

# 离散制造系统在制品库存控制

Work-in-Process Inventory Control in Discrete Manufacturing System

苏州市职业大学机电工程系 郭彩芬

**[摘要]** 建立了离散制造系统在制品库存控制模型,详细分析了模型中采用的需求平稳化策略、生产延迟策略和库存策略对在制品库存的影响。在仿真分析系统参数对在制品库存影响的基础上,指出了在离散制造过程中通过采用过程控制技术以及集成应用过程控制与统计过程控制来控制制品库存的优越性。

**关键词:** 在制品 库存控制 离散制造系统

**[ABSTRACT]** The work-in-progress inventory control model in discrete manufacturing system is established. The effects of demand stabilized strategy, production delay strategy and inventory strategy on work-in-process inventory in model are analyzed in detail. Based on the effect of simulation analysis system parameters on work-in-process inventory, the advantages of work-in-process inventory control by means of applying process control technology and integrating the application process control with statistic process control in discrete manufacturing process are pointed out.

**Keywords:** Work-in-progress Inventory control Discrete manufacturing system

面对顾客需求的多样化和市场竞争的全球化,要求生产企业,特别是民用产品批量生产企业要满足面向订单定制生产的需求。对于这类企业来说,及时送货能力将成为衡量企业成败的重要指标之一。

对于生产—配送—销售这样的层供应链系统而言<sup>[1]</sup>,生产和配送是影响企业及时送货能力的关键因素。在生产加工过程中,产品的生产节拍(生产节拍=加工时间+等待时间)直接影响企业的及时送货能力。根据 Little 定律,在制品库存等于生产率与生产节拍的乘积,且生产率达到生产能力,并保持基本恒定时,生产节拍的变化量与在制品库存的变化量成正比。因此,控制生产系统的在制品库存等同于控制生产节拍<sup>[2]</sup>。而且与生产节拍测量相比,在制品库存易于观测。因此,通过控制在制品库存来间接控制生产节拍更具有实用价值。但是由于市场、企业条件等诸多复杂因素

的制约,有效地实现在制品库存控制亦非易事,其控制效果的优劣直接影响着企业快速响应市场、高效车间作业调度、100%的工序质量保证等指标。

为此,本课题基于经典控制理论研究了在制品库存控制问题。首先,建立离散制造系统在制品控制模型;然后详细分析模型中采用的需求平稳化策略、生产延迟策略、库存补充策略及其对在制品库存的影响;最后通过实例仿真,分析了需求平稳化时间常数、生产延迟时间常数和恢复库存时间常数的不同取值对在制品库存的影响,指出了在离散制造过程中采用过程控制技术以及集成应用过程控制与统计过程控制的优越性。

## 1 模型的建立与分析

实际生产过程中存在很多可能性(如加工方案选择、设备利用和人力资源分配等),要提出一个通用的在制品控制模型非常困难,所以就需要对实际生产过程进行必要的简化。

在生产领域广泛应用的 BOM 表就是对组成产品的部件、组件和零件最好的结构层次化表达。不过,BOM 表的应用侧重于装配,而忽略了有关主要零部件的生产过程信息;而加工工序单又仅提供了过于详细的加工过程信息。因此,在制品控制模型都不能建立在这二者的基础上。

文献[3]提出的工序清单(Bill of Processes, BOP)概念弥补了上述缺陷。BOP 表将一个产品的加工过程分为 2 类基本的操作:串行操作(如零件加工)和并行操作(装配过程)。实质上,任何产品的生产过程都属于串行操作。如果某一产品的加工过程牵涉到很多工段,那么可以将整条生产线分段,然后一一对地进行分析,犹如常数相加一样。因此,基于文献[3]的工序清单概念,本课题只考虑 2 个加工工段,以及在此基础上建立在制品库存控制模型。

### 1.1 建立模型

离散控制系统的数学模型一般采用差分方程或其变型 Z 传递函数。离散仿真虽然能精确地反映加工过程,但人们感兴趣的参数如输出速率、平均在制品

库存或平均生产周期却表现出连续的特点。因此,上述参数在离散仿真的基础上短时间内是不能确定的,它们的动态行为必须由连续模型来描述。

应用 BOP 表的概念,把文献[4]中的 2 个基本加工工段的控制理论模型串联集成,就得到了离散制造系统在制品控制模型,如图 1 所示。图 1 中的加工工段 1 生产顾客消费的成品,而加工工段 2 为加工工段 1 提供原料(即在制品)。由于整条生产线以“拉动”方式工作,因此当加工工段 1 开始生产时,它就给加工工段 2 发出了需求指令,拉动加工工段 2 也投入生产。

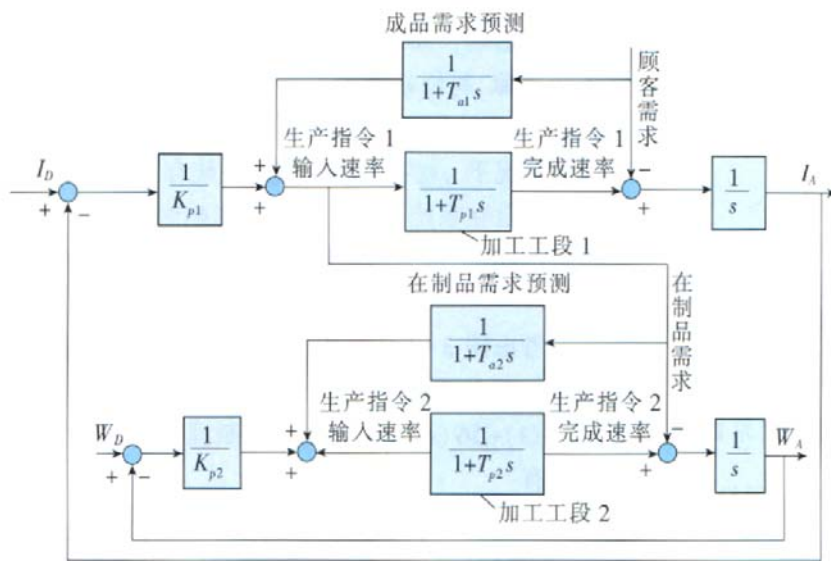


图 1 离散制造系统在制品控制模型

Fig.1 Work-in-process control model in discrete manufacturing system

由图 1 可知,加工工段 1 的生产率即是加工工段 1 对加工工段 2 生产的产品的需求率。因此,两个加工工段通过加工工段 1 的生产率互相关联。

图 1 中,  $T_{pk}$  为第  $k$  个加工工段的生产延迟时间常数 ( $k=1, 2$ ), 系统参数;  $T_{dk}$  为第  $k$  个加工工段的需求平稳化时间常数 ( $k=1, 2$ ), 系统参数;  $K_{pk}$  为第  $k$  个加工工段的恢复库存时间常数 ( $k=1, 2$ ), 系统参数;  $W_A$  为实际在制品库存;  $W_D$  为理想在制品库存;  $I_A$  为实际成品库存;  $I_D$  为理想成品库存;  $S$  为拉普拉斯算子。

在上述 3 个系统参数中,生产延迟时间常数可以从加工周期中估计得出,它是一个已知数值,即  $T_{pk}$  等于实际生产节拍<sup>[4]</sup>;而需求平稳化时间常数和恢复库存时间常数是 2 个可控参数,分别与控制模型中采用的需求平稳化策略、生产延迟策略及恢复库存策略有

关,其取值的大小决定了某一加工工段对需求的反应能力和恢复库存的能力。

## 1.2 模型分析

离散制造系统中,有 3 种基本的产品信息流:产品需求信息、成品库存信息、在制品库存信息。这些信息又基本上可分为 2 类:反馈信息和前馈信息。通常,成品库存量和在制品库存量作为反馈信息传递,而需求信息作为前馈信息<sup>[9]</sup>。对离散制造系统建模时,必须考虑以下 3 种主要行为:预测、生产周期和库存补充。要实现离散制造系统的优良控制,需要折衷选择 3 个基本系统参数:需求平稳化时间常数、生产延迟时间常数和恢复库存时间常数。这 3 个系统参数分别与控制模型中采用的需求平稳化策略、生产延迟策略及恢复库存策略有关。

### 1.2.1 需求平稳化策略

由于市场对产品的需求是不断变化的,因此企业要根据市场变化做好需求预测。尽管需求的部分进程是未知的,如具体的数量和日期,但还有一些进程是可以预知的,如发展趋势、变化周期、季节性波动等。但需要注意的是,预测和客户订单是不稳定、不均衡的,根据它们直接安排生产将可能出现忽而加班加点也不能完成生产任务,忽而又出现设备空闲待工的现象,这将严重影响生产的平稳运行,给企业带来可怕的后果。因此,企业要妥善处理产生各种需求时的调度问题,即适时调整其生产能力,并在保持顾客满意度的同时尽量降低生产率波动,维持生产的平稳运行。

如果在企业的调度策略中忽略了一个渐增的需求信息,库存就会出现持续下降的局面;如果没有考虑一个阶跃的需求信息,就会产生永久性的库存短缺。因此,当前需求信息是调度算法中必须要考虑的影响因素。不过即使在调度算法中考虑了需求信息,但没有对需求信息进行某种形式的平均,也会使生产率产生大幅度的波动,转而导致生产间接成本增加<sup>[9]</sup>。

如果按图 1 的模型不采取需求平稳化措施,则系统在接收到阶跃需求后,如在 1 000 时间单位处有一阶跃需求,幅值为 100(套),将会出现永久性的库存短缺,如图 2 所示。因此,在离散制造系统在制品库存

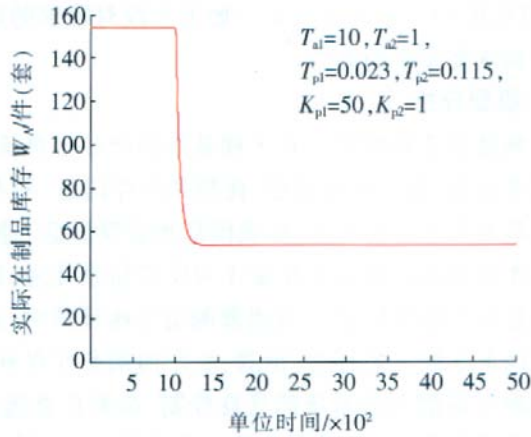


图2 实际在制品库存随阶跃需求的变化  
Fig.2 Change of actual work-in-process inventory with step demand

控制模型中要考虑采用一种需求平稳化方法。

由于指数平稳方法几乎不需要数据储存,对短期预测相对准确,易于理解,也比较接近控制理论一阶滞后形式,所以是一种适宜的方法。因此,本课题在制品库存控制模型中即采用这种需求平稳化处理,其传递函数形式为  $\frac{1}{1+T_{pk}s}$ ,  $k=1, 2$ 。需求平稳时间常数  $T_{pk}$  ( $k=1, 2$ ) 的物理意义为经过  $T_{pk}$  这段时间时,理想生产量才等于需求量。

### 1.2.2 生产延迟策略

延迟主要是一种变换过程,它接受给定的输入流速,并在输出端给出变换过的流速。当流速处在动态变化之中时,其输出流在每个瞬间均和输入流不同,且一般表现为滞后。这就意味着传递流量的部分存在延迟。

在实际生产加工过程中,由于设备调整、工件安装、运输、设备生产能力及机床故障等各种因素的影响,导致加工系统中原料输入速率与产品输出速率不同,从而产生了生产延迟的现象。为方便分析起见,把各类延迟合计为单独一个常数  $T_p$ ,定义为生产延迟时间常数。一种纯粹的生产延迟的二项式形式为<sup>[7]</sup>

$$e^{-T_p s} = \frac{1}{\left(1 + \frac{T_p s}{n}\right)^n}$$

式中  $n$  为系统阶数。

上式中,  $n=1$  对应指数延迟,而  $n=3$  则对应立方延迟。一般来讲,立方延迟难于控制,而指数延迟可以较好地平衡系统复杂性和试验结果的精确性之间的

关系<sup>[4]</sup>。因此,本课题在制品库存控制模型中也采用指数生产延迟,其传递函数形式为  $\frac{1}{1+T_{pk}s}$  ( $k=1, 2$ ),其物理意义表示经过  $T_{pk}$  这段时间,输入物流完成加工操作。单位时间内完成数量的多少代表生产指令完成速率,生产指令完成速率减去顾客需求,经过一段时间的累加(通过一个积分环节  $\frac{1}{s}$ ),形成了库存(包括成品库存和在制品库存)。

### 1.2.3 恢复库存策略——前馈与反馈控制方式

#### 1.2.3.1 反馈控制方式

一般的物理系统,总会受到来自系统外或系统内的各种影响,如顾客对产品及其售后服务的要求、机床故障、材料缺陷等。因此,凡是有环境影响到决策、决策采取行动、行动影响环境、又从而影响到未来决策的情况下,就有信息反馈的系统存在。反馈控制的作用就是在系统受到内外因素影响时,能维持系统输出基本稳定,从而尽可能减少其对系统造成的负面效果。

考虑图3中的开/闭环控制系统。假设由于系统组成结构的变化,系统的传递函数由原来的  $G(s)$  变为  $(G(s) + G(s))$ ,根据经典控制理论,图3所示控制系统有

$$\begin{cases} \text{开环应用} & \begin{cases} Y(s) + Y(s) = [G(s) + G(s)]U(s) \\ Y(s) = G(s)U(s) \end{cases} \\ \text{闭环应用} & \begin{cases} Y(s) + Y(s) = \frac{G(s) + G(s)}{1 + G(s) + G(s)}U(s) \\ Y(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)}U(s) \end{cases} \end{cases}$$

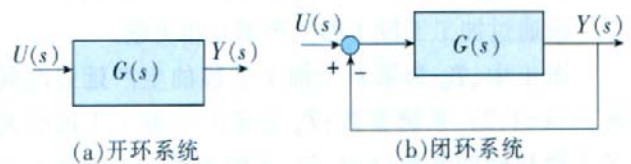


图3 控制系统中反馈环节的应用  
Fig.3 Application of feedback element in control system

可见,控制系统中的反馈环节降低了系统输出量的变化幅度,提高了控制系统的控制精度。

库存反馈环节的传递函数形式为  $\frac{1}{K_{pk}}$ ,  $\frac{1}{K_{pk}}$  表示在制品库存偏差的倍数,它与需求预测环节叠加后,

形成加工工段的生产指令。

### 1.2.3.2 前馈控制方式

如前所述,反馈控制指通过一个比较设定值和被调量之间的偏差,并迫使偏差趋向于零的控制方法。尽管反馈是最常用也是最简单的一种控制方式,但它不是万能的,有些场合应用反馈控制并不合适。比如,系统的时间延迟在很大程度上是由生产节拍过长造成的,在这种情况下采用反馈控制就不能得到及时的稳定的反馈结果,而前馈方式则行之有效。前馈控制方式的校正作用产生在偏差出现之前,从而超前抑制了偏差的幅度。

本课题的离散制造系统在制品控制模型的前馈控制环节由需求预测部分与库存补充部分二者叠加而成。通过2个系统参数,需求平稳化时间常数 $T_{sk}$  ( $k=1, 2$ )和恢复库存时间常数 $T_{pk}$  ( $k=1, 2$ )调节加工系统输入速率的大小,维持系统输出稳定。

### 1.2.3.3 前馈和反馈环节的集成应用

前馈校正和反馈校正,是控制系统中2种常用的校正方法,在一定程度上可以满足系统的性能指标要求。在实际离散制造系统中,由于顾客需求的随机性及各种突发事件的影响,如果控制系统中缺乏反馈环节,就会造成在制品的大量积压;如果缺少需求信息这样的前馈环节,也会使生产率连续波动,造成生产成本的不断上涨。因此,在控制系统中有必要集成反馈环节和前馈环节,构成复合控制校正系统。

复合校正中的前馈装置是按不变性原理设计的,可分为按扰动补偿和按输入补偿。在本课题的控制系统中,采用按扰动补偿技术。图4即为一个按扰动进行补偿的复合控制系统,图中 $D(s)$ 为可测量扰动, $G_1(s)$ 和 $G_2(s)$ 为反馈部分的前向通路传递函数, $G_n(s)$ 为前馈补偿装置传递函数。复合校正的目的,是通过恰当选择 $G_n(s)$ ,使扰动 $D(s)$ 经过 $G_n(s)$ 对系统输出 $Y(s)$ 产生补偿作用,以抵消扰动 $D(s)$ 通过 $G_2(s)$ 对输出 $Y(s)$ 产生的影响。

若选择前馈补偿装置的传递函数

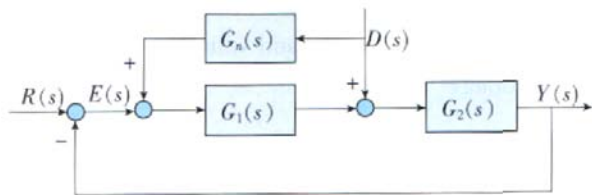


图4 按扰动补偿的复合控制系统

Fig.4 Complex control system compensated by disturbance

$$G_n(s) = \frac{1}{G_1(s)}, \quad (1)$$

则必有偏差 $E(s)$ 。因此,(1)式称为对抗扰动的误差全补偿条件。

然而,误差全补偿在物理上往往无法准确实现。由于指数平稳化比较接近控制理论的一阶滞后形式,在实际的离散制造系统中易于实现,所以本课题中令

$$G_n(s) = \frac{1}{1+T_{sk}s}$$

是一种比较适宜的方法。

综合上述分析,本课题建立的在制品库存控制模型中,考虑了2个加工工段,二者通过加工工段1的生产率互相关联;在这2个加工工段,都利用指数平稳方法平稳需求信息,采用指数化的生产延迟策略,同时在恢复库存方面集成了前馈和反馈控制环节,参见图1。

## 2 在制品库存控制的Simulink仿真

本课题以某公司发动机曲轴箱体加工为例,分析研究需求平稳化时间常数、生产延迟时间常数和恢复库存时间常数对在制品库存的影响。

根据该公司发动机曲轴箱生产实际,曲轴箱体零件的加工工艺牵涉到3个加工工段:毛坯加工工段(精密铸造,表面处理),机械加工工段(安装面加工,结合面加工,周边孔加工)和清洗喷漆工段(清洗,喷漆)。

基于图1在制品库存控制模型,取曲轴箱体零件的最后2个加工工段:机械加工工段(对应图1中的加工工段2)和清洗喷漆工段(对应图1中的加工工段1)为例,采用仿真方法,研究外界需求发生变化时需求平稳化时间常数 $T_{a1}$ 、 $T_{a2}$ 及恢复库存时间常数 $K_{p1}$ 、 $K_{p2}$ 对在制品库存的影响。

根据对实际生产过程的分析,取2个加工工段的生产延迟时间常数分别为: $T_{p1}=0.023$ 个工作日, $T_{p2}=0.046$ 个工作日。根据文献[8]的计算方法,取该2工段间的理想在制品库存 $W_0=154$ (件或套),仿真时间为5000个时间单位。系统经过1000个时间单位的加工平稳期后,需求发生突变,仿真做出在制品库存的变化曲线,如图5-7所示,在制品库存随系统参数变化的情况见表1。

仿真结果显示,加工工段1的需求平稳时间常数 $T_{a1}$ 越大,实际在制品库存 $W_A$ 的变化幅度就越小;加工工段2的需求平稳时间常数 $T_{a2}$ 越大,实际在制品库存 $W_A$ 的变化幅度却越大。加工工段1的库存恢复

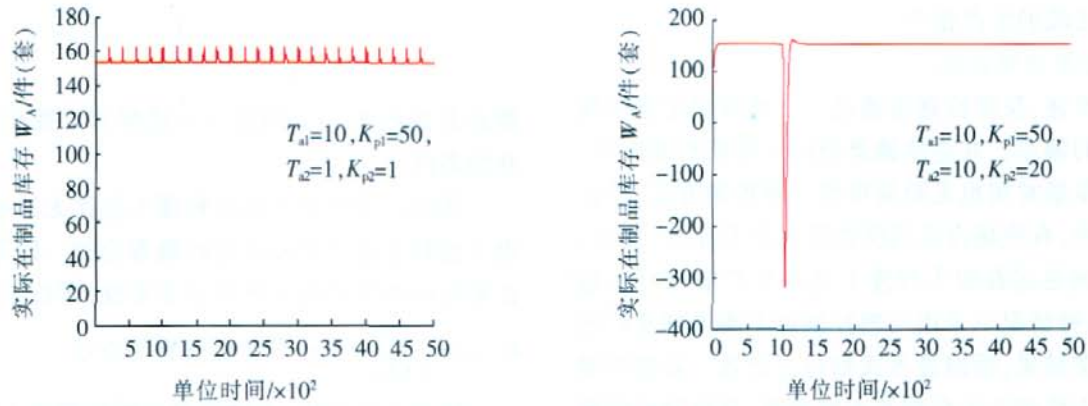


图5 阶跃需求时系统参数变化对在制品库存的影响

Fig.5 Effect of system parameter change on work-in-process inventory when sep demands

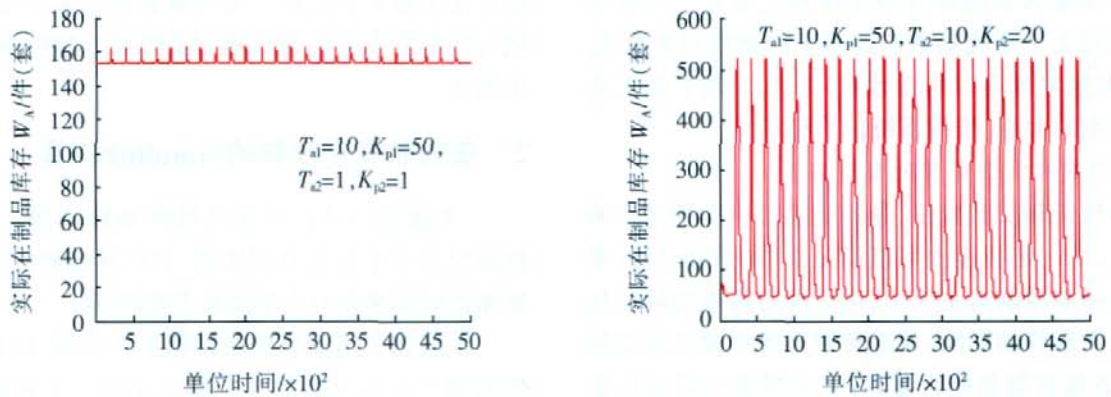


图6 锯齿波需求时系统参数变化对在制品库存的影响

Fig.6 Effect of system parameter change on work-in-process inventory when sawtooth waveform demands

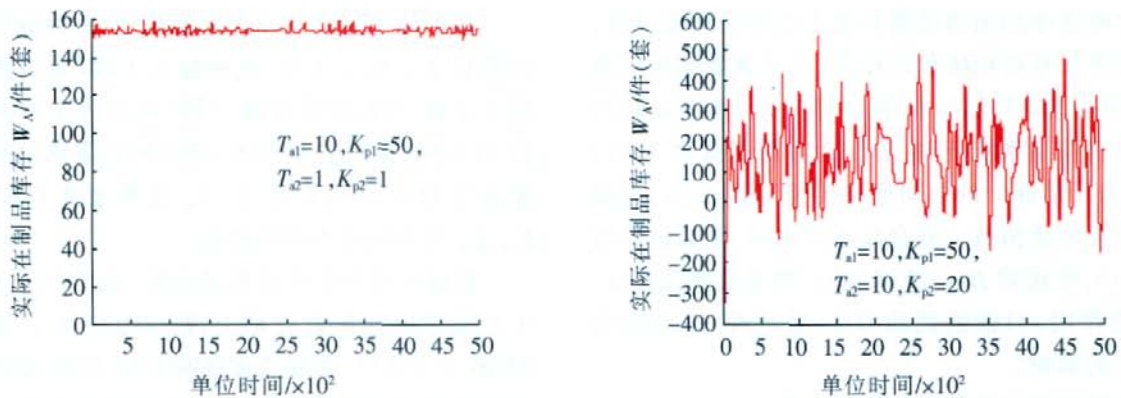


图7 需求量和需求时间都随机变化时系统参数变化对在制品库存的影响

Fig.7 Effect of system parameter change on work-in-process when demand volume and demand time change randomly

时间常数  $K_{p1}$  取值越大, 实际在制品库存  $W_A$  的变化幅度越小; 反之, 加工工段 2 的库存恢复时间常数  $K_{p2}$  取值越大, 实际在制品库存  $W_A$  的变化幅度越大。可见, 系统参数的不同取值对在制品库存的影响很大,

因而, 有必要对系统参数进行优化设计。

### 3 结束语

由于各加工中心的工作负荷不平衡, 为了有效地

