

基于单调指标空间的分布式信息处理系统论证

牛艺燕¹, 胡剑文^{2*}

¹重庆师范大学数学科学学院 重庆

²四川工商学院数字经济与管理学院 四川眉山

【摘要】针对分布式信息处理系统在费用与效率综合评估中的复杂性,提出一种基于单调指标空间的探索性评估方法。该方法通过系统建模与精确测量,量化主机、网络及分布处理机的费用(C)与延迟(T)属性,构建涵盖 27 种可能配置的技术方案空间;创新性地融合多维二分探索算法与支持向量机,实现目标集边界的高精度拟合,并建立多层关系映射模型以揭示属性与评估准则的内在联系。基于蒙特卡洛模拟,对各方案的费用与延迟分布进行全面评估,最终筛选出 3 个符合目标要求的候选方案,其中方案 111 与 121 在目标集内的样本占比均超过 70%,表现出显著的性能-成本优势。研究结果表明,该方法能够有效支撑复杂分布式系统的技术选型、体系优化与决策制定,为相关领域提供可验证的理论框架与评估工具。

【关键词】单调指标空间;分布式信息处理体系;多维二分探索算法;支持向量机;蒙特卡洛

【收稿日期】2025 年 5 月 17 日

【出刊日期】2025 年 6 月 10 日

【DOI】10.12208/j.aics.20250047

Argumentation of the distributed information processing system based on the monotonic indicator space

Yiyan Niu¹, Jianwen Hu^{2*}

¹School of Mathematical Sciences, Chongqing Normal University, Chongqing

²School of Digital Economy and Management, Sichuan Technology and Business University, Meishan, Sichuan

【Abstract】 An exploratory evaluation method based on the monotonic indicator space is proposed to assess the cost (C) and delay (T) of distributed information processing systems. The C and T characteristics of the mainframe, communication network, and distributed processors are quantified to construct a solution space of 27 configurations. A multi-dimensional binary search algorithm combined with support vector machines enables high-precision fitting of the target set boundary, supported by a multi-layer relational mapping model. Monte Carlo simulation is used to evaluate each configuration, identifying three candidate schemes, among which schemes 111 and 121 achieve over 70% coverage within the target set and exhibit clear performance–cost advantages. The method provides an effective framework for technology selection, system optimization, and decision-making in complex distributed systems.

【Keywords】 Monotonic indicator space; Distributed information processing system; Multi-dimensional binary search algorithm; Support vector machine; Monte Carlo

1 问题背景与体系论证框架

分布式信息处理系统在军事、金融和云计算等领域应用广泛^[1-8],但性能评估常受复杂性与不确定性影响。本文以抽象案例为例,用单调指标空间^[6-8]刻画方案间关系,并对系统进行评估,为实际应用提供理论支撑。

信息处理系统(图 1)结构由三部分组成:主机(大型计算机)、网络通信系统(高速局域网)和分布处理

机(高性能微型计算机)。假设信息源批量向主机发送数据,经主机预处理后通过网络传输至各分布处理机进一步处理。设信息长度为 L ,主机处理速度为 v_1 ,延

迟为 $t_1 = \frac{L}{v_1}$;网络传输速率为 v_2 ,延迟为 $t_2 = \frac{L}{v_2}$;分

布处理机速率为 v_3 ,延迟为 $t_3 = \frac{L}{v_3}$ 。(各分机速率相

作者简介:牛艺燕(2001-)女,四川省达州市,汉,硕士生,主要从事决策分析理论与优化研究;

*通讯作者:胡剑文(1975-)男,江西省景德镇市,汉,博士,教授,主要从事决策分析理论研究。

同)。

三类设备的速率相互独立, 且均为单调正向指标。每类设备设三档速率与费用区间(表1)。三类设备组合可形成 27 种系统方案, 以“主机—网络—分机”三位码表示(如 123 表示主机 1 档、网络 2 档、分机 3 档)。本文选取方案 111、121、223、333 作为测试对象, 在其中筛选符合目标需求的方案。

评估目标是在满足性能要求的前提下实现高性价比。

比。评价准则为系统总延迟 T 与总费用 C , 其中 T 指信息处理完成所需的总时间, C 包括主机、网络及分布处理机的硬件和软件成本。

在属性-准则映射中, 通过仿真与回归分析建立设备速率与总延迟的函数关系, 并解析总延迟的计算式。方案空间由三类设备三档速率与费用区间组合, 各方案经计算与评估后, 按准则与目标符合程度进行筛选, 其体系论证框架如图 2 所示。

表 1 各类设备速率与费用区间

设备	档位	速率区间	费用区间
主机	1	(0.25, 1.25)	(1, 2)
	2	(0.63, 1.63)	(4, 5)
	3	(1.16, 2.16)	(11, 12)
网络系统	1	(0.23, 1.23)	(0.5, 1.5)
	2	(0.65, 1.65)	(2, 3)
	3	(1.14, 2.14)	(5.5, 6.5)
分布处理机	1	(0.26, 1.26)	(0.2, 1.2)
	2	(0.62, 1.62)	(0.4, 1.4)
	3	(1.13, 2.13)	(0.6, 1.6)

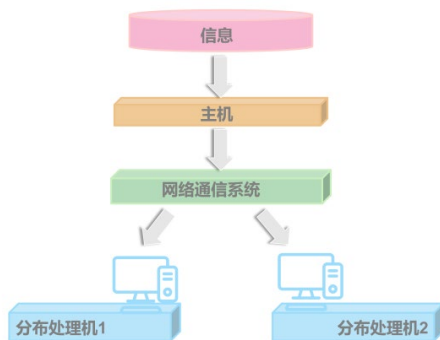


图 1 抽象分布式信息处理体系

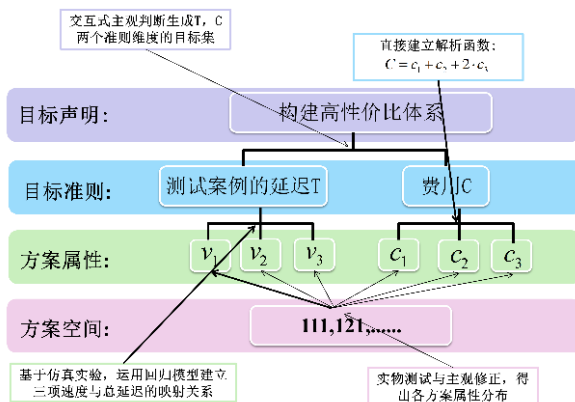


图 2 评估论证框架结构流程图

2 建立各层的映射关系模型

2.1 建立目标声明与目标准则的关系

在二维准则空间中, 依据指标单调性, 将搜索区域分为三类(图3): 紫色为最大等分内接超盒(全部可行)、绿色为对角超盒(全部不可行)、蓝色为最小外包超盒(包含全部可行解的最小矩形)。

为筛选低延迟、低费用方案, 采用多维二分探索算法^[8]递归逼近目标集。该方法先构造外包超盒, 逐维确定上确界并缩放得到内接超盒, 判定区域可行性; 对部分可行区域继续二分, 直至满足精度阈值。

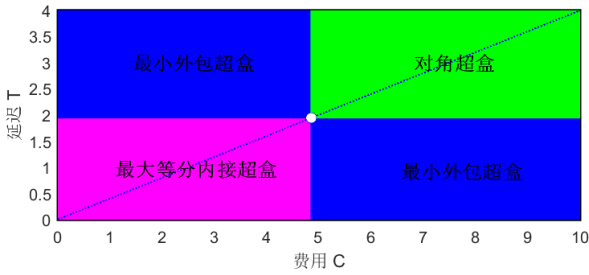


图3 各类超盒

在二分过程中, 获取可行点(正样本)与不可行点(负样本)对(图4)。将这些点对作为支撑向量, 再通过SVM核函数进行高维映射, 将非线性边界转化为线性可分问题, 实现精确拟合, 得到目标集曲线(图5)。

2.2 方案速度 v_1, v_2, v_3 与延迟 T 的关系

方案属性与目标准则的关系映射 f_2 , 应基于仿真实验的手段获取。另外, 对于体系总费用的计算直接使用 $C = c_1 + c_2 + 2c_3$ 。接下来主要探究方案速度属性与延迟的映射关系。

本文引用仿真实验^[4-15]来获得 f_2 , 首先进行仿真实验生成实验数据, 再基于实验数据, 运用回归方法得出总延迟时间的回归方程, 实现 v_1, v_2, v_3 与延迟 T 的映射关系, 从而获得 f_2 。总延迟时间 T 的回归方程如下:

$$\begin{aligned} T = & 1.71767 - 1.38797 \times v_1 - 1.38788 \times v_2 \\ & - 0.185381 \times v_3 + 0.947729 \times v_1^2 \\ & + 0.947596 \times v_2^2 + 0.198696 \times v_3^2 \\ & - 0.474248 \times v_1 \times v_2 - 0.11735 \times v_1 \times v_3 \\ & - 0.117314 \times v_2 \times v_3 \end{aligned}$$

该模型对总延迟时间的解释率 (R^2) 为 90%, 可以有效反映 T 与 v_1, v_2, v_3 的关系。

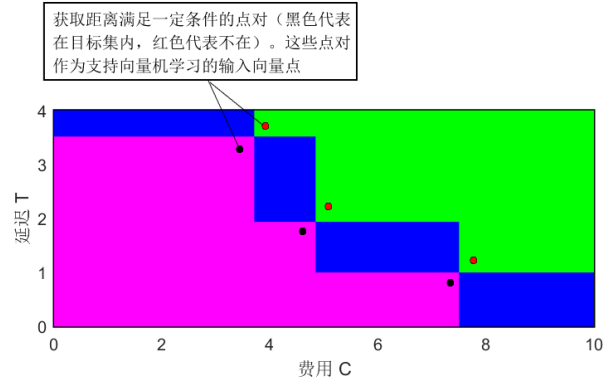


图4 获取支撑向量的示意图

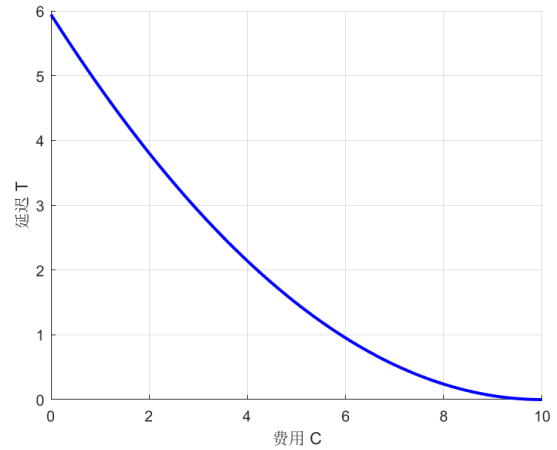


图5 费用与延迟两准则的目标集

3 体系技术方案的评估与论证结论

将各方案的属性值分别代入延迟回归模型与费用计算模型, 并利用蒙特卡洛模拟法进行随机点采样, 获得各方案的延迟与费用范围如下:

111: $T \in [0.134823, 1.126835]$, $C \in [1.917400, 5.875206]$

121: $T \in [0.134808, 1.417425]$, $C \in [3.425201, 7.379590]$

223: $T \in [0.135022, 0.930994]$, $C \in [7.214790, 11.180817]$

333: $T \in [0.144541, 1.779193]$, $C \in [17.718077, 21.689191]$

在此基础上, 进一步在各方案的延迟-费用矩形区域内随机生成样本点, 依据拟合得到的目标集边界曲线判断其可行性, 并计算落入目标集的比例。

图6展示了四种方案在目标集中的属性分布: 蓝色虚线框表示方案111的范围, 红色表示方案121, 青色表示方案223, 紫色表示方案333。结果表明, 方案

111、121 与 223 为备选方案, 其中方案 111 与 121 在目标集内的样本比例分别超过 70%, 可视为优选方案, 见表 2。

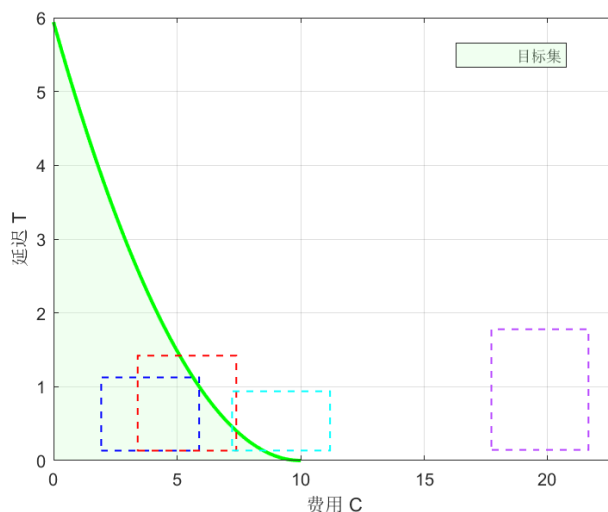


图 6 测试方案相对于目标集的属性值占比范围

表 2 测试方案范围矩形落在目标集的概率

方案	111	121	223	333
概率	0.9961	0.7519	0.0595	0.0000

4 结语

本文提出的基于单调指标空间的探索性评估方法, 能够有效筛选出高性价比的分布式信息处理系统方案。通过多维二分探索算法和支持向量机的结合, 实现了复杂系统的高效评估。该方法不仅适用于抽象案例, 还可推广到实际的分布式系统设计中。

参考文献

- [1] TANENBAUM A S, VAN STEEN M. Distributed Systems: Principles and Paradigms[M]. 2nd ed. Upper Saddle River:Prentice Hall, 2007.
- [2] 秦映, 卢强, 黄士坦. 基于云理论和信息融合理论的系统性能评估方法研究[J]. 计算机工程与科学, 2012, 34(2): 33-38.
- [3] 吴岳. 一种优化的 Hadoop 数据放置策略[J]. 软件工程, 2023, 26(7): 44-47.
- [4] SHAKHOVSKA N, BOYKO N, ZASOBA Y, et al. Big Data Processing Technologies in Distributed Information Systems[J]. Procedia Computer Science, 2019, 160: 561-566.
- [5] 刘陶, 胡剑文. 基于单调指标空间方法的分布式信息处理系统指标分析与设计[J]. 计算机应用与软件, 2008, 25(2):184-185.
- [6] 王娜, 张健, 王晋东, 等. 单调指标空间在信息系统风险评估中的应用研究[J]. 计算机工程与科学, 2015, 37(3): 486-491.
- [7] HU J, HU X, ZHANG W, et al. Monotonic Indices Space Method and Its Application in the Capability Indices Effectiveness Analysis of a Notional Antistealth Information System[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2009, 39(2): 404-413.
- [8] 胡剑文. 探索性评估论证方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2020: 58-65.
- [9] 李凯, 王志刚. 支持向量机及其核函数理论的应用研究[J]. 计算机应用与软件, 2019, 36(7): 98-104.
- [10] 刘方园, 王水花, 张煜东. 支持向量机模型与应用综述[J]. 计算机系统应用, 2018, 27(4): 1-9.
- [11] CORTES C, VAPNIK V. Support-vector networks[J]. Machine Learning, 1995, 20(3): 273-297.

- [12] SCHÖLKOPF B, SMOLA A J. Learning with Kernels: Support Vector Machines, Regularization, Optimization, and Beyond[M]. Cambridge: MIT Press, 2002.
- [13] 杨峰, 李群, 王维平, 等. 基于仿真的探索性评估方法论[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(11): 1561-1564.
- [14] 胡剑文. 作战仿真实验理论、平台与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.
- [15] 曾畅, 方强, 吴军, 等. 蒙特卡洛模拟法在复杂系统可靠性仿真中的应用研究[J]. 四川兵工学报, 2015, 36(9): 65-68.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心 (OAJRC) 所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS