Modeling and Simulation 建模与仿真, 2026, 15(11), 51-63
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/mos
https://doi.org/10.12677/mos.2026.1511155

Hans汉斯

制造实验平台故障诊断方法研究

付宝金，王　海

沈阳理工大学机械工程学院，辽宁 沈阳

收稿日期：2026年10月13日；录用日期：2026年11月6日；发布日期：2026年11月12日

摘　要

制造实验平台集PLC/CNC控制、主轴驱动、坐标轴进给系统、夹具与换刀机构及现场传感系统于一体，运行过程同时包含离散事件和连续监测变量。针对监测信息来源多样、故障类型复杂以及传统阈值报警难以描述故障因果层级和传播过程的问题，提出一种故障树分析与模糊Petri网相结合的诊断方法。首先依据PLC/CNC状态、S7通讯、RS485数据、主轴电流、坐标轴位置与误差及夹具反馈等信息建立“监测数据－异常表现－故障类型”映射；其次构建故障树并按逻辑门规则转换为FTA-Petri网；最后引入模糊隶属度、规则权重、变迁阈值和故障置信度进行不确定异常推理。所建模型可描述底层异常向中间故障、子系统故障和系统级故障的传播关系，为故障报警、定位和处理建议提供模型基础。

关键词

制造实验平台，故障诊断，故障树，模糊Petri网，故障推理，多源数据

Fault Diagnosis Method for a Manufacturing Experimental Platform

Baojin Fu, Hai Wang

School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang Liaoning

Received: October 13, 2026; accepted: November 6, 2026; published: November 12, 2026

Abstract

A manufacturing experimental platform integrates PLC/CNC control, spindle drive, coordinate-axis feed systems, fixtures and tool-changing mechanisms, and field sensor systems, and its operation involves both discrete events and continuous monitoring variables. To address the problems of diverse monitoring information sources, complex fault types, and the limited capability of conventional threshold-based alarms to describe fault causal hierarchies and propagation processes, a fault diagnosis method combining fault tree analysis and fuzzy Petri nets is proposed. First, a mapping relationship

文章引用: 付宝金, 王海. 制造实验平台故障诊断方法研究[J]. 建模与仿真, 2026, 15(11): 51-63.
DOI: 10.12677/mos.2026.1511155

among monitoring data, abnormal manifestations, and fault types is established based on PLC/CNC status, S7 communication, RS485 data, spindle current, coordinate-axis position and error information, and fixture feedback. Then, a fault tree model is constructed and converted into an FTA-Petri net according to logic-gate conversion rules. Finally, fuzzy membership degrees, rule weights, transition thresholds, and fault confidence levels are introduced to perform reasoning for uncertain abnormal information. The proposed model can describe the propagation of underlying abnormal events to intermediate faults, subsystem faults, and system-level faults, providing a modeling basis for fault alarm, fault localization, and maintenance recommendations.

Keywords

Manufacturing Experimental Platform, Fault Diagnosis, Fault Tree, Fuzzy Petri Net, Fault Inference, Multi-Source Data

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

随着制造系统自动化程度提高，制造实验平台逐渐形成由控制、驱动、执行和传感等部分协同运行的综合系统。平台通常由 PLC/CNC 控制系统、主轴变频器、坐标轴伺服、夹具与换刀机构、气液压回路及现场传感器组成，具有耦合度高、信号类型多和状态切换频繁等特点。关键环节异常可能造成实验中断、加工质量下降或安全联锁动作，因此需要对运行状态进行有效监测和故障定位[1]。

现有平台故障判断多依赖越限报警、状态位监测和人工经验，能够发现部分局部异常，但难以统一描述不同信号之间的因果关系和传播路径。对于同时包含通讯、顺序控制、执行机构和安全回路的平台，固定阈值还可能受到工况波动和瞬态干扰影响，导致误报警、漏报警或定位范围过大。

故障树分析法(Fault Tree Analysis, FTA)能够以“顶事件－中间事件－底事件”描述故障层级及原因，适合梳理平台故障逻辑；但传统故障树主要反映静态因果结构，对时序和动态传播描述不足。Petri 网利用库所、变迁、有向弧和标识描述状态变化与事件触发，可表达主轴启动、夹具反馈、换刀超时等顺序或联合触发过程。因此，将 FTA 与 Petri 网结合可兼顾故障层级关系和传播过程[2]。

制造实验平台中的部分异常具有不确定性。主轴电流短时升高可能来自负载波动，也可能是过载征兆；偶发 RS485 读取失败未必代表通讯故障，而连续失败更具故障意义；夹具反馈延迟和跟随误差也存在程度差异。为避免简单二值判断带来的边界误判，可在 FTA-Petri 网中引入隶属度、规则权重、变迁阈值和置信度，对异常程度进行量化[3]。

基于上述分析，本文提出故障树与模糊 Petri 网相结合的制造实验平台故障诊断方法。首先分析诊断对象和可采集数据，建立监测数据与故障类型的对应关系；其次构建以系统故障为顶事件的故障树并转换为 FTA-Petri 网；随后引入模糊隶属度、变迁阈值和规则可信度建立推理机制；最后通过典型故障路径分析模型的传播和诊断过程，为后续实验验证提供基础[4]。

2. 制造实验平台故障诊断对象与数据来源

2.1. 制造实验平台组成

本文研究对象为制造实验平台。平台以 PLC/CNC 控制系统为核心，完成加工逻辑、状态管理、程序

调用和互锁控制；主轴变频器与坐标轴进给系统负责主轴及各轴运动；S7 与 RS485 通讯用于交换控制状态和驱动数据；急停、安全门、气压、液压、限位及到位信号构成安全保护和动作反馈。平台同时包含电流、位置等连续量以及命令、反馈、模式等离散状态，适合采用 FTA 与 Petri 网联合建模。

各组成部分通过控制指令、状态量、现场反馈和通讯数据相互关联，其结构及故障诊断信息关系如图 1 所示。

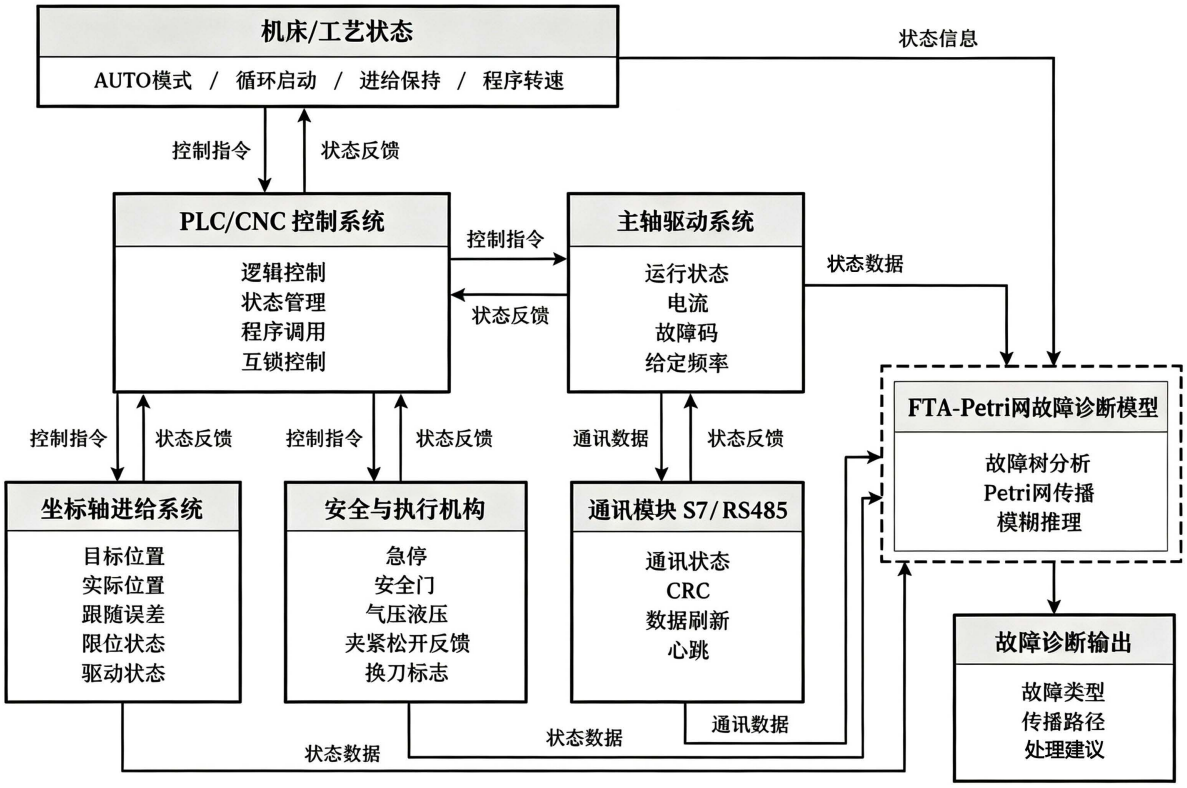


Figure 1. Fault diagnosis objects and information relationships of the manufacturing experimental platform
图 1. 制造实验平台故障诊断对象与信息关系

2.2. 可采集数据类型

结合当前实验平台条件，可采集数据主要分为以下五类。

(1) 主轴变频器数据。包括运行状态、输出电流、故障代码、给定频率及部分反馈频率等，通过 RS485 读取，可用于判断主轴启动失败、过载、变频器故障及参数异常。

(2) 通讯状态数据。包括 RS485 通讯状态、CRC 校验、连续读取失败次数、S7 PUT/GET 状态、数据块刷新和通讯心跳等。通讯异常会降低相关数据的可信度，因此应先判断通讯有效性。

(3) 坐标轴运行数据。包括目标位置、实际位置、跟随误差、驱动器 Ready 信号和硬件限位状态，可用于判断轴运动不到位、跟随误差超限、限位触发及坐标轴驱动异常。

(4) 安全与执行机构信号。包括急停、安全门、气压、液压、夹紧/松开命令与到位反馈、换刀标志、刀库状态及气缸限位等，具有明显的时序和互锁特征，是安全回路、夹具及换刀故障判断的重要依据。

(5) 机床状态数据。包括 AUTO 模式、循环启动、进给保持、程序转速指令、工艺参数及传感器互斥状态等，用于反映运行模式和逻辑一致性，辅助识别状态/工艺异常。

2.3. 数据异常与故障类型对应关系

底层采集数据需要结合命令、反馈和时间条件才能形成具有诊断意义的事件。例如，主轴运行状态为 0 并不能单独说明启动失败，只有在启动命令已发出且规定时间内仍未建立运行状态时才能形成判据；夹紧反馈缺失也需与夹紧命令及超时条件共同判断。因此，本文建立“采集数据/信号－异常表现－可能故障－处理方法”的对应关系，为故障树分层和 Petri 网底层库所定义提供依据。

Table 1. Mapping between acquired data and faults in the manufacturing experimental platform
表 1. 制造实验平台采集数据与故障关系表

采集数据/信号	异常表现	可能故障	处理方法
RS485 通讯状态	连续无响应、CRC 错误频繁出现	主轴变频器通讯故障	检查 485 接线、站号、波特率、终端电阻与屏蔽接地
S7 通讯状态	PUT/GET 状态异常、DB 数据长时间不刷新	S7 通讯故障	检查 IP、连接参数、DB 地址和程序调用顺序
变频器故障代码寄存器	读取值非 0	变频器故障	解析故障码，执行主轴停机并排查电源、驱动和电机
主轴运行状态	启动后 3~5 s 仍停止	主轴启动失败	检查使能条件、运行命令、急停复位与主轴接线
主轴输出电流	超过 110%预警、超过 150%故障	主轴过载	预警时降低进给，严重时停机并检查刀具和负载
主轴给定频率	程序转速与给定频率不一致	参数下发异常	校核程序参数、下发逻辑及人机界面输入
坐标轴实际位置	运动命令发出后位置无变化	轴运动不到位	进给保持，检查坐标轴驱动使能、机械卡滞和润滑状态
跟随误差	超出设定公差	坐标轴跟随误差异常	检查驱动参数、编码器反馈、联轴器和丝杠导轨
硬件限位开关	加工中突然触发	限位故障	立即停止进给，检查坐标越界、回零状态及限位开关
Ready 信号	运行中由 1 变 0	坐标轴驱动异常	检查驱动报警、编码器、电源和安全链路
夹紧/松开反馈	规定时间内无反馈	夹具故障	禁止主轴启动，检查气源、电磁阀、气缸和传感器
换刀序列标志位	M06 后动作超时	换刀故障	阻断下一步动作，检查刀库、刀柄、气缸和限位信号
传感器互斥状态	夹紧到位与松开到位同时有效	传感器异常	停止依赖该信号的动作，检查接线与安装位置

表 1 所示映射统一了监测信号与底层故障事件之间的对应关系，为后续故障树和 Petri 网建模提供数据基础。

3. 故障树与 Petri 网建模方法

3.1. 故障树分析方法

故障树分析以系统故障为顶事件，通过逻辑门逐层分解中间事件和底事件。制造实验平台的顶层可表示无法正常加工或保护停机；中间事件对应主轴、通讯、伺服或夹具等子系统故障；底事件则对应 RS485

读取失败、主轴运行状态未建立、夹紧反馈超时等具体异常。由此可将分散的故障知识组织为清晰的层级因果结构。

故障树侧重故障层级及静态逻辑关系，对命令、反馈和超时等动态过程描述有限，因此本文进一步采用 Petri 网描述事件触发及故障传播。

3.2. Petri 网基本定义

Petri 网可表示为四元组：

$$\Sigma = (P, T; F, M_0)$$

式中：P 为库所集合，$P = \{p_1, p_2, \cdots, p_m\}$；$T$ 为变迁集合，$T = \{t_1, t_2, \cdots, t_n\}$；$F$ 为有向弧集合，$F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$；$M_0$ 为初始标识。

在 Petri 网中，库所表示状态或条件，变迁表示状态变化或触发规则，有向弧描述两者关系，Token 表示相应状态是否成立。输入条件满足后变迁触发，Token 由输入库所转移到输出库所。在故障诊断中，该过程可表示底层异常向中间故障和系统级故障的逐层传播[5] [6]。

3.3. 故障树到 Petri 网的转换规则

故障树转换为 Petri 网时，按照事件、逻辑门和因果关系分别进行映射。

(1) 事件转换规则。故障树中的顶事件、中间事件和底事件均转换为 Petri 网库所，分别对应不同层级的故障状态或异常条件。

(2) 逻辑门转换规则。OR 门和 AND 门均用变迁表示，但连接方式不同。OR 逻辑中，各输入库所分别经独立变迁指向同一上层库所；AND 逻辑中，多个输入库所共同连接同一变迁，所有条件满足后再输出到上层库所[7]。

(3) 故障关系转换规则。故障树中的因果关系用 Petri 网的“库所－变迁－库所”有向连接表示，以形成连续的故障传播路径。

转换时应保持原有逻辑含义。如图 2，OR 逻辑不能用多个库所共同输入同一变迁表示，否则会变成 AND 关系。通讯故障、主轴过载和安全回路故障等由独立异常触发的事件，应采用多个变迁指向同一故障库所[8]。

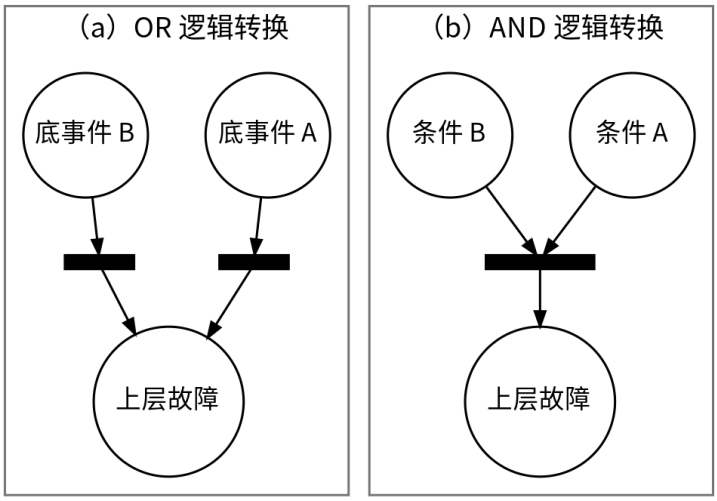


Figure 2. Conversion rules from fault tree logic gates to Petri nets
图 2. 故障树逻辑门到 Petri 网的转换规则

3.4. 关联矩阵描述方法

为对 FTA-Petri 网进行形式化描述，引入输入矩阵 R、输出矩阵 U 和关联矩阵 A。设模型含 m 个库所、n 个变迁，R、U 均为 $m \times n$ 矩阵；r_{ij} 表示库所 p_i 到变迁 t_j 的输入弧权值，u_{ij} 表示变迁 t_j 到库所 p_i 的输出弧权值。关联矩阵定义为：

$$A = U - R$$

设 M_k 为第 k 次变迁作用后的标识向量，X_k 为第 k 次变迁触发序列，则 Petri 网状态变迁方程为：

$$M_{k+1} = M_k + A^{\mathrm{T}} X_k$$

该方程描述变迁作用下标识向量的变化。底层库所获得初始 Token 后，满足条件的变迁依次触发，Token 沿模型向上层传播。通过标识演化可判断底层异常是否能够到达中间故障或顶事件，并用于分析故障传播路径。

4. 制造实验平台故障树模型构建

4.1. 顶事件确定

结合平台运行目标和故障诊断需求，本文将顶事件定义为：

P0 制造实验系统故障

其表示制造实验平台无法维持正常加工、关键动作链中断、主轴或坐标轴功能失效，或因安全联锁条件进入保护停机状态。以该事件为起点向下分解，可建立底层异常与系统失效之间的因果关系。

4.2. 一级故障事件划分

依据平台结构及监测数据，将顶事件 P0 分解为六类一级故障：

P1 通讯与数据采集故障；

P2 主轴系统故障；

P3 坐标轴/伺服系统故障；

P4 安全回路故障；

P5 夹具与换刀系统故障；

P6 状态/工艺故障。

P1~P6 与顶事件采用 OR 逻辑，任一一级故障达到判定条件均可能使平台进入系统故障状态。该划分覆盖当前平台主要故障来源，并便于按通讯、主轴、轴系、安全和执行机构分别展开。

4.3. 各子系统故障树展开

(1) 通讯与数据采集故障。包括 RS485 通讯故障、S7 通讯故障和设备心跳故障。RS485 读取失败、CRC 错误或线路参数异常可触发 RS485 故障；PUT/GET 状态异常或 DB 数据不刷新对应 S7 故障；心跳长时间不更新对应设备心跳故障。通讯异常会影响相关数据有效性，应优先判断数据是否可信。

(2) 主轴系统故障。包括主轴启动失败、过载、变频器故障和参数/频率异常。启动失败要求“启动命令已发出”和“3~5 s 内运行状态仍为 0”同时成立；过载可由电流超过 110%并持续 2 s、电流超过 150%或过流故障码任一事件触发；故障代码非 0 表示变频器故障；程序转速与给定频率不一致表示参数异常。

(3) 坐标轴/伺服系统故障。包括轴运动不到位、跟随误差超限、硬件限位触发和伺服驱动器故障。轴运动不到位要求运动命令已发出且实际位置在规定时间内无有效变化；跟随误差超限、限位触发及 Ready 信号由 1 变 0 可分别形成相应故障。

(4) 安全回路故障。包括急停触发、气压不足、液压不足和安全门异常。此类事件保护优先级较高，条件成立后可直接形成一级故障并使系统禁止运行或停机，因此采用较短传播路径。

(5) 夹具与换刀系统故障。夹紧或松开故障采用“命令已发出 + 规定时间内无到位反馈”的 AND 逻辑；夹紧与松开到位同时有效触发传感器互斥故障；换刀进退超时要求 M06 命令已执行且刀库进/退未按时完成，其他异常包括松刀、夹刀超时及刀库传感器异常。

(6) 状态/工艺故障。包括 AUTO 模式下进给保持异常、循环启动后未进入运行、程序转速与给定频率不一致及工艺参数下发错误等。此类异常主要影响工艺执行和状态一致性，因此作为独立一级故障建模。

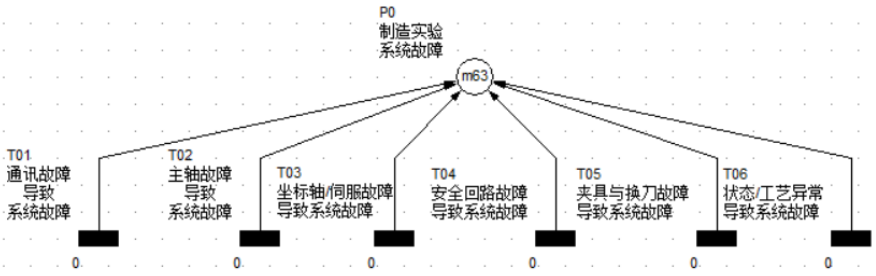


Figure 3. Fault tree model of the manufacturing experimental platform
图 3. 制造实验平台故障树模型

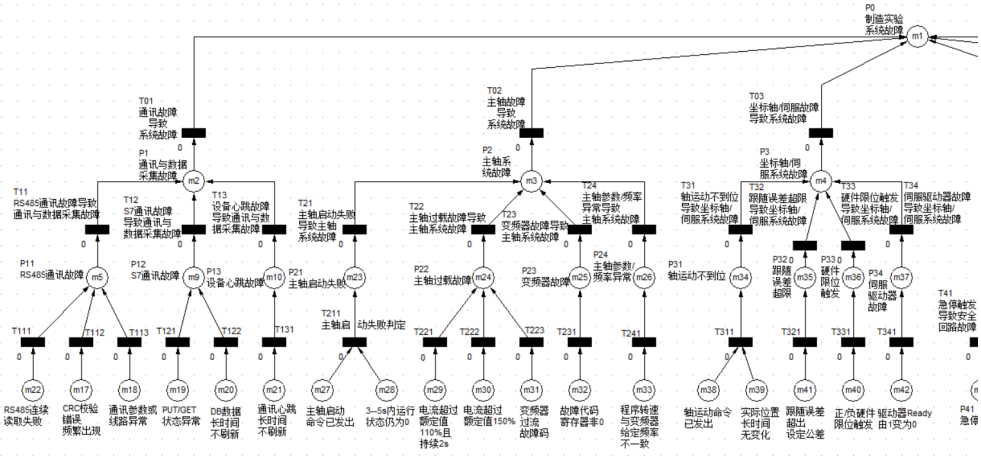
图 3 所示故障树将分散的监测变量组织为层次化故障事件网络，明确了各类底事件、中间事件和一级故障之间的逻辑关系，也为后续按照统一规则转换为 FTA-Petri 网提供结构基础。

5. 制造实验平台 FTA-Petri 网模型构建

5.1. FTA-Petri 网总体模型

依据“事件→库所、逻辑门→变迁、因果关系→有向弧”的原则，将故障树转换为 FTA-Petri 网。顶事件 P0、一级故障 P1~P6、中间故障及底层异常均用库所表示；AND、OR 逻辑转换为相应变迁；有向弧表示故障传播方向，从而把层级因果关系转化为可描述状态变化的网络结构。

FTA-Petri 网可进一步描述故障触发与传播。例如，RS485 连续读取失败经变迁形成 RS485 通讯故障，再传播至通讯与数据采集故障和顶事件；主轴启动失败则要求启动命令与运行状态异常同时成立，AND 型变迁才会触发。由此可区分单一事件触发和多条件联合触发两类故障。其总体模型如图 4 所示。



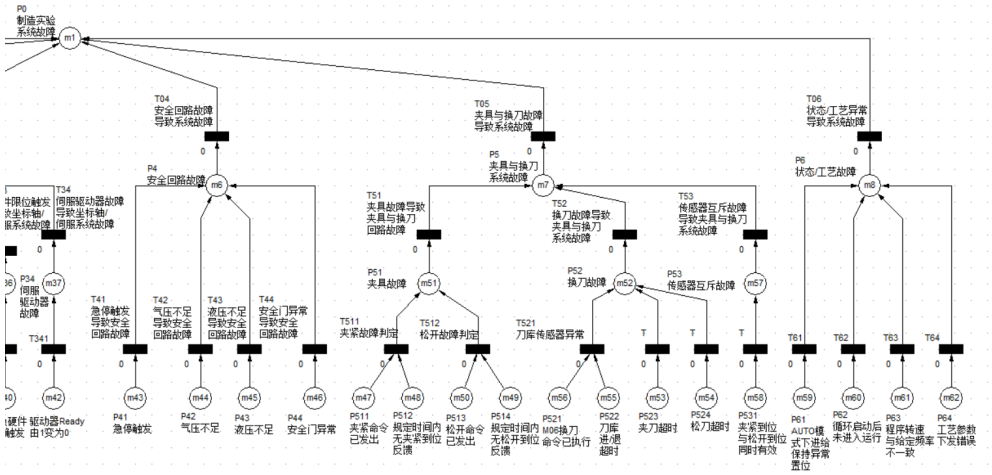


Figure 4. Overall FTA-Petri net model of the manufacturing experimental platform
图 4. 制造实验平台 FTA-Petri 网总体模型

5.2. 节点编号说明

Table 2. Descriptions of the main places in the FTA-Petri net
表 2. FTA-Petri 网主要库所含义

库所编号	含义	层级
P0	制造实验系统故障	顶事件
P1	通讯与数据采集故障	一级故障
P2	主轴系统故障	一级故障
P3	坐标轴/伺服系统故障	一级故障
P4	安全回路故障	一级故障
P5	夹具与换刀系统故障	一级故障
P6	状态/工艺故障	一级故障
P11	RS485 通讯故障	中间故障
P12	S7 通讯故障	中间故障
P13	设备心跳故障	中间故障
P21	主轴启动失败	中间故障
P22	主轴过载故障	中间故障
P23	变频器故障	中间故障
P24	主轴参数/频率异常	中间故障
P31	轴运动不到位	中间故障
P32	跟随误差超限	中间故障
P33	硬件限位触发	中间故障
P34	伺服驱动器故障	中间故障
P51	夹具故障	中间故障
P52	换刀故障	中间故障
P53	传感器互斥故障	中间故障

为便于模型说明，对 FTA-Petri 网中的主要库所统一编号。顶事件记为 P0，一级故障记为 P1~P6，中间故障及底层事件按所属层级继续编号如表 2 所示。

统一编号便于在故障传播分析中引用各库所，也便于将模型节点与故障代码、处理策略及后续实验用例对应。

5.3. 变迁逻辑说明

在 FTA-Petri 网中，变迁承担逻辑判定和故障传播功能。结合平台故障特点，本文将其分为 OR 型触发变迁和 AND 型联合触发变迁。具体内容如表 3 所示。

Table 3. Typical transitions and their triggering conditions
表 3. 典型变迁及触发条件

变迁编号	触发条件	逻辑类型	输出故障
T111	RS485 连续读取失败达到阈值	OR	P11 RS485 通讯故障
T121	PUT/GET 状态异常	OR	P12S7 通讯故障
T131	通讯心跳长时间不刷新	OR	P13 设备心跳故障
T211	主轴启动命令已发出 + 3~5 s 内运行状态仍为 0	AND	P21 主轴启动失败
T221	电流超过 110%且持续 2s	OR	P22 主轴过载故障
T222	电流超过 150%	OR	P22 主轴过载故障
T223	变频器过流故障码出现	OR	P22 主轴过载故障
T231	故障代码寄存器非 0	OR	P23 变频器故障
T241	程序转速与给定频率不一致	OR	P24 主轴参数/频率异常
T311	轴运动命令已发出 + 实际位置长时间无变化	AND	P31 轴运动不到位
T321	跟随误差超出设定公差	OR	P32 跟随误差超限
T341	驱动器 Ready 由 1 变 0	OR	P34 伺服驱动器故障
T511	夹紧命令已发出 + 无夹紧到位反馈	AND	P51 夹具故障
T512	松开命令已发出 + 无松开到位反馈	AND	P51 夹具故障
T521	M06 换刀命令已执行 + 刀库进/退超时	AND	P52 换刀故障

表 3 中，主轴启动失败、轴运动不到位、夹具故障和换刀进退超时均需“命令–反馈/状态–超时”等条件联合满足，采用 AND 型变迁；通讯异常、故障码异常、限位和安全联锁异常可由单个底层事件触发，采用 OR 型变迁。

6. 基于模糊 Petri 网的故障推理方法

6.1. 引入模糊推理的原因

传统 FTA-Petri 网以 0/1 状态表示底层事件，但主轴电流、通讯失败、反馈延迟和跟随误差等存在连续变化及边界不确定性，刚性阈值容易在临界状态产生误判。

因此，本文引入模糊推理，以[0, 1]区间的隶属度或置信度描述异常程度，并结合规则权重和变迁阈值进行传播判定。

6.2. 模糊 Petri 网定义

为描述上述不确定信息，本文将模糊 Petri 网定义为：

$$FPN=\left(P,T,F,M,W,\theta,R,CF\right)$$

式中：P、T、F 分别为库所、变迁和有向弧集合；M 为库所标识向量；W 为输入权重集合；θ 为变迁阈值；R 为规则可信度集合；CF 为故障置信度集合，用于表示各故障库所成立的可信程度。

模糊 Petri 网允许库所具有[0, 1]区间内的模糊状态，而不再只用 Token 有无表示事件。例如，主轴电流轻度超限时可赋予中等隶属度；连续通讯失败次数增加时，通讯异常置信度逐步提高，使推理结果能够反映不同异常程度。

6.3. 输入变量模糊化

输入变量模糊化用于将连续量或非严格二值量转换为[0, 1]区间的隶属度。结合当前平台可获取信号及图 5 所示曲线，本文选取主轴电流比 $x_I = I/I_N$、RS485 连续失败次数 n 和夹具反馈时间比 $x_t = t/T_{\lim}$ 作为典型模糊输入，其中 I_N 为主轴额定电流，$T_{\lim}$ 为控制程序规定的最大允许反馈时间。隶属函数采用分段线性的三角形或梯形形式，参数由设备额定值、已有报警阈值以及控制程序中的超时/重试逻辑共同确定。

具体取值如下：① 主轴电流。正常集在 $x_I \le 1.00$ 时隶属度取 1，在 1.00~1.15 区间线性降至 0；偏高集在 1.00~1.15 区间线性升至 1，在 1.15~1.30 区间保持 1，在 1.30~1.55 区间线性降至 0；严重过载集在 $x_I \le 1.30$ 时取 0，在 1.30~1.50 区间线性升至 1，$x_I \ge 1.50$ 时取 1。② RS485 连续失败次数。正常集在 $n \le 0.5$ 时取 1，在 0.5~2 次之间线性降至 0；轻微异常集在 0.5~2 次之间线性升至 1，在 2~2.5 次之间保持 1，在 2.5~4.5 次之间线性降至 0；严重异常集在 $n \le 2$ 时取 0，在 2~4 次之间线性升至 1，$n \ge 4$ 时取 1。③ 夹具反馈时间。正常集在 $x_t \le 0.75$ 时取 1，在 0.75~1.00 区间线性降至 0；延迟集在 0.65~0.90 区间线性升至 1，在 0.90~1.10 区间保持 1，在 1.10~1.35 区间线性降至 0；超时集在 $x_t \le 0.90$ 时取 0，在 0.90~1.20 区间线性升至 1，$x_t \ge 1.20$ 时取 1。

上述设定中，主轴 110%预警和 150%故障阈值用于约束电流隶属函数的过渡区和严重过载上限；通信失败次数及夹具反馈时间采用次数和相对时间表示，可降低扫描周期和动作周期差异对参数的影响。各相邻状态之间设置线性过渡区，是为了避免刚性阈值在临界点产生突变。这些数值作为本文方法验证的初始工程参数，并非所有设备通用的固定阈值；实际部署时可依据同型号设备的运行样本对分界点进行再标定。

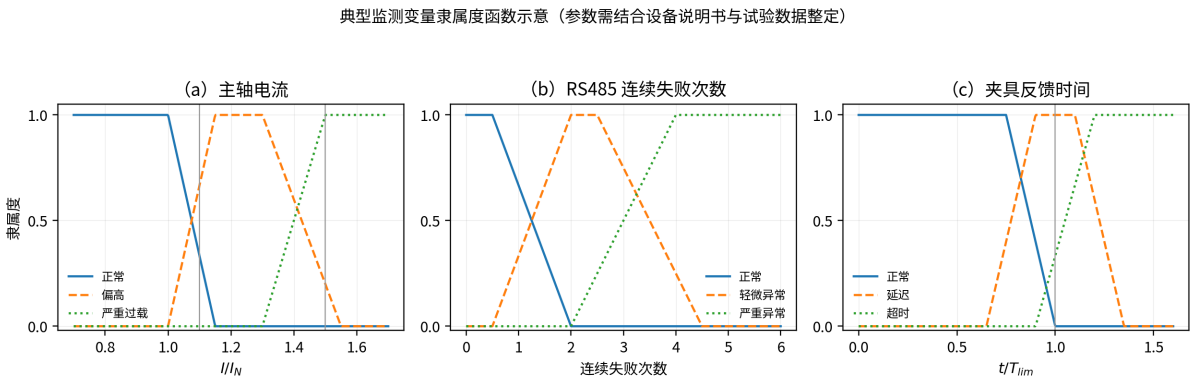


Figure 5. Membership functions of typical monitoring variables
图 5. 典型监测变量隶属度函数示意

6.4. 模糊推理规则

根据平台故障传播关系，模糊推理仍分别处理 OR 逻辑和 AND 逻辑。

对于 OR 逻辑，上层故障库所的置信度可表示为：

$$CF\left(P_j\right)=\max\left[CF\left(P_1\right),CF\left(P_2\right),\cdots,CF\left(P_n\right)\right]$$

OR 逻辑表示任一输入事件达到较高置信度即可推动上层故障成立。

对于 AND 逻辑，上层故障库所的置信度可表示为：

$$CF\left(P_j\right)=\min\left[CF\left(P_a\right),CF\left(P_b\right)\right]\times R_j$$

其中 R_j 为 AND 规则的可信度系数，用于对规则可靠程度进行修正。

考虑输入权重后，变迁综合激活强度可写为：

$$S_j=\sum W_{ij}\times CF\left(P_i\right)$$

当 $S_j\geq\theta_j$ 时，认为变迁 t_j 满足触发条件，相应故障信息传播至输出库所。

以主轴启动失败为例，其模糊置信度可表示为：

$$CF\left(\mathrm{P21}\right)=\min\left[CF\left(\mathrm{P211}\right),CF\left(\mathrm{P212}\right)\right]\times R_{211}$$

其中 P211 表示“主轴启动命令已发出”，P212 表示“3~5 s 内运行状态仍为 0”。只有两个条件同时具有较高可信度时，P21 才会被有效激活。

对于主轴过载故障，可写为：

$$CF\left(\mathrm{P22}\right)=\max\left[CF\left(\mathrm{P221}\right),CF\left(\mathrm{P222}\right),CF\left(\mathrm{P223}\right)\right]$$

其中 P221 表示“电流超过 110%且持续 2 s”，P222 表示“电流超过 150%”，P223 表示“变频器过流故障码”。三条路径可分别触发主轴过载，体现 OR 逻辑特征。

W_{ij} 表示输入条件对变迁的贡献，R_j 为规则可信度，θ_j 为触发阈值。单输入 OR 规则取 W_{ij} = 1.00、θ_j = 0.60；两输入 AND 规则取 W_{1j} = W_{2j} = 0.50、θ_j = 0.80；确定性规则 R_j = 1.00，模糊规则初始 R_j = 0.90。实际整定时以设备阈值为初值，并采用±10%的单参数扰动检查触发结果，敏感参数再结合试验数据修正。

当顶事件或一级故障库所被激活后，沿已触发变迁反向追溯：OR 节点按故障置信度排序候选支路，AND 节点保留全部前件，直至末端底层异常；再以该异常为索引匹配表 1“可能故障－处理方法”，输出排查顺序和维护建议。多个异常并发时，按置信度和安全优先级排序。

7. 典型故障传播路径与诊断过程分析

为说明不同故障逻辑的推理过程，选取 RS485 通讯故障和主轴启动失败两个案例，分别对应 OR 型单事件触发和 AND 型多条件联合触发。

7.1. 案例 1：RS485 通讯故障

该故障路径可表示为：

P111 RS485 连续读取失败→P11 RS485 通讯故障→P1 通讯与数据采集故障→P0 制造实验系统故障

初始标识设为 M0 = {P111 = 1，其余库所为 0}。当连续读取失败达到设定次数，T111 触发，故障由 P111 经 P11、P1 传播至 P0。

模糊推理中，P111 的置信度随连续失败次数增加，超过 T111 阈值后沿 P111→P11→P1→P0 传播。反向定位时，从 P0 经 P1、P11 可回溯到末端异常 P111，因此将“RS485 连续读取失败”列为该路径的根因候选；若 P12 或 P13 等通信支路同时被激活，则各支路均保留，并依据故障置信度进行排序。确定 P111 后，再调用表 1 中 RS485 通讯故障对应的处理项，依次检查接线与屏蔽接地、站号和波特率、终端

电阻以及 CRC 和数据刷新状态。

7.2. 案例 2：主轴启动失败

该故障路径可表示为：

(P211 主轴启动命令已发出，P212 3~5 s 内运行状态仍为 0)→P21 主轴启动失败→P2 主轴系统故障→P0 制造实验系统故障

初始标识设为 M0 = {P211 = 1，P212 = 1，其余库所为 0}。只有启动命令已发出且规定时间内运行状态仍未建立时，AND 变迁 T211 才触发。

在模糊推理中，P211 为命令条件，P212 的置信度随超时时间增加；两者达到 T211 阈值后，故障由 P21 传播至 P2 和 P0。反向定位时，从 P0 经 P2、P21 回溯至 AND 变迁 T211，并同时保留 P211 与 P212。其中 P211 用于确认“已发出主轴启动命令”的前提，P212 表示“规定时间内运行状态未建立”的异常，二者构成联合原因，且 P212 为优先检查对象；若主轴过载或变频器故障等其他支路同时激活，则并列保留并按置信度排序。随后依据表 1 及控制逻辑生成检查顺序：先核对急停和安全条件，再检查主轴使能、运行信号、变频器参数及外部控制回路。

上述案例表明，FTA-Petri 网能够描述底层异常、中间故障、一级故障和系统级故障之间的传播关系；引入模糊机制后，可进一步处理通讯失败次数和响应时间等具有渐变特征的异常信息，为后续实验验证及参数整定提供模型基础。

8. 结论

本文基于 PLC/CNC 状态、通讯信息、主轴变频器数据、坐标轴反馈、安全联锁及夹具换刀信号，建立了监测数据、异常表现和故障类型的对应关系，为故障建模提供数据基础。

以制造实验系统故障为顶事件，将故障划分为通讯与数据采集、主轴、坐标轴/伺服、安全回路、夹具与换刀及状态/工艺六类，并构建故障树；进一步转换为 FTA-Petri 网，实现故障层级和传播关系的统一描述。

针对监测信息的边界不确定性，在 FTA-Petri 网中引入隶属度、规则权重、变迁阈值和故障置信度，使模型能够以连续可信程度描述异常状态并完成 OR、AND 规则推理。

RS485 通讯故障和主轴启动失败的分析表明，模型能够表达典型故障逻辑和传播路径，可为本地报警、故障定位和处理建议提供模型依据。

目前研究以模型构建和方法设计为主，后续需结合实际运行数据和典型故障试验验证诊断准确性、实时性及参数合理性，并进一步优化隶属函数、规则可信度和变迁阈值。

参考文献

[1] 廖江林, 黄欢, 向映旭. 机电设备智能控制系统设计中 PLC 的地位研究[J]. 新能源与智能网联, 2025(1): 79-84.

[2] 李阳阳, 姚磊, 周俊童. 配电系统安全性分析技术研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2025(4): 74-79.

[3] 丁健, 卢兴福, 曹俊, 等. 基于模糊 pETRI 网的变电站变压器故障快速诊断模型[J]. 电子设计工程, 2026, 34(8): 91-94+100.

[4] 丁健, 卢兴福, 曹俊, 等. 基于改进 pETRI 网的变电站高压断路器故障诊断方法[J]. 国外电子测量技术, 2025, 44(12): 57-62.

[5] 王育辉, 杨乾军, 徐思宁, 等. 基于 Petri 网的国防工程设计管理流程优化研究[J]. 项目管理技术, 2026, 24(8): 67-87.

[6] 倪景峰, 马世波, 刘玉姣, 等. 基于 WFPN 模型的矿井通风系统故障诊断方法[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2026, 62(4): 529-535.

[7] 任燕晨. 智能环境调控系统中基于维度模型的服务建模与管理策略[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京邮电大学, 2015.

[8] 杨蔚海. 基于 Petri 网的离散事件动态系统的建模、优化与应用[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2025.