

车间动态调度方法研究与应用

Research and Application of Shop Dynamic Scheduling Algorithm

北京航空制造工程研究所 许鹏 王焱

[摘要] 作业调度是实现车间数字化制造的基本软件功能之一。本文介绍了车间动态调度问题,提出一种动态调度方法,同时将此方法应用于航空小批量产品的车间调度,该方法以基于遗传算法的静态调度为基础,结合机床与工艺路线的约束,按照各种规则求解以产品的加工周期最短为目标的调度问题,并通过具体的实例仿真分析其有效性。

关键词: 车间调度 动态调度 静态调度 遗传算法

[ABSTRACT] Task scheduling is one of the basic software for achieving digital manufacturing of the shop. A dynamic scheduling method based on static scheduling of genetic algorithm is proposed, which has been applied in shop scheduling of small batch aeronautical products. Combined with manufacture and machine tool constrains, the scheduling problems of the shortest processing cycle under rules are researched, and the validity is analyzed through specific examples.

Keywords: Shop scheduling Dynamic scheduling Static scheduling Genetic algorithm

车间调度是先进制造系统实现管理技术、运筹技术和优化技术发展的核心。有效的调度方法和优化技术的研究应用,是实现先进制造和提高生产效益的基础和关键。针对生产调度问题并且按照不同的分类标准,Graves等人进行了分类整理。根据生产线中各工件的加工路径,可将其分为Flow Shop和Job Shop。Flow Shop假设所有的作业都在同样的设备上,并具有统一的加工操作和加工顺序,如炼钢厂、汽车制造厂等;Job Shop是最一般的调度类型,并不限制作业所操作的加工设备,并允许一个作业加工具有不同的加工路径。根据作业的加工特点,可将其分为静态调度和动态调度,其中静态调度是指所有的待加工工件均处于待加工状态,且被调度的工件集合和工件的加工时间都是确定的,在进行一次调度后,各作业加工顺序被确定,而且在以后的加

工过程中不再更改;动态调度则是把车间生产看成一个动态过程,其中会遇到多种突发事件(如新订单到来、工件交货期改变和机床发生故障等),调度方案要根据这些变化及时调整。由于动态调度更符合实际生产过程,很多学者开始重视动态调度问题的研究。实际的生产调度类型往往是Job Shop型,且是动态的。

一般来说,动态调度的研究有3种方法,即人工智能和专家系统方法、仿真试验方法以及滚动窗口再调度方法。人工智能和专家系统方法能够根据系统的当前状态和给定优化目标,对知识库进行搜索,选择最优的调度策略。但这种方法对新环境的适应性差,开发周期长、成本高;仿真试验方法通过对仿真模型的运行收集数据,对实际系统进行性能、状态方面的分析,从而对系统采用合适的控制调度方法;滚动窗口再调度方法就是把一个动态调度过程分成多个调度时刻,当一个调度时刻到来时,根据当前生产状态选择一个最佳调度方案^[1]。

车间调度问题的研究主要集中在建模和算法设计2方面。对于车间调度问题,至今还没有一种算法能够对调度问题进行全面而有效的求解,近年发展起来的遗传算法对该类问题的求解具有一定的优势。由于作者所从事的课题研究领域属于多品种、小批量生产模式,因此本课题针对多品种、小批量模式的生产调度特点,将滚动窗口再调度方法和遗传算法相结合,设计了相关调度模型和算法,并在此基础上研制了车间调度系统软件。仿真结果表明,该系统和方法是可行的。

1 车间动态调度问题描述

本课题研究的调度问题是基于多目标的车间调度问题的,它可以描述为 N 个加工顺序不同的工件要在 M 台机器上完成加工。

已知各操作的加工时间和各工件在机器上的加工次序约束,要求确定与工艺约束条件相容的各机器上所有操作的加工开始时间或完成时间或加工次序,使加工性能指标达到最优,数学描述为^[2]:

$$\begin{cases} \text{Min } \max\{\max_{1 \leq k \leq m, 1 \leq i \leq n} c_{ik}\} & \text{①} \\ \text{s. t. } c_{ik} - p_{ik} + M(1 - a_{ihk}) \geq c_{ik} & i=1, 2, \dots, n; h, k=1, 2, \dots, m; \\ c_{jk} - c_{ik} + M(1 - x_{ijk}) \geq p_{jk} & \text{②} \\ i, j=1, 2, \dots, n; k=1, 2, \dots, m; \\ c_{ik} \geq 0, i=1, 2, \dots, n; k=1, 2, \dots, m; \\ x_{ijk}=0 \text{ 或 } 1; i, j=1, 2, \dots, n; k=1, 2, \dots, m. \end{cases}$$

其中,式①表示目标函数,即Makespan;式②表示工艺约束条件决定的各工件各操作的先后加工顺序以及加工各个工件各机器的先后顺序。式中,符号 c_{ik} 和 p_{ik} 分别为 i 工件在机器 k 上的完成时间和加工时间; M 是一个足够大的正数; a_{ihk} 和 x_{ijk} 分别为指示系数和指示变量。

除以上的技术约束外,通常还假定以下主要条件:

- ① 各工件经过其准备时间后即可开始加工;
- ② 每一时刻每台机器只能加工一个工件,且每个工件只能被一台机器所加工,同时加工过程为不间断,整个加工过程中机器均有效;
- ③ 整个加工过程中,每个工件不能在同一台机器上加工多次;
- ④ 各工件必须按工艺路线以指定的次序在机器上加工。

2 车间动态调度方法

滚动再调度方法一般分为2种:连续性再调度和周期性再调度^[1]。连续性再调度指当出现一个使系统状态发生变化的事件时进行再调度;周期性再调度则是在每个生产周期开始前进行调度,当生产周期开始后,按调度结果执行。连续性再调度能处理突发事件,而遗传算法则有整体的预见能力,因此,我们研究的动态调度方法,是将连续性再调度方法和遗传算法相结合,采用事件驱动的策略,即当机床发生故障、机床恢复生产、工件交货期改变和急需工件到达等关键事件出现时,立即进行调度。

具体的调度流程是:首先利用生产系统本身包含的零件工艺数据、车间作业计划、设备资源、工具、材料供应和人力资源等数据信息,按照一定的规则,通过遗传算法得到设备原始的加工计划;然后按照一定的规则,在二次调整窗口进行更为细致、准确的人工调度或自动调度,形成调度队列,以甘特图或报表的形式显示。调度流程图如图1所示。

我们所研究的调度方法主要是基于零件工艺规程

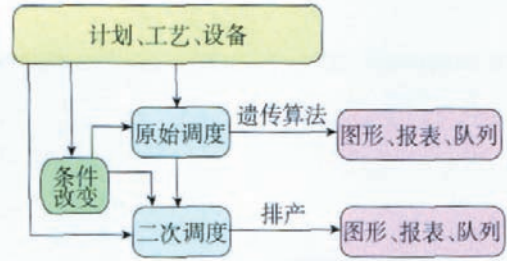


图1 动态调度流程图

Fig.1 Flowchart of dynamic scheduling

和规则的动态调度方法。二次连续性再调度侧重于规则,遗传算法着重于零件工艺规程的约束。

2.1 遗传算法

遗传算法是一类随机优化算法,它不是简单的随机比较搜索,而是通过对染色体或个体或串的评价和对染色体及其基因的作用,有效地利用已有信息来指导搜索有希望改善优化质量的状态。本课题的遗传算法采用的是标准遗传算法,流程如图2所示^[2]。

① 调度编码。染色体的基因由工件、设备组成。如表1所示。不同位置的工件解释为同一工件的不同工

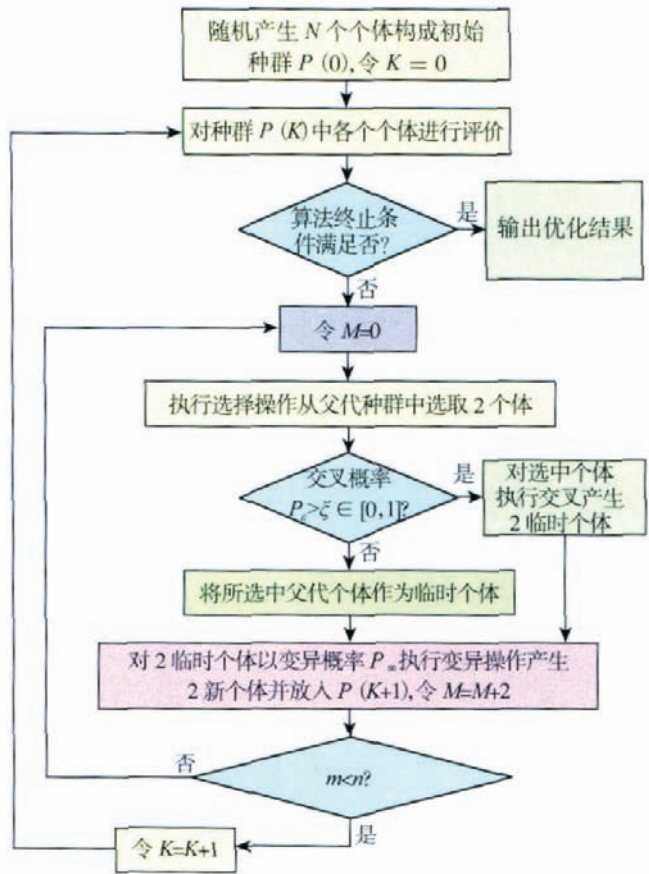


图2 遗传算法流程

Fig.2 Flowchart of genetic algorithm

表1 染色体的基因型

工件	B	C	A	B	C	C	A	B	A
机床	0	2	0	1	1	3	2	0	1

序。如第一次出现的“B”为工件B的工序0,第二次出现的“B”为工件B的工序1等。容易看出,基因的任意排列都对应可行调度,并且基因的所有排列对应整个解空间。

② 种群初始化。随机产生 N 个染色体,种群大小由用户自行指定。

③ 染色体解码。根据基因信息为工序确定机床,并按染色体中工序出现的顺序为工序分配加工资源,使工序尽早完工。这样就能得到一个完整的调度方案。

④ 选择。计算适应度,复制率由用户指定。

⑤ 交叉。采用 $1ox$ 法线性顺序交叉,交叉概率由用户指定。

⑥ 变异。采用基因移位,变异概率由用户指定。

⑦ 求解。当群体进化趋于稳定状态时,算法终止。迭代次数由用户指定。

零件加工是一个复杂的系统,其组织、运行和控制涉及零件工艺、生产计划、设备状态、物料供应、工具工装和人员因素等诸多环节,本课题关注的只是其中在一定时期内相对固定的设备、生产计划和信息网络3个重点环节,忽略了生产系统中变化较大的因素,这使调度结果存在着一定的误差,甚至可能导致得到的结果不可用。

2.2 连续性再调度

连续性再调度主要针对算法产生的调度队列进行二次调度,以事件为激活策略,采用一定的规则实现对方案的人工或自动调整。在调整的过程中,采用抢占式插排原则。连续性再调度的前提是有一套合理原始的调度结果,这里所说的连续性再调度本质上是一个排产过程。

(1) 进行连续性再调度的条件。

- 动态插入作业。
- 设备故障。
- 加工过程产品报废补件加工。
- 提前完工。
- 进度调整。

② 连续性再调度的原则。

- 抢占式插排。
- 顺序正排。

- 工艺规程。
- 计划任务的顺序。系统根据任务的优先级进行排序和分解,默认的优先级为先到先排。优先级以任务为基本单元,任务的优先级信息衍射到相应的工序级信息。

• 已调度信息。系统根据用户的指定来决定任务已有调度信息的取舍,默认的原则为保留已有信息。在保留原有调度信息的基础上,系统采用插排的原则进行二次排产。

• 设备的班次和制度工时信息。系统在二次调度的过程中,严格按照设备的班次信息以及制度工时信息来调整。系统会对被选中而没有班次和工时信息的设备进行有效标记。同时,对于一个时间节点之后没有连续班次信息的设备,系统会自动给出此设备的班次和制度工时。

2.3 调度数据流

调度过程涉及的数据主要包括输入数据、输出数据。输入数据主要包括工艺规程、设备、生产计划和生产状态;输出数据主要包括生产统计、调度结果(甘特图、报表、数据库)。整个数据模型的流程如图3所示。

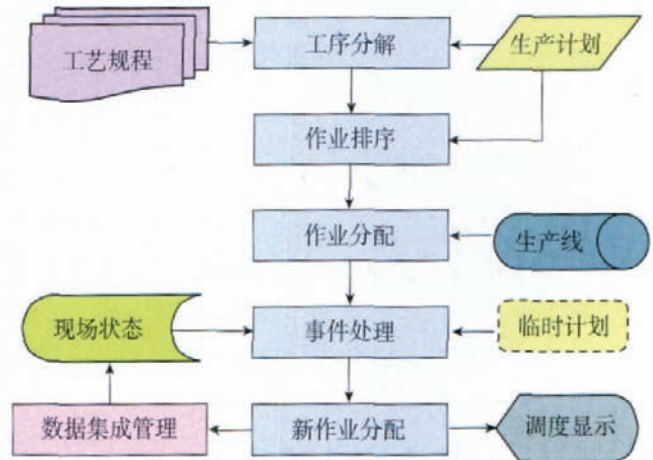


图3 数据流

Fig.3 Data streaming

3 调度软件的结构与实现

在软件的设计过程中,以静态调度统称算法调度,以动态调度统称连续性再调度。

3.1 软件组成结构

调度软件主要包括调度条件管理、车间静态调度、现场状态信息跟踪分析、车间动态调度和作业计划管理5个功能,产生的结果保存在运行控制数据库中,也可以甘特图和报表形式直观显示。其中静态调度和动态调

度各为一个完整的系统,各自包含调度条件管理和作业计划管理;现场状态信息跟踪分析利用 DNC 采集的数据,结合设备测评标准,可以对现场生产实时数据进行分析汇总,以图形和报表形式显示,分析得到的设备的数据信息可以提供给调度条件使用。具体结构如图 4 所示。

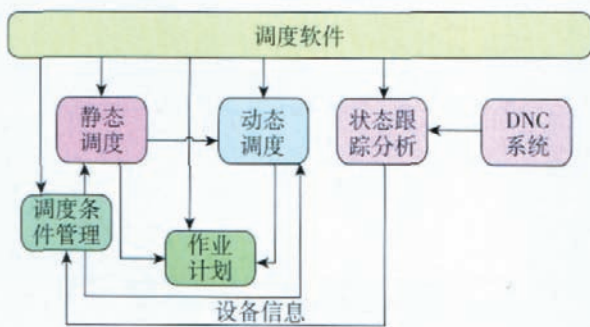


图 4 软件结构

Fig.4 Software structure

3.2 软件模块实现

3.2.1 静态调度

整个系统由计划、调度 2 部分构成。主要以遗传算法为手段对工序级的加工任务进行调度优化。用户自行设置遗传算法相关的主要参数,系统内部计算。调度结果以甘特图和报表的形式显示。下面展示的是一个 46 台设备,40 个工序的调度任务,选取的种群大小为 40,复制率为 89%,变异率为 35%,迭代次数为 60 次。主要加工对象为某机车零件,具体加工实物为油腔端盖、端板、主轴承座体、稳压箱、进气道、连接管和变速箱等,具体工序包括磨平面、钻孔、钳工打磨、粗铣、粗镗缸孔、精过轮孔、划全面孔、刨铣周边、车外园和钳工攻丝等。

调度的初始条件为:

(1) 工序级的任务信息(见表 2)。

主要包括任务的标识、数量、预测占用时间等。

表 2 工序级的任务信息

任务号	工序号	部件数量 / 件	工序工时 / h
HD005005	0	1	34
HD005005	10	1	34
105H015	15	2	68
105H015	20	2	68
...

(2) 工艺约束。具体包括设备能力和生成的队列 2 方面。

- 设备能力(见表 3)。

主要包括设备的标识、可加工任务及相应工序的集合、花费时间等。

- 结果:生成的队列(见表 4)。

表 3 设备能力

设备号	设备名称	可加工任务号	可加工任务工序	占用时间 / h
105-01	三坐标铣床	HD005005	0	34
105-02	五坐标高速	HD005005	20	34
105-03	F410	HD005005	25	34
105-04	F510	HD005005	30	34
...

表 4 生成队列

设备号	任务号	工序号	部件数 / 件	开始时间	结束时间	总时间 / h
105-020	HD003003	25	34	09-02-01 15:24	09-02-01 17:24	27.2
105-020	HD003002	20	34	09-02-03 17:24	09-02-06 02:24	57.8
105-007	10511001	0	68	09-02-01 15:24	09-02-01 16:24	1
105-007	1051003	0	68	09-02-01 16:24	09-02-01 18:24	2
...

参与调度的机床加工性能实现已经给出。调度结果从原始工序开始零纪录,一直延续到结束,系统给出工序的开始时间、结束时间。从最终结果看,调度的结果和预期基本吻合。图 5 所示为调度结果和甘特图,图 6 所示为调度报表。

3.2.2 动态调度

整个系统是一个完整的数控加工现场管理系统。它实现了建立任务、任务分配、任务下达、人工排产以及工时统计等功能。排产的结果以甘特图的形式显示。其中,排产部分实现了人工干涉和自动排产相结合的方式。排产的任务来源可以是本系统的任务,也可能是静态调度的结果。用户在人工干涉界面上,设置任务的优先顺序、原有调度信息的取舍、设备的班次信息等原则,系统自动排产。本系统对于发生干涉的任务进行插排排



图 5 调度结果

Fig.5 Scheduling result

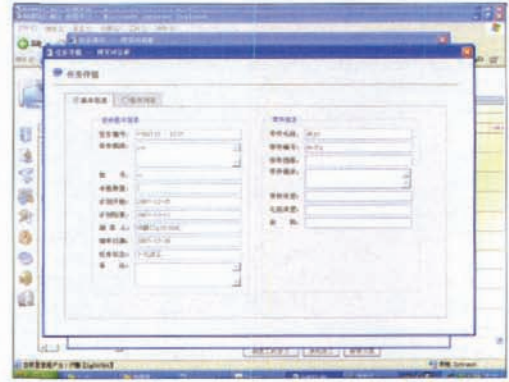


图 7 任务信息

Fig.7 Task information



图 6 调度报表

Fig.6 Scheduling report



图 8 人工干涉界面

Fig.8 Interface of manual intervention

产效果良好,动态调度发生的前提是动态插入作业、设备故障、加工过程产品报废补件加工、提前完工和进度调整等。调度的依据是相关工艺规程、任务优先顺序、已调度信息和设备班次信息。具体到使用过程,主要引起调度的因素包括动态插入作业、设备班次信息改变引起的进度调整等。

下面展示的是用户动态插入作业引起的人工干涉调整。用户首先指定插入作业发生的时间段,也就是指定任务优先加工顺序,考虑原有的排产信息,然后系统自动插排排产。插入的任务为 F200712-013T,主要工序包括钳工、检验,具体的任务和工艺信息如图 7 所示。图 8 为人工干涉界面,图 9 为排产结果。

从结果可以看出,排产当天没有班次信息,需要用户回调当天的设备的具体班次。

系统在指定的位置插排了紧急任务。结果表明,系统的实用性良好。

3.2.3 现场跟踪分析

该系统是调度系统的辅助信息采集系统,也可作为

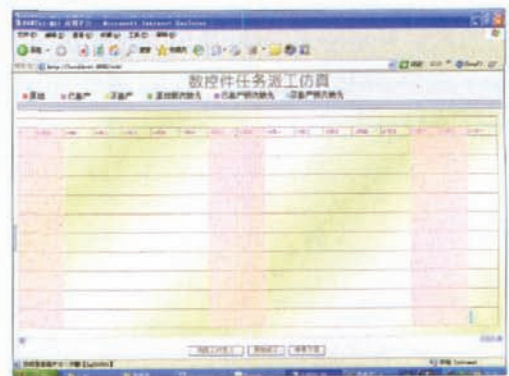


图 9 排产结果

Fig.9 Production scheduling report

一个独立的系统。利用 DNC 系统对运行设备进行监控,对通过监控取得的设备运行数据分析,获得设备的运行效率和状态,以 OAE 为蓝本,规则输出设备的状态参数(设备加工效率、设备综合应用效率、设备加工绩效、设备利用率、程序运行率和主轴周转率等),作为调度的

依据。图 10 所示为数据分析过程,图 11 所示为分析结果,它包括饼图、直方图和报表。

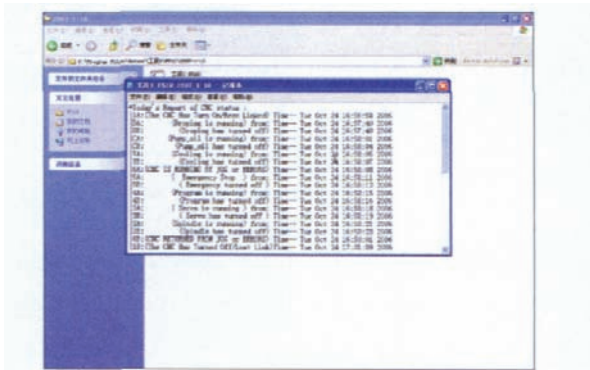


图 10 数据分析
Fig.10 Data analysis



图 11 分析结果
Fig.11 Analysis of the result

4 结论

本课题系统研究了多品种、小批量生产环境下的动态车间调度问题,提出了一种遗传算法和连续性再调度结合的动态调度方法,介绍了研究成果的调度软件的情况。本软件在人工干涉调整方面还有待完善。

鉴于调度问题的复杂性,调度问题的研究也在持续深入,研究热点主要集中在理论研究、应用研究以及系统设计和集成等方面^[3]。

① 实时调度。实时调度是一个研究领域。因为它与传统(离线)确定性模型在一些研究基础上是不同的,所以在线调度的研究非常重要,前者假设所有的信息都是事先已知的。在线调度中,决策的制定必须依赖于已提交的工作信息而不能依赖于将来要提交的工作信息。

② 用户界面和交互式优化。用户界面和交互式优化的发展将面临一些障碍。用户界面的设计必须使交

互式优化可以方便且有效地实现。调度人员在所有时间都必须对调度过程有一个很好的把握。用户界面的放大、缩小能力是非常重要的。为了允许交互式优化,用户界面必须具有单击和拖放操作、冻结操作、处理层叠与传播效应和再调度的功能。用户在系统中进行了手工修改后,系统可以进行再调度且保持可行性。

③ 与其他供应链管理模块的集成。许多公司早已经开始为制造业开发调度软件。它的发展使为供应链管理的各个方面提供相应软件的需求变得日益明显。供应链优化管理所需的模块类型除了计划与调度外,还包括预测、需求管理和库存控制等。在供应链管理中的调度问题需要考虑预测、库存和流通过程等问题。这些综合调度问题比在研究文献中研究的非常基础的问题要困难得多。软件的结构和组织必须很好地设计和模块化。

参 考 文 献

- [1] 潘全科. 作业车间动态调度研究. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(2): 131-137
- [2] 王凌. 车间调度及其遗传算法. 北京: 清华大学出版社, 2003, 8.
- [3] Michael Pinedo. 调度: 原理、算法和系统. 张智海, 译. 北京: 清华大学出版社, 2007. (责编 玉龙)

PW800 发动机 即将开始核心机试验

普惠公司高级市场经理 March Young 表示, 普惠公司将于 2009 年年底开始进行 PW800 “洁净动力” 涡扇发动机的核心机试验。

在瑞士举行的 ERA 会员大会上, Young 透露试验用的核心机将包括一个 8 级高压压气机和 2 级高压涡轮, 核心机与即将装配三菱支线客机的 PW1000G 齿轮传动涡扇发动机相似。

一台“洁净动力”发动机的验证机(带有 6 级高压压气机和 1 级高压涡轮)完成了 250h 的地面试验, 随后还在波音 747SP 和空客 A340-600 飞行试验台上完成了飞行试验。其中在波音 747SP 飞行试验台上总共完成了 12 次累计 44h 的飞行试验, 在 A340-600 飞行试验台上共进行了 27 次累计 76h 的飞行试验。

此次核心机试验将在普惠加拿大公司位于魁北克省 Longueuil 的工厂进行。普惠公司将在各种压力、温度和应力条件下测试发动机的性能。

(本刊记者 侧卫)