

基于模糊控制的生产过程控制研究*

Research of Production Process Control Based on Fuzzy Control

西北工业大学现代设计与集成制造重点实验室 梁晓慧 张 维 何卫平 高阿曼

[摘要] 为了实现对生产过程的实时控制,提高对生产过程中不确定因素的处理能力,引入多阶段推-拉生产控制模式,建立一种基于模糊控制技术的生产控制模型,通过模糊控制器对影响生产过程的关键因素进行实时调控,达到生产过程平稳且在制品量最小的生产过程控制目标。

关键词: 多阶段推-拉生产控制模式 模糊控制技术 生产控制模型 在制品库存量

[ABSTRACT] To achieve the real-time control of production process and improve the ability for processing uncertainty, the model of multistage push-pull (MP-P) are led into, and a control model based on fuzzy control is proposed. The object of dynamic control is to keep the work-in-process inventory at low level and the workflow is balanced, which is achieved by adjusting and controlling the key factor that affect the process real-time in the mode.

Keywords: Multistage push-pull model Fuzzy control methodology Model of production control Work-in-process inventory

在面向客户需求的制造企业中,不确定性和时变性是车间生产过程的主要特征。生产模式、设备生产能力、设备故障率、维修率、在制品库存量、需求变动等都是影响生产过程的重要因素^[1-2],必须有一种具有系统的、动态的控制系统对整个生产过程进行实时的监督与调控,才能保证生产系统的平稳。目前对生产过程控制的研究仅限于对可预见、固定的生产过程进行管理控制,对生产过程中不能预测的、动态的变化则无法进行处理^[3-6]。一些研究者通过引入供应链的概念^[7]和现代控制理论^[8],将生产过程中所有可能出现的情况定义于所建立的生产模型中,以此来提高对生产过程的动态控制。这些方法的缺点在于,只有在事先知道不确定因素的所有情况后,才能进行定义,而对于动态的生产过程来说,这往往是不现实的。此外,这些方法只适应于在一段时间内稳定重复生产的大批量离散制造业,而对于

大规模复杂系统模型的建立,明显力不从心。

对于复杂的、多因素影响的生产过程,不可能建立精确的数学模型进行控制。实际生产中,对于由于不确定因素而引起的扰动,计调人员往往根据长期的实践观察和操作经验对生产过程进行调控,虽然这些操作经验具有模糊性与多样性,但它们具有一定的规律性。本课题利用这些实践操作经验的规律性,将其进行总结、归纳及适当的抽象,提出了模糊控制推理规则;并且在目前研究的基础上,建立了基于模糊控制技术的动态生产控制模型。该模型无需事先考虑不确定因素的所有情况,只需通过模糊控制器对影响生产过程的关键因素进行实时调控,就能使整个生产系统在满足需求的同时保证生产过程的平稳,并且能达到生产过程中在制品库存量最小的目的。本课题还引入了多阶段推-拉生产控制模式(MP-P),通过对目前车间生产模式的调整,使基于模糊控制的生产控制模型更具有实用性和可操作性。

1 问题分析

在实际生产中,多种零件在车间同时进行加工,这些零件按工序和计划任务组成各自的生产过程,事实上,我们可以将车间的整个生产系统看作是各零件生产过程的交叉组合。因此,对整个车间生产系统的控制简化即是对各零件生产过程控制的组合。

在大多数的制造企业中,加工车间按工序将设备组成能力有限的不同生产单元,车间接各生产单元的最大生产能力组织生产。在每个生产单元之间都设置一个在制品缓存区(buffer),各缓存区的存储能力可以相同,也可以不同。假设某零件的生产由 N 道工序组成,那么在该零件的生产过程中将经过 N 个相应的生产单元,其半成品存放在各生产单元后的缓存区内,该零件的生产模型如图1所示。

在该零件的加工过程中,由于各生产单元对该零件的各工序加工的时间是不可能相同的,因此缓存区内制品的数量随着时间的积累也在不断变化。从图1可以看出,在不发生意外(如设备故障、任务、需求变动等)的情况下,如果上游生产单元 $cell_i$ 生产速率 v_i 大于下游生产单元 $cell_{i+1}$ 的生产速率 v_{i+1} ,那么缓存区 B_i 中的在制品将不断被累积,直到上游单元 $cell_i$ 因缓存区 B_i 被

* 国家自然科学基金项目(50505039)和国防基础科研基金项目(B2720060292)。

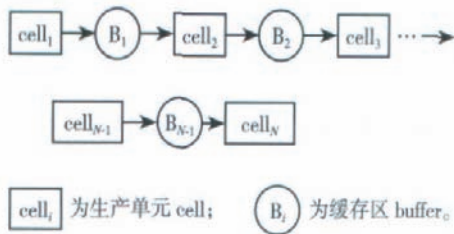


图1 包含N道工序零件的生产模型
Fig.1 The production model of part which includes N working procedures

充满而停止对该零件的生产。如果上游生产单元 $cell_k$ 对某零件的生产速率 v_k 大于下游生产单元 $cell_{k+1}$ 的生产速率 v_{k+1} , 那么下游生产单元 $cell_{k+1}$ 对该零件的生产始终处于缺料状态。特别是对于工艺路线长、结构复杂且各工序生产速率差异较大的零件, 其整个加工过程中将存在大量的在制品, 且其加工过程将不断的因为生产单元阻塞或缺料而被中断。在目前车间的生产中, 计划人员往往是根据客户的需求和过去的生产经验来制定各零件在某时段的加工任务, 调度人员对生产中出现的生产单元阻塞或缺料现象进行临时调配, 然而, 由于车间同时生产的零件种类繁多且在生产过程中存在很多诸如机床故障、人员缺勤、任务变动等不确定因素, 因此, 生产经验和人工临时调配越来越不能满足需求日益多样化的生产。

2 基于模糊控制的生产控制模型

从以上的分析可以看出, 目前车间的生产中存在以下问题: (1) 生产过程不稳定, 经常出现生产单元阻塞和缺料现象; (2) 生产过程中在制品的量过多且分布不均; (3) 对生产现场人工的临时调配不能满足多样化生产的需求。因此, 实现生产过程的实时监控与调整, 在生产系统平衡的同时使在制品总量最小是对生产过程控制的关键。

从时间上来说, 生产控制是一个动态的过程。随着时间的积累, 每个零件的生产状态和在制品数量也是在不断变化的。对整个生产系统所有零件的各工序进行实时控制, 困难是很大的, 而且在制品在短时间内的变化是不明显的。因此, 本课题对每个零件的生产过程建立了一个模糊控制系统, 以 8h 为一周期, 通过不断调整各零件在各工序的生产速率, 使各零件的在制品量最小且分布均匀, 从而达到整个生产系统平稳且总在制品量最小的目的。

2.1 MP-P 生产控制模式

在车间目前的生产模式下, 每个零件在每道工序完成后都存放在该生产单元后的在制品缓存区内, 这就要求缓存区的存储空间必须足够大。事实上, 很多工序后

的缓存区都是无用的, 并且模糊控制系统对每道工序的在制品进行控制的复杂度与难度都相当大。因此, 在建立模糊控制系统之前, 本课题利用 MP-P 生产控制模式对目前车间生产模式下的生产系统模型进行调整。

为了方便说明问题, 本课题引入几个相关概念。瓶颈资源是指生产线上生产能力最小的生产单元。次瓶颈资源 (CCR) 是指瓶颈资源前所有工序中, 生产能力相对于邻近设备的生产能力小的生产单元或利用率已接近实际生产能力的生产单元。而生产能力相对于邻近设备最大的生产单元为最大产能资源 (MPR)^[9]。

MP-P 生产方式是把瓶颈资源前的生产工序以 CCR 和 MPR 为间隔点进行分区控制, 并在各区间前设置一个 buffer, 如图 2 所示。在 CCR 与 MPR 之间实行推动式生产, 零件从前道工序“推进”到后道工序, 而不管后道工序当时是否需要。首工序与 CCR 之间、MPR 与 CCR 之间、MPR 与瓶颈之间实行拉动式生产模式, 通过 buffer 内在制品量控制前区间的生产。由于瓶颈后的工序都有多余的生产能力, 因此瓶颈后的工序采用推动式

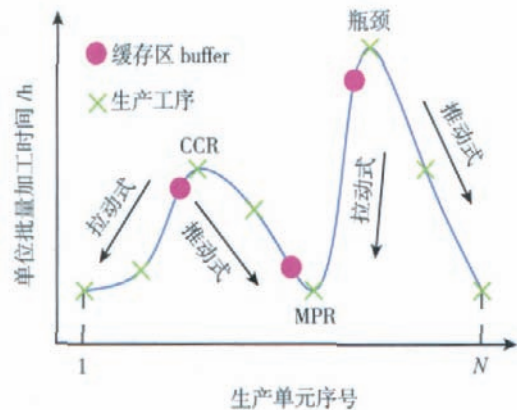


图2 MP-P生产方式
Fig.2 MP-P production style

生产。

从图 2 可以看出, 利用 MP-P 模式后, 零件的生产过程按推动生产方式和拉动生产方式被分成多个生产阶段, 这样, 该零件的模糊控制系统将由对所有工序的控制转变为对各生产阶段的控制, 而相应的 buffer 量的减少, 使得模糊控制系统中模糊控制器的数量和计算量都大幅减少。

2.2 模糊控制器的建立

模糊控制器是模糊控制系统的核心, 模糊控制系统的优劣取决于模糊控制器的结构、所采用的模糊规则及合成推理算法等因素^[10]。在图 2 中, 每个生产阶段与上、下游 buffer 就可以被看成是一个如图 3 所示的模糊控制器。

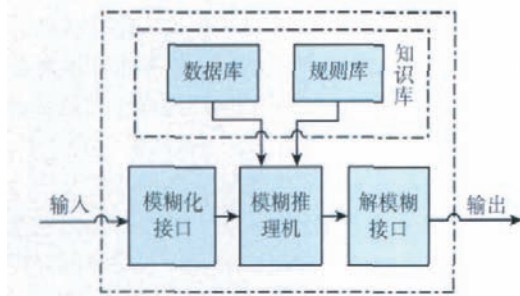


图3 模糊控制器的组成
Fig.3 The constitute of fuzzy controller

在建立模糊控制器之前,我们假设车间生产满足以下条件:

(1) 每个生产单元有 k ($k \geq 2$) 台机床组成,单元内的机床不同时发生故障,那么设备故障率与维修率只影响该生产单元的生产速率,而生产单元一直处于工作状态。

(2) 不发生故障时,瓶颈资源始终以最大生产速率生产,且其最大生产速率大于需求速率 d 。

(3) 各零件生产线上第一生产阶段永远不会物料短缺,最后一个生产阶段永远不会发生阻塞现象。

模糊控制器结构的选择实际上就是确定模糊控制器的输入、输出控制变量。而输入、输出变量是由影响生产过程控制的关键因素决定的。在 MP-P 生产模式下的模糊控制系统中,第 1、3 阶段采用拉动方式进行生产,根据拉动式生产原理^[1],只要该生产阶段满足生产需求(即产品剩余量的值合理,这里的产品剩余量是指实际生产量与产品需求量之间的差异量),这 2 个阶段的生产速度由其后 buffer 内的在制品量决定,而与其前 buffer 内的在制品量没有关系,因此,结合前面的假设条件,拉动式生产阶段的模糊控制器 controll1 输入控制变量可以确定为两个:下游 buffer 内在制品的量 b_{F1} 和产品剩余量 x ,此类模糊控制器的结构如图 4 (a) 所示。在图 2 中的第 2、4 生产阶段采用推动方式进行生产,根据推动式生产的原理^[1],这个阶段的生产速率由其前后的缓存区内在制品量决定,而与产品剩余量没有关系,因此,推动式生产阶段的模糊控制器 controll2 输入控制变量可确定为 2 个:上、下游 buffer 内在制品的量 b_{U2} 和 b_{F2} ,此类模糊控制器的结构如图 4 (b) 所示。而图 2 中瓶颈后的生产阶段采用推动方式进行生产,由于最后的生产阶段永远不会堵塞,且瓶颈工序始终按最大速度进行生产,所以瓶颈后的生产阶段不需要调整与控制。

考虑到实际生产过程中零件的生产速率需要根据需求不断变动,将模糊控制器的输出控制变量设定为生产速率 r 与需求生产速率 d 的比值 k 。

因此模糊控制器的结构,在 MP-P 生产模式下各零

件的生产过程中,拉动式生产阶段看作 controll1 类型的模糊控制器,而推动式生产阶段看作 controll2 类型的模糊控制器。

图 4 所示的模糊控制器的组成结构中,模糊化的实质就是确定控制参数语言变量和对应的模糊集合隶属度函数。本课题根据车间生产的管理经验,利用经验归纳法设定下游缓存区在制品量与生产单元生产速率的语言变量为 5 级: {NB, NS, OK, PS, PB}; 上游缓存区在制品量和产品剩余量的语言变量为 3 级: {N, OK, P}。本课题选用最常用的三角形函数作为输入量的隶属度函数。

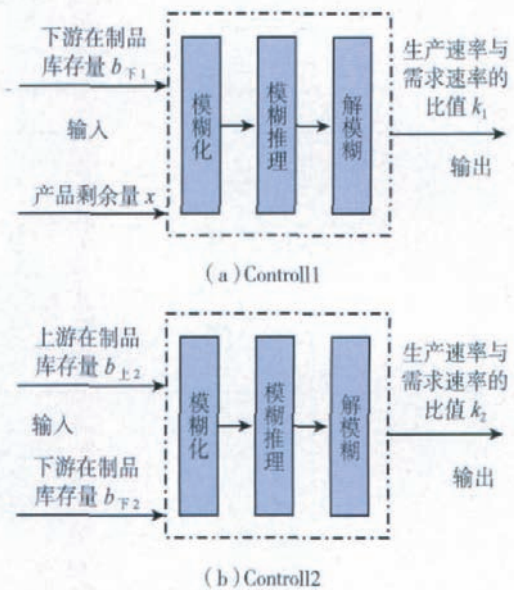


图4 Controll1与Controll2结构
Fig.4 The structure of controll1 and controll2

模糊控制规则是由自然语言变量所表达的模糊条件语句组成的,针对车间的实际生产情况,模糊控制规则设计的原则为:

(1) 如果产品剩余量为负,在满足生产单元不发生物料积压或短缺的情况下,应该首先考虑满足产品需求量,其次再考虑减少在制品的量;

(2) 如果产品剩余量为零,在满足生产单元不发生物料积压或短缺的情况下,同时考虑满足产品需求与减少在制品的量;

(3) 如果产品剩余量为正,在满足生产单元不发生物料积压或短缺的情况下,尽量减少在制品的量。

由 Mamdani 推理可以得到以下形式的模糊规则:

If b_{i-1} is PB and b_i is NB then r_i is P。

解模糊的目的是根据模糊推理的结果求得最能反映控制量的真实分布。本课题采用重心法解模糊,该方法的数学公式为:

$$u = \int x\mu_N(x)dx / \int \mu_N(x)dx。$$

通过 MATLAB 软件的模糊逻辑工具箱来仿真整个模糊推理过程,利用模糊规则观察器获得解模糊的结果。

2.3 生产控制模型的构建

根据确定的 2 类模糊控制器,对 MP-P 生产模式下零件的整个生产过程建立生产控制模型,如图 5 所示。

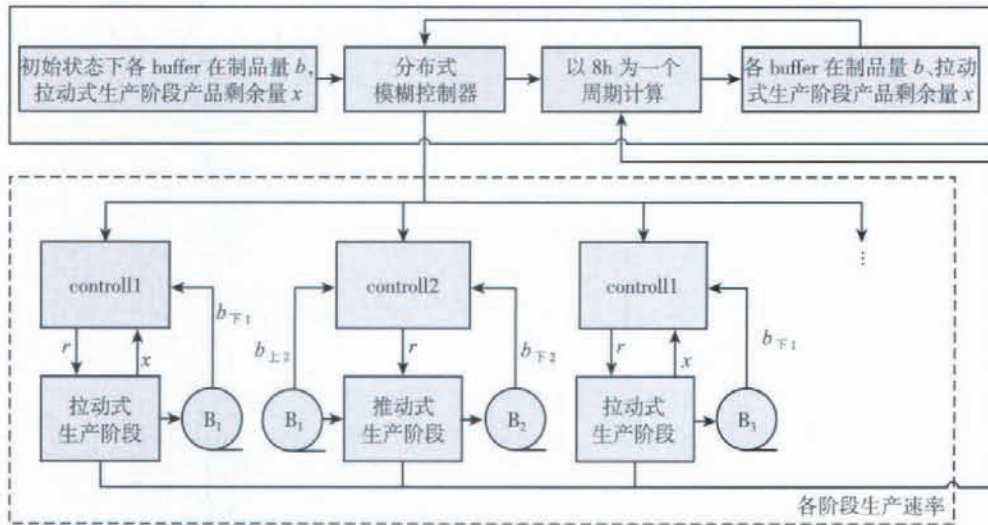


图5 基于模糊控制的生产控制模型

Fig.5 The mode of production control based on fuzzy control

3 实例分析

假设某零件从投料到机加工共完成 8 道工序,该零件在每道工序加工的平均时间如表 1 所示。如果按照车间原有的生产模式组织生产,那么,该零件生产线上有 7 个在制品缓存区,经过 1 个周期(8h)和 3 个周期(24h)后,各缓存区的在制品量 b_i 如表 2 所示。从表 2 可以看出,由于各单元的生产速率不同,生产单元 4、5、7、8 始终处于缺料状态(在制品量的值为负),而生产一段时间后,其余缓存区的在制品量不断增加,当在制品量超过其存储能力,该生产单元将被阻塞而停产。

首先,利用 MP-P 生产模式对该零件的生产过程进行阶段划分,如图 6 所示。其中第 1、3 生产阶段采用 controll1 类型的模糊控制器,而第 2 生产阶段采用 controll2 类型的模糊控制器。这两类模糊控制器的各输入、输出语言变量、取值范围、隶属度函数如图 7 和 8 所示。

根据所确定的语言变量和模糊控制规则的原理,由 Mamdani 推理可以得出模糊控制器 controll1、controll2 各自的 15 条控制规则,分别如表 3 和 4 所示。

在生产控制系统中,根据该零件生产线上初始状态下各缓存区内在制品的量和产品剩余量,模糊控制器对各工序的生产速率进行调整,以达到生产过程在满足需求同时减少在制品的库存量的目的。根据调整后的速率,计算出一个周期后各 buffer 内实际的在制品量及产品剩余量等,模糊控制器根据新的在制品量及其他因素重新调整该零件各工序的生产速率,这是一个循环的过程,直到生产过程平稳及在制品量达到理想的最小值。

表1 单个零件在各工序的生产时间

工序	1	2	3	4	5	6	7	8
生产时间/h	0.4	0.5	1.0	0.8	0.4	1.6	1.0	0.4

表2 按生产单元最大能力生产在制品状态

生产状态	各缓存区的在制品数量/件							总量 b_0 /件
	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	
8h后	4	8	-2	-10	3	-5	-12	15
24h后	12	24	-6	-30	9	-9	-48	45

注: b_0 的值等于各正值相加之和,负值表示缺料状态。

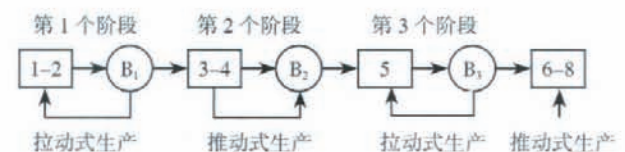


图6 MP-P 生产模式下零件的生产模型

Fig.6 The production mode of part under MP-P production style

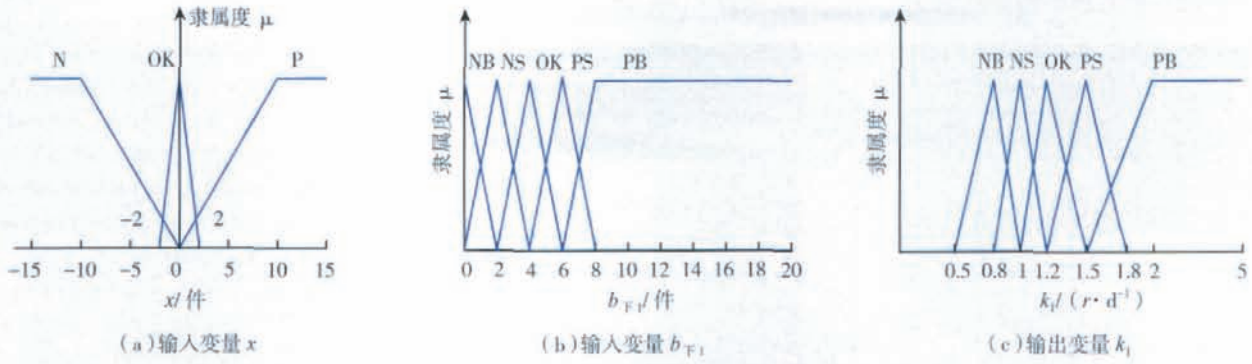


图7 Control1不同变量的隶属度函数

Fig.7 The membership function of controll1's different variable

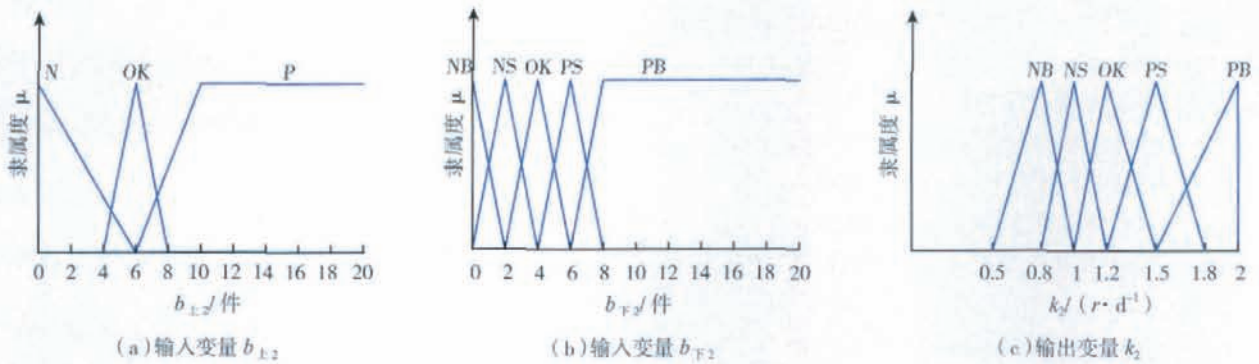


图8 Control2不同变量的隶属度函数

Fig.8 The membership function of controll2's different variable

表3 controll1的模糊控制规则

序号	if	x	and	b_{F1}	then	k_1
1		OK		PB		NB
2		OK		PS		NS
3		OK		OK		OK
4		OK		NS		PS
5		OK		NB		PS
6		P		PB		NB
7		P		PS		NB
8		P		OK		OK
9		P		NS		PS
10		P		NB		PS
11		N		PB		NS
12		N		PS		OK
13		N		OK		PS
14		N		NS		PB
15		N		NB		PB

表4 Control2的模糊控制规则

序号	if	b_{L2}	and	b_{F2}	then	k_2
1		OK		PB		NB
2		OK		PS		NS
3		OK		OK		OK
4		OK		NS		PS
5		OK		NB		PB
6		P		PB		NS
7		P		PS		NS
8		P		OK		OK
9		P		NS		PS
10		P		NB		PB
11		N		PB		NS
12		N		PS		NS
13		N		OK		OK
14		N		NS		PS
15		N		NB		PS

假设初始状态下,各缓存区 B_i 的在制品量分别为: $b_1=8, b_2=0, b_3=3$,此时生产过程在制品的总量 $B=11$;各阶段的产品剩余量为: $x_1=12; x_2=4; x_3=4$;各阶段的生产

速率分别为: $r_1=2, r_2=1, r_3=0.625$,产品需求速率 $d=0.5$ 。

模糊控制器根据初始状态下各buffer在制品量和各阶段产品剩余量对各个阶段生产速率进行调整,利

表5 模糊控制系统在制品状态表

生产状态	各阶段生产速率 $r/(\text{件}\cdot\text{h}^{-1})$			各buffer在制品量 $b/\text{件}$			在制品总量 $b_{\text{总}}$
	第1阶段	第2阶段	第3阶段	b_{1j}	b_{2j}	b_{3j}	
初始状态	2	1	1	8	0	3	11
8h	0.384	0.905	0.57	3.8	2.7	2.6	10
16h	0.52	0.71	0.58	2.3	3.7	2.2	8
24h	0.6	0.645	0.605	1.9	4.0	2.0	8
32h	0.625	0.615	0.615	2.0	4.0	2.0	8

用 MATLAB 软件的模糊逻辑工具箱来仿真整个控制过程^[12],根据初始条件,模糊控制器输出结果 $k_{i1}(k=r/d)$: $k_{11}=0.768, k_{21}=1.81, k_{31}=1.14$ 。相应的各阶段生产速率分别为: $r_{11}=0.384, r_{21}=0.905, r_{31}=0.57$ 。一个周期(8h)后,各缓存区的在制品量分别为:

$$b_{11} = 8 + (0.384 - 0.905) \times 8 \approx 3.8 (\text{件});$$

$$b_{21} = 0 + (0.905 - 0.57) \times 8 \approx 2.7 (\text{件});$$

$$b_{31} = 3 + (0.57 - 0.625) \times 8 \approx 2.6 (\text{件});$$

生产过程中在制品总量 $B=10$ 。各阶段的产品剩余量分别为:

$$x_{11} = 12 + (0.384 - 0.5) \times 8 = 11 (\text{件});$$

$$x_{21} = 4 + (0.905 - 0.5) \times 8 = 7.2 (\text{件});$$

$$x_{31} = 4 + (0.57 - 0.5) \times 8 = 4.6 (\text{件});$$

模糊控制器根据此时在制品数量和产品剩余量再次调整个阶段的生产速率 r_{i2} : $r_{12}=0.52, r_{22}=0.71, r_{32}=0.58$ 。2个周期(16h)后,各缓存区在制品量为: $b_{12}=2.3, b_{22}=3.7, b_{32}=2.2$ 。在制品总量 $b_{\text{总}}=8$ 。各阶段产品剩余量为: $x_{12}=11; x_{22}=8.8; x_{32}=5.2$ 。3个周期(24h)、4个周期(32h)后各阶段在制品量如表5所示。

从表5中可以看出,2个周期(16h)后,该零件的整个生产过程就会处于平稳状态,在制品分布均匀且数量减少。

4 结束语

本课题利用 MP-P 生产控制模式,将各零件的生产过程按拉动式和推动式原理分成几个控制阶段,并在此基础上,利用模糊控制技术,对各零件的生产过程建立了生产控制模型,通过模糊控制器实现生产过程的实时监控,使得由各零件生产过程组成的整个车间生产系统在满足需求的同时确保了生产过程的平稳,并使整个车间在制品的库存量达到了最小。

参考文献

[1] N C Tsourveloudis, S Ioannidis. Fuzzy work-in-process inventory control of unreliable manufacturing system. Information Sciences, 2000

(127): 69-83.

[2] N C Tsourveloudis, S Ioannidis. Work-in-process scheduling by evolutionary tuned fuzzy controllers. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2007 (34): 748-761.

[3] Hui Li, Liming Liu. Production control in a two-stage system. European Journal of Operational Research, 2006 (174): 887-904.

[4] Taho Yang, Hsin-Pin Fu, Kuang-Yi Yang. An evolutionary-simulation approach for the optimization of multi-constant work-in-process strategy—A case study. Int. J. Production Economics, 2007 (107): 104-114.

[5] H P G van Ooijen, J W M Bertrand. The effects of a simple arrival rate control policy on throughput and work-in-process in production systems with workload dependent processing rates. Int. J. Production Economics, 2003 (85): 61-68.

[6] 张洁,汪宇,刘世平,等. 工序间在制品库存优化设计. 华中科技大学学报(自然科学版). 2002 (30): 71-73.

[7] 尤静. 面型供应链的在制品跟踪与管理研究[D]. 南京航空航天大学. 2005.

[8] 郭彩芬. 生产物流系统在制品控制技术研究[D]. 南京航空航天大学. 2005.

[9] 杨国栋,宋国防,陈顺正. 在制品(WIP)多阶段优化控制方法研究. 工业工程, 2005, 8(1): 101-106.

[10] 诸静. 模糊控制理论与系统原理. 北京: 机械工业出版社, 2005.

[11] 陈国华. 生产与运作管理. 南京: 南京大学出版社, 2006.

[12] 张国良. 模糊控制理论及其 MATLAB 应用. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.

(责编 岩石)

(上接第 84 页)

磁场作用下被估算的虚拟截面偏移量充分超过截面半径。

(4)考虑了在电子束参数中灯丝电流脉冲的影响。试验表明: 随时间变化的磁场导致束流以及焊缝质量明显下降,而且无法用电子光学系统中的静态合轴去除。根据设备要求的参数,设计灯丝电流稳定电路使电流脉冲控制在可承受的范围内。

参考文献

[1] Tsarev B M. Calculation and design of electron tubes. Moscow-Leningrad: Gosenergoizdat, 1952.

[2] Rozenfeld L B, Grinfeld D E. Estimation of effect of magnetic field of directly heated cathode on electron gun parameters. Bulletin of the Russian Academy of Sciences (Physics), 2005, 169 (4): 573-579.

[3] 阿良莫夫斯基 И В. 电子注与电子枪. 黄高年,译. 北京: 电子管技术编辑组, 1974.

[4] 《国外航空》编辑部. 电子束焊枪设计理论和实验技术, 国外航空技术. 1975.1.

[5] 华中一,顾昌鑫. 电子光学. 上海: 复旦大学出版社, 1991.

(责编 侧卫)