

基于知识库的核电厂压力变送器可靠性评估

刘正一*, 周世梁#, 吕杜城

华北电力大学核科学与工程学院, 北京

收稿日期: 2025年2月27日; 录用日期: 2025年3月11日; 发布日期: 2025年4月17日

摘要

针对核电厂压力变送器可靠性评估中传统方法(如鉴定试验、电路仿真)难以量化元器件的随机失效对压力变送器可靠性影响的问题,提出一种基于知识库的模型驱动可靠性评估方法。采用FIGARO建模语言构建描述压力变送器电路元器件失效模式与后果的知识库;基于知识库在Model Builder平台中构建图形化描述模型并自动生成故障树;结合FIDES可靠性模型计算元器件失效率,利用XFTA和YAMS软件分别开展故障树定量分析与蒙特卡洛仿真。结果表明,严重事故后360小时,压力变送器不可用度为0.00415858(XFTA)与0.00405161(YAMS),两者相对误差为2.58%,同时最小割集分析表明运算放大器为电路关键元器件。该方法验证了模型驱动方法在复杂仪表系统可靠性评估中的有效性,可提高核电厂关键仪表可靠性评价的规范性和效率。

关键词

压力变送器, 可靠性评估, FIGARO知识库, 最小割集

Reliability Assessment of Nuclear Power Plant Pressure Transmitters Based on Knowledge Base

Zhengyi Liu*, Shiliang Zhou#, Ducheng Lyu

School of Nuclear Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing

Received: Feb. 27th, 2025; accepted: Mar. 11th, 2025; published: Apr. 17th, 2025

Abstract

To address the challenge in nuclear power plant pressure transmitter reliability assessment where

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 刘正一, 周世梁, 吕杜城. 基于知识库的核电厂压力变送器可靠性评估[J]. 核科学与技术, 2025, 13(2): 110-120. DOI: 10.12677/nst.2025.132012

traditional methods (e.g., qualification testing, circuit simulation) struggle to quantify the impact of random component failures on system reliability, this study proposes a knowledge base-driven model-based reliability assessment approach. By employing the FIGARO modeling language, a knowledge base describing failure modes and consequences of pressure transmitter circuit components is constructed. Based on this knowledge base, a graphical descriptive model is developed in the Model Builder platform, from which a fault tree is automatically generated. Component failure rates are calculated using the FIDES reliability model, followed by quantitative fault tree analysis and Monte Carlo simulation through XFTA and YAMS software, respectively. Results demonstrate that the system unavailability at 360 hours post-severe accident is 0.00415858 (XFTA) and 0.00405161 (YAMS), with a relative error of 2.58%. Minimal cut set analysis further identifies operational amplifiers as critical components in the circuit. This method validates the effectiveness of the model-driven approach for reliability assessment of complex instrumentation systems, significantly enhancing the standardization and efficiency of reliability evaluation for critical nuclear power plant instruments.

Keywords

Pressure Transmitter, Reliability Assessment, FIGARO Knowledge Base, Minimal Cut Sets

Copyright © 2025 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

在核电厂中,为了使核岛和常规岛的各种设备安全经济地运行,必须对压力加以监视和控制[1]。压力变送器参与核电厂保护系统所需工艺参数的监测,对核电厂的安全起到非常重要的作用。在核电厂严重事故环境下,安全壳内的压力变送器短时间会经历辐射剂量率的升高、温度和压力的大幅度变化。这些环境变化会造成压力变送器电子元件的失效率升高,导致压力变送器的可靠性降低。《核动力厂安全重要仪表和控制系统》中提到,设备鉴定中不要求考虑严重事故工况,但是,应以合理可信度和可能程度表明用于响应严重事故的设备能够在预计的严重事故工况下起作用[2]。目前普遍采用的评价方法为将仪表鉴定曲线最大值与严重事故环境条件的要求值之间进行对比,并结合工程判断评价严重事故环境对仪表的可用性的影响[3],这一方法虽能初步筛选合格设备,却难以量化环境应力对可靠性退化的影响。

针对这一问题,不少学者提出了改进分析方法。邹树梁、黄有俊对鉴定曲线及环境曲线进行包容性分析并建立电路模型,根据环境对仪表影响敏感性建立降级的电路特征或引入噪声信号,通过输出结果的对比,分析了温度对压力变送器电路输出响应的影响及严重事故下仪表的可用性[4][5],但其在仿真分析中采用的是简化电路模型,与完整电路存在一定的误差。对于简化模型带来的误差问题,王肖宇等人对差动电容式压力变送器的电路进行了详细的建模,通过导入电子元件的故障以及温度扫描来分析模拟电路输出响应[6]。此外,陈垦伦等人以高温熔盐压力变送器为研究对象进行了失效模式及影响分析(FMEA)及可靠性评估,找到可靠性薄弱环节和关键影响因素[7]。然而,上述学者的研究工作中,没有建立可靠性评价模型,无法分析元器件失效率变化是如何影响压力变送器的可靠性。

本文基于 FIGARO 建模语言,构建了压力变送器电路部分可靠性知识库;基于知识库构建了图形化模型,并自动转化为故障树模型,进行定量分析。并以某差动电容式压力变送器为分析对象,采用所提方法开展了压力变送器的可靠性评估,识别了电路薄弱环节,为变送器电路可靠性优化设计提供了依据。

2. 压力变送器电路及工作原理

核电厂压力变送器多采用电容式压力变送器，其原理是差动电容受到压力后，电容量产生的变化可以反映被测压力的变化，通过一定的测量电路将电容值转换为电流信号并放大。某型压力变送器电路的原理如图 1 所示。

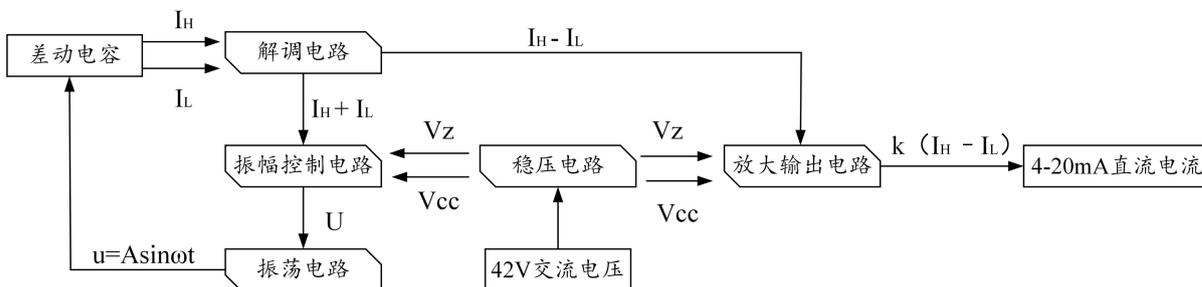


Figure 1. Schematic diagram of the pressure transmitter circuit

图 1. 压力变送器电路原理图

差动电容的中心测量膜片与两侧隔离膜片形成 2 个独立的腔室，介质压力是通过腔室中的填充液作用到中心测量膜片上，中心测量膜片与两侧固定极板构成两个平面型电容 C_H 和 C_L [8]。当压力变送器工作时，外部压力导致中心测量膜片产生位移，导致可动极板和左右 2 个固定极板之间的间距发生变化，电容 C_H 和 C_L 的电容量发生变化。振荡电路产生的交流电压在电容 C_H 和 C_L 中产生电流 I_H 和 I_L ，经过解调电路，输出两个电流 $I_H + I_L$ 和 $I_H - I_L$ 。电流 $I_H + I_L$ 经过振幅控制电路为振荡电路提供一个起振电压，振荡电路则为解调电路提供交流电压，解调电路、振幅控制电路和振荡电路构成一个负反馈电路，目的是保证电流 $I_H + I_L$ 稳定，使电流 $I_H - I_L$ 经过放大输出电路输出的电流值与压力成正比。此外稳压电路输出两个稳定电压 V_{CC} 和 V_Z ， V_{CC} 为振幅控制电路和电流放大电路中的运算放大器提供工作电压， V_Z 则作为运算放大器反向输入端的基准电位。

3. 压力变送器电路可靠性模型建立

3.1. 基于模型的可靠性分析方法

基于模型的可靠性评估(Model-Based Reliability Assessment, MBRA)方法有效解决了传统可靠性分析方法处理复杂系统时存在的工作量巨大、重复工作效率低、人工建模的主观性强等问题[9]。可减少主观判断引入的偏差或疏漏，提高可靠性分析的系统化和自动化水平，提高分析结果的客观性和准确性。MBRA 方法的主要思想是以高级建模语言来描述所研究系统的功能和物理架构(高层模型)，高层模型可以直接处理(随机模拟)或自动编译成故障树等[10]。

本研究使用的模型是基于 Model Builder 软件建立的图形化模型，研究方法由以下部分组成：

- (1) 失效模式与影响分析(Failure mode and effect analysis, FMEA)；
- (2) 建立元器件知识库；
- (3) 知识库导入 Model Builder 软件，然后建立图形化模型；
- (4) 自动生成故障树模型。

3.2. 压力变送器电路元器件失效模式与影响分析

压力变送器电路中的元器件类型有电阻、电容、二极管、三极管、运算放大器、变压器、可变电阻。根据元器件失效机理，将元器件失效模式分为开路失效、短路失效和参数漂移失效，而元器件失

效的影响，体现在压力变送器电路的输出电流上。因此基于压力变送器电路功能设计和工作原理，建立电路的仿真模型，基于电路仿真，分析元器件失效的影响。根据仿真结果可将元器件失效影响分为两类：

(1) 压力变送器电路功能故障。压力变送器电路中元器件的失效导致部分电路丧失功能，进而导致压力变送器电路功能故障。

(2) 压力变送器电路输出故障。根据电路仿真结果，元器件的失效导致压力变送器电路输出结果不满足精度要求，压力变送器电路输出故障。

3.3. 压力变送器电路元器件知识库建立

使用 Model Builder 软件建立的图形化模型，其系统、结构和组件的状态、逻辑需要在知识库中定义。分析人员基于预定义的组件构建系统的图形化模型，知识库定义了这些组件的行为，包括故障和故障传播。法国电力公司提供了知识库开发平台 Visual Figaro，可以根据需求使用 FIGARO 建模语言来构建知识库。

在 FIGARO 语言中，使用类(CLASS)来描述具有相同行为和特征的元器件，包含一系列它所描述的元器件所共有的特征；使用对象(OBJECT)来描述电路中特定的元器件，每个对象都属于一个类，对象继承了其类的特征。

一个类由两部分组成，静态特征部分(如表 1 所示)与动态行为部分。

(1) 静态特征部分

Table 1. Static features of CLASS

表 1. 类的静态特征

关键字	描述
CLASS	声明类的名称和继承了其属性的类的名称
ATTRIBUTE	声明类的状态变量，通常为布尔变量，通过 TRUE 和 FALSE 来描述组件的失效和正常状态
INTERFACE	声明不同类之间的接口，用于交互规则中描述失效后果的影响
CARDINAL	声明类接口的数量
DIST_PARAMETER	声明参数，如元器件的失效率
FAILURE	声明类的失效域，即该类有哪些失效模式

(2) 动态行为部分

FIGARO 语言中有两种规则用来描述对象的动态行为：发生规则(OCCURRENCE)和交互规则(INTERACTION)。发生规则描述元器件可能发生的状态转移事件，如某一元器件在正常运行时，会有概率发生失效。而交互规则用于传播系统状态转移发生后的确定性结果，如某一元器件发生失效后会使得部分电路失效。

对电路进行失效模式与后果分析后，使用 FIGARO 建模语言描述元器件的失效模式、失效率等，并定义状态变量及接口，并在发生规则和交互规则中描述元器件的失效和失效后果。根据电路结构和电路的失效模式与后果分析，将知识库中类的定义分为两部分。元器件类是对电路中具体的元器件(实际存在的电阻、电容等)进行定义，电路类是对整体电路划分的各功能电路(解调电路、振荡电路等)进行定义，用于描述实现某个电路功能的元器件的集合，目的是将元器件按功能和对电路的影响进行分组。

3.4. 压力变送器电路可靠性模型

压力变送器电路可靠性分析所使用的软件如表 2 所示。

Table 2. Software introduction

表 2. 软件简介

软件名称	功能简介	输出文件
Visual Figaro	使用 FIGARO 建模语言定义类来构建知识库	.dbc
Figaro IDE Designer	设计类的建模图形, 用于图形化建模	.ico 和 .sym
Model Builder	基于知识库建立系统的图形化模型, 并转化为故障树模型或 FIGARO 0 模型	.rsa 和 .fi
XFTA	对故障树模型(.rsa)进行定量分析计算	-
YAMS	对 FIGARO 0 模型(.fi)进行定量分析计算	-

在 Visual Figaro 平台中使用 FIGARO 建模语言对压力变送器电路中所有电路类和元器件类定义, 并定义类之间的连接点, 编写连接规则和类接口的填充规则。在 Figaro IDE Designer 平台设计类的建模图形, 并导入 Visual Figaro 平台, 为每个类分配建模图形。

在 Visual Figaro 平台导出 XML 语言描述的 .dbc 文件, 完成知识库的构建。将知识库(.dbc 文件)导入到 Model Builder 软件中, 进行图形化建模。基于知识库构建的压力变送器电路图形化模型如图 2 所示。

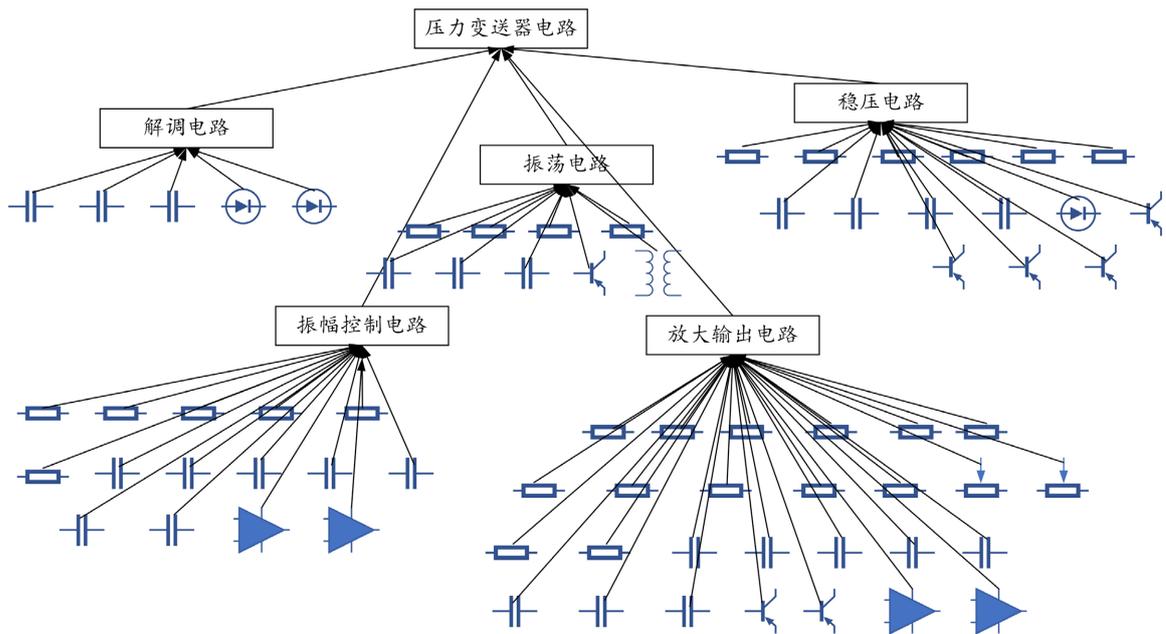


Figure 2. Graphical model of pressure transmitter circuit

图 2. 压力变送器电路图形化模型

4. 压力变送器电路可靠性分析

4.1. 元器件失效率

元器件的失效率数据是使用 FIDES 可靠性预计模型得到, 该模型可以用于对电子产品在工作及贮存

环境下的多应力影响可靠性进行预计。

FIDES 的通用可靠性模型如式(1)所示:

$$\lambda = \lambda_{physical} \times \pi_{PM} \times \pi_{Process} \quad (1)$$

式中, λ 为产品预计失效率; $\lambda_{physical}$ 为物理因素(高温、电应力、机械应力、辐照等)的失效率; π_{PM} 为产品制造的质量与技术控制系数; $\pi_{Process}$ 为包含此产品在开发、制造以及使用过程中的质量与技术控制系数。

以开关二极管为例, 根据《FIDES Guide 2022 Edition A》中电子元器件半导体失效率计算公式:

$$\lambda_{physical} = \sum_i^{Phases} \left(\frac{t_{phase}}{T_{Total}} \right)_i \times (\lambda_{oTH} \times (\pi_{Thermal} + \pi_{FZ}) + \lambda_{omech} \times \pi_{mech})_i \times (\pi_{Induced})_i \quad (2)$$

式中, λ_{oTH} 表示与温度相关的基础失效率; λ_{omech} 为与机械应力相关的基础失效率; $\pi_{Thermal}$ 表示电压应力和温度联合相关的加速因子; π_{FZ} 表示与辐照相关的加速因子; π_{mech} 表示机械振动相关的加速因子; $\pi_{Induced}$ 表示未列出的应力的贡献。

$$\pi_{Thermal} = \pi_{El} \times e^{11604 \times 0.7 \times \left[\frac{1}{293} - \frac{1}{273 + T_{j-component}} \right]} \quad (3)$$

$$\pi_{FZ} = \frac{t_1}{t_2} \quad (4)$$

$$\pi_{mech} = \left(\frac{G_{RMS}}{0.5} \right)^{1.5} \quad (5)$$

$$\pi_{Induced_i} = \left(\pi_{Placement_i} \times \pi_{Application_i} \times \pi_{Ruggedizing_i} \right)^{0.511 \times \ln(C_{Sensitivity})} \quad (6)$$

式中, π_{El} 为与反向电压相关的系数, 对于开关二极管: 当 $\frac{V_{applied}}{V_{rated}} > 0.3$ 时, $\pi_{El} = \left(\frac{V_{applied}}{V_{rated}} \right)^{2.4}$; 当 $\frac{V_{applied}}{V_{rated}} \leq 0.3$

时, $\pi_{El} = 0.056$; $V_{applied}$ 为相位期间施加的反向电压, V_{rated} 为额定反向电压; $T_{j-component}$ 为元器件工作环境温度; t_1 为正常运行温度下的失效前运行时间; t_2 为严重事故温度下的失效前运行时间; G_{RMS} 为与每个随机振动相位相关的振动幅值; $\pi_{Placement}$ 表示元器件在设备或系统中的位置的影响; $\pi_{Application}$ 表示在使用含有该元器件的产品期间, 使用环境的影响; $\pi_{Ruggedizing}$ 表示在产品开发中建立超应力容忍度政策的影响; $C_{Sensitivity}$ 表示有关项目技术固有的超应力敏感系数。

对于开关二极管: 开关二极管为无源元件, 所以其 π_{PM} 的取值为 1.6; $\pi_{Process}$ 的取值为 4; 开关二极管 λ_{oTH} 为 0.0044 FIT, λ_{omech} 为 0.000005 FIT; 超应力敏感系数 $C_{Sensitivity}$ 为 0.63; 通过现场运维情况与查询专家可知, 严重事故后施加的反向电压是很小的, 其与额定反向电压之比小于 0.3, π_{El} 取值为 0.056; $\pi_{Application}$ 为默认值 1.9; $\pi_{Placement}$ 的取值范围为 1~2.5, $\pi_{Ruggedizing}$ 的取值范围为 1~2, 取其平均值 1.75 和 1.5 进行计算。计算得到开关二极管的失效率为 2.0694×10^{-8} 。

根据压力变送器电路中元器件的类型及严重事故后的环境参数, 在《FIDES Guide 2022 Edition A》中选择相应的参数, 得到每种类型元器件在严重事故环境下的失效率[11][12], 如表 3 所示。

在获得压力变送器电路元器件在严重事故环境下的整体失效率后, 需进一步量化不同失效模式(开路、短路、参数漂移)对元器件失效的贡献。由于元器件失效机理受环境应力与自身物理特性的综合影响, 不同失效模式的发生概率存在显著差异, 如电容类元件在高温高压环境下更易发生短路失效。因此, 需确定各元器件失效模式的典型分布比例。文献[13]根据经验数据及统计, 给出了元器件失效模式占比, 如表 4 所示。

Table 3. Failure rate of components**表 3.** 元器件失效率

元器件	失效率
金属膜电阻	5.1129E-10
可变电阻	9.3260E-09
陶瓷电容	5.9746E-09
钽电容	1.9663E-07
开关二极管	2.0694E-08
整流二极管	4.8773E-08
精密稳压管	8.9378E-07
稳压管	4.4869E-07
三极管	1.9168E-07
变压器	3.0462E-09
运算放大器	8.5798E-06

Table 4. Proportion of component failure modes**表 4.** 元器件失效模式占比

元器件	失效模式占比
金属膜电阻	开路 92%，参数漂移 8%
可变电阻	开路 40%，短路 10%，参数漂移 50%
陶瓷电容	开路 16%，短路 73%，参数漂移 17%
钽电容	短路 75%，参数漂移 25%
开关二极管	开路 50%，短路 17%，参数漂移 33%
整流二极管	开路 50%，短路 17%，参数漂移 33%
精密稳压管	开路 25%，短路 29%，参数漂移 46%
稳压管	开路 25%，短路 29%，参数漂移 46%
三极管	开路 46%，短路 38%，参数漂移 16%
变压器	开路 40%，短路 45%，参数漂移 15%
运算放大器	开路 21%，短路 9%，参数漂移 70%

通过将表 3、表 4 中的元器件总失效率与其失效模式占比相结合，可计算得到开路、短路、参数漂移失效模式的具体失效率，从而得到多维度失效数据，为故障树分析提供输入参数。

4.2. 压力变送器电路故障树模型

在 Model Builder 软件里建立图形化模型后，使用 Model Builder 软件中故障树生成工具，定义压力

变送器电路失效为顶事件，将图形化模型自动转化为故障树模型。故障树中基本事件(部分)如表 5 所示。

Table 5. Basic events of pressure transmitter fault tree (partial)
表 5. 压力变送器故障树基本事件(部分)

故障树符号	事件含义
T	压力变送器电路故障
T1	压力变送器电路功能故障
T2	压力变送器电路输出故障
M1	稳压电路功能故障
M2	解调电路功能故障
M3	振幅控制电路功能故障
M4	振荡电路功能故障
M5	放大输出电路功能故障
M6	稳压电路输出故障
M7	解调电路输出故障
M8	振幅控制电路输出故障
M9	放大输出电路输出故障
M10	电容 C24 故障
M11	二极管 D3 故障
X1	电容 C24 开路故障
X2	电容 C24 短路故障
X3	二极管 D3 开路故障
X4	二极管 D3 短路故障
X5	电容 C22 短路故障
X6	二极管 D2 开路故障
X7	电容 C23 短路故障

中文压力变送器电路故障树(部分)如图 3、图 4 所示。

4.3. 定量分析

XFTA 是一个基于 Open PSA (Open Initiative for Next Generation PSA)格式描述的免费的故障树计算引擎，计算输出的结果包括典型的最小割集分析，顶/基本事件概率重要度等[14]。基于 Model Builder 软件建立的压力变送器电路图形化模型，可生成故障树模型和 FIGARO 0 文本模型，将这两种模型分别使用 XFTA 和蒙特卡罗仿真软件 YAMS 进行计算，得到严重事故环境下，压力变送器电路不可用度随时间的变化曲线，如图 5 所示。

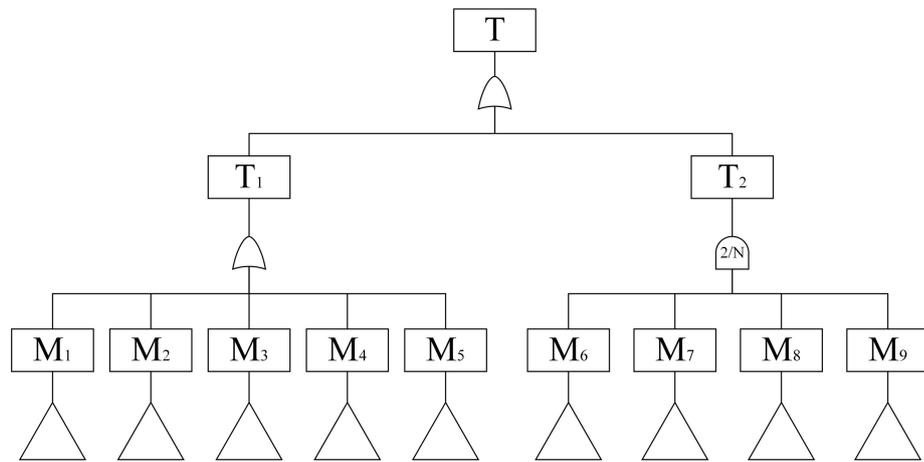


Figure 3. Pressure transmitter circuit fault tree
图 3. 压力变送器电路故障树

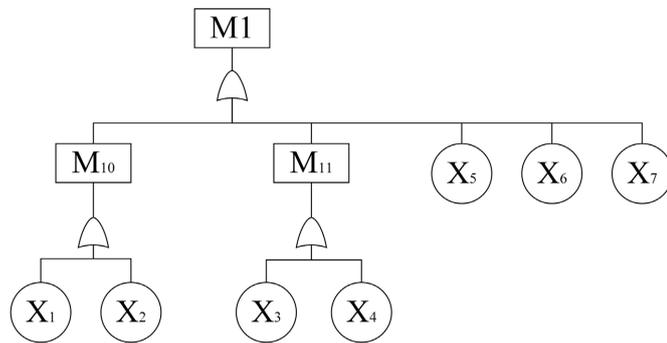


Figure 4. Pressure transmitter voltage stabilization circuit fault tree
图 4. 压力变送器稳压电路故障树

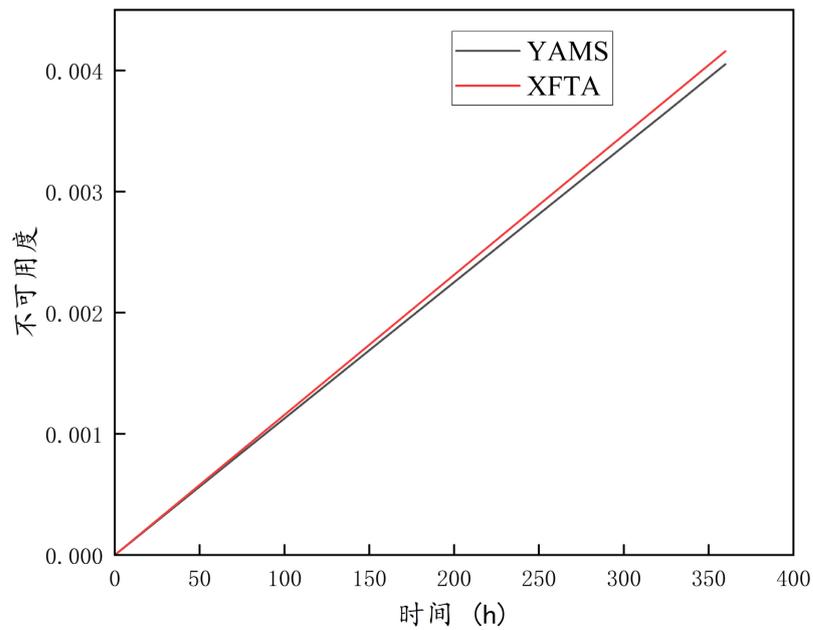


Figure 5. Post-Accident pressure transmitter circuit unavailability variation curve over time
图 5. 事故后压力变送器电路不可用度随时间变化曲线

从图中可以看出,两种计算方式的结果相近,在事故后 360 h 时,XFTA 计算的不可用度为 0.00415858, YAMS 计算的不可用度为 0.00405161,两者相对误差为 2.58%。YAMS 与 XFTA 的差异源于方法本质差异及数值计算特性,但其量级在工程分析允许范围内,这一结果验证了由图形化模型转化为故障树模型的准确性。

最小割集是导致顶事件发生的初始事件的组合(交集),是一个最小的组合,在这个组合中,所有的失效会导致顶事件的发生[15]。基于 XFTA 计算得到的压力变送器电路故障树的最小割集如表 6 所示。

Table 6. Minimal cut sets of the pressure transmitter circuit fault tree

表 6. 压力变送器电路故障树最小割集

NO.	probability	contribution/%	Minimal cut sets	
1	6.48423E-04	15.5637	U1_OPENFAIL	-
2	6.48423E-04	15.5637	U2_OPENFAIL	-
3	6.48423E-04	15.5637	U3_OPENFAIL	-
4	6.48423E-04	15.5637	U4_OPENFAIL	-
5	2.77947E-04	6.67139	U1_SHORTFAIL	-
6	2.77947E-04	6.67139	U2_SHORTFAIL	-
7	2.77947E-04	6.67139	U3_SHORTFAIL	-
8	2.77947E-04	6.67139	U4_SHORTFAIL	-
9	3.17416E-05	0.761875	Q5_OPENFAIL	-
10	3.17416E-05	0.761875	Q6_OPENFAIL	-
11	3.17416E-05	0.761875	Q7_OPENFAIL	-
12	3.17416E-05	0.761875	Q1_OPENFAIL	-
13	2.86018E-05	0.686513	Z1_PARAMETERFAIL	-
14	2.62214E-05	0.629376	Q3_SHORTFAIL	-
15	2.62214E-05	0.629376	Q6_SHORTFAIL	-
16	2.62214E-05	0.629376	Q1_SHORTFAIL	-
17	1.80317E-05	0.432804	Z1_SHORTFAIL	-
18	1.80317E-05	0.432804	D3_SHORTFAIL	-
19	1.55446E-05	0.373107	D3_OPENFAIL	-
20	1.55446E-05	0.373107	D2_OPENFAIL	-
21	1.55446E-05	0.373107	Z1_OPENFAIL	-
...
78	6.85547E-08	1.64548E-03	U4_PARAMETERFAIL	Q3_OPENFAIL
79	6.85547E-08	1.64548E-03	U3_PARAMETERFAIL	Q3_OPENFAIL
...

压力变送器电路故障树共 393 个最小割集, 其中运算放大器 U1、U2、U3、U4 的单点故障对压力变送器电路失效的贡献度占比超过 85%。三极管 Q1 到 Q7 的贡献度其次, 主要体现在三极管的开路故障。单个电容的短路失效贡献较低, 但压力变送器电路中电容分布广泛, 总累积贡献也超过 3%。稳压二极管 Z1 作为稳压电路中的关键功能元器件, 对压力变送器电路失效的贡献也不可忽视。

5. 结论

针对核电厂压力变送器在严重事故工况下的可靠性评估需求, 提出了一种基于知识库的模型驱动方法, 使用 FIGARO 建模语言, 构建某压力变送器电路可靠性知识库, 定义了每种元器件的短路、开路和参数漂移失效模式, 并结合电路仿真, 分析元器件每种失效对电路输出的影响。基于压力变送器可靠性知识库, 在 Model Builder 软件中建立压力变送器电路图形化模型, 并自动转化为故障树模型。结合故障树分析与蒙特卡罗仿真, 量化了元器件随机失效对压力变送器可靠性的影响, 通过某差动电容式压力变送器的研究, 得出以下结论:

故障树分析表明, 运算放大器(U1~U4)的开路与短路失效贡献了系统不可用度的 85%以上。其中, 单个运算放大器开路失效的贡献度为 15.56% (每项), 短路失效贡献 6.67% (每项)。运算放大器的单点失效是压力变送器电路最敏感环节, 需优先采用高可靠性器件优化。

通过 XFTA (解析法)与 YAMS (蒙特卡罗仿真)的交叉验证, 证明了知识库驱动的故障树建模流程在复杂电路系统可靠性分析中的准确性, 为核电厂关键仪表的量化评估提供了方法。同时 FIGARO 建模语言具有更强的描述能力, 能够描述传统布尔模型(如故障树)无法表达的动态行为, 如冗余切换等。因此对于更复杂的核电厂仪表如智能压力变送器也同样适用, 但生成故障树模型时则需要近似处理。

参考文献

- [1] 朱夏虹. 核工程检测技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2009.
- [2] IEC (2001) IEC 61513 Nuclear Power Plants-Instrumentation and Control for Systems Important to Safety-General Requirements for Systems.
- [3] 杨忠勤. 核电设备严重事故鉴定标准建设[J]. 核标准计量与质量, 2011(4): 23-25.
- [4] 邹树梁, 黄有骏. 核电厂事故温度环境对压力变送器的影响分析[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2014, 28(1): 1-4, 16.
- [5] 黄有骏. 核电厂严重事故下仪表可用性评价方法研究[D]: [硕士学位论文]. 衡阳: 南华大学, 2014.
- [6] 王肖宇, 张心怡, 殷晶, 等. 基于电路仿真技术的核电厂仪表可用性评价[C]//中国核学会 2019 年学术年会论文集. 北京: 中国原子能出版社, 2019: 274-283.
- [7] 陈垦伦, 关敏仪, 梁佩博, 等. 基于 FMEA 的某型高温熔盐压力变送器可靠性分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2023, 41(2): 33-39.
- [8] 冯翠. 复合式电容压力变送器的开发和应用[J]. 流体测量与控制, 2023, 4(6): 51-55.
- [9] 徐思敏, 陈浠毓, 黄素文. MBRA 在核电厂仪控系统可靠性分析中的应用研究[J]. 自动化仪表, 2023, 44(z1): 84-87, 91.
- [10] Prosvirnova, T. (2014) AltaRica 3.0: A Model-Based Approach for Safety Analyses. Master's Thesis. <https://www.researchgate.net/publication/278827421>
- [11] FIDES Guide 2009 Edition: A Reliability Methodology for Electronic Systems. <http://www.fides-reliability.org>
- [12] 高成, 陈炳印, 黄姣英, 等. 多失效机理下基于 FIDES 的 MEMS 失效率预计研究[J]. 微电子学, 2020, 50(5): 743-749.
- [13] 冒天诚. 故障树与船舶自动控制系统的故障诊断[M]. 大连: 大连海事大学出版社, 2000: 16-17.
- [14] 刘雪. 模型驱动的嵌入式系统设计安全性验证方法研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- [15] 宋龙飞, 陈玉清, 金振俊. 基于故障树和产生式规则的故障诊断专家系统设计[J]. 中国舰船研究, 2024, 19(z1): 84-92.