



面向多样化需求的 MRO 服务资源配置模型与算法

马书刚^{1,2}, 杨建华¹, 郭继东¹

1 北京科技大学 东凌经济管理学院, 北京 100083

2 河北经贸大学 商学院, 石家庄 050061

摘要:针对大型复杂企业维修任务集的多服务需求点和多样化需求特征,基于服务需求视角,定义一类多服务需求点下的MRO服务资源配置问题,建立以MRO服务提供商整体服务成本为优化目标,同时考虑资源紧张度、信任度和多服务需求点不同工期要求的问题模型;针对模型中的关键参数(即服务成本和资源紧张度)的特征进行分析,并给出相应的度量方法;在此基础上,设计改进的模拟植物生长算法实现求解,算法通过启发式获得初始可行解,并进行敏感性分析。研究结果表明,MRO服务资源配置模型和算法是可行和有效的,服务成本的波动、信任度和资源紧张度的变化对于资源配置结果均有影响,模型能够有效提高维修服务成本的估算能力,同时能够保持MRO服务提供商资源配置的稳定性。

关键词:服务资源配置;维修;多服务需求点;模拟植物生长算法

中图分类号:F273.4

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1672-0334.2014.04.012

文章编号:1672-0334(2014)04-0133-12

1 引言

大型复杂企业一般下设多个或几十个分公司,而由于多元化经营,分公司经营领域也较为复杂,如采矿、服装和电子等领域。大型生产设备具有高度的复杂性和专业性,使此类设备维修的复杂度增加,当这类设备出现问题时,需要MRO(Maintenance维护、Repair维修、Operations运行)服务提供商的服务, MRO服务提供商是为大型复杂企业提供设备维修服务的企业。大型复杂企业为了降低整体维修成本,提高维修服务的可靠性,通常统一管理设备MRO服务。由于各分公司生产订单工期不同,需要维修的设备也不同,所以需要在不影响公司正常运行的前提下保证总体维修成本最低。在MRO服务资源配置过程中,涉及到维修人员、检测设备和备件等资源在分公司之间的动态调度,由于维修人员具有不同的技能和不同的服务水平,既要保证分公司生产工期的要求,又要保证人员的合理配置,尽可能地减少人力资

源的浪费。由于设备维修具有一定的不确定性,所以维修时间和维修费用的估算是服务资源配置中的关键问题,可将分公司作为服务需求点,而在多服务需求点中,设备种类不同、使用时间不同都会影响维修时间和维修费用的估算精度。多服务需求点下送修设备的资源配置是一个涉及服务提供企业内部车辆、维修设备和人员合理调度的问题,与单一服务需求下资源配置的研究成果相比,多服务需求点的、多样化需求的研究少见且有待完善。本研究将多服务需求点的内修和外修服务综合考虑,对资源配置优化进行探讨。

2 相关研究评述

维修设备资源调度已经引起国内外学者的关注,在这类问题中服务需求来自于多个分公司,服务资源包括人员、设备和维修备件等。Li等^[1]针对制造企业中的随机资源配置问题提出一个优化模型,

收稿日期:2013-10-06 **修返日期:**2014-02-28

基金项目:国家自然科学基金(71231001);河北省高等学校科学技术研究项目(QN20131133);河北经贸大学校内科研基金(2014KYQ03)

作者简介:马书刚(1977-),男,河北邢台人,北京科技大学东凌经济管理学院博士研究生、河北经贸大学商学院讲师,研究方向:运营管理和供应链管理等。E-mail:mashugang@126.com

在模型中考虑分配问题的特性,研究模型的收敛性及在仿真中的性能,该模型在分配过程中能够有效进行决策,在物流和生产运营中能够广泛应用;Ekenpenyong等^[2]提出具有可信赖准则的发电机组维修计划模型,该模型包括新约束的维修时间窗,通过实证分析发现,该模型能够得到更多可信赖解;Brumi等^[3]分析不确定活动期下的资源受限项目调度问题,发现项目活动期具有可重复使用资源和不确定期限的特性;黄敏镁等^[4]为解决柔性资源约束的产品开发项目调度问题,考虑项目调度过程中任务的先后约束关系、所需技能以及柔性资源约束,运用网络最大流理论对每项任务的柔性资源配置方案进行求解;陈宁等^[5]为解决多项目管理中共享资源配置问题,运用随机理论确定企业资源多项目等效效率转换系数,建立资源配置效率模型,实现资源的合理配置;唐海波等^[6]为解决MRO服务提供商预维修调度问题,提出基于设备问题预期的预维修优化调度方法;Jha等^[7]、Martorell等^[8]、Ashayeri^[9]和de Castro等^[10]分别从维修资源有效性的角度分析不同领域维修资源的优化配置问题;Celen等^[11]考虑预防性维修中维修策略的具体方法;Saif等^[12]提出基于仿真计算的两层优化方法,解决电力系统的资源优化配置,第一层将动态的最优潮流线路融入到仿真方法中,第二层采用粒子群算法优化第一层的输出,优化目标为成本最小化,满足可信赖度约束;Tsai等^[13]在云计算环境中针对任务调度和资源配置提出改进模型,考虑成本和时间两个优化目标,成本包括处理和接受成本,时间包括接受、处理和等待时间;Liang等^[14]使用变邻域搜索方法解决多目标资源配置优化问题,特别是最小化成本和最大化效率;Khoshjahan等^[15]分析每一个活动具有截止期的资源受限项目调度问题,目标函数为提前和滞后完工的成本最小化;Jia等^[16]将工厂布局方法和智能算法融合在一起解决资源受限的项目调度问题,其中活动由资源和临时的约束组成,活动之间需保持先后顺序,再利用智能算法求

解。

MRO资源配置问题已取得较为丰富的研究成果,但结合实际情况看,当前研究仍存在以下不足。①大多数研究没有考虑服务过程中人力和维修设备调度问题,而在实际设备送修过程中人员、维修设备和运输车辆是一个服务整体,缺少其中一项都无法达到整体最优;②在实际的资源配置问题中,资源的紧张度对服务链的稳定性具有重要意义,送修资源越紧张,资源配置服务链越不稳定,易使服务发生补救,影响服务的效果,但已有研究并没有考虑资源的紧张度;③由于设备维修时间和维修成本具有不确定性,合理的时间和成本估计对资源配置中维修计划的制定具有指导性,而对成本估算方法的研究不多。综合考虑上述因素,本研究将服务时间、服务成本和资源紧张度作为建模的关键参数,并将人员和维修机器作为一个整体服务单元,给出参数的合理估算方法。在此基础上建立维修服务链多服务需求的MRO资源配置模型,满足维修多服务需求点资源信任度、工期、成本和资源紧张度约束,并改进模拟植物生长算法进行模型求解。

3 问题描述和建模关键参数分析

3.1 问题描述

大型复杂企业为控制设备维修的整体成本,在固定时刻 t_0 接收维修服务请求,根据目前设备运行状况申报需要维修设备的数量,多服务需求点资源配置时间如图1所示,横轴为时间轴。维修服务开始前为申报期,当申报期结束后,根据所需维修设备的种类和数量,选择合适的MRO服务提供商,在满足时间约束下,降低整体服务成本。维修服务需求点 A_1 、 A_2 和 A_3 在时刻 t_1 ~时刻 t_3 进行维修设备申报,时刻 t_0 ~时刻 t_4 为资源配置期,时刻 t_4 ~时刻 t_6 为 A_1 维修设备服务期,时刻 t_4 ~时刻 t_5 为 A_2 维修设备服务期,时刻 t_4 ~时刻 t_7 为 A_3 维修设备服务期,时刻 t_6 ~时刻 t_9 为 A_1 生产期,时刻 t_5 ~时刻 t_8 为 A_2 生产期,时刻 t_7 ~时刻 t_{10} 为

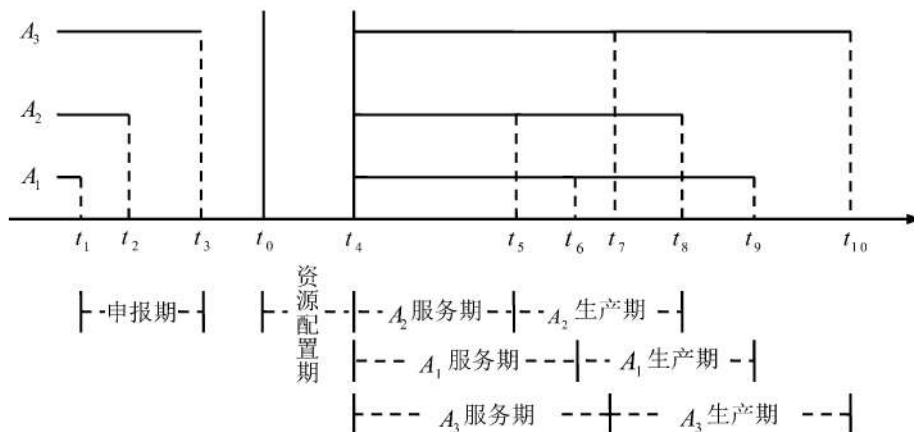


图1 多服务需求点资源配置时间

Figure 1 Resource Allocation Time of Multi-service Demand Points

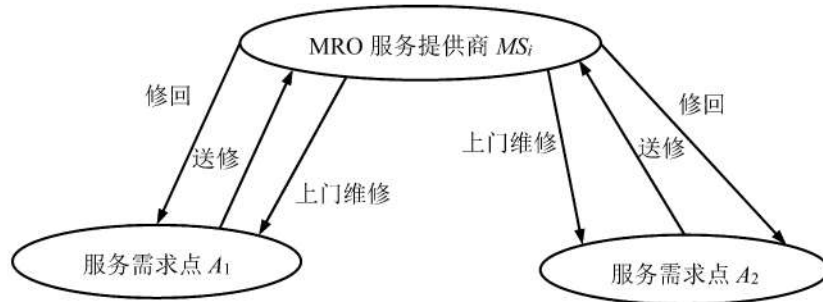


图2 MRO服务的多样化:上门维修和送修

Figure 2 Various MRO Services: Field and Depot Maintenance

A_3 生产期。

在多服务需求点下多MRO服务提供商资源配置与优化问题中,设待维修部件集合为 MP , $MP = \{mp_{11}, mp_{12}, \dots, mp_{BR}\}$, mp_{BR} 为维修服务网络中第 B 个服务需求点中第 R 个待维修部件, $B = 1, 2, \dots, M, R = 1, 2, \dots, N, M$ 为服务需求点总数量, N 为待维修部件总数量,部件是形成维修服务任务的最小单元。在多服务需求点中,MRO服务提供商的总数量根据维修设备的大类进行划分,在同一个服务需求点内,维修设备所属的大类不同,即使不同服务需求点中待维修设备类型相同,设备的部件也会不同。

当部件的维修较简单时,一般可由MRO服务提供商派出人员携带检测设备、维修工具和可替换部件前往服务需求点进行维修,即上门维修;当维修部件工艺较复杂时,所需检测设备和维修工具较多,比较适合送修方式,即由服务提供商派出车辆,将维修部件运至MRO服务提供商的维修站进行维修,待修复后再返回服务需求点安装测试,运输费用由服务需求方承担。上门维修和送修的MRO服务如图2所示。

3.2 建模关键参数分析

从上述问题分析可以看出,MRO服务提供商的服务成本和服务资源的紧张度对于服务提供商的选择以及保持服务资源配置的稳定性具有重要意义,是建立问题模型的关键参数。但是,这两种关键参数在实际管理过程中存在量化困难的情况,针对这一问题,本研究首先给出服务成本和资源紧张度的计算方法。

3.2.1 MRO服务提供商的服务成本估算

在多服务需求点下MRO服务资源配置模型中,维修服务成本是优化目标中非常重要的一个指标,提供商承担不同类型设备的维修服务工作,为了使客户满意且保证服务利润,MRO服务提供商需要对维修服务任务进行合理的成本估算,报价过高,会使客户流失,报价过低,无法保证自身利益。由于客户使用的设备在类型和型号等方面存在较大差异,所以对设备存在的问题进行合理评估同时给出合理报价是一个较难解决的问题。传统的设备维修成本的估计主要依靠专家的经验,无法提供准确、可靠的定

量评估方法。基于案例推理是在人工智能领域中一个重要的研究方向,主要工作原理是在对具体问题的分析和求解中,采用过去类似的解决方法分析当前现有问题,并根据二者之间存在的变化做一定的调整,以此得到具体解决方法。根据多服务需求点维修项目历史数据建立MRO服务成本案例数据库,基于案例的推理使信息的获取更加简单可行,能够提高解决问题的准确度和可靠度。目前,基于案例的推理已经广泛应用于物流外包、管理决策和软件设计等领域,同时越来越受到相关研究领域专家的重视,这种问题的核心问题在于案例属性指标的设置、相似性度量方法的设定和估算结果的调整等方面。本研究将基于案例推理应用到维修设备成本评估中,通过分析发现该方法能够有效地对不同种类设备和复杂问题进行较好的成本估算。

(1) 基于案例推理的维修服务成本估算步骤

以MRO服务成本案例数据库中维修设备项目作为参考,根据相似度方法检索与当前项目最为相似的案例,并根据二者在维修条件和人员配置等方面的具体情况对估算结果进行调整,得到当前项目的估算结果。

步骤1 将待评估设备维修服务成本的估算案例作为目标案例,通过专家对目标案例的属性进行取值。

步骤2 将目标案例进行分解,具体到设备级别,然后检索案例库,查找与当前维修设备相似的案例。

步骤3 根据调整原则对相似案例中的维修服务报价进行修改,求得当前待维修服务的报价。

步骤4 将新案例存储到案例库。

(2) 案例的描述

案例的描述方式会影响检索的准确度,比较常见的案例描述方式有文字描述、列表描述和结构化描述^[17]。本研究采用树型结构描述案例,顶部是MRO服务提供商所在的行业,如电力设备、交通设备、机械制造设备和服装加工设备;第2层为服务范围,如服装加工领域中,包括服装设计使用的CAD软件、用于裁剪衣片的数控裁床和用于服装生产的智能吊挂系统等;第3层为不同服务范围内使用的

设备品牌,如服装生产智能吊挂系统使用瑞典ETON等;第4层为不同设备在当次服务中的问题,如吊挂系统出现主轨道问题、接收轨道问题、智能终端问题和传动链问题等;第5层为出现问题的主要原因,这有可能是多方面的;第6层为针对不同原因采用不同的方法;第7层为采用不同方法对应的报价。整个案例可分为案例级、设备级、部件级3个级别。这里存储的报价是针对不同部件的,因为在服务过程中设备的种类较多,存在的问题会出现在设备不同部件,所以完全按照案例的相似度进行检索,满足检索要求的案例会较少。

(3) 案例的相似度度量

相似度是案例检索的核心,目前用于相似度度量的方法主要是K近邻法^[17],该方法是一种基于距离的度量方法,首先对属性设定相应的权重,再采用加权的方法评价目标项目与案例的相似度^[17]。本研究借鉴此方法分析项目之间的相似度,大多数研究按照两个项目之间的相似度进行案例的选取^[18],本研究针对设备级进行相似度分析,以确保维修报价的准确性。

常用的基于距离的度量函数包括Euclidean距离、Manhattan距离和Minkowski距离^[18],距离度量函数如下。

Euclidean距离为

$$ED(P_b, P_g) = \sqrt{\sum_{v=1}^V (f_{bv} - f_{gv})^2} \quad (1)$$

Manhattan距离为

$$MAD(P_b, P_g) = \sum_{v=1}^V |f_{bv} - f_{gv}| \quad (2)$$

Minkowski距离为

$$MID(P_b, P_g) = \sqrt[\alpha]{\sum_{v=1}^V |f_{bv} - f_{gv}|^\alpha} \quad (3)$$

其中, P_b 为待估算的目标项目, P_g 为案例库中检索项目, f_{bv} 为项目 b 的第 v 个特征属性值, f_{gv} 为项目 g 的第 v 个特征属性值, V 为特征属性值总个数, α 为项目 P_b 与 P_g 之间的范数。

在已有研究中,多数案例推理采用欧式距离方法^[18]设定案例属性指标的权重。 P_b 与 P_g 的欧式距离为

$$DIE(P_b, P_g) = \sqrt{\sum_{v=1}^V (W_v |f_{bv} - f_{gv}|)^2} \quad (4)$$

其中, W_v 为第 v 个特征的权重, $W_v \in [0, 1]$ 。

在已有研究的基础上,本研究提出设备维修服务成本估算的相似度方法,将维修服务分为案例级、设备级和部件级3个级别。在进行设备维修时,通常是按照部件级进行问题的分析、人员的配置和部件的替换。成本的估算通常以整个设备为计算单元,所以在计算相似度时也以整个设备为标准。案例库中与当前服务设备品牌完全相同、问题完全相同的案例较少,设备相似度由各个部件相似度综合

计算得到,所以计算相似度时需要确定部件各个属性指标的相似度。首先根据欧氏距离计算部件级的相似度,然后再按照部件级对应的设备品牌计算设备级相似度。将案例之间的相似度计算^[18]方法加以改进,应用到本研究中,即为

$$SIP_u(P_b, P_g) = 1 - DIP_u(P_b, P_g) \quad (5)$$

其中, $SIP_u(P_b, P_g)$ 为 P_b 与 P_g 在部件级第 u 个部件维修的相似度, $DIP_u(P_b, P_g)$ 为 P_b 与 P_g 在部件级第 u 个部件之间的距离。

$$SID_F(P_b, P_g) = \sum_{u=1}^U \frac{SIP_u(P_b, P_g)}{BRP_u} \quad (6)$$

其中, $SID_F(P_b, P_g)$ 为 P_b 与 P_g 在设备级第 F 个设备维修的相似度, U 为部件的总数量, BRP_u 为第 u 个部件所属设备的品牌值。

(4) 案例的调整

在MRO服务提供商服务成本评估中,案例的调整是非常重要的一个步骤,主要是针对案例成本评估的调整,成本评估一般是根据设备级进行计算。目前案例的调整方法主要采用领域知识更新和组合策略,领域知识更新是将无关的属性进行过滤,组合策略是利用案例中多个相似的设备级成本组合求解^[17]。

在本研究中,由于当前项目与案例中具有完全相同的设备的可能性较小,所以根据问题特征,改进组合策略方法,对案例成本进行评估。首先,获取当前项目中需要维修的设备总数和每个设备出现的所有问题,针对当前项目中每一个需要维修的设备,在案例库中进行设备级检索,获取与当前设备相似度最高的相关设备集;然后,对当前设备进行成本估算;最后,对当前项目中所有的设备进行成本估算,由此得到当前项目成本估算值。维修成本的变动与当前可用员工数量、备件品牌有很大的关系,不同品牌的备件成本也有一定的变动。

估算的设备维修成本为

$$DMC_d = \sum_{l=1}^K \frac{SID(d, d_l)}{\sum_{l=1}^K SID(d, d_l)} [DSC_{d_l} + CR_d - CRD_{d_l} + \sum_{a=1}^Q (CM_{da} - CMD_{d_l, a})] \quad (7)$$

其中, DMC_d 为第 d 个待评估设备成本, d 为当前待评估设备, d_l 为与当前待评估设备相似的第 l 个案例设备, K 为相似案例设备数量, $SID(d, d_l)$ 为当前设备与案例设备之间的相似度, DSC_{d_l} 为第 l 个相似案例设备的维修成本, CR_d 为根据当前待评估设备维修可用员工数评估的人员成本, CRD_{d_l} 为根据第 l 个相似案例维修设备可用员工人数评估得到的人员成本, Q 为当前设备出现问题的数量, CM_{da} 为当前待评估设备中维修第 a 个问题可用备件成本, $CMD_{d_l, a}$ 为案例设备中维修第 a 个问题可用备件成本。

当前待评估项目维修成本为

$$CB = \sum_{d=1}^D DMC_d \quad (8)$$

其中, CB 为当前待评估项目所有设备的维修成本, D 为当前待评估项目的设备总数量。

3.2.2 资源紧张度

在多服务需求点下的MRO资源配置模型中,资源紧张度是衡量服务提供商的重要约束条件。服务资源配置过程中,为防止资源的中断而发生服务延期,需要考虑服务资源的紧张度,服务资源越紧张,发生服务中断的可能性越大。资源紧张度在项目管理过程中被广泛采用^[19-20],褚春超^[19]采用资源使用比例峰值的办法衡量资源的紧张度,即

$$\alpha_q = \max \sum_{z=1}^Z \frac{sr_{z0}}{SR_{t_0}} \quad (9)$$

$$t_0 \in [ST_q, ST_q + DR_q]$$

其中, α_q 为待求工序 q 的资源紧张程度, SR_{t_0} 为项目在时刻 t_0 的资源供应限量, sr_{z0} 为在时刻 t_0 执行的已知工序 z 所需的资源量, Z 为在时刻 t_0 执行已知工序的总数, ST_q 为待求工序 q 的开始时间, DR_q 为待求工序 q 的工期。

基于以上资源紧张度的分析,依据问题实际特征,本研究在服务资源配置过程中考虑运输车辆、服务人员、送修服务资源和备件4个方面的资源紧张程度。

设多服务需求点在维修设备送修中需使用 λ 种类型车辆,车辆资源紧张度为

$$\alpha^{\lambda} = \max_{\lambda} \left(\frac{rc_{\lambda}}{ac_{\lambda}} - m_{\lambda} \right) \quad (10)$$

其中, α^{λ} 为车辆资源紧张度; rc_{λ} 为多服务需求点使用第 λ 种类型车辆的数量; ac_{λ} 为MRO服务提供商第 λ 种类型车辆的可用量; m_{λ} 为第 λ 种类型车辆的可替代性, $0 \leq m_{\lambda} \leq 1$ 。

设多服务需求点在上门维修中调用 β 种类型的服务人员,服务人员资源紧张度为

$$\alpha^{\beta} = \max_{\beta} \left(\frac{rb_{\beta}}{ar_{\beta}} - rl_{\beta} \right) \quad (11)$$

其中, α^{β} 为服务人员资源紧张度; rb_{β} 为多服务需求点调用第 β 种类型服务人员的数量; ar_{β} 为MRO服务提供商第 β 种类型服务人员的可用量; rl_{β} 为第 β 种类型服务人员的可替代性, $0 \leq rl_{\beta} \leq 1$ 。

送修服务资源紧张度为

$$\alpha^m = \max_{\gamma} \left(\frac{rm_{\gamma}}{am_{\gamma}} \right) \quad (12)$$

其中, α^m 为送修服务资源紧张度, rm_{γ} 为送修服务任务所需第 γ 种类型资源数量, am_{γ} 为MRO服务提供商第 γ 种类型资源数量。

备件资源紧张度与备件的数量紧密相关,但服务需求企业对于MRO服务提供商备件的数量评估不太精确,可根据MRO服务提供商的企业规模进行专家评价,即

$$\alpha^{sp} = \alpha_H^{sp} \quad (13)$$

其中, α^{sp} 为备件资源紧张度; α_H^{sp} 为第 H 类企业规模下MRO服务提供商的资源紧张度; H 为企业具体规模,根据具体行业进行细分。

$$\alpha = \omega_1 \alpha^{rc} + \omega_2 \alpha^{rb} + \omega_3 \alpha^{rm} + \omega_4 \alpha^{sp} \quad (14)$$

其中, α 为MRO服务提供商整体资源紧张度, ω_L 为第 L 种资源紧张度的权重, $0 \leq \omega_L \leq 1$, $\sum_L \omega_L = 1$, $L = 1, 2, 3, 4$ 。

4 MRO服务资源配置模型

构建MRO服务资源配置模型的目标是最小化所有服务需求点的服务成本,合理配置MRO资源以保证完成服务任务。根据建模关键参数服务成本和资源紧张度的度量方法,构成整个多服务需求点下MRO服务资源配置模型假设条件如下。

(1) 各服务需求点与各MRO服务提供商之间的距离已知。

(2) 在服务资源配置过程中,包括上门维修和送修两种类型。

(3) 大型复杂企业能够有效地获取MRO服务提供商的车辆、人员、服务和备件等资源的紧张度。

(4) 大型复杂企业能够对维修设备按照行业标准进行任务分解。

(5) 各服务需求点上门维修和送修设备服务工期相同。

(6) 同一类维修设备的所有服务任务均由一个MRO服务提供商完成,不考虑同一类维修设备在不同MRO服务提供商之间的转运和维修任务。

(7) 大型复杂企业的各子公司位于同一个大服务区域,即各服务需求点之间的距离较近,这样在多服务需求点资源配置才具有现实意义。

在建模中,不仅要考虑各潜在MRO服务提供商的上门维修成本、送修成本、服务时间和MRO服务提供商的信任度,还要考虑人员、服务设备、备件和运输车辆的资源紧张度。现给出变量含义如下。

i 为所有服务需求点的服务类型, $i = 1, 2, \dots, n$, n 为服务类型数量;

EP_i 为承担第 i 种服务类型所有维修任务的MRO服务提供商集合, $EP_i = \{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{ik_i}\}$;

k_i 为承担第 i 种服务类型维修任务的MRO服务提供商的数量;

p_{ir} 为有能力承担第 i 种服务类型任务的第 r 个MRO服务提供商;

$$P_{ir} = \begin{cases} 1 & \text{第 } i \text{ 种服务类型的任务由第 } r \text{ 个 MRO 服} \\ & \text{务提供商完成} \\ 0 & \text{第 } r \text{ 个 MRO 服务提供商不承担服务任务} \end{cases};$$

nc_{ij} 为第 r 个MRO服务提供商完成第 i 种服务类型的第 j 个上门服务任务的成本, $j = 1, 2, \dots, m$;

dm_{ir} 为第 r 个MRO服务提供商完成第 i 种服务类型的所有上门维修任务的人员转移成本;

dc_{ir} 为第 r 个MRO服务提供商完成第 i 种服务类型

的所有送修任务的车辆运输成本;

mc_{icr} 为第 r 个 MRO 服务提供商完成第 i 种服务类型第 c 个送修任务的成本, $c = 1, 2, \dots, I, I$ 为第 i 种服务类型送修任务的数量;

TP_{ir} 为第 r 个 MRO 服务提供商完成第 i 种服务类型所有任务的信任度;

MT_{sir} 为第 r 个 MRO 服务提供商承担 A_s 服务需求点下第 i 种服务类型的所有上门维修服务任务的最后完工时间, $s = 1, 2, \dots, S, S$ 为服务需求点数量;

LT_{sir} 为第 r 个 MRO 服务提供商承担 A_s 服务需求点下第 i 种服务类型的所有送修服务任务的最后完工时间;

SC 为所有多服务需求点 MRO 服务提供商的服务总成本;

α_{ir} 为第 r 个 MRO 服务提供商完成第 i 种服务类型所有任务的资源紧张度;

ADT_{si} 为 A_s 服务需求点下第 i 种服务类型的上门维修和送修服务完工期;

MST 为由大型复杂企业设定的 MRO 服务提供商整体服务资源信任度的最小值;

MSE 为由大型复杂企业设定的 MRO 服务提供商整体服务资源紧张度的最高值。

基于以上模型的描述和假设, 建立运输成本和维修成本最小化为目标的多服务需求点 MRO 服务资源配置模型。

目标函数为

$$\min SC = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{r=1}^{k_i} nc_{jir} p_{ir} + \sum_{i=1}^n \sum_{r=1}^{k_i} (dm_{ir} p_{ir} + dc_{ir} p_{ir}) + \sum_{i=1}^n \sum_{b=1}^l \sum_{r=1}^{k_i} mc_{ibr} p_{ir} \quad (15)$$

约束条件为

$$\sum_{r=1}^{k_i} p_{ir} = 1, p_{ir} \in EP_i \quad (16)$$

$$\prod_{i=1}^n \sum_{r=1}^{k_i} TP_{ir} p_{ir} \geq MST \quad (17)$$

$$\max \left(\sum_{r=1}^{k_i} MT_{sir} p_{ir}, \sum_{r=1}^{k_i} LT_{sir} p_{ir} \right) \leq ADT_{si} \quad (18)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{r=1}^{k_i} \alpha_{ir} p_{ir} \leq MSE \quad (19)$$

目标函数(15)式为多服务需求点 MRO 服务提供商的维修成本和运输成本, 约束条件(16)式为对每一类维修任务保证只有一个候选资源承担, 约束条件(17)式为服务资源整体信任度应大于设定的最小值, 约束条件(18)式为保证每个服务需求点任务按时完工, 约束条件(19)式为整体资源紧张度应小于设定的最大值。

5 基于模拟植物生长算法的模型求解

MRO 服务资源配置模型为多约束的 0-1 整数规划模型, 针对这类模型, 若采用分支定界法等精确算法很难在有效时间内实现问题求解, 而由人工智能领域发展而来的模拟进化算法则能够在短时间内获取

问题的优化解, 模拟植物生长算法是其中一类有效的方法。本研究针对 MRO 服务资源配置模型特征, 采用模拟植物生长算法对模型进行求解。

模拟植物生长算法是由李彤等^[21]提出的仿生类随机算法, 该算法利用植物的向光性求解整数规划问题, 随后李彤等^[22]将算法扩展到物流网络的优化、两层规划问题和知识创新等领域。国内外许多学者将实际问题利用模拟植物生长算法进行求解。杨琴等^[23]运用改进模拟植物生长算法实现瓶颈工作站动态调度; 毛崇峰等^[24]构建技术联盟投资决策模型, 应用模拟植物生长算法求解; 丁雪枫等^[25]运用模拟植物生长算法求解虚拟企业选择问题; Rao 等^[26]在电容配置中运用该算法求解得到电容的最优位置。

该算法的具体工作原理在多数文献中均得到充分的分析, 本研究主要关注针对多服务需求点 MRO 资源配置情况设计合理的模拟植物生长算法。

5.1 生长点表示和初始解的启发式方法

(1) 生长点的表示

模拟植物生长算法是将问题求解的可行域当作植物的生长环境, 模拟植物的整个生长过程^[21]。将植物在茎和枝能够长出新茎枝的部位称为生长点, 换言之, 生长点即植物生长细胞, 是模拟植物系统每一次生长的位置点。植物的生长过程是在生长点按不同方向生长, 分枝长度即步长, 步长在整数规划情况下设定为 1^[23]。在优化问题求解中, 首先确定初始可行解作为植物的树根, 以各生长点的形态素浓度值确定新生长点, 以保证茎枝向最优解方向蔓延。其中, 算法设计的关键点在于生长点的表示方法和形态素浓度计算方法。

多服务需求点 MRO 资源配置的模型优化中, 生长点可表示为

$$(3, 4, \dots, 1), (2, 3, \dots, 4), \dots, (4, 3, \dots, r) \quad (20)$$

其中, $(4, 3, \dots, r)$ 为第 1 种服务类型下第 4 个服务提供商完成此类任务, 第 2 种服务类型下第 3 个服务提供商完成此类任务, 以此类推, 第 i 种服务类型下第 r 个服务提供商完成此类任务。

生长点函数值可表示为

$$f(x) = \overline{MD}(x) + \overline{MA}(x) + \overline{MMR}(x) \quad (21)$$

其中, $\overline{MD}(x)$ 为上门维修成本函数值, $\overline{MA}(x)$ 为送修成本函数值, $\overline{MMR}(x)$ 为运输成本函数值, x 为生长点。

目标函数 $f(x)$ 为求总成本的最小化, 可将任意一个细胞的形态素浓度表示为

$$pr_{x_h} = \frac{1}{f(x_h)} \quad (22)$$

其中, pr_{x_h} 为第 h 个生长点的形态素浓度; $f(x_h)$ 为 x_h 的函数值; C 为生长点的总数量。在每次迭代过程中, 根据随机生成的数值落在各生长点形态素浓度对应概率空间的情况, 确定获得优先生长权的生长点。

$x_h = [x_h^1, x_h^2, \dots, x_h^i]$, x_h^i 为第 i 种服务类型任务的候选服务资源取值, 从 x_h 开始生长, 在 x_h^i 取值范围 $[1, k_i]$ 内, 以生长步长 G 沿各个坐标轴的正、负方向做与坐标轴平行的直线段, 在各个线段上寻找新生长点。

(2) 初始可行解的启发式方法

由于本研究分析的资源配置问题较为复杂, 需要考虑多个服务需求点、多个待服务设备和多个服务提供商等因素, 因此设计一个启发式方法求初始可行解, 以提高模型的求解效率。具体步骤如下。

第1步, 按服务提供商的信任度和资源紧张度确定资源配置的优先权, 服务提供商的信任度越大, 资源的紧张度越低, 优先权越高。将信任度指标和资源紧张度指标统一量纲后综合计算, 确定资源配置的优先权。

第2步, 根据优先权对不同类型的服务提供商从大到小排序。

第3步, 依次对多服务需求点进行资源配置, 计算当前优先权最大的服务提供商的服务成本和服务时间。

第4步, 如果服务成本和服务时间超出约束, 选择优先权较小的服务提供商, 转到第3步。

第5步, 若存在待分配服务需求点时, 转到第3步; 否则算法结束, 输出初始解。

5.2 模拟植物生长算法求解步骤

(1) 设定生长步长 G 和最大迭代次数, 根据启发式方法确定初始可行解 x^0 , 求出 $f(x^0)$ 。

(2) 以 x^0 作为初始状态, 按步长生长出新生长点。

(3) 计算各生长点形态素浓度 pr_{x_h} 。

(4) 建立各生长点在 $0 \sim 1$ 之间的概率空间, 系统产生的随机数落在 $pr_1, pr_2, \dots, pr_{x_h}$ 其中一个概率空间内, 对应的生长点得到优先生长权。

(5) 依据步长, 生成新生长点, 当新生长点目标函数值优于原生长点, 满足模型的约束条件, 保留最优的生长点。

(6) 新生长点均不优于原生长点, 或达到设定的最大迭代次数, 得到全局最优解。

以上步骤可用图3表示。

6 实例分析

某集团公司有3个相近区域的子公司, 在同一维修招标期内子公司向集团公司提出维修服务需求, 同时提供详细的维修设备列表, 包括维修设备出现的关键问题、要求达到的性能等。集团公司根据维修设备的具体情况, 将子公司提出的服务需求按服务类型分为3类, 每一类服务任务由一个MRO服务提供商完成。

MRO服务提供商根据服务成本估算方法求得 A_1 服务需求点上门服务成本和送修服务成本, 见表1。上门维修和送修方式分别包括3种服务类型, 第1种~第3种服务类型的候选MRO服务提供商数量分别为3、3、4。上门维修包括3种服务类型, 第1种~第3

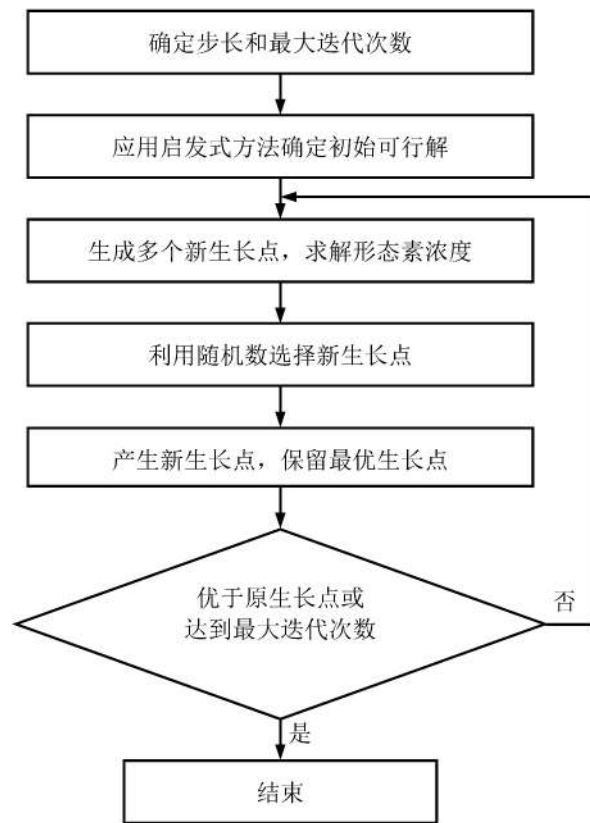


图3 模拟植物生长算法步骤

Figure 3 Steps of Plant Growth Simulation Algorithm

种服务类型的任务数量分别为3、2、3, 第1种服务类型下有能够承担第1个维修任务的候选MRO服务提供商共有3个, 维修成本分别为1 836元、1 512元和2 305元。送修服务的第1种~第3种服务类型的任务数量分别为2、4、2, 第1种服务类型下有能够承担第1个维修任务的候选MRO服务提供商的维修成本分别为12 612元、15 006元和11 682元。

A_1 服务需求点下MRO服务提供商的服务时间见表2, 3类服务任务的工期分别为15小时、26小时和10小时, 有能力承担第1种服务类型任务的候选MRO服务提供商的上门维修时间分别为10.230小时、12.200小时和9.600小时, 送修时间分别为11.417小时、15.069小时和7.889小时。 A_2 服务需求点共有2种服务类型, A_3 服务需求点共有3种服务类型。限于文章篇幅, 本研究只列出 A_1 服务需求点下MRO服务提供商的服务成本和服务时间。表3给出所有服务需求点下服务提供商数据, 如对于所有服务需求点的第1种服务类型, 第1个候选服务提供商的人力转移成本为216元。整个实例分析过程在Windows 7操作系统、配置为Pentium 2.2GHZ, 2GB内存的机器上进行。具体参数设置如下。

步长 $G = 1$, 最大迭代次数为800, MST 为0.050, MSE 为1.500。以模型中整体服务成本最小化为目标, 同时满足约束条件, 经过500次迭代求解得出最优服务成本为219 500元, 服务资源配置最优方案为

表1 A₁ 服务需求点下MRO服务提供商服务成本
Table 1 Cost of MRO Service Providers at A₁ Service Demand Point

服务类型	任务	上门维修成本(元)				任务	送修服务成本(元)			
		第1种 类型服务 提供商1	第1种 类型服务 提供商2	第1种 类型服务 提供商3			第1种 类型服务 提供商1	第1种 类型服务 提供商2	第1种 类型服务 提供商3	
1	1	1 836	1 512	2 305		4	12 612	15 006	11 682	
	2	361	559	325		5	16 702	18 057	15 006	
	3	782	1 251	1 559						
2		第2种 类型服务 提供商1	第2种 类型服务 提供商2	第2种 类型服务 提供商3		第2种 类型服务 提供商1	第2种 类型服务 提供商2	第2种 类型服务 提供商3		
	1	1 859	2 317	1 218		3	2 713	3 168	2 102	
	2	3 553	3 194	3 573		4	17 152	15 851	17 232	
						5	5 215	7 309	5 127	
						6	20 011	15 031	22 131	
			第3种 类型服务 提供商1	第3种 类型服务 提供商2	第3种 类型服务 提供商3	第3种 类型服务 提供商4	第3种 类型服务 提供商1	第3种 类型服务 提供商2	第3种 类型服务 提供商3	第3种 类型服务 提供商4
3	1	6 947	7 205	8 533	6 178	4	3 810	2 806	4 349	3 712
	2	3 258	3 937	6 939	5 371	5	17 175	19 005	31 021	23 062
	3	10 328	11 605	8 912	9 659					

表2 A₁ 服务需求点下 MRO 服务提供商服务时间
Table 2 Time of MRO Service Providers at A₁ Service Demand Point

服务类型	工期	上门维修时间(小时)				工期	送修时间(小时)			
		第1种 类型服务 提供商1	第1种 类型服务 提供商2	第1种 类型服务 提供商3			第1种 类型服务 提供商1	第1种 类型服务 提供商2	第1种 类型服务 提供商3	
1	15	10.230	12.200	9.600		15	11.417	15.069	7.889	
			第2种 类型服务 提供商1	第2种 类型服务 提供商2	第2种 类型服务 提供商3		第2种 类型服务 提供商1	第2种 类型服务 提供商2	第2种 类型服务 提供商3	
		17.012	20.810	25.310		26	15.302	23.028	22.138	
3	10		第3种 类型服务 提供商1	第3种 类型服务 提供商2	第3种 类型服务 提供商3	第3种 类型服务 提供商4	第3种 类型服务 提供商1	第3种 类型服务 提供商2	第3种 类型服务 提供商3	第3种 类型服务 提供商4
		5.097	3.179	2.980	8.039	10	7.026	5.100	9.221	8.359

[3,1,1],即对于3个服务需求点,第1类任务由服务提供商3完成,第2类任务由服务提供商1完成,第3类任务由服务提供商1完成。

依据服务资源配置方案,由表1数据可知,完成上门服务的第1种服务类型的3项任务成本分别为

2 305元、325元和1 559元,计算可得第1类服务类型下3项任务上门维修总成本为4 189元。同理可得第2类任务和第3类任务由服务提供商完成的上门维修成本分别为5 412元和20 533元。第1类任务的送修服务由服务提供商3完成的服务成本分别为11 682

表3 所有服务需求点下MRO服务提供商相关数据
Table 3 Relative Data of MRO Service Providers for All Service Demand Points

		人员转移成本(元)	车辆运输成本(元)	信任度	资源紧张度
第1种 服务类型	服务提供商1	216	2 015	0.523	0.028
	服务提供商2	393	3 216	0.307	0.383
	服务提供商3	325	1 580	0.723	0.150
第2种 服务类型	服务提供商1	308	5 607	0.756	0.585
	服务提供商2	187	3 521	0.832	0.170
	服务提供商3	392	3 669	0.613	0.622
第3种 服务类型	服务提供商1	171	1 931	0.901	0.320
	服务提供商2	353	3 335	0.382	0.532
	服务提供商3	116	1 612	0.792	0.160
	服务提供商4	217	1 592	0.817	0.193

元和15 006元,计算得出第1类任务的送修服务总成本为26 688元,同理可得,由第2类和第3类任务送修成本分别为45 091元和20 985元。根据资源配置方案,表2数据显示第1类任务~第3类任务上门维修服务时间分别为9.600小时、17.012小时和5.097小时,送修时间分别为7.889小时、15.302小时和7.026小时,均满足服务工期要求。表3数据显示最优配置方案下人员转移成本分别为325元、308元和171元,进而求得人员转移总成本为804元,同样可求得车辆运输总成本为9 118元,根据模型约束条件中的(17)式计算求得整体信任度为0.492,根据约束条件中的(19)式求得整体资源紧张度为1.055,整体信任度和整体资源紧张度满足设定值要求。若模型中仅考虑所有服务需求点成本最小化,忽略约束条件的限制,经求解,[2,2,1]是最优结果,总维修成本为19.379万元,但整体资源紧张度为1.727,超过MSE设定值1.500,为了保持服务资源配置的稳定性,最优方案为[3,1,1]。

由于算法充分考虑了模型约束,根据模型优化目标设计生长点函数,在初始解生成算法和优化迭代过程中结合了模型特征,因此能够获取如上满足模型约束的优化结果。

6.1 算法与已有研究成果比较分析

在该领域的研究成果中选取具有代表性的算法,从求解速度和求解函数值两个方面与本研究算法进行比较。以李彤等^[21]的算法与本研究算法比较求解速度,迭代次数从100变化到500。在服务类型和服务任务数量不变的情况下比较求解速度的变化,结果见图4。由图4可知,本研究算法比李彤等^[21]的算法求解速度快。在求解最优函数值方面,利用本研究算法与改进的蚁群算法^[27]、改进遗传算法^[28]和粒子群算法^[29]进行比较,结果见图5。各算法的迭代次数设为100~500,由图5可知,本研究算法求出的生长点函数值优于相关研究中的其他3类

算法。

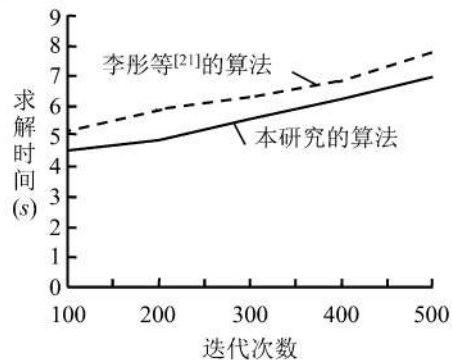


图4 算法求解速度对比
Figure 4 Efficiency Comparisons among Various Algorithms

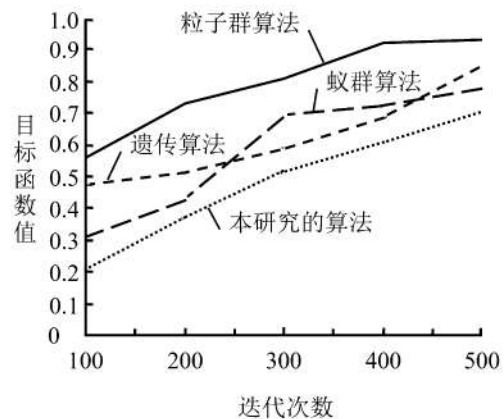


图5 算法求解目标值比较
Figure 5 Comparisons of Target Values among Various Algorithms

6.2 敏感性分析

本研究中服务成本、信任度和资源紧张度均为固定值,下面分析各因素发生变化时对资源配置结果和总成本的影响,敏感性分析结果见表4。人员转

表4 参数变化对服务资源配置结果和总成本的影响

Table 4 Impacts of Parameter Variations on Service Resource Allocation and Total Cost

参数变化	第1个服务 提供商变化 配置结果	第2个服务 提供商变化 配置结果	第3个服务 提供商变化 配置结果	第1个服务 提供商 变化后成本	第2个服务 提供商 变化后成本	第3个服务 提供商 变化后成本	
人员转移成本	+50%	[3,1,1]	[3,1,1]	[3,1,1]	+2.523%	+3.569%	2.125%
	-50%	[3,1,1]	[3,1,1]	[3,1,1]	-1.718%	-2.519%	-1.957%
运输成本	+50%	[2,1,3]	[3,2,1]	[3,1,1]	+6.000%	+5.301%	+5.227%
	-50%	[3,1,1]	[3,1,1]	[3,1,1]	-6.962%	-5.783%	-5.918%
服务成本	+50%	[2,1,1]	[2,2,3]	[2,3,2]	+20.000%	+26.000%	+21.000%
	-50%	[3,1,1]	[3,1,1]	[3,1,1]	-18.000%	-28.000%	-22.000%
信任度	+50%	[3,1,1]	[3,1,1]	[3,1,1]	0%	0%	0%
	-50%	[2,1,3]	[2,3,1]	[1,1,2]	+8.000%	+5.913%	5.682%
资源紧张度	+50%	[2,1,1]	[3,2,2]	[1,3,1]	+7.112%	+5.153%	+5.816%
	-50%	[3,1,1]	[3,1,1]	[3,1,1]	0%	0%	0%

移成本的增减对资源配置结果没有影响,对总成本的影响较为有限,主要是因为人员转移费用在服务总成本中所占比例较低,增减比例超过50%之后,总成本没有明显的变化;运输成本在增减后对资源配置结果有一定的影响,所占成本比例比人员转移成本有一定提高,运输成本变化后,总成本有5%~6%的变动,因此对资源配置结果产生影响;服务成本的增加对资源配置结果影响更显著,当其中一个MRO服务提供商发生变化时,整个服务配置链都发生变动,总成本也有明显的变化,波动区间在20%~30%之间,分析发现,由于一个MRO服务提供商服务成本的变化,使原资源配置结果不再最优,同时原有服务组合不再满足约束条件;信任度减少、资源紧张度增加同样对配置结果影响较大,总成本变动在5%~10%之间,可见信任度和资源紧张度对服务资源配置结果的稳定和可靠性有较大的影响。

因此,在服务资源配置过程中,MRO服务提供商必须加强对服务成本的控制,通过协商和沟通尽可能减少服务成本的增加。服务需求企业应尽可能地选择信任度高、资源紧张度低的服务提供商作为候选服务企业,以保持服务资源配置的稳定性和可靠性。

7 结论

为了满足大型复杂企业的多服务需求点定期维修需求,降低公司整体维修成本,本研究将服务资源配置问题在多服务需求点下进行讨论,从服务需求的视角分析MRO服务提供商上门维修和送修状态下车辆、人员和维修设备等资源的合理配置,为多服务需求点下维修管理决策提供依据,具体研究结果如下。

(1) 在多服务需求点下考虑多样化需求,在模型

中采用案例推理方法对服务成本进行合理评估,设计资源紧张度约束指标,给出度量方法,建立企业多服务需求点下维修服务资源配置优化模型。

(2) 针对资源配置优化模型,提出改进的模拟植物生长算法,设计启发式规则加快求解速度,通过与已有研究算法对比验证本算法更有效。

(3) 基于敏感性分析,得出服务成本、信任度和资源紧张度对资源配置结果和总成本均有一定影响的结论,通过实例验证多服务需求点下设备综合维修计划方法的有效性。

研究表明,在准确度量MRO服务提供商服务成本和资源紧张度的基础上,降低服务资源配置过程中服务成本波动,同时保证较高信任度和较低资源紧张度有助于维持服务资源配置的稳定性和提高服务按时完工率。

本研究没有考虑在服务过程中存在中断和补救的情况,在实际服务中由于内部和外部的各种原因,易出现服务的中断和补救,在后续的研究中将解决在多样化需求下考虑服务中断和服务补救的资源配置模型和求解算法。

参考文献:

- [1] Li F, Xu L D, Jin C, Wang H. Random assignment method based on genetic algorithms and its application in resource allocation [J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(15): 12213-12219.
- [2] Ekpenyong U E, Zhang J, Xia X. An improved robust model for generator maintenance scheduling [J]. *Electric Power Systems Research*, 2012, 92: 29-36.
- [3] Bruni M E, Beraldi P, Guerriero F, Pinto E. A heuristic approach for resource constrained project scheduling with uncertain activity durations [J]. *Comput-*

- ers & Operations Research, 2011, 38 (9): 1305 – 1318.
- [4] 黄敏镁, 罗荣桂. 柔性资源约束下的产品开发项目优化调度研究[J]. 管理工程学报, 2010, 24(4): 143–147, 154.
Huang Minmei, Luo Ronggui. Study on flexible-resource-constrained product development project scheduling[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2010, 24 (4): 143 – 147, 154. (in Chinese)
- [5] 陈宁, 章雪岩, 武振业, 陈石. 基于随机理论的多项目资源配置模型及应用研究[J]. 中国管理科学, 2006, 14(4): 75–80.
Chen Ning, Zhang Xueyan, Wu Zhenye, Chen Shi. Research on model and application of resource allocation in multi-project management based on stochastic theory[J]. Chinese Journal of Management Science, 2006, 14(4): 75–80. (in Chinese)
- [6] 唐海波, 叶春明. 基于MRO服务提供商的设备预维修调度[J]. 系统管理学报, 2012, 21(3): 336–340, 351.
Tang Haibo, Ye Chunming. Pre-maintenance scheduling with MRO service provider[J]. Journal of Systems & Management, 2012, 21(3): 336–340, 351. (in Chinese)
- [7] Jha M K, Shariat S, Abdullah J, Devkota B. Maximizing resource effectiveness of highway infrastructure maintenance inspection and scheduling for efficient city logistics operations [J]. Procedia: Social and Behavioral Sciences, 2012, 39: 831–844.
- [8] Martorell S, Villamizar M, Carlos S, Sánchez A. Maintenance modeling and optimization integrating human and material resources [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2010, 95(12): 1293–1299.
- [9] Ashayeri J. Development of computer-aided maintenance resources planning (CAMRP): A case of multiple CNC machining centers [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2007, 23 (6): 614–623.
- [10] de Castro H F, Cavalca K L. Maintenance resources optimization applied to a manufacturing system [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2006, 91 (4): 413–420.
- [11] Celen M, Djurdjanovic D. Operation-dependent maintenance scheduling in flexible manufacturing systems [J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2012, 5(4): 296–308.
- [12] Saif A, Pandi V R, Zeineldin H H, Kennedy S. Optimal allocation of distributed energy resources through simulation-based optimization [J]. Electric Power Systems Research, 2013, 104: 1–8.
- [13] Tsai J, Fang J, Chou J. Optimized task scheduling and resource allocation on cloud computing environment using improved differential evolution algorithm [J]. Computers & Operations Research, 2013, 40 (12): 3045–3055.
- [14] Liang Y, Chuang C. Variable neighborhood search for multi-objective resource allocation problems [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2013, 29(3): 73–78.
- [15] Khoshjahan Y, Najafi A A, Afshar-Nadjafi B. Resource constrained project scheduling problem with discounted earliness-tardiness penalties: Mathematical modeling and solving procedure [J]. Computer & Industrial Engineering, 2013, 66(2): 293–300.
- [16] Jia Q, Seo Y. Solving resource-constrained project scheduling problems: Conceptual validation of FLP formulation and efficient permutation-based ABC computation [J]. Computers & Operations Research, 2013, 40(8): 2037–2050.
- [17] Li H, Sun J. Ranking-order case-based reasoning for financial distress prediction [J]. Knowledge-Based Systems, 2008, 21(8): 868–878.
- [18] Chiu N, Huang S. The adjusted analogy-based software effort estimation based on similarity distances [J]. Journal of Systems and Software, 2007, 80(4): 628–640.
- [19] 褚春超. 缓冲估计与关键链项目管理 [J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(5): 1029–1035.
Chu Chunchao. Buffer sizing and critical chain project management [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14 (5): 1029 – 1035. (in Chinese)
- [20] 施骞, 王雅婷, 龚婷. 项目缓冲设置方法及其评价指标改进 [J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(8): 1739–1746.
Shi Qian, Wang Yating, Gong Ting. An improved approach for project buffer sizing and evaluation [J]. Systems Engineering – Theory & Practice, 2012, 32 (8): 1739–1746. (in Chinese)
- [21] 李彤, 王春峰, 王文波, 宿伟玲. 求解整数规划的一种仿生类全局优化算法: 模拟植物生长算法 [J]. 系统工程理论与实践, 2005, 25(1): 76–85.
Li Tong, Wang Chunfeng, Wang Wenbo, Su Weiling. A global optimization bionics algorithm for solving integer programming: Plant growth simulation algorithm [J]. Systems Engineering – Theory & Practice, 2005, 25(1): 76–85. (in Chinese)
- [22] 李彤, 王众托. 大型城市地下物流网络优化布局的模拟植物生长算法 [J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(4): 971–980.
Li Tong, Wang Zhongtuo. Optimization layout of underground logistics network in big cities with plant

- growth simulation algorithm [J]. *Systems Engineering - Theory & Practice*, 2013, 33 (4): 971 - 780. (in Chinese)
- [23] 杨琴, 周国华, 林晶晶. 改进模拟植物生长算法求解汽车维修车间瓶颈工序的多目标动态调度问题 [J]. *系统管理学报*, 2011, 20 (5): 595 - 599, 626, 635.
Yang Qin, Zhou Guohua, Lin Jingjing. An improved PGSA for multi-objective dynamic scheduling of bottleneck machine in an auto maintenance shop [J]. *Journal of Systems & Management*, 2011, 20 (5): 595 - 599, 626, 635. (in Chinese)
- [24] 毛崇峰, 李彤, 周青. 技术联盟投资决策的模拟植物生长优化分析 [J]. *系统工程*, 2012, 30 (2): 73 - 78.
Mao Chongfeng, Li Tong, Zhou Qing. Optimal analysis of simulated plant growth of investment decision of technical alliances [J]. *Systems Engineering*, 2012, 30 (2): 73 - 78. (in Chinese)
- [25] 丁雪枫, 马良, 尤建新, 丁雪松. 基于模拟植物生长算法虚拟企业盟友选择问题研究 [J]. *管理学报*, 2011, 8 (2): 278 - 283.
Ding Xuefeng, Ma Liang, You Jianxin, Ding Xuesong. Studies on the partner selection problem of virtual enterprise based on plant growth simulation algorithm [J]. *Chinese Journal of Management*, 2011, 8 (2): 278 - 283. (in Chinese)
- [26] Rao R S, Narasimham S V L, Ramalingaraju M. Optimal capacitor placement in a radial distribution system using plant growth simulation algorithm [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2011, 33 (5): 1133 - 1139.
- [27] Keskinurk T, Yildirim M B, Barut M. An ant colony optimization algorithm for load balancing in parallel machines with sequence-dependent setup times [J]. *Computers & Operations Research*, 2012, 39 (6): 1225 - 1235.
- [28] Dudek G. Genetic algorithm with binary representation of generating unit start-up and shut-down times for the unit commitment problem [J]. *Expert Systems with Applications*, 2013, 40 (15): 6080 - 6086.
- [29] Badawi A A, Shatnawi A. Static scheduling of directed acyclic data flow graphs onto multiprocessors using particle swarm optimization [J]. *Computers & Operations Research*, 2013, 40 (10): 2322 - 2328.

Model and Algorithm for MRO Service Resource Allocation with Various Demands

Ma Shugang^{1,2}, Yang Jianhua¹, Guo Jidong¹

1 Dongling School of Economics and Management, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2 School of Business, Hebei University of Economics and Business, Shijiazhuang 050061, China

Abstract: For the maintenance task set with multi-service points and diversified demands of large-scale complex enterprises, a type of MRO service resource allocation problem with multi-service points is defined from view of service demand. Then it is formulated with the optimal total cost for overall service of MRO service providers as the goal, with considering resource intensity, trust degree and different schedule requirements. The characteristics and measurement methods of key parameters in the model (i. e. , service cost and resource intensity) are further analyzed. To solve the model, an improved Plant Growth Simulation Algorithm is developed, whose initial solutions are got through heuristics. The sensitivity analysis then is made on major parameters. Final results show the feasibility and effectiveness both for the model and the algorithm are tested; Fluctuations of service cost, trust degree and resource intensity have impacts on resource allocation, increase service cost assessment ability and maintain the stability of resource allocation of MRO service providers.

Keywords: service resource allocation; maintenance; multi-service demand points; plant growth simulation algorithm

Received Date: October 6th, 2013 **Accepted Date:** February 28th, 2014

Funded Project: Supported by the National Natural Science Foundation of China (71231001), the Hebei Province Colleges Science and Technology Research Projects (QN20131133) and Hebei University of Economics and Business Science Research Fund (2014KYQ03)

Biography: Ma Shugang, a Hebei Xingtai native (1977 -), is a Ph. D. candidate in the Dongling School of Economics and Management at University of Science and Technology Beijing and a Lecturer in the School of Business at Hebei University of Economics and Business. His research interests include operation management and supply chain management, etc. E-mail: mashugang@126.com □