

基于混合法的叶片 FMS 控制系统研究

吴祚宝 吴澄 熊光楞

(清华大学国家 CIMS 工程研究中心·北京, 100084)

摘要: 本文基于 Petri 网建模的混合法, 建立了叶片 FMS 控制系统活的、安全和可逆的 Petri 网模型, 应用该模型开发了叶片 FMS 控制系统仿真器, 可成功地避免叶片 FMS 的死锁产生。

关键词: Petri 网; 柔性制造系统; 控制; 死锁

1 引言

柔性制造系统(FMS)的主要特点是可同时加工不同的工件, 这些工件竞争系统中的有限资源. 对于这种共享资源的分配, 如果不加以限制, 系统就可能在生产过程中产生死锁. 死锁可使整个系统瘫痪, 使得加工无法进行. 因此死锁避免控制是 FMS 必须解决的问题之一.

目前, 常用的 FMS 死锁避免控制方法是先建立 Petri 网模型, 然后用所建模型分析死锁存在与否, 若存在, 则用算法加以控制. 但是, 当系统较大时, 其 Petri 网模型的构造和分析非常复杂. 为此, 本文用 Petri 网建模的混合法建立叶片 FMS 活的、安全和可逆的 Petri 网模型, 不仅能避免复杂的模型分析过程, 而且给出了避免死锁产生的条件, 从而可方便地实现死锁避免控制.

2 Petri 网建模的混合法

Petri 网的建模方法主要有自底向上综合法, 自顶向下逐步求精法, 以及基于前面两种的混合法. 混合法综合了自底向上和自顶向下的方法, 它将运行位置和资源位置区分开来, 以便在初始阶段构造 Petri 网时用自顶向下方式, 在后期阶段采用自底向上方式. 其优点在于细节可以逐步引入, 这样可减少复杂性, 同时保证所构造的 Petri 网具有活性、有界(安全)和可逆性等重要特性.

2.1 定义

定义 1 Petri 网由四元组构成, $PN = (P, T, I, O, M_0)$. 其中, P 和 T 分别为位置和变迁, $P \cap T = \emptyset$; $I = \{I(t_1), I(t_2), \dots, I(t_m)\}$ 为从 T 到 P 的输入函数, $m \geq 0$; $O = \{O(t_1), O(t_2), \dots, O(t_n)\}$ 为从 T 到 P 的输出函数, $n \geq 0$; M_0 为位置到自然数的映射, 为初始标识.

定义 2 假定 M_0 是 Petri 网的初始标识, p 是其中的一个位置. 如果 $M_0(p) = 0$, 则称位置 p 为 A-位置或运行位置; 如果 $M_0(p)$ 是个常量, 则称位置 p 为 B-位置或固定资源位置; 如果 p 的初始标识 $M_0(p) > 0$ 且 $M_0(p)$ 是可变的, 则称位置 p 为 C-位置或可变资源位置.

A-位置通常表示系统运行, B-位置表示固定资源(机器、传送带等)的可用(availability),

C-位置表示毛坯、夹具、托板等的可用. A-位置、B-位置和 C-位置的集合分别用 P_A, P_B 和 P_C 来表示.

2.2 并行排斥性质

并行排斥定义为 k 个独立的过程并行地共享一个被建模为 P_E 的资源. 并行排斥用 k -PME 表示, k 是独立的过程数.

并行排斥有下面的性质:

定理 1 假定 $PN = (P_A \cup P_B \cup P_C, T, I, O, M_0)$ 是 $PN' = (P', T', I', O', M_0')$ 的子网, $P' = P_A \cup (P_B \cup \{p_E\}) \cup P_C, T' = T$ 并且 D 是变迁对的集合或 $D = \{(t_{ai}, t_{bi}), i \in N_K\}$. 如果 (p_E, D) 是 PN' 的一个 k -PME, 则

- 1) 如果 PN 是有界(安全)的, 则 PN' 是有界(安全)的;
- 2) 如果 PN 是活的, 则 PN' 是活的;
- 3) 如果 PN 是可逆的, 则 PN' 是可逆的.

定理 1 说明了如果一个系统包含几个独立的过程并具有某些特性, 那么当这些过程需要竞争一个具有同等机会且在使用后就释放的资源时, 该系统仍保持这些特性.

2.3 串行排斥性质

串行排斥用于建立被几个串行过程组共享的一个资源模型. 如果忽略其它组, 每个组都包括独立的过程, 并形成一个小 PME. 串行排斥用 SME 表示.

在包括 SME 的 Petri 网中, 当每个 C-位置的初始标识数超过某个常量时, 系统就会产生死锁. 例如, 在图 1 所示的叶片 FMS 中, 每台机床有一上料台和下料台, 机械手 R 用于搬运叶片. 当机床的上料台、加工台和下料台已有三个工件, R 正在搬运传送带上的工件至机床上料台, 而机床下料台上工件需要 R 搬至传送带时, 系统就出现循环等待, 从而产生死锁. 因此, 对于这样的系统, 为避免产生死锁, 应在一给定的时间间隔内限制进入系统的工件数.

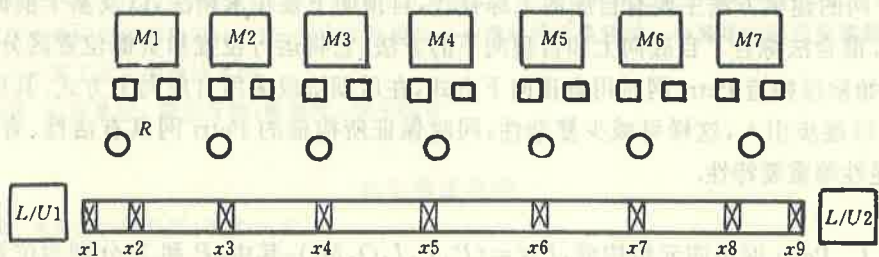


图 1 叶片 FMS

定义 3 假定 Petri 网 $PN = (P, T, I, O, M_0)$, PN 中变迁 t 和 t' 之间的标识容量 $C(t, t')$ 是 t' 不激发时, t 可激发的最大数.

定理 2 假定 $PN = (P_A \cup P_B \cup P_C, T, I, O, M_0)$ 是 $PN' = (P', T', I', O', M_0')$ 的子网, $P' = P_A \cup (P_B \cup \{p_E\}) \cup P_C, T' = T$ 并且 $D = D^1 \cup D^2 \cdots \cup D^l, K_i = |D^i| \geq 1, D^i = \{(t_{ai}, t_{bi}), j \in N_{ki}\}$. 如果 (p_E, D) 是一个 SME, 则

- 1) 如果 PN 是有界(安全)的, 则 PN' 是有界(安全)的. 进一步, 如果

i) $\exists C^i, M_0, \alpha, \beta^i, \exists M_0(p) \geq \alpha(p), \beta^i(p) M_0(p) \leq C^i, p \in P_C;$

ii) Petri 网没有这个 SME 时,在任何可达标识下;资源位置 $p \in P_B \cup P_C$ 的标识数不会超过其初始标识;

iii) 当任何两个连续 PME 之间的标识容量为一有限数时,该标识容量是有效的.

那么

2) 如果 PN 是活的,那么 PN' 是活的.

3) 如果 PN 是可逆的,那么 PN' 也是可逆的.

定理 2 给出了一个包括 SME 的 Petri 网保持活的、有界和可逆的条件. 其中条件 i) 定义了初始标识的范围,实际上给出了在一给定的时间间隔内允许进入系统的工件数. C^i 为一个 SME 中两个连续 PME(第 i 个和第 $i+1$ 个)之间的标识容量,它取决于一个缓冲站容量或机器加工容量. $\alpha(p)$ 是使 SME 中变迁可激发的最小 $M_0(p), p \in P_C. \beta^i(p)$ 是当 p 中的初始标识增加时最大的变迁激发比率.

对于实际制造系统,如果不存在公共缓冲区,这些条件应是正确的,因而 Petri 网模型能满足这些条件.

2.4 基本设计模块

在混合法中,引入了四个基本设计模块,用于辅助制造系统的 Petri 网建模.

1) 串行 PN 模块:表示一系列连续的操作.

2) 并行 PN 模块:表示同时执行 n 种操作,并且只有当 n 个操作都结束后,其它操作才能开始.

3) 选择 PN 模块:表示后续操作有 n 种选择,它用于表示给定的条件可激发多个竞争的变迁,或者一个操作后选择 n 个操作中的一个.

4) 无决策 PN 模块:它根据初始标识,给后续操作的 n 种选择加上了严格的顺序.

定理 3 (求精原理) 假定 PN 中一个位置或一个变迁用上述的基本设计模块代替, PN' 是精细了的 Petri 网,则

1) 如果 PN 是有界(安全)的,则 PN' 是有界(安全)的;

2) 如果 PN 是活的,则 PN' 是活的;

3) 如果 PN 是可逆的,则 PN' 是可逆的.

2.5 混合法建模

Petri 网的建模过程为:

第一步 选择一活的、有界和可逆的 Petri 网作为系统的最初模型,并确定 A -位置、 B -位置和 C -位置的集合.

第二步 将系统分解为几个子系统,这些子系统用已定义的基本设计模块表示成运行位置. 根据定理 3,这些运行位置用更详细的基本设计模块代替,直到运行不可能或没有必要再分为止. 在每一步, A -位置的集合得到扩展.

第三步 当一个或几个运行需要资源时,在每个阶段适当增加一些非共享资源位置,并用弧连接这些资源位置. 在每步增加时,只有 B -位置的集合扩大了.

第四步 如果存在缓冲站,则增加缓冲位置.每个增加的缓冲位置有初始标识,其值等于缓冲站的容量.

第五步 根据定理 1,增加共享的资源位置,以形成 PME,这些资源位置是 B -位置.

第六步 根据定理 2,增加共享的资源位置,以形成 SME,并计算 PME 之间的标识容量、 α 和 β ;对于 $\forall p \in P_c$,确定 p 中的初始标识数.这些资源位置添加到 B -位置的集合.

最后,综合成一个活的、有界和可逆的 Petri 网模型.

在实际建模过程中,基本设计模块的代替和资源位置的增加可交替进行.

3 叶片 FMS 组成

叶片 FMS 用于加工如表 1 所示的四种叶片.它由 4 台五轴加工中心 $M1, M2, M3, M7$, 一台七轴磨床 $M4$, 一台砂带抛光机 $M5$ 和三坐标测量机 $M6$ 组成,如图 1 所示.叶片 FMS 的物料输送由一条传送带进行,并只能往一个方向传送.装卸站 $L/U1$ 用于装, $L/U2$ 用于卸. $x1$ 至 $x9$ 为传送带的停靠站位,在这些站位上机械手可从传送带取或放工件.工件装在托板上,在计算机的控制下依次通过系统的各个加工工位.

4 应用混合法建立叶片 FMS 的 Petri 网模型

叶片 FMS 不存在公共缓冲区,因此可用混合法建立其活的、有界和可逆的 Petri 网模型,并将系统分解为以下二部分:装卸站和传送带系统,机械手和机床系统.

4.1 装卸站和传送带系统建模

由于叶片 FMS 在一个工作循环中,带有叶片的托板从 $L/U1$ 出发到 $L/U2$,再回到 $L/U1$,因此装卸站和传送带系统是可重复的.由于每个托板只能往一个方向移动,因而系统是无决策的.托板的基本状态是移动和等待.由于传送带上的站位不可能同时被两个托板占用,因而可将站位建模为单独的资源.装有叶片的托板被建模为标识,因它们从一个站位移动到另一个站位反映了系统状态的变化.为此,两个站位间的移动用一变迁表示,在一个站位等待用一位置表示,就可建立如图 2 所示的装卸站和传送带系统 Petri 网模型.图中 $pyi (i=1 \sim 9)$ 表示站位可用, p_{xi} 表示托板停在站位 x_i 等待, ti 表示托板从站位 x_i 移到了下一个站位.由于图 2 的任一位置只有一个输入和一个输出变迁,而且子网中的每个回路至少有一个标识,因此网是活的和可逆的.又因为没有一个位置有二个标识,因而网又是安全的.

4.2 机械手和机床系统建模

机械手和机床系统涉及的活动有机械手从传送带搬工件到机床上料台、工件从上料台至加工台、机床进行加工、加工完后工件从加工台至机床下料台和机械手从下料台搬工件到传送带.这里用位置 $pi2$ 至 $pi6$ 来表示这些活动,而这些活动的开始或结束分别用变迁 $ti1$ 至 $ti6$ 表示.其中 i 表示机床,且 $i=1, 2, \dots, 7$ 分别代表 $M1, M2, \dots, M7$,如图 3 所示. $pi1$ 表示带有叶片的托板等待进入, $pi7$ 表示托板被释放, $pi8$ 至 $pi11$ 分别表示机械手、机床上料台、加工台和下料台的可用.该 Petri 网模型存在一个串行排斥 $\{p_E, D^1 \cup D^2\}$, 其中 $p_E = pi8$, $D^1 = \{(ti1, ti2)\}$, $D^2 = \{(ti5, ti6)\}$, 因此系统就会产生死锁.为避免产生死锁,应在一给定的时间间隔内限制进入系统的工件数.根据定理 2,可求得当 $1 \leq M_0(pi1) \leq 3$ 时,该网是

表 1 叶片加工工艺参数(时间单位:秒)

叶片类型 \ 工序	1	2	3	4	5	6	7
带凸台扭叶	67	280	77	45	45	20	12
无凸台扭叶	48	198	30	30	45	25	10
斜切式扭叶	37	91	26		40	15	
直叶片	35	56	33		25	15	

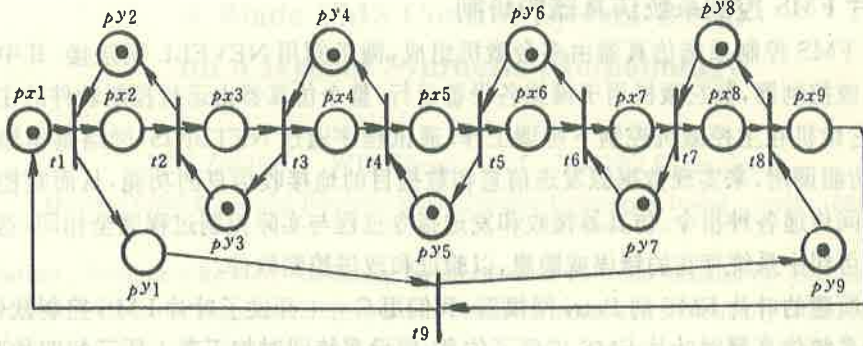


图 2 装卸站和传送带系统的 Petri 网模型

活的、安全和可逆的。

4.3 系统的 Petri 网模型

用图 3 中的子网代替图 2 中的 $px2$ 至 $px8$, 则可得到系统的 Petri 网模型如图 4 所示。由于图 2 和图 3 所示的 Petri 网在 $1 \leq M_0(pi1) \leq 3, i = 1, 2, \dots, 7$ 时, 是活的、安全和可逆的, 因此根据定理 3, 所得的系统 Petri 网子模型是活的、安全和可逆的。

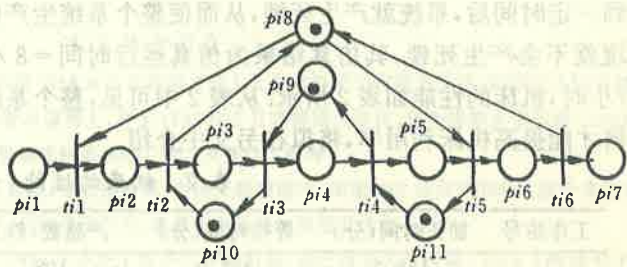


图 3 机械手和机床 Petri 网模型

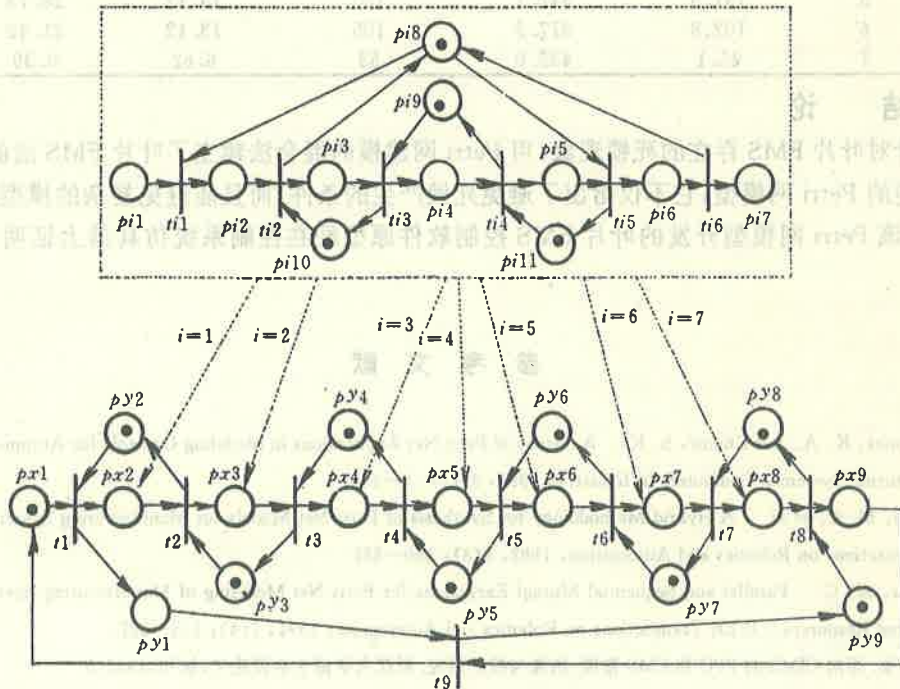


图 4 叶片 FMS 的 Petri 网模型

5 叶片 FMS 控制系统仿真器的研制

叶片 FMS 控制系统仿真器由多台微机组成,微机间用 NEVELL 网连接.其中一台微机用作系统控制器,其它微机用于模拟各设备运行.整个仿真器由运行控制软件的主控微机控制,其它微机在可控微机控制下协调工作.通讯程序通过 NETBIOS(网络基本输入输出系统)的功能调用,来实现数据源发送信息和数据目的地接收信息的功能,从而在控制软件与设备之间传递各种指令.仿真器接收和发送指令过程与实际控制过程完全相同,这样通过仿真器就可纠正系统中存在的错误或隐患,以验证和改进控制软件.

利用所建的叶片 FMS 的 Petri 网模型,我们用 C++ 开发了叶片 FMS 控制软件原型.并用控制系统仿真器对叶片 FMS 进行了仿真.假设系统同时加工表 1 所示的四种叶片,并且四种叶片按 1:1:1:1 的比例进入系统,调度规则采用先进先出,装卸站装或卸叶片时间为 20 秒,机床之间距离为 3 米,传送带速度为 9 米/分,当不采用上述死锁控制方法时,仿真运行到一定时间后,系统就产生死锁,从而使整个系统生产停止;而采用上述死锁控制方法后,系统就不会产生死锁,其仿真结果为仿真运行时间=8 小时,成品数=104 件,生产率=13 件/小时,机床的性能如表 2 所示.从表 2 中可见,整个系统的负荷不均匀,机床利用率偏低,如何才能提高机床利用率,将拟在另文中介绍.

表 2 机床的性能

工作站号	加工时间(分)	等待时间(分)	产品数(件)	生产率(件/小时)	利用率(%)
1	156.2	323.9	108	13.5	32.53
2	353.3	126.8	108	13.5	73.59
3	145.5	334.5	107	13.37	30.31
4	69.8	410.3	54	6.75	14.53
5	137.9	342.1	105	13.12	28.73
6	102.8	377.2	105	13.12	21.42
7	45.1	435.0	53	6.62	9.39

6 结 论

针对叶片 FMS 存在的死锁现象,用 Petri 网建模的混合法建立了叶片 FMS 活的、安全和可逆的 Petri 网模型,它不仅给出了避免死锁产生的条件,而且能避免复杂的模型分析过程.用该 Petri 网模型开发的叶片 FMS 控制软件原型经在控制系统仿真器上证明是有效的.

参 考 文 献

- [1] D'Souza, K. A. and Khator, S. K. . A Survey of Petri Net Applications in Modeling Controls for Automated Manufacturing Systems. Computers in Industry, 1994, 24(1): 5-16
- [2] Zhou, M. C. et al. . A Hybrid Methodology for Synthesis of Petri Net Models for Manufacturing Systems. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1992, 8(3): 350-361
- [3] Zhou, M. C. . Parallel and Sequential Mutual Exclusions for Petri Net Modeling of Manufacturing Systems with Shared Resources. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1991, 7(4): 515-527
- [4] 吴祚宝. 面向 CIMS 的 PPC 和 FMS 建模、仿真与控制研究. 浙江大学博士学位论文, 杭州, 1995.5

A Blade FMS Control System Based on a Hybrid Synthesis Methodology

WU Zuobao, WU Cheng and XIONG Guangleng

(National CIMS Engineering Research Center, Tsinghua University • Beijing, 100084, PRC)

Abstract: Based on a hybrid methodology for synthesis of Petri net models, the Petri net model of a blade FMS which has the important properties of liveness, safeness and reversibility is constructed in this paper. Using the Petri net model, a emulator of the blade FMS control system is developed and the dead-lock of the blade FMS can be avoided successfully.

Key words: Petri nets; flexible manufacturing systems; control; deadlocking

本文作者简介

吴祚宝 1965年生, 分别于1985年7月和1988年2月在南京理工大学获得学士和硕士学位, 同年进入杭州制氧机集团有限公司工作, 1991年9月进入浙江大学攻读博士, 并于1995年5月获得博士学位, 现为清华大学国家CIMS工程研究中心博士后, 目前主要研究兴趣为计算机集成制造系统CIMS及并行工程等。

吴澄 1940年生, 清华大学自动化系教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 国家863计划CIMS主题专家组组长, 从事计算机集成制造系统的总体及集成技术、软件集成平台、离散制造系统的调度及优化等研究。

熊光楞 1936年生, 教授, 博士生导师, 1959年毕业于清华大学电机系, 现任清华大学国家CIMS工程研究中心总工程师, 中国系统仿真学会副理事长, 目前主要研究方向为CIMS, 并行工程及系统仿真与建模等。