

传热学与电学问题的迁移类比研究:(2)工程实践

李元^{1,2}, 王晨^{1,2}, 张冠军^{1,2}

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安;

2. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为验证传热学与电学迁移类比理论研究成果的可行性与工程实践价值,给出了两个利用热电类比思想解决电气工程领域实际问题的典型应用案例。针对特殊区域电缆载流量合理核算的难题,基于热电类比分析思路构建电缆径向热路,将电缆结构的各层绝缘材料热阻与各层损耗进行归算,建立了穿过不利散热区电缆的分布式参数热路模型,给出了求解电缆温度场与载流量的思路,弥补了当前国际电工委员会(IEC)标准推荐计算方法的不足;针对变压器热点温度预测方法不能同时满足实时性与准确性的问题,结合变压器传热过程分析与热电类比理论构建了变压器的集中式参数热路模型,将基尔霍夫电流定律类比应用于热路模型,提出了热点温度快速预测方法。实例分析发现,所提模型相较于IEC推荐方法具有更高的预测精度。热电类比方法能有效地解决电气工程领域的实际应用问题,迁移类比学习应可推动不同学科交叉的创新与发展。

关键词: 热电类比;热路模型;工程实践;电力电缆;变压器

中图分类号: TM835 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202109001 **文章编号:** 0253-987X(2021)09-0001-08



OSID 码

Analogical Transfer between Heat Transfer and Electrology: (2) Engineering Practices

LI Yuan^{1,2}, WANG Chen^{1,2}, ZHANG Guanjun^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To verify the feasibility and engineering practice value of the transfer analogy theory between heat transfer and electrology, this paper presents two typical applications addressing practical problems in the field of electrical engineering. Firstly, in view of lack of calculating method for the current carrying capacity of cable lying through unfavorable heat dissipation regions, we establish the radial thermal circuit of cable with the aid of thermal-electrical analogy analysis. The thermal resistance of insulating material and the loss in each layer of cable structure are equivalently evaluated, and further, the thermal circuit model with distributed parameters is constructed. The thought of solving the cable temperature distribution and carrying capacity is given, which compensates the insufficiency of the current calculation method recommended by IEC standard. Secondly, for the limitations of the prediction methods of hot-spot temperature in transformer, we develop the thermal circuit model with centralized parameters by incorporating the heat transfer process of transformer and the thermal-electrical analogy. Applying Kirchhoff current law to the thermal circuit model, a faster prediction method for calculating the hot-spot

temperature is proposed. It is verified that the model has higher prediction accuracy than the method recommended by IEC standard. The results indicate that the thermal-electric analogy can solve engineering problems more practically and the transfer analogy can promote innovation and development of many interdisciplinary researches.

Keywords: thermal-electrical analogy; thermal circuit model; engineering practices; power cable; transformer

前文^[1]详述了传热学与电学迁移类比研究的理论基础,并借助热电理论类比得到热路模型。为验证上述研究的正确性与适用性,本文给出两个运用热-电类比思想解决电气工程领域中热场估算等典型问题的分析案例。

电力设备是构成电力系统的基本元件,在电能产生、输送、变换和利用等环节中起到关键作用。电力设备在使用过程中受负荷波动影响,常因过热导致故障,从而威胁电力系统的安全可靠性^[2]。因此,研究电力设备内部与外部的传热过程,严格控制其运行温度,合理确定负荷限值,对保证设备的绝缘强度、稳定性和高可靠性具有重要意义。

目前,随着输电电压等级的提升、设备小型化的需求以及新型设备的出现,电力设备的容量体积比不断增大,内部结构与组成日趋复杂,计算设备内部热场分布变得更加困难,如何快速准确地计算设备内部温度,进而有效评估设备负载能力成为电气工程特别是高压输电领域的一个重要研究方向。

本文以电力电缆与电力变压器为研究对象,针对估算特殊区域电缆载流量与快速有效预测变压器热点温度的问题,运用热路模型法对局部穿过不利散热区电缆的稳态载流能力与油浸式变压器的热点温度开展研究。通过算例验证该方法在快速估算热场方面的有效性,展现热-电迁移类比思想潜在的工程实践价值。

1 电力电缆的载流能力研究

1.1 问题:如何估算特殊区域电缆载流量

随着城市化建设速度加快,大城市中心用电负荷陡增,城市建设规划与架空输电走廊相互配合的矛盾日益加剧^[3]。有序开展大规模电力架空线路“入地”工作成为现代都市建设的重要方向。以深圳为例,目前配网电缆化率为88%^[4],中心区罗湖、福田、南山已基本实现电缆全覆盖,达到99%以上,地下电缆输电线路取代架空输电线路成为今后的必然趋势,尤其是在城镇市区。

常见的地下电缆敷设方式主要有土壤直埋、沟

槽式、管道式(排管)和隧道式^[5],因不同电压等级和敷设环境而异,如图1所示。计算4种常规敷设方式下电缆的稳态载流量时,可直接依据国际电工委员会(IEC)IEC60287标准^[6-7]推荐的公式。在城市电网大规模建设中,受实地条件限制,一些非标准电缆敷设方式大量使用。例如,电缆通常沿街道走向敷设,有时需要穿过街道或建筑物,导致局部电缆运行环境发生改变^[8]。为了保护电缆,往往将局部电缆敷设在管道内,其他区域仍以直埋方式敷设,如图2所示。采用管道敷设区域的热阻通常高于周围环境介质的,对电缆散热产生不利影响,需重点关注穿

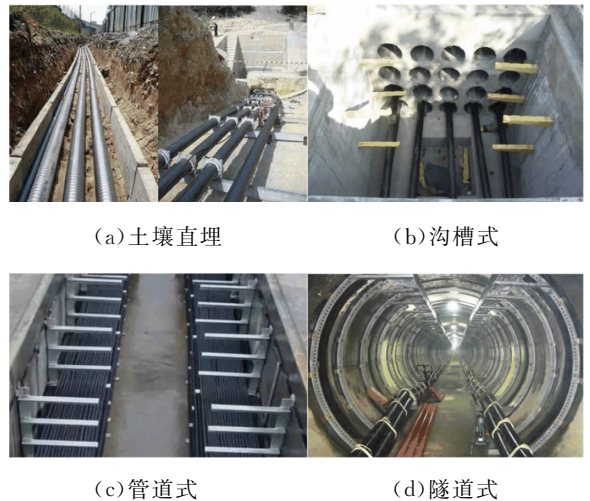


图1 常见的电缆敷设方式

Fig. 1 Typical laying methods of cable

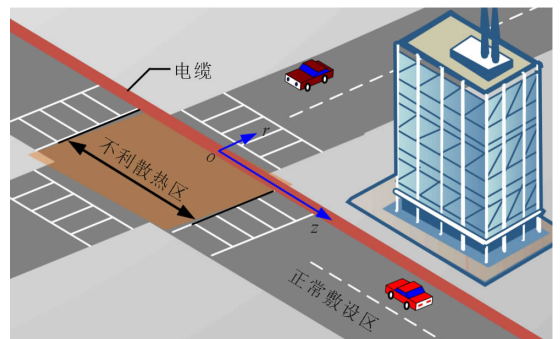


图2 电缆穿过街道的敷设方式

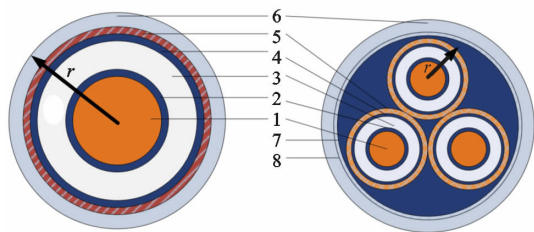
Fig. 2 Cable laying method through streets

过不利散热区时电缆的温度分布与载流能力,防止过热事故。目前,IEC 标准推荐方法仅适用于标准敷设情况,非标准敷设情况下的电缆载流量计算尚缺乏科学的计算依据。

第1节依据文献[1]所述的热-电类比迁移思想,研究了一种典型的非标准敷设情况——穿过不利散热区域的电缆温度分布与载流量,研究建立的计算分析模型可为电缆非标准敷设方式下温度场与载流量评估提供解决方案。

1.2 基于分布参数的电缆热路模型

35 kV 及以下电压等级电缆多为三芯结构,典型结构如图3所示。电缆的发热源主要有导体电阻损耗 W_1 、绝缘层介质损耗 W_2 、金属护套电阻损耗 W_3 与铠装层电阻损耗 W_4 [9]。当电流通过电缆导体时,不利散热区与正常敷设区电缆的径向传热过程基本相同。导体电阻产生焦耳热损耗引起导体升温,产生的热量部分储存在导线和绝缘材料内,其余热量经绝缘材料传导至电缆表面和周围介质,最后土壤与空气边界产生对流与辐射换热。经过一个较长的暂态过程,电缆的温度逐渐达到稳定,产热与散热达到平衡。基于电缆径向传热过程建立的热路模型如图4所示。图中, R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 分别为导体与金属套间热阻、金属套与铠装间热阻、外护层热阻、外部热阻。各部分热阻依次连接,形成串联热路。



1—导体;2—导体屏蔽;3—绝缘层;4—绝缘屏蔽;
5—金属套;6—外护层;7—内衬;8—铠装层。

图3 交联聚乙烯电缆结构

Fig. 3 Structure of XLPE cable

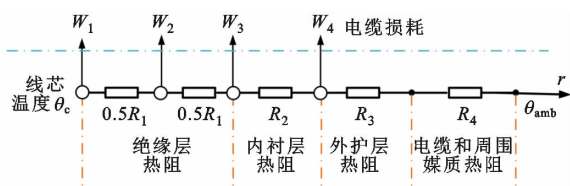


图4 电缆径向热路模型

Fig. 4 Radial thermal circuit model of cable

为了简化电缆热路模型,将电缆结构中各层绝缘材料热阻 R_1 、 R_2 、 R_3 与各层损耗 W_1 、 W_2 、 W_3 、 W_4

进行归算。假设电缆每层厚度不变,可将各层等效为一种介质,得到电缆径向本体等效热阻 R' 。在保证总输出热量与各层温度不变的情况下,将各层损耗归入导体损耗,得到电缆等效热源 W_c 。由于电缆穿过不均匀介质,还需要考虑电缆轴向的热流 q_L 与热阻 R_L 。以不利散热区的中心位置为起点($z=0$),将电缆长度方向的 z 轴离散化,认为导体和金属套温度在每个离散间隔内热流保持不变[10]。由此建立的电缆分布式参数热路模型如图5所示。图中 $\theta_{amb}^{(1)}$ 与 $\theta_{amb}^{(2)}$ 为环境温度,上标(1)和(2)用来区分不利散热区与正常敷设区。

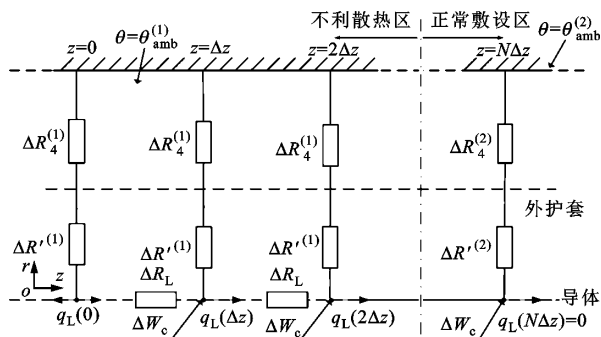


图5 穿过不利散热区电缆的热路模型

Fig. 5 Thermal circuit model of cables crossing unfavorable heat dissipation regions

1.3 载流量计算与实例应用

根据能量守恒定律,电缆导体长度为 dz 的微元体在任一时间间隔内有动态平衡关系

$$(W_r - W_c) + \frac{\partial W_z}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中: W_r 为径向微元体的热流量; W_c 为通过表面轴向流入微元体的热流量,是电缆导体温度 θ 的函数。根据温度叠加原理, θ 可分解为沿电缆径向传热温度 $\theta_r^{(v)} = \theta_{amb}^{(v)} + \Delta\theta_d^{(v)} + W_c R_t^{(v)}$ 与沿轴向传热温度 $\theta_z^{(v)} = \frac{\partial W_z}{\partial z} R_r^{(v)}$, 其中, v 代表两个敷设区域的序号1或2, $\Delta\theta_d$ 为单位长度导体绝缘的介质损耗引起的温升, R_r 与 R_t 分别为电缆的径向热阻与总等效热阻。电缆导体温度方程为

$$\theta^{(v)} = \theta_{amb}^{(v)} + \Delta\theta_d^{(v)} + W_c R_t^{(v)} + (W_r - W_c) R_r^{(v)} \quad (2)$$

将参数 W_c 的表达式代入式(2),整理化简可得

$$\theta^{(v)} - \frac{1}{\gamma_v} \frac{\partial^2 \theta^{(v)}}{\partial z^2} = \frac{W_c R_t^{(v)} + \Delta\theta_d^{(v)} + \theta_{amb}^{(v)}}{1 - \Delta W R_t^{(v)}} \quad (3)$$

等式的右边是一个与轴向长度 z 、温度 θ 无关,而仅与区域相关的常数项,可用 $\theta_{\infty}^{(v)}$ 表示。 γ_v 是一个与电缆电流有关的参数,求解式(3)的微分方程可得轴

向导体温度方程的通解^[11]

$$\theta^{(v)} = \theta_{\infty}^{(v)} + A_v \sinh(\gamma_v z) + B_v \cosh(\gamma_v z) \quad (4)$$

式中 A 和 B 是两个任意常数。根据边界约束条件解出 A 和 B , 即可得到轴向导体温度的表达式

$$\theta^{(1)}(0) = \theta_{\infty}^{(1)} + \frac{\theta_{\infty}^{(2)} - \theta_{\infty}^{(1)}}{\cosh(\gamma_1 z_0) + \gamma_1 \gamma_2^{-1} \sinh(\gamma_1 z_0)} \quad (5)$$

式中 z_0 为不利散热区宽度的 $1/2$ 。设置 $\theta^{(1)}(0)$ 为电缆导体最高工作温度, 迭代计算电缆稳态载流量和对应的电缆轴向温度分布。

以 YJV8.7/10 kV $3 \times 300 \text{ mm}^2$ 的 XLPE 电缆为例, 应用图 5 提出的模型与表达式估算电缆温度分布与载流量。若该电缆为正常敷设, 载流量应为 475 A。若穿过不利散热区, 局部电缆段穿过宽 15 m 的街道, 从街道中心位置即 $z=0$ 处开始分析导体轴向温度分布, 计算结果如图 6 所示。

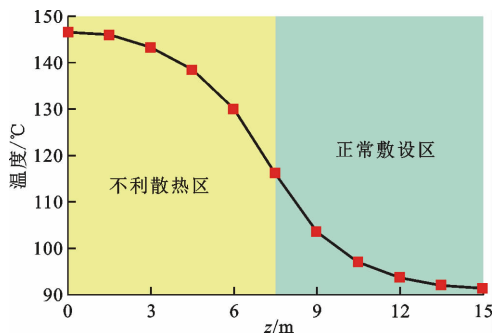


图6 电缆轴向导体温度分布

Fig. 6 Axial temperature distribution of cable conductor

由图 6 可知: 敷设于不利散热区的电缆导体温度较高, 最高温度出现在街道中心位置, 达到 146.9 °C; 不利散热区的边界处 (即 $z=7.5 \text{ m}$ 附近) 电缆导体温度变化急剧; 正常敷设区的电缆导体温度相对较低, 距离街道中心 15 m 时, 导体温度降至稳态最高工作温度 90 °C。经迭代计算得到此时电缆的稳态载流量 $I=369 \text{ A}$, 比正常敷设下的载流量降低 23%。该研究对电缆线路合理敷设、负荷动态实时调整与电缆经济安全运行具有参考意义。

2 电力变压器的热点温度预测

2.1 问题: 如何快速有效预测热点温度

电力变压器是电能转换的核心设备, 结构非常复杂, 在电力系统中作用重大。目前, 用电需求量快速增长, 而电网规划与建设相对滞后, 使得部分变压器在较高的负荷率下运行^[12]。2019 年某省电网年度运行方式电网风险报告显示, 变电站内一台 220

kV 主变压器跳闸后, 可引起区域网络内 53 台主变压器负载率超 1.3。变压器的负荷增大会引起负载损耗增加、内部温度升高, 从而导致绝缘强度降低, 变压器的故障概率显著上升。一旦变压器停运可能引起电网大面积停电或限电, 造成恶劣的社会影响^[13]。为了延长变压器的运行时长, 保障电网的安全性, 许多学者聚焦变压器的热特性研究^[14-16]。对热特性的研究集中在绕组热点温度的预测, 即变压器绝缘系统承受的最高温度^[17]。

准确监测、管控热点温度可有效评估变压器的负荷能力, 延长变压器寿命。光纤传感器或热电偶测量绕组温度是最直接获取变压器内部温度的方法^[18]。直接测量法简单易实现, 但存在部分局限: 将探头埋入变压器绕组线饼中可能会降低变压器的绝缘强度; 测温元件埋设位置与数量的不确定性使得测温结果存在误差; 高质量的传感器设计和工艺制造要求增加了生产与维护成本。除此之外, 学者们还研究了一些其他方法: 标准推荐法^[19]通过描述变压器内部热传递过程来间接估计热点温度, 但是公式中多为经验参数, 计算误差较大; 数值计算法^[20]计算精度高但计算复杂且耗时长, 不适合工程应用; 人工智能法^[21]预测精度高但训练过程易陷入局部极小值点。为实现快速有效预测变压器热点温度, 本节在热-电迁移类比思想的基础上, 提出将变压器内部热传递过程简化为热路模型, 进而依据电路理论估计热点温度。

2.2 基于集总参数的变压器热路模型

变压器的热源主要由负载损耗、空载损耗和器壁吸收的日照辐射功率组成^[22]。负载损耗产生的热量首先传导至铁芯与绕组, 使二者温度升高。此时, 铁芯与绕组和绝缘油间存在温度差, 热量以热对流的形式传递到油中, 吸收热量的油温度升高、密度减小, 向箱体顶部流动。顶部绝缘油在日照辐射的作用下温度也会升高, 由于此部分影响通常小于内部损耗发热, 顶部油温相对较低, 因此顶部绝缘油会向底部运动, 上升的底部油流与向下的顶部油流形成热对流。其中, 靠近变压器箱体的绝缘油将这些持续产生的热量传递到冷却装置和变压器外壳。因此, 冷却装置和变压器外壳温度升高, 与周围空气产生温度差, 热量最终以热对流和热辐射的形式传递到外界环境, 变压器内部热量传递过程如图 7 所示。

基于变压器传热过程和热-电类比理论, 建立了环境温度-平均油温-顶层油温到绕组温度的变压器集总参数热路模型^[23-24], 如图 8 所示。以图 8a 为

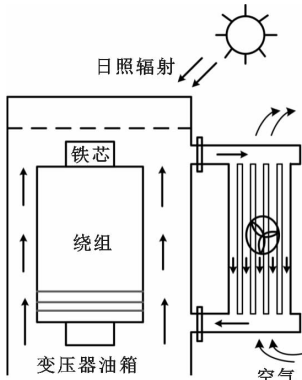
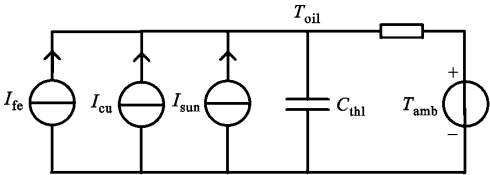


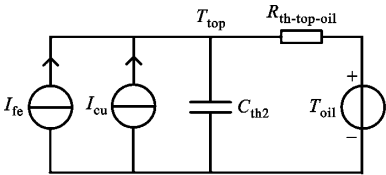
图 7 变压器内部热量传递过程

Fig. 7 Heat transfer process in transformer

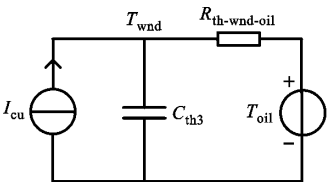
例,分析热路模型的建立过程。在变压器空载损耗 I_{fe} 、负载损耗 I_{cu} 与变压器外壳吸收的日照辐射功率 I_{sun} 的共同作用下,绝缘油温度升高,直接影响平均油温 T_{oil} ,因此可将三支热流并联。在热量传递的过程中,铁芯、绕组、绝缘油与变压器外壳的温度都上升,可看作是热量的储存,用热容 C_{th1} 表示;在绝缘油、变压器外壳及外部空气温度的影响下,热量的传递会受到阻碍,用热阻 $R_{th-oil-air}$ 表示。完整的散热过程是在平均油温与环境温度的温差的驱动下进行的,因此可将环境温度 T_{amb} 看作电压源。



(a) 环境温度-平均油温模型



(b) 平均油温-顶层油温模型



(c) 平均油温-绕组平均温度模型

图 8 变压器热路模型

Fig. 8 Thermal circuit model of transformer

图 8b 与 8c 涉及到的其他物理量有: T_{top} 、 T_{wnd}

分别表示顶层油温与绕组平均温度; C_{th2} 表示铁芯、绕组和绝缘油的总储热热容; C_{th3} 表示为绕组的储热热容; $R_{th-top-oil}$ 表示在顶层油温至平均油温的散热过程中,绝缘油对散热过程的阻碍作用; $R_{th-wnd-oil}$ 表示在绕组平均温度至平均油温的散热过程中,绕组和绝缘油对散热过程的阻碍作用。

2.3 热点温度估算方法与实例验证

将电路中的基尔霍夫电流定律类比应用于热路模型,可得到图 8 对应的一阶微分方程

$$I_{fe} + I_{cu} + I_{sun} = C_{th1} \frac{dT_{oil}}{dt} + \frac{1}{R_{th-oil-air}} (T_{oil} - T_{amb}) \quad (6)$$

$$I_{fe} + I_{cu} = C_{th2} \frac{dT_{top}}{dt} + \frac{1}{R_{th-top-oil}} (T_{top} - T_{oil}) \quad (7)$$

$$I_{cu} = C_{th3} \frac{dT_{wnd}}{dt} + \frac{1}{R_{th-wnd-top}} (T_{wnd} - T_{top}) \quad (8)$$

已知环境温度 T_{amb} ,可由式(6)求得平均油温 T_{oil} ,进而可通过式(7)(8)分别求解 T_{top} 与 T_{wnd} 。

为了便于分析变压器内部温度场分布,GB/T 1094.7—2008 负载导则^[25]给出了经过合理假设与简化后的变压器内热分布,如图 9 所示。图中: g_r 为绕组平均温度 T_{wnd} 与平均油温 T_{oil} 的差值,绕组热点温度通常高于绕组顶部温度; $H > 1$ 为热点系数; Hg_r 为热点温度 T_{hs} 与顶层油温 T_{top} 的差值。

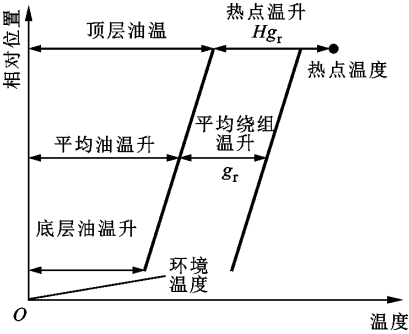


图 9 变压器内热分布

Fig. 9 Heat distribution in transformer

由此,得到变压器热点温度的计算公式

$$T_{hs} = H(T_{wnd} - T_{oil}) + T_{top} \quad (9)$$

采用 110 kV/50 MV·A 油浸自冷型变压器与 220 kV/180 MV·A 油浸风冷型变压器的温升实验数据,对图 8 提出的温度估算模型进行验证,预测结果如图 10 和 11 所示。

分析图 10 可知,采用 IEC 推荐方法计算热点温度的最大绝对误差和相对误差分别为 3℃和 4.47%,而本文模型计算结果的最大绝对误差和相对误差分别为 1.5℃和 2.14%。分析图 11 可知,对

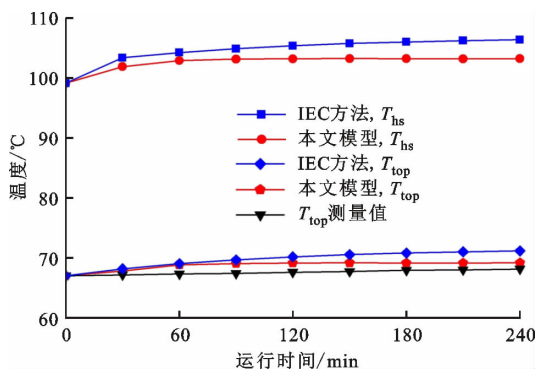


图10 110 kV 变压器的实测数据与模型验证

Fig. 10 Model verification for a 110 kV transformer

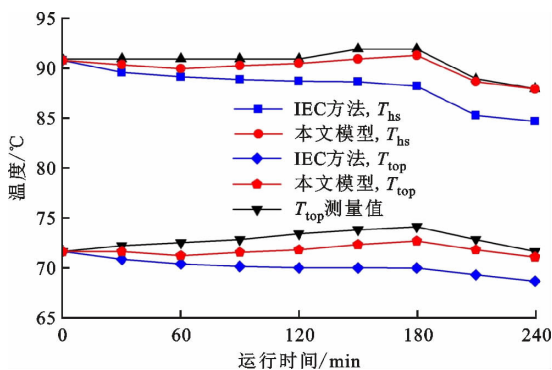


图11 220 kV 变压器的实测数据与模型验证

Fig. 11 Model verification for a 220 kV transformer

比220 kV 变压器的实测数据,IEC 推荐方法计算结果的最大绝对误差和相对误差分别为3.6℃和4.11%,本文模型的最大绝对误差和相对误差分别为1℃和1.1%。可以看出,本文提出的变压器热路模型在简化传热计算过程的同时,具有很高的准确度,便于工程应用。

3 讨论与展望

本文介绍了热-电类比迁移思想在电气工程领域应用的两个典型案例,运用电路基本理论实现热路模型的快速准确求解,从而简化工程中的复杂传热问题。除此之外,热-电类比思想也已开始应用于其他领域。例如:微机械领域通过构造导热等效模型模拟微流体器件的响应时间,进而评估其工作性能^[26];建筑空调设计中考虑到传统谐波法数学推导的复杂性,运用热-电类比理论简化墙体温度响应的计算过程^[27];光学传感器研制中,常通过建立等效热网络分析和优化光纤环模块的热特性^[28]等。

物理学史的发展历程证实了分支学科间物理概念或数学形式的相似性并非偶然,这些相似性源于物理学的统一性。在理解传热学与电学中许多基本

物理量具有内涵与表达式对偶关系的同时,也要注意两个学科的类比研究还有不少热点值得继续探索。例如,相较于电路中的电感,传热学中尚无热感的概念,热场中是否存在与热量交互变化的某种作用能量或作用力仍待探究。另一方面,随着研究的深入,出现了许多非常规条件下的传热问题(如非线性和非平衡因素较强的场合、微细时间或空间尺度),傅里叶定律等传统线性导热定律的适用性存在挑战。如何通过理论间的融合与交叉合理解释非常规传热现象、完善传热理论需要进一步的研究。

本文基于传热学与电学的诸多共性,提出热-电迁移类比思想用于解决部分实际工程问题。迁移类比思想同样适用于探索各个物理分支学科间的共性规律。因此,期望更多学者专注研究本学科方向的同时,亦关注其他分支学科的发展,从中借鉴新的成果,推动学科融合,驱动科技创新。

4 结论

为验证热-电迁移类比理论研究的可行性与适用性,本文给出了将热路模型思想应用于电力设备热场估计两个实例,得到如下结论。

(1)针对穿过不利散热区的电力电缆,建立了电缆轴向离散热路模型,分析电缆导体轴向温度分布,计算电缆的稳态载流量,弥补了当前IEC标准在电缆群温度场和载流量计算中的不足。

(2)为了快速准确获取变压器的热点温度,提出了集总参数变压器热路模型。分析实例发现,该模型相较于IEC推荐法具有更高的准确度。

(3)热-电类比思想可以简化复杂的传热过程,快速准确求解热学工程问题。通过深入研究传热学与电学的异同,借鉴类比迁移的思想,预期可以解决更多难题,推动多学科领域的创新与发展。

致谢 针对热学和电学的关联性,作者与西安交通大学能源与动力工程学院、热流科学与工程教育部重点实验室陶文铨院士和王秋旺教授进行了交流讨论,促使了本文思路的形成和论文完成,在此向两位老师表示诚挚的感谢。

参考文献:

- [1] 李元,王晨,张冠军. 传热学与电学问题的迁移类比研究: (1)理论基础 [J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(8): 78-84.

LI Yuan, WANG Chen, ZHANG Guanjun. Analogi-

- cal transfer between heat transfer and electrology: (1) theoretical fundamentals [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(8): 78-84.
- [2] 李刚, 张博, 赵文清, 等. 电力设备状态评估中的数据科学问题: 挑战与展望 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(21): 10-20, 177.
- LI Gang, ZHANG Bo, ZHAO Wenqing, et al. Data science issues in state evaluation of power equipment: challenges and prospects [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(21): 10-20, 177.
- [3] 黎坚. 浅谈中等城市架空线路改为地下电缆的必要性与可行性 [J]. 中国高新技术企业, 2012(29): 158-160.
- [4] 高茜. 城市配电网建设改造中电缆线路的应用探讨 [J]. 通信电源技术, 2019, 36(7): 266-267.
- GAO Qian. Discussion on the application of cable lines in the construction and reconstruction of urban distribution network [J]. Telecom Power Technology, 2019, 36(7): 266-267.
- [5] 张雪峰. 地下电缆的敷设形式与散热条件分析 [J]. 科技信息, 2011(13): 752, 827.
- [6] IEEE. Calculation of the current rating-current rating equations (100% load factor) and calculation of losses; C60287-1 [S]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001: 714-716.
- [7] IEEE. Calculation of the current rating-thermal resistance; C60287-2 [S]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001: 751-760.
- [8] 郑雁翎. 穿过不利散热区域排管电力电缆的三维热路模型分析计算 [J]. 电气自动化, 2016, 38(2): 52-55.
- ZHENG Yanling. Analysis and calculation of a three-dimensional thermal circuit model for power cables in pipes crossing unfavorable heat dissipation regions [J]. Electrical Automation, 2016, 38(2): 52-55.
- [9] 郑雁翎, 王宁, 李洪杰, 等. 电力电缆载流量计算的研究与发展 [J]. 电线电缆, 2010(2): 4-9.
- ZHENG Yanling, WANG Ning, LI Hongjie, et al. Study and progress of the ampacity computation of power cables [J]. Electric Wire & Cable, 2010(2): 4-9.
- [10] ANDERS G, BRAUN J M, VAINBERG M, et al. Rating of cables in a nonuniform thermal environment [C]//Proceedings of the 1999 IEEE Transmission and Distribution Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1999: 83-88.
- [11] ANDERS G, BRAKELMANN H. Cable crossings-derating considerations; I Derivation of derating equations [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(3): 709-714.
- [12] 陈如意, 江军, 陈珉, 等. 基于最大信息系数的变压器过热故障特征选择 [J]. 电力工程技术, 2020, 39(2): 140-145.
- CHEN Ruyi, JIANG Jun, CHEN Min, et al. Feature selection of dissolved gases in power transformer based on maximal information coefficient [J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(2): 140-145.
- [13] HILL J, WANG Zhongdong, LIU Qiang, et al. Analysing the power transformer temperature limitation for avoidance of bubble formation [J]. High Voltage, 2019, 4(3): 210-216.
- [14] 李玉杰, 李洪涛, 宋思齐, 等. 基于红外的 GIS 内部导体温度检测技术研究 [J]. 电力工程技术, 2019, 38(2): 142-146.
- LI Yujie, LI Hongtao, SONG Siqi, et al. Temperature detection of internal conductor in GIS based on infrared thermal imaging [J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(2): 142-146.
- [15] ARABUL A Y, SENOL I. Development of a hot-spot temperature calculation method for the loss of life estimation of an ONAN distribution transformer [J]. Electrical Engineering, 2018, 100(3): 1651-1659.
- [16] LI Xiaosong, CHEN Qiaofu, HU Gui, et al. Numerical analysis on magnetic field of HTS transformer with different geometry [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(4): 1343-1346.
- [17] 吕茵, 王慧泉, 周文青, 等. 基于有限元法的换流阀水路系统电场分析 [J]. 电力工程技术, 2019, 38(4): 145-151.
- LÜ Yin, WANG Huiquan, ZHOU Wenqing, et al. Electric field of valve cooling system in thyristor valve based on finite element method [J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(4): 145-151.
- [18] 邓建钢, 王立新, 聂德鑫, 等. 内置光纤光栅油浸式变压器的研制 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(24): 160-167, 23.
- DENG Jiangang, WANG Lixin, NIE Dexin, et al. Development of oil-immersed transformers with built-in fiber Bragg grating sensors [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(24): 160-167, 23.
- [19] IEEE. IEEE guide for loading mineral-oil-immersed transformers; C57.91-1995 [S]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1995: 25-30.
- [20] 苏小平, 陈伟根, 胡启元, 等. 基于解析-数值技术的变压器绕组温度分布计算 [J]. 高电压技术, 2014, 40(10): 3164-3170.
- SU Xiaoping, CHEN Weigen, HU Qiyuan, et al. Cal-

- ulation for transformer winding temperature distribution by numerical analytical technology [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10): 3164-3170.
- [21] 陈伟根, 滕黎, 刘军, 等. 基于遗传优化支持向量机的变压器绕组热点温度预测模型 [J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 44-51.
- CHEN Weigen, TENG Li, LIU Jun, et al. Transformer winding hot-spot temperature prediction model of support vector machine optimized by genetic algorithm [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 44-51.
- [22] 刘文泽, 张俊, 邓焱. 基于深度置信网络和多维信息融合的变压器故障诊断方法 [J]. 电力工程技术, 2019, 38(6): 16-23.
- LIU Wenze, ZHANG Jun, DENG Yan. Transformer fault diagnosis method based on deep learning and multi-dimensional information fusion [J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(6): 16-23.
- [23] 李元, 刘宁, 梁钰, 等. 基于温升特性的油浸式变压器负荷能力评估模型 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(22): 6737-6746.
- LI Yuan, LIU Ning, LIANG Yu, et al. A model of load capacity assessment for oil-immersed transformer by using temperature rise characteristics [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(22): 6737-6746.
- [24] GUO Zengyuan, ZHU Hongye, LIANG Xingang. Entropy: a physical quantity describing heat transfer ability [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50(13/14): 2545-2556.
- [25] 全国变压器标准化技术委员会. 电力变压器: 第7部分 油浸式电力变压器负载导则: GB/T 1094.7—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009: 10-11.
- [26] 杨博淙, 王伯雄, 秦焱, 等. 热气致动双稳态微型阀响应时间的仿真及实验 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2011, 51(6): 840-845.
- YANG Bocong, WANG Boxiong, QIN Yao, et al. Response time of a thermopneumatically actuated bistable microvalve [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2011, 51(6): 840-845.
- [27] 彭昌海. 用热电类比方法计算多层墙体的温度响应 [J]. 暖通空调, 2005, 35(11): 13-15, 87.
- [28] 刘海霞, 蒋鹞飞, 宋凝芳, 等. 基于热电类比法的光纤陀螺环模块热分析 [J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(5): 596-601.
- LIU Haixia, JIANG Yaofei, SONG Ningfang, et al. FOG ring modules thermal analysis based on thermoelectric analogy [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(5): 596-601.

(编辑 陶晴)