

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2022.04.053

基于 Icepak 的电网保护装置热设计研究

周辉^{1,2}, 郑立亮^{1,2}, 沈敏^{1,2}, 夏雨^{1,2}, 甘云华^{1,2}, 周华良^{1,2,3}, 王新春^{1,2}

(1. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106;

2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106;

3. 智能电网保护与运行控制国家重点实验室, 江苏 南京 211106)

摘要:以某电网保护装置为热设计研究对象,针对国产 CPU、FPGA 芯片在 70 °C 环境温度运行时超过其最高许用温度的问题,先通过理论模型计算选定自然散热的冷却方式,再利用 Icepak 仿真软件分析装置内部稳态温度分布情况。通过调整高功耗插件的间隔距离、增加独立风道结构等措施,实现装置内部关键芯片的控温要求,提升了设备可靠性,并在温度实验中得到验证。

关键词: 电网保护装置;热设计;Icepak;数值模拟

中图分类号:TK123 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)04-0206-05

Thermal Analysis of Power Grid Protection Device Based on Icepak

ZHOU Hui^{1,2}, ZHENG Liliang^{1,2}, SHEN Min^{1,2}, XIA Yu^{1,2}, GAN Yunhua^{1,2}, ZHOU Hualiang^{1,2,3}, WANG Xinchun^{1,2}

(1. NARI Group Corporation State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211106, China;

2. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China;

3. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control, Nanjing 211106, China)

Abstract: With the power grid protection device taken as the thermal design research object and aimed at the problem that domestic CPU and FPGA chips exceed their maximum allowable temperature when running at an ambient temperature of 70 °C, a natural cooling method is initially selected based on theoretical model calculations, and the internal steady-state temperature distribution of the device is analyzed by the Icepak simulation software. The temperature control requirements for critical chips are achieved by adjusting the spacing distance of high-power plug-in modules and adding independent air duct structures, etc., which improves the reliability of the device and is verified by thermal experiments.

Keywords: power grid protection device; thermal analysis; Icepak; numerical simulation

0 引言

自主可靠、可控、安全稳定运行是智能电网的发展趋势,近期贸易争端进一步推动了电力行业芯片与器件的国产化进程。然而在实际应用中,国产芯片在功耗与热稳定性方面与进口芯片都存在较大差距,但装置内部元器件的功率密度却在提升。电子设备工作时,功率损失一般都会转化为热能。据统计,55%的失效故障都是因温度超过规定值而导致,且失效率随温度增加呈指数增长趋势^[1]。因此,为保证设备长期、稳定地运行,热设计是必不可少的环节,科学合理的热设计方法至关重要^[2]。

某型采用国产元器件的电网保护装置,因工作环境严酷,性能指标严格,加上密封的箱体结构,其热设计的难度较大。如何选用合理有效的散热方式与散热结构,确保国产元器件在极限温度下按预定参数正常、可靠地工作是本文研究的重点。

1 装置结构与热设计

1.1 整体结构与热设计参数

装置外形尺寸为 442 mm×292 mm×175 mm,采用插件式结构设计,整体封闭。外壳选用铝合金板料,用螺栓连接。内部由背板分隔成前舱与后舱,前舱用于操作面板与液晶模块的信号接入,后舱通过导轨安装 DSP、CPU 与 SV-TX 等功能模块插件,各功能模块插件上按需配置散热器,并通过无源背板实现电气互联,整体结构如图 1 所示。

装置要求在-40 °C~70 °C的环境温度下无间断工作。从机箱背视图看,各功能模块插件的规划位置见图 2。其中 DC 模块热耗 8 W, BI 模块、AI 模块、BO 模块热耗均为 1 W, SV-TX 模块、DSP 模块、CPU 模块热耗由印制板、芯片与光模块热耗相加构成,装置总热耗约 40 W。其主要发热芯片的热耗与最高允许温度见表 1。

基金项目:国家电网公司总部科技项目资助(5700-202040263A-0-0-00)

第一作者简介:周辉(1984—),男,江苏启东人,工程师,硕士,研究方向为电力电子设备结构与热分析。

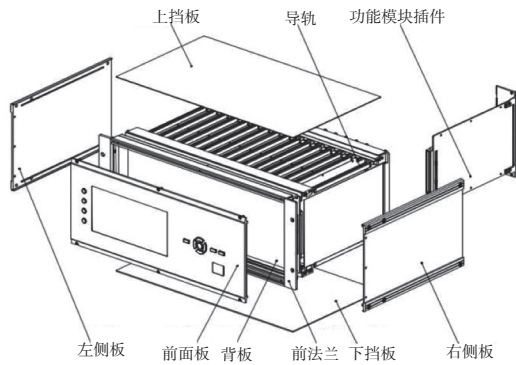


图1 装置整体结构爆炸图

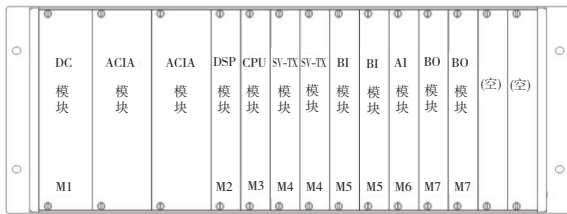


图2 装置功能模块插件规划布局

表1 主要发热芯片热设计参数

序号	名称	位于	热耗/W	数量	最高允许温度/°C
1	CPU 芯片 A	DSP 模块	4.5	1	115
2	FPGA 芯片 A	DSP 模块	2.0	1	110
3	FPGA 芯片 B	DSP 模块	2.0	1	110
4	光模块	DSP 模块	0.3	8	85
5	ADC 芯片	DSP 模块	0.3	6	110
5	CPU 芯片 B	CPU 模块	4.5	1	115
6	FPGA 芯片 C	CPU 模块	2.0	1	110
7	FPGA 芯片 D	CPU 模块	2.0	1	110
9	光模块	CPU 模块	0.3	6	85
10	光模块	SV-TX 模块	0.3	8	85

1.2 冷却方式选择

冷却方式的选择直接影响到装置的组装设计、可靠性与成本。自然冷却(导热、自然对流和辐射换热的单独作用或两种以上换热形式的组合)设计简单、可靠性高,成本低,而且不需要冷却剂驱动装置,避免了因机械磨损或故障影响系统可靠性的弊病^[3]。在满足电气性能与可靠性指标的前提下,装置优先考虑自然冷却的散热方式。

根据传热学模型,密闭结构的装置机箱主要通过与周围空气的对流和向空间的辐射来散热,其总散热量的计算公式为^[4]

$$\Phi = 1.86 \left(A_s + \frac{4}{3} A_t + \frac{2}{3} A_b \right) \Delta T^{1.25} + 4\sigma \varepsilon T_m^3 A_r \Delta T \quad (1)$$

式中: Φ 为密闭结构的装置机箱总散热量,W; A_s 为机箱的

侧面面积, m^2 ; A_t 为机箱的顶面面积, m^2 ; A_b 为机箱的底面面积, m^2 ; A_r 表示参与辐射的机箱表面积, m^2 ; ΔT 为箱体表面相对于环境的温升,K; σ 为箱体辐射常数,约 $5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$; ε 为箱体表面平均发射率,取 $\varepsilon = 0.86$; $T_m = (T_s + T_a)/2$,其中 T_s 为装置机箱表面平均热力学温度,K; T_a 为环境热力学温度,K。

由于装置表面温度的升高会影响操作环境的舒适性,根据研制规范要求,箱体表面相对于环境的温升应不超过 $10 K$ ^[5]。取 $\Delta T = 10 K$, $T_s = 348 K$, $T_a = 343 K$, $T_m = 345.5 K$ 。 $A_r = A_s + A_t + A_b$, $A_s = 0.257 m^2$, $A_t = 0.129 m^2$, $A_b = 0.129 m^2$, $A_r = 0.515 m^2$ 。

按公式(1)计算: $\Phi = 58.5 W > 40 W$,即自然冷却方式下的装置总散热量大于内部各模块插件的总热耗。

1.3 热设计

上述计算确认了装置自然冷却的散热方式,但设备仍可能存在局部过热问题,尤其是在 $70^\circ C$ 极限温度下持续工作一段时间后,芯片温度可能超过最高允许温度,影响设备的性能与可靠性^[5]。为此,对该型电网保护装置重点考虑了以下零组件的散热设计。

1) 印制板与元器件的散热

通过增加印制板覆铜层厚度、层数、覆铜面积、加宽印制线宽度、增加热过孔等措施,提高其导热性能^[6]。在满足性能参数的前提下,优先选用热耗较小、结温高、热阻低和耐温性好的工业级器件。将热耗大的元器件位置均匀分散,热敏感元器件远离热源或将其隔离。此外,器件的位置与排列应便于散热结构的设计与安装。

2) 散热器结构形式的选择

根据设备研制规范,当印制板上元器件的热流密度超过 $0.4 W/cm^2$ 时应采取适当措施,将热量有效地传导到热沉上。对于功率管器件,选择插装式散热器,与功率管组装后焊接在印制板上。对于国产高功耗的 CPU、FPGA 芯片,选择型材散热器,用螺钉方式固定。使用导热硅脂或导热衬垫填充散热器与芯片的间隙,并保证足够接触压力,减小接触热阻。

3) 装置机箱的设计

选择机械强度高、导热性好的铝合金 6063 作为装置箱体材料,对箱体与散热器表面做导电氧化处理。在装置内部采用插头、插座连接各模块印制板,减少连接电缆,便于空气流通,避免热量在机箱内部循环。在箱体两侧壁安装防水透气阀,平衡内外气压,利于设备的散热^[7]。

2 热仿真与改进

Icepak 是一款基于有限元法,针对电子产品的热仿真软件,且集几何建模、网格生成、求解和后处理功能为一体。器件级、印制板级与系统级的散热问题都可以利用 Icepak 进行仿真计算,该软件广泛应用于电力电子、通信、航空航天等领域^[8-9]。

2.1 模型简化与仿真参数设置

对物理模型进行简化可以提高仿真效率,更有针对性

地分析问题。通过移除面板与插件的连接器,去除倒角、圆角特征,删除与仿真无关的零组件,将发热量小的功能模块热耗均化后建立板级模型,将发热量大且芯片热流密度高的功能模块建立芯片级模型等措施,建立如图 3 所示的热仿真简化模型,并为各功能模块建立 Assemblies 装配体,设定网格边界。

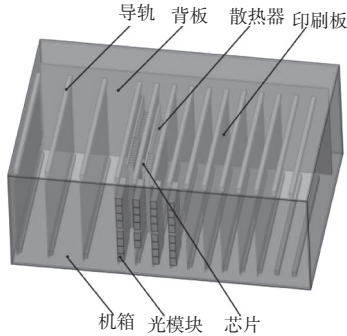


图 3 简化后的装置热仿真模型

其他主要仿真参数设置如下:

求解类型:稳态;

环境温度:70 °C (装置允许的最高环境温度);

流态:湍流;

环境压力:101 325 Pa;

辐射模型:Ray tracing 光线追踪辐射换热模型;

网格类型:Mesher-HD,非连续性网格。

2.2 仿真计算结果与分析

求解得到环境温度 70 °C 时机箱达到热稳态时的温度分布,图 4 为装置截面温度云图。结果显示,热量主要集中在箱体内部 DSP 与 CPU 功能模块区域,其中 DSP 模块 CPU 芯片 A 结温 119.7 °C, FPGA 芯片 A 结温 113.3 °C, FPGA 芯片 B 结温 113.7 °C, CPU 模块 CPU 芯片 B 结温 120.9 °C, FPGA 芯片 C 结温 113.8 °C, FPGA 芯片 D 结温 114.1 °C,均已超过其最高允许温度。因此,需要进行散热结构改进,将温度控制在许用范围内,并留有一定的安全余量。

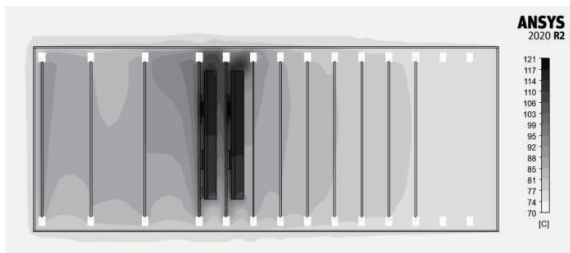


图 4 装置截面温度云图

2.3 设计改进

根据热设计原理,提高设备散热效率的主要措施有:选用导热系数高的材料,扩大散热表面积,增大与环境的换热系数,增大物体表面发射率和减小接触热阻等^[5]。本装置拟采取下列改进措施。

1)在硬件资源允许的情况下,将高功耗插件按图 5 间

隔配置,均衡热量分布。



图 5 装置各功能模块插件调整后的布局

2)在散热器基板内埋入热管以快速分散热量,使用导热系数高、质地柔软的导热凝胶填充芯片与散热器间隙,实现低内应力条件下界面热量传导^[6],如图 6 所示。

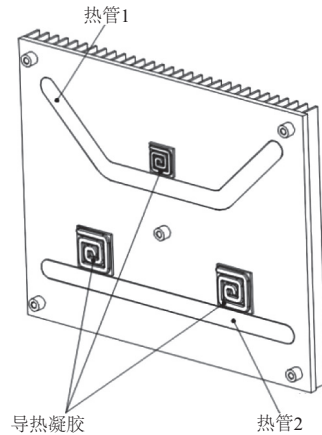


图 6 散热器热管与导热凝胶的设计

3)针对 DSP 与 CPU 功能模块,在满足装置防尘等级前提下,设计如图 7 所示独立风道结构。功能模块按图中箭头指示方向,通过印制板导向槽插入装置机箱,风道盖板、散热器、风道支架与挡板散热孔共同构成与外部环境连通的气流腔体。独立风道结构增强了自然散热时空气流通速率,提升了高功耗模块与外部环境的散热效率。

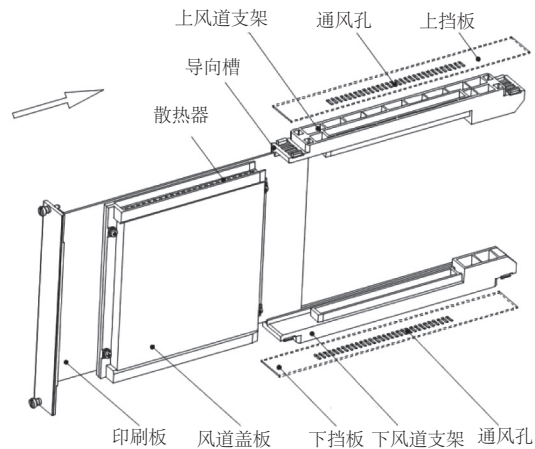


图 7 高功耗模块的独立风道散热结构

按上述改进措施更新仿真模型,重新求解环境温度 70 °C 时机箱达到热稳态时的温度分布。图 8 为改进后装置截面的温度云图;图 9、图 10 分别为改进后 DSP 模块、

CPU 模块表面的温度云图。表 2 为改进前后关键芯片温度仿真结果对比。

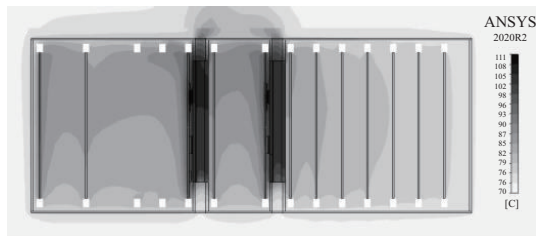


图 8 改进后装置截面温度云图

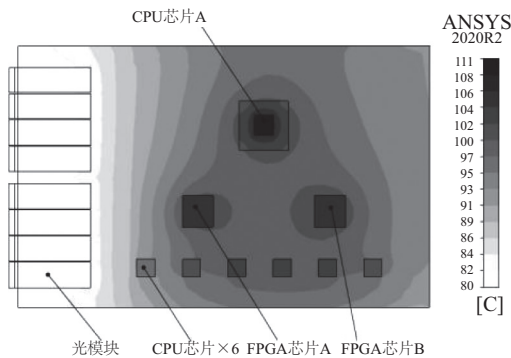


图 9 改进后 DSP 功能模块表面温度云图

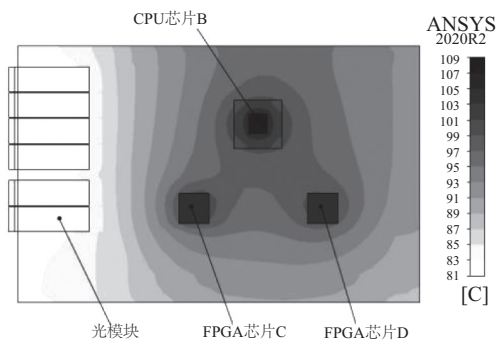


图 10 改进后 CPU 功能模块表面温度云图

表 2 改进前后关键芯片温度仿真结果对比 单位:℃

序号	名称	最高允许温度	改进前最高温度	改进后最高温度	改进前后温差
1	CPU 芯片 A	115.0	119.7	110.6	9.1
2	FPGA 芯片 A	110.0	113.3	105.0	8.3
3	FPGA 芯片 B	110.0	113.7	105.2	8.5
4	CPU 芯片 B	115.0	120.9	109.4	11.5
5	FPGA 芯片 C	110.0	113.8	103.5	10.3
6	FPGA 芯片 D	110.0	114.1	103.6	10.5

表 2 对比结果显示,通过设计改进,CPU、FPGA 等关键国产芯片最高温度下降约 8℃~11℃,均低于其最高允许温度,且留有一定安全余量。此外,图 11 所示装置截面的气流速度云图也表明,由于采用独立风道散热结构,风道区域内空气流速增大,对流换热效率提高,高功耗芯片的热量传递至散热器翅片后,能在风道结构中被有效带出

至外部环境。

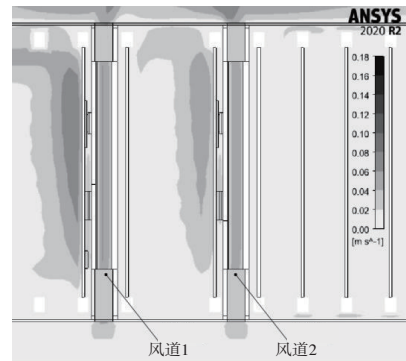


图 11 装置截面独立风道区域的气流速度云图

3 实验验证

为验证热设计及仿真结果的有效性,按改进后的方案制造样机,装置主要发热芯片的热耗见表 1。在 CPU 与 FPGA 芯片正表面固定铂电阻温度传感器,通过机箱外壳小孔引出,如图 12 所示。将装置放入标准温度试验箱 VC³7060,设置环境温度 70℃,进行高温运行实验。引出温度传感器连接到数据采集终端,通过计算机读取、处理后得到关键芯片的结温数据。



图 12 装置高温运行实验

设备开机正常运行 8h 后,记录热平衡时各关键芯片温度,见表 3。数据显示实测值比仿真结果低,偏差在 7%之内。

表 3 高温运行实验关键芯片实测温度与仿真结果对比

序号	名称	实测温度/℃	仿真结果/℃	偏差/%
1	CPU 芯片 A	104.7	110.6	5.6
2	FPGA 芯片 A	101.3	105.0	3.7
3	FPGA 芯片 B	102.7	105.2	2.4
4	CPU 芯片 B	103.0	109.4	6.2
5	FPGA 芯片 C	99.3	103.5	4.2
6	FPGA 芯片 D	100.3	103.6	3.3

4 结语

本文针对某电网保护装置进行热设计与相关仿真分析,并通过实验验证了改进方案的有效性,实现了装置内部关键国产芯片的控温要求。这种理论计算与软件仿真相结合的设计方法,既提高设计效率,又降低研发成本,对

同类型自然散热条件下的电力电子设备的热设计具有一定借鉴意义。

参考文献:

[1] 赵博彦. 电子设备热设计[M]. 北京:电子工业出版社,2009.

[2] 余建祖,高红霞,谢永奇. 电子设备热设计及分析技术[M]. 2版. 北京:北京航空航天大学出版社,2008.

[3] 邱成梯. 电子设备结构设计原理[M]. 南京:东南大学出版社,2002.

[4] 谢德仁. 电子设备热设计[M]. 南京:东南大学出版社,1989.

[5] 李庆友,王文,周根明. 电子元器件散热方法研究[J]. 电子器件,2005,28(4):937-941.

[6] 杜丽华,蔡云枝. PCB的热设计[J]. 现代电子技术,2002,

25(8):85-87.

[7] 刘应辉,张思东. 防水透气阀在通信设备行业的应用[J]. 电子机械工程,2014,30(4):5-7.

[8] 任恒,刘万钧,黄靖,等. 基于 Icepak 的密闭机箱热设计研究[J]. 电子科学技术,2015,2(6):639-644.

[9] 祝德春,范志刚,吴明,等. 新一代智能变电站预制舱热设计与舱内热环境数值模拟及评价[J]. 机械制造与自动化,2017,46(1):126-130,152.

[10] 王晨,张德晓,王力. 新型导热凝胶材料在航空电子设备中的应用[J]. 航空电子技术,2016,47(3):43-46,55.

收稿日期:2021-01-28

(上接第 183 页)

3.3 系统操作界面介绍

应用 FactoryTalk SE 软件绘制控制系统界面,可以实现实时在线对系统进行监测与控制。如前文所述,系统有手动和自动两种操作模式,在自动模式时,所有的设备启停都需要受到连锁条件的限制,设备的启停及运行控制基本实现无人值守。系统控制界面如图 5 所示。

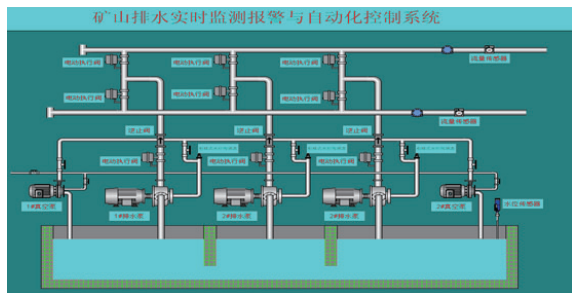


图 5 矿泵控制系统

4 系统应用效果

对原有矿山泵房采用环行以太网自动化控制系统升级改造后,基本实现了矿井泵房排水系统自动控制,水位高、低实时监测、泵房无人值守等。同时由于工作工时的减少,原泵房三班值班制改为了定期巡检制,节省下的员工可投入到了生产一线。系统改造投资费用约 600 万元,改造前后费用对比如表 1 所示。

表 1 升级改造费用对比 单位:万元/年

费用名称	手动控制	自动控制
工时费	65.7	21.9
折旧费	20.0	30.0
电费	949.4	602.5
维保费	50.0	65.0
合计	1 085.1	724.4

从表 1 可以看出,系统升级改造后,折旧及维保费用会增加,但工时费、电费等得到了降低。按此计算两年左右即可收回投资。同时采用本系统后具备报表功能,并能够掌握矿井的水文规律,有效地支撑了井下排水系统的安全运作,减少故障的发生概率,更有利于管理者实现人员统一的调度、优化和协调^[6]。

5 结语

本文结合矿井泵房的现状给出了矿井中央泵房自动化排水系统总体设计方案。该系统针对各种防治水故障、水泵的自动化控制因素在矿井环形工业以太网实现远程自动控制,最大程度地保障了矿井的安全生产,从而实现了人员无失误、设备无故障、系统无缺陷、管理无漏洞的现代化煤矿企业管理模式。

参考文献:

[1] KOKURIN M Y. Stable gradient projection method for nonlinear conditionally well-posed inverse problems[J]. Journal of Inverse and Ill-Posed Problems,2016,24(3):323-332.

[2] 张宏武. 工业以太网常用网络拓扑结构特点比较[J]. 内蒙古电力技术,2006,24(S2):93-96.

[3] 张康,刘淑良. 现场总线技术在煤炭装车中的应用[J]. 煤矿现代化,2013(5):90-91.

[4] 车永军,王成真,杜利宏. 煤矿井下中央水泵房自动化排水系统研究与应用[J]. 煤矿开采,2013,18(5):28-31,37.

[5] 刘海波,卓邦远. 基于 PLC 和以太环网的矿井泵房自动控制系统设计[J]. 科技创新导报,2014,11(28):90-91.

[6] 李宝望. 煤矿井下排水泵房 PLC 控制系统分析[J]. 当代化工研究,2020(6):66-67.

收稿日期:2021-04-06