

机床产品制造系统能效的最优控制

王艳, 纪志成[†]

(江南大学 物联网工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘要: 本文结合机床产品制造系统的能量流特性, 研究机床产品制造系统能效的最优控制. 首先, 利用无线传感器网络, 构建制造系统能效感知网络, 并设计了网络能量高效的通信协议, 实时获取制造系统的能效数据. 进而, 利用能效感知数据, 分别从单机设备局部优化与综合资源全局优化两方面, 设计能效优化控制算法. 根据单机设备任意两工步间空载能耗特性, 给出单机设备空载能效最优控制模型. 同时, 建立以缩短生产周期、减少机器空转时间、提高产品合格率为优化目标的综合生产资源能效多目标优化方案. 考虑到所论综合资源能效优化问题是离散组合优化问题, 本文提出了文化基因支配排序粒子群算法进行求解, 并采用层次分析(analysis hierarchy process, AHP)决策方法从Pareto解集中选取最优综合能效的优化策略. 最后, 利用实例与仿真相结合的方法, 验证了文中所提方法的有效性.

关键词: 机床产品; 制造系统; 能效; 控制; 优化

中图分类号: TP301.6 **文献标识码:** A

Optimal control of energy efficiency for machine tool manufacturing systems

WANG Yan, JI Zhi-cheng[†]

(School of IoT Engineering, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu 214122, China)

Abstract: By considering the energy flow characteristics, we put forward an optimal control scheme for the energy efficiency of a machine tool manufacturing system. Wireless sensors are employed to build the energy consumption network for the manufacturing system, and an energy-efficiency communication protocol is developed to transmit the real-time manufacturing data. With the sampled real-time data, we design the energy efficiency optimal control scheme for both the single manufacturing machine and the comprehensive production resources. For a single manufacturing machine, the no-load efficiency between any two stages is optimized in the control scheme. For the comprehensive production resources, a multiple-objective optimal control scheme is developed for minimizing the manufacturing cycle, reducing the machine idle time and improving the product quality. Since this is a discrete combinatorial optimization problem, we solve it by using the MA-NSPSO (memetic algorithm-non-dominated sorting particle swarm optimization) algorithm, and select the most proper energy efficiency control strategy from the Pareto solution set by using analysis hierarchy process (AHP) decision method. Finally, the effectiveness of the proposed method is illustrated by examples and simulation.

Key words: machine tool; manufacturing system; energy efficiency; control; optimization

1 引言(Introduction)

机床是装备制造业的核心, 面对传统机床产品制造系统高能耗、高物耗的现状, 通过对装备、工艺、系统控制等技术的集成, 构建具有感知、决策和优化控制为一体的高能效制造系统, 提升生产效率、能源效率, 对于实现制造过程的智能化和绿色化发展具有重要的意义. 机床产品制造系统的能效优化控制, 不能只局限于对单台机械加工设备的节能设计, 而是一个系统工程, 需要从系统的角度对整个生产过程执行一次以能源为基础的观察, 通过对制造系统全局的能效

控制, 优化加工流程来降低可变能耗^[1]. 因此, 机床产品制造系统的能效优化控制, 是单机局部节能优化与全局综合生产资源优化的节能优化的融合. 机床产品能效优化控制问题可用如下典型的控制系统结构进行描述, 如图1所示. 由图1可知, 机床产品生产制造系统为被控对象, 系统输出为制造系统实际能效, 通过构建车间信息交互网络与能耗感知网络, 对能效数据进行动态检测, 能效优化控制模块通过对实际能效与期望能效指标之间的偏差, 进行优化控制, 给出设备与工艺参数优化方案, 从而通过反馈控制实现对机床

产品生产制造系统的能效提升。

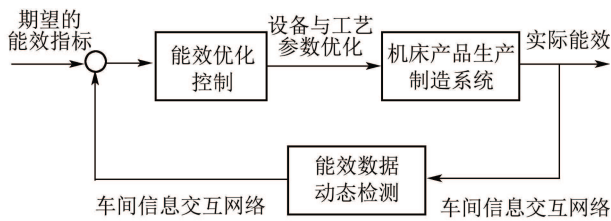


图1 机床产品能效优化控制

Fig. 1 Energy efficiency optimal control of machine tools

目前,机床产品能效优化研究主要集中于机械绿色设计与制造方面,从研究方向上大致可分为技术节能、制造过程管控节能、机床产品能耗特性分析与建模3个方向^[2]。国内外技术节能措施包括设计阶段的轻量化设计,选用节能型电机等部件^[3-4]。制造过程管控节能主要通过优化车间布局、生产计划调度、工艺参数优化等达到节能的目的^[5-6]。能耗分析与建模主要针对机床产品的多源能量流特性,建立主传动系统能量流模型及变频调控节能方案^[7-10]。就现有的研究而言,技术节能与能耗建模分析主要集中在单台机床能耗的理论分析、传动系统设计、电机优化匹配、电机单体节能、变频器节能应用等各专题方面,内容分散,集成度低;制造过程的管控节能缺乏实时制造数据的支持,多数是基于分析模型或经验模型^[11]。此外,现有的能效优化多数是立足于局部能效优化,从系统的角度,研究能效检测、优化控制与评价方面鲜有报道。

由图1系统结构可知,能效优化控制依赖于对制造系统能效数据的实时检测,主要采集生产过程中“人”、“机”、“法”、“环”、“料”5大综合生产要素以及采集车间内主要耗能设备(机床)和外围辅助设备的能耗数据。考虑到机床产品制造车间布局分散的特点,无线传感器网络为构建车间能耗感知网络的首选网络。无线传感器网络组网与通信协议方面近年来已经取得了丰富的研究成果,如基于低功耗自适应簇分层型(low energy adaptive clustering hierarchy, LEACH)协议^[12]和采用贪婪算法的传感器信息系统中的高效采集(power efficient gathering in sensor information system, PEGASIS)协议^[13]。LEACH是一种基于分簇算法的路由协议,其主要思想是通过随机的方式选择簇头,感知节点选择距离近的簇头加入以便成簇,通过这种方式网络内能耗得到了均衡,网络的最大生存周期明显得到延长。PEGASIS协议是采用贪婪算法生成一条链,并且轮流选择节点作为簇头与基站通信。能效的优化控制方法利用反馈的实时制造能耗数据,从生产执行的角度对资源、工艺参数、生产计划进行优化控制与调度,属于离散组合优化问题,具有复杂性、多目标性、离散型、多约束性、不确定性

等特点。经过多年的发展,智能优化理论与方法取得了丰富的研究成果^[14-19]。其中遗传算法^[15-16]、蚁群算法^[14,17]、粒子群算法^[18-21]等被广泛地应用于求解制造车间优化调度问题。文献[15]对遗传算法进行了改进,提出了有效的染色体编码方式用来解决柔性车间调度中机器分配和工序排序的问题。文献[17]提出了一种基于图的柔性制造车间调度数学模型,并使用蚁群算法对其进行优化求解。文献[18]针对具有随机因素的车间调度问题设计了一种具有两个阶段的粒子群算法。文献[19]提出一种基于Pareto支配的混合粒子群优化算法求解多目标柔性作业车间调度问题。总体而言,已有文献对多目标调度的问题研究相比单目标的少很多^[22],从实际应用而言,车间能效优化不但要实现生产效率、产品质量、加工成本等常规目标的优化运行,而且还需要对车间制造过程的敏捷性、柔性、可视性和智能性等方面进行提升。基于单一目标的建模与优化难以反映实际制造系统能效优化问题。

本文从控制系统的视角,利用无线传感器网络,构建制造系统能效感知网络,并设计了网络能量高效的通信协议,实时获取制造系统的能效数据;进而,利用能效感知数据,基于单机设备任意两工步间空载能耗特性,给出单机设备空载能效最优控制模型,并利用最优化控制方法进行求解。同时,建立综合生产资源能效离散组合优化数学模型,以缩短生产周期、减少机器空转时间、提高产品合格率为优化目标,提出了一种文化基因支配排序粒子群算法进行求解,并采用层次分析AHP决策方法从Pareto解集中选取最优综合能效优化策略。

2 制造系统能耗感知网络(Energy consumption sensor network of manufacturing system)

2.1 能耗感知网络模型(Model of energy consumption sensor network)

制造车间系统能耗感知网络是在制造车间内利用射频识别(radio frequency identification, RFID)技术、无线传感器、无线通信网络获取车间各个节点的生产数据、质检数据、库存数据以及物料数据,通过对所需信息的收集、整理和分析,为生产活动提供有效的决策依据^[7-8]。

通过设置于应用管控点的多功能交互式作业控制终端,实现现场实时运行状态信息的采集与工人作业的可视化指导,把企业信息系统的功能和应用从原有的企业资源管理层延伸到车间生产作业管理者和操作工人,构建起企业内纵向的资源管理系统、车间生产管理模型与底层制造控制系统的无缝集成,以及横向的车间生产管理与动态联盟合作企业制造车间的无缝集成。针对图2所示的制造车间能耗感知网络部署结构,提出以下车间感知网络部署模型。

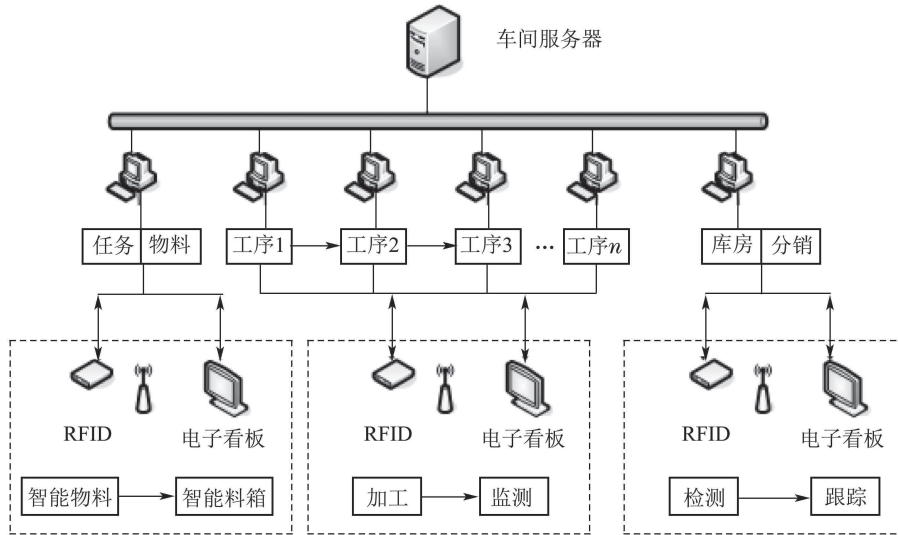


图 2 能耗感知网络部署

Fig. 2 Deployment of energy consumption sensor network

无线传感器网络按照车间进行分簇, 每台设备安装一个传感器节点, 每个工件、每位员工也有对应的RFID标签, 每个车间设置一个汇聚节点, 汇聚节点按照一定原则选择, 如图3所示. 无线传感器网络将车间实时信息传递给基站, 以方便管理和调度. 在保证实用性基础上, 为方便研究, 对车间网络模型作如下几点假设:

假设 1 基站部署在距离制造车间较远的地方, 并且基站的能量不受限制.

假设 2 无线传感网络中的节点相对均匀地分布在制造车间中, 初始能量也相同.

假设 3 所有节点一旦布置完成以后就不再移动, 且位置已知.

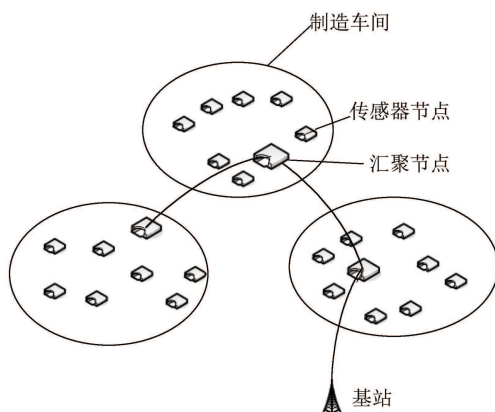


图 3 能耗感知网络模型

Fig. 3 Model of energy consumption sensor network

2.2 能量高效传输协议(Energy-efficiency transmission protocol)

本节基于第2.1节中提出的能耗感知网络模型, 提出了一种综合LEACH协议分簇的拓扑结构和

PEGASIS协议的多跳链式通讯方式, 设计了一种基于混合粒子群算法的能量高效路由协议. 算法综合了LEACH协议和PEGASIS协议的优点, 对簇头的选择、分簇方法以及链路的建立都进行了改进, 以达到平衡并减少感知节点的能耗, 延长网络的生存周期的目的. 基于上述假设, 本文采用集中式算法, 基于能量与距离原则, 利用混合粒子群算法进行链路的形成和簇头的选择. 首先在基站按照地理位置把监测区域划分为大小相等、相邻不重叠的方形区域, 其次在每个分簇内通过混合粒子群算法构造一条最优的簇内链, 再次在每个簇中根据节点剩余能量的大小选择簇头, 当候选节点剩余能量相同时, 选择距离基站近的节点作为簇头, 然后各簇头再通过混合粒子群算法构造一条簇头链, 并根据簇头链中节点的剩余能量和距离基站的距离选择总簇头. 最后当簇内链和簇头链都形成后, 基站将消息发布给区域内的所有节点.

混合粒子群算法执行过程如下, 且算法执行的流程图如图4所示.

1) 个体编码.

粒子个体编码采用整体编码方式, 每一个粒子表示经过的所有传感器节点, 比如当经过的传感器节点数目为10, 个体编码为[2 3 10 6 9 7 5 4 8 1], 表示节点遍历从2开始, 经过2, 3, 10, 6, ...最后到节点1, 从而完成遍历.

2) 适应度值粒子适应度值表示为遍历路径长度, 计算公式为

$$\text{fitness}(i) = \sum_{i,j=1}^n \text{path}_{i,j}, \quad (1)$$

其中: n 为传感器节点个数; $\text{path}_{i,j}$ 为节点 i, j 间路

径的长度.

3) 交叉操作. 个体通过和群体极值以及个体极值的交叉来更新, 采用整数交叉法进行交叉.

4) 变异操作. 变异操作是采用个体内部两个随机位互换的策略.

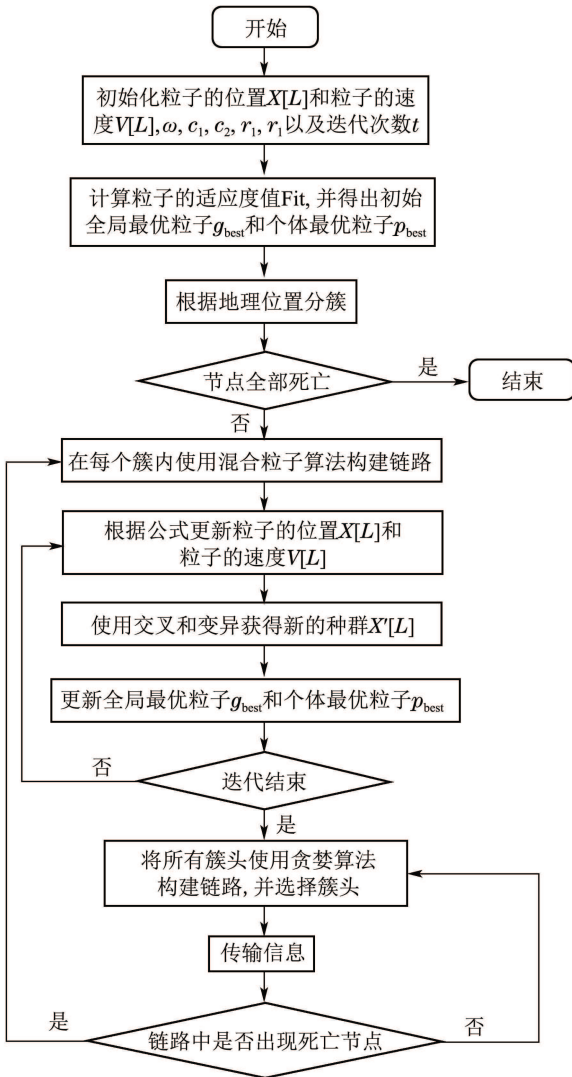


图4 基于混合粒子群的能耗网络通信协议流程

Fig. 4 Transmission protocol flow of energy consumption network based on hybrid particle swarm

3 制造系统能效优化控制(Energy efficiency optimal control)

3.1 单机设备空载能效优化控制(No-load energy efficiency optimal control of single machine)

机床加工过程工步间空载运行过程是一个能量损耗过程, 是造成机床能量利用率低的直接原因之一. 本文首先根据机床加工过程的能量特征, 将机床空载分为3类状态: 机床启动后空载阶段、工步间空载阶段、退刀停机空载阶段. 工步之间的空载阶段是机床空载运行能量损耗的主体. 根据工步间空

载阶段的能量特性, 将工步间的能量动态变化过程分为3个阶段: 频率自由下降阶段、最优频率运行阶段、频率上升阶段. 由机床运动过程可知, 工步间频率变化曲线如图5所示.

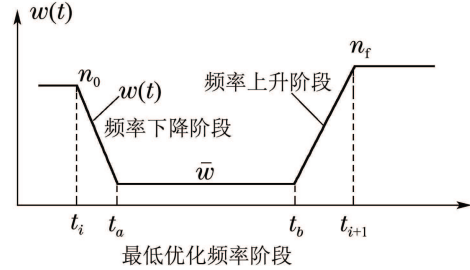


图5 机床空载运行过程

Fig. 5 No-load running process of machine tools

结合文献[9, 23]对机床运行能量流的分析与描述, 可将工步间空载节能运行问题描述为

$$\min E = \int_{t_i}^{t_{i+1}} [P_0(w(t)) + k_1 f_n(w(t)) + k_2 f_n(w(t))]^2 dt = \int_{t_i}^{t_a} [P_0(w(t)) + k_1 f_n(w(t)) + k_2 f_n(w(t))]^2 dt + [P_0(\bar{w}(t)) + k_1 f_n(\bar{w}(t)) + k_2 f_n(\bar{w}(t))]^2 (t_b - t_a) + \int_{t_b}^{t_{i+1}} [P_0(w(t)) + k_1 f_n(w(t)) + k_2 f_n(w(t))]^2 dt, \quad (2)$$

$$\text{s.t. } \dot{w}(t) = \begin{cases} \frac{\bar{w} - w(t_i)}{t_a - t_i}, & t \in [t_i, t_a), \\ 0, & t \in [t_a, t_b], \\ \frac{\bar{w} - w(t_b)}{t_{i+1} - t_b}, & t \in [t_b, t_{i+1}), \end{cases}$$

$$t_i < t_{i+1}, t_a, t_b \in (t_i, t_{i+1}),$$

$$f_n(w(t_i)) = n_0,$$

$$f_n(w(t_{i+1})) = n_f,$$

$$f_n(\bar{w}) < n_0, n_f,$$

其中: E 为任意两个工步间空载运行过程的能耗; $w(t)$ 为变频器输出频率; \bar{w} 为空载节能运行变频器最低优化输出频率; n_0, n_f 分别为空载节能优化起始时刻 t_i 与终端时刻 t_{i+1} 对应的主轴电机转速, 为已知常数; t_a 为机床主传动系统自由减速运动到最低优化频率 \bar{w} 的时刻; t_b 代表主传动系统从最低优化频率 \bar{w} 进入上升阶段的起始时刻; $P_0(w(t))$ 为主轴电机空载时的能耗; $f_n(\cdot)$ 为变频器输出频率与主传动系统转速之间的函数; k_1, k_2 为由电机及变频器参数决定的常数. 基于建立的工步间空载节能优化模型, 利用最优化控制理论与方法, 利用MATLAB编程, 可求解出空载节能运行最优调速规律 \bar{w}, t_a, t_b .

3.2 综合生产资源能效优化控制(Energy efficiency optimal control of comprehensive production resources)

本文在提出的车间能耗感知网络部署基础上, 利用制造系统的实时数据, 建立以缩短生产周期、减少机器空转时间、提高产品合格率为优化目标的综合生产资源能效优化模型, 并提出用于解决此多目标优化问题的智能优化算法。

3.2.1 数学模型(Mathematical model)

首先给出相关参数的定义。

n : 待加工工件的个数;

m : 加工机器的数量;

M : 所有加工机器的集合;

M_{ij} : 工件 i 的工序 j 可选加工机器的集合, 其中 $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, n_i, n_i$ 代表工件 i 的所有工序个数, $M_{ij} \in M$;

k : 机器的序列号; O_{ij} : 工件 i 的工序 j ;

T_k : 机器 k 完成所有加工任务的时间;

S_{ijk} : 工件 i 的工序 j 在机器 k 上的开工时间;

T_{ijk} : 工件 i 的工序 j 在机器 k 上的完工时间;

t_{ijk} : 工件 i 的工序 j 在机器 k 上的加工时间;

T_i : 工件 i 的加工时间;

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{如果工序在 } O_{ij} \text{ 选择在机器 } k \text{ 上加工,} \\ 0, & \text{否则,} \end{cases}$$

其中: $n, m, M, M_{ij}, n_i, k, O_{ij}, t_{ijk}$ 表示输入变量; $S_{ijk}, T_{ijk}, T_k, T_i$ 表示输出变量; x_{ijk} 表示工件的某道工序可以在多台机器上加工, 为决策变量。

1) 目标函数. 本文以缩短生产周期、减少机器空转时间、提高产品的合格率为优化目标, 对各目标的数学描述如下:

i) 生产周期. 即工序的最大加工完成时间:

$$f_1 = \max C_i, \quad (3)$$

其中: C_i 表示工件 $i (i = 1, 2, \dots, n)$ 的完工时间, n 是待加工的工件个数。

ii) 机器空转时间. 为了使产出最大化, 应减少机器的空转时间:

$$f_2 = \sum_{k=1}^m \Delta T_k, \quad (4)$$

其中 ΔT_k 表示第 $k (k = 1, 2, \dots, m)$ 台机器从开机到停车过程中的空转时间。

iii) 产品合格率. 产品的合格率受多种因素影响, 对于生产调度而言, 让操作熟练的工人和性能优异的机器承担更多的任务是提高产品合格率的有

效方法:

$$f_3 = \sum_{j=1}^s \sum_{k=1}^m N_{kj} E_k, \quad (5)$$

其中: N_{kj} 表示加工第 $j (j = 1, 2, \dots, s)$ 道工序的第 k 台机器加工工件的个数, s 表示工件 i 的工序道数, $E_k \in [0, 1]$ 示该机器和相应工人的综合品质属性, $N_{kj} E_k$ 表示在第 k 台机器上加工第 j 道工序工件的合格产品个数。

2) 约束条件: i) 生产资源约束为

$$\begin{cases} s_{ijk} + t_{ijk} \leq S_{abk}, \\ a = 1, 2, \dots, n, b = 1, 2, \dots, n_i, \\ a \neq i, b \neq j, \end{cases} \quad (6)$$

式(6)表示同一台机器在同一时刻能且仅能加工1个工件。

ii) 工艺流程约束为

$$\sum_{k=1}^{M_{ij}} x_{ijk} = 1, \quad (7)$$

$$S_{ijk} + x_{ijk} \times t_{ijk} \leq T_{ijk}, \quad (8)$$

$$T_{ij} \leq S_{i(j+1)}, \quad (9)$$

其中: 式(7)表示工件的某一道工序在同一时刻能且仅能被一台机器加工; 式(8)–(9)表示工件工序的先后顺序约束, 即在下一道工序开始加工前这个工件上一道工序必须已经完成。

iii) 其他约束:

$$S_{i1k} \geq 0, \quad (10)$$

$$\max T_k \geq \max T_i, \quad (11)$$

其中: 式(10)表示工件开始加工时间必须大于或等于0; 式(11)表示每个工件的完工时间小于或等于总完工时间。

3.2.2 参数的在线获取(Parameter online access)

1) 工件 C_i 完工时间: 通过对车间感知网络的部署, 每个工件均配置与其唯一对应的标签, 用于对工件全生命周期的跟踪. 工件 i 在某道工序上的完工时间 C_i 可以根据对其采集的开始加工与结束加工的时间计算得出。

2) 机器的空转时间 ΔT_k : 传感器可以对机器的空转时间 ΔT_k 实现监控, 并将实时信息与调度信息相比较, 如果有错误操作被执行, 系统将进行远程控制, 使生产回到正确轨道上来。

3) 机器和工人的综合品质信息 E_k : 由RFID采集并通过无线传感器网络传输给服务器, 通过对过去一段时间内每台机器和工人完成工件的合格率进行分析, 给出综合品质属性 E_k 。

3.2.3 MA-NSPSO优化算法(MA-NSPSO optimal algorithm)

考虑第3.2.1节提出描述的资源能效优化问题是离散的组合优化问题,而粒子群算法是属于连续空间的优化算法,直接用粒子群算法求解调度问题是不可行的.因此,本文提出一种文化基因支配排序粒子群算法MA-NSPSO,将粒子群算法作为全局搜索方法,将随机游走法作为局部搜索方法,平衡算法的全局搜索能力和局部搜索能力;采用非支配排序和拥挤距离来获得Pareto最优解并提高其多样性;采用变异操作防止算法陷入局部最优.算法的特点在于能够有效地向Pareto最优前沿优化,求得Pareto最优解集具有良好的分布性,具有优良的收敛性.

1) 非支配排序和拥挤距离排序.本文通过对比,选择NSGA-II中的非支配排序和拥挤距离排序策略构成Pareto最优解集.具体过程是:找出当前种群中非支配最优解的个体并将其放在第1等级中,在剩余种群中继续按照支配关系对个体进行分级,重复上述过程,直至解集中所有的个体都被分到等级为止.拥挤距离 D_i 是该粒子 i 与同Pareto等级里面的所有粒子的欧几里得距离之和.粒子 i 的拥挤距离可以按照下式计算:

$$D_i = \sum_{j=1}^l \sqrt{\sum_{h=1}^p (f_i^h - f_j^h)^2}, i, j \in F(s), j \neq i, \quad (12)$$

其中: D_i 表示粒子的拥挤距离; $F(s)$ 表示Pareto等级为 s 的所有粒子的合集; f_j^h 表示第 j 个粒子的第 h 个目标函数,共有 p 个目标函数; l 表示集合 $F(s)$ 中粒子的个数.

2) 基于工序和机器的双层粒子编码方法.本文基于工序和机器的粒子编码方式采用双层粒子,即粒子的每一位用 $[\frac{n}{m}]$ 来表示, n 是自然数,表示各个工件的工件号. m 也是自然数,表示工件的各道工序所对应的加工机器.实际生产过程中,机器的编号一定是整数,经过迭代运算后得到的数值可能不是整数,本文采取向上取整的修正方法.由于机器总数是 M ,粒子中机器编号不能超过 M ,所以规定该向量每一维的取值范围为 $[1, M]$,当超过此区间时,按照边界取值,见图6.

| | | | | | | | | | | |
|----------|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| $X_9[L]$ | 工序 | 1 | 3 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 2 |
| $X_m[L]$ | 机器 | 3 | 2 | 3 | 1 | 2 | 2 | 3 | 2 | 1 |

图6 基于工序和机器的双层粒子编码

Fig. 6 Double layer particle coding based on procedure and machine

3) 基于工序编码与机器分配的变异操作.本文采用两种变异操作来防止算法陷入局部最优,一种是基于工序编码的变异操作,变异算子首先从种群中选取变异粒子,然后选择变异位置1和位置2,最后把个体中的加工工序对换.另一种是基于机器分配的变异操作,首先从种群中随机选取变异粒子,然后选择变异位置1和位置2,最后随机产生机器编号,把原有的编号替换,产生的机器编号不大于机器总数.

4) 随机游走法为了提高粒子群算法的收敛速度以及解的精确度.本文采用随机游走法作为局部搜索算法.利用式(13)随机地求得下一个优化解,如果优化后的解优于当前解,则更新当前解,如果劣于当前解,则不更新.

$$x_i = x_{i-1} + \lambda u_{i-1}, \quad (13)$$

其中: x_i 表示在 $i-1$ 步内获得的近似最小值, λ 是规定的常量,其大小决定了搜索范围. u_i 是随机产生的单位向量.

5) 算法流程见图7.

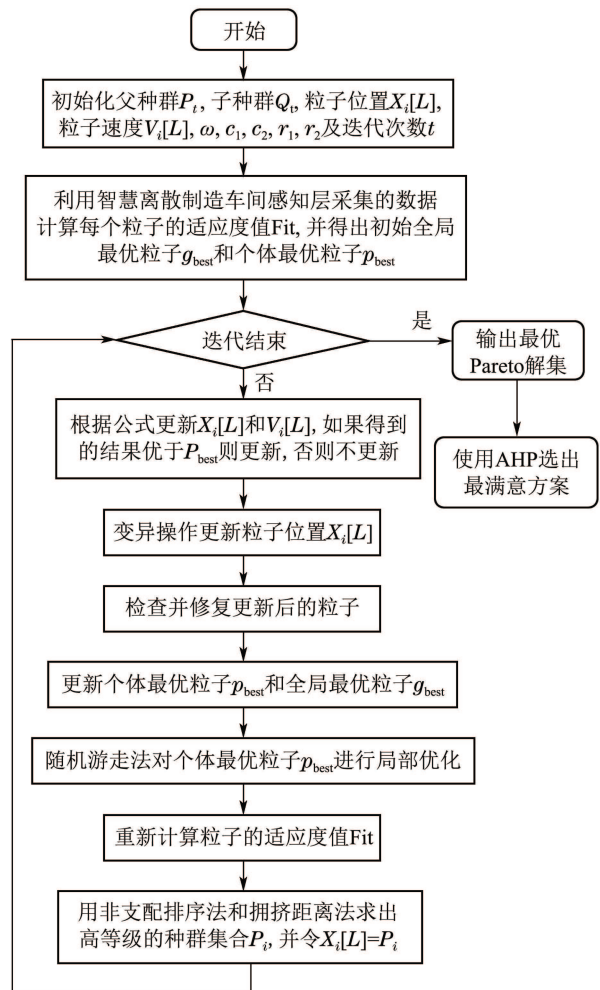


图7 MA-NSPSO算法流程

Fig. 7 MA-NSPSO algorithm flow

3.2.4 基于AHP层析分析的优化决策算法(AHP-based optimal decision algorithm)

利用第3.2节提出的优化算法求解资源能效优化问题的一组Pareto解集后, 需要从这组Pareto解集中选取一个最适合的解作为能效控制最优调度方案. 本文采用层次分析法, 根据专家系统对调度指标的重要性进行评估并排序, 分析多目标优化后得到的Pareto解集, 选出一个最满意的调度方案. 本文所要考虑的就是生产周期、机器空转时间和产品合格率; 分案层就是多目标算法求得的一组Pareto解集, 具体分层结构如图8所示.

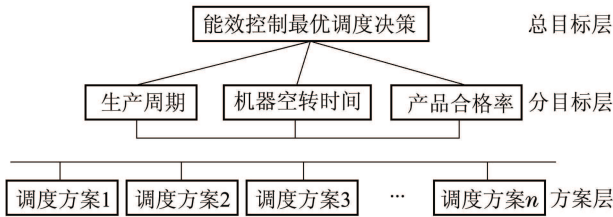


图 8 多目标决策的AHP递阶结构

Fig. 8 AHP hierarchical structure of multi objective decision

决策时各个目标函数的重要性依次为最大完工时间最短、产品合格率最高、机器空转时间最小. 用数字1-9表示各个目标函数之间两两重要程度, 并得到判断矩阵:

$$A = \begin{pmatrix} f_1 & f_2 & f_3 \\ f_1 & 1 & \frac{1}{5} \\ f_2 & 5 & 1 \\ f_3 & 3 & \frac{1}{3} & 1 \end{pmatrix}$$

各个指标的量纲不同是多目标问题决策过程的一个重要问题, 没有统一标准, 无法相互比较. 因此, 在综合评定Pareto解集之前, 需要进行无量纲化处理, 即指标的特征值同一变换到[0, 1]范围内. 本文采用以下方法来进行无量纲化处理.

设 b_{ij} 表示指标 f_j 对Pareto方案 X_i 无量纲化后的一个值, 定义如下函数:

$$b_{ij} = \frac{a_j^{\max} - a_{ij}}{a_j^{\max} - a_j^{\min}}, \quad (14)$$

$$a_j^{\max} = \max\{a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{pj}\},$$

$$a_j^{\min} = \min\{a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{pj}\},$$

式中: $i = 1, 2, \dots, p$ 是评价方案的数量; $j = 1, 2, \dots, q$ 是指标 f_j 的数量; a_{ij} 是Pareto方案中指标 f_j 的值. 由上式可得到方案的决策矩阵 $B = (b_{ij})_{p \times q}$. 计算

$$D = (D_i)_p = BW^T = \sum_{j=1}^q b_{ij}w_j,$$

可得到评价方案满意度矩阵 $(D_i)_p$.

4 实例分析(Example analysis)

本文以某轴承磨床制造系统为实例, 对实际加工过程采集的数据经处理后, 获得表1和表2. 表1为机器和工人综合属性系数表, 表2给出了每道工序的加工机器及其加工时间.

表 1 机器品质属性系数表

Table 1 Coefficient of machine quality property

| 编号 | M_1 | M_2 | M_3 | M_4 | M_5 | M_6 | M_7 | M_8 |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 品质 | 0.8 | 0.3 | 0.9 | 0.7 | 0.4 | 0.8 | 0.7 | 0.6 |

表 2 各工序及其加工机床时间表

Table 2 Procedure and machine time schedule

| 工件 | 工序 | 加工时间 t/h | | | | | | | |
|-------|----------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | M_1 | M_2 | M_3 | M_4 | M_5 | M_6 | M_7 | M_8 |
| J_1 | O_{11} | - | 12 | - | - | 14 | - | 20 | - |
| | O_{12} | 18 | - | - | 19 | - | - | 11 | - |
| | O_{13} | - | - | 14 | 9 | - | 17 | - | - |
| | O_{14} | - | 11 | - | - | 9 | - | - | 12 |
| | O_{15} | 15 | - | - | 8 | - | - | - | 18 |
| J_2 | O_{21} | - | - | 12 | 19 | 14 | - | - | - |
| | O_{22} | 8 | - | - | 9 | - | - | 15 | - |
| | O_{23} | 16 | 17 | - | - | - | 9 | - | - |
| J_3 | O_{31} | - | - | - | 11 | 10 | - | - | 13 |
| | O_{32} | - | - | 12 | 18 | - | - | 14 | - |
| | O_{33} | 9 | - | - | 15 | 17 | - | - | - |
| | O_{34} | - | 12 | - | - | - | 5 | - | 9 |
| | O_{35} | 3 | - | - | 4 | - | 8 | - | - |
| J_4 | O_{41} | - | 19 | - | - | 7 | - | 13 | - |
| | O_{42} | - | - | 8 | - | 11 | - | - | 16 |
| | O_{43} | - | 11 | - | 8 | - | - | 18 | - |
| | O_{44} | 6 | - | - | - | - | - | 14 | 9 |
| J_5 | O_{51} | - | - | - | 22 | - | 12 | 17 | - |
| | O_{52} | - | 18 | - | - | 11 | - | - | 9 |
| | O_{53} | 9 | - | 12 | - | - | - | - | 7 |
| J_6 | O_{61} | - | 11 | - | - | - | 9 | 14 | - |
| | O_{62} | 8 | - | - | - | 6 | - | - | 9 |
| | O_{63} | - | - | 11 | - | 17 | - | - | 18 |
| | O_{64} | 5 | - | - | 15 | - | - | 7 | - |
| | O_{65} | - | 11 | - | - | - | 8 | - | 7 |
| | O_{66} | 19 | - | - | 7 | - | 15 | - | - |

1) 制造系统网络优化方法的有效性分析. 选取轴承磨床制造车间内50 m × 50 m的矩形区域作为

仿真研究传感器节点的分布区域, 根据车间的布局, 采用按地理位置分簇的方法, 在此分布100个节点监测此区域内人、物料、工序、设备、辅助加工系统等信息. 基站的坐标是(50, 300), 簇头的数目为节点的5%, 设节点的初始能量分别为0.5 J.

表3 PEGASIS与MA-NSPSO算法平方和值比较

Table 3 Sum of square comparison between PEGASIS and MA-NSPSO

| 算法 | 平方和值 | 存活轮数 | | | |
|----------|---------|------|------|------|------|
| | | 1% | 20% | 50% | 100% |
| PEGASIS | 5391.23 | 1420 | 1760 | 1912 | 2028 |
| MA-NSPSO | 2502.94 | 1891 | 1925 | 1938 | 1952 |

贪婪算法与本文改进算法形成的链路如图9和图10所示.

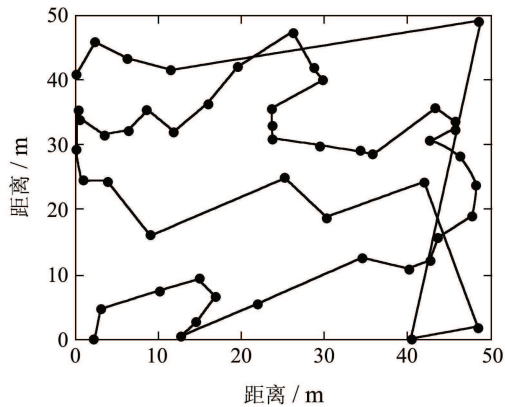


图9 PEGASIS算法得到的链路

Fig. 9 Link from PEGASIS algorithm

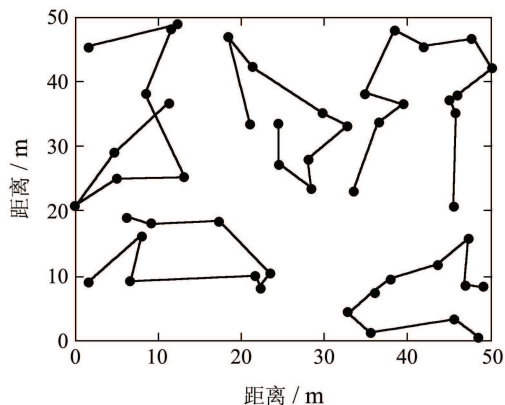


图10 MA-NSPSO算法得到的链路

Fig. 10 Link from MA-NSPSO algorithm

图11为3种算法下节点的存活时间情况. 通过对比发现, 本文提出的能量高效通信协议的第1个死亡节点存活轮数比LEACH算法延长了约1.5倍, 比PEGASIS算法也延长了0.3倍.

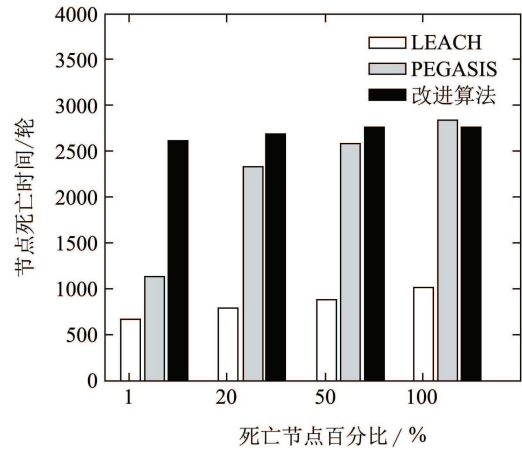


图11 3种算法节点存活时间比较

Fig. 11 Life span comparison of three algorithm

2) 单机设备能效优化算法的有效性分析.

选取机床加工设备用于单机设备能效优化算法的验证, 此设备为某机床厂生产的CK6136变频数控机床. 设任意两工步间的空载时间为 T_0 , 工步间空载运行转速为 n_k . 基于文中第4.1节提出的单机设备任意两工步间空载节能运行模型进行优化, 采用文献[6]给出的节能百分比定义:

$$\delta = (1 - \frac{E_{0k}}{T_0 \times P_{0k}}) \times 100\%$$

式中: δ 为节能百分比, E_{0k} 为频率上升阶段启动过渡过程的能量消耗, P_{0k} 为主传动轴空载转速为 n_k 时与之对应的主轴空载功率. 单机设备工步间空载节能优化实验数据如表4所示.

表4 工步间空载节能优化实验值

Table 4 Experimental value of no-load energy saving optimization between two procedure

| 空载过程 | 已知参数 | | 优化后测量值 | | |
|------|-------|-------|----------|----------|----------------|
| | T_0 | n_k | P_{0k} | E_{0k} | 节能百分比 δ |
| 1 | 3 | 600 | 174 | 435 | 16.7% |
| 2 | 10 | 1050 | 277 | 1144 | 58.7% |
| 3 | 40 | 1200 | 302 | 1357 | 88.8% |

3) 综合资源能效优化算法有效性分析.

采用文中第4.2节提出的综合能效资源优化模型及算法对轴承磨床制造系统综合资源能效进行优化. 算法中参数设置如下:

$$w_0 = 1.3, c_1 = 1.6, c_2 = 1.5,$$

$$\text{gen} = 300, \text{popsize} = 50,$$

变异率 $w_1 = 0.35$, 求解后可得 Pateto 解集如表5所示.

表 5 Pareto解
Table 5 Pareto solution

| 最大 序号 | 完工 时间/h | 机器 空转 时间/h | 产品 合格率 系数 | 最大 序号 | 完工 时间/h | 机器 空转 时间/h | 产品 合格率 系数 |
|----------|------------|------------------|-----------------|----------|------------|------------------|-----------------|
| 1 | 60 | 53 | 0.0585 | 26 | 61 | 75 | 0.0599 |
| 2 | 64 | 82 | 0.0562 | 27 | 63 | 71 | 0.0610 |
| 3 | 62 | 57 | 0.0568 | 28 | 65 | 64 | 0.0614 |
| 4 | 66 | 79 | 0.0565 | 29 | 65 | 82 | 0.0575 |
| 5 | 59 | 68 | 0.0588 | 30 | 69 | 63 | 0.0585 |
| 6 | 59 | 64 | 0.0610 | 31 | 63 | 83 | 0.0588 |
| 7 | 60 | 85 | 0.0556 | 32 | 63 | 85 | 0.0585 |
| 8 | 65 | 85 | 0.0565 | 33 | 64 | 63 | 0.0667 |
| 9 | 66 | 63 | 0.0575 | 34 | 66 | 62 | 0.0595 |
| 10 | 62 | 62 | 0.0592 | 35 | 65 | 73 | 0.0602 |
| 11 | 62 | 72 | 0.0578 | 36 | 66 | 76 | 0.0575 |
| 12 | 62 | 57 | 0.0680 | 37 | 62 | 80 | 0.0602 |
| 13 | 64 | 59 | 0.0610 | 38 | 69 | 85 | 0.0585 |
| 14 | 59 | 72 | 0.0610 | 39 | 69 | 92 | 0.0578 |
| 15 | 63 | 68 | 0.0568 | 40 | 63 | 78 | 0.0610 |
| 16 | 64 | 91 | 0.0559 | 41 | 66 | 64 | 0.0595 |
| 17 | 64 | 60 | 0.0602 | 42 | 62 | 68 | 0.0625 |
| 18 | 63 | 91 | 0.0562 | 43 | 63 | 85 | 0.0592 |
| 19 | 64 | 62 | 0.0585 | 44 | 63 | 87 | 0.0625 |
| 20 | 59 | 75 | 0.0588 | 45 | 66 | 83 | 0.0595 |
| 21 | 64 | 87 | 0.0575 | 46 | 64 | 82 | 0.0621 |
| 22 | 68 | 62 | 0.0592 | 47 | 65 | 87 | 0.0625 |
| 23 | 60 | 89 | 0.0588 | 48 | 67 | 85 | 0.0617 |
| 24 | 62 | 93 | 0.0585 | 49 | 65 | 91 | 0.0637 |
| 25 | 62 | 67 | 0.0621 | 50 | 66 | 88 | 0.0629 |

进而, 采用第3.3节的层次分析法AHP从得到的 Pareto解集中选择最优能效优化调度方案. 经计算得到权重矢量 $W^T = (0.10, 0.64, 0.26)$. 计算 $D = (D_i)_p = BW^T = \sum_{j=1}^q b_{ij}w_j$, 可得到评价方案满意度矩阵 $(D_i)_p$. 取 $D_L = \max D_i = D_{11}$, 说明方案11为最满意方案, 其对应的调度解甘特图见图12.

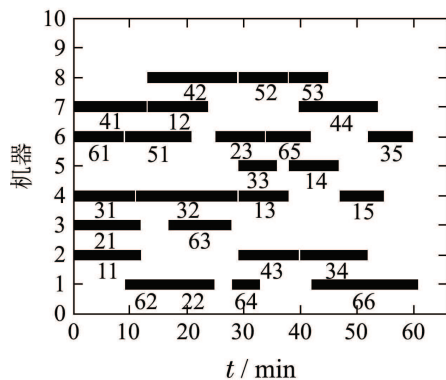


图 12 综合资源能效优化调度甘特图

Fig. 12 Gantt chart of integrated resource efficiency optimal scheduling

5 结论(Conclusions)

本文针对机床产品制造系统为研究对象, 从控制系统的角度, 以能效优化为目标, 利用无线传感器网络技术、优化控制理论与方法, 给出了机床产品制造系统信息检测、能效优化问题建模方法及优化控制算法. 目前, 机床产品能效优化基本上均是从机械的角度, 通过绿色设计, 采用高能效部件提高能效, 鲜有从控制与决策的角度, 解决系统的能效优化控制问题. 然而, 机床产品制造系统的节能是一个系统工程, 从单机的角度来看, 采用高能效部件是一个重要步骤, 相比之下, 通过单机内多驱动装置的协同, 尽量减少整台机床的基本能耗, 特别是根据负载动态调节驱动装置的运转速度, 或暂时性关闭不需要的能耗设备, 对能耗的影响则大得多. 从制造车间机群来看, 不能只局限在查明单机机床所用各个部件的效率, 有必要对整个生产过程执行一次以能源为基础的观察, 通过对整体加工流程的精益管控, 优化加工流程来降低可变能耗. 因此, 本文的特色之处在于从系统控制与决策的视角, 结合无线传感器高能效通信, 实现单机设备与综合资源能效优化. 如何从控制系统角度, 建立行之有效的能效优化控制评价指标体系与量化评估方法是值得进一步探索的方向.

参考文献(References):

- [1] MASAO D. Energy saving in heavy machine manufacturing shop [J]. *Tool Engineer*, 2008, 52(8): 10 – 14.
- [2] 胡韶华. 现代数控机床多源能耗特性研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2012. (HU Shaohua. *Energy consumption characteristics of multiple-component of modern CNC machine tools* [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.)
- [3] KROLL L, BLAU P, WABNER M. Lightweight components for energy-efficient machine tools [J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2011, 4(2): 148 – 160.
- [4] ZULAIKA J J, CAMPA F J, DE LOPEZ L L N. An integrated process-machine approach for designing productive and lightweight milling machines [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2011, 51(7/8): 591 – 604.
- [5] ZHE Y, LIU F. Methods for integrating energy consumption and environmental impact considerations into the production operation of machining processes [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 23(4): 428 – 435.
- [6] SCHREMS S, EISELE C, ABELE E. Methodology for an energy and resource efficient process chain design [J]. *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing*, 2011, 17(3): 299 – 304.
- [7] DRAGANESCU F, GHEORGHE M, DOICIN C V. Models of machine tool efficiency and specific consumed energy [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 141(1): 9 – 15.
- [8] SARWAR M, PERSSON M, HELLBERGH H. Measurement of specific cutting energy for evaluating the efficiency of bandsawing different workpiece materials [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2009, 49(12/13): 958 – 965.

- [9] 施金良, 刘飞, 许弟建, 等. 变频调速数控机床主传动系统的功率平衡方程 [J]. 机械工程学报, 2010, 46(3): 118 – 124.
(SHI Jinliang, LIU Fei, XU Dijian, et al. Power balance equation about the numerical control machine tool's main driver system driven by variable voltage variable frequency [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(3): 118 – 124.)
- [10] HE Y, LIU F, WU T. Analysis and estimation of energy consumption for numerical control machining [J]. *Journal of Engineering Manufacture*, 2012, 226(2): 255 – 266.
- [11] LIU F, ZHANG H, WU P. A model for analyzing the consumption situation of product material resources in manufacturing systems [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 122(2): 201 – 207.
- [12] HEINZELMAN W B, CHANDRAKASAN A P, BALAKRISHNAN H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2002, 1(4): 660 – 670.
- [13] LINDESY S, RAGHAVENDRA C. PEGASIS: power-efficient gathering in sensor information system [C] // *Proceedings of IEEE Aerospace Conference*. Big Sky, Montana: IEEE, 2002: 1 – 6.
- [14] 任志刚, 冯祖仁, 张兆军. 多优解更新信息素的混合行为蚁群算法 [J]. 控制理论与应用, 2010, 27(9): 1202 – 1206.
(REN Zhigang, FENG Zuren, ZHANG Zhaojun. Hybrid-behavior ant-colony optimization algorithm with pheromone updated by multiple good solutions [J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(9): 1202 – 1206.)
- [15] WANG C, LIU Q, LI Q Y, et al. Optimal charge plan model for steel-making based on modified partheno-genetic algorithm [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30 (6): 734 – 741.
- [16] JIE G, MISUO G, SUN L Y, et al. A hybrid of genetic algorithm and bottleneck shifting for multi-objective flexible job shop scheduling problems [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2007, 53(1): 149 – 162.
- [17] 王进峰, 范孝良, 万书亭. 一种基于图的柔性作业车间调度方法 [J]. 系统仿真学报, 2013, 25(10): 2499 – 2502.
(WANG Jinfeng, FAN Xiaoliang, WAN Shuting. Graph-based approach for flexible job-shop scheduling problems [J]. *Journal of System Simulation*, 2013, 25(10): 2499 – 2508.)
- [18] ZHANG R, SONG S, WU C. A two-stage hybrid particle swarm optimization algorithm for the stochastic job shop scheduling problem [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2012, 27(3): 393 – 406.
- [19] 张静, 王万良, 徐新黎, 等. 混合粒子群算法求解多目标柔性作业车间调度问题 [J]. 控制理论与应用, 2012, 29(6): 715 – 722.
(ZHANG Jing, WANG Wanliang, XU Xinli, et al. Hybrid particle-swarm optimization for multi-objective flexible job-shop scheduling problem [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(6): 715 – 722.)
- [20] LEI D. A Pareto archive particle swarm optimization for multi-objective job shop scheduling [J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2008, 54(4): 960 – 971.
- [21] TAVAKKOLI M R, AZARKISH M, SADEGHNEJAD B A. Solving a multi-objective job shop scheduling problem with sequence-dependent setup times by a Pareto archive PSO combined with genetic operators and VNS [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 53(5/8): 733 – 750.
- [22] LEI D M. Multi-objective production scheduling: A survey [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, 43(9/10): 926 – 938.
- [23] MARC B, JOHN C, ROBERT N. High-performance induction motor control via input-output linearization [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 1994, 14(4): 25 – 33.

作者简介:

王艳 (1978–), 女, 副教授, 硕士生导师, 目前研究方向为网络化控制系统、制造系统能效优化控制, E-mail: wangyan@jiangnan.edu.cn;

纪志成 (1959–), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为电力电子与电气传动、制造信息化, E-mail: zcji@jiangnan.edu.cn.