

基于受控 Petri 网的抽水蓄能机组工况转换控制 ——建模及实现

张永刚 叶鲁卿

(华中理工大学能源学院 430074 武汉)

摘 要 定义了一种受控 Petri 网,并对其中冲突的避免问题进行了探讨。针对抽水蓄能机组运行工况较多、工况转换复杂的特点,采用了受控 Petri 网技术对抽水蓄能机组的运行状态进行建模及分析,并用可编程控制器(PLC)加以实现。

关键词 受控 Petri 网 抽水蓄能机组 调速器 可编程控制器

分类号 TV 743 TP 13

0 引言

近年来,为了缓解电网中负荷的峰谷差,改善电网的结构,提高系统可靠运行的能力,全国各地有很多抽水蓄能电站正在建设或筹建。与常规的水电站机组相比,抽水蓄能电站机组具有运行工况多,工况转换复杂、频繁等特点。常规的水电站机组一般所处的稳定工况有静止、发电(包括空载)、调相等 3 种;而抽水蓄能电站机组由于既可在水轮机状态下运行,又可在水泵状态下运行,其稳定工况包括静止、发电、水轮机调相、抽水、水泵调相等 5 种。从理论上讲,这 5 种工况之间还有 20 种过渡工况。除了一些不具有实际意义的转换外,它们之间主要有 14 种工况转换,如图 1 所示。图中略去了一些故障工况及中间过渡工况。在每一种工况中,机组所处的系统结构不同,控制规律也不同。所以准确地对机组所处工况进行辨识,从而正确地对机组进行控制,并对外界的不正确的信息进行容错并报警,就成为抽水蓄能机组控制的重要任务。

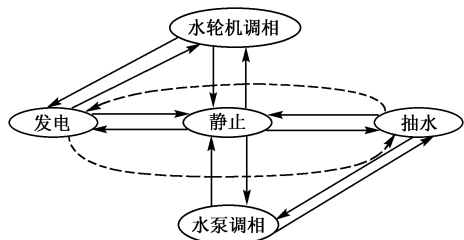


图 1 抽水蓄能机组工况转换简图

Fig. 1 Transition diagram of the pumped-storage set operating modes

本文采用受控 Petri 网(Controlled Petri Net,

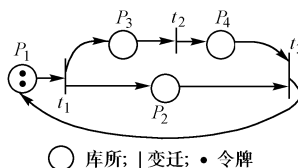
简称 CPN)技术对抽水蓄能机组调速器进行建模及分析,并用可编程控制器完成其控制功能。这种方法控制可靠,易于实现,并具有良好的故障检测功能。

1 受控 Petri 网

1.1 Petri 网简介^[1]

Petri 网是由德国学者 C. A. Petri 于 1962 年提出的一种系统建模工具,主要用于描述和研究信息处理系统。

图 2 为一个简单的 Petri 网模型。在图 2 中,共有 P_1, P_2, P_3, P_4 四个库所和 t_1, t_2, t_3 三个变迁。由库所到变迁及由变迁到库所的有向弧线分别表示变迁所需的输入库所和输出库所。在库所中出现的黑点为令牌(token),一个库所可以有一个或多个令牌,也可以没有令牌。Petri 网的状态就是由库所中的令牌分布状况决定的。如图 2 中 P_1 有两个令牌, P_2, P_3, P_4 中没有令牌。假定各弧的权都为 1,各库所的容量都为无穷,则变迁的引发规则为:当某变迁的所有输入库所中的令牌数大于输入弧线的权,并且所有输出库所中的令牌数加上输出弧线的权小于或等于库所的容量(关于变迁引发规则的确切定义见文献[1])时,可发生变迁。因为 P_1 中令牌数大于 1,且 P_2, P_3 的容量为无穷,则 t_1 可以发生变迁。 t_1 发生变迁后, P_1 的令牌数减 1,而 P_2, P_3 的令牌数加 1。其结果是 P_1 中有一个令牌, P_2, P_3 中各有一个令牌。



○ 库所; | 变迁; • 令牌

图 2 简单的 Petri 网模型

Fig. 2 A simple Petri net model

目前, Petri 网技术较为成功地应用于计算机性能分析、计算机集成制造系统(CIMS)、柔性制造系统(FMS)、系统可靠性分析、并程序计等领域。由于 Petri 网能很好地描述系统的并行性、异步性、分布性和不确定性,而且采用图形方式,直观清晰,又有精确的数学理论作基础,所以在系统分析与控制中得到了广泛的应用。

1.2 受控 Petri 网

受控 Petri 网是 Petri 网的一种扩展,它把外界的控制引入到 Petri 网中。Krogh, Ichikawa 等人通过在可控变迁上引入控制库所及其令牌数来影响系统行为^[2,3]。为了简化 Petri 网模型,本文将外部控制事件直接加于可控变迁之上,并引入条件函数 $C(i)$ 以增强其建模能力。这种方法虽然在直观性方面不如前者,但它简化了受控 Petri 网的结构,特别是当控制事件较多、控制较复杂时,若引入控制库所,则易使 Petri 网结构十分复杂。在建模能力上,两者是相同的。

定义 1 受控 Petri 网为如下的 10 元组: $\{P, T, A, K, W, M_0, E, \delta, C, G\}$ 。

其中, $P = \{P_1, P_2, \dots, P_m\} (m > 0)$ 是库所节点的有限集合; $T = T_U \cup T_C, T_C = \{t_1, t_2, \dots, t_{n_1}\} (n_1 > 0)$ 是可控变迁的有限集合, $T_U = \{t_1, t_2, \dots, t_{n_2}\} (n_2 > 0)$ 是不可控变迁的有限集合, $T_C \cap T_U = \emptyset$; $A \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ 是有向弧集; $W: A \rightarrow \mathbb{Z}^+$ 是各弧的权函数; $K: P \rightarrow \mathbb{Z}^+ \cup \{\infty\}$, 为库所的容量函数; $E = [e_1, e_2, \dots, e_k]^T$ 是可控变迁对应的外界事件矩阵, $e_i = 1$ 表示事件 i 有效, $e_i = 0$ 表示事件 i 无效; M_0 是一个初始标记; M 为某一时刻的受控 Petri 网标记; $\forall P_i \in P, M(P_i) \leq K(P_i)$; δ 为 $n_1 \times k$ 阶转换矩阵, 表示可控变迁触发所需的外部事件; $\delta(i, j) = 1$ 表明变迁 i 发生时事件 j 必须有效(为真或发生); $\delta(i, j) = 0$ 表示变迁 i 发生时事件 j 无直接作用; $\delta(i, j) = -1$ 表示变迁 i 发生时事件 j 必须无效(为假或未发生); 设 $\delta_i = [\delta_{i1}, \delta_{i2}, \dots, \delta_{ik}]$ 表示变迁 i 发生的外界条件; C 表示变迁可触发应满足的条件; $\forall t_i \in T, C(i) = 1$ 表示此变迁触发的条件已经满足; $C(i) = 0$ 表示此变迁触发的条件未满足; $C(i)$ 所对应的可以是一个条件或一组条件; $G: P \rightarrow \mathbb{Z}^+$ 为可控变迁发生应满足的事件数。

定义 2 $\forall x \in P \cup T$, 令 $\cdot X = \{y | (y, x) \in A\}$, 称 $\cdot X$ 为 x 的前集; 令 $X^\cdot = \{y | (x, y) \in A\}$, 称 $X^\cdot$ 为 x 的后集。

定义 3 若满足下列条件, 则称变迁 t_i 在 M 有发生权: $\forall P_j \in P$, 如果 $P_j \in \cdot t_i$, 且 $M(P_j) \geq W(P_j, t_i)$; 或者如果 $P_j \in t_i^\cdot$, 且 $M(P_j) + W(t_i, P_j) \leq$

$K(P_j)$ 。

定义 4 称可控变迁 t_i 在 $\{M, E\}$ 下被触发, 如果变迁 t_i 在 M 有发生权, 且 $\delta_i E = G(i), C(i) = 1$ 。

从以上一系列定义可知, 受控 Petri 网是由普通 Petri 网扩展而来的。它一方面把变迁分为可控变迁和不可控变迁, 其中不可控变迁的触发等同于普通 Petri 网, 而可控变迁的触发除满足普通 Petri 网的触发条件外, 还要求外部事件满足一定的要求(包括必须有效的事件及必须无效的事件), 而且还要满足一些相应的内部条件。这样定义的受控 Petri 网可以较好地满足大多数对状态转移的控制应用。下面, 给出一个受控 Petri 网的例子, 如图 3 所示。

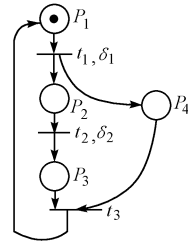


图 3 受控 Petri 网

Fig. 3 An example of CPN

这里, 令所有库所的容量 K_i 都为 1, 所有弧的权 $w(i)$ 都为 1, 初始标记 $M_0 = [1, 0, 0, 0]$, 变迁 t_1, t_2 为可控变迁, t_3 为不可控变迁, 外部事件集 $E = [e_1, e_2, e_3, e_4]^T$, 转换矩阵 δ 为 2×4 阶矩阵:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

可控变迁的条件 $C(1), C(2)$ 都恒为 1 (即无条件), $G(1) = 2, G(2) = 2$ 。在图中所示的初始状态下, t_1 有发生权, 当外部事件中至少有 e_1 发生(为 1), 且 e_3 未发生(为 -1)时, $\delta_1 E = G(1)$, 又因 $C(1) = 1$, 则 t_1 被触发。标记变为 $[0, 1, 0, 1]$ 。此时 t_2 有发生权, 当外部事件中至少有 e_1, e_4 发生(为真)时, $\delta_2 E = G(2)$, 又因 $C(2) = 1$, 则 t_2 被触发, 标记变为 $[0, 0, 1, 1]$ 。由于 t_3 为不可控变迁, 而且有发生权, 所以 t_3 将立即触发, 使标记返回初始标记 $[1, 0, 0, 0]$ 。受控 Petri 网具有比普通 Petri 网更强的建模能力, 适用范围较广。

关于冲撞、并发、混惑等概念的定义与一般 Petri 网类似, 请参阅文献[1]。这里针对控制过程中比较重要的冲突加以定义。

1.3 受控 Petri 网中冲突的定义及避免方法

$M[t_i >]$ 表示在 M 标记下, t_i 有发生权, $M[t_i > M']$ 表示在 M 标记下, t_i 触发形成标记 M' 。

定义 5 $M[S > M']$, 称 M' 是 M 可达的。这里 $S = \{t_i, \dots, t_j\}$ 为触发序列。

定义 6 如果 $\delta_i E = G(i), C(i) = 1$, 且 $M[t_i >]; \delta_j E = G(j), C(j) = 1$, 且 $M[t_j >]$; 而 $M[\{t_i, t_j\}] >$ 不成立, 则称 t_i, t_j 在标记为 M 时发生了冲突。图 4 就是一个冲突的例子。图中 t_1, t_2 都可触发, 但两者不能同时触发。一个变迁的触发使得另一个变迁不能触发, 而哪一个变迁触发则存在着任意性。冲突是个结构特性, 它由被建模的系统决定。

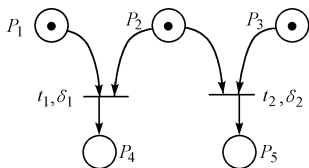


图 4 受控 Petri 网的冲突
Fig. 4 Conflict in the CPN

冲突发生之处要求外界对其进行严格的控制, 因为冲突时系统的运行具有随机性、不确定性。消除冲突的方法是设计冲突变迁所对应的事件 δ_i 和条件 $C(i)$, 使得任何事件矩阵 E 和条件 C 都不能同时满足冲突中的任意两个变迁的触发条件。即对于冲突变迁集 $T_1' = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$, 任意 E 和 C , 如果 $\delta_i E = G(i)$, 且 $C(i) = 1, t_i \in T_1', j \neq i$, 都有 $\delta_j E \neq G(j)$, 或 $C(j) \neq 1$ 。

1.4 “或”型及“IF, THEN”型外部事件的转换

在以上变迁所对应的外界事件 δ_i 的定义中可知, 各个事件 e_i 之间是“与”的关系, 只有当各事件全部满足时变迁才可触发。而事实上, 外部事件之间可以有其它类型的关系, 这些关系均可以通过分解使之成为“与”的形式。下面针对常见的两种情况加以讨论。

1.4.1 两个外部事件之间“或”的关系

即变迁 t_i 所对应的 δ_i 有两个事件 e_{j1}, e_{j2} , 两者满足其中一个即可, 如图 5(a) 中, 设 t_1 所对应的 δ_1 中含有这种关系的事件 e_{j1} 和 e_{j2} 。为了表示这种情况, 我们引入了中间库所和中间变迁, 并且不产生冲突, 如图 5(b) 所示, 引入中间库所 P_1' 和中间变迁 t_1', t_1'', t_1''' 。

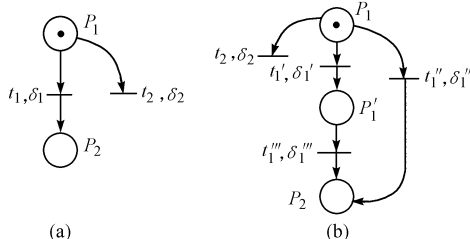


图 5 “或”型外部事件的转换
Fig. 5 Transition of the “OR” type external events

与 t_1 的条件 $C_1(1)$ 相同。设 $E = [e_1, \dots, e_{j1}, \dots, e_{j2}, \dots, e_k]^T, \delta_1' = [e_1, \dots, e_{j1}', \dots, e_{j2}', \dots, e_k], \delta_1'' = [e_1, \dots, e_{j1}'', \dots, e_{j2}'', \dots, e_k], \delta_1''' = [e_1, \dots, e_{j1}''', \dots, e_{j2}''', \dots, e_k]$ 。其中 $e_{j1}' = -1, e_{j2}' = 0; e_{j1}'' = 1, e_{j2}'' = 0; e_{j1}''' = -1, e_{j2}''' = 1$ 。

1.4.2 两个外部事件之间“IF, THEN”的关系

设 $E = [e_1, \dots, e_{j1}, \dots, e_{j2}, \dots, e_k]^T$ 。不失一般性, 令在 t_1 的触发条件中 e_{j1}, e_{j2} 的“IF THEN”关系为: 如果 e_{j1} 有效, 则 e_{j2} 必须有效。如图 6(a) 所示, 设 t_1 所对应的 δ_1 含有这种关系的事件 e_{j1}, e_{j2} 。在此, 我们引入中间库所 P_1' , 以及中间变迁 t_1', t_1'', t_1''' 。 t_1', t_1'', t_1''' 所对应的条件 $C_1'(1), C_1''(1), C_1'''(1)$ 与 t_1 的条件 $C_1(1)$ 相同。如图 6(b) 所示, 在 δ_1' 中, $e_{j1}' = 1, e_{j2}' = 0$; 在 δ_1'' 中, $e_{j1}'' = -1, e_{j2}'' = 0$; 在 δ_1''' 中, $e_{j1}''' = 1, e_{j2}''' = 1$ 。

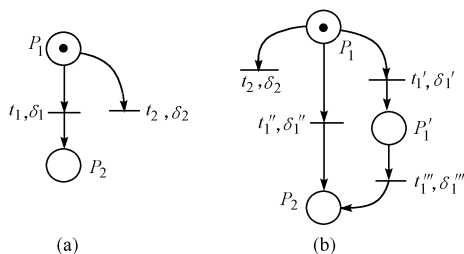
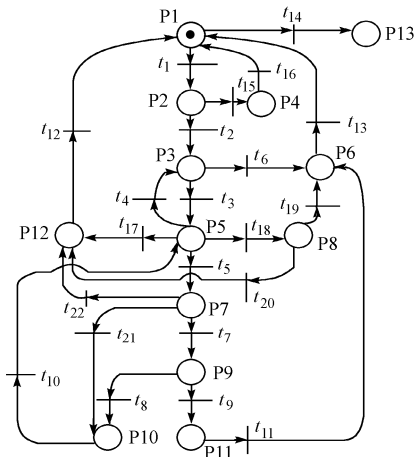


图 6 “IF, THEN”型外部事件的转换
Fig. 6 Transition of the “IF, THEN” type external events

2 抽水蓄能机组工况转换的建模与分析

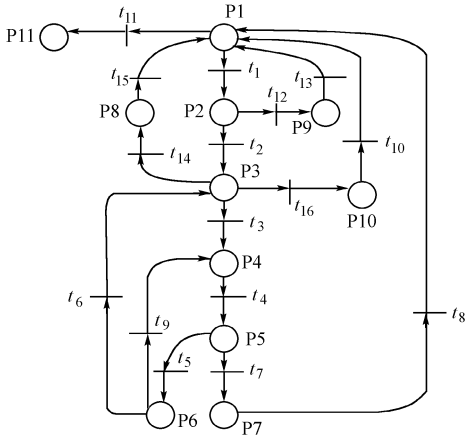
利用上面所定义的受控 Petri 网对抽水蓄能调速器进行建模。模型如图 7、图 8 所示。



P1 水轮机静止; P2 开机; P3 空载; P4 开机转停机; P5 发电
P6 空载转停机; P7 发电转调相; P8 发电转停机; P9 调相; P10 调相转发电
P11 调相转停机; P12 甩负荷; P13 水泵静止 (即为图 8 中的 P1)

图 7 抽水蓄能机组受控 Petri 网模型 (水轮机部分)
Fig. 7 The CPN model of the pumped-storage set (turbine part)

t_1', t_1'', t_1''' 所对应的条件 $C_1'(1), C_1''(1), C_1'''(1)$



P1 水泵静止; P2 水泵开机; P3 抽水; P4 抽水转调相; P5 水泵调相
P6 调相转抽水; P7 调相转停机; P8 卸载; P9 停机; P10 抽水转停机
P11 水轮机静止(即为图7中的P1)

图8 抽水蓄能机组受控 Petri 网模型(水泵部分)
Fig.8 The CPN model of the pumped-storage set (pump part)

为机组安全运行起见,不考虑抽水到发电之间的直接转换。两者之间的转换须经过静止工况,也就是说,水泵工况与水轮机工况只在静止时相互切换,所以在对系统建模时,将受控 Petri 网分成两部分:水轮机部分(图7)和水泵部分(图8),而静止状态分为水泵静止和水轮机静止。两部分只在静止时有联系(实际上,静止状态并不区分水泵静止和水轮机静止,这里是为了分析问题的方便人为附加的)。

根据现场的要求,外界事件来源于1个模拟量和6个开关量。模拟量为导叶开度 y ,开关量为水轮机状态 L_{tur} 、水泵状态 L_{pmp} 、油开关状态 L_{DL} 、停机令 L_{tj} 、调相令 L_{tx} 、开机令 L_{kj} 。

在此,由于抽水蓄能机组在某一时刻只能处于一种状态,所以应保证 Petri 网中始终保持一个令牌。令在初始状态 M_0 中所有的库所中只含有一个令牌,任一条弧的权 $w(i)=1$,且 $\forall t \in T, |t^+|=|t^-|$,则可保证在任一时刻,系统中只有一个令牌。在这种情况下,此 Petri 网模型是一个状态机(state machine)。在图7、图8中, Petri 网模型是安全的、结构 L_3 活性的(关于状态机、安全性、活性的定义见文献[4])。

下面,以水轮机状态为例加以分析。设外部事件 $E=\{L_{tur}, L_{pmp}, L_{DL}, L_{tj}, L_{tx}, L_{kj}\}$,则 δ 为一个 22×7 阶的矩阵,触发条件 $C(i)$ 是模拟量 y 的大小。在设计以上 Petri 网系统时,为了使系统运行安全可靠,我们特别注意对冲突点的控制,以保证在正确的控制下,系统可以消除冲突。由图7可见,在 t_2 与 t_{15} 之间; t_3 与 t_6 之间; t_4, t_{17}, t_5 与 t_{18} 之间; t_1 与 t_{14} 之间; t_{19} 与 t_{20} 之间; t_{21}, t_{22} 与 t_7 之间; t_8 与 t_9 之间存在着冲

突。为了消除冲突,必须使冲突中的任意两个变迁(例如 t_i, t_j)满足下面的关系:

$$C_i \cap C_j = \emptyset; \text{或对于 } \forall E, \text{ 如果 } \delta_i E = G(i), \text{ 则 } \delta_j E \neq G(j)。$$

表1列出了各冲突变迁的 δ_i 与 C_i 。

表1 各冲突变迁对应的事件及条件
Table 1 The events and conditions of the conflicting transitions

变迁	L_{tur}	L_{pmp}	L_{DL}	L_{tj}	L_{tx}	L_{kj}	条件 C
t_2	0	0	-1	-1	0	0	$y \in \{y_0 - \Delta y_0, y_0 + \Delta y_0\}$
t_{15}	0	0	-1	1	0	0	1
t_3	0	0	1	-1	0	0	$y \in \{y_0 - \Delta y_0, y_0 + \Delta y_0\}$
t_6	0	0	-1	1	0	0	$y \in \{y_0 - \Delta y_0, y_0 + \Delta y_0\}$
t_4	0	0	-1	0	0	0	$y \in \{y_0 - \Delta y_0, y_0 + \Delta y_0\}$
t_5	0	0	1	-1	1	0	$y \geq y_0 + \Delta y_0$
t_{17}	0	0	-1	0	0	0	$y \in \{y_0 - \Delta y_0, y_0 + \Delta y_0\}$
t_{18}	0	0	1	1	0	0	$y \geq y_0 - \Delta y_0$
t_1	1	0	0	0	0	1	$y \leq \delta_y$
t_{14}	0	1	0	0	0	0	$y \leq \delta_y$
t_{19}	0	0	-1	1	0	0	$y \in \{y_0 - \Delta y_0, y_0 + \Delta y_0\}$
t_{20}	0	0	-1	0	0	0	$y \geq y_0 + \Delta y_0$
t_7	0	0	1	-1	0	0	$y \leq \delta_y$
t_{21}	0	0	1	1	0	0	$y < y_0 + \Delta y_0$
t_{22}	0	0	-1	0	0	0	$y \geq y_0 - \Delta y_0$
t_8	0	0	1	-1	-1	0	$y \leq \delta_y$
t_9	0	0	1	1	0	0	$y \leq \delta_y$

注: y 为导叶开度; y_0 为空载开度; Δy_0 为空载开度范围;
 δ_y 为零开度。

对于图中的其它变迁同样可以写出相应的 E_i 和 C_i ,限于篇幅,这里不再列出。现以发电状态P5加以说明(参见图7)。当机组处于发电状态时,如果油开关断开(为-1),而导叶在空载范围内(条件C(4)为1)时,机组转入空载状态P3;如果油开关闭合,无停机令和油调相令,而导叶在空载开度或空载开度以上(C(5)为1)时,机组转入发电转调相状态P7;如果油开关闭合,有停机令,而导叶在空载开度或空载开度以上(C(18)为1)时,机组转入发电转停机状态;如果油开关断开,而导叶在空载开度以上(C(17)为1)时,机组转入甩负荷状态。

采用受控 Petri 网技术可以清晰直观地利用图形方式对复杂系统进行建模、分析并进而设计控制程序。在此应用中,由于 Petri 网模型等同於一个状态机,从而在一定程度上简化了问题。而在其它很多工业控制问题中,受控 Petri 网不能等效于状态机,其控制要复杂一些。

3 受控 Petri 网的 PLC 实现

以上针对调速器的要求对抽水蓄能机组的运行工况进行了建模与分析,对于这种状态转换复杂的

状态机,使用一般的编程手段难以保证准确性。解决这一问题的途径有两种:一是使用面向对象编程技术,此方法适合于 PC 机控制;另一种是采用步进顺控指令,此方法适合于 PLC(可编程控制器)控制。

在本项目中,我们采用了三菱公司的 PLC 来实现对抽水蓄能机组的基本检测与控制。可编程控制器的步进顺控指令十分适合对受控 Petri 网程序的编制(关于步进顺控指令的内容参见文献[5])。现举例如下(见图 9,为简洁起见,图中对实际程序进行了简化)。此时,机组处于发电工况 S102,使用步进顺控指令必须保证每个时刻设备只处于一种状态。当油开关闭合、无停机令和调相令时,进行调节控制(通过调用子程序);当油开关断开、导叶开度在空载开度以上(M123 成立)时,进入甩负荷状态;当油开关断开、导叶开度在空载开度范围内(M122 成立)时,进入空载状态。最后,还可以根据目前所处的状态,对外界事件进行故障检测及报警。

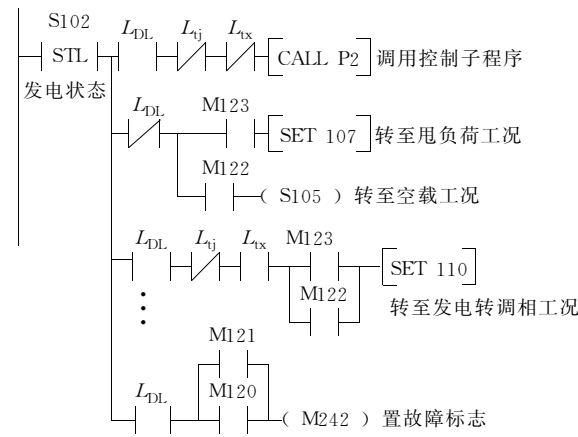


图9 步进顺控方式编程举例

Fig. 9 An example of the step sequential programming

4 结语

本课题是华中理工大学与东方电机股份有限公司合作为响洪甸抽水蓄能电站设计一台调速器。其中,PLC处于辅助控制与保护的位置。采用受控

Petri 网技术保证了建模的准确性和控制的可靠性,并提高了实现的效率。

本系统经过调试与仿真运行,证实其可以在各种稳定工况、过渡工况以及故障工况下实现准确、安全、可靠的运行。对以下几点还可作进一步的讨论。

a. 建模的每一个库所都代表了一种工况,而这种工况在模型中应看作一个连续变量动态系统(CVDS),并可以用一组微分方程来表示^[6]。如果考虑此点,即可构成 HPN(混合 Petri 网)。对此将作进一步研究。

b. 本文所提出的受控 Petri 网定义,具有一定的普遍性,但也有其局限性。可以加以修改,以适应特定领域的要求。

c. 使用 PC 机(如工控机)的用户,采用 OOP 技术,也可以很好地完成受控 Petri 网模型的编程。

参考文献

- 1 袁崇义. Petri 网. 南京:东南大学,1981
- 2 Krogh B H. Controlled Petri Nets and Maximally Permissive Feedback Logic. In: Proc 25th Annual Allerton Conf. University of Illinois;1987
- 3 Ichikawa A, Hiraishi K. Analysis and Control of Discrete Event Systems Represented by Petri Nets, in Discrete Event Systems: Models and Applications. LNCS, 1986, 44(4)
- 4 彭永进,肖雁鸿,彭 崇,等. 离散事件动态系统. 长沙:湖南科学技术出版社,1994
- 5 钟肇新,彭 侃. 可编程控制器原理及应用. 广州:华南理工大学出版社,1992
- 6 徐心和,李政国,李彦平. 一类混杂系统的广义 Petri 网模型. 自动化学报,1997,23(3):297~301

张永刚,男,1972 年生,博士研究生,主要研究方向为水电站自动控制技术、Petri 网技术、CMMS-IAMS 技术在水电系统的应用。

叶鲁卿,男,1935 年生,教授,博士生导师,长期从事水电站微计算机控制理论及应用的研究。

CPN-BASED CONTROL OF OPERATING MODE TRANSITION FOR PUMPED-STORAGE SET Modeling And Implementation

Zhang Yonggang, Ye Luqing (Huazhong University of Science and Technology, 430074, Wuhan, China)

Abstract A kind of Controlled Petri Net (CPN) is defined. The method of conflict resolution is discussed. There are many operating modes in the pumped-storage set, and the transitions between the modes are frequent and complex. So the Controlled Petri Net is adopted to model and analyze the operating modes of the pumped-storage set. The programmable logic controller (PLC) is applied to implement the control of the operating mode transitions.

Keywords Controlled Petri Net (CPN) pumped-storage set governor programmable logic controller (PLC)