

柔性制造系统的负荷分配及路径规划方法

史海波 张丽娟 薛劲松

(中国科学院沈阳自动化研究所·沈阳, 110015)

摘要: 柔性是柔性制造系统(FMS)的一个基本优点,但这一基本优点却往往被人们所忽视,许多现在运行的 FMS 不是缺乏柔性,就是没能充分利用可获得的柔性来提高生产效率. 柔性制造系统的负荷分配和路径规划问题正是这种柔性的一个主要方面. 然而,路径规划决策却往往被忽视. 其中一个主要原因就是人们仍不能从传统的生产管理概念中解放出来. 本文在明确概念区分的基础上,提出了一种柔性制造系统的负荷分配和路径规划的线性规划模型,其主要特点是将负荷分配和路径规划问题有机地结合起来,并通过仿真实验验证并分析了此方法对 FMS 性能上的影响.

关键词: 柔性制造系统; 负荷分配; 路径规划

1 介 绍

在现代制造系统中,柔性是一个越来越引起人们注意的关键指标. 现今制造业的趋势正如柔性制造系统介绍的那样,减少生产过程的前导时间(lead time),促进新产品新工艺的开发,减少设置时间(setup time)和给工人以较广范围的任务. 所有这些都指向一个共同的目标:柔性. 人们期望柔性能够延长制造设备的服务时间和使得制造系统对动态市场的变化具有快速的、经济的响应.

尽管柔性能潜在地提供柔性制造系统用户的竞争能力,但许多公司仍没能充分发挥柔性的作用. Stecke 和 Browne^[1]与 Kulatilak^[2]指出大多数 FMS 没有充分利用可获得的柔性,而是以某些柔性操作来代替,其中一部分原因是为了便于管理. Jaikumar^[3]也指出在美国许多 FMS 用户仍倾向于旧的生产观念,如传统 Jop-Shop 负荷分配方式,从而阻碍了公司从新的制造技术中获得效益.

在图 1 中,我们给出了一个传统 FMS 计划与调度机制与本文提出的改进的 FMS 计划与调度机制的演变过程. 正如 Maimon 和 Gershiwin^[4]指出的那样,在 FMS 调度实施之前,一个路径规划机制的计算是非常重要的,然而大多数现存的研究将负荷分配和路径规划看成两个分离的问题. 实际上,这两个决策之间的联系是非常紧密的,对 FMS 性能的影响也是共同的^[5].

本文提出了一种将负荷分配和路径规划结合在一起的方法,以负荷平衡为目标,实现了柔性制造系统的负荷分配与路径规划决策,并期望它的结果能为底层调度活动提供指导.

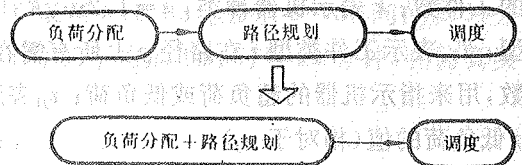


图 1 FMS 计划与控制决策

2 负荷分配与路径规划模型

实现最大的系统/机器利用率和最小在制品库存是 FMS 的二个关键性能判据^[6,7]. 完成这一目标的一种途径是采用多判据决策方法 (multiple criteria decision making), 然而这种方法存在着复杂性和计算困难等障碍. 另一种选择是利用一个代理目标, 它反过来完成上述这二个目标的优化. 一般情况下, 负荷平衡可以通过减少瓶颈机器的负荷来提高系统的物流, 这样就能够提高系统的利用率和减小总加工时间, 从而使所带来的在制品库存越小. 因此, 我们认为以负荷平衡作为负荷分配及路径规划的目标是合适的. 现将模型描述如下:

目标函数:

$$\min \left[\sum_{j=1}^K C_{j1} X_{j1} + \sum_{j=1}^K C_{j2} X_{j2} \right]. \quad (1)$$

约束:

$$\sum_{i=1}^I T_{ij} n_{ig} - X_{j1} + X_{j2} = W_j, \quad (2)$$

$$\sum_{g=1}^{G_i} n_{ig} = D_i; \quad i = 1, 2, \dots, I, \quad (3)$$

$$n_{ig} \geq 0 \text{ 整数}; \quad g = 1, 2, \dots, G_i, \quad (4)$$

$$X_{j1}, X_{j2} \geq 0; \quad j = 1, 2, \dots, K. \quad (5)$$

式(1)为目标函数, 其中 C_{j1} 和 C_{j2} 表示对机器 j 的超负荷和低负荷进行的加权值, 它们可以根据机器的性能、加工成本、费用等方面来确定的适当的值. 约束(2)描述每台机器的负荷平衡或不平衡关系; 约束(3)保证不同路径的同类工件总和应等于此工件类型的工件总数; 约束(4)保证具有不同路径的工件数量应为大于等于 0 的整数. 具体符号定义如下:

i 表示工件种类, $i = 1, 2, \dots, I$; j 表示机器数, $j = 1, 2, \dots, m$; G_i 表示工件类型 i 具有的加工路径条数; n_{ig} 表示分配给工件类型 i 的 g 条路径上加工的工件数; D_i 表示工件类型 i 的工件数; k 表示机器种类, $k = 1, 2, \dots, K$; h_k 表示机器类型 k 的台数; l_j 表示机器 j 的类型; T_{ij} 表示工件类型 i 在路径 g 上所有需在机器 j 上加工的加工时间总和; w_j 是一个常数, 用来指示机器的超负荷或低负荷; x_{j1} 表示机器 j 超负荷的值 (相对于 w_j); x_{j2} 表示机器 j 低负荷的值 (相对于 w_j).

由此, 我们可以看出:

$$\sum_{k=1}^K h_k = m. \quad (6)$$

另外, 对于 w_j 的取值, 我们可以针对不同的问题背景, 不同的目的而采用相应的方法来确定. 本文中我们对二种不同背景和目标下的 w_j 的取值方法进行了讨论. 第一种情况是对于具有高性能、多功能加工中心的 FMS, 每类加工中心可以加工多道工序, 而在数量上多数仅为 1 台. 基于这种情况, 路径规划的目标应为平衡不同类加工中心之间的负荷. 按上所述, 各加工中心的 w_j 值应相同 (并不是绝对的), 并以 W 来表示:

$$W = \frac{\sum_{j=1}^m (ML_j + SL_j)}{2m} \quad (7)$$

其中, ML_j 表示可能在机器 j 上的最大负荷量, SL_j 表示可能在机器 j 上的最小负荷量.

另一种情况是, FMS 由多个机器池组成. FMS 机器池一般应是具有相同功能或相似功能的一组机器的集合. 因此, 我们在确定每台机器的 w_j 值时, 采用了均值法, 使具有相同类型的机器具有相同的 w_j 值. 这一点反映在目标函数中就是尽可能减小同类机器之间的负荷差别. w_j 的求解方法如下:

$$w_k = \frac{\sum_{i=1}^I (\sum_{j=k}^{q_i} \sum_{p=1}^{a_i} T_{ijp}) / G_i \cdot D_i}{h_k} \quad (8)$$

其中 $(\sum_{j=k}^{q_i} \sum_{p=1}^{a_i} T_{ijp}) / G_i$ 为 i 工件类型平均到每条路径上的在 k 类机器上的加工时间, 则分子为所有工件在 k 类机器上按路径数平均的总加工时间.

3 仿真及分析

在建模与仿真过程中, 我们对 FMS 作了以下假设:

- 1) 无机器故障发生.
- 2) 对自动引导小车 (AGV) 的数量、托盘的数量以及存贮工件空间 (buffers) 的数量无限制.
- 3) 工件传输时间忽略不计.
- 4) 在加工准备就绪时, 所有原材料都是可获得的.
- 5) 工件进入系统加工的次序为随机方式.

由于 FMS 性能上的比较需要通过底层调度才能体现出来, 因此, 在仿真过程中我们选用了一些简单的调度规则, 如先进先出 (FIFO)、最短加工时间 (SPT)、最少剩余加工时间 (SR) 等, 对工件进行调度. 另一方面, 工序的加工时间分布对各种方法的性能也有一定的影响. 按照 Stecke^[8]和 Dvorsky^[9]对有关 DNC 和 FMS 的考察后指出大多数工序的加工时间范围在 2~45 分钟之间. Shanker 和 Tzen^[10]采用 $U(6, 30)$ [表示 6~30 间的均匀分布] 作为工序的加工时间分布. 因此, 我们假设工序的平均加工时间为 20 分钟. 在仿真实验中, 采用了以下二种工序的加工时间分布:

$U(16, 24)$ ——体现加工时间具有较小差别;

$U(2, 38)$ ——体现加工时间具有较大差别.

实验结果表明, 对于工序加工时间分布为 $U(16, 24)$ 这种情况, 本方法对 FMS 性能上的影响, 如在总加工时间和机器利用率等主要性能指标上的改善程度不大. 而对于工序加工时间分布为 $U(2, 38)$ 这种情况, 对 FMS 性能上的改善是非常显著的. 因此, 下面我们只给出后者的二个数值例子, 分别针对前面所述的二种不同的 FMS 应用背景.

数值例子: 表 1 和表 2 分别列出了数值例子 1 和例子 2 的机器种类、数量及机器号. 表 3 和表 4 中分别列出了数值例子 1 和例子 2 的工件类型、批量、加工路径以及对应机器上的加工时间. 表 5 和表 6 分别给出了例子 1 和例子 2 求解线性规划模型后的结果. 表

7 和表 8 给出了例子 1 和例子 2 调度仿真后固定路径与路径规划后的结果比较. 对于例子 1, 按公式 (7), 求出 $w=570$. 对于例子 2, 按公式 (8) 求出三类机器的 w_i 值分别为: $w_1=520, w_2=465, w_3=400$.

表 1 例 1 的机器种类、数量及编号

机器种类	数量	机器编号
类型 1	1	1
类型 2	1	2
类型 3	1	3

表 3 例 1 的工件类型、批量及加工路径

工件类型	批量	路径号	加工时间(机器号)		
1	20	1	4(1)	30(2)	
		2		2(2)	20(3)
2	20	1	10(2)	19(1)	
		2	8(2)		14(3)
3	20	1	7(1)	15(2)	
		2	8(1)		34(3)

表 5 例 1 求解线性规划模型的结果

工件类型	路径号	工件数量
1	1	10
	2	10
2	1	20
	2	0
3	1	12
	2	8

表 2 例 2 的机器种类、数量及编号

机器种类	数量	机器编号
类型 1	2	1, 2
类型 2	2	3, 4
类型 3	2	5, 6

表 4 例 2 的工件类型、批量及加工路径

工件类型	批量	路径号	加工时间(机器号)		
1	20	1	7(1)	20(3)	15(5)
		2	30(2)	6(4)	17(6)
2	20	1	10(5)	32(4)	12(1)
		2	4(6)	15(3)	16(2)
3	20	1	18(2)	24(6)	12(3)
		2	21(1)	10(5)	8(4)

表 6 例 2 求解线性规划模型的结果

工件类型	路径号	工件数量
1	1	10
	2	10
2	1	8
	2	12
3	1	3
	2	17

表 7 例 1 的仿真结果比较

路径策略	调度策略	总加工时间	平均机器利用率	相对改善程度	
				总加工时间	机器利用率
固定路径	SPT	704	0.644		
	FIFO	704	0.644		
规划路径	SPT	600	0.967	14.8%	33.4%
	FIFO	600	0.967	14.8%	33.4%

表 8 例 2 的仿真结果比较

路径策略	调度策略	总加工时间	平均机器利用率	相对改善程度	
				总加工时间	机器利用率
固定路径	SPT	719	0.538		
	FIFO	719	0.538		
	SR	829	0.466		
规划路径	SPT	603	0.726	16.1%	25.9%
	FIFO	546	0.802	24.1%	32.9%
	SR	662	0.661	20.1%	39.5%

从实验结果来看,路径规划决策对提高 FMS 的柔性以及改善 FMS 的性能上的确起着非常重要的作用.同时也体现了传统 Jop-Shop 负荷分配及固定路径概念已经不能适应现代制造系统的要求,尤其是对 FMS 这样具有高柔性的制造系统.同时,也体现了柔性是现代制造系统的主要特征和主要性能指标之一.

4 结 论

柔性制造系统是对改进制造系统柔性和对用户具有快速、经济响应的一种有效手段.本文中首先分析了传统 Jop-Shop 负荷分配及固定路径概念直接应用到 FMS 的缺陷,继而提出了一种适合 FMS 的负荷分配与路径规划方法,并通过仿真实验进一步验证了在 FMS 调度实施之前进行路径规划的必要性.同时也证实了,路径决策能对底层调度活动提供有价值的指导,并能对 FMS 的性能具有显著的改善.

参 考 文 献

- [1] Steck, K. E. and Browne, J. . Variation in Flexible Manufacturing Systems According to the Relevant Types of Automated Materials Handling. *Material Flow*, 1985, 2;179—185
- [2] Kulatilaka, N. . Valuing the Flexibility of Flexible Manufacturing Systems. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 1988, 35(4);250—257
- [3] Jaikumar, R. . Postindustrial Manufacturing. *Harvard Business Review*, 1986, 64(6);69—76
- [4] Maimon, O. Z. and Gershwin, S. B. . Dynamic Scheduling and Routing for Flexible Manufacturing Systems That Have Unreliable Machines. *Operation Research*, 1988, 36(2);279—292
- [5] Injazz J. Chen and Chen Hua Chung. Effects of Loading and Routing Decision in Performance of FMS. *International Journal of Production Research*, 1991, 29(11);2437—2450
- [6] Smith, M. L. . Characteristics of U. S. Flexible Manufacturing Systems—A Survey. *Proceedings of the Second ORSA/TIMS Conference on Flexible Manufacturing Systems*, Ann Arbor, Michigan (Elsevier), 1986, 477—486
- [7] Steck, K. E. and Kim, I. . A Study of FMS Part Type Selection Approaches for Short-Term Production Planning. *International Journal of FMS*, 1988, 1(1);7—29
- [8] Steck, K. E. . Production Planning Problems for Flexible Manufacturing Systems. Ph. D. Dissertation, Purdue University, West Lafayette, Indiana. 1981
- [9] Bastos, J. M. . Batching and Routing; Two Functions in Operational Planning of FMS. *European Journal of Operation Research*, 33, 1988
- [10] Shanker, K. and Tzen, Y. J. . A Loading and Dispatching Problem in A Random Flexible Manufacturing Systems. *International Journal of Production Research*. 1985, 23(2);579—595

A New Approach of Loading and Routing Decision for FMS

SHI Haibo, ZHANG Lijuan and XUE Jingsong

(Shenyang Institute of Automation Academia Sinica • Shenyang, 1100015, PRC)

Abstract: Research has been found that flexibility is a prime advantage of Flexible Manufacturing System (FMS). Unfortunately, many firms have failed to take this advantage or have not obtained the available flexibility as soon as possible. One main aspect of this flexibility is the loading and routing decision of FMS, but the rout-

ing decision is always ignored. One of the major factors that inhibiting current FMS to realize benefits from the flexibility is the inappropriate application of the conventional production management concepts. In this paper, we firstly analyze why the conventional job shop loading and fixed routing concepts fail to capture the FMS flexibility, then a new loading and routing method of FMS is addressed using a linear programming model. The main feature of the method is that we successfully integrated the loading problem and routing problem of FMS. Finally we give several numerical examples and analyze the affection on FMS performance using this model based on the simulating results.

Key words: flexible manufacturing system(FMS); loading; routing;

本文作者简介

史海波 1966年生. 1991年中国科学院沈阳自动化所硕士研究生毕业, 后留所工作. 现受聘为 CIMS 系统工程部助理研究员. 当前研究领域是计算机集成制造系统(CIMS), 单元化生产, 柔性制造系统的理论及应用, MRP II 应用及产品开发等.

张丽娟 1965年生. 1988年在东北工学院获硕士学位. 现在中国科学院沈阳自动化所从事 CIMS 方面工作, 曾从事控制理论, 自适应控制方面的研究, 主要研究兴趣是 CIMS 系统的仿真以及单元控制器方面的研究工作.

薛劲松 1938年生. 1964年毕业于清华大学自动控制系, 1968年中国科学院研究生毕业, 现受聘于中国科学院沈阳自动化所研究员, 研究部主任. 早期从事机电控制系统, 交通控制应用开发, 近期研究方面为计算机集成制造系统(CIMS)系统技术, 总体技术及应用工程.