

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2016.06.014

# Petri 网逆网在主轴故障诊断中的应用

谷东伟<sup>1,2</sup>, 张学文<sup>1</sup>, 王志琼<sup>2</sup>, 申桂香<sup>2</sup>, 张英芝<sup>2</sup>

(1. 长春工业大学 机电工程学院, 长春 130012; 2. 吉林大学 机械科学与工程学院, 长春 130022)

**摘要:** 为了能够快速寻找主轴故障原因, 采用 Petri 网逆网对数控机床主轴进行故障诊断。建立 petri 网逆网模型构建数控机床主轴关联故障可达图, 深入系统分析主轴故障的各个子系统、故障模式和故障根本原因, 并对故障模式和故障原因进行关联性分析; 分析状态转移可达集, 掌握主轴关联故障的传递过程, 寻找导致主轴故障的根本原因; 并以数控机床主轴噪声大为例描述数控机床主轴 Petri 网逆网故障诊断过程。主轴关联故障的 Petri 网逆网研究, 有助于迅速进行主轴故障诊断与维修, 缩短修复时间, 进一步提高主轴的可用度。

**关键词:** 主轴; 故障诊断; Petri 网逆网

**中图分类号:** TG659, TB114.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-582X(2016)06-111-07

## Inverse Petri net and its application to spindle fault diagnosis

GU Dongwei<sup>1,2</sup>, ZHANG Xuwen<sup>1</sup>, WANG Zhiqiong<sup>2</sup>, SHEN Guixiang<sup>2</sup>, ZHANG Yingzhi<sup>2</sup>

(1. School of Mechatronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, P.R.China;  
2. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, P.R.China)

**Abstract:** In order to quickly find the cause of the spindle failure, inverse Petri net was adopted to diagnose the fault of CNC (computerized numerical control) machine tool spindle. An inverse Petri net model of related failure for CNC machine tool spindle was established to obtain the inverse Petri net reachability graph of the spindle. And the failure of subsystems, failure modes and failure causes can be thorough analyzed. In addition, the relevance of fault modes and fault causes can be analyzed by the reachability graph. By analyzing state transferring reachable set, we can grasp the transmission process of spindle related failure and get the root cause of failure. By taking the loud noise of spindle as an example, its fault diagnosis process with inverse Petri net was described. Studying inverse Petri net of spindle related failure can help to diagnosis and repair the spindle quickly, shorten the repair time and improve the availability of the spindle.

**Keywords:** spindle; fault diagnosis; inverse Petri net

随着数控机床可靠性的发展, 主轴系统可靠性显著提高。由于主轴系统结构复杂, 一旦发生故障, 如何从繁多的潜在故障中寻找故障根本原因, 定位故障元件, 缩短维修时间, 成为生产亟待解决的问题<sup>[1]</sup>。

**收稿日期:** 2016-08-13

**基金项目:** 教育部“春晖计划”(Z2014140); 吉林省科技发展计划项目(20140520126JH); 吉林省教育厅十二五科学技术研究项目资助(2015-80)。

Supported by The Spring Plan of Ministry of Education (Z2014140), Scientific and Technological Developing Project of Jilin Province(20140520126JH), and Science and Technology Research Project during the “12 th Five-Year Plan” of Department of Education, Jilin Province (2015-80).

**作者简介:** 谷东伟(1983-), 男, 博士, 主要从事数控机床可靠性维修性研究, (E-mail)gdw2000@163.com。

故障模式、影响和危害性分析(failure mode, effects and criticality analysis, FMECA)<sup>[2-3]</sup>、故障树<sup>[4-5]</sup>、灰色关联度分析<sup>[6]</sup>等是故障分析的主要手段。FMECA 主要从统计学角度系统进行全面地分析,确定系统故障的关键因素,为系统可靠性改进和提升提供依据,但无法快速查找故障根源。故障树分析通常采用布尔运算完成,但对于大型复杂故障树,则产生“组合爆炸”问题<sup>[7-8]</sup>。灰色关联分析主要从形状相似性方面进行分析,分析过程需要进行权重赋值,主观性较强。以上几种方法在进行主轴故障诊断中,每次都需要进行大量的运算,降低了维修的时效性。

Petri 网是一种图形演绎方法,由于其对离散事件良好的图形化描述和快速推理能力引起了广大学者的关注<sup>[9-11]</sup>。在故障诊断中,依据一张“一劳永逸”的可达图,经遍历搜索能够快速寻找故障根本原因。Hura 等<sup>[12]</sup>采用 Petri 网模型进行了系统动态特性描述及故障分析。Renganathan 等<sup>[13]</sup>采用混合 Petri 网对典型三罐系统进行了故障诊断和容错优化分析。Liu 等<sup>[14]</sup>通过自适应动态模糊 Petri 网对涡轮机进行了故障诊断和故障原因分析。汪惠芬等<sup>[15]</sup>基于改进模糊故障 Petri 网对复杂系统进行了故障诊断与状态评价。熊国江等<sup>[16]</sup>针对电网进行了容错 Petri 网故障诊断模型的改进。

由于 Petri 网能够通过故障的分层描述,系统表达故障间转移及传递,实现故障元件的快速定位,因此文中采用 Petri 网逆网进行主轴故障诊断。首先,依据历史故障信息建立主轴故障 Petri 网逆网模型;然后,根据 Petri 网逆网变迁原则构建关联故障可达图,探寻主轴故障发生的动态过程;最后,针对生产中数控机床主轴的典型故障现象,采用可达图进行可达集分析,快速确定故障发生的根本原因。

## 1 主轴故障 Petri 网逆网模型

### 1.1 Petri 网定义

故障 Petri 网定义为 5 元组

$$PN = (P, T, F, M_0, M),$$

式中: $P$  为库所,  $P = \{p_0, p_1, p_2, \dots, p_m\}$ , ( $m > 0$ ) 故障事件集合;  $T$  为变迁有限集合,  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$  ( $n > 0$ ),  $P \cap T = \varnothing$ , 故障原因集合;  $F$  为弧权函数  $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P) \rightarrow NN = \{0, 1\}$ , 且  $\text{dom}(F) \cup \text{cod}(F) = P \cup T$ , 表示在 Petri 网中不能有孤立的库所或者变迁, 其中  $\text{dom}(F) = \{x \mid \exists y: (x, y) \in F\}$ ,  $\text{cod}(F) = \{y \mid \exists x: (x, y) \in F\}$ ;  $M$  为库所标识,  $P \rightarrow N$ ,  $M$  通常采用向量表示,  $M$  中元素表示对应库所托肯(Token)数。托肯数目反映系统状态, 系统故障发生时一定有托肯存在;  $M_0$  为初始标识(初始状态)。

### 1.2 Petri 网逆网定义

Petri 网逆网定义

$$PN^{-1} = (P, T, F^{-1}, M_0, M)。$$

采用 Petri 网逆网构建数控机床主轴故障模型, 将数控机床主轴故障定义为  $p_0$  托肯。  $M_0$  作为数控机床主轴故障 Petri 网逆网  $FPN^{-1}$  初始标识, 即  $M_0(p_0) = 1$ , 其他  $M_0(p_i) = 0, i = 1, 2, \dots, n$ 。

### 1.3 模型运行规则

变迁激发规则:

当且仅当  $\forall p \in \cdot t: M(p) \geq 1$ , 变迁  $t \in T$  使能(Enable); 记作  $M[t >]$ 。

使能的变迁  $t$  在  $M$  下激发, 得到后继标识  $M'$ , 则

$$M'(p) = \begin{cases} M(p) + 1, & p \in t^{-} \cdot t, \\ M(p) - 1, & p \in \cdot t - t^{\cdot}, \\ M(p), & \text{其他。} \end{cases}$$

记作  $M[t > M']$ 。

在主轴故障的 Petri 网逆网模型中, 数控机床主轴故障发生采用变迁  $t$  表示; 通过变迁使能描述数控机床主轴故障发生所需条件满足。数控机床主轴故障模式发生所需系统局部状态由输入库所  $\cdot t$  描述。在模型运行过程中, 如果数控机床主轴输入库所中含有托肯数目, 则表示此故障模式已发生, 依据 Petri 网逆网变迁激发及运行规则, 能够进一步探寻导致故障模式发生的根本故障原因。

## 2 可达图

Petri 网具有可达性。如果标识  $M'$  是从  $M$  可达的, 则  $M'$  一定可由  $M$  通过变迁激发产生。Petri 网可达图为一有向图  $D_{RMG} = [V, E]$ , 其中:  $v \in V$  表示节点集,  $e \in E$  表示弧集, 可达图的构成流程如图 1 所示。在

主轴故障 Petri 网故障分析中,利用 Petri 网可达图描述数控机床主轴故障发生的动态变化过程。

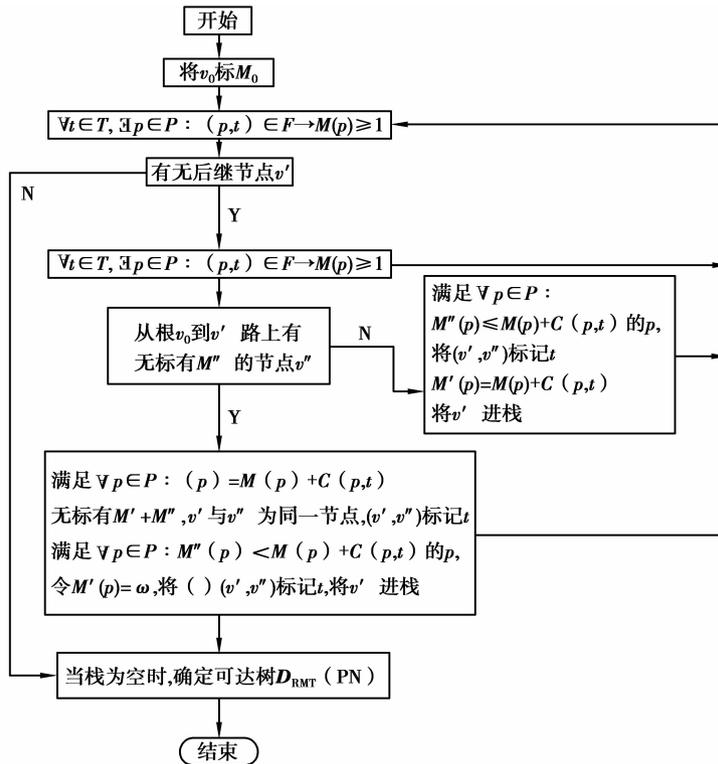


图 1 可达图构成流程图

Fig.1 Flow chart of reachable graph

### 3 Petri 网逆网故障诊断

#### 3.1 主轴故障 Petri 网逆网模型

根据现场试验获得的数控机床主轴为期一年的故障信息,如表 1 所示。将主轴故障映射为顶库所,将导致主轴故障的直接原因映射为中间库所,主轴故障发生的根本原因映射为底库所。各库所与数控机床主轴关联故障的映射如表 2 所示。根据库所映射表建立数控机床主轴关联故障 Petri 网逆网模型,运用 PIPE 软件绘制数控机床主轴关联故障 Petri 网逆网模型,如图 2 所示。

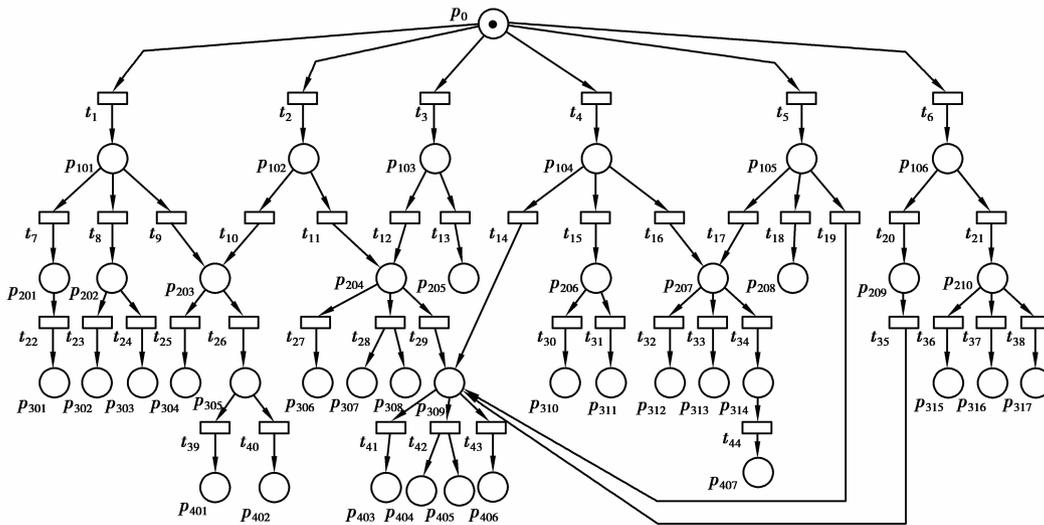


图 2 主轴故障 Petri 网逆网模型

Fig.2 Spindle fault Petri net inverse net model

表 1 主轴故障信息表  
Table 1 Failure data of spindle

主轴 编号	故障 序号	故障现象	故障原因	主轴 编号	故障 序号	故障现象	故障原因
1	1	主轴松动	装配螺钉未拧紧	22	26	镗孔不圆	锁刀装置精度不好
2	2	主轴后端摩擦损坏	主轴磨损	23	27	镗孔不稳定	主轴装配不良
3	3	主轴锁不紧	刀柄与主轴锥度配合不对	24	28	主轴刀具脱落	拉爪损坏
4	4	主轴异响	制造精度不够, 安装不同轴	24	29	拉爪损坏	外购件问题
5	5	轴承损坏	装配中轴承装配不同轴	25	30	轴承损坏	轴承烧毁
6	6	主轴精度偏差	锁刀装置精度不好	25	31	主轴抱死	轴承损坏
7	7	拉不住刀	拉刀力不够	26	32	轴承损坏, 抱死	轴承损坏
8	8	主轴抱死	润滑油中含杂质, 轴承损坏	27	33	镗孔不稳, 大量废品	主轴刀具未锁紧
9	9	主轴轴承烧毁	轴承质量问题	28	34	异响, 且声音很大	装配不良
10	10	返修主轴, 换轴承	轴承磨损	29	35	主轴干活不对	切削参数设置不对
11	11	主轴异响	切削力过大, 导致轴承损坏	29	36	镗孔不稳, 废 15%	锁刀装置精度不好
12	12	主轴拉杆损坏	制造问题, 未消除内应力	30	37	异响, 轴承问题	轴承损坏
13	13	爪刀片弹簧损坏	爪刀片制造问题	31	38	主轴轴承损坏	轴承质量问题
14	14	主轴拉爪断	拉爪制造问题	32	39	主轴 500/转响	轴承安装位置精度不对
15	15	主轴噪音很大	轴承装配间隙过大, 轴承损坏	33	40	异响	装配不良
16	16	主轴异响	装配不良, 轴承调节不适	34	41	温度高, 异响	润滑油杂质轴承损坏
17	17	主轴异响, 无法工作	轴承损坏	35	42	主轴问题	设计问题
17	18	主轴噪音大不回转	轴承卡死	36	43	主轴电气问题	电气问题
18	19	主轴用手转不动	轴承装配不正, 卡死	37	44	主轴异响	轴承烧毁
18	20	主轴轴承烧毁	外购件质量问题	38	45	主轴稍孔损坏	加工时切削力过大
19	21	主轴锁不紧	拉刀力不够	39	46	主轴异响	设计问题
20	22	主轴锁不住刀	刀柄与主轴锥度配合不对	40	47	轴承损坏	装配不良
20	23	拉刀爪损坏	外购件质量问题	41	48	主轴轴承损坏	润滑油杂质问题
21	24	主轴异响, 轴承问题	轴承研伤损坏	42	49	更换主轴	主轴设计问题
21	25	主轴锁不紧	拉刀力不够大				

表 2 主轴故障与库所映射表  
Table 2 Spindle fault mapping with the place

库所代码	故障模式	库所代码	故障模式	库所代码	故障模式
$p_0$	电主轴故障	$p_{208}$	冷却不充分	$p_{312}$	油管堵塞
$p_{101}$	拉刀故障	$p_{209}$	主轴抱死	$p_{313}$	润滑压力不足
$p_{102}$	加工精度差	$p_{210}$	电气故障	$p_{314}$	润滑油泄漏
$p_{103}$	切削振动大	$p_{301}$	拉爪断	$p_{315}$	压合开关未压合、失灵
$p_{104}$	主轴噪声大	$p_{302}$	刀柄主轴锥度配合差	$p_{316}$	转动指令未输出
$p_{105}$	主轴发热	$p_{303}$	碟簧压合过紧	$p_{317}$	定子损坏
$p_{106}$	主轴不转动	$p_{304}$	碟簧损坏	$p_{401}$	碟簧位移量小
$p_{201}$	主轴掉刀	$p_{305}$	拉刀力不够	$p_{402}$	碟簧螺母松动
$p_{202}$	松刀松不开	$p_{306}$	轴承拉毛	$p_{403}$	轴承磨损
$p_{203}$	锁不住刀	$p_{307}$	预紧力不够	$p_{404}$	预紧力过大
$p_{204}$	轴承故障	$p_{308}$	游隙过大	$p_{405}$	无润滑
$p_{205}$	螺母松动	$p_{309}$	轴承损坏	$p_{406}$	有杂质
$p_{206}$	动平衡不好	$p_{310}$	安装不同轴	$p_{407}$	密封件损坏
$p_{207}$	润滑不良	$p_{311}$	轴承调节不适		

3.2 实例分析

以数控机床主轴噪声大  $p_{104}$  为例描述数控机床主轴 Petri 网逆网故障诊断过程。将主轴噪声大作为栈顶提取其逆网模型(图 3),并求得轴承故障的可达集,根据图 1 获得如图 4 的主轴噪声大可达图。

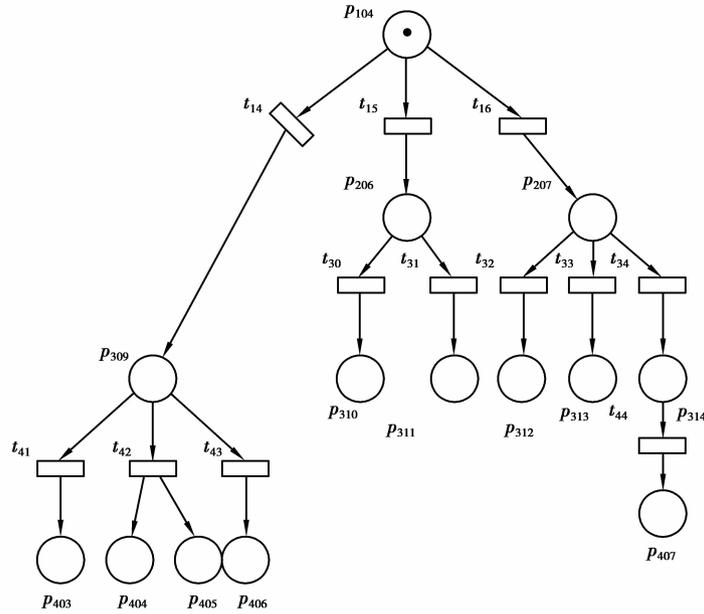


图 3 主轴噪声大故障 Petri 网逆网图

Fig.3 Spindle noise greatly fault Petri net inverse net figure

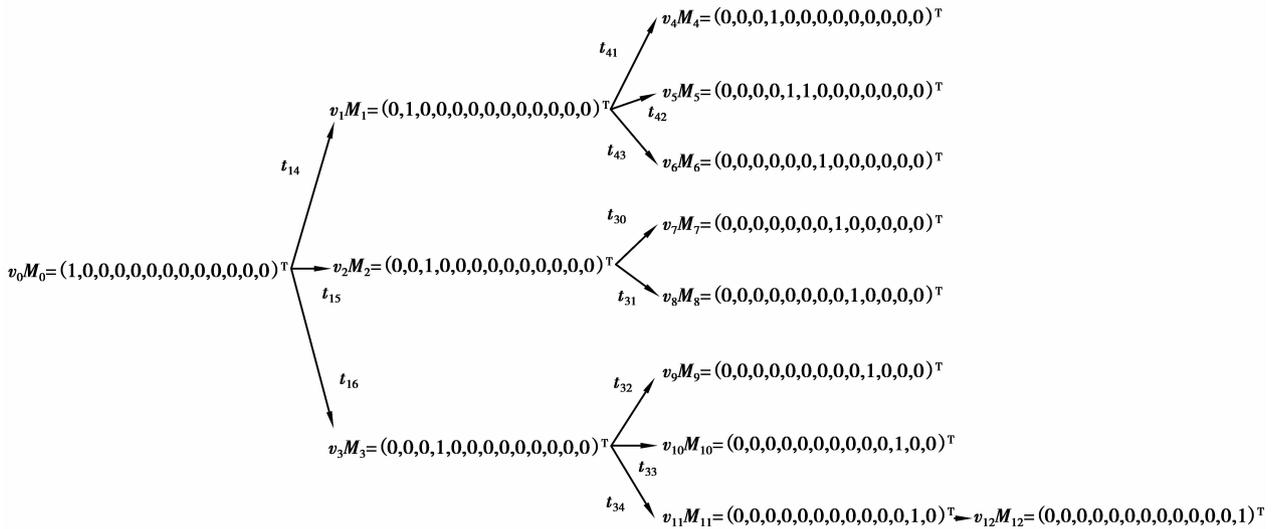


图 4 主轴噪声大可达图

Fig.4 Spindle noise greatly fault reachability graph

主轴噪声大为设初始状态,初始标识

$$M_0 = (1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0)^T。$$

通过对图 4 分析可知,导致轴承故障的三大主要因素为轴承损坏、动平衡不好、润滑不良。通过更深入分析,引发轴承损坏的主要原因为预紧力过大且无润滑,轴承磨损、有杂质导致;引发动平衡不好的原因为安装不同轴和轴承调节不适;引发润滑不良的主要原因为油管堵塞,润滑压力不足,润滑油泄露及密封件损坏。



## 4 结 论

通过建立数控机床主轴 Petri 网逆网可达图,系统描述主轴故障传递过程,并根据主轴故障现象,通过遍历查找进行故障诊断,寻找主轴故障根本原因。通过文中方法,能够快速定位故障根本原因,为提高设备可用度,提高维修效率具有重要意义。

### 参考文献:

- [1] 邓三鹏,徐小力,张建新,等.基于噪声小波包络谱的数控机床主轴故障诊断研究[J].机床与液压,2009,37(12):219-221.  
DENG Sanpeng, XU Xiaoli, ZHANG Jianxin, et al. Spindle fault diagnosis based on wavelet and envelope analysis [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2009, 37(12): 219-221. (in Chinese)
- [2] 于捷,贾亚洲.数控车床故障模式影响与致命性分析[J].哈尔滨工业大学学报,2005,37(12):1725-1727.  
YU Jie, JIA Yazhou. Failure mode effect and criticality analysis on certain serial CNC lathes [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(12): 1725-1727. (in Chinese)
- [3] Wang Y, Deng C, Wu J, et al. A corrective maintenance scheme for engineering equipment [J]. Engineering Failure Analysis, 2014, 36: 269-283.
- [4] Purba J H, Tjahyani D T S, Ekariansyah A S, et al. Fuzzy probability based fault tree analysis to propagate and quantify epistemic uncertainty [J]. Annals of Nuclear Energy, 2015, 85: 1189-1199.
- [5] Liu P, Yang L, Gao Z, et al. Fault tree analysis combined with quantitative analysis for high-speed railway accidents [J]. Safety Science, 2015, 79: 344-357.
- [6] 董立立,朱煜,黄道,等.灰关联分析及其在装备故障诊断中的应用[J].华东理工大学学报(自然科学版),2008,38(4):563-597.  
DONG Lili, ZHU Yu, HUANG Dao, et al. Grey relevancy analysis and its application to equipment fault diagnosis [J]. Journal of East China University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2008, 38(4): 563-597. (in Chinese)
- [7] 刘晨曦,陈南,杨佳宁.基于多态故障树的伺服刀架可靠性分析[J].东南大学学报(自然科学版),2014,44(3):538-543.  
LIU Chenxi, CHEN Nan, YANG Jianing. Reliability analysis of servo turret based on multi-state fault tree [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2014, 44(3): 538-543. (in Chinese)
- [8] Whiteley M, Dunnett S, Jackson L. Failure mode and effect analysis, and fault tree analysis of polymer electrolyte membrane fuel cells [J]. International Journal of Hydrogen Energy. 2016, 41(2): 1187-1202.
- [9] Renganathan K, Bhaska V. Modeling, analysis and performance evaluation for fault diagnosis and Fault Tolerant Control in bottle-filling plant modeled using Hybrid Petri nets [J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37: 4842-4859.
- [10] 王志琼.电主轴故障分析及可靠性增长技术研究[D].长春:吉林大学,2012.  
WANG ZhiQiong. The fault analysis and reliability growth technique study for electro-spindle [D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)
- [11] Cheng H, He Z, Wang Q, et al. Fault diagnosis method based on Petri nets considering service feature of information source devices [J]. Computers and Electrical Engineering, 2015, 46: 1-13.
- [12] Huea G S, Atwood J W. The use of Petri nets to analyze coherent fault trees [J]. IEEE Transaction on Reliability, 1988, 37(5): 469-474.
- [13] Renganathan K, Bhaskar V C. An observer based approach for achieving fault diagnosis and fault tolerant control of systems modeled as hybrid Petri nets [J]. ISA Transactions, 2011, 50: 443-453.
- [14] Liu H C, Lin Q L, Ren M L, et al. Fault diagnosis and cause analysis using fuzzy evidential reasoning approach and dynamic adaptive fuzzy Petri nets [J]. Computers & Industrial Engineering, 2013, 66(4): 899-908.
- [15] 汪惠芬,梁光夏,刘庭煜,等.基于改进模糊故障 Petri 网的复杂系统故障诊断与状态评价[J].计算机集成制造系统,2012,19(12):3049-3061.  
WANG Hui fen, LIANG Guangxia, LIU Tingyu, et al. Machinery failure diagnosis and condition evaluation for complex system based on improved fuzzy fault Petri net [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 19(12): 3049-3061. (in Chinese)
- [16] 熊国江,石东源.容错 Petri 网电网故障诊断改进模型[J].华中科技大学学报(自然科学版),2013,41(1):11-15.  
XIONG Guojiang, SHI Dongyuan. Improved fault-tolerant petri nets for fault-diagnosis power grids [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2013, 41(1): 11-15. (in Chinese)