arXiv:2305.00855v1 [cs.DC] 1 May 2023

# 太阳能与电池供电计算机系统中电能与热能的协同管理

Noman Bashir、Yasra Chandio、David Irwin、Fatima Anwar、Jeremy Gummeson、Prashant Shenoy 马萨诸塞大学阿默斯特分校

## 摘要

环境供能计算机系统利用从环境中采集的可再生能源（如太阳能或风能）运行，并将能量存储在电池中。长期以来，对于无法接入外部电源的小型嵌入式系统而言，采集环境能量一直十分必要；而在设计用于边缘应用的可持续大型系统时，这也日益重要。为了持续运行，此类系统在设计与操作中不仅必须考虑可用的电能，还必须考虑环境中可用的热能。遗憾的是，先前的研究通常忽略热效应的影响，转而默认温度理想。为解决这一问题，我们构建了一个热力学模型，用以刻画环境供能计算机系统中电能与热能之间的相互作用。该模型刻画了环境条件、系统物理特性和工作负载调度对性能的影响。在评估模型时，我们使用小规模原型和可编程培养箱，提炼出影响这类系统的热效应。随后，我们利用该模型表明，在设计和运行不同规模的环境供能计算机系统时考虑这些热效应，可以提升其能效、性能和可用性。

## CCS 概念

• **硬件** → **热问题**；• **计算机系统组织** → **嵌入式与信息物理系统**；• **通用与参考** → 设计；性能；可靠性。

## 关键词

环境供能计算机系统、热效应、能效、性能、电池。

**ACM 参考格式：**

Noman Bashir、Yasra Chandio、David Irwin、Fatima Anwar、Jeremy Gummeson、Prashant Shenoy。2023年。《太阳能与电池供电计算机系统中电能与热能的协同管理》。载于第*14*届*ACM*未来能源系统国际会议（*e-Energy '23*），*2023*年*6*月*20*日至*23*日，美国佛罗里达州奥兰多。ACM，纽约州纽约市，美国，12页。https://doi.org/10.1145/3575813.3595191

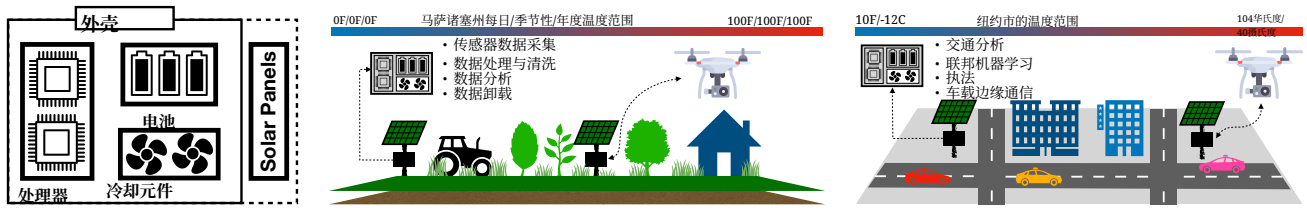
允许为个人或课堂使用免费制作本作品全部或部分内容的数字副本或纸质副本，但不得为营利或商业利益而制作或分发副本，且副本必须保留本声明及首页上的完整引文。必须尊重本作品中由作者以外的其他方拥有版权的组成部分。注明出处后，可以进行摘要引用。若要以其他方式复制、重新发布、发布到服务器上或向列表重新分发，必须事先获得特定许可和/或支付费用。请通过 permissions@acm.org 申请许可。*e-Energy '23*，*2023*年*6*月*20*日至*23*日，美国佛罗里达州奥兰多© 2023 版权归所有者/作者所有。出版权授权给 ACM。ACM ISBN 979-8-4007-0032-3/23/06...$15.00 https://doi.org/10.1145/3575813.3595191

## 1 引言

环境供能计算机系统依靠从环境中采集并储存在电池中的可再生能源运行，例如太阳能或风能。长期以来，对于没有外部电源的小型嵌入式系统而言，采集环境能量一直必不可少 [2, 26], ；如今，在设计面向零碳和边缘应用的可持续大型系统时，这也日益重要。例如，近年来，人们愈发重视设计由可再生能源供电的零碳边缘云基础设施，以缓解气候变化 [3, 5]。

由于这些系统的功率具有间歇性，且受环境限制，因此必须随着时间推移谨慎调节能耗，以匹配供能。尽管此前已有大量研究致力于设计能够动态调整能耗、从而实现持续运行的环境供能系统，但其中大多数工作聚焦于小规模能量采集传感器系统 [14, 22, 27], ，这类系统的计算能力有限、计算密度低，且主要用于数据感知。然而，近年来低功耗、高能效 AI 加速器的兴起，例如 NVIDIA 的 Jetson Nano [1], ，再加上太阳能和电池技术的进步，正在改变这类系统的设计与运行方式。未来的边缘环境供能计算机系统将拥有强大的计算能力，可运行 AI 推理和计算机视觉等计算密集型任务。这些工作负载将来自部署在户外环境中的现代应用，包括精准农业、智能交通监测与控制、蜂巢／鸟类／动物种群监测、实时语言翻译等。系统规模及其运行的工作负载发生变化，使热效应愈发重要，而此前的研究尚未解决这一问题。通常，环境供能计算机系统可能部署在多种气候环境中，承受范围广泛的环境温度，而这会以多种显著方式影响其运行。

具体而言，温度变化会以显著但各不相同的方式影响处理器、电池和冷却元件的能效。例如，随着温度降低，电池充电和放电的能效会大幅下降；如果温度过低或过高，电池还可能停止工作。以往研究通常忽略了这些影响，并且往往默认存在理想温度范围，例如 20-25◦C，尽管大多数位置全年都无法维持理想温度。忽视热效应是环境供能系统（如 FarmBeats）的报告运行时间往往较短的原因之一，例如 <30 天 [15]。我们的关键洞见是，要优化性能、能效和可用性，环境供能计算机系统在设计和运行时必须将环境中的电能与热能纳入考量，并进行协同管理。尽管此前大量研究




(a) Sy系统 Com p组件 (b) 精度 A griculture (c) 智慧城市

**图 1：** 环境供能计算机系统由太阳能和电池供电的处理器组成，并包含一个冷却元件（***a***）。常见应用包括小型到中型的嵌入式系统，例如用于精准农业的系统（***b***），以及中型到大型的边缘数据中心（***c***）。在这两种情况下，系统都可能暴露于高度变化的温度环境中。

探讨了如何调整系统操作以适应可用能量的变化（例如太阳能或风能），涵盖小规模传感系统 [14, 22, 27] 和大规模云系统 [8, 9, 16, 21]，但并未探讨温度对太阳能和电池供能系统的设计与运行造成的重大影响。

为解决这一问题，我们列举、量化并建立模型，以分析影响太阳能和电池供电计算机系统的众多热效应。尽管单个组件（例如处理器、电池、冷却元件等）的温度响应已广为人知，但要优化这些系统的性能、能效和可用性，就必须理解这些组件与其环境之间的关系。例如，在低温下，环境供能系统可以利用其处理器产生的部分热能为电池加热，从而显著提高二者的能效。当然，这些系统在高温下也必须高效散热，以防止处理器和电池过热并变得不可用。

为此，我们结合有关热传递、电池、处理器和冷却元件的成熟物理模型，为环境供能系统设计了一个热力学模型。重要的是，我们的模型捕捉了组件之间的热反馈回路，这些回路会影响系统的操作；例如，回收系统的废热会使电池升温，从而提高其能效，并支持更多计算。我们使用一个小规模原型和可编程培养箱对模型进行经验验证，该培养箱能够在 -30◦C 至 40◦C 之间精确调节温度。随后，我们利用热模型说明，在环境供能计算机系统的设计和操作中考虑热效应，如何提升其性能、能效和可用性。

具体而言，我们的模型和分析量化了系统的功耗、外壳隔热和环境温度对其能效的影响，即使用充满电的电池所完成的计算工作量。我们还强调了外壳的传热系数与其能效之间的权衡：在寒冷环境中，更好的隔热能更有效地利用废热，从而提高能效；但在炎热环境中，为了给冷却元件供能以散热，防止电池和处理器过热，就需要消耗额外能量，因而会降低能效。我们的研究不同于以电网供电的数据中心冷却基础设施优化研究；后者主要关注如何高效地将热量从设施内部传递到外部，并未体现环境供能系统中计算与电池之间的反馈循环。

我们的研究表明，在太阳能和电池供电的计算机系统中，管理并适应变化的热能与电能同样重要，而且二者相互依存。目前，这些系统的热管理大多被视为事后考虑；大多数系统在设计时默认环境温度理想或偏高，通常很少采用隔热，以减少温度升高时对主动冷却的需求，但温度降低时，这也会浪费系统产生的大量热量。目前，人们对温度如何影响这些系统知之甚少，也没有明确的建模工作。我们的研究迈出了重要一步，有助于更深入地理解各个组件受温度影响的效应如何体现在系统层面。

我们的假设是，优化环境供能计算机系统，需要在设计和操作过程中协同管理其电能与热能。在验证这一假设时，我们作出以下贡献。

**热力学模型与验证**。我们为一种环境供能计算机系统设计了全面的热力学模型，该系统由能源（如太阳能板）、外壳、电池和处理器组成，并处于一定的环境温度下。该模型考虑了热量和处理器功率对电池容量、充电和放电的影响、处理器产生的热量，以及冷却元件散热所消耗的能量。我们通过枚举、隔离并以经验方式量化影响系统操作的热力学效应，以及这些效应之间的相互关系，验证了模型。经验分析展示了不同环境温度下各项效应对系统操作的影响。**系统设计与操作用例**。我们展示了热力学模型在设计和操作方面的用例。在设计用例中，我们利用热力学模型揭示系统设计参数与用户指定的性能目标（如性能、能效和可用性）之间的权衡。在操作用例中，我们展示调度器如何利用热力学模型来运行既定设计的环境供能计算机系统，从而优化用户指定的性能目标。

**实现与评估**。我们构建了一个小规模原型和一台可编程培养箱，以经验验证我们的模型。我们开发了一个模型驱动模拟器，以支持长期实验。我们量化了设计权衡和运行空间，展示如何利用热力学模型来提升两个案例研究应用的系统级性能——用于精准农业的小规模嵌入式系统，以及边缘数据中心的中规模联邦学习。

## 2 背景

我们总结电池、处理器和冷却元件表现出的热力学效应，以及这些效应如何改变各自的能量效率。下一节将对这些效应进行建模。

### 2.1 环境供能系统

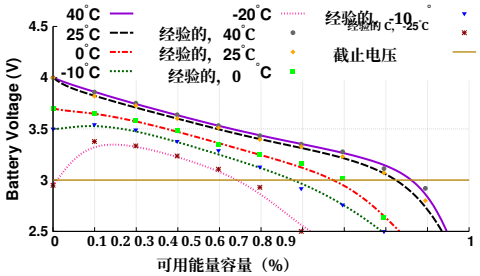
环境供能计算机系统依靠从环境中采集的可再生能源（如太阳能或风能）运行，并将能量储存在电池中。图 1(a) 展示了这类系统的典型组件，包括太阳能板、处理器、电池以及冷却元件（如风扇或泵）。图 1(b) 和 (c) 展示了两种利用环境供能系统的应用示例。精准农业应用部署这类系统，以从小型嵌入式设备收集数据；这些设备用于监测土壤湿度、湿度和温度等环境条件。同样，智慧城市也有种类繁多的应用，例如交通监控、车载到边缘通信和犯罪检测；这些应用会分析和处理由传感器和摄像头在中大型边缘数据中心收集的数据。

### 2.2 电池

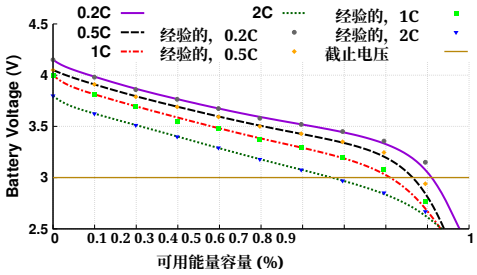
电池储存的能量与其温度以及充放电电流有关。我们将在下文讨论这些关系。**温度-能量效应**。 锂电池的可用能量容量会随温度降低而减少。图2(a)展示了原型电池数据手册中的曲线，其中各数据点代表我们使用可编程培养箱进行的实验，用于通过经验验证数据手册。图中显示，当温度从 25◦C 降至 -20◦C 时，在 3V 截止电压下，电池的可用容量（占其充满电时容量的百分比）会下降 50% 以上。这部分“浪费”的能量会以热量的形式被电池消耗，用来催化产生电力的化学反应。我们将此称为温度-能量 效应。此外，低温放电会损坏电池并缩短循环寿命。一般而言，锂电池不应在低于 -20◦ 的温度下放电。同样，温度升高时，电池的自放电率也会增加，从而减少可用于放电的能量，不过其影响不及温度降低那么大。锂电池通常无法在 >60◦ 下放电，而且在该温度下，其可用容量会降至

0.

图3(a)绘制了原型中的温度-能量效应，横轴为环境温度，纵轴为电池可用容量。各数据点代表使用原型进行的实验，实线则代表模型的预测结果，与数据高度吻合。在此情形下，我们将电池在 25◦C 时的容量设为 100%。如图所示，温度降低时可用容量显著下降：在 0◦C 时仅有 80% 的能量可用，在 -20◦C 附近则仅有 50% 的能量可用。美国、欧洲及其他许多高纬度地区的冬季，0◦C 至 -20◦C 的温度很常见。正如我们所展示的，处理器产生的热量可用于提高机箱内部温度，从而从电池中提取更多能量。图中还显示，为确保安全，原型的充电控制器会在电池达到 60◦C 时自动关闭电池。环境温度通常不会达到 60◦C，但如果处理器产生热量的速度超过系统散热的速度（例如通过对流散热），隔热机箱内部的温度就可能升至这一水平。




（a）温度效应

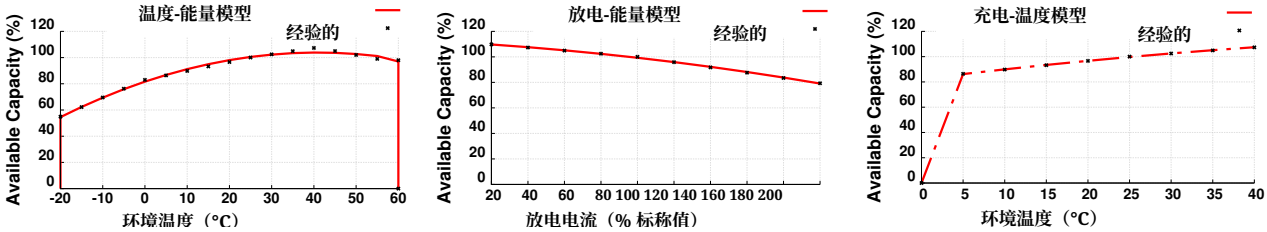



（b）放电电流效应

**图2：** 系统的可用电池容量会随温度（***a***）和放电电流（***b***）而变化。

**放电-能量效应**。 放电-能量效应 指以较高倍率放电时可用能量的减少。图2(b)展示了原型电池数据手册中的曲线，数据点代表我们为进行实证验证而开展的实验。图中显示，在 3V 截止电压下，将电流从 C倍率 0.2 提高至 2 时，电池的可用能量会减少 25%；其中，C倍率为 $N$时，表示以足以在 $1/N$ 小时内将电池完全放电的放电电流放电。由于这一效应，如果处理器以 100% 利用率运行，其从电池消耗的能量会少于以较低利用率运行时的消耗量，因为利用率与电流消耗大致呈线性关系。因此，处理速度越慢，就越能从电池中提取能量，也就能执行更多的总体计算。

图3(b)量化了放电-能量效应：我们将放电电流（与利用率呈线性关系）绘制在 x 轴上，将可用能量容量绘制在 y 轴上。数据点代表使用原型进行的实验，连续曲线则代表模型的预测结果，与实测数据高度吻合。在这里，我们将实验结果按某一放电电流（相当于 50% 利用率）进行归一化，并将该电流下的可用容量设为 100%。这样便可以评估高于 1C 的电流下的放电-能量效应，而系统可能需要这种电流来应对工作负载突发。实验显示出线性关系：降低系统速度（即降低利用率）时，我们能够提取超过标称可用能量的能量；提高系统速度（即提高利用率）时，提取的能量则会减少。在此情况下，利用率为 100% 时的可用容量仅为利用率为 50% 时的 80%。放电 - 能量效应与温度-能量效应相互抵消：处理器以高利用率运行会产生更多热量，这些热量可能使电池升温并增加其可用能量；但放电电流增大又会减少可用能量。因此，要确定任一时刻能效最优的运行点并非易事。




(a) 温度-能量效应 (b) 放电-能量效应 (c) 温度-充电效应

**图3：** 能效与温度 ***(a)***、放电电流 ***(b)***，以及在不同温度下充电时的可用电池容量 ***(c)*** 的关系。对于 ***(a)*** 和 ***(b)***，黑点表示实验数据，红色曲线表示我们的模型。

**温度-充电效应**。温度-充电效应指温度与电池充电速率之间的关系。锂电池可以安全地放电至 −20◦C，但其最大充电速率会随温度降低而下降，并且在 0◦C 以下无法充电。因此，低温会阻碍能量存储，并大幅降低能量利用效率。锂电池在高温下也容易过热，因为其化学反应会产生额外热量，使内部温度升至高于环境温度。充电控制器通常会在内部温度过高（高于 ~60 ◦C）时阻止充放电。因此，高温可能会阻碍能量存储和使用。图3(c)展示了电池的充电容量如何随温度变化。在此情况下，25◦C 时的最大充电容量设为 100%。如图所示，充电速率从 5◦C 到 0◦C 迅速下降，并在 0◦C 时降至 0%。在 5◦C 时，容量为 ~80%，之后随温度升高大致呈线性增长。与预期一致，温度越高，系统为电池充电的速率越快。与前文相同，数据点代表使用原型进行的实验，曲线代表模型的预测结果，两者高度吻合。

## 2.3 处理器

由于处理器不做机械功，其功率会转化为热量，必须将热量散发出去，以防止它们因热失控而过热。如果系统利用外部空气（或水）进行冷却，那么系统的能效取决于温度，因为较低的环境温度意味着主动冷却处理器所需的额外能量较少。云数据中心通常采用这种“自然冷却”方式 [10]。因此，与电池不同，处理器在低温下能效更高，因为它们无需消耗额外功率来散热。与电池不同，在频率和电压固定时，计算机系统的功率越高，每次计算所消耗的焦耳数越少，能效也越高，因为

它们通常不是能耗成比例系统，而且较高的功率（和利用率）会将其基础负载功率分摊到更多计算任务上。当然，理想的能耗成比例系统在任何利用率下都具有相同的能效。处理器产生的热量可由环境供能系统回收，根据上述各种影响优化电池效率。例如，在低温下调度工作负载，可以通过产生热量来提高电池效率，从而改善系统性能。我们称之为调度-性能 效应。

## 2.4 冷却系统

风扇（或泵）通常用于计算机系统散热。变速电机必须以何种强度运转才能娱乐主管

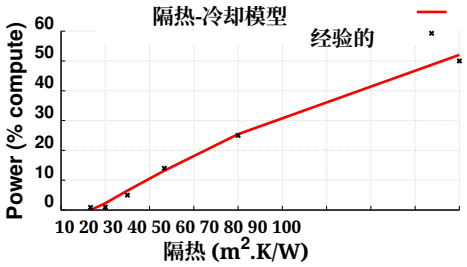



**图 4：** 风扇功率随隔热程度的变化。黑色点表示实验数据，红色曲线表示我们的模型。

旋转风扇（或泵）的叶片以维持特定温度，取决于处理器散发的热量、系统外壳隔热层的导热率以及外部温度。因此，存在一种影响系统外壳设计的隔热-冷却效应：外壳的隔热层越厚，其在低温环境下的性能越好，但在高温环境下，电机必须运行得越频繁，反之亦然。此外，正如我们将要讨论的，风扇（和泵）的能耗与其输送的空气（或水）的流量以及因此所散发的热量呈三次函数关系。

隔热-冷却效应体现了这样一种权衡：在低温环境下，采用更厚的隔热层可以保留热量，但代价是需要在高温环境下消耗更多能量，通过风扇（或泵）来散热。图 4 量化了我们的原型在 25◦C 下、不同隔热等级对应的隔热-冷却效应，横轴表示隔热等级。纵轴表示当系统以 50% 的利用率运行时，随着外壳隔热性能的提高，为维持 25◦C 的温度而驱动风扇（或泵）电机所需的功率。正如预期的那样，当隔热层较薄时，几乎不需要冷却，因此消耗的功率很少。然而，随着隔热层厚度增加，外壳会保留更多热量，因此需要消耗更多功率，通过主动冷却来散发这些热量。当然，冷却元件所消耗的能量无法用于有效计算。在隔热等级较高的情况下，除了运行冷却元件之外，另一种选择是以较低的利用率运行，从而产生更少的热量，降低通过风扇散热所需的能量消耗。因此，与放电-能量效应一样，以较低的速度和较低的利用率运行，可以使更多能量用于有效计算。也就是说，利用冷却元件进行主动散热，使环境供能系统能够以高于原本所能达到的工作负载强度运行，但代价是能效降低。此外，与前文一样，图中的数据点代表我们原型的实验数据，而曲线则代表模型的预测结果，两者高度吻合。

## 3 热力学模型

为了更好地理解温度对环境供能系统操作的影响，我们开发了一个全面的物理热力学模型，用于估算系统外壳在一段时间间隔 $\Delta t$ 内的温度变化。我们的贡献在于利用基本热力学关系，开发一个端到端模型来预测系统级性能；这些基本关系可见于经典热力学教科书 [6, 19]。图 5 展示了我们的模型及其关键参数。表1 列出了模型中使用的符号说明、定义及单位。模型假设一个处理单元（例如中央处理器、图形处理器、无线电模块，或它们的组合）具有一定的动态功率范围，且电池位于给定尺寸的外壳内。处理器、电池和外壳内的空气各自具有相应的温度（$T$）、质量（$m$）和热容量（$C$）；热容量指改变该质量的温度所需的热量，单位为焦耳/开尔文。我们还假设，外部的环境温度（$T_{amb}$）不受与外壳之间任何热传递的影响。

外壳根据其传热系数 $U$ 提供与环境隔热的能力。该系数是通过经验推导得出的常数，用于决定外壳与外部环境之间单位时间内的热传递速率（$Q_{trans}$），单位为焦耳。总传热系数 $U$ 由外壳内部的对流、热量通过外壳壁的传导以及热量从外壳向外部的对流共同构成。我们可以将 $U$ 计算为串联连接的热阻，如下所示。

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{d}{k} + \frac{1}{h_o}. \tag{1}$$

在公式1中，$h_i$ 是内部对流系数，$k$ 是热导率，$d$ 是外壳的厚度，$h_o$ 是外部对流系数。如下所示，外壳与外部环境之间的热传递速率（$\hat{Q}_{trans}$）与传热系数（$U$）、外壳内外的温差（$\Delta T(t)$）以及传热面积（$A$）成正比。

$$\hat{Q}_{trans} = U \times A \times \Delta T(t) = U \times A \times (T_{amb} - T_{enc}(t)). \tag{2}$$

为简化起见，我们的模型假设外壳是一个边长为 $L$、表面积为 $A = 6L^2$的立方体。如公式 2 所示，传热速率是表面积的函数 $A$。在任意时间$t$，$\Delta T(t) = T_{amb} - T_{enc}(t)$表示外壳内外的温度差。因此，正的$\Delta T(t)$表示热量流入外壳，负的 $\Delta T(t)$则表示热量流出外壳。根据公式 2，我们只需对 $\Delta t$ 内的$\hat{Q}_{trans}$随时间积分，即可计算该时间间隔内的总热传递量（单位为焦耳），如下所示。

$$Q_{trans} = \int_{t}^{t+\Delta t} \hat{Q}_{trans}\, dt. \tag{3}$$

公式 3 使我们能够计算外壳内部与外部环境之间传递的总热能。然而，这部分热能会被外壳内的物质吸收，包括处理器、电池和空气，因此不会导致外壳温度升高（$T_{enc}$）。这种热能取决于外壳的热容量（$C_{enc}$），其计算方式是对外壳内各物体的热容量进行质量加权平均，具体如下：

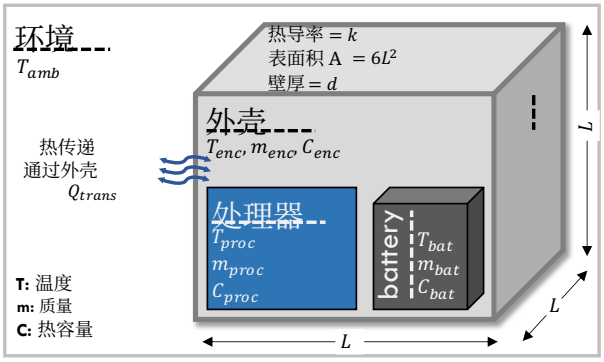



**图 5：** 一种简单、通用的环境供能计算机系统热力学模型。

| 符号说明 | 定义 | Unit |
|---|---|---|
| Q | 传热速率 | 焦耳·秒$^{-1}$ |
| h | 传热系数 | W.m$^{-2}$K$^{-1}$ |
| U | 综合传热系数 | W·m$^{-2}$K$^{-1}$ |
| k | 热导率 | W.m$^{-1}$K$^{-1}$ |
| d | 围护结构厚度 | m |
| A | 围护结构表面积 | m$^2$ |
| T | 温度 | K |
| ΔT | 温差 | K |
| m | Mass | Kg |
| C | 热容量 | J.K$^{-1}$ |
| $R_{specific}$ | 比气体常数 | J.Kg$^{-1}$K$^{-1}$ |
| $p$ | 压力 | J.m$^{-3}$ |
| $\rho$ | 密度 | 千克·米$^{-3}$ |
| V | 体积 | m$^3$ |
| $\mathcal{V}$ | 处理元件电压 | 伏特 |
| $\mathcal{I}$ | 处理元件电流 | 安培 |
| AF | 气流 | m$^3$.s$^{-1}$ |

**表1：** 模型符号、定义和单位。

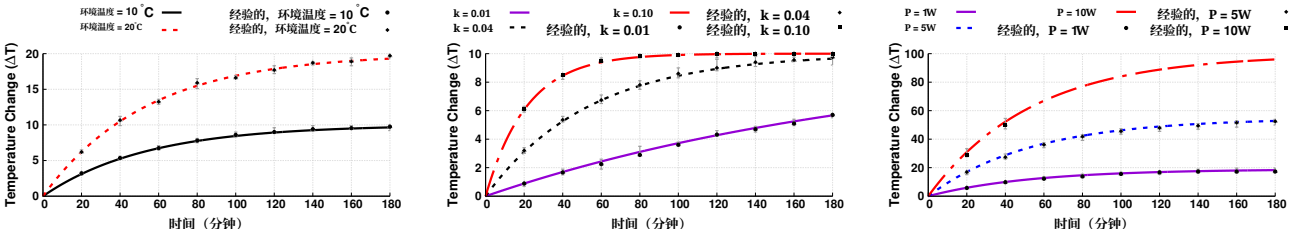
如下所示，其中 $m_{enc} = m_{air} + m_{bat} + m_{proc}$或外壳内的总质量。这里，我们假设外壳仅包含处理元件、电池和环境空气。

$$C_{enc} = \frac{1}{m_{enc}} \times (m_{air}.C_{air} + m_{bat}.C_{bat} + m_{proc}.C_{proc})$$

我们可以分别使用秤和量热计，通过经验测量电池和计算平台的质量（$m$）及热容量（$C$）。我们无法直接称量空气质量，但可以利用简单的模型推导得出。具体而言，封闭空间内的空气质量是其体积与空气密度（$\rho_{air}$）的乘积。空气密度与大气压成正比，与温度（$T_{air}$）及比气体常数（$R_{specific}$）成反比，如下所示。

$$\rho_{air} = \frac{p}{R_{specific} \times T_{air}}. \tag{4}$$

对于地球上的干燥空气 $R_{specific} = 287\ 058 J\ kg^{-1} \cdot K^{-1}$。我们假设当 $p = 1$ 大气压和 $T_{air} = 25$◦C 时，外壳处于封闭状态。请注意，根据理想气体定律，即使外壳内部的温度发生变化，其压力 $p$与温度 $T_{air}$之比以及空气密度仍保持不变。因此，在这种情况下，空气密度为 $\rho_{air} = 1.1839$kg/m3，相应的空气质量为 $m_{air} = 1.1839 \times L^3$。在这些条件下，地球表面空气的热容量（$C_{air}$）同样是一个常数，等于每千克每开尔文度（K）717 焦耳。我们从 Engineering ToolBox [25]获取了空气及其他组件热学性质的系数。




(a) 环境温度 ($k$=0.04, $P$=0)　(b) 热导率 ($T_{amb}$=10∘$C$, $P$=0)　(c) 功耗 ($k$=0.04, $T_{amb}$=10∘$C$)

**图6：** 外壳温度 $T_{enc}$ 随时间的变化取决于 ***(a)*** 环境温度 $T_{amb}$、***(b)*** 外壳的热导率 $k$以及 ***(c)*** 处理器的功耗 $P$。

鉴于以上信息，我们可以计算出外壳的热容量 $C_{enc}$。如果外壳不产生内部热量，那么其温度最终将达到一个平衡温度，该温度等于周围环境的温度 $T_{amb}$。为达到平衡，外壳将吸收或释放的热量总量 $Q_{trans}$ 等于其总质量 $m_{enc}$、热容量 $C_{enc}$与温度变化的乘积，计算如下。

$$Q_{trans} = m_{enc} \times C_{enc} \times (T_{amb} - T_{enc}(0)). \quad (5)$$

这里， $T_{enc}(0)$ 表示初始时刻的外壳温度。上面的公式表示达到平衡温度所传递的热量，而同一个基本公式也决定了任意时间间隔 $\Delta t$ 内传递的热量，具体取决于该时间间隔开始和结束时的温度变化，如下所示。

$$Q_{trans} = m_{enc} \times C_{enc} \times (T_{enc}(t + \Delta t) - T_{enc}(t)). \quad (6)$$

请注意，我们在公式 3 和公式6 中都计算了一个时间间隔内的总热传递 $Q_{trans}$。令这两个公式相等即可得到我们的模型，该模型根据初始温度 $T_{enc}(t)$、外壳的质量 ($m_{enc}$) 和热容量 ( $C_{enc}$)，以及其热导率 ($k$)、表面积 ($A$)、环境温度 ($T_{amb}$) 和深度 ($d$)，预测经过一段时间间隔 $\Delta t$ 后外壳内的温度。

$$m_{enc} \times C_{enc} \times (T_{enc}(t + \Delta t) - T_{enc}(t)) = \int_t^{t+\Delta t} \hat{Q}_{trans}\, dt$$

$$T_{enc}(t + \Delta t) = T_{enc}(t) + \frac{1}{m_{enc} C_{enc}} \int_t^{t+\Delta t} \hat{Q}_{trans}\, dt \quad (7)$$

到目前为止，我们的模型假设处理器不会产生热量。然而在实际中，处理器的功耗会转化为热量，而我们的模型假设这些热量均匀分布在整个外壳中。暂时，我们假设不存在用于散发这些热量的机械部件，例如风扇。下面我们将讨论使用风扇进行散热的建模方法。因此，我们通过假设处理器的功耗完全转化为热量，将上述模型扩展为纳入处理器的功耗。我们只需将这些热能加到与环境进行热传递的热量中，即可计入这些热能，如下所示。

$$T_{enc}(t + \Delta t) = T_{enc}(t) + \frac{1}{m_{enc} C_{enc}} \int_t^{t+\Delta t} (\hat{Q}_{trans} + (\mathcal{V} \cdot \mathcal{I}))\, dt.$$

这里，V 和 I 分别是平台的电压和电流，V·I 则是其总体功耗。上述模型只是指出，功率会直接转化为外壳内的热量，因此会增强系统可用的其他热传递机制。

我们的模型根据外壳的物理特性、环境温度以及处理器的功耗，描述外壳温度随时间的变化。遗憾的是，目前没有良好的物理模型能够描述温度和功耗对可用电池容量的影响。因此，我们采用电池数据手册中的经验模型（见图2），并通过实验对其进行了验证。接下来，我们将扩展模型，使其能够纳入任意冷却部件，例如空调或简单的风扇。

**使用主动冷却散热**。处理器散热的速度可能快于外壳根据其导热率将热量传递到外部环境的速度，导致温度升高到电池和处理器都无法工作的程度。在这种情况下，可能需要使用风扇或泵，通过对流提高外壳内的散热速率。虽然下面的模型重点讨论通过推动空气来传递热量的风扇，但同样的基本方法也适用于通过推动液体来传递热量的泵。风扇的选择取决于外壳的规格以及所需的最大散热速率。风扇推动空气，使其吸收箱体内部的热量，然后将热量散发到外部环境。散发的能量（$Q_{diss}$）取决于流动空气的质量（$m_{air}$）、流动空气的比热容（$C_{air}$）以及流动空气的温度变化（$\Delta T_{air}$）。

$$Q_{diss} = m_{air} \times C_{air} \times \Delta T_{air}$$

流动空气的质量可以根据被移动的空气体积（$V_{air}$）和流动空气密度（$\rho_{air}$）计算得出。

$$Q_{diss} = (V_{air} \times \rho_{air}) \times C_{air} \times \Delta T_{air}$$

我们将方程两边相除，得到各个时间点需要耗散的功率（$t$）。

$$\frac{Q_{diss}}{t} = (\frac{V_{air}}{t} \times \rho_{air}) \times C_{air} \times \Delta T_{air}$$

空气体积随时间的变化即为空气流量，我们将其称为 $AF_{air}$。我们将功率耗散称为 $P_{diss}$。整理方程，求出给定功率耗散所需的气流量。

$$AF_{air} = \frac{P_{diss}}{\rho_{air} \times C_{air} \times \Delta T_{air}}$$

$C_{air}$的值为 $1kJ\ kg^{-1}\ C^{-1}$.，20∘C时空气密度为 $\rho_{air} = 1.20$ kg/m$^3$。我们可以使用此方程，根据给定的流量求出散热率，也可以求出达到所需散热率所需的热流。

由于外壳内的设备会对气流产生阻力，因此需要以一定的压力输送空气，以克服这种阻力。然而，所需压力的大小在很大程度上取决于设计和物理特性

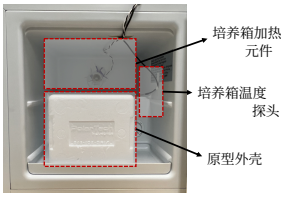



**Fig 7** ***Small-scale prototype inside the incubat***

或。待冷却的产品，并且必须通过实验，使用风速计和压力计分别测量空气速度和压力来确定，或者使用不同的计算机辅助设计（CAD）软件进行设计并计算气流特性。两种方法都会得出系统压力要求，该要求会随气流量的增加而提高。随着气流量增加，风扇产生的压力会降低；背压最低时，气流量最大。这两条曲线的交点就是风扇在给定系统中的运行点。我们假设模型使用的风扇在其运行点能够提供所需的气流量。变速风扇的功耗与气流量变化呈立方关系。也就是说，如果风扇的气流量加倍，其功耗将增加 $8\times$。这一关系如以下公式所示。

$$P_j = P_i \times \left({}^{AF_j}/_{AF_i}\right)^3$$

这里， $P_i$ 和 $AF_i$ 分别是初始功耗和气流，而 $P_j$ 和 $AF_j$ 分别是最终功耗和气流。请注意，使用风扇散热会减少可用于进行有效计算的能量。

**实现与模型验证**。为验证我们的模型并开展热力学设计实验，我们将迷你冰柜和白炽灯泡（作为热源）连接到由 Raspberry Pi 控制的可编程继电器，构建了一个可编程培养箱（图7）。我们的培养箱可通过程序将温度控制在 -30◦C 至 40◦C 之间，误差为 $\pm 2$◦C。我们使用 Nvidia Jetson Nano 作为验证用计算平台。Nano 的基础负载功率为 $\sim 1$W，最大功率为 10W。我们使用额定容量为 3.2 安时（Ah）、电压为 3.6V 的 Panasonic NCR18650B 锂离子电池。我们使用升压转换器为 Nano 构建了一个 4Ah、5V 的电池组，其最大能量容量为 20Wh。第 §2 节中的图2展示了电池对温度和放电电流的响应。我们的外壳采用发泡聚苯乙烯（EPS）泡沫，其热导率为 $k0.04Wm^{-1}K^{-1}$ [17]。我们将 1.25 英寸厚度作为实验基准。我们通过改变其厚度来改变 $k$。例如，将厚度减半会使 $k$增加 $2\times$，达到 $0.08Wm^{-1}K^{-1}$。

三个参数会影响外壳温度$T_{enc}$随时间的变化：与环境温度的差值

$T_{amb}$、外壳的热导率 $k$ 以及处理器的功耗 $P$。图6展示了这三者分别对从 0◦C 开始的 $T_{enc}$ 变化所产生的复杂非线性影响。我们的基准条件为 $T_{amb}$=10◦C、$k$=0.04 和 $P$=0W。随后，图6(a) 在不改变 $k$ 或 $P$ 的情况下改变 $T_{amb}$，结果表明，环境温度越高，外壳的温度上升得越快。同样，图6(b) 改变 $k$，结果表明，热导率越高，即隔热越强，温度上升得也越快。最后，图6(c) 改变处理器的功耗，展示了由此产生的热量如何使温度在满负载（10W）时升高至 100◦C，远高于 10◦C 的环境温度。

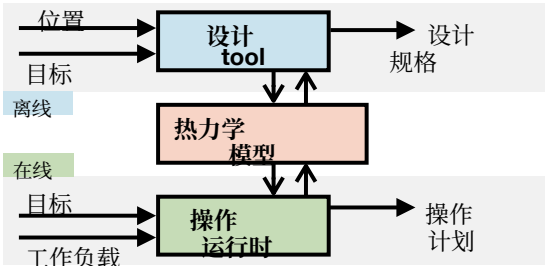



**图8：**热力学模型用例概览。图6也验证了我们的模型：曲线表示我们的模型，数据点表示五次实验中温度变化的平均值，误差线表示最大值和最小值。

## 4 热力学模型用例 C ASES

本节首先介绍一台环境供电计算机系统的设计，具体包括其外壳，以及系统的操作，这两者作为热力学模型的两个用例，如图8所示。随后，我们将进行更广泛的分析，概述各种环境下的用例。

### 4.1 用例1：系统设计I

n the first 个用例，I the end goals for the 未语

确定系统外壳的配置范围，使系统在各个季节都能达到其性能目标。为此，前提是掌握系统所在地的历史温度曲线，以及用户指定的系统目标，例如在 50% 功率下实现 100% 可用性。用户还需指定次要指标的优先顺序。此外，用户还必须指定不同系统组件（如处理器、电池和太阳能板）的容量。根据这些输入，我们穷举搜索系统外壳参数空间，其中包括外壳隔热和冷却元件容量，以找到满足用户指定性能目标的参数范围。

我们采用迭代方法，寻找合适的外壳和冷却元件规格。首先，为外壳隔热或热导率 $k$ 设定一组初始值，分别对应低（例如泡沫塑料， $k = 0.04W/m.K$）、中（例如聚氯乙烯（PVC）塑料 $k = 0.2W/m.K$）和高（例如玻璃， $k = 0.8W/m.K$）值。这些值可配置，并对应可用于外壳的实际隔热材料。同样，我们为冷却能力设定一个初始值，以瓦特（W）为单位。然后，我们根据所有隔热值下的温度和太阳能功率曲线，使用热力学模型，通过迭代过程寻找最佳的外壳和冷却元件规格。由于工作负载未知，我们将系统运行功率从用户指定的最低值（例如 30%）调整到 100% 功率。对于每种配置组合（即热导率、冷却能力和运行功率），我们都会计算量化系统性能目标的所有指标值。

然后，我们使用蛮力法来找到最佳配置。由于确定合适的外壳规格是系统部署前一次性完成的流程，因此蛮力法所需的时间并不是问题。最后，我们输出一个配置：在满足首要性能目标的同时，按优先级顺序最大化其他指标。

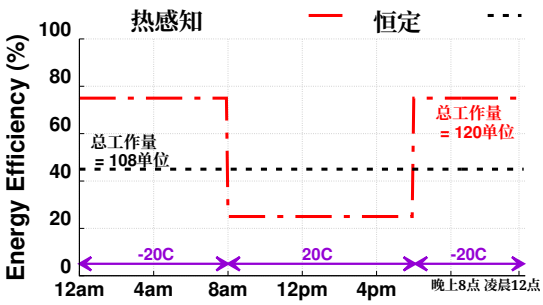



**图9：** 采用 ***i)*** 朴素调度和 ***ii)*** 利用电气/热反馈回路的热感知调度所完成的工作。优先级。对于给定的规格，可能不存在任何配置能够达到期望的性能水平。

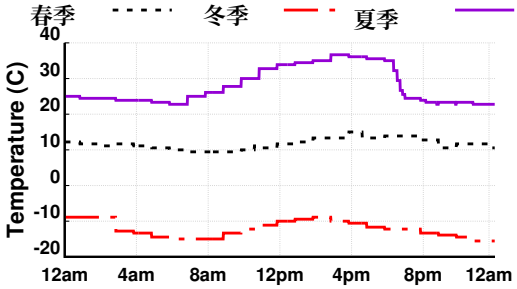



**图10:** 美国东北部某一位置在不同季节的温度曲线。

**4.2 用例 2：操作系统组件**在操作用例中，我们的目标是确定计算元件和冷却元件的运行点，使系统在有限的调度时域内满足其性能目标。为此，我们需要设计用例中的所有输入，以及设计流程的输出参数，但有一项关键区别：我们需要的是这些输入的预测值，而非观测到的温度、太阳能发电量和工作负载到达计划。温度预测通常非常准确，而且容易获取。太阳能功率预测也可通过许多开源且公开可用的工具获取，例如 Solar-TK [4]。通过小型嵌入式系统或边缘数据中心部署的应用，其工作负载模式往往也是确定性的。给定这些输入后，我们使用预测的温度、太阳能功率和工作负载来模拟热力学模型。这样，我们便可在满足指定目标的同时，为调度时域内的每个小时安排工作负载。

在确定运行计划时，我们利用了这样一个洞见：热能和电能之间都存在反馈回路，并且在时间 $t$ 因能耗产生的热能会影响后续时段的能量可用性。我们用一个简单的例子来展示这一效应，并将其称为调度能耗效应。它指的是处理器运行强度与电池可提供能量之间的关系。具体而言，由第2节所述的温度-能量效应可知，电池温度越高，系统就能从中提取越多能量。因此，在调度工作负载时，随着温度降低，系统可以通过提高利用率来提取更多能量并完成更多计算；而在温度升高时，则采用较低的利用率。前者能维持较高的温度，从而提高电池效率；后者产生的热量较少，因而降低了冷却需求，而这会消耗额外的能量来散发废热。

图9量化了这样一种情境下的调度能耗效应：温度在夜间下降，白天上升。图中比较了始终以 ~50% 利用率运行，与采用一种调度策略、在白天以 ~25% 利用率运行且在夜间以 ~80% 利用率运行这两种情况。在此情境下，由于上述影响，后一种计划能够比前一种多完成 11% 的计算。本实验中的计算只是一个整数基准测试。实验表明，处理器散热的时间和热量会影响系统的能效和总计算量。

我们采用简单的迭代方法，寻找满足用户性能目标的最优工作负载调度计划。我们从调度时域的末端向前推算，并为每个小时安排工作负载，以便以最高能效从电池中提取能量。第一轮中，我们仅使用默认的工作负载模式，然后调整每个时隙中的工作负载，以确保达到性能目标。

## 4.3 工作中的热力学模型

接下来，我们将展示热力学模型如何改进上述用例的设计和操作。我们将介绍性能目标与最低运行功率约束的多种组合。我们还将结果按三个季节分别呈现，以说明即使在同一位置，季节变化也会如何影响性能权衡。

*4.3.1* **评估设置。** 下文概述用于指定系统性能目标的关键指标。

**性能指标。**我们使用三个指标来定义系统性能目标：能效、可用性和工作速率。

能效 定义为从电池中提取并用于计算的可用能量所占的百分比。

$$\text{Energy Efficiency} = 100 \times \frac{\text{Energy used for computation}}{\text{Energy stored in the battery}}$$

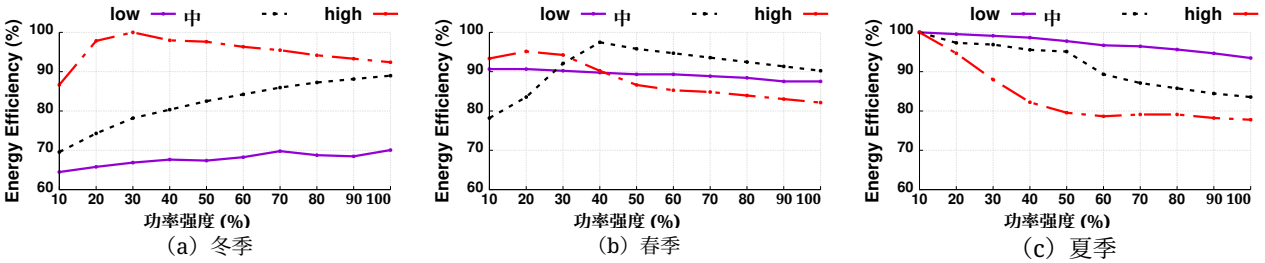
100% 表示从电池中提取的所有能量都用于计算，而 50% 则表示只有 50% 的能量能够被提取并用于计算。在这种情况下，其余 50% 要么无法从电池中提取，要么被冷却系统消耗。数值越高越好。

可用性是指系统正常运行且具有足够功率、能够以不低于某一利用率阈值运行的时间百分比。

$$\text{Availability} = 100 \times \frac{\text{System up time}}{\text{Total experiment time}}$$

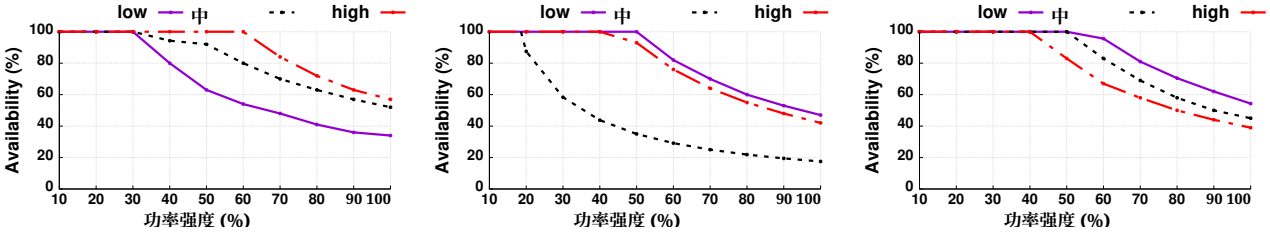
可用性介于 0% 和 100% 之间；对于给定的运行点，数值越大越好。最后，工作速率定义为单位时间内完成的工作量（计算量），其取值范围为 (0，无穷大)。工作速率越高越好。

**系统配置。**为了演示我们的使用场景，我们考虑一个小规模、无碳的边缘数据中心，与近期研究中所讨论的类似 [3, 5]。我们将外壳（此处为一间小房间）视为边长为 8 英尺的立方体。电池容量为 20kWh，最低荷电状态为 40%，即 8kWh。该边缘数据中心内有 8 台服务器，每台功率为 250W，在 100% 利用率下总需求为 2kW。可用电池容量




（a）冬季 （b）春季 （c）夏季

**图11：** 三个季节的能效：（***a***）冬季、（***b***）春季和（***c***）夏季。对于每个季节，我们评估三种设计：冬季最优（红色长虚线）、春季最优（黑色短虚线）和夏季最优（紫色实线），并考察由横轴功率强度表示的多个运行点。




(a) 冬季 (b) 春季 (c) 夏季

**图12：** 三个季节的可用性：***(a)*** 冬季，***(b)*** 春季，***(c)*** 夏季。对于每个季节，我们评估三种设计在不同运行点下的表现，这些运行点由横轴上的功率强度表示。三种设计分别针对冬季优化（红色长虚线）、春季优化（黑色短虚线）和夏季优化（紫色实线）。

12kWh，在理想条件下足以让所有服务器以 50% 的利用率运行 24 小时。通过这一设置，我们可以围绕 50% 调整系统利用率（以及电流消耗），并评估增加或降低电池放电电流对系统目标的影响。电池的热容量、体积和质量基于我们的锂离子电池数据手册 [28]。

我们以美国东北部的一个地点为例，展示设计和运行点对能效、可用性和性能的影响。该地点在冬季、夏季和春季的天气差异显著。图10展示了这些季节中三个典型日的温度曲线。夏季温度范围为 77◦F (25◦C) 至 97◦F (36◦C)，春季为 46◦F ( 8◦C) 至 52◦F (11◦C)，冬季为 5◦F (-15◦C) 至 16◦F (- 5◦C)。我们将外壳的传热系数设为三种隔热等级：低（2）、中（0.9）和高（0.35）。这些数值通过改变隔热墙的厚度实现，墙体的热导率为 0.15 W/m·K。

*4.3.2* **能效。** 图11展示了所有季节中不同设计参数和运行点下的能效。这里，我们假设系统针对能效进行优化，并讨论各季节中的设计选择和运行点。设计的影响。 用于优化能效的设计选择取决于系统针对哪个季节进行优化，以及其愿意在其他季节接受多大程度的能效损失。如果系统希望在冬季实现较高能效，我们应选择能够最大限度抵御环境天气并在热量回收方面提供最佳性能的设计，称为冬季最优设计（高隔热设计）。该设计在冬季可实现100%的能效，并且在任何运行点下都能提供最高的能效（图11(a)）。然而，它在其他季节中的能效显著较低，尤其是在夏季（图11(c)），因为在夏季，该设计必须使用大量风扇能耗来耗散废热。同样，低隔热设计是实现夏季能效的最佳选择。不出所料，由于高导热率使处理器热量能够逸出，导致系统在处理器空闲时无法保持热量，因此该设计在冬季的性能最差。春季最优设计（中隔热设计）在春季和秋季提供最佳性能（图11(b)）。由于其在冬季的性能优于低隔热设计、在夏季的性能优于高隔热设计，因此它是优化各季节能效的最佳选择。

操作的影响。 针对某一季节设计系统，并不能自动保证能效达到最佳。运行点，即利用率，是另一个可用于优化能效的调节因素。例如，在冬季，低隔热设计在最高运行点时能效最高。这是因为利用率越高，产生的热量越多，从而使电池保持温暖。电池能效的提升足以抵消电流消耗增加带来的负面影响。然而，同一设计在春季和夏季的最低运行点时能效最佳。这是因为在较低运行点下，低隔热设计能够通过正常的热传递散去热量。较低的运行点不仅无需使用风扇，还能避免放电电流增大带来的负面影响。并非所有设计选择都呈现这一趋势。对于高隔热和中隔热设计，在各自对应的季节中，最佳性能都出现在中间运行点。这表明，对于给定的设计，运行点的选择会随季节变化，并且在不同季节之间也会有所不同。图11也可用于指导系统设计。如果系统必须在某个特定运行点运行，可以选择性能最佳的设计。例如，如果系统必须始终以10%功率强度运行，那么高隔热设计在冬季和夏季都能提供最佳性能，在一年中其余时间的性能也相当出色。

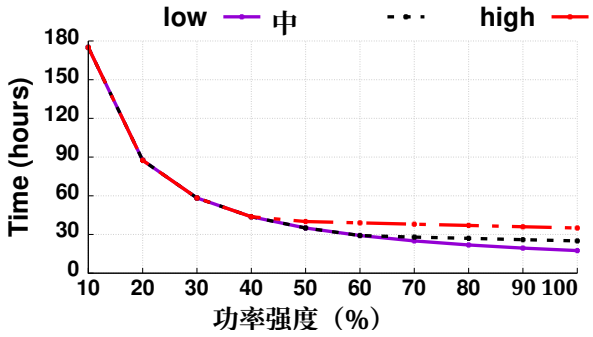



**图13：** 在不同运行点下，高（冬季最优）、中（春季最优）和低（夏季最优）隔热设计在夏季的性能。

*4.3.3* **可用性。** 图12评估了不同设计参数和运行点在各季节的可用性。这里假设系统以可用性为优化目标，并讨论如何选择设计和运行点，以便在各季节实现这一目标。设计的影响。不同隔热等级在所有运行点上的可用性各不相同。各隔热等级在所有运行点上所能达到的最高可用性，在不同季节之间差异显著。高隔热设计在所有运行点上的可用性至少为60%，而低隔热设计为35%。这是因为这两种设计的能效在最高运行点时差异显著。然而，同一高隔热设计在夏季的所有运行点上，可用性仅为38%。这是因为运行点提高时，需要更大的气流来散热，从而导致风扇消耗能量。如果操作者不在意运行点或能效，那么实现100% 可用性的设计选择就很简单。图12显示，所有设计方案在所有季节都能实现100% 可用性。它们的区别仅在于实现100% 可用性时所能达到的最高运行点。因此，如果操作者希望系统达到100% 可用性，可以选择任意一种设计，然后在该设计能够实现100% 可用性的最高运行点运行。操作的影响。 不同运行点在各季节的可用性各不相同。例如，在功率强度为30%或更低时，无论采用何种设计，系统都能达到100% 可用性。这低于理想系统在100%可用性下可支持的50%功率强度。这表明，针对非最佳季节设计的热管理能力较差。请注意，每种设计在其最佳季节都能在更高的运行点达到100% 可用性。例如，高隔热设计在冬季的热能管理效果最好，能够在超过50%的运行点下运行。这是因为热量滞留使电池温度超过25◦C，并提取出高于标称值的能量。这一现象在各季节中都一致：在特定季节最善于管理热能的设计

季节，实现了 100% 可用性的最高运行点。*4.3.4* **性能。** 图13展示了不同设计在夏季的性能。此次评估有两个关键点。首先，在不同运行点，工作速度有所不同。这一点很直观，因为 x 轴上的功率强度与中央处理器利用率成正比。在 100% 利用率下，计算速率是 10% 利用率下的 10 倍。第二个要点是不同设计之间的性能差异。低隔热设计的性能最佳，因为它不需要风扇或主动

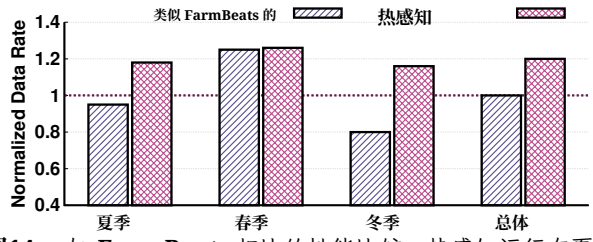



**图14：** 与 ***FarmBeats*** 相比的性能比较。热感知运行在夏季和冬季的表现优于 ***FarmBeats*** 的非热感知设计。两者在春季的表现相同。

冷却然而，另外两种设计必须使用风扇散热，同时还要通过工作负载调度来降低风扇的能耗。例如，高隔热设计采用非常简单的调度策略：当温度超过 60◦C 时停止计算，只有在温度降至 60◦C 时才恢复计算；此过程结合了通过传导实现的被动冷却和使用风扇实现的主动冷却。这样一来，该设计以牺牲性能为代价，实现了更高的能效。

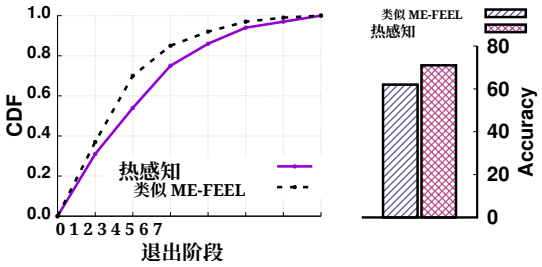
## 5 案例研究

接下来，我们将介绍两个案例研究应用，它们使用我们的热力学模型，同时各自侧重于不同的目标。第一个应用是精准农业，其中物联网基站从分布式无线传感器网络中的环境传感器收集传感器数据。该应用的最新技术水平是 FarmBeats [26]，，它是一个用于数据驱动农业的物联网平台。第二个应用是智慧城市中的联邦学习，多个边缘计算平台在此训练机器学习（ML）模型。这些案例研究表明，我们的热感知 设计与运行比针对特定应用的最新技术水平具有更好的性能。

### 5.1 传感器数据采集

我们将热感知 方法的性能与 FarmBeats [26]进行比较。FarmBeats 通过改变数据采集的占空比，努力将数据缺口降至最低。Vasisht 等 [26] 详细介绍了该系统的硬件规格。系统由两块功率均为 60W 的太阳能板供电。太阳能板连接到四块并联的 12V-44Ah 电池。处理组件为 Raspberry Pi 4B，空闲时功耗为 2.7W，最大功耗约为 7W。环境传感器通过 802.11b 路由器与基站连接；该路由器最大功耗为 20W，基础功率为 3W。为开展本案例研究，我们假设路由器功率与传感器数据采集速率之间存在线性关系。然而，如 FarmBeats 论文（图 6a）所示，电池没有外壳。在本案例研究中，我们为所使用的系统设计了一个外壳，并将其同时用于类似 FarmBeats 的方法和我们提出的热感知方法。本案例研究实质上比较了热无关的类似 FarmBeats 系统与热感知运行在数据采集方面的性能。前一种情况下，我们仅根据可用能量改变速率；后一种情况下，我们利用调度能耗效应来获得更好的性能。

图14展示了热感知和热无关的 FarmBeats 操作所达到的数据速率。两种方法的表现




(a) 工作速率 (c) 准确率

**图15：**与改进后的多出口联邦边缘学习（***ME-FEEL***）方法*[23]*进行性能比较。热感知运行通过在更高阶段退出，取得了优于***ME-FEEL***的表现，并获得了更高的训练准确率。

在春季气温适中、单日内温度没有显著变化时，两者的表现相近。然而，基站的热感知操作在夏季和冬季的表现优于FarmBeats。冬季的差异尤为显著，因为此时热效应明显。总体而言，我们的热感知方法比 FarmBeats 的热无关设计实现了高出 24% 的数据速率。

## 5.2 边缘联邦学习

此前已有大量研究探讨如何在资源受限边缘设备上利用联邦学习 [12, 23, 24]。这些方法旨在满足每台设备的能量可用性约束，以及将本地模型上传到参数服务器时的可用带宽约束，从而最大限度地提高训练后模型的准确率。然而，这些方法并未明确考虑，当设备暴露于各种极端环境时，这些受限资源可能会受到怎样的进一步影响。本案例研究表明，通过协同管理电能与热能，我们可以提升此类环境供能计算机系统的性能，具体体现在能效和工作速率两方面。

**应用设置**。本案例研究采用的基线是 Tang 等人提出的多退出联邦边缘学习（ME-FEEL）方法 [24], , 该方法使用经过修改的 ResNet18 [13] 深度学习模型，可在其七个层中的任意一层退出。Tang 等人 [24]对每个退出阶段的训练时间进行了分析，我们在仿真中采用了这些数据。我们的应用场景由多个周期性轮次组成，在每轮中，边缘设备训练其模型，并在规定的时间阈值内将结果上传到服务器。边缘设备根据自身的能量可用性选择退出阶段。退出阶段越高，完成的工作越多，反之亦然。由于两种情况下的能量消耗相同，工作速率越高，能效也越高。此外，由于系统根据可用能量选择退出阶段，因此在 100% 的轮次中均可用。我们评估了两种场景，在这两种场景中，应用都力求在较长时间内最大化工作速率和能效。

**优化工作速率**。 如 [24], 所示，退出阶段越高，准确率也越高，因此应用程序的目标是尽可能在最高阶段退出。为实现这一目标，应用程序必须优先考虑工作速率，而非系统可用性和能效。图 15 对比了 ME-FEEL 的非热感知方法与我们的热感知 方法的性能。热感知 方法在更高阶段退出的概率更高。

因此，采用热感知 模型进行训练可获得更高的准确率。然而，为了达到更高的退出阶段并提高工作速率，节点可能会耗尽能量，从而无法参与某些轮次。因此，尽管准确率较高，模型可能未能使用最新数据进行训练。我们的方法准确率达到 71%，而基线为 62%，提升了 14.5%。

## 6 相关工作

**能量采集传感器系统**。已有研究探讨如何设计环境供能系统，使其能够动态调整能耗以实现持续运行，研究对象主要是小型能量采集传感器系统 [14, 22, 27]。大多数相关研究都假设运行条件理想，例如温度为 20-25◦C，并忽略热效应。与我们的工作最接近的是 [20], , 该研究考察了环境温度和放电电流对电池能效的影响。然而，该研究忽略了我们工作中涉及的其他效应，例如隔热风扇效应和调度能耗效应。

**边缘人工智能**。 已有研究通过优化各种电源管理技术，提高边缘人工智能的边缘计算平台的能效 [12]。不过，这类研究与我们的工作正交，可以与我们的方法结合使用。

**可持续云**。 近期有研究探讨如何设计由可再生能源供能的可持续云，并配备电池储
age [3, 8, 9, 16, 21], , 其重点是调整工作负载以
匹配能源供应的变化，但忽略了热效应。
**数据中心冷却**。 关于大型
数据中心热量管理的既有研究，主要关注设施内部的热量传递以及避免出现热点。关于数据中心自然冷却的研究讨论了
环境温度对能效和工作负载的影响。
负载适应以优化冷却效率 [7, 10]。然而，数据
中心没有大型电池，其内部的热效应也
有限 [18]。此外，数据中心注重冷却；产生的热量
是一种必须散去的浪费。相比之下，环境
供电的计算机系统可以在寒冷天气中利用这些热量。
**能源建模**。 已有研究对热能进行建模
建筑物，例如 OpenStudio [11]。然而，它通常不会
对电池组件及其热效应进行建模。

## 7 结论

本文研究了环境供能计算系统，并指出，要有效地设计和运行这类系统，必须同时考虑其电能和热能。评估结果表明，与非最优设计相比，季节特定设计的能效最高可提升 35%，可用性也可提高 20%。最后，案例研究表明，这些系统的热感知运行可使精准农业应用的数据采集率提高 24%，使边缘联邦学习的模型准确率提高 14%，并使边缘端用于训练的数据量增加 41%。

## 致谢

我们感谢匿名的 e-Energy 审稿人提出的富有洞察力的评论和反馈。本研究得到美国国家科学基金会（NSF）资助项目 2230143、2107133、2105494、2213636、2211302、1908536、1925464、2211888、美国陆军合同 W911NF-17-2-0196 以及 CX-027429 的支持。

# 参考文献

[1] 2020。Jetson Nano 开发者套件。https://developer.nvidia.com/embedded/jetson- nano-developer-kit。[2] Joshua Adkins、Branden Ghena、Neal Jackson、Pat Pannuto、Samuel Rohrer、Brad- ford Campbell 和 Prabal Dutta。2018 年。用于城市规模感知的 Signpost 平台。载于 第 *17* 届 *ACM/IEEE* 传感器网络信息处理国际会议（*IPSN*）。[3] Anup Agarwal、Jinghan Sun、Shadi Noghabi、Srinivasan Iyengar、Anirudh Badam、Ranveer Chandra、Srinivasan Seshan 和 Shivkumar Kalyanaraman。2021 年。面向可再生能源重新设计数据中心。载于 第二十届 *ACM* 网络热点专题研讨会论文集（*HotNets*）。[4] Noman Bashir、Dong Chen、David Irwin 和 Prashant Shenoy。2019 年。Solar-TK：用于太阳能光伏性能建模和预测的数据驱动工具包。载于 *IEEE* 第 *16* 届移动自组织与传感器系统国际会议（*MASS*）。[5] Noman Bashir、Tian Guo、Mohammad Hajiesmaili、David Irwin、Prashant Shenoy、Ramesh Sitaraman、Abel Souza 和 Adam Wierman。2021 年。实现可持续云：能源系统虚拟化的案例。载于 *ACM* 云计算研讨会（*SoCC*）。[6] Claus Borgnakke 和 Richard E Sonntag。2022 年。热力学基础。John Wiley & Sons。[7] Hiroshi Endo、Hiroyoshi Kodama、Hiroyuki Fukuda、Toshio Sugimoto、Takashi Horie 和 Masao Kondo。2013 年。气候条件对直接新风集装箱式数据中心能耗的影响。载于 国际绿色计算会议论文集（*IGCC*）。[8] Inigo Goiri、Ryan Beauchea、Kien Le、Thu D. Nguyen、Md. E. Haque、Jordi Guitart、Jordi Torres 和 Ricardo Bianchini。2011 年。GreenSlot：绿色数据中心的能源消耗调度。载于 *ACM/IEEE* 高性能计算、网络、存储与分析国际会议（*SC*）。[9] Inigo Goiri、William Katsak、Kien Le、Thu D. Nguyen 和 Ricardo Bianchini。2013 年。Parasol 和 GreenSwitch：可再生能源供电数据中心管理。载于 *ACM* 编程语言与操作系统体系结构支持会议（*ASPLOS*）。[10] Inigo Goiri、Thu D. Nguyen 和 Ricardo Bianchini。2015 年。CoolAir：面向温度和变化感知的自然冷却数据中心管理。载于 *ACM* 编程语言与操作系统体系结构支持会议（*ASPLOS*）。[11] Rob Guglielmetti、Dan Macumber 和 Nicholas Long。2011 年。*OpenStudio*：开源集成分析平台。技术报告。美国国家可再生能源实验室（NREL）。[12] Hongpeng Guo、Haotian Gu、Zhe Yang、Xiaoyang Wang、Eun Kyung Lee、Nand- hini Chandramoorthy、Tamar Eilam 和 Deming Chen、Klara Nahrstedt。2022 年。BoFL：面向能源高效联邦学习的贝叶斯优化的本地训练节奏控制。载于 第 *23* 届 *ACM/IFIP* 国际中间件会议论文集（*Middleware*）。[13] Kaiming He、Xiangyu Zhang、Shaoqing Ren 和 Jian Sun。2016 年。用于图像识别的深度残差学习。载于 *IEEE* 计算机会议论文集视觉与模式识别 *(CVPR)*。[14] XiaofanJiang、JosephPolastre 和 David Culler。2005 年。永久环境供电传感器网络。载于 第四届国际传感器网络信息处理研讨会 *(IPSN)*。[15] Zerina Kapetanovic、Deepak Vasisht、Jongho Won、Ranveer Chandra 和 Mark Kimball。2017 年。部署全天候农场网络的经验。*GetMobile*：移动计算与通信 21，2（2017）。[16] William Katsak、Inigo Goiri、Ricardo Bianchini 和 Thu Nguyen。2015 年。绿色 Cassandra：在分布式结构化存储系统中使用可再生能源。载于 绿色与可持续计算国际会议 *(IGSC)*。[17] Ákos Lakatos 和 Ferenc Kalmár。2013 年。膨胀聚苯乙烯隔热材料的热导率对厚度和密度的依赖性研究。材料与结构 （2013）。[18] Justin D Moore、Jeffrey S Chase、Parthasarathy Ranganathan 和 Ratnesh K Sharma。2005 年。让调度"冷静下来"：数据中心中温度感知的工作负载放置。载于 *USENIX*年度技术会议 *(ATC)*。[19] Michael J Moran、Howard N Shapiro、Daisie D Boettner 和 Margaret B Bailey。2010 年。工程热力学基础。John Wiley & Sons。[20] Chulsung Park、Kanishka Lahiri 和 Anand Raghunathan。2005 年。无线传感器节点的电池放电特性：实验分析。载于第二届 *IEEE* 通信学会传感器与自组织通信和网络会议 *(SECON)*。[21] Navin Sharma、Sean Barker、David Irwin 和 Prashant Shenoy。2011 年。Blink：利用间歇性电力管理服务器集群。载于 *ACM* 编程语言与操作系统体系结构支持会议 *(ASPLOS)*。[22] Navin Sharma、Jeremy Gummeson、David Irwin 和 Prashant Shenoy。2010 年。云状计算：在能量采集传感器系统中利用天气预报。载于 *IEEE* 通信学会传感器、网状网络与自组织通信和网络年会 *(SECON)*。[23] Shunpu Tang、Lunyuan Chen、Ke HeJunjuan Xia、Lisheng Fan 和 Arumugam Nallanathan。2021 年。面向下一代边缘赋能工业物联网的计算智能与深度学习。*arXiv* 预印本 *arXiv:2110.14937*（2021）。[24] Shunpu Tang、Wenqi Zhou、Lunyuan Chen、Lijia Lai、Junjuan Xia 和 Liseng Fan。2021 年。面向 B5G/6G 网络的无人机赋能物联网电池受限联邦边缘学习。*Physical Communication*（2021）。[25] Engineering ToolBox。2003 年。空气——热物性。检索于 2022 年 10 月 11 日，网址：https://www.engineeringtoolbox.com/air-properties-d_156.html [26] Deepak Vasisht、Zerina Kapetanovic、Jong-ho Won、Xinxin Jin、Ranveer Chandra、Ashish Kapoor、Sudipta N Sinha、Madhusudhan Sudarshan 和 Sean Stratman。2017 年。FarmBeats：面向数据驱动农业的物联网平台。载于 *USENIX*网络系统设计与实现会议 *(NSDI)*。[27] Christopher M Vigorito、Deepak Ganesan 和 Andrew G Barto。2007 年。能量采集无线传感器网络中的占空比循环自适应控制。载于 *IEEE* 通信学会传感器与自组织通信和网络年会 *(SECON)*。[28] XANTREX。访问于 2022 年 8 月。XANTREX 锂离子电池数据手册。https://www.xantrex.com/documents/lithium/。