

高温超导电缆通道监测系统的物理场建模研究

付 赏, 周 艳*

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2025年4月28日; 录用日期: 2025年5月21日; 发布日期: 2025年5月29日

摘 要

高温超导电缆作为新型电力传输技术的典型代表, 其安全稳定运行在很大程度上依赖于其所在电缆通道的完好状态, 因此实时监测电缆通道成为确保系统可靠运行的关键。然而, 传统监测方法主要依赖于定期巡检和离线数据分析, 存在响应延迟、数据采集不全面以及预警不及时等不足, 难以满足现代电网对监测精度和实时性的严苛要求。为应对此挑战, 文章基于物理场仿真技术, 深入设计并构建了电缆监测系统的关键模块, 重点开发了电缆通道多物理场仿真模型。通过与历史检测数据的对比分析, 验证了所构建物理场仿真模型在电缆通道状态监测中的有效性。该研究为高温超导电缆的实时、智能监测提供了一种创新性解决方案, 并为推动电网监测技术向更高智能化和数字化方向发展奠定了坚实的理论基础和工程实践依据。

关键词

高温超导电缆, 物理场仿真, 监测系统

Physical Field Modeling Research on the Monitoring System of High-Temperature Superconducting Cable Channels

Shang Fu, Yan Zhou*

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 28th, 2025; accepted: May 21st, 2025; published: May 29th, 2025

Abstract

High-temperature superconducting cables, as a novel power transmission technology, largely depend on the intact condition of their cable conduits for safe and stable operation. Real-time monitoring of

*通讯作者。

these channels is, therefore, key to ensuring reliable system performance. However, traditional monitoring methods, which mainly depend on periodic inspections and offline data analysis, suffer from delayed responses, incomplete data acquisition, and untimely warnings, making it difficult to meet the stringent requirements for monitoring accuracy and real-time performance in modern power grids. To address this challenge, this paper employs physical field simulation technology to design and construct the critical modules of a cable monitoring system, with a particular focus on developing a multi-physics simulation model for cable channels. Through comparative analysis with historical detection data, the effectiveness of the developed physical field simulation model for monitoring the status of cable channels has been validated. This study provides an innovative solution for the real-time, intelligent monitoring of high-temperature superconducting cables and lays a solid theoretical foundation and practical engineering basis for advancing power grid monitoring technology towards higher levels of intelligence and digitization.

Keywords

High-Temperature Superconducting Cable, Physical Field Simulation, Monitoring System

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着城市电网向智能化和高效化转型, 电缆作为电力传输的核心元件, 其健康状态直接影响电网的安全性与经济效益[1]。高温超导电缆作为新型传输技术的典型代表, 其运行依赖于电缆通道的物理保护, 因此要求对通道内温度、振动等常规参数进行实时监控, 以防止因通道或电缆损伤而引发事故。传统检测方法依赖定期巡检与离线数据分析, 存在响应滞后、数据采集不全面和预警不及时等缺陷, 难以满足复杂运行环境下对设备状态精确预测的需求, 这促使研究者亟需开发更加高效、实时的监测手段。

基于上述背景, 许多学者已经利用物理场仿真技术探索实时监控和故障预警的新方法。例如, 罗智荣等构建了基于多物理场仿真的油浸式变压器振动特性分析模型, 通过建立铁心磁致伸缩模型并耦合流场、温度场与结构场, 实现了对变压器内部油温和振动分布的精准预测[2]; 龚培林等利用有限元仿真建立了输电线路监测装置内部温、湿度场的模型, 在加热器作用下分析了温升与相对湿度变化的关系, 为装置环境适应性改进提供了依据[3]; 黎庆柱等采用多物理场耦合仿真研究了低压断路器双金属片的残余应力, 揭示了制造及环境因素对设备可靠性影响的内在机制[4]; 黄泽平等通过温度-流体场耦合仿真对大电流固体绝缘开关柜进行了温升特性分析, 验证了优化散热设计对降低局部温升的效果[5]; 柴鹏举等构建了薄壁玻璃钢内衬复合管的流固耦合模型, 对管道振动响应及层间稳定性进行了定量模拟[6]; 杨殿勇等基于 ABAQUS 建立了公轨合建隧道及周围土层的动力响应模型, 评估了车辆振动荷载对结构和土体安全的影响[7]; 龚辉等结合现场测试与 CFD 数值模拟, 对浅层地下建筑的热环境进行了长期监测和模拟分析[8]; 华永等利用傅里叶变换和谐波反应法构建了浅埋地下建筑室内温度计算模型, 对全年温度分布进行了系统研究[9]。此外, 张永超等提出了基于多物理场耦合仿真的变压器温度预测及热寿命损失分析方法, 利用磁-热-流耦合仿真和极限学习机实现了对绕组热点温度的实时监控与寿命评估[10]; 张克琪等建立了油浸式电力变压器的物理场建模与仿真系统, 通过构造电磁耦合和温度场模型, 实现了对变压器内部涡流场、温度场及绕组受力状态的仿真分析[11]; 此外, 基于多物理场仿真技术的方法还被应用于动车组制动盘疲劳研究[12]、油冷式永磁同步电机温度场分析[13]、中大型 SUV 乘员舱热舒适性分析

[14]以及某驱动电机及控制器冷却系统热流耦合分析[15]，这些研究为设备设计优化、性能提升和故障预测提供了坚实的数据支撑与理论依据。

基于上述研究成果，本文采用物理场仿真技术对电缆监测系统的关键模块进行了深入设计与建模，主要包括电缆通道的多物理场仿真模型。通过构建包含温度场和结构场的高精度仿真模型，实现对电缆通道内部运行状态的实时仿真与数据采集；通过与历史检测数据的对比分析，进一步优化模型参数，验证了所构建的物理场仿真模型在高温超导电缆通道健康状态评估与故障预警中的有效性，为电网监测技术向更高智能化和高效化方向发展提供了坚实的理论依据和工程实践参考。

2. 模型构建

物理场建模的核心在于通过精确的理论描述与数值方法，构建与物理实体高度一致的虚拟模型，以支持实时监测与故障预测。基于此，本研究选取了高温超导电缆通道中的部分区域进行建模，并重点关注通道内部温度场与结构场的仿真建模。并结合历史检测数据的特点，最终选取温度变化最为显著的电缆沟区段以及承载力需求较高的顶管区段作为主要研究对象。

2.1. 物理模型

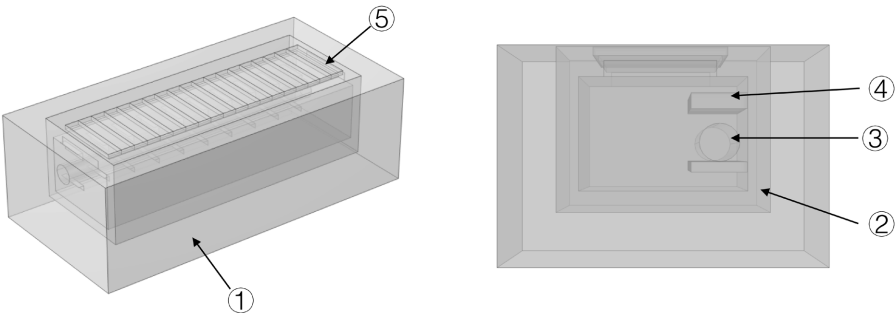


Figure 1. Physical model structure diagram of cable trench
图 1. 电缆沟的物理模型结构图

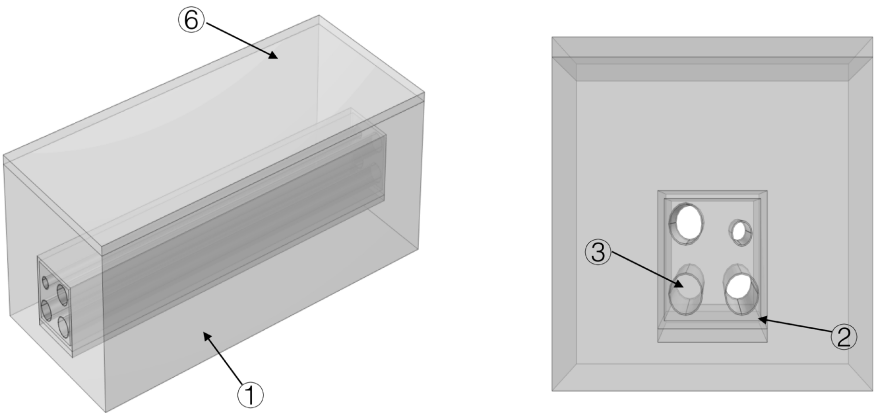


Figure 2. Structure diagram of physical model for pipe laying
图 2. 排管的物理模型结构图

如图 1 和图 2 所示，图中①~⑥分别代表土壤、混凝土结构体、高温超导电缆、支架、盖板和路面。上图中左侧透视图可清晰展示通道走向，右侧正视图则直观呈现通道的内部结构。通常，电缆沟顶部设计有可拆卸或可开启式盖板，便于运维人员定期检修和维护内部高温超导电缆及其辅助设备。整体结构

尺寸为长 1000 mm、宽 2400 mm 和高 3800 mm。基本材料属性见表 1 和表 2。

Table 1. Temperature field material property setting

表 1. 温度场材料属性设置

材料	热导率(W/m·K)	比热容(J/kg·K)	密度(kg/m ³)
混凝土	1.4	840	2400
钢支架	45	470	7700
土壤	1.0	800	1800
空气	1.225	0.024	1005

Table 2. Material property setting of structural field

表 2. 结构场材料属性设置

材料名称	密度(kg/m ³)	弹性模量(GPa)	泊松比
土壤	1800	0.05	0.30
混凝土	2400	30	0.20
路面	2800	25	0.20

2.2. 数学模型

a) 温度场

在温度场中，通道的主要换热方式包括热传导、热对流和热辐射三种形式。其中热传导对顶管和排管的影响尤为严重，而热对流和热辐射则主要影响电缆桥和电缆沟的敷设，三种换热形式具体公式如下。

瞬时热传导的具体公式如下：

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T + \frac{q}{\rho c_p} \quad (1)$$

上式中， T 是通道的温度， t 是某一点的时间， $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$ 是通道具体材料的热扩散率， k 是材料热导率， ρ 是材料密度， c_p 是材料比热容， q 是单位体积内的热源强度， $\nabla^2 T$ 是温度的空间二阶导数，表示热量在物体内部的扩散。

热对流的数学表达式为：

$$q_{conv} = hA(T_s - T_\infty) \quad (2)$$

式中， q_{conv} 是空气对流引起的热流量， h 是对流换热系数， A 是通道外表面与空气接触的表面积， T_s 是通道外表面温度， T_∞ 是远离通道外表的空气温度。

热辐射的数学表达式为：

$$q_{rad} = \epsilon \sigma A(T_s^4 - T_{surround}^4) \quad (3)$$

式中， q_{rad} 是由辐射引起的热流量， ϵ 是通道表面的发射率， σ 是斯特凡 - 玻尔兹曼常数， T_s 是通道表面的绝对温度， $T_{surround}$ 是环境的绝对温度。

b) 结构场

通道振动分析中，动能定律和应力应变动量守恒的原理至关重要。该原理表明，当通道承受外部荷载，尤其是冲击荷载时，管道内部各点的位移、加速度和变形程度受到直接影响。动量定律提供了一种理论框架，用于预测和分析这些物理量的变化，表达公式如下：

$$\sum m_i \cdot v_i = \sum m_f \cdot v_f \quad (4)$$

其中, m_i 为初始时刻各个物体的质量, v_i 为初始时刻各个物体的速度, m_f 为最终时刻各个物体的质量, v_f 为最终时刻各个物体的速度。

应力应变关系描述了材料在外力作用下形变程度与所受应力之间的关系, 在对通道施加于具体荷载后, 应力方程如下所示:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \nabla \cdot S + F_v \quad (5)$$

其中, ρ 表示荷载物体质量密度, u 是荷载的位移。 $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$ 表明加速度, ∇ 表示矢量场的空间变化率。 S 表示受力物体内部的应力张量, $\nabla \cdot s$ 代表应力张量 s 的散度, F_v 是通道应力。

2.3. 边界条件设定

本研究基于 COMSOL 软件, 通过 CFD 仿真深入探讨了高温超导电缆通道的温度变化和结构响应。具体的仿真参数和设置详见表 3 和表 4。

Table 3. Temperature field boundary condition setting

表 3. 温度场边界条件设置

边界名称	边界设置
通道表面	对流与辐射耦合边界
通道内部温度	293.1 K
内部接触面	传热连续性边界

Table 4. Structure field boundary condition setting

表 4. 结构场边界条件设置

边界名称	边界设置
底部支撑边界	固定支撑
侧壁自由边界	自由边界
荷载表面	施加外载荷边界
内部接触面	接触边界

3. 结果分析

为全面评估模型的准确性, 本研究分别对温度场和结构场进行了深入仿真, 并与历史检测数据进行了详细对比。接下来, 本文将从以下两个方面对仿真结果展开系统探讨: 一是温度场的动态分布特征及其与实际监测数据的吻合程度; 二是结构场中关键区域不同荷载下的应力分布和竖向位移。

3.1. 温度场仿真分析

图 3 显示的电缆沟温度分布揭示了明显的日变化规律: 无论是监测数据(图 3(c))还是仿真数据(图 3(d)), 均呈现“凌晨低温 - 中午高温 - 夜间回落”的模式, 其中凌晨温度维持在 27℃~28℃, 中午受阳光直射和太阳辐射影响迅速上升至近 38℃峰值, 夜间则逐渐降至约 30℃; 环境温度曲线(黑色虚线)的峰值出现

时间逐渐后移, 反映了建筑物热容效应在热量储存和释放过程中的调节作用。这一温度分布特点不仅源于太阳辐射引起的热平衡变化, 还与电缆沟内各组成部分(如高温超导电缆、支架、盖板等)的材料导热性能和对流换热密切相关——边界区因较强对流作用温度下降较快, 而内部区域因传热受限形成局部高温。

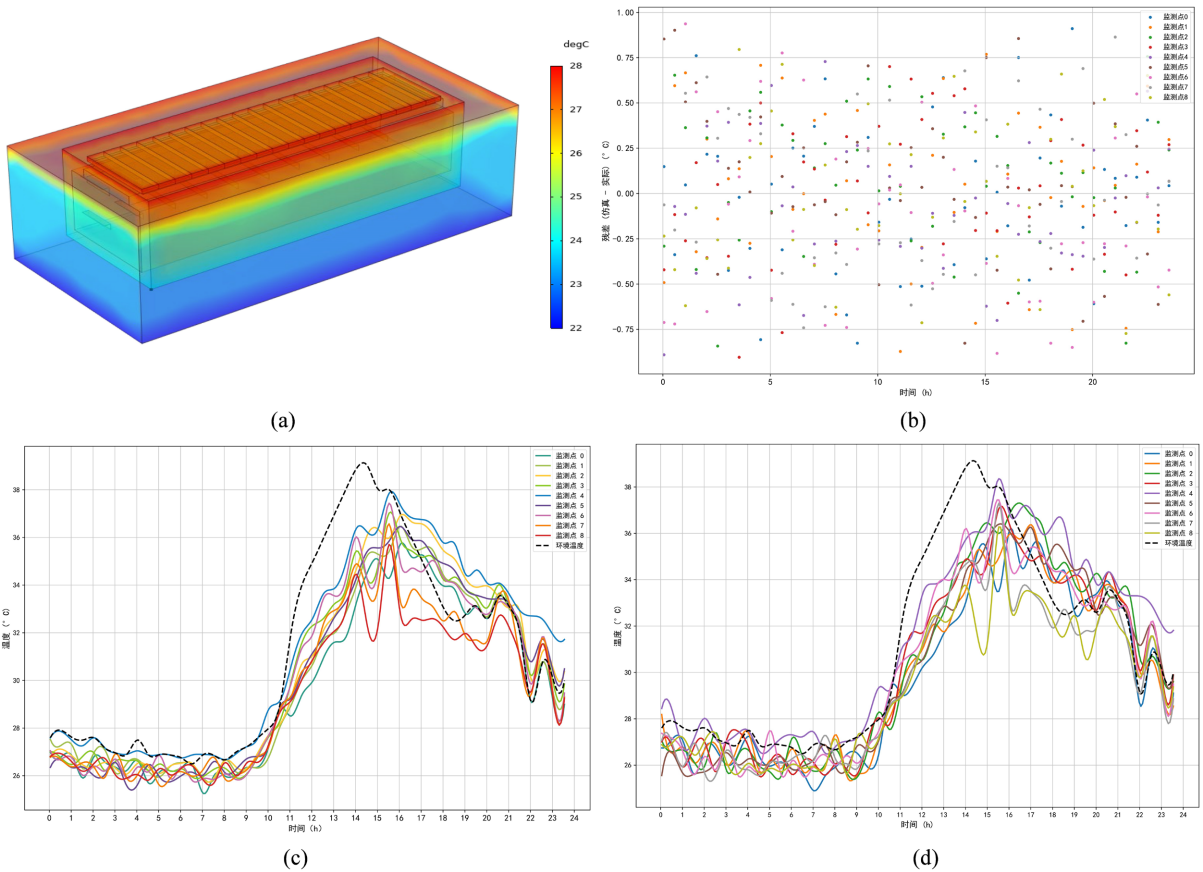


Figure 3. Temperature field cloud image and data comparison diagram
图 3. 温度场云图以及数据对比图

误差对比表明, 仿真数据与实际检测数据间均方根误差(RMSE)约为 0.68°C 、平均绝对误差(MAE)约为 0.56°C , 其中监测点 0 的 RMSE 为 0.62°C 、MAE 为 0.55°C , 监测点 1 和监测点 2 分别为 $0.71^{\circ}\text{C}/0.60^{\circ}\text{C}$ 和 $0.69^{\circ}\text{C}/0.57^{\circ}\text{C}$, 大部分残差集中在 -0.8°C 至 0.8°C 范围内, 并呈近似正态分布、围绕零对称, 表明整体上模型未出现明显系统性偏差, 但在中午 12~15 时段和夜间 0~4 时段, 部分局部区域存在略高误差。这些误差的主要来源包括: 实际监测中传感器的测量误差和环境干扰, 数值模型在求解热传导、对流和辐射过程中采用的简化假设, 以及网格划分和求解器精度等数值计算误差。总体而言, 虽然当前模型能够较好地再现温度场的动态变化, 且预测误差在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以内处于可接受范围, 但通过进一步优化局部参数校准和提高数值求解精度, 将有助于进一步减小误差, 提高模型的整体准确性与适用性。

3.2. 结构场仿真分析

如图 4 所示, 三维应力云图呈现出由冷向暖过渡的分布特征, 其中在支撑区域和连接角部等局部区域出现明显的应力集中, 局部最大应力可达 $18\sim 20\text{ MPa}$, 而稳定区域的应力仅维持在 $2\sim 3\text{ MPa}$ 左右。这种应力分布现象可以归因于结构几何突变和边界约束效应的共同作用: 在几何形状发生急剧变化处或受

边界固定影响处, 荷载传递不均导致局部应力迅速累积。此外, 不同荷载条件下的动态响应曲线显示出显著差异。在匀速移动恒力荷载作用下, 结构较快达到静力平衡, 位移波动较小(约介于 -0.4×10^{-6} m至 -0.2×10^{-6} m), 表明整体响应均匀; 而在匀速移动简谐荷载作用下, 监测点呈现周期性振荡, 其位移峰值约为 -0.15×10^{-6} m, 谷值约为 -1.0×10^{-6} m, 峰谷差可达 0.85×10^{-6} m, 反映出结构在固有振动频率和外部激励耦合下存在较强的动力响应; 对于冲击荷载, 瞬时高幅荷载在 0.4 s 和 0.7 s 左右引起短时峰值(高达 -1.4×10^{-6} m), 随后迅速衰减至约 0.2×10^{-6} m, 显示出结构对瞬态荷载的敏感性。此外, 局部应力集中区域的产生也与支撑约束、材料物理性能差异以及数值模型中对局部网格划分和边界条件近似处理有关, 这些因素共同导致了在极短时间内振动响应和局部应力值的计算偏差。总体而言, 图 4 的结构场仿真结果不仅揭示了复杂荷载作用下的动态响应特性和局部应力集中现象, 还为结构设计优化、疲劳风险评估以及承载能力提升提供了重要的物理依据和理论支持。

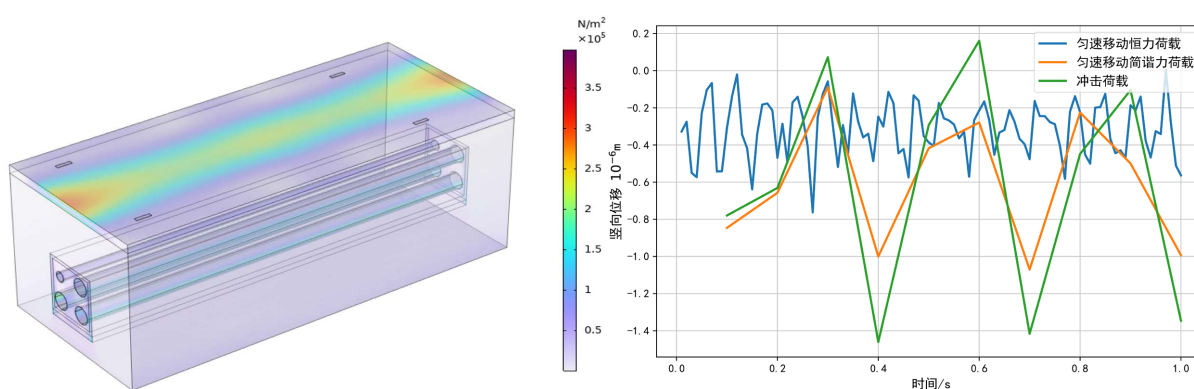


Figure 4. Structure field stress distribution nephogram and displacement curve

图 4. 结构场应力分布云图以及位移曲线图

总体而言, 不同荷载情形下结构的动态响应特征差异显著: 匀速移动恒力荷载更能体现系统整体的静力平衡水平, 匀速移动简谐力荷载则揭示了结构对周期性外力的动力学响应, 冲击荷载则考验结构对瞬态高幅冲击的耐受能力。通过将仿真结果与此类时域响应曲线相结合, 可更深入地分析结构在多种复杂工况下的动态安全性与疲劳特性, 为电缆通道的健康监测和故障预警提供关键参考依据。

4. 总结与展望

本研究通过构建基于数字孪生的电缆通道监测系统关键模块, 取得了如下两方面的重要成果与启示:

1) 物理场建模与仿真优化的成效

本研究基于热传导、对流和辐射理论以及力学基本原理, 建立了温度场和结构场的仿真模型。通过与历史检测数据的对比分析, 验证了该模型在空间分布和时间动态变化方面均具有较高的预测精度, 能够真实反映电缆通道的实际运行状态。这为实现故障预测和健康状态评估提供了坚实的理论支撑和数据依据。

2) 不足与未来发展方向

尽管取得了显著成果, 但由于模型参数存在不确定性、现场环境的复杂性以及部分简化假设的影响, 当前模型仍存在一定偏差。未来研究应进一步优化参数动态校准和敏感性分析, 整合更多实时数据, 完善局部仿真策略和自适应通信机制, 以提高系统的整体精度和适应性, 推动电网监测技术向更高智能化和数字化水平发展。

参考文献

- [1] 莫佳辉, 张伟鑫. 带电检测技术在电力电缆状态评估中的应用与研究[J]. 电工技术, 2024(S2): 544-546.
- [2] 罗智荣, 黄丰, 郭淳, 等. 基于多物理场仿真的油浸式变压器振动特性分析及影响因素研究[J]. 智慧电力, 2024, 52(11): 48-55.
- [3] 龚培林, 魏敏, 严波, 等. 基于多物理场的输电线路在线监测装置内部温湿度控制方法研究[J]. 电气自动化, 2024, 46(6): 55-57.
- [4] 黎庆柱, 朱林丰, 陈国峰, 等. 低压断路器双金属片残余应力的多物理场仿真研究[J]. 中国新技术新产品, 2025(2): 51-53.
- [5] 黄泽平, 陈丽安, 王红艳, 等. 基于多物理场的大电流固体绝缘开关柜温升特性研究[J]. 高压电器, 2025, 61(3): 71-79.
- [6] 柴鹏举. 基于流固耦合作用下薄壁玻璃钢内衬复合管振动响应分析[D]: [硕士学位论文]. 大庆: 东北石油大学, 2024.
- [7] 杨殿勇. 振动荷载作用下公轨合建隧道及周围土层动力响应研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 济南大学, 2024.
- [8] 龚辉. 某浅层地下建筑热环境实测与模拟分析[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
- [9] 华永. 浅埋地下建筑室内温度计算模型及全年分布特征分析[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2021.
- [10] 张永超. 基于数字孪生技术的变压器温度预测及热寿命损失分析[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2022.
- [11] 张克琪. 油浸式电力变压器数字孪生建模与仿真[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2023.
- [12] 刘基雄. 动车组制动盘热-流-固多场耦合疲劳研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.
- [13] 张浩. 某乘用车油冷式永磁同步电机温度场分析[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆理工大学, 2023.
- [14] 李坤璠. 基于三维热流耦合仿真的中大型 SUV 乘员舱热舒适性分析[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆理工大学, 2023.
- [15] 贺渝港. 某驱动电机及控制器冷却系统热流耦合分析[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆理工大学, 2024.