第 9 卷第 6 期
1992 年 12 月

控制理论与应用
CONTROL THEORY AND APPLICATIONS

Vol. 9, No. 6
Dec., 1992

FMS 的模型参考自适应调度*

吴受章　辛为民
(西安交通大学信息与控制工程系,710049)

摘要：用运筹学研究生产线调度问题已有几十年的历史,但由此得出的调度策略的实时性很差. 1986 年自动控制工作者提出了"FMS 动态自适应计算机调度"一词,令人感到十分新奇. 可惜,从未见到任何有关的论文. 本文研究 FMS 的模型参考自适应调度. 本文采用我们提出的考虑了有限缓冲器容量的极大代数模型. 环境的影响反映于对象参数的摄动,本文采用我们提出的摄动计算方法. 调度器的设计采用次梯度法,以求解连续变量和离散变量混合的优化问题. 附有数字实例. 计算和仿真表明:FMS 的模型参考自适应调度是可行的,是值得继续深入研究的.

关键词：模型参考自适应调度;FMS 的建模;摄动计算;次梯度

1 前　言

柔性制造系统(FMS)由若干台加工中心所组成,每台加工中心都有刀具库、机械手、数控装置,并受主计算机控制. 待加工的工件先在装卸站装到托盘上去,然后,工件和托盘存于托盘库中. 自动导向小车(AGV)将工件和托盘运送到各加工中心前,通过自动托盘交换装置送到加工中心上去. 加工完毕的工件(和托盘一起)再通过自动托盘交换装置退出,并由 AGV 送回托盘库,等待送往其它加工中心去加工.

由于 FMS 的价格十分昂贵,系统特别复杂,系统的生命周期中成长阶段较长;此外,FMS 面对多变的生产计划和花色繁多的小批量多品种工件,已经不象昔日串行生产线那样单纯了. 因此,为了使 FMS 充分发挥作用,调度问题自然十分重要. 调度问题主要有三个方面：1) 上料问题(小批量多品种的工件应在何时送入系统)；2) 路线问题(根据工艺要求,各种工件所应访问的机床次序如何)；3) 排序问题(在各机床前,各种工件访问的次序如何). 在传统上,用运筹学解决这些问题有两个缺陷：a) 得出的调度策略的实时性很差；b) 没有考虑系统内部的运动规律. 我们认为:系统内部的服务、空闲、阻塞和死锁会影响调度结果的,所以,应将描写服务、空闲、阻塞和死锁的系统方程作为优化调度的约束条件. 过去未曾做到.

此外,当 FMS 中某台机床因故障而退役,就需要再调度. 但是过去也未曾在再调度时以系统方程作为约束条件. 更主要的是:FMS 在运行中经常会受到偶发性事件的影响(例如机床由各种原因造成短暂故障,但可修复),频繁地再调度就显得不方便,甚至会陷入混乱之中. 我们认为:应该针对运行环境的变化,对原调度计划作适当修正,而不是大动干戈——频繁地再调度. 这就是我们对需要自适应调度的理解. 过去不仅未曾做到自适应调

* 国家自然科学基金支持项目.
本文于 1991 年 4 月 30 日收到. 1992 年 3 月 28 日收到修改稿.

度，就在文[1]提出自适应调度一词后，除了感到新奇外，多少还透露出将信将疑的情调.

在文[1]提出 FMS 动态自适应计算机调度这一名词后，从未见到任何有关的论文. 我们曾于文[2]中探讨了 FMS 自适应调度的思想，本文则把此种思想具体化.

图1所示 FMS 的模型参考自适应调度(MRAS)很象连续变量动态系统(CVDS)的模型参考自适应控制(MRAC). 图1中，参考模型的性能 P_m 与对象的性能 P_p 比较，当对象受环境影响使性能变坏，并超过阈值时，就通过调度器调度对象(改变工件投料时刻 U 和托盘库中位置的分配 q)，使 P_p 接近 P_m. 这里，信号综合自适应和参数自适应是同时使用的. 然而，FMS 毕竟是离散事件动态系统(DEDS)，它发生的物理现象主要是：服务、空闲、阻塞和死锁，而不是其它.

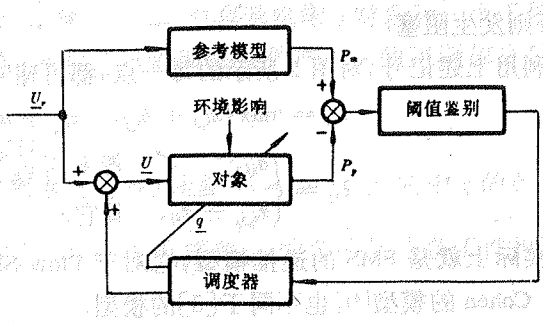

图 1　FMS 的 MRAS

为了实现图 1 所示 FMS 的 MRAS 算法，以下分别阐述 FMS 的建模、摄动计算和调度器设计，更着重于三者的联合. 最后给出数字实例.

2　FMS 的建模与摄动计算

文[3]曾为 FMS 的 Flow-Shop 情况建模，并作出无限小摄动计算. 本文则为 Job-Shop 情况(含 Flow-Shop)建模，并作出有限摄动计算(含无限小摄动计算).

设有 M 台机床，m 种工件. 工件访问机床的路线完全任意，各机床前工件加工优先级也可任意指定. 设工件的加工时间相对于 AGV 的运送时间为长，故忽略 AGV 的运送时间.

记 $u_i(1\leqslant i\leqslant M)$ 为 i 机床投入运行时刻；$u_i(M+1\leqslant i\leqslant M+m)$ 为 $(i-M)$ 工件投料时刻. 图 1 中 U 的各个分量即 u_i；若机床均已开动，则 U 中仅含工件投料时刻. x_{ij} 为 j 机床加工 i 工件的开始时刻. $y_i(1\leqslant i\leqslant m)$ 为 i 工件加工完毕时刻；$y_i(m+1\leqslant i\leqslant m+M)$ 为 $(i-m)$ 机床加工完毕时刻. a_{ij} 为 j 机床加工 i 工件所需时间. b_{ij} 为机床 j 开始加工工件 i 到工件 i 离开该机床这段时间. q_j 为 j 机床缓冲器容量. 图 1 中 q 的各个分量即 q_j.

由于工件访问机床的路线完全任意，各机床前工件加工优先级也可任意指定(示例于图 2)，有必要引入下列名词. 相应于图 2 中某点 (i,j)，称 (i_u,j) 为 (i,j) 的左点，即 j 机床加工完 i_u 工件后紧接着加工 i 工件. (i_d,j) 为 (i,j) 的右点，即 j 机床加工完 i 工件后紧接着加工 i_d 工件. 称 (i,j_u) 为 (i,j) 的上点，即 i 工件经 j_u 机床加工后紧接着经 j 机床加工. 称 (i,j_d) 为 (i,j) 的下点，即 i 工件经 j 机床加工后紧接着经 j_d 机床加工. 称 (i_b,j_d) 为 (i,j) 的可能阻塞点，即 i 工件经 j 机床加工完毕，必须在 j_d 机

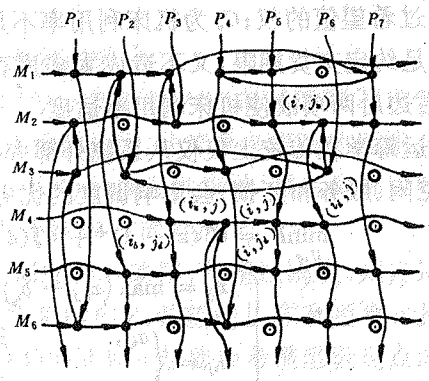

图 2　Job-Shop

床开始加工 i_b 工件后，才能进入 j_d 机床的缓冲器. 此外，若 j_d 机床加工 i 工件的序号为第 k_i 个，j_d 机床加工 i_b 工件的序号是第 k_{i_b} 个，则 $k_{i_b}-k_i=q_{j_d}$，即可能阻塞点到下点之间需加工的工件数量是 j_d 机床的缓冲器容量. i_b 工件必须在 i 工件到达之前先加工，让出 j_d 缓冲器，否则发生阻塞.

利用上述记号，对图 2 所示的每一点，都可建立以下递推关系

$$x_{ij}=\max\{x_{i_u j}+b_{i_u j},\quad x_{ij_u}+a_{ij_u}\},\tag{1}$$

$$b_{ij}=\begin{cases}a_{ij}, & 若\ k_i\leqslant q_{j_d}\ 或\ x_{i_b j_d}\leqslant x_{ij}+a_{ij},\\ x_{i_b j_d}-x_{ij}, & 其它.\end{cases}\tag{2}$$

此式实际上就是 FMS 的递推模型，它对于 Flow-Shop 及 Job-Shop 两者都适用. 它既不同于 G. Cohen 的模型[4]，也不同于[3]的模型.

当 u_i 改变或参数摄动时，可用式(1)，(2)逐点地直接递推计算. 因为是逐点计算，故有必要考虑计算顺序. 显见，应由上到下按行计算，行内按优先级顺序计算. 但计算 j 行时，要用到的 j_d 行的可能阻塞点(i_b, j_d)的参数并未先行算出，则暂停此行计算，跳入下一行计算. 当所有行计算一遍后，各行都已算出部分结点的参数，再从第一行起，由上到下按行继续各行剩余结点的计算. 多次循环，直到全部结点算出. 只要系统没有死锁现象，每次循环得出的点就能导致下次循环得出新点，以上算法经有限次循环必能算出全部结点的参数.

我们基于式(1)，(2)和上述算法，已编制了摄动计算软件[5]. 这里所指摄动计算，不必区分摄动量的大小，这与 Y. C. Ho 的摄动分析[6]不同.

3 调度器设计

当仅从系统外部考虑调度问题时，目标函数可取为[7]

$$P=C_z^{\mathrm T}(z-d)^+ + C_d^{\mathrm T}(d-z)^+ + C_r^{\mathrm T}(r-a)^+ + C_a^{\mathrm T}(a-r)^+.\tag{3}$$

式中

$$(x)^+=\begin{cases}x, & 若\ x\geqslant 0,\\ 0, & 若\ x<0.\end{cases}$$

P 为性能；z,d,r,a 各为工件的释放时间，约定交货时间，机床的实际利用率和希望的利用率，均为向量. C_z 为违反约定期限的权；C_d 为产品提前完成造成库存的权；C_r 为机床利用率超过希望值的权；C_a 为机床利用率不足的权. 式(3)右边前两项欲使产品的完成时间尽量满足约定交货期限，又不造成太多库存，符合 FMS 的 Just-In-Time 生产控制的思想. 式(3)右边后两项欲使机床利用率适度.

运筹学在传统上仅仅从系统外部去研究系统的调度，实际上系统内部的相互作用(阻塞、空闲、服务和死锁)会影响调度的优劣. 故调度器设计的优化问题表达为：

$$\min_{U,q} P=C_z^{\mathrm T}(z-d)^+ + C_d^{\mathrm T}(d-z)^+ + C_r^{\mathrm T}(r-a)^+ + C_a^{\mathrm T}(a-r)^+,\tag{4a}$$

s. t.

$$x_{ij}=\max\{x_{i_u j}+b_{i_u j},\quad x_{ij_u}+a_{ij_u}\},\tag{4b}$$

$$b_{ij}=\begin{cases}a_{ij}, & 若\ k_i\leqslant q_{j_d}\ 或\ x_{i_b j_d}\leqslant x_{ij}+a_{ij},\\ x_{i_b j_d}-x_{ij}, & 其它,\end{cases}\tag{4c}$$

$$z_i=x_{ij_{\max}}+a_{ij_{\max}},\tag{4d}$$

$$\begin{cases} r_i = \sum_i a_{ij}/(x_{i_{\max}j} + a_{i_{\max}j}), \\ i = 1,2,\cdots,m. \quad j = 1,2,\cdots,M. \end{cases} \tag{4e}$$

式中 $(i, j_{\max})$表示工件 i 在最后一台机床 $j_{\max}$加工；$(i_{\max}, j)$表示机床 j 对最后一个工件 $i_{\max}$ 加工. 式(4a)～(4e)实际上都和 U, q 有关，但仅表示偶发性事件产生后的可调部分(该时刻之前已形成的为不可调部分).

解式(4a)～(4e)所示优化问题的算法如下：

1) 在可行域内随机选取初始混合(离散与连续)向量 $w_0=[q^{\mathrm{T}}\ U^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$，式中 q 的各分量为各机床的缓冲器容量 q_i，应满足 $\sum_{i=1}^{M} q_i \leqslant \mathrm{const}$，$M$ 为机床数；U 的各分量为各工件投料时刻 u_i(这里设各机床已开动).

2) a) 由式(4b)，(4c)计算 $x_{ij}, b_{ij}, i=1,2,\cdots,m; j=1,2,\cdots,M$. 并由式(4d)，(4e)计算 z_i, r_i；然后代入式(4a)得 $P=f(w_0)$.

b) 确定混合次梯度，并沿该方向搜索 $w=[q^{\mathrm{T}}\ U^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$

$$\tilde{\nabla} f = \left[\frac{\Delta f}{\Delta w_1}\ \frac{\Delta f}{\Delta w_2} \cdots \frac{\Delta f}{\Delta w_n}\right]^{\mathrm{T}}.$$

对于离散变量，

$$\frac{\Delta f}{\Delta w_i} \triangleq \frac{\Delta f}{\Delta q_i} = \frac{f(w_0 + \Delta_i^+ e_i) - f(w_0)}{\Delta_i^+}, \quad i = 1,2,\cdots,M.$$

对于连续变量，

$$\frac{\Delta f}{\Delta w_k} \triangleq \frac{\Delta f}{\Delta u_{k-M}} = \frac{f(w_0 + \varepsilon_k e_k) - f(w_0)}{\varepsilon_k}, \quad k = M+1, M+2, \cdots, M+m.$$

式中 Δ_i^+ 为离散变量的步长，ε_k 为连续变量的步长.

在按次梯度寻优时，每维变量采用伸缩法搜索 w_i，可得 $w'=[w_1' w_2' \cdots w_i' \cdots w_{M+m}']^{\mathrm{T}}$. 若 $f(w')<f(w_0)$，则以 w' 为新起点重复步骤 b)；否则转入 c).

c) 在离散子空间 $Q(q\in Q)$与连续子空间 $\mathscr{U}(U\in\mathscr{U})$之间轮流地用伸缩法搜索，得 w''. 若 $f(w'')<f(w')$，则以 w''为新起点重复 b)；否则转入 d).

d) 利用组合优化中的查点技术(隐枚举法)[8]，如果得 w'''，而且有 $f(w''')<f(w'')$，则以 w'''为新起点重复 b)；否则输出最优解 $w^*=w''$.

以上仅为调度器设计的算法，以下阐述自适应调度算法：

1) 采用上述调度器设计算法，对于约定交货时间 d 及希望的机床利用率 a，求解式(4). 其解作为参考模型的设定点；并用第 2 节所述递推算法[5]，计算参考模型的性能 P_m.

2) 当 FMS 感受到偶发性事件的影响(凡机床上发生的偶发性事件，其后果都可归结为加工时间变化 Δa_{ij})，利用第 2 节所述递推算法[5]，计算 FMS 的性能 P_p.

3) 若 P_p 与 P_m 之差小于或等于阈值，则自适应调度器不动作；若超过阈值，则自适应调度器动作，即用上述调度器设计算法，对于约定交货时间 d、希望的机床利用率 a 及新的 a_{ij}，求解式(4)，得新的 U 与 q. 在求解过程中，式(4)的 d 和 a 起着参考模型设定点的等价作用，靠它不断地发出调整指向，使FMS 的性能向参考模型逼近.

由上述自适应调度算法可看出：调度器的输出就是自适应规律所产生的结果，但这种

自适应规律是以算法描述的. 还可看出：由于式(4a)所示优化目标是一批或若干批工件在加工结束后的性能，而且由式(4a)右边前两项所决定，式(4)的解必定不会发散.

我们曾用 FORTRAN-77 程序语言为调度器设计的算法和自适应调度算法编程序，并在 IBM PC-386 机器上调试通过.

4 数字实例

4.1 Flow-Shop

$M=5, m=5$，路线和优先级示于图 3. 参考模型的设定点为 $q=[4\quad 1\quad 1\quad 2\quad 1]^{\mathrm{T}}$，$U=[7\quad 10\quad 11\quad 16\quad 18]^{\mathrm{T}}$，$P_m=1859.746$，额定 a_{ij} 示于表 1.

表 1 a_{ij}

$j \backslash i$	1	2	3	4	5
1	1.50	1.00	2.00	1.50	1.00
2	15.5	0	1.00	0	1.00
3	18.0	2.00	0	4.00	0
4	0	0	25.0	10.0	5.00
5	0	6.00	5.00	0	15.0

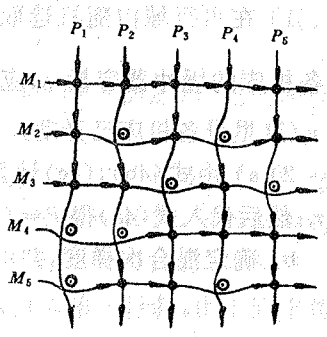

图 3 Flow-Shop

图 4 所示曲线表示 a_{11} 有 Δa_{11} 时，自适应调度可改善性能. 其它参数摄动后之结果未画出.

4.2 Job-Shop

$M=6, m=7$，路线和优先级同图 2. 参考模型的设定点为 $q=[3\quad 3\quad 3\quad 3\quad 3\quad 3]^{\mathrm{T}}$，$U=[0\quad 17.5\quad 8.4\quad 12.75\quad 4.0\quad 14.75\quad 14.5]^{\mathrm{T}}$，$P_m=10113.76$，额定 a_{ij} 示于表 2.

表 2 a_{ij}

$j \backslash i$	1	2	3	4	5	6	7
1	1.50	1.00	2.00	1.50	1.00	0	2.50
2	15.5	0	1.00	0	1.00	12.3	30.0
3	18.0	2.00	0	4.00	0	2.50	0
4	0	0	25.0	10.0	5.00	0.70	0
5	0	6.00	5.00	0	15.0	0	10.0
6	5.50	1.60	0	1.50	0	3.00	0

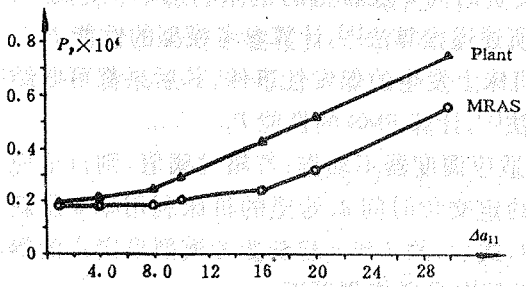

图 4 性能对比

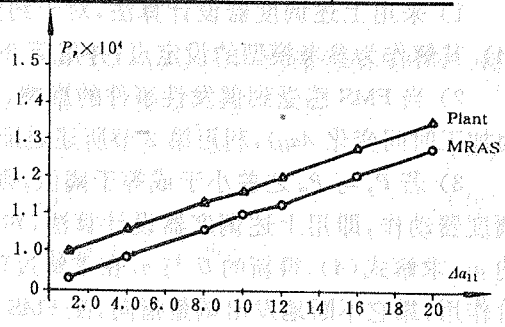

图 5 性能对比

图 5 所示曲线表示 a_{11}和 Δa_{11}时，自适应调度可改善性能. 其它参数摄动后之结果未画出.

5 结　论

FMS 动态自适应计算机调度是有可能实现的；FMS 的模型参考自适应调度是完全可以实现的.

参 考 文 献

[1] Levis, A. H., et al.. Challenges to Control: A CollectiveView. IEEE Trans. Automat. Contr., 1987, AC-32:275—285

[2] 吴受章. 关于 FMS 的自适应调度. 杭州：控制理论及其应用年会论文集，1990, 11:361—364

[3] Mu, G. Q. and Wu, S. Z.. Modeling and PerturbationAnalysis of FMS. In: Olling, G. and Deng, Z., Information Technologyfor Advanced Manufacturing Systems, Elsevier Science Publishers, 1992, 187—196

[4] Cohen, G., et al.. A Linear-Systems-TheoreticView of Discrete-Event Process and Its Use for Performance Evaluationin Manufacturing. IEEE Trans. Automat. Contr., 1985, AC-30:210—220

[5] 陈昱，吴受章. FMS 摄动分析软件研制报告. 北京：第一届中国工厂自动化(CIMS)学术会议论文，1990, 11

[6] Ho, Y. C., et al.. A New Approach to the Analysis ofDiscrete Event Dynamic Systems. Automatica, 1983, 19:149—168

[7] Brandimarte, P., et al.. Integration of Knowledge-Basedand Algorithmic Techniques for Production Scheduling. Proc. 1988 Int. Conf. on CIM, Troy, New York, 1988, 64—73

[8] 陈立周等. 工程离散变量优化设计方法(原理与应用). 北京：机械工业出版社，1989

Model Reference Adaptive Scheduling of FMS

WU Shouzhang　and　XIN Weimin

(Department of Information & Control Engineering, Xi'an Jiaotong University · Xi'an, 710049, PRC)

Abstract: It's been several decades to study the problemof production line scheduling by Operation Research. However, the related methods for scheduling lack the real-time character. In 1986, scholars on automatic control presented the term "Dynamic Adaptive Computer Scheduling of FMS" which was very novel. Unfortunately, no paper was found about that. In this paper, we consider adaptive scheduling for FMS by model reference, employ the max-algebra model which we proposed earlier with limited buffer capacity. Because influence by circumstance is reflected in perturbation of parameters, we utilize our method of perturbation calculation. The design for scheduling is with sub-gradient algorithm so as to solve the optimization problem with both continuous and discrete variables. Calculation examples are attached. The calculation and simulation show that it is feasible to adaptively schedule the FMS with model reference, and it is worth continuing this research.

Key words: adaptive scheduling for FMS by model reference; FMS modeling; perturbation calculation; sub-gradient

本文作者简介

吴受章　1934 年生. 1957 年毕业于上海交通大学电机系. 现在西安交通大学信息与控制工程系任教，担任硕士生的最优控制等教学工作. 目前主要从事"离散事件系统"的研究.

辛为民　1968 年生. 1989 年获西安交通大学数学系学士学位. 现在该校系统工程研究所攻读硕士学位. 擅长于数学优化等各种算法及应用软件的研制. 目前主要从事"离散事件系统"的研究.