DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.6.353 **中图分类号**：TD608 **文献标志码**：A

基于电热耦合的矿用变频器温度场分析

程照虎[1,2]，王 越[1,2]，荣 相[1,2]，史 晗[1,2]
(1.中煤科工集团常州研究院有限公司，常州 213015；2.天地(常州)自动化股份有限公司，常州 213015)

摘要：矿用变频器一般工作在密闭空间中，电热耦合效应显著，易导致热退化和热失效。另外，矿用变频器和电机通常采用长电缆连接，故需要考虑电缆带来的高频负面效应。以630 kW/1 140 V四象限矿用变频器为对象，建立其一体化电热耦合模型并对其相关特性进行研究分析。首先，建立了矿用变频器的高频电路模型；其次，研究了各功率器件损耗受温度影响的机理，分析了部分损耗随温度的非线性关系，推导了各损耗随温度变化的解析模型；最后，分析了高频电路模型、损耗模型及温度场模型之间的耦合关系，建立了矿用变频器的一体化电热耦合模型。耦合仿真结果表明了电热耦合建模的必要性，且温度的实验和仿真结果最大误差仅为0.9 ℃，验证了所建模型的准确性。

关键词：矿用变频器；高频电路模型；损耗模型；电热耦合

Analysis of Temperature Field of Mine Inverter Based on Electric-thermal Coupling

CHENG Zhaohu[1,2], WANG Yue[1,2], RONG Xiang[1,2], SHI Han[1,2]
(1. CCTEG Changzhou Research Institute Co., Ltd., Changzhou 213015, China; 2. Tiandi (Changzhou) Automation Co., Ltd., Changzhou 213015, China)

Abstract: Mine inverters typically operate in enclosed spaces where the thermal-electric coupling effect is significant, leading to thermal degradation and thermal failure. Additionally, mine inverters and motors are often connected by long cables, necessitating a consideration of the high-frequency negative effects of these cables. A 630 kW/1 140 V four-quadrant mine inverter is taken as a research object, its integrated thermal-electric coupling model is established, and its relevant characteristics are analyzed. First, a high-frequency circuit model of the mine inverter is constructed. Second, the mechanism by which the losses of various power devices are affected by temperature is studied, the nonlinear relationship between temperature and some losses is analyzed, and analytical models for losses changing with temperature are derived. Finally, the coupling relationship between the high-frequency circuit model, loss model and temperature field model is analyzed, and the integrated thermal-electric coupling model of the mine inverter is built. The simulation results of coupling demonstrate that it is necessary to perform thermal-electric coupling modeling, and the maximum error between experimental and simulation temperature results is only 0.9 ℃, validating the accuracy of the established model.

Keywords: Mine inverter; high-frequency circuit model; loss model; electric-thermal coupling

收稿日期：2024-06-03；**修回日期**：2024-08-01，2024-08-14；
录用日期：2024-09-02；**网络首发日期**：2024-09-26
基金项目：天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项资助项目(2023-TD-ZD001-006)
This work is supported by Science and Technology Innovation and Entrepreneurship Finance Project of Tiandi Science & Technology Co., Ltd. under the grant 2023-TD-ZD001-006

变频器在煤矿节能减排、提高生产效率、延长设备寿命、改善生产环境及实现智能化管理等方面具有关键作用。然而，矿用变频器在现场工作环境下所面临的挑战也日益凸显。一是现场工作环境较为封闭，散热性能不佳，电热耦合特性易导致损耗进一步增加和积累，威胁变频器运行的安全[1]；

二是矿用变频器与电机经常处于不同位置，需要用长电缆连接，会带来高频负面效应，增加性能分析难度[2]。因此，必须对变频器进行有效的散热设计和准确的电热耦合分析。

目前，诸多专家学者对变频器相关功率器件的电热耦合特性进行了研究。文献[3]考虑 H 桥逆变器中绝缘栅双极型晶体管 IGBT(insulated gate bipolar transistor)模块的热耦合效应，建立了传热系统模型，在电热耦合的基础上提出了复合观测器用于提高结温提取精度；文献[4]建立了金属化薄膜、电容器单体与电容器整机的电-热-力多场耦合模型，分析了模块化多电平换流器子模块在常见谐波环境下，电容器内部多物理场特性；文献[5]开发了一种基于共轭梯度法的晶闸管电热耦合模型快速求解方法。然而，对矿用变频器整体的电热耦合特性的研究相对匮乏，且上述对单个器件的电热耦合计算方法均是针对器件自身特性进行设计的，难以用于变频器整体的电热耦合计算。文献[6]虽建立了矿用变频器的一体化热模型，考虑了不同器件之间的热交换作用，但并未考虑温度对功率器件损耗和关键电气性能的影响，且未建立适用于矿用变频器的一体化电热耦合模型，导致不能全面准确地分析矿用变频器的温度特性。

因此，在变频器的温升仿真过程中，考虑电热耦合特性的各器件损耗的快速计算方法尤为重要。现有研究成果已能较为精确地计算各功率器件的损耗。其中，IGBT 的损耗解析模型已考虑了温度的影响[7]，并且相关专家学者在不断提出性能更优的混合型热模型[8-9]；但母排、电抗器的损耗模型仍未考虑温度的影响，母排的损耗模型结合了集肤效应对其导电性能的影响[10]，电抗器的研究集中于绕组直流损耗、绕组交流损耗及结构件涡流损耗的计算方法[11]，现有损耗模型均不能直接用于电热耦合仿真。

针对上述问题，本文以 630 kW/1 140 V 四象限矿用变频器为研究对象，首先，建立了矿用变频器的高频电路模型，用于精确计算各功率器件的电压电流参数。接着，分析了变频器中各功率器件受温度影响的内在机理，建立考虑温度影响的关键器件损耗的解析模型。然后，结合高频电路模型的精确计算优势和损耗解析模型的快速计算优势，实现变频器各器件损耗的快速精确计算。最后，基于矿用变频器的电热双向耦合仿真，全面准确地分析变频器的热特性。

1 矿用变频器高频电路建模

本文以 630 kW/1 140 V 四象限矿用变频器为研究对象，主电路拓扑如图 1 所示。

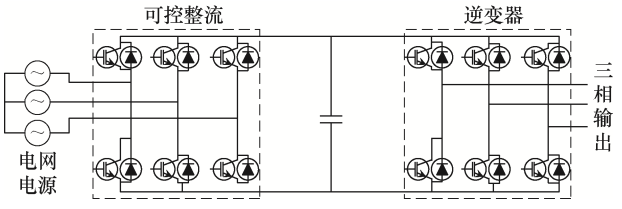


图 1 四象限矿用变频器主电路拓扑示意

Fig. 1 Schematic of main circuit topology of four-quadrant mine inverter

为后续准确计算变频器各关键器件的损耗，本节建立变频器的高频电路模型，得出各器件的精确电压电流参数。

影响矿用变频器高频电气特性的关键器件主要包含 IGBT、叠层母排、输出电力电缆这 3 个部分。为了考虑长电缆带来的高频负面效应，提高变频器电气特性的计算精度，一方面需要建立上述 3 个关键器件的高频模型。IGBT 的高频模型采用 PSIM 软件中的 2 级模型，并结合生产厂商提供的关键数据进行参数修正，同时考虑 IGBT 瞬态的开通关断特性及输入输出电容等寄生参数。针对叠层母排的高频建模，本文采用 ANSYS Q3D 进行寄生参数提取。电力电缆的高频模型考虑了分布电阻、分布电感以及分布电容参数。另一方面，本文设计的矿用变频器采用 LRC 滤波器。

通过上述关键部件的高频建模，可建立变频器高频电路模型，如图 2 所示。图中各变频器关键器件均进行了高频建模，考虑了寄生参数的影响，其中，整流侧和逆变侧中各阻抗元件包括了母排各部分的杂散电感和等效电阻。

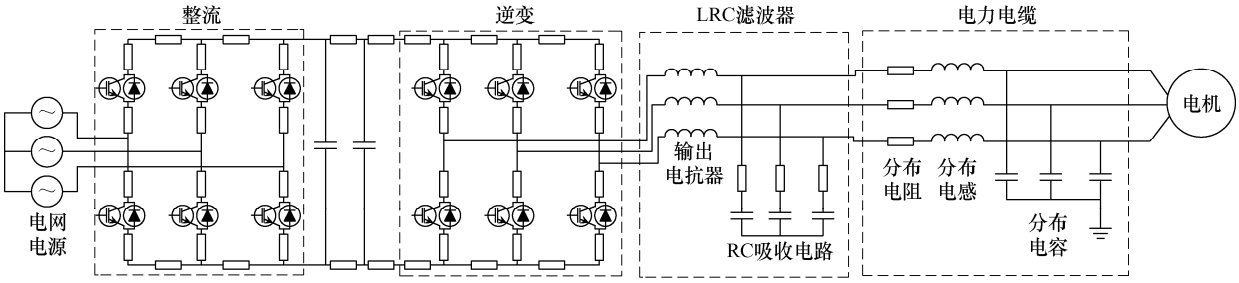


图 2　矿用变频器高频电路模型

Fig. 2 High-frequency circuit model of mine inverter

2　温度对关键器件的损耗影响分析

温度会直接影响变频器关键器件的性能参数,导致损耗数值增大和分布情况改变。受温度影响的器件主要包括 IGBT、电抗器、母排、吸收电阻等。

2.1　温度对 IGBT 模块损耗的影响分析

对于 IGBT，需考虑的受温度影响的参数包括门极阈值电压、跨导及饱和电压，分别表示为

$$U_{\mathrm{th}}(T_{\mathrm{j}})=U_{\mathrm{th}}(T_0)-\alpha(T_{\mathrm{j}}-T_0) \tag{1}$$

$$g_{\mathrm{m}}(T_{\mathrm{j}})=g_{\mathrm{m}}(T_0)\left(\frac{T_0}{T_{\mathrm{j}}}\right)^{\beta} \tag{2}$$

$$U_{\mathrm{sat}}(T_{\mathrm{j}})=U_{\mathrm{sat}}(T_0)+\gamma(T_{\mathrm{j}}-T_0) \tag{3}$$

式中：U_{th}、g_{m}、U_{sat} 分别为门极阈值、跨导、饱和电压；T_{j} 为当前 IGBT 实际结温；T_0 为初始温度；α、β、γ 分别为各 IGBT 参数的温度系数[12]。

变频器选用的 IGBT 模块为英飞凌科技股份公司的 FZ800R33KF2C。结温为 25 ℃时，IGBT 各性能参数分别为 $U_{\mathrm{th}}=5.1\,\mathrm{V}$、$g_{\mathrm{m}}=260\,\mathrm{S}$、$U_{\mathrm{sat}}=3.4\,\mathrm{V}$。根据手册数据推算，各参数的温度系数分别为 $\alpha=6\,\mathrm{mV/K}$、$\beta=0.36$、$\gamma=9\,\mathrm{mV/K}$。

考虑脉冲宽度调制 PWM(pulse width modulation)正弦形的占空比，IGBT 的导通损耗为

$$P_{\mathrm{cond(T)}}=\left(\frac{1}{2\pi}+\frac{m\cdot\cos\varphi}{8}\right)U_{\mathrm{sat}}(T_{\mathrm{j}})\cdot I_{\mathrm{m}} \tag{4}$$

式中：m 为调制比；$\cos\varphi$ 为功率因数；I_{m} 为输出电流幅值。

将开关损耗简化为与集电极电流的线性关系，可表示为

$$P_{\mathrm{sw(T)}}=f_{\mathrm{sw}}(E_{\mathrm{on(T)}}+E_{\mathrm{off(T)}})\frac{\sqrt{2}}{\pi}\frac{I_{\mathrm{out}}}{I_{\mathrm{ref(T)}}}\left(\frac{U_{\mathrm{dc}}}{U_{\mathrm{ref(T)}}}\right)^{K_{u(\mathrm{T})}}\cdot[1+TC_{\mathrm{Esw(T)}}(T_{\mathrm{j}}-T_{\mathrm{ref(T)}})] \tag{5}$$

式中：f_{sw} 为开关频率；$E_{\mathrm{on(T)}}$、$E_{\mathrm{off(T)}}$ 分别为参考导通损耗和关断损耗；I_{out} 为 IGBT 工作电流；$I_{\mathrm{ref(T)}}$、$U_{\mathrm{ref(T)}}$ 和 $T_{\mathrm{ref(T)}}$ 分别为参考电流、参考电压和参考温度；U_{dc} 为母线电压；$K_{u(\mathrm{T})}$ 为开关损耗电压关系的指数参数，一般为 1.3~1.4；$TC_{\mathrm{Esw(T)}}$ 为开关损耗的温度系数，$TC_{\mathrm{Esw(T)}}=0.003\ 1/\mathrm{K}$。

对于 IGBT 模块中的反并联二极管,其导通损耗与 IGBT 类似，主要取决于门限电压，该电压也直接受到温度的影响。该二极管的导通损耗可表示为

$$P_{\mathrm{cond(D)}}=\left(\frac{1}{2\pi}-\frac{m\cdot\cos\varphi}{8}\right)U_{\mathrm{F0}}(T_{\mathrm{j}})\cdot I_{\mathrm{m}} \tag{6}$$

式中，U_{F0} 为反并联二极管的门限电压。

反并联二极管的开关损耗近似为

$$P_{\mathrm{sw(D)}}=f_{\mathrm{sw}}E_{\mathrm{rr}}\left(\frac{\sqrt{2}}{\pi}\frac{I_{\mathrm{out}}}{I_{\mathrm{ref(D)}}}\right)^{K_{i(\mathrm{D})}}\left(\frac{U_{\mathrm{dc}}}{U_{\mathrm{ref(D)}}}\right)^{K_{u(\mathrm{D})}}\cdot[1+TC_{\mathrm{Err(D)}}(T_{\mathrm{j}}-T_{\mathrm{ref(D)}})] \tag{7}$$

式中：E_{rr} 为反向恢复能量；$I_{\mathrm{ref(D)}}$、$U_{\mathrm{ref(D)}}$ 和 $T_{\mathrm{ref(D)}}$ 分别为二极管损耗的参考电流、参考电压及参考温度；$K_{i(\mathrm{D})}$ 为开关损耗电流关系的指数参数，$K_{i(\mathrm{D})}=0.6$；$K_{u(\mathrm{D})}$ 为二极管开关损耗电压关系的指数参数，$K_{u(\mathrm{D})}=0.6$；$TC_{\mathrm{Err(D)}}$ 为二极管开关损耗的温度系数，$TC_{\mathrm{Err(D)}}=0.006\ 1/\mathrm{K}$[7]。

2.2　温度对阻性器件的损耗影响分析

温度对母排、吸收电阻及充放电电阻的损耗影响主要源于材料电阻率随温度的变化，以典型的铜为例，其电阻率随温度的变化关系为

$$\rho(T)=\rho_0[1+\alpha(T-T_0)] \tag{8}$$

式中：ρ 为电阻率；T 为实际温度；ρ_0 为参考温度下的电阻率。对于铜，$\alpha\approx 0.003\ 9/℃$。

但交流母排在实际工作中会受到集肤效应的作用，使得等效电阻增大，矩形铜排的交流电阻可表示为

$$r=\frac{v(F+F')}{\pi^2\sigma z_a}l \tag{9}$$

式中：F 和 F' 分别为模量为 v 和 v_1 的第一类完全椭圆积分；l 为导体长度；σ 为电导率；z_a 为等效透入深度，可表示为

$$z_a=\sqrt{\frac{2}{\omega v\sigma}} \tag{10}$$

式中，ω 为角频率[10]。

将式(10)代入式(9)可得

$$r=\frac{vl(F+F')\sqrt{\omega v}}{\pi^2\sqrt{2\sigma}} \tag{11}$$

将式(8)代入式(11)可得

$$r=\frac{vl(F+F')\sqrt{\omega v}}{\pi^2\sqrt{2}}\sqrt{\rho_0[1+\alpha(T-T_0)]} \tag{12}$$

从式(12)可以看出，理想矩形铜排的交流电阻与电阻率的平方根成正比，因此其与温度的关系并不是线性的。

以等效电阻较大的交直流连接母排为例，其等效电阻用 R++表示。在 2 kHz 激励频率下，随着母排温度的增加，不考虑集肤效应的等效电阻计算值、等效矩形铜排的计算值及 Q3D 仿真值的对比结果如图 3 所示。从图中可以看出，不考虑集肤效应，按照电阻随温度的变化系数计算得出的母排交流电阻与仿真值相差明显。等效矩形铜排的交流电阻计算值与 Q3D 仿真值基本保持一致，故可按照式(12)计算变频器中母排的等效电阻值。在得到变频器各阻性器件的等效电阻后，根据电路仿真电流即可计算损耗值。

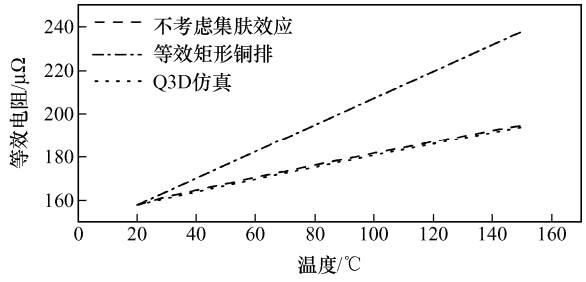


图 3 2 kHz 激励频率下 *R*++随温度的变化曲线

Fig. 3 Curves of *R*++ changing with temperature at excitation frequency of 2 kHz

2.3 温度对电抗器的损耗影响分析

电抗器的损耗分为绕组损耗和铁心损耗 2 个部分，绕组损耗与 ρ 相关，直接受温度影响。绕组损耗中又包含电阻损耗和涡流损耗，随着电抗器容量的增大，涡流损耗在总损耗中的占比会大幅增加[13]。绕组涡流损耗通常以占绕组电阻损耗的百分数表示，计算公式为

$$K_W\%=\frac{K_m}{10^7}\left(\frac{fmnas\rho_r}{H_x}\right)\times 100\% \tag{13}$$

式中：K_m 为涡流损耗系数，$K_m=\frac{17.8^2\pi^2}{18\rho^2}\times 10^{-5}$；$f$ 为通过电抗器电流的频率；m 为并联根数；n 为匝数乘以螺旋根数；a 为沿辐向单根导线厚度；s 为每根导线截面积；ρ_r 为洛氏系数；H_x 为线圈电抗高度。

考虑温度影响时

$$K_m=\frac{17.8^2\pi^2}{18\rho_0{}^2[1+\alpha(T-T_0)]^2}\times 10^{-5} \tag{14}$$

为完成变频器整体温度的精确解算，需要计算所有热源器件的功率损耗。可通过电路结合有限元仿真及损耗解析公式的方式获取损耗的精确值。

3 电热耦合一体化建模

基于单个器件的结构模型和连接关系，建立矿用变频器的一体化模型，如图 4 所示。本文中的一体化模型主要考虑功率部件，忽略部分控制和保护组件(如控制器、保护器等)；并对功率器件进行适当简化，忽略部分结构特征(如倒角、螺丝等)。

本文设计的电热耦合计算框架和流程如图 5 所示。通过电路仿真计算变频器关键器件的电压和电流参数，结合温度参数并根据损耗的解析表达式或有限元仿真计算损耗值。导入热仿真模型解算变

频器温度场分布，再将仿真得出的温度结果用于更新电路仿真中受温度影响的器件参数。循环执行，直到温度场耦合计算结果收敛。

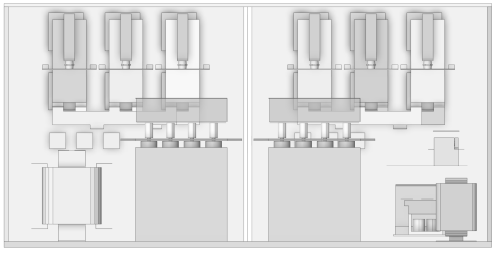
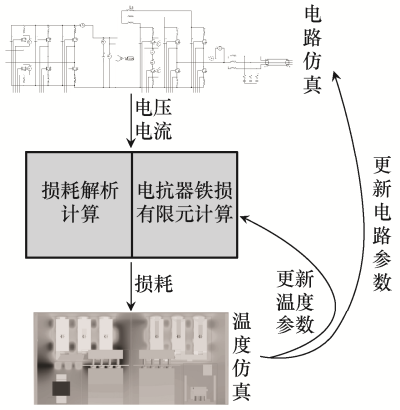
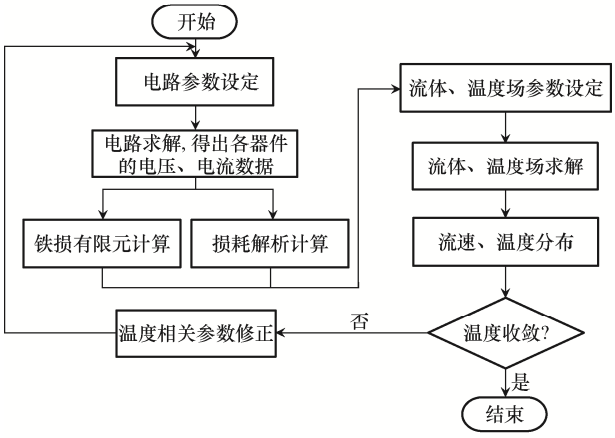


图 4　矿用变频器一体化模型

Fig. 4 Integrated model of mine inverter



(a) 计算框图

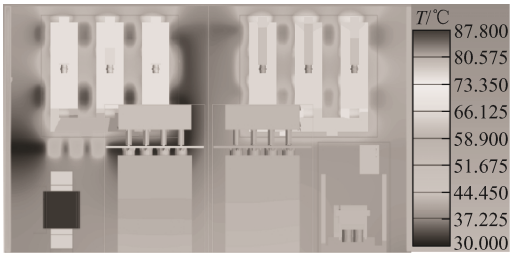


(b) 计算流程

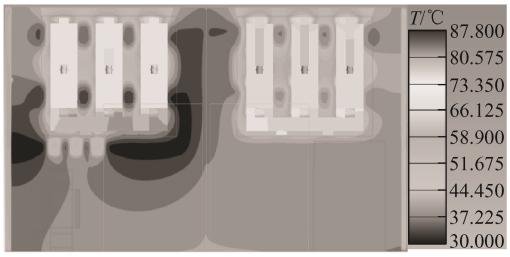
图 5　电热耦合计算框图和流程

Fig. 5 Block diagram and flow chart of electronic-thermal coupling calculation

基于上述电热耦合计算方法，设置电缆长度为 50 m，环境温度为 30 ℃，采用强制水冷+风冷+自然冷却方式，变频器在额定负载工况下的稳态温升分布情况如图 6 所示。



(a) 变频器整体温度分布



(b) 变频器母排温度分布

图 6　额定工况下变频器温度分布

Fig. 6 Temperature distribution of inverter under rated conditions

由图 6 可见，变频器整体的最高温度为 87.800 ℃。温升最高的为输出电抗器，因为该部件与变频器外壳的接触面积有限，大部分与壳内空气直接接触。虽然装有散热风扇，但在局限空间下，对流换热带走的热量依然有限，散热能力较差。除电抗器以外，温升最高的部分集中于 IGBT 模块和叠层母排，即变频器损耗最集中的部分。从图 6(b) 可以看出，母排的温度分布并不均匀，呈现自上而下温度逐渐增加的趋势，这是因为越往下母排与水冷基板的热传导距离越远，进而导致母排的下半部分温升增加。

额定工况下变频器的关键器件损耗的耦合计算前、后对比见表 1，表中 IGBT 和二极管的温度为结温，根据结-散热器热阻进行折算。从表 1 中可以看出，耦合计算前、后的器件损耗相差明显，增加最大的是 IGBT 模块，IGBT 损耗约增加 17.5%、反并联二极管损耗约增加 20.0%、电抗器绕组损耗约增加 15.0%。损耗随温度的变化会显著影响变频器的温度场计算结果，从表 1 中可以看出，耦合计算温度比非耦合计算温度平均增加 6 ℃。上述仿真结果主要有 2 个原因：一是 IGBT

模块的结和电抗器绕组的损耗集中，且热量导出路径的热阻较大，IGBT 结的热量需要通过焊层、陶瓷基板、底板及导热硅脂后才能被水冷板带出，电抗器绕组产生的热量必须通过空气对流传到隔爆外壳上才能实现散热，所以耦合计算后，IGBT 模块的结和电抗器绕组的温度增加最为明显；二是从本文第 2 节的分析结果可以看出，母排损耗与电阻率的平方根成正比，IGBT 模块的结损耗基本与温度满足线性关系，电抗器绕组的损耗既包括随温度线性增加的电阻损耗，还包含部分涡流损耗，因此 IGBT 模块的结和电抗器绕组的损耗受温度的影响更明显，耦合计算后，损耗增加也最为显著。综上所述，矿用变频器中各关键部件的损耗和温升均会受到电热耦合特性的影响，因此，针对矿用变频器的一体化电热耦合建模是准确评估散热性能的必要条件。

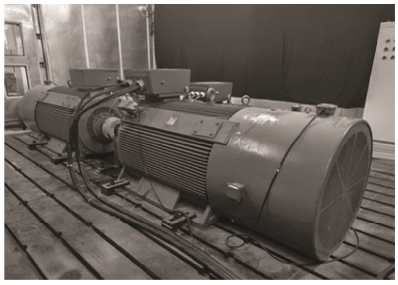
表 1 额定工况下各功率器件损耗耦合计算前、后对比

Tab. 1 Comparison of losses of power devices before and after coupling calculation under rated conditions

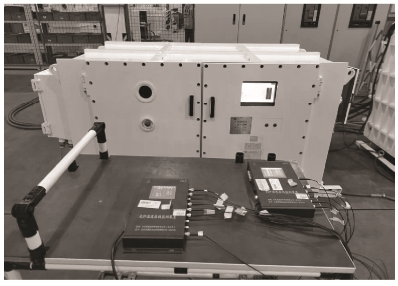
器件名称	20 ℃下损耗/W	耦合计算后损耗/W	非耦合计算温度/℃	耦合计算温度/℃
整流 IGBT	1 155.8	1 361.5	79.3	86.0
整流反并联二极管	746.5	897.4	87.7	93.4
逆变 IGBT	1 094.6	1 285.3	78.3	84.7
逆变反并联二极管	714.5	858.5	86.2	92.0
母排	79.3	86.7	63.3	69.8
吸收电阻	340.5	373.2	41.2	44.6
电抗器绕组	312.7	360.3	80.5	87.8

4 实验验证

为验证基于电热耦合的温度场建模的准确性，搭建矿用变频器加载试验平台，如图 7 所示，外接电缆设置为 50 m。在矿用变频器上设置 7 处测温点，分别为 IGBT 散热片、交流母排、直流母排、水冷散热器、直流支撑电容、输出电抗器及隔爆外壳。



(a) 驱动和加载电动机



(b) 矿用变频器样机

图 7 矿用变频器及其加载试验平台

Fig. 7 Mine inverter and corresponding load test platform

在环境温度为 22.6 ℃时，利用光纤测温仪测得矿用变频器满载工况下各标定测温点的温升曲线，如图 8 所示。将各测温点的实测稳态温度值与基于一体化电热耦合模型的温度场仿真结果进行对比，结果见表 2。

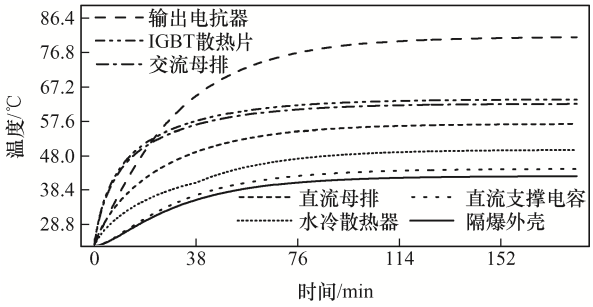


图 8 各标定测温点的温升曲线

Fig. 8 Temperature rise curve at each calibrated temperature measurement point

由图 8 和表 2 可以看出，各功率器件在 2~3 h 后温度逐渐趋于稳定，各标定测温点的实验与仿真结果在整体趋势上保持较好的一致性，但在数值上

表 2　额定工况下各测温点实测和仿真值对比

Tab. 2 Comparison between measured and simulated values at each temperature measurement point under rated conditions

测温点	实验值/℃	仿真值/℃
IGBT 散热片	63.6	64.0
交流母排	62.4	63.1
直流母排	56.7	57.5
水冷散热器	49.5	50.4
直流支撑电容	44.1	43.7
输出电抗器	81.1	80.4
隔爆外壳	42.1	42.5

存在一定的误差。仿真和实验温度结果的误差是由于温度场模型对内部功率器件进行了结构上的适当简化，未建立详细的器件模型，并且整体模型忽略了部分控制保护器件，这些器件会在一定程度上改变热传导的方向。另外，从表 2 中可以看出：IGBT 散热片、交流母排、直流母排、水冷散热器及隔爆外壳的仿真值偏高，这与前述误差来源分析是一致的，主要原因是本文建立的温度场模型忽略了非功率器件对热量的传导作用；直流支撑电容、输出电抗器的仿真值偏低，主要原因是其并不与变频器中的其他部件充分接触，此类器件的散热方式需要充分考虑辐射散热的影响，而仿真忽略了部分变频器组件，电抗器和电容的热量会更容易辐射到防爆外壳。整体而言，温度仿真值和实验值之间的误差较小，最大误差仅为 0.9 ℃。

综上，本文所建立的一体化电热耦合模型可准确解算矿用变频器的温度分布，可在设计阶段准确评估矿用变频器的温度特性。

5　结论

本文建立了考虑高频特性的矿用变频器电路模型，用于精确计算各功率器件的电压、电流参数；分析了温度对变频器各功率器件(包括 IGBT 模块、阻性器件及电抗器)的损耗影响，重点分析了母排的交流电阻损耗、电抗器绕组的涡流损耗随温度变化的非线性关系，建立了各损耗随温度变化的解析模型。结合高频电路模型和损耗解析模型，可快速准确计算损耗值。

在此基础上，分析了高频电路模型、损耗解析模型及温度场模型之间的耦合关系，建立了矿用变频器的一体化电热耦合模型，实现了电热的双向耦合，并分析了变频器在额定负载下的温度场耦合计算结果。通过对电热耦合前、后的功率器件损耗进行对比分析，发现耦合解算后 IGBT 损耗约增加 17.5%、反并联二极管损耗约增加 20.0%、电抗器绕组损耗约增加 15.0%；与非耦合温度场计算方法相比，温度平均上升 6 ℃。因此，矿用变频器中各关键部件的损耗和温升均会受到电热耦合特性的影响，表明了一体化电热耦合建模的必要性。

最后，搭建了实验平台，进行了矿用变频器温升实验，结果表明矿用变频器内部组件的温升均未超过 60 ℃，满足煤矿现场的应用需求。实验与仿真温度结果在数值上具有较好的一致性，最大误差仅为 0.9 ℃，验证了矿用变频器一体化电热耦合建模的准确性。

参考文献：

[1] 贾天毅, 徐立军, 陈志峰, 等. 嵌入式风冷变频器散热结构设计及热仿真分析研究[J]. 矿业安全与环保, 2024, 51(2): 166-174.
Jia Tianyi, Xu Lijun, Chen Zhifeng, et al. Design of heat emission structure and thermal simulation analysis of embedded air-cooled frequency converter [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2024, 51(2): 166-174. (in Chinese)

[2] 荣相, 史晗, 蒋德智, 等. 一种矿用变频器滤波装置[J]. 工矿自动化, 2020, 46(5): 76-81.
Rong Xiang, Shi Han, Jiang Dezhi, et al. A mine-used frequency converter filter device [J]. Journal of Mine Automation, 2020, 46(5): 76-81. (in Chinese)

[3] 黄成洋, 孙建平, 谢川, 等. 一种基于新型复合观测器的 IGBT 结温提取方法[J]. 电源学报, 2025, 23(7): 330-337.
Huang Chengyang, Sun Jianping, Xie Chuan, et al. IGBT junction temperature extraction method based on novel composite observer [J]. Journal of Power Supply, 2025,

23(7): 330-337. (in Chinese)

[4] 曹轩赫, 胡迪, 张楚岩, 等. 谐波环境下模块化多电平换流器子模块电容器的多场耦合分析及优化研究[J]. 电网技术, 2024, 48(10): 4367-4376.
Cao Xuanhe, Hu Di, Zhang Chuyan, et al. Multifield coupling analysis and optimization research of modular multilevel converter submodular capacitors in harmonic environment [J]. Power System Technology, 2024, 48(10): 4367-4376. (in Chinese)

[5] 刘隆晨, 李龙蛟, 彭东, 等. 基于共轭梯度法的晶闸管电热耦合模型快速求解方法研究[J]. 电源学报, 2024, 22(3): 54-61.
Liu Longchen, Li Longjiao, Peng Dong, et al. Research on rapid solution method for thyristor electro-thermal coupling model based on conjugate gradient method [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(3): 54-61. (in Chinese)

[6] 王越, 史晗, 荣相, 等. 基于一体化模型的矿用变频器散热性能分析[J]. 工矿自动化, 2023, 49(2): 115-124.
Wang Yue, Shi Han, Rong Xiang, et al. Analysis of heat dissipation performance of mine inverter based on the integrated model [J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(2): 115-124. (in Chinese)

[7] SEMIKRON. Application Manual Power Semiconductors [M]. 2nd edition. Ilmenau: ISLE Verlag, 2011.

[8] 田野, 卜凯阳, 李楚杉, 等. 用于 IGBT 模块温度观测的 3-D 降阶混合型热模型[J]. 电工技术学报, 2024, 39(16): 5104-5120.
Tian Ye, Bu Kaiyang, Li Chushan, et al. A hybrid 3-D reduced-order thermal model for temperature observation of IGBT modules [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(16): 5104-5120. (in Chinese)

[9] 黄海宏, 彭岚, 王海欣. 并联 IGBT 占空比的温度特性建模与分析[J]. 电工技术学报, 2024, 39(14): 4422-4431.
Huang Haihong, Peng Lan, Wang Haixin. Modeling and analysis of temperature characteristics of parallel IGBTs duty cycle [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(14): 4422-4431. (in Chinese)

[10] 余明扬, 童磊. 集肤效应对铜排导电性能的影响分析[J]. 电气技术, 2007, 8(4): 56-57, 65.
Yu Mingyang, Tong Lei. Effect analysis of conductivity of copper busbars [J]. Electrical Engineering, 2007, 8(4): 56-57, 65. (in Chinese)

[11] 李星汉, 李永建, 张长庚, 等. 考虑谐波损耗特性的干式平波电抗器热效应模拟与验证[J]. 高压电器, 2021, 57(9): 58-65.
Li Xinghan, Li Yongjian, Zhang Changgeng, et al. Simulation and verification on thermal effects of dry-type smoothing reactor considering harmonics loss characteristics [J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(9): 58-65. (in Chinese)

[12] Shi Bochen, Zhao Zhengming, Zhu Yicheng. Piecewise analytical transient model for power switching device commutation unit [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(6): 5720-5736.

[13] 张宗有, 何晓峰, 赵永霞. 铁心电抗器绕组涡流损耗的计算[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(6): 73-77.
Zhang Zongyou, He Xiaofeng, Zhao Yongxia. Calculation on winding eddy current loss of iron core reactor [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(6): 73-77. (in Chinese)



程照虎

作者简介：

程照虎(1998—)，男，硕士。研究方向：矿用电气产品研发。E-mail：cheng_ccteg@163.com。

王越(1994—)，男，博士，助理研究员。研究方向：矿用电气产品研发。E-mail：m18635372893@163.com。

荣相(1976—)，男，通信作者，硕士，研究员。研究方向：矿用电气产品研发。E-mail：tdczrx@126.com。

史晗(1985—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：矿用变频器研发。E-mail：shihan0121@163.com。

(责任编辑：耿越)