

文章编号: 1671-0444(2018)04-0541-09

## 基于社群负载感知的机床自组织策略

张启万<sup>1</sup>, 鲍劲松<sup>1</sup>, 王庆霞<sup>1</sup>, 郑小虎<sup>1</sup>, 郭东升<sup>1</sup>, 孙习武<sup>2</sup>, 翁海红<sup>2</sup>

(1. 东华大学 机械工程学院, 上海 201620; 2. 上海航天设备制造总厂, 上海 200245)

**摘要:** 订单变化引起生产过程变化, 为使得生产线上设备自组织在一起, 实现高效柔性化生产模式, 引入加工社群的概念, 提出了一种基于社群负载感知的多层次结构, 建立了以机床类型以及加工能力为标准对机床域进行机床社群划分的聚类模型; 同时以负载率和负载均衡状态为目标, 提出了机床自组织动态形成机床社群的实现方案, 实现社群负载波动的最小化。通过改进分组遗传算法(IGGA)对社群动态划分进行求解, 实例分析表明, 该方法在机床自组织形成机床社群过程中使得设备负载更加均衡。

**关键词:** 社群; 负载感知; 改进分组遗传算法; 机床自组织

**中图分类号:** TH 166; TH 164      **文献标志码:** A

## Self-organization Strategy of Machine Tool Based on Community Load Sensing

ZHANG Qiwan<sup>1</sup>, BAO Jinsong<sup>1</sup>, WANG Qingxia<sup>1</sup>, ZHENG Xiaohu<sup>1</sup>, GUO Dongsheng<sup>1</sup>,  
SUN Xiwu<sup>2</sup>, WENG Haihong<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China;

2. Shanghai Spaceflight Manufacture (Group) Co. Ltd., Shanghai 200245, China)

**Abstract:** The change order will lead to the changes of production process. The concept of processing community was introduced in order to achieve the self-organized production line equipment as well as the efficient and flexible production. A multi-level structure based on community load sensing was proposed and a clustering model was set up which was based on the basis of the machine type and machining capacity to achieve machine tool community division. At the same time, the load rate and load balancing state were taken as the goal, and the self-organizing dynamic tool community was proposed to minimize the community load fluctuation. The dynamic division of the community was solved by the improved group genetic algorithm (IGGA). The example suggests that this method makes the equipment load more balance in the process of forming machine tool community through machine tool self-organization.

**Key words:** community; load sensing; improved group genetic algorithm; machine tool self-organization

航天事业的蓬勃发展促使航天企业生产模式发生转变。航天产品的个性化和多样化要求企业向多

品种、小批量的模式发展<sup>[1]</sup>, 这引起了生产作业的频繁切换, 从而产生大量作业切换时间和设备加工等

收稿日期: 2017-11-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51475301)

作者简介: 张启万(1994—), 男, 江苏南通人, 硕士研究生, 研究方向为智能制造与测控, E-mail: 1104024221@qq.com

鲍劲松(联系人), 男, 副教授, E-mail: Bao@dhu.edu.cn

待时间,导致企业的生产效率下降,企业设备的整体负载均衡状态深受影响<sup>[2]</sup>。事实上,以加工设备为行为主体时,可以发现加工设备仅仅接收与自己加工能力匹配的加工任务<sup>[3]</sup>,无须重点关心总体任务的多样性。因此,减少加工设备与加工任务的关联度,从而保持加工设备的自主性,这是提高生产效率和保持设备整体负载均衡的策略之一。

目前,已有多种控制系统体系应用于企业的生产中,并且其已经适应了不同阶段的生产需求,使得航天企业生产制造走向数字化、自动化,但这些控制系统体系无法适应柔性制造的高动态性。而应用多智能体控制系统可以有效地降低作业与加工设备的关联度,使得加工设备能够自主智能地协同生产计划、调度和控制系统,实现企业自适应、自组织式智能生产,其发展趋势<sup>[4-5]</sup>如图 1 所示。Brustchy<sup>[6]</sup>通过应用群智能的阈值模型使得机器人能够根据环境

的变化和自己的行为结果,自适应地调整行为阈值,自组织实现任务分配与执行。Hadeli 等<sup>[7]</sup>根据 sign-based stigmergy 设计了 multi-agent 协作系统,并将其应用于制造控制系统中。Lou 等<sup>[8]</sup>提出一种基于谈判的分布式调度方法,以最小化最大完工时间为目标,以设备智能体为核心制定单机调度方案,进而由任务智能体通过谈判实现全局最优。Lim 等<sup>[9]</sup>提出基于货币的竞价机制来促进智能体的合作,并通过遗传算法(GA)来调整货币取值。单汨源等<sup>[10]</sup>针对多阶段的分布式制造系统构造了基于多智能体的协同生产框架,每个智能体具有决策、通信、协作的功能。但此种多智能体引导的生产方式无法完全适用于航天企业中多产品、小批量的任务加工,加工设备一开始就被动地只归其归属的智能体管理,使得设备的功能复用性逐渐变差,最终导致加工资源的浪费。

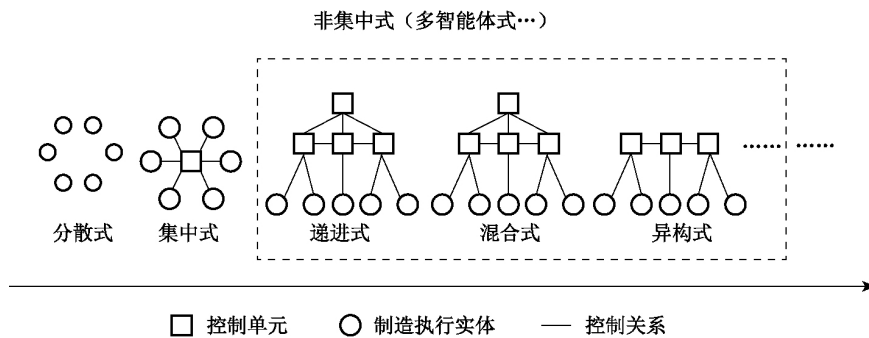


图 1 控制系统体系发展趋势图

Fig. 1 The development trend of control system architecture

随着设备间互联互通(M2M)技术的迅速发展,设备可以与后台信息系统及人之间进行信息共享<sup>[11-12]</sup>。以设备间通信为基础,智能设备通过计算<sup>[13]</sup>以自适应、自组织的方式集群形成一个智能体,同时可以自主地脱离一个智能体并加入新的智能体,位于每个智能体内部的智能设备可以密切地进行通信,这符合社会学中的社群特征,即具有行为规范及具有持续的互动关系<sup>[14]</sup>。因此,以设备社群为基础的工厂设备管理既体现了多智能体的协同能力,又增强了设备的复用性,有利于实现设备的负载均衡状态。

本文以多智能体的分布式管理为参考,提出机床社群概念,以机床负载均衡状态为目标分析机床社群的动、静态的规则,以改进分组遗传算法(IGGA)对航天机加工车间中的机床社群动态进行划分。

## 1 社群概念及其划分规则

### 1.1 社群概念

假设车间 M2M 通信中的每个机床节点在一般

情况下只与自己有紧密联系的机床进行互联互通以及数据共享。一般从同一个社群网关中接收或者共享信息的设备节点可以形成一个加工社群。

**定义 1** 社群(community)是由若干个以相同通信节点为基础的具有相同功能和属性的机床节点  $D_i (i = 1, 2, \dots, n)$  构成。

在形成社群的过程中,需要为社群中的机床节点  $D_i$  定义一些基本属性,这些基本属性形成了设备节点的基本功能,用向量  $(f_1, f_2, \dots, f_n)$  表示,从而设备节点可以表示成  $D_i = (f_1, f_2, \dots, f_n)$ ,这表示第  $i$  个设备节点是由  $n$  个属性构成。本文针对航天加工的特殊性定义了相应的属性功能特征,其中包括设备节点的加工能力的描述、加工负载的描述以及每个社群中的设备节点标签和设备节点的初始总时间,这些特征可以用来衡量各个设备节点的负载率以确定任务的分配与否<sup>[15]</sup>。

### 1.2 社群通信过程

在车间设备的 M2M 互联中,整个的设备网络将被分成若干个社群。假如每个机床节点由具有相

同的加工能力的设备组成一个社群,那么社群的数目会远远小于设备节点的数目,这种方法使物联网 M2M 管理更加便利。一个社群中的设备节点之间的关系十分密切,任务会在同个社群中的设备节点间频繁转移,因此它们之间关系属于强关系型;而在不同社群的设备节点间只存在任务的递进关系,关系比较单一,联系也比较稀疏,使得两个社区间的设备节点的关系属于弱关系型,这个时候就需要一些相对比较活跃的中继节点将信息互相传递,这就是网关的作用。因此,将整个 M2M 设备网络按照设备节点间关系的强弱分成不同的社群。各个设备节点间采用“存储-计算-转发”的方式来实现互联互通,利用每个节点之间的这种互联互通方式实现数据的传输,其社群通信模型如图 2 所示。

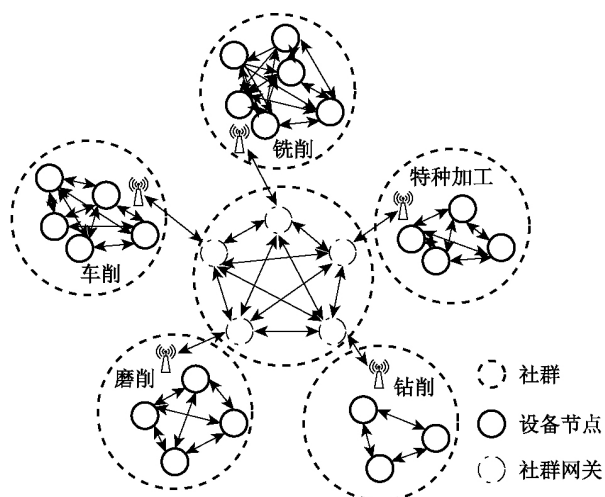


图 2 设备节点的通信模型

Fig. 2 The communication model of device mode

### 1.3 社群静态划分规则

加工任务在同一个机床社群内部的设备节点上的调动十分频繁,设备节点之间的数据信息的传递的可能性很大,而位于不同社群的设备节点之间的互联互通往往需要一个中间社群网关来进行调配。本文采用一些相对紧密联系的网关节点来实现社群之间的信息传递。由于车间 M2M 设备网络中的机床节点在不同的加工过程中实现的功能不同,会出现一定的社群转移,需要将设备网络中的设备节点按照一定的划分策略分成若干个社群,划分依据设备节点之间的邂逅次数。

**定义 2** 邂逅频次是指机床设备  $i$  和机床设备  $j$  在一定的时间内被同时选择作为同一个设备选择域中成员的次数,记作  $m_{(i,j)}$ ,该值表示节点间的关联程度。

使用 10 个简单设备节点对本文的社群划分策

略进行说明,此处设备节点的邂逅次数小于 3 默认为弱关联关系,即认为两个设备节点不存在功能重合,不存在一定的互联互通的关系,且不能划分到该功能社群中。10 个机床节点的互联互通关系划分的相邻矩阵  $A$  如式(1)所示,社群的划分结果如图 3 所示。

$$A = \begin{bmatrix} \infty & 2 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 5 & 6 & 4 \\ 2 & \infty & 5 & 3 & 1 & 0 & 0 & 2 & 1 & 1 \\ 2 & 5 & \infty & 3 & 2 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 3 & 3 & \infty & 3 & 2 & 2 & 1 & 2 & 2 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & \infty & 5 & 4 & 1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 2 & 5 & \infty & 4 & 2 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 4 & 4 & \infty & 1 & 0 & 0 \\ 5 & 2 & 0 & 1 & 1 & 2 & 1 & \infty & 5 & 6 \\ 6 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 0 & 5 & \infty & 5 \\ 4 & 1 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 6 & 5 & \infty \end{bmatrix} \quad (1)$$

设备节点之间的邂逅频次在一段时间内是比较稳定的,但是在设备加工一定的时间后,设备节点的邂逅次数会发生改变。这是因为设备节点具有一定的疲劳度,即其运转时间是有限定值的,当其预测到工作时间即将用完时就会将之前的强关联关系自动转变成弱关联关系,这个时候就会对社群的结构造成影响。此外一个设备节点可能存在多个功能,因此设备节点有可能被不同的设备选择域选中,同样会对社群的结构造成影响。因此,本文采用周期性的方法对社群进行更新,每个周期中的社群划分的结构信息都可以给下一个周期提供原始数据。这可以保证设备网络中的设备节点周期性地动态构建社群,从而降低算法的时间复杂度。

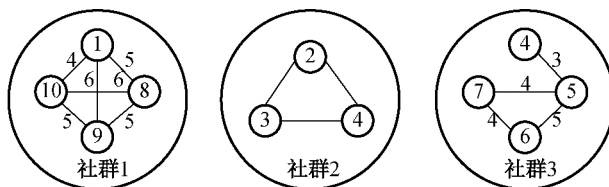


图 3 社群划分示意图

Fig. 3 The sketch map of community division

## 2 机床社群的动态调整策略

机床社群的静态调整使得机床社群保持一定的稳定性,保证加工过程中的加工稳态,但机床的静态调整难以使得社群中的设备利用率达到最大,从而使得加工任务能够最快完成。因此采用动态调整机

床社群的方法即社群成员快速匹配加工任务,可使机床社群成员在整个加工过程中处于动态最佳负载状态并能够快速完成加工任务。

### 2.1 机床社群负载模型

设备节点的负载与其能力紧密相关,其能力主要通过两个部分来表明,即设备的剩余加工时间和设备可加工的工件特征<sup>[16]</sup>。设备可加工的工件特征是工件能在某设备节点上加工的前提,本文中设备的剩余加工时间  $\Delta T_{D_j}$  表示设备是否有能力加工其他零件,其计算方法如式(2)所示。

$$\Delta T_{D_j} = T_{D_j} - \sum (t_{w_j} + t'_{w_j}) \quad (2)$$

式中:  $t_{w_j}$  是在设备节点  $D_j$  上加工工件以及待加工工件  $i$  所需要的总加工时间;  $t'_{w_j}$  是加工完成工件  $i$  后到加工下一个工件之间的加工间隔时间,即待机休息时间;  $T_{D_j}$  是设备节点  $D_j$  上的可用工时。当  $\Delta T_{D_j} < \forall t_i$  时,该设备节点将弱化其与社群中其他设备节点的联系,当其他所有设备节点都无法加工某一零件时,这类设备节点才会依次重新转为强关联。

因而设备的负载率  $\theta_k$  如式(3)所示。

$$\theta_k = \frac{\sum t_{w_j}}{T_{D_j}} \times 100\% (\theta_k \leq 80\%) \quad (3)$$

式中:  $\theta_k$  为设备  $k$  的负载率,在实际生产中一般不大于 80%。 $\theta_k$  反映了设备节点的利用状态,通过设备负载率  $\theta_k$  的均方差  $\sigma(\theta)$  表示生产社群中的设备负载的均衡状态,其计算方法如式(4)、(5)所示。

$$\bar{\theta} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \theta_k \quad (4)$$

$$\sigma(\theta) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (\theta_k - \bar{\theta})^2} \quad (5)$$

式中:  $\bar{\theta}$  为社群中设备的整体利用率,该值越大时表明社群整体利用率越大;  $\sigma(\theta)$  说明了社群中每个设备节点的利用率之间的差异程度,该值越小越说明该社群中的设备的负载相对比较均衡。本文研究的目标就是使得设备在整体利用率高的情况下维持比较均衡的设备负载。

### 2.2 社群之间动态调整

社群之间的互联互通的基础在于社群网关,其调整流程如图4所示。调整的步骤如下:

(1) 零件选择某工序作为加工的开始,对负责该工序的机床社群进行整体负载率评估,评估函数为式(3),通过评价函数得到3种状态:社群饥饿、社群正常、社群过盈。

(2) 针对不同的社群状态,进行不同的操作。当社群处于正常状态时,一般不需要调整,此时,社群不会主动地去接收任务,而是被动地接收零件的加工任务;当社群处于饥饿状态时,该社群的网关将会主动请求任务进行加工,以实现整个社群的设备利用率达到最大;当社群处于过盈状态时,社群网关对于加工任务采取放弃竞争的策略,保证加工设备的使用寿命。

(3) 当出现加工任务调整以及设备节点动态调整时,都会进行社群负载率评估,分配社群状态。

(4) 循环第二步、第三步,使得社群处于正常状态。

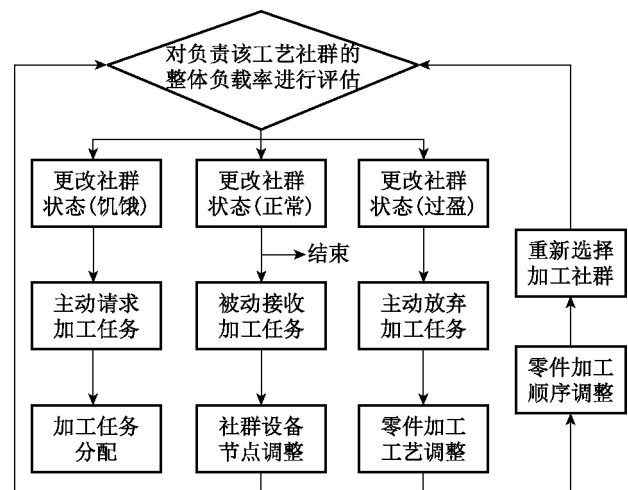


图4 机床社群间动态调整流程图

Fig. 4 Dynamic adjustment flow chart between machine communities

### 2.3 社群内部动态调整

社群内部的动态调整主要是针对机床设备的个体负载率,通过加工任务的重新分配实现机床资源的更优配置,其调整流程如图5所示。调整的步骤如下:

(1) 机床社群网关对本社群中的所有成员进行评估,评估函数为式(5);

(2) 若  $\sigma(\theta) < \tau$ ,则认为该机床社群满足要求,不需要进行任务重新分配;反之,进行加工任务微调。 $\tau$  为调整阈值,取值范围为  $0 \leq \tau < 0.2$ 。

当前机床社群网关向其他社群网关发出申请,要求其他社群网关对当前社群所有机床节点的负载率进行评估,每一个社群网关采用的评估函数如式(6)所示。

$$\rho_c = \left| \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (\theta_k - \bar{\theta}^c)^2} - \sigma(\theta) \right| \quad (6)$$

式中:  $\theta_k$ 、 $\bar{\theta}^c$  为有别于当前机床社群的社群  $c$  中的机床负载率和平均机床负载率。考虑到社群和社群之间的稳定性,  $\rho_c$  应当不大于 0.15。

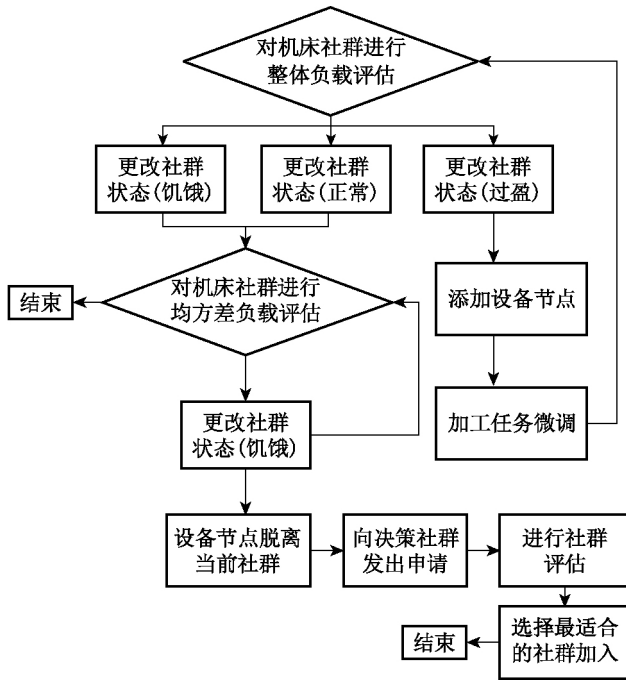


图 5 机床社群内部的动态调整流程图

Fig. 5 Dynamic adjustment flow chart within machine community

(3) 参与评估的机床社群网关向当前社群网关报告评估值。当  $\rho_c$  未超过阈值时, 整个设备网络不需要调整; 当  $\rho_c$  超过阈值时, 当前社群网关将与  $\rho_c$  最大的社群网关进行社群间调整。

(4) 循环第二步、第三步, 使得社群处于正常状态, 同时结束社群内部调整过程。

### 2.4 机床自组织时机的选择

社群间和社群内的调整是由机床社群的负载能力的变化决定的, 以下情况需要紧急调整:

- (1) 机床社群中出现设备损坏以及设备维修期来临时;
- (2) 设备维修结束加入社群时;
- (3) 机床社群中设备负载很高, 危及使用寿命时;
- (4) 机床社群中设备能力需求发生很大变化时。

## 3 基于改进分组遗传算法的机床自组织过程

### 3.1 编码

采用 IGGA 进行染色体编码时, 采用按组编码的方式, 即针对机床社群调整问题, 按照社群类别进行编码。这种编码方式可以解决传统遗传算法编码(按照机床设备编码)对分组信息不明确的问题, 当

进行交叉和变异时, 此种编码方式按照机床来进行, 从而对机床社群信息完全透明。

6 台机床映射到 3 个机床社群上的编码方式如图 6 所示。从图 6 可以看出, 按组编码的方式, 以机床社群为编码的主体, 机床设备依赖于机床社群的存在。

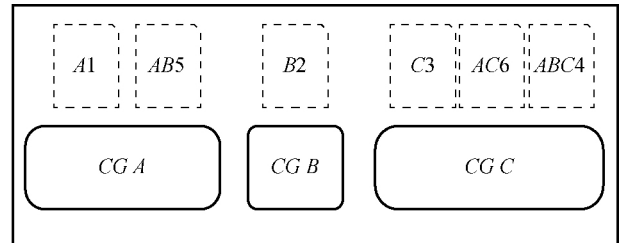


图 6 基于分组的染色体编码示意图

Fig. 6 Sketch map of chromosome coding based on grouping

图 6 中的映射可以表示为  $A(1, 5)B(2)C(3, 4, 6)$ 。此映射关系可以通过分组编码表示为染色体  $\{n = 1, 5, 2, 3, 6, 4; G = A, B, C\}$ , 该染色体可由  $n$  和  $G$  来完整表示, 其中设备 1、2、3 在同一机床社群中, 即上一行的  $n$  通过传统遗传算法编码实现; 下一行的  $G$  代表着整个设备网络中, 其由标号为 1、2、3 的 3 个机床社群(即 group)组成。本文中, 所构造染色体的  $n$  行基因由两部分构成: 一是字母, 其与 group 的标识相同, 表明这台机床的功能以及能否进入某一个机床社群, 例如,  $AB5$  表示可以成为 group A 中的个体, 也可以成为 group B 中的个体, 但不可以成为 group C 中的个体; 第二部分是数字, 表示机床的标号, 用于区分不同机床。

### 3.2 适应度值计算

适应度值是每一代每一个染色体好坏的评判标准, 本文通过评估每一个染色体的整体负载率以及负载均衡状态来选择每一代中的最佳个体, 并将每一代的优秀个体作为下一代的种群集合。其中适应度值通过适应度函数来计算, 由于负载均衡状态值越小越可满足要求, 适应度值的计算属于最小值问题, 因此本文中的适应度函数如式(7)所示。

$$g = \frac{1}{\sigma(\theta)} \quad (7)$$

IGGA 为计算每个机床社群的负载率以及负载均衡状态提供了便利, 提高了算法的运行效率。

### 3.3 交叉行为

交叉行为是遗传算法中的核心, 用于使后代继承到父代的优秀基因, 从而变得更加优秀, 同时在种

群进化过程中起到决定全局搜索能力的作用。

本文通过局部映射杂交的方法来实现染色体的交叉行为,确定交叉的父代,将父代的样本两两分组,

交叉过程如图 7 所示。其中交叉过程中阶段 1 的阴影为重复基因,阶段 2 的阴影部分为未分配的基因,阶段 3 的阴影部分为分配基因的位置。

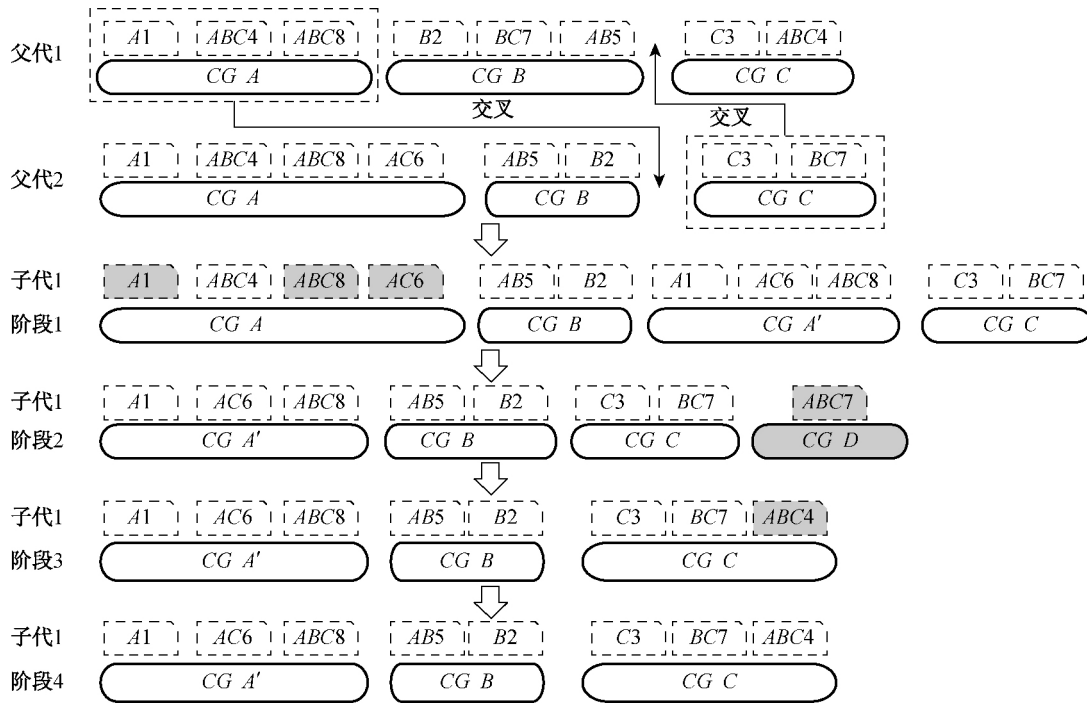


图 7 基于分组的父代交叉生成子代过程图

Fig. 7 Parent cross generation process map based on grouping

一组父代之间进行交叉后,会生成阶段 1 中的重复基因;阶段 2 将重复基因中原染色体基因删除,同时将删除后的孤立基因新建一个 group;阶段 3 将

新建 group 中的基因随机分配到非插入 group 中,形成阶段 4 中的子代 1。同理可以得到子代 2 的基因排列如图 8 所示。

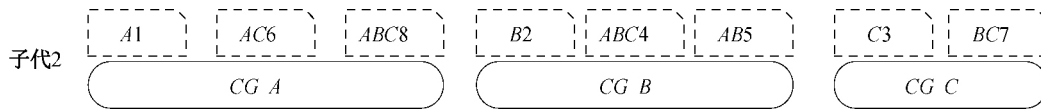


图 8 基于分组的子代排列图

Fig. 8 Subgroup permutation based on grouping

采用随机选择 group 插入的交叉方式,由于 group 信息对于选择过程是完全透明的,每一个 group 被选中的概率大体是相等的,因此无法保证被选出来的 group 能够使得子代的优秀程度大于父代。这种盲目的选择不利于算法效率的提升,通过对本文问题的分析,选择使用非极值 group 选择交叉法。通过式(3)计算每一个 group 的负载率,剔除负载率最大和最小的两个 group,尽量将负载率为平均值的 group 作为交叉 group。

### 3.4 变异行为

变异行为是模仿自然界基因突变的过程,用于维持种群的多样性,避免出现未成熟收敛的现象。对于机床社群调整问题,最佳结果是每个社群中的

机床的负载比较平均。因而,在分组遗传算法中,本文通过随机调换两个 group 中的基因来实现突变过程。当调换机床设备后,必然导致机床社群的能力变动,与交叉行为不同,变异行为完全是随机实现的。

本文针对 IGGA 中的变异过程,采用二分随机调换算法来辅助变异行为。二分随机调换算法是在突变的过程中计算每一个 group 负载率,基于负载率将机床设备分成两组进行组间调换基因而不是组内调换基因。二分随机调换算法的优势在于,负载率高和负载率低的 group 之间进行调换的概率比较大,这样就能够保证变异行为使种群沿着优化的轨道发展。

## 4 试验分析

航天某企业某机加工车间负责生产一批零件,

该生产车间拥有的机床类型有多种,每种机床的数量及详细信息如表1所示。

表1 车间10台设备详例  
Table 1 Details of ten workshop equipments

| 机床类型   | 机床能力             | 机床最大负载率/% | 机床编号  |
|--------|------------------|-----------|-------|
| 数控车床   | 工序 1, 2          | 80        | A1    |
| 数控加工中心 | 工序 1, 2, 3, 4    | 75        | AB2   |
| 数控铣床   | 工序 3, 4          | 75        | B3    |
| 数控铣床   | 工序 3, 4          | 75        | B4    |
| 数控加工中心 | 工序 1, 2, 3, 4    | 75        | AB5   |
| 数控磨床   | 工序 5             | 70        | C6    |
| 数控加工中心 | 工序 1, 2, 5       | 70        | AC7   |
| 数控加工中心 | 工序 3, 4, 5       | 70        | BC8   |
| 数控加工中心 | 工序 1, 2, 5       | 70        | AC9   |
| 数控加工中心 | 工序 1, 2, 3, 4, 5 | 65        | ABC10 |

表1中的机床编号用于进行IGGA中的编码,各机床的每周可用产能如表1所示,超过产能后,机床需要进行规定的保养,以保证机床的使用寿命。本文以该车间某一时期的生产任务作为应用实例,分析机床社群的动态划分过程。

统计结果如表2所示。其中,表2中的加工任务P表示这批任务具体内容,其他各列表示各个零件的详细加工信息。例如,对于零件 $P_1$ ,其加工数量是20,总共需要多道工序,其中工序1需要0.4h,总共需要2次。

9种零件的具体加工路线及各道工序加工时间

表2 9种零件的具体加工路线及各道工序加工时间统计  
Table 2 Specific processing route of nine parts and summary of each step time consuming

| 加工任务      | 工序 1     | 工序 2     | 工序 3      | 工序 4     | 工序 5     |
|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| $P_1(20)$ | (0.4, 2) | (0.2, 5) | (0.75, 1) | (1.5, 1) | (3, 1)   |
| $P_2(10)$ | (1, 2)   | (0.5, 4) | (1, 2)    |          |          |
| $P_3(10)$ | (0.6, 2) | (0.6, 4) | (1.5, 2)  |          |          |
| $P_4(10)$ | (0.8, 2) | (0.4, 5) | (1.2, 2)  | (1.8, 1) | (3.5, 1) |
| $P_5(40)$ | (0.5, 2) | (0.5, 3) | (0.6, 1)  | (0.9, 1) | (2.5, 1) |
| $P_6(20)$ | (1, 2)   | (1.2, 2) | (1, 1)    | (2, 1)   | (4, 1)   |
| $P_7(10)$ | (2, 2)   | (2, 1)   | (0.6, 2)  | (2.2, 2) |          |
| $P_8(10)$ | (2, 2)   | (2, 3)   | (1.5, 2)  | (2, 2)   |          |
| $P_9(40)$ | (1, 2)   | (0.5, 2) | (1.5, 1)  |          |          |
| 加工时间/h    | 303      | 312      | 235       | 208      | 275      |

原始机床社群组织状态如表3所示。由表3可知,机床社群的变化过程对应该车间原始加工过程中机床功能的转变方案。原始机床社群下完成9种

零件的加工需要200.8h。表4和表5分别是采用GA和IGGA得到的两种机床加工过程中机床社群组织变化动态。

表3 原始机床社群组织状态  
Table 3 The original machine community organization status

| 加工时间/d      | 社群 A                          | 社群 B                         | 社群 C                    |
|-------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------|
| 1, 2, 3     | A1, AB2, AB5, AC7, AC9, ABC10 | B3, B4, BC8,                 | C6                      |
| 4, 5, 6     | A1, AC9                       | AB2, B3, B4, BC8, AB5, ABC10 | C6, AC7,                |
| 7, 8, 9, 10 | A1,                           | AB2, B3, B4, AB5, BC8, ABC10 | C6, AC9, AC7            |
| 11, 12      | A1                            | AB2, B3, B4, AB5,            | C6, AC7, AC9, BC8 ABC10 |

表 4 由 GA 方法得到的机床社群组织状态  
Table 4 Status of the machine community organization obtained by GA

| 加工时间/d  | 社群 A                     | 社群 B                    | 社群 C              |
|---------|--------------------------|-------------------------|-------------------|
| 1, 2, 3 | A1, AB2, AC7, AC9, ABC10 | B3, B4, AB5, BC8,       | C6                |
| 4, 5, 6 | A1, AB5, AC7, AC9        | AB2, B3, B4, BC8,       | C6, ABC10         |
| 7, 8    | A1, AC7,                 | AB2, B3, B4, AB5, BC8,  | C6, AC9, ABC10    |
| 9, 10   | A1                       | AB2, B3, B4, AB5, ABC10 | C6, AC7, AC9, BC8 |

表 5 由 IGGA 得到的机床社群组织状态  
Table 5 Status of the machine community organization obtained by IGGA

| 加工时间/d  | 社群 A                     | 社群 B                    | 社群 C              |
|---------|--------------------------|-------------------------|-------------------|
| 1       | A1, AB2, AB5, AC7, AC9   | B3, B4, BC8, ABC10      | C6                |
| 2       | A1, AB5, AC7, AC9, ABC10 | AB2, B3, B4, BC8,       | C6                |
| 3       | A1, AB5, AC7, AC9        | AB2, B3, B4, BC8,       | C6, ABC10         |
| 4, 5, 6 | A1, AB5, AC7,            | AB2, B3, B4, BC8,       | C6, AC9, ABC10    |
| 7, 8    | A1, AC7,                 | AB2, B3, B4, AB5, BC8,  | C6, AC9, ABC10    |
| 9       | A1, AC7,                 | AB2, B3, B4, AB5, ABC10 | C6, AC9, BC8      |
| 10      | A1                       | AB2, B3, B4, AB5, ABC10 | C6, AC7, AC9, BC8 |

对上述原始方法、GA 以及 IGGA 的结果进行分析,其结果如表 6 所示。由表 6 可知,原始方法以及 GA 的加工时间明显大于 IGGA 的加工时间,而且对应的平均负载率小于 IGGA,由此可知原始方法和 GA 的设备利用率不高。根据比较结果,IGGA 加工时间短且设备利用率高更适合于实际的生产环境。

表 6 机床社群调配结果对比  
Table 6 The comparison of machine community deployment results

| 方法   | 加工时间/h | 平均负载率/% |
|------|--------|---------|
| 原始方法 | 200.8  | 55.4    |
| GA   | 178.9  | 68.6    |
| IGGA | 168.5  | 73.2    |

图 9 为 3 种模式下的加工过程机床负载均衡状态变化对比,其中机床负载均衡状态由设备负载率均方差表示,如上文式(5)所示。由图 9 可知,IGGA 划分下的机床负载均衡状态在一定时间后达到最优;而原始加工方案虽然很快将机床整体的负载均衡状态调整到合理范围内,但是整体的负载率均方差较高;同时,可以看出 IGGA 指导下的生产加工时间是最短的。结合表 6 和图 9 的结果分析可知,IGGA 得到的机床社群动态划分不仅提高了生产效率,同时提高每台机床的利用率,从而降低机床的整体负载率均方差。

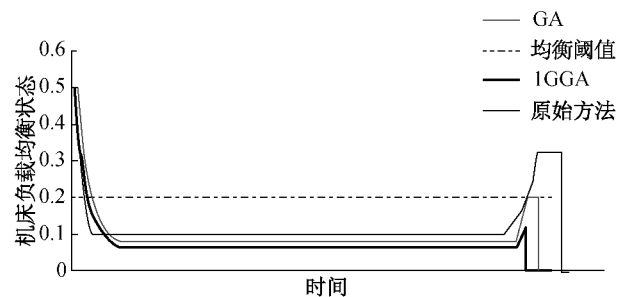


图 9 3 种模式下的加工过程中机床负载均衡状态变化对比  
Fig. 9 Comparison of machine load rate of three modes in machining processes

## 5 结 语

本文通过对机床域进行社群化,提出了一种车间机床资源控制的解决方法。该方法在计算社群的负载率和评估社群的负载均衡状态的基础上,可以保证机床的可持续应用。通过分组遗传算法对社群进行动态调整,从而对社群的组成进行优化,提高机床利用率,进一步优化机床整体负载均衡状态,同时缩短加工时间。最后通过实际生产中的事例验证了所提出方法的可行性以及有效性,加工时间缩短了 15%,负载率均方差下降了 20%。

下一步将围绕机床自组织社群,让生产任务自主寻找合适的机床社群中的加工设备,构建设备和加工任务双向协作关系以完成预定任务,同时机床社群内部通过 M2M 技术确定加工待任务的设备。



## 参 考 文 献

- [1] 宋海草, 易树平, 刘觅, 等. 基于加工资源的零件分类成组研究[J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(9): 1460-1466.
- [2] 范泽兵, 李山, 陈冰, 等. 设备负载均衡的制造资源优化配置方法[J]. 机械设计与制造, 2013(8): 113-116.
- [3] 谢刚, 吴瑜, 邱权, 等. 一种多 CPS 协同机制的设计研究[J]. 航空制造技术, 2016(16): 70-74.
- [4] 王世进. 基于自治与协商机制的柔性制造车间智能调度技术研究[D]. 上海: 上海交通大学机械与动力工程学院, 2008.
- [5] 张洁. 基于 Agent 的制造系统调度与控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [6] BRUTSCHY A. Task allocation in swarm robotics towards a method for self-organized allocation to complex tasks[M]. India: Universite Libre de Bruxelles, 2009.
- [7] HADELI, VALXKENAERS P, et al. Multi-agent coordination and control using stigmergy[J]. Computers in Industry, 2004, 53: 75-96.
- [8] LOU P, ONG S K, NEE A Y C. Agent-based distributed scheduling for virtual job shops [J]. Int J of Production Research, 2010, 48(13): 3889-3910.
- [9] LIM M K, TAN K, LEUNG S C H. Using a multi-agent system to optimise resource utilization in multi-site manufacturing facilities [J]. Int J of Production Research, 2013, 51(9): 2620-2638.
- [10] 单汨源, 蔡自兴, 高阳. 一种多级分布式制造系统的多智能体协同生产机制[J]. 控制与决策, 2001, 16(4): 410-414.
- [11] SUN W C, SONG M. A general M2M device model[C]// Proceedings-2010 IEEE 2nd Symposium on Web Society. 2010: 578-581.
- [12] KIM J, LEE J, KIM J. M2M service platform: Survey, issues, and enabling technologies[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2014, 16(1): 61-76.
- [13] 潘颖, 张文孝. 基于多 agent 的离散制造业制造执行系统框架研究[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(1): 244-246.
- [14] 郑鑫, 张晓洁, 宾冬梅, 等. 物联网 M2M 中基于社区的能耗感知路由策略[J]. 小型微型计算机系统, 2017, 38(4): 797-802.
- [15] 李新, 董朝阳. 基于本体映射的云制造资源与加工任务智能匹配[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(11): 157-160.
- [16] 何彦, 王乐祥, 李育锋, 等. 一种面向机械车间柔性工艺路线的加工任务节能调度方法[J]. 机械工程学报, 2016, 52(19): 168-179.

(责任编辑: 杜 佳)