

# 基于 EHLEP-N 模型的 FMS 实时 调度和控制<sup>1)</sup>

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<sup>[1]</sup>, 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)<sup>[2]</sup> 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)<sup>[3]</sup> 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)<sup>[3]</sup> 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)<sup>[4]</sup> 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)<sup>[5]</sup> 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。

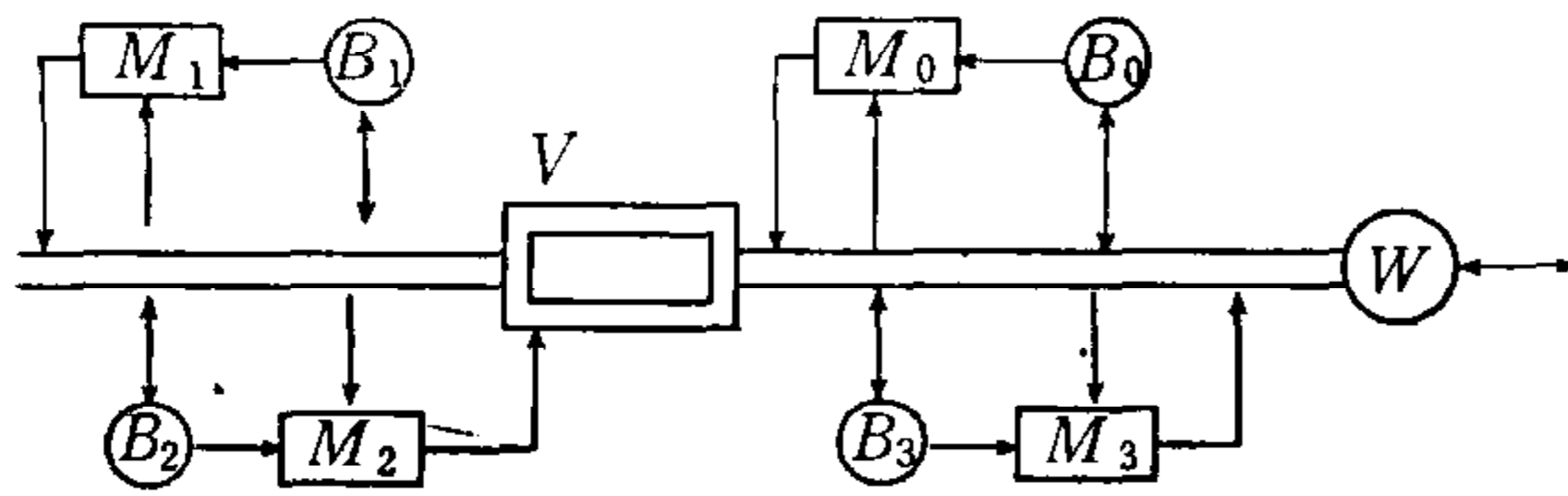


图 1 FMS 的布局

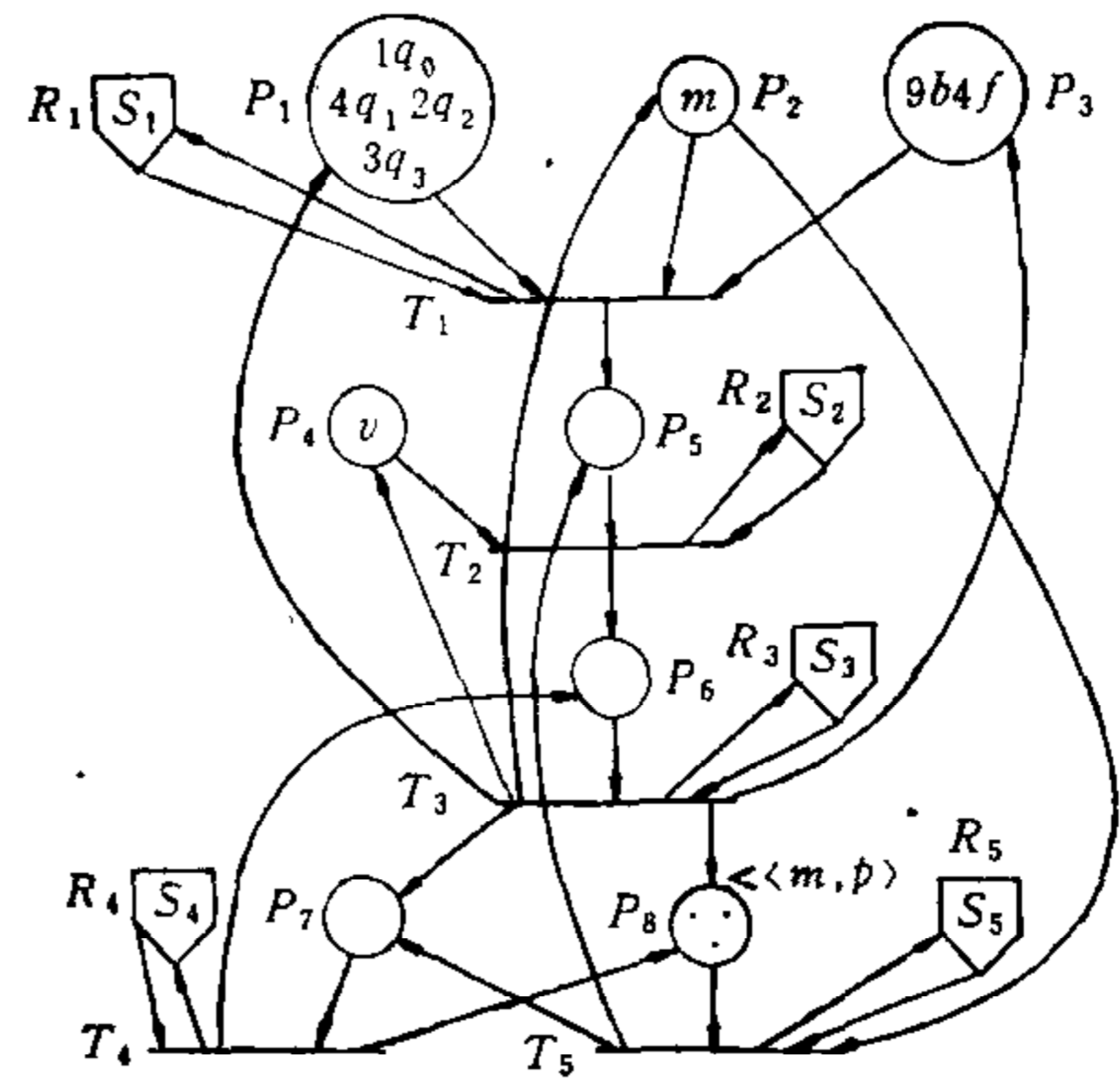


图 2 FMS 的 EHLEP-N 模型

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。

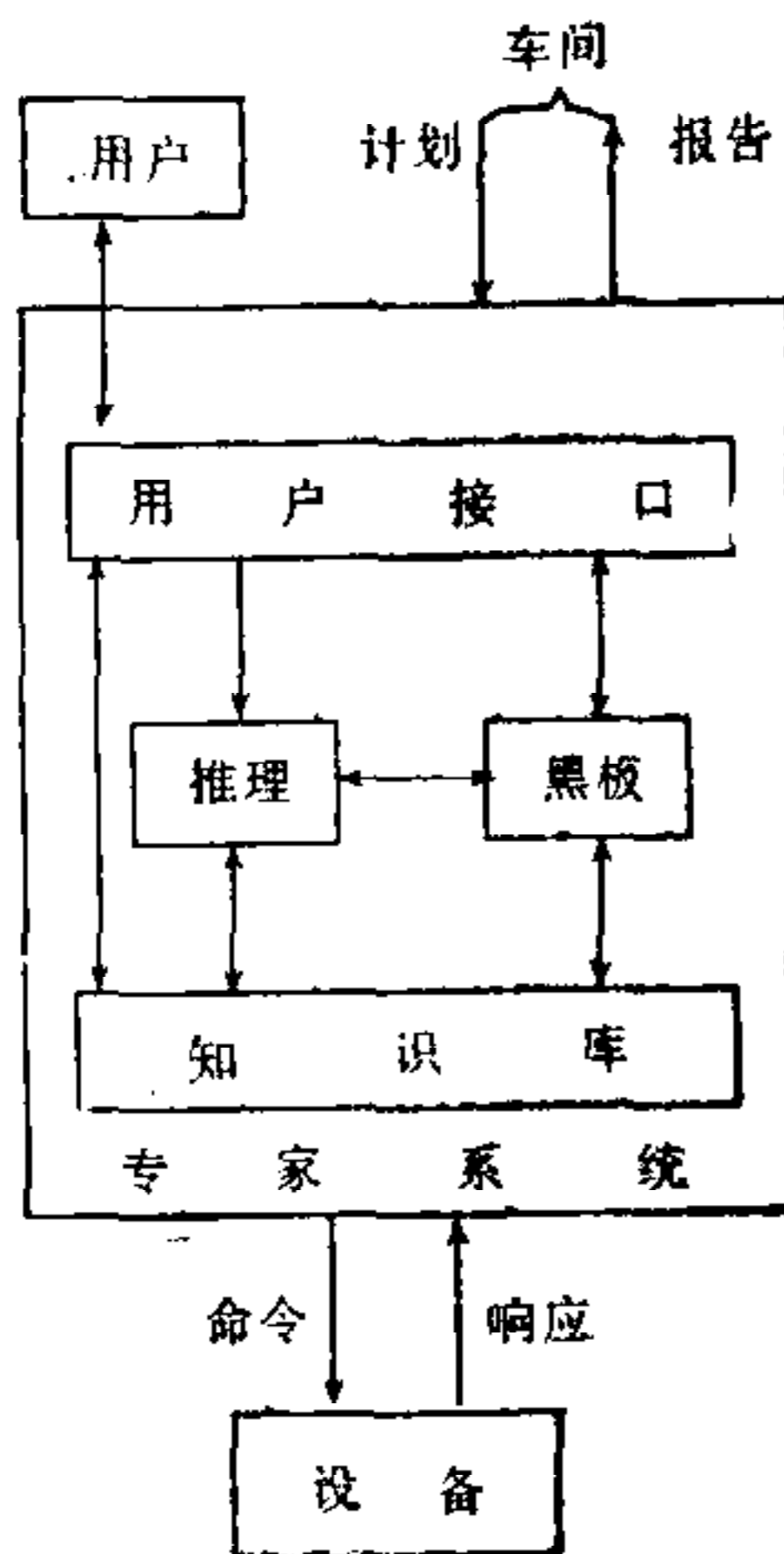


图 3 系统结构

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。