机器学习辅助混合冷却的 Raspberry Pi 5

Abdallah Gh azal、Fazal Hameed、Elshafey Elshafey、Mohammad Awadallah 和 Alhasan Emam

arXiv:2611.32047v1 [cs.AR] 24 Nov 2026

摘要—**对于在持续高计算负载下运行的紧凑型计算平台而言，热管理是一项关键挑战。处理器温度过高会导致热节流、性能下降和可靠性降低。本研究开发并通过实验评估了一种智能混合散热器，该散热器将被动式热能存储与主动冷却相结合，以支持设备持续运行。所提出的设计由一个铝腔体构成，腔体内含有作为相变材料（PCM）的石蜡，并嵌入铜泡沫中，同时配有自适应控制风扇。风扇运行由随机森林回归模型指导，该模型使用实验测得的 CPU温度数据进行训练，用于预测未来的 CPU 温度。随后利用预测温度为自适应风扇控制策略提供依据。该散热器直接安装在 Raspberry Pi 5 的 CPU 上，并在约 99% CPU利用率的极端 CPU工作负载下进行实验评估。将所提出的混合系统与两种基准场景进行比较：使用嵌入铜泡沫中的相变材料进行被动冷却，以及使用商用Raspberry Pi 5主动冷却器。结果表明，所提出的散热器在热性能方面优于这两种基准方案；与相变材料—铜泡沫配置相比，其 CPU 温度峰值降低约** $9\,^{\circ}\mathrm{C}$**，与商用主动冷却器相比则降低约** $6\,^{\circ}\mathrm{C}$ **。**

索引词—**Raspberry Pi 5、电子设备冷却、相变材料（PCM）、金属泡沫、机器学习、自适应风扇控制。**

I. 引言

数字技术和人工智能（AI）的快速发展提高了对紧凑型电子设备的计算需求。在日益受限的空间内实现更高的处理能力，会导致更高的功率密度和局部发热，因此，有效的热管理对于保持性能和可靠性至关重要。对于 Raspberry Pi 5 等紧凑型计算平台而言，这些挑战尤为重要；如果缺乏足够的冷却，持续的计算负载可能会使处理器达到其热节流极限 [1]。

传统的热管理方法通常依赖被动冷却或主动冷却。在被动技术中，相变材料 (PCMs) 由于能够在熔化过程中以潜热能的形式吸收热量，从而延缓温升并减小瞬态温度波动，因此受到了广泛关注。Mallela 等人 [2] 通过实验验证了这种方法的热学优势，报告称，使用填充相变材料的铝翅片散热器可使峰值温度降低近 6%。Kumar 等人 [3] 通过实验研究了采用交叉板式翅片的石蜡基相变材料散热器，并报告称，通过增加相变材料散热器内部的腔体数量，散热器温度最高可降低 19.5%。

尽管具有这些优势，相变材料冷却仍受到其有限蓄热容量的限制；此外，对于常用的石蜡基相变材料而言，其热导率相对较低也是一个限制因素。相变材料完全熔化后，吸收额外热量的能力会显著降低，而较低的热导率则可能导致熔化不均匀。因此，研究人员开始研究金属泡沫，以增强相变材料散热器的热响应。Afaynou 等人 [4]报告称，与未填充散热器相比，在相变材料散热器中完全填充铝泡沫可使电子元件温度降低 16.3°C，并使相变材料熔化时间缩短 13.85%。Arshad 等人 [5] 研究了用于电子冷却的相变材料—金属泡沫散热器，结果表明，加入铜泡沫能够改善传热性能；在优化配置下，相变材料熔化时间缩短了 18.1%。尽管这些改进提升了相变材料散热器的热响应，但在长时间运行过程中，相变材料有限的蓄热容量仍然是一个限制因素。

与此同时，机器学习技术日益被应用于热管理系统中的预测与控制。G¨ursoy 等人 [6] 将长短期记忆注意力模型应用于 PCM–金属泡沫热储能系统，在预测 PCM 热特性方面取得了（$R^2 > 0.997$），且平均绝对百分比误差低于 3%。同样，Sreenath 和 Chanda [7] 开发了一种人工神经—

基于 PCM–金属泡沫复合散热器的实验数据构建了网络模型，并实现了（$R^2 > 0.99$），用于预测不同热输入下的散热器界面温度。在此类研究中，机器学习主要用于预测或优化热系统性能。主动冷却电子系统中的预测控制也得到了研究。Iranfar 等人 [8] 开发了一种基于强化学习的热管理策略，主动调整处理器运行条件和风扇转速；与恒定风扇转速运行相比，该策略将风扇功率降低了最多 40 %。Chen 等人 [9]利用机器学习预测未来的处理器温度，并利用强化学习确定后续的热控制动作，使系统性能提升了最多 43%。然而，将预测驱动的主动冷却与 PCM–金属

A. Ghazal、E. Elshafey 和 A. Emam 任职于沙迦美国大学机械工程系，阿拉伯联合酋长国沙迦。F. Hameed 和 M. Awadallah 任职于沙迦美国大学计算机科学与工程系，阿拉伯联合酋长国沙迦。

泡沫热缓冲相结合的研究仍然较为有限，在这种方式中，预测的未来处理器温度直接控制风扇运行。为此，本研究开发并通过实验评估了一种适用于 Raspberry Pi 5 的紧凑型混合冷却系统，该系统集成了石蜡相变材料、铜泡沫和预测驱动的强制对流。

II. 问题设置

我们采用了一种专为 Raspberry Pi 5 设计的主动式紧凑型混合冷却组件，旨在减轻或避免 Raspberry Pi 5 在持续、高计算强度工作负载下发生热节流。片上系统（SoC）产生的热量传递至内嵌石蜡相变材料的铝制散热器中，该相变材料填充于铜泡沫内。相变材料通过潜热储存吸收瞬态热负荷，而铜泡沫则增强相变材料内部的传热。可变速风扇提供强制对流，以排出冷却组件中的热量，并在被动热缓冲能力不足后支持系统持续运行。

如图 1 所示，冷却组件直接安装在 Raspberry Pi 5 处理器上方。该系统经过设计，可根据预测的处理器热响应调节风扇运行，从而使被动热缓冲与主动冷却作为一个集成式热管理系统协同运行。

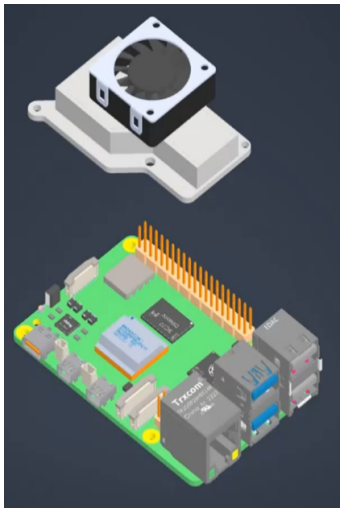

图 1：与 Raspberry Pi 5 集成的拟议混合冷却系统 CAD 模型。

III. 系统设计

A. 机械子系统

冷却组件由一个数控加工的铝制散热器组成，直接安装在 Raspberry Pi 5 处理器上。处理器与铝制底座之间放置了导热界面垫，以降低热接触热阻，使片上系统产生的热量能够传导至散热器主体和内部相变材料腔体。

内部腔体填充了石蜡相变材料，其熔化温度范围为 53–57°C，潜热容量为 200 kJ/kg。选择这一熔化温度范围，是为了让相变材料在处理器接近其热节流范围之前就开始吸收潜热。相变材料中嵌入了一块孔隙率为 95%、每英寸孔数（PPI）为 50 的铜泡沫。高孔隙率使相变材料能够占据腔体的大部分体积，同时铜结构改善了相变材料区域内的热量扩散。

相变材料腔体由一个铝制盖板封闭，盖板上设有用于温度测量的开口（参见图 2）。组装时，先将铜泡沫放入腔体，再注入相变材料，填满泡沫内部的空隙，然后安装盖板。



图 2：带有热电偶开口的铝制相变材料腔体和盖板。

散热器组件上方安装了 PWM控制风扇，以便在持续运行期间提供强制对流冷却。风扇连接至 Raspberry Pi，其运行转速由后续章节所述的预测控制系统调节。

冷却组件内部的温度测量值由 K 型热电偶获取，精度为 ±0.9°C。热电偶穿过盖板上的固定开口插入，并分别置于相变材料腔体高度约 15%、50% 和 80% 处，以便在运行期间监测相变材料区域内的温度变化（见图 2）。

B. 系统架构

我们采用围绕四项职责组织的模块化架构：传感、预测、控制和数据管理。所有模块均运行在单个控制器节点——树莓派 5 上。该节点从冷却系统传感器获取温度测量值，确定适当的风扇转速，通过标准接口排针驱动风扇，并记录带时间戳的运行日志，以供后续分析。这种单节点架构简化了集成，最大限度地降低了通信延迟，同时保持了模块化特性，使各个组件能够在不影响系统其余部分的情况下进行更新。

在节点层面，该系统由一个控制器节点组成，并与两个物理外设相连：温度传感器

这些传感器安装在冷却组件上及其周围，另有一个变速风扇安装在密封相变材料腔体上方。所有计算均在控制器本地执行，包括传感器数据采集、风扇转速选择和运行日志存储。该配置可直接部署在任何基于 Raspberry Pi 5 的平台上。

在组件层面，控制器节点由多个协同工作的软件模块组成。传感模块以固定的采样间隔获取温度测量值和基本运行数据，随后进行轻量级验证。特征/窗口模块维护近期测量值的简短历史记录，作为预测器的输入。机器学习预测器利用这段历史记录预测未来的 CPU 温度。热控制器根据预测温度以及预定义的温度区间和安全限值，确定合适的风扇设置。风扇驱动器通过标准风扇接头应用所选设置。最后，数据存储/日志记录器将测量值、风扇设置以及任何标记事件的带时间戳记录追加到运行日志中，以便后续分析并比较各项测试。

C. 控制器架构

按照热管理设计，Raspberry Pi 5 既是被测设备，也是冷却控制器。控制软件执行四项功能：温度采集、风扇设置选择、风扇驱动控制，以及用于后续模型优化的事件记录。控制器持续循环运行。首先，它采集表示片上系统和冷却组件温度的数据，并进行基本有效性检查。其次，它通过两种机制选择合适的风扇转速：(i) 简单的基于规则的方案，将离散温度区间与滞回裕量结合，以防止风扇转速档位频繁切换；(ii) 根据近期热特征曲线，对未来 CPU 温度进行基于机器学习的预测。

基于规则的控制器根据预定义的温度区间选择风扇转速。在区间边界处采用滞回机制，以防止速度级别之间频繁切换。无论预测输出如何，系统都会强制执行明确的安全限值，因此即使模型运行异常或传感器发生故障，片上系统温度仍能保持在 85 °C 稳态限值以下。

采用随机森林回归模型预测未来的 CPU 温度。该模型以近期测量数据的短时间窗口作为输入，预测 30 秒后的 CPU 温度。随后将预测温度输入热控制器，由其结合基于规则的逻辑和预先设定的安全限值，确定合适的风扇设定。该模型使用 Raspberry Pi 5 在不同工作负载下的实验测温数据进行训练。选择该模型是因为它能够捕捉非线性热动力学，且对测量噪声具有较强的鲁棒性。此外，该模型轻量，十分适合部署在 Raspberry Pi 5 上。我们使用达到降频时间、SoC 最高温度、平均风扇设定、噪声和数据完整性等指标评估了多种模型配置，并选择预测性能最佳的配置来驱动风扇。

最后，控制决策受到预定义安全限值的约束。如果测得的温度超过临界阈值，或检测到无效的传感器读数，控制器将覆盖预测输出，将风扇切换至最大冷却模式，并记录该事件以供后续分析。

IV. 结果与讨论

在约 99% CPU利用率的极端工作负载下，从热响应和温度预测准确性两个方面评估了所提出混合冷却系统的性能。所有实验均重复进行三次，并给出了平均响应结果。将所提出系统的热性能与被动式相变材料–金属泡沫冷却以及商用Raspberry Pi 5主动冷却器进行了比较。

A. 极端负载下的热节流

图3展示了 Raspberry Pi 5 在无额外冷却条件下极端负载运行时的 CPU 温度响应。CPU 温度迅速升高并接近热节流范围，最终稳定在约 85°C。图4展示了相应的 CPU 频率响应。在测试初始阶段，频率保持在约 2400 MHz；约 75 s 后，频率开始反复下降，表明热节流开始出现。

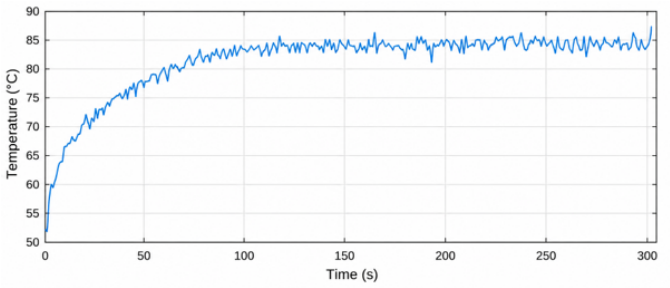

图 3：无冷却时极端负载下的 CPU 温度。

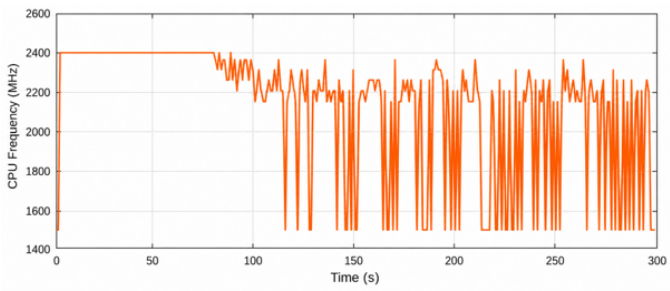

图 4：无冷却时极端负载下的 CPU频率。

B. 机器学习性能

图5展示了实测 CPU 温度，以及随机森林模型预测的提前 30 s 的温度。整个实验期间，预测响应都紧密跟随实测热趋势。所选模型的 R^2 值为 0.931，平均绝对误差（MAE）为 1.076°C，均方根误差（RMSE）为 1.946°C。这些结果表明，该模型能够较好地捕捉处理器温度的变化，实测响应与预测响应具有良好的一致性，支持将其应用于预测式风扇控制策略中。

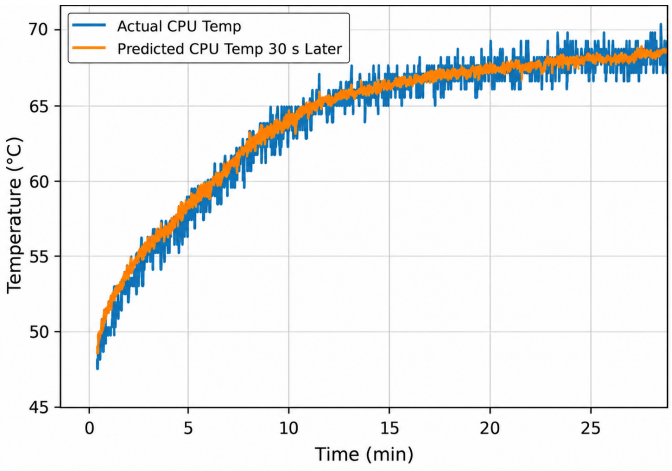

图 5：机器学习模型预测性能

C. 混合冷却系统的热性能

图 6 对比了在相同极端负载下，所提出的混合系统、被动式相变材料–金属泡沫配置以及商用Raspberry Pi 5 主动冷却器的 CPU 温度响应。所提出的混合系统将平均 CPU 温度维持在约 57°C，峰值温度为 59.5°C。相比之下，商用主动冷却器的峰值温度约为 65°C，而被动式相变材料–金属泡沫配置的峰值温度更高。因此，与商用主动冷却器相比，所提出的系统将 CPU 峰值温度降低了约 6°C；与被动式相变材料–金属泡沫配置相比，则降低了约 9°C。使用所提出的系统时未观察到热节流，且 CPU 频率在整个测试过程中保持稳定，表明处理器在极端负载下能够持续运行。

V. 结论

本研究开发并通过实验评估了一种适用于 Raspberry Pi 5 的紧凑型混合冷却系统，该系统集成了石蜡相变材料、铜泡沫和预测驱动的强制对流。在约 99 % CPU利用率的极端负载下，未配备额外冷却装置的 Raspberry Pi 5 在约 75 秒后进入热节流区域，CPU 温度稳定在约 85°C。随机森林模型提前 30 秒预测 CPU

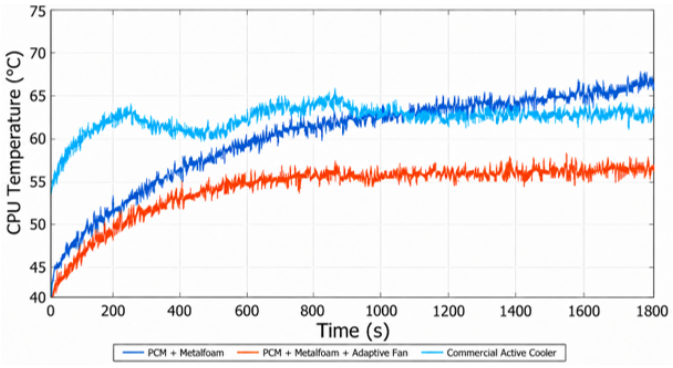

图 6：冷却条件下极端负载时的 CPU 温度。

温度， R^2 为 0.931，平均绝对误差为 1.076°C，均方根误差为 1.946°C。与自适应风扇控制策略集成后，所提出的混合系统将平均 CPU 温度维持在约 57°C，峰值温度为 59.5°C，且未发生热节流。与商用Raspberry Pi 5主动冷却器相比，其峰值温度降低了约 6°C；与被动式相变材料–金属泡沫配置相比，则降低了 9°C。这些结果表明，将被动热缓冲与预测驱动的主动冷却相结合，能够为紧凑型计算平台在持续高负载运行期间提供稳定的热管理。

致谢

本稿件所报告的研究得到了沙迦美国大学本科生研究基金的支持（基金编号：UE2619）；

参考文献

[1] A. Allan，《树莓派 5 的加热与冷却》，https://www.raspberrypi.com/news/heating-and-cooling-raspberry-pi-5/，2023年10月，访问日期：2026年10月1日。[2] G. Mallela、M. I. Shajahan、A. C. Benim、M. Sharaf 和 E. Lopez，《采用四水合硝酸钙相变材料的散热器在电子冷却中的性能评估》，《科学报告》，第 15 卷，2025 年。[3] A. Kumar、R. Kothari、V. Saxena、S. K. Sahu 和 S. I. Kundalwal，《采用交叉板翅排列的石蜡基散热器冷却电子元件的实验研究》，《热分析与量热学杂志》，第 147 卷，第 9504 页，2022 年，第 17 期，第 9487– 页。[4] I. Afaynou、H. Faraji、K. Choukairy、R. Djebali 和 H. Rezk，《用于电子设备冷却的混合相变材料基散热器的综合分析与热经济优化》，《传热学》，第 54 卷，第 6 期，第 3754–3774 页，2025 年。[5] A. Arshad、M. Jabbal、H. Faraji、P. Talebizadehsardari、M. A. Bashir 和 Y. Yan，《在相变材料基散热器中加入纳米颗粒和金属泡沫以提升电子设备冷却性能的热性能》，《能源存储杂志》，第 48 卷，2022 年。[6] E. G¨ursoy、M. G¨urdal、M. Tan 和 E. Gedik，《潜热储能：金属泡沫结构与基于深度学习的过程预测》，《能源存储杂志》，第 130 卷，2025 年。[7] V. R. Sreenath 和 S. Chanda，《变化的环境条件下基于相变材料的复合散热器建模：一种数据驱动方法》，《热科学与工程进展》，第 59 卷，2025年3月。

[8] A. Iranfar、F. Terraneo、G. Csordas、M. Zapater、W. Fornaciari 和 D. Atienza，《通过强化学习主动控制风扇转速的动态热管理》，载于*2020*年欧洲设计、自动化与测试会议及展览（*DATE*）论文集，法国格勒诺布尔，2020 年，第 418–423 页。[9] K.-C. Chen、Y.-H. Liao、C.-T. Chen 和 L.-Q. Wang，《面向片上网络系统的基于自适应机器学习的主动热管理》，*IEEE*超大规模集成电路系统汇刊，第 31 卷，第 8 期，第 1114–1127 页，2023 年 8 月。