

doi: 10.16104/j.issn.1673-1891.2025.03.011

基于自适应黏性粒子群算法的最优 Web 服务选择方法

陈 钊

(安徽职业技术大学教务处,安徽 合肥 230011)

摘要:为有效应对动态、多变的 Web 服务环境,提升服务质量,研究基于自适应黏性粒子群算法的最优 Web 服务选择方法。选取 6 个量化指标建立评估体系,利用序关系分析法量化指标权重,通过权重与指标量化值计算 Web 服务质量,为最优服务方案的求取提供优化方向;引入自适应机制和黏性策略,增强粒子群算法的自适应性和全局搜索能力;以 Web 服务服务质量作为评估 Web 服务组合方案优劣的适用度函数值,通过自适应黏性粒子群算法的迭代寻优,找到最优 Web 服务组合方案。结果表明,本文方法面对静态场景时,Web 服务组合方案的服务质量保持在 0.9 以上,得到的 Web 服务组合方案平均精确率、召回率及 F1 分数分别达到 92.5%、91.3% 和 91.9;面对动态场景时,服务质量保持在 0.8 以上,上述 3 个指标分别为 88.7%、87.6% 和 88.1,具有出色的适应性和稳定性。因此,本文方法能够在不同环境下提供高质量的 Web 服务组合方案。

关键词:自适应黏性粒子群算法;最优 Web 服务;评估体系;指标权重

中图分类号:TP393.03 文献标志码:A 文章编号:1673-1891(2025)03-0092-11

Optimal Web Service Selection Method Based on Adaptive Sticky Particle Swarm Optimization Algorithm

CHEN Zhao

(Academic Affairs Office, Anhui University of Applied Technology, Hefei 230011, Anhui, China)

Abstract:To effectively cope with the dynamic and ever-changing web service environment and improve service quality, the optimal web service selection method was studied based on adaptive sticky particle swarm algorithm. An evaluation system was established based on six quantitative indicators and the ordinal relationship analysis method was used to quantify the weights of the indicators. The quality of web services was calculated by combining the weights with the quantified values of the indicators, providing optimization directions for obtaining the optimal service solution. Adaptive mechanisms and viscosity strategies were introduced to enhance the adaptability and global search capability of particle swarm optimization algorithm. Web service quality was used as the fitness function value to evaluate the quality of web service composition solutions and the optimal web service composition solution was found through iterative optimization using adaptive viscous particle swarm algorithm. The results showed that when facing static scenarios, the service quality of the web service composition scheme obtained by the research method remained above 0.9. The average accuracy, recall rate, and F1 score of the web service composition scheme obtained by the research method reached 92.5%, 91.3%, and 91.9 respectively. When facing dynamic scenarios, the service quality remained above 0.8, with the above indicators being 88.7%, 87.6%, and 88.1 respectively, demonstrating excellent adaptability and stability. Therefore, the research method can

收稿日期:2025-06-09

基金项目:2023 年安徽省质量工程项目(2023hxxk020);2024 年度安徽省自然科学基金项目(2024AH050902)。

作者简介:陈钊(1984—),男,安徽肥东人,高级实验师,硕士,主要研究方向为人工智能算法。E-mail:chenzhao@uta.edu.cn。

provide high-quality web service composition solutions in different environments.

Keywords:adaptive viscous particle swarm algorithm; optimal web service; evaluation system; indicator weight

0 引言

在信息化发展的时代,计算机网络被广泛应用在各行各业当中,因此每时每刻都有大量的用户涌入网络当中,申请处理各种业务。在此背景下,互联网上的Web服务呈爆发式增长态势。作为分布式计算的关键构成元素,Web服务的主要功能在于向用户供给具备高度灵活性与可扩展性的计算资源以及相关服务^[1]。然而,面对大量用户的请求,如何在众多服务中高效选择出最优的Web组合成为学术界与工业界的研究热点。

针对上述热点问题,学者提出了多种改进方案。Latifi等^[2]在生成初始服务排名的基础上,通过马尔可夫链分析和跟踪用户反馈的变化,对最终排名进行完善。马尔可夫链的转移概率矩阵需要基于历史数据进行估计,因此在面对快速变化的用户需求和市场环境时,如果历史数据与现实情况存在偏差,会导致转移概率的估计不准确,从而影响选择结果的可靠性。彭高贤等^[3]以感知的能耗目标,通过遗传算法自然选择过程(选择、交叉、变异),在组合空间中搜索服务选择的最佳方案。遗传算法的性能与参数设置之间存在紧密的线性关系,因此不合理的参数设置会导致算法性能不佳。杨珍等^[4]借鉴了生物免疫系统的自适应性和多样性机制,通过模拟免疫系统的克隆选择、抗原识别等过程,实现服务选择的优化。结合定向采样和自适应选择,虽然一定程度上避免了早熟收敛,但是该方法在面对快速变化的动态环境时,算法参数的调整有时可能存在滞后,难以确保算法的稳定输出。谢燕瑜等^[5]以最小化任务时延和任务能耗为目标函数,通过RSA-TU算法求解,得出最佳方案。当问题规模扩大或场景变化时,RSA-TU算法无法保持原有的求解效率和质量,甚至可能无法找到可行解。

Web服务场景常常是高速动态变化的,传统的粒子群算法在解决最优Web服务选择问题时,容易因为粒子之间的信息交互导致群体趋同,从而陷入局部最优解而无法跳出,这意味着可能无法找到全局最优的服务组合方案。针对上述问题,本文通过引入自适应机制和黏性策略,以增强粒子群算法对Web服务选择问题的适应性和鲁棒性,利用自适应黏性粒子群算法进行最优Web服务选择。

1 最优Web服务选择研究

基于自适应黏性粒子群算法的最优Web服务选择方法,旨在通过改进粒子群行为机制,提升算法的全局搜索能力对动态环境的适应性,从大量的选择方案中迭代搜索最佳方案,具体研究过程如图1所示。

基于图1所述流程,将研究划分为2部分:一是Web服务质量评估模型构建,用于评估粒子群算法

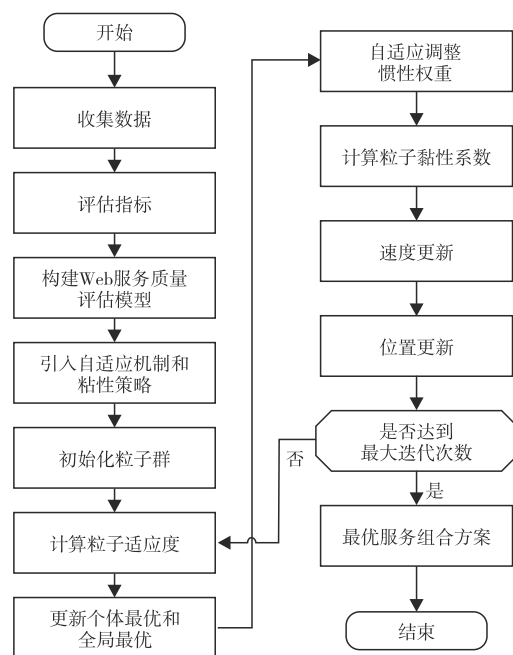


图1 最优Web服务选择方法研究流程

每个解的优劣;二是在传统粒子群算法中引入自适应机制和黏性策略,利用改进后的粒子群算法选取

最优 Web 服务组合方案。

1.1 Web 服务质量评估模型构建

Web 服务质量评估模型是后续自适应黏性粒子群算法 (adaptive sticky particle swarm optimization, ASPSO) 的核心输入与反馈机制,其作用包括以下 2 点:一是通过该模型可以将 Web 服务质量量化为具体数值,为 ASPSO 的解的求取提供明确的优化方向;二是通过对 Web 服务质量的评估,为方案的自适应调整提供依据^[6]。建立 Web 服务质量的评估体系^[7],该体系由 $a_1 \sim a_6$ 共 6 个度量指标组成,计算公式如式(1)所示。

$$\left\{ \begin{aligned} a_1 &= b_1 + b_2 \\ a_2 &= \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} \\ a_3 &= \frac{\sum_{i=1}^n c_i}{n} \\ a_4 &= \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \\ a_5 &= \frac{T_1}{T} \\ a_6 &= \frac{n_1}{n} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式中: a_1 为执行费用,即 Web 服务执行过程中所需的成本; a_2 为平均执行时间,即 Web 服务处理请求所需的时间; t_i 为用户调用一次 Web 服务从请求到收到返回信息所需要消耗的时间; n 为调用 Web 服务的次数; b_1, b_2 分别为软件费用、计时费用; c_i 为用户调用一次 Web 服务的吞吐量; a_3 为平均吞吐量,即 Web 服务在单位时间内处理的请求数量; a_4 为用户服务所有评价的平均值,即 Web 服务提供者的可信度和声誉,反映其服务质量和用户满意度; d_i 为用户对第 i 次 Web 服务作出的评价分数; a_5 为可靠性,即 Web 服务在长时间运行中保持正常工作的能力; T_1 为 Web 服务的正常工作时间; T 为观察 Web 服务的总时间; a_6 为可用性,即 Web 服务在给定时间内可访问和使用的程度; n_1 为一段时间内,Web 服务能

被调用的次数。

为了将这些量化指标综合起来,采用序关系分析法(sequential relation analysis method, G1 法)计算这 6 个量化指标的权重^[8]。首先对相邻的两两指标之间的相对重要程度进行比较并赋值:

指标 a_i 比 a_j 稍微重要—— $g_k=0.2$;

指标 a_i 比 a_j 明显重要—— $g_k=0.4$;

指标 a_i 比 a_j 强烈重要—— $g_k=0.6$;

指标 a_i 比 a_j 极端重要—— $g_k=0.8$;

指标 a_i 和 a_j 同样重要—— $g_k=1.0$;

假设重要程度 g_i 等于连接 2 个相邻指标的权重比值,即

$$g_i = \frac{w_{i-1}}{w_i} \quad (2)$$

式中: w_{i-1}, w_i 分别为第 $i-1$ 、第 i 个指标的权重。

Web 服务质量的评估体系中共有 6 个指标,将这些指标的 g_i 进行降序排序,得到 g_1, g_2, \dots, g_6 。基于式(2)的比值 g_i , 逆向推导出最小权重,如式(3)所示。

$$w_6 = \left(1 + \sum_{i=2}^6 \sum_{j=i}^6 g_i \right)^{-1} \quad (3)$$

式中: w_6 为最小 g_6 对应指标的权重。

基于式(3)计算出来的 w_6 和式(2)的 g_i , 从后向前递推算其他剩余指标的权重^[9], 计算公式如式(4)所示。

$$\left\{ \begin{aligned} w_5 &= w_6 \times g_6 \\ w_4 &= w_5 \times g_5 \\ \dots & \\ w_1 &= w_2 \times w_2 \end{aligned} \right. \quad (4)$$

式中: w_1, w_2, \dots, w_5 为其他指标权重。

基于 w_1, w_2, \dots, w_6 和指标量化值构建 Web 服务质量评估模型,如式(5)所示。

$$F = \sum_{i=1}^6 w_i \cdot \left(\frac{1}{1 + e^{-a_i}} \right) \quad (5)$$

式中: F 为 Web 服务质量。

将计算出来的 Web 服务质量,用于评估自适应黏性粒子群算法中粒子位置的适应度,为 Web 服务

组合方案的优化提供依据。

1.2 自适应黏性粒子群算法选取最优Web服务组合

面对Web服务数量激增的趋势,如何选择出最优组合,是提高服务效率的关键^[10-12]。在1.1研究的基础上,利用自适应黏性粒子群算法进行迭代搜寻。自适应黏性粒子群算法是传统粒子群算法的改进,传统算法在面对复杂多变的Web服务选择问题时,很容易陷入局部最优解而无法跳出问题,导致选出的方案无法达到最优^[13]。针对这种缺陷,引入了自适应机制和黏性策略,以增强算法对Web服务选择问题的适应性和鲁棒性。自适应机制能够确保算法在不同环境下也能一直保持全局搜寻能力;而黏性策略则通过引入“黏性”概念,使得粒子在搜索过程中能够更好地保持对优质解的跟踪和记忆,从而提高算法性能。

1) 自适应调整惯性权重,其计算如式(6)所示。

$$w(k) = w_{\max} - \frac{k(w_{\max} - w_{\min})}{K} \quad (6)$$

式中: $w(k)$ 为动态调整的惯性权重,用于平衡粒子群算法中全局探索与局部开发的能力; w_{\max} 、 w_{\min} 分别为惯性权重的最大值与最小值; k 为迭代次数; K 为最大迭代次数。

式(6)通过线性递减策略调整惯性权重,使算法在初始阶段具有较大的全局搜索能力,而在后期更注重局部精细优化。然而,线性调整可能无法充分适应复杂优化问题的动态特性,因此,本文将参考自适应梯度多目标粒子群优化中的非线性调整策略,引入种群多样性反馈机制,使惯性权重能够根据搜索进程动态优化调整。

2) 粒子黏性系数,其计算如式(7)所示。

$$\mu_i(k) = \mu_{\min} + (\mu_{\max} - \mu_{\min}) \frac{M_i(k)}{M_{\max}} \quad (7)$$

式中: $\mu(k)$ 为粒子黏性系数,用于模拟粒子在运动过程中因信息交互而产生的“阻力”,其物理意义可类比流体动力学中的黏性力; $M_i(k)$ 、 M_{\max} 分别为当前种群多样性(粒子间平均汉明距离)及最大值;

μ_{\min} 、 μ_{\max} 分别为粒子黏性系数的最小值和最大值。具体而言,当种群多样性较高时(粒子分布分散),黏性系数增大以增强信息共享,促进群体协作;当多样性较低时(粒子趋于聚集),黏性系数减小以降低交互阻力,避免早熟收敛。

式(7)的数学形式构建时参考了流体动力学中的黏性模型,通过非线性映射将多样性指标转化为黏性阻力。例如,在最优Web服务组合动态优化问题中,若粒子间平均汉明距离接近 M_{\max} ,则 $\mu(k)$ 趋近于 μ_{\max} ,此时算法更注重全局探索;反之,则趋近于 μ_{\min} ,强化局部开发能力。

利用自适应黏性粒子群算法选取最优Web服务组合方案的具体过程如下。

步骤1:随机生成 N 个粒子,每个粒子的位置向量表示一个初始的Web服务组合方案。

步骤2:将每个粒子的位置 x_i 编码^[14-15]为一个服务组合路径 $x_i = [s_{ij} | i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m]$,式中的 s_{ij} 为任务 i 选择的第 j 个Web服务编号。

步骤3:利用1.1构建Web服务质量评估模型式(5),评估每个粒子的位置(Web服务组合方案) x_i 应用下的Web服务质量,将其记为适应度值 $F(x_i)$ 。

步骤4:选出 $F(x_i)$ 最大值对应的最优个体 x_b 。若 x_b 优于历史最优,则更新个体最优 \tilde{x}_b 。同时,比较所有粒子的适应度值^[16],找到全局最优位置 \tilde{x}_p 。

步骤5:速度与位置更新^[17],分别如式(8)和式(9)所示。

$$u_i(k+1) = \varpi(k)u_i(k)\mu(k) + q_1r_1\left(\tilde{x}_b - x_i(k)\right) + q_2r_2\left(\tilde{x}_p - x_i(k)\right) \quad (8)$$

式中: $\varpi(k)$ 、 $u_i(k+1)$ 为更新前后粒子速度; q_1 、 q_2 为学习因子; r_1 、 r_2 为 $[0,1]$ 之间均匀分布的随机数。

$$x_i(k+1) = x_i(k) + u_i(k+1) \quad (9)$$

式中: $x_i(k)$ 、 $x_i(k+1)$ 为更新前后的粒子位置。

步骤6:重复步骤1~5,直至 $k = K$ 结束。全局最

最优解的粒子位置向量对应于最优服务组合方案^[18-20]。

经过上述 2 个步骤,完成基于自适应黏性粒子群算法的最优 Web 服务选择方法研究。

2 实验测试

通过基于云计算的分布式实验平台 AWS 模拟自适应黏性粒子群算法在各组测试用例下的 Web 服务选择情况并与基于遗传算法的方法^[3]、基于免疫算法的方法^[4]及基于 RSA-TU 算法的方法^[5]进行比较和分析。

2.1 实验环境

实验环境设置如表 1 所示。

表 1 实验环境设置

环境	名称	参数
软件环境	操作系统	Ubuntu 20.04 LTS
	编程语言	Python 3.8
	算法编程工具	Matlab 7
	开发框架	Flask 2.0.1
	算法库	NumPy 1.21.2, SciPy 1.7.1
	HTTP 客户端	requests 2.26.0
	可视化工具	Matplotlib 3.4.3, Seaborn 0.11.2
硬件环境	数据库	SQLite 3.36.0
	服务器	Dell PowerEdge R740
	存储设备	500GB SSD + 2TB HDD
	网络设备	千兆以太网交换机
	其他设备	键盘、鼠标、显示器

2.2 场景设置

场景设置的主要目标是模拟不同的 Web 服务组合优化场景,以全面评估自适应黏性粒子群算法在 Web 服务选择方面的搜索性能。

场景 1:在静态环境中,模拟了一个相对稳定且可预测的 Web 服务选择场景,即服务器的性能参数

和任务的 QoS 需求在整个实验过程中保持不变,以模拟一个稳定的服务环境。此场景下,设置 3 个并行任务,代表需要同时处理的 Web 服务请求数量;候选服务器的数量则从 5 台逐步扩展至 500 台,以模拟从小规模到大规模的服务集群环境。

场景 2:在动态环境中,模拟了一个更加复杂且多变的 Web 服务选择场景。动态环境具有更高的不确定性和复杂性,要求 ASPSO 算法能够适应服务器性能参数和任务 QoS 需求的动态变化,实时调整 Web 服务组合方案。在此场景下,任务量增加到 5 个;候选服务器的数量同样从 0 增加到 500 个。其难点在于服务器性能的时变性会导致历史最优解失效,任务需求的不确定性需算法平衡探索与开发能力,且大规模候选服务集加剧了实时决策的复杂度。

2.3 参数设置

1)设置自适应黏性粒子群算法参数。粒子数量为 0~500,迭代次数为 200,惯性权重动态取值范围为 $[0.4, 0.9]$,学习因子为 0.2 和 0.4,随机数为 0.5 和 0.6。

2)Web 服务质量的评估体系的 6 个度量指标权重计算结果如式(10)所示。

$$\begin{cases} w(a_1) = 0.850 \\ w(a_2) = 0.783 \\ w(a_3) = 0.721 \\ w(a_4) = 0.645 \\ w(a_5) = 0.795 \\ w(a_6) = 0.422 \end{cases} \quad (10)$$

2.4 Web 服务选择方案

利用自适应黏性粒子群算法选择上述 2 种场景下的 Web 服务组合方案,选择结果如表 2 所示。

从表 2 中可以看出,随着候选服务数量的增加,无论是场景 1 还是场景 2,所选择的服务数量也相应增多。在场景 1 中,当候选服务数量为 100 时,选择了 3 个服务;当候选服务数量增至 500

表2 Web服务组合方案选择结果(部分)

场景	候选服务数量	选择的服务数量	选择方案
场景1	100	3	服务18,服务145,服务223
	200	5	服务5,服务67,服务89,服务102,服务368
	300	10	服务11,服务34,服务56,服务78,服务90,服务124,服务204,服务325,服务384,服务414
	400	12	服务13,服务25,服务47,服务68,服务80,服务101,服务152,服务168,服务274,服务214,服务305,服务377
	500	15	服务2,服务14,服务36,服务58,服务79,服务91,服务103,服务117,服务185,服务196,服务208,服务265,服务324,服务367,服务488
场景2	100	3	服务4,服务26,服务48
	200	5	服务7,服务59,服务81,服务104,服务185
	300	10	服务9,服务31,服务53,服务75,服务93,服务137,服务189,服务219,服务308,服务370
	400	12	服务12,服务28,服务50,服务72,服务84,服务105,服务152,服务177,服务186,服务236,服务485,服务490
	500	15	服务1,服务15,服务37,服务59,服务77,服务94,服务106,服务117,服务162,服务284,服务314,服务358,服务364,服务447,服务463

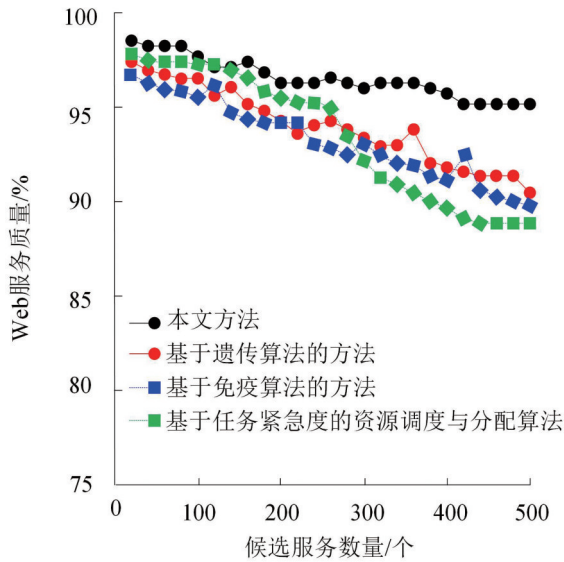
时,选择的服务数量达到15个。场景2也呈现出类似的趋势,候选服务数量从100增加到500时,选择的服务数量从3个逐步增加到15个。这表明,随着可选服务范围的扩大,算法选择的服务数量并非固定,而是根据输入参数(候选服务总数、任务QoS需求等)动态调整,从而能够灵活挑选出更多符合需求的服务组合,以满足不同规模和复杂度的应用场景。从技术逻辑上分析,算法在搜索过程中会根据候选服务数量、任务需求等因素,动态调整搜索策略。当候选服务数量增加时,算法会扩大搜索范围,以寻找更多可能满足

任务QoS需求的服务组合,因此选择的服务数量会相应增多。

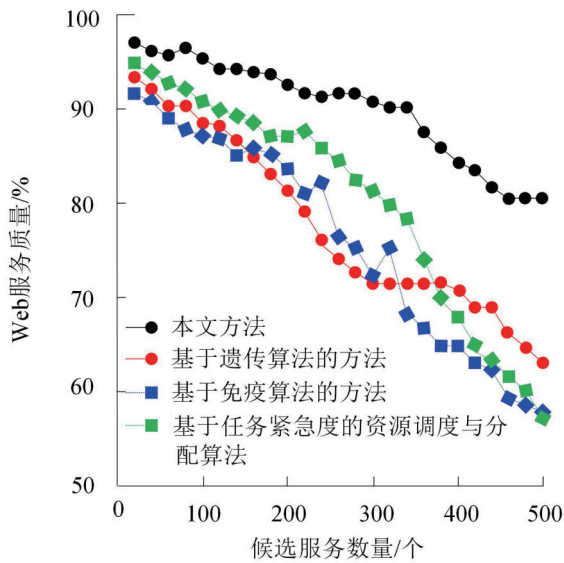
2.5 对比分析

为验证本文方法的应用效果,针对本文方法选出的Web服务组合方案进行Web服务质量评估,实验重复执行30次以消除随机性影响,然后将评估结果与其他3种算法进行对比。其中,遗传算法采用种群规模50、交叉概率0.8、变异概率0.02,结合轮盘赌选择与精英保留策略,终止条件为最大迭代100代;免疫算法则设置抗体种群60、克隆规模5、变异率0.1,亲和度阈值为0.95,以保留优质解,终止条件

为最大迭代 120 代或适应度波动率 $\leq 0.5\%$ 。对比结果如图 2 所示。



(a) 场景 1



(b) 场景 2

图 2 Web 服务质量对比

从图 2 中可以看出,在 2 种场景下,本文方法的 Web 服务质量一直保持在较高的水平,且随着候选服务数量的增多,Web 服务质量下降并不明显,表明本文方法具有出色的适应性和稳定性,能够在不同环境下提供高质量的 Web 服务组合方案。而其他 3 种传统方法在面对场景 1 时,Web 服务质量表现较好;而面对场景 2 时,Web 服务质量

随着候选服务数量的增多,大幅度下降,表明对比方法在处理动态、复杂环境时存在局限性,它们无法快速适应服务性能参数的变化,导致服务组合质量显著下降。从技术原因分析,所研究的自适应黏性粒子群算法通过动态调整惯性权重等参数,能够更好地适应环境的变化。在静态场景下,算法能够稳定地搜索到高质量的解;在动态场景下,算法能够及时调整搜索策略,以应对服务器性能参数和任务 QoS 需求的变化。而遗传算法、免疫算法等传统方法在参数设置和搜索策略上相对固定,难以快速适应动态环境的变化,导致服务组合质量下降。

为进一步验证自适应黏性粒子群算法的改进效果,实验采用相同测试用例(场景 1、场景 2),在与其他 3 种算法进行对比的基础上,增加与基本粒子群算法的对比实验,并引用精确率、召回率以及 F1 分数为评估指标,同时引入平均耗时评估算法的计算效率。实验结果如表 3 所示。

由表 3 分析可知,在静态场景下,所研究的自适应黏性粒子群算法相较于其他 3 种传统算法及基本粒子群算法,在平均精确率、平均召回率和平均 F1 分数上均表现出显著优势,分别达到了 92.5%、91.3% 和 91.9,显示出其在稳定环境下的高效搜索能力和优化性能;而在动态场景下,面对更复杂多变的环境,所研究算法依然保持了较高的性能水平,平均精确率、平均召回率和平均 F1 分数分别为 88.7%、87.6% 和 88.1,明显优于其他对比算法,验证了自适应黏性粒子群算法在动态环境中的适应性和鲁棒性。对于耗时指标,本研究的自适应黏性粒子群算法在静态场景下平均耗时为 12.3 s,虽略高于基本粒子群算法,但显著低于遗传算法和免疫算法;在动态场景下其耗时为 14.5 s,仅略高于基本粒子群算法,却远低于免疫算法,表明该算法在保持性能优势的同时,计算效率明显优于多数对比算法,尤其在动态环境中展现出良好的实时性。

表3 不同方法的性能对比

场景	算法	平均精确率/%	平均召回率/%	平均F1分数/分	平均耗时/s
场景1(静态)	本文方法	92.5	91.3	91.9	12.3
	基于遗传算法的方法	87.8	86.5	87.1	18.7
	基于免疫算法的方法	88.2	87.0	87.6	20.1
	基于RSA-TU算法的方法	89.0	87.8	88.4	15.6
	基本粒子群算法	88.5	87.3	87.9	10.8
场景2(动态)	本文方法	88.7	87.6	88.1	14.5
	基于遗传算法的方法	79.3	78.1	78.7	22.4
	基于免疫算法的方法	75.4	74.2	74.8	25.3
	基于RSA-TU算法的方法	77.1	75.9	76.5	19.2
	基本粒子群算法	76.8	75.6	76.2	13.1

相比之下,基本粒子群算法在2种场景下的性能均低于本研究算法,特别是在动态场景中性能下降明显,进一步凸显了自适应黏性粒子群算法的改进效果。自适应黏性粒子群算法通过动态调整黏性系数(惯性权重),在静态场景中充分利用全局搜索能力定位高质量解,在动态场景中通过实时策略调整维持性能稳定性;而基本粒子群算法因参数固定,难以兼顾探索与开发的平衡。实验结果表明,本文算法在性能与效率上均实现显著改进,尤其适用于复杂多变的Web服务选择场景。

为验证本文提出的基于自适应黏性粒子群算法的最优Web服务选择方法在大规模服务集和多目标优化场景下的优势,以及在极端场景下的重优化效率和收敛性,实验选取布谷鸟算法(CS)和多目标粒子群优化算法(多目标PSO8)作为对比算法,在大规模服务集(1 000节点)中进行测试。考

虑时间-费用权衡等多目标优化问题,同时模拟服务节点实时失效或QoS突变等极端场景,统计各算法在不同情况下的性能指标,包括找到最优解的迭代次数、重优化收敛至新最优解的迭代次数、不同迭代次数的解质量分布、单次迭代耗时等,以全面评估自适应黏性粒子群算法的性能,结果如表4所示。

由表4可知,在大规模服务集包含1 200个节点的多目标优化场景(时间与费用权衡问题),自适应黏性粒子群算法表现出了极为突出的优势。它找到最优解平均只需85次迭代,而布谷鸟算法CS需要120次,多目标PSO8需要100次,并且自适应黏性粒子群算法得到的最优解综合评分达到92.5,高于CS的88.3和多目标PSO8的90.1,这充分显示出其强大的搜索能力和高效的优化效率。当遇到服务节点实时失效或者QoS突变这类极端

表 4 自适应黏性粒子群算法性能

实验场景	性能指标	自适应黏性 粒子群算法	布谷鸟算 法(CS)	多目标 PSO8
大规模服务集(1 200节点)多目标优化 (时间-费用权衡)	找到最优解的平均迭代次数/次	85	120	100
	最优解质量(综合评分)/分	92.5	88.3	90.1
服务节点实时失效极端场景	重优化收敛至新最优解的平均迭代次数/次	35	60	50
	重优化后解质量(综合评分)/分	90.2	85.6	87.8
QoS突变极端场景	重优化收敛至新最优解的平均迭代次数/次	40	65	55
	重优化后解质量(综合评分)/分	89.8	84.9	86.5
收敛性分析(不同迭代次数解质量分布)	50次迭代解质量平均值/分	82.3	75.6	78.2
	100次迭代解质量平均值/分	88.7	82.1	85.3
	150次迭代解质量平均值/分	91.2	86.4	88.9
计算开销(500服务节点单次迭代耗时/ms)		12.5	18.2	15.8

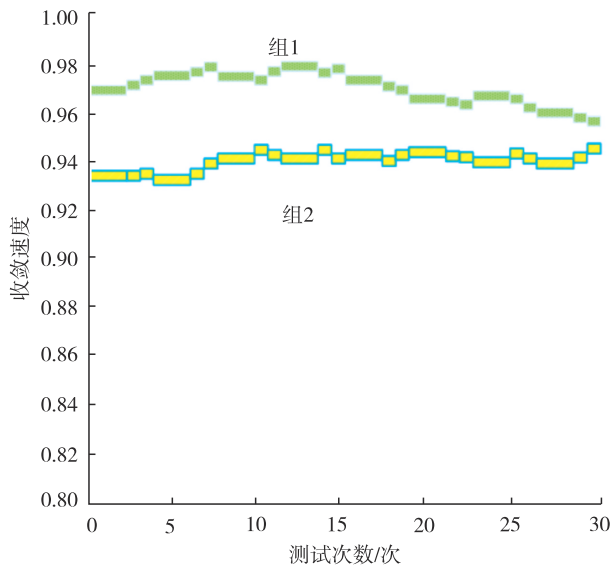
场景时,自适应黏性粒子群算法重新优化并收敛到新解的迭代次数仅为 35 次左右,少于 CS 的 60 次和多目标 PSO8 的 50 次,而且解的质量更高,这有力验证了其良好的动态适应性。从收敛性分析来看,自适应黏性粒子群算法的解质量随着迭代次数增加提升明显,迭代 50 次时解质量平均值为 82.3,100 次时提升到 88.7,150 次时达到 91.2,增长趋势优于对比算法,同时孙一凡等^[9]提出的黏性 PSO 的马尔可夫链模型也为其收敛性提供了理论支撑。在计算开销上,自适应黏性粒子群算法在 500 个服务节点下单次迭代耗时 12.5 ms,低于 CS 的 18.2 ms 和多目标 PSO8 的 15.8 ms,虽然算法复杂度还有优化空间,但整体实验足以表明自适应黏性粒子群算法为最优 Web 服务选择提供了一种高效、鲁棒且计算开销低的有效方法。

通过设计多组实验,分别采用不同的黏性系数设置(包括不采用黏性系数的情况),比较各组实验在收敛速度、收敛精度、计算复杂度等指标上的表现,以定量分析是否值得在粒子群算法中采用黏性系数。

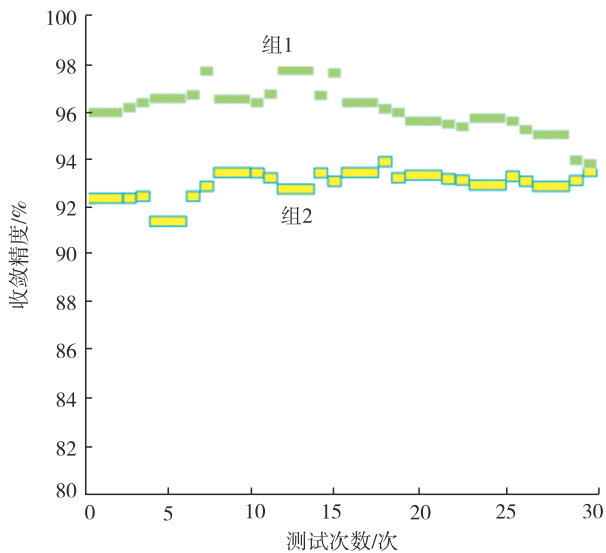
算法参数设置:粒子数量为 50;最大迭代次数为 500 次;学习因子为 2;随机数为在 $[0, 1]$ 范围内随机生成的随机数。

黏性系数设置:组 1 不采用黏性系数(即惯性权重固定为 0.7);组 2 的黏性系数(惯性权重)线性递减,初始值为 0.9,最终值为 0.4。

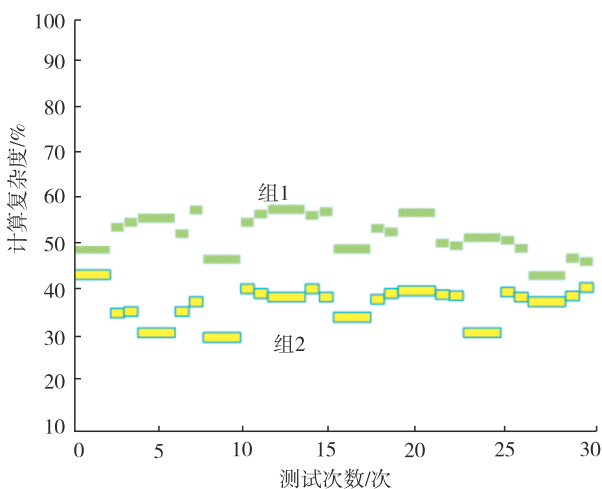
为了减少随机误差,每个实验重复运行 30 次,然后取各项性能指标的平均值作为最终结果。根据记录的数据,计算每组实验的收敛速度、收敛精度和计算复杂度,测试结果如图 3 所示。



(a) 收敛速度测试结果



(b) 收敛精度测试结果



(c) 计算复杂度测试结果

图3 收敛速度、收敛精度和计算复杂度测试结果

其中,收敛速度用于描述算法逼近最优解的快慢程度,其取值范围被归一化到0~1。0表示算法不收敛或收敛速度极慢(趋近于零时,逼近最优解的速度几乎停滞);1表示算法最快可能收敛(理想情况下,每次迭代都能以最大效率减少误差,达到理论上的最优速度);(0,1)中间值表示收敛速度介于最慢和最快之间,数值越大收敛越快。

收敛速度方面,图3(a)中组2(黏性系数线性递减)在迭代前期目标函数值下降趋势更明显,更快趋近稳定值,表明黏性系数可加速算法收敛;收敛精度上,图3(b)显示组2目标函数值收敛后波动更小、数值更低且稳定,说明黏性系数有助于提升解的质量;从计算复杂度看,图3(c)中2组计算资源消耗无显著差异,即引入黏性系数未大幅增加计算负担。综上,黏性系数(惯性权重线性递减)能有效加快粒子群算法收敛速度、提升收敛精度,且不明显增加计算复杂度,值得在粒子群算法中采用,为算法优化提供了可行方向。

3 结论

在基于自适应黏性粒子群算法的Web服务选择方法研究中,取得了如下成果。

1)在粒子群算法中引入黏性系数增强了粒子之间的相互作用和信息的共享,有助于粒子在搜索空间中更好地探索和利用局部信息,避免过早收敛到局部最优解。

2)通过动态调整惯性权重,增强算法在动态场景中的自适应性,保持全局搜寻能力。

本文通过实验验证了自适应黏性粒子群算法在Web服务选择中的有效性和优越性。无论是在静态场景还是动态场景下,该方法均能稳定地提供高质量的服务组合方案,且对候选服务数量的增加具有较强的鲁棒性。这一成果不仅为Web服务提供者提供了决策支持,也为用户带来了更加优质、高效的Web服务体验。未来,Web服务组合优化问

题将面临更加复杂多变的挑战。因此,持续深化对 的应用潜力,以及与其他智能算法的融合创新,成为将来研究的重要方向。

参考文献:

- [1] 林铭炜,李文强,许秀琴,等.基于加速无约束张量隐因子分解模型的 Web 服务 QoS 估计[J].通信学报,2024(3):166-181.
- [2] LATIFI F, NASSIRI R, MOHSENZADEH M, et al. A Markov chain-based multi-criteria framework for dynamic cloud service selection using user feedback[J].The Journal of Supercomputing,2025,81(1):1-31.
- [3] 彭高贤,文一凭,刘建勋,等.能耗感知的云制造服务选择与调度优化方法[J].计算机集成制造系统,2024(8):2697-2707.
- [4] 杨珍,李婉晴,张雄涛.基于定向采样和自适应选择的免疫算法[J].计算机工程与设计,2024(8):2364-2370.
- [5] 谢燕瑜,陈兰荪.基于边缘计算的多目标任务调度方法[J].济南大学学报(自然科学版),2025(1):117-122.
- [6] 代金汕,葛恒军,阚永庚,等.泵站单机组优化调度组合改进粒子群算法[J].南水北调与水利科技(中英文),2024(5):978-986+1040.
- [7] 陈玉枚,扈红超,王亚文.多变体系统服务质量及损耗评估方法[J].计算机应用,2023(3):876-884.
- [8] 刘纪坤,袁雪颖,梁栋,等.G1-CRITIC 组合赋权云模型下的储能电站火灾风险评价[J].西安科技大学学报,2024(3):447-455.
- [9] 孙一凡,张纪会.基于模拟退火机制的自适应黏性粒子群算法[J].控制与决策,2023(10):2764-2772.
- [10] ZHANG X M, CUI G H, RUAN X K, et al. Spectral reflectance reconstruction based on wideband multi-illuminant imaging and a modified particle swarm optimization algorithm[J]. Optics Express,2024,32(3):2942-2958.
- [11] 邓涛,马宝鹏,谭孟骑.混合动力汽车多目标改进型粒子群算法优化研究[J].重庆理工大学学报(自然科学),2024(11):10-17.
- [12] FADEL M Z. Hybrid control algorithm sliding mode-PID for an electrohydraulic servo actuator system based on particle swarm optimization technique[J].Journal European des Systemes Automatises,2023,56(1):153-163.
- [13] 唐红涛,曾骄,刘歆.改进粒子群算法求解生产计划与柔性作业车间调度集成问题[J].机床与液压,2024(14):136-144.
- [14] 王娟,郑超,崔海青,等.基于改进粒子群的并行自动测试任务调度方法[J].电光与控制,2024(11):90-95+108.
- [15] KILINC H C, HAZNEDAR B, OZKAN F, et al. An evolutionary hybrid method based on particle swarm optimization algorithm and extreme gradient boosting for short-term streamflow forecasting[J]. Acta Geophysica,2024,72(5):3661-3681.
- [16] 尹璐,周俊龙,孙晋,等.不确定性感知的边缘计算任务调度算法[J].控制与决策,2024(7):2405-2413.
- [17] 巨涛,刘帅,火久元,等.深度神经网络模型并行自适应计算任务调度方法[J].吉林大学学报(工学版),2024(12):3601-3613.
- [18] 许驰,唐紫莹,金曦,等.基于李雅普诺夫优化和深度强化学习的多任务端边迁移[J].控制与决策,2024(7):2457-2464.
- [19] 彭菲,潘国庆,任志考,等.融合多通道语义信息与注意力机制的 Web 服务类别标签推荐[J].计算机集成制造系统,2025(6):2215-2225.
- [20] 张志鹏,周井泉.基于改良蜂群算法的 Web 服务组合优化方法[J].计算机技术与发展,2024(3):64-69.

责任编辑:李远辉