

基于云计算的飞机 PHM 体系架构研究

李耀华, 尚金秋

(中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300)

摘 要: 针对目前国内飞机维修资源利用率较低的问题, 提出一种基于云计算的故障预测与健康管理 (PHM) 体系架构。通过为云计算的虚拟层 PHM 资源建立基于粒子群算法的分配模型, 使得在服务质量最优情况下, 用户与资源的效用函数尽量大于需求与资源的效用函数。运用 CloudSim 平台进行仿真实验, 结果表明, 该体系架构可提高 PHM 系统的通用性和知识利用率, 有效解决飞机维修保障中的资源优化问题。

关键词: 故障预测与健康管理; 云计算; 粒子群算法; 虚拟资源配置; 效用函数

中文引用格式: 李耀华, 尚金秋. 基于云计算的飞机 PHM 体系架构研究 [J]. 计算机工程, 2017, 43 (12) : 6-10.

英文引用格式: LI Yaohua, SHANG Jinqu. Research on PHM Architecture of Aircraft Based on Cloud Computing [J]. Computer Engineering, 2017, 43 (12) : 6-10.

Research on PHM Architecture of Aircraft Based on Cloud Computing

LI Yaohua, SHANG Jinqu

(School of Aviation Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

【Abstract】 Aiming at the problem of now internal low aircraft maintenance resources utilization, a Prognostic and Health Management (PHM) architecture based on cloud computing is put forward. Allocation model based on particles swarm algorithm is set for PHM resources in cloud computing virtual layer, it ensures utility function between users and resources is higher than utility function between asks and resources under optimal service quality, and the simulation experiments are carried out by using CloudSim platform, results show that the architecture can improve the generality and utilization of knowledge to PHM system, and can solve effectively the problem of resource optimization in aircraft maintenance support.

【Key words】 Prognostic and Health Management (PHM); cloud computing; particle swarm algorithm; virtual resource allocation; utility function

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2017.12.002

0 概述

目前, 随着航空产业的快速发展, 以降低使用和保障费用、提高飞行安全和飞机可用性为目的^[1]的飞机故障预测与健康管理 (PHM) 理论与方法获得越来越多的重视和应用。国内外部分大型航空企业已经开始构建自己的 PHM 系统, 实时监测和管理设备, 如波音公司开发并使用的“飞机状态管理”^[2]系统等。但是, 由于 PHM 体系架构和运行模式未形成统一规范, 存在重复构建、资源浪费等情况。部分中小型企业受到人力、财力等限制, 无法构建自己的 PHM 系统, 严重影响飞机故障诊断及故障维修效率。因此, 部分学者针对存在的这些问题, 结合“云计算”“物联网”“数据挖掘”等新兴计算机技术, 希望在大数据的背景下提高民航健康管理能力。文献 [3] 基于云计算等理念构建面向服务的 PHM 系统, 以实现维修资源

的集中管理和共享。但该文仅限于概念性的功能描述, 对于如何分配调度维修资源提及较少。文献 [4] 将 PHM 与信息网格化结合, 介绍新型 PHM 系统的软件、硬件、人员、组织和基础设施等接口设计, 构建新一代飞机自主式保障系统, 但是对资源动态管理的方案仅处在定性阶段, 缺少方法实现过程。

针对现有 PHM 体系的局限性, 本文结合云计算概念提出一种新的 PHM 架构。根据维修资源建立粒子群算法分配模型并进行模拟仿真。

1 基于云计算的飞机 PHM 体系架构

1.1 飞机 PHM 体系架构

飞机 PHM 系统是一个多层次的复杂系统, 传统的 PHM 体系按功能层可划分为 6 层^[5]: 即数据处理层、状况监测层、故障诊断层、故障预测层、决策支持层和表达层。传统飞机 PHM 系统架构如图 1 所示。

基金项目: 航空科学基金 (20150267001); 工信部民机专项 (2015SACSC-044JS); 中国民航局科技引领重大专项 (MHRD20160105)。

作者简介: 李耀华 (1974—), 男, 副教授、博士研究生, 主研方向为云计算、智能算法、故障预测; 尚金秋 (通信作者), 硕士研究生。

收稿日期: 2016-11-24 **修回日期:** 2016-12-28 **E-mail:** yh_li@cauc.edu.cn

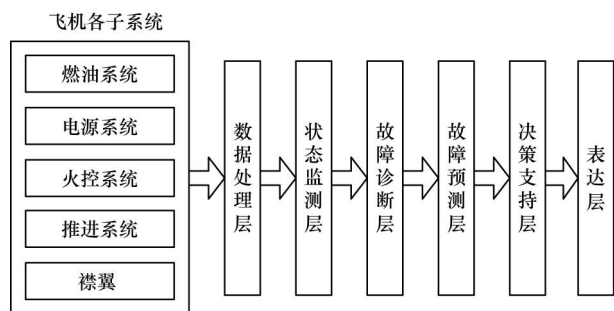


图1 传统飞机 PHM 系统架构

将从机身传感器中采集到的数据在数据处理层进行去噪、平滑等处理;将处理后的数据在状态监测层分析,得出部件、子系统、系统的状态;利用得到的状态在故障诊断层判断发生故障对象的故障位置,并分析其故障原因;在故障预测层预测部件或子系统未来状态及状态趋势,估计发生故障的时间;根据具体预测情况采取决策,在决策支持层准备人力、设备、航材等维修资源实现后勤保障;最后,将 PHM 系统与用户的交互界面作为表达层,设定想要查询的参数,直接操作 PHM 系统中其他功能层的信息。

1.2 基于云计算的 PHM 体系架构

目前,PHM 系统通用性较低,大多是针对特定飞机系统的一对一服务模式。另外,知识利用率较低,飞机作为交通运输工具又决定其具有地域分散性,实时且较为准确地进行故障诊断需要丰富的诊断预测模型库,即知识资源。所以,需要将现有的架构网络化发展:一方面,将现有的一对一应用模式升级为多对多、多对一、多对多的模式,以提高系统通用性;另一方面,开发基于 Web 的 PHM 系统,取代现有的 PHM 客户端系统或局域网系统,提升知识资源的共享程度,进而提升故障预测与健康管理效率。

1.2.1 云计算

云计算技术原理如图 2 所示。

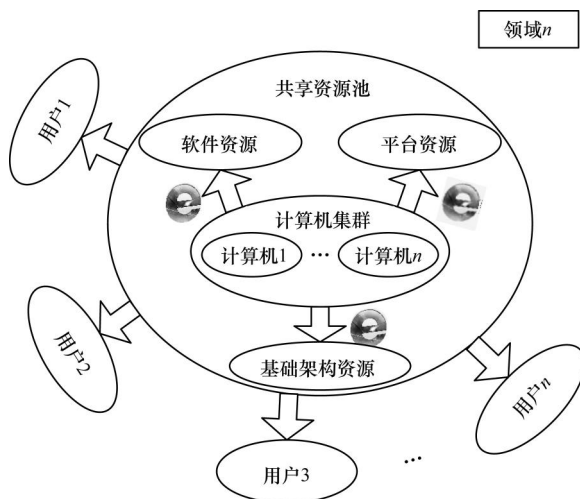


图2 云计算技术原理示意图

云计算为解决现有 PHM 架构的不足提供了可能。云计算的构想是 Google、Amazon 等公司于 2006 年提出的^[6],目的是用来解决数据存储量大等问题。云计算技术以同心圆的方式向外扩散,首先采用计算机集群构成数据中心,然后针对不同领域,利用互联网随时随地、按需、便捷地访问共享资源池,最后将经过大数据处理分配后的资源传送给用户,使得用户仅通过简单的交互界面获取所需的资源和信息,从而提高服务效率。

1.2.2 PHM 体系架构

云计算可以通过服务过程的动态控制与协调优化按需分配资源。弹性增加或减少资源,根据用户所需提供一对一、一对多、多对一或多对多服务,避免资源浪费;利用虚拟化技术统一管理共享资源池中的资源,发现、匹配、监控资源,并自动形成分配决策进行资源分配。这为改进现有 PHM 架构、构建基于云计算的 PHM 架构提供依据。

首先界定“维修资源”等的涵义。

1) 维修资源:维修资源简称为资源,对应于云计算技术中的资源,是基础架构资源、平台资源和软件资源的总称。在基于云计算的 PHM 体系中,基础架构资源是配置、存储、处理飞机状态信息的载体,如 IT 设备、传感器、计算机集群等。平台资源是指应用程序的运行环境,部署和管理应用程序。软件资源包括模型(诊断、预测、优化、计算、仿真等)、算法、软件工具(Matlab、Visual Studio 等)、案例、技术标准、需求文档等。本文的资源特指软件资源中的模型算法资源。

2) 服务:本文的服务特指 PHM 系统收到用户发送的请求^[7]后,云计算中虚拟资源层按需提供飞机维修结果的行为。

3) 节点:本文的节点位于云网络的平台资源上,与模型算法一一对应。

基于云计算的 PHM 系统架构如图 3 所示。

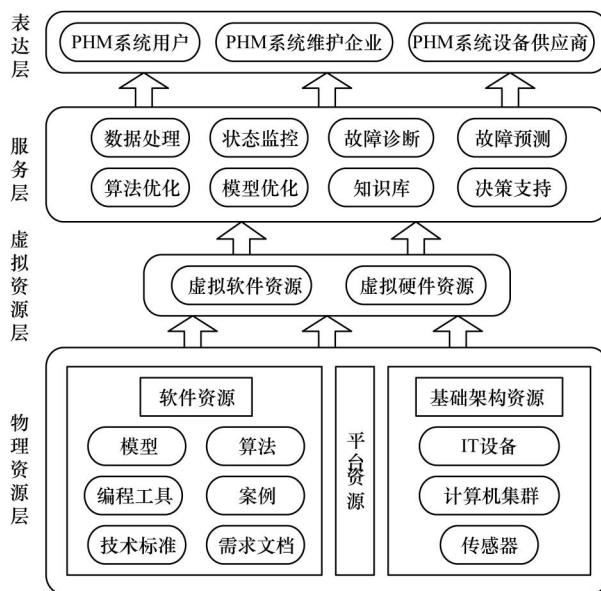


图3 基于云计算的 PHM 体系架构

1) 物理资源层:基础架构资源、平台资源和软件资源 3 种资源部署在物理资源层,为飞机状态信息的传输提供可靠的环境。

2) 虚拟资源层:将物理资源通过接口传送到虚拟资源层中虚拟化封装。将资源转换成平台可识别的形式,为后续调用服务做准备。虚拟资源层的资源管理包括发现匹配、优化调度和实时监控等活动。通过计算机集群进行数据挖掘获取故障信息和模型算法信息,但是不仅仅关注故障和模型算法内容,对于某些故障采用某些算法的偏好性和可行性等都在获取范围内。同时,经济性和市场竞争^[8]等因素也是资源匹配的参考因素,即针对飞机故障信息提供云计算环境下最优的故障诊断、故障预测模型,并输出故障维修结果。

3) 服务层:服务层包括传统 PHM 架构中的数据处理、特征值提取、故障诊断、故障预测、状态监控等。

4) 表达层:用户通过人机交互界面选择需要的服务,调用平台中的虚拟资源,最终满足需求。

2 基于粒子群的云计算 PHM 资源分配模型

基于云计算的 PHM 体系中用户和需求是动态变化的,为实现一对多、多对一、多对多的应用模式,需要将系统模型算法资源进行抽象、封装、优化和组合。有效的匹配方法不仅可以较高地覆盖飞机数据,而且能优化调用服务时间。本文提出一种基于粒子群算法的资源分配方法。

2.1 粒子群算法

粒子群算法是 1995 年由社会心理学家 Kennedy 和 Eberhart 共同提出的一种智能仿生方法,现已成为当下主流的智能优化算法^[9-12]之一。

用 $PSO = (Z_i^t, V_i^t, P_i^t, P_g^t, \chi)$ 定义粒子群算法。

1) $Z_i^t = (z_{i1}^t, z_{i2}^t, \dots, z_{ik}^t)$ 为第 t 次迭代时第 i 个粒子 ($i = 1, 2, \dots, m$) 的 k 维位置向量。

2) $V_i^t = (v_{i1}^t, v_{i2}^t, \dots, v_{ik}^t)$ 为第 t 次迭代时粒子 i 的飞行速度。

3) $P_i^t = (p_{i1}^t, p_{i2}^t, \dots, p_{ik}^t)$ 为 t 次迭代后粒子 i 当前最优解。

4) $P_g^t = (p_{g1}^t, p_{g2}^t, \dots, p_{gk}^t)$ 为 t 次迭代后整个粒子群的当前最优解。

5) χ 为粒子群收敛因子,可以参考文献 [13] 得到:

$$\chi = 2 / \sqrt{(2 - l - \sqrt{l^2 - 4l})^2}, l = c_1 + c_2, l > 4 \quad (1)$$

粒子在每次迭代中,可根据下式更新速度和位置:

$$V_i^{k+1} = V_i^k + \chi [c_1 r_1 (P_i^t - Z_i^t) + c_2 r_2 (P_g^t - Z_i^t)] \quad (2)$$

其中, c_1 和 c_2 为加速常量, $r_1 \sim U(0, 1)$ 、 $r_2 \sim U(0, 1)$ 为 2 个相互独立的随机函数。由式 (2) 可知, c_1 调节

粒子飞向个体最优方向的步长, c_2 调节粒子向全局最优方向的步长。

2.2 云计算 PHM 资源分配模型

资源分配的目的是合理地调度虚拟资源网络,根据资源节点配置(由资源供应商提供)处理用户发出的请求,按照调度策略分配实际资源^[14],如图 4 所示。

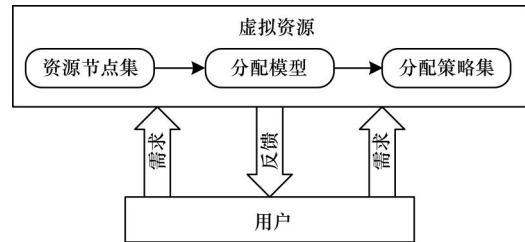


图 4 资源分配示意图

2.2.1 资源分配模型因素描述

资源分配是一个动态平衡过程,在分配性能最高的前提下,尽量使用户和资源供应商的利益最大花费最小。资源供应商提供 PHM 模型算法等资源以满足不同用户的不同需求,也可理解为通过需求来分析资源供应商的收益。所以,本文比较资源节点与用户需求、资源节点与用户之间的函数关系,并用粒子群算法求解。资源分配结构如图 5 所示。

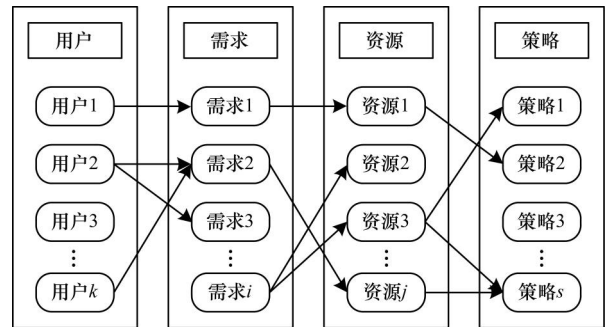


图 5 资源分配结构

用户用 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_k\}$ 描述。每个资源节点上的用户需求用 $A = (A_{id}, link)$ 描述:

1) A_{id} 表示需求编号。

2) $link = (pre, sus)$ 表示各需求的前驱和后继。

资源节点用 $R = (R_{id}, Type, Rl, Rt, n)$ 描述:

1) R_{id} 表示 R 的编号。

2) $Type = \{ARMA, FNN, K2, PSO\}$ 表示模型算法的类型,但不仅仅是所列举出的 4 种类型,要根据实际 PHM 资源供应商信息量而定。

3) $Rl = \{allow, avel, nowl, maxl, minl, cir1, max, min, cir, now\}$ 表示每个资源节点的需求数量,分别表示一个资源允许连接总数、平均连接数、当前连接数、最大连接数、最小连接数、临界连接数、最大资源数、最小资源数、临界资源数和当前资源数。

4) Rt 表示需求 A_i 与资源 R_j 的连接结果,以矩阵 $Rt_i = \{rt_1, rt_2, \dots, rt_m\}^T$ 表示。其中, $rt_j = 1$ 表示发

生连接,并累计连接数量,直到3)中 $allow1$ 达到上限,0表示未发生连接, m 表示资源节点总数。

5) n 表示一个资源节点上的需求总数。

分配性能用 $S = (U, A, Q, F)$ 表示:

1) $Q = \{cost, benefit, time, ava\}$ 表示 PHM 系统的服务质量,分别表示成本、收益、时间和资源效率, $Q(i, j)$ 表示需求 A_i 与资源节点 R_j 连接后的服务质量。为使 Q 最优,应该使成本最小、收益最大、分配时间最短、资源效率最高,即 $Q_{(i,j)} = \{\min(cost), \max(benefit), \min(time), \max(ava)\}$,为方便不同数据的比较,将上述4个因素分别作归一化处理^[15],使 $Q_{(i,j)}$ 中每个值都小于1,即 $Q_{(i,j)} = \{\min(C(A)), \max(B(A)), \min(T(A)), \max(A(A))\}$,其中, $C(A) = cost_c / cost$ 表示成本最小化; $cost_c$ 是用户、资源供应商和网络成本组成之和,是 $cost$ 的主体部分。

$B(A) = (benefit_c - cost_c) / cost$ 表示收益最大化, $benefit_c$ 是用户、资源供应商收益组成之和,是 $benefit$ 的主体部分。

$T(A) = time_c / time$ 表示时间最小化, $time_c$ 是资源分配时间、运行时间和回收时间组成之和,是 $time$ 的主体部分。

$A(A) = (cir + cir1) / (cir + \sum R_j)$ 表示需求与资源之间的分配效率最大化,即获得最大的利用率。

$$Q(i, j) = \max(Q_{(i,j)}) \quad (3)$$

为求得式(3)的数值,将其转化为:

$$Q(i, j) = \max((\omega_2(B(A)) + \omega_4(A(A))) / (\omega_1(C(A)) + \omega_3(T(A))))$$

其中, $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ 为系数,且在 $0 \sim 1$ 之间。

2) F 是效用函数,由用户和资源提供方的效用两部分组成。当 Q 达到最优时,要使用户和资源提供商都尽量达到最大化收益,达到一种趋向平衡。

用户的效用函数为:

$$F_1 = F_1(k, j) F(U, A) Q(i, j) \quad (4)$$

资源提供商效用函数为:

$$F_2 = F_2(i, j) (1 - Q(i, j)) \quad (5)$$

其中, $F_1(k, j)$ 是 U 对 R 的收益(功能性), $F_2(i, j)$ 是资源提供方对 R 的收益, $F(U, A)$ 是用户与需求之间的对应关系。因为资源提供方提供模型算法等资源以满足用户需求,所以 $F_2(i, j)$ 可理解为 A 对 R 的功能性收益。

分配策略用 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_s\}$ 描述。在满足限定的要求下,存在最优分配策略 V ,使得 k 个用户对资源的功能性收益 F_1 大于等于 i 个需求对资源的收益 $F_2 (k \geq i)$ 。

2.2.2 基于粒子群的云计算 PHM 资源分配方法

本文的粒子群优化算法是通过用户与需求共同确定的,即通过用户与资源的函数来获得粒子搜索到的最优位置,通过需求与资源函数来获得整体粒子群搜索的最优位置,也就是说,一个粒子代表一个

用户,整体粒子就代表整个 PHM 系统中云计算环境下的需求。这样既可以有效地使每个用户获得最大收益,也可以使资源供应商获得全局最优。

根据粒子群算法的执行规律,可按如下步骤求解:1) 选择算法阈值(PHM 系统用户数,资源节点,需求数,最大迭代次数)。2) 设置计时器,以便记录 PSO 整个过程时间。3) 初始化粒子的位置,获得初始 Q 值、初始 F_1 和 F_2 。4) 初始化每个粒子的速度。5) 根据式(3)的 Q 值找到全局最优 F_2 。6) 计算 F_1 和 F_2 ,当 $F_1 \geq F_2$ 时,不断更新 Q, v, z, F_1, F_2 。直到达到最大迭代次数或是 F_1 小于 F_2 操作结束。

3 仿真实现及实验分析

选用 CloudSim 仿真平台进行仿真实验^[16],将基于粒子群算法的云计算 PHM 资源分配模型和 CloudSim 中的资源模型进行匹配,通过实验分析改进模型。

3.1 仿真实现

CloudSim 支持大型云计算基础设施的建模与仿真,可以实现用户到需求的多对多关系、需求对虚拟机的多对多关系、虚拟机到分配策略的多对多关系,且与本文需解决的 PHM 资源分配结构一一对应。CloudSim 仿真平台的搭建采用 JDK1.7 编译环境、CloudSim2.1 仿真云计算环境及 MyEclipse8.5 开发工具。运用 CloudSim 进行资源调度仿真步骤如下:1) 初始化 GridSim 库,GridSim 层用来提供云计算中的 PHM 资源。2) 创建 Datacenter 以及 DatacenterBroker。创建 Datacenter 包括创建虚拟机列表、创建 PE 列表,进而处理虚拟机信息的查询。创建 DatacenterBroker 以便根据所求 Q 值协调用户与需求。3) 创建虚拟机对象。对虚拟机的参数进行设置,并提交给代理 DatacenterBroker。4) 创建云任务。对云任务的参数进行设置,并提交给代理 DatacenterBroker。5) 启动仿真实验。6) 资源分配实施,调用需求(任务)分配策略到资源(虚拟机)上。7) 结束仿真实验并统计结果。

假设资源数为20,需求数为30,用户数为30,得到最大迭代次数为300的情况下, F_1 与 F_2 的变化关系如图6所示。

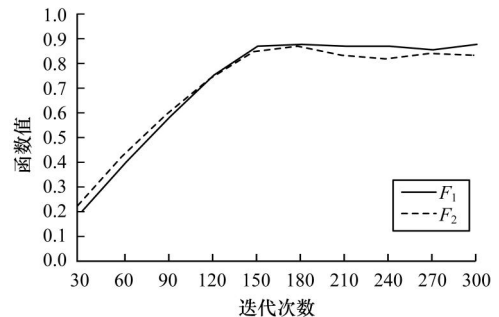


图6 F_1 与 F_2 变化关系

通过分析可得, PSO 算法保证了 F_1 大于等于 F_2 , 且迭代次数小于 120 阶段, 两者数值变化不大, 在迭代次数超过 150 时, F_1 和 F_2 趋于平衡, 说明资源分配较顺利, 同时也验证了该算法进行资源分配的可行性。

3.2 实验结果分析

对比分析传统的分配方法轮循 (Round Robin, RR) 算法与粒子群算法在分配中的效率和效用。在 CloudSim 平台上, 分别进行 RR、PSO 仿真实验并记录相关数据以对比分析。

1) 响应效率。云计算中的需求响应效率受需求数量和分配算法影响, 本文首先假定资源数量为 30, 分别在需求数量为 10、20、30 的情况下进行 20 次资源分配, 并取 20 次的平均值作为数据依据。算法效率比较如图 7 所示。RR 算法因为动态适应性较差, 需求响应时间越来越多且时间变化较大; PSO 算法能够自主适应且需求响应时间变化较平稳。通过分析可得, PSO 算法在进行资源分配的时间上优于 RR, 而且随着资源数量的增大, PSO 算法效率优势越明显。

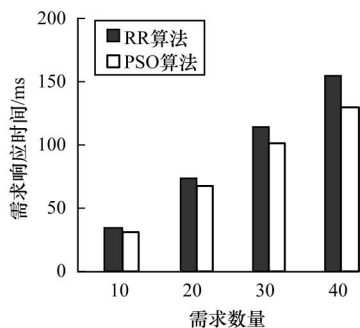


图7 算法效率对比

2) 响应效用。初始阶段 RR 算法与 PSO 算法的效用值差别不大, 随着需求数量的增大, 2 种算法的效用值虽然都逐渐增大, 但是 PSO 增大的幅度更多。分析可得, PSO 算法在进行资源分配的时间上优于 RR 算法, 而且随着资源数量的增大, PSO 算法效率优势越明显。算法效用值对比如图 8 所示。

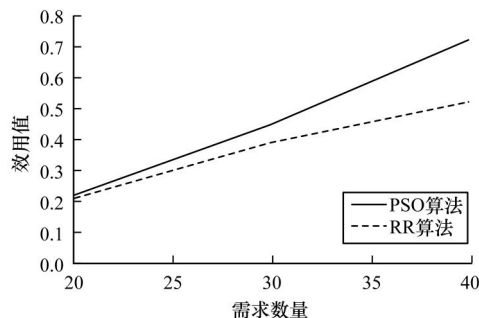


图8 算法效用值对比

4 结束语

本文对基于云计算的 PHM 架构进行研究, 针对其中的虚拟层资源分配环节提出基于粒子群算法的

分配模型, 并结合 CloudSim 仿真平台进行仿真实验, 结果表明, 与传统 RR 算法相比, 该算法效率与效用优势明显, 有效提高 PHM 系统的通用性可知识利用率。

参考文献

- [1] 夏立群, 田一松, 王 可. 浅谈作动器健康管理技术 [J]. 系统仿真学报, 2009, 20 (增 2): 295-299.
- [2] AHMADI A, FRANSSON T. Integration of RCM and PHM for the Next Generation of Aircraft [C] // Proceedings of International IEEE Aerospace Conference. Big Sky, USA: [s. n.], 2009: 1-9.
- [3] 李向前. 复杂装备故障预测与健康管理的不关键技术研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2014.
- [4] 李振翼. PHM 对提升新一代飞机综合保障能力的研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- [5] 杨 洲, 景 博, 张 勃, 等. 飞机故障预测与健康管理系统应用模式研究 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (9): 2061-2063.
- [6] 罗军舟, 金嘉晖, 宋爱波, 等. 云计算: 体系架构与关键技术 [J]. 通信学报, 2011, 32 (7): 3-21.
- [7] 肖明清, 杨 召, 薛辉辉, 等. 云计算及其在测试领域的应用探索 [J]. 空军工程大学学报 (自然科学版), 2015, 16 (1): 50-55.
- [8] 扣彦敏, 王俊峰, 薛 霄, 等. 集群协同制造服务组合策略比较研究 [J]. 计算机工程, 2016, 42 (12): 208-216.
- [9] 刘志雄, 梁 华. 粒子群算法中随机数参数的设置与实验分析 [J]. 控制理论与应用, 2010, 27 (11): 1489-1496.
- [10] CHEN C L, DONG D Y, CHEN Z H. Grey Systems for Intelligent Sensors and Information Processing [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2008, 19 (4): 659-665.
- [11] 王 娜, 卫 波, 王晋东, 等. 基于混沌多目标粒子群算法的云服务选择方法 [J]. 计算机工程, 2014, 40 (3): 23-27.
- [12] ZHAO Xinchao, SONG Boqian, HUANG Panyu, et al. An Improved Discrete Immune Optimization Algorithm Based on PSO for QoS-driven Web Service Composition [J]. Applied Soft Computing, 2012, 12 (8): 2208-2216.
- [13] 周相兵. 一种基于粒子群优化的虚拟资源分配方法 [J]. 重庆邮电大学学报 (自然科学版), 2014, 26 (5): 686-693.
- [14] RAO L, LIU X, LE XIE, et al. Minimizing Electricity Cost: Optimization of Distributed Internet Data Centers in a Multi-electricity-market Environment [C] // Proceedings of IEEE INFOCOM'10. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2010: 1145-1153.
- [15] LECUE F, MEHANDJIEV N. Seeking Quality of Web Service Composition in a Semantic Dimension [J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2011, 23 (6): 942-958.
- [16] 李 超. 基于改进粒子群算法的云计算资源调度研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.

编辑 索书志