

# 基于目标矩阵的 CPU 热点可持续冷却模型

颜兵情<sup>1</sup> 袁景凌<sup>1,2</sup> 陈旻骋<sup>1</sup> 刘东领<sup>1</sup> 江涛<sup>1</sup>

(武汉理工大学计算机科学与技术学院 武汉 430070)<sup>1</sup>

(交通物联网技术湖北省重点实验室 武汉 430070)<sup>2</sup>

**摘要** 为了解决 CPU 发热导致的自身过热问题,很多学者都提出了各自的 CPU 降温模型,以实现绿色节能。在已有的热量循环利用模型的基础上,定量分析了 CPU 热点可持续冷却模型成立的数学条件,建立了 CPU 降温过程中基于温度变化的目标热量矩阵模型,通过实验分析了热点区域的温度变化等特征,并验证了该数学关系模型的正确性;在比较已有热量循环利用模型的基础上,进一步提出了考虑系统自身散热因素的可持续冷却模型,该模型能够利用所提出的目标热量矩阵进行验证。实验表明,所提出的考虑自身散热的可持续冷却模型的冷却效率提高了 0.937%。

**关键词** CPU 热点,目标热量矩阵,可持续冷却模型,系统自身散热因素

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2019.04.051

## Sustainable Cooling Method of CPU Hot Spot Based on Target Matrix

YAN Bing-qing<sup>1</sup> YUAN Jing-ling<sup>1,2</sup> CHEN Min-cheng<sup>1</sup> LIU Dong-ling<sup>1</sup> JIANG Tao<sup>1</sup>

(College of Computer Science and Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)<sup>1</sup>

(Hubei Key Laboratory of Transportation Internet of Things, Wuhan 430070, China)<sup>2</sup>

**Abstract** In order to solve the CPU overheating problems, many scholars have proposed their own CPU cooling models to achieve energy saving. Based on the previous model of heat cycling, this paper quantitatively analyzed the mathematical conditions of the establishment of the CPU hotspot sustainable cooling model, established the target heat matrix model based on the temperature change during the CPU cooling process, analyzed the temperature change of the hot spot, and verified the correctness of the mathematical relation model. On the basis of comparing the previous models of heat recovery, a cooling model considering the self-heating factor of the system was proposed, which can be carried out by using our proposed target heat matrix. The experimental results show that the cooling efficiency of the cooling model is 0.937%.

**Keywords** CPU hot spot, Target heat matrix, Sustainable cooling model, Self-cooling factor of system

## 1 引言

随着云计算和大数据时代的到来,数据中心的高能耗势必会导致数据中心的各个节点严重发热,尤其是容易造成 CPU 过热<sup>[1-2]</sup>。如何防止数据中心各个节点的 CPU 过热,对于提高系统的运行效率和保护硬件的安全具有举足轻重的作用。传统的直接制冷法虽然在实践中应用广泛,但是仍存在着一些不足。首先,直接制冷法需要额外的动力来为数据中心送入“冷却剂”(无论是空气还是液体),该过程存在能耗;其次,数据中心产生的热量在一定程度上本来就是一种能量形式,现在将这相当大一部分热量当作“废热”来处理,无疑是一

种浪费<sup>[3]</sup>。针对这一问题, Wu 等将数据中心各个节点中的过热区域进行热量回收和转换,并将转换得到的能量用于对热点的降温,以 CPU 上局部热能的循环利用方式实现 CPU 的冷却<sup>[4-5]</sup>。本文在 Wu 的热量循环利用模型的基础上考虑了系统自身的散热因素,建立了新的热量关系模型。本文的主要贡献如下:

(1)在前人的热量循环利用模型的基础上,建立了 CPU 降温过程中基于温度变化的目标热量矩阵模型,该模型主要反映了 CPU 可持续冷却系统成立的数学条件;进一步分析了热点区域温度变化等特征,并且通过实验验证了该模型的正确性。

收到日期:2018-01-05 返修日期:2018-04-03 本文受国家自然科学基金(61303029),湖北省创新群体项目(2017CFA012),湖北省技术创新专项重大项目(2017AAA122)资助。

颜兵情(1990—),男,硕士生,CCF 学生会员,主要研究方向为绿色计算、数据挖掘;袁景凌(1975—),女,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为绿色计算、机器学习、数据挖掘,E-mail:yuanjingling@126.com(通信作者);陈旻骋(1990—),男,博士生,主要研究方向为绿色计算、机器学习、大数据处理;刘东领(1992—),男,硕士生,主要研究方向为绿色计算、机器学习;江涛(1992—),男,硕士生,主要研究方向为绿色计算、数据挖掘。

(2)在CPU自我冷却模型的基础上,加入系统自身散热因素,以更加全面地考虑冷却环节,建立考虑CPU自身散热的冷却模型。实验结果表明,在考虑自身散热因素后,其冷却效率比之前的模型提高了0.937%。

## 2 相关工作

对于CPU局部过热的问题, Lee等<sup>[4]</sup>按照温度的不同对整个CPU进行区域性划分,将超过一定温度的区域统称为热点区域,低于一定温度的芯片区域称为正常区域,并且对热区进行热量的定量分析,从理论上证明了对热区进行热量收集的可能性。

Shuja等<sup>[6]</sup>对数据中心的“废热”进行收集,并从整体能耗的角度来用这部分“废热”抵消数据中心的制冷能耗。Ebra-

himi等<sup>[7]</sup>对数据中心的发热问题进行了热力学关系分析,对数据中心的“废热”进行收集并且在数据中心进行再利用。Zhou等<sup>[8]</sup>对CPU等核心发热器件用TEG(热电转换器)将热点热量收集并转换成电能,从电学的角度对热量转换原理和转换关系进行定量的系统分析,并对TEG的部署方式进行了比较和讨论。

Wu等<sup>[5]</sup>用电路将TEG和TEC(热电冷却器)连接起来组成一个新的系统,在CPU芯片热区用一定数量的TEG进行热量收集后将这些热量转换成电能,并用这部分转换的电能驱动TEC(热电冷却器)对热点进行冷却降温,在没有外部能耗的情况下,让新系统实现CPU热量的循环利用和CPU自身的可持续冷却。CPU自动冷却系统的布局如图1所示。

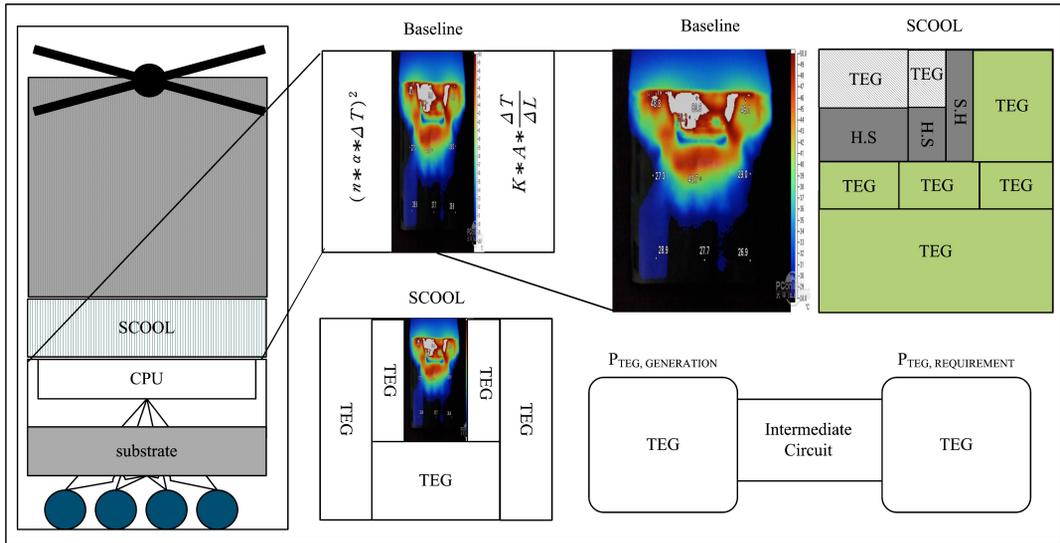


图1 CPU自动冷却系统的布局

Fig. 1 Layout of CPU automatic cooling system

## 3 可持续自动降温系统模型

传统的数据中心的降温节能主要是针对CPU过热问题,一般通过系统资源和任务的调度管理降低CPU负载,或对CPU直接制冷。传统的降温节能方法虽然在数据中心上有比较明显的效果,但是必须以牺牲一定的系统性能为代价或者需要额外的能耗。

### 3.1 基于热电回收的CPU冷却方法

与传统方法相比,基于热电回收的CPU冷却系统的优点是在不影响CPU性能的前提下,不使用额外功耗而仅仅使用TEG和TEC的组合系统对数据中心的CPU芯片进行降温。TEG是一种热点转换装置,该装置主要利用的是赛贝克效应,能够利用温差进行发电。与TEG相反,TEC采用了珀尔帖效应,即TEC在外加电场的作用下,电子会发生定向运动,将一部分内能带到电场的另一端,从而实现对热点的降温<sup>[9]</sup>。

由于CPU工作时,TEG可以不断地从热点吸收热量,同时热点自身也会不断产生热量,大部分针对热点的研究都将此过程看作是一个动态平衡的过程,因此本文也不对这一过程进行深入分析。将单个TEG的发电功率记为 $P_{TEG}$ ,  $P_{TEG}$

与TEG的串联个数、转换设备的赛贝克系数、热点与周围环境的温度差等因素直接相关。

$$P_{TEG} = I^2 R = \frac{(n * a * \Delta T)^2}{4 * r_{TEG}} \quad (1)$$

其中, $\Delta T$ 为热点和环境的温差, $n$ 为TEG串联个数, $a$ 为赛贝克系数差, $r_{TEG}$ 为TEG自身的电阻。

热点用TEC进行散热,记单个TEC的额定功率(即驱动TEC运行的最小功率)为 $P_{TEC}$ <sup>[10]</sup>。

$$P_{TEC} = 2 * N * G * Z * T_{cold} * T_{hot} \quad (2)$$

其中, $N$ 为TEC中PN节的个数, $G$ 为TEC材料的横截面积。基于热电回收的CPU冷却方法是:使用TEG装置将CPU热点散发的热量转换成电能,然后用驱动TEC对热点进行降温。

### 3.2 基于目标矩阵的CPU可持续冷却模型

由于TEG和TEC的操作对象都是CPU内部的热点区域,因此需要根据冷热程度对CPU进行细粒度划分。由于CPU工作时内部温度分布不均,本文将CPU分为热区和冷区<sup>[4]</sup>。对于每个CPU区域,将热区温度记为 $T_{hot}$ ,冷区温度记为 $T_{normal}$ ,热区与冷区的临界温度记为 $T_{boundary}$ 。CPU温度 $T \geq T_{boundary}$ 时为热区,简称为热点; $T \leq T_{boundary}$ 时为正常区域。

热点降温后的温度为  $T'_{hot}$ , 热点区域降温前后的降温幅度记为  $\Delta T$ , 若能有效实现热点的降温从而保证 CPU 的安全, 则有:

$$\begin{cases} T'_{hot} \leq T_{boundary} \\ \Delta T = T_{hot} - T'_{hot} \end{cases} \quad (3)$$

本文对 CPU 热点区域芯片在结构上以温度变化情况为基准进行细粒度划分: 将热点芯片按温度递增分成  $m$  个区域以满足  $T_{i+1} \geq T_i (i=1, 2, \dots, m-1)$ ; 在  $n$  个连续时刻内,  $T_i^j$  表示热点芯片区域  $i$  在时刻  $j$  的温度 ( $j=0, 1, \dots, n$ ), 则该热点芯片的温度状态矩阵为:

$$A_T = \begin{bmatrix} T_1^0 & T_1^1 & \dots & T_1^k & \dots & T_1^m \\ T_2^0 & T_2^1 & \dots & T_2^k & \dots & T_2^m \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_i^0 & T_i^1 & \dots & T_i^k & \dots & T_i^m \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_n^0 & T_n^1 & \dots & T_n^k & \dots & T_n^m \end{bmatrix}$$

降温后的目标温度状态矩阵为  $A_{T'}$ , 该矩阵为常数矩阵, 内部元素均应小于或等于  $T_{normal}$ . 令其全部元素为  $T_{normal}$ , 这样所有热点区域降温后将全部消失, 则在此目标下将热点区域降温后, 各个热点区域降温前后自身热量的减少幅度可以用矩阵表示, 本文称其为目标热量矩阵, 记为  $Q$ , 如式(4)所示, 其中,  $C$  为 CPU 比热容,  $M$  为 CPU 热点区域对应的质量。由于  $A_{T'}$  是一个常数矩阵, 因此  $Q$  是一个以瞬时温度变化来描述热量变化的矩阵形式。

$$Q = \sum_{j=0}^m C * \frac{M}{n} * (A_T - A_{T'})$$

$$= \sum_{j=0}^m C * \frac{M}{n} * \begin{pmatrix} T_1^0 & T_1^1 & \dots & T_1^k & \dots & T_1^m \\ T_2^0 & T_2^1 & \dots & T_2^k & \dots & T_2^m \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_i^0 & T_i^1 & \dots & T_i^k & \dots & T_i^m \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_n^0 & T_n^1 & \dots & T_n^k & \dots & T_n^m \end{pmatrix} - A_{T'} \quad (4)$$

常用的 CPU 自我冷却方法只考虑了 CPU 发热, 通过 TEG 进行热电转换和 TEC 吸热降温。但实际工作过程中, CPU 热点温度是远高于周围温度的, 因此存在自身散热的问题。将 CPU 散热效率记为  $P_{Reduce}$ , 则有:

$$P_{Reduce} = k * A * \frac{\Delta T}{\Delta L} \quad (5)$$

其中,  $k$  为周围环境的平均热传导系数,  $A$  为 CPU 与周围环境的接触面积,  $\Delta T$  为热点和环境的温差,  $\Delta L$  为从热点到散热介质的平均距离。实际情况下,  $k$  和  $A$  分别为实验中 CPU 上的热胶、金属和空气等以及各自对应的接触面积等有关参数, 定义  $u = k * A$ :

$$u = k_1 * x_1 + k_2 * x_2 + \dots + k_i * x_i + \dots \quad (6)$$

其中,  $k_i$  和  $x_i$  分别为本实验中热点自动散热时各种发热材质的导热系数及其对应的与介质的接触面积。基于目标热量矩阵的可持续自我冷却系统的示意图如图 2 所示。

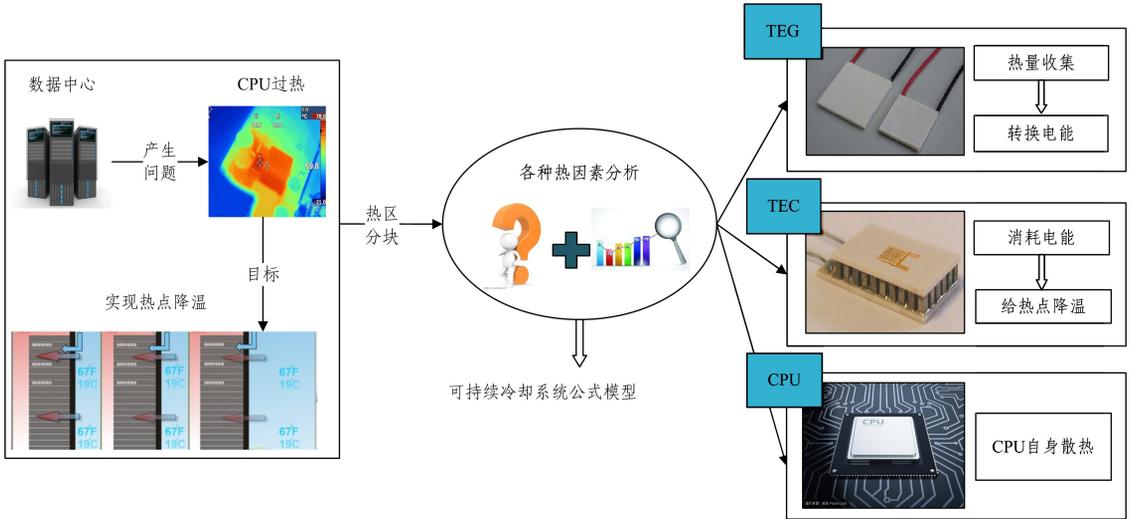


图 2 基于目标矩阵的 CPU 可持续冷却系统

Fig. 2 Sustainable cooling system of CPU based on target matrix

本文考虑用 TEG 组将热点的热量转换成电能来驱动 TEC 组对热点进行散热, 从而实现自动冷却。定义自动冷却系统 TEC 的散热效率为  $P_{Reduce}$ 。本文考虑了 CPU 的自身散热因素, 因此只有 TEG 组的发电功率大于 TEC 组的功率才能保持散热系统的可持续工作; 在此基础上还需要 TEC 组的散热效率和系统自身散热效率以及大于热点的目标热量矩阵才能实现理想的冷却效果, 即实现 CPU 热点区域的可持续自我冷却。由于  $Q$  为一个矩阵, 本文令矩阵  $\beta = (1, 1, 1, \dots, 1)$  ( $A$  为  $n$  阶行向量),  $\gamma = (1, 1, \dots, 1)^T$  ( $B$  为  $m$  阶列向量,  $T$  为矩阵的转置), 结合式(1)、式(2)、式(4), CPU 可持续冷却系

统的数学模型可表示为:

$$\begin{cases} n_1 * P_{TEG} = \frac{(n * a * \Delta T)^2}{4 * r_{TEG}} \geq n_2 * P_{TEC} \\ \int_{T_0}^{T_n} (P_{TEC}^{Reduce} + P_{Reduce}) dt \geq \beta * Q * \gamma \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $n_1$  表示 TEG 组中 TEG 的个数,  $n_2$  代表 TEC 组中 TEC 的个数,  $T_0$  和  $T_n$  表示可持续自我冷却系统工作的开始时间和截止时间。若实验证明式(7)成立, 则意味着可持续自我冷却系统是成立的。基于目标矩阵的 CPU 可持续冷却系统的工作流程如图 3 所示。

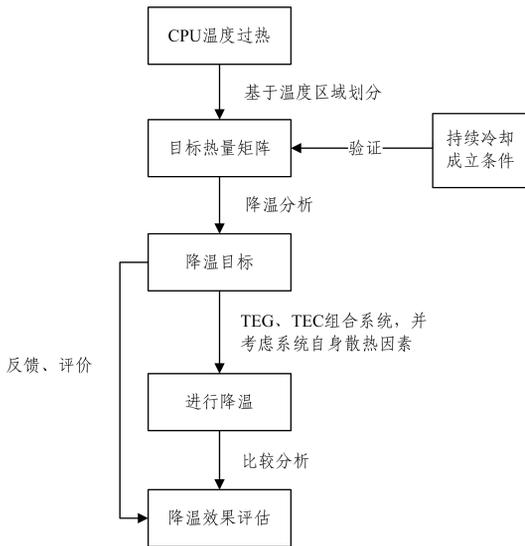


图3 基于目标矩阵的CPU可持续冷却系统的工作流程图

Fig. 3 Flowchart of sustainable Cooling system of CPU based on target matrix

## 4 实验

实验利用多核仿真器跟踪CPU应用程序的活动,通过不同程序区各自的指令活动轨迹来分析处理器内的电源分配情况。最后对目标处理器进行温度和热量的监控及模拟分析。实验使用FloEDF9.0来进行仿真,模拟目标处理器内各个片区的温度情况;同时利用TEG核TEC对CPU的热点集成的影响进行评估模拟,对本文提出的CPU自我冷却系统进行验证和分析。本实验中TEG和TEC器件的相关参数如表1所列。

表1 TEG和TEC的相关参数

Table 1 Related parameters of TEG and TEC

	厚度/mm	导热系数/(W/m·K)	比热/(J/m <sup>3</sup> ·K)	赛贝克系数/(μV/K)
TEG	2.0	2.07×10 <sup>6</sup>	4.69	677
TEC	2.0	1.154×10 <sup>6</sup>	17.00	301

### 4.1 可持续自我冷却系统的验证

将CPU温度分为normal域和hot域,热区 $T_{hot} \geq 65^{\circ}\text{C}$ 。由式(2)可知,在使用固定材料的TEG设备时,可产生的电势差与温差有明显关系。TEG,TEC在各种密集型指令下的功率如表2所列。

表2 TEG和TEC在各种密集型指令下的功率

Table 2 Power of TEG and TEC under various intensive instructions

	TEG最大发电效率/mW	TEC运行功率/mW
400.perlbench	69	78
403.gcc	67	76
429.mcf	66	75
445.gobmk	67	76
456.hammer	70	78
458.sjeng	66	75
473.astar	68	77

由表2可知,单个TEG的最大实际功率约为70mW,略低于器件的额定功率,这主要是由于TEG自身器件和CPU本身都存在主动散热(式(7)中有说明)。由于一般的热点区域TEG的发电效率低于TEC的额定功率,而且TEC从CPU吸收热量的功率有限,因此本文分别使用多个TEG和

TEC构成的TEG组和TEC组作为自动冷却系统。因为CPU在运行密集型应用指令时热点温度变化明显,所以实验中以温度为基准对CPU活动的功能模块进行划分。为了验证可持续冷却系统中TEG组和TEC组的关系,本实验以热点温度 $60^{\circ}\text{C}$ 为起点,以 $10^{\circ}\text{C}$ 为增长幅度进行测试,结果如图4所示。

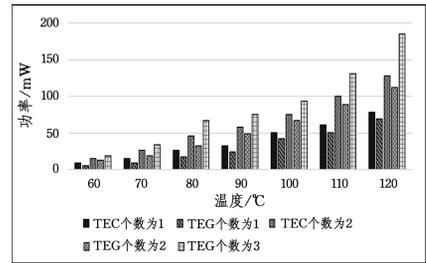


图4 TEG组与TEC组测试效果的对比

Fig. 4 Comparison of TEG and TEC test results

实验结果表明,当冷却系统中TEG与TEC的数量均为1时式(7)显然不成立;但当TEG的数量大于TEC的数量时,则有TEG组的发电功率大于TEC组的功率,即满足式(7)中的 $n_1 * P_{TEG} = \frac{(n * a * \Delta T)^2}{4 * r_{TEG}} \geq n_2 * P_{TEC}$ ,亦即满足冷却系统的可持续性。本实验将可持续降温系统与目标热量矩阵相结合,检验是否满足式(7)中的降温要求。为了便于实验,直接计算目标热量矩阵的瞬时功率,结果如图5所示。

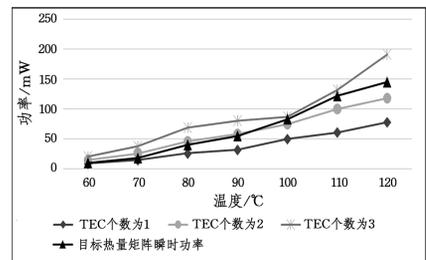


图5 TEC组中TEC个数变化时的散热效率与目标热量矩阵瞬时功率的对比

Fig. 5 Comparison of thermal efficiency and target thermal matrix instantaneous power when TEC changes in TEC group

实验结果表明,在TEC组中TEC数量大于3的情况下,TEC的吸热功率的整体趋势大于热点的产热效率,而且从趋势上看,TEC组中TEC个数越多,散热效果将越好,因此综合本节的两个实验可得式(7)在实践中是成立的,即可以实现基于目标热量矩阵的CPU热点可持续冷却系统是成立的。

### 4.2 系统降温效率的分析

在图6所示的降温幅度评估实验结果中,横轴表示CPU不同温度的热点区,左边纵轴表示TEG产热的功率,右边纵轴表示使用TEC后该热点区对应的温度下降幅度。通过分析实验结果可知,最大热点温度降低为 $23^{\circ}\text{C}$ 左右,平均降温 $8.6^{\circ}\text{C}$ 。这主要是由不同热点区域的芯片的活跃程度和持续工作时间决定的,在本实验中这种差异直接反映在温差上,局部热点区域的温度越高,TEG便能转换产生更多的电能,TEC容易带走更多的聚集热量,CPU热点温度的降幅自然更加明显。

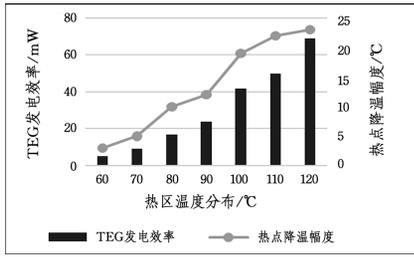


图 6 各热点 TEG 发电效率与热点降温幅度的情况

Fig. 6 Power generation efficiency and hot spot cooling rate of each hot spot TEG

由于本文的可持续冷却系统考虑了系统自身的散热因素,相对于一般的冷却系统,降温效率有所增加,记降温效率增加了 $\alpha$ 。本文所有器件都是比较计算的功率,因此对于目标矩阵而言,通过目标热量矩阵对时间进行求导,即 $\frac{\partial Q}{\partial t}$ ,便能得到热点各个划分区域的热量变化速率矩阵,即目标热量矩阵对应的功率矩阵表示形式,故有:

$$\alpha = \frac{P_{\text{Reduce}}}{A * \frac{dQ}{dt} * B - P_{\text{Reduce}}} = \frac{k * A * \frac{\Delta T}{\Delta L}}{\beta * \sum_{j=0}^m C * \frac{M}{n} * (A_T - A_T')} * \gamma \quad (8)$$

本实验中 CPU 自身散热效率与目标热量矩阵对应的功率比结果如图 7 所示,实验结果计算得到的 $\alpha$ 值为 0.937%,即对比前人的 CPU 冷却系统<sup>[11]</sup>,本文基于目标热量矩阵的 CPU 热点可持续冷却系统的冷却效率增加了 0.937%。虽然在模拟实验中基于目标矩阵的 CPU 可持续冷却模型有一定的冷却效果,但是在实际环境中还存在一些问题:首先,系统的散热冷却效果严重依赖于 TEG 和 TEC 硬件的可靠性,硬件一旦出现故障,散热性能将大大降低;其次,随着硬件的不断发展,CPU 集成度不断提高,芯片尺寸不断变小,这就要求 TEG 和 TEC 在功能不断增强的同时能够不断缩小尺寸;最后,将 TEG 和 TEC 应用在大规模数据中心会增加一定的经济成本,因此在大规模应用过程中该系统还显得不够成熟,不能很好地适应数据中心降温的应用场景。

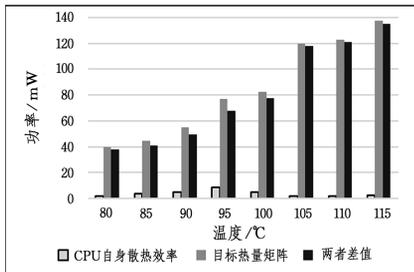


图 7 CPU 自身散热效率与目标热量矩阵对应功率的对比

Fig. 7 Comparison of CPU's own thermal efficiency and target thermal matrix power

**结束语** 本文基于前人的热电冷却模型,建立了基于目标热量矩阵的可持续冷却模型并进行了验证,然后考虑了冷却系统的自动散热因素,在一定程度上提高了系统的冷却效率。但是,在大规模应用过程中,该系统存在着稳定性差、成

本高、效果难以达到预期等问题,因此难以满足实际应用场景的需求。将来随着新型热电回收材料的不断出现以及热电材料成本的下降,新材料的 TEG 将 CPU 散发的热量转换成电能的效率将越来越高,基于热电回收的 CPU 可持续冷却模型的冷却效果必将越来越好。在此基础上结合体系结构的研究和任务调度算法的优化来实现数据中心的绿色计算、控制 CPU 的发热、实现大规模的绿色节能将指日可待。

## 参考文献

- [1] DENG W, LIU F M, JIN H, et al. Leveraging Renewable Energy in Cloud Computing Datacenters: State of the Art and Future Research[J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(3): 582-598. (in Chinese)  
邓维, 刘方明, 金海, 等. 云计算数据中心的新能源应用: 研究现状与趋势[J]. 计算机学报, 2013, 36(3): 582-598.
- [2] VALENTINI G L, LASSONDE W, KHAN S U, et al. An overview of energy efficiency techniques in cluster computing systems[J]. Cluster Computing, 2013, 16(1): 3-15.
- [3] WANG W, LUO J Z, SONG A B. Dynamic Pricing Based Energy Cost Optimization in Data Center Environments [J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(3): 599-612. (in Chinese)  
王巍, 罗军舟, 宋爱波. 基于动态定价策略的数据中心能耗成本优化[J]. 计算机学报, 2013, 36(3): 599-612.
- [4] LEE S, PHELAN P E, WU C J. Hot spot cooling and harvesting CPU waste heat using thermoelectric modules[C]// ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineers, 2014.
- [5] WU C J. Architectural Thermal Energy Harvesting Opportunities for Sustainable Computing[J]. IEEE Computer Architecture Letters, 2014, 13(2): 65-68.
- [6] SHUJA J, GANI A, SHAMSHIRB S, et al. Sustainable Cloud Data Centers: A survey of enabling techniques and technologies [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 62(9): 195-214.
- [7] EBRAHIMI K, JONES G F, FLEISCHER A S. A review of data center cooling technology, operating conditions and the corresponding low-grade waste heat recovery opportunities[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2014, 31(2): 622-638.
- [8] ZHOU R, WANG Z, BASH C E, et al. Data center cooling management and analysis-a model based approach[C]// Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium. IEEE, 2012: 98-103.
- [9] ZHU Y, HALPERN M, REDDI V J. Event-based scheduling for energy-efficient QoS (eQoS) in mobile Web applications[C]// 2015 IEEE 21st International Symposium on High Performance Computer Architecture (HPCA). IEEE, 2015.
- [10] EGLIMEZ B, MEMIK G, OGRENCI-MEMIK S, et al. User-specific skin temperature-aware DVFS for smartphones[C]// Design, Automation and Test in Europe. 2015: 1217-1220.
- [11] LEE S, PANDIYAN D, SEO J S, et al. Thermoelectric-based sustainable self-cooling for fine-grained processor hot spots[C]// IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems. IEEE, 2016: 847-856.