

多源数据融合的DC-DC电源热误差补偿模型

范建明^{1,2}, 裴焕斗^{1*}, 韩晋², 石彦龙², 金建新²

(1. 中北大学 仪器与电子学院, 山西 太原 030051; 2. 太原永明恒动源电子有限公司, 山西 太原 030006)

摘要: 随着高功率密度DC-DC开关电源的快速发展, 电源模块的热管理面临严峻挑战。精准的温度测量是热管理设计的核心环节, 而传统单一测温方法难以在稳态与动态工况下同时兼顾测量精度与实时性。本文针对高功率密度DC-DC电源模块热管理中传统测温方法的精度局限, 提出一种基于多源数据融合的温度补偿模型。该模型综合利用经动态发射率校正的红外热图像、热电偶测量值及ANSYS有限元热仿真结果, 并以MEMS传感器嵌入式测量值为基准, 通过计算测量偏差与误差方差构建静态权重, 同时结合负载电流变化率与温度变化率引入动态响应因子, 实时调整各测温方法的权重分布, 实现对不同工况下温度数据的加权融合补偿。实验结果表明: 模型在满载及部分负载工况下的稳态最大测温误差均不超过1.0℃, 平均误差小于0.7℃; 动态负载突变实验中, 动态响应误差控制在1.0℃以内, 响应时间约1.1s; 在环境温度(-55~100℃)和风速(0~3 m/s)干扰下, 模型平均误差小于1.5℃, 最大误差不超过2.0℃, 具备良好的环境鲁棒性。与DS证据理论、卡尔曼滤波方法相比, 本文模型在稳态精度、动态误差控制及环境适应性方面表现更为均衡。本文所提模型在不破坏器件封装和不显著增加成本的前提下, 实现了对DC-DC电源关键器件温度的高精度、高可靠性监测, 为电源热设计与系统优化提供了有效的数据支撑。

关键词: DC-DC电源; 热误差补偿; 多源数据融合; 热评估

中图分类号: TM930.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2025.10.0006

引用格式: 范建明, 裴焕斗, 韩晋等. 多源数据融合的DC-DC电源热误差补偿模型[J]. 中北大学学报(自然科学版), DOI:10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2025.10.0006.

Fan Jianming, Pei Huandou, Han Jin, et al. Compensation Model for DC-DC Power Supply Based on Multi-Source Data Fusion[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), DOI:10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2025.10.0006.

Compensation Model for DC-DC Power Supply Based on Multi-Source Data Fusion

Fan Jianming^{1,2}, Pei Huandou^{1*}, Han Jin², Shi Yanlong², Jin Jianxin²

(1. School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Taiyuan Yongming Hengdong Electronic Co., Ltd., Taiyuan 030006, China)

Abstract: With the rapid development of high power density DC-DC switching power supplies, thermal management of power modules faces severe challenges. Accurate temperature measurement is the core aspect of thermal management design, while traditional single-method temperature measurement struggles to balance measurement accuracy and real-time performance under both steady-state and dynamic conditions. This paper addressed the accuracy limitations of conventional temperature measurement methods in

收稿日期: 2025-10-10

作者简介: 范建明(1998—), 男, 硕士, 主要从事开关电源热设计方面的研究。

* 通信作者: 裴焕斗(1973—), 男, 副教授, 博士, 主要从事动态测试与智能仪器方面的研究。E-mail: 1455160188@qq.com。

the thermal management of high power density DC-DC power modules and proposed a temperature compensation model based on multi-source data fusion. The model comprehensively utilized infrared thermal images with dynamically calibrated emissivity, thermocouple measurements, and ANSYS finite element thermal simulation results, taking embedded MEMS sensor measurements as the benchmark. By calculating measurement deviations and error variances, static weights were constructed, while dynamic response factors were introduced based on load current change rate and temperature change rate to adjust the weight distribution of each temperature measurement method in real time. This enabled weighted fusion compensation of temperature data under different operating conditions. Experimental results show that the model maintains a maximum steady-state temperature measurement error within $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ and an average error below $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ under full-load and partial-load conditions. During dynamic load step tests, the dynamic response error is controlled within $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, with a response time of approximately 1.1 s . Under environmental temperature ($-55\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$) and wind speed ($0\sim 3\text{ m/s}$) disturbances, the model achieves an average error below $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ and a maximum error not exceeding $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, demonstrating good environmental robustness. Compared with Dempster-Shafer evidence theory and Kalman filter methods, the proposed model performs more balanced in terms of steady-state accuracy, dynamic error control, and environmental adaptability. The presented model achieves high-precision and high-reliability monitoring of key device temperatures in DC-DC power supplies without damaging device packaging or significantly increasing costs, providing effective data support for power supply thermal design and system optimization.

Key words: DC-DC power; thermal error; multi-source data fusion; thermal assessment

0 引 言

随着电子设备向高效率、高功率密度和小型化方向不断发展,DC-DC开关电源作为核心电能转换单元,在通信、计算、工业控制等领域中发挥着日益重要的作用。然而,功率密度的持续提升也带来了严峻的热管理挑战。研究表明,电子产品失效有高达55%是由温度超过元器件规定值而引起的^[1]。电源模块在运行过程中产生的热量若不能及时有效地处理,将极大的影响其电气性能、工作效率,甚至引发热失效。而优化其热设计与提升整机性能的关键前提是精确的热测试数据。

目前,国内外在DC-DC电源热测试领域的研究已形成多种技术路线,主要可分为接触式测温、非接触式测温及多源数据融合等方向。接触式测量方法中,热电偶虽具备响应快、成本低的优点,但其精度极易受到多种因素的显著干扰^[2-3]。Pope等^[4]的研究表明,当热电偶嵌入至PCB板或器件封装等材料中时,会因“热桥效应”而严重扰动原有的温度场,导致测点温度显著低于真实“无干扰”温度。不仅如此,即便采用高精度MEMS温度传感器进行接触式测量,其精度也高度依赖安装质量(如界面平整度、接触压力等)。

不一致的安装方式会引入难以量化且重复性差的接触热阻,进而引发固定的系统偏移或随温度变化的测量误差。此外,传感器自身及安装结构固有的热惯性,使其在电源负载突变、温度快速变化的动态工况下响应存在明显滞后。在非接触式测温方面,红外热成像技术具备全场测温优势,但其精度严重依赖于被测表面发射率的准确设定^[5-7]。为追求更高的测温精度,一些研究采用了更为精密的测量手段,如金线键合式微热电偶^[8]、短波红外热像仪或直接在芯片内部集成MEMS温度传感器^[9]。这类方法虽能提供更接近结温的可靠数据,但显著增加了测量成本,还可能需要对器件封装进行物理改造,对器件结构造成不可逆的损伤,从而影响长期实际应用价值。

近年来,多源数据融合成为提升测温可靠性的新兴研究方向。国内外学者开始探索结合多种测量方法的优势以克服单一技术的局限性。方子敏等^[1]在工程案例中联合使用红外热成像与热电偶,实现了从宏观定位到精确测量的闭环;Liao等^[10]将部分观测的红外测温数据与热传导物理定律相融合,实现了全场温度的高精度预测与未知参数的反演。在测量领域,跨传感器融合被明确定义为一种通过多个传感器测量同一物理量以提升测量结果质量的有效方法^[11]。

针对高功率密度DC-DC电源在热管理中传统测温方式存在的精度局限与动态响应不足问题,本文基于多源数据融合的思路,提出了一种基于多源数据融合的温度补偿模型。该模型通过集成动态发射率校正的红外热成像、热电偶实测数据及ANSYS有限元热仿真结果,并以嵌入式MEMS传感器为基准,构建了稳态权重与动态权重相融合的机制,有效消除了单一传感器在电源模块热测试中存在的系统误差、非线性误差及随机误差。该模型实现了在不改变器件封装、不显著增加成本的前提下,显著提升DC-DC电源模块温度测量的精度与可靠性,为后续热设计与系统优化提供精准的数据支撑。

1 本文方法

本文提出的多源数据融合温度补偿模型实验系统结构如图1所示。首先,通过多源数据温度测试实验,同步采集经过动态发射率标定后的红外热成像测温数据、热电偶温度测量数据、ANSYS有限元热仿真数据以及高精度MEMS传感器嵌入式测量数据。随后,通过计算各方法的均方误差来分配权重,并结合负载电流变化率与温度变化率引入动态响应因子,实时调整权重分布,从而实现对不同工况下温度的加权融合估计。最终,采用加权融合算法对各数据源进行融合计算,输出对电源模块关键器件温度的精确估计值。

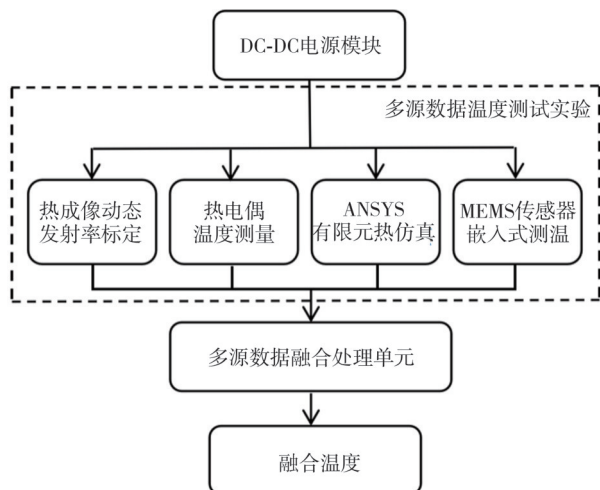


图1 实验系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system structure

1.1 实验样机概述与主要热源器件

本文使用的实验样机是一台额定功率为

300 W, 标准四分之一砖封装的全国产化高功率密度DC-DC电源模块,其输入电压范围为16~40 V,输出5V/60 A,工作频率200~400 kHz。设计有输入欠压、输出过压、输出过流、输出短路、等保护功能。

该实验样机采用全桥式拓扑结构,后端采用同步整流技术降低整流损耗,简化电路如图2所示。其中主要热源元件包括功率开关管Q1、Q2、Q3、Q4,同步整流管Q5、Q6、Q7、Q8,高频变压器T1,滤波电感L1,功率开关管与同步整流管的损耗主要来源于导通损耗和开关损耗;高频变压器和滤波电感的损耗则包括铜损和铁损。由于电阻和电容发热较小,本文不将其视为主要热源。为简化表述,本文后续图表及分析中将使用以上符号表示对应的元器件,其在PCB板上的对应位置关系如图3所示。

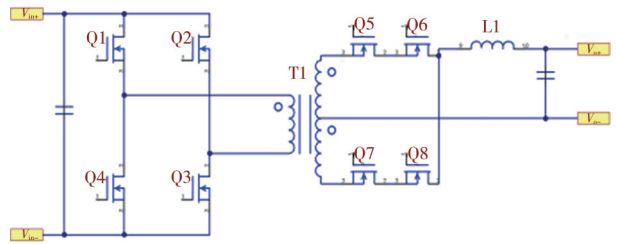


图2 实验样机简化电路图

Fig. 2 Simplified circuit diagram of experimental prototype

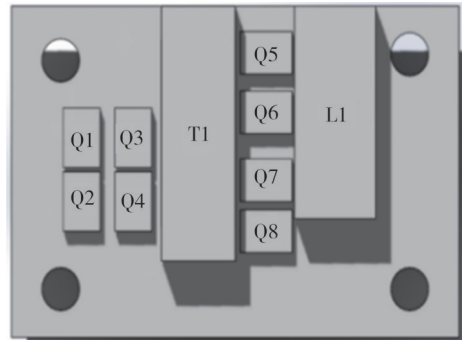


图3 主要元器件对应位置图

Fig. 3 Corresponding position diagram of main components

1.2 多源数据温度测试实验

本实验基于专用测试平台,对DC-DC电源模块进行了多源温度测量。该平台主要由未封装的待测DC-DC电源模块及其专用测试工装、80 V/60 A直流源、120 V/80 A电子负载、K型四通道热电偶和红外热成像仪等核心设备组成。实验中输入电压28 V、输入电流20 A、电子负载设置为满载60 A。实验环境温度为室内温度,在具

体测试的时候测试具体温度值。测试过程中,若温度连续 60 s 内的变化幅度低于 0.5°C , 则判定温度已趋于稳定达到稳态条件。需要注意的是,该稳态判定标准仅适用于负载稳定后的测量阶段;而在负载突变引发的动态响应期间,具体温度的测试值为当前时刻各传感器温度读数。

由于被测器件封装尺寸较小且测试过程中温度测试点均在器件封装表面几何中心,三种测温传感器无法在空间上实现完全同步安装和实时同步采集。为确保多传感器测温数据的可比性,实验采用严格的环境控制和分阶段测量策略,保证各测量阶段各个环境因素的稳定性和重复性,实现多源数据的相对同步。

1.2.1 热成像动态发射率标定

红外热成像测温的准确性关键在于表面发射率的准确设定。为提升红外测温精度,本实验通过在待测器件封装表面中心粘贴已知发射率的基准标签,对待测器件进行发射率动态标定。在满载工况下进行温度测试,待温度稳定且无明显波动时,记录标签温度及器件封装表面温度,并对比标签与相邻区域的测温差异。得到器件封装表面的真实发射率,利用当前热成像图像进行温度校正。实验过程中,本文实验环境温度为 25.3°C ,具体温度值可在测试过程中具体测试。红外热成像工作环境温度参数设置与实际环境保持一致,以减少环境温度变化对红外测温结果的影响。校正后的结果如图 4 所示。

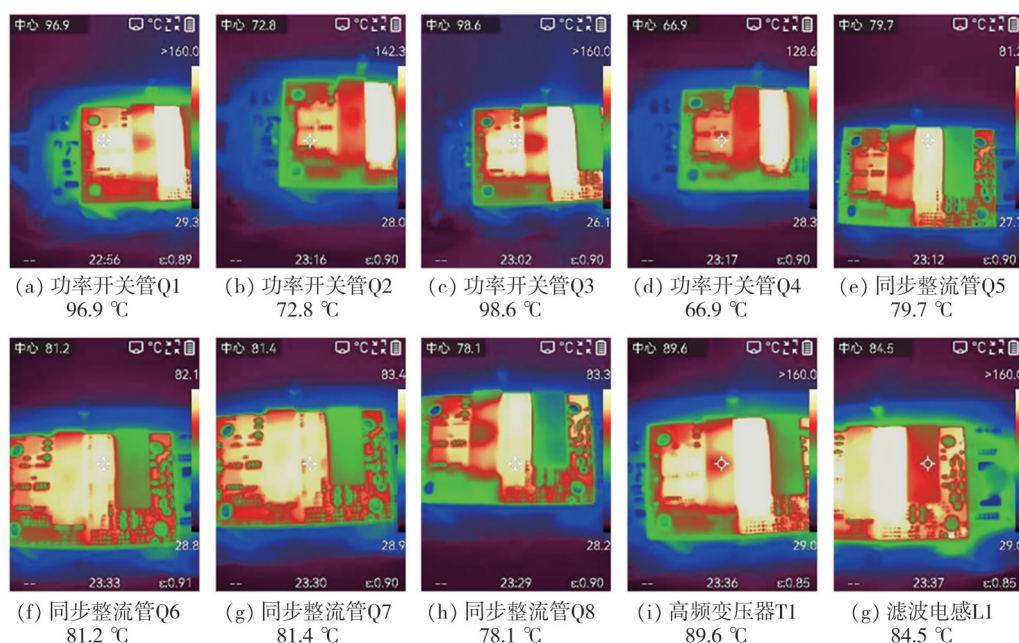


图 4 调整发射率后器件表面温度

Fig. 4 The surface temperature of the device after adjusting the emissivity

1.2.2 热电偶温度测量

热电偶测温作为传统的接触式测温方法,因其响应速度快和测量稳定性高,被用于测量模块关键热源器件的表面温度。实验采用 K 型四通道热电偶进行温度测量。使用高温瞬干胶将热电偶探头粘贴于各待测器件表面的几何中心位置,确

保探头与器件表面充分贴合并直接机械接触。本文实验环境温度为 25.3°C ,具体温度值通过测试过程中测试,以保证热电偶测量环境条件的一致性。在满载工况下进行温度测试,待温度稳定后记录热电偶读数,测试结果见 1.2.5 节表 1 所示。

表 1 多源数据温度测试实验数据汇总

Tab. 1 Summary of multi-source data temperature testing experimental data

$^{\circ}\text{C}$

方法	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	T1	L1
热成像动态发射率标定	96.9	72.8	98.6	66.9	79.7	81.2	81.4	78.1	89.6	84.5
热电偶温度测量	96.1	68.5	98.9	63.8	78.1	81.7	74.7	77.1	89.7	83.8
ANSYS 有限元热仿真	96.2	72.4	98.9	68.4	79.5	84.8	80.5	78.1	91.5	84.8
MEMS 传感器嵌入式测温	96.6	70.5	98.7	65.2	78.6	83.1	77.8	77.4	90.4	84.8

1.2.3 ANSYS有限元热仿真

为了获得主要发热元器件表面温度的理论分布,本文利用ANSYS有限元软件进行热仿真分析。仿真模型基于电源模块实际结构进行适当简化,重点保留功率损耗大的关键元器件如功率MOS管和磁芯,忽略小功率元件以提高计算效率^[12-13]。本文仿真模型的边界温度设置为25.3℃,可在具体仿真实验时进行具体环境温度测试,以提高仿真结果与实际环境的一致性。通过仿真,获得各节点温度预测值作为多源数据融合中的一项重要数据源。有限元稳态热仿真结果如图5所示。

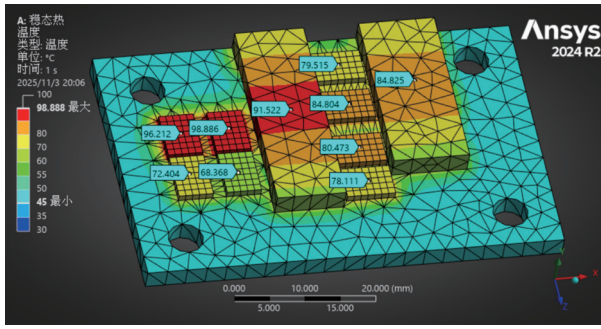


图5 满载工况下ANSYS稳态热仿真结果

Fig. 5 ANSYS steady-state thermal simulation results under full load conditions

1.2.4 MEMS传感器嵌入式测温

在半导体器件可靠性测试,如JESD51系列标准^[14]和精密电子热分析领域,将微型传感器置于尽可能靠近芯片结区的位置,被视为获取核心温度的权威方法。虽然MEMS传感器本身已具备高精度特性,但采用嵌入式测量方式可进一步减小传感器与被测器件间的接触热阻,进而提升测量精度并显著降低响应滞后,为本文后续多源融合模型的建立与评估提供一个尽可能贴近真实值的可靠参照标准。

本研究采用高精度微型MEMS温度传感器TMP117进行嵌入式测温。传感器通过微加工工艺嵌入待测器件封装表面几何中心,利用高导热硅脂确保良好热接触并固定。为评估传感器嵌入对局部热场的影响,本文基于ANSYS有限元软件建立了包含传感器及填充材料的详细热仿真模型。仿真结果表明,传感器及硅脂的引入仅引起局部温度场微小扰动,温度偏差不超过0.3℃,明显小于其他测温方法的典型误差范围,表明嵌入式测温对整体传热特性影响有限,足以作为高精度基准温度。传感器通过I²C接口采集数据,实验

达到热稳态后的测量值见表1。

1.2.5 多源数据温度测试实验数据汇总

将本节中的四种温度测量方法在满载工况下的测试结果进行系统汇总,具体数据如表1所示。表中所有数据均保留到小数点后一位。通过数据汇总,为后续误差分析以及多源数据融合模型构建提供数据基础。

1.3 多源数据融合温度补偿模型

针对DC-DC电源在单一测温方法中的局限性,本文提出了一种基于多源数据融合的温度补偿模型。该模型不仅考虑各数据源的静态误差特性,还引入动态响应因子以适应动态工况,实现对不同工况下测温数据的加权融合。下文将详细介绍该模型的权重计算方法、动态调整机制及融合计算过程。

1.3.1 稳态权重

首先,分别计算三种测试方法对各个器件的测试温度与基准值之间的误差。记第*i*种测量方法在第*j*个被测热源器件上的测试温度为 T_{ij} ,对应的基准真值为 $T_{ture,j}$,则其温度误差

$$E_{ij} = T_{ij} - T_{ture,j}, \quad (2)$$

接着,计算每种测量方法在不同被测热源器件上的测试偏差 $\bar{E}_i$ 与误差方差 σ_i^2 。测试偏差 $\bar{E}_i$ 用以衡量该方法整体上是否存在系统性偏差,若偏差大,说明测量结果整体偏离真实值,应降低权重。误差方差 σ_i^2 用以衡量该方法的整体精度和稳定性。

$$\bar{E}_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N E_{ij}, \quad (3)$$

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (E_{ij} - \bar{E}_i)^2, \quad (4)$$

式中: N 为器件数量。

为综合考虑系统误差与随机误差,将测试偏差和误差方差统一纳入考虑,避免仅用方差导致系统误差被忽略的缺陷。定义第*i*种方法的综合误差为

$$S_i = \bar{E}_i^2 + \sigma_i^2. \quad (5)$$

静态权重 W_i^{sta} 通过 S_i 的倒数分配,保证测量方法的准确性和稳定性都被考虑。静态权重计算公式为

$$W_i^{\text{sta}} = \frac{1/S_i^2}{\sum_{i=1}^3 (1/S_i^2)}. \quad (6)$$

1.3.2 动态权重

为了提升多源数据融合温度补偿模型在动态工况下的适应能力,本文在静态权重的基础上引入动态权重调整机制。该机制通过引入动态响应因子,结合实时负载变化和温度变化信息,动态修正各测量方法的权重分布,从而增强模型对负载波动和温度非稳态变化的响应能力,最终权重计算为

$$W_i(t) = W_i^{\text{sta}} \cdot \alpha_i^{\text{dyn}}(t) \cdot \beta_i^{\text{dyn}}(t), \quad (7)$$

式中: W_i^{sta} 为第 i 种测量方法的静态权重; $\alpha_i^{\text{dyn}}(t)$ 和 $\beta_i^{\text{dyn}}(t)$ 分别为基于负载电流变化率和温度变化率的动态响应因子。

动态负载响应因子 $\alpha_i^{\text{dyn}}(t)$ 用于反映负载电流快速变化时各测量方法的响应特性,其计算公式设计为

$$\alpha_i^{\text{dyn}}(t) = \begin{cases} 1 + K_i \cdot \left| \frac{dI_{\text{load}}(t)}{dt} \right|, & \text{当 } \left| \frac{dI_{\text{load}}(t)}{dt} \right| > \Delta I_{\text{th}}, \\ 1, & \text{否则,} \end{cases} \quad (8)$$

式中: K_i 为调节系数; $I_{\text{load}}(t)$ 为 t 时刻的负载电流测量值; ΔI_{th} 为负载变化阈值,其取值为测试时所使用电子负载的电流分辨率,本文所使用的电子负载在低量程档位(0~3 A)时的取值为 1 mA/s,高量程档位(0~100 A)时的取值为 10 mA/s。当 $|dI_{\text{load}}(t)/dt|$ 大于 ΔI_{th} 时,表明负载电流正在进行动态变化。此时需提高快速响应方法的权重,同时降低慢响应方法权重。反之,当 $|dI_{\text{load}}(t)/dt|$ 小于等于 ΔI_{th} 时,则动态负载响应因子记为 1,即保持静态权重。

动态温度响应因子 $\beta_i^{\text{dyn}}(t)$ 反映温度处于非稳态时各测量方法的动态适应性,计算公式为:

$$\beta_i^{\text{dyn}}(t) = \begin{cases} 1 + H_i \cdot \left| \frac{dT(t)}{dt} \right|, & \text{当 } \left| \frac{dT(t)}{dt} \right| > \Delta T_{\text{th}}, \\ 1, & \text{否则,} \end{cases} \quad (9)$$

式中: H_i 为调节系数。 $I_{\text{load}}(t)$ 为 t 时刻的负载电流测量值。 ΔT_{th} 为负载变化阈值,根据本文温度稳态判定标准,设定该阈值为 0.5 °C/s。 $T(t)$ 为电路板温度未到达稳态持续变化中 t 时刻的温度测量值。若 $\left| \frac{dT(t)}{dt} \right|$ 大于温度变化阈值,则表明温度未达到稳态。此时需提高快速响应方法的权重,

同时降低慢响应方法权重。反之,若 $\left| \frac{dT(t)}{dt} \right|$ 小于等于温度变化阈值,则动态负载响应因子记为 1,即保持静态权重。

为保证权重归一化,最终权重需满足

$$W_i(t) = \frac{W_i^{\text{sta}} \cdot \alpha_i^{\text{dyn}}(t) \cdot \beta_i^{\text{dyn}}(t)}{\sum_{j=1}^3 [W_j^{\text{sta}} \cdot \alpha_j^{\text{dyn}}(t) \cdot \beta_j^{\text{dyn}}(t)]}. \quad (10)$$

1.3.3 融合计算与输出

对于任意时刻 t ,首先对原始测量数据进行偏差补偿

$$T_i^{\text{comp}}(t) = T_i^{\text{row}}(t) - \bar{E}_i, \quad (11)$$

式中: $T_i^{\text{row}}(t)$ 为第 i 种测试方法在 t 时刻的实际测量数据。

随后基于实时权重进行加权融合,得到最终温度估计值

$$T_{\text{fusion}}(t) = \sum_{i=1}^N W_i(t) \cdot T_i^{\text{comp}}(t). \quad (12)$$

1.3.4 模型应用

模型应用阶段,将多源温度测试实验获得的热成像动态发射率标定数据、热电偶实测数据及 ANSYS 有限元热仿真数据代入所建立的融合模型中。通过预设的静态权重与动态响应因子,模型能够对各类输入数据进行实时偏差补偿与加权融合,从而输出对电源关键器件温度的高精度估计值。需要特别说明的是,本文所采用的 MEMS 传感器嵌入式测量仅用于模型建立阶段的权重标定与验证,旨在为各测温方法提供可靠的基准参照,以确定其在融合体系中的贡献比例。在实际工程应用中,一旦模型权重完成标定与验证,系统即可仅依赖热电偶、红外热成像与有限元仿真三类数据源,在不引入额外硬件与封装改动的前提下,实现对电源模块温度的高精度、无损、低成本监测与评估,具有较强的实用性与可推广性。

2 实验结果与分析

2.1 不同负载条件下的稳态权重验证

为验证所提出的多源数据融合温度补偿模型在不同负载条件下的稳态权重适用性,本研究针对 75% 负载与 50% 负载工况开展了专门的数据采集实验。实验过程中,严格控制环境条件、实验设备及测量时间等参数,确保与满载工况保持一致。随后,将采集的数据代入本文构建的多源

数据融合模型,进行误差分析与权重计算。

表2汇总了不同负载比例下各数据源的融合权重及融合模型的误差统计情况。结果表明,在75%与50%负载条件下,通过误差方差及均方误差计算得到的融合权重分别为0.3(热成像):0.4(热电偶):0.3(有限元仿真),与满载工况下确定的权重完全一致(保留一位小数)。这充分证明了

所提融合模型的权重配置在不同负载工况下具有良好的稳定性和普适性,且该权重分布均为对应负载条件下的最优权重。此外,采用该统一权重进行温度融合后,融合模型在75%和50%负载下的最大测温误差分别为0.8℃和1.0℃,平均误差均低于1.0℃,体现了模型在稳态工况时良好的测温准确性和鲁棒性。

表2 不同负载条件下融合模型误差

Tab. 2 Errors of the fusion model under different load conditions

负载比例/%	热成像权重	热电偶权重	有限元仿真权重	最大误差/℃	平均误差/℃
100	0.3	0.4	0.3	0.9	0.4
75	0.3	0.4	0.3	0.8	0.5
50	0.3	0.4	0.3	1.0	0.7

2.2 模型动态响应能力验证

为了验证所提出的多源数据融合温度补偿模型在动态工况下的响应能力和准确性,本节以待测器件Q1为例,开展了阶跃负载变化实验。实验在恒定环境条件(环境温度25.3℃,无风速干扰)下进行,通过快速切换负载电流从低负载(20%额定负载)突变至满载(100%额定负载),并实时采集多源测温数据及融合模型输出温度。实验过程重点记录负载突变后前120 s内的温度响应动态。表3选取了关键时间节点的MEMS基准温度与融合模型温度以及对应误差。从表中可以看出,融合模型在负载快速变化的初期阶段(0~10 s)能够迅速响应温度变化,误差控制在1.0℃以内,且随着温度逐渐趋于稳态,误差进一步减小,保持在0.4~0.7℃范围内。动态响应因子的引入有效调整了各测温方法权重,使模型兼顾了响应速度和测量稳定性。

表3 动态工况下多源数据融合模型温度与基准对比

Tab. 3 Comparison of temperature and benchmark in multi-source data fusion model

时间/s	负载电流/A	融合模型温度/℃	MEMS基准温度/℃	误差/℃
0	12	35.0	35.4	0.4
5	36	46.3	47.1	0.8
10	60	69.8	70.7	0.9
20	60	76.0	76.6	0.6
30	60	82.7	83.4	0.7
50	60	89.1	89.7	0.6
80	60	94.3	94.7	0.4
120	60	96.7	97.1	0.4

2.3 环境干扰对多源数据融合模型精度的影响

为系统评估环境干扰对所提出的多源数据温

度融合模型测温精度的影响,本研究设计了环境温度与风速变化干扰实验。实验旨在验证融合模型在不同复杂环境条件下的稳定性和鲁棒性,确保其满足实际应用中的测温需求。实验采用高低温试验箱对电源模块进行温度控制,风速通过风速可调节的等离子风扇实现,负载电流则由可调节的电源老化架施加。环境温度与风速干扰实验装置如图6所示。环境温度设置为-55℃、25℃(室温)和100℃三个典型等级,风速设定为0 m/s(静止)、1 m/s和3 m/s三个档位。



图6 环境温度与风速干扰实验装置图

Fig. 6 Experimental setup diagram for interference between environmental temperature and wind speed

在满载稳态工况中,实验首先将环境温度和风速调整至目标档位,启动试验箱和风扇,同时将负载电流设定为满载状态。待温度达到稳态后,开始采集多源融合测温数据,以确保测量数据的准确性和代表性。针对阶跃负载工况,实验过程更侧重于动态响应能力的验证。首先在设定的环境温度与风速条件下,将电源模块置于低负载状态并待温度稳定,随后通过电源老化架快速将负载切换至满载状

态,形成阶跃负载变化。在此过程中,实时采集多源融合模型的温度响应数据,记录温度上升及动态变化趋势,待温度趋于稳态后继续采集满载稳态数据。随后负载电流恢复至低负载,采集温度下降过

程中的测温数据。通过对整个阶跃负载响应过程中的最大绝对误差、平均误差及均方根误差进行统计,全面评估模型在负载突变条件下的测温精度与稳定性。各环境条件下的误差统计数据汇总见表4。

表4 环境温度与风速干扰下融合模型误差

Tab. 4 Fusion model error under environmental interference

环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	稳态满载			动态阶跃负载		
		平均误差/ $^{\circ}\text{C}$	最大误差/ $^{\circ}\text{C}$	误差标准差/ $^{\circ}\text{C}$	平均误差/ $^{\circ}\text{C}$	最大误差/ $^{\circ}\text{C}$	误差标准差/ $^{\circ}\text{C}$
-55	0	0.5	0.8	0.6	0.7	0.9	0.8
25	0	0.4	0.9	0.3	0.5	0.9	0.5
100	0	0.8	1.1	0.9	0.9	1.2	1.1
-55	1	0.6	1.0	0.7	0.8	1.1	1.0
25	1	0.5	0.9	0.6	0.8	1.0	0.9
100	1	0.8	1.3	0.8	1.1	1.4	1.2
-55	3	1.0	1.3	1.3	1.2	1.7	1.4
25	3	0.8	1.2	1.0	1.1	1.5	1.3
100	3	1.3	1.6	1.5	1.5	1.9	1.6

2.4 对比实验

本文选取了具有代表性的多源数据融合方法Dempster-Shafer(DS)证据理论融合^[15]与卡尔曼滤波融合^[16]作为对比,从稳态测温精度、动态响应能力以及非稳态温度条件下的表现三个维度进行对比分析。对比实验包括三种主要工况:首先,在稳态测温环节,系统在满载条件下保持温度稳定,分别

采集各方法的温度估计值,并计算其平均误差与最大误差;其次,在负载动态变化工况中,通过阶跃式负载从20%迅速跃升至100%,实时记录各方法的温度响应及误差,重点分析其动态跟随能力;最后,在温度未达稳态的情况下,模拟温度从初始环境温度缓慢升高至稳态的全过程,综合评估各测温方法在非稳态条件下的性能表现。表5汇总了三种方法在三种工况下的测温误差统计及动态响应时间。

表5 多源数据融合模型与典型融合方法性能对比

Tab. 5 Performance comparison between multi-source data fusion model and typical fusion methods

工况	方法	平均误差/ $^{\circ}\text{C}$	最大误差/ $^{\circ}\text{C}$	动态响应时间/s
稳态测温	本文多源融合模型	0.4	0.9	—
	DS证据理论融合	0.4	0.7	—
	卡尔曼滤波融合	0.7	1.2	—
负载动态变化	本文多源融合模型	0.6	0.9	1.1
	DS证据理论融合	1.3	1.8	1.5
	卡尔曼滤波融合	0.5	1.1	0.8
非稳态温度	本文多源融合模型	0.7	1.1	1.0
	DS证据理论融合	1.1	1.7	1.2
	卡尔曼滤波融合	0.5	1.1	0.9

基于表5的数据,本文提出的融合模型在稳态、动态及非稳态等多种工况条件下均展现出均衡且优越的性能表现。该模型在稳态精度方面与DS证据理论融合方法相当,尽管其动态响应速度略逊于卡尔曼滤波,但在最大误差控制方面表现更为稳定,特别是在非稳态条件下能有效控制整体误差范围。相比之下,DS证据理论融合方法在动态及非稳态场景中误差增加较为显著;卡尔曼滤波虽然具有动态跟踪的速度优势,但其稳态精度相对较低。本文模型通过结合静态权重与动态响应因子,在不过度依赖单一性能指标的情况下,实现了多类工况下可靠

的温度估计,充分体现了其在工程实用性和环境适应性方面的综合优势。

3 结 论

本文针对高功率密度DC-DC电源模块热管理中测温精度不足的问题,提出了一种基于多源数据融合的温度补偿模型。通过融合动态发射率校正的红外热图像、热电偶测量值和ANSYS稳态热仿真结果,并以嵌入式MEMS传感器测量值为基准,构建了基于稳态权重与动态权重结合的加权融合算法,有效提升了温度测量的准确性和

稳定性。实验验证表明,该模型在不同负载条件下的稳态测试中表现出优异的适应性和普适性,最大误差不超过 1.0°C ,相比现有融合方法精度提升显著。动态权重调整机制增强了模型在动态工况下的响应能力,且在复杂环境温度 and 风速干扰下依然保持良好的测温性能。该模型在不破坏器件封装、不显著增加成本的条件下,为实现高精度、高可靠性的电源模块热评估提供了有效方法,对优化热设计、评估系统可靠性具有重要的工程应用价值。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献:

- [1] 方子敏,王红涛,刘建南,等.基于热测试技术的电子产品可靠性分析研究[J].现代信息科技,2019,3(19):37-40.
FANG Zimin, WANG Hongtao, LIU Jiannan, et al. Reliability analysis of electronic products based on thermal testing technology[J]. Modern Information Technology, 2019, 3(19): 37-40. (in Chinese)
- [2] 田晓兵,潘玉峰.热电偶测量温度的误差分析[J].上海计量测试,2024,51(4):71-73.
TIAN Xiaobing, PAN Yufeng. Error analysis of temperature measurement by thermocouples[J]. Shanghai Measurement and Testing, 2024, 51(4): 71-73. (in Chinese)
- [3] 王飞跃.热电偶传感器信号调理与数字采集系统的设计[D].太原:中北大学,2013.
- [4] POPE I, HIDALGO J P, HADDEN R M, et al. A simplified correction method for thermocouple disturbance errors in solids[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2022, 172: 107324.
- [5] 张双双,刘琦,张济国.红外热成像设备目标检测原理及影响因素分析[J].中国安全防范技术与应用,2024(4):43-52.
ZHANG Shuangshuang, LIU Qi, ZHANG Jiguo. Target detection principle of infrared thermal imaging equipment and analysis of its influencing factors [J]. China Security Protection Technology and Application, 2024(4): 43-52. (in Chinese)
- [6] 曹鹤阳.高精度红外测温关键技术及实现[D].南京:南京理工大学,2021.
- [7] 孙成,潘明强,王阳俊,等.噪声对红外测温性能的影响研究[J].红外技术,2019,41(4):370-376.
SUN Cheng, PAN Mingqiang, WANG Yangjun, et al. Influence of noise on infrared temperature measurement performance[J]. Infrared Technology, 2019, 41(4): 370-376. (in Chinese)
- [8] AMMOUS A, ALLARD B, MOREL H. Transient temperature measurements and modeling of IGBT's under short circuit [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1998, 13(1): 12-25.
- [9] 姜文涛.嵌入式歧管微通道散热器实验与数值模拟研究[D].合肥:中国科学技术大学,2023.
- [10] LIAO S H, XUE T J, JEONG J, et al. Hybrid thermal modeling of additive manufacturing processes using physics-informed neural networks for temperature prediction and parameter identification[J]. Computational Mechanics, 2023, 72(3): 499-512.
- [11] LIU Z, XIAO G, LIU H, et al. Multi-sensor measurement and data fusion[J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2022, 25(1): 28-36.
- [12] 吴锟,林宏翔,李辉,等.基于有限元软件的开关电源热分析仿真[J].科技创新与应用,2022,12(16):49-52.
WU Kun, LIN Hongxiang, LI Hui, et al. Thermal analysis simulation of switching power supply based on finite element software [J]. Technology Innovation and Application, 2022, 12(16): 49-52. (in Chinese)
- [13] 李岩.基于有限元法的开关电源热设计技术的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
- [14] JEDEC Solid State Technology Association. Integrated circuits thermal test method environment conditions-Natural convection (still air): EIA/JESD51-2[S]. Arlington: Electronic Industries Association, 1995.
- [15] 姬文焱,梁全东,李科志,等.基于神经网络和DS证据理论的多传感器数据融合目标识别方法[J].网络安全与数据治理,2023,42(S2):193-201.
JI Wenyan, LIANG Quandong, LI Kezhi, et al. A multi-source data fusion target recognition method based on neural network and DS evidence theory [J]. Cyber Security and Data Governance, 2023, 42(S2): 193-201. (in Chinese)
- [16] 罗钦文,余潇,高歆杨,等.基于卡尔曼滤波补偿传感器数据滞后的时间配准[J].激光技术,2025,49(6):867-873.
LUO Qinwen, YU Xiao, GAO Xinyang, et al. Time registration based on Kalman filter for sensor data delay compensation[J]. Laser Technology, 2025, 49(6): 867-873. (in Chinese)