第 52 卷 第 4 期：1947-1968 高电压技术 Vol.52, No.4: 1947-1968
2026 年 4 月 30 日 High Voltage Engineering April 30, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20251177

电力装备传热过程：机理、研究方法与应用综述

张智昊，刘亚东，严英杰，冯　琳，江秀臣
（上海交通大学电气工程学院，上海 200240）

摘　要：在构建新型电力系统目标驱动下，高比例新能源和电力电子设备接入对电力装备的热可靠性提出了严峻挑战。高电压、大容量、高功率密度的发展趋势使温度限制着装备绝缘寿命、运行安全和输送容量的发展。为系统梳理领域研究进展，依托热传导、对流和辐射的经典传热学框架，对电力装备中的传热机理、研究方法及应用场景进行了综述。在传热机理层面，讨论了各向异性导热、界面热阻与热界面材料等导热问题；整理了湍流、多孔介质和相变传热等复杂对流现象的机理模型；介绍了辐射制冷技术在电力装备中的应用。在研究方法与应用层面，归纳了流场诊断技术、数值仿真与机器学习等分析工具，并总结了传热分析在优化设计、故障诊断、动态增容等全生命周期环节中的关键作用。最后，对电力装备极端工况传热、物理信息融合的机器学习、装备数字孪生构建等未来发展方向做了展望。

关键词：电力装备；传热；多物理场耦合；流场诊断；数值计算

Review of Heat Transfer Processes in Power Equipment: Mechanisms, Research Methods, and Applications

ZHANG Zhihao, LIU Yadong, YAN Yingjie, FENG Lin, JIANG Xiuchen
(School of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Driven by the goal of building a new-type power system, the high penetration of renewable energy and widespread application of power electronic devices have posed severe challenges to the thermal reliability of power transmission and distribution (T&D) equipment. The development trend towards high voltage, large capacity, and high power density has made temperature a critical bottleneck, constraining the insulation lifetime, operational safety, and transmission capacity of the equipment. This paper presents a comprehensive overview of the heat transfer mechanisms, research methodologies, and application scenarios in T&D equipment on the basis of the classical framework of conduction, convection, and radiation. At the mechanism level, conduction issues such as anisotropic heat conduction, thermal contact resistance, and thermal interface materials are discussed. The physical models for complex convective phenomena, including turbulence, porous media flow, and phase change heat transfer, are summarized. Furthermore, the application of radiative cooling technology in power equipment is introduced. In terms of methodologies and applications, analytical tools, including flow field diagnostic techniques, numerical simulations, and machine learning, are categorized. The critical role of heat transfer analysis throughout the equipment's life cycle, including optimal design, fault diagnosis, and dynamic rating, is also summarized. Finally,prospects in future research directions are put forward, including heat transfer in power equipment under extreme conditions, the development of physics-informed machine learning, and the construction of equipment digital twins.

Key words: power equipment; heat transfer; multi-physics coupling; flow field diagnostics; numerical simulation

0　引言

在“碳达峰、碳中和”战略目标引领下，我国正构建以安全高效、清洁低碳、柔性灵活和智慧融合为特征的新型电力系统[1]。这一系统性变革对电力装备提出了新的挑战。一方面，清洁低碳所代表的大规模新能源与电力电子设备的广泛接入[2]，使得装备须承受更宽范围的负荷波动、更复杂的谐波分量和更高频率的开关冲击；另一方面，为提升输电效率与经济性，装备正朝着高电压、大容量、高功率密度的方向发展。这些新特征加剧了装备内部的损耗产热，使其热工问题愈发严峻，对装备的运行可靠性、绝缘寿命和输送容量构成了直接制约。

基金资助项目：国家重点研发计划(2024YFE0108300)。
Project supported by National Key R&D Program of China (2024YFE0108300).

因此，深入研究电力装备的传热机理并开发高热流密度、快速响应的热管理技术，已成为支撑新型电力系统安全、稳定运行的关键科学与工程问题。

温度是决定电力装备状态与寿命的核心物理量之一。装备运行中不可避免的电、磁、介质损耗最终绝大部分转化为热量，热量的传递在装备内部形成了复杂的温度分布。首先，持续的过热状态是导致装备绝缘老化的重要诱因，制约了装备的服役寿命。研究表明，当交联聚乙烯(cross-linked polyethylene，XLPE)电力电缆的线芯温度仅超过允许值8%时，其使用寿命便缩减至原有的一半[3]。其次，局部过热或瞬时高温还会直接导致材料性能劣化甚至失效，进而引发电气故障。近年来，电气火灾约占我国火灾总数的30%，其中由电气线路故障引发的比例高达72%[4]；在2017—2023年间，由热缺陷引发的故障在变压器和气体绝缘开关设备(gas insulation switchgear，GIS)故障中占比分别超过26%和10%。因此，准确获取并有效控制装备内部温度场，对装备安全运行、挖掘其输送潜力、延长其服役寿命具有直接意义。

学界与工业界已对电力装备中传热机制开展了深入研究。例如，已建立了能够描述变压器绕组与铁芯传热的模型[5-7]；对变压器[8]及GIS[9]内部复杂湍流传热的详细建模，已成为温升计算与负荷评估的关键。这些研究为理解装备内、外温度分布奠定了坚实基础。

然而，在构建新型电力系统的驱动下，装备的运行环境与内在特性正发生深刻变化，对温度分布预测的精细度、动态性与广度提出了更高要求。这要求传热机理的研究更关注微观物理过程：一方面，对复杂结构传热过程的精细化描述尚显不足。传统模型在处理绕组、铁芯等复杂结构时常采用集总参数或等效方法，难以精确反映局部热流与温度分布；另一方面，对于湍流、多相流等复杂传热现象在电力装备特定工况下的内在规律，其认知与建模仍有待深化。

同时，传热学理论的应用也急须从单一的温升控制拓展至更广阔的全周期性能管理。传统研究多聚焦于热点温度计算以防止过热，而传热传质过程在凝露[10]、腐蚀、早期故障演化等问题中的关键作用尚待揭示。此外，辐射制冷[11]、高效相变散热等前沿传热技术的发展，为进一步提升装备性能与可靠性提供了可能。因此，如何将传热机理与先进传热技术应用于优化设计、状态评估、故障诊断与动态增容等工程实践中，是实现理论向工程价值转化的一个核心议题。

为系统梳理上述研究方向的进展与挑战，本文将遵循“机理-方法-应用”的逻辑框架展开。文章将首先依托热传导、对流和辐射的经典分类，讨论电力装备中各类复杂传热机理的物理模型与研究现状；其次，归纳服务于机理揭示与工程分析的试验、数值及数据驱动方法；最后探讨传热分析在上述关键工程场景中的应用范例、面临的瓶颈与未来方向，以期为电力装备热管理领域的发展提供参考。

1 电力装备中的传热机制

热量在电力装备内部的输运遵循热传导、对流和辐射3种基本机制，多种机制常在单一装备中并存，图1直观给出了各典型装备的传热机制索引。同时，同一传热机制也几乎总是出现在不同装备中。为系统性地梳理其共性规律，本章将首先对电力装备中的3种传热机制展开讨论，并将其典型场景、现有理论模型与关键科学问题归纳于表1中。此外，电力装备中的传热天然地与电、磁、力等多物理场效应耦合，共同决定了装备的热行为。

1.1 热传导

热传导指的是在没有宏观物质流动的情况下，通过分子热运动将热能从温度较高处传递到温度较低处的一种传热方式。在电力装备中，热传导是导体材料、绝缘材料和结构件等固体部件传递热量的主要方式，可由傅里叶导热方程[12]描述，即：

$$\boldsymbol{q} = -\lambda_{\mathrm{s}} \nabla T \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{q}$ 为热流密度；λ_{s} 为固体导热系数；温度场 T 可通过能量守恒方程确定。对于各向同性材料，三维非稳态导热的能量守恒方程可表示为：

$$\rho_{\mathrm{s}} c_{\mathrm{s}} \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_{\mathrm{s}} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_{\mathrm{V}} \tag{2}$$

式中：ρ_{s} 为固体材料密度；c_{s} 为比热容；q_{V} 为内部热源体积密度，通常由焦耳热、涡流损耗、介质损耗等产生；t 为时间。各向同性导热问题通常较易求解，但是在电力装备中普遍存在各向异性、非均质性显著的材料与部件，各结构间形成大量界面，导致导热问题的求解仍然具有相当的挑战性。

1.1.1 复合材料传热特性及等效导热系数建模

电力装备中各结构普遍由复合材料制成，如变压器中的纸包线、电缆线路中的多层绝缘以及电力

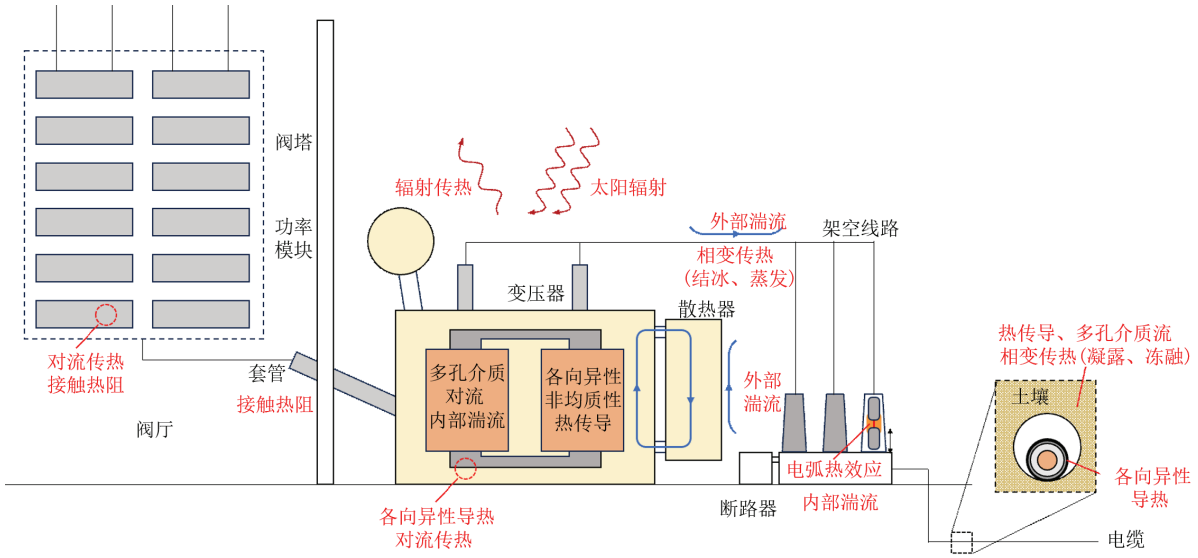


图 1　电力装备典型传热机制分布示意图

Fig.1　Schematic of typical heat transfer mechanisms in power equipment

表 1　电力装备中热量传输的主要机制

Table 1　Key heat transfer mechanisms in power equipment

传热机制		典型场景	现有理论模型	关键问题
导热	接触热阻	触头接触面、IGBT 模块	CMY 模型	接触面动态演化下的接触热阻
	各向异性导热	变压器绕组、铁芯	Fourier 定理	运行环境下导热系数获取
对流	湍流传热	变压器散热器空气侧 电弧流动过程	k-epsilon RNG k-omega 模型 SST k-omega 模型	湍流边界层参数、湍动能传输系数的确定
	多孔介质流	电缆敷设环境 气体绝缘开关电弧吸能结构绝缘材料的干燥与气体渗出	Darcy-Forchheimer 模型、 流阻网络模型	电力装备多孔网络提取渗透率、惯性系数确定
	相变传热	电缆接头凝露、渗水早期故障电弧过程 油浸绝缘设备的电弧故障过程	Kelvin 方程、 Young-Laplace 方程	相界面迁移精确计算、电磁环境下的相变机制
辐射	辐射制冷	设备表面涂覆聚氨酯油漆	Stefan-Boltzmann 定律、Kirchhoff 辐射定律	高性能辐射制冷涂层开发

电子模块中层状排列的铜基板、陶瓷衬底、焊料等。这些结构导致其内部导热系数 λ_s 呈现出复杂的分布特征，为精确的热分析带来了挑战。具体表现在：

1）非均质性。电力装备中的导体(铜、铝)常常也是热的良导体，而绝缘材料则(绝缘纸、XLPE 等)是热的不良导体，见图 2，二者导热系数可相差 2~3 个数量级，组成的材料导热系数具有明显的非均质性。因此，在局部温度场计算中必须分别考虑各材料的导热系数[5]；但对于较大范围的温度分布，将复合材料等效为一种具有一定等效导热系数 λ_{eq} 的均质材料也能获得足够精度的解。此类方法一般根据热流和复合结构各层的空间取向关系将整体传热近似为各层热阻的串联、并联组合，其中各层热阻可根据其简化几何的传热解析解计算[13]。这类方法应用简便，但从原理上“抹平”了导体和绝缘体之间的温度波动，比较适合装备尺度下温度分布评估。

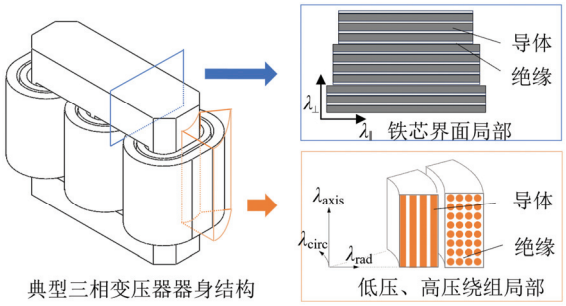
2）各向异性。材料自身晶体取向或宏观的几何装配方式导致不同方向上的物性参数与导热能力差异显著。以图 2 中的变压器为例，绕组由导线(高导热)和绝缘纸/漆(低导热)沿径向和轴向交替缠绕而成。因此，热量沿导线周向(切向)的传导能力远大于需要穿过多层绝缘的径向和轴向导热能力；铁芯则由高导热的硅钢片叠压制成，片间有低导热的绝缘涂层，因此热量沿硅钢片平面的传导能力远强于垂直于叠片方向的传导能力。对于这类结构，须将导热系数 $\boldsymbol{\lambda}_{eq}$ 表示为张量形式[5-6]，即：

$$\boldsymbol{\lambda}_{eq}=\begin{bmatrix}\lambda_{eq,11} & 0 & 0\\ 0 & \lambda_{eq,22} & 0\\ 0 & 0 & \lambda_{eq,33}\end{bmatrix} \tag{3}$$

式中：$\lambda_{eq,11}$、$\lambda_{eq,22}$ 和 $\lambda_{eq,33}$ 分别表示在 3 个主方向上的等效导热系数。相比各向同性导热模型，各向异性导热系数模型在铁芯垂直方向获得了明显大于平行方向的温度梯度[7]。

1.1.2　体导热系数与高导热绝缘材料

除了上述由宏观装配方式导致的各向异和非均质特性，电力装备中广泛使用的聚合物绝缘/封装



$\lambda_\perp$、$\lambda_\parallel$—垂直、平行于铁芯叠片层间方向的等效导热系数；
λ_{rad}、λ_{axis} 和 λ_{circ}—绕组径向、轴向和周向等效导热系数

图 2 电力装备中典型复合材料结构所形成的非均质和各向异性结构

Fig.2 Typical heterogeneous and anisotropic structures formed by composite materials in power equipment

材料，如环氧树脂，其极低的热导率(约 0.2 W/(m·K))也给装备热管理带来挑战。主流提升方法是向其基体中添加高导热无机填料(如 Al□O□、BN 等)以构建“导热通路”。但同时，填料会在基体内引入缺陷并导致电场畸变，可能降低材料的电气击穿强度。因此，当前的研究已转向对填料网络结构的精巧设计，如构建三维导热骨架或诱导填料定向排列，致力于以更低的填充量提升导热率。关于填料选择、结构设计与性能权衡的详细论述可参见相关综述[14-15]。

高导热环氧树脂的应用显著改善了电力装备的传热特性。例如，在以导体损耗为主要热源的传统干式变压器中，应用氮化硼(boron nitride，BN)填充环氧树脂已被证实能有效降低绕组热点温度，并使温度分布更均匀[16]。而在以固态变压器为代表的新型高频装备中，其作用更为关键：必须及时导出环氧树脂自身因高频介电损耗产生的热量，以防止“热失控”的发生[17]。

尽管已有显著进展，但该领域仍面临挑战。核心挑战在于材料综合性能的多目标协同优化，即在提升导热性的同时，必须兼顾高绝缘强度、低介电损耗(尤其在高频下)和优良的力学性能。未来的发展方向将聚焦于：1）借助多物理场仿真指导的填料网络智能化结构设计，以实现性能的最优组合；2）面向具体应用场景的定制化材料开发，研制兼具高导热与低损耗特性的复合材料。

1.1.3 界面热阻与近结热管理

通常，固体部件的接触面即便经过精密加工，在微观尺度下也存在大量由粗糙峰和空气(或其他介质)填充的沟壑组成的间隙。当热流通过此界面时，由于空气是热的不良导体，真实的热传导路径被收缩到有限的接触点上产生温差，其对应热阻即为界面热阻。界面热阻与界面压力、表面粗糙度、材料硬度及填充介质的导热能力密切相关[18]，是电力装备热分析中不可忽视的因素。以变压器为例，其运行时由磁致伸缩和电磁力引发的持续振动，可能导致分接开关、加速套管与导体等部位的接触不良，增大接触热阻而造成局部热点[19]。

随着以高压直流输电、大规模新能源并网为代表的新型电力系统的构建，其核心电力电子装备的功率密度急剧提升，发热源(半导体芯片)的尺寸不断缩小。这种“热流高度集中”的特点使得界面热阻的影响更为显著，也催生了近结热管理这一概念。近结热管理聚焦于从芯片结到散热器之间这一段距离最短、但热阻占比最高的关键热通路。在这条通路中，电力电子模块(如绝缘栅双极型晶体管，(insulated gate bipolar transistor，IGBT))的基板与散热器之间的界面被认为是最大传热瓶颈之一[20]。

为了有效降低该界面的热阻，热界面材料(thermal interface material，TIM)应运而生。TIM 是一种用于填充接触面微观间隙的高导热工程材料。例如，采用液态金属作为 TIM，可将压接式 IGBT 模块的结-壳热阻降低超过 30%，有效提升器件的热性能[21]。此外，必须考虑 TIM 对器件动态热应力和可靠性的影响。Cai 采用热阻相对较高的 TIM，牺牲了部分散热能力的同时减缓芯片的冷却速度，降低了芯片表面的温度梯度，反而减小了键合线上的热机械应力，从而显著延长了 IGBT 模块的功率循环寿命[22]。

1.2 热对流

热对流是指流体宏观运动携带热量的传热方式，在电力装备中广泛存在于冷却系统、油浸设备等场合。根据流体运动的驱动力不同，热对流可分为自然对流和强制对流。自然对流由温差导致的流体密度差引起，强制对流则依靠外部动力装置(如风机、泵等)驱动流体运动。对于电力装备中的热对流问题，需要通过连续性方程、动量方程(即 Navier-Stokes 方程，N-S 方程)和能量方程共同描述，分别可表示为：

$$\frac{\partial \rho_l}{\partial t}+\nabla\cdot\left(\rho_l \boldsymbol{u}\right)=0 \tag{4}$$

$$\rho_l \frac{D\boldsymbol{u}}{Dt}=-\nabla p+\eta\nabla^2\boldsymbol{u}+\boldsymbol{F} \tag{5}$$

$$\rho_{\mathrm{l}} c_{\mathrm{l}}\left(\frac{\partial T}{\partial t}+\boldsymbol{u}\cdot\nabla T\right)=\nabla\cdot\left(\lambda_{\mathrm{l}}\nabla T\right)+q_{\mathrm{v}} \tag{6}$$

式中：ρ_{l}为流体密度，包括绝缘油、SF_6和空气等，在埋地电缆周围土壤、电缆接头渗水等场景下也包括液态水；q_{v}为体积热源；$\boldsymbol{u}$、p、T分别为流场速度、压强和温度；$\boldsymbol{F}$为体积力；流体的热物性参数包括c_{l}、λ_{l}、η，分别为流体比热、导热系数和动力黏度。

电力装备中流体绝缘介质的热物性参数对于传热特性有基础性影响。更环保、安全的绝缘介质不断涌现。例如，具有高燃点、可生物降解优势的合成酯绝缘油以及具有极低全球变暖潜能值的C4-FN等环保绝缘气体已在变压器和GIS等设备中得到应用[23–25]。然而，这些材料的热物性变化常常削弱了传热能力。酯类绝缘油通常具有更高的动力黏度，可能削弱自然对流强度，改变流动模式和热点位置[26]；Korbel等人发现，基于C5-FK、C4-FN的气体混合物可分别产生比SF_6平均高15%和12%的温升[27]。因此，未来亟须通过优化冷却流道、纳米流体改性等方法发展与新型绝缘流体匹配的强化换热技术和设计准则，以确保在获得环保与安全增益的同时不牺牲装备的热可靠性。

电力设备中的流动在正常工况下流动速度马赫数Ma远小于0.3(马赫数Ma定义为流速与当地声速之比)，一般可视为不可压缩流动，式(4)可简化为$\nabla\cdot\boldsymbol{u}=0$。但是在油浸、气体绝缘设备的电弧故障等极端情况下，仍须考虑流体的可压缩性，此时须与特定状态方程如理想气体状态方程[28]、Tait 方程[29]联合求解。

自然对流或混合对流在输配电设备的传热中占据重要地位，包括油浸设备的内部油循环、电力变压器与开关设备的外部散热和电缆管廊内的热对流等，其驱动力来源于温差导致的流体密度差异。电力装备中的大部分情况可采用Boussinesq近似[30]描述流体密度与温度的关系，即：

$$\rho_{\mathrm{l}}=\rho_0\left(1-\beta\left(T-T_0\right)\right) \tag{7}$$

式中：β为体积膨胀系数；下标0表示参考状态。在输配电系统中，电场力$\boldsymbol{F}_{\mathrm{e}}$和磁场力$\boldsymbol{F}_{\mathrm{m}}$是除重力以外最主要的体积力，在电弧的磁流体特性、触头动作产生的油中碎屑运动特性预测[31]方面十分重要；此外，变压器绝缘纸水汽析出[32]、架空线金具雨水导致锈蚀[33]等多相问题中需要考虑表面张力$\boldsymbol{F}_{\gamma}$的作用。其各自可表示为：

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{e}}=\rho_{\mathrm{e}}\boldsymbol{E}+\frac{1}{2}|\boldsymbol{E}|^2\nabla\varepsilon \tag{8}$$

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{m}}=\mu_0\left(\boldsymbol{M}\cdot\nabla\right)\boldsymbol{H}+\mu_0\boldsymbol{M}\times\left(\nabla\times\boldsymbol{H}\right) \tag{9}$$

$$\boldsymbol{F}_{\gamma}=\gamma\kappa\boldsymbol{n}\delta \tag{10}$$

式中：ρ_{e}为自由电荷密度；ε、μ_0分别为介电常数和真空磁导率；$\boldsymbol{E}$、$\boldsymbol{M}$和$\boldsymbol{H}$分别为电场强度、介质磁化强度和磁场强度；γ、κ为表面张力系数、界面曲率；$\boldsymbol{n}$为界面法向量；δ为表面Delta函数，在界面处取值为1。

能量方程(式(6))中，q_{v}为体积热源，在输配电设备中，热量主要来自固体结构如变压器绕组、铁芯、电缆绝缘等，流体内一般没有热源，只有在较极端工况例如内部电弧故障会导致绝缘油强烈的振动、剪切流动，其内部能量耗散表现为热量。在开关动作、电弧故障等条件下出现的电弧热量也可通过q_{v}描述。

电力装备的热量最终普遍通过对流方式传递至环境，无论换流阀的水冷板、变压器的风冷与自冷[34]系统，还是架空线路向周围空气、地下电缆周围的土壤的传热，对流传热均构成电力装备热管理的关键边界条件，其传热能力用传热系数h表示，从温度为T_{surf}的表面向环境温度T_∞传输的热量可用Newton冷却定律计算[12]，即：

$$q=h\left(T_{\mathrm{surf}}-T_\infty\right) \tag{11}$$

工程上普遍采用无量纲传热关联式确定各边界条件中的传热系数h。关联式通过无量纲数将复杂多变的流动换热问题简化为普适公式。对流换热中主要包括Nusselt数Nu、Reynolds数Re、Prandtl数Pr、Grashof数Gr和Rayleigh数Ra，分别可写为：

$$Nu=hL_{\mathrm{scale}}/\lambda_{\mathrm{l}} \tag{12}$$

$$Re=U_{\mathrm{scale}}L_{\mathrm{scale}}/\nu \tag{13}$$

$$Pr=\nu/a \tag{14}$$

$$Gr=g\beta\Delta TL_{\mathrm{scale}}^3/\nu^2 \tag{15}$$

$$Ra=g\beta\Delta TL_{\mathrm{scale}}^3/\left(\nu a\right) \tag{16}$$

式中：L_{scale}为结构的特征几何尺寸；U_{scale}为特征速度；ν为运动黏度；a为热扩散率；g为重力加速度；ΔT为流体温度与参考温度之差。根据流体类型与流动驱动力，电力装备的对流边界条件可分为以下几类：

1）强制单相对流边界。如变流器水冷系统、配电柜强迫通风，水冷板内部全发展湍流流动，典型关联式如Dittus-Boelter方程，对于流体作为冷却

介质的情况可写为：

$$Nu = 0.023Re^{4/5}Pr^{2/5} \tag{17}$$

2）开放空间自然对流边界。如户外电抗器、干式变压器的开放的空气侧，其冷却可归类为垂直平板自然对流，此时边界层可以不受限制地自由发展。定性关联式如 Churchill-Chu 公式[35]，即：

$$Nu = \left(0.825 + \frac{0.387Ra^{1/6}}{\left(1+(0.492/Pr)^{9/16}\right)^{8/27}} \right)^2 \tag{18}$$

3）混合对流边界。如自然通风配电柜(对流+辐射)、架空导线，须同时考虑多种传热方式。架空导线的对流冷却常用关联式为 Morgan 公式[36]，即：

$$Nu = CRe^{\xi} \tag{19}$$

式中：C 和 ξ 取决于导线表面粗糙度和环境条件。更多针对特定几何结构的无量纲关联式可参见文献[37]。这些经验关联式为电力装备热设计提供了简便实用的计算工具，有效平衡了计算精度与效率。然而，标准关联式大多基于理想几何和稳态流动条件，在电力装备复杂结构、瞬态工况或极端工作环境下可能产生较大误差；此外，关联式通常无法反映关键局部区域的温度分布细节，在热点预测和局部过热防护上存在局限性。随着计算机硬件与数值理论的发展，数值仿真在对流传热计算、边界条件确定方面起到基础性作用，相关讨论见 3.2 节。

在基本的单相层流传热以外，电力装备中还会涉及更为复杂的湍流、多相流、相变和多孔介质流等对流传热机制，以下分别展开讨论。

1.2.1 电力装备中的湍流传热与建模

湍流指的是流体运动呈现出不规则、随机性波动的状态，特征是存在多尺度的涡旋结构、增强的混合特性以及显著的三维性和非定常性。湍流能显著增强热量和动量的交换效率，同时改变结构受力情况，是各类工程设备散热设计的关键因素。

湍流传热理论可依据流场几何(内流、外流)和驱动机制(自然对流、强制对流) 2 个维度将湍流分为 4 类，如图 3 所示。其中，内流受封闭壁面约束，导致流动发展和湍动强度高度依赖于壁面摩擦和入口条件，而外流允许边界层自由扩展，更易受外部扰动影响；强制对流中，Re 数是判断流动状态的主要参数。一般而言，对于内流，当 Re<2 300 时为层流，2 300<Re<10^4 为过渡流，10^4 以上为充分发展的湍流；对于外流，局部雷诺数 Re_x<5×10^5 时为层流，Re_x>5×10^5 时为湍流。架空线路在微风中即可产生外部强制湍流，敷设在隧道内的高电压等级电缆周围 Re 数可达 10^4[38]。湍流不仅会强化散热、提升潜在容量，脱落的涡街还会使其受力摇晃，属于典型的流固耦合问题。

油浸变压器内的流动总体上处在层流状态，但是在油道拐角等狭窄处，特别是强油循环的变压器内可能出现湍流流动[39-41]，可使用 SST k-ω 描述[42]；另一类典型的内部湍流是各类装备内部电弧引发的流动，包括断路器电弧[43-44]、早期故障和内部电弧故障。电弧引发的湍流是典型的电-磁-流-热耦合问题，须同时求解 Maxwell 方程和流动传热方程。

在自然对流中，通常使用 Ra 数判断流动状态。对于垂直平板，当 Ra<10^9 时流动呈层流特性，Ra>10^9 时转变为湍流；对于水平加热板(热面朝上，例如变压器油箱顶部)，临界 Ra 数约为 10^7[37]。电力装备中的外部自然对流湍流可出现在较大容量变压器散热器的空气侧顶端附近[8]，内部自然对流湍流包括气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear，GIS)母线室[9]以及使用 SF_6[45]或空气散热的变压器。

使用数值方法求解电力装备中的湍流传热问题时，需要湍流模型来封闭雷诺时均 N-S 方程中出现的雷诺应力项，常用模型包括 k-ε 模型[46-47]、RNG k-ε 模型[9]、SST k-ω 模型[8]等。其中，k-ε 模型比较适合充分发展的湍流，如较强风场中的架空线路周围的湍流[48]，该模型要求 30<y^+<300 以确保第 1 层网格节点位于对数律层[49-51]；而 SST k-ω 模型适合存在流动分离和过渡状态的湍流，如干式变压器气道内的湍流换热，需 y^+<1 以准确解析黏性底层。其中 y^+为无量纲的网格第 1 层节点到壁面距离 y，即：

$$y^+ = y\nu^{-1}(\tau_w/\rho_l)^{1/2} \tag{20}$$

式中：τ_w 为壁面切应力。

尽管湍流模型众多，但如何为特定流动场景选择合适的模型、如何确定模型中的湍动能传输系数等关键参数、如何处理从层流到湍流的转捩区域以及如何在计算资源约束下平衡近壁区解析精度(如 y+的选择)与整体计算效率，仍是制约仿真结果准确性的关键挑战。

1.2.2 电力装备中的多孔介质流动与建模

多孔介质是指内部含有大量相互连通的孔隙或通道的材料结构，其特征在于固体骨架与流体共存，流体可在孔隙间流动。多孔介质结构广泛存在于电力装备中，如图 4 所示。多孔介质中的单相流

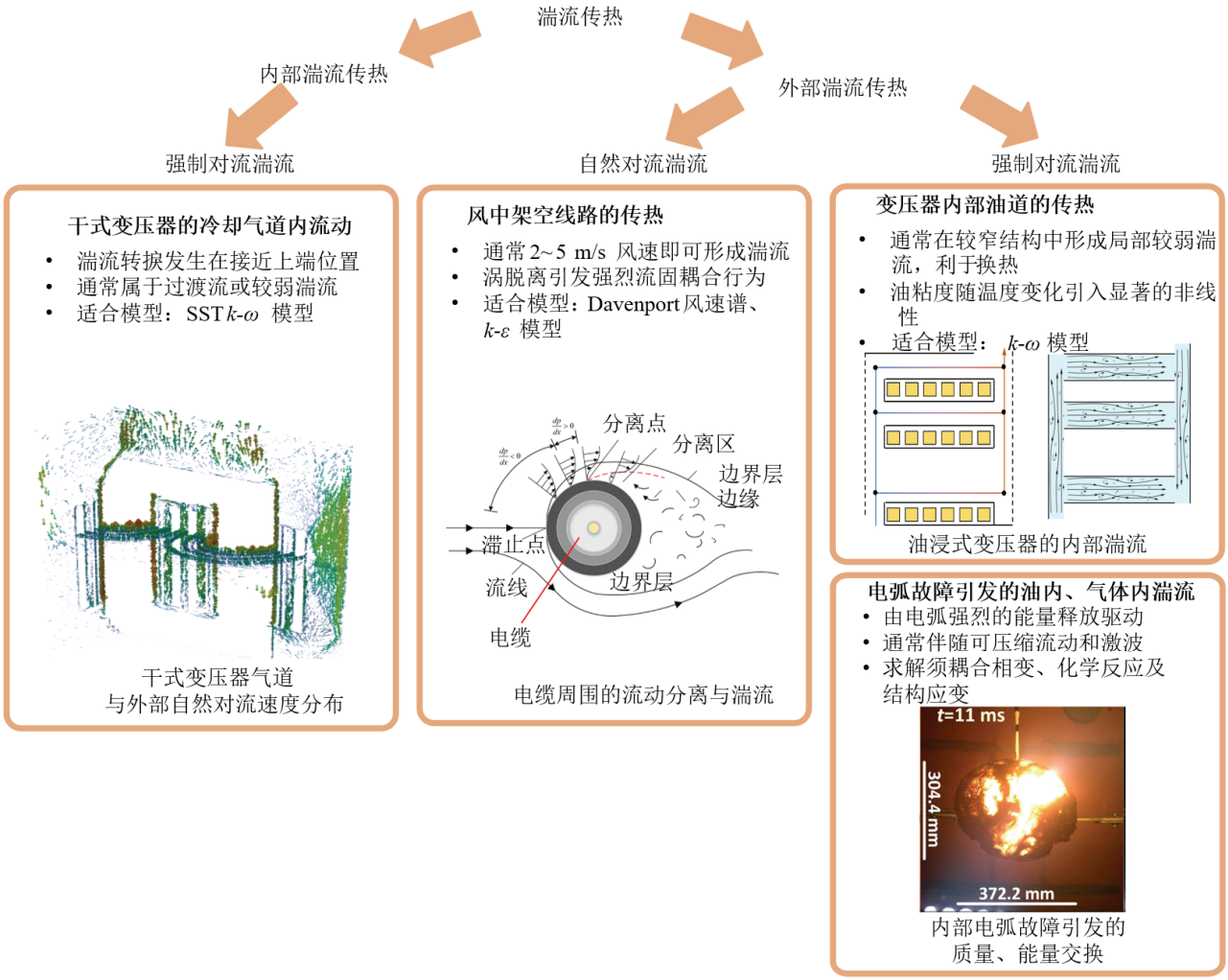
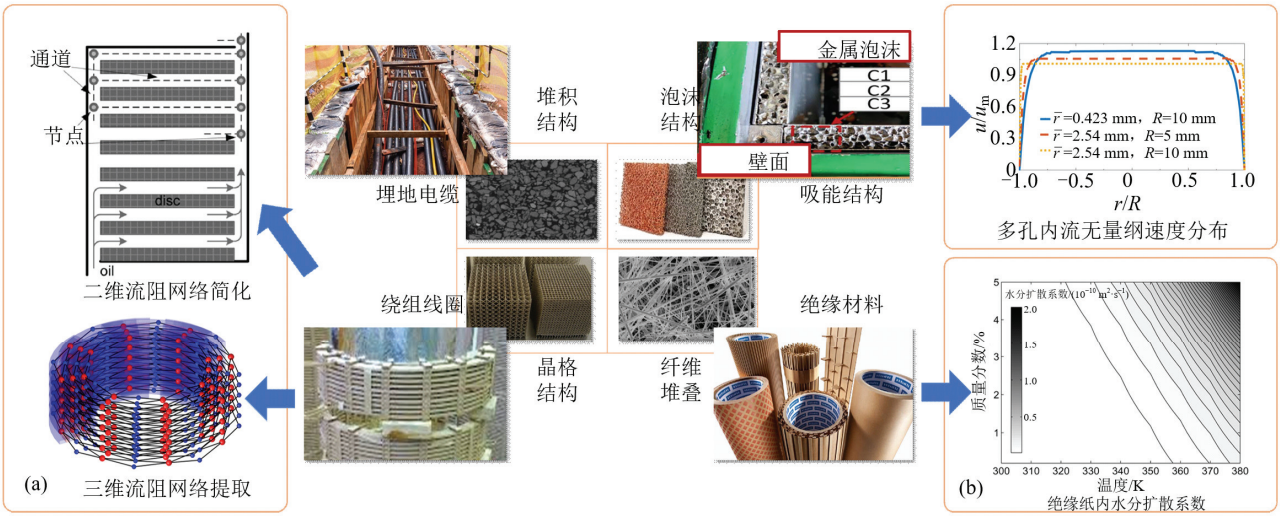


图 3　电力装备中常见的湍流场景及其特点[38-40]

Fig.3　Typical turbulent flow scenarios in power equipment and their characteristics[38-40]



r/R—多孔介质填充圆管中径向位置与管半径之比；u/u_m—局部速度与截面平均流速之比；$\bar{r}$ —平均孔径

图 4　电力装备中主要的多孔介质类型及其应用场景[52-53]

Fig.4　Typical porous media types and application scenarios in electrical equipment[52-53]

动的动量方程一般采用 Darcy-Brinkman-Forchheimer(DBF)模型，即：

$$\frac{\rho_{\mathrm{l}}}{\phi}\frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t}+\frac{\rho_{\mathrm{l}}}{\phi^2}(\boldsymbol{u}\cdot\nabla)\boldsymbol{u}=-\nabla p+\frac{\eta}{\phi}\nabla^2\boldsymbol{u}-\frac{\eta}{K}\boldsymbol{u}-\frac{\rho_{\mathrm{l}}C_{\mathrm{F}}}{\sqrt{\phi}}|\boldsymbol{u}|\boldsymbol{u}+\boldsymbol{F} \tag{21}$$

式中：ϕ 为孔隙率；K 为渗透率；C_{F} 为 Forchheimer 系数，表征惯性阻力；$\boldsymbol{F}$ 为体积力项(如重力、浮力等)。

输配电工程中，最常见的多孔介质类型是堆积结构。电缆所在管廊常位于地下环境，周围土壤即属于堆积结构多孔介质，如图 4 所示，且其中可能存在复杂的地下水流动[54]、季节性结冰与融化等现象。准确获取土壤多孔介质的等效热阻对预测电缆最高温度、绝缘材料寿命和潜在负载均有实际意义，而其等效热阻主要与结构的孔隙率(通常为 35%~50%)、渗透率(10^{-12}~10^{-8} m^2)有关，具体土壤环境的渗透率可用 Kozney-Carman 公式计算，见表 2。

电弧故障可能发生在油浸设备如变压器和气体绝缘设备中如开关、GIS 等，可造成灾难性后果。一种保护方式是使用多孔介质吸能装置，如图 4 所示，例如金属泡沫、金属多孔板[55]。泡沫类多孔介质通常具有较高的孔隙率(常高于 90%)和渗透率，重量较轻，对设备重量和成本影响不大。故障发生时，流体受到电弧能量冲击而快速流入吸能多孔结构，其内部的复杂通道和高导热金属骨架可用于消耗绝缘油的动能和内能。Lu 等人基于 DBF 模型给出了金属泡沫内单相流动速度曲线解析解[52]，如图 4 所示，可见其在近壁面区域较大的速度梯度表明其较大的粘滞作用。曾斐[56]、王永刚[57]等人的研究也证实了泡沫金属材料在爆炸吸能、抗冲击方面的显著作用，但其应对内部电弧故障方面的基材、渗透率等参数的最优取值仍需试验和数值研究，以获取能量吸收、抗冲击和电磁屏蔽方面的平衡。

油浸和干式变压器绕组、铁芯通常使用油道和气道散热，见图 4(a)，这些沿圆周、半径方向周期性设置的散热通道形成了相对规整的流道网络。正常工况下，通道内流动一般处于层流状态，结构阻力的惯性效应可以忽略，因此只保留 Darcy 项的 DBF 模型已经被用于计算变压器绕组温度分布和热点预测问题[58-59]。由于绕组、铁芯等结构复杂，相比求解全解析的 N-S 方程，DBF 模型可以大幅提升计算效率，代价是牺牲了一定空间精度。为此，

表 2 不同类型多孔介质渗透率计算方法汇总

Table 2 Permeability calculation methods for different types of porous media

类型	常用渗透率计算公式	
堆积结构	Kozney-Carman 公式	$K=\dfrac{\phi^3}{\zeta^2(1-\phi)^2}\dfrac{{d_{\mathrm{p}}}^2}{180}$
泡沫结构		$K=\dfrac{\phi^3{d_{\mathrm{c}}}^2}{C_{\mathrm{f}}(1-\phi)^2}$
纤维结构	Ergun 公式	$K=\dfrac{\phi^3}{(1-\phi)^2}\dfrac{{d_{\mathrm{f}}}^2}{150}$

注：ζ 为形状系数；d_{p} 为颗粒直径；C_{f} 为泡沫结构系数；d_{c} 为孔体直径；d_{f} 为纤维直径。

Meyer 在绕组热点局部采用高精度的全解析网格，在求解域的其他位置使用 DBF 模型，实现了较高计算精度与效率的平衡[60]。

流阻网络方法是另一类处理多孔介质流动的方法，通过将孔隙空间简化为一维通道网络来简化计算。变压器中，轴向、径向通道内的冷却介质流动受到几何约束表现为一维或准一维流动，对于此类多孔介质内部流动问题，因此比较适合流阻网络方法分析[50]。对于充分发展阶段，可使用 Poiseuille 定律[49]，即：

$$Q=\frac{\pi {r_{\mathrm{h}}}^4\Delta p}{8\eta L} \tag{22}$$

或 Darcy-Weisbach 定理[49]描述通道内的流动：

$$\Delta p=f\frac{L}{r_{\mathrm{h}}}\frac{\rho_{\mathrm{l}}\boldsymbol{u}^2}{2} \tag{23}$$

式中：Q 和 Δp 为通道流量和两端压差；f 为阻力系数，与流动 Re 数有关；L 为通道长度；r_{h} 为通道水力半径，定义为通道截面积与湿周之比。

采用类似原理的孔隙网络模型已广泛应用于石油开采[61]、纸张干燥[62]等领域，此类方法将三维流动转化为一维网络流动，计算效率可提升 2~3 个数量级，且其明确的物理意义便于工程设计人员分析和调整散热流道设计。然而，目前流阻网络方法需要先对绕组做二维轴对称近似[63]，因而无法直接考察相邻绕组发热以及绕组内周向垫块的导流作用的影响。未来须开发绕组、铁芯和围屏间流道网络的提取算法[51]，见图 4(a)，在保留流阻网络高效计算的优点下提升其精度。

油浸绝缘纸的干燥过程也是一种多孔介质流动，电力装备的制造和检修过程中，绝缘纸中的含水质量分数应从 2%~3%降低至 0.5%[64]。干燥过程

中，绝缘材料通常已经被组装在器身中，因此水分必须从数十微米的纤维间隙迁移到若干毫米的通道内，之后才能进入低真空环境，或被热风、热油带走。因此电力装备中的干燥问题通常表现出显著的多尺度特征，对此，Perre 提出了一种多尺度模型[65]，使用不同的公式同时考虑 2 个空间尺度。Asem 和 Howe 证明变压器干燥过程中热传递远远快于质量传递[66]，因此可以忽略热传递过程，仅考虑质量传递。与之类似，绝缘纸浸油、聚酯纤维浸漆等过程所发生的流动也属于多孔介质流，尚未完全浸透的绝缘纸内的微小气隙可能引发局部放电，威胁设备安全[67-69]。

目前，DBF 模型已广泛应用于电力装备多孔介质流动模拟，但在实际应用中仍面临诸多挑战。现有模型对多孔介质内部微观结构的精确描述不足，尤其是在变形、堵塞或结构演化情况下；此外，多物理场耦合(如相变、化学反应、电场作用等)对多孔介质参数的影响仍有待深入研究，特别是在极端工况如电弧故障、短路冲击等条件下的适用性有待验证。

1.2.3 电力装备中的多相流与相变传热

多相流指的是 2 种或多种不同相态流体共存且相互作用的流动系统，在电力装备中常见气-液、液-固等多相流形式，并且常伴随相变现象，如环境中水的凝结、结冰和融化以及绝缘纸中水汽析出形成气泡，主要场景如图 5 所示。建模多相流与相变过程的关键在于准确刻画界面的迁移与界面上发生的质量、能量传输机制，因此常用流体体积法(volume of fluid，VOF)、相场法、水平集方法等界面捕捉算法描述。以 VOF 方法为例，即：

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t}+\nabla\cdot(\alpha \boldsymbol{u})=\frac{S_{\mathrm{m}}}{\rho} \tag{24}$$

式中：α 为体积分数；S_{m} 为单位体积的相变质量源项；ρ 是源项所对应相密度。

气液相变与两相流是电力装备中常见的传热形式，当温度高于当前压力下的饱和温度时，蒸发、沸腾发生；反之则发生冷凝，其气液界面的质量传输可通过 Hertz-Knudsen 公式描述[70]，即：

$$S_{\mathrm{m}}=\alpha_{\mathrm{ac}}\sqrt{\frac{W}{2\pi R_{\mathrm{u}}T}}\left(p_{\mathrm{sat}}-p_{\mathrm{v}}\right) \tag{25}$$

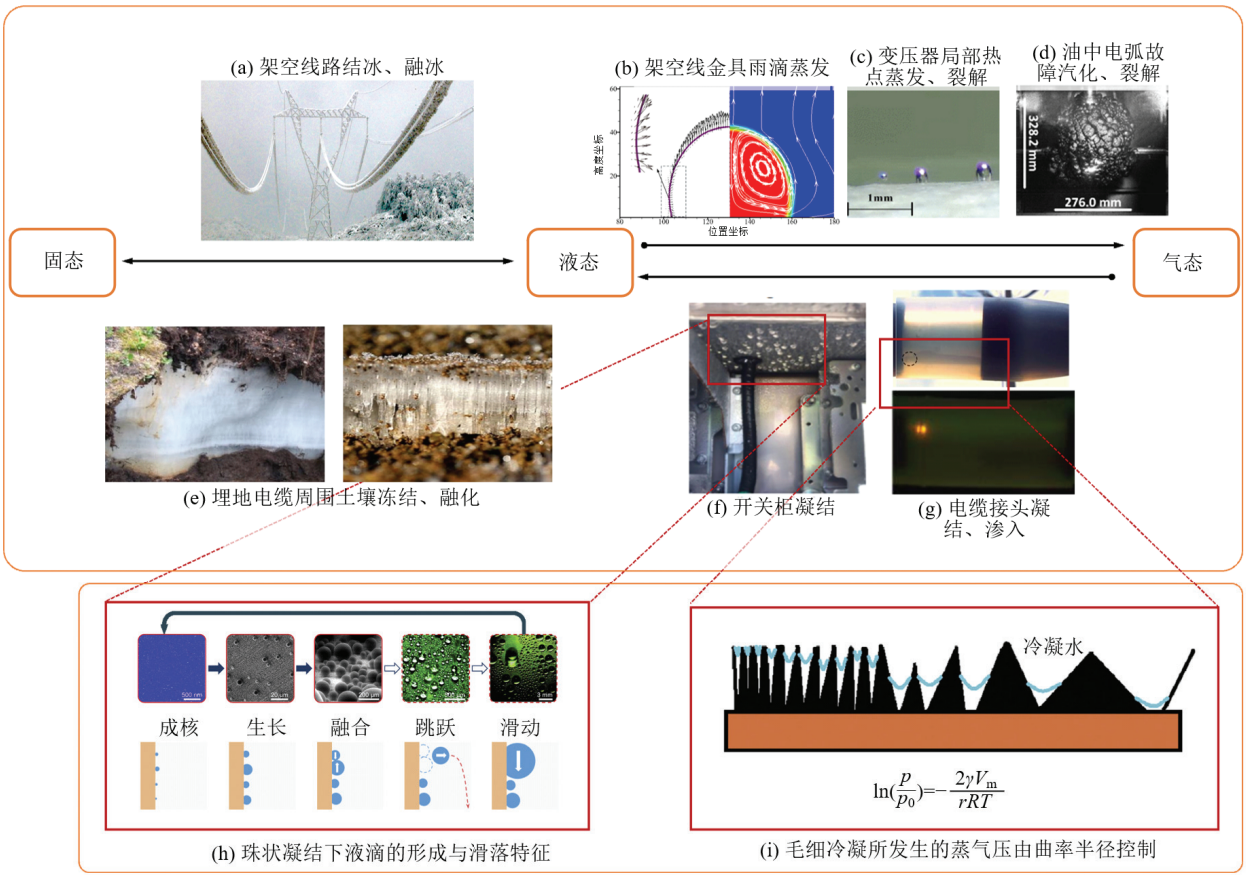


图 5 电力装备中典型相变过程与场景[10,32,39,68-69]

Fig.5 Typical phase change processes in power equipment[10,32,39,68-69]

式中：α_{ac}为调节系数；W为摩尔质量；R_u为气体常数；p_{sat}为饱和压强；p_v为气相压强。雨水在架空线路上的流动与蒸发是典型的气液两相行为。架空线路通常使用空气绝缘，降雨时，雨滴落在导体和金具等带电部件表面，所形成液滴、液膜会因电晕、漏电流与介质损耗等机制发热，并在液膜与金具之间接触角的影响下改变流动和蒸发行为，进而导致金具产生不同程度的锈蚀。目前针对金具、架空线路锈蚀的研究主要从电磁角度展开，虽已确认湿润时间对锈蚀的影响但尚未进行定量研究，特别是三相接触线出蒸发动力学对液滴留存时间及空间电磁分布的影响。未完全干燥的绝缘纸内部水分析出时发生蒸发相变[32]，会形成局部气泡，进而诱发绝缘击穿等失效，其中气泡动态行为可使用Rayleigh-Plesset方程描述，即：

$$R\ddot{R}+\frac{3}{2}\dot{R}^2=\frac{1}{\rho_l}\left(\left(p_v-p_\infty\right)-\frac{2\gamma}{R}-4\eta\frac{\dot{R}}{R}\right) \tag{26}$$

式中：R为气泡半径；$\dot{R}$、$\ddot{R}$分别为半径对时间的一次、二次导数；p_v为气泡内压强；p_∞为无穷远处压强。油浸设备中的局部放电也会导致气泡的形成，绝缘油在电弧作用下会发生裂解产生气泡，这些气泡既可以溶解于油中，也可能以气相形式迁移。这些气泡是局部放电、发热乃至闪络事件的潜在原因，因而限制了变压器短期过负荷能力[71]。

冷凝可能对装备运行安全造成显著危害。对运行在潮湿地区的GIS的研究[72]表明，冷凝将显著降低设备的闪络电压。在电缆接头、绝缘子等部件的狭窄缝隙中，毛细冷凝现象会在高于正常露点的温度下发生。根据Kelvin方程，毛细管中的饱和蒸汽压[70]为：

$$\ln\left(\frac{p_r}{p_{sat}}\right)=-\frac{2\gamma V_m}{rR_uT} \tag{27}$$

式中：p_r为毛细管内蒸气分压强；p_{sat}为平坦界面下的饱和蒸汽压；V_m为液体摩尔体积；r为毛细管半径；R_u为气体常数。在微米级缝隙中，相对湿度80%即可发生毛细冷凝。凝结的液态水在电场力和毛细力共同作用下发生变形、迁移和积聚，当水柱达到临界长度时会触发击穿。电弧能量导致水强烈汽化，体积膨胀带来的动量力会推动残余液体发生明显迁移和流动，期间电弧会逐渐烧蚀、熔融绝缘材料，导致中压电缆接头[10]、环网柜肘型头[73]、绝缘子[74]等设备的早期故障，其物理过程如图6所示。尽管

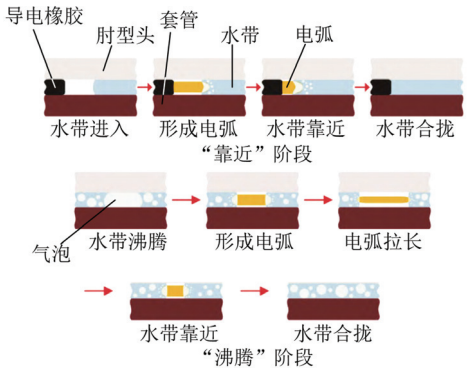


图6 环网柜肘型头早期故障中的电弧与气液相变流动[73]

Fig.6 Arc and vapor-liquid two phase flow with boiling in incipient fault in ring main unit elbow connectors[73]

对微细通道内的沸腾、冷凝等两相现象已有广泛研究，但电力装备中的狭缝两相流动除受到结构约束外，还受到电磁效应特别是电弧的强烈影响，因而其流动阻力特性、相间传热传质规律以及两相流型的演变等传递特性仍须深入研究。

针对冷凝危害，表面改性和主动除湿是2个潜在解决方案。超疏水涂层通过促进珠状凝结可使凝结液滴在重力作用下及时脱落，避免形成连续水膜。而在设备内部设置冷阱或凝水收集装置，利用温差将水汽定向凝结在非关键部位，也是一种有效的防护措施。未来可开发兼具疏水、防污、电绝缘性能的多功能涂层材料以及智能化的湿度监测与控制系统。

液固相变主要出现在户外电力装备中。架空线等室外设备面临的结冰与除冰问题同样是相变传热的典型应用。覆冰不仅可能导致导线机械负荷增加引发断线或杆塔倾覆事故，还会改变绝缘子表面电场分布，增加沿面放电风险。冰层形成过程涉及水滴撞击、附着、冻结的复杂多相流动与相变现象，文献[75]给出一个简化模型，使用碰撞系数和空气含水量建模冰层增厚过程。更精细的建模须考虑空气动力学、表面湿润性和过冷水动力学等多重因素。

此外，埋地电缆可能遭遇土壤冻结问题，地下水矿物沉积和冻融可能导致电缆故障[76]。冻融过程不仅会改变土壤热阻，其体积变化产生的应力可能导致电缆外护套破损。尽管环境温度变换对电缆散热的影响已经受到关注，但针对更为复杂的冻融过程的机理模型仍比较缺乏[54,77-78]。

1.3 热辐射以及辐射制冷效应

热辐射是物体通过电磁波而不依赖介质的传

热方式。对于输配电装备，特别是室外设备，辐射热传递占比显著，例如，IEEE[79]和 IEC[80]等标准中所规定的用于确定架空线路载流量的热平衡方程中均包含辐射散热与日照吸热效应。热辐射遵循斯特藩-玻耳兹曼定律，其净辐射热流密度 q_r[12]可表示为：

$$q_r = \varepsilon_{rad}\sigma\left(T_s^4 - T_{surf}^4\right) \tag{28}$$

式中：ε_{rad} 为表面发射率；σ 为斯特藩-玻耳兹曼常数；T_s 为物体表面温度；T_{surf} 为周围环境表面温度。

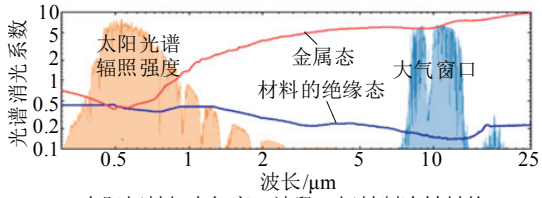
对于户外电力装备而言，除了从太阳吸收热量外，也会直接向环境辐射热量。其中，材料通过向宇宙空间辐射热量而实现被动冷却的现象被称为辐射制冷[81]，其核心机制在于利用大气窗口(8~13 μm 波段)将地表热量直接辐射至外太空，同时高效反射太阳辐射(0.3~2.5 μm)，如图 7 所示。这一技术无需能量输入，可实现全天候制冷效果，特别适合于室外电力设备的散热增强。

目前辐射制冷材料主要包括光子晶体结构、多层薄膜、金属-介质复合材料以及微纳结构表面等。传统的电力设备外表面涂料如聚氨酯面漆也具有一定的辐射制冷效果，发射率约为 0.85，但其在太阳光谱区域的反射率相对较低，白天制冷效果有限。因此，Peoples 考虑了 $BaSO_4$ 涂层的制冷效果，见图 7(c)，发现最大可实现 20 K 的绕组降温[11]，其制冷效果随着环境温度和功率的上升而下降，这是未来其在电力装备中的应用的主要瓶颈。此外，辐射制冷涂料也在向多功能集成(如疏水、防污、电绝缘)和长期稳定性(抗紫外老化、污损)方向发展，有望成为提升电力装备热管理水平的重要技术手段。

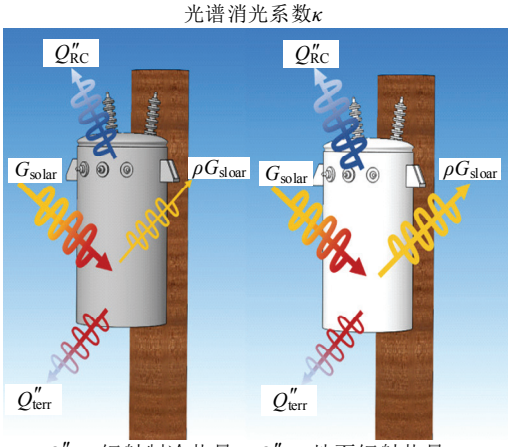
1.4 电力装备中的电-磁-热-力耦合

在电力装备中，传热过程起始于电磁效应造成的各种损耗，并引起各个部件的力学响应，其与电、磁、力等效应之间的多物理场耦合是不可分割的。因此，要准确计算装备内部的传热量与温度场分布，就必须综合考虑这些物理场之间的相互作用。目前，已有文献对电力装备的多物理场耦合问题进行了系统性综述[82]。本文在此基础上，聚焦流动传热与其他物理场之间的具体耦合机制。如图 8 所示，这些耦合作用主要通过以下路径实现。

1）温度的变化改变热量的产生。对于电力装备中常用的导体与绝缘材料而言，温度变化通常会引起电导率、相对磁导率等电磁参数的显著变化[83]，并直接影响欧姆损失、涡流损失[84]等电力装备中的主要热源的数值与分布。

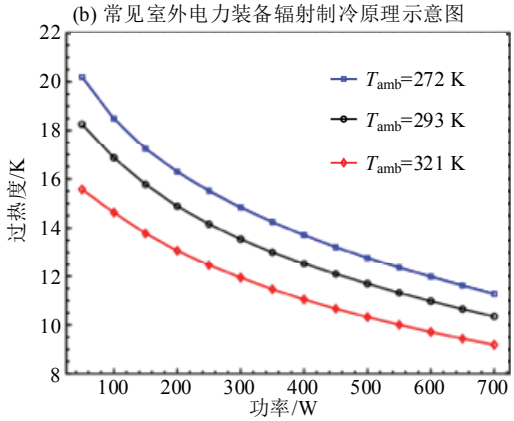


(a) 太阳辐射与大气窗口波段、辐射制冷材料的光谱消光系数κ



Q''_{RC}—辐射制冷热量；Q''_{terr}—地面辐射热量；G_{solar}—入射太阳辐照度；ρ—太阳反射率

(b) 常见室外电力装备辐射制冷原理示意图



(c) 柱上变压器在不同发热功率下辐射制冷涂层产生的降温效果

图 7 辐射制冷技术及其在室外电力装备热管理中的应用[11,78]

Fig.7 Radiative cooling technology and its application in thermal management of outdoor power equipment[11,78]

2）电力装备中的材料热物性(包括固态导体、绝缘材料与流体介质的导热系数、密度和比热[34,85])对温度的显著依赖性导致能量守恒方程的非线性；流体黏度的变化可能引发流型和传热系数的变化，二者都会影响温度分布。

3）材料的热膨胀系数决定了其受热时的膨胀或收缩行为。不同材料热膨胀系数的不匹配会造成界面处的应变差异，是热应力的主要起因，热应力可能在结构间引入额外的接触电阻、热阻，引起异常发热；此外，工频交流电、短路电流及涌流电流引发的电磁力也会导致材料变形，进而改变电磁分

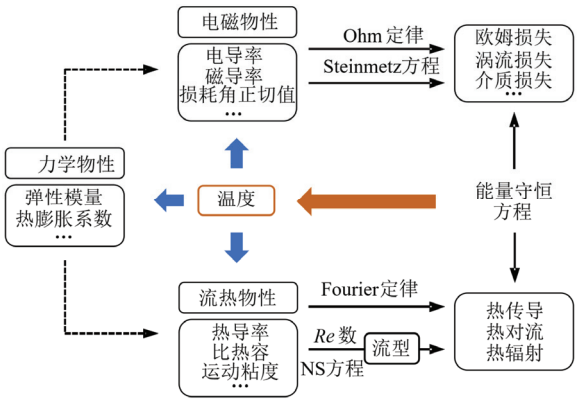


图 8 温度参与的电-磁-热-力耦合机制

Fig.8 Mechanism of temperature-dependent electro-magneto-thermo-mechanical coupling

布并影响损耗。如 Jia 开展了变压器电磁-传热-流动-振动多物理场耦合仿真研究，发现漏磁通主要集中于线圈端部及铁芯角隅、不均匀电流分布导致中间相低压线圈承受最大电磁力等现象[34]。研究还发现温度升高会增加损耗密度，热点温度上升可达 7.06 K。

可见，温度在多物理场耦合中扮演着核心的“桥梁”角色：它既是电磁损耗的直接产物，又反向调整材料的电、磁、热、力学参数，进而影响整个系统的温度分布。目前，关键耦合参数的准确获取仍是首要难题，特别是如何在线辨识并预测界面接触热阻、复合材料(如绕组、铁芯)的等效热物性等参数在振动、老化、污秽等全生命周期工况下的动态演化规律；其次，装备巨大的时空尺度跨越(从微米级界面到米级结构，从秒级瞬态到年级的老化)给全耦合数值仿真带来了难以承受的计算负担，制约了其在机理发现和工程设计与评估中的应用，这一问题将在 2.2 节中进一步讨论。

2 电力装备传热机制的研究方法

对电力装备内部复杂传热机制的深入理解依赖先进研究方法的支撑。获取温度、流速、压力等关键物理量的时空分布，是揭示传热机理、验证模型和评估装备热性能的前提。长期以来，试验测试、数值仿真与解析/半解析模型构成了传热机理研究与工程实践的三大支柱。然而，在新型电力系统的背景下，面对装备状态透明化、数字孪生构建等新需求，这些传统方法在实时性、保真度和泛化能力等方面也面临新的挑战。本章将系统梳理服务于电力装备传热机理研究的各类方法，重点讨论其在揭示物理机制、构建高精度模型以及应对工程挑战中的作用与局限。

2.1 试验测试技术

试验测试是传热研究的基石，其核心任务包括 1）对温度、流速等关键物理量进行精确测量，以揭示传热机理；2）构建可控与可复现试验平台，模拟实际运行工况，用于模型验证与整机热性能评估。

2.1.1 关键物理量测量技术

温度是表征装备热状态最核心的物理量。热电偶因其技术成熟、成本低廉，在电磁环境可控条件下应用广泛。但在强电磁干扰环境下，光纤传感技术因其优良的绝缘性能、抗电磁干扰能力和长寿命等特点更有优势。主流的光纤温度传感器包括点式的荧光光纤、光纤布拉格光栅以及可实现连续测量的分布式光纤传感技术。点式传感适用于关键单点的高精度测量，而分布式传感则能实现对长距离、大范围对象的连续温度剖面测量，但通常需要在空间分辨率、测量距离和精度等指标间进行取舍。此外，声表面波传感器因其无线无源的特性，在开关触头等不便布线的密闭部件测温中展现出优势[86]；而非接触式的红外热成像技术则广泛用于对变电站母线接头、隔离开关等设备进行远距离、大面积的巡检和故障预诊断。鉴于电力装备中温度测量的普遍性与重要性，已有专门的综述文献对其原理、应用与发展趋势进行了详细阐述[87-88]，本文不再赘述。

除了温度，对流传热中的流场分布是揭示换热机理的另一关键。相较于管道总量流量计(差压、涡轮、超声等)，理解设备内外局部传热机制更依赖局部流场分布的获取。受限于复杂结构、狭小空间与严苛电磁环境，传统流量计难以适配。

粒子图像测速技术(particle image velocimetry，PIV)通过追踪流体中的示踪粒子运动来获取流体的速度场信息，已被应用于变压器绝缘油流动的研究中[89]。PIV 方法使用激光照射来跟踪分散在流体内的示踪粒子，可一次性获得与激光垂直平面内的流场的压力和速度信息。在油浸绝缘设备研究中，示踪粒子可选用直径为 10~50 μm 的聚酰胺或中空玻璃微球，粒子密度与绝缘油接近，以确保良好的跟随性。Daghrah 使用 PIV 重构了模型绕组饼间油流，认为较高的入口油流速可能不会提高变压器的热性能，并可能诱发逆流[90]。

激光多普勒测速技术(laser Doppler velocimetry，LDV)是另一种非接触式流场测量技术，基

于多普勒效应原理，通过测量示踪粒子散射光的频率偏移来计算粒子的运动速度。与 PIV 能够同时获取整个平面流场信息不同，LDV 只能测量单点速度，但具有更高的时间分辨率和测量精度，特别适合于需要精确测量局部流速的场合。早期研究者通过搭设外部光路测量变压器饼间流场，最近，Qi 等人基于 LDV 原理开发了油速传感器，作者利用从变压器绝缘材料自然脱落而随油流动的微小粒子作为示踪粒子，避免了加入示踪粒子造成的故障风险，作者在 110 kV 变压器上实现了 4.6%的最大测量误差[91]。不过，由于电力装备内部结构通常十分复杂，光路设置常会遇到困难，因此目前研究主要在模型中进行[90,92-93]。

考虑到电弧高温会引起周围气体介质的密度和折射率发生剧烈变化，基于光线偏转原理的光学诊断方法，如纹影法、摩尔偏转技术以及干涉法，已被用于非接触式地测量电弧通道及周围热流场的物理特性。Zhou 等人使用摩尔偏转技术证实了中压交流空气电弧等离子体的电子温度显著高于气体温度，电弧处于非局部热平衡状态[94]。Wang 等人使用纹影法拍摄了油内电弧，发现电弧引发了 2 次冲击波，并且间隙距离的增加会导致气泡直径、气泡膨胀速度显著增大[95]。李元研究了更高电流(峰值为 14.6 kA)下的油内电弧气泡，同样发现气泡所引发 2 次压力波的现象[96]。与 PIV、LDV 等技术相比，基于干涉或衍射的方法精度也较低，同时实施难度、成本较低。

总体而言，现有流场测量技术多为非接触式光学方法。与成熟的光纤温度/压力传感相比，光纤流速传感因其测量原理更复杂，因而可靠性更低。例如基于热耗散原理的传感器[97]易受污染物附着而失准，基于微悬臂梁的传感器[98]机械结构一旦脱落则可能造成绝缘故障，因此长期稳定性与可靠性尚不能满足电力装备的要求。精确掌握绕组油道等关键区域的局部流速，将能精确计算局部传热量、获取流动传热模式，不仅能为评估设备状态提供直接的数据支撑，也为构建高保真度的设备热-流数字孪生模型提供了验证的基础。因此，在强电磁、高电压、空间受限约束下，开发低成本、高可靠的微型流速传感器，以实现对关键部件的“零距离”监测极有发展价值。

2.1.2 集成化试验平台与环境模拟

对关键物理量的测量往往需要在特定的试验平台上进行。为了在可控条件下复现电力装备在特定工况下的复杂传热过程，研究人员通常需要构建自建平台。例如带有光学窗口的变压器绕组模型[90]、用于研究电弧动态行为的高压放电腔室[96]等。这些平台通过对真实设备进行合理简化，为 PIV、LDV 等精细化诊断技术的应用创造了条件，是验证数值模型和发展理论模型的关键环节。

而为了评估整个设备在真实运行环境下的热性能和可靠性，则需要借助微气候室(环境模拟实验室)。这类设施可模拟高温、高湿、风、雨、雪、盐雾和太阳辐射等多种气候条件组合。利用微气候室，可以开展架空线路覆冰与融冰试验[99]、高压直流电缆在温度梯度下的热-电耦合老化机理[100]以及评估辐射制冷等新材料、新技术的涂层试验在整机上的实际应用效果。这些系统级的试验能够全面评估装备的设计裕度，验证其长期运行的可靠性。

综上，从服务机理研究的自建平台到面向整体验证的环境模拟系统，试验测试为传热研究提供了不可或缺的物理依据。未来的挑战在于如何将平台测试数据与在线监测数据高效融合，为构建高保真度的数字孪生模型提供支撑。

2.2 数值仿真在电力装备传热分析中的应用

数值计算方法，特别是有限元法和有限体积法，已成为电力装备传热分析中不可或缺的工具，关于其在电力装备中的数值算法[101]与多场耦合数值计算[102]已有专门的综述可供读者查阅。目前软件平台主要可分 2 类，一是如 ANSYS、COMSOL 等通用仿真平台可执行精细的多场仿真，但并非针对电力装备设计，通常需要用户从零开始构建几何、物理模型及边界条件；另一类则是面向特定工程应用的专用软件，通过内嵌行业标准和简化模型，实现了精度与效率的平衡。例如，CYMCAP 可基于 IEC 标准进行电缆载流量和温度计算[103]，能够精确处理复杂的埋地环境和瞬态热响应，是电缆热分析领域的行业基准；用于架空线路设计的 PLS-CADD 集成了热定额分析模块，能够依据实时气象条件计算导线温度和弧垂，对动态增容和线路安全评估至关重要[104]；Simcenter MAGNET 专注于低频电磁场仿真[105]，在精确计算电磁损耗的同时，可通过设定经验性的对流换热系数进行快速热仿真，但无法模拟详细的冷却流体流动。尽管这些工具日益强大，但在实际应用中，研究者仍面临着从物理建模到计算效率的一系列关键挑战。

1）物理模型的精确构建。一方面，关键热物性参数(界面热导、材料发射率等)往往难以精确测量，且可能随服役年限、工作环境发生变化，这使得依赖反演算法[106]从实测数据中间接辨识参数成为必要。另一方面装备的失效过程常呈现显著的跨时空尺度特征，例如设备局部热点尺寸在毫米级，而整体尺寸在米级或更大。这一特征要求进一步开发跨尺度耦合算法[60]。

2）复杂几何的时间、空间离散。复杂几何对空间和时间离散化提出了苛刻要求。空间上，须局部网格加密以捕捉流经固体的流体形成的速度、热边界层[60,107]，并对不同尺寸网格做无关性验证[34]，常用方法如 Richardson 外推法；时间上，显式算法的步长选择则常受限于 CFL(Courant-Friedrichs-Lewy)条件的约束，为保证数值稳定性，信息在网格间传播的数值速度不能超过其物理速度[108]，时间步长与最小空间网格因此紧密耦合。为解析变压器绕组间隙、开关触头间隙等狭窄空间，瞬态时间步被严格限制在秒级甚至毫秒级，难以满足工程中对设备长期运行状态(小时至天级)的预测需求。同时，电力装备通常是包含多组件、多材质的非均质结构，其内部更可能存在绝缘裂纹、接触面烧蚀等不规则的微观形貌。这种几何复杂性对传统贴体网格生成构成挑战，为此，发展自适应网格加密技术以及对复杂边界适应性更强的非贴体网格方法(如浸没边界法、格子玻耳兹曼法[68])，是解决几何离散化难题、提升计算准确性的重要方向。

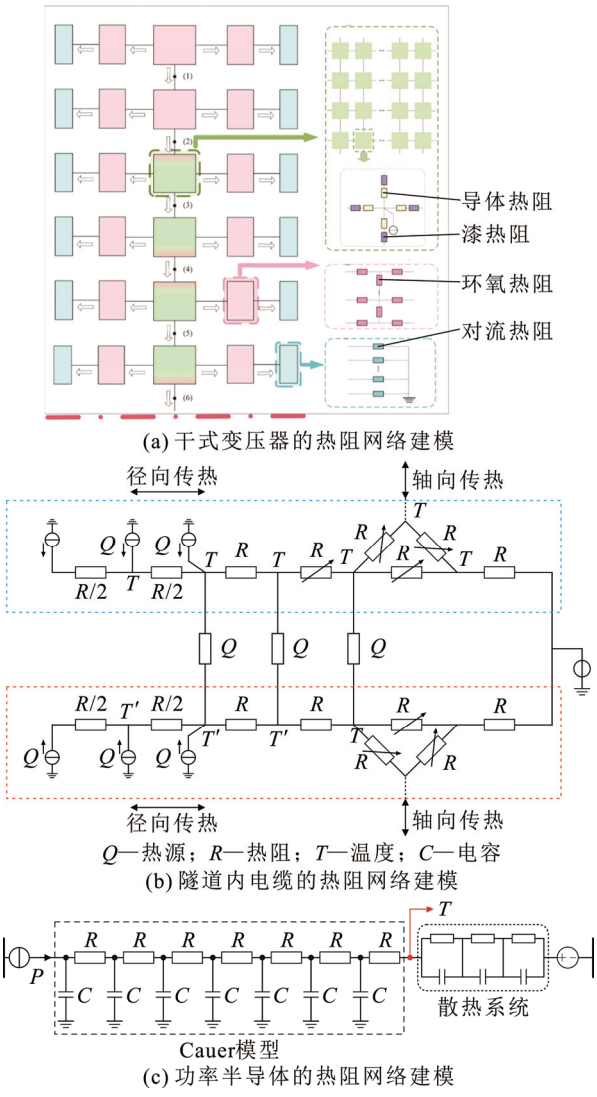
3）效率瓶颈和可迁移性。多物理场耦合的计算成本和传统数值方法的结果可迁移性差这 2 个因素共同导致了仿真效率瓶颈。首先，多物理场耦合要求在每个时间步内迭代求解电-磁-流-热等多个庞大的代数方程组，提高了计算开销。而对装备几何、材料或边界条件的任何微小改动所产生的影响都要通过重新计算确定，这在优化设计、故障诊断等需要重复计算的场景下，使得总计算负担变得难以承受，严重制约了仿真技术在实时评估和数字孪生中的应用。面对这一瓶颈，目前针对变压器[109]、开关设备[110-111]等构建的代理模型(surrogate model)可以快速预测不同工况下的温度分布，是同时解决计算效率和结果可迁移性两大难题、实现装备快速设计与在线评估的核心突破口。

2.3 热网络模型

热网络法是一种基于热电类比的传热建模方法。通过将结构或材料的热阻、热容分别等效为电阻和电容，可以借助电路分析方法(如 Kirchhoff 定律、Thevenin 定理等)来模拟和求解复杂系统的传热过程。如图 9 所示，在热网络模型中，既可包含导热、对流和辐射等不同类型的热阻，也可以通过引入热容元件分析系统的暂态热行为，并使用电流源和电压源建模不同类型的热源与边界条件。与全解析或数值计算方法相比，热网络法属于介尺度建模手段，具有计算速度快、便于参数扫描和优化设计等优点，但其精度依赖于等效参数的获取和模型简化的合理性。

目前，在电力装备中应用的热网络方法主要分为 2 类。

第 1 类基于真实材料或部件结构，通过解析计算、数值仿真或试验手段获取热阻和热容参数，常用于油浸和干式变压器[114](见图 9(a))、电缆等设备



(a) 干式变压器的热阻网络建模

(b) 隧道内电缆的热阻网络建模

(c) 功率半导体的热阻网络建模

图 9 电力装备中热阻网络模型的典型应用[38,112-113]

Fig.9 Representative thermal resistance network models for electrical power equipment[38,112-113]

的热分析(见图 9(b))。这一方法的优点是能够较好反映设备的实际结构和热物性，便于对具体部件的温度场进行分析，未来可通过与多物理场仿真、试验数据融合进一步提升精度和适用性。

第 2 类主要应用于电力电子设备[115]的热管理与热设计中，典型模型包括 Cauer 和 Foster 热阻网络，如图 9(c)所示。由于电力电子器件(如功率半导体)常常面临周期性热激励，其激励间隔远小于器件热弛豫时间，动态热响应表现出明显的低通滤波器特性。在这类模型中，热阻和热容参数通常是通过试验数据拟合获得，并不直接代表实际材料的物理属性，而是用于准确描述器件的动态热行为。热网络在电力装备热分析中具有重要价值，可根据应用对象和分析需求灵活选择建模方式，以实现高效、准确的热管理和优化设计。

3 传热机理在电力装备中的应用场景

传热分析在电力装备全生命周期中发挥着关键作用。从设备投运前的优化设计到运行中的状态监测与故障诊断，再到故障后的应急处置以及基于温度数据的健康状态评估，温度场信息始终是支撑科学决策的核心依据。如图 10 所示，4 类应用场景形成闭环：优化设计追求最佳的温度分布以提升设备本征性能；状态监测通过实时或准实时的温度场获取实现故障状态和类型评估；故障处置基于温度演化规律制定应急响应策略；健康评估则利用历史温度数据预测设备未来状态，指导维护决策并反馈至设计优化。

3.1 优化设计

电力装备的优化设计以控制温度分布、降低热点温度为核心目标，通过改进冷却结构和引入新型散热技术提升设备本征热性能。对于变压器这一输配电系统的核心装备，准确预测并降低绕组热点温度是避免绝缘加速老化、延长设备寿命的关键。油浸式变压器通过优化油道结构、导向板布置和油泵配置，可显著改善油流分布，Li 等通过 Darcy 定律描述饼间油流，结合拓扑优化算法设计油浸自冷变压器导油板几何，实现超过 15 K 的热点温度降低[122]。Wang 等电磁-热流耦合仿真研究了中压开关的风量控制策略[123]。

新型散热技术在电力装备中的应用进一步提高了散热效率，支撑了装备小型化与容量提升。电力电子装备如换流阀、大功率变流器和 IGBT 模块通常采用风冷、水冷等单相强制对流传热冷却方式，但随着器件功率密度不断提高、集成度日益增强和工作环境日趋复杂，传统的单相冷却方式在热流密度超过 10^3 W/cm²时已难以满足热管理需求。热管和均热板(vapor chamber，VC)作为高效相变传热元件，以其出色的等温性、被动工作特性和极高的等效导热系数而受到青睐。研究人员将 SiC-MOSFET 裸芯片集成于 VC 顶部[124]，使 VC 同时承担散热器和漏极电流传导双重功能，构建的模块原型可在 632 W/cm²的热流密度下安全运行；通过将 VC 嵌入中 IGBT 功率模块的铜基板，可使芯片结温降低 12 ℃[125]。未来，相变传热技术在电力电子装备中的应用将致力于解决长期可靠性、与电气绝缘的兼容性以及复杂工况下性能衰减等挑战。

3.2 热故障诊断

电力装备热故障诊断需要从外部和内部的有限温度数据反演热故障发生的位置和强度，属于典型的传热反问题[126-127]。由于反问题求解具有固有的不适定性，通常可将其转化为优化问题，并引入正则化方法(如 Tikhonov、LASSO 正则化等)确保解的稳定性和物理意义。求解该优化问题的算法目前主要有 2 类，一是基于梯度的迭代法，例如朱丽娜使用共轭梯度法求解了反演了稳态传热系数[127]，张大千求解了输电塔基冻土层内热源和边界温度[128]，此类方法收敛快但易陷入局部极小；二是启发式算法，如陈思使用粒子群算法反演了 10 kV 变压器的内部热点(见图 10(c)[85])，Zhang 使用遗传算法检测 GIS 断路器接触温度[129]。此类方法具备全局搜索能力，但计算成本较高。

同时，2 类方法均需要反复调用高精度的正问题模型(如有限元仿真)，计算代价高昂。采用模型降阶(如本征正交分解[130](proper orthogonal decomposition，POD))和机器学习方法构建高效代理模型因此成为前沿方向。Tang 等人采用物理信息神经网络，将传热控制方程嵌入损失函数，求解了二维变压器模型的温度分布[131]。此外，物理信息神经网络类方法还可将故障信息如位置、强度视为优化变量，根据数据损失和方程损失“端到端”地同时反演温度场和故障点，为热故障诊断提供了一种求解新范式。进一步研究将针对性提升目前数据驱动方法在求解域几何、边界条件的泛化能力以及超参数智能化调节(如各物理场损失权重[106]、数据与方程损失权重)算法的开发。

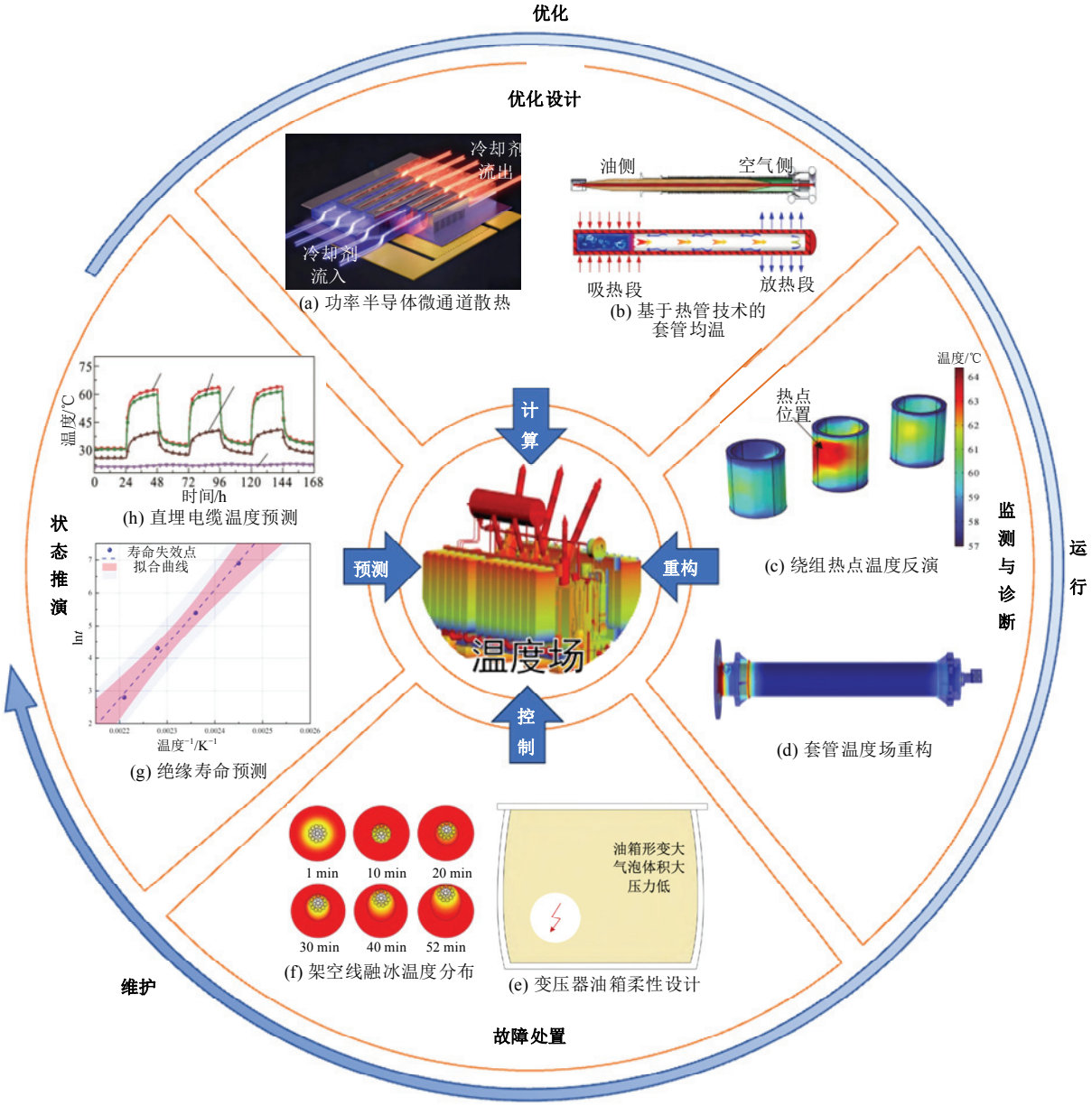


图 10 输配电装备全生命周期中典型传热场景[58,116-121]

Fig.10 Typical thermal problem scenarios in the life cycle of power equipment[58,116-121]

3.3 热故障处置

基于传热理论的故障处置策略通过实时温度监测和热演化规律的精确掌握，在故障发展的关键时间窗口内采取主动热管理措施，可降低热失控导致故障扩大和设备损坏风险，减少非计划停电检修，保障电力系统安全运行。

架空线路覆冰严重威胁电网安全，直流/交流融冰技术虽然能有效消除冰层，但常需要线路停运，因此非接触式融冰方法应运而生。激光融冰利用高能激光束局部加热冰层，可精确控制融冰位置[132]；蒸汽融冰已被魁北克水电公司应用于断路器、立柱绝缘子等设备除冰。此外，开发抗冰材质的架空线减少液滴在线路上的凝结，有望从源头避免线路、塔架结冰问题[99]。

电弧故障是油浸设备最严重的热故障之一，绝缘油裂解产生的高温高压油气可能撕裂油箱导致燃爆。除加固油箱外，采用多孔吸能装置[55]和压力释放装置可快速降低油气压力，降低事故后果。压力释放装置的安装位置、泄放面积和开启压力阈值均会显著影响泄放性能，其最优取值有赖对电弧故障产生的油流速度和压力波传播过程的准确预测[133-134]。由于电弧故障真型试验的危险性以及内部结构的复杂

性，试验和仿真研究均受到巨大挑战，因此一方面应开展可控能量释放和多点测量的缩比或半实物试验平台，结合先进的流场诊断技术获得关键参数如压力、温度和流场的高时空分辨数据，另一方面应推进电弧-流体-结构多物理场耦合的数值模型开发，实现模型与试验的闭环校准。

3.4 容量动态预测

基于温度数据的推演预测是实现电力装备前瞻性运维的关键，其核心在于依据有限的温度监测信息，结合传热机理模型，推断设备当前内部状态并预测其未来演化趋势，动态增容技术是其典型代表。

动态增容旨在通过实时评估装备的热状态和散热能力，避免因采用保守静态额定值而造成的输送容量浪费。对于埋地电缆，其研究已从经典稳态载流量计算发展到结合分布式光纤测温，建立精细化的电缆-土壤耦合热模型，从而评估载流能力动态，提升输送灵活性[135]。对电力变压器而言，不仅关注基于热路模型的绕组热点温度推算，并探索将其与需求的协同优化方法，在保证绝缘寿命的前提下提升变压器的备用容量和接纳新负荷的能力[136]。对于气体绝缘设备，其动态增容能力更加依赖于精确计及交变电磁场下导体损耗和复杂内外热交换的分析模型，以此为基础可实时推算其最大安全载流量[137]。总之，将温度作为核心约束，通过建立从“可测”到“不可测”的准确映射，将在保障安全的前提下，最大化挖掘现有电力装备的潜力。

4 结论与展望

本文依托热传导、对流与辐射的经典传热学框架，系统梳理了电力装备中传热过程的建模理论、研究方法与应用进展。目前，传热分析贯穿于装备设计、运维和评估的全生命周期，并正从传统的宏观、稳态分析向多物理场耦合、跨时空尺度方向发展。物理机理层面，装备中典型的传热过程已形成较完善的理论模型；研究方法层面，试验、仿真与数据驱动方法的发展为深入理解装备内部复杂的热-电-流过程提供了有力工具；工程应用层面，传热分析已在动态增容、热点预测、冷却结构优化等方面取得了显著成效。在未来，针对电力装备的多样应用场景和运行环境，传热研究有望在以下几个方向取得进一步突破。

1）大型油浸式变压器内部绕组、铁芯和围屏间的复杂流动模式仍缺乏充分的实证数据；其结构本身的多尺度特性给精确建模带来困难；此外，振动、油中气泡引发的局部放电和匝间短路等故障下的多物理场耦合特性使热点预测更为复杂。因此，一方面应发掘现有数值方法的潜力，尤其是在网格离散策略、湍流模型的正确选用及边界条件的精确设置等方面追求更高的保真度；另一方面，PINN等机器学习方法所构建的高效代理模型或能替代高成本仿真，融合稀疏实测数据以修正模型、反演内部热状态。

2）对于以换流阀为代表的电力电子设备，随着功率密度持续提升，结温管理是核心挑战。未来的研究重点在于开发并应用兼具高导热与高可靠性的热界面材料例如液态金属、石墨烯基 TIM 和碳纳米管增强复合物，并探索均热板、微通道沸腾散热及微通道喷雾冷却等高效相变传热技术与器件的深度集成设计，以提升装备的长期热可靠性与服役寿命。

3）电缆复杂的外部环境造成了载流能力评估、局部破坏模式预测乃至早期故障检测的主要困难。未来的研究将从基于静态等效热阻的简化模型转向对土壤中地下水流动、季节性冻融等多过程耦合下的动态湿热迁移机理的研究。对土壤内部流动传热过程的准确预测将进一步提升系统动态增容能力；在此基础上，针对电缆接头等薄弱部位，细致建模渗水导致的局部电弧及电弧导致的绝缘烧蚀、碳化过程，将有助于揭示早期故障的演化机制，为在线监测、故障预警和精准运维提供理论依据。

4）架空线路在不同气象工况下的详细传热机制仍有待阐明。未来针对液滴在导线和金具表面的凝结、蒸发与结冰等微观过程，结合多尺度试验与数值模拟，将揭示蒸发过程对局部冷却和电解质、污染物富集的影响，有望化解架空线路锈蚀与结构劣化风险。覆冰问题上，进一步量化风速、水滴粒径、表面粗糙度及导线温度等因素对冰层形核与增长的影响，将为灾害防控和主动融冰策略优化提供理论基础。

5）针对气体绝缘开关设备等电弧主导的极端工况，未来加强对电弧本体建模，涵盖可压缩流动、湍流、辐射传热、电磁作用等多物理场耦合过程。由于相关试验风险高、成本大，对高精度流场诊断技术和先进数值计算方法的需求更为迫切。完善电弧机理与电弧与绝缘油、装备结构相互作用机制模型，不仅有助于优化吸能结构与压力释放装置设计，提高设备抗故障能力和运维安全性，同时也为先进

数字孪生与故障预测系统的开发提供支撑。

参考文献 References

[1] 《新型电力系统发展蓝皮书》编写组. 新型电力系统发展蓝皮书[M]. 北京：中国电力出版社，2023.
Writing Group of 'Blue Book on the Development of New Power Systems'. Blue book on the development of new power systems[M]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2023.

[2] 江秀臣，许永鹏，李曜丞，等. 新型电力系统背景下的输变电数字化转型[J]. 高电压技术，2022，48(1)：1-10.
JIANG Xiuchen, XU Yongpeng, LI Yaocheng, et al. Digitalization transformation of power transmission and transformation under the background of New Power System[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 1-10.

[3] 赵莹莹，纪 航，王逊峰，等. 电力电缆载流量计算方法综述[J]. 电力与能源，2022，43(4)：299-303，331.
ZHAO Yingying, JI Hang, WANG Xunfeng, et al. Review of calculation methods for power cable current carrying capacity[J]. Power & Energy, 2022, 43(4): 299-303, 331.

[4] 李陈莹，陈 杰，谭 笑，等. 电缆燃烧典型火源模拟方法综述[J]. 消防科学与技术，2021，40(3)：345-351.
LI Chenying, CHEN Jie, TAN Xiao, et al. A review of typical fire source simulation methods for cable combustion[J]. Fire Science and Technology, 2021, 40(3): 345-351.

[5] 王晓晗. 基于等效导热系数法的油浸式电力变压器绕组流-热耦合分析[D]. 保定：华北电力大学，2021.
WANG Xiaohan. Analysis of flow-thermal coupling of oil-immersed power transformer windings based on equivalent thermal conductivity method[D]. Baoding, China: North China Electric Power University, 2021.

[6] SMOLKA J, NOWAK A J. Experimental validation of the coupled fluid flow, heat transfer and electromagnetic numerical model of the medium-power dry-type electrical transformer[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2008, 47(10): 1393-1410.

[7] TSILI M A, AMOIRALIS E I, KLADAS A G, et al. Power transformer thermal analysis by using an advanced coupled 3D heat transfer and fluid flow FEM model[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2012, 53: 188-201.

[8] GALLETTI B, BLASZCZYK A, WU W. CFD based sensitivity study of cooling performance of transformer radiators[C]//2019 6th International Advanced Research Workshop on Transformers (ARWtr). Cordoba, Spain: IEEE, 2019: 1-6.

[9] WANG B, JIA X Y, YANG J, et al. Numerical study on temperature rise and structure optimization for a three-phase gas insulated switchgear busbar chamber[J]. Energy, 2022, 254: 124463.

[10] YU Z P, LIU Y D, YAN Y J, et al. Dynamic resistance characteristics of an incipient fault of a medium-voltage cable joint in a water-logged environment[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2025, 32(3): 1827-1836.

[11] PEOPLES J, ARENTZ F, FANG Y Z, et al. Lifespan and efficiency gain for outdoor electronic systems from radiative cooling: a case study on distribution transformers[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 213: 118636.

[12] 杨世铭，陶文铨. 传热学[M]. 4 版. 北京：高等教育出版社，2006.
YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer[M]. 4th ed. Beijing, China: Higher Education Press, 2006.

[13] 邓永清，阮江军，龚宇佳，等. 基于参数热等效的 10 kV 变压器温度流体场三维仿真计算[J]. 电力自动化设备，2021，41(4)：212-218.
DENG Yongqing, RUAN Jiangjun, GONG Yujia, et al. Three dimensional thermal fluid field simulation of 10 kV transformer based on parameter thermal equivalence[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4): 212-218.

[14] 张天栋，石壮壮，吴加雪，等. 填充型高导热环氧树脂复合材料的研究进展[J]. 绝缘材料，2022，55(3)：10-22.
ZHANG Tiandong, SHI Zhuangzhuang, WU Jiaxue, et al. Research progress of filled epoxy resin composites with high thermal conductivity[J]. Insulating Materials, 2022, 55(3): 10-22.

[15] 吴加雪，张天栋，张昌海，等. 高导热环氧树脂的研究进展[J]. 材料导报，2021，35(13)：13198-13204.
WU Jiaxue, ZHANG Tiandong, ZHANG Changhai, et al. Research status of epoxy resin with high thermal conductivity[J]. Materials Reports, 2021, 35(13): 13198-13204.

[16] XIAO M, DU B X. Effects of high thermal conductivity on temperature rise of epoxy cast winding for power transformer[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(4): 2413-2420.

[17] SHANG X Y, PANG L, BU Q H, et al. Thermal runaway and induced electrical failure of epoxy resin in high‐frequency transformers: insulation design reference[J]. High Voltage, 2024, 9(5): 989-1000.

[18] FIEDLER T, WHITE N, DAHARI M, et al. On the electrical and thermal contact resistance of metal foam[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 72: 565-571.

[19] WANG C N, LU L, MA H Z, et al. Diagnosis for loose switching contact fault of on-load tap-changer in transformer[C]//CICED 2010 Proceedings. Nanjing, China: IEEE, 2010: 1-6.

[20] NARUMANCHI S, MIHALIC M, KELLY K, et al. Thermal interface materials for power electronics applications[C]//2008 11th Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems. Orlando, USA: IEEE, 2008: 395-404.

[21] WANG X, LI H, YAO R, et al. Thermal contact resistance optimization of press-pack IGBT device based on liquid metal thermal interface material[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(5): 5411-5421.

[22] CAI J H, DING L J, WANG J N, et al. Impact of thermal interface material on power cycling lifetime of IGBT module[J]. Microelectronics Reliability, 2021, 126: 114272.

[23] 王飞鹏，夏章川，高振发，等. 我国合成酯绝缘油的研究及应用现状[J]. 绝缘材料，2025，58(8)：1-10.
WANG Feipeng, XIA Zhangchuan, GAO Zhenfa, et al. Research and application status of synthetic ester insulating oil in China[J]. Insulating Materials, 2025, 58(8): 1-10.

[24] 郑含博，蓝泓策，姚德贵，等. 变压器用植物绝缘油冷流特性的研究进展[J]. 高电压技术，2025，51(6)：2599-2609.
ZHENG Hanbo, LAN Hongce, YAO Degui, et al. Research progress on cold flow characteristics of vegetable insulating oils for transformers[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(6): 2599-2609.

[25] 高克利，杨 圆，周文俊，等. SF_6 替代型环保绝缘气体：研究、应用和展望[J]. 中国电机工程学报，2024，44(18)：7395-7411.
GAO Keli, YANG Yuan, ZHOU Wenjun, et al. SF_6 alternative environmentally friendly insulating gas: research, application and outlook[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(18): 7395-7411.

[26] DIXIT A, EKANAYAKE C, MA H, et al. Thermal analysis of natural cooling type distribution transformer retrofilled with natural ester oil[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(1): 231-239.

[27] KORBEL J, OSTROWSKI J, STOLLER P, et al. Convective performance of C5-flouroketone-based (C5-FK) and C4-flouronitrile-based

(C4-FN) gas mixtures and SF_6[J]. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2023, 15(1): 011002.

[28] CUI L, ZHOU Y X, ZHOU X X, et al. Simulation and analysis of pressure generation characteristics caused by arcing faults in transformer[C]//2022 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Applications (ICHVE). Chongqing, China: IEEE, 2022: 1-4.

[29] YU Y, CUI J, SMITH W R, et al. The mechanisms of jetting, vortex sheet, and vortex ring development in asymmetric bubble dynamics[J]. Physics of Fluids, 2023, 35(12): 123320.

[30] WELTY J, RORRER G L, FOSTER D G. Fundamentals of momentum, heat, and mass transfer[M]. 6th ed. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, 2014.

[31] 鲁沛乐，严英杰，刘亚东，等. 有载分接开关绝缘油中金属颗粒运动规律及其对介电性能的影响[J]. 南方电网技术，2024，18(5)：1-11.
LU Peile, YAN Yingjie, LIU Yadong, et al. Movement law of metal particles in insulating oil of on-load tap-changer and its influence on dielectric properties[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(5): 1-11.

[32] GAO M, ZHANG Q G, DING Y Q, et al. Investigation on bubbling phenomenon in oil-paper insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(4): 2362-2370.

[33] LUO L, WANG L M, MEI H W, et al. Corrosion mechanism and process of hardware of disc suspension type insulators on ±800 kV transmission lines[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(1): 339-348.

[34] JIA X Y, LIN M, SU S W, et al. Numerical study on temperature rise and mechanical properties of winding in oil-immersed transformer[J]. Energy, 2022, 239: 121788.

[35] CHURCHILL S W, CHU H H S. Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1975, 18(11): 1323-1329.

[36] MORGAN V T. The overall convective heat transfer from smooth circular cylinders[J]. Advances in Heat Transfer, 1975, 11: 199-264.

[37] BERGMAN T L, LAVINE A S, INCROPERA F P, et al. Fundamentals of heat and mass transfer[M]. 7th ed. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, 2011.

[38] SUN Q Q, LIN Z Q, WANG F, et al. Thermal network modeling of tunnel cable considering circumferential heat transfer and tunnel curvature[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 196: 107190.

[39] YAN C G, XU C, LIU H, et al. Research on oil pressure rise and fluctuation due to arcing faults inside transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(2): 1483-1492.

[40] YAN C G, XU Y, ZHANG P, et al. Investigation of the gas bubble dynamics induced by an electric arc in insulation oil[J]. Plasma Science and Technology, 2022, 24(4): 044003.

[41] 刘士利，韩继涛，张　宁，等. 变压器油中气泡聚并行为及其对电场分布的影响[J]. 高电压技术，2023，49(8)：3534-3543.
LIU Shili, HAN Jitao, ZHANG Ning, et al. Coalescence behavior of bubbles in transformer oil and its effect on electric field distribution[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(8): 3534-3543.

[42] KHANDAN S, TENBOHLEN S, BREUER C, et al. CFD study of fluid flow and temperature distributions in a power transformer winding[C]//2017 IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL). Manchester, UK: IEEE, 2017: 1-4.

[43] WU M L, YANG F, RONG M Z, et al. Numerical study of turbulence-influence mechanism on arc characteristics in an air direct current circuit breaker[J]. Physics of Plasmas, 2016, 23(4): 042306.

[44] LUO Z Y, LIU Z Q, WU Y, et al. Evaluation and optimization of circuit breaker opening performance based on arc simulation[C]//2024 7th International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology (ICEPE-ST). Xiamen, China: IEEE, 2024: 786-790.

[45] GUO J, LIN H Y, FANG S H, et al. SF_6 transformer force-directed-gas duct design based on thermal-fluid coupled analysis method[C]//2007 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Seoul, Korea (South): IEEE, 2007: 1309-1311.

[46] JING Y T, LI Y, YUAN X G, et al. Calculation and analysis of the hot-spot temperature-rise for large power transformer based on 3D electromagnetic-fluid-thermal coupling method[C]//2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Sydney, Australia: IEEE, 2017: 1-4.

[47] NOVÁK B, KOLLER L. Steady-state heating of gas insulated busbars[C]//PES T&D 2012. Orlando, USA: IEEE, 2012: 1-7.

[48] YANG W T, ZHENG Z, HUANG W, et al. Thermal analysis for multi-conductor bundle in high voltage overhead transmission lines under the effect of strong wind[J]. Electric Power Systems Research, 2024, 231: 110308.

[49] 张鸣远，景思睿，李国君. 高等工程流体力学[M]. 西安：西安交通大学出版社，2006.
ZHANG Mingyuan, JING Sirui, LI Guojun. Higher engineering fluid dynamics[M]. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University Press, 2006.

[50] WEINLÄDER A, WU W, TENBOHLEN S, et al. Prediction of the oil flow distribution in oil-immersed transformer windings by network modelling and computational fluid dynamics[J]. IET Electric Power Applications, 2012, 6(2): 82-90.

[51] ZHAN N H, WU R, TSOTSAS E, et al. Proposal for extraction of pore networks with pores of high aspect ratios[J]. Physical Review Fluids, 2022, 7(1): 014304.

[52] LU W, ZHAO C Y, TASSOU S A. Thermal analysis on metal-foam filled heat exchangers. Part I: metal-foam filled pipes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49(15/16): 2751-2761.

[53] ALMENDROS-IBANEZ J A, BURGOS J C, GARCIA B. Transformer field drying procedures: a theoretical analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(4): 1978-1986.

[54] AHMAD S, RIZVI Z H, WUTTKE F. Unveiling soil thermal behavior under ultra-high voltage power cable operations[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 7315.

[55] 李　鹏，孙建涛，赵义焜，等. 大型油浸式变压器油箱防爆技术研究综述[J]. 中国电机工程学报，2025，45(9)：3282-3296.
LI Peng, SUN Jiantao, ZHAO Yikun, et al. Review on explosion-proof technology of large oil-immersed transformer tank[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(9): 3282-3296.

[56] 曾　斐，潘　艺，胡时胜. 泡沫铝缓冲吸能评估及其特性[J]. 爆炸与冲击，2002，22(4)：358-362.
ZENG Fei, PAN Yi, HU Shisheng. Evaluation of cushioning properties and energy-absorption capability of foam aluminium[J]. Explosion and Shock Waves, 2002, 22(4): 358-362.

[57] 王永刚，胡时胜，王礼立. 爆炸荷载下泡沫铝材料中冲击波衰减特性的实验和数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击，2003，23(6)：516-522.
WANG Yonggang, HU Shisheng, WANG Lili. Shock attenuation in aluminum foams under explosion loading[J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(6): 516-522.

[58] 袁发庭，张乃月，匡柏源，等. 基于多孔介质的油浸式变压器磁场-流场-温度场仿真计算及热点温度反演预测[J]. 高电压技术，2025，51(1)：62-74.
YUAN Fating, ZHANG Naiyue, KUANG Boyuan, et al. Simulation calculation of magnetic-fluid-thermal field of oil-immersed transform-

er based on porous media and prediction of hot spot temperature inversion[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(1): 62-74.

[59] 吕金潮，陈希之，刘 刚，等. 基于多孔介质理论的35 kV油浸式变压器热点简化计算[J]. 高电压技术，2024，50(3)：1034-1042.
LÜ Jinchao, CHEN Xizhi, LIU Gang, et al. Simplified calculation of hot spots of 35 kV oil immersed transformer based on porous medium theory[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 1034-1042.

[60] MEYER O H H, LERVÅG K Y, ERVIK Å. A multiscale porous-resolved methodology for efficient simulation of heat and fluid transport in complex geometries, with application to electric power transformers[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 183: 116133.

[61] SADJADI Z, RIEGER H. Scaling theory for spontaneous imbibition in random networks of elongated pores[J]. Physical Review Letters, 2013, 110(14): 144502.

[62] LE K H, KHARAGHANI A, KIRSCH C, et al. Discrete pore network modeling of superheated steam drying[J]. Drying Technology, 2017, 35(13): 1584-1601.

[63] ZHANG J, LI X. Coolant flow distribution and pressure loss in ONAN transformer windings-part I: theory and model development[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(1): 186-193.

[64] GARCÍA D F, GARCÍA B, BURGOS J C. Modeling power transformer field drying processes[J]. Drying Technology, 2011, 29(8): 896-909.

[65] PERRÉ P. Multiscale modeling of drying as a powerful extension of the macroscopic approach: application to solid wood and biomass processing[J]. Drying Technology, 2010, 28(8): 944-959.

[66] ZHANG J, DATTA A K. Some considerations in modeling of moisture transport in heating of hygroscopic materials[J]. Drying Technology, 2004, 22(8): 1983-2008.

[67] FAN X Z, SUN Z K, ZHANG X W, et al. Impregnation model and experimental study of mineral oil/meta-aramid paper combination insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2024, 31(4): 2003-2012.

[68] YAO J, WANG J F, DONG Q M, et al. Lattice Boltzmann study of droplet evaporation on a heated substrate under a uniform electric field[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 211: 118517.

[69] WEN R F, MA X H, LEE Y C, et al. Liquid-vapor phase-change heat transfer on functionalized nanowired surfaces and beyond[J]. Joule, 2018, 2(11): 2307-2347.

[70] CAREY V P. Liquid-vapor phase-change phenomena: an introduction to the thermophysics of vaporization and condensation processes in heat transfer equipment[M]. 3rd ed. Boca Raton, USA: CRC Press, 2020.

[71] ARIANNIK M, REZAEI-ZARE A, KUHNKE M, et al. A comparison between bubble formation on kraft and thermally upgraded papers in synthetic ester[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2023, 30(4): 1566-1572.

[72] PURNOMOADI A P, RODRIGO MOR A, SMIT J J. Spacer flashover in Gas Insulated Switchgear (GIS) with humid SF_6 under different electrical stresses[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 116: 105559.

[73] 段常坤，刘亚东，严英杰，等. 配网环网柜肘型头早期故障动态特性[J]. 高电压技术，2025，51(2)：742-752.
DUAN Changku, LIU Yadong, YAN Yingjie, et al. Incipient fault dynamic characteristic of elbow type cable joint in the distribution ring main units[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(2): 742-752.

[74] CONG Z H, LIU Y D, YAN Y J, et al. Study on the mechanism and electrical characterization of the distribution porcelain insulator incipient fault in the non-effectively grounded system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2024, 39(3): 1840-1851.

[75] ZHOU C, YIN J Q. Glaze icing process of moveable overhead conductor and its aerodynamic characteristics with numerical method[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 176: 121436.

[76] BOGGS S A. Failure mechanisms of shielded power cable related to high ground shield resistance and/or insulation of neutral wires from the ground shield[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(2): 295-301.

[77] ZHANG Y, GAO L, JIANG K, et al. Study on a coupled model of soil hydrothermal field considering the heat transfer of grounded conductor in soil freezing process[C]//Annual Meeting of CSEE Study Committee of HVDC and Power Electronics (HVDC 2023). Nanjing, China: IET, 2023: 356-360.

[78] ZHAO H P, ZHAN Y H, DOU S L, et al. Passive radiative temperature regulator: principles and absorption-emission manipulation[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2021, 229: 111143.

[79] IEEE. IEEE standard for calculating the current-temperature relationship of bare overhead conductors: IEEE Std 738—2012[S]. Washington, USA: IEEE, 2013.

[80] International Electrotechnical Commission. Guidelines for the functional specification of transmission line towers[S]. Geneva, Switzerland: 2021.

[81] FAROOQ A S, ZHANG P, GAO Y F, et al. Emerging radiative materials and prospective applications of radiative sky cooling-a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 144: 110910.

[82] 杨 帆，吴 涛，廖瑞金，等. 数字孪生在电力装备领域中的应用与实现方法[J]. 高电压技术，2021，47(5)：1505-1521.
YANG Fan, WU Tao, LIAO Ruijin, et al. Application and implementation method of digital twin in electric equipment[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1505-1521.

[83] CHEN J Q, CHEN Z H, WANG D, et al. Influence of temperature on magnetic properties of silicon steel lamination[J]. AIP Advances, 2017, 7(5): 056113.

[84] MO Z Q, LI X Z, ZHANG D X, et al. Valve reactor for HVDC system: electrical, thermal and vibrational properties[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2024, 161: 110149.

[85] 陈 思，刘亚东，严英杰，等. 10 kV油浸式变压器匝间短路故障反演与定位[J]. 高电压技术，2023，49(5)：1870-1881.
CHEN Si, LIU Yadong, YAN Yingjie, et al. Inversion and localization of turn-to-turn short-circuit faults in 10 kV oil-immersed transformers[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 1870-1881.

[86] MA G M, WU Z, ZHOU H Y, et al. A wireless and passive online temperature monitoring system for GIS based on surface-acoustic-wave sensor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3): 1270-1280.

[87] 马国明，王思涵，张晓星，等. 变电设备状态信息光纤/光学传感研究[J]. 高电压技术，2024，50(8)：3354-3386.
MA Guoming, WANG Sihan, ZHANG Xiaoxing, et al. Research on optical fiber/optical sensing for state information of transformer equipment[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(8): 3354-3386.

[88] 江俊杰，胡 军，马国明，等. 数字化电力装备专用传感应用需求与发展趋势[J]. 高电压技术，2024，50(8)：3271-3302.
JIANG Junjie, HU Jun, MA Guoming, et al. Application requirements and development trend of special sensors in digital electrical equipment[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(8): 3271-3302.

[89] TENBOHLEN S, SCHMIDT N, BREUER C, et al. Investigation of thermal behavior of an oil-directed cooled transformer winding[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(3): 1091-1098.

[90] DAGHRAH M. Experimental study of transformer liquid flow and

temperature distributions[D]. Manchester, UK: The University of Manchester, 2017.

[91] QI B, ZHU K H, WANG C Y, et al. An oil flow velocity in situ sensor for power transformers based on laser doppler effect[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2025, 74: 9002908.

[92] ZHANG X, DAGHRAH M, WANG Z D, et al. Experimental verification of dimensional analysis results on flow distribution and pressure drop for disc-type windings in OD cooling modes[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(4): 1647-1656.

[93] LANERYD T, BEL FDHILA R, RAHMANI M A, et al. Analysis of oil flow distribution in power transformer winding cooling ducts using temperature measurements[C]//9th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics. Potchefstroom, South Africa: North-West University, 2012: 16-18.

[94] ZHOU T, YANG Q, YUAN T. Investigation of non-local thermodynamic equilibrium effects of medium voltage AC air arc[C]//2023 IEEE 4th International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE). Shanghai, China: IEEE, 2023: 1-4.

[95] WANG H, ZHANG C, WANG Z F, et al. Electrohydraulic effect of microsecond pulsed discharge in transformer oils[J]. High Voltage, 2025, 10(1): 137-145.

[96] 李　元，王亚桢，施沛澍，等. 变压器油中脉冲电弧放电压力波的产生过程研究[J]. 高电压技术，2024，50(10)：4349-4357.
LI Yuan, WANG Yazhen, SHI Peishu, et al. Study on pressure wave generation in transformer oil by pulsed arc discharge[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(10): 4349-4357.

[97] LIEN V, VOLLMER F. Microfluidic flow rate detection based on integrated optical fiber cantilever[J]. Lab on a Chip, 2007, 7(10): 1352-1356.

[98] XIN W, HE Z Y, ZHAO C C. Design and experimental evaluation of a dual-cantilever piezoelectric film sensor with a broadband response and high sensitivity[J]. Micromachines, 2023, 14(11): 2108.

[99] FARZANEH M, CHISHOLM W A. Techniques for protecting overhead lines in winter conditions: dimensioning, icephobic surfaces, de-icing strategies[M]. Cham, Switzerland: Springer, 2022.

[100] 邱伟豪. 高压直流电缆温度梯度控制与光纤检测技术研究[D]. 广州：华南理工大学，2018.
QIU Weihao. Research on temperature gradient control and optical fiber detection technique of HVDC cable[D]. Guangzhou, China: South China University of Technology, 2018.

[101] 杨　帆，郝翰学，王鹏博，等. 电力装备多物理场数值计算发展现状[J]. 高电压技术，2023，49(6)：2348-2364.
YANG Fan, HAO Hanxue, WANG Pengbo, et al. State of the art of multiphysics simulation technology for power equipment[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2348-2364.

[102] 李清泉，朱　然，李姝奇，等. 换流变压器电热耦合数值计算方法综述[J]. 高电压技术，2024，50(10)：4734-4748.
LI Qingquan, ZHU Ran, LI Shuqi, et al. Review of numerical calculation methods for electro-thermal coupling of converter transformers[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(10): 4734-4748.

[103] LU X L, CAI L S, JIA Q Y, et al. Numerical analysis of cable heat output for renewable energy transmission lines[C]//2024 7th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE). Yangzhou, China: IEEE, 2024: 1500-1504.

[104] BERYOZKINA S, SAUHATS A. Research and simulation of overhead power line uprating using advanced conductors[C]//2015 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). Riga, Latvia: IEEE, 2015: 1-4.

[105] LIU L R, LI J, CHE F L. Electromagnetic and thermal modeling based on large power transformers[M]//CHENG Z G, TAKAHASHI N, FORGHANI B. Modeling and Application of Electromagnetic and Thermal Field in Electrical Engineering. Singapore, Singapore: Springer, 2020: 553-586.

[106] LI Y H, LÜ Y H, YAN Y J, et al. Physics-informed neural networks for robust equivalent damping parameter inversion and fault diagnosis in gas-insulated switchgear vibration systems[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 24521.

[107] MUFUTA M B J M, VAN DEN BULCK E. Modelling of the mass flow distribution around an array of rectangular blocks in-line arranged and simulating the cross-section of a winding disc-type transformer[J]. Applied Thermal Engineering, 2001, 21(7): 731-749.

[108] VERSTEEG H K, MALALASEKERA W. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method[M]. 2nd ed. Harlow, UK: Pearson Education India, 2007.

[109] XIA B, HONG S, CHOI K, et al. Optimal design of winding transposition of power transformer using adaptive co-kriging surrogate model[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(6): 7203904.

[110] GAO K, WANG S J, XU P, et al. Thermoelectric coupling simulation of high-voltage switchgear based on RBF surrogate model[C]//2023 IEEE 4th International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE). Shanghai, China: IEEE, 2023: 1-4.

[111] CHEN H H, HAN W X, ZHONG L L, et al. A surrogate model of thermal field simulation for switchgear cabinet based on proper orthogonal decomposition and deep learning[C]//Proceedings of the 1st Electrical Artificial Intelligence Conference, Volume 3. Nanjing, China: Springer, 2025: 271-279.

[112] CHEN Y F, YANG Q X, ZHANG C G, et al. Thermal network model of high-power dry-type transformer coupled with electromagnetic loss[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2022, 58(11): 8402105.

[113] 徐梦琦，蔡恬乐，马　柯，等. 功率半导体器件频域热流模型及特性[J]. 中国电机工程学报，2024，44(11)：4426-4434.
XU Mengqi, CAI Tianle, MA Ke, et al. Frequency-domain thermal modelling of heat flow for power semiconductor devices and its characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(11): 4426-4434.

[114] AMÉRICO J P, LEITE J V, MAZZOLA C F. Enhanced thermal modeling of three-phase dry-type transformers[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2024, 58: 104445.

[115] ZHANG C, DU B C, QIAO K, et al. In situ parameter identification method for thermal network models of power modules[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2025, 40(9): 13276-13288.

[116] VAN ERP R, SOLEIMANZADEH R, NELA L, et al. Co-designing electronics with microfluidics for more sustainable cooling[J]. Nature, 2020, 585(7824): 211-216.

[117] YIN P B, XU Z M, HU W, et al. Temperature homogenization technology of current carrying conductor in the valve side bushing of converter transformer based on the heat pipe theory[C]//2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). Beijing, China: IEEE, 2020: 1-4.

[118] 贾云飞，汲胜昌，李金忠，等. 变压器油中工频电弧特性及变压器防爆研究综述[J]. 中国电机工程学报，2024，44(7)：2910-2926.
JIA Yunfei, JI Shengchang, LI Jinzhong, et al. Overview on the characteristics of power frequency arc in transformer oil and transformer explosion protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(7): 2910-2926.

[119] 胡　琴，张　永，陈旭烨，等. OPGW 直流融冰温升特性及其影响因素[J]. 高电压技术，2025，51(5)：2363-2373.
HU Qin, ZHANG Yong, CHEN Xuye, et al. DC ice-melting temperature rise characteristics of OPGW and its influencing factors[J]. High

Voltage Engineering, 2025, 51(5): 2363-2373.

[120] 王同超. 基于电缆机电特征的高速列车车顶高压电缆寿命预测模型研究[D]. 大连：大连交通大学，2025.
WANG Tongchao. Research on life prediction model of high voltage cable on high speed train roof based on cable electromechanical characteristics[D]. Dalian, China: Dalian Jiaotong University, 2025.

[121] 刘潇镁，刘　英，李文清. 基于暂态电热场特性的高压直流电缆线路动态增容能力评估[J]. 高电压技术，2025，51(4)：1674-1683.
LIU Xiaomei, LIU Ying, LI Wenqing. Dynamic capacity expansion evaluation for HVDC cable lines based on transient electrical and thermal field characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(4): 1674-1683.

[122] LI L N, ZHU G J, WANG Z, et al. Topological design optimization approach for winding oil flow paths in oil-natural air-natural transformers based on a fluidic-thermal coupled model[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2023, 59(11): 8401405.

[123] WANG L J, LI X L, LIN J, et al. Studies of modeling and simulation method of temperature rise in medium-voltage switchgear and its optimum design[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2018, 8(3): 439-446.

[124] MU W, WANG B Y, WANG S H, et al. Directly integrated vapor chamber as an efficient heat spreader for high heat flux density SiC MOSFET dies in power modules[C]//2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Vancouver, Canada: IEEE, 2021: 5642-5649.

[125] ZHANG C, GE X L, LIN C X, et al. Optimization and analysis of thermal conductivity structure for IGBT module embedded with the vapor chamber[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2023, 13(6): 798-807.

[126] 韩雯雯，吴　健，刘长亮，等. 基于导热反问题的二维圆管内壁面第三类边界条件的反演[J]. 机械工程学报，2015，51(16)：171-176.
HAN Wenwen, WU Jian, LIU Changliang, et al. Inversion of the third boundary condition on the inner wall of a two-dimensional pipe based on inverse heat conduction problems[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(16): 171-176.

[127] 朱丽娜，王广军，陈　红. 采用共轭梯度法求解多变量稳态传热反问题[J]. 中国电机工程学报，2011，31(8)：58-61.
ZHU Lina, WANG Guangjun, CHEN Hong. Estimating steady multi-variables inverse heat conduction problem by using conjugate gradient method[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(8): 58-61.

[128] 张大千，王广军，陈　红，等. 随季节变化输电线路塔基传热反问题研究[J]. 工程热物理学报，2022，43(4)：878-882.
ZHANG Daqian, WANG Guangjun, CHEN Hong, et al. Inverse heat transfer problem of transmission line tower foundation under seasonal change[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2022, 43(4): 878-882.

[129] ZHANG L, LI R, LU Y F, et al. Inversion method for contact temperature of GIS disconnect switch[J]. IEEE Access, 2024, 12: 44553-44563.

[130] 赵　耀，刘　征，王志强，等. 基于POD热网络模型的SiC MOSFET浪涌安全工作区评估[J]. 中国电机工程学报，2025，45(15)：6080-6091.
ZHAO Yao, LIU Zheng, WANG Zhiqiang, et al. Evaluation of surge safe operating area for SiC MOSFETs based on POD thermal network model[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(15): 6080-6091.

[131] TANG P F, ZHANG Z H, TONG J, et al. Predicting transformer temperature field based on physics‐informed neural networks[J]. High Voltage, 2024, 9(4): 839-852.

[132] FANG Y Q, ZENG H, MALUTA N E, et al. Study on the melting characteristics of icing on overhead contact lines using high-power fiber laser[J]. Optics & Laser Technology, 2025, 191: 113297.

[133] 闫晨光，张保会，郝治国，等. 电力变压器油箱内部故障压力特征建模及仿真[J]. 中国电机工程学报，2014，34(1)：179-185.
YAN Chenguang, ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, et al. Modeling and simulation of pressure characteristics of power transformer tanks' internal faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 179-185.

[134] BRADY R, PERIGAUD G, MULLER S, et al. Application of a 3D computer simulation tool as a decision making tool for optimizing transformer protection[C]//2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Calgary, Canada: IEEE, 2009: 1-8.

[135] ENESCU D, COLELLA P, RUSSO A, et al. Concepts and methods to assess the dynamic thermal rating of underground power cables[J]. Energies, 2021, 14(9): 2591.

[136] DAMINOV I, RIGO-MARIANI R, CAIRE R, et al. Demand response coupled with dynamic thermal rating for increased transformer reserve and lifetime[J]. Energies, 2021, 14(5): 1378.

[137] SZCZEGIELNIAK T, KUSIAK D, JABŁOŃSKI P. Determination of the operating temperature of the gas-insulated transmission line[J]. Applied Sciences, 2020, 10(24): 8877.



张智昊
1995—，男，博士
主要从事电力装备故障诊断、电弧诱导的气液两相流动传热方面的研究工作
E-mail: zhangzh2017@sjtu.edu.cn.com

ZHANG Zhihao
Ph.D.



刘亚东(通信作者)
1982—，男，博士，研究员，博导
主要从事输配电设备故障检测与诊断方面的研究工作
E-mail: lyd@sjtu.edu.cn

LIU Yadong
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2025-08-02　修回日期　2025-12-16　　编辑　曾文君