

在制品库存优化控制*

Optimization Control of Work-in-Progress Inventory

北京航空航天大学机械与自动化学院 李 薇 唐晓青
苏州市职业大学机电工程系 郭彩芬

[摘要] 分析了在制品库存的作用、应设立的位置及最佳容量,建立了离散制造系统在制品库存之比例积分控制模型。再以摩托车曲轴箱体生产线为例评价了控制效果,表明在需求动态变化时PI控制较之传统的正负反馈控制能更好地使在制品库存平稳化。

关键词: 离散制造系统 在制品库存 比例积分控制

[ABSTRACT] The effect, deploying methods and optimum amounts of work-in-process inventory are analyzed. The proportional integral control model of discrete manufacturing system work-in-process inventory is built up. The control effect is evaluated by taking production line of motorcycle crank box as an example. The results show that PI control can make work-in-process inventory more stable than traditional positive and negative feedback control.

Keywords: Discrete manufacturing system Work-in-progress inventory Proportional integral control

1 在制品库存

1.1 设立在制品库存的意义

文献[1]将在制品库存定义为第一道工序加工完成后直至最后一道工序前的库存。在制品库存的存在,历来利弊共存。如果没有在制品库存的介入,两个顺序相连的加工工段的生产节拍必须完全相同,否则就会产生干涉。即使它们的平均加工时间相等,第1个加工工段有时可能会先于第2个加工工段完成加工任务,但它要等待第2个加工工段接收它的成品后才能加工下一个工件,此时第1个加工工段就处于“阻塞”状态;类似地,如果第2个加工工段先于第1个工段完成加工任务,就一定要等待第1个加工工段输入原料,此时第2个加工工段就处于“饥饿”状态。

不管是“饥饿”还是“阻塞”,都意味着加工过程的停顿,造成潜在生产能力的损失。如果在这样的2个加工工段之间设置在制品库存,由于降低了系统出现“饥饿”和“阻塞”现象的概率,就会提高系统的生产能力。

如果出现某些原因(如设备故障、刀具损坏、操作者请假、缺少辅料等),造成设备突然停机,整个制造系统损失会更大。这时,在制品库存的存在会放宽系统的恢复时间。在制品库存的存在也使得2个加工工段加工不同产品成为可能。

但是其弊端在于它会产生相关的生产成本,如搬运设备费用、堆放场地费用等,不过最重要的还在于在制品库存对工件生产节拍的影响。

在工件流通时间里除去加工时间,剩余时间都与在制品库存有关。比如,一条生产线上每2个加工工段之间都设置了容量为1套的在制品库存,如果运输时间可以忽略不计,那么每个工件等待的时间大约等于其加工时间,也即工件的生产节拍与加工时间的比是2:1。据统计,即使是现代化的制造厂,工件用于加工的时间也很难占到生产节拍的1/10。因此,在制品库存对企业的及时送货能力有很大影响。

1.2 确定在制品库存的位置

生产线上在制品库存所处的位置、其存储容量的设计及两者与生产效率的关系长期以来一直是人们研究的课题。文献[2]系统地研究了设有在制品库存的自动生产线的运作,指出:

(1)如果 $E_0 \approx E_\infty$ (E_0 指生产线中不设在制品库存时整条生产线的生产效率, E_∞ 指在制品库存容量无限时整条生产线的生产效率), 那么在生产线上增设制品库存效果不明显;如果 E_∞ 远远大于 E_0 , 那么在制品库存的设置将可能显著改善生产线的性能。

(2) 如果某一个在制品库存总处于空或满的状态, 那么该库存两侧加工工段的生产率是失衡的, 该在制品库存的设置起不到任何作用。

(3) 通过在每两个加工工段间都设立容量大的在制品库存, 将可能使生产线的生产效率达到最大。

借鉴文献[2]的研究成果, 本课题在每两个加工工

* “十一五”国防基础科研项目(B0620060421)资助。

段之间都设立了在制品库存。

1.3 确定在制品库存的最佳容量

在制品库存的容量太大,会占用过多的存储空间,延长产品的生产节拍,损失企业适应调度和工艺变化的柔性。在制品库存的容量过小,又不能满足生产量要求。因此,必须对在制品库存的容量进行优化设计。文献[3]概括了丰田公司确定看板(在制品)数量的方法,即:

$$\text{看板数量} = [DL(1+\alpha)]$$

式中, D 为平均需求,以标准容器的数量表示, L 为生产节拍(加工时间+看板等待时间), α 为安全系数。

虽然丰田公司成功地应用了此方法^[4],但上述方法存在着以下缺点:

(1)看板数量的确定依赖主观参数 L 和 α ,而二者的合理数值要通过试验才能确定。

(2)不适用于变化的环境。如果加工工段的生产能力提高,或需求发生变化,调整在制品的唯一方法是估计变化后的 L 和 α ,而这些经验数值的确定很难做到快速和准确。

不过丰田公司克服了这些缺点,原因之一是丰田公司用了很长时间调整参数 L 和 α ;原因之二在于该公司的生产规模是大批量生产,产量稳定、变化幅度小。

文献[5]使用仿真方法确定加工工段的生产节拍,进而给出每个加工工段所需的看板数量,以避免动态生产环境下的任务积压。但文献[5]在进行库存最佳设计时,采用的是穷尽式的试探法。对于加工工段数量较少的加工系统,该方法是可行的;对于较长的生产线,或经常更换产品品种和批量大小的生产线,该方法就不太适用。

文献[6]采用仿真方法,使用实时的生产数据,考虑设备故障及维修等因素,动态调整生产系统的在制品库存,在确保在制品库存最低的同时,保证加工系统的生产量要求。但该文是在假定原材料无限,需求无限的前提下做出的,因此不能适应需求动态变化的情况。

文献[7]给出的计算在制品库存各项组成的公式中,全面考虑了生产量、生产节拍、设备负荷等各种在制品库存的影响因素,比较合理实用,因此被选为本课题确定各加工工段间在制品库存限定值的方法。

综合以上分析,为降低由在制品库存产生的非增值的生产成本,缩短企业的生产节拍,在制品库存占生产量的比例要小;为保证生产连续稳定运行,在需求动态变化时在制品库存要保持平稳,不应有过大波

动。因此,应优化设置在制品库存,并采用比例积分控制器控制其波动范围。

2 离散制造系统在制品库存的比例积分控制优化模型

2.1 离散制造系统建模

由于顾客需求的个性化和多样化,使得现代制造系统表现出以下特点:(1)产品品种多,加工工艺多样化;(2)有可能在某一时刻接到很多不同批量的产品订单;(3)产品数量不定,由于顾客订单经常变化,产品加工数量几乎每天都有变化;(4)由于有大量的需要优先完工的产品,加工过程总存在干扰。

同时,较复杂的制造系统由于加工工段多,存在反向物流,会产生各种随机的故障现象。况且同一产品也会存在加工时间和批量的差异,因此实现在制品库存的优良控制非常困难。

依据所采用的不同数学方法,主要的离散制造系统控制模型有以下4类:(1)连续时间微分方程模型(控制理论模型);(2)离散时间差分方程模型;(3)离散事件仿真模型;(4)运筹学模型。

上列4种建模方法分别适用于解决不同的问题,没有哪一种方法是万能的。要研究离散制造系统中在制品库存的变化情况,一定要基于对离散制造系统的动态描述,即要建立离散制造系统的控制理论模型。制造系统参数(需求平稳化常数、生产延迟时间常数、恢复库存时间常数)的大小,参数间不同的组合,都会对在制品库存产生不同的影响。其中,恢复库存常数(相当于比例积分控制算法的比例系数)不同的取值,不仅会造成系统的不同反应速度,在制品库存的波动程度也会有很大不同^[8],因此优化配置系统参数很有必要。系统参数优化配置后应产生以下影响:(1)对需求的真实变化做出快速反应;(2)过滤掉销售过程的随机干扰;(3)对加工周期的未知变化和加工时间的分布形式具有鲁棒性。

在流程作业中已获得广泛应用的比例积分(proportional and integral, PI)^[9]。可以采用的较好的控制算法。采用这种控制算法时,要在离散制造系统控制理论模型的基础上^[8],建立离散制造系统在制品之PI控制模型。PI控制器有几种设置方式:(1)只在加工工段1的反馈通路上放置PI控制器 $G_{c1}(s)$;(2)只在加工工段2的反馈通路上放置PI控制器 $G_{c2}(s)$;(3)在每个加工工段的反馈通路上都放置PI控制器,即采用级联控制方式。

不同的放置方式,需求与实际在制品之间的传递函数不同,也即动态系统的零点、极点不同,对同样的扰动量反应不同。根据文献[10],如果PI控制器设计得当,那么在同样的扰动 $D(s)$ 下,采用级联控制方式生产系统输出量的波动要比其他方式小得多。因此,本课题PI控制器的布置采用级联方式,如图1所示。

图中各参数的定义: $T_{pi}(i=1,2)$ 为生产延迟时间常数; $T_{aj}(i=1,2)$ 为需求平稳时间常数; W_D 为理想在制品库存; W_A 为实际在制品库存; I_D 为理想成品库存; I_A 为实际成品库存; $G_{cl}(l=1,2)$ 为比例积分控制器(传递函数形式); s 为控制理论在复数域的数学模型——传递函数中的复变量。

2.2 目标函数

如果过渡过程中动态偏差太大,或是建立时间太长,则控制品质太低。所以控制系统的过渡过程控制指标采用积分鉴定的形式,常用的有以下5种:

- $ISE = \int_0^T e^2(t)dt$ 为偏差二次方积分鉴定。
- $ITSE = \int_0^T te^2(t)dt$ 为时间乘以偏差二次方积分鉴定。
- $IAE = \int_0^T |e(t)|dt$ 为偏差绝对值积分鉴定。
- $ITAE = \int_0^T t|e(t)|dt$ 为时间乘以偏差绝对值积分鉴定。

• $IE = \int_0^\infty e(t)dt$ 为偏差积分鉴定。

上述前4个指标都难以进行解析分析,只有指标 $IE = \int_0^\infty e(t)dt$ 较易进行解析分析。Åström 在其专著中提出一个重要结论,即 $IE = \frac{1}{K_{ik}^{[11]}}$ (K_{ik} 为PI控制器的积分常数)。因此,通过优化设计PI控制器的积分系数即可平稳系统输出。

2.3 约束条件

就不同的控制问题而论,系统性能和鲁棒性之间的折衷程度有所不同。设计者通常希望选择一个约束条件来改变闭环系统的特性。一般情况下,这个参数应满足如下要求:

- (1)既要与系统性能直接相关,又不能是面向过程的。
- (2)如果设计的PI控制器可以自动调整参数,那么这个设计参数可以有一些缺省数值,不必迫使用户进行选取。
- (3)应该有很好的物理意义和自然界限值,以便于调整。

符合条件的2个控制参数是控制系统的灵敏度 M_s 和补灵敏度 $M_p^{[12]}$ 。

设系统的开环传递函数为

$$L(s) = G(s)G_c(s),$$

式中, $G(s)$ 是工业过程的传递函数, $G_c(s)$ 是PI控制器的传递函数。

灵敏度函数 $S(s)$ 定义为: $S(s) = 1/(1+L(s))$;控制系统的灵敏度 M_s 定义为灵敏度函数 $S(s)$ 幅频特性的最大值,即 $M_s = \max |S(j\omega)|$ 。 M_s 也是开环传递函数 $L(s)$ 对应的Nyquist图到临界点 $(-1, j0)$ 最短距离的倒数。 $M(s)$ 的一般取值范围为 $1.2 \sim 2.0^{[12]}$ 。

若定义 $H(s) = 1 - S(s) = L(s)/(1+L(s))$ 为系统的补灵敏度函数,也即控制系统的闭环传递函数,则

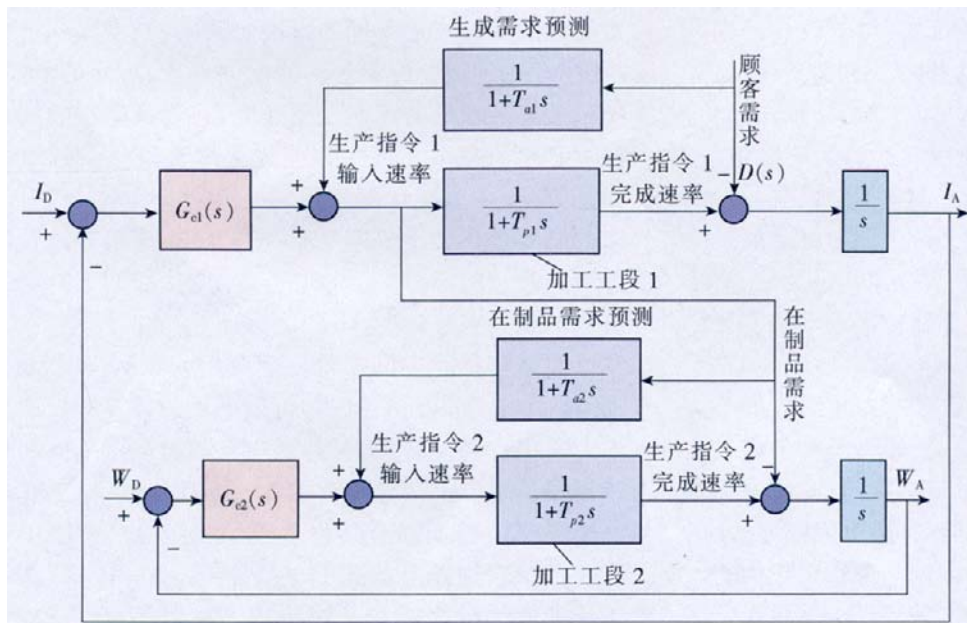


图1 离散制造系统在制品库存之PI控制模型

Fig.1 PI control model of discrete manufacturing system work-in-progress inventory

控制系统的灵敏度也可以用补灵敏度函数幅频特性的最大值表示,即 $M_p = \max |H(j\omega)|$ 。

理论上 M_s 和 M_p 都可以作为控制系统的约束条件,但二者对控制系统的影响程度不同,这一点可以用具体实例说明。

图 2 是一个简单的单输入单输出 (Single Input Single Output, SISO) 生产系统示意图。(假设理想库存量为 $I_D=50$, I_A 定义为实际在制品库存。)

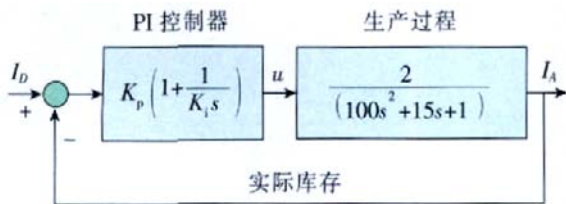


图 2 简单的 SISO 生产系统
Fig.2 A simple SISO production system

当 PI 控制器的比例系数 K_p 和 K_i 积分系数取不同数值时,其对应的系统灵敏度数值 M_s 和 M_p 如表 1 所示。可见,系统的灵敏度 M_s 和补灵敏度 M_p 是 PI 控制器的比例系数 K_p 和积分系数 K_i 的函数。

改变图 2 系统的灵敏度及补灵敏度(2 个参数分别取值 1.2, 1.4, 2.0), 可得到与该系统开环传递函数对应的 Nyquist 图以及与其闭环系统对应的系统输出 I_A 和系统输入(控制信号) u , 如图 3 所示(左列图以 M_s 为控制参数,右列图以 M_p 为控制参数)。

由图 3 左列图可见,调整参数 M_s 的数值,系统在时间域上的输出变化缓慢,并且在 M_s 数值不同时曲线形状有明显不同。改变右列图中 M_p 的数值,系统输出变化快且曲线形状变化不显著。因此,一般选灵敏度 M_s 作为控制系统的约束条件。

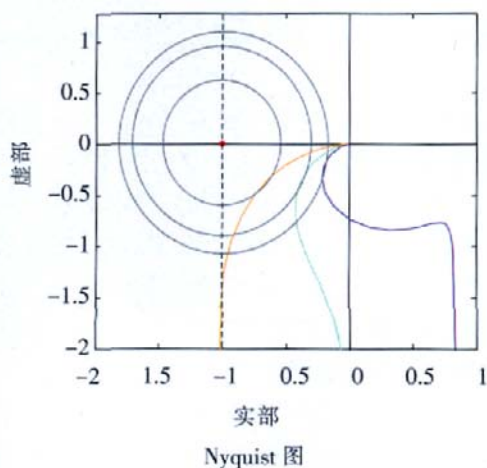


表 1 图 2 控制系统灵敏度系数与 PI 控制器参数的对应关系

灵敏度系数	PI 控制器参数		
	K_p	K_i	
M_s	1.2	0.5	90.380
	1.4	0.5	15.800
	2.0	0.5	7.985
M_p	1.2	0.5	10.610
	1.4	0.5	9.020
	2.0	0.5	6.798

2.4 建立优化模型

离散制造系统每个加工工段所对应的加工过程的传递函数为 $G_k(s) = G'_k(s) \frac{1}{s} = \frac{1}{s(T_{pk}s+1)}$, PI 控制器的

传递函数为 $G_{ck}(s) = K_{pk} + K_{ik} \frac{1}{s}$ 。据此可得出每一个加工工段所对应的控制系统的开环传递函数、灵敏度函数分别为

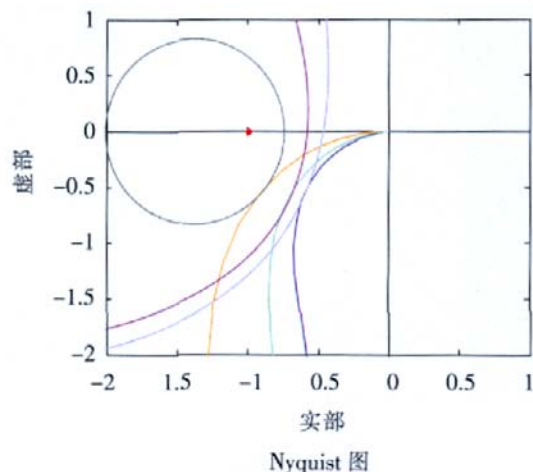
$$L_k(s) = G_{ck}(s)G_k(s) = \left(K_{pk} + K_{ik} \frac{1}{s} \right) \frac{1}{s(T_{pk}s+1)}$$

$$S_k(s) = 1/[1+L_k(s)] = \frac{s(T_{pk}s+1)}{s(T_{pk}s+1) + K_{pk}s + K_{ik}}$$

式中, K_{pk} 、 K_{ik} 、 T_{pk} 分别表示比例积分控制器的比例系数和积分系数以及生产延迟时间常数。

本课题的主要目的是通过对生产过程的 PI 控制,控制每个工段的在制品库存,在需求动态变化时,应尽量减少其变化幅度。基于上述分析,建立了如下的离散制造系统每个加工工段的优化模型:

$$\begin{cases} \max & f_k(K_{pk}, K_{ik}) = K_{ik} \\ \text{s.t.} & |S_k(j\omega)| - M_{sk} \leq 0 \end{cases} \quad (k=1, 2, \dots), (1)$$



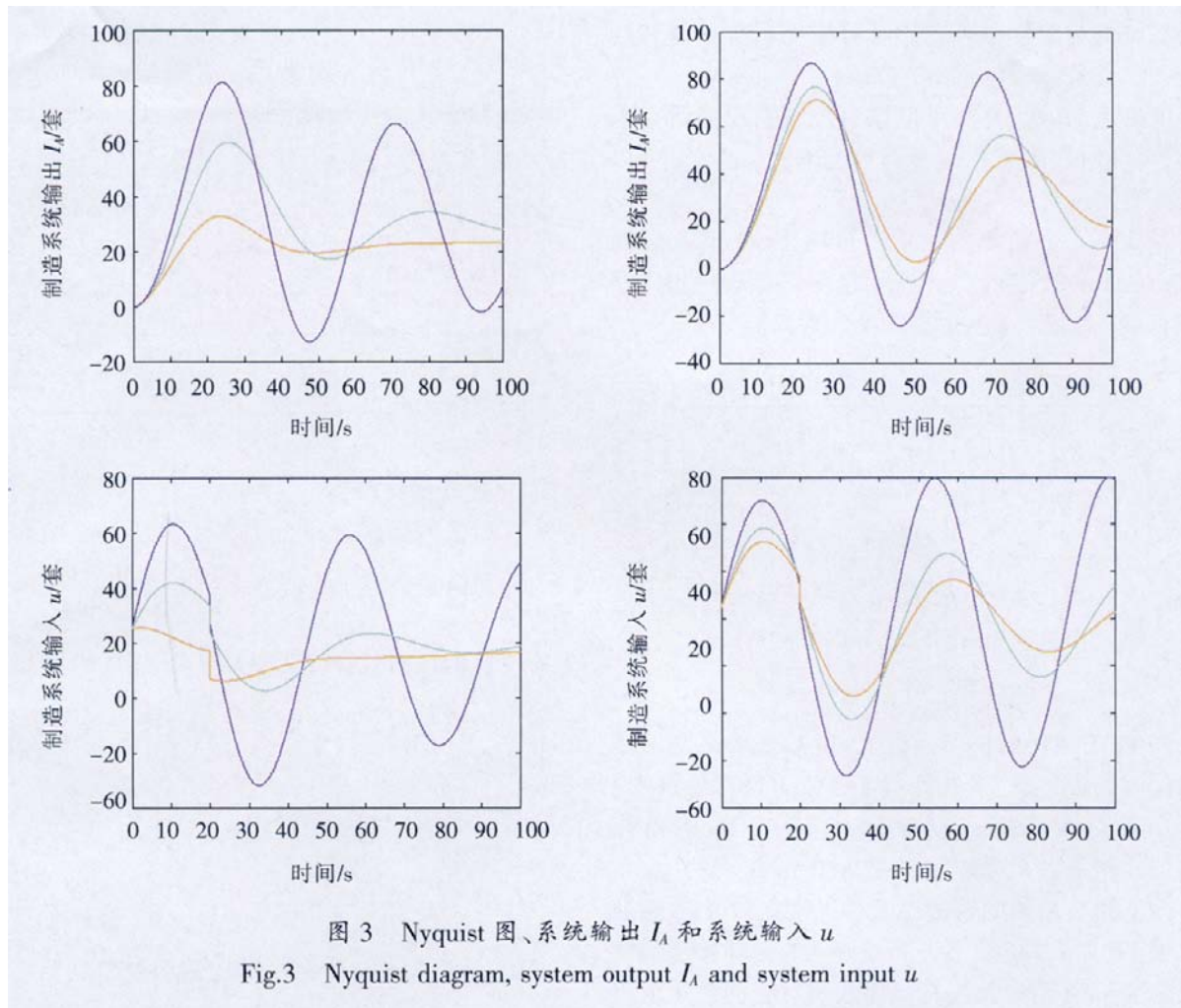


图3 Nyquist图、系统输出 I_A 和系统输入 u
Fig.3 Nyquist diagram, system output I_A and system input u

式中,目标函数规定了系统的实现目标,即在制品库存的变化幅度要尽量小;约束条件定义了控制系统的稳定范围。

若 $\alpha_k(\omega)$ 、 $\beta_k(\omega)$ 分别代表过程传递函数 $G_k(s)$ 的实部和虚部,通过进一步简化,可以将优化模型(1)转换为代数方程(2)和(3),进而应用 Newton-Raphson 方法迭代求解 PI 控制器的比例系数和积分系数^[13]。

$$K_{pk} = -\frac{\alpha_k}{r_k} = -\frac{1}{r_k} \cos\phi_k, \quad (2)$$

$$K_{ik} = -\frac{\omega\beta_k}{r_k} - \frac{\omega R_k}{r_k} = -\frac{\omega}{r_k} (\sin\phi_k + R_k),$$

$$q_k(\omega) = 2R_k \left[(R_k + \sin\phi_k) \left(\frac{r'_k}{r_k} - \frac{1}{\omega} \right) - \phi'_k \cos\phi_k \right] = 0 \quad (3)$$

3 PI控制系统仿真分析

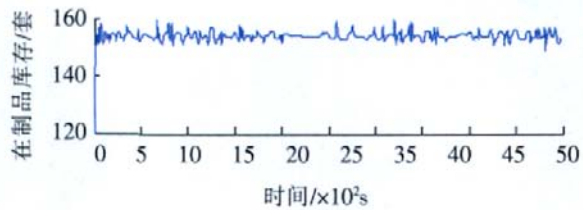
现以某摩托车生产企业发动机曲轴箱体生产线

为例,分析研究 PI 控制器控制在制品库存的效果。按工段划分,曲轴箱体零件的加工工艺过程为:毛坯加工(加工工段3)→机械加工(加工工段2)→清洗喷漆(加工工段1)。

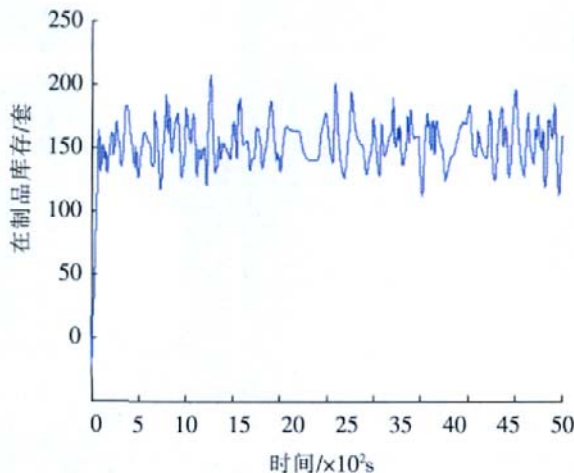
基于箱体生产线 PI 控制器的优化结果^[12],以最后2个加工工段(清洗喷漆工段和机械加工工段及在此期间的在制品库存 W_{A1} 为例,研究了外界需求动态变化时 PI 控制器使在制品库存平衡化的效果。

根据调研结果,各工段生产延迟时间常数分别取 $T_{p1}=10\text{min}$, 相当于 0.023 车间工作日 (Shop Calendar Day, scd), $T_{p2}=50\text{min}$ (0.115scd); 需求平稳化时间常数 $T_{a1}=10\text{scd}$, $T_{a2}=1\text{scd}$ 。确定在制品库存 1 的最佳容量为 $W_{D1}=150$ 套^[7]。控制模型中分别采用正/负反馈控制和 PI 控制,在需求量和需求时间都可变时,实际在制品库存 W_{A1} 的变化如图 4 所示。

由仿真结果可见,若离散制造系统中只采用简单的正/负反馈控制,在动态需求下,在制品库存波动很



(a)比例积分控制



(b)正/负反馈控制

图4 箱体生产线在制品库存之控制效果

Fig.4 Control effect of box production line work-in-progress inventory

大,波动范围大约有 100 套;而同样的需求下,PI 控制器的平稳效果非常显著,在制品库存的波动范围只有 15 套左右。

在实际生产过程中,需求的时间和数量都是随机变化的,因此 PI 控制可以作为首选的控制方式。

4 结束语

由于在制品库存直接影响产品的生产节拍和生产的平稳运行,因此,在满足顾客要求的同时,在整个价值链上降低在制品库存并维持在理想水平就显得日益重要。借鉴流程作业中广泛应用的过程控制技术,本课题将比例积分控制算法应用于工段间在制品库存控制。仿真结果表明,PI 控制器在离散制造业中具有良好的应用前景。

虽然 PI 控制器可以补偿过程扰动的影响,但它不能揭示产生过程变化的内因,而这一缺陷将导致过程不断偏离理想值。因此,为了持久改善过程品质,寻

找过程产生重大变化的起因,在比例积分控制过程中采用统计控制技术就显得至关重要,这是需要进一步研究的内容。

参 考 文 献

- [1] Conway R, Maxwell W, McClain J O, et al. The role of work-in-process inventory in serial production lines. *Operations Research*, 1988, 36(2), 229-241.
- [2] Buzacott J A, Hanifin L E. Models of automatic transfer lines with inventory banks—a review and comparison. *AIIE Transactions*, 1978, 10(2): 197-207.
- [3] Monden Y. *Toyota Production Systems*. Atlanta, GA: Industrial Engineering and Management Press. Institute of Industrial Engineers, 1983.
- [4] Rees L P, Spearman M L, Cheema P, et al. Dynamically adjusting the number of kanbans in a just-in-time production systems using estimated values of leadtime. *IIE Transactions*, 1987, 19(2): 199-207.
- [5] Philipoom P R, Schonbeyerger R J, Naim M M, et al. An investigation of the factors influencing the number of kanbans required in the implementation of the JIT technique with kanbans. *International Journal of Production Research*, 1987, 25 (3): 457-472.
- [6] Spearman M L, Woodruff D L, Hopp W J. CO CON-WIP: a pull alternative to kanban. *International Journal of Production Research*, 1990, 28(5): 879-894.
- [7] Lödding H, Yu K W, Wiendahl H P. Decentralized WIP-oriented manufacturing control. *Production Planning & Control*, 2003, 14(1): 42-54.
- [8] 郭彩芬. 离散制造系统在制品库存控制. *航空制造技术*, 2008(9): 92-97.
- [9] Towill D R, Evans G N, Cheema P. Analysis and design of an adaptive minimum reasonable inventory control system. *Production Planning and Control*, 1997, 8(6): 545-557.
- [10] Zhuang M X, Atherton D P. Optimum cascade PID controller design for SISO systems, *IEE CONTROL'94*: 1994: 606-611.
- [11] Åström K L, Hägglund, T. *PID controllers theory, design and tuning*, 2nd ed. Instrument Society of America, Research Triangle Park, NC, 1995.
- [12] Åström K L, Panagopoulos H, Hägglund T. Design of PI controllers based on non-convex optimization. *Automatica*, 1998, 34(5): 585-601.
- [13] Guo Caifen, Wang Zongrong. The application of PI control algorithm in discrete manufacturing systems. *Journal of Southeast JiaoTong University*, 2006, 14(4): 331-338.

(责编 晓静)