第 49 卷 第 6 期：2348-2364 高电压技术 Vol.49, No.6: 2348-2364
2023 年 6 月 30 日 High Voltage Engineering June 30, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20231105

电力装备多物理场数值计算发展现状

杨　帆，郝翰学，王鹏博，姜　慧，夏依莎，罗　澳，廖瑞金
（输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学)，重庆 400044）

摘　要：随着我国加快构建新型电力系统、助力实现“碳达峰、碳中和”战略的实施，全行业对电网的数字化转型和安全运行提出了更高要求。基于多物理场仿真技术实现电力装备运行状态的实时监测和故障预警，提高电力装备的数字化程度，实现电网核心设备的数字化、智能化运维是当前电网安全运行亟待解决的关键问题。本文首先简要回顾数值计算的发展历程，包括数值计算方法、语言和工程领域发展应用情况；在电气工程领域，除了应用于传统电力系统分析和电机设计分析的数值计算，以多物理场耦合数值计算为核心的计算高电压学可为传统的高电压试验研究提供重要的补充和支撑，已成为电力装备的研究热点。然后针对变压器、电抗器、套管等典型电力装备运行中常见的热故障、绝缘故障和机械故障，整理分析了各类故障所涉及的工程背景、计算分析内容、多物理场耦合模型、计算关键问题和关键材料特性，并指出目前多物理场数值计算面临材料非线性、多场耦合准确性和快速计算方法等方面的难题。此外，汇总了包括典型商业软件和开源软件在内的电力装备多物理场仿真计算平台，进一步指出目前国内高压电力装备计算正面临软件卡脖子的严峻形势。最后，从高压电力装备中如放电等复杂的多物理场过程、新型电工材料研究、高性能计算方法和数字孪生应用的角度，提出电力装备多物理场数值仿真的研究思路和发展方向。

关键词：电力装备；多物理场模型；材料特性；数值求解算法；仿真计算平台

State of the Art of Multiphysics Simulation Technology for Power Equipment

YANG Fan, HAO Hanxue, WANG Pengbo, JIANG Hui, XIA Yisha, LUO Ao, LIAO Ruijin
(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment and System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract：As China accelerates the construction of a new power system, which helps realize the implementation of the “carbon peak, carbon neutral” strategy, the entire industry has put forward higher requirements for the digitalization and safe operation of the power grid. Based on multi-physics field simulation technology, realizing real-time status monitoring and fault warning of power equipment, improving the digitalization of power equipment, and realizing digital and intelligent operation and maintenance of core power equipment are key issues that need to be solved urgently for the safe operation of power grids. This paper first briefly reviews the development of numerical calculation, including numerical methods, programming languages, and the application in engineering. In the field of electrical engineering, in addition to numerical calculations applied to traditional power system analysis and motor design, the computational high voltage with multi-physics coupling calculation can provide important supplements and support for traditional experimental research, which becomes a research hotspot of power equipment. Then, for the thermal faults, insulation faults, and mechanical faults that are common in the operation of typical power equipment such as transformers, reactors, and bushings, the engineering background, calculation and analysis content, multi-physics coupling model, and key calculation problems, and key material properties are sorted out and analyzed. This paper also points out that the current multi-physics numerical calculations are facing difficulties in material nonlinearity, multi-field coupling accuracy, and fast calculation methods. In addition, the current multi-physics calculation platforms for power equipment, including typical commercial software and open source software, are summarized. This paper points out that the calculation of high-voltage power equipment in China is currently facing a severe situation of software bottlenecks. Finally, from the perspectives of more complex multi-physics processes such as discharge in high-voltage power equipment, new electrical materials, development of high-performance computing methods, and digital twin applications, the research ideas and directions for multi-physics simulation of power equipment are proposed.

Key words：power equipment; multi-physics model; material properties; numerical method; simulation platform

基金资助项目：国家重点研发计划 (2021YFB2401701)。
Project supported by National Key R&D Program of China (2021YFB2401701).

0　引言

20 世纪 40 年代后由于航空工业和计算机的发展，有限元、有限体积等数值计算理论被提出并快速完善。20 世纪 90 年代至今 ANSYS 等企业通过技术积累和兼并收购形成了一批成熟的商业软件并应用于航天、建筑和电气等各个行业。在电气领域，有限元法从 20 世纪 60 年代开始用于电力装备的电磁场计算[1]，随之电力行业的多物理场数值仿真理论体系逐步发展形成。

电力装备泛指电力系统发输变配用等各个环节中的高低压设备，包含发电机组、13 类输变电设施和配用电设备等[2]。电力装备在运行中受到电、磁、热、力及流体等多物理场的耦合作用，各物理场相互耦合、相互影响，使电力装备的物理机理更加复杂。电力装备的设计、制造和运维都离不开电磁、温度、流体、应力、绝缘等各种物理性能的考量。

根据全国电力可靠性年度报告[2]，2019—2021 年，变压器共发生非计划停运 279 次，其中由于产品质量不良和设备老化造成 220 kV 以上变压器非计划停运 128 次；断路器非计划停运 370 次，其中操作机构和灭弧部分是 220 kV 以上断路器故障的高发部件，近半故障源于产品质量不良。2021—2023 年，工业和信息化部等部委接连发布《环保装备制造业高质量发展行动计划》[3]等多个规划，强调关键基础软件补短板[4]，推广仿真模拟软件，提高企业数字化设计水平。

近年来，由于国外 CAE 软件的进入和垄断生态的形成，中国特高压工程和高端电力装备设计中广泛采用国外多物理场仿真软件，给国内高端电力装备发展带来严重安全问题。同时，国外软件的普及极大制约了国内电力行业数值计算理论的发展，尽管近年来仍有部分国内厂商和高校在寻求突破，但行业的发展仍旧滞后，面临严重的卡脖子问题。

为了明晰多物理场仿真技术的研究现状及发展趋势，本文对数值计算理论、电力装备多物理场及软件平台发展现状进行总结，并对未来电力装备多物理场计算发展的趋势进行了展望。

1　数值计算发展历程

1.1　数值计算基本方法和语言

1.1.1　数值计算基本方法

数值计算离散逼近的思想起源于 18 世纪欧拉差分格式的提出，经过不断发展，目前已形成众多数值计算方法，其中有限元法、有限体积法、有限差分法、边界元法在电力装备多物理场仿真计算已得到成熟广泛应用。图 1 为主流数值计算方法的发展历程。

有限元法是数值建模的重要范式，该方法起源于 20 世纪 40 年代初土木和航空工程中解决复杂弹性和结构问题的需要[5]。20 世纪 70 年代以来有限元方法已应用于求解各种工程问题并逐步衍生出流线迎风等多种有限元方法。同时期开发的网格生成技术现已成为各大软件建模功能中的重要一环。

20 世纪 50 年代提出的戈杜诺夫格式计算 1 维欧拉方程初见有限体积法思想，而后 FVM 被视为有限差分法的变种开始使用。保持求解问题中质量、动量、能量等物理量的局部守恒性是其最大特点[6]。FVM 方法由于其清晰的物理含义而成为 CFD 领域主要技术。近年将固体行为纳入流体流动模型开发出的 FSI 统一规范大大促进了 FVM 于结构力学的应用，相关商软如 FLUENT、CFX 等的流行也推动了相关研究的发展。而后 FVM 也被证明适用于流固问题及磁流体动力学等领域[7]。在非结构网格下如何提高阶次与精度[8]，以及稳定处理时间步进以及求解大型方程组等重要方面仍是 FVM 方法未来应用面临的问题[9]。

时域有限差分(finite difference-time domain，FDTD)方法作为有限差分法的重要分支之一，自 1966 年由 K. S. Yee 提出以来，首先应用于时域电磁场的计算，经过五十多年发展现在几乎可应用于所有电磁问题[10]，并衍生出如网络并行 FDTD 法，简化时域有限差分法(RFDTD)等改进算法[11]。

边界元法(boundary element method，BEM)的研究工作可追溯至 20 世纪 60 年代间接和直接边界元法的研究，涉及弹性动力学、位势波传播等领域的应用[12]。目前包括 COMSOL Multiphysics、ANSYS 等商业软件都已引入了边界元法，例如通过混合 FEM-BEM 法对结构–声问题进行计算[13]。

1.1.2　数值计算语言

数值计算采用计算机求数学问题的近似解，其通过编程语言来执行一系列的分步计算指令。编程语言经过数十年的发展，形成了诸如 Fortran、C/C++、MATLAB、Python、Julia 等众多语言体系。图 2 所示为目前数值计算语言的发展历程。

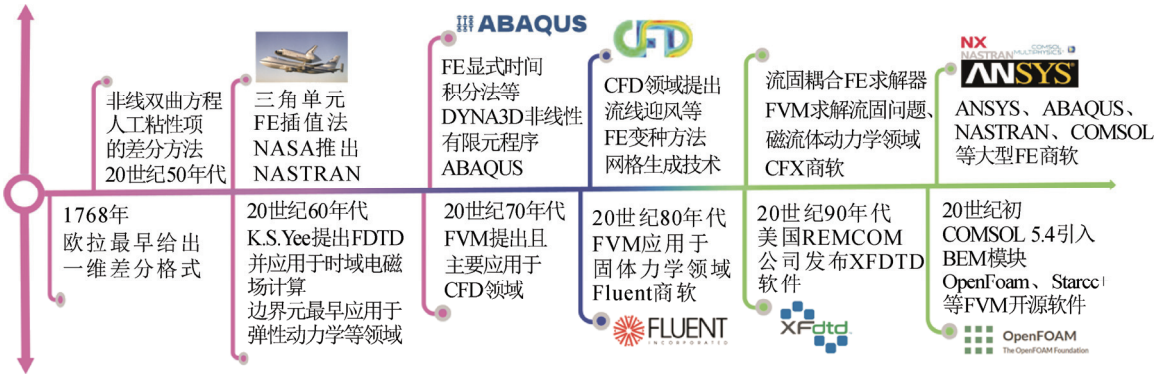


图 1 主流数值计算方法发展历程

Fig.1 Development of mainstream numerical computing methods

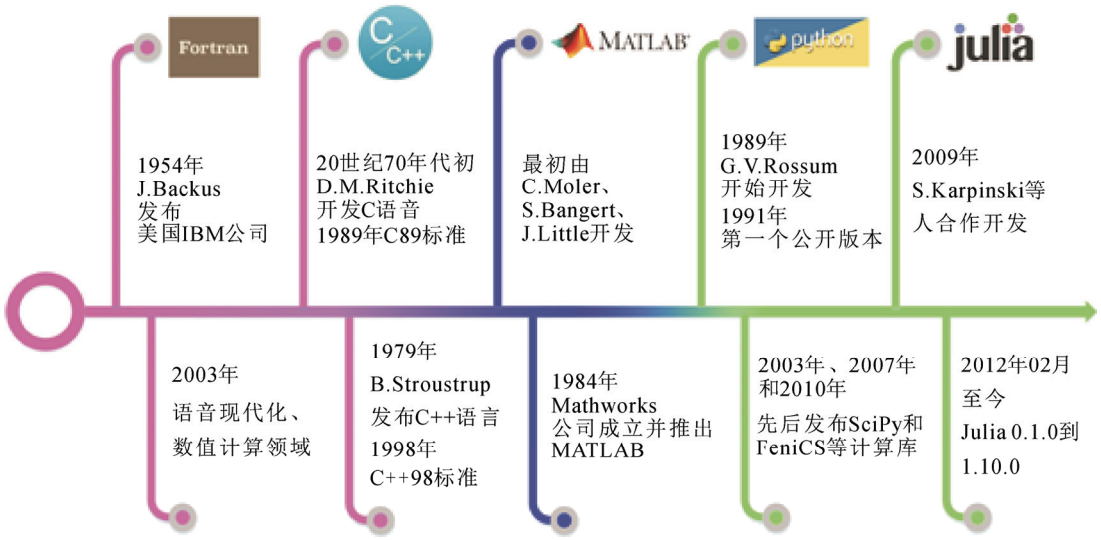


图 2 数值计算语言发展历程

Fig.2 Development of the programming language

最先用于数值计算的语言是 Fortran。Fortran 最大的特点是其程序接近数学公式的自然描述，在计算机里具有很高的执行效率，可以直接对矩阵和复数进行运算[14]。具有完整的面向对象机制、灵活的语法特征、统一的接口标准等。20 世纪 70 年代初，C/C++语言以其简洁、高效和可移植的特性，成为广泛应用的编程语言。C/C++语言具有强大的性能和庞大的开发社区。许多现代编程语言都借鉴了 C++的某些特性或语法。20 世纪 80 年代，MATLAB 在教学实践中提出并发展。MATLAB 语言是一个高级的基于矩阵/数组的语言，其有程序流控制、数据结构和面对对象编程等特色。得益于其简单易用的编程方式和实用的程序接口，现在已经集成了适用于多学科的模块工具箱。20 世纪 90 年代后 Python 和 Julia 等现代语言相继出现。Python 简单易用、可扩展性强、标准库和第三库众多，在数值计算和数据处理方面发挥着重要作用。Julia 是一个面向科学计算的高性能动态语言，其设计的独特之处包括具有参数多态性的类型系统和以多重分派为核心编程范式。Julia 语言已有的工具软件生态可以支持数据科学、机器学习和并行计算等实现。

1.2 工程领域数值计算发展及应用

1.2.1 工程领域数值计算应用学科分布

迄今为止，数值计算在工程领域的应用非常广泛。据不完全统计，目前已有 15 个一级学科下设的 40 个二级学科应用数值计算，如图 3 所示。尽管涉及数值计算的学科很多，但大多计算内容主要围绕力学、化学、材料和电磁场电路这几个方面展开，只是不同学科领域的应用背景和问题各有特点。

最早将数值计算应用到工程领域的一级学科是力学领域，常借助数值计算方法来研究工程实际中的应力、形变、物体运动等现象，在绝大多数工

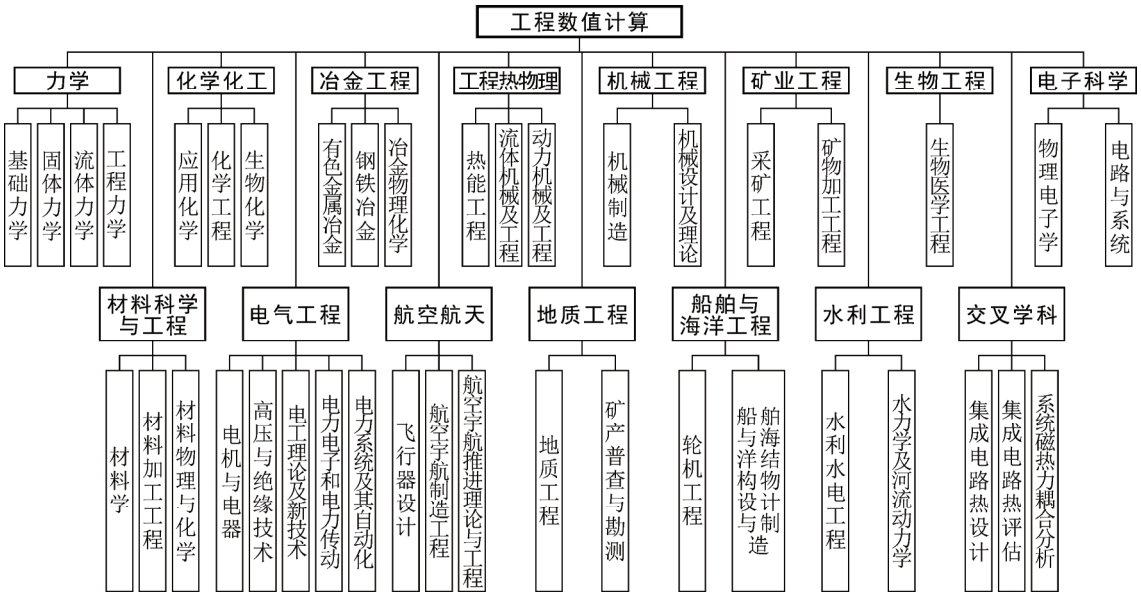


图 3　工程数值计算应用学科分布图

Fig.3　Engineering application of the numerical calculation in different subjects

科领域都存在类似的物理过程。航空宇航工程领域中，数值计算可模拟和预测飞行器的气动性能与风险、飞行器各部件结构响应，实现飞行器的动态控制和精确定位。动力工程和工程热物理领域常利用数值计算方法研究解决热能和动力相关问题，提高燃烧效率和供热效率[15]，还通过分析热力系统中的流体流动、传热和传质现象，为科学合理地制定动力系统运行策略提供依据[16]。

基于量子力学理论的化学领域数值计算起始于 20 世纪 20 年代，目前计算的规模已达到数十万原子计算模型。常用于石油工业、化学工程和冶金与材料制备工业等领域。常用的软件包括 Chem3D、Gaussian 和 Conformer 等。

数值计算在材料学的应用方向包括材料信息学、计算材料学等，主要通过建立数学模型和数值计算进行实际过程的模拟、通过理论模型和计算进行材料结构和性能的预测或设计[17]。涉及到的数值计算方法有经典分子动力学(molecular dynamics，MD)[18]、耦合宏观有限元、蒙特卡罗模拟、耗散粒子动力学模拟、相场动力学和元胞自动化方法、有限元和有限差分法等[19]。常用软件包括 JmatPro 和 Material Studio 等。

1.2.2　电气领域数值计算发展及应用

数值计算在电气工程领域的应用起步稍晚。20 世纪 60—70 年代，数值计算开始应用于电气工程领域，并逐渐应用于研究和评估电力装备与绝缘材料在电、磁、力、热等物理场作用下的运行状态[20]，电工装备、电工材料和器件的电磁特性和设备的电磁兼容研究。

电气领域多物理场耦合计算的研究开始于 21 世纪初，并在近年来得到了快速发展。在此之前，电磁场问题求解主要侧重于单一物理场(如电场、磁场)的数值求解[21-22]，多物理场间的相互作用和耦合效应并没有得到充分的考虑。然而，随着电力装备要求越来越高，需要更全面、更准确地考虑多个物理场之间的相互作用和影响，如电机电磁场和温度的耦合效应、变压器电磁–热–力等多物理场的复杂耦合效应等[23]。

通过多物理场耦合计算，可以更准确地预测电力装备的性能、实现优化设计、提高设备的可靠性和安全性。例如，在电机设计过程中，通过多物理场仿真可以优化空气隙长度、减小磁通波动等，从而提高电机效率；在变压器设计过程中，可以利用多物理场仿真优化绝缘相关设计参数，提高变压器的耐电压能力和绝缘性能[24]；在电缆设计过程中，可利用多物理场仿真优化电缆导体、绝缘材料等的设计参数，以提高电缆的传输能力和绝缘性能[25]。多物理场耦合计算已经成为电力装备设计中不可或缺的重要手段。

电气领域常用的计算软件包括：多物理场仿真软件 ANSYS、COMSOL 等；电力系统故障仿真软件 PSCAD；电力系统实时仿真软件 RTDS。电机仿

真设计软件 Simcenter Motorsolve。

国内外学者近年来的研究表明，利用 COMSOL、ANSYS 等有限元软件对高压电力装备进行多物理耦合场的数值仿真计算结果与实际测量结果具有一致性，验证了多物理耦合场数值仿真模型的正确性，在常见电力装备温升、绝缘性能分析方面具有较高的准确度，但是在电弧和动态过程等方面由于物理过程的复杂性，计算精度仍然有待提升。总之，多物理场耦合计算在电气工程领域的应用和发展前景广阔，对于工程实际中的各个环节具有实际应用价值，但尚存在许多困难需要解决。

2 电力装备多物理场计算发展现状

电力装备的数值计算涉及电、磁、热、力、流等多物理场之间的耦合。在实际工程问题中，需根据多物理场作用下的运行特性，考虑材料在多物理场作用下的非线性效应的影响，建立面向绝缘分析与校核等特定场景需求的装备多物理场精确模型。根据不同设备及其工程背景，其研究侧重点也各有不同。表 1 概括了几种典型电力装备多物理场计算中涉及的工程背景、分析内容、耦合模型、存在的关键问题以及关键材料参数。

表 1 典型电力装备多物理场问题

Table 1 Multiphysics problem of typical power equipment

设备	工程背景	分析内容	物理场模型	关键问题	关键材料参数
变压器	局部过热	漏磁损耗、温升计算	磁–热–流耦合(结构件、油箱)	材料磁性能的非线性，传热系数等效	硅钢片：B–P、B–H、B–λ、H–λ、$\sigma(E/T)$、α、c、ν_p、M、ρ； 碳钢：B–P、B–H、$h(T)$、$\sigma(E/T)$、α、c、ν_p、M、ρ； 绝缘油纸：$\sigma(E/T)$、$\varepsilon(E/T)$、α、c、ν_p、M、ρ； 绝缘油：$\sigma(E/T)$、$\varepsilon(E/T)$、α、c、ν_p、M、ρ、η(T)； 铜、铝：$\sigma(E/T)$、α、c、ν_p、M、ρ
			磁场–电路耦合		
			热–流耦合(绕组)	热路等效	
	短路冲击	绕组受力形变	磁–力耦合(绕组、铁芯)	形变累积效应、硅钢磁致伸缩特性表征	
	振动噪声	铁芯振动与噪声传播			
	绝缘校核	电场强度分析	电场(绕组、绝缘件)	液–固界面空间电荷的计算	
	特殊条件下的机械强度校核	地震、台风、放电条件下油箱等机械结构强度分析	应力场(地震和台风条件)	实验验证难	
			电–热–力耦合(油中放电)	放电模型建立	
电抗器	外绝缘校核	电场强度分析	电场(均压环)	空间电荷和粒子流影响	铝：$\sigma(E/T)$、α、c、ν_p、M、ρ； 环氧树脂：$\sigma(E/T)$、$\varepsilon(E/T)$、α、c、ν_p、M、ρ； 陶瓷：$\sigma(E/T)$、$\varepsilon(E/T)$、α、c、ν_p、M、ρ
	局部过热	交直流复合电流、谐波电流下的温升计算	电磁–热–流耦合(包封)	导电材料非线性、对流换热系数等效	
	应力校核	匝间受力分析	电磁–力耦合(包封)、应力场(包封、绝缘柱)	包封结构精细模型等效	
	结构抗震	地震影响下响应谱分析			
	振动噪声	振动与噪声传播	电磁–力–声耦合		
套管	局部过热	损耗计算、温升计算	磁–热耦合	涡流损耗、趋肤效应	铜、铝：$\sigma(E/T)$、α、c、ν_p、M、ρ； 陶瓷：$\sigma(E/T)$、$\varepsilon(E/T)$、α、c、ν_p、M、ρ； 绝缘油纸：$\sigma(E/T)$、$\varepsilon(E/T)$、α、c、ν_p、M、ρ
	绝缘校核	交直流、极性反转等工况下的电场分析	电场	精细化几何建模	
	结构抗震	结构地震响应分析	应力场	实验验证难	
盆式绝缘子	电场畸变	内部缺陷下电场强度分布	电场	空间电荷的影响	铜、铝：$\sigma(E/T)$、α、c、ν_p、M、ρ； 环氧树脂：$\sigma(E/T)$、$\varepsilon(E/T)$、α、c、ν_p、M、ρ
	沿面闪络	沿面放电发展过程	电场–流体–物理化学过程耦合	微观粒子运动、物理化学过程	
	连接件异常发热	温度分布	温度场	热源等效	
	连接件机械性能校核	接触面应力	应力场	接触面的几何等效	
	结构缺陷导致的受力问题	静力分析		热–力耦合影响	
GIS	颗粒缺陷导致的绝缘问题	局部放电	电场–流体–物理化学过程耦合	微观粒子运动、物理化学过程	铜、铝：$\sigma(E/T)$、α、c、ν_p、M、ρ
	局部过热	温度分布	电磁–热–流耦合(断路器、隔离开关、母线)	材料非线性、热源等效	

注：B–P 为铁损曲线；B–H 为磁滞曲线；B 为磁通密度；P 为磁通密度；H 为磁场强度；λ 为磁致伸缩系数；σ 为电导率；E 为电场强度；h 为导热系数；α 为热膨胀系数；c 为比热容；ν_p 为泊松比；M 为杨氏模量；ρ 为密度；η 为黏度；T 为温度；ε 为介电常数。

2.1　多物理场耦合模型

变压器、套管、电抗器和气体绝缘开关设备等典型电力装备从材料改进、结构优化、产品设计至运行状态和故障分析的全寿命过程都离不开基于多物理场耦合模型的数值仿真计算。电力装备中复杂的多物理场耦合关系可总结为图 4 所示。在电力装备全生命周期的分析中，主要关注的问题可以分为热问题、绝缘问题、机械和振动噪声问题，本节根据这上述几种问题类别对多物理场耦合模型的研究现状分别展开论述。

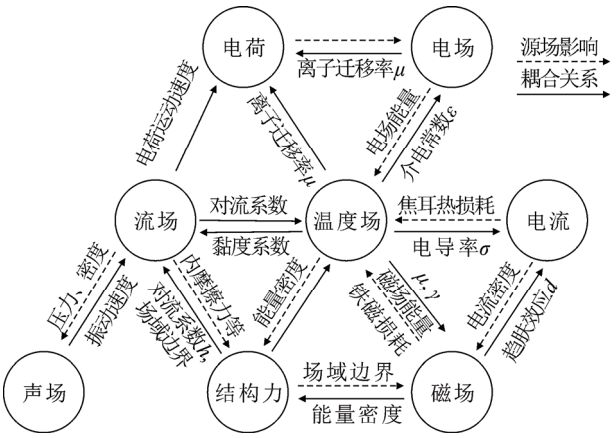


图 4　电力装备物理场间耦合关系

Fig.4　Coupling relationships between the physical fields in power equipment

2.1.1　绝缘问题的多物理场耦合模型

电力装备中绝缘结构的使用寿命是影响设备安全运行的重要因素。针对绝缘问题的多物理场研究主要包括材料非线性的影响、电场和温度场的相互作用、不同工况的影响、分层介质导致的多尺度问题、液固界面间的微观运动过程等。但如何将物理变化过程等效为相应仿真模型，仍是绝缘问题多物理场耦合模型的关键所在。

例如，换流变压器内部温度分布不均匀[26]会导致油纸绝缘的材料参数非线性分布，相关学者对该条件下的绝缘性能开展仿真分析，更准确地评估换流变真实运行条件下的绝缘状态并优化阀侧绝缘设计；为减少气泡引起的局部放电，利用数值模拟分析气泡在极不均匀交流电场等不同场强下的迁移路径、速率、畸变程度等特征[27]；在油浸纸板内部水分分布的仿真研究中，构建了复合电场–温度场下的单、双侧水分暂态扩散模型，修正油纸界面处水分的平衡条件，可分析不同因素对油浸纸板内部水分暂态分布的影响[28-29]；在分子层面，基于反应分子动力学对三元混合绝缘油中不同物质成分的单分子、多分子和混合油体系的热裂解动力学过程进行仿真模拟[30]，研究分析了矿物油、天然酯和改性天然酯中不同类型油品分子的热裂解路径及产气行为，以及三元混合绝缘油的热裂解产气特性；为了对变压器绝缘中可能的空隙形状进行全面比较研究，相关学者基于等离子体动力学模型[31]，使用具有单个可调电子产生速率自由参数的修正漂移扩散模型，并考虑了二次电离过程。

针对高压直流干式套管芯子内外较大温度梯度致使电场发生翻转的现象，相关学者利用多物理场耦合软件对温度场电场分布进行求解，并基于仿真结果提出电容芯子的优化设计方案[32]，通过降低最外层极板处的绝缘结构设计场强，降低温度梯度下最外层极板处的电场强度；在微观层面，相关学者综合考虑环氧浸渍纸复合材料低频极化、环氧/浸渍纸界面极化、载流子弥散等低频介电弛豫过程，研究低频介电弛豫对特高压直流干式套管电场分布的影响；进一步考虑空间电荷后不同类型电压下套管的电场分布以及金属颗粒对局部电场的影响[33]，对改善设备绝缘性能、保障设备安全运行具有重要意义。

为研究电抗器匝间绝缘机理，相关团队通过热应力耦合场仿真分析得到干式空心电抗器轴向温度场分布不均，且与运行电压有关，尤其是在环境温度较高或较低时，轴向温度场极不平衡产生的热应力是造成干式空心电抗器局部匝间绝缘破损的根本内在动力；根据初步结构设计，通过真型产品的 50%操作冲击放电特性试验和 3 维电场仿真理论计算，得到了 PLC 电抗器表面临界击穿场强值和均压屏蔽装置表面场强畸变相对严重的部位，从均压环外径、管径等方面进行研究和优化[34]；通过电场仿真研究热老化对电抗器匝间绝缘材料空间电荷和工频击穿场强的影响[35]，得出干式空心电抗器匝间绝缘容易发生击穿事故的原因；采用磁场–电路耦合的有限元分析方法，对空心电抗器稳态运行下的电动力进行仿真分析，得到稳态过程和投切暂态过程下电动力的分布特点，在此基础上研究绝缘厚度与约束投切过程中产生径向电动力的关系，为空心电抗器的制造设计和可靠平稳运行提供重要参考[36]。

2.1.2　热问题的多物理场耦合模型

温度对绝缘材料的各种性能有很大影响，包括电气性能、机械强度、硬度、粘度、弹性、力及化

学反应速率等，同时温度场也会与电场、磁场、力场等物理场相互作用，加速设备材料老化和减弱设备绝缘能力。采用数值计算和实验结合的方法分析高压设备的温度场是电力装备多物理场数值计算的重要内容之一。

相关研究表明，考虑磁性材料的温度效应[37]，采用双向耦合可以克服传统磁路法变压器损耗计算不准确的问题；考虑换流器触发角的变化，给出换流变压器直流偏磁状态下油箱涡流损耗的计算公式[38-39]，有助于多物理场仿真的精确度提升；绝缘油温度的变化对变压器内部温度的影响不可忽视，国内相关高校结合自然对流的物理原理，研究绕组散热量与绕组温度、绝缘油温度之间的关系，建立其动态热模型[40]，提出新的内部油道温度计算方法；有学者进一步研究了不同短路与接地故障对变压器多次冲击后绕组温度分布的变化规律[41]；针对谐波电流引起的换流变压器绕组局部过热、绝缘老化加速的问题[42]，研究人员对现有绕组温度计算模型进行了改进，并采用电磁–热–流多物理场耦合的方法定量分析了谐波电流对绕组损耗和温度分布的影响规律。目前变压器温度场主要研究绝缘热点，如绕组热点、出线装置温度场，而在涉及大型变压器温度场计算时，模型建立和损耗计算是制约变压器温度场计算准确度的关键，尤其变压器内部结构复杂，难以采用精细化模型准确表征其温度传导过程。

套管的温度场仿真计算中，有学者通过仿真获得套管温度场分布，实现时变温度曲线校正[43]，有助于电力装备绝缘状态的精确评估；综合考虑涡流效应、集肤效应、重力作用、热对流、热辐射等因素，研究充气式套管温升特性[44]，为大容量高压 SF_6 充气套管的设计工作提供理论借鉴；考虑等温和温度梯度影响，计算不同极性反转时间下直流干式套管内部电场分布，可以为套管绝缘的优化提供参考；计算换流变压器阀侧套管的电热场分布特性及温度场对电场分布的影响规律[45]。通过结构优化，基于纳米填充和物理共混的材料改性方法可以改善套管温度场分布。

在电抗器多物理场研究中，一些团队根据等高等热流的空心电抗器设计参数，建立 3 维流场–温度场耦合仿真模型[46]，研究电抗器的温度场和流场分布特点，可以为电抗器的优化设计提供重要指导意义；采用理论分析、仿真计算与实验验证相结合的方法，研究大容量叠装空心电抗器线圈本体发热以及漏磁导致的金属辅件发热问题，为大容量叠装电抗器的温升设计提供借鉴[47]；基于温度场仿真可以开展对干式空心电抗器匝间绝缘破损的机理研究；进一步对桥臂电抗器异常温升的影响机理[48]进行研究，并提出桥臂电抗器异常温升的控制策略；考虑空气流速影响，基于流体–热力学耦合研究防雨降噪装置对电抗器的散热效果[49]，为干式平波电抗器温度场分布研究以及优化设计提供参考。

2.1.3 机械和振动噪声问题的多物理场耦合模型

力场计算主要应用于研究变压器、套管、电抗器、绝缘子及高压断路器等设备运行时的力场分布情况，并根据对各设备应力分布的数值计算结果评估设备的实际运行状态，为设备的优化设计、状态监测及故障诊断提供了理论依据。

一些学者采用电磁–力耦合的方法研究了单次短路冲击下绕组所受应力、形变的分布及绕组耐受短路冲击的情况，同时研究了多次短路冲击下绕组形变规律[50]，并采用 B–R 准则判断多次短路冲击后绕组及其支撑结构的稳定性，可为电力变压器机械强度的校验以及运维检修提供有力的参考；相关学者认为绕组振动数学模型有待完善，已有的大多文献认为绕组固定不动，这与实际情况不符，应充分考虑绕组振动与磁场之间的耦合效应；通过有限元软件对铁芯模型进行电磁–力多物理场仿真，分析变压器铁芯表面的振动加速度分布，选择最优铁芯振动测量点位置，为获得更高质量的振动加速度数据和铁芯的状态识别提供了依据；基于电磁–力耦合仿真得到故障情况下绕组受力情况及易变形部位[51]，为变压器抗短路能力提升应用及其匝间短路故障在线检测和保护技术研究提供理论依据。

由于特高压直流穿墙套管结构细长、在地震中极易受损，国内团队对其内部支柱绝缘子的受力情况进行仿真研究[52]，并对比了新型陶瓷材料与环氧材料的受力分布特性；针对套管的具体结构件，相关团队对法兰应力分布进行仿真分析，研究了不同根部结构下法兰应力集中特征，并采用模态分析和响应谱分析研究振动载荷下法兰应力分布[53]，为确定结构疲劳开裂的主要因素提供参考依据；此外为研究 550 kV 油纸电容式套管的抗震性能，可以利用静力及反应谱分析对套管进行抗震强度计算[54]。

对带气隙结构的并联电抗器铁芯考虑动静态力共同作用下的电磁场–机械场双向耦合模型[55]，为进一步分析电抗器振动问题提供理论支持和分析

方法；为了更加准确地建立铁芯电抗器振动仿真模型，基于经典 Jiles-Atherton(J-A)磁滞模型和二次畴转模型建立磁致伸缩模型[56]，采用算法优化铁芯材料磁致伸缩模型；为综合考虑隔音装置对噪音和温升的影响，构建 3 维电磁–力–声耦合和热–流耦合模型，在此基础上可以实现降噪装置结构参数的优化；利用响应谱分析研究电抗器的基本动力特性，并进行电抗器的抗震性能分析，可以为支撑结构的抗震设计提供参考。

2.2　多物理场计算中的材料模型

材料特性参数是多物理场耦合模型必不可少的条件之一。针对变压器、电抗器、套管和盆式绝缘子等电力装备及部件，目前仿真研究主要考虑硅钢片、碳钢、绝缘纸、绝缘油、反磁材料(铜)、铝、环氧树脂、陶瓷材料等参数特性，总体概括为铁磁、绝缘、导电 3 类材料，以下具体描述这 3 类材料在典型电力装备多物理场计算研究中的热点问题。

2.2.1　铁磁材料模型

广泛应用于电力装备的铁磁材料具有显著的非线性和磁滞特性，需在多物理场模拟时加以考虑。为此，学者们逐渐建立了各种铁磁材料磁滞模型，主要分为唯象模型和物理模型两大类。

唯象模型是基于实验现象建立铁磁材料的磁滞物理规律，其中算子磁滞模型将磁滞回线的非线性特征视为多算子的积分求和，主要包括 Preisach 模型[57-58]和 Pradtl-Ishlinskii 模型[59]。Preisach 模型可以较好地描述实际材料的磁滞特性和非线性特征，但其参数辨识复杂、需要大量实验数据。针对该问题，Dlala[60]用极限磁滞回线下降支来模拟磁滞特性，降低了 Preisach 模型在实现过程中对实验数据量的要求。黄雷等[61]兼顾磁滞特性和数值分析效率，采用 cosh 分布函数，并引入 Everett 函数，建立了解析形式的磁滞模型。

相比唯象模型，物理磁滞模型以其清晰的物理基础、高精确性和可靠性的特点，为研究人员提供了深入理解和模拟铁磁材料磁滞行为的工具，如 J-A 模型[62-64]和 Energetic 模型[65]等。J-A 模型基于磁性材料微观磁化理论建立，而 Energetic 磁滞模型基于能量最小化原理，通过统计磁畴分布而得到，但由于涉及大量参数的求解，难以应用于实时动态分析。

铁磁材料在实际工作环境中会遭受极端应力、温度等复杂激励，建立适用于不同激励条件下软磁材料的磁滞模拟和损耗分析的相关模型和方法尚需进一步研究，从而为电力装备性能的评估和优化等奠定基础。

2.2.2　绝缘材料模型

绝缘材料在电力装备中起着至关重要的作用，缺乏绝缘性能研究的电力装备多物理场计算是不完整的，依赖经验及试验数据的绝缘设计将会制约电力装备仿真设计与产品制造，进而影响实际设备的安全运行。

固体绝缘材料模型研究方面，通过研究绝缘材料性能参数对变压器温升、应力和形变的影响，可以求解响应面模型获得理想的绝缘材料性能参数范围，以确定优化配合方案[66]；文献[67]针对浸渍环氧树脂的玻璃纤维传热特性的研究，得到不同传热方式下的传热参数，代入电抗器包封结构建立的传热模型中，可以为干式空心电抗器温升的准确预测提供参考。

液体和气体绝缘材料方面，相关研究团队根据实验测得的迁移率、电离特性等参数，构建 3 维结构的仿真模型，对换流变压器出线装置均压球附近油纸绝缘中的空间电荷与电场分布进行研究，可为出线装置的绝缘设计提供参考[68]；文献[69]采用有限元方法模拟套管内绝缘气体 SF_6 的热流体耦合场，可以分析热流体场对绝缘体电场分布和金属颗粒运动特性的影响，为研究 SF_6 绝缘装置中温度梯度或微小金属颗粒运动等问题提供参考。

2.2.3　导电材料模型

导电材料在电力传输、信息传递以及从电到磁和从光到热的能量转换中发挥至关重要的作用。电力装备的安全稳定运行对导电材料提出了高电导率、高机械强度、轻质、抗拉、低弧垂、耐高温、耐烧蚀、耐腐蚀、耐磨损等共性需求。铜是电力装备中比较常用的传统导电材料，具有良好的导电性能和机械性能，电导率仅次于银，且不易氧化，对湿度和腐蚀有较强的抗性。而常被用于制作高压输电线的铝，导电性能次于铜但具有更低的密度。除了这些传统导电材料，超导材料、碳纤维复合芯和电接触材料等新型导电材料愈发受到广泛关注。

在多物理场环境下，导电材料的特性会有所变化。一般来说，导电材料的电阻随着温度升高而增大，温度变化可能会影响设备的性能。某些导电材料(如一些半导体材料)的导电性能还会受到压力的影响。此外，导电材料在磁场中的运动会产生洛伦

兹力，这可能会影响设备的运行。同时，改变磁场可能会导致材料的导电性能发生改变。因此，多物理场环境下导电材料特性规律对电力装备的设计运维都是十分重要的。

现有研究成果中，针对导体接触处的热电过程，已有团队建立了导体接触处的分析模型，通过将固体结构、电和热联合耦合求解，计算了不同压力条件下接触斑点的大小及其相应接触电阻的大小，并且考虑了接触电阻的大小随温度的变化[70]。另外，还有文献提出了一种基于 Allen-Bradley 140M-C2EC25 断路器的仿真模型，将断路器中的这些金属导电部分赋予了与温度有关的导热系数和电阻率[71]。对于断路器温度仿真模型不仅要包括导电部分，而且还要包括不导电的塑料部分。因此其对断路器操作机构部件热导率进行质量平均，获得了其等效热导率[72]。

当前我国的高端导电材料供不应求，而低端产品产能过剩，材料的特性与电力装备的稳定运行和服役寿命紧密相关，后续研究需着重研究加工工艺、组织演变、多物理场影响以及极端条件下的材料演变模型。

2.3 电力装备多物理场仿真计算平台

2.3.1 国外典型商用软件平台

1963 年，首个商业有限元软件公司 MSC 诞生于 NASA，60 年间各软件公司不断发展，相互收购，最终形成巨头垄断局面。目前商用软件平台主要公司有美国的 ANSYS、Altair，德国的 Siemens，法国的 Dassault Systemes，以及瑞典的 COMSOL。

1）ANSYS 公司

1969 年，J. Swanson 离开西屋电气创建 SASI 公司，来年开发出 ANSYS 软件。以非线性有限元分析程序起家的 ANSYS 公司依托资本不断并购多家 CAE 领域的企业。目前已经形成了如图 5 所示的庞大软件体系。从 ANSYS 公司的整个并购史可看出工程数值计算中主要研究对象的演变轨迹：从结构分析到环境分析，从机械结构到电子结构，从部件涉及到系统设计等等。

2）Dassault Systemes 公司

达索公司作为全世界工业软件巨头，尤其在工业软件研发设计领域位居前列。经过不断收购各大软件平台，形成了图 6 所示主要软件体系。达索目前自我定位为“3D Experience 公司”，其产品几乎涵盖各大行业的设计模拟等需求，著名的 CATIA、



图 5 ANSYS 公司的主要软件体系

Fig.5 The main software system of ANSYS

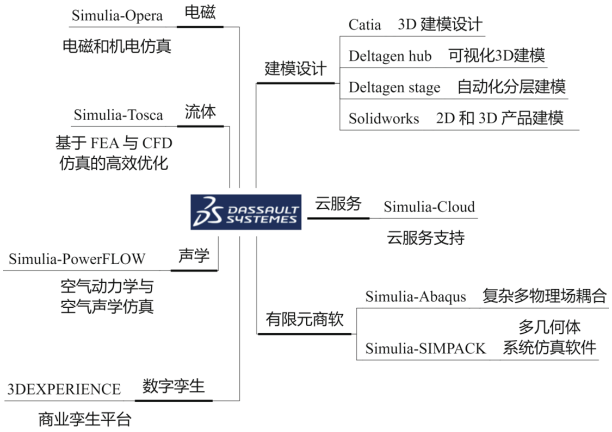


图 6 Dassult Systemes 公司的主要软件体系

Fig.6 The main software system of Dassult Systemes

SolidWorks 等产品出自达索。达索在仿真领域的贡献离不开强大的 SIMULIA 应用程序，旗下包括：Abaqus、PowerFLOW、Oprea 等强大产品。

3）Altair 公司

相较于其他主流公司，Altair 涉足数值计算软件开发的年份较迟，在 20 世纪末以研发求解器为主流的时期，Altair 另辟蹊径通过前处理工具软件 HyperMesh 弥补了当下网格剖分工具的空白，在数值计算领域迅速占据一席之地。发展至今 Altair 已能为工业界提供一系列多物理场仿真软件，涉及结构、流体、传热、电磁学等，为多个学科提供性能优化、数据分析和高保真可视化渲染。其主要软件产品有 Hyperworks、Flux、OptiStruct 等。

4）Siemens 公司

Siemens 是一家专注于工业、基础设施、交通

和医疗领域的科技公司。公司凭借深厚的硬件背景以及同样的大公司并购手段使其占据有限元仿真软件的重要地位。Siemens 通过收购整合形成了仿真平台 Simcenter，核心产品包括 Amesim、Simcenter 3D、STAR-CCM+、FloTherm 等。其中 Simcenter MagNet 等软件在国内外变压器、电抗器等设备厂家中使用广泛。

5）COMSOL 公司

COMSOL 于 1986 年在瑞典成立。最初发布的是名为 PDE Toolbox 1.0 的一个 MATLAB 结构分析工具箱，后于 1998 年更名为 FEMLAB。FEMLAB 时期发布了结构力学模块、电磁学模块与传热模块等。FEMLAB 最后于 2005 年更名为 COMSOL Multiphysics。随着 2010 年发布 4.0 版本，COSMOL Multiphysics 凭借高效的计算性能及多场双向耦合能力直接计算 PDE，同时具备相对完善的前后处理功能，使其迅速崛起，在 CAE 领域可谓独树一帜。2014 年发布的 5.0 版本中包含“App 开发器”，同年还发布了 COMSOL Server，2018 年发布 COMSOL Compiler。COMSOL Multiphysics 凭借其易于掌学习掌握、强大的多物理场仿真功能和二次开发能力等特点，被各高校和科研机构广泛使用。

2.3.2　国内软件平台

国内的科研单位和企业经过多年的发展积累，已经形成了一批各有特色的多物理场仿真软件。北京云道智造科技有限公司基于“仿真平台+仿真 APP”模式开发推出多物理场仿真平台 Simdroid，具备自主可控的结构、电磁、流体与热四大物理场求解器与多物理场仿真内核，同样提供前、后处理等工具，目前已更新至 V4.0 版本。2018 年成立的重庆励颐拓软件有限公司推出 LiToProducts，其产品统一到 LiToDesk 平台框架下，其中 LiToSim 为一款国产自主可控的通用有限元求解器，能求解复杂固体力学问题及非线性问题模拟。电磁及多物理场耦合分析软件平台 EMPbridge 由中国科学院电工研究所研发并于 2021 年发布 1.0 版本，基于数十年建模仿真算法的研究成果与开发经验目前已具有完全自主可控的底层代码，涵盖前处理、场求解器及后处理等的全流程分析。2009 年成立的英特工程仿真技术(大连)有限公司目前已为国内 CAE 软件研发的重要企业，其推出的多物理场仿真及优化平台 INTESIM-MultiSim 面向工程中对单场及多场耦合仿真的实际需求提供核心求解器解决方案。广州中望龙腾软件公司在CAD软件方面积累深厚，在CAE领域也相继推出了结构、电磁仿真和网格剖分软件，逐步完善 CAx 产品生态。

2.3.3　其他软件平台

商用软件平台提供了成熟的求解器和标准化的建模流程。但由于源代码不开放等问题使得软件在极大地方便用户采用成熟软件平台进行复杂问题建模仿真的同时，也限制了二次开发的可行性。当用户遇到软件不能解决的问题时，无法通过更新算法解决新问题。此类问题广泛存在于科学研究和产品研发过程中。因此在众多科研机构的共同努力下，诞生了众多不同类型的数值计算平台，表 2 中给出了部分具有代表性的平台。在这些数值计算平台中，属开源软件平台影响最大。开源软件平台的源代码对外开放，因此研究人员可以在此基础上展开各种问题的仿真分析和算法的二次开发。为使这类可支持二次开发计算平台更具通用性，平台应具备以下特点：支持通用网格文件；接口封装不易过高；可扩展性强，如具备单独材料接口便于自定义材料；提供丰富的说明文档和案例等。

3　电力装备多物理场计算发展展望

3.1　复杂耦合场建模计算

总的来说，现有典型电力装备的多物理场仿真研究涉及的对象和物理场仍相对简单，可以解决电力装备设计运维中的多数问题。然而，由于现今国内电力系统中电压等级的不断提高以及电网数字化、透明化的发展趋势，一方面对电力装备的结构设计、材料选取提出更高要求，另一方面对电力装备中复杂耦合场的建模计算也提出迫切需求，如高压、特高压电力装备中更容易发生的放电问题、电机运行状态下的旋转动态场计算问题等。

放电是电力装备的一个典型现象，电力装备中关键部位的放电严重影响其绝缘性能，而放电过程具有多时空尺度、多粒子碰撞、多物理场耦合等复杂特点，因此早期的放电研究以试验为主，研究内容包括放电的参数测量与分析、放电的信号检测、定位和绝缘裕度评估等[84]。然而，试验研究已无法满足现今电网数字化的需求，电力装备中不同场景和条件下的放电仿真已成为复杂多物理场耦合计算的热点和难点之一。

针对电力装备中的放电仿真，目前主要存在如下问题：

表 2 部分数值计算平台

Table 2 Part of the numerical calculation platform

程序平台	类型	支持方法	特点
FEniCSx[73]	开源	FEM	针对偏微分方程求解，可求解流体、结构、电磁等问题。高度抽象，可将弱形式翻译成有限元代码。可以实现自适应网格和高性能计算
OOFEM[74]	开源	FEM	可以对结构静力、动力、热传导、热力耦合问题以及流体力学的线性和非线性问题进行计算。模块化可扩展，支持并行计算，但无前后处理程序
Code_aster[75]	开源	FEM	通用结构与热力耦合仿真平台，处理非线性功能强大
OpenFoam[76]	开源	FVM	主要研究 CFD，目前拓展至固体力学(包括流固耦合、非线性结构分析)
FreeFem++[77]	开源	FEM	集成网格生成器、线性方程组的求解器、后处理及计算结果可视化于一体。具有网格自适应和移动网格生成的功能
Elmer[78]	开源	FEM	内置流体力学、结构力学、电磁学、热传导等多个模块，可处理多物理场仿真
SU2[79]	开源	FVM	具有可压缩和不可压缩流体的 Euler、NS 和 RANS 求解器。支持 OpenMP 与 MPI 并行计算，同时具备了网格自适应功能
Code_Saturne[80]	开源	FVM	适于流体湍流、传质传热等通用 CFD 软件，具备二次开发接口与并行计算能力，支持于超算平台处理大规模计算问题
MFEM[81]	开源	FEM	可扩展的 FEM 的 C++库，具任意高阶有限单元网格与多种有限单元离散方法，支持扩展至 GPU 加速进行超算计算
dealii[82]	开源	FEM	具有多种单元类型和自适应网格功能，与其他库有良好接口，文档和范例齐全
CEMLAB[83]	非开源	FEM、FVM、FDM	模块化结构，可以支撑电磁、温度、应力等物理场求解。由中国武汉大学开发，不对外开放

① 由于科学技术手段及应用数学方法的限制，变压器油绝缘失效的详细微观机制尚不清晰，进而无法准确表征含气泡变压器油的放电演变特性[85]；

② 局放机理的讨论需建立在微观电荷分布规律的基础上，油纸绝缘电场分布与电荷分布特性需进一步深入研究；

③ 进一步认识短空气间隙流注放电的物理过程，对于完善间隙放电的微观机理十分必要[86]；

④ 设备内部不同类型放电的多场耦合模型建立及其可靠性验证，目前仍没有普遍认可的方法。

3.2 新型电工材料的特性研究和建模

电力装备需要在高压、高温、强电磁力载荷等复杂条件下稳定工作，所以材料性能直接决定了电力装备的性能。电力装备中的新材料研究正在蓬勃发展。例如，超导材料在低温下可以无电阻传导电流，传统的超导材料需要在极低的温度下才能工作，对实际应用造成了极大困难，而诸如铜氧化物和铁基材料等高温超导材料可以在相对较高的温度下实现超导[87]，大大提高了其在电力装备中的应用潜力；氮化镓(GaN)和碳化硅(SiC)等宽禁带半导体材料具有耐高温、高频、高压等优点，可以应用于电力转换和控制设备[88]；热电材料可以将废热转换为电能，大大提高了电力装备的能源效率，其中一些热电材料如铋碲合金、硅锗合金等已经得到商业应用，而新型的热电材料如有机热电材料、复合热电材料等也在不断研发中；一些非晶合金用作变压器等装备的铁芯可以有效降低损耗，但非晶合金的材料性能同样会由于转变温度导致的晶化存在非常强的非线性[89]；绝缘材料方面，通过在传统绝缘材料中掺杂修复剂可制成靶向自恢复材料[90]，这类材料的绝缘性能已经具有一定“智能化”特征。此外，还有诸多新型有机、无机高性能绝缘材料也在不断研究中。

总的来说，近些年新型电工材料的研究成果斐然，很多新型材料可以很好地解决目前电力装备安全稳定运行中遇到的部分难题，在未来新型电力系统中有非常广泛的应用前景。与此同时，由于材料特性的强非线性，未来这些新型电工材料的大规模应用势必会对电力装备的多物理场仿真带来严峻挑战。例如，超导材料在临界温度、临界磁场以上失超的现象造成超导材料导电参数的强非线性特性，而非晶材料、智能材料等材料特性参数在多物理场条件下的变化规律目前尚不明确。因此，从多物理场仿真计算的角度来说，面对不断涌现众多新型材

料，如何展开特性研究并建立材料模型，是需要深入思考的问题。

3.3　高性能计算方法

3.3.1　云计算与模型降阶

数值计算方法发展至今，已基本能解决常规工程问题。而多尺度复杂问题中巨大的计算量对问题的求解提出了挑战，同时伴随数字孪生技术在新型电力系统数字化建设中的应用，对数值仿真的实时性提出了更高要求。云计算中，云端依托的大型超算可以提供远超以往单台计算机或小型计算集群所能提供的算力，云计算成为解决计算速度的一个潜在方案，而仿真软件云端化也成为必然趋势。但数据安全将是未来云计算发展必须解决的问题。

除算力的增长，仿真模型的降阶也可以降低计算量，提高计算效率。目前常见的模型降阶方法有本征正交分解法、平衡截断降阶方法、径向基函数法、响应面法等。目前电力装备数值仿真的模型降阶研究才刚起步，亟需针对电力装备数值仿真的特点进行模型降阶的应用和算法研究。

3.3.2　结合人工智能的计算方法

随着人工智能方法在各领域中展现出巨大的应用前景，数值计算方法也已逐步与各种形式的人工智能方法结合以支撑解决大数据背景下的科学问题。自动微分技术的出现为基于人工智能的偏微分方程求解奠定了基础。结合人工智能的计算方法本质是通过深度学习神经网络表征偏微分方程，当前研究主要集中在 2 个场景：构建未知偏微分方程和求解已知偏微分方程[91]。针对构建未知偏微分方程，深度学习方法采用可学习的卷积近似微分算子或近似演化算子从根本上提高从噪声数据中识别动力学的能力，从而降低对偏微分方程先验知识的要求。针对已知偏微分方程求解主要有 3 个研究方向：基于数据驱动、基于物理驱动和基于物理约束，其技术核心在与神经网络框架构建与损失函数的构造。结合人工智能的数值计算方法需要将深度学习原理、数值模拟理论、偏微分方程数学本质、偏微分方程物理意义和工程背景有机融合。

3.4　数字孪生技术

伴随着新型电力系统的数字化进程，对电力装备某一阶段的多物理场仿真已经不再满足需求，而是需要采用数字孪生技术对电力装备的全生命周期进行监测。针对数字孪生技术，首先电力装备通常由许多子系统和组件组成，这些子系统和组件以各种方式相互作用，然而目前关于电力装备多物理场的数字孪生建模普遍停留在组件的精细化建模方面，未对组件及子系统之间的相互作用予以考虑。因此基于面向对象的、多领域统计的建模原则对电力装备的电气模型、机械模型进行多领域的耦合建模是当下的研究热点之一[92]。在面向对象的电力装备多物理场数字孪生建模中，电工装备的各子系统和组件可以看作有不同方法和属性的对象，基于该方法可以为电力装备的组件化、模块化建模提供指导原则。未来需要进一步从多物理场的角度明确电力装备各个组件所具备的“属性”和“方法”，以及组件接口之间的耦合关系，进一步以典型电力装备为代表，模块化的构建其各个组件的“属性”和“方法”库。为未来采用数字孪生技术实现电力装备复杂多物理场耦合特性和行为特性的准确表示提供模型基础。

目前电力装备数字孪生建模方法主要有：基于多物理仿真模型的驱动方法、基于监测数据和机器学习方法的驱动方法[93]。这两种建模策略分别适用于物理机理明确和物理机理不明确的两种情况。目前对于实际的电力装备仅依赖第一种建模策略所构建的数字孪生模型往往难以满足实际应用需求。因此，数据驱动模型中整合物理知识所形成得混合驱动方法正备受关注。基于混合驱动方法能够加快数据驱动模型的训练过程，并解释数据驱动模型预测的潜在物理特性。对于电力装备多物理场数字孪生混合驱动方法，未来还需要进一步研究添加何种多物理场物理信息的损失项来修改数据驱动模型的损失函数，实现该损失项能够去惩罚不符合第一性原理的数据驱动模型，从而将数据驱动模型的训练限制在符合第一性原理的解决方案上。

4　结语

电力装备多物理场数值仿真计算对于推动电力行业装备制造的发展起着至关重要作用。面向电力装备在产品设计和运维监测过程中存在的问题，可以利用高效的数值计算方法和多物理场仿真平台进行典型电力装备的运行机理分析，从而提升装备的制造水平和使用寿命。结合人工智能的飞速发展和电力装备全生命周期的监测需求，国内相关企业和科研高校应加快高性能计算多物理场分析软件的研发和数字孪生平台的建设，助力电网行业焕发新的科技创新活力。

参考文献 References

[1] SILVESTER P, CHARI M V K. Finite element solution of saturable magnetic field problems[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1970, PAS-89(7): 1642-1651.

[2] 国家能源局电力可靠性管理和工程质量监督中心. 2021 年全国电力可靠性年度报告[EB/OL]. (2022-08-19)[2023-05-18]. http：//prpq. nea. gov. cn/ndbg/8540. html.
Power Reliability Management and Project Quality Supervision Center, National Energy Administration. 2021 national electric power reliability annual report[EB/OL]. (2022-08-19)[2023-05-18]. http: //prpq. nea. gov. cn/ndbg/8540. html.

[3] 工业和信息化部，科学技术部，生态环境部. 工业和信息化部 科学技术部 生态环境部关于印发环保装备制造业高质量发展行动计划(2022—2025 年)的通知[EB/OL]. (2022-01-13)[2023-05-18]. https://wap.miit.gov.cn/jgsj/jns/gzdt/art/2022/art_e9dc9470b18d4747-bbb9892406907c92.html.
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China, Ministry of Science and Technology, Ministry of Ecology and Environment. Notice on printing and distributing the action plan for the high-quality development of the environmental protection equipment manufacturing industry (2022—2025)[EB/OL]. (2022-01-13)[2023-05-18]. https://wap.miit.gov.cn/jgsj/jns/gzdt/art/2022/art_e9dc9470b18d4747bbb9892406907c92. html.

[4] 国务院. 国务院关于印发“十四五”数字经济发展规划的通知[EB/OL]. (2022-01-12)[2023-05-18]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2022-01/12/content_5667817. htm.
The State Council. Notice of the state council on printing and distributing the “14th five-year” digital economy development plan[EB/OL]. (2022-01-12)[2023-05-18]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2022-01/12/content_5667817. htm.

[5] LIU W K, LI S F, PARK H S. Eighty years of the finite element method: birth, evolution, and future[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2022, 29(6): 4431-4453.

[6] 张 帆. 非结构网格有限体积法的空间离散算法研究[D]. 大连：大连理工大学，2017.
ZHANG Fan. Research on spatial discretization schemes for finite volume method on unstructured grids[D]. Dalian, China: Dalian University of Technology, 2017.

[7] PRAPAINOP R, MANEERATANA K. Simulation of ice formation by the finite volume method[J]. Songklanakarin Journal of Science and Technology, 2004, 26(1): 55-70.

[8] ACHARYA S, BALIGA B R, KARKI K, et al. Pressure-based finite-volume methods in computational fluid dynamics[J]. Journal of Heat Transfer, 2007, 129(4): 407-424.

[9] FONTES E. FEM vs. FVM[EB/OL]. (2018-11-29)[2023-05-18]. http: //comsol. com/blogs/fem-vs-fvm/.

[10] 孙凤杰，周启明. 时域有限差分(FDTD)法发展综述[C]//2009 系统仿真技术及其应用学术会议论文集. 合肥：中国科学技术大学出版社，2009：115-119.
SUN Fengjie, ZHOU Qiming. A summary of FDTD research and development at home and abroad[C] // Proceedings of 2009 System Simulation Technology and Application Academic Conference. Hefei, China: University of Science and Technology of China Press, 2009: 115-119.

[11] 郑奎松. FDTD 网络并行计算及 ADI-FDTD 方法研究[D]. 西安：西安电子科技大学，2005.
ZHENG Kuisong. Study of FDTD parallel computing and ADI-FDTD method[D]. Xi'an, China: Xidian University, 2005.

[12] 刘 阳，李 金，胡齐芽，等. 边界元方法的一些研究进展[J]. 计算数学，2020，42(3)：310-348.
LIU Yang, LI Jin, HU Qiya, et al. Some research progress on boundary element methods[J]. Mathematica Numerica Sinica, 2020, 42(3): 310-348.

[13] COSTABEL M. Principles of boundary element methods[J]. Computer Physics Reports, 1987, 6(1/6): 243-274.

[14] CHAPMAN S J. Fortran for scientists and engineers[M]. 3rd ed. New York, USA: McGraw Hill Higher Education, 2008.

[15] 郑成航，程乐鸣，李 涛，等. 多孔介质燃烧火焰面特性数值模拟[J]. 中国电机工程学报，2009，29(5)：48-53.
ZHENG Chenghang, CHENG Leming, LI Tao, et al. Numerical simulation of combustion fronts in porous media[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(5): 48-53.

[16] 张瑞卿，杨海瑞，吕俊复. 应用于循环流化床锅炉气固流动和燃烧的 CPFD 数值模拟[J]. 中国电机工程学报，2013，33(23)：75-83.
ZHANG Ruiqing, YANG Hairui, LÜ Junfu. Application of CPFD approach on gas-solid flow and combustion in industrial CFB boilers[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(23): 75-83.

[17] 冯瑞华，姜 山. 国外材料计算学研究战略与计划分析[J]. 科技管理研究，2014，34(3)：34-39.
FENG Ruihua, JIANG Shan. Research on strategies and projects of computational material in foreign countries[J]. Science and Technology Management Research, 2014, 34(3): 34-39.

[18] 金 泉，覃继宁，张 荻，等. 颗粒和纤维混杂增强复合材料力学性能的三维有限元模拟[J]. 复合材料学报，2006，23(2)：14-20.
JIN Quan, QIN Jining, ZHANG Di, et al. 3D FEM simulation of mechanical property of composites reinforced by both particles and fibers[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2006, 23(2): 14-20.

[19] 居学海，叶财超，徐司雨. 含能材料的量子化学计算与分子动力学模拟综述[J]. 火炸药学报，2012，35(2)：1-9.
JU Xuehai, YE Caichao, XU Siyu. Overview on quantum chemical computing and molecular dynamic simulations of energetic materials[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2012, 35(2): 1-9.

[20] 周海京，刘 阳，李瀚宇，等. 计算电磁学及其在复杂电磁环境数值模拟中的应用和发展趋势[J]. 计算物理，2014，31(4)：379-389.
ZHOU Haijing, LIU Yang, LI Hanyu, et al. Computational electromagnetics and applications in numerical simulation of electromagnetic environmental effects and development tendency[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2014, 31(4): 379-389.

[21] 洪 伟. 计算电磁学研究进展[J]. 东南大学学报(自然科学版)，2002，32(3)：335-339.
HONG Wei. Progress in computational electromagnetics[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2002, 32(3): 335-339.

[22] 文舸一. 计算电磁学的进展与展望[J]. 电子学报，1995，23(10)：62-69.
WEN Geyi. Recent advances in computational electromagnetics[J]. Acta Electronica Sinica, 1995, 23(10): 62-69.

[23] 温斌荣，田新亮，李占伟，等. 大型漂浮式风电装备耦合动力学研究：历史、进展与挑战[J]. 力学进展，2022，52(4)：731-808.
WEN Binrong, TIAN Xinliang, LI Zhanwei, et al. Coupling dynamics of floating wind turbines: history, progress and challenges[J]. Advances in Mechanics, 2022, 52(4): 731-808.

[24] 李子欣，高范强，赵　聪，等. 电力电子变压器技术研究综述[J]. 中国电机工程学报，2018，38(5)：1274-1289.
LI Zixin, GAO Fanqiang, ZHAO Cong, et al. Research review of power electronic transformer technologies[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1274-1289.

[25] 梁永春. 高压电力电缆温度场和载流量评估研究动态[J]. 高电压技术，2016，42(4)：1142-1150.
LIANG Yongchun. Technological development in evaluating the temperature and ampacity of power cables[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1142-1150.

[26] WANG L K, HOU K N, LU X B, et al. Research on electric field distribution at winding end of converter transformer considering temperature gradient[C]// Proceedings of 2021 International Conference on Electrical Materials and Power Equipment. Chongqing, China: IEEE, 2021: 1-4.

[27] 刘秋实，李庆民，LADISLAS N E，等. 极不均匀电场下绝缘油中气泡动力学特性与迁移机制[J]. 中国电机工程学报，2022，42(9)：3460-3469.
LIU Qiushi, LI Qingmin, LADISLAS N E, et al. Bubble dynamics and migration mechanism in insulation oil under extremely inhomogeneous electric field[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3460-3469.

[28] 刘　骥，杨　航，张明泽，等. 交直流复合电场−温度场下油纸绝缘内水分暂态分布规律研究[J]. 中国电机工程学报，2023，43(8)：3260-3272.
LIU Ji, YANG Hang, ZHANG Mingze, et al. Research on moisture transient distribution in oil-paper insulation under AC/DC composite electric field and temperature field[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(8): 3260-3272.

[29] 池明赫，王　倩，罗青林，等. 油纸绝缘场致动态参数对换流变端部电场计算结果的影响[J]. 中国电机工程学报，2022，42(5)：1701-1712.
CHI Minghe, WANG Qian, LUO Qinglin, et al. Influence of oil-paper insulation electric-dynamic parameters on calculation results of electric field at the end of converter transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(5): 1701-1712.

[30] 徐　晴，郝　建，叶文郁，等. 三元混合绝缘油热裂解过程与产气特性[J]. 高电压技术，2023，49(3)：1026-1037.
XU Qing, HAO Jian, YE Wenyu, et al. Microscopic mechanism of thermal cracking and gas production characteristics of three-element mixed insulation oil[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 1026-1037.

[31] 赵轩宇，陈庆国，杨洪达，等. 温度梯度下直流套管内绝缘结构优化设计[J]. 高电压技术，2022，48(3)：928-937.
ZHAO Xuanyu, CHEN Qingguo, YANG Hongda, et al. Optimal design of insulation structure in DC bushing under temperature gradient[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 928-937.

[32] LIU Z, ZHANG H, HAO X, et al. Influence of low frequency dielectric relaxation on electric field distribution of epoxy impregnated paper[C]// Proceedings of the 22nd International Symposium on High Voltage Engineering. Xi'an, China: IEEE, 2021: 1548-1553.

[33] 孟　旋，郭若琛，袁文泽，等. 空间电荷及金属颗粒对换流变阀侧套管的电场分布影响[J]. 电力工程技术，2022，41(1)：48-55.
MENG Xuan, GUO Ruochen, YUAN Wenze, et al. Influence of space charge and metal particles on the electric field distribution of converter transformer is valve-side bushing[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(1): 48-55.

[34] 毛　艳，丁玉剑，郭贤珊，等. ±1100 kV PLC 电抗器均压屏蔽装置的结构优化[J]. 高电压技术，2021，47(4)：1436-1442.
MAO Yan, DING Yujian, GUO Xianshan, et al. Structure optimization of grading and shielding devices for ±1100 kV PLC reactor[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(4): 1436-1442.

[35] 彭庆军，姜雄伟，司马文霞，等. 35 kV 干式空芯并联电抗器匝间绝缘故障综合分析[J]. 高电压技术，2018，44(6)：2005-2011.
PENG Qingjun, JIANG Xiongwei, SIMA Wenxia, et al. Comprehensive analysis of turn-insulating fault of 35 kV dry-type air-core reactors[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(6): 2005-2011.

[36] 汪　洋，李英娜，李　川. 空心电抗器投切下的电场和电动力分析[J]. 电子科技，2019，32(3)：47-52.
WANG Yang, LI Yingna, LI Chuan. Analysis on electric field and electrodynamics force of switching air-core reactor[J]. Electronic Science & Technology, 2019, 32(3): 47-52.

[37] 李永建，闫鑫笑，张长庚，等. 基于磁−热−流耦合模型的变压器损耗计算和热点预测[J]. 电工技术学报，2020，35(21)：4483-4491.
LI Yongjian, YAN Xinxiao, ZHANG Changgeng, et al. Numerical prediction of losses and local overheating in transformer windings based on magnetic-thermal-fluid model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(21): 4483-4491.

[38] 黄天超，王泽忠，李宇妍. 换流变压器直流偏磁对油箱涡流损耗的影响[J]. 电工技术学报，2023，38(8)：2004-2014.
HUANG Tianchao, WANG Zezhong, LI Yuyan. The influence of converter transformer DC bias on eddy current loss of tank[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(8): 2004-2014.

[39] 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.

[40] 李　欢，刘云鹏，王佳雪，等. 油浸式配电变压器动态热模型分析及其试验验证[J]. 中国电机工程学报，2023，43(1)：389-398.
LI Huan, LIU Yunpeng, WANG Jiaxue, et al. Analysis and test verification of dynamic thermal model of oil-immersed distribution transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 389-398.

[41] 王胜辉，许育帅，孙凯旋，等. 多物理场耦合下不同短路与接地故障对变压器绕组状态影响的仿真研究[J/OL]. 高电压技术，2023：1-12[2023-06-10]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve. 20221835.
WANG Shenghui, XU Yushuai, SUN Kaixuan, et al. Simulation study on the influence of different short circuit and ground fault on transformer winding state under the coupling of multiple physical fields[J/OL]. High Voltage Engineering, 2023: 1-12[2023-06-10]. https://doi. org/10.13336/j. 1003-6520. hve. 20221835.

[42] 谭又博，余小玲，臧　英，等. 谐波电流对换流变压器绕组损耗及温度分布特性的影响[J]. 电工技术学报，2023，38(2)：542-553.
TAN Youbo, YU Xiaoling, ZANG Ying, et al. The influence of harmonic current on the loss and temperature distribution characteristics of a converter transformer winding[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(2): 542-553.

[43] 姚欢民，穆海宝，张大宁，等. 时变温度下油纸绝缘频域介电谱曲线校正方法研究[J]. 电工技术学报，2023，38(1)：246-257.
YAO Huanmin, MU Haibao, ZHANG Daning, et al. Study on the fre-

quency domain spectroscopy curves correction method of oil-paper insulation at time-varying temperature[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(1): 246-257.

[44] 王流火，陶雄武，周俊宏，等. 550 kV/8000 A 大容量 SF_6 充气式套管温升特性的仿真研究[J/OL]. 高电压技术，2023：1-8[2023-06-10]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20221493.
WANG Liuhuo, TAO Xiongwu, ZHOU Junhong, et al. Simulation research on temperature rise characteristics of 550 kV/8000 A large capacity SF_6 inflatable bushing[J/OL]. High Voltage Engineering, 2023: 1-8[2023-06-10]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20221493.

[45] DU B X, WANG Q, KONG X X, et al. A novel method for management of thermal loads in the EV cable based on improved thermal conductivity of insulation and sheathing materials[C]// Proceedings of the 2nd International Conference on Electrical Materials and Power Equipment. Guangzhou, China: IEEE, 2019: 357-360.

[46] 袁发庭，韩毅凛，唐 波，等. 基于多岛遗传算法的干式空心电抗器热磁联合优化方法[J/OL]. 南方电网技术，2023：1-11[2023-06-14]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1643.TK.20230316.1734.008. html.
YUAN Fating, HAN Yibing, TANG Bo, et al. Thermal and magnetic joint optimization method of dry-type air core reactor based on multi-island genetic algorithm[J/OL]. Southern Power System Technology, 2023: 1-11[2023-06-14]. http: //kns. cnki. net/kcms/detail/44.1643. TK. 20230316.1734.008. html.

[47] 王银岭，张 猛，韩艳丰，等. 桥臂空心电抗器磁场对金属结构件温升影响特性研究[J]. 变压器，2020，57(2)：39-42.
WANG Yinling, ZHANG Meng, HAN Yanfeng, et al. Influence characteristics of magnetic field of bridge arm reactor on temperature rise of metal structure[J]. Transformer, 2020, 57(2): 39-42.

[48] 于群英，赵春明，林海丹，等. 基于温度场的干式空心电抗器匝间绝缘破损机理研究[J]. 高压电器，2022，58(4)：94-100.
YU Qunying, ZHAO Chunming, LIN Haidan, et al. Damage mechanism of inter-turn insulation of dry-type air-core reactor based on temperature field[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(4): 94-100.

[49] 刘成柱，张 猛，奚晶亮，等. 基于流体−热力学耦合的大容量干式电抗器温度场研究[J]. 高压电器，2021，57(4)：84-89.
LIU Chengzhu, ZHANG Meng, XI Jingliang, et al. Study on temperature field of high capacity dry-type reactor based on fluid-thermodynamic coupling[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(4): 84-89.

[50] 汲胜昌，师愉航，张 凡，等. 电力变压器振动与噪声及其控制措施研究现状与展望[J]. 高压电器，2019，55(11)：1-17.
JI Shengchang, SHI Yuhang, ZHANG Fan, et al. Review on vibration and noise of power transformer and its control measures[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(11): 1-17.

[51] 张冰倩，咸日常，于 洋，等. 匝间短路故障下电力变压器绕组的物理特征分析[J]. 高电压技术，2021，47(6)：2177-2185.
ZHANG Bingqian, XIAN Richang, YU Yang, et al. Analysis of physical characteristics of power transformer windings under inter-turn short circuit fault[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 2177-2185.

[52] 杨卓栋，齐 波，卢理成，等. 特高压直流穿墙套管绝缘支柱在高地震烈度下的机械应力仿真[J/OL]. 电网技术，2022：1-9 [2023-06-10]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.tm.20220826.1124.007.html.
YANG Zhuodong, QI Bo, LU Licheng, et al. Mechanical stress simulation of post-insulator in UHVDC wall bushing under high intensity earthquake[J/OL]. Power System Technology, 2022: 1-9[2023-06-10]. http://kns.cnki. net/kcms/detail/11.2410. tm.20220826.1124.007.html.

[53] 赵莉华，蔡维哲，黄小龙，等. 换流变阀侧套管振动模态及其法兰根部应力研究[J]. 振动与冲击，2021，40(13)：201-209.
ZHAO Lihua, CAI Weizhe, HUANG Xiaolong, et al. Vibration mode and flange root stress of side bushing of converter transformer valve[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(13): 201-209.

[54] 王革鹏，帅远明. 550 kV 油纸电容式套管抗震性能的研究[J]. 高压电器，2020，56(5)：203-208.
WANG Gepeng, SHUAI Yuanming. Research on seismic performance of 550 kV oil-impregnated capacitive bushing[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(5): 203-208.

[55] 闫荣格，程云飞. 动静态力共同作用对电抗器铁心振动影响[J]. 电工技术学报，2023，38(4)：1104-1114.
YAN Rongge, CHENG Yunfei. Influence of dynamic and static forces on vibration of reactor core[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(4): 1104-1114.

[56] 袁发庭，陈步康，陈 炜，等. 基于电磁−结构力场耦合的铁芯电抗器振动特性分析及优化方法[J/OL]. 高电压技术，2023：1-12[2023-06-10]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve. 20221857.
YUAN Fating, CHEN Bukang, CHEN Wei, et al. Vibration characteristic analysis and optimization method of iron core reactor based on electromagnetic-structural force field coupling[J/OL]. High Voltage Engineering, 2023: 1-12[2023-06-10]. https: //doi. org/10.13336/j. 1003-6520. hve. 20221857.

[57] 段娜娜，徐伟杰，李永建，等. 基于极限磁滞回线法的软磁复合材料磁特性模拟[J]. 电工技术学报，2018，33(20)：4739-4745.
DUAN Nana, XU Weijie, LI Yongjian, et al. Electromagnetic property modeling of the soft magnetic composite material based on the limiting loop method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(20): 4739-4745.

[58] FINOCCHIO G, CARPENTIERI M, CARDELLI E, et al. Analytical solution of Everett integral using Lorentzian Preisach function approximation[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2006, 300(2): 451-470.

[59] BROKATE M, SPREKELS J. Hysteresis and phase transitions[M]. New York, USA: Springer, 1996.

[60] DLALA E. Efficient algorithms for the inclusion of the Preisach hysteresis model in nonlinear finite-element methods[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(2): 395-408.

[61] 黄 雷，包广清，陈俊全. 基于 Levenberg-Marquardt 算法的改进 Preisach 模型磁特性模拟与验证[J]. 中国电机工程学报，2020，40(18)：6006-6014.
HUANG Lei, BAO Guangqing, CHEN Junquan. Magnetic property simulation and verification with improved Preisach hysteresis model based on Levenberg-Marquardt algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 6006-6014.

[62] ZHU L H, LI J J, YANG Q X, et al. An improved magnetostriction model for electrical steel sheet based on Jiles–Atherton model[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2020, 56(3): 7514604.

[63] POP N, CALTUN O. Algorithm to describe magnetization curves by using Jiles Atherton model[J]. Pollack Periodica, 2010, 5(3): 155-165.

[64] 曹 林，何金良，张 波. 直流偏磁状态下电力变压器铁心动态磁滞损耗模型及验证[J]. 中国电机工程学报，2008，28(24)：141-146.
CAO Lin, HE Jinliang, ZHANG Bo. Dynamic hysteresis loss model of

power transformer under DC current biasing and its verification[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(24): 141-146.

[65] 刘　任，李　琳. 基于模拟退火与 Levenberg-Marquardt 混合算法的 Energetic 磁滞模型参数提取[J]. 中国电机工程学报，2019，39(3)：875-884.
LIU Ren, LI Lin. Parameter extraction for energetic hysteresis model based on the hybrid algorithm of simulated annealing and Levenberg-Marquardt[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(3): 875-884.

[66] 赵玉顺，戴义贤，庄加才，等. 基于热固耦合的中频变压器绝缘材料性能参数优化配合方法[J]. 电工技术学报，2023，38(4)：1051-1063.
ZHAO Yushun, DAI Yixian, ZHUANG Jiacai, et al. Optimization of insulation material performance parameters for medium frequency transformers based on thermosolid coupling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(4): 1051-1063.

[67] 沈典宇，虞锦洪，江　南，等. 碳纤维@石墨烯/环氧树脂复合材料的制备和导热性能研究[J]. 塑料工业，2017，45(7)：98-102，88.
SHEN Dianyu, YU Jinhong, JIANG Nan, et al. Preparation and thermal conductivity of CF@ G/epoxy composites[J]. China Plastics Industry, 2017, 45(7): 98-102, 88.

[68] 任双赞，吴经锋，吴　昊，等. 换流变压器出线装置油纸绝缘中空间电荷仿真[J]. 高电压技术，2022，48(6)：2292-2301.
REN Shuangzan, WU Jingfeng, WU Hao, et al. Space charge simulation of oil-paper insulation in outlet of converter transformer[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(6): 2292-2301.

[69] 张　岩，李　琳，丁　杰，等. SF_6 气体中绝缘材料高频沿面放电特性的实验研究[J]. 电工电能新技术，2022，41(1)：1-7.
ZHANG Yan, LI Lin, DING Jie, et al. Study on surface discharge characteristics of insulation materials in SF_6 gas under high frequency electrical stress[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2022, 41(1): 1-7.

[70] PAULKE J, WEICHERT H, STEINHAEUSER P. Simulation of contact spots[C]// Proceedings of the 21st International Conference on Electrical Contacts. Zurich, Switzerland, 2002: 388-393.

[71] PAULKE J, WEICHERT H, STEINHAEUSER P. Thermal simulation of switchgear[C]//Proceedings of the 47th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Montreal, Canada: IEEE, 2001: 6-11.

[72] FREI P U, WEICHERT H O. Advanced thermal simulation of a circuit breaker[C]//Proceedings of the 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts and the 22nd International Conference on Electrical Contacts Electrical Contacts. Seattle, USA: IEEE, 2004: 104-110.

[73] LOGG A, MARDAL K A, WELLS G. Automated solution of differential equations by the finite element method: the FEniCS book[M]. Berlin, Heidelberg, Germany: Springer, 2012.

[74] PATZÁK B. OOFEM-an object-oriented simulation tool for advanced modeling of materials and structures[J]. Acta Polytechnica, 2012, 52(6): 59-66.

[75] EDF France. Finite element code_aster, Analysis of structures and thermomechanics for studies and research[EB/OL]. (2017-02-20)[2023-06-02]. http: //www. code-aster. org.

[76] WELLER H G, TABOR G, JASAK H, et al. A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques[J]. Computers in Physics, 1998, 12(6): 620-631.

[77] HECHT F. New development in freefem++[J]. Journal of Numerical Mathematics, 2012, 20(3/4): 251-265.

[78] RÅBACK P, MALINEN M, RUOKOLAINEN J, et al. Elmer models manual[R]. Helsinki, Finland: CSC – IT Center for Science, 2013.

[79] PALACIOS F, COLONNO M R, ARANAKE A C, et al. Stanford university unstructured (SU^2): an open-source integrated computational environment for multi-physics simulation and design[C] // Proceedings of the 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Grapevine, USA: AIAA, 2013.

[80] Anon. Code_Saturne source code[DB/OL]. (2015-11)[2016-01-20]. https: //www. code-saturne. org/releases/.

[81] ANDERSON R, ANDREJ J, BARKER A, et al. MFEM: a modular finite element methods library[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2021, 81: 42-74.

[82] ARNDT D, BANGERTH W, BLAIS B, et al. The deal. II library, Version 9.3[J]. Journal of Numerical Mathematics, 2021, 29(3): 171-186.

[83] 张　宇. 运动涡流场数值计算方法研究及电磁场数值分析软件平台的研制[D]. 武汉：武汉大学，2007.
ZHANG Yu. Study on the numerical methods for eddy current field invol-ing movement and development of a software platform for numerical analy-sis of electromagnetic field[D]. Wuhan, China: Wuhan University, 2007.

[84] 李军浩，韩旭涛，刘泽辉，等. 电气设备局部放电检测技术述评[J]. 高电压技术，2015，41(8)：2583-2601.
LI Junhao, HAN Xutao, LIU Zehui, et al. Review on partial discharge measurement technology of electrical equipment[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2583-2601.

[85] 臧奕茗，钱　勇，刘　伟，等. C_4F_7N/CO_2 混合气体中尖端缺陷的流注放电仿真研究[J]. 电工技术学报，2020，35(1)：34-42.
ZANG Yiming, QIAN Yong, LIU Wei, et al. Simulation study on streamer of tip defects in C_4F_7N/CO_2 mixed gas[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(1): 34-42.

[86] 张　宁，刘士利，郝　建，等. 变压器油中气泡杂质相局部放电特性研究综述[J]. 电工技术学报，2023，38(10)：2757-2776.
ZHANG Ning, LIU Shili, HAO Jian, et al. Review on partial discharge characteristics of bubble impurity phase in transformer oil[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(10): 2757-2776.

[87] WANG X F, WANG Y, HU Y W, et al. Analysis of wireless power transfer using superconducting metamaterials[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(2): 5500605.

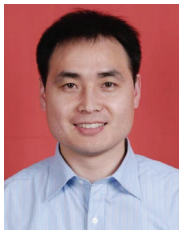
[88] FEI C, GADELRAB R, LI Q, et al. High-frequency three-phase interleaved LLC resonant converter with GaN devices and integrated planar magnetics[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 7(2): 653-663.

[89] LI W C, ZHENG Y, KANG Y, et al. Magnetic behavior of soft magnetic composites constructed by rapidly quenched flake-like FeSiAl alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 819: 153028.

[90] 梁　琛，司马文霞，孙魄韬，等. 单组分光敏微胶囊/纳米 SiO_2/环氧树脂复合绝缘介质的自修复特性[J]. 电工技术学报，2022，37(6)：1564-1571.
LIANG Chen, SIMA Wenxia, SUN Potao, et al. Self-healing property of one-component photosensitive microcapsule/Nano-SiO_2/epoxy composite dielectric[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(6): 1564-1571.

[91] HUANG B, WANG J H. Applications of physics-informed neural networks in power systems - a review[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(1): 572-588.

[92] 刘亚东，陈　思，丛子涵，等. 电力装备行业数字孪生关键技术与应用展望[J]. 高电压技术，2021，47(5)：1539-1554.
LIU Yadong, CHEN Si, CONG Zihan, et al. Key technology and application prospect of digital twin in power equipment industry[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1539-1554.
[93] 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.



杨　帆
1980—，男，博士，教授，博导
主要从事输变电设备多物理场计算、电力装备数字孪生方面的研究工作
E-mail: yangfan@cqu.edu.cn

YANG Fan
Ph.D., Professor



郝翰学
1998—，男，博士生
主要从事输变电设备多物理场耦合计算方面的研究工作
E-mail: haohanxue@cqu.edu.cn

HAO Hanxue
Ph.D. candidate



王鹏博(通信作者)
1994—，男，博士
主要从事多物理场数值计算、电磁波产生与调控技术等方面的研究工作
E-mail: wangpb@cqu.edu.cn

WANG Pengbo
Ph.D.
Corresponding author



姜　慧
1985—，女，博士，副教授，硕导
主要从事放电等离子体及应用、多物理场仿真计算方面的研究
E-mail: jianghui@cqu.edu.cn

JIANG Hui
Ph.D.
Associate professor



夏依莎
1996—，女，博士生
主要从事输变电设备多物理场计算和电工装备电磁振动研究
E-mail: xiayisha1@163.com

XIA Yisha
Ph.D. candidate



罗　澳
2000—，女，硕士生
主要从事电力设备多物理场计算方面的研究工作
E-mail: luoao@cqu.edu.cn

LUO Ao



廖瑞金
1963—，男，博士，教授，博导
主要从事电气设备绝缘在线监测与故障诊断研究和高电压测试技术工作
E-mail: rjliao@cqu.edu.cn

LIAO Ruijin
Ph.D., Professor

收稿日期　2023-05-30　修回日期　2023-06-11　　编辑　卫李静