

# COPPER: 具有存内计算架构的组合优化问题求解器

汪乾坤<sup>1</sup>, 李星辰<sup>2,3</sup>, 吴秉哲<sup>4</sup>, 杨可<sup>3</sup>, 胡炜<sup>5</sup>, 孙广宇<sup>3,6,7</sup>, 杨玉超<sup>3</sup>

<sup>1</sup>北京大学软件与微电子学院, 中国北京市, 100871

<sup>2</sup>北京大学计算机学院, 中国北京市, 100871

<sup>3</sup>北京大学集成电路学院, 中国北京市, 100871

<sup>4</sup>腾讯人工智能实验室, 中国深圳市, 518057

<sup>5</sup>福州大学物理与信息工程学院, 中国福州市, 350116

<sup>6</sup>北京集成电路高精尖创新中心, 中国北京市, 100871

<sup>7</sup>北京智源人工智能研究院, 中国北京市, 100080

**摘要:** 组合优化问题 (combinatorial optimization problem, COP) 是一类在离散空间中寻找最优解的数学问题, 具有广泛的应用。然而, 许多组合优化问题是NP完全的, 随着问题规模的增加, 解决问题所需的时间急剧增加, 这促使研究人员寻求更快速的解决方法, 即使解不一定是最优的, 如近似算法、启发式算法和机器学习算法等。一些先前的工作基于Hopfield神经网络提出了混沌模拟退火 (chaotic simulated annealing, CSA), 并取得了良好的表现。然而, CSA的计算模式对当前的通用处理器并不友好, 且没有专用的计算硬件。为了高效地执行CSA, 我们提出一种软硬件联合的设计方案。在软件方面, 我们使用适当的位宽对权重和输出进行量化, 并修改那些不适合硬件实现的计算模式。在硬件方面, 我们设计了一种基于忆阻器的专用存内计算硬件架构COPPER。COPPER能够高效地运行修改后的量化CSA算法, 并支持流水线以获得进一步加速。结果表明, COPPER在执行CSA算法时, 速度和能耗方面都十分出色。

**关键词:** 组合优化问题; 混沌模拟退火; 存内计算

<https://doi.org/10.1631/FITEE.2200463>