DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.4.306 中图分类号：TM32 文献标志码：A

基于热耦合分析的IGBT损耗与结温估算研究

熊刘涛[1,2]，李国丽[1,3,4]，孙泽辉[1,2]
(1.安徽大学电气工程与自动化学院，合肥 230601；2.工业节电与电能质量控制协同创新中心(安徽大学)，合肥 230601；3.教育部电能质量工程研究中心(安徽大学)，合肥 230601；4.工业节电与用电安全安徽省重点实验室(安徽大学)，合肥 230601)

摘要：电机控制器IGBT模块是实现电能转换和电机控制的重要组件之一，通常在复杂工况下工作，其可靠性对整个电驱动系统的稳定至关重要。一般情况下，IGBT的损耗分析采用手册公式法直接求取，忽略了温升对IGBT模块的影响。针对此问题，提出1种热耦合分析的方法，首先建立IGBT模块的损耗计算模型，在此基础上构建热网络模型进行结温估算，再用温升估算结果修正损耗计算模型；搭建了电机控制器仿真模型，对IGBT结温和损耗进行仿真，并通过电机温升实验，验证了该热耦合分析方法的有效性。

关键词：电机控制器；IGBT；温升预测；损耗计算

Estimation of IGBT Loss and Junction Temperature Based on Thermal Coupling Analysis

XIONG Liutao[1,2], LI Guoli[1,3,4], SUN Zehui[1,2]
(1. School of Electrical Engineering and Automation, Anhui University, Hefei 230601, China; 2. Collaborative Innovation Center of Industrial Energy-Saving and Power Quality Control, Anhui University, Hefei 230601, China; 3. Power Quality Engineering Research Center of Ministry of Education, Anhui University, Hefei 230601, China; 4. Anhui Key Laboratory of Industrial Energy-Saving and Safety, Anhui University, Hefei 230601, China)

Abstract: The IGBT module of a motor controller is one of the important components for realizing electric energy conversion and motor control. This module usually works under complex conditions, and its reliability is crucial for the stability of the whole electric drive system. In general, the IGBT loss is directly calculated using the method of manual formulas, which ignores the influence of temperature rise on the IGBT module. Aimed at this problem, a method of thermal coupling analysis is proposed. First, a loss calculation model of IGBT module is established. On the basis, a thermal network model is built for the estimation of junction temperature, and the temperature rise estimation result is further used to correct the loss calculation model. A simulation model of the motor controller is constructed, and the junction temperature and loss of IGBT are simulated. In addition, the effectiveness of the proposed thermal coupling analysis method was verified by the results of a temperature rise experiment conducted on the motor controller.

Keywords: Motor controller; IGBT; temperature rise prediction; loss calculation

新能源汽车因其具有低排放、高效率等特点，得到了广泛的发展。控制器绝缘栅双极晶体管IGBT(insulate-gate bipolar transistor)功率模块的高可靠性是决定新能源汽车电驱动系统性能的关键。工业调查表明，功率器件是电力电子系统中最容易发生故障的部分[1]。功率模块也是电机控制器中最为脆弱的部件，超过30%的电机控制器故障由功率模块引起[2]，其中60%的功率模块故障是由过热引

收稿日期：2022-05-27；**修回日期：**2022-07-19；**录用日期：**2022-08-15；**网络首发日期：**2022-09-16
基金项目：国家重点研发计划资助项目(2018YFB0104900)
This work is supported by National Key Research and Development Program of China under the grant 2018YFB0104900

起的[3]。因此，控制器 IGBT 模块温度估算和预测对提高电驱动系统可靠性十分必要。

国内外学者对此已经进行了较为深入的研究，目前获取 IGBT 结温的方法主要有 4 种：接触探测法、热敏电参法、有限元计算法、热网络方法[4-11]。接触探测法使用红外探测仪等设备测量 IGBT 的结温，易于实时测量结温变化，文献[4]采用该方法对电力电子器件进行结温检测，但是需要破坏封装，或者去除芯片表面硅脂，测得的结温与实际工况下有所不同；热敏电参法通过提取器件外部电气参数与内部结温构建函数关系，但求解过程由于负载电流变化与自热现象影响，实时性和准确性存在误差[5]；有限元计算法可分析模块内部各芯片的温度分布情况与热耦合的影响，计算结果较精确，但有限元计算需要精确的几何模型，建模复杂[6]；热网络方法根据器件损耗和热阻抗模型，仿真计算获得结温，相对前述方法而言，热网络方法易于在软件中实现，且便于预测多时间尺度下的结温。文献[7]考虑了上下桥臂间的热耦合，提出了 1 种较复杂的 3D 紧凑型热网络模型，该模型可以较准确地预测功率模块的结温，但模型参数提取难度较大；文献[8]通过功率阶跃热响应法获得热网络参数，建立了 1 种考虑热-电耦合效应和热边界条件的 3D 集总参数热模型；文献[9]利用数据手册提取热网络模型，通过 PLECS 软件热仿真对比验证了有、无温度修正的理论计算方法；文献[10]提出 1 种基于大电流通态压降的 IGBT 功率模块结温监测方法，并分别使用数学模型和神经网络模型拟合出结温和通态压降之间的关系，从而实现对结温的预测，但适用性不强，需要大量的实验数据；文献[11]提出 1 种改进型的具有物理意义的 Cauer 型网络，考虑了热扩散效应对结温计算的影响。

损耗是 IGBT 温升的主要来源，损耗计算作为结温预测的前提也受到了国内外学者的广泛关注。目前，IGBT 损耗计算方法主要有基于物理结构和基于数学方法 2 大类[12]。基于物理结构的计算方法通过 IGBT 模块内部的电阻、电容、电感及电源等元件参数信息模拟出 IGBT 模块的工作特性，进而利用模拟所得的电压、电流波形来计算损耗，这种计算方法的准确度较高，但是需要掌握 IGBT 模块各器件微观物理结构及工作机理，对于一般用户来说有一定的难度，因而在工程领域应用较少。文献[13]采用 Saber 仿真软件，使用电容与电源等元件构建出模块内部的物理模型，仿真出 IGBT 的动态特性，可准确地计算出损耗，但模型内部参数提取非常困难。损耗计算的数学方法包含多项式法、线性化方法、指数方法、数据手册估算方法。这些方法虽略有不同，但都是从数据手册获得所需的数据参数，再进行相应的计算得到损耗数据。由于所需的数据可以从数据手册中直接获得，因而比较适合工程设计计算。文献[14]对 IGBT 损耗公式进行推导，采用软件仿真的方法，在 Simulink 中搭建电机控制算法模型，考虑了电机运行对 IGBT 损耗计算的影响，实现了 Simplorer/Simulink 联合仿真计算 IGBT 损耗，计算精度较高，但需要构建模型的数量较大。

本文针对新能源汽车电驱动系统中控制器 IGBT 模块的损耗和结温估算开展研究，考虑 IGBT 温升对 IGBT 损耗的影响，采用热耦合分析的方法，首先通过插值方法获得损耗计算模型，并以此为基础，采用 Foster 热网络模型对 IGBT 结温进行预测估算，再用温升估算结果对损耗计算模型进行修正，仿真和实验结果验证了该热耦合分析方法的有效性。

1　拓扑模型与损耗计算

本文研究的新能源汽车电驱动控制器为英飞凌 FS820R06A6P2B，系统的简化拓扑模型如图 1 所示，包含 6 个单元，每个单元包含了相应桥臂的 IGBT 与续流二极管 FWD(free wheeling diode)芯片。通过芯片的导通与关断对永磁同步电机 PMSM (permanent magnet synchronous motor)进行驱动控制。

在运行过程中，IGBT 模块的电流与温度会不断发生变化，对应的损耗也会不断地改变。IGBT

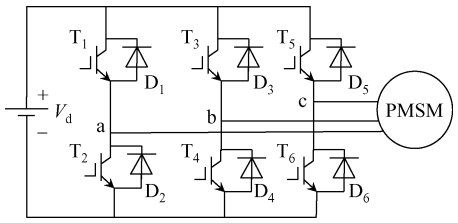


图 1 电驱动简化模型

Fig. 1 Simplified model of electric drive

模块工作过程中的损耗主要有导通损耗和开关损耗[15-16]。导通损耗主要取决于管压降、负载电流、结层温度和占空比；开关损耗主要取决于负载电流与负载电气特性、直流母线电压、结层温度、开关频率等。

1.1 IGBT 模块导通损耗

IGBT 模块导通损耗主要包含 IGBT 与 FWD 运行时的导通损耗。设电流周期为 T_c，开关周期为 T_{sw}。若电流周期内有 N 个开关周期，则 IGBT 导通损耗 $P_{cond,T}$ 计算公式为

$$P_{cond,T}(t)=\frac{1}{NT_{sw}}\sum_{n=1}^{N}\int_{(n-1)T_{sw}}^{[n-1+D(t)]T_{sw}}V_{ce}I_c(t)\mathrm{d}t \tag{1}$$

式中：V_{ce} 为 IGBT 通态压降；I_c 为 IGBT 导通电流；$D(t)$为占空比。

因 T_c 远大于 T_{sw}，故式(1)可简化为

$$P_{cond,T}(t)=\frac{1}{T_c}\int_0^{T_c}V_{ce}I_c(t)D(t)\mathrm{d}t \tag{2}$$

FWD 的导通损耗 $P_{cond,D}$ 为

$$P_{cond,D}(t)=\frac{1}{T_c}\int_0^{T_c}V_fI_f(t)[1-D(t)]\mathrm{d}t \tag{3}$$

式中：V_f 为 FWD 通态压降；I_f 为 FWD 导通电流。

由式(1)和式(2)可知，导通损耗主要与器件导通时的管压降、导通电流、占空比有关。但实际上，结温 T_j 对式中的管压降、导通电流等都有一定影响。根据数据手册提供的 IGBT 在 25、150 与 175 ℃下的管压降与导通电流的输出特性曲线，通过 MATLAB 编程插值，可获得指定温度与导通电流下的管压降 V_{ce}，如图 2 所示。

同理根据数据手册提供的 FWD 在 25、150 与 175 ℃下的管压降 V_f 与导通电流 I_f 的输出特性曲线，可获得管压降 V_f 关于结温和导通电流的插值函数，如图 3 所示。

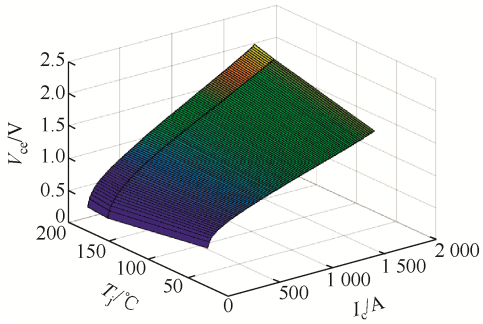


图 2 IGBT 的 V_{ce} 与结温 T_j、导通电流 I_c 关系

Fig. 2 Relationship among V_{ce}, junction temperature T_j and conduction current I_c of IGBT

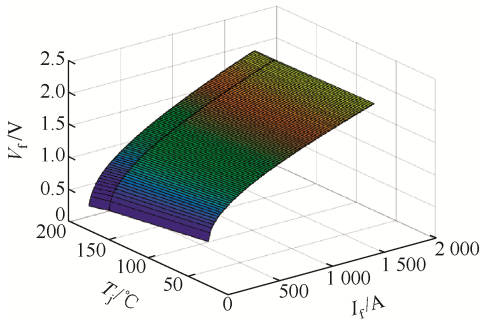


图 3 FWD 的 V_f 与结温 T_j、导通电流 I_f 关系

Fig. 3 Relationship among V_f, junction temperature T_j and conduction current I_f of FWD

利用图 2 和图 3 的变量关系，可以对式(2)与式 3 的导通损耗进行温度修正。

1.2 IGBT 模块开关损耗

IGBT 模块开关损耗，主要包含 IGBT 的开关损耗与 FWD 的开关损耗。IGBT 模块开关损耗取决于器件的开关特性，其开关过程如图 4 所示。

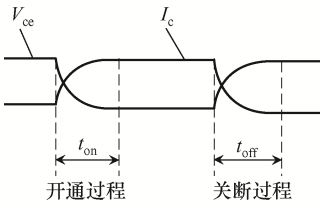


图 4 IGBT 开关过程

Fig. 4 Switching process of IGBT

IGBT 单开关周期内的开通损耗 P_{on} 与单开关周期内的关断损耗 P_{off} 表达式分别为

$$P_{on}=\frac{1}{t_{on}}\int_0^{t_{on}}V_{ce}I_c(t)\mathrm{d}t \tag{4}$$

$$P_{\text{off}}=\frac{1}{t_{\text{off}}}\int_0^{t_{\text{off}}}V_{\text{ce}}I_{\text{c}}(t)\text{d}t \tag{5}$$

式中，t_{on} 和 t_{off} 分别为开通时间和关断时间。

IGBT 的开关损耗 $P_{\text{sw,T}}$ 表达式为

$$P_{\text{sw,T}}=\frac{f_{\text{sw}}}{NT_{\text{sw}}}\sum_{n=1}^{N}[P_{\text{on}}(nT)+P_{\text{off}}(nT)]T_{\text{sw}} \tag{6}$$

式中，f_{sw} 为逆变器开关频率。

由于 FWD 的关断(反向恢复)损耗要比开通损耗大得多，所以计算过程主要考虑其关断损耗。FWD 的开关损耗 $P_{\text{sw,D}}$ 表达式为

$$P_{\text{sw,D}}=\frac{1}{\pi}f_{\text{sw}}P_{\text{rec}}\cdot\frac{V_{\text{dc}}}{V_{\text{dref}}}\cdot\frac{I_{\text{max}}}{I_{\text{ref}}} \tag{7}$$

式中：P_{rec} 为单开关周期内 FWD 的反向恢复损耗；V_{dc} 为母线电压；I_{max} 为相电流最大值；V_{dref} 与 I_{ref} 为数据手册母线电压与最大相电流参考值。

同理，开关时间为定值条件下，开关损耗 P_{on}、关断损耗 P_{off} 和反向恢复损耗 P_{rec} 都受温度、管压降和导通电流 3 者共同影响，根据图 2，采用线性插值算法可以获得特定温度、压降与电流条件下的 IGBT 开通损耗如图 5 所示，IGBT 关断损耗如图 6 所示，FWD 反向恢复损耗如图 7 所示。

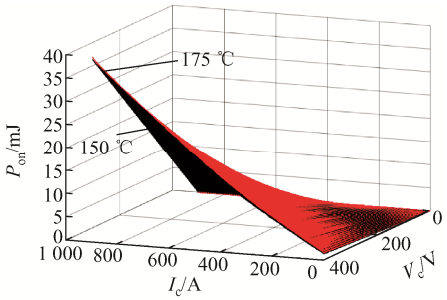


图 5　P_{on} 与 I_{c}、V_{c}、T_{j} 关系

Fig. 5 Relationship among P_{on}, I_{c}, V_{c} and T_{j}

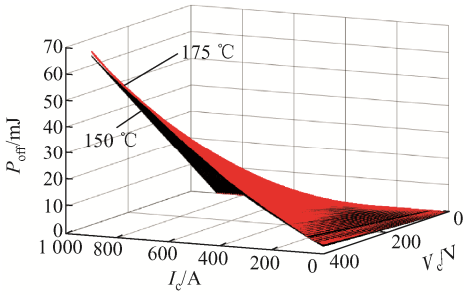


图 6　P_{off} 与 I_{c}、V_{c}、T_{j} 关系

Fig. 6 Relationship among P_{off}, I_{c}, V_{c} and T_{j}

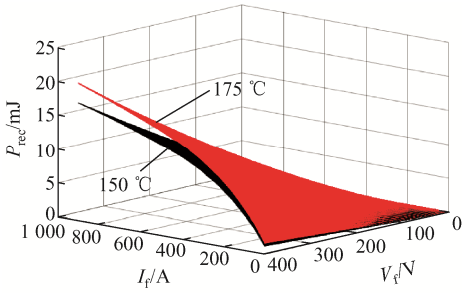


图 7　P_{rec} 与 I_{f}、V_{f}、T_{j} 关系

Fig. 7 Relationship among P_{rec}, I_{f}, V_{f} and T_{j}

1.3　考虑结温的 IGBT 损耗计算

芯片产生的损耗是 IGBT 模块的主要热源，热量的扩散会改变模块内部的温度分布，进而影响损耗。也就是说，IGBT 模块内的电参数与热参数存在着热耦合。如图 8 所示，使用 IGBT 芯片的导通电流 I_{c} 与管压降 V_{ce} 可计算出器件损耗，损耗产生的热量将会改变芯片的结温，而结温的改变又会改变器件的导通与关断特性，进而影响器件损耗的计算。

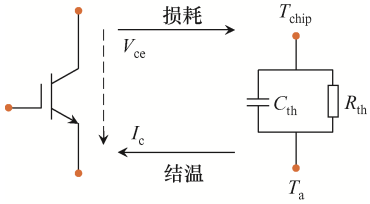


图 8　IGBT 热耦合效应

Fig. 8 Thermal coupling effect on IGBT

芯片在实际工况下的结温处于不断变化中，通过 1.1 节建立的函数关系，可将器件实时的管压降拟合为 I_{c}、T_{j} 的相关函数，进而将开关损耗拟合为与 I_{c}、V_{ce}、T_{j} 相关的函数，即

$$V_{\text{ce},T_{\text{j}}}=f(I_{\text{c}},T_{\text{j}}) \tag{8}$$

$$V_{\text{f},T_{\text{j}}}=f(I_{\text{f}},T_{\text{j}}) \tag{9}$$

$$P_{\text{on},T_{\text{j}}}=f_{\text{on}}(I_{\text{c}},V_{\text{ce}},T_{\text{j}}) \tag{10}$$

$$P_{\text{off},T_{\text{j}}}=f_{\text{off}}(I_{\text{c}},V_{\text{ce}},T_{\text{j}}) \tag{11}$$

$$P_{\text{rec},T_{\text{j}}}=f(I_{\text{f}},V_{\text{f}},T_{\text{j}}) \tag{12}$$

式中，$V_{\text{ce},T_{\text{j}}}$、$V_{\text{f},T_{\text{j}}}$、$P_{\text{on},T_{\text{j}}}$、$P_{\text{off},T_{\text{j}}}$、$P_{\text{rec},T_{\text{j}}}$ 分别为修正后的管压降与单开关周期的开关损耗。

由此，式(2)与式(3)的 IGBT/FWD 导通损耗计算公式可修正为

$$P_{\text{cond,T}}(t)=\frac{1}{T_{\text{c}}}\int_0^{T_{\text{c}}}[f(I_{\text{c}},T_{\text{j}})]I_{\text{c}}(t)D(t)\text{d}t \tag{13}$$

$$P_{\text{cond,D}}(t)=\frac{1}{T_{\text{c}}}\int_0^{T_{\text{c}}}f(I_{\text{f}},T_{\text{j}})I_{\text{f}}(t)[1-D(t)]\text{d}t \tag{14}$$

式(6)与式(7)的IGBT/FWD开关损耗计算公式可修正为

$$P_{\text{sw,T}}=\frac{f_{\text{sw}}}{NT_{\text{sw}}}\sum_{n=1}^{N}[f_{\text{on}}(I_{\text{c}},V_{\text{ce}},T_{\text{j}})(nT)+f_{\text{off}}(I_{\text{c}},V_{\text{ce}},T_{\text{j}})(nT)]T_{\text{sw}} \tag{15}$$

$$P_{\text{sw,D}}=\frac{1}{\pi}f_{\text{sw}}f(I_{\text{f}},V_{\text{f}},T_{\text{j}})\cdot\frac{V_{\text{dc}}}{V_{\text{dref}}}\cdot\frac{I_{\text{max}}}{I_{\text{ref}}} \tag{16}$$

2 基于等效热网络模型的 IGBT 模块结温估算

1.3 节表明，IGBT 模块工作时产生的热量与损耗之间存在热耦合，为了对考虑温升的 IGBT 的损耗进行分析，本节将采用热网络模型法对 IGBT 的结温进行估算。

IGBT 的热网络建模主要有 Cauer 模型和 Foster 模型等，由于 Foster 模型参数较容易获取，本文采用 Foster 模型进行 IGBT 的结温估算[17]，等效传热 Foster 模型如图 9 所示。图中：Z_{Ttot} 与 Z_{Dtot} 分别为 IGBT 与 FWD 到基板的总热阻抗；Z_{Tch} 与 Z_{Dch} 分别为 IGBT 与 FWD 各自热路中基板到散热器的热阻抗；Z_0 为散热器等效热阻抗；T_0 为外界环境温度；R_{T1}、R_{T2}、R_{T3}、R_{T4} 分别为 IGBT 从芯片到基板的各层材料 Foster 型等效热阻；C_{T1}、C_{T2}、C_{T3}、C_{T4} 分别为 IGBT 从芯片到基板的各层材料 Foster 型等效热容；R_{D1}、R_{D2}、R_{D3}、R_{D4} 分别为 FWD 从芯片到基板的各层材料 Foster 型等效热阻；C_{D1}、C_{D2}、C_{D3}、C_{D4} 分别为 FWD 从芯片到基板的各层材料 Foster 型等效热容；R_{T5} 与 C_{T5} 分别为 IGBT 从基板到散热器的 Foster 型等效热阻与热容；R_{D5} 与 C_{D5} 分别为 FWD 从基板到散热器的等效热阻与热容；R_6 与 C_6 分别为散热器跟外界环境的等效热阻与热容。可从数据手册查询或计算出 Foster 模型参数，见表 1。

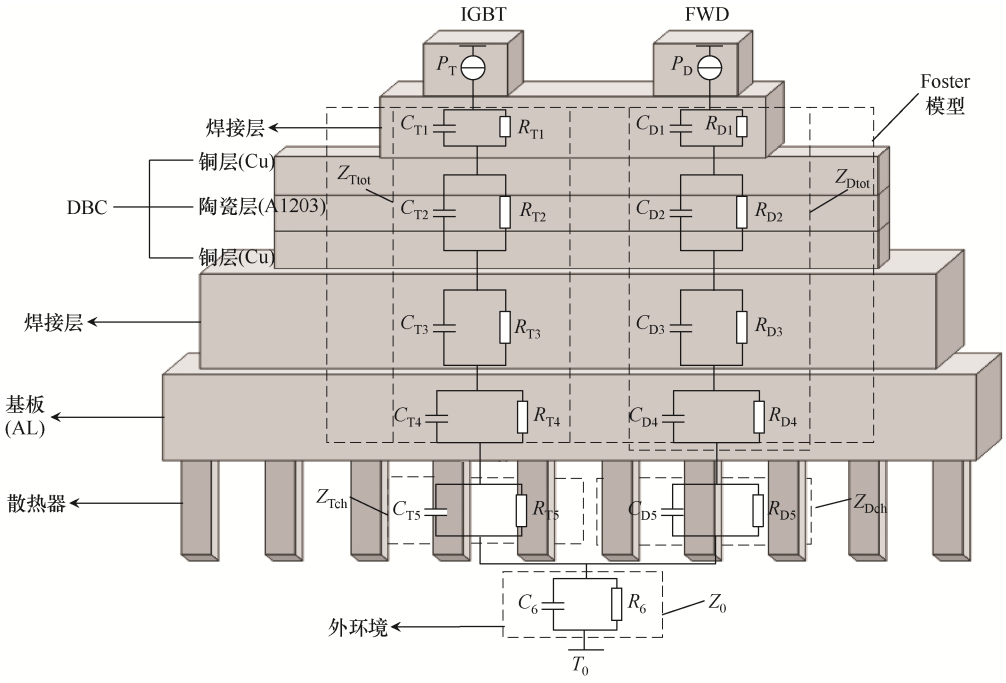


图 9 IGBT 等效传热 Foster 模型

Fig. 9 Equivalent heat transfer Foster model of IGBT

基于图 9 的等效传热 Foster 模型，IGBT 的结温 T_{jT} 与 FWD 的结温 T_{jD} 可分别表示为

$$T_{\text{jT}}=P_{\text{T}}(Z_{\text{Ttot}}+Z_{\text{Tch}})+(P_{\text{T}}+P_{\text{D}})Z_0+T_0=P_{\text{T}}\sum_{i=1}^{5}R_{\text{T}i}\left(1-\text{e}^{\frac{-\Delta t}{R_{\text{T}i}C_{\text{T}i}}}\right)+(P_{\text{T}}+P_{\text{D}})\cdot R_6\left(1-\text{e}^{\frac{-\Delta t}{R_6C_6}}\right)+T_0 \tag{17}$$

$$T_{\mathrm{jD}}=P_{\mathrm{D}}(Z_{\mathrm{Dtot}}+Z_{\mathrm{Dch}})+(P_{\mathrm{T}}+P_{\mathrm{D}})Z_0+T_0=P_{\mathrm{D}}\sum_{i=1}^{5}R_{\mathrm{D}i}\left(1-\mathrm{e}^{\frac{-\Delta t}{R_{\mathrm{D}i}C_{\mathrm{D}i}}}\right)+(P_{\mathrm{T}}+P_{\mathrm{D}})\cdot R_6\left(1-\mathrm{e}^{\frac{-\Delta t}{R_6C_6}}\right)+T_0 \tag{18}$$

式中：$\Delta t=1/(2f_{\mathrm{s}})$,$f_{\mathrm{s}}$ 为逆变器输出频率；P_{T} 与 P_{D} 为 1 个开关周期 IGBT 与 FWD 芯片的总损耗。

表 1　Foster 模型具体参数

Tab. 1 Specific parameters of Foster model

i	IGBT		FWD	
	r_i/kW^{-1}	τ_i/s	r_i/kW^{-1}	τ_i/s
1	0.005	0.001	0.015	0.001
2	0.050	0.030	0.100	0.030
3	0.065	0.250	0.065	0.250
4	0.020	1.500	0.020	1.500

基于式(17)与式(18)的瞬时结温估算，可对式(8)~式(12)的损耗进行实时修正，在温度波动的过程中，不断地插取对应的损耗参数，实现对损耗的热耦合计算。

3　仿真建模

3.1　建模流程与原理

本文在 PLECS 软件中搭建电驱动与 IGBT 损耗计算模型，将本文 1、2 节中获取的损耗计算公式与 Foster 模型参数导入到搭建的 IGBT 模块中，实现对损耗的热耦合计算，仿真参数见表 2。

表 2　仿真参数

Tab. 2 Simulation parameters

参数	数值
电机定子电阻 R_{s}/Ω	0.018
直流母线电压 U/V	351
电机 d 轴电感 L_d/H	0.000 147
电机 q 轴电感 L_q/H	0.000 344
开关频率 f_{sw}/kHz	10
占空比 D	0.5
电机 d 轴电流 I_d/A	−160
电机 q 轴电流 I_q/A	75
极对数 P	4
磁链 ψ_{f}/Wb	0.071 2
输出频率 f/HZ	50
转动惯量 J/(kg·m^2)	0.001

仿真模型主要由电机控制模块、损耗计算模块与温度模块 3 个部分组成。将控制模块运行获得的导通电流与温度模块计算获得的温度导入对应的损耗计算模块，获得对应的管压降与单开关周期内的开关损耗，损耗计算模块计算开关周期总损耗并导入至温度模块，温度模块再通过 Foster 热网络计算出当前结温。建模流程如图 10 所示。

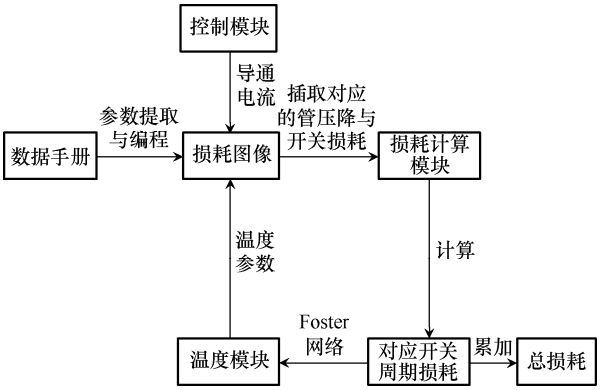


图 10　建模流程

Fig. 10 Flow chart of modeling

控制模块采用矢量控制算法实现电机的转速控制，在电机运行过程中，通过不同变换方式获得给定的 V_α、V_β，并将二者与给定的母线电压输入到触发电路，产生三相空间矢量脉宽调制 SVPWM (space vector pulse width modulation)波控制芯片的关断与导通，进而驱动 PMSM 转动。在电机运行过程中，将芯片的导通电流导入损耗函数，获得相应损耗参数，控制模块如图 11 所示。

温度模块主要包括以下组件：散热器、Foster 热网络模型、环境热容热阻。散热器作为电路与热路之间的接口，可以自动吸收元件产生的损耗同时将温度反馈到半导体元件模型，在散热器收集到损耗后，热量将在 Foster 网络中参与计算获得相应的温度参数。

损耗计算模块在获得管压降与单开关周期内的开关损耗后，依据 1.1、1.2 节中的公式进行积分与累加计算，获得平均功率损耗，对单开关周期导

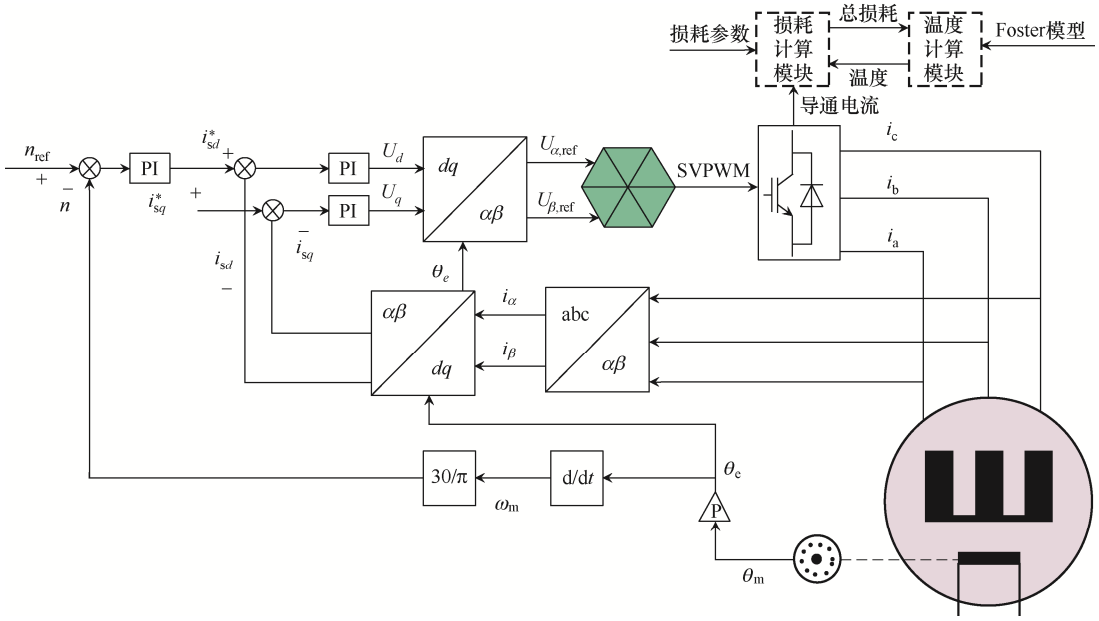


图 11 控制模块原理

Fig. 11 Schematic of control module

通损耗与开关损耗累加可获得总损耗，损耗计算原理如图 12 所示。

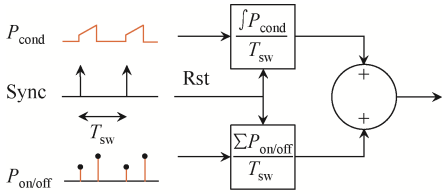


图 12 损耗计算原理

Fig. 12 Schematic of loss calculation

3.2 仿真结果

根据 3.1 节在 PLECS 软件中搭建出仿真模型。仿真工况下设定 PMSM 转速为 8 000 r/min，负载为 47.7 N·m，IGBT 与 FWD 元件初始温度均为 37 ℃，在设置好仿真参数与仿真步长后进行仿真，给定 I_d=−160 A，I_q=75 A。仿真获得的结温变化如图 13 和图 14 所示。

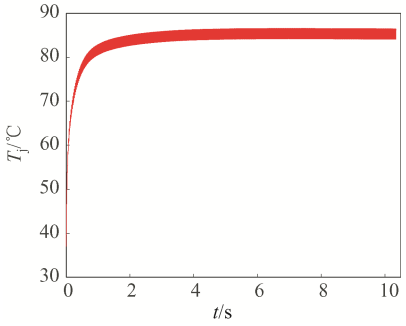


图 13 结温变化

Fig. 13 Variation in junction temperature

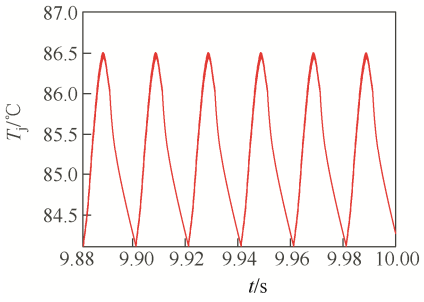


图 14 稳态结温细节变化

Fig. 14 Detailed variation in steady-state junction temperature

对仿真结果进行分析，可发现 IGBT 结温波动的频率与控制器基波频率相同，在达到稳态之后，结温在一定范围内波动，损耗仿真结果如图 15 所示。

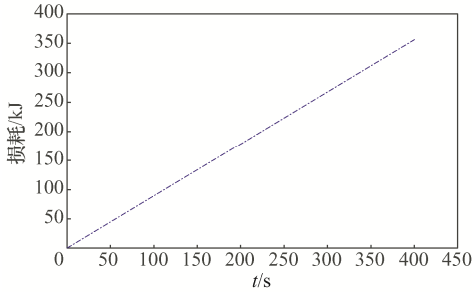


图 15 损耗仿真

Fig. 15 Simulation of loss

4　实验结果分析与验证

为验证本文提出的热耦合分析方法的准确性，以英飞凌 FS820R06A6P2B 控制器模块与 1 个永磁同步电机搭建电机驱动电路，在新能源车用电驱动系统试验平台 AVL 上进行电机恒转速运动控制器模块温升试验，AVL 试验平台如图 16 所示，由控制器模块、PMSM、上位机显示屏和控制面板组成。

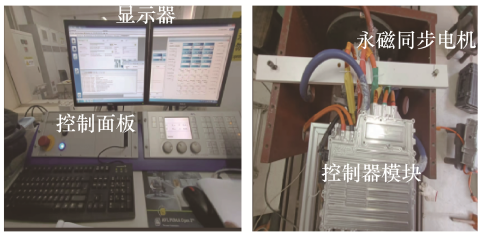


图 16　AVL 实验平台

Fig. 16 AVL experimental platform

实验过程中控制器初始温度为环境温度，与仿真设定相同，借助 IGBT 模块上的负温度热敏电阻，可间接获得 IGBT 的结温。传感器采样周期为 1 s，电机从启动至达到稳定转速，获得的实验结温曲线如图 17 所示。

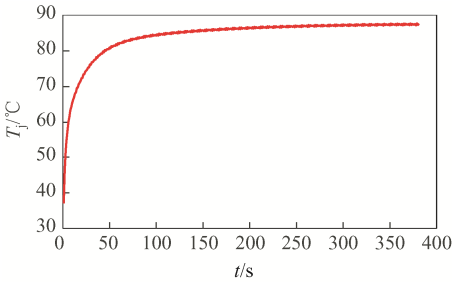


图 17　实验结温曲线

Fig. 17 Experimental junction temperature curve

由于实验中采用的传感器的采样频率较低，无法在结温达到稳态之后在每个开关周期内体现出结温在上、下限之间的波动过程，故获得的曲线较平滑。实验达到稳态后，结温均值约为 88.2 ℃，而仿真结温稳态均值约为 85.25 ℃，误差为 3.34%，二者温度变化趋势相似，实验结果与热耦合模型仿真获得的结温较接近，可以满足工程散热设计的要求。结温最大值仿真与实验差距约为 2.5 ℃，表明给定的热阻较小，手册中的 Foster 模型参数热阻热容与实际各层的热阻热容仍有一定的误差。

达到稳态后，通过实验测得的母线电压、电流与 IGBT 模块工作效率可求得实际工况下模块损耗。同时采用基于数据手册与仿真获得的损耗进行对比，手册公式法[18]将导通损耗与开关损耗图像近似为幂函数求解，未考虑热耦合的影响，损耗对比如图 18 所示。可见，对比使用手册公式法计算求得损耗结果，基于热耦合分析方法仿真获得的损耗曲线更加接近实验获得的损耗曲线，手册公式法最大误差为 15.64%，而仿真获得最大误差为 7.13%，在考虑了结温波动对损耗的影响下，对每个开关周期的损耗进行插值获取，并输入至热网络模型进行不断迭代，可明显地减少损耗计算误差，同时提升结温的计算精度。对比采用物理结构的方法计算结温与损耗，计算精度稍差，但不用考虑内部复杂物理结构，更适用于工程应用。同时建模量相较 Simulink/Simplorer 联合仿真法更少，计算速度更快。

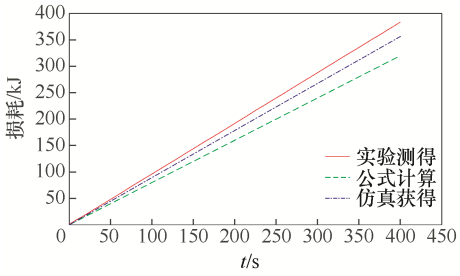


图 18　损耗对比

Fig. 18 Comparison of loss

5　结语

针对温度对 IGBT 模块损耗计算的影响，提出了 1 种基于热耦合的损耗计算方法。通过插值获取的损耗参数函数，结合热网络模型对结温进行估算。在结温不断波动的过程中，对损耗计算模型进行了修正迭代，提高了 IGBT 模块的损耗计算精度。通过 AVL 实验平台对热耦合计算模型可靠性进行了验证，对比手册公式计算的损耗结果，损耗计算误差减小 8.51%。因此，该方法更适用于 IGBT 模块的准确计算。现有模型未考虑同一模块中芯片之

间的热耦合效应，也未能考虑到芯片的横向热传导，计算结温与损耗仍有一定误差，后续将考虑对 IGBT 模型采用有限元分析方法，从而更精确地计算结温与损耗。

参考文献：

[1] Ji Bing, Song Xueguan, Cao Wenping, et al. In situ diagnostics and prognostics of solder fatigue in IGBT modules for electric vehicle drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(3): 1535-1543.

[2] Yole Development. SiC modules, devices and substrates for power electronics market [R]. Lyon, France: Yole Market and Technology Reports, 2014.

[3] Wolfgang E. Examples for failures in power electronics systems [C]// ECPE Tutorial on Reliability Power Electronics System. Nuremberg, Germany, 2007.

[4] Dupont L, Avenas Y, Jeannin P O. Comparison of junction temperature evaluations in a power IGBT module using an IR camera and three thermo-sensitive electrical parameters [C]// 2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Orlando, FL, USA, 2012: 182-189.

[5] 李武华, 陈玉香, 罗皓泽, 等. 大容量电力电子器件结温提取原理综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(13): 3546-3557, 3373.
Li Wuhua, Chen Yuxiang, Luo Haoze, et al. Review and prospect of junction temperature extraction principle of high power semiconductor devices [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13): 3546-3557, 3373. (in Chinese)

[6] 丁杰, 张平. 高功率密度电机控制器的 IGBT 模块损耗及结温计算[J]. 电源学报, 2018, 16(1): 99-106.
Ding Jie, Zhang Ping. Calculation of loss and junction temperature of IGBT module for high power density motor controller [J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(1): 99-106. (in Chinese)

[7] 马铭遥, 郭伟生, 严雪松, 等. 用于电动汽车功率模块热分析的紧凑型热网络模型[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(18): 5796-5805.
Ma Mingyao, Guo Weisheng, Yan Xuesong, et al. Compact thermal network model for thermal analysis of power modules in electric vehicle [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 5796-5805. (in Chinese)

[8] Bahman A S, Ma Ke, Blaabjerg F. A lumped thermal model including thermal coupling and thermal boundary conditions for high-power IGBT modules [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(3): 2518-2530.

[9] 张思慧, 赵蕤, 闫帅, 等. 基于热阻抗模型的三相逆变器功率器件结温监测方法[J]. 电源学报, 2021, 19(4): 27-34.
Zhang Sihui, Zhao Rui, Yan Shuai, et al. Junction temperature monitoring method for three-phase inverter power device based on thermal impedance model [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(4): 27-34. (in Chinese)

[10] 柴晓光, 宁圃奇, 曹瀚, 等. 基于大电流通态压降的 IGBT 功率模块结温监测方法的研究[J]. 电源学报, 2020, 18(4): 77-84.
Chai Xiaoguang, Ning Puqi, Cao Han, et al. Research on junction temperature monitoring method for IGBT power module based on on-state voltage drop at high current [J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(4): 77-84. (in Chinese)

[11] Wang Ze, Qiao Wei. A physics-based improved cauer-type thermal equivalent circuit for IGBT modules [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(10): 6781-6786.

[12] 熊妍, 沈燕群, 江剑, 等. IGBT 损耗计算和损耗模型研究[J]. 电源技术应用, 2006, 9(5): 55-60.
Xiong Yan, Shen Yanqun, Jiang Jian, et al. Study on loss calculation and model for IGBT [J]. Power Supply Technologles and Applications, 2006, 9(5): 55-60. (in Chinese)

[13] Jing Lei, Du Mingxing, Wei Kexin, et al. An improved behavior model for IGBT modules driven by datasheet and measurement [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2020, 67(1): 230-236.

[14] 朱元, 张幸福, 肖明康, 等. 基于 Simplorer/Simulink 联合仿真计算 IGBT 损耗的方法[J]. 微特电机, 2021, 49(1): 10-13.
Zhu Yuan, Zhang Xingfu, Xiao Mingkang, et al. Research of IGBT power loss calculation based on simplorer/Simulink co-simulation [J]. Small & Special Electrical Machines, 2021, 49(1): 10-13. (in Chinese)

[15] Cao Jian, Bharathan D, Emadi A. Efficiency and loss models for key electronic components of hybrid and plug-

in hybrid electric vehicles' electrical propulsion systems [C]// 2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Arlington, TX, USA, 2007: 477-482.

[16] 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)

[17] Infineon. FS820R08A6P2B HybridPACK™ drive module-DataSheet [R/OL]. (2019-10-09)[2022-05-27]. https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-FS820R08A6P2LB-DataSheet-v03_04-EN.pdf

[18] Infineon. Calculation of major IGBT operating parameters [R/OL]. [2022-05-27]. https://www.docin.com/p-985052983.html



熊刘涛

作者简介：

熊刘涛(1998—)，男，硕士研究生。研究方向：电力电子可靠性。E-mail：xlt1998228@163.com。

李国丽(1961—)，女，通信作者，博士，教授。研究方向：电机智能优化设计，机器人电驱动。E-mail：liguoli@ahu.edu.cn。

孙泽辉(1979—)，男，博士。研究方向：电机热分析。E-mail：zehuis@ustc.edu.cn。

(责任编辑：郭凯凯)

关于《电源学报》2024 年度优秀论文的表彰(一)

标题	所有作者 (标*为通信作者)	作者单位	刊期信息	详细信息
高压大容量柔性直流换流阀关键设计和发展趋势	饶宏[1]，周月宾[1*]，陈煜坤[1]，杨柳[1]，赵彪[2]，易荣[3]，盛俊毅[4]	1.直流输电技术全国重点实验室（南方电网科学研究院有限责任公司） 2.清华大学电机系 3.荣信汇科电气股份有限公司 4.特变电工西安柔性输配电有限公司	2024,22(3):1-14	
数据驱动的钠离子电池健康状态评估方法研究	陆楠[1]，孙越[1]，彭鹏[1,2]，熊瑞[1*]，孙逢春[1]	1.北京理工大学机械与车辆学院 2.南方电网调峰调频发电有限公司储能科研院	2024,22(1):1-10	
一种基于自由衰减振荡的固定占空比控制的无铁芯变压器	戴晨皓，张波*	华南理工大学电力学院	2024,22(2):1-9	
车用永磁同步电机高性能弱磁控制策略	章回炫[1,2]，范涛[1,2*]，宁圃奇[1,2]，国敬[1,2]，温旭辉[1,2]	1.中国科学院大学 2.中国科学院电工研究所	2024,22(2):378-385	
一种具有高容错能力的改进型 LLC 拓扑及其控制策略	陈庆华，吴克，邱荣禄，王涵宇*，马铭遥	合肥工业大学电气与自动化工程学院	2024,22(3):165-171	

《电源学报》对优秀论文及其作者表示热烈祝贺！