

受扰机器单机干扰管理模型^{*}

姜洋¹ 孙伟¹ 丁秋雷² 张旭¹

(1. 大连理工大学机械工程学院, 大连 116024; 2. 东北财经大学工商管理学院, 大连 116025)

【摘要】 运用干扰管理思想,从客户不满意度、运作成本以及工件加工顺序三方面度量单机调度系统的扰动,构建字典序的、多目标的单机调度干扰管理模型,并采用改进的蚁群算法进行求解,通过算例验证模型的有效性。结果表明:该方法比已有的全局重调度方法更实用,能够均衡各方的利益,得到多方满意的调整方案,使得系统的扰动更小。

关键词: 单机调度 干扰管理 多目标优化

中图分类号: TB114.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)12-0251-06

Model of Disruption Management for Machine Disruption in Single Machine Scheduling

Jiang Yang¹ Sun Wei¹ Ding Qiulei² Zhang Xu¹

(1. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

2. School of Business Administration, Dongbei University of Finance and Economics, Dalian 116025, China)

Abstract

The system deviation according to disruption management were measured from the following three aspects: the customer dissatisfaction, operational cost and processing sequence of jobs. Then, the multi-objective model of disruption management based on the lexicographic multiple goal programming was constructed and an improved ant colony optimization was demonstrated. Finally, the effectiveness of model was validated by a case. The computational result proved that, due to the tradeoff between all parties involved in the single machine scheduling, the proposed model was more practical than existed global rescheduling model.

Key words Single machine scheduling, Disruption management, Multi-objective optimization

引言

单机调度(single machine scheduling,简称SMS)问题作为生产调度问题的一个重要分支,可看作是其其他调度问题的特殊形式,是复杂多机调度问题的研究基础。

生产过程中,加工机器经常会受到众多干扰事件的影响导致加工中断,使得初始调度方案受到影响,甚至变得不可行,如机器故障、工人短缺、人为因素等,称这类问题为机器受扰问题。针对这一问题,

国内外学者进行了大量的研究,其采用的方法主要有重调度^[1-2]和鲁棒调度^[3-4]。

干扰管理^[5]是实时处理干扰事件的方法论。它通过对初始方案进行局部优化调整,能够快速生成对系统扰动最小的调整方案。因此,近年来已经成为国际学术界前沿性的研究方向并逐渐成为研究热点^[6-11]。但是,现有研究大多是从实际问题中抽象出若干目标,然后构建优化模型并求解。然而,由于单机调度系统包括多个主体,现有方法虽然能够得到问题的最优解,但是由于没有

从对整个系统的影响来考虑,因此这个最优解往往并不是解决实际问题的可行解,可能给系统带来更大的扰动。

本文针对上述难题,通过考虑单机调度系统中客户、生产企业管理者和车间工人等多个主体的利益,构建以客户不满意、运作成本和工件加工顺序的偏离为目标的干扰管理模型,并采用改进的蚁群算法进行求解,以期实际的单机调度干扰管理提供科学有效的决策工具。

1 扰动分析

干扰管理的核心是在干扰事件发生后,快速有效地生成使系统扰动最小的调整方案。因此,在建立干扰管理模型前,需要对扰动造成的影响进行分析,从而确定相应的目标函数。由于客户、生产企业管理者以及车间工人是使单机调度过程能够顺利运行的3个主体,三者的利益是单机调度问题中研究的关键。因此,本文首先分析扰动对客户、生产企业管理者以及车间工人等受扰主体的影响,从客户不满意、运作成本和工件加工顺序的偏差三方面来度量系统的扰动。

(1) 客户不满意。单机调度过程中,当机器受扰导致加工中断时,必然会引起连锁反应,影响后续一系列剩余工件的完工时间,使得某些客户可能无法在交货期内收到货物,从而增加了客户的不满意度。由于降低客户不满意有利于提高客户对企业的忠诚度,使企业拥有长期稳定的客户群并吸引更多的新客户,进而提高赢利,因此客户不满意是度量系统扰动时需要考虑的重要指标。

(2) 运作成本。生产企业管理者是单机调度过程的主导者。扰动发生后,工件的加工顺序可能随之发生变化,会影响剩余工件的总完工时间,从而增加企业的运作成本。由于在整个单机调度过程中,运作成本是生产企业管理者关注的核心,因此,在生成调整方案时,应适当兼顾成本因素,尽可能节约运作成本。

(3) 工件加工顺序。车间工人是单机调度过程的执行者。扰动发生后,初始加工方案将变得不可行。在新的调整方案下,需要更改工件的加工顺序,重新对原材料、工具等进行分配,这就对车间工人的工作情绪造成影响。如果调整方案与初始方案具有较大偏差,将有可能导致车间工人的消极怠工,因此在生成调整方案时,应使工件加工顺序的偏差尽量小。

2 单机调度干扰管理模型构建

首先建立初始方案的单机调度数学模型。当系统发生扰动后,在该模型的基础上,运用干扰管理思想,构建单机调度干扰管理模型。

2.1 初始方案的单机调度数学模型

2.1.1 问题界定

单机调度问题界定如下: n 个相互独立的工件在一台机器上序贯进行处理,需要满足以下工艺约束条件:①工件只有在到达之后才能被加工。②任何时刻机器只能加工一个工件。③工件只能被加工一次。

要求找到一个最优的工件加工顺序,使得目标函数最优,即工件的总完工时间最短。

2.1.2 数学模型

建立单机调度数学模型如下

$$\min \sum_{i=1}^n c_i \quad (1)$$

$$c_i \geq r_i + p_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

$$c_j - c_i + M(1 - x_{ij}) \geq p_i \quad (i \neq j; i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

$$c_i - c_j + Mx_{ij} \geq p_j \quad (i \neq j; i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$$

$$\text{其中 } x_{ij} = \begin{cases} 1 & (v_i \text{ 在 } v_j \text{ 前面进行加工}) \\ 0 & (\text{否则}) \end{cases}$$

式中 n ——需要加工的工件个数

V ——工件集合 p_i —— v_i 的加工时间

r_i —— v_i 的到达时间

c_i —— v_i 的完工时间

M ——很大的正数

上述模型中:式(1)为目标函数,表示所有工件的总完工时间最短;式(2)保证每个工件只有在到达之后才能被加工;式(3)和(4)保证任何时刻机器只能加工一个工件。

2.2 单机调度干扰管理模型

2.2.1 模型假设

在工件加工过程中,如果发生了扰动,本文假设如下:①初始调度方案已知。②将扰动结束的时间定为调整调度方案的0时刻。③剩余工件的到达时间为0时刻。④扰动发生时正在加工的工件,在扰动结束后需要重新进行加工,即工件加工是不可恢复的。

2.2.2 扰动的度量函数

(1) 客户不满意度的度量

客户不满意是衡量扰动的重要指标。当工件

在客户的交货期内完工时,货物能够在客户要求的时间范围内送达,此时客户的不满意度最低。反之,如果工件不能在客户的交货期内完工时,货物将不能够在客户要求的时间范围内送达,此时客户的不满意度将会提高。

根据以上描述,客户不满意度与工件的完工时间密切相关,如图 1 所示。

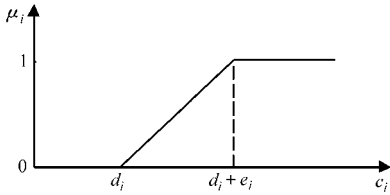


图 1 客户不满意度函数

Fig. 1 Function of customer dissatisfaction

根据图 1,客户不满意度可用函数^[12]表示为

$$\mu_i(c_i) = \begin{cases} 0 & (c_i \leq d_i) \\ \frac{c_i - d_i}{e_i} & (d_i < c_i \leq d_i + e_i) \\ 1 & (c_i > d_i + e_i) \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

式中 m ——未完成的工件个数 d_i —— v_i 的工期

e_i —— v_i 交货时间的容忍量

$\mu_i(c_i)$ —— v_i 对应的客户不满意度

式(5)是对单一客户不满意度的度量,对于系统中所有客户整体不满意度的度量,则需要根据生产企业的标准不同而有所不同。本文提出 3 种系统整体客户不满意度的度量方法,如表 1 所示。三者的区别在于:平均法的目的是降低系统的平均客户不满意度;抓重点法的目的是减少取消订单的客户数量;百分比法的目的是减少不满意客户的数量。

表 1 系统整体客户不满意度的度量方法

Tab. 1 Measuring methods of whole customer dissatisfaction

方法	定义	意义
平均法	$\frac{\sum_{i=1}^m \mu_i(c_i)}{m}$	以平均客户不满意度度量整体客户不满意度
抓重点法	$\frac{ \{\mu_i(c_i) \mu_i(c_i) \geq 100\%; i = 1, 2, \dots, m\} }{m}$	系统中不满意度不小于 100% 的客户数量
百分比法	$\frac{ \{\mu_i(c_i) \mu_i(c_i) \neq 0; i = 1, 2, \dots, m\} }{m}$	系统中不满意客户的数量占客户总数的百分比

在上述度量方法的基础上,可以对客户的不满意度进行度量。如采用平均法时,客户不满意度的度量表示为

$$U - \bar{U} = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_i(c_i)}{m} - \frac{\sum_{i=1}^m \mu_i(\bar{c}_i)}{m} \quad (6)$$

其中 $\bar{c}_i = -(\delta + \delta_1) + p_1 + p_2 + \dots + p_i$
 $= -(\delta + \delta_1) + c_i$

式中 U ——调整方案中的整体客户不满意度

\bar{U} ——初始方案中的整体客户不满意度

\bar{c}_i ——未发生扰动时 v_i 的完工时间

δ ——扰动持续的时间

δ_1 ——扰动发生时正在加工的工件 v_k 已经加工的时间, $1 \leq k \leq n$

(2) 运作成本的度量

该目标是生产企业管理者当前关注的核心。由于运作成本和工件总完工时间相关,因此在单机调度数学模型的基础上,运作成本的度量表示为

$$f - \bar{f} = \sum_{i=1}^m c_i - \sum_{i=1}^m \bar{c}_i \quad (7)$$

式中 f ——调整方案中剩余工件的总完工时间

\bar{f} ——初始方案中剩余工件的总完工时间

(3) 工件加工顺序的度量

工件加工顺序的偏差是车间工人关注的重要目标之一,工件加工顺序的度量表示为

$$g(\bar{S}_i) = \sum_{i=1}^m \bar{S}_i \quad (8)$$

其中

$$S_i = S_i^1 \cap S_i^2$$

式中 S_i^1 ——初始方案中在 v_i 之前加工的工件集合

S_i^2 ——调整方案中在 v_i 之后加工的工件集合

S_i —— S_i^1 和 S_i^2 的交集

\bar{S}_i ——集合 S_i 的势

g ——调整方案与初始方案间剩余工件加工顺序的偏差

2.2.3 干扰管理模型

以 2.2.2 节的扰动度量函数为基础,采用字典序多目标规划方法,构建单机调度干扰管理模型为

$$\min Lex = P_1 : d_U^+ \quad P_2 : d_f^+ \quad P_3 : g(\bar{S}_i) \quad (9)$$

$$d_U^+ = U - \bar{U} \quad (10)$$

$$d_f^+ = f - \bar{f} \quad (11)$$

$$P_1 \gg P_2 \gg P_3 \quad (12)$$

$$c_i \geq r_i + p_i \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (13)$$

$$c_j - c_i + M(1 - x_{ij}) \geq p_i$$

$$(i \neq j; i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, m) \quad (14)$$

$$c_i - c_j + Mx_{ij} \geq p_j$$

$$(i \neq j; i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, m) \quad (15)$$

$$V' = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$$

式中 V' ——未完成的工件集合

d_U^+ ——整体客户不满意度 U 和 \bar{U} 的正偏差变量

d_f^+ ——剩余工件的总完工时间 f 和 \bar{f} 的正偏差变量

式(9)~(11)表示调整方案与初始方案的偏离最小,即系统的扰动程度最小。在本模型中,客户不满意度为第1级目标,运作成本为第2级目标,工件加工顺序的偏差为第3级目标。式(12)为不同目标的优先级,决策者可针对实际情况,调整不同目标的优先级顺序。式(13)保证每个工件只有在到达之后才能被加工;式(14)和(15)保证任何时刻机器只能加工一个工件。

3 单机干扰管理模型求解方法

干扰管理模型是一个多目标的 NP 难问题,求解起来非常困难,兼顾各方利益,形成多方满意的调整方案,是目前干扰管理研究的核心。蚁群算法具有正反馈、分布式计算以及贪婪的启发式搜索等特点,为有效地求解上述问题提供了可能。但是,由于该算法仍然存在着容易陷入局部优化的缺陷,因此本文提出改进的蚁群算法——混合蚁群算法(hybrid ant colony optimization,简称 HACO)。

3.1 信息素调整策略

在蚁群算法中,蚁群运动的路径总是趋近于信息量最强的路径,由于可能使离最优解相差很远的路径上的信息得到不应有的增强,阻碍以后的蚂蚁发现更好的全局最优解,因此信息量最强的路径不一定能反映出最优的路径。算法虽然经过改进,加大了目标的选择概率,但是这种信息正反馈导致搜索过早出现停滞的现象仍然没有得到改善。

为了提高蚁群算法的全局搜索能力,本文采用一种确定性选择和随机性选择相结合的策略,当搜索陷入停滞时,对路径上的信息量进行动态调整,缩小最好和最差路径上信息量的差距,并适当加大随机选择的概率,以利于对解空间更完全地搜索。

由于信息素的更新作用,每条边的信息量可能在某次搜索后出现极大值或极小值的现象,极大值将使搜索早熟,极小值则不利于全局搜索,因此本文吸收了最值蚂蚁算法^[13]的思想,将信息素水平限制在 $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$ 之间,同时在开始搜索前,将所有边的信息素水平设为最大值,从而使蚂蚁在搜索初期具

有更大的搜索范围。

当问题规模较大时,由于信息素挥发系数 $1 - \rho$ 的存在,那些从未被搜索到的边信息量会逐渐减小到接近于零,降低了算法的全局搜索能力,而且当 $1 - \rho$ 过小时,边的信息量增大会使以前搜索过的解被选择的可能性增大,影响到算法的全局搜索能力;增大 $1 - \rho$ 虽然可以提高算法的全局搜索能力,但又会使算法的搜索速度降低。本文采用自适应改变 ρ 以解决上述问题^[14]。

3.2 最优个体交叉及变异策略

蚁群算法是一种正反馈的启发式搜索算法,算法在具有较快搜索速度的同时,也容易陷入局部优化。由于遗传算法的交叉和变异操作,可增加种群的多样性,防止算法早熟,因此当倾向于局部最优时,引入最优个体交叉及变异策略,从而有效扩大搜索空间,避免算法陷入局部最优。

(1) 交叉策略

当搜索陷入停滞时,将最优个体和次优个体的编码进行交叉操作,假设两组编码分别为 A_1 和 A_2 ,交叉规则如下:①随机生成交叉段的长度和交叉段起始位置。假设 $A_1: B_1 | B_2 | B_3, A_2: C_1 | C_2 | C_3, B_2$ 和 C_2 分别为 A_1 和 A_2 的交叉段。②将 C_2 插入到 A_1 中,位于 B_2 前面,这样形成新的编码 $A_3: B_1 | C_2 | B_2 | B_3$ 。③在 A_3 中,删除 B_1, B_2, B_3 中与 C_2 重复的编码,从而形成新的交叉编码 A_3 。④同样的方法用在 A_2 上,生成新的编码 A_4 。⑤比较 A_1, A_2, A_3, A_4 的结果,选出最优编码。

(2) 变异策略

当算法倾向于局部收敛时,对最优个体进行变异,即在这个局部最优路径上取任意一段或几段,让信息素大幅度减少,甚至减为最小值。于是下次不得不跳出此路径,而去寻找另外可能的更好路径,实验表明变异有助于摆脱局部最优值。从实验数据看,对于规模较大的问题,在引入变异后明显看到结果出现震荡,然后向更好解的方向变化。

3.3 集成其他算法策略

蚁群算法易与传统启发式算法相结合的特点,决定其具有很强的耦合性。交换法最初用于求解车辆路径问题,它通过路线之间的交换,从而达到改善目标函数的目的。本文吸收交换法的思想,提出求解单机调度问题的 2-opt 交换法,即通过交换 2 个工件的加工位置,从而防止搜索陷入局部优化。

4 算例验证及结果分析

首先假设了一个单机算例,按照最短加工时间(short processing time,简称 SPT)优先规则,得到初

始加工方案。之后将此方案作为单机调度干扰管理问题的背景,运用本文方法进行求解。由于初始方案按照 SPT 规则排序,因此,采用全局重调度方法得到的方案与原调度相同。通过与传统全局重调度方法的结果对比,验证本文方法的有效性。

4.1 算例设计

假设加工企业车间的一台瓶颈机需要顺序加工 9 个工件,按照 SPT 规则,工件的初始加工顺序为 1→2→3→4→5→6→7→8→9,各工件的参数如表 2 所示。

表 2 工件参数

Tab.2 Parameters of jobs

参数	工件								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
p_i	2	4	4	7	8	10	13	16	17
d_i	6	13	5	10	21	15	32	21	25
e_i	6	9	3	3	4	7	5	12	2

4.2 实验结果

当机器加工到第 3 个工件时突然发生扰动,导致机器无法继续加工,这时工件 3 已经加工的时间为 0.5 h,干扰持续的时间为 1.5 h。当机器恢复后,从工件 3 开始,重新安排剩余工件的加工顺序。

在现代生产企业生产中,生产同种产品的企业越来越多,企业间的竞争越来越激烈,有效地维护客户订单是生产企业保持生存和发展的重点之一。因此,本文采用抓重点法来衡量客户不满意度,以有效减少客户取消订单的数量。客户不满意度可以表示为

$$\mu_i(c_i) = \begin{cases} 0 & (c_i \leq d_i + e_i) \\ 1 & (c_i > d_i + e_i) \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, m)$$

假设目标的重要程度依次为客户不满意度、运作成本以及工件加工顺序,采用本文方法与全局重调度方法对干扰问题进行求解,结果如表 3 所示。

4.3 对比分析

由表 3 可得:①从客户不满意度的扰动来看,由于客户不满意度采用调整方案与初始方案间的整体客户不满意度差值来度量,实验结果表明本文方法

表 3 本文方法和全局重调度方法得到的结果

Tab.3 Results of the proposed method and global rescheduling

方法	加工顺序	客户不满意度 的扰动	运作成本 的扰动	工件加工顺序 的扰动
本文方法	3→4→5→7→6→8→9	-1	17	1
全局重调度方法	3→4→5→6→7→8→9	0	14	0

比全局重调度方法多交付了一个工件,这说明本文方法在降低客户不满意度上的效果是比较明显的。②从运作成本的扰动来看,虽然本文方法得到的结果劣于全局重调度方法得到的结果,但是两者相差不大,说明本文方法得到的运作成本接近于重调度方法得到的运作成本。③从工件加工顺序的扰动来看,虽然本文方法得到的结果略高于全局重调度方法得到的结果,但是在车间工人可以接受的范围之内。

综上所述,与全局重调度方法相比,本文方法以牺牲较小的运作成本扰动和加工顺序扰动,换来了客户不满意度的降低。因此,该方法更能平衡单机调度系统中各个主体之间的利益,得到的结果更加科学。另外,虽然从短期看,企业牺牲了一点成本,但从长期的战略角度看,客户不满意度的降低有利于提高客户对企业的忠诚度,使企业拥有稳定的客户群并吸引更多的新客户,进而提高利润。

5 结论

(1) 提出了机器受扰的扰动度量方法,为单机调度系统中涉及感知多样性的扰动度量提供了手段,为解决干扰管理领域扰动度量这一关键问题提供了新思路,有利于丰富和完善干扰管理理论。

(2) 构建了机器受扰的单机调度干扰管理多目标优化模型,为寻找扰动最小的调整方案提供较为实用的定量分析工具。

(3) 提出了改进的蚁群算法——混合蚁群算法的基本原理,为求解干扰管理模型这一 NP 难问题提供了思路,为寻求科学实用的多目标优化问题的求解方法进行了有益探索。

参 考 文 献

- 刘明周,单晖,蒋增强,等. 不确定条件下车间动态重调度优化方法[J]. 机械工程学报,2009,45(10):137~142.
Liu Mingzhou, Shan Hui, Jiang Zengqiang, et al. Dynamic rescheduling optimization of job-shop under uncertain conditions [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(10): 137~142. (in Chinese)
- Ali T U, Reha U, Ali S K. Rescheduling on a single machine with part-type dependent setup times and deadlines [J]. Annals of Operations Research, 1997, 70: 93~113.
- Yang J, Yu G. On the robust single machine scheduling problem [J]. Journal of Combinatorial Optimization, 2002, 6(1):

17 ~ 33.

- 4 刘琳,谷寒雨,席裕庚. 加工时间不确定的 Just-in-time 单机鲁棒调度[J]. 控制与决策,2007,22(10):1 151 ~ 1 154, 1 159.
Liu Lin, Gu Hanyu, Xi Yugeng. Robust scheduling in a Just-in-time single machine system with processing time uncertainty [J]. Control and Decision, 2007, 22(10): 1 151 ~ 1 154, 1 159. (in Chinese)
- 5 Yu G, Qi X T. Disruption management: framework, models and applications [M]. Singapore: World Scientific Publishing, 2004.
- 6 Qi X T, Bard J F, Yu G. Disruption management for machine scheduling: the case of SPT schedules [J]. International Journal of Production Economics, 2006, 103(1): 166 ~ 184.
- 7 Abumaizar R J, Svestka J A. Rescheduling job shops under random disruptions [J]. International Journal of Production Research, 1997, 35(7): 2 065 ~ 2 082.
- 8 Yang J, Qi X, Yu G. Disruption management in production planning [J]. Naval Research Logistics, 2005, 52(5): 420 ~ 442.
- 9 严培胜,邓薇,高成修. 单机排序中带可分配工期的总误工问题的应急管理[J]. 高校应用数学学报 A 辑,2004,19(增刊 1):543 ~ 549.
Yan Peisheng, Deng Wei, Gao Chengxiu. Disruption management for single machine scheduling with assignable due dates to total tardiness [J]. Applied Mathematics A Journal of Chinese Universities, 2004, 19(Supp. 1): 543 ~ 549. (in Chinese)
- 10 曹晓刚,闻卉,黄崇超. 单机排序中关于完工前总损失的应急管理[J]. 数学物理学报,2009,29A(4):940 ~ 948.
Cao Xiaogang, Wen Hui, Huang Chongchao. Disruption management for single machine scheduling on total loss before completion [J]. Acta Mathematica Scientia, 2009, 29A(4): 940 ~ 948. (in Chinese)
- 11 Wang J, Liu F, He P. Rescheduling under predictive disruption of WSPT schedule for single machine scheduling [J]. ICIC Express Letter, 2010, 4(2): 467 ~ 472.
- 12 Zimmermann H J. Fuzzy set theory and its application[M]. London: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- 13 Stützle T, Hoos H. Improvements on the ant system: introducing MAX-MIN ant system [M] // Smith G D, Steele N C, Albrecht R F. Proceedings of ICANNGA'97, Int. Conf. on Artificial Neural Net and Genetic Algorithms: Springer Verlag, 1997.
- 14 王颖,谢剑英. 一种自适应蚁群算法及其仿真研究[J]. 系统仿真研究,2002,14(1):31 ~ 33.
Wang Ying, Xie Jianying. An adaptive ant colony optimization algorithm and simulation [J]. Acta Simulata Systematica Sinica, 2002, 14(1): 31 ~ 33. (in Chinese)

(上接第 245 页)

- 5 孟彬,阮健,邢彤,等. 耐高压低惯量直动式电-机械转换器,中国:200910097093.3 [P]. 2010-12-08.
- 6 阮健,孟彬. 耐高压低惯量旋转电磁铁,中国:200910095983.0 [P]. 2011-02-09.
- 7 阮健,裴翔,李胜. 2D 数字换向阀[J]. 机械工程学报,2000,36(3):86 ~ 89.
Ruan Jian, Pei Xiang, Li Sheng. 2D digital directional control valve[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000, 36(3):86 ~ 89. (in Chinese)
- 8 阮健,李胜,裴翔,等. 数字阀的分级控制及非线性[J]. 机械工程学报,2005,41(11): 91 ~ 97.
Ruan Jian, Li Sheng, Pei Xiang, et al. Stage control and nonlinearities of digital valves [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(11):91 ~ 97. (in Chinese)
- 9 李胜,阮健. 步进电机-机械转换器的闭环连续跟踪控制方法,中国:200910097093.3 [P]. 2010-12-08.
- 10 Takashi K, Akira S. Stepping motors and their microprocessor controls [M]. USA: Oxford University Press, 1994.
- 11 孟彬,阮健,李胜. 2-D 数字阀用低惯量旋转电磁铁及其矩角特性研究[J]. 农业机械学报,2011,42(12):220 ~ 224, 230.
Meng Bin, Ruan Jian, Li Sheng. Low inertia rotary electromagnet of 2-D digital valve and research on its torque-angle characteristic. [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(12): 220 ~ 224, 230. (in Chinese)
- 12 孟彬,阮健,李胜. 低惯量旋转电磁铁的动态特性研究 [J]. 中国机械工程,2011,22(20):2 407 ~ 2 410, 2 459.
Meng Bin, Ruan Jian, Li Sheng. Research on dynamic characteristics of rotary electromagnet with low inertia [J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(20): 2 407 ~ 2 410, 2 459. (in Chinese)