

文章编号: 1001-0920(2009)12-1761-08

免疫调度算法综述

左兴权¹, 莫宏伟²

(1. 北京邮电大学 计算机学院, 北京 100876; 2. 哈尔滨工程大学 自动化学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 调度问题在科学和工程中广泛存在且难以求解, 人们一直寻求先进的调度算法来解决这一问题. 基于生物免疫系统的计算智能发展迅速, 并很快被应用于调度问题, 体现了其解决调度问题的优势和特色. 对此, 综述了国内外免疫调度理论和算法的研究现状, 介绍了基于克隆选择、免疫网络、疫苗接种等原理的调度算法, 并将其按免疫机理、优化目标以及解决的问题进行分类. 最后给出了免疫调度算法在各领域中的应用及其未来研究展望.

关键词: 调度; 免疫调度; 免疫算法; 人工免疫系统; 优化计算

中图分类号: TP18

文献标识码: A

Survey on immune scheduling algorithms

ZUO Xing-quan¹, MO Hong-wei²

(1. Computer School, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China; 2. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China. Correspondent: ZUO Xing-quan, E-mail: zuoxq@bupt.edu.cn)

Abstract: Scheduling problems exist widely in science and engineering areas and are hard to obtain their optimal solutions, so people are searching advanced scheduling algorithms to solve them. Therefore, biological immune system inspired computational intelligence is developed and applied to scheduling problems quickly, which demonstrates their advantages and characteristics for solving scheduling problems. This paper surveys the state of the art of immune scheduling theories and algorithms, and introduces the clonal selection, immune network, and immune vaccine based scheduling algorithms. These algorithms are classified according to their immune mechanisms, optimization objectives, and scheduling problems. Finally, the applications of immune scheduling algorithms and their future research directions are given.

Key words: Scheduling; Immune scheduling; Immune algorithm; Artificial immune system; Optimization computation

1 引言

调度问题在很多领域广泛存在, 例如, 车间工件加工调度、工作流程中的资源分配以及车辆调度等. 由于其广阔的应用背景, 自 20 世纪 50 年代开始人们就对其展开了研究. 当时所面临的调度问题比较简单, 主要采用传统的优化方法来解决, 包括牛顿法、分支定界法等. 该类方法可有效解决简单的调度问题(如单机调度), 但对于复杂的调度问题, 则因其时间计算复杂性太大而在工程中不实用.

工程中往往只需要得到调度问题的次优解, 而不苛求问题的最优解, 为此, 自 20 世纪七八十年代以来, 人们开始用智能优化算法来解决调度问题, 主要包括遗传算法、模拟退火和禁忌搜索等.

到了 90 年代, 相继出现了一些新的智能优化算法, 包括蚁群算法、微粒群算法和免疫算法等, 并被应用于调度问题. 其中免疫调度算法是调度领域中的一个新方向, 它将生物免疫理论和原理引入调度研究中, 以构造更有效的调度方法.

近几年来, 免疫调度算法发展较快, 本文按照免疫机理、优化目标以及解决的问题来对其分类综述, 介绍其应用领域及未来研究展望.

2 免疫调度算法的一般框架

免疫调度算法是指基于免疫学原理和免疫系统机制设计的调度问题解决方法总称^[1]. 免疫机理多种多样, 免疫调度算法并没有统一的框架. 但目前绝大多数免疫调度算法都是基于免疫优化机理, 将

收稿日期: 2008-11-13; 修回日期: 2009-04-14.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60504028).

作者简介: 左兴权(1971—), 男, 黑龙江铁力人, 副教授, 博士, 从事生产调度、人工免疫系统的研究; 莫宏伟(1973—), 男, 山东济阳人, 教授, 博士, 从事人工免疫系统、数据挖掘的研究.

调度问题看作优化问题加以解决,这类免疫调度算法的一般框架如图1所示。

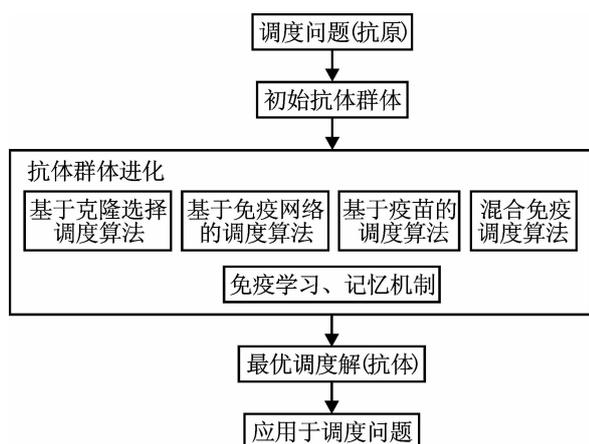


图1 基于免疫优化机理的调度算法

基于克隆选择、免疫网络、免疫接种等免疫优化机理,相继出现了基于免疫网络理论的调度算法,基于克隆选择原理的调度算法和基于疫苗接种的调度算法。对于混合免疫调度算法,这里是指以上免疫机制的混合或与其他算法的混合。

基于免疫优化机理的调度算法通常将抗原和抗体隐喻为调度问题及其可行解,抗体与抗原间的亲和力和定义为候选解的评价值,抗体间的亲和力为候选解的相似度。抗体通常用一个“串”来表达,其编码方式采用二进制、整数或实数编码。利用抗体群体的进化来产生与抗原匹配最佳的抗体,即最优调度解。有些算法加入了记忆单元以防止种群退化,加快算法收敛。

3 免疫调度算法按免疫机理分类

按照所基于的免疫机理,免疫调度算法可分为:

1)基于免疫优化机理的调度算法;2)基于非优化免疫机理的调度算法。

3.1 基于免疫优化机理的调度算法

3.1.1 基于免疫网络理论的调度算法

基于免疫网络的免疫算法是最常用的免疫算法之一,又称为免疫遗传算法,最早由 Mori 等^[2]于1993年提出,其基本思想为:1)用遗传算法的基本操作和群体进化方式来生成最优抗体;2)基于免疫网络中淋巴细胞相互作用机理来调节抗体亲和力,以抑制相似抗体;3)用免疫记忆来加快算法收敛。

调度问题本质上是优化问题,当规模很大时难以求解。采用遗传算法解决时,群体多样性减少很快,易早熟收敛。而免疫遗传算法可保持群体较大的多样性,因此不易陷入局部最优,增加了找到最优解的可能性。

针对不同调度问题,免疫遗传算法的具体操作

不同,但其基本思想都是基于免疫网络机理提高群体的多样性。Mori 等^[3]将该算法用于调度问题,他们基于免疫网络中抗体相互作用机理来调节群体的多样性,用交叉和变异操作来产生新抗体。Zandieh 等^[4]基于免疫网络相互作用和基因重组原理,提出了一种用于柔性制造系统分配和调度问题的调度算法,其中利用免疫网络相互机制来选择,以防止优秀候选解过度支配群体。Chan 等^[5]用模糊规划方法为柔性制造系统的机器工具选择和操作分配问题建模,并采用该类免疫算法来解决这一问题,算法基于免疫网络原理以保持群体多样性。Chen 等^[6]采用该类免疫算法解决了联合计划调度问题,目标函数包括油成本、人力成本和电力成本。算法包括交叉、变异以及竞争和自动调节机制,以避免群体早熟。徐震浩等^[7]利用模糊规划理论,为不确定条件下具有零等待的流水线车间生产调度问题建模,采用该类免疫算法来解决这一问题。余建军等^[8]用基于动态评价的免疫算法求解 Job shop 调度问题,算法基于抗体浓度的概念来抑制规模较大而又不是最优的抗体,避免算法早熟收敛。周亚勤等^[9]研究了考虑加工批量、工件到达时间和辅助时间等情况下的复杂生产调度问题,给出了问题的模型和免疫调度算法。算法借鉴了免疫抗体多样性和抗体浓度调节等机理以保持群体多样性,用遗传操作进化群体。

该类免疫调度算法应用广泛,能很好地解决一些调度问题,但算法形式较单一,解决调度问题的思想大致类似。另外,对于非常复杂的调度问题,仅依靠群体多样性的增加仍难以获得其最优解,此时需要与其他算法混合来构造更有效的算法。

3.1.2 基于克隆选择原理的调度算法

在适应性免疫应答中,要经历一个演化过程来产生与抗原高匹配的淋巴细胞,这一过程通过克隆选择原理来实现。基于这一原理,de Castrol 等^[10]提出了克隆选择算法用于优化计算,算法模拟适应性免疫应答中的进化现象,用选择、克隆和超突变等操作来进化群体。

目前,出现了多种基于克隆选择原理的免疫算法,并被用于调度问题的求解。其思想是:将调度问题视为抗原,调度候选解视为抗体,按照适应性免疫应答产生抗体的适应性行为来进化群体,生成最优调度解。Coello 等^[11]提出了一种人工免疫算法来解决调度问题,算法借鉴了免疫系统的两个机理:抗体分子构造和克隆选择。算法首先利用基因库来构造抗体,然后用一个局部搜索算法来优化抗体所代表的调度解,并用克隆选择算法来寻求最优抗体。Zuo 等^[12-14]针对加工时间不确定调度问题,利用工作流

仿真模型集合为其建模,采用基于克隆选择的免疫算法来优化并获得鲁棒调度解. Tavakkoli-Moghaddam 等^[15]将该类免疫调度算法用于解决非等待流水线调度问题. Costa 等^[16]采用该类免疫算法来解决并行机调度问题,优化目标为最大完成时间最小.

该类免疫调度算法的选择操作采用确定性选择方式,可能导致群体多样性减少过快,因此往往需要采用某种方法来保持群体多样性. 该类算法的算子可根据调度问题的需要而灵活设计,包括引入遗传算子等,易于构造优秀的调度算法.

3.1.3 基于疫苗接种的调度算法

基于疫苗接种的免疫算法由 Jiao 等^[17]提出,其思想为:在遗传算法的基础上,充分利用问题的先验知识,引入疫苗抽取和接种算子来防止种群退化,加快算法收敛.

该算法因其解决复杂优化问题的有效性,而被用于调度问题的求解. 余建军等^[18]提出了一种免疫调度算法,用于解决多目标柔性 Job shop 调度问题,利用免疫记忆和接种疫苗机制加快算法收敛,通过免疫记忆来提高局部搜索能力,并利用疫苗抽取和接种来增强搜索的稳定性. 柴永生等^[19]提出了一种车间动态调度问题的免疫算法. 算法基于免疫机理提取疫苗,对种群实施免疫操作,有效抑制了遗传算法的早熟和搜索效率低的问题.

该类免疫调度算法的研究成果还不多. 已有研究表明,该类算法对于解决算法早熟收敛问题和提高搜索效率方面较有效.

3.1.4 混合免疫调度算法

已有研究表明,单一调度方法很难获得复杂调度问题的最优解,而多种算法的混合则可构造优秀的调度算法. 为此,免疫调度算法与其他算法的混合、以及不同免疫算法的混合便成为解决调度问题的有效方法,称之为混合免疫调度算法.

(1) 借鉴多种免疫机理

为了构造更有效的免疫调度算法,需要借鉴几种免疫机理,实现优势互补. 例如,钟一文等^[20]针对异构环境下任务分配问题,提出一种免疫遗传算法,其中引入了抗体浓度调节机制以保持群体多样性,采用接种疫苗算子来提高算法搜索效率,以在局部和全局搜索间取得较好的平衡.

(2) 与模糊逻辑结合

模糊逻辑可表达人的知识和经验,用其自适应调整免疫调度算法的参数,可降低陷入局部最优的可能,提高算法的搜索效率. Chan 等^[21]提出了一种免疫算法和模糊逻辑相结合的方法用于计划和调

度,免疫算法用于调度问题求解,模糊逻辑则用于自适应调节免疫算法的变异率.

(3) 与分支定界算法结合

免疫算法与传统的分支定界算法结合,可实现二者的优势互补,提高调度的性能. 徐震浩等^[22]提出了一种结合免疫算法和分支定界方法的混合免疫调度算法来解决 Flow shop 调度问题. 首先利用分支定界确定初始产品排列顺序中的首位,然后再用免疫算法进行优化搜索.

(4) 与启发式调度算法结合

基于优先级的启发式调度算法简单、有效,在工程中应用广泛,但由于其是基于经验的,无法保证调度结果的最优性. 利用免疫算法可为启发式调度算法寻求一组最优优先级,提高调度的性能. Zuo 等^[14]提出了一种结合免疫算法和启发式算法的混合调度算法来解决 Job shop 调度问题,免疫算法用于优化启发式算法中的优先级,以确定一个最优的启发式算法来生成优化的调度解.

(5) 与模拟退火算法结合

模拟退火作为一种局部搜索算法,与免疫调度算法结合可构造具有更强全局和局部搜索能力的调度算法. 陈爱玲等^[23]构造了一种混合免疫算法来解决轧制计划编排问题. 用车辆路径问题模型为轧制调度问题建模,组合人工免疫算法和模拟退火算法来构造混合免疫算法,即利用免疫算法的全局搜索能力来寻求全局最优解,利用模拟退火算法来避免陷入局部最优. 余建军等^[24]将免疫算法与模拟退火算法结合,用于柔性动态 Job shop 调度问题. 算法由随机产生的初始群体开始搜索,通过选择、交叉、变异、克隆、接种疫苗等操作产生一组新抗体,然后对各抗体独立地进行模拟退火操作,其结果作为下一代群体中的抗体. 算法利用模拟退火的带有概率突跳性的爬山能力避免早熟收敛.

(6) 与禁忌搜索算法结合

禁忌搜索是解决调度问题的一种有效方法,将其与免疫算法结合,可构造搜索能力更强的调度算法. 左兴权等^[25]将混沌搜索免疫算法、禁忌搜索算法以及启发式算法相结合,用于 Job shop 调度问题. 混沌搜索免疫算法用于在全局解空间范围内寻找优秀解;启发式算法用于抗体解码,生成参数化活动调度;禁忌搜索则用于在优秀解的邻域内搜索高精度的调度解.

(7) 与粒子群算法结合

免疫算子也被引入粒子群调度算法中以改善其性能. 李安强等^[26]将免疫信息处理机制引入粒子群算法,用于电厂间的负荷分配. 算法一方面利用免疫

记忆和调节机制来保持各粒子维持一定浓度;另一方面引入疫苗接种机理,对进化过程进行有目的、有选择的指导,以提高搜索效率.

3.2 基于非优化免疫机理的调度算法

目前,免疫调度算法大多是基于免疫优化机理的,基于其他免疫机理的则很少.用于调度算法设计的非优化免疫机理主要包括免疫多智能体、错误忍耐、免疫危险理论等.例如,Russ等^[27]发展了一个人工免疫模型,用于网络计算机系统的任务分配和性能优化.抗原被认为是实时收集的系统(硬件)和程序(软件)性能信息向量(例如内存,CPU,硬盘等);而抗体则对应于两种类型智能控制主体,即H细胞主体和S细胞主体,分别管理硬件和软件资源.每个抗体使用一个自适应方法以提高系统性能,该自适应方法用一个3层决策树来分类抗原并确定适当的建议行为.Nicholas等^[28]研究了实时嵌入系统的实时任务调度问题,以保证系统稳定性.传统解决这一问题的策略是采用固定优先级调度或统计分析调度方法,他们基于免疫系统的错误忍耐机理,利用免疫系统的异常检测技术来实时检测异常任务调度.其中异常检测技术是基于先天免疫系统和免疫危险理论,将危险模型的树枝细胞算法用于嵌入系统的任务调度,以检测调度异常情况.

除了以上介绍的免疫调度算法外,还有一些其他免疫调度方法,将其归类于表1.

表1 免疫调度方法按免疫机理分类

生物免疫机理	免疫调度方法	相关文献
免疫优化机理	免疫网络理论	[2-9,29-42]
	克隆选择原理	[11-16,43-48]
	疫苗抽取与接种	[18,19]
	混合免疫机制	[20-26,49,50]
其他免疫机理(非优化机理)	实时嵌入系统任务调度	[28]
	多智能体任务调度	[27,51]
	多机器人协作任务分配	[52]

4 免疫调度算法的其他分类

4.1 按调度的目标分类

实际调度问题通常要考虑一个以上的目标,例如,既要考虑最大完成时间,又要考虑平均拖后时间.解决多目标调度问题通常有两种方法:一种将几个目标加权处理形成单一目标,然后求解;另一种直接采用多目标调度算法求解.

多目标调度算法能得到若干 Pareto 最优调度

解,可根据需要在几个优化目标间权衡,最终选择一个 Pareto 解作为调度解.多目标加权组合的方法则只能得到唯一的调度解.

目前免疫调度算法大多只考虑单个优化目标,很少用于解决多目标调度问题.用于多目标调度的免疫调度算法见文献[13-15,18,31,33,53].

4.2 按调度问题的确定性分类

大多数免疫调度算法都是解决确定性调度问题的,然而实际调度中往往存在着不确定因素,如加工时间不确定、机器故障等.用于解决不确定调度问题的免疫调度算法见文献[7,12-14,19,22,24,31,49].

5 免疫调度算法的应用

5.1 Job shop 调度

Job shop 调度是调度问题的典型代表,可描述为: n 个工件要在 m 台机器上加工,每个工件包括若干操作且加工顺序固定,操作的加工时间和加工机器已知,调度的目标是确定每个操作的开始加工时间,以使其性能指标最优.

由于 Job shop 调度的典型性,很多免疫调度算法都用于解决 Job shop 调度问题.李蓓智等^[29]用免疫遗传算法来解决 Job shop 调度问题,其中通过免疫记忆、抗体激增和抑制机理来解决遗传算法早熟收敛,提高算法优化效率;此外,还给出了基于工序约束的抗体生成方法和基于机床作业序列的抗体编码规则.常桂娟等^[30]提出了一种免疫遗传算法,用于 Job shop 调度,其中利用优先权编码和三个体交叉算子来继承父代优良特性,采用正交实验法来确定算法参数,以加快算法收敛速度.苏生等^[31]建立了 Job shop 调度问题的模糊运输模型,利用加权和方法将多目标函数转化为单目标函数,并使用基于积分值的方法对模糊数进行排序,提出了基于排列边集编码的免疫算法.Chandrasekaran等^[43]基于克隆选择和亲和力成熟原理,提出了人工免疫系统,用于解决 Job shop 调度问题.

其他文献见[8,9,16,18,19,24].

5.2 Flow shop 调度

Flow shop 调度是 Job shop 调度的特例,当 Job shop 调度的每个工件的机器加工顺序约束均相同时,Job shop 调度变为 Flow shop 调度.由于 Flow shop 调度有着很强的工程应用背景,免疫调度算法常被用于求解该问题.例如,徐震浩等^[54]针对不确定条件下的 Flow shop 调度问题,采用模糊数学方法来描述数据的不确定性,基于模糊规划理论建立了相应调度模型,并结合免疫算法特点,提出了解决此类问题的模糊免疫调度算法.

免疫调度算法还被用于混合 Flow shop 调度问题. Engin 等^[44]基于克隆选择原理和亲和力成熟机制构造了一种免疫算法,用于解决 n 个工件 k 个阶段的混合流水线调度问题,同时给出了一个确定最优算法参数的系统化实验设计方法.

其他文献见[4,7,15,22,42].

5.3 负荷分配

电厂中存在着机组负荷优化分配问题,在满足设备安全和供电需求的前提下,优化负荷分配能够降低电厂能耗,提高经济效益.例如,李蔚等^[32]用一种免疫算法来解决火电厂机组负荷优化分配问题,通过抗体浓度调节保持群体多样性,使算法具有良好的搜索性能.其他文献见[26].

免疫算法还被用于其他领域的负荷分配问题.例如,马忠丽等^[33]采用免疫遗传算法来解决环境经济负荷调度问题,并用一个含有 5 个电力生产单元的燃煤电力系统模型验证了算法的有效性.

5.4 车辆调度

车辆调度是指制定行车路线,使车辆在满足一定的约束条件下,有序地通过一系列装货点和卸货点,达到诸如路程最短、费用最小、耗时最少等目标.免疫算法被用于该类问题的求解.李菁等^[34]应用免疫算法解决车辆调度中路线安排问题,给出了一种基于分组匹配的亲和力计算方法.张海刚等^[45]将遗传算子引入免疫克隆选择中,构造了一种免疫算法,用于带软时间窗的车辆调度问题和双向车辆调度问题.

5.5 任务分配与调度

任务调度是网格环境中的重要内容,需要根据任务信息采用适当策略将不同的任务分配到相应的节点上运行.例如,陈廷伟等^[35]针对网格环境下任务调度问题,提出了一种任务调度机制:基于任务图先将每一个可能的任务调度方案表示成一个任务-资源分配图,将网格任务调度问题转化为任务-资源分配图优化问题,再用免疫算法来解决.

任务调度问题也存在于并行、分布计算环境中. Anna 等^[49]提出了基于细胞自动机的多处理器调度系统,其中进行了知识抽取,抽取的知识被用于调度问题新的实例.调度器有 3 个模型:学习、正常操作和重新使用模型.

其他文献见[28,51,52].

5.6 电厂中的调度

免疫调度算法被用于解决热电厂和水电站中的调度问题. Huang^[36]用免疫算法解决热力发电调度问题,并用台湾电厂实际数据验证了算法的可行性.左幸等^[50]在基于免疫网络的免疫算法中引入了疫

苗注射预处理操作,改进了记忆库结构,并将改进的免疫算法用于水电站日常现货市场优化调度中. Liao 等^[37,38]将免疫算法与混沌搜索、模糊遗传算法相结合,以处理短期电力生产单元调度问题.

其他文献见[6].

5.7 钢厂中的调度

Kumar 等^[46]用人工免疫系统与模糊逻辑控制器构成的混合算法来解决钢厂调度问题,并将结果与简单免疫算法、遗传算法以及优先规则方法进行了比较.陈爱玲等^[23]构造了一种混合免疫算法,以解决钢厂中轧制计划编排问题.

5.8 通信中的调度

通信领域中广泛存在着调度问题,免疫调度算法在其中得到了应用.例如,Xue 等^[47]将无线传感器网络的电源消耗优化问题转换为柔性调度问题,用基于克隆选择的免疫算法来消除无用的节点,重构网络拓扑结构.通过网络的二次应答来建立疫苗库.

除了上述领域,免疫调度算法还被用于工艺流程优化与调度^[39]、供应链批排序^[55]、柔性生产调度^[5]、水库群调度^[56]以及项目调度^[57]等方面.由于篇幅所限,不再赘述.

6 结 论

采用人工免疫方法解决调度问题是调度领域中近几年出现的新分支.已有研究表明了人工免疫方法解决调度问题的优势与特色.人工免疫系统作为一种新兴的计算智能出现的时间较短,与遗传算法、模拟退火和禁忌搜索等传统智能优化方法相比,其在调度领域中的研究成果还相对较少.随着人工免疫系统研究的不断深入,免疫调度算法的研究和应用将更加深入和广泛.

免疫调度算法未来的研究包括以下几方面:

1) 人类免疫系统的信息处理机理非常丰富,但目前免疫调度算法研究主要集中在免疫优化方面,很少涉及其他免疫机理.人类免疫系统的鲁棒性、分布性和自组织性对调度问题的解决也存在着某种启发,引入这些机理,构建新颖的免疫调度方法,能为调度研究注入新的思想与活力.

2) 一些免疫调度算法解决问题的思路与进化计算相似,因此免疫调度算法与传统进化计算方法相比有何优势与特色需要深入挖掘.这不但需要实验验证,而且需要理论分析.

3) 与遗传算法、禁忌搜索和模拟退火等传统智能调度算法相比,一些免疫调度算法还不够完善,与实际应用还有距离.针对实际调度问题,发展实用的免疫调度算法,将是一个有意义的研究.

4) 免疫调度算法的发展,不能仅仅依靠免疫机理的挖掘与利用及算法自身的改进,而应与其他调度算法相结合来构造混合免疫调度算法,实现优势互补.混合算法是解决复杂问题的有效方法,将免疫调度算法与其他算法混合,能构造更有效的调度方法.

参考文献(References)

- [1] 莫宏伟, 左兴权. 人工免疫系统[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
(Mo H W, Zuo X Q. Artificial immune system[M]. Beijing: Science Press, 2009.)
- [2] Mori M, Tsukiyama M, Fukuda T. Immune algorithm with searching diversity and its application to resource allocation problem [J]. Trans on the Institute of Electrical Engineers of Japan, 1993, 113-C(10): 872-878.
- [3] Fukuda T, Mori K, Tsukiyama M. Immune networks using genetic algorithm for adaptive production scheduling[C]. 12th Triennial World Congress of the Int Federation of Automatic Control. Sydney, 1993: 353-356.
- [4] Zandieh M, Fatemi Ghomi S M T, Moattar Husseini S M. An immune algorithm approach to hybrid flow shops scheduling with sequence dependant setup times [J]. Applied Mathematics and Computation, 2006, 180(1): 111-127.
- [5] Chan F T S, Swarnkar R, Tiwari M K. Fuzzy goal-programming model with an artificial immune system (AIS) approach for a machine tool selection and operation allocation problem in a flexible manufacturing system[J]. Int J of Production Research, 2005, 43(19): 4147-4163.
- [6] Chen S L, Tsay M T, Gow H J. Scheduling of cogeneration plants considering electricity wheeling using enhanced immune algorithm[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2005, 27(1): 31-38.
- [7] 徐震浩, 顾幸生. 不确定条件下具有零等待的流水车间免疫调度算法[J]. 计算机集成制造系统, 2004, 10(10): 1247-1251.
(Xu Z H, Gu X S. Immune scheduling algorithm for flow shop under uncertainty with zero wait [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2004, 10(10): 1247-1251.)
- [8] 余建军, 孙树栋, 郑锋. 基于动态评价免疫算法的车间作业调度研究[J]. 机械工程学报, 2005, 41(3): 25-31.
(Yu J J, Sun S D, Zheng F. Job-shop scheduling study by dynamic evaluation based immune algorithm [J]. Chinese J of Mechanical Engineering, 2005, 41(3): 25-31.)
- [9] 周亚勤, 李蓓智, 杨建国. 考虑批量和辅助时间等生产工况的智能调度方法[J]. 机械工程学报, 2006, 42(1): 52-56.
(Zhou Y Q, Li B Z, Yang J G. Intelligent scheduling algorithm for problems with batch and non cutting time [J]. Chinese J of Mechanical Engineering, 2006, 42(1): 52-56.)
- [10] de Castro L N, Von Zuben F J. Learning and optimization using the clonal selection principle [J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2002, 6(3): 239-251.
- [11] Coello C A, Cortes Rivera D, Cruz Cortes N. Use of an artificial immune system for job shop scheduling [C]. The 2nd Int Conf on Artificial Immune Systems. Edimburgh, 2003: 1-3.
- [12] Zuo X Q. Robust scheduling method based on workflow simulation model and biological immune principle[C]. Genetic and Evolutionary Computation Conf. London, 2007: 187.
- [13] Zuo X Q, Mo H W. Artificial immune systems and natural computing: Applying complex adaptive technologies[M]. Hershey: Idea Group Inc, 2008: 122-138.
- [14] Zuo X Q, Mo H W, Wu J P. A robust scheduling method based on a multi-objective immune algorithm [J]. Information Science, 2009, 179(19): 3359-3369.
- [15] Tavakkoli-Moghaddam R, Rahimi-Vahed A R, Mirzaei A H. Solving a multi-objective no-wait flowshop scheduling problem with an immune algorithm[J]. Int J of Advanced Manufacture Technology, 2008, 36(9/10): 969-981.
- [16] Costa A M, Vargas P A, Von Zuben F J, et al. Makespan minimization on parallel processors: An immune-based approach [C]. The 2002 Congress on Evolutionary Computation. Honolulu, 2002: 920-925.
- [17] Jiao L C, Wang L. A novel genetic algorithm based on immunity [J]. IEEE Trans on System, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, 2000, 30(5): 552-561.
- [18] 余建军, 孙树栋, 刘易勇. 基于免疫算法的多目标柔性job-shop调度研究[J]. 系统工程学报, 2007, 22(5): 511-519.
(Yu J J, Sun S D, Liu Y Y. Multi-objective flexible job-shop scheduling based on immune algorithm[J]. J of Systems Engineering, 2007, 22(5): 511-519.)
- [19] 柴永生, 孙树栋, 余建军, 等. 基于免疫遗传算法的车间动态调度[J]. 机械工程学报, 2005, 41(10): 23-27.
(Chai Y S, Sun S D, Yu J J, et al. Job shop dynamic scheduling problem based on immune genetic algorithm

- [J]. Chinese J of Mechanical Engineering, 2005, 41(10): 23-27.)
- [20] 钟一文, 杨建刚. 异构环境下独立任务分配问题的免疫遗传算法[J]. 小型微型计算机系统, 2006, 27(8): 1498-1502.
(Zhong Y W, Yang J G. Immune genetic algorithm for independent tasks assignment problem in heterogeneous environments[J]. J of Chinese Computer Systems, 2006, 27(8): 1498-1502.)
- [21] Chan F T S, Kumar V, Tiwari M K. Optimizing the performance of an integrated process planning and scheduling problem: An AIS-FLC based approach[C]. IEEE Conf on Cybernetics and Intelligent Systems. Bangkok, 2006: 1-8.
- [22] 徐震浩, 顾幸生. 用混合算法求解 Flow shop 调度问题[J]. 华东理工大学学报, 2004, 30(2): 234-238.
(Xu Z H, Gu X S. A hybrid method for scheduling problems of flow shop[J]. J of East China University of Science and Technology, 2004, 30(2): 234-238.)
- [23] 陈爱玲, 杨根科, 吴智铭. 基于混合离散免疫算法的轧制计划编排[J]. 控制与决策, 2007, 22(6): 716-720.
(Chen A L, Yang G K, Wu Z M. Hybrid method based on discrete immune algorithm for the hot rolling plan[J]. Control and Decision, 2007, 22(6): 716-720.)
- [24] 余建军, 孙树栋, 王军强, 等. 免疫模拟退火算法及其在柔性动态 Job Shop 中的应用[J]. 中国机械工程, 2007, 18(7): 793-799.
(Yu J J, Sun S D, Wang J Q, et al. Immune simulated annealing hybrid algorithm and its application for flexible dynamical job shop scheduling [J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(7): 793-799.)
- [25] 左兴权, 莫宏伟, 范玉顺. 参数化活动调度及其混合免疫算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2006, 27(21): 257-262.
(Zuo X Q, Mo H W, Fan Y S. Parameterized active schedule with its hybrid immune scheduling algorithm [J]. J of Harbin Engineering University, 2006, 27(21): 257-262.)
- [26] 李安强, 王丽萍, 李崇浩, 等. 基于免疫粒子群优化算法的梯级水电站间负荷优化分配[J]. 水力发电学报, 2007, 26(5): 15-20.
(Li A Q, Wang L P, Li C H. The optimized loading distribution among cascaded hydropower stations based on immune particle swarm optimization algorithm[J]. J of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(5): 15-20.)
- [27] Russ S H, Lambert A, King R, et al. An artificial immune system model for task allocation[C]. Proc of the Symposium on High Performance Distributed Computing. USA, 1999.
- [28] Nicholas L, Iain B. Improving the reliability of real-time embedded systems using innate immune techniques [J]. Evolutionary Intelligence, 2008, 1(2): 113-132.
- [29] 李蓓智, 杨建国, 丁惠敏. 基于生物免疫机理的智能调度系统建模与仿真[J]. 计算机集成制造系统, 2002, 8(6): 446-450.
(Li B Z, Yang J G, Ding H M. The modeling and simulation of intelligent scheduling system based on biologic immunity mechanism[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2002, 8(6): 446-450.)
- [30] 常桂娟, 张纪会. 基于正交试验的免疫遗传算法在调度问题中的应用[J]. 信息与控制, 2008, 37(1): 46-51.
(Chang G J, Zhang J H. Immune genetic algorithm based on orthogonal experiment for scheduling problems[J]. Information and Control, 2008, 37(1): 46-51.)
- [31] 苏生, 战德臣, 徐晓飞. 基于免疫算法的并行机间歇过程模糊生产调度[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(8): 1252-1257.
(Su S, Zhan D C, Xu X F. Fuzzy scheduling with parallel machines batch process based on immune algorithm [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2006, 12(8): 1252-1257.)
- [32] 李蔚, 刘长东, 盛德仁, 等. 基于免疫算法的机组负荷优化分配研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 241-245.
(Li W, Liu C D, Sheng D R, et al. Research on optimization of unit commitment based on immune algorithm[J]. Proc of the CSEE, 2004, 24(7): 241-245.)
- [33] 马忠丽, 王科俊, 莫宏伟, 等. 基于免疫遗传算法的环境经济负荷调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(1): 98-103.
(Ma Z L, Wang K J, Mo H W, et al. Economic emission load dispatch based on immune genetic algorithm[J]. Proc of the CSU-EPSA, 2006, 18(1): 98-103.)
- [34] 李菁, 王宗军, 蒋元涛, 等. 免疫算法在车辆调度问题中的应用[J]. 运筹与管理, 2003, 12(6): 96-100.
(Li J, Wang Z J, Jiang Y T, et al. Immune algorithm for vehicle scheduling problem [J]. Operations Research and Management Science, 2003, 12(6): 96-100.)
- [35] 陈廷伟, 张斌, 郝宪文. 基于免疫遗传算法的网格任务调度[J]. 东北大学学报, 2007, 28(3): 329-332.
(Chen T W, Zhang B, Hao X W. Task scheduling in grid environment based on immune genetic algorithm [J]. J of Northeastern University, 2007, 28(3): 329-332.)
- [36] Huang S J. Enhancement of thermal unit commitment

- using immune algorithms based optimization approaches[J]. *Electrical Power and Energy Systems*, 1999, 21(4): 245-252.
- [37] Liao G C. Short term thermal generation scheduling using improved immune algorithm[J]. *Electric Power Systems Research*, 2006, 76(5): 360-373.
- [38] Liao G C, Tsao T P. Application embedded chaos search immune genetic algorithm for short term unit commitment[J]. *Electric Power Systems Research*, 2004, 71(2): 135-144.
- [39] 董朝阳, 孙树栋. 基于免疫遗传算法的工艺设计与调度集成[J]. *计算机集成制造系统*, 2006, 12(11): 1807-1813.
(Dong Z Y, Sun S D. Integration of process planning and scheduling based on immune genetic algorithm [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2006, 12(11): 1807-1813.)
- [40] Hong J, Lee W, Lee S, et al. An efficient production planning algorithm for multi head surface mounting machines using the biological immune algorithm[J]. *Int J of Fuzzy Systems*, 2000, 2(1): 45-53.
- [41] 高赐威, 程浩忠, 王旭. 基于计算资源效率分配的多种群中心解搜索电网规划算法[J]. *中国机电工程学报*, 2004, 24(10): 8-14.
(Gao C W, Cheng H Z, Wang X. Multi-population central solution searching algorithm based on computation resource distributing for electric network planning[J]. *Proc of the CSEE*, 2004, 24(10): 8-14.)
- [42] Alisantoso D, Khoo L P, Jiang P Y. An immune algorithm approach to the scheduling of a flexible PCB flow shop[J]. *Int J of Advanced Technology*, 2003, 22(11/12): 819-827.
- [43] Chandrasekaran M, Asokan P, Kumanan S, et al. Solving job shop scheduling problems using artificial immune system[J]. *Int J of Advanced Manufacture Technology*, 2006, 31(5/6): 580-593.
- [44] Engin O, Doyen A. A new approach to solve hybrid flow shop scheduling problems by artificial immune system [J]. *Future Generation Computer Systems*, 2004, 20(6): 1083-1095.
- [45] 张海刚, 吴燕翔, 顾幸生. 基于免疫遗传算法的双向车辆调度问题实现[J]. *系统工程学报*, 2007, 22(6): 649-653.
(Zhang H G, Wu Y X, Gu X S. Vehicle scheduling problem with backhauls based on immune genetic algorithm[J]. *J of Systems Engineering*, 2007, 22(6): 649-653.)
- [46] Kumar V, Maull R S, Smart P A, et al. Artificial immune system (AIS) based information system to solve scheduling problem in leagile driven steel industries [C]. *Int Conf on Digital Information Management*. Bangalore, 2006: 373-380.
- [47] Xue W L, Chi Z X. An immune algorithm based node scheduling scheme of minimum power consumption and no collision for wireless sensor networks[C]. *IFIP Int Conf on Network and Parallel Computing*. Dalian, 2007: 630-635.
- [48] Akhilesh K, Anuj P, Ravi S, et al. Psycho-clonal algorithm based approach to solve continuous flow shop scheduling problem [J]. *Expert Systems with Applications*, 2006, 31(3): 504-514.
- [49] Anna S, Franciszek S, Albert Y Z. Multiprocessor scheduling and rescheduling with use of cellular automata and artificial immune system support [J]. *IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems*, 2006, 17(3): 253-262.
- [50] 左幸, 马光文, 梁武湖, 等. 免疫算法在水电站日前现货市场优化调度中的应用[J]. *水力发电学报*, 2006, 25(6): 21-25.
(Zuo X, Ma G W, Liang W H, et al. The immune algorithm and its application in short-term scheduling of hydro plant [J]. *J of Hydroelectric Engineering*, 2006, 25(6): 21-25.)
- [51] King R, Russ S H, Lambert A, et al. An artificial immune system model for intelligent agents[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2001, 17(4): 335-343.
- [52] Gao Y, Wei W. Multi-robot autonomous cooperation integrated with immune based dynamic task allocation [C]. *Proc of the 6th Int Conf on Intelligent Systems Design and Applications*. Ji'nan, 2006: 586-591.
- [53] Reza T M, Alireza R V, Ali H M. A hybrid multi-objective immune algorithm for a flow shop scheduling problem with bi-objectives: Weighted mean completion time and weighted mean tardiness [J]. *Information Sciences*, 2007, 177(22): 5072-5090.
- [54] 徐震浩, 顾幸生. 不确定条件下的 flow shop 问题的免疫调度算法[J]. *系统工程学报*, 2005, 20(4): 374-380.
(Xu Z H, Gu X S. Immune scheduling algorithm for flow shop problems under uncertainty [J]. *J of Systems Engineering*, 2005, 20(4): 374-380.)
- [55] Shukla M, Shukla N, Tiwari M K, et al. Integrated model for the batch sequencing problem in a multi-stage supply chain: An artificial immune system based approach[J]. *Int J of Production Research*, 2009, 47(4): 1015-1037.