

染缸资源的离散事件动态系统建模及优化

余婷, 王飞, 汲洋弘康

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 根据印染企业订单排缸生产计划的实际情况,建立染缸资源配置系统的自动机模型,使订单的各种染缸配置方式映射到自动机模型中;然后,根据模型行为演化过程,对订单的染缸资源配置过程划分阶段,在各个阶段设定性能指标函数,并建立各阶段间性能指标函数间的递推关系式;最后,用动态规划法对染缸的配置过程寻找最优排缸策略,得到染缸资源利用率最大的配置方式.实例结果表明:与现有的计算机调度系统相比,所建立的模型和决策方法能有效地提高染缸资源的利用率.

关键词: 染缸;资源配置;离散事件;动态系统;自动机;动态规划

中图分类号: TP 271.8 **文献标志码:** A

对于资源配置系统的一系列研究成果,很大程度上依赖于离散事件动态系统的迅速发展^[1].目前,对于资源配置系统的研究大致可分为系统的死锁和优化两个主要问题.基于模型的死锁避免,在多线程并发系统中的应用得到了较好的发展.在柔性制造系统中,自动机和 Petri 网是研究死锁问题的两大数学工具^[2].在自动机中, Lawley 等^[2]和 Reveliotis 等^[3]提出了基于多项式复杂性的最优无阻塞监控策略来预防死锁避免问题.在 Petri 网中,李志武等^[4]和 Tricas 等^[5]根据 Siphon 理论来设计控制监控器,避免柔性制造系统中的死锁问题.郭涛等^[6]和 Sampath 等^[7]提出了在资源配置系统中的控制规范改变时,用数学规划的方法在 Petri 网模型中设计资源重构控制器,以实现最优资源配置问题;Tezcan 等^[8]提出了用鲁棒控制策略来优化多服务器并行服务系统中的服务器分配问题.本文基于福建晋江某印染纺织企业的订单排缸过程,用离散事件动态系统对订单的染缸资源配置过程建立模型.

1 离散事件动态系统

离散事件动态系统是指由异步、突发的事件按照一定的运行规则相互作用,导致系统状态演化的一类动态系统,实际上是一个用于生产产品或提供服务的人造系统,以此来满足人类设定的一些需求^[9].资源配置系统是一类典型的离散事件动态系统,通常由一系列的异步、并发或有序的过程一起构成^[6].它的每个配置过程可能需要多种资源并且服从人为设定的一些复杂规则,而这些规则无法用传统的差微分方程来描述.用离散事件系统能够更好地对染缸资源配置系统建立模型及分析其行为性能^[10].

自动机和形式语言是离散事件动态系统的基本建模工具.一个确定的有限状态自动机 G 是一个五元组^[11], $G=(X,\Sigma,\delta,x_0,X_m)$.其中: X 为有限状态集合; Σ 为事件集,分可控事件集 Σ_c 和不可控事件集 Σ_{uc} ; δ 为状态转移函数, $\delta:X\times\Sigma\rightarrow X$,描述系统由一个状态经给定条件转移至新的状态的过程; $x_0\in X$ 为初始状态; $X_m\in X$ 为标识状态.在形式语言中,用 Σ^* 表示事件集 Σ 中包含空串 ϵ 在内的所有有限字符串的集合.若定义 $\delta(x_0,\epsilon)=x_0$,且 $\delta(x_0,s\sigma)=\delta(\delta(x_0,s),\sigma),(\forall \sigma\in\Sigma,s\in\Sigma^*)$,则状态转移函数也可以扩展定义至符号串集合 Σ^* ,即为 $\delta:X\times\Sigma^*\rightarrow X$.

离散事件动态系统的行为一般以自动机 G 的生成语言 $L(G)=\{s\in\Sigma^*|\delta(x_0,s)!\}$ 表示.假设字符

串 s 长度为 $|s|$, $L^k(G) = \{s \in L(G) \mid |s| = k\}$ 表示由自动机 G 生成的长度为 k 的字符串集合. 当字符串长度 $|s| = k$ 时, 则串 s 发生后, 在控制器 f_k 作用下, 所有可能的控制输入 $f_k(s)$ 可表示为 $f_k: L^{(k)}(G) \rightarrow \Gamma$. 其中: $s \in L^{(k)}(G)$; Γ 为控制输入集. 因此, 控制器 f 即为一系列决策序列 $f = (f_0, f_1, f_2, \dots)$.

2 染缸资源配置系统数学模型的建立

染缸资源配置系统是一种常见的离散事件动态系统. 在此, 将利用自动机对染缸资源配置系统建立数学模型. 在模型中, 订单的各种生产方式可以用自动机的状态转换图表示出来. 文中, 将考虑对 l 种缸容的染缸资源配置系统建立自动机模型, 如图 1 所示. 模型 G 可表示为

$$G = (X, \Sigma, \delta, x_0, X_m).$$

其中: $X = \{l \text{ 种染缸工作状态的集合}\}$, $0, 1, 2$ 分别表示染缸处于空闲状态、满负荷工作状态和不满负荷工作状态; $\Sigma = \{\text{不同缸容的染缸工作事件的集合}\}$, $\sigma_i (i = 1, 2, \dots, l)$ 表示第 i 种缸容的染缸满负荷工作, $\beta_i, \beta_j (i = 1, \dots, l; j = 1, \dots, l, i \neq j)$ 分别表示使第 i 种、第 j 种缸容的染缸不满负荷工作, r 表示染缸工作结束返回空闲状态; $\delta: X \times \Sigma \rightarrow X$ 为各种染缸工作状态的转移函数; $x_0 = (0, 0, \dots, 0)$ 表示为 l 种染缸资源的初始状态均处于空闲状态; X_m 为订单顺利加工完成后染缸的工作状态.

在染缸资源配置系统的自动机模型中, 先需定义订单的排缸规则: 当订单的质量不能用单一染缸完成加工时, 这时就需要对订单做拆分. 即一部分可以用某些染缸满负荷工作有限次, 另外一部分用某一种染缸不满负荷工作一次, 以此来顺利完成订单的加工. 因此, 对任何一个订单, 它都可以通过种染缸进行有限次的满负荷工作和某种染缸进行一次的不满负荷工作来完成. 在自动机模型中, 订单的任何一种染缸配置方式都可以用一个事件串表示, 且这些事件串集合可用正则表达式表示为

$$R = (\sigma_1 r)^* \cdots (\sigma_l r)^* (\beta_1 r + \cdots + \beta_l r), \quad \Sigma_c = \{\sigma_1, \dots, \sigma_l; \beta_1, \dots, \beta_l\}, \quad \Sigma_{uc} = \{r\}.$$

3 订单的最优染缸资源配置

假定所有染缸工作事件发生后的染缸资源利用率均为正, 染缸满负荷工作时的资源利用率为 100%. 在此, 设一个订单的染缸分配过程按事件串长度分为 n 阶段, 定义如下 4 种关于染缸资源利用率的控制函数.

1) 订单加工过程中, 从第 k 阶段到最后阶段(第 n 阶段)的染缸平均资源利用率函数. 其表达式为

$$V_{k,n}(s_k, u_k, s_2, \dots, s_{n+1}) = \frac{v_k(s_k, u_k) + V_{k+1,n}(s_{k+1}, u_{k+1}, \dots, s_{n+1}) \times (n - (k + 1) + 1)}{n - k + 1}.$$

其中: $v_j(s_j, u_j)$ 表示在第 j 阶段, 选取决策 u_j 的染缸资源利用率; u_k 为在第 k 阶段时, 当状态处于 s_k 时, 对剩余订单量分配染缸资源的决策函数. 待各阶段决策确定后, 整个订单染缸配置过程的决策序列就构成一个策略, 用 $f = \{u_1(s_1), u_2(s_2), \dots, u_n(s_n)\}$ 表示.

2) 最优化函数, 表示订单顺利加工完成后的染缸资源利用率最大. 其表达式为

$$f_{k,n}(s_k) = \max_{u_k \in D_k(s_k)} f_{k,n}(s_k, u_k, s_2, \dots, s_{n+1}).$$

其中: 边界条件 $V_{n+1,n+1}(s_{n+1}) = 0$; $D_k(s_k)$ 表示在第 k 阶段时, 对剩余订单量分配染缸资源的允许决策函数集合.

在实际生产当中, 为使订单能够尽量分配在较大缸容的染缸里加工一次, 避免在较小缸容的染缸里加工多次而导致布出现的色差问题, 提高布的质量. 因此在这里引入利用率折扣率 ρ , 来减小订单在较

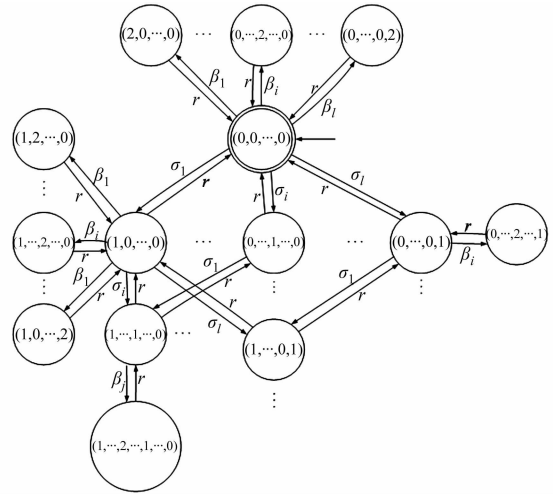


图 1 染缸资源配置的自动机模型
Fig. 1 Automata model for the resource allocation of dye vats

小缸容资源的使用频率和效率,折扣率的取值范围为 $\rho \in (0, 1)$.

3) 染缸满负荷工作时的染缸资源利用率函数,其表达式为

$$v(s_k, u_k) = \begin{cases} 100\%, & \text{缸容为 540 kg 的染缸满负荷工作 1 次;} \\ \rho \times 100\%, & \text{缸容为 360 kg 的染缸满负荷工作 1 次;} \\ \rho^2 \times 100\%, & \text{缸容为 180 kg 的染缸满负荷工作 1 次;} \\ \rho^3 \times 100\%, & \text{缸容为 50 kg 的染缸满负荷工作 1 次.} \end{cases}$$

4) 染缸不满负荷工作时的染缸资源利用率函数,其表达式为

$$v(s_k, u_k) = \begin{cases} \lambda_1, & \text{缸容为 540 kg 的染缸不满负荷工作 1 次;} \\ \rho \times \lambda_2, & \text{缸容为 360 kg 的染缸不满负荷工作 1 次;} \\ \rho^2 \times \lambda_3, & \text{缸容为 180 kg 的染缸不满负荷工作 1 次;} \\ \rho^3 \times \lambda_4, & \text{缸容为 50 kg 的染缸不满负荷工作 1 次.} \end{cases}$$

其中: $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ 分别表示剩余订单量在缸容为 540, 360, 180, 50 kg 的染缸中不满负荷工作时的染缸利用率.

在染缸资源配置的自动机模型中,任何一个订单的任何一种加工方式都可以用一个事件串表示. 每个染缸工作一次视为一个事件. 对订单的染缸配置过程按事件串长度划分阶段,在每个阶段设定染缸资源的利用率为决策函数,并构造各个阶段之间染缸资源利用率的递推关系. 最后,以所用染缸的最大平均资源利用率为目标函数寻找订单的最优排缸策略.

4 实例分析

现有一组订单,其质量分别为 810, 80, 860, 410, 670, 800, 685, 785, 530, 655, 1 150, 2 350, 1 450, 530, 390 kg, 缸容为 50, 180, 360, 540 kg 的染缸各一台,折扣率为 $\rho = 0.95$, 求此组订单的最优染缸资源配置方式,使得染缸资源的利用率最大. 以订单质量为 810 kg 的染缸资源配置为例,其自动机模型如图 2 所示.

订单的所有染缸配置方式在模型中均可用事件串表示出来. 将订单质量为 810 kg 的染缸配置过程按事件串长度划分为 n 个阶段,其边界条件 $V_{n+1, n+1}(s_{n+1}) = 0$.

按照动态规划的方法,从最后一个阶段开始计算,计算过程从略.

1) 当 $k = n$ 时,经计算有

$$\begin{cases} V_{n, n+1}(540 \text{ kg}) = 100\%; \\ V_{n, n+1}(360 \text{ kg}) = 95\%; \\ V_{n, n+1}(180 \text{ kg}) = 90.25\%; \\ V_{n, n+1}(50 \text{ kg}) = 85.74\%. \end{cases}$$

2) 当 $k = n - 1$ 时,经计算有

$$\begin{cases} V_{n-1, n+1}(540 \text{ kg}) = \max(75\%, 89.17\%, 95.125\%, 92.87\%) = 95.125\%; \\ V_{n-1, n+1}(360 \text{ kg}) = \max(85.625\%, 95\%, 92.625\%, 90.37\%) = 95\%; \\ V_{n-1, n+1}(180 \text{ kg}) = \max(95.125\%, 92.625\%, 90.25\%, 87.995\%) = 95.125\%; \\ V_{n-1, n+1}(50 \text{ kg}) = \max(92.87\%, 90.34\%, 87.995\%, 85.74\%) = 92.87\%. \end{cases}$$

3) 当 $k = n - 2$ 时,经计算有

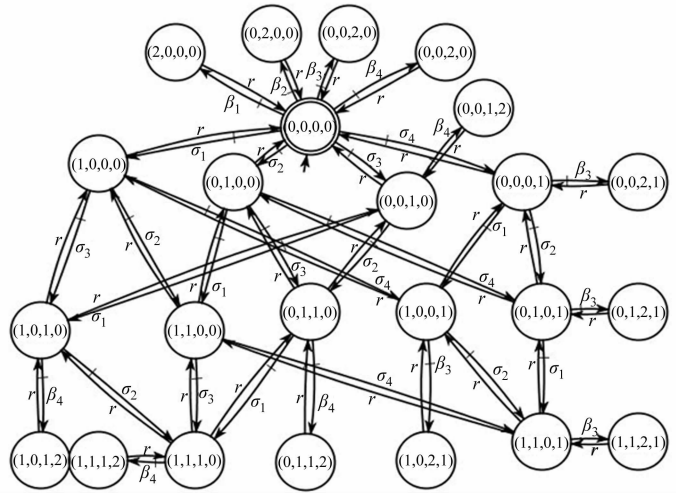


图 2 订单质量为 810 kg 的染缸自动机模型图

Fig. 2 Automata model of dye vats for the order weight of 810 kg

$$\begin{cases} V_{n-2,n+1}(540\text{ kg}) = \max(68.97\%, 68.89\%, 68.97\%, 75.40\%) = 75.49\%; \\ V_{n-2,n+1}(360\text{ kg}) = \max(71.33\%, 71.25\%, 71.33\%, 81.27\%) = 81.27\%; \\ V_{n-2,n+1}(180\text{ kg}) = \max(78.46\%, 78.46\%, 90.25\%, 92\%) = 92\%; \\ V_{n-2,n+1}(50\text{ kg}) = \max(92\%, 91.91\%, 92\%, 90.49\%) = 92\%. \end{cases}$$

4) 当 $k=n-3$ 时,经计算有

$$V_{n-3,n+1}(50\text{ kg}) = \max(87.05\%, 87.05\%) = 87.05\%.$$

以订单顺利加工完成为终止阶段.由以上各种配置方式中,可知整个配置过程中最长阶段为 4 个阶段,故 $n=4$.

取订单的染缸资源利用率为最大,其配置方式为

$$f_{\max} = [75\%, 89.17\%, 85.625\%], \quad V_{\max} = f_{1,3}(540\text{ kg}) = 89.17\%.$$

据此可知订单质量为 810 kg 的染缸资源最佳配置策略:一个缸容为 360 kg 的染缸满负荷工作一次和一个缸容为 540 kg 的染缸不满负荷工作一次.用自动机的生成语言可表示为

$$L(f/G) = \{\overline{\sigma_3 r \beta_4}\}.$$

其中: f 为染缸资源最优配置策略.

在实际企业生产中,用计算机调度系统对此订单进行排缸,将会使此订单平均到缸容为 540 kg 的染缸中加工两次,这样染缸的利用率 $V=\frac{810}{1\ 080}\times 100\% = 75\%$. 以此类推,可以求得剩余 11 个订单的最优染缸资源配置方式的事件串表达式.将该结果与计算机调度系统的排缸结果做对比,如表 1 所示.表 1 中: m 为订单质量; V 为染缸利用率.

表 1 不同缸容下两种系统的排缸结果

Tab. 1 Result of the two arranging ways of the dye vat for orders

m/kg	动态规划系统					计算机调度系统染缸				
	540 kg	360 kg	180 kg	50 kg	$V/\%$	540 kg	360 kg	180 kg	50 kg	$V/\%$
810	β_1	σ_3	—	—	89.17	β_1, β_1	—	—	—	75.00
80	—	—	—	σ_1, β_1	68.59	—	—	β_2	—	44.44
860	β_1	σ_3	—	—	93.79	β_1, β_1	—	—	—	79.63
410	—	σ_3	—	σ_1	90.34	β_1	—	—	—	75.93
670	—	σ_3, β_3	—	—	88.40	β_1	—	β_2	β_1	87.01
800	β_1	σ_3	—	—	88.24	β_1, β_1	—	—	—	74.07
685	β_1	—	σ_2	—	91.88	β_1	—	β_2	β_1	88.96
785	β_1	σ_3	—	—	86.85	β_1, β_1	—	—	—	72.68
530	β_1	—	—	—	98.00	β_1	—	—	β_1	89.83
655	β_1	—	—	σ_1	89.63	—	β_3, β_3	—	β_1	85.06
1 150	σ_1, β_1	—	—	σ_1, σ_1	91.48	β_1	β_3, β_3	—	—	91.26
2 350	$\sigma_1, \sigma_1, \sigma_1, \beta_1$	σ_3	—	—	92.71	$\beta_1, \beta_1, \beta_1, \beta_1, \beta_1$	—	—	—	87.04

由表 1 可知:所研究的动态规划寻找订单的最优排缸策略具有一定的有效性.

5 结束语

文中将资源配置系统的自动机模型及动态规划寻最优染缸配置方式应用到实际订单的排缸过程中,其排缸结果与目前印染企业中普遍采用的计算机调度系统的排缸结果相比,染缸资源利用率有了一定的提高.然而,染缸的资源是有限的,当订单的数量多时,会使一些订单集中在某些缸容的染缸排队等待加工,而其他缸容的染缸却是处于空闲状态.因此,如何使所有染缸同时工作,减少订单的排队等待时间有待于进一步的研究.

参考文献:

[1] REVELIOTIS S A. Real-time management of resource allocation systems[M]. Boston:Springer Science,2005:2-35.

- [2] FANTI M P,ZHOU M C. Deadlock control methods in automated manufacturing systems[J]. IEEE Trans Syst Man Cybern A;Syst Humans,2004,34(1):5-22.
- [3] LAWLEY M A,REVELIOTIS S A. Deadlock avoidance for sequential resource allocation systems: Hard and easy cases[J]. Int J Flexible Manuf Syst,2001,13(1):384-404.
- [4] REVELIOTIS S A,LAWLEY M A,FERREIRA P M. Polynomial complexity deadlock avoidance policies for sequential resource allocation systems[J]. IEEE Trans Automat Control,1997,42(10):1344-1357.
- [5] LI Shao-yong,LI Zhi-wu,HU He-suan. Siphon extraction for deadlock control in flexible manufacturing systems by using Petri nets[J]. Int J Comput Integr Manuf,2011,24(8):710-725.
- [6] TRICAS F,EZPELETA J. Some results on siphon computation for deadlock prevention in resource allocation systems modeled with Petri nets[C]// Proceedings of 2003 IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. Lisbon Portugal;IEEE,2003:322-329.
- [7] GUO Tao,LI Jun,DAI Xiao-zhong,et al. Supervisory control reconfiguration and optimization of resource allocation systems with a Petri Net and mathematical programming approach[C]// Proceedings of 9th IEEE International Conference on Networking,Sensing and Control. Beijing:IEEE,2012:52-57.
- [8] SAMPATH R,DARABI H. Control reconfiguration of discrete event systems with dynamic control specifications [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering,2007,5(1):84-100.
- [9] DAI J G,TEZCAN T. Optimal control of parallel server systems with many servers in heavy traffic[J]. Queueing Syst,2008,59(2):95-134.
- [10] 徐国华,胡奇英. 离散事件动态系统的监控方法[M]. 郑州:河南科学技术出版社,1996:1-10.
- [11] 郑大忠,赵千川. 离散事件动态系统[M]. 北京:清华大学出版社,2001:282-340.

Model Building and Optimization of Discrete Event Dynamic System for Dye Vats

YU Ting, WANG Fei, JI Yang-hong-kang

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: According to the flow of the vat arranging for orders in the actual production, the automata model for the resource allocation of dye vats was established. By this way, all the dye vats arranging ways for an order can be mapped into the automata model. Then according to the evolution process of the model behavior, the resource allocation of the dye vats were divided into several stages firstly. Secondly, the performance index function was defined at each stage. Thirdly, the recursive relation of performance index function was set up between each stage. Lastly, the dynamic programming method was adopted to get the optimal way of the allocation of the dye vats, aiming at improving the utilization of the dye vat to the maximum. Compared to the existing computer dispatch system, the result of the instance shows that the model and the decision method provided in this paper can effectively improve the utilization of the dye vats.

Keywords: dye vats; resource allcation; discrete event; dynamic system; automata; dynamic programming

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 吴逢铁)