# 电机流固耦合暂态传热分析的分离矢量法

李佳泽[1]， 边旭[1]， 朱志佳[2]， 梁艳萍[1]， 汪冬梅[1]
（1. 哈尔滨理工大学 电气与电子工程学院，黑龙江 哈尔滨 150080；
2. 哈尔滨电机厂有限责任公司 产品设计部，黑龙江 哈尔滨 150040）

**摘 要**：电机在实际运行中常处于动态工况，其内部温度会随时间快速变化，因此需要进行准确的暂态传热分析。针对流固耦合法将流体场与温度场耦合求解，温度计算结果的准确度高，但是计算时间长，计算资源要求高的问题，提出分离矢量法，将流体矢量做为常数分离仅对温度标量进行暂态求解，降低计算时长和对计算资源的要求。以一台 300 Mvar 空冷同步调相机为例，建立其端部的分离矢量暂态传热模型，通过实测温度验证了分离矢量暂态传热模型的准确性。计算输电系统单相短路故障后 100 s 的暂态传热，对比分析分离矢量法和传统流固耦合法的计算过程与计算结果。结果表明，分离矢量法的计算时间仅占传统流固耦合法的 7.7%，且求解所需内存仅占传统流固耦合法的 64.4%。2 种方法的温度计算结果最大差异为 0.16%。

**关键词**：分离矢量法；流固耦合法；温度场；流体场；暂态计算；同步调相机
**DOI**：10.15938/j.emc.2026.02.009
**中图分类号**：TM341 **文献标志码**：A **文章编号**：1007-449X(2026)02-0101-10

# Separated vector method for fluid-solid coupled transient heat transfer analysis of electric machines

LI Jiaze[1], BIAN Xu[1], ZHU Zhijia[2], LIANG Yanping[1], WANG Dongmei[1]
(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;
2. Product Design Department, Harbin Electric Machinery Co., Ltd., Harbin 150040, China)

**Abstract**: Electric machines in actual operation often operate under dynamic conditions, leading to rapid internal temperature changes over time. Therefore, accurate transient heat transfer analysis is required. To address the issue of the coupled fluid-solid method, which solves the fluid field and temperature field simultaneously yielding high accuracy in temperature calculation but demands long computation time and high computational resources, the separated vector method was proposed. This method separates the fluid vector as a constant and solves only for the temperature scalar transiently, thereby reducing the computation duration and resource requirements. Taking a 300 Mvar air-cooled synchronous condenser as an example, a separated vector transient heat transfer model for its end region was established. The accuracy of the model was verified by measured temperatures. The transient heat transfer within 100 seconds after a single-phase short-circuit fault in the power transmission system was calculated. The computational

**收稿日期**：2025-09-08
**基金项目**：黑龙江省自然科学基金(LH2024E090)
**作者简介**：李佳泽(1999—)，男，博士研究生，研究方向为电机多物理场仿真分析；
边 旭(1988—)，女，博士，教授，博士生导师，研究方向为电机多物理场仿真分析以及电机设计；
朱志佳(1988—)，男，学士，高级工程师，研究方向为汽轮发电机的电机设计；
梁艳萍(1963—)，女，博士，教授，博士生导师，研究方向为电机电磁理论与电磁设计、大型发电设备机电能量转换机理与电磁场分析计算研究；
汪冬梅(1989—)，女，博士，副教授，研究方向为电机设计、电磁参数计算与暂态性能分析。
**通信作者**：边 旭

processes and results of the separated vector method and the traditional coupled fluid-solid method were compared and analyzed. The results show that the computation time of the separated vector method is only 7.7% of that required by the traditional coupled fluid-solid method, and the memory required for the solution is only 64.4%. The maximum difference in the temperature calculation results between the two methods is 0.16%.

**Keywords**: separation vector method; fluid-solid coupling method; temperature field; fluid field; transient calculation; synchronous condenser

## 0 引 言

电机在实际运行中常处于动态工况,其内部温度场会呈现显著的瞬态特性[1]。特别是在短路故障等工况下,电机关键部位的温度可能迅速飙升,极易超过材料的耐温阈值,进而引发绝缘材料加速老化、结构件的磁性质退化[2]。暂态传热研究不仅能够精确捕捉温度场的峰值及其动态变化过程,还能为电机的热安全设计提供关键依据,因此开展准确的电机暂态传热分析具有重要的工程意义[3-4]。电机的内部通常具有复杂的结构,如定、转子绕组和铁心以及各种端部结构件,为保证暂态传热计算结果的准确性,需要对电机各个结构的暂态传热特性进行准确计算。与此同时,暂态的传热计算需要计算多个时步,导致了计算量大和计算时间长的问题。因此,需要一种方法既能准确计算电机各个结构的暂态传热特性又能快速进行暂态传热计算。

在目前的电机暂态温度场计算中,主要有集总参数热网络法、有限元法和流固耦合法[5]。集总参数热网络法是将电机内部组件根据形状分成多个热阻单元[6-7],根据几何位置关系和热流路径将各个单元连接起来,形成全局的热阻网络。文献[7]提出一种考虑热参数变化的同步电机瞬态热网络模型,通过网络节点计算暂态温度。但是,集总参数法的计算结果为节点对应部件的平均温度[8-12],且对于复杂结构的模型无法做到精准建模,这就导致了不能准确考虑流体流动的散热,计算精度低,无法准确计算电机各个结构的暂态传热特性。有限元法常用于电机的电磁仿真,也可以用于温度场计算,需要建立电机的物理模型,在电机结构的表面设置边界条件,能够计算电机结构之间的热传导,并采用对流换热系数模拟流体流动的散热效果。文献[13]建立了蒸发冷却发电机的瞬态有限元传热模型,通过给定传热的边界条件计算负载变化过程中的暂态温度。文献[14]建立了大型水轮发电机的有限元模型,通过给定传热边界条件计算了不同短路故障下的暂态温升。但是,有限元法计算结果的准确度很大程度上依靠边界条件中的对流传热系数[15],且同一边界上的不同位置的流体流动特性会存在较大差异,无法准确考虑流体流动对散热的影响,因此也无法准确计算电机各个结构的暂态传热特性。

针对集总参数法和有限元法无法准确考虑流体流动的散热,进而导致无法准确计算电机各个结构的暂态传热特性的问题。学者们提出了流固耦合法[16],在有限元法的基础上引入了流体动力学的计算[17],通过求解复杂区域的流动特征来提高计算精度[18-20],兼顾了固体与固体,固体与流体之间的传热,能够准确计算电机各个结构的暂态传热特性[21-23],是温度场计算中精度最高的计算方法。文献[24]建立了300 Mvar同步调相机全域内流固耦合瞬态分析模型,研究了极限运行工况下的电机温度。文献[25]建立了核主泵屏蔽电机的流固耦合暂态传热模型,计算了冷却水断供下的温升。但是,矢量的求解比标量求解更复杂,流固耦合法中流体矢量的引入严重增加了求解的复杂度,导致迭代困难,并且在暂态传热计算的每一个时步中都需要对流体矢量进行求解,导致了计算时间长和计算资源要求高。

针对流固耦合法计算流体矢量导致的暂态计算时间长和资源要求高的问题,本文提出分离矢量法,在流固耦合法的基础上,将流体矢量作为常数分离仅对温度标量进行暂态求解,降低计算时长和对计算资源的要求。以一台300 Mvar空冷同步调相机为例,建立其端部的分离矢量暂态传热模型,通过2个工况下的实测温度验证分离矢量暂态传热模型的准确性。分别采用分离矢量法和传统的流固耦合法计算输电系统单相短路故障后100 s的同步调相机端部暂态传热,对比分析2种方法的计算过程与计算结果。

## 1　分离矢量法计算原理

流固耦合法将流体动力学与有限元结合,需要同时求解流体矢量和温度标量。流体矢量的求解需要分别计算不同方向分量所在的方程,一个流体矢量的求解需要计算多个方程,温度标量的求解只需要计算一个方程,由此可见,流体矢量的求解是限制流固耦合暂态计算时间与计算资源的主要原因。因此提出分离矢量法,将流体矢量作为已知量分离,只对温度标量进行暂态求解,降低对资源的要求,达到简化计算的目的。

提出的分离矢量法如图 1 所示,在电机的流固耦合暂态传热计算时,基于电机的结构和传热特点,分离矢量法要求计算的过程中模型的结构与网格划分均保持一致,对于转子结构件等能够使流体域改变的结构需要进行等效处理,并保留出风口,不应用于动网格。在 $t=0$ 时同时求解流体场与温度场,先计算流速矢量 $\boldsymbol{u}$,再计算温度标量 $T$, 计算过程与传统流固耦合计算相同,若计算结果收敛,则将计算结果作为迭代初值进行下一时步的计算,若计算结果不收敛则再次进行迭代求解直至达到收敛。在 $t>0$ 时仅求解温度场,由于模型的结构与网格不变,不考虑暂态过程流体的温升对流速的影响,将 $t=0$ 时得到的流体矢量作为已知量分离,后续只需要对标量 $T$ 进行暂态求解。

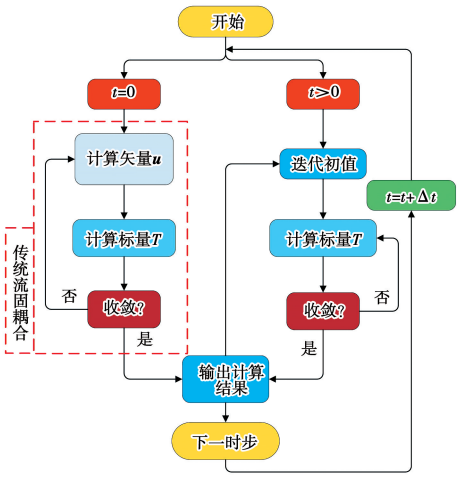



图 1　分离矢量法流程图

Fig. 1　Flow chart of separation vector method

流体的温升对流速的影响主要体现在影响流体的膨胀性和黏滞性。电机内的流体分为气体与液体,液体的膨胀系数小,温度升高体积基本不变;气体的膨胀系数大,但当气体的流速远远小于声速时,可以忽略气体温升对体积的影响。在电机的实际工程问题中,无论是液体还是气体,都可以认为是理想流体忽略黏滞性[26]。因此,在电机的暂态流热分析中,可以忽略流体的温升对流速的影响。

## 2　分离矢量暂态传热模型与实验验证

本文以一台 300 Mvar 空冷同步调相机为例,由于其端部具有复杂的端部结构件和绕组排列,暂态传热计算难度大,选取同步调相机的端部建立分离矢量暂态传热模型,通过 2 个工况下的温升实测数据验证分离矢量暂态传热模型的准确性。

### 2.1　物理模型与基本假设

同步调相机基本参数如表 1 所示,同步调相机端部结构如图 2 所示,包含定子绕组、定子铁心、转子铁心、励磁绕组、槽楔、护环、铁心间径向通风沟和大量端部结构件,如铜屏蔽、压圈、挡风板、远铁心压指、近铁心压指和磁屏蔽。铜屏蔽位于端部结构件的最上层,具有阻挡端部漏磁场的作用,且具有特殊的 2 层台阶结构,为了准确计算铜屏蔽的涡流损耗及后续的温度分布,将铜屏蔽进行分段处理,划分为 C1 ~ C4 四个部分。

表 1　同步调相机主要参数

Table 1　Main parameters of synchronous condenser

| 参数 | 数值 | 参数 | 数值 |
|---|---|---|---|
| 额定容量/Mvar | 300 | 额定转速/(r/min) | 3 000 |
| 额定电压/kV | 20 | 额定励磁电流/A | 2 381 |
| 额定频率/Hz | 50 | 定子外径/mm | 2 950 |
| 额定电流/A | 8 660.3 | 定子槽数 | 72 |

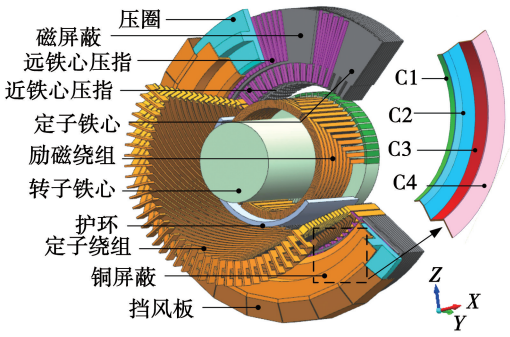



图 2　同步调相机端部结构

Fig. 2　End structure of synchronous condenser

将同步调相机的端部以及一层定子铁心作为流固耦合求解域,建立的分离矢量暂态传热模型如图 3所示,冷却空气在风扇的作用下从风扇入口沿轴向进入机壳内部。

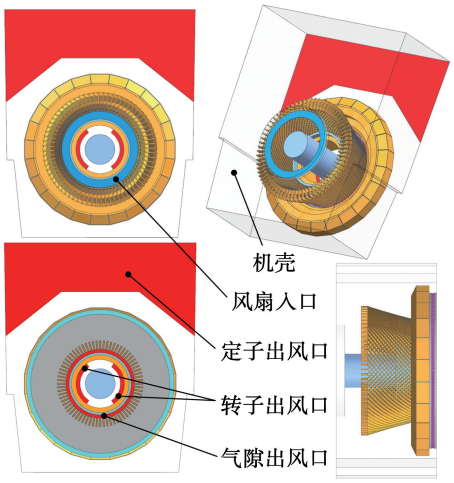



图 3 分离矢量暂态传热模型

Fig. 3 Separation vector transient heat transfer model

同步调相机端部的结构件数量多且结构复杂，为得到准确的暂态传热计算结果，需要针对暂态传热和暂态流动的特点对复杂区域进行针对性的网格划分。压圈的内侧与铜屏蔽间的气隙小，压圈的上侧与挡风板之间存在较大空间，压圈的外侧又紧贴挡风板，因此压圈表面的流体流动路径截面积为小－大－小，为准确计算压圈与流体的传热，需要将压圈的网格划分与流体保持相同的网格尺寸和曲率。铜屏蔽的损耗密度高且梯度大，对铜屏蔽的网格划分进行加密。分离矢量暂态传热模型剖分网格如图 4 所示，模型的网格为定网格采用四面体划分，共划分了 9 222 943 个单元。

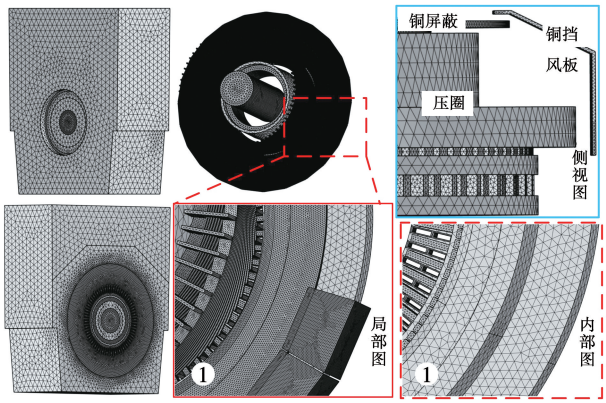



图 4 分离矢量暂态传热模型剖分网格

Fig. 4 Subdivision grid of separation vector transient heat transfer model

为简化计算，模型的基本假设与边界条件如下：

1）由于电机内流体的雷诺数远大于 2 300，流体流动属于湍流，采用标准 $k-\varepsilon$ 计算模型求解。

2）同步调相机冷却结构内的流体流速小于 0.3 马赫，将空气视为不可压缩流体。

3）忽略流体的重力和浮力的影响。

4）忽略转子旋转对流体的影响，将气隙和转子槽内的缝隙等效为气隙出风口和转子出风口。

5）由于励磁绕组位于护环内侧，护环内的冷却空气只从转子出风口流出，不流经定子端部区域，励磁绕组的温度对定子侧的温升影响小，因此将励磁绕组简化为一个圆环。

6）同步调相机风扇入口为速度入口，入口流速与入口温度通过实测值得到。

7）定子出风口、转子出风口和气隙出风口位于同一平面上，出口为 1 个标准大气压的压力出口。

## 2.2 数学模型

建立电机暂态传热分析的分离矢量法的数学模型。

流体流动计算方程为：

$$\left.\begin{aligned}
&\rho(\boldsymbol{u}\cdot\nabla)\boldsymbol{u} = \nabla\cdot(-PI+K);\\
&\rho(\boldsymbol{u}\cdot\nabla)k = \nabla\cdot\left[(\mu+\rho\frac{k^2}{10\varepsilon_0})\nabla k\right]+P_{\mathrm{k}}-\rho\varepsilon;\\
&\rho(\boldsymbol{u}\cdot\nabla)\varepsilon = \nabla\cdot\left[(\mu+\rho\frac{3k^2}{40\varepsilon_0})\nabla\varepsilon\right]+\\
&\qquad 1.5\frac{\varepsilon}{k}P_{\mathrm{k}}-2\rho\frac{\varepsilon^2}{k}。
\end{aligned}\right\} \tag{1}$$

其中：$P_{\mathrm{k}}=\mu_{\mathrm{T}}\{\nabla\boldsymbol{u}:[\nabla\boldsymbol{u}+(\nabla\boldsymbol{u})^{\mathrm{T}}]\}$；$\rho\nabla\cdot\boldsymbol{u}=0$；$K=(\mu+\rho\frac{k^2}{10\varepsilon_0})[\nabla\boldsymbol{u}+(\nabla\boldsymbol{u})^{\mathrm{T}}]$；$t$ 为时间；$\rho$ 为密度；$k$ 为湍流动能；$P$ 为流体压力；$\varepsilon$ 为湍流耗散率；$\mu$ 为流体的动力黏度。

流体暂态传热计算方程为

$$\rho C_{\mathrm{p}}\frac{\partial T}{\partial t}+\rho C_{\mathrm{p}}\boldsymbol{u}\cdot\nabla T+\nabla\cdot q=Q。 \tag{2}$$

其中：$q=-\lambda\nabla T$；$T$ 为温度；$\lambda$ 为导热系数；$C_{\mathrm{p}}$ 为比热容；$Q$ 为热源。

固体暂态传热计算方程为

$$\rho C_{\mathrm{p}}\frac{\partial T}{\partial t}+\nabla\cdot q=Q。 \tag{3}$$

## 2.3 实验验证

为验证分离矢量暂态传热模型的准确性，以过励和欠励工况为例，将分离矢量暂态传热模型得到的结果与实测数据进行对比，同步调相机运行现场如图 5 所示，测温元件位置如图 6 所示。在铜屏蔽内圆的 2 点钟、6 点钟和 10 点钟方向分别放置了 Ta、Tb 和 Tc 三个 Pt100 热电阻测温元件。同步调相

机端部铜屏蔽内侧表面 6 点钟方向 Tb 测温元件处的温度最高,将 Tb 测温元件处的计算数据与实测数据进行对比。



图 5　同步调相机运行现场

Fig. 5　Operation site of synchronous condenser

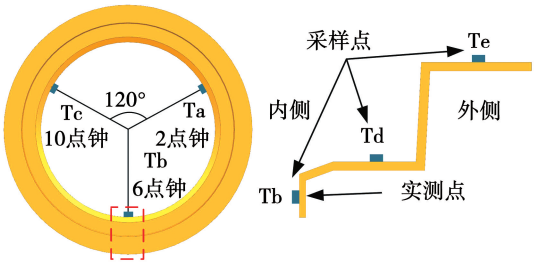



图 6　测温元件位置与采样位置

Fig. 6　Temperature measuring element position and sampling position

通过实测无功输出、实测风扇入口流速和实测风扇入口温度,准确计算发热和散热过程。为了将暂态计算得到的温度结果与稳态的实测温度进行对比,分别计算了空载工况到过励和欠励工况的传热过程,传热时长为 12 h,结构件的温度达到稳定。过励和欠励下的实测值与计算值如表 2 所示,12 h 的过励和欠励工况下铜屏蔽温度如图 7 所示,计算值与实测值误差较小,满足工程需要,可以验证分离矢量暂态传热模型的准确性。

表 2　过励和欠励下的实测值与计算值

Table 2　Measured and calculated values under over-excitation and under-excitation

| 参数 | 过励工况 | 欠励工况 |
|---|---|---|
| 实测无功输出/Mvar | 296.5 | 148.1 |
| 实测风扇入口流速/(m/s) | 70.45 | 70.45 |
| 实测风扇入口温度/℃ | 38.39 | 36.87 |
| 铜屏蔽实测点温度/℃ | 64.0 | 67.9 |
| 铜屏蔽实测点计算温度/℃ | 64.7 | 68.8 |

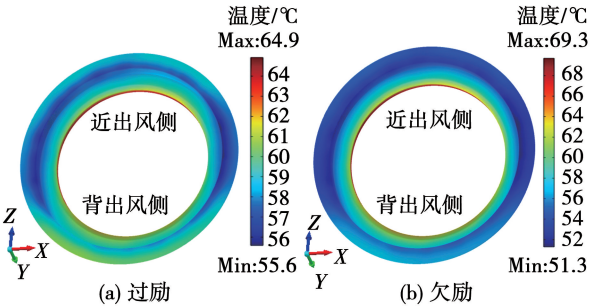



图 7　过励和欠励工况下铜屏蔽温度

Fig. 7　Temperature of copper shielding under over-excitation and under-excitation conditions

## 3　分离矢量法与传统流固耦合法对比

为体现分离矢量法相比传统流固耦合法的优势,对比 2 种方法的计算过程与计算结果。单相短路故障作为输电系统常见的短路故障,导致端部磁场快速变化,结构件内产生大量涡流损耗,温度升高超过最大允许温度,因此以高压直流输电(high voltage direct current,HVDC)系统整流侧单相短路故障为例,计算并对比输电系统单相短路故障后 100 s 的同步调相机端部结构件暂态温升。

### 3.1　端部结构件热源

通过同步调相机的机 – 网双向耦合模型计算单相短路故障下定转子电流,通过同步调相机端部模型计算端部结构件损耗。单相短路过程中端部结构件的暂态损耗如图 8 所示,400 ms 时结构件产生的损耗达到稳定。故障瞬间结构件的损耗高于故障稳定时,铜屏蔽是涡流损耗最多的端部结构件,故障瞬间产生的涡流损耗是稳定时的 2.3 倍,且铜屏蔽的体积小损耗密度极大。压圈、远铁心压指和挡风板故障瞬间产生的涡流损耗是稳定时的 1.5 倍。

单相短路故障过程中铜屏蔽不同区段的暂态损耗如图 9 所示,铜屏蔽的结构特殊且产生的涡流损耗大,导致了铜屏蔽不同区段的损耗差异较大,C1 区段距离转子最近,产生的涡流损耗最高,C4 区段产生的涡流损耗仅少于 C1 区段,C3 区段产生的涡流损耗最低,与 C1 区段相差 25 倍。铜屏蔽的损耗分布与涡流分布相同,通过某一时刻电密分布观察该时刻的损耗分布,8.3 ms 为故障瞬间的最严重时刻,电流密度最高为 $7\times10^7$ A/m$^2$,208.3 ms 故障基本稳定,电流密度最高为 $4\times10^7$ A/m$^2$。

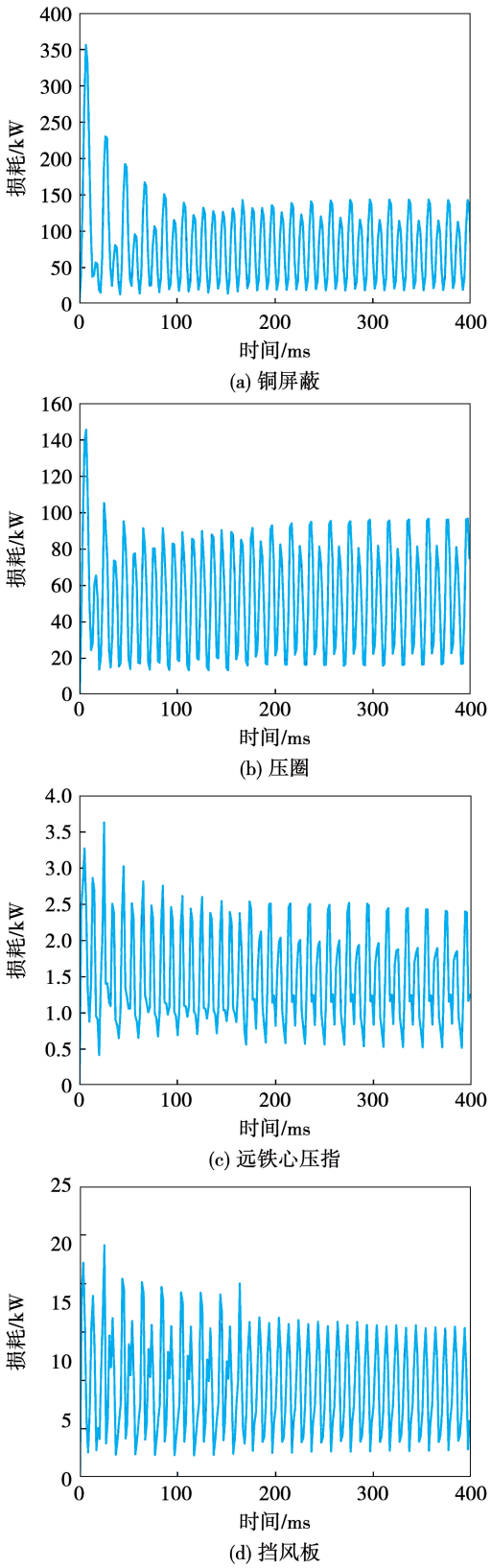



图 8 端部结构件暂态损耗

Fig. 8 Transient loss of end structure

### 3.2 计算过程对比

为比较分离矢量法计算过程上的优势,对比了分离矢量法与传统流固耦合法的计算时间和求解所需内存如表 3 所示。由于 $t=0$ 时 2 种方法的计算步骤相同,因此对比 $t>0$ 的暂态计算过程。分离矢量法的计算时间仅占传统流固耦合法的 7.7%,分离矢量法求解所需内存仅占传统流固耦合法的 64.4%。这是由于分离矢量法减少了矢量的求解,相比于传统流固耦合法的求解时占用的内存更少,计算时间能更快。

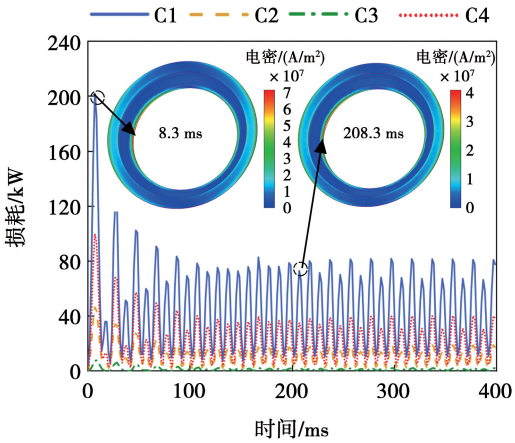



图 9 铜屏蔽不同区段暂态损耗

Fig. 9 Transient loss of copper shielding in different sections

表 3 分离矢量法与传统流固耦合法暂态计算过程对比

Table 3 Comparison of transient calculation process between separation vector method and traditional fluid-solid coupling method

| 参数 | 分离矢量法 | 传统流固耦合法 |
|---|---|---|
| 计算时间 | 1 小时 17 分 | 16 小时 34 分 |
| 求解所需内存 | 35.17 GB | 54.64 GB |

### 3.3 流体计算结果对比

由于分离矢量法将流体矢量分离,为对比分离矢量法与传统流固耦合法在流体计算结果上的差异,将 2 种方法的流体计算结果进行对比。同步调相机端部三维流线如图 10(a)所示,冷却空气从风扇入口流入后,大部分经过定子绕组流向端部结构件,随后从定子出风口流出,少部分直接从转子出风口和气隙出风口流出。为进一步对比分析端部结构件处的流速分布,沿流体域中心线绘制 $M$ 截面。$M$ 截面的流速分布如图 10(b)所示,分离矢量法与传统流固耦合法端部结构件处的流速对比如图 10(c)所示,冷却空气在挡风板周围形成了较多涡流,铜屏蔽和压圈周围的冷却空气流入了挡风板与压圈之间的空间,并形成了涡流。可见,分离矢量法得到的流体计算结果与传统流固耦合法的流体计算结果无明

显差异,能够准确计算流体分布。

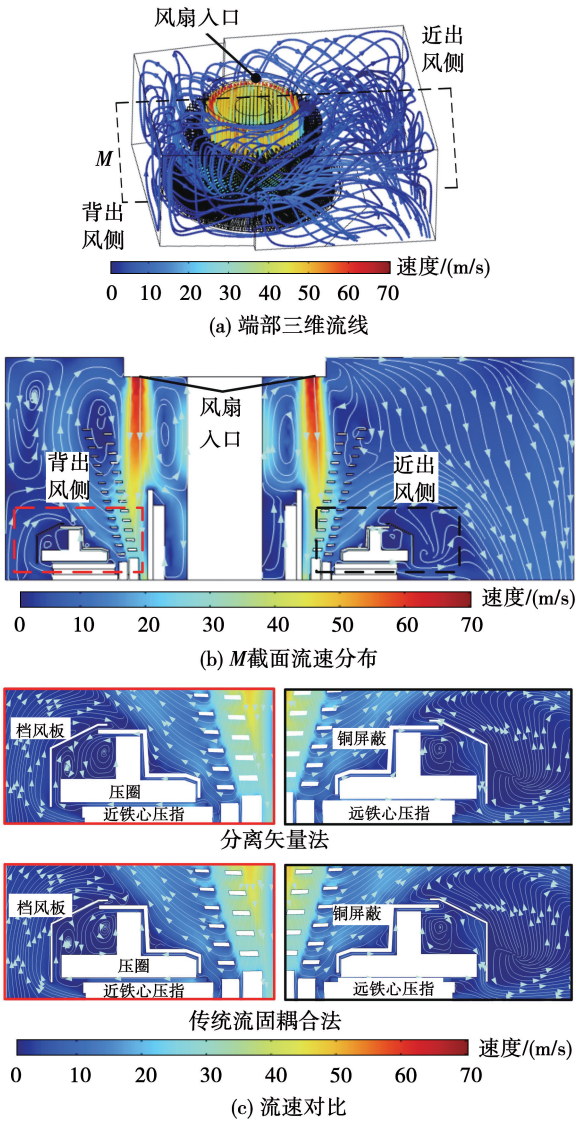



**图 10　流体对比**

**Fig. 10　Fluid comparison**

### 3.4　温度计算结果对比

为对比分离矢量法与传统流固耦合法在温度计算结果上的差异,将 2 种方法的温度计算结果进行对比。分离矢量法与传统流固耦合法得到的铜屏蔽温度分布如图 11(a)所示,铜屏蔽的 C1 区段温度最高,C4 区段温度最低,分离矢量法得到的铜屏蔽最高温度为 156.79 ℃,传统流固耦合法得到的铜屏蔽最高温度为 156.56 ℃。铜屏蔽最高温度的暂态变化对比如图 11(b)所示,2 种方法的铜屏蔽温升曲线高度重合,呈现抛物线的形式。分离矢量法不考虑空气温升对流速的影响所造成的差异较小。

分离矢量法与传统流固耦合法得到的压圈温度分布如图 12(a)所示,压圈外侧的挡风板阻碍了流体流动,导致压圈外侧被挡风板覆盖处温度高,挡风板之间的缝隙处温度低,分离矢量法与传统流固耦合法得到的压圈最高温度分别为 48.80 ℃和 48.79 ℃。压圈最高温度的暂态变化对比如图 12(b)所示,2 种方法的压圈温升曲线高度重合,呈现近似线性的形式。

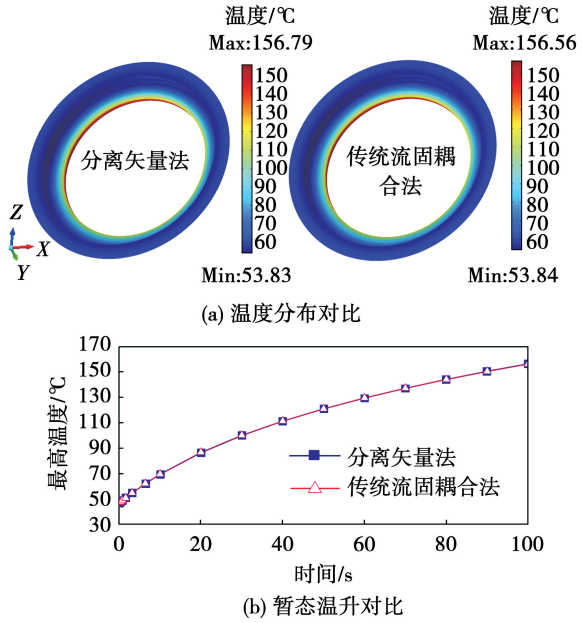



**图 11　铜屏蔽温度对比**

**Fig. 11　Comparison of copper shielding temperature**

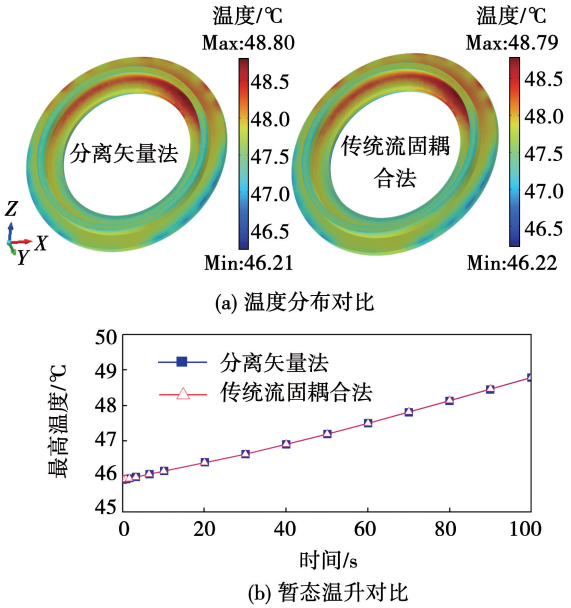
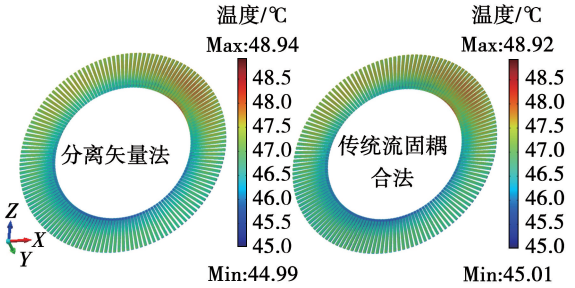



**图 12　压圈温度对比**

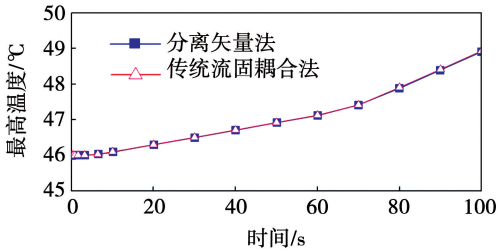
**Fig. 12　Comparison of pressure ring temperature**

分离矢量法与传统流固耦合法得到的远铁心压指温度分布如图 13(a)所示,远铁心压指的温度为内侧温度低外侧温度高,分离矢量法与传统流固耦合法得到的远铁心压指最高温度分别为 48.94 ℃和 48.92 ℃。

远铁心压指最高温度变化对比如图 13(b)所示，2 种方法的远铁心压指温升曲线高度重合，在 60 s 前温度升高速度缓慢，60 s 后温度升高速度加快。




(a) 温度分布对比

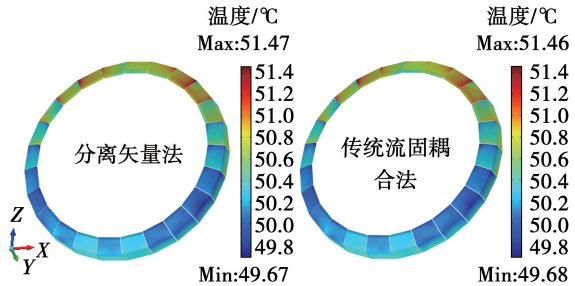



(b) 暂态温升对比

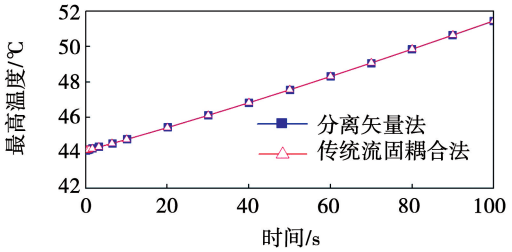
图 13 远铁心压指温度对比

**Fig. 13 Comparison of temperature of far iron core pressing finger**

分离矢量法与传统流固耦合法得到的挡风板温度分布如图 14(a)所示，挡风板的温度为内侧温度低外侧温度高，分离矢量法与传统流固耦合法得到的挡风板最高温度分别为 51.47 ℃和 51.46 ℃。挡风板最高温度的暂态变化对比如图 14(b)所示，2 种方法的挡风板温升曲线高度重合。




(a) 温度分布对比



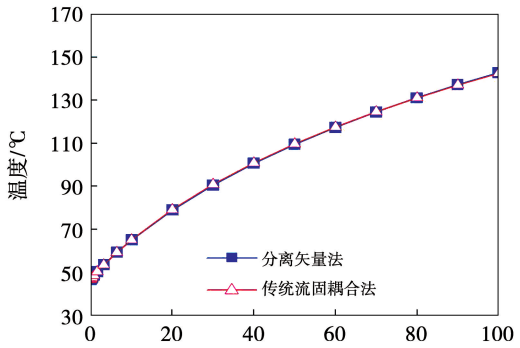

(b) 暂态温升对比

图 14 挡风板温度对比

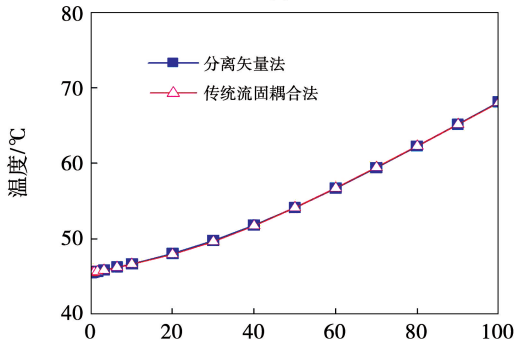
**Fig. 14 Comparison of windshield temperature**

由于铜屏蔽的温度最高且 2 种方法计算结果的差异最大，因此以铜屏蔽为例，进一步对比结构件不同位置分离矢量法与传统流固耦合法的计算结果。铜屏蔽的 C1 区段温度最高，设置采样点 Tb，在铜屏蔽的 2 层台阶上分别设置采样点 Td 和 Te。

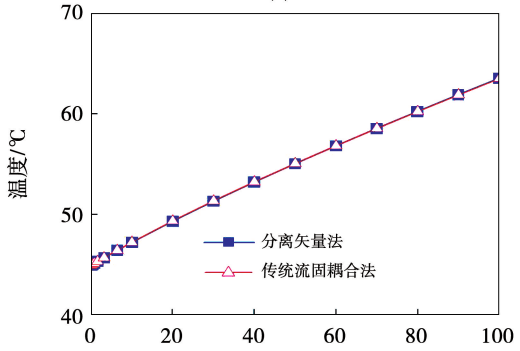
分离矢量法与传统流固耦合法在铜屏蔽采样点的温度对比如图 15 所示，Tb 采样点 2 种方法的计算结果差异最大为 0.16%。在不同的采样点中，温度升高的趋势有所差别，分别呈现抛物线、指数和线性的形式。但是，分离矢量法与传统流固耦合法计算得到的温升曲线均高度重合，2 种方法在结构件不同位置的温度计算结果依然基本相同。




(a) Tb




(b) Td




(c) Te

图 15 铜屏蔽采样点温度对比

**Fig. 15 Comparison of copper shielding sampling point temperature**

## 4 结　论

针对实际工程中电机面临故障工况需要进行准确暂态传热分析时,有限元法与热网络法精度低计算不准确,流固耦合法计算资源大时间长的问题,提出了用于电机流固耦合暂态传热分析的新型分离矢量法,并以一台 300 Mvar 同步调相机的端部为例计算其暂态传热,对比分析了分离矢量法与传统流固耦合法的计算过程与计算结果。得出如下结论:

1)基于电机的结构和传热特点,提出了分离矢量法,在流固耦合法的基础上,将流体矢量作为已知量分离,仅对温度标量进行暂态求解,相比于传统流固耦合法求解时需要的内存更少,计算时间更快。

2)建立了同步调相机端部的分离矢量暂态传热模型,分别采用过励和欠励工况下的温度实测数据验证了分离矢量暂态传热模型的准确性,过励工况下温度误差为 0.7 ℃,欠励工况下温度误差为 0.9 ℃。

3)对比分析分离矢量法和传统流固耦合法的计算过程与计算结果。以输电系统单相短路故障下的同步调相机端部结构件损耗作为热源,计算故障后 100 s 的端部结构件暂态传热。在计算过程上,分离矢量法的计算时间仅占传统流固耦合法的 7.7%,求解所需内存仅占传统流固耦合法的 64.4%。在计算结果上,2 种方法的流体计算结果无明显差异,得到的温升曲线与温度分布趋势高度一致,温度数值最大相差 0.16%,电机内气体的温升对流速的影响很小。

**参 考 文 献:**


[1] MADONNA Vincenzo, GIANGRANDE Paolo, LUSUARDI Luca, et al. Thermal overload and insulation aging of short duty cycle, aerospace motors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(4): 2618.

[2] DONG Tenghui, ZHANG Xi, ZHOU Fei, et al. Correction of winding peak temperature detection in high-frequency automotive electric machines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(7): 5615.

[3] 郭强, 李志强. 同步调相机发展综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(15): 6050.
GUO Qiang, LI Zhiqiang. Summarization of synchronous condenser development[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(15): 6050.

[4] 汪冬梅, 李思义, 梁艳萍. 新能源汽车驱动电机热设计与热管理技术研究综述[J/OL]. 电工技术学报, 1-26[2026-01-16]. https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.250189.
WANG Dongmei, LI Siyi, LIANG Yanping. Comprehensive review of thermal design and thermal management technologies for new energy vehicle drive motors[J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1-26[2026-01-16]. https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.250189.

[5] XU Ziyi, XU Yongming, GAI Yaohui, et al. Thermal management of drive motor for transportation: analysis methods, key factors in thermal analysis, and cooling methods—a review[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(3): 4751.

[6] 张健, 朱锡庆, 张卓然,等. 电励磁双凸极无刷直流发电机热网络建模与热特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 318.
ZHANG Jian, ZHU Xiqing, ZHANG Zhuoran, et al. Thermal network modeling and thermal characteristics analysis of doubly salient brushless DC generator with stator field winding[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 318.

[7] CHENG Shucan, ZHAO Yanpu, XIE Kejia, et al. A novel method for fast computation of the temperature rise and optimal design of GIL based on thermal network model[J]. Energy, 2024, 289(130034): 360.

[8] SONG Zaixin, HUANG Rundong, WANG Wusen, et al. An improved dual iterative transient thermal network model for PMSM with natural air cooling[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(4): 2588.

[9] NATEGH Shafigh, ZHANG Hui, WALLMARK Oskar, et al. Transient thermal modeling and analysis of railway traction motors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(1): 79.

[10] ZHAO Wenxiang, CAO Donghui, JI Jinghua, et al. A generalized mesh-based thermal network model for SPM machines combining coupled winding solution[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(1): 116.

[11] BOGLIETTI Aldo, CARPANETO Enrico, COSSALE Marco, et al. Stator-winding thermal models for short-time thermal transients: definition and validation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(5): 2713.

[12] WANG Likun, SHEN Fengyu, MARIGNETTI Fabrizio, et al. Transient thermal exchange analysis of an external rotor hub motor for electrified defense vehicles applications based on FVM and TNM[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 10(1): 1116.

[13] CHEN Jinxiu, RUAN Lin. The stator bar's transient temperature characteristic of evaporative cooling generator-motor[C]// 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), October 22-25, 2014, Hangzhou, China. 2014: 339-343.

[14] HU Qingling, XIAO Ke, ZHOU Zhiting, et al. 3D transient electromagnetic-temperature field analysis of the loss and heat of the damper bars of a large tubular hydro-generator during short circuit faults[J]. IEEE Access, 2020, 8: 135963.

[15] LIU Xiaomei, GERADA David, XU Zeyuan, et al. Effective

thermal conductivity calculation and measurement of Litz wire based on the porous metal materials structure[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(4): 2667.

[16] WANG Likun, LI Yuan, MARIGNETTI Fabrizio, et al. Coupled fluid-solid heat transfer of a gas and liquid cooling PMSM including rotor rotation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(1): 443.

[17] KIM Chiwon, LEE Kwansoo. Numerical investigation of the air-gap flow heating phenomena in large-capacity induction motors [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 110: 746.

[18] YANG Sungjin, JUNG Yunju, SEO Jungmoo, et al. Numerical and experimental study on the cooling performance affected by ventilation holes of a BLDC motor for multi-copters[C]// 2018 IEEE 18th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), August 26 – 30, 2018, Budapest, Hungary. 2018: 293 – 298.

[19] 谢颖, 范伊杰, 蔡蔚, 等. 油冷式扁线电机油路结构优化设计及温度场计算[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(5): 37.
XIE Ying, FAN Yijie, CAI Wei, et al. Oil circuit structure optimization design and temperature field calculation of oil cooled motor with hairpin winding[J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(5): 37.

[20] ROCCA Salvatore La, PICKERING Stephen J, EASTWICK Carol N, et al. Fluid flow and heat transfer analysis of TEFC machine end regions using more realistic end-winding geometry[J]. The Journal of Engineering, 2019, 17: 3831.

[21] 边旭, 孟雨鹏, 梁艳萍, 等. 计及复杂换位结构的百万千瓦级汽轮发电机定子流固耦合传热研究[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(13): 5328.
BIAN Xu, MENG Yupeng, LIANG Yanping, et al. Study of fluid-solid coupled heat transfer in stator of million-kilowatt-class turbo-generator with complex transposition structure[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(13): 5328.

[22] 王立坤, 毕晓帅, 朱志佳, 等. 特高压输电用同步调相机端部涡流损耗及流固耦合传热研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(5): 1968.
WANG Likun, BI Xiaoshuai, ZHU Zhijia, et al. Research on eddy current loss and fluid-solid coupling heat transfer in the end region of synchronous condenser for UHV transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(5): 1968.

[23] 夏云彦, 邵远亮, 陈志成, 等. 中型高压电动机暂态温度场分析及短时过载运行研究[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(5): 88.
XIA Yunyan, SHAO Yuanliang, CHEN Zhicheng, et al. Transient temperature field analysis and short-term overload operation of medium and high voltage motor[J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(5): 88.

[24] 王立坤, 宋旭升, 寇宝泉, 等. 电网电压跌落下基于二分迭代和NITA法的同步调相机全域瞬态流热分析[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(20): 8292.
WANG Likun, SONG Xusheng, KOU Baoquan, et al. Global transient flow and heat analysis of synchronous condenser based on dichotomy iteration and NITA method under voltage drop in power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(20): 8292.

[25] 路义萍, 艾丽昆, 孙海锋, 等. 二次水断供核主泵屏蔽电机冷却水瞬态热分析[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(14): 5756.
LU Yiping, AI Likun, SUN Haifeng, et al. Transient thermal analysis of cooling water of a canned motor for the nuclear main pump under secondary water supply outage condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(14): 5756.

[26] 魏永田. 电机内热交换[M]. 北京: 机械工程出版社, 1998.

(编辑:刘琳琳)