = \zeta I^r$,其中常数 ζ 与 r 值可通过查表或实验的手段进行获取。

目前,已有多套标准规定了导线的 q_s 、 q_r 、 q_c 计算方式,本文采用IEEE Std 738-2012标准(简称IEEE标准)^[17]对3个热交换功率参数进行计算。值得说明的是,IEEE标准中对流散热功率的计算式包含环境风向因子 K_{angle} ,其表达式为

$$K_{\text{angle}} = 1.194 - \cos \varphi + 0.194 \cos 2\varphi + 0.368 \sin 2\varphi \quad (3)$$

其中, φ 为风向角,定义为当前风向与架空导线轴向方向的夹角。研究表明^[12],由于湍流的影响,风速对载流量的影响远远低于理论计算的结果,并且架空线路的设计通常是曲折的,因此,架空导线各档距中风向数值不尽相同,亦难以准确获得风向,通常取定值进行计算^[18]。本文统一取风向角为 90° ,即 $K_{\text{angle}} = 1$ 。

根据GB 50545—2010标准规定^[19],在计算钢芯铝绞线和钢芯铝合金芯导线的额定载流量时,所考虑的导线最大运行温度为 70°C ,因此,通过热平衡方程得到导线载流量 I_{amp} 的计算式为

$$I_{\text{amp}} = \sqrt{\frac{q_c + q_r - q_s}{R(T_c)}} \Bigg|_{T_c = 70} \quad (4)$$

2 环境测量解耦模型的建立

2.1 环境测量解耦模型的原理

根据文1所述,架空导线的载流量与风速、环境

温度以及日照强度相关,所提等效散热装置^[12]引入一个与架空导线处于同环境的发热铝球,由于发热铝球与架空导线所处气象条件相同,因此,铝球和导线与外界环境的热交换具有一定的关联性。本文所提环境测量解耦模型通过对该关联性进行解析,完成对导线所处环境的风速、环境温度以及日照强度的计算,据此对导线一段时间内的周围环境综合散热能力进行评估,进而对导线的载流量进行计算。环境测量解耦模型原理如图3所示。

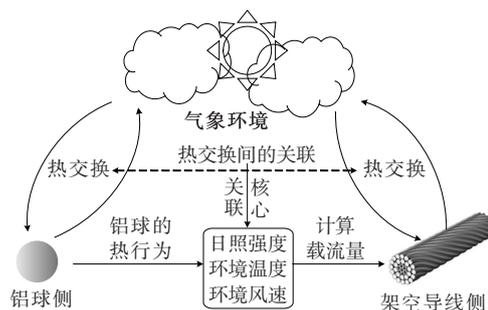


图3 环境测量解耦模型原理

Figure 3 Principle of environmental measurement decoupling model

2.2 铝球的热平衡方程

与架空导线相同,为了对铝球的热行为进行分析,同样需要列写铝球的热平衡方程。自然降温过程中高温铝球满足以下暂态热平衡方程:

$$-m_A C_{pA} \frac{dT_A}{dt} = q_{cA} + q_{rA} - q_{sA} \quad (5)$$

式中, m_A 为铝球的质量,kg; C_{pA} 为铝球的比热容, $J/(kg \cdot K)$; q_{sA} 为铝球的日照吸热功率,W; q_{cA} 为铝球的对流散热功率,W; q_{rA} 为铝球的辐射散热功率,W。发热铝球的各发散热功率参考文献[12,20]。

2.3 环境变量的求解

环境测量解耦模型通过构建关联方程组实现对环境变量求解的目的。当环境变量未发生改变时,对高温铝球自然降温过程中的每一温度点都能列写相应的暂态热平衡方程。由于与导线载流量相关的环境变量有3个(风速、日照强度、环境温度),因此,可以从铝球降温过程中取3个温度点构建关联方程组。本文以 70°C 、 60°C 、 50°C 为例,并记 $x = [Q_s, V_w, T_a]^T$,构建的关联方程组如下:

$$f(x) = \begin{cases} m_A C_{pA} \frac{dT_A}{dt} + q_{cA} + q_{rA} - q_{sA} \Big|_{T_A=70} = 0 \\ m_A C_{pA} \frac{dT_A}{dt} + q_{cA} + q_{rA} - q_{sA} \Big|_{T_A=60} = 0 \\ m_A C_{pA} \frac{dT_A}{dt} + q_{cA} + q_{rA} - q_{sA} \Big|_{T_A=50} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中铝球的温度微分项无法由直接监测手段获取。文献[13]中采用解析求导法对温度微分项进行处理,对铝球的暂态降温方程进行拟合,即

$$T_A(t) = T_a + (T_{a0} - T_a)e^{-t/\tau} \quad (7)$$

式中, τ 为铝球降温过程的时间常数, s; T_{a0} 为铝球降温的初始温度, °C; T_a 为铝球的终态温度, °C; T_A 为铝球在经历时间 t 后的温度, °C。

获得铝球的暂态降温方程后铝球的温度微分项可直接求导获得:

$$\frac{dT_A}{dt} \Big|_{T_A=T} = -\frac{1}{\tau} (T_{a0} - T_a)e^{-t/\tau} \quad (8)$$

获取铝球的温度微分项后关联方程组(6)即为一个关于日照强度 Q_s 、环境风速 V_w 以及环境温度 T_a 的三元非线性方程组。牛顿-拉夫逊法是求解非线性方程组的一种有效方法,其原理是利用逐次线性化的思想,将非线性方程组转化为线性方程组,并通过迭代的手段获得方程组的数值解,该方法在初始值取得当的情况下可以迅速收敛至最优解^[21]。因此,本文也采用牛顿-拉夫逊法对关联方程组(6)进行求解,其求解过程如图4所示。

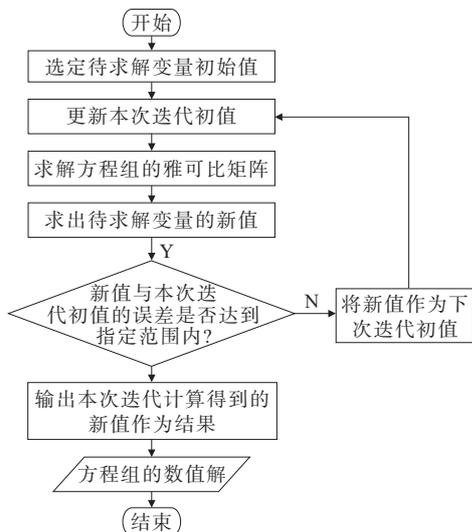


图4 牛顿-拉夫逊法的方程组求解步骤

Figure 4 The solution steps of Newton-Raphson method

由于牛顿-拉夫逊法对于不同的变量其求解精度有所不同^[22],因此,本文将对各个环境变量的求解精度进行讨论。

2.4 环境变量的求解精度讨论

实际上对方程组(7)的求解等价于以下最优化问题^[23]:

$$\min F(x) := \|f(x)\|^2 = \sum_{i=1}^3 f_i^2(x) \quad (9)$$

其中, $\|f(x)\|$ 为方程组 $f(x)$ 的范数, $f_i(x)$ 为方程组(6)中的第 i 个方程。对于该优化问题,方程组中待求的 n 个变量对方程组中每一个方程的灵敏度都不同。对于一个待求解变量 x , 其对于一个方程的灵敏度即为该方程对其偏导数的绝对值:

$$S = \left| \frac{\partial F}{\partial x} \right| \quad (10)$$

式中, S 为变量的灵敏度; F 为寻优目标函数。

若 S 越大,则对于寻优的目标函数来说,该变量的微小变化对目标函数的值影响越大,寻优过程中该变量能够计算得越精确。换句话说,对于与该优化问题等效的方程组的求解,灵敏度较大的变量更容易求解得到精确的结果,而灵敏度越小的变量则越难以保证真值。因此,可以对3个环境变量进行灵敏度分析,再根据灵敏度的不同对各环境变量采取不同的解决方案。 V_w 、 T_a 、 Q_s 的灵敏度分别为

$$S_v = |2(f_1 + f_2 + f_3)(0.198(\rho_f/\mu_f)^{0.6} \cdot \pi k_f l^{1.6} (T_A - T_{aA}) V_w^{-0.4})| \quad (11)$$

$$S_t = |2(f_1 + f_2 + f_3)(-0.33(\rho_f V_w/\mu_f)^{0.6} \cdot \pi k_f l^{1.6} + 4\pi l^2 \epsilon_A \sigma (T_{aA} + 273)^3)| \quad (12)$$

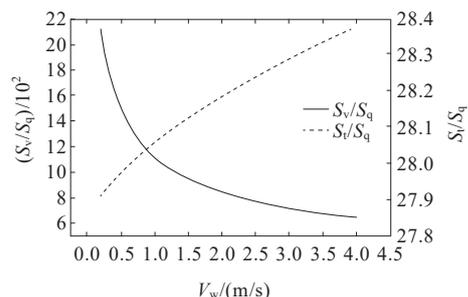
$$S_q = |2(f_1 + f_2 + f_3)(\alpha_A \pi l^2/4)| \quad (13)$$

对于式(11)~(13),直接采用数学分析的方法不易看出各灵敏度大小。由于各式都有一个相同的乘法项 $2(f_1 + f_2 + f_3)$,并且日照强度项也仅存在于该乘法项中,因此,可以采用除法对各式进行数值比较,同时消除日照强度对数值比较的影响。

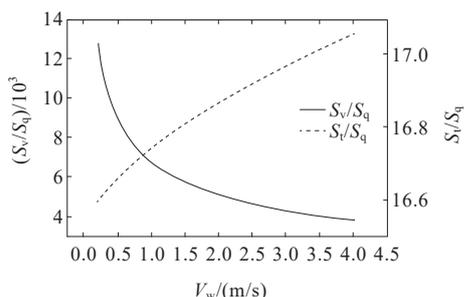
为了进行数值比较,首先需要规定式(11)~(13)中参数的取值。对于导线的日照吸收率 α_A 与铝球的表面辐射率 ϵ_A ,文献[24]提出,钢芯铝绞线的日照吸收率一般为 0.27~0.95,本文采用该范围的平均值 0.60 作为这两者的值;设计铝球半径 l 为 0.03 m;按照中国架设架空线路的一般环境温度状

况以及典型风速范围^[19],设定环境温度 T_{aA} 为 $-10\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、环境风速 V_{wA} 为 $0.2\sim 4.0\text{ m/s}$;本文采用3个用于构建方程组(6)的最小温度($50\text{ }^{\circ}\text{C}$),故设置铝球表面温度 T_A 为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

S_v/S_q 、 S_t/S_q 的3个环境变量灵敏度比较如图5所示,可知在给定的环境风速与环境温度范围内,环境风速远大于环境温度与日照强度的灵敏度。此外,环境温度也要远大于日照强度的灵敏度。



(a) $T_a=40\text{ }^{\circ}\text{C}$



(b) $T_a=-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

图5 环境变量灵敏度比较

Figure 5 Sensitivity comparison of environmental variables

对于环境风速 V_w ,由于其灵敏度较高,方程组(6)的求解结果能较为准确地反映实际环境风速的值,用于计算导线载流量的环境风速值可直接采用方程组(6)的求解结果作为最终结果;对于日照强度 Q_s 和环境温度 T_a 的求解,由于其灵敏度远小于风速,故在方程组(6)中无法保证求解精度,并且环境温度比日照强度的灵敏度大得多,达到了日照强度灵敏度的10倍以上,因此,对日照强度这种灵敏度较小的变量可以固定为一个默认值进行分析,从而保证其他参数的计算精度^[25]。本文取日照强度的夜间默认值 0 W/m^2 为例进行分析,同时,将日照强度和风速的值再次代入方程组(6),可分别获得3个环境温度,记为 T_{a70} 、 T_{a60} 、 T_{a50} 。取计算的平均环境温度作为最后的环境温度,即

$$T_{aA} = \frac{T_{a70} + T_{a60} + T_{a50}}{3}$$

综上,在利用上述方法确定铝球周边气象环境的环境变量后,即可得到导线周围气象环境的环境变量,进而可对导线载流量进行计算。环境测量解耦模型的计算过程如下:

1) 将等效散热装置放置在导线附近的发热铝球侧进行快速升温,达到升温上限后停止升温,并使其自然降温,同时记录自然降温过程中的铝球暂态温度数据;

2) 利用记录得到的铝球暂态温度数据,并拟合铝球降温温度函数表达式;

3) 确定关联方程组中的各项参数,并对该方程组进行求解;

4) 基于求解得到的风速,给定日照强度的默认值计算环境温度;

5) 将获取得到的风速、环境温度、日照强度代入式(6)中对导线载流量进行求解。

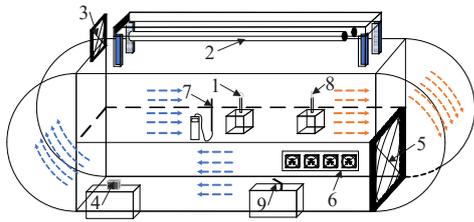
3 环境测量解耦模型的实验验证

针对文1中所提出的环境测量解耦模型,本文对该模型的准确性进行实验验证。通过对装置中的铝球在不同气象条件下的自然降温过程进行模拟,采集铝球的暂态降温数据后结合环境测量解耦模型计算导线载流量,并引入IEEE标准与环境下的载流量计算结果确定所提模型的计算误差。

3.1 实验平台设备

实验平台包含环境变量模拟实验平台与等效散热装置,如图6所示。环境变量模拟实验平台利用风洞实验平台与日照强度模拟平台分别对环境风速和日照强度进行模拟,其中风洞实验平台的具体设备构成按照文献[13]中的环境模拟实验平台进行设置。日照辐射模拟实验平台的具体设备包括:长弧氙灯、灯罩、触发器、功率调节器、开关电源、风冷风扇以及日照辐射计。氙灯是一种利用惰性气体放电从而进行发光的气体灯,需要配置一个触发器进行点燃,同时,通过开关电源为氙灯提供可靠的大功率直流能量,并利用功率调节器对电源的出力进行调整从而实现氙灯照度的改变,达到改变日照强度的目的。由于氙灯工作时会产生大量热量,因此使用风冷风扇给氙灯进行散热。实验过

程中利用日照辐射计对当前日照强度进行测量。



1.等效散热装置;2.长弧氙灯;3.氙灯散热设备;4.氙灯功率控制设备(日照强度控制器);5.负压风机;6.风机散热设备;7.热敏式风速检测仪;8.测量环境温度的热电偶;9.温度记录仪

图 6 实验平台

Figure 6 Diagram of experimental platform

对于等效散热装置,其主要组成部分为发热铝球和支撑杆。装置的构造如图 7 所示,其半径设置为 0.03 m,实际测得铝球的质量为 0.040 4 kg。铝球内部置放电阻丝,加热电阻丝可将铝球短时间内升至高温,通过绝热材料制造的中空支撑杆引出电阻与电源之间的引出线。

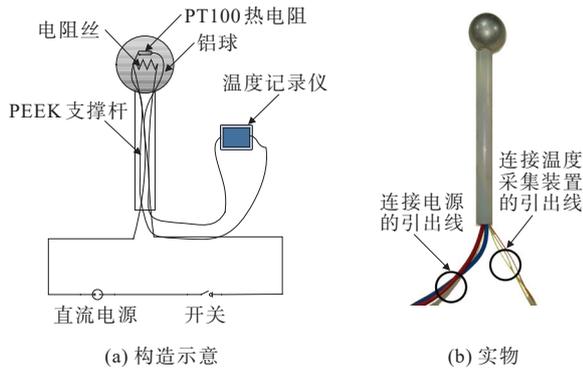


图 7 等效散热装置的构造

Figure 7 Structure of equivalent heat transfer equipment

3.2 实验验证结果与分析

本文设计的模型实验验证流程如图 8 所示。实验所研究的对象为 JL/G1A 240/30 mm² 型导线。在实验过程中,首先调节日照强度、风洞内部风速,同时利用空调稳定内部的环境温度,再记录此时的实验环境参数值用于 IEEE 标准的载流量计算。然后将铝球快速升温至温升上限(本文以 70℃ 为例),采集铝球暂态降温过程中的暂态温度数据,时间间隔为 0.5 s。将获取得到的铝球暂态温度数据用于环境测量解耦模型的计算,并通过对比所提模型和 IEEE 标准载流量计算结果,确定所提模型载流量计算精度。不同气象条件下所提模型和 IEEE 标准下的载流量计算结果及误差如表 1 所示。

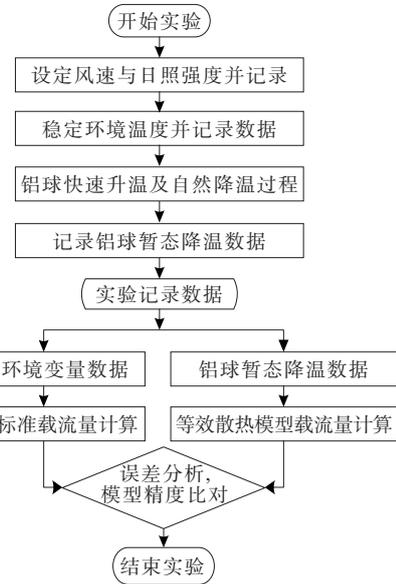


图 8 实验流程

Figure 8 Experimental procedure

表 1 环境测量解耦模型与 IEEE 标准计算结果对比

Table 1 Comparison of environmental measurement decoupling model and IEEE standard calculation results

日照强度/ (W/m ²)	风速/ (m/s)	环境 温度/℃	载流量/A		误差/ %
			模型	IEEE 标准	
0	0.00	22.1	550.71	539.12	2.15
0	0.57	17.5	727.59	729.63	0.28
0	1.12	17.6	836.35	841.82	0.65
0	1.67	17.7	917.54	920.89	0.36
0	2.23	18.3	984.24	1 002.05	1.81
0	2.78	18.7	1 039.83	1 036.90	-0.28
0	3.33	21.6	1 060.86	1 093.39	3.07
500	0.57	34.5	565.70	564.53	-0.21
500	1.12	32.6	679.06	676.79	-0.33
500	1.67	32.5	750.91	745.87	-0.67
500	2.23	32.2	817.43	812.12	-0.65
1 000	0.57	30.2	563.48	556.09	-1.31
1 000	1.12	28.2	688.40	685.23	-0.46
1 000	1.67	27.3	775.76	767.60	-1.05
1 000	2.23	25.3	866.76	873.61	0.79

与表 1 相对应的各个模拟气象条件下模型对环境参数的计算值与实际环境参数值的比较如表 2 所示,可知环境测量解耦模型对环境风速的计算偏差不超过 0.25 m/s,说明环境测量解耦模型能较准确地对风速进行计算,验证了文 2.3 中对各变量进行精度分析的结果。同时可以发现,环境温度的求解精度较差,并且实际日照强度越大环境温度的求解

精度也越差。这是由于日照强度在计算中默认为 0 W/m^2 , 若实际日照强度大于 0 W/m^2 , 其带来对环境散热的影响将施加到环境温度的求解结果上。实际日照强度与日照强度默认值偏差越大, 环境温度求解结果的偏差也越大, 但最终表现出的综合散热影响能力变化不大。

表2 环境测量解耦模型的环境变量计算值与实测值对比

Table 2 Comparison between calculated values using environmental measurement decoupling model and measured values of environmental variables

日照强度/ (W/m^2)	风速/(m/s)		风速偏差/ (m/s)	环境温度/ $^{\circ}\text{C}$		环境温度 偏差/(m/s)
	实际	计算		实际	计算	
0	0.00	0.25	0.25	22.1	29.52	-7.42
0	0.57	0.56	-0.01	17.5	16.75	-0.75
0	1.12	1.19	0.07	17.6	18.33	0.73
0	1.67	1.73	0.06	17.7	18.36	0.66
0	2.23	2.42	0.19	18.3	18.74	0.44
0	2.78	2.76	-0.02	18.7	18.78	0.08
0	3.33	3.48	0.15	21.6	19.77	-1.83
500	0.57	0.58	0.01	34.5	39.30	4.80
500	1.12	1.11	-0.01	32.6	36.07	3.47
500	1.67	1.65	-0.02	32.5	35.53	3.03
500	2.23	2.23	0.00	32.2	35.05	2.85
1 000	0.57	0.54	-0.03	30.2	39.51	9.31
1 000	1.12	1.10	-0.02	28.2	35.12	6.92
1 000	1.67	1.60	-0.07	27.3	32.87	5.57
1 000	2.23	2.37	0.14	25.3	30.74	5.44

由于环境测量解耦模型对日照强度采用赋予默认值的方案, 因此, 存在默认值取值的不同可能对模型载流量计算结果产生影响的问题。取不同日照强度默认值(500 、 $1\ 000 \text{ W/m}^2$)时环境测量解耦模型的载流量计算结果如表3所示, 并与前述采用 0 W/m^2 时的模型计算结果进行对比, 可以看到, 随着日照强度的增加, 模型的载流量计算结果与日照强度默认值取为 0 W/m^2 时的偏差不超过 4% , 即日照强度默认值的取值对模型计算结果影响较小。

实际上不同季节的环境量对架空导线的载流能力也有影响。夏、冬季条件下利用环境测量解耦模型和 IEEE 标准计算的导线载流量的比较结果如表4所示。

表3 不同日照强度默认值与日照强度默认值为 0 W/m^2 的模型计算结果对比

Table 3 Comparison of environmental measurement decoupling model calculation results between different default sunlight intensities and zero unit sunlight

0	不同日照强度默认值(W/m^2)下的载流量/A			
	500		1 000	
	载流量/A	误差/%	载流量/A	误差/%
550.71	541.16	-1.73	531.07	-3.57
729.63	720.51	-1.25	711.17	-2.53
841.82	832.88	-1.06	823.81	-2.14
920.89	912.69	-0.89	904.40	-1.79
1 002.05	994.51	-0.75	986.91	-1.51
1 036.90	1 029.61	-0.70	1 022.27	-1.41
1 093.39	1 086.48	-0.63	1 079.51	-1.27
564.53	553.64	-1.93	542.36	-3.93
676.79	666.21	-1.56	655.39	-3.16
745.87	735.86	-1.34	725.68	-2.71
812.12	802.87	-1.14	793.49	-2.29
556.09	545.22	-1.95	533.93	-3.98
685.23	674.77	-1.53	664.08	-3.09
767.60	757.86	-1.27	747.97	-2.56
873.61	864.99	-0.99	856.27	-1.98

表4 不同季节下环境测量解耦模型与 IEEE 标准载流量计算结果对比

Table 4 Comparison of ampacity calculation results using environmental measurement decoupling model and IEEE standard in different seasons

季节	日照强度/ (W/m^2)	风速/ (m/s)	环境温 度/ $^{\circ}\text{C}$	载流量/A		误差/ %
				IEEE标准	模型	
夏季	0	0.00	26.9	528.00	508.62	3.81
	0	0.57	28.3	637.46	652.22	-2.26
	0	1.12	27.2	755.64	758.89	-0.43
	0	1.67	28.3	817.03	821.51	-0.54
	0	2.23	28.3	882.32	885.81	-0.39
冬季	0	0.00	22.1	550.71	539.12	2.15
	0	0.57	17.5	727.59	729.63	0.28
	0	1.12	17.6	836.35	841.82	0.65
	0	1.67	17.7	917.54	920.89	0.36
	0	2.23	18.3	984.24	1 002.05	1.81

由表4可知, 不同季节下环境测量解耦模型的载流量计算结果具有较好的精度, 与 IEEE 标准的载流量计算结果相比较, 误差不超过 4% 。这说明季节的变化对环境测量解耦模型的载流量计算结果影响较小。因此, 在不使用环境变量监测设备的情况下, 环境测量解耦模型只需通过对铝球的暂态

降温数据进行监测,即可计算当前环境的环境参数,从而达到对导线载流量准确计算的目的。

4 结语

本文基于与架空导线处于同一气象条件下的等效散热装置,建立了用于架空导线动态增容的环境测量解耦模型。该模型通过建立等效散热装置中铝球的暂态热行为与环境参数间的关联关系,对当前风速、环境温度以及日照强度进行求解,间接实现对导线载流量的计算,并对模型进行实验验证。

1) 在求解关联方程组获取导线所处环境的风速、环境温度及日照强度时,由于风速灵敏度最高,因此其求解精度最好,而日照强度灵敏度最低,求解精度最差。

2) 本文通过环境模拟实验平台实现了等效散热装置的模拟运行,并利用环境测量解耦模型进行了载流量的计算。实验结果表明,在不同气象条件下,环境测量解耦模型与IEEE标准的载流量计算结果的相对误差不超过4%,验证了环境测量解耦模型的准确性。

3) 环境测量解耦模型对不同实验条件下的风速解耦偏差不超过0.25 m/s,说明模型能较为准确地对风速进行求解;而由于解耦过程中取日照强度为默认值 0 W/m^2 ,因此,当实际日照强度大于 0 W/m^2 时,这部分日照的影响将会反映在环境温度的解耦结果上,使环境温度的解耦结果偏大。

4) 改变日照强度的默认值,环境测量解耦模型的载流量计算误差不超过4%,这表明日照强度默认值的取值对所提模型的计算结果影响较小。

5) 不同季节下的实验结果表明,环境测量解耦模型与IEEE标准的载流量计算结果相对误差不超过4%,这说明季节的变化对环境测量解耦模型的计算结果影响较小。

在环境测量解耦模型的研究中,主要通过周围环境的环境变量对导线散热水平影响的研究实现对导线载流量的求解,而实际上导线的自身电阻会产生焦耳热对导线的载流量也有影响。目前,本文采用的电阻计算方法考虑了集肤效应以及导线温度对其电阻的影响,但该方法对于不同的导线具有特异性,限制了本模型的通用性,因此,后续研究中

有必要对电阻的计算进行研究,从而拓宽本模型的使用范围。同时,由于实验室条件下不能模拟现实环境中风速以及日照突变的情况,因此,后续研究中需展开等效散热装置的试点应用进行验证。

参考文献:

- [1] 侯宇,王伟,韦微,等.输电线路动态增容技术研究及应用[J].电力系统自动化,2021,45(17):189-198.
HOU Yu, WANG Wei, WEI Zheng, et al. Research and application of dynamic rating technology of transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45 (17):189-198.
- [2] 陈志永,张倩茅,秦梁栋,等.考虑大规模区外来电接入的输电网扩展规划方法[J].电网与清洁能源,2022,38(10):87-97.
CHEN Zhiyong, ZHANG Qianmao, QIN Liangdong, et al. A transmission expansion planning method considering of large-scale external power access[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(10): 87-97.
- [3] DUPIN R, KARINIOTAKIS G, MICHIORRI A. Overhead lines dynamic line rating based on probabilistic day-ahead forecasting and risk assessment[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2019, 110:565-578.
- [4] 宰红斌,吴浩林,王昊,等.基于改进机器学习的输电线路弧垂温度估计方法[J].电力工程技术,2022,41(2):209-214+223.
ZAI Hongbin, WU Haolin, WANG Hao, et al. Sag and temperature estimation method based on improved machine learning for transmission line[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(2):209-214+223.
- [5] 曾祥君,阳韬,钟卓颖,等.基于弧垂实时测量的输电线路动态增容决策系统设计[J].电力科学与技术学报,2015,30(2):9-15.
ZENG Xiangjun, YANG Tao, ZHONG Zhuoying, et al. Design of dynamic power capacity increasing decision system based on the real-time measurement of transmission line sag[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2015, 30(2):9-15.
- [6] 傅晨钊,李红雷,张振鹏,等.土壤直埋单根电缆暂态温升热路模型的验证试验[J].高压电器,2021,57(2):159-165.
FU Chenzhao, LI Honglei, ZHANG Zhenpeng, et al. Verification test for thermal circuit model of transient temperature rise of soil direct buried single cable[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(2): 159-165.
- [7] 张钰宁,程养春,陈凯,等.输电线路动态增容载流量计算模型的研究[J].现代电力,2013,30(6):88-91.

- ZHANG Yuning, CHENG Yangchun, CHEN Kai, et al. Study on calculation model of the dynamic compatibilization carrying capacity of transmission lines [J]. *Modern Electric Power*, 2013, 30(6): 88-91.
- [8] GLENN A D, THOMAS E D, PIERRER R H L, et al. Short-time thermal ratings for bare overhead conductors[J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1969, 88: 194-199.
- [9] DOUGLASS D A, ABDEL-ATY E. Real-time monitoring and dynamic thermal rating of power transmission circuits [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1996, 11: 1407-1418.
- [10] MICHIRRI A, TALOR P C, JUPE S C E, et al. Investigation into the influence of environmental conditions on power system ratings[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A Journal of Power and Energy*, 2009, 223(7): 743-757.
- [11] 王雨畅, 张国玉, 孙高飞, 等. 日照计的研究概况与发展趋势[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(12): 1-14.
WANG Yuchang, ZHANG Guoyu, SUN Gaofei, et al. Research survey and development trend of sunshine recorder[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(12): 1-14.
- [12] LIU Z, DENG H L, PENG R D, et al. An equivalent heat transfer model instead of wind speed measuring for dynamic thermal rating of transmission lines[J]. *Energies*, 2020, 13(18): 13184679.
- [13] 彭向阳, 彭瑞东, 王锐, 等. 架空输电线路动态增容等效散热暂态测量模型[J]. *高电压技术*, 2022, 48(10): 3975-3986.
PENG Xiangyang, PENG Ruidong, WANG Rui, et al. An equivalent heat transfer transient measurement model for dynamic capacity increase of over-head transmission lines [J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(10): 3975-3986.
- [14] 徐奇伟, 黄宏, 张雪峰, 等. 基于改进区域全卷积网络的高压引线接头红外图像特征分析的在线故障诊断方法[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(7): 1380-1388.
XU Qiwei, HUANG Hong, ZHANG Xuefeng, et al. Online fault diagnosis method for infrared image feature analysis of high-voltage lead connectors based on improved R-FCN [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(7): 1380-1388.
- [15] 杨世铭, 陶文铨. *传热学(第3版)*[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998: 28-72.
YANG Shiming, TAO Wenquan. *Heat Transfer (3rd Edition)*[M]. Beijing: Higher Education Press, 1998: 28-72.
- [16] 韩晓燕, 黄新波, 赵小惠, 等. 输电线路摩尔根载流量简化公式的初步研究[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2009, 21(5): 92-96.
HAN Xiaoyan, HUANG Xinbo, ZHAO Xiaohui. Preliminary study on morgan transmission capacity simplified formula of transmission lines[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2009, 21(5): 92-96.
- [17] IEEE Std 738—2012. IEEE standard for calculating the current-temperature relationship of bare over-head conductors[S].
- [18] MICHIORRI A, NGUYEN H M, ALESSANDRINI S, et al. Andrea et al. Forecasting for dynamic line rating[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 52: 1713-1730.
- [19] GB 50545—2010. 110 kV~750 kV 架空输电线路设计规范[S]. GB 50545—2010. Code for design of 110 kV~750 kV overhead transmission line[S].
- [20] MCADAMS W H. *Heat transmission(3rd Edition)*[M]. New York, USA: McGraw-Hill Book Company, 1954: 27-87, 99-133.
- [21] 顾超, 王珏钰, 朱德通. 一种解非线性方程组的不精确牛顿—兰索斯方法[J]. *数学学报(中文版)*, 2023, 66(2): 317-338.
GU Chao, WANG Jueyu, ZHU Detong. An inexact Newton-Lanczos method for solving a system of nonlinear equations[J]. *Acta Mathematica Sinica(Chinese Series)*, 2023, 66(2): 317-338.
- [22] BEN-ISRAEL A. A Newton-Raphson method for the solution of systems of equations[J]. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 1966, 15(2): 243-252.
- [23] 谢亚君. 一类基于 Halley-Newton 型的有效修正算法[J]. *数学物理学报*, 2021, 41(4): 1066-1078.
XIE Yajun. A class of efficient modified algorithms based on Halley-Newton methods[J]. *Acta Mathematica Scientia*, 2021, 41(4): 1066-1078.
- [24] RASHID M H, HUSSIEN Z F, RAHIM A A, et al. *Electric power transmission*[M]. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann Ltd., 2018: 829-846.
- [25] 李培强, 李慧, 李欣然. 基于灵敏度与相关性的综合负荷模型参数优化辨识策略[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(16): 181-188.
LI Peiqiang, LI Hui, LI Xinran. Optimized identification strategy for composite load model parameters based on sensitivity and correlation analysis[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(16): 181-188.