

基于 EHLEP-N 模型的 FMS 实时 调度和控制¹⁾

严洪森 张晋格 王炎 黎贞渭

(哈尔滨工业大学电气工程系, 哈尔滨 150006)

摘 要

本文提出一种新的更适合柔性制造系统 (FMS) 建模的扩展高级 E-Net, 简称 EHLEP-N (Extended High Level Evaluation Petri Net). 将 EHLEP-N 与专家系统技术相结合, 使 EHLEP-N 对 FMS 更具有描述性, 推理和决策能力. 以 EHLEP-N 为 FMS 的建模工具, 设计并建立 FMS 实时调度控制专家系统. 借助于该系统, 提出并研究新的旨在减少空闲 (no-inputs) 和消除阻塞的实时动态再调度规则. 加工实验结果表明: 1) 该系统满足实时性和调度控制功能的要求; 2) 新规则的产率 (throughputs) 比传统规则平均提高7%.

关键词: Petri 网, FMS, 实时调度与控制, 专家系统.

一、引 言

由于 Job shop 调度问题对几乎所有情形都是 NP 难题^[1], 所以采用基于规则的专家系统来解决 FMS 的实时调度与控制问题将更合适. 由于规则调度常常比最优调度有更多的空闲和阻塞, 到目前为止还没有解决这类问题的调度规则, 所以本文提出旨在减少空闲和消除阻塞的实时动态再调度规则. 为叙述方便, 以下简称再调度规则.

为了实现 FMS 的调度与控制, 需要一种建模工具来描述 FMS 的结构、状态和动态行为等. Petri 网在一定程度上可以满足这种要求. 但仍有一些不尽人意的地方. 例如, EP-N (Evaluation Petri Nets)^[2] 含有表示令牌 (token) 传递控制的决策点, 但是节点数目太多, 结构比较复杂, 以致只适合简单制造系统的建模和控制. 谓词/变迁网 P/TP-N (Predicate/Transition Petri Nets)^[3] 比 EP-N 有更少的节点和更简单的结构, 但没有决策点. 有色网 CP-N (Coloured Petri Nets)^[3] 除了相同颜色的令牌不能相互区分外, 与 P/TP-N 相同, 因而适合对决策程度不高的系统进行性能分析. 高级网 HLP-N (High Level Petri Nets)^[4] 综合了 P/TP-N 和 CP-N, 它的模型更简单, 更直观, 状态数更少, 但仅适合同类系统建模. 因此, 本文综合上述几种 Petri 网的优点, 同时吸收 PR-N (Petrillo Nets)^[5] 可用参数表示令牌的特点, 提出新的扩展高级 E-Net, 即 EHLEP-N,

本文于 1991 年 7 月 29 日收到.

1) 参加本文工作的还有崔贤玉同志和张晓莹同志.

用以描述 FMS 的结构和动态特性,实现 FMS 的调度和控制。

二、FMS 的 EHLEP-N 模型

EHLEP-N 可定义为一个 11 元组, $EHLEP-N = \{P, T(R, ER), F, D, A_p, C, I_-, I_+, ER, M_0, CM_0\}$,

其中

$P = \{P_1, \dots, P_m; R_1, \dots, R_k\} = \{P_g, R\}$ 是一个有限库所 (Place) 集, $P_i \in P_g, R_j \in R, P_g$ 是普通库所集, R 是决策点集。

$T(R, ER) = \{T_1(R_1, ER_1), \dots, T_k(R_k, ER_k)\}$ 是一个有限变迁 (Transition) 集, $P \cap T(R, ER) = \emptyset$ 。

$F \subseteq P \times T(R, ER) \cup T(R, ER) \times P, F$ 是流关系。

D : 是非空有限集,称为 EHLEP-N 的个体集。

$A_p: P_g \rightarrow A_p(P_g), R \rightarrow A_p(R)$ 。 $A_p(P_g)$ 是 D 上的参数表集。在专家系统中用动态数据库谓词表示。 $A_p(R) = S = \{S_1, \dots, S_k\}$ 是 D 上的调度、控制等规则的集和。 $A_p(P_g) \cup A_p(R)$ 是 EHLEP-N 的令牌 (token) 集。

$C: A_p(P) \cup T(R, ER) \rightarrow$ 一个已知颜色集的幂集合,使得

$\forall p \in P, C(A_p(p))$ 是 p 上的所有可能令牌色的集合;

$\forall t(\cdot) \in T(R, ER), C(t(\cdot))$ 是 $t(\cdot)$ 上的所有可能出现色的集合。 $t(\cdot)$ 表示 $t(r, er)$ 。

I_- 是一个负函数,使得

$\forall (p, t(\cdot)) \in P \times T(R, ER):$

$I_-(p, t(\cdot)) \in [C(t(\cdot))_{MS} \rightarrow C(A_p(p))_{MS}]_L$, 且 $I_-(p, t(\cdot)) = 0$ 的充分条件是 $(p, t(\cdot)) \notin F$ 。

其中 $[\dots]_L$ 是线性函数集。 $C(\dots)_{MS}$ 是多重集, $C(A_p(p))_{MS}$ 是 P 上的有色令牌集。

I_+ 是一个正函数,使得

$\forall (t(\cdot), p) \in T(R, ER) \times P:$

$I_+(p, t(\cdot)) \in [C(t(\cdot))_{MS} \rightarrow C(A_p(p))_{MS}]_L$, 且 $I_+(p, t(\cdot)) = 0$ 的充分条件是 $(t(\cdot), p) \notin F$ 。

$ER = \{ER_1, \dots, ER_k\}$ 是外部响应的集合,如 MXF 。

M_0 是用于调度和控制的初始标识 (Markings), 满足

$\forall p \in P: M_0(p) \in A_p(p)$ 。

CM_0 是用于用户观察令牌分布和性能统计的初始标识,满足

$\forall p \in P: M_0(p) \in A_p(p) \rightarrow CM_0(p) \in C(A_p(p))_{MS}$ 。

上述定义只规定了 EHLEP-N 的静态结构。为了规定它的动态行为,还需给出变迁触发的条件和规律,即变迁触发规则。EHLEP-N 的变迁触发将由标识,调度、控制等规则和外部响应来决定。

以哈尔滨工业大学 FMS 实验系统(图 1)为例介绍 EHLEP-N 的建模方法。该系统由一台数控铣床 (M_0), 三台加工中心 (M_{1-3}), 一台小车 (V), 四个缓冲区 (B_{0-3} , 每个缓冲区的容量为 5) 和一个工件库 (W , 容量为 20) 所组成。相应的 EHLEP-N 模型如图 2 所示。图中, P_1 是一个“排队”库所。 P_1 中有令牌说明机床缓冲区中有工件等待加工, P_1 中用于调度控制的令牌用动态数据库谓词 $dpart(queue_no, sequence_no, part_no, position, available_machine, part_priority, delivery, processing_time, nc_program, tool)$ 表示。用于用户观察令牌分布和性能统计的有色令牌用动态数据库谓词 $dqueue(queue_no, length)$ 表示。 $C(A_p(P_1)) = \{q_0, q_1, q_2, q_3\}$, $CM_0(P_1) = q_0 + 4q_1 + 2q_2 + 3q_3$ 。 P_2 是“机床空闲 (empty 和 no_input)”库所。 P_3 是“工件库”库所。 P_4 是“小车空闲 (empty 和 no_input)”库所。 P_5 是“等待搬运”库所。 P_6 是“搬运”库所。 P_7 是“故障”库所, P_8 是“加工”库所。 R_{1-5} 是决策点。 S_{1-5} 是调度、控制等规则的集合。 T_{1-5} 即 $T_{1-5}(\cdot)$, 是变迁。

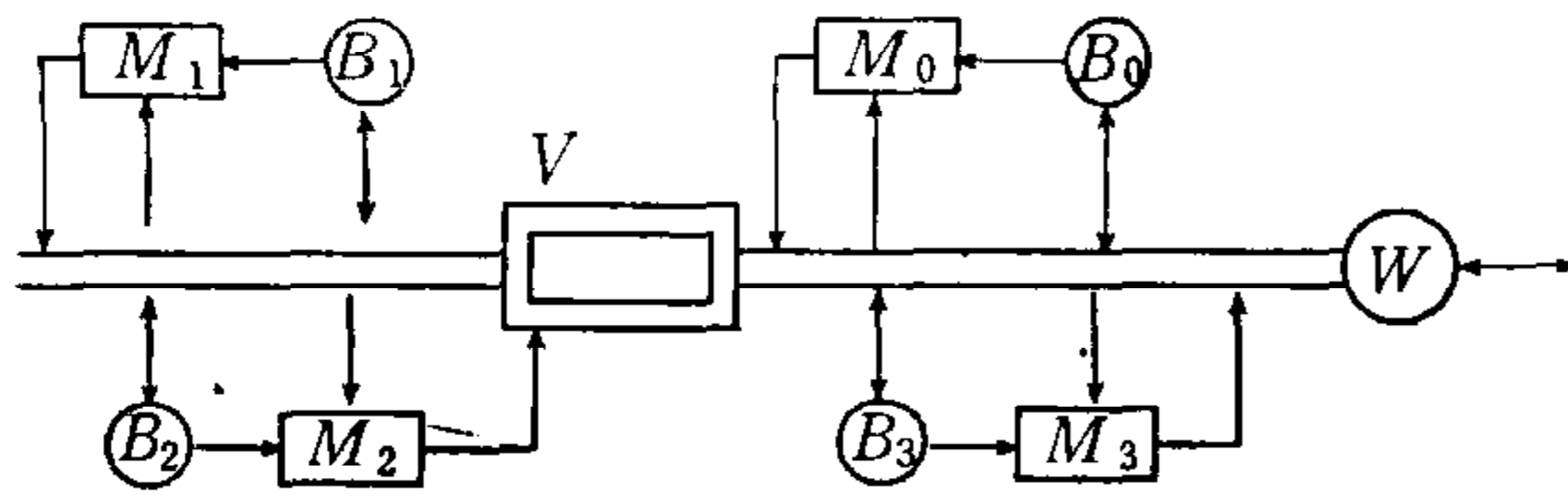


图 1 FMS 的布局

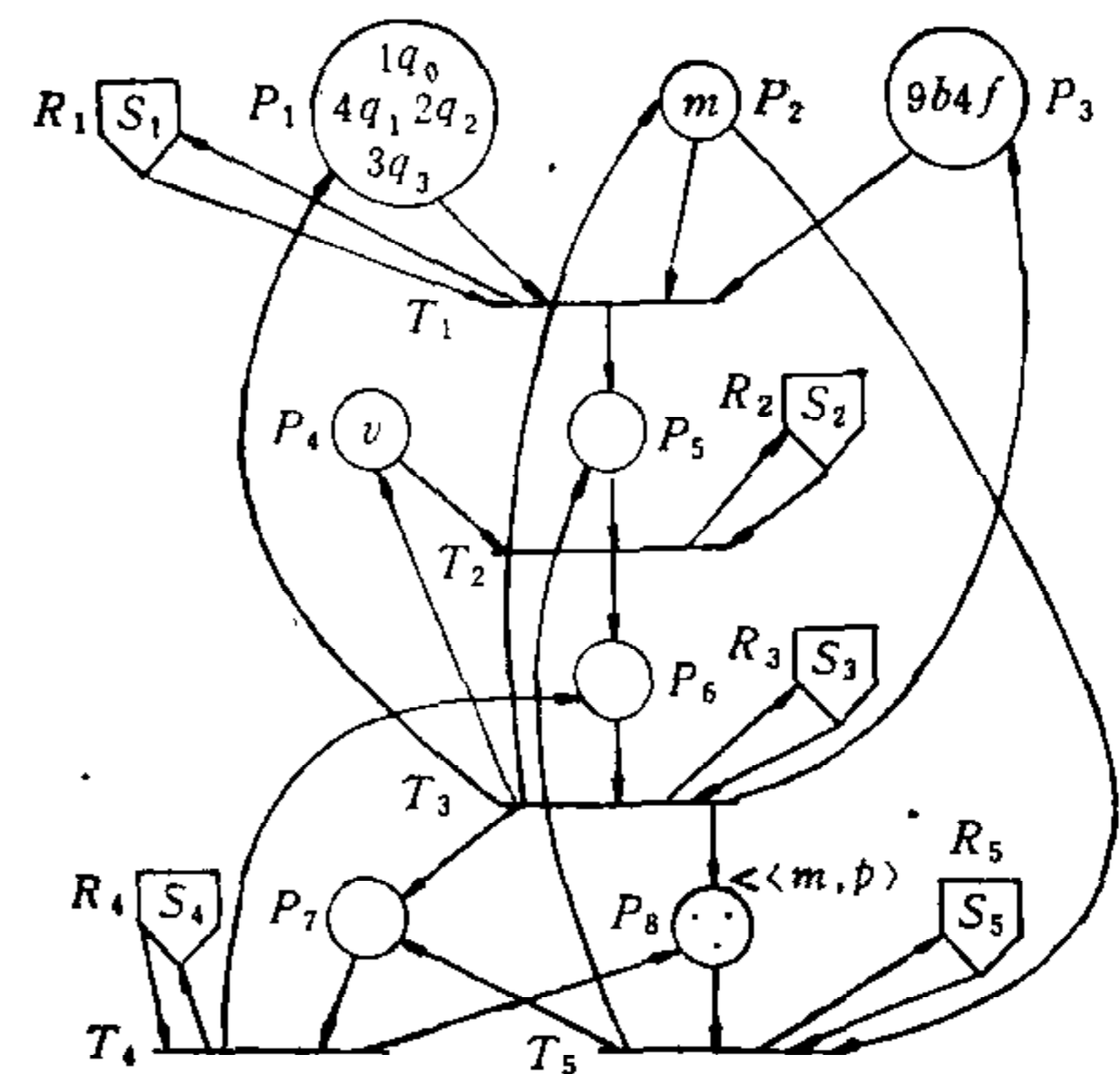


图 2 FMS 的 EHLEP-N 模型

图 2 的 EHLEP-N 模型对多于一台小车, 非四台且至少有一台机床的情况, 仍然适合, 其拓扑结构完全一样, 所不同的只是令牌总数的不同。因此, 这种模型具有高度的聚合性, 对用户观察令牌分布和性能统计极为方便, 又不影响调度控制, 因为对调度控制, 所有令牌是可区分的。这就是模型中双重令牌和双重标识定义的优越性, 也是与其它 Petri 网的根本区别。当只有一台小车和一台机床时, 如果去掉所有库所中令牌的颜色, 并把 P_7 分解成两个库所, 一个代表小车故障, 另一个代表机床故障, 那么图 2 的 EHLEP-N 模型就变成 EP-N 模型。因此, 可以说 EP-N 是 EHLEP-N 的一个特例。也可以设想一下, 对于图 1 的系统, 如果用 EP-N 建模, 则其复杂程度是图 2 中 EHLEP-N 模型的 4 倍! 由于篇幅所限, 不能将 EHLEP-N 同引言中提到的各种 Petri 网作更多的比较。感兴趣的读者, 可参阅本文所列的参考文献。

可见, EHLEP-N 具有形象直观, 描述性强, 节点少, 结构简单等优点。它既可用于调度控制(令牌可区分), 又可用于用户观察令牌分布和性能统计(相同颜色的令牌不可区分)。它与专家系统的结合也很容易、自然。这只要把 EHLEP-N 普通库所中的令牌用专家系统中的动态数据库谓词表示; 决策点中的令牌用调度、控制等规则表示; 变迁的触发用外部响应(如 MXF, 即机床完成工件的加工)引起的推理过程表示即可。

三、实时调度控制专家系统的建立

在上述 EHLEP-N 模型基础上,建立了 FMS 实时调度控制专家系统,如图 3 所示。图中,黑板是一个共享数据区,存储操作及资源状态、决策结果和统计量。操作及资源状态和决策结果又可分成三类: 1) 用于调度控制的令牌; 2) 用于用户观察令牌分布和性能统计的有色令牌; 3) 辅助状态。其中, P_i 中令牌和有色令牌的格式如上节名为 `dpart` 和 `dqueue` 的动态数据库谓词所示。推理机在系统状态发生变化时处理知识, 如一台机床完成某一工件的加工等。设备由图 1 所示的机床和小车组成。

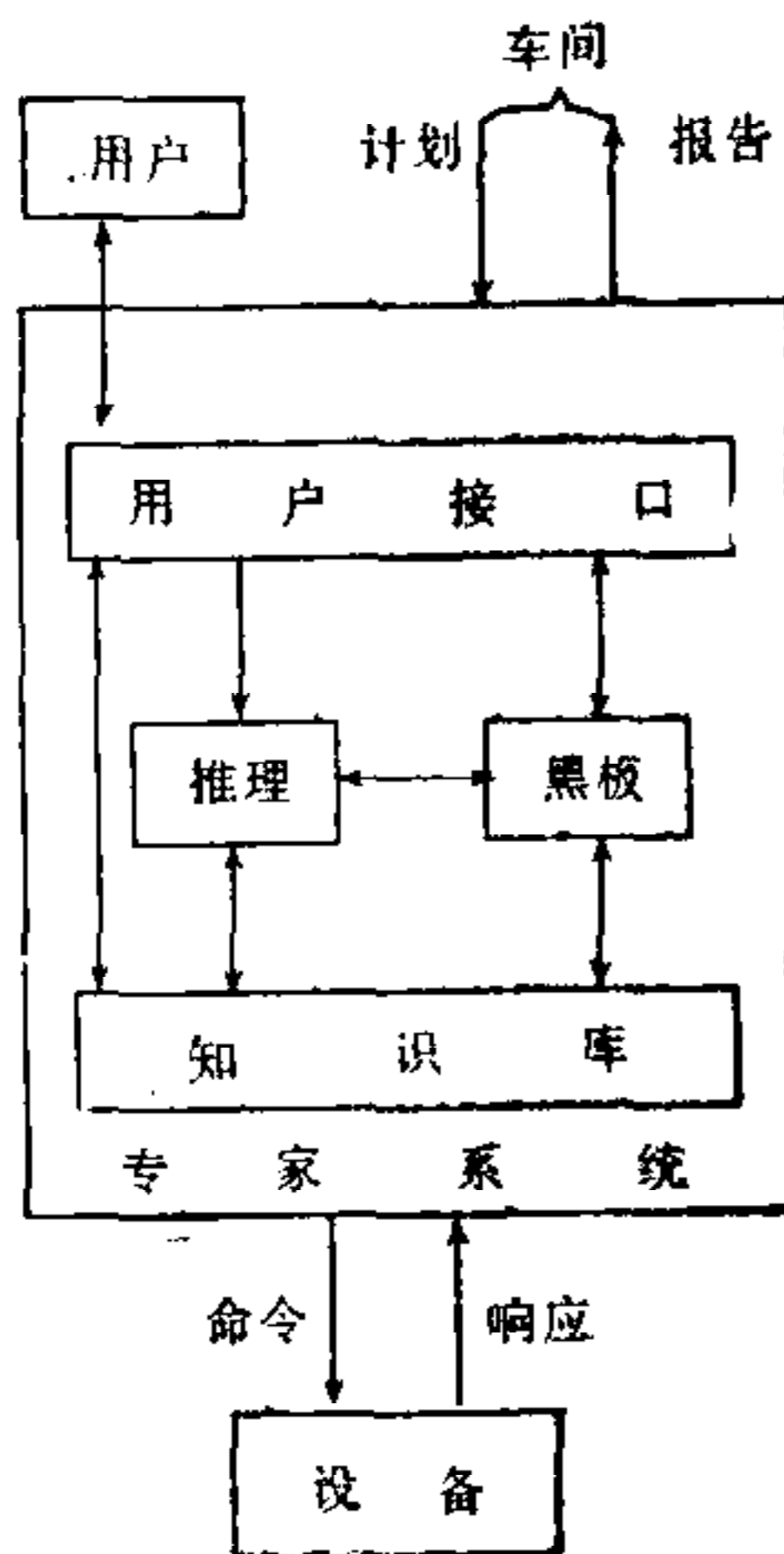


图 3 系统结构

或消除阻塞的再调度规则。当需要触发 EHLEP-N 模型的变迁时, 选用适当的控制规则。

这里仅将新的再调度规则的涵义描述于下。

*减少空闲的再调度规则。当某台机床的缓冲区为空, 且工件库 W 中也没有合适的待加工的工件, 而使该机床处于空闲时, 可从其它最长队列中选择一个合适的工件放到该机床上进行加工, 从而消除空闲。

* 消除阻塞的再调度规则。当某工件 P_i 在某台机床 M_k 上完成了加工且其下一工位的缓冲区 B_j ($k \neq j$) 已满, 而使 M_k 处于阻塞时, 可从 B_j 中选择一个工件放到另一台机床或另一最短队列中, 以腾出空间, 消除阻塞。如果 B_j 中没有这样的工件, 由于 $\bigcup_{i=0}^3 B_i$ 中至少有一个空闲存储单元 (通过限制工件进入 FMS 来保证), 就把 P_i 暂时放在空闲存储单元数最多的缓冲区 B_i 中, 并把 P_i 插入 Q_i 中, 因此也能消除阻塞。一旦 B_j 中有空闲存储单元, 立即从 B_i 中取出 P_i 放入 B_j 中。

专家系统的实现就是把领域问题求解知识转换成可实现的形式, 即把复杂的调度、控制等规则 (过程性知识) 转换成用 PROLOG (TURBO PROLOG 2.0) 语言写成的简单规则集。如减少空闲的再调度规则可用 PROLOG 语言写成

```
decrease_noinput (Machine, State):-
    State = no_input,
    get_part (Part, Machine, Other_queue).
```

专家系统的主要功能是根据车间下达的生产计划, 给 FMS 中的加工设备安排任务,

输送工件及数控程序,并把生产情况及时向车间汇报。尽管该 FMS 实验系统只有四台机床,但作者开发的软件包(4000 个 PROLOG 子句)可调度控制 10 台机床,也可支持 FMS 的其它布局。

四、实验结果和结论

目前,由调度控制专家系统,四台机床和一台小车组成的 FMS 实验系统联调已经结束;在此基础上进行了加工实验研究,下面是一个加工实例:

设生产计划如表 1,时间以“分”为单位,工件到达率与批量成正比。通过运行 FMS 实验系统得到的结果列于表 2。表中,“新规则”指专家系统的知识库中包含新的再调度规则,而“传统规则”则指知识库中不包含新的再调度规则。由表中可得到新规则的平均设备利用率比传统规则提高 4.4%,产率提高 7.15%。

经过输入 10 种不同计划进行实验,发现新规则的产率比传统规则最大提高 13%,最少提高 1%,平均提高 7%。

可见,新的再调度规则是有效的。通过观察 FMS 实验系统的运行过程,发现 FMS 实时调度控制专家系统完全能够满足所设计的调度控制功能的要求。此外,在实验中还观察到,它调度一个工件的计算机运行的最长时间仅需 2 秒钟,而一个工件的加工时间,少者需要十几分钟,多者需要一小时,因而它也能够满足实时性的要求。

表 1 生产计划

工件	批量	优先权	可用机床	加工程序	加工时间	交付期
W347.S 0	6	4	M_0	O3*	15	5.9.12.0
W347.S 1	6	4	M_1, M_2	O4*	40	5.9.12.0
W347.S 2	6	4	M_3	O5*	25	5.9.12.0
W542.S 0	10	2	M_1, M_3	O45*	35	5.9.12.0
W542.S 1	10	2	M_0	O46*	20	5.9.12.0
W369.S 0	12	1	M_1, M_2, M_3	O15*	40	5.9.12.0
W372.S 0	12	1	M_0, M_1, M_2	O168*	45	5.9.12.0

表 2 实验结果

机床号	规则	平均队长	空闲 (no-inputs) 次数	阻塞次数	加工时间	运行时间	利用率 (%)
M_0	新规则	2.31	0	0	475.8	609.7	78.03
	传统规则	2.73	0	0	488.1	653.3	74.71
M_1	新规则	1.99	0	0	475.7	609.7	78.02
	传统规则	1.91	0	2	513.5	653.3	78.60
M_2	新规则	1.97	0	0	505.6	609.7	82.93
	传统规则	2.22	0	0	605.5	653.3	92.68
M_3	新规则	2.05	0	0	594.9	609.7	97.57
	传统规则	1.35	2	0	498.9	653.3	76.37

尽管 EHLEP-N 是在引言中提到的几种 Petri 网的基础上扩展而得,但是它与这些 Petri 网已有根本区别。首先,它保留了它们的优点,克服了它们的缺点。其次,在 EHLEP-N 中定义了双重令牌和双重标识,一种用于调度控制(令牌可区分),另一种用于用户观察令牌分布和性能统计(相同颜色的令牌不可区分)。这是根据实际需要提出来的,也是以前的 Petri 网所没有的。还有,与制造环境紧密结合,把调度、控制等规则和外部响应直接引入 EHLEP-N 中。使它的行为与外部环境同步,达到调度控制 FMS 中加工设备(数控机床,加工中心)、小车和工件的目的,也使它的行为的物理意义更明确、更易理解。

本文的部分成果已经用于航空航天部 159 厂的高级 DNC (Direct Numerical Control) 系统设计之中。该系统由四台加工中心,一台数控车床,一台线切割机,一台三坐标测量机及 HP 公司生产的工件站等设备组成。

参 考 文 献

- [1] Blazewicz, J., Several Special Subjects of Scheduling Theory, *Annals of Discrete Mathematics*, **31** (1987), 1—60.
- [2] Nof, S. Y., et al, Control and Decision Support in Automatic Manufacturing System, *AIIE Transaction*, **12** (1980), (2), 156—169.
- [3] 袁崇义, Petri 网,东南大学出版社,南京,1989.
- [4] Lin, C., and Marinescu, D. C., On Stochastic High Level Petri Nets, Proc. IEEE Intl. Workshop on Petri Nets and Performance Models, 1987, 34—43.
- [5] Tzafestas, S. G., Petri-net and Knowledge-based Methodologies in Manufacturing Systems Modelling Simulation and Control, Proc. 5th CIM Europe Conf., 1989, 39—50.

FMS REAL TIME SCHEDULING AND CONTROL BASED ON EHLEP-N MODEL

YAN HONGSEN ZHANG JINGE WANG YAN LI ZHENWEI

(Dept. of Elec. Eng., Harbin Institute of Technology, Harbin 150006)

ABSTRACT

In this paper, the authors propose the new Extended High Level Evaluation Petri Net (EHLEP-N) which is more suitable for modelling FMS. Merging EHLEP-N with expert system techniques leads to more descriptive, inferential and decisive power. EHLEP-N being taken as a means of modelling FMS, the real-time scheduling and controlling expert system for FMS is designed and built up. By means of the system, the new real-time dynamic-rescheduling rules are proposed and researched, in which no-inputs can be decreased and blockings can be eliminated. The results of the machining experiment prove that:

- 1) the system can meet the demand of real time scheduling and control;
- 2) the throughputs of the new rules can increase on an average by 70% as compared with those of the traditional rules.

Key words: Petri nets; FMS; real-time scheduling and control; expert system.



严洪森 1957 年生于浙江江山。1982 年在哈尔滨船舶工程学院自控系获工学学士学位, 1989 年在哈尔滨工业大学电气工程系获工学硕士学位, 1992 年在哈尔滨工业大学控制工程系获工学博士学位。现在南京航空学院“机械工程”博士后流动站从事 CIMS 的科研工作, 主要研究方向为 FMS 建模、调度、控制、仿真, CIMS。



张晋格 1943 年生。1967 年毕业于东北工学院自控系。1980 年在哈尔滨工业大学电气工程系获工学硕士学位。现任哈尔滨工业大学电气工程系副教授、哈工大现代生产技术研究总师。主要研究方向有计算机控制、FMS 等。编写教材“计算机控制系统分析与设计。”近年来发表论文 30 余篇。



王炎 1932 年生于上海市松江县。1956 年毕业于哈尔滨工业大学, 现任该校电气工程系教授, 机器人研究所副所长。主要研究方向有最优控制、机器人控制与新型伺服系统等。目前承担了国家 863 计划智能机器人型号研制任务, 任总师。近年来发表论文 40 余篇。