

Research on Modeling of Relay Control Circuit Based on High-Level Petri Net*

Xinglong Pan, Guo He

College of Naval Architecture and Power, Naval University of Engineering, Wuhan
Email: paxilo52@tom.com

Received: Jun. 18th, 2012; revised: Jul. 3rd, 2012; accepted: Jul. 12th, 2012

Abstract: A method of modeling and analyzing a relay control circuit is proposed by using colored Petri net with inhibitor arcs, based on the peculiarity of the relay control circuit. The proposed method is applied to modeling and simulating a certain marine diesel engine control system, which is a typical relay control circuit. Simulation results indicate that this circuit can be modeled and described by using the given colored Petri net with inhibitor arcs exactly. And the work procedures, input and output characteristics can be analyzed by simulating the corresponding Petri net model on Matlab platform. It is concluded that the research work presents an effective method in modeling and analyzing a relay control circuit, and the new method is highly practical.

Keywords: Colored Petri Net with Inhibitor Arcs; Relay Control Circuit; Modeling; Simulation Analysis

基于高级 Petri 网的继电器控制电路建模方法研究*

潘兴隆, 贺 国

海军工程大学船舶与动力学院, 武汉
Email: paxilo52@tom.com

收稿日期: 2012 年 6 月 18 日; 修回日期: 2012 年 7 月 3 日; 录用日期: 2012 年 7 月 12 日

摘 要: 根据继电器控制电路的特点, 给出了利用带抑制弧的着色 Petri 网对继电器控制电路进行建模和分析的方法, 并将其应用于某型船用柴油机控制系统的一典型继电器控制电路。建模及仿真分析结果表明, 给出的带抑制弧的着色 Petri 网模型能对继电器控制电路进行准确的数学描述, 利用建立的 Petri 网模型, 借助 Matlab 平台, 可以对被测电路的工作过程、输入输出特性等进行分析, 为继电器控制电路的建模和特性分析提供了一种新的有效方法。

关键词: 带抑制弧的着色 Petri 网; 继电器控制电路; 建模; 仿真分析

1. 引言

继电器是一种当输入量的变化达到规定要求时, 在输出电路中使被控量发生预定的阶跃变化的一种电器。具有响应时间短、工作稳定、体积小、使用寿命长等优点, 在电路中起着自动调节、安全保护、电路转换等功能, 广泛应用于自动控制、机电一体化、电力电子、测量和通信等装置中。

由于继电器主要用于实施逻辑控制, 其电路状态的改变通常在离散时间点上由继电器触点逻辑状态的切换来驱动, 是一种典型的离散事件系统, 不能用传统的微分方程和差分方程对其进行数学描述。目前, 对继电器控制电路并没有成熟的建模和分析方法。文献[1]提出的总线电流法、文献[2]提出的定性推理技术等仅限于理论研究, 均不能利用计算机进行建模与仿真分析。文献[3]提出的基于数字电路模型的测

*资助信息: 海军工程大学博士研究生创新基金(HGBSJJ2011003)。

试技术虽然适合于用计算机进行自动测试,但并没有给出获取被测电路正常输出响应矩阵的快速有效方法。

Petri 网是一种适合于描述离散并发系统的数学模型,既有直观的图形描述,又具有严格的数学表达方式和丰富的系统行为分析技术,广泛应用于离散事件系统建模、 workflow 管理、并行程序设计、协议验证等领域^[4-9]。本文结合继电器控制电路的特点,给出一种带抑制弧的着色 Petri 网模型和将继电器控制电路转换为 Petri 网模型的方法,并将其应用于某型船用柴油机控制系统一典型继电器控制电路的建模与仿真分析。

2. 带抑制弧的着色 Petri 网模型

由于基本 Petri 网对系统行为的模拟能力不能达到标准图灵机的水平,不能满足某些系统的建模需求,因此需要对基本 Petri 网模型进行扩充,使之具备与图灵机同样强的模拟能力^[5]。带抑制弧的着色 Petri 网是一种高级 Petri 网,除基本 Petri 网所具有的库所、变迁、连接库所和变迁的有向弧外,还包括抑制弧、颜色集等,且库所容量和库所状态标识集是用一个向量而不是数字来表示的,其模型通常定义为如下八元组^[4-8]:

$$PN = (P, T; F, I, C, M, K, W) \quad (1)$$

其中, P 为系统的库所集,通常包括初始库所、中间库所和终止库所,表示系统各组成部分可能所处的状态,每个库所用 p_i 表示。

T 为系统的变迁集,表示系统中可能发生的导致系统状态发生改变的事件,每个变迁用 t_i 表示。

$F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ 是系统的有向弧集,称为网 PN 的流关系。

$I \subseteq P \times T$ 称为抑制弧集, $I \cap F = \Phi$, Φ 为空集,即, $\forall p \in P \wedge \forall t \in T: (p, t) \in F \rightarrow (p, t) \notin I$ 。

抑制弧集 I 与有向弧集 F 的区别在于,对于含有抑制弧 (p_j, t_i) 的变迁 t_i ,其触发条件除了要满足与 t_i 相关的有向弧集的触发条件外,还必须满足 p_j 中的标识数为 0,即,带抑制弧的库所中的标识会对变迁的发生起抑制作用,因此,称为抑制弧。在 Petri 网图形表示中,有向弧 F 用箭头表示,而抑制弧 I 则将箭头换成一个小圆圈表示。

$C = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$ 是一个有限颜色集,用于区分库所中的不同标识。

M 是库所集 P 到 k 维非负整数向量集的映射,即库所中带 k 种颜色的状态标识向量集,每一个状态标识向量 $M(p_i) = [c_1, c_2, \dots, c_k]$ 。

K 为库所的容量函数,库所 p_i 的容量用 $K(p_i)$ 表示, $\forall p_i \in P, M(p_i) \leq K(p_i)$ 。

W 是有向弧集 F 抑制弧集 I 到 k 维非负整数向量集的映射,即带 k 种颜色的权向量集,每一个权向量 $w = [c_1, c_2, \dots, c_k]$ 。库所 p_i 到变迁 t_j 的权函数用 w_{ij} 表示;变迁 t_i 到库所 p_j 的权函数用 w'_{ji} 表示。

定义 $I(t_i) = \{p_j \in P: (p_j, t_i) \in (F \cup I)\}$,
 $O(t_i) = \{p_j \in P: (t_i, p_j) \in F\}$ 分别为变迁 t_i 的输入库所集和输出库所集。

不包含抑制弧的变迁 t_i 的触发条件定义如下:

$$\begin{cases} M(p_i) \geq w_{ji}, & p_j \in I(t_i) \\ M(p_i) + w'_{ji} \leq K(p_j), & p_j \in \{Q(t_i) - I(t_i)\} \\ M(p_i) + w'_{ji} - w_{ji} \leq K(p_j), & p_j \in \{Q(t_i) \cap I(t_i)\} \end{cases} \quad (2)$$

变迁 t_i 触发后,库所 p_j 的标识数由 $M(p_j)$ 变为

$$M'(p_j) = \begin{cases} M(p_j) - w_{ji}, & p_j \in \{I(t_i) - Q(t_i)\} \\ M(p_j) + w'_{ji}, & p_j \in \{Q(t_i) - I(t_i)\} \\ M(p_j) + w'_{ji} - w_{ji}, & p_j \in \{I(t_i) \cap Q(t_i)\} \\ M(p_j), & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

对于含抑制弧的变迁 t_i ,其触发条件除了要满足式(2)外,还必须满足

$$M(p_j) = 0, (p_j, t_i) \in I \quad (4)$$

变迁 t_i 发生后,带抑制弧的库所内标识数保持不变,仍为 0,其余库所内标识数通过式(3)得到。

3. 继电器控制电路的 Petri 网模型

继电器控制电路通常由常开触点、常闭触点,以及由此组合形成的串联触点、并联触点等基本单元构成逻辑控制电路。将其转换为 Petri 网模型的方法如下:

继电器线圈得电为“1”,失电为“0”;触点闭合或触点所在支路接通为“1”,触点断开或触点所在支路断路为“0”。

在 Petri 网模型中, 继电器线圈、触点和支路状态用库所表示, 库所中的标识数大于 0 表示继电器线圈得电或触点、支路接通; 库所中的标识数为 0 表示继电器线圈失电或触点、支路断路。线圈的得失电、触点状态、支路状态的切换用变迁表示。

3.1. 常开触点模型

常开触点的 Petri 网模型如图 1 所示。

原始继电器电路的含义是: $J1_1$ 代表继电器 $J1$ 的一个常开触点, 当继电器 $J1$ 的线圈得电时, 其常开触点 $J1_1$ 闭合, z_1 与 z_2 间支路接通; 当继电器 $J1$ 的线圈失电时, $J1_1$ 断开, z_1 与 z_2 间支路断路。

在相应的 Petri 网模型中, 库所 p_1 代表继电器 $J1$ 线圈的状态; 库所 p_2 代表触点 $J1_1$ 的状态; 变迁 t_1 代表继电器 $J1$ 线圈得电或失电时, 触点 $J1_1$ 发生状态切换的动作事件。根据式(2)和(3), 当线圈 $J1$ 得电时, 库所 p_1 中的标识数为 1, 变迁 t_1 触发。变迁 t_1 触发后, 库所 p_2 中的标识数变为 1, p_1 中的标识数仍为 1, 表示线圈 $J1$ 得电, 触点 $J1_1$ 闭合, z_1 与 z_2 间支路接通。当线圈 $J1$ 失电时, 库所 p_1 中的标识数为 0, 变迁 t_1 不能触发, 库所 p_2 中的标识数为 0, 表示线圈 $J1$ 失电, 触点 $J1_1$ 断开, z_1 与 z_2 间支路断路。

3.2. 常闭触点模型

常闭触点的 Petri 网模型如图 2 所示。

在 Petri 网模型中, 库所 p_1 代表继电器 $J1$ 线圈的状态; 库所 p_2 代表触点 $J1_1$ 的状态; 变迁 t_1 代表 $J1$ 线圈得电或失电时, 触点 $J1_1$ 发生状态切换的事件。与常开触点不同的是, 常闭触点的 Petri 网模型中, 库所 p_1 与变迁 t_1 之间仅通过抑制弧相连。根据式(2)~(4), 当线圈 $J1$ 得电时, 库所 p_1 中的标识数为 1, 变迁 t_1 受抑制, 不能触发, 所以库所 p_2 中的标识数为 0,

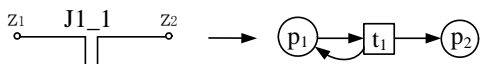


Figure 1. Petri net model of normal open contact
图 1. 常开触点的 Petri 网模型

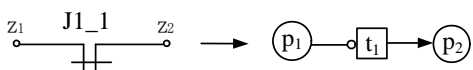


Figure 2. Petri net model of normal closed contact
图 2. 常闭触点的 Petri 网模型

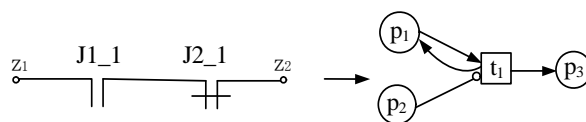
表示线圈 $J1$ 得电, 常闭触点 $J1_1$ 断开, z_1 与 z_2 间支路断路。当线圈 $J1$ 失电时, p_1 中的标识数变为 0, 变迁 t_1 触发, 库所 p_2 中的标识数变为 1, 表示线圈 $J1$ 失电, 常闭触点 $J1_1$ 闭合, z_1 与 z_2 间支路接通。

3.3. 串联触点模型

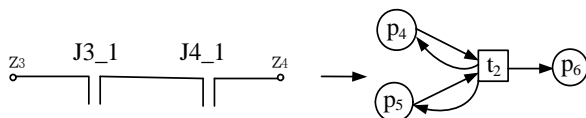
基本的继电器串联触点模型有三类: 常开触点与常闭触点构成的串联触点模型、单纯常开触点构成的串联触点模型、单纯常闭触点构成的串联触点模型。三类串联触点转换为 Petri 网的模型如图 3 所示。

上述三类串联触点的 Petri 网模型结构及含义类似。下面以图 3(a)常开触点与常闭触点构成的串联触点模型为例进行分析。

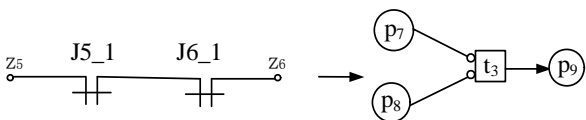
在 Petri 网模型中, 库所 p_1 与变迁 t_1 之间通过有向弧相连, 而库所 p_2 与变迁 t_1 之间通过抑制弧相连。根据式(2)和式(4)定义的带抑制弧的变迁的触发条件, 当且仅当库所 p_1 的标识数不为 0, 而 p_2 的标识数为 0(继电器 $J1$ 线圈得电, $J2$ 线圈失电, 触点 $J1_1$ 与 $J2_1$ 均闭合)时, 变迁 t_1 才能触发。变迁 t_1 触发后, 库所 p_1 与 p_2 中的标识数保持不变(继电器 $J1$ 与 $J2$ 线圈状态不变), 库所 p_3 中的标识数由 0 变为 1, 表示 z_1 与 z_2 间支路接通。库所 p_1 与 p_2 的标识数不满足式(2)和式(4)定义的变迁触发条件(p_1 的标识数为 0; 或 p_2 的标识数不为 0; 或 p_1 的标识数为 0, 同时 p_2 的标识数不为 0)时, 变迁 t_1 不能发生, 库所 p_3 的标识数为 0, 表示 z_1 与 z_2 间支路断路。



(a) 常开触点与常闭触点构成的串联触点模型



(b) 两个常开触点构成的串联触点模型



(c) 两个常闭触点构成的串联触点模型

Figure 3. Petri net model of series contacts
图 3. 串联触点的 Petri 网模型

3.4. 并联触点模型

与串联触点模型类似，基本的继电器并联触点模型也有三类：常开触点与常闭触点构成的并联触点模型、单纯常开触点构成的并联触点模型、单纯常闭触点构成的并联触点模型。三类并联触点转换为 Petri 网的模型如图 4 所示。

上述三类并联触点的 Petri 网模型结构及含义类似。下面以图 4(a)常开触点与常闭触点构成的并联触点模型为例进行分析。

在 Petri 网模型中，库所 p_1 与变迁 t_1 之间通过有向弧相连，而库所 p_2 与变迁 t_2 之间通过抑制弧相连。根据式(2)和式(4)定义的带抑制弧的变迁的触发条件，当库所 p_1 中的标识数不为 0(继电器 $J1$ 线圈得电，常开触点 $J1_1$ 闭合)，或库所 p_2 中的标识数为 0(继电器 $J2$ 线圈失电，常闭触点 $J2_1$ 闭合)时，变迁 t_1 或 t_2 触发，库所 p_3 中的标识数不为 0，表示 z_1 与 z_2 间支路接通。当且仅当库所 p_1 的标识数为 0(继电器 $J1$ 线圈失电，常开触点 $J1_1$ 断开)，而库所 p_2 的标识数不为 0(继电器 $J2$ 线圈得电，常闭触点 $J2_1$ 断开)时，库所 p_3 中的标识数为 0，表示 z_1 与 z_2 间支路断路。

4. 带抑制弧的着色 Petri 网模型分析方法

将继电器控制电路转换为带抑制弧的 Petri 网模型后，可以利用可达树分析法、状态方程分析法、

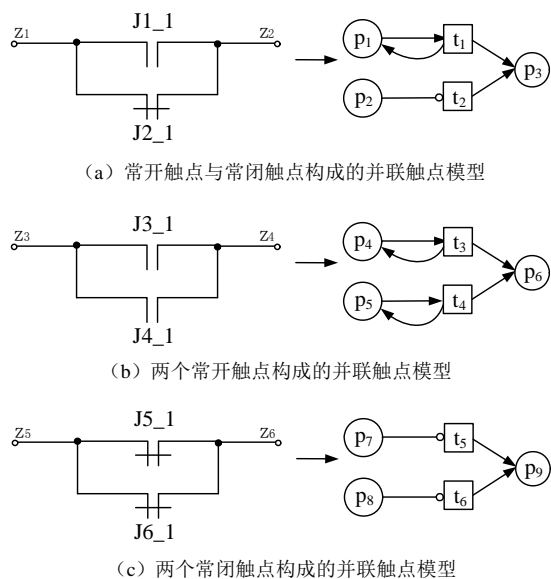


Figure 4. Petri net model of parallel contacts
图 4. 并联触点的 Petri 网模型

仿真分析法等对建立的 Petri 网模型进行分析。然而，当对一个由不同继电器构成的控制电路进行分析时，由于转换后得到的带抑制弧的 Petri 网模型中不同库所中的标识不具有可区分性，应用该模型进行分析时，仅能得到某一支路接通或断开的状态，而不能对导致该支路接通或断开的具体原因进行分析。也就是说，仅仅通过对带抑制弧的 Petri 网模型进行分析，不能得到具体是哪些继电器的状态变化导致该支路接通或断开。显然，要对继电器控制电路进行更深入的分析，甚至进行故障诊断，仅通过对上述带抑制弧的 Petri 网模型进行分析是无法实现的。原因在于，上述模型中不同库所中的标识不具有可区分性，因此也就无法对每个库所所对应的继电器状态进行跟踪分析。

利用(1)式定义的带抑制弧的着色 Petri 网模型，将不同库所中的标识赋予不同的颜色，各有向弧和抑制弧上的权函数也用相应的颜色向量表示，这样就能区分库所中的不同标识，进而可以对各继电器的状态进行跟踪分析，实现继电器控制电路的精确建模及分析。

下面以图 4 中(a)常开触点与常闭触点构成的并联触点模型为例，给出利用带抑制弧的着色 Petri 网模型对并联支路进行分析的方法。

首先，将库所 p_1 与 p_2 的标识用不同的颜色表示。设颜色集 $C = \{c_2, c_1\}$ $c_i \in \{0, 1\}, i = 1, 2$ ，用二进制颜色标识向量 $M_1 = [0 \ c_1]$ 与 $M_2 = [c_2 \ 0]$ 分别表示库所 p_1 与 p_2 的状态。根据式(1)~(4)得到并联触点带抑制弧的着色 Petri 网二进制表示模型，如图 5(a)所示。为简化着色 Petri 网的运算，利用文献[8]给出的方法将该二进制 Petri 网模型中的二进制向量转换为十进制数进行运算，转换后的十进制表示模型如图 5(b)所示。

例如， $M_1 = [0 \ 1]$ 转换为十进制数为 1，表示继电器 $J1$ 线圈得电，常开触点 $J1_1$ 闭合； $M_2 = [1 \ 0]$ 转换为十进制数为 2，表示继电器 $J2$ 线圈得电，常闭

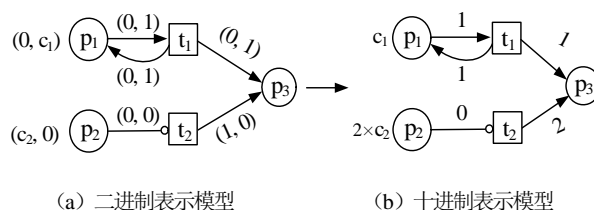


Figure 5. Colored Petri net with inhibitor arcs of parallel contacts
图 5. 并联触点带抑制弧的着色 Petri 网模型

触点 $J2_1$ 断开。如果对建立的着色 Petri 网模型进行仿真分析后库所 p_3 的标志数为 3, 则对应的颜色集向量 $M_3 = [c'_2 \ c'_1] = [1 \ 1]$, 表示库所 p_3 的结果是由 p_1 与 p_2 中的标识共同引起的。即 $J1_1$ 和 $J2_1$ 两条支路都接通(继电器 $J1$ 线圈得电, $J2$ 线圈失电)。如果 p_3 的颜色集向量 $M_3 = [c'_2 \ c'_1] = [1 \ 0]$, 则说明库所 p_3 的结果是由 p_2 中的标识引起的, 即继电器 $J2$ 失电, 常闭触点 $J2_1$ 闭合导致 z_1 与 z_2 间支路接通。同理, 如果 $M_3 = [c'_2 \ c'_1] = [0 \ 1]$, 则说明库所 p_3 的结果是由 p_1 中的标识引起的, 即继电器 $J1$ 得电, 常开触点 $J1_1$ 闭合导致 z_1 与 z_2 间支路接通。

5. 继电器控制电路实例分析

某船用柴油机控制系统由大量继电器组成, 用于对柴油机的盘车、启动、停机、调速等实施复杂的逻辑控制, 并具有实时监测、报警和连锁保护等功能^[8]。以文献[3]中介绍的部分主控电路的 y_1 支路为例, 利用给出的带抑制弧的着色 Petri 模型对该继电器控制电路进行建模和仿真分析。

5.1. 电路原理图及其带抑制弧的着色 Petri 网模型

y_1 支路电路原理如图 6 所示。

如图 6 所示, $J5_3$ 、 $J4_3$ 、 $J3_4$ 分别是继电器 $J5$ 、 $J4$ 、 $J3$ 的一组常开触点, $J6_2$ 是继电器 $J6$ 的一组常闭触点。根据给出的继电器电路转换模型, 将图 6 所示继电器控制电路转换为带抑制弧的着色 Petri 网模型, 如图 7 所示。

其中, 库所 p_1 、 p_2 、 p_3 、 p_4 分别用于描述继电器 $J5$ 、 $J6$ 、 $J4$ 、 $J3$ 的状态, 库所标识用二进制颜色向量集 $M = [c_4 \ c_3 \ c_2 \ c_1]$ 表示, 其中, $c_i \in \{0, 1\}, i=1, 2, 3, 4$, 表示库所 p_i 的标识。库所 p_5

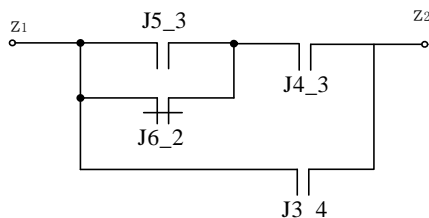


Figure 6. The circuit schematic diagram for y_1 branch of a relay control system
图 6. 某继电器控制系统 y_1 支路电路原理图

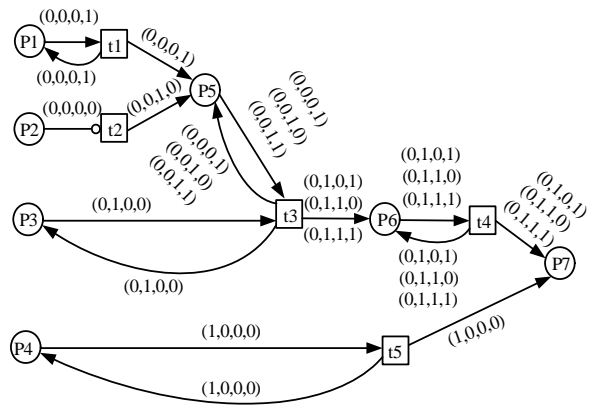


Figure 7. Binary colored Petri net model of transformed y_1 branch
图 7. 转换后 y_1 支路二进制着色 Petri 网模型

表示并联触点 $J5_3$ 与 $J6_2$ 支路的通断状态, 当该组并联触点所在支路处于接通状态时, 库所 p_5 内的标识数不为 0(具体数据根据 $J5_3$ 与 $J6_2$ 的通断状态而定); 当该组并联触点所在支路处于断路状态时(触点 $J5_3$ 与 $J6_2$ 均断开), 库所 p_5 内的标识数为 0。库所 p_6 表示上述并联支路与触点 $J4_3$ 形成的串联支路的通断状态, 当库所 p_6 的标识数不为 0 时, 表示该串联支路处于接通状态, 否则处于断路状态。库所 p_7 用于描述整个 y_1 支路的通断状态, 当 p_7 的标识数不为 0 时, 表示 y_1 支路处于接通状态, p_7 的标识数等于 0 时, 表示 y_1 支路处于断路状态。

根据式(1)~(4), 设有向弧与抑制弧上的权向量集 $W = [c_4 \ c_3 \ c_2 \ c_1]$, $c_i \in \{0, 1\}, i=1, 2, 3, 4$, 每个权向量的具体数值如图 7 所示。由于初始条件的不同, 有向弧上的权向量可能不同, 反映在图 7 中就是有的有向弧上含有不止 1 个权向量。但对于确定的初始条件和变迁触发条件, 权向量是唯一的。例如, 从库所 p_5 到变迁 t_3 的有向弧上有 3 个权向量 $[0 \ 0 \ 0 \ 1]$ 、 $[0 \ 0 \ 1 \ 0]$ 和 $[0 \ 0 \ 1 \ 1]$, 分别对应只有变迁 t_1 触发、只有变迁 t_2 触发和变迁 t_1 与 t_2 都触发的情形。

为简化计算, 根据文献[8]给出的方法, 将二进制权向量转换为十进制数值表示, 如图 8 所示。

5.2. 仿真分析

对 Petri 网模型进行分析的方法和工具有很多, 如可达树分析法、状态方程分析法、仿真分析法等。本文在 Matlab 平台下基于 GPenSIM 工具箱对建立的带抑制弧的着色 Petri 网模型进行仿真分析^[10]。

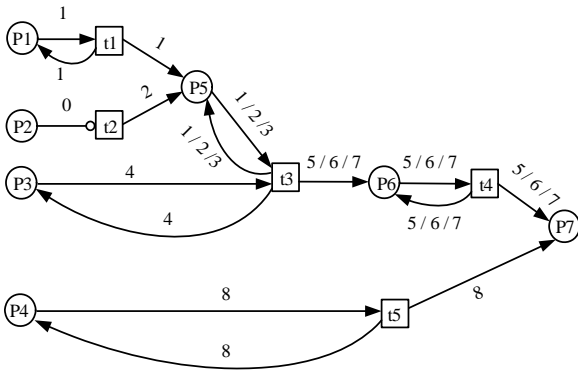


Figure 8. Decimal colored Petri net model of transformed y_1 branch
图 8. y_1 支路十进制着色 Petri 网模型

根据文献[3]中得到的伪穷举测试矩阵 M'_4 ，对初始库所设置 16 个二进制颜色向量，利用这 16 个初始标识向量，并设置相应的变迁触发条件，对建立的 Petri 网模型进行仿真分析，仿真结果如表 1 所示。

在文献[3]中，以伪穷举测试矩阵 M'_4 作为输入激励，计算得到的 y_1 支路的输出响应向量为 $M_{y1} = [0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$ 。即，第 2、4、6、8、9、10、12、13、14、15、16 个测试向量对应的 y_1 支路为通路。从表 1 中的仿真结果可以看出，第 4 列中 y_1 支路状态与文献[3]得到的结果一致，即，第 2、4、6、8、9、10、12、13、14、15、16 个测试向量对应的 y_1 支路状态为通路。

与文献[3]的计算结果相比，本文的仿真结果除了可以得到测试所需的正常输出响应矩阵外，还能根据

仿真结果对系统的具体工作过程进行分析。以第 9 个初始标识测试向量 $[0 \ 1 \ 0 \ 0]$ 为例，分析在 Matlab 平台下利用 GPenSIM 工具箱对建立的 y_1 支路带抑制弧的着色 Petri 网模型进行仿真分析的方法并对仿真结果进行分析。

第一，定义图 8 所示的 y_1 支路带抑制弧的着色 Petri 网模型的基本结构。包括：4 个初始库所，2 个中间库所，1 个终止库所，5 个变迁，15 条有向弧和 1 条抑制弧。

第二，设计仿真程序并初始化，包括初始库所标识设置、变迁触发条件和触发时间设置等。其中，初始库所标识向量设置为 $M_0 = [0 \ 1 \ 0 \ 0]$ ，表示继电器 $J5$ 、 $J6$ 、 $J3$ 线圈失电，继电器 $J4$ 线圈得电。根据式(2)和(4)定义变迁 $t_1 \sim t_5$ 的触发条件，同时，对每个初始库所标识向量(对应一组具体的继电器线圈状态)，每个变迁只能触发 1 次，即假设继电器线圈得电或失电时，相应触点闭合或断开后不存在抖动。根据该型船用继电器的特性参数，假设继电器线圈得电或失电过程中，继电器触点状态切换的动作时间为 15 毫秒。仿真过程中，变迁 $t_1 \sim t_5$ 的触发时间分别定义为 15 ms、15 ms、15 ms、1 ms、15 ms。其中变迁 t_4 的触发不涉及继电器线圈及触点状态的改变，因此触发时间定义为 1 ms。所以，变迁 $t_1 \sim t_5$ 的触发时间向量设定为 $[15 \ 15 \ 15 \ 1 \ 15]$ 。

第三，运行仿真程序并输出仿真结果，仿真结果如图 9 所示。

Table1. Simulation results
表 1. 仿真结果

序号	$[p_4, p_3, p_2, p_1]$ 初始标识向量	p_7 状态标识 (十进制)	y_1 支路状态	p_7 状态对应的 二进制标识	y_1 支路接通路径
1	[0 0 0 0]	0	断路	[0 0 0 0]	
2	[1 0 0 0]	8	通路	[1 0 0 0]	p_4
3	[0 0 1 0]	0	断路	[0 0 0 0]	
4	[1 0 1 0]	8	通路	[1 0 0 0]	p_4
5	[0 0 0 1]	0	断路	[0 0 0 0]	
6	[1 0 0 1]	8	通路	[1 0 0 0]	p_4
7	[0 0 1 1]	0	断路	[0 0 0 0]	
8	[1 0 1 1]	8	通路	[1 0 0 0]	p_4
9	[0 1 0 0]	6	通路	[0 1 1 0]	p_3, p_2
10	[1 1 0 0]	14	通路	[1 1 1 0]	p_4, p_3, p_2
11	[0 1 1 0]	0	断路	[0 0 0 0]	
12	[1 1 1 0]	8	通路	[1 0 0 0]	p_4
13	[0 1 0 1]	7	通路	[0 1 1 1]	p_3, p_2, p_1
14	[1 1 0 1]	15	通路	[1 1 1 1]	p_4, p_3, p_2, p_1
15	[0 1 1 1]	5	通路	[0 1 0 1]	p_3, p_1
16	[1 1 1 1]	13	通路	[1 1 0 1]	p_4, p_3, p_1

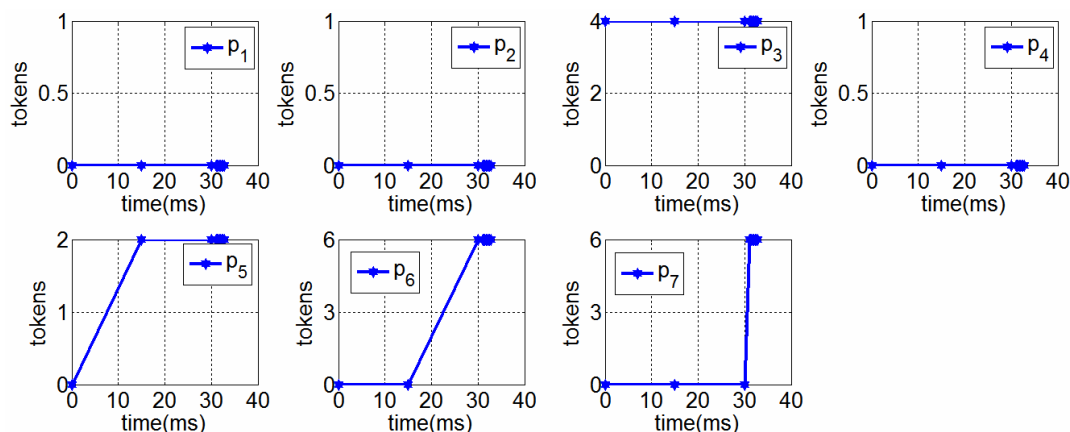


Figure 9. Simulation results of the initial test vector [0 1 0 0]
图 9. 初始标识测试向量为[0 1 0 0]时的仿真结果

仿真结果分析如下：初始时刻，库所 p_1 、 p_2 、 p_4 中标识数为 0，表示相应的继电器 (J_5 、 J_6 、 J_3) 线圈失电；库所 p_3 的标识数为 4 (对应的二进制向量为 $[0 \ 1 \ 0 \ 0]$)，表示相应的继电器 (J_4) 线圈得电。第 15 ms 时，变迁 t_2 触发，库所 p_5 中的标识数变为 2 (对应的二进制向量为 $[0 \ 0 \ 1 \ 0]$)，表示常闭触点 $J6_2$ 闭合， $J5_3$ 与 $J6_2$ 之间的并联支路接通。第 30 ms 时，变迁 t_3 触发，库所 p_6 中的标识数变为 6 (对应的二进制向量为 $[0 \ 1 \ 1 \ 0]$)，表示常开触点 $J4_3$ 闭合， $J4_3$ 与前端并联支路构成的串联支路接通。第 31 ms 时，变迁 t_4 触发，库所 p_7 中的标识数变为 6，表示整个 y_1 支路接通，其中，库所 p_7 中标识数的二进制表示为 $[0 \ 1 \ 1 \ 0]$ ，说明导致 y_1 支路导通的原因是库所 p_2 与 p_3 的状态，即，继电器 J_6 线圈失电 (p_2)， J_4 线圈得电 (p_3)， y_1 支路通过触点 $J6_2$ 和 $J4_3$ 接通。

通过对建立的带抑制弧的着色 Petri 网模型进行仿真分析表明，本文给出的继电器控制电路建模和仿真方法不仅可以获取被测继电器电路在一定输入激励条件下的正常输出响应参数，而且可以对系统的具体运行过程进行分析，为被测电路的故障诊断分析提供依据。

6. 结论

继电器作为一种逻辑控制器件，因其本身的特殊性，目前尚没有成熟的建模与分析方法。本文结合继电器控制电路的特点，给出了带抑制弧的着色 Petri 网模型，并给出了将继电器控制电路转换为 Petri 网模

型的基本方法。以某型船用柴油机控制系统的一典型继电器控制电路为例，应用给出的继电器电路模型转换方法，建立了相应的带抑制弧的着色 Petri 网模型，并在 Matlab 平台上进行了仿真分析。仿真结果表明，给出的带抑制弧的着色 Petri 模型不仅能对继电器控制电路进行准确的数学描述，而且可用于其工作过程和输入、输出特性的仿真分析，为继电器控制电路的建模、工作过程仿真分析，以及输入、输出响应特性分析提供了一种全面、高效、可行的方法。

参考文献 (References)

- [1] 严新民, 张建国. 继电器控制电路故障的微机辅助诊断[J]. 西北工业大学学报, 1989, 7(4): 364-372.
- [2] 蔡光斌, 胡昌华, 蔡艳宁. 基于定性推理的开关/继电器电路故障诊断[J]. 系统仿真学报, 2006, 18: 829-836.
- [3] 吴鹏, 潘兴隆, 徐国印. 基于数字电路模型的继电器控制电路测试技术研究[J]. 船电技术, 2010, 30(4): 20-24.
- [4] C. G. Gassandras, S. Lafortune. Introduction to discrete event systems (2nd Edition). New York: Springer Science and Business Media, 2008.
- [5] 吴哲辉. Petri 网导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [6] 金海, 王述振. 一种基于有色 Petri 网的网格 workflow 模型[J]. 华中科技大学学报, 2006, 34(7): 39-41.
- [7] 曹玉辉, 王卫红, 覃征. 一种扩展式动态环境演算范型的 Petri 网描述[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(10): 1230-1234.
- [8] X.-L. Pan, G. He and X.-C. Wang. Research on the application of colored Petri net to fault diagnosis of diesel engine control system. Proceedings of 2011 International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer, 2011, 11: 2082-2085.
- [9] 郑蓓蓉, 谢楠, 薛伟, 谢晓文. 基于 Petri 网的制造系统质量管理流程建模[J]. 江苏大学学报, 2010, 31(5): 582-585.
- [10] R. Davidrajuh. GPenSIM: A new Petri net simulator. Petri Net Applications, InTech Publisher, 2010: 527-539.