



专题：物联网技术与应用

面向服务组合质量的物联网绿色能源管理

郭冲¹, 闫文卿², 许斌¹

(1. 南京邮电大学, 江苏 南京 210003;

2. 山东科技大学计算机科学与工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要: 随着物联网技术的迅速发展, 物联网环境中服务组合的能源消耗是目前有待研究的一个关键问题。当前物联网环境下服务组合的问题大多集中在基于服务质量(QoS)的评估研究, 忽略了服务组合动态配置过程中的总体能源消耗。因此, 提出面向物联网环境下服务组合的 QoS 评估模型和能源评估模型。考虑到物联网环境下的服务组合是 NP 难问题, 将飞蛾算法(MFO)成功运用到 QoS 评估模型和能源评估模型。实验结果表明, MFO 在上述模型中都呈现出较好的优化效果, 从而实现服务组合质量在物联网环境下的绿色能源管理。

关键词: 物联网; 服务组合质量; 绿色能源管理; QoS

中图分类号: TP315

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017268

Green energy management in internet of things based on quality of service composition

GUO Chong¹, YAN Wenqing², XU Bin¹

1. Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

2. College of Computer Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China

Abstract: With the rapid development of internet of things technology, the energy consumption of service composition in the internet of things is a key issue to be studied. The service composition problem in the internet of things mostly focuses on the evaluation based on quality of service(QoS) at present and ignores the overall energy consumption during the dynamic deployment of service composition. Therefore, a QoS evaluation model and an energy evaluation model was proposed for service composition in the internet of things. Finally, considering the service composition in the internet of things is NP hard, the moth-flame optimization (MFO) was successfully applied to the QoS evaluation model and the energy evaluation model. The experimental results show that MFO has a better optimization effect in the above model, so as to realize the green energy management of the quality of service composition in the environment of the internet of things.

Key words: internet of things, quality of service composition, green energy management, quality of service

收稿日期: 2017-08-20; 修回日期: 2017-09-22

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目 (No.BK20160910); 江苏省教育厅自然科学研究面上项目 (No.16KJB520034, No.17KJB520026)

Foundation Items: The Natural Science Foundation of Jiangsu Province of China (No.BK20160910), Natural Science Fund for Colleges and Universities in Jiangsu Province (No.16KJB520034, No.17KJB520026)

1 引言

随着新一代信息技术的不断发展, 物联网^[1,2]被视为继计算机、互联网之后信息发展的又一次重大变革。目前, 面对物联网环境动态变化的特点, 在将物联网环境下的各种资源、设备映射成海量服务的同时, 如何实现服务的动态组合以达到最优配置是当前的一大主要挑战。

针对上述挑战, 国内外众多学者对物联网环境下服务组合质量问题进行了深入研究, 即主要面向物联网环境下给定不同类别的服务以及候选服务, 通过聚合每个类别下的候选服务^[3], 实现面向具体任务的整体 QoS 最大化。但在实际过程中, 由于服务信息来源于现实世界的实时数据, 服务所处的环境存在动态性和不确定性, 不恰当的服务组合不仅难以满足用户对物联网环境下 QoS 的需求, 同时会造成服务资源的浪费。所以对物联网环境下服务组合质量评估体系的优选仍需进一步的探索与研究。此外, 物联网环境下服务组合在动态配置过程中产生的总体能源消耗仍然是一个关键的问题。当前大部分研究主要集中在物联网环境下服务组合质量^[4,5]问题上, 并没有考虑服务组合优选过程中的能源消耗。因此, 在以 QoS 为主导的服务组合优选过程中, 实现服务组合质量在物联网环境下的绿色能源管理有着重要的意义。

本文综合考虑了服务组合质量和能源消耗问题, 提出物联网环境下服务组合的 QoS 评估模型和能源评估模型, 并将 MFO (moth-flame optimization) 算法成功运用到 QoS 评估模型和能源评估模型中。实验结果表明, 相较 PSO (particle swarm optimization, 粒子群算法)^[6]和 DE (differential evolution, 差分进化)^[7], MFO 在获取最佳 QoS 的同时, 能有效降低能源消耗, 从而实现了服务组合质量在物联网环境下的绿色能源管理。

2 相关工作

当前关于服务组合质量问题^[8,9]的研究大多围绕于 QoS 指标进行优化决策, 并取得了一些初步成效。然而, 随着物联网技术的发展, 如何实现服务组合质量的绿色能源管理仍是一个开放性的难题。本节重点就基于 QoS 指标的各类服务组合质量方法进行总结与分析。

参考文献[10]提出使用混合整数线性规划进行服务选择, 其中的能源消耗作为 QoS 属性中的一个指标。然而, 整数线性规划的时间复杂度会随着问题的规模以指数形式增加。针对整数线性规划的局限性, 参考文献[11]将服务选择制定为一个多维多选择的背包问题, 并将基于单源最短路径算法用于解决多约束的服务组合质量问题。参考文献[12]突破了只能选择单一候选服务的经典服务组合方法瓶颈, 并提出允许从一个给定的服务类中选出多个候选服务顺序执行以提高复合服务的 QoS, 该方法的优势在于通过引入 QoS 需求的潜在可行路径, 以此提高传统多约束最短路径的选择时间。参考文献[13]将服务组合建模为一个有向无环图的路径搜索问题, 并将元启发式蚁群算法用于寻找满足全局约束下有向无环图中的最优路径。

但上述研究没有充分考虑优化过程中的动态性和服务状态的复杂性, 针对以上问题, 使用机器学习和多目标优化方法进行服务组合被大量学者提出。参考文献[14]采用 K-means 聚类技术将候选服务分为具有大致相同属性的簇, 这些不同的簇可用于确定在满足全局 QoS 约束的条件下, 选出最佳的服务组合。参考文献[15]首先将 QoS 值定义为具有概率质量函数的离散随机变量, 然后使用模拟退火算法选出满足全局 QoS 约束的服务组合。参考文献[16-19]都使用多目标优化中的 Pareto (帕拉托) 最优解集进行基于服务组合质量问题的优化, 上述方法的优势在于可以根据用户



感兴趣的 QoS 属性进行优化, 从而搜索出满足用户实际需求的服务组合路径。

然而, 上述文献的研究主要都集中在基于 QoS 评价指标进行服务组合的优化选择, 并没有考虑服务组合优选过程中的能源消耗问题。在参考文献[10]中, 提出了能源消耗和响应时间加权总和最小化进行服务组合的选择。然而, 没有单独评估能源消耗对海量服务在动态配置过程中的影响。

针对以上问题, 本文对物联网环境下的服务组合问题就 QoS 评估和能源消耗分别建模, 并将 MFO 算法成功用于上述模型中。实验结果表明, 本文采用的 MFO 算法不仅在 QoS 指标上显示出较好的优化性能, 同时能减少物联网环境下服务组合的能源消耗, 从而实现服务组合质量在物联网环境下的绿色能源管理。

3 面向服务组合质量的物联网绿色能源管理模型

3.1 整体模型描述

本文通过构建多个目标函数进行优化以实现组合质量在物联网环境下的绿色能源管理, 以下为服务组合质量的绿色能源管理模型要达成的目标。

- 满足用户对服务组合中 QoS 最小化的需求。
- 实现服务组合中能源消耗最低的需求。

因此, 服务组合质量的物联网绿色能源管理模型构建如下:

$$F(x) = \begin{cases} \min f_1(x_1) \\ \min f_2(x_2) \end{cases} \quad (1)$$

其中, $F(x)$ 为上述模型的优化函数, x 为模型中的约束条件, 该约束条件由 x_1 和 x_2 两部分组成。由于该模型包括服务组合在物联网环境下的 QoS 评估和能源消耗评估。因此, 将该问题分解为对 $f_1(x_1)$ 和 $f_2(x_2)$ 的优化, $f_1(x_1)$ 和 $f_2(x_2)$ 分别代表服务组合中针对 QoS 指标的评估函数和能源消耗评估函数, x_1 为 QoS 评估模型函数中的约束条件, x_2 为

能源评估模型中的约束条件。

3.2 QoS 评估模型

$T = \{T_1, T_2, \dots, T_i, \dots, T_D\}$ 是一个复杂的物联网服务, 其中, D 代表一个服务的服务类别数量。每个服务类别 T_i 包含 C_i 具体服务 S_i^j , 其中, i 代表相应的服务类别数, j 代表候选服务数, $j=1, 2, \dots, C_i$, 使用的 QoS 指标集评价每个候选服务。综合考虑现有的研究结果^[20-22], 主要的 QoS 指标如下。

- 时间 t : 指服务选择过程中的时间消耗。 t 包括服务本身的执行时间、远程服务所需的传输时间和系统交互过程中所消耗的时间。
- 成本 c : c 是指一个服务用户使用该服务的能力或资源支付的成本。为了实现最佳的效果, c 应最小, 以服务需求者愿意投资独立货币的最高价格计算。
- 可靠性 r : 评估服务正常运行和持续运行的能力。一些传统的生产指标可以用来描述可靠性, 如在一个给定的时间和条件下的平均无故障率和平均故障率。显然, 服务用户更喜欢选择高可靠性的服务。

图 1 描述了物联网服务组合的主要流程。从图 1 中可以看出, 物联网服务组合的目标是选择最佳路径, 以满足用户的服务需求。从理论上考虑, 共有

$\prod_{i=1}^D C_i$ 服务组合路径, 其中, D 和 C_i 分别是服务类别的数量和候选服务的数量。当 D 和 C_i 增加时, 问题规模会迅速增加, 因此该问题是 NP 难问题。

服务组合的路径可以表示为 $x = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_D\}$, 其中, x_i 表示执行第 i 个服务类别的候选服务, 其中, $1 \leq i \leq C_i$ 。一般情况下, 根据几个减少原则^[23], 当评估具有服务质量指标的路径时, 串行、并行和循环结构可以被转换成序列结构。因此, 本文的物联网服务组合问题是基于序列结构建模。在这种结构中, 每个服务 CS_i 的 QoS 参数值是 $q(CS_i^j) = \{q_1, q_2, q_3\}$, 即 $q(CS_i^j) = \{t, c, r\}$ 。

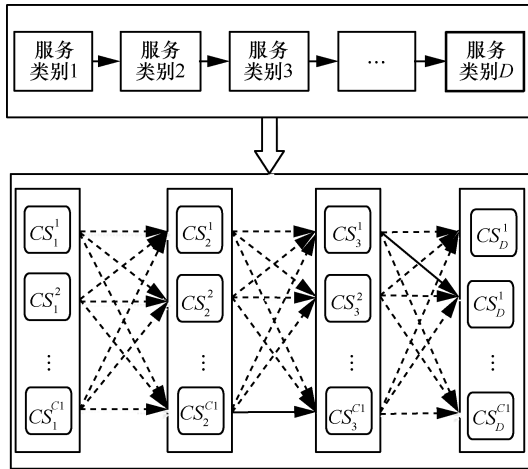


图1 物联网服务组合流程

整个服务组合路径的服务质量指标可以表示为 $Q=\{Q_1, Q_2, Q_3\}=\{T, C, R\}$, 并根据物联网服务本身的服务质量指标特点, 按照特定的规则对每个索引进行评估。 T 、 C 、 R 的计算方法见表1的计算规则, 包括 sum、product。

表1 物联网中的服务质量计算方法

QoS 指标	计算规则	函数
T, C	sum	$\sum_{s'_i \in x} q(S'_i)$
R	product	$\prod_{s'_i \in x} q(S'_i)$

寻找最佳路径的目的是尽量减少 T 、 C , 同时最大化 R , 这与以上描述的每个服务质量指数是一致的。它是一个有约束的多目标优化问题。本文将问题转化为一个约束的单目标优化问题, 使用常用的加权和法以方便计算。因此, 物联网服务组合问题的目标函数如下, 这也是提出的算法中使用的适应度函数:

$$\min f_1(x_1) = w_1 T(x_1) + w_2 C(x_1) - w_3 R(x_1) \quad (2)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} 1 \leq j \leq C_i \\ 1 \leq i \leq D \\ \sum_{i=1}^D W_i = 1 \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\{w_1, w_2, w_3\}$ 对应每个 QoS 指标的权重, 本文将它们都设置为 1/3。

3.3 能源评估模型

式(4)为能源评估模型的目标函数:

$$\begin{aligned} \min f_2(x_2) \\ = \left(\sum_{i=1}^{N_{ES}} \left(\frac{P_i(t)}{\eta_i} C_{\text{run}}(i) + P_i(t) C_{\text{om}}(i) \right) + P_{\text{Grid}}(t) C_{\text{Grid}}(t) \right) \end{aligned} \quad (4)$$

其中, T 为总的系统运行段数; N_{ES} 表示能源服务 (energy service, ES) 的总个数, 其中, ES 包含各种不同发电类服务, 例如: 光伏 (photovoltaic cell, PV) 服务、风电 (wind turbine, WT) 服务、蓄电池 (battery, BAT) 服务、燃料电池 (fuel cell, FC) 服务和微汽轮机 (microturbine, MT) 服务; i 为 ES 类别数目, $P_i(t)$ 为第 $i(i=\{1, 2, \dots, n\})$ 个 ES 在 t 时刻的发电量, η_i 为第 i 个 ES 的发电效率; C_{run} 为各 ES 的运行费用; C_{om} 为各 ES 的维护费用。 $C_{\text{Grid}}(t)$ 为大电网在 t 时刻的电价, $P_{\text{Grid}}(t)$ 为在 t 时刻能源物联网与大电网交换的电功率。

功率平衡约束为^[24]:

$$\sum_{i=1}^{N_{ES}} P_i(t) + P_{\text{Grid}}(t) = P_{\text{Load}}(t) + \sum_{n=1}^{N_{ESO}} P_{\text{ESO}}(t) \quad (5)$$

式(5)为功率平衡约束, 其中, $t \in 1, 2, \dots, T$, $P_{\text{Load}}(t)$ 为 t 时刻的负荷功率, $P_{\text{ESO}}(t)$ 为在 t 时刻 ES 的放电功率。式(5)表明, 能源物联网的能量管理必须在全时段满足总的功率平衡条件。

电源约束为:

$$P_{\text{ES}, \min} \leq P_{\text{ES}}(t) \leq P_{\text{ES}, \max} \quad (6)$$

$$\Delta P_{\text{ES}, \text{down}} \leq P_{\text{ES}}(t) - P_{\text{ES}} \leq \Delta P_{\text{ES}, \text{up}} \quad (7)$$

式(6)为电源约束, 其中, $t \in 1, 2, \dots, T$, $P_{\text{ES}, \min}$ 、 $P_{\text{ES}, \max}$ 分别为 ES 输出的最小、最大限值; $\Delta P_{\text{ES}, \text{down}}$ 、 $\Delta P_{\text{ES}, \text{up}}$ 为 ES 单位时间段内功率最大减少量和最大增加量。

4 基于飞蛾算法的物联网绿色能源管理模型求解流程

由于物联网环境下的服务组合是一个 NP 难



问题,传统的数学方法在对上述问题的求解存在计算复杂度高和效率低下等问题。而智能优化算法在解决上述问题时呈现出较好的优化效果。参考文献[25]表明,MFO 相比于传统的智能优化算法在单峰函数、多模态基准函数以及复合基准函数具有更好的优化效果和更高的稳定性。因此本文选取 MFO 对 QoS 评估模型和能源评估模型进行实验仿真。

4.1 飞蛾算法

飞蛾的种群规模为 n ,其飞行空间是 d 维,与服务类别的数目相同。初始种群 $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ 是随机产生的,其中, x_i 是飞蛾的位置,位置 x_i 的第 d 维由式 (8) 产生:

$$x_i^d = [lb^d + (ub^d - lb^d) \times rand(0,1)] \quad (8)$$

其中, ub^d 和 lb^d 分别是 d 维的上下限值, $rand(0,1)$ 为在 (0,1) 之间随机产生的一个数值。

FMO 通过结合飞蛾趋向于人造灯光的特定轨迹,定义了飞蛾种群和相应的适应度值以及火焰种群和相应的适应度值,通过让飞蛾种群以螺旋线的形式进行更新,并计算进化飞蛾种群的适应度值,从而得到最佳的适应度值以及与之对应的相应解。在该算法中,飞蛾位置的更新如式 (9) 和式 (10) 所示:

$$S(M_i, F_j) = D_i \times e^{bt} \times \cos(2\pi t) + F_j \quad (9)$$

$$D_i = |F_j - M_i| \quad (10)$$

其中, F_j 代表飞蛾位置, M_i 代表火焰位置, D_i 代表飞蛾位置和火焰位置的距离,由式 (8) 可以看出,飞蛾的位置更新是相对于火焰的位置进行的,设定式 (9) 中的 t 是 $[r,1]$ 之间的一个随机数,其中, r 在迭代的过程中从 -1 到 -2 线性递减。通过这种方法,飞蛾在迭代过程中往往能更好地利用相应的火焰。算法原理和步骤等细节请参见参考文献[25]。

4.2 物联网绿色能源管理模型求解步骤

本节重点介绍 MFO 算法解决物联网环境下

服务组合的相关步骤和方法,其中,表 2 和表 3 为飞蛾算法与基于 QoS 的服务组合优化问题和能源评估优化问题的对应关系。

表 2 算法与基于 QoS 的服务组合优化问题映射

飞蛾算法	服务组合优化问题
飞蛾种群维度	服务类别数目
飞蛾位置	服务组合的解
最佳适应度值的解	最优服务组合的解
最佳适应度值	服务组合的最佳 QoS

表 3 算法与能源评估优化问题的映射

飞蛾算法	能源评估优化问题
飞蛾种群维度	能源类别数目
飞蛾种群规模	候选能源数目
最佳适应度值的解	最低能源消耗的解
最佳适应度值	最低能源消耗

服务组合质量在物联网环境中的绿色能源管理模型采用式 (2) 和式 (4) 作为适应度函数进行优化,通过 MFO 迭代获得最佳的适应度值,该算法应用于上述模型的具体步骤如下。

输入: 服务组合中的候选服务数目和服务类别数目。

输出: 指定候选服务数目和服务类别数目下的能源消耗和最佳的 QoS。

步骤 1 将候选服务数目和服务类别数目作为初始化飞蛾种群 $x_i(x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,D})$ 的种群规模和维度,并设定最大迭代次数 $\max\text{-iteration}$ 。

步骤 2 采用第 4.1 节中的式 (8) 对飞蛾种群进行随机初始化。

步骤 3 选用第 3.2 节中的 QoS 评估模型式 (2) 和第 3.3 节中的能源评估模型式 (4) 计算初始化飞蛾种群的适应度值。

步骤 4 对初始化飞蛾种群的适应度值进行从小到大的排序,将排序后的适应度值作为火焰种群的适应度值。

步骤 5 保存最小的火焰适应度值,并将该适应度值作为初始化飞蛾种群的当前最佳 QoS 和

最低能源消耗。

步骤 6 使用第 4.1 节中的式 (9) 对初始化的飞蛾种群进行更新, 并再次采用第 3.2 节中的 QoS 评估模型式 (2) 和第 3.3 节中的能源评估模型式 (4) 计算飞蛾种群的适应度值。

步骤 7 将飞蛾种群的适应度值和火焰种群的适应度值进行合并, 并进行从小到大的排序操作。

步骤 8 取出前一半的适应度值作为火焰种群的适应度值, 并再次记录最小的适应度值, 得到迭代过后最佳 QoS 和最低能源消耗。

步骤 9 循环指针 I 加 1, 如果 $I \geq \max_iteration$, 则完成迭代过程, 否则跳至步骤 6。

5 实验仿真

5.1 实验参数设置

在物联网环境下的服务组合问题由于缺乏公共的数据集, 因此根据参考文献[20]采用合成 QoS 属性下的数据集进行仿真实验。然而, 随着物联网环境下服务类别和候选服务数量的急剧增长, 各个服务产生的总体能耗也随之迅速增加。因此, 本文引入了能源评估模型对海量服务在动态配置过程的能源消耗进行评估, 以实现 MFO 对于服务

组合质量在物联网环境下的绿色能源管理。为了验证算法的有效性, 本文将 MFO 与 PSO、DE 进行对比实验分析。

实验参数设置如下: 针对 QoS 评估模型, 对每一个服务的 QoS 属性值是在 (0,1) 间随机生成, 服务类别 D 和候选服务 C 的数目从小增大, 同时也包括以下两种情况: D 固定为 72, C 从 100 增加到 1 000; C 固定为 100, D 从 72 变化到 720。针对能源消耗评估模型, 每时段 Δt 的时长为 1 h, 控制时域 T 为 24 h, 总仿真时间为 1 天。 i 为能源服务的类别, 算法中初始化种群的个数 N 为候选服务的数目。实验中分别选取两种情况: I 固定为 72, N 从 100 增加到 1 000; N 固定为 100, i 从 72 变化到 720。

5.2 实验结果与分析

(1) QoS 评估模型

图 2 中的参数选定如下, D 固定为 72, C 从 100 变化到 1 000, 实验结果表明, MFO 在 QoS 评估模型下的适应度函数均优于 PSO 和 DE。在图 3 中, C 固定为 100, D 从 72 变化到 720, 图 3 中 MFO 得到 QoS 评估模型下的适应度函数较 PSO 和 DE 有明显的优势。同时, 图 3 中的 QoS

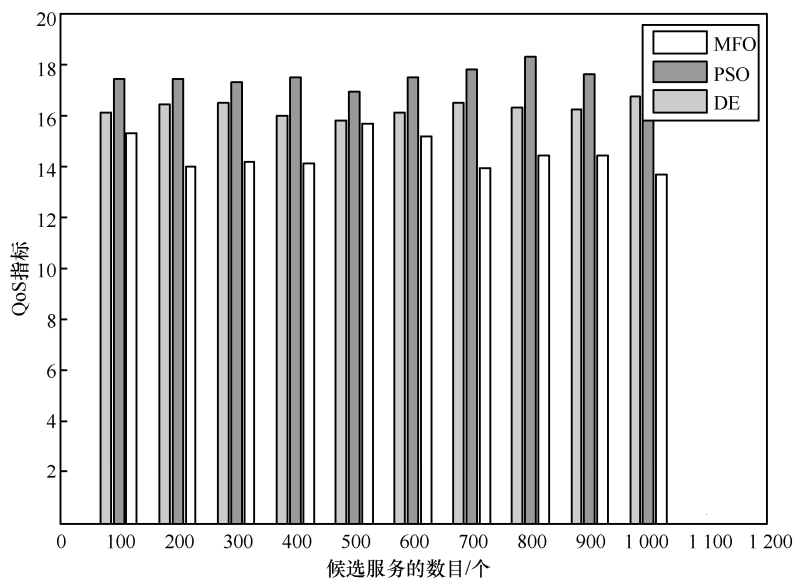


图 2 QoS 随候选数目的变化

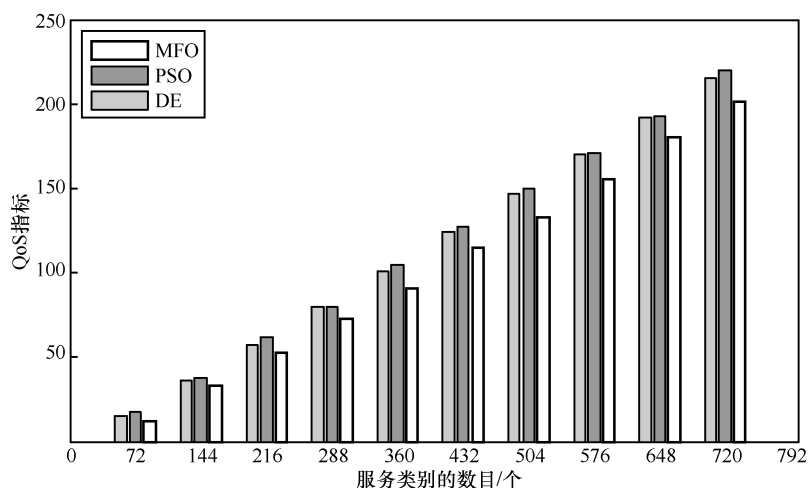


图3 QoS 随服务类别数目的变化

评估模型的适应度函数值随着服务类别数目的增加而增加，这可以解释为适应度函数与服务类别数目的变化呈现出线性关系。

(2) 能源评估模型

为了说明所选的算法在获取最佳 QoS 的同时，又不影响服务组合的能耗。因此，在能耗评估模型中的参数选取与 QoS 模型中的参数保持一致。本文选取 MFO、PSO 以及 DE 就物联网服务环境下服务组合的能源消耗进行评估。图 4 表明，当 D 固定为 72， C 从 100 变化到 1 000 时，MFO 在能耗评估模型上的优化效果明显优于 PSO 和 DE。在图 5 中， D 从 72 变化到 720，而 C 固定为 100，实验结果表明，在上述情况下，MFO 在物

联网环境下服务组合的能源消耗明显小于 PSO 和 DE 算法产生的能源消耗。此外，图 5 表明随着候选服务的增加，能源消耗也随之增加，这是因为各个服务类别选取的同时都会产生能源消耗，且服务选取过程中产生的总体能耗量与服务类别的数目呈现出线性关系。

6 结束语

随着物联网技术的发展，如何实现物联网环境下服务组合的优化选择，以满足用户对服务的实际需求是一个 NP 难问题。当前，大量文献的研究主要面向基于 QoS 进行物联网环境下的服务选择。然而，随着物联网环境下服务类别数目的

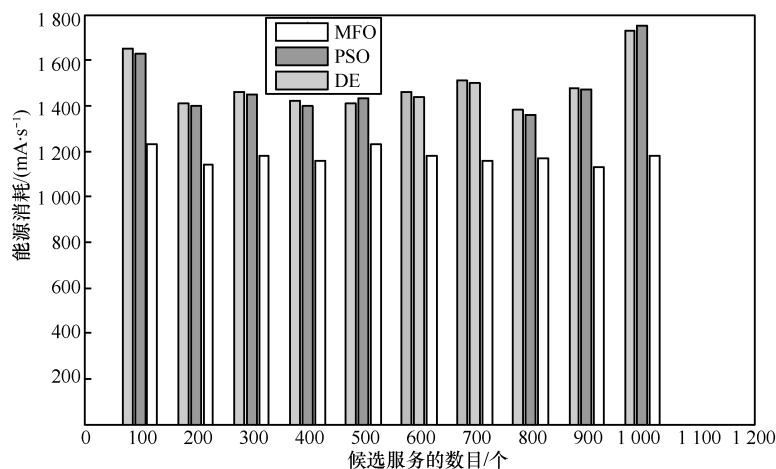


图4 能源消耗随服务数目的变化

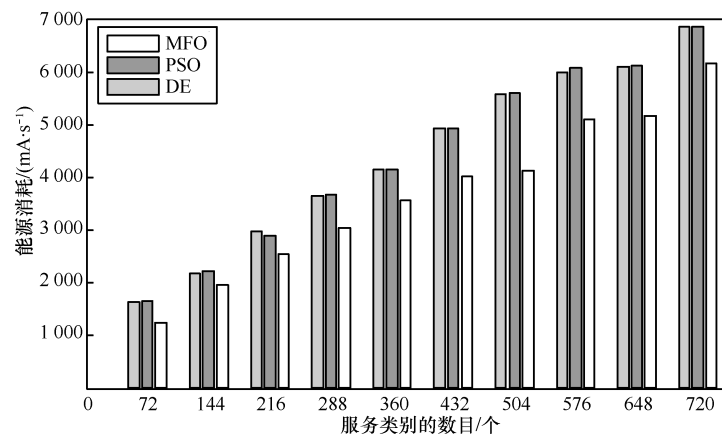


图5 能源消耗随服务类别数目的变化

迅速增加, 每个候选服务产生能耗使得服务组合中的总体能耗也随之增长。因此, 以 QoS 评估和能源消耗评估对物联网环境下服务组合的优化选择有着重要的意义。

本文针对传统方法中仅基于 QoS 评估进行物联网环境中服务优选的不足, 提出服务组合在物联网环境中的 QoS 评估模型和能源评估模型, 并将 MFO 成功运用于 QoS 评估模型和能源评估模型中。实验结果表明, 比起 PSO 和 DE, MFO 算法在上述模型中具有更好的优化效果。因此, MFO 在用于解决物联网环境下的服务组合问题中, 不仅能满足用户对物联网环境下 QoS 的需求, 同时能有效减少服务组合的能源消耗, 从而实现服务组合质量在物联网中的绿色能源管理。

下一步的研究工作可以考虑从实验中获得真实数据集进行物联网环境下服务组合质量评估和能源消耗评估。此外, MFO 具有较强的收敛性, 但有陷入局部最优的可能。因此, 可以考虑将 MFO 与其他智能优化算法相结合, 针对物联网环境下服务组合问题就 MFO 易陷入局部最优这一缺点进行改进。

参考文献:

[1] AL-FUQAHA A, GUIZANI M, MOHAMMADI M, et al. Internet of things: a survey on enabling technologies, protocols, and applications[J]. IEEE Communications Surveys Tutorials, 2015, 17(4): 2347-2376.

[2] KAFLE V P, FUKUSHIMA Y, HARAI H. Internet of things standardization in ITU and prospective networking technologies[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(9): 43-49.

[3] JATOTH C, GANGADHARAN G R, BUYYA R. Computational intelligence based QoS-aware Web service composition: a systematic literature review[J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2017, 10(3): 475-492.

[4] LI L, LI S, ZHAO S. QoS-aware scheduling of services-oriented internet of things[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(2): 1497-1505.

[5] YACHIR A, AMIRAT Y, CHIBANI A, et al. Event-aware framework for dynamic services discovery and selection in the context of ambient intelligence and internet of things[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2016, 13(1): 85-102.

[6] ZAMBRANO-BIGIARINI M, CLERC M, ROJAS R. Standard particle swarm optimisation 2011 at CEC-2013: a baseline for future PSO improvements[C]//2013 IEEE Congress on Evolutionary Computation, June 20-23, 2013, Cancun, Mexico. New Jersey: IEEE Press, 2013: 2337-2344.

[7] ZHOU Y, ZHANG C, ZHANG B. Multi-objective service composition optimization using differential evolution[C]//2015 11th International Conference on Natural Computation (ICNC), Aug 15-17, 2015, Zhangjiajie, China. New Jersey: IEEE Press, 2015: 233-238.

[8] 孙明瑞. 服务网络中基于改进蚁群系统的服务路径选择[J]. 电信科学, 2015, 31(7): 48-57.

SUN M R. Service path selection based on improved ant colony system in service network[J]. Telecommunication Science, 2015, 31(7): 48-57.

[9] 许斌. 基于多策略离散差分进化的移动互联网个性化服务组合[J]. 电信科学, 2016, 32(2): 99-105.

XU B. Personalized service composition based on multi-strategy discrete differential evolution in mobile internet[J].



- Telecommunication Science, 2016, 32(2): 99-105.
- [10] NGOKO Y, GOLDMAN A, MILOJICIC D. Service selection in Web service compositions optimizing energy consumption and service response time[J]. Journal of Internet Services and Applications, 2013, 4(1): 19.
- [11] YU T, ZHANG Y, LIN K J. Efficient algorithms for Web services selection with end-to-end QoS constraints[J]. ACM Transactions on Web, 2007, 1(1) .
- [12] LLINÁS G A G, NAGI R. Network and QoS-based selection of complementary services[J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2015, 8(1): 79-91.
- [13] WU Q, ZHU Q. Transactional and QoS-aware dynamic service composition based on ant colony optimization[J]. Future Generation Computer Systems, 2013, 29(5): 1112-1119.
- [14] MABROUK N B, BEAUCHE S, KUZNETSOVA E, et al. QoS-aware service composition in dynamic service oriented environments[C]//10th ACM/IFIP/USENIX International Conference on Middleware, November 30-December 4, 2009, Urbana, Illinois. New York: ACM Press, 2009: 123-142.
- [15] HWANG S Y, HSU C C, LEE C H. Service selection for Web services with probabilistic QoS[J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2015, 8(3): 467-480.
- [16] CHEN Y, HUANG J, LIN C, et al. A partial selection methodology for efficient QoS-aware service composition[J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2015, 8(3): 384-397.
- [17] AL-HELAL H, GAMBLE R. Introducing replaceability into Web service composition[J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2014, 7(2): 198-209.
- [18] TRUMMER I, FALTING S B, BINDER W. Multi-objective quality-driven service selection—a fully polynomial time approximation scheme[J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2014, 40(2): 167-191.
- [19] JIN X, CHUN S, JUNG J, et al. IoT service selection based on physical service model and absolute dominance relationship[C]//2014 IEEE 7th International Conference on Service-Oriented Computing and Applications, Nov 17-19, 2014, Matsue, Japan. New Jersey: IEEE Press, 2014: 65-72.
- [20] ARDAGNA D, PERNICI B. Adaptive service composition in flexible processes[J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2007, 33(6): 369-384.
- [21] XIANG F, HU Y, YU Y, et al. QoS and energy consumption aware service composition and optimal-selection based on Pareto group leader algorithm in cloud manufacturing system[J]. Central European Journal of Operations Research, 2014, 22(4): 663-685.
- [22] TAO F, LAILI Y, XU L, et al. FC-PACO-RM: a parallel method for service composition optimal-selection in cloud manufacturing system[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(4): 2023-2033.
- [23] TAO F, ZHAO D, HU Y, et al. Resource service composition and its optimal-selection based on particle swarm optimization in manufacturing grid system[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2008, 4(4): 315-327.
- [24] KAMANKESH H, AGELIDIS V G, KAVOUSHI-FARD A. Optimal scheduling of renewable micro-grids considering plug-in hybrid electric vehicle charging demand[J]. Energy, 2016(100): 285-297.
- [25] MIRJALILI S. Moth-flame optimization algorithm: a novel nature-inspired heuristic paradigm[J]. Knowledge-Based Systems, 2015(89): 228-249.

[作者简介]



郭冲（1993—），男，南京邮电大学硕士生，主要研究方向为智能优化算法。



闫文卿（1995—），男，山东科技大学计算机科学与工程学院在读，主要研究方向为智能计算在能源互联网及工业互联网中的应用。



许斌（1981—），男，博士，南京邮电大学讲师，主要研究方向为智能计算。