# 基于不完全检验测试的安全仪表系统失效划分和 $PFD_{avg}$ 计算方法

李秋娟[1],熊文泽[2*],刁 宇[1],刘 瑶[2],刘胜楠[1],汪 阳[2]

(1. 国家石油天然气管网集团有限公司科学技术研究总院分公司,天津 300450;
2. 机械工业仪器仪表综合技术经济研究所,北京 100055)

**摘要**:目前对于安全仪表系统(SIS)的要求时危险失效平均概率($PFD_{avg}$)的计算采用的是完全检验测试(假设检验测试覆盖率 100%)的方法,然而实际应用中这种完全的检验测试只存在理想情况,特别是面对复杂的系统或检维修策略情况下计算的误差难以接受。该文对于不完全检验测试情况下的失效划分进行研究,并基于新的失效划分,采用马尔科夫(Markov)状态转移的方式开展概率模型的构建,基于此模型开展 $PFD_{avg}$ 的计算,从而减少概率计算的误差。

**关键词**:SIS 检验测试;$PFD_{avg}$;Markov 模型

**中图分类号**:X937 **文章编号**:1000 - 0682(2024)04 - 0064 - 07

**文献标识码**:A DOI:10.19950/j.cnki.CN61 - 1121/TH.2024.04.013

## Failure classification and $PFD_{avg}$ calculation method for safety instrumented systems based on incomplete proof testing

LI Qiujuan[1], XIONG Wenze[2*], DIAO Yu[1], LIU Yao[2], LIU Shengnan[1], WANG Yang[2]

(1. *National Petroleum and Natural Gas PipeChina Network Group Co., Ltd., Tianjin* 300450, *China*)

(2. *Instrumentation Technology and Economy Institute, Beijing* 100055, *China*)

**Abstract**: Currently, the calculation of the average probability of dangerous failure on demand ($PFD_{avg}$) for safety instrumented systems (SIS) was based on the method of complete proof testing (assuming 100% coverage of proof testing). However, in practical application, this completed proof testing only exists in ideal situations, especially when faced with complex systems or maintenance strategies, and the calculation errors was difficult to accept. This article is reported that the failure partitioning under incomplete proof testing, and based on the new failure classification, uses Markov state transition to construct a probability model. Based on this model, $PFD_{avg}$ is calculated to reduce the error in probability calculation.

**Keywords**: SIS proof test; $PFD_{avg}$; Markov model

## 0 引言

安全仪表系统(SIS)是应用于石油、化工等过程工业中,保障生产安全的关键设施,一般采用安全完整性等级(SIL)作为衡量其安全能力的指标[1]。SIL 一般分为 4 个等级(SIL1 ~ SIL4)[2],SIL 的高低反应了 SIS 在危险发生时能否正确响应的可能性(概率)。在影响 SIL 高低的因素中,要求时危险失效平均概率($PFD_{avg}$)是其中关键的定量指标之一。

在对 $PFD_{avg}$ 进行概率建模计算过程中,检验测试是影响 $PFD_{avg}$ 的关键因素,这包括检验测试间隔

**收稿日期**:2024 - 02 - 06

**基金项目**:国家重点研发计划项目"跨地域复杂油气管网安全高效运行状态监测传感系统及应用"(2022YFB3207600);国家市场监管重点实验室(智能机器人安全)开放课题资助(GQI - KFKT202206)

**第一作者**:李秋娟(1980—),女,山东临沭人,德国斯图加特大学硕士,高级工程师,主要从事油气管道人工智能技术、功能安全技术和成果推广工作相关技术研究。E - mail:liqj@ pipechina. com. cn

**通信作者**:熊文泽(1986—),男,四川渠县人,硕士,高级工程师,主要从事高危复杂仪表、控制系统的功能安全、可靠性和信息安全相关技术研究。E - mail:xwz@ instrnet. com

($T_1$)和检验测试覆盖率($PTC$)。$T_1$是 2 次检验测试之间的时间间隔,一般用小时作为单位;$PTC$ 是检验测试对于危险不可诊断到失效的覆盖程度,一般用百分数(%)表示。

目前,对于检验测试仅考虑了对于危险不可诊断到的失效,而没考虑对于诊断本身的测试验证,在开展 $PFD_{avg}$计算过程中仅考虑了固定的 $T_1$时间,且 $PTC$ 假设为 100%。但在实际生产运行中这是很难实现的,这就导致计算的概率误差超出预期,错误的概率估算会对 SIS 的安全能力评价带来偏差[3]。

在现有的一些研究中,一方面是对检验测试如何实施的方法研究[4],包括可能采取的一些自动化工具[5-6],另一方面是对基于检验测试的失效概率建模的研究[7-8],但是在这些研究中,仅考虑完全检验测试下的 Markov 模型[7],也没有对检验测试所产生的失效划分的变化进行重新分配,缺少基于检验测试覆盖率构建完全的 Markov 模型[8-9]。

## 1　现有的 SIS 失效划分及 $PFD_{avg}$估算方法

### 1.1　SIS 失效划分方法

按照当前功能安全技术的理论体系,在过程工业领域对于 SIS 将其失效按照失效的后果进行失效划分,按照“安全”与“危险”进行第 1 次分类;再基于该失效能否被诊断到,按照可诊断的和不可诊断的方式进行第 2 次分类,获得 4 种失效分类,如图 1 所示。在相关规范中对于失效分类还包括无影响的失效、无关失效以及共因失效,这些失效与该文要讨论的检验测试覆盖率对 $PFD_{avg}$影响没有直接关系,文中不再列出[2]。

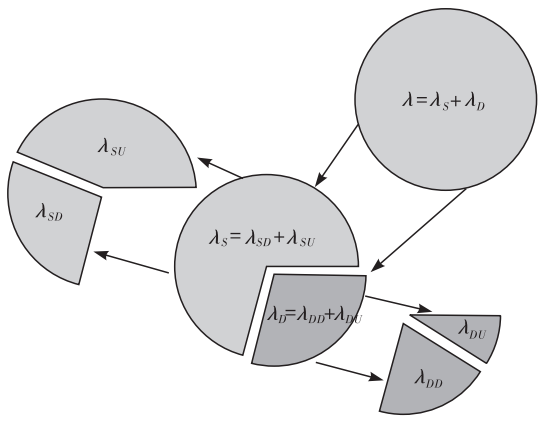



图 1　SIS 失效的 4 类划分

4 种失效分类的定义如下:

(1)可诊断到的安全失效($\lambda_{SD}$),是指导致系统直接进入安全状态的失效,该失效能够被系统自动诊断到。

(2)不可诊断到的安全失效($\lambda_{SU}$),是指导致系统直接进入安全状态的失效,且该失效无法被系统自动诊断到。

(3)可诊断到的危险失效($\lambda_{DD}$),是指导致系统不能执行安全功能的失效,该失效能够被系统自动诊断到。

(4)不可诊断到的危险失效($\lambda_{DU}$),是指导致系统不能执行安全功能的失效,且该失效无法被系统自动诊断到。

针对一个具体的模块/子系统而言,其安全失效率为安全可检测失效 + 安全不可检测失效,即 $\sum\lambda_S = \sum\lambda_{SD} + \sum\lambda_{SU}$,其危险失效率为危险的可检测失效与危险的不可检测失效之和,即 $\sum\lambda_D = \sum\lambda_{DD} + \sum\lambda_{DU}$。在该失效划分的基础上,统计 4 类失效的总和 $\sum\lambda_{SD}$,$\sum\lambda_{SU}$,$\sum\lambda_{DD}$和 $\sum\lambda_{DU}$,根据系统实际情况再结合具体公式,计算模块/子系统的功能安全相关参数,即诊断覆盖率($DC$)和安全失效分数($SFF$)。

$$DC = \frac{\sum\lambda_{DD}}{\sum\lambda_D} \tag{1}$$

$$SFF = \frac{\sum\lambda_{DD} + \sum\lambda_S}{\sum\lambda_D + \sum\lambda_S} \tag{2}$$

$DC$ 和 $SFF$ 这 2 个安全参数的值越大表示安全性越好。通过参数的计算可以发现,对于安全性影响的关键是 $\lambda_{DU}$,也就是 $\lambda_{DU}$越小,安全性越好,但现实中很难通过安全设计将 SIS 的 $\lambda_{DU}$降为 0,而检验测试的目的就是希望通过周期性的测试揭露出系统的 $\lambda_{DU}$来保证 SIS 的安全能力持续维持。

### 1.2　SIS 的 $PFD_{avg}$估算方法

目前,在考虑固定的 $T_1$ 时间且 $PTC$ 假设为 100% 的情况下,基于概率组合的关系,$PFD(t)$函数的曲线相对简单。图 2 中 $PFD(t)$以指数形式上升,在每次检验测试之后 $PFD_{avg}$回到零点,以 $T_1$ 为时间间隔的周期函数,整个运行寿命期间的平均值 $PFD_{avg}$即等于其一个周期内的平均值(图中直线)。图中曲线可以采用概率模型对其平均值进行分析估算,从而实现有效的测试规划[10]。

一般采用简单的方程式计算其平均值,对于不同的表决结构(MooN)的简化计算结论如下[11]:

1oo1 结构

$$PFD_{avg} = \frac{\lambda_D T_1}{2} \tag{3}$$

1oo2 结构

$$PFD_{\text{avg}} = \frac{\lambda_{DU}^2 T_2^2}{3} \tag{4}$$

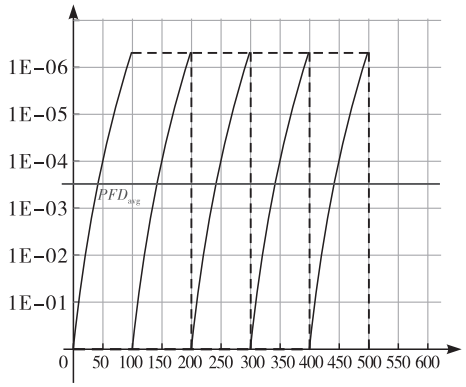



图 2 $PFD_{\text{avg}}$曲线(固定 $T_1$,$PTC = 100\%$)

但是,当 $T_1$ 是变化的或 $PTC$ 不为 100% 时,该曲线将不再呈现周期性,也难以通过简单的方程式开展计算。如图 3 所示,某 SIS 系统连续 5 次检验测试(图中序号 1 ~5),每次的检验测试间隔不同,检验测试覆盖率也达不到 100%,则每次检验测试周期内的 $PFD_{\text{avg}}$也完全不同。

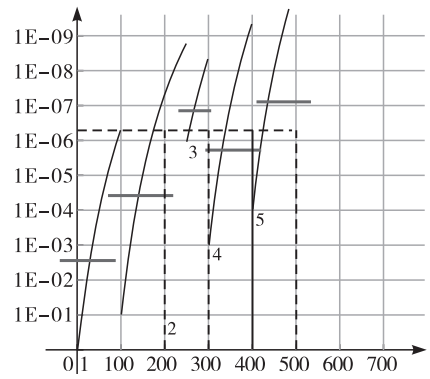



图 3 $PFD_{\text{avg}}$曲线(不固定 $T_1$,$PTC < 100\%$)

在 SIS 实际的运行中,$T_1$ 的非周期性和 $PTC$ 的非完全性( <100% )是更加贴合现实的情况,因此需要研究新的方法对这样的情况开展失效概率建模。

## 2 基于不完全检验测试的 SIS 失效划分

为实现更加精确的失效概率预计,首先考虑到检验测试的影响,对 SIS 的失效进行了重新划分。

如前所述,现有的方法中对于检验测试仅考虑了对于危险不可诊断到的失效($\lambda_{DU}$)的检测,在实际的系统中,除了该类失效以外,诊断功能本身的失效也值得关注。因为:(1)诊断功能的失效会导致原有的失效划分发生变化,也就是原有的 $\lambda_{DD}$ 会变为 $\lambda_{DU}$,从而导致 $PFD_{\text{avg}}$ 计算的变化;(2)诊断功能失效之后对于系统的影响也会不同,可能导致 SIS 直接进入安全状态,也可能作为隐性故障潜伏起来,这些隐性故障也需要通过检验测试进行揭露。

因此,该研究将检验测试扩展为对 $\lambda_{DU}$ 和诊断功能的测试,在传统 4 类失效划分的基础上,对 SIS 的失效进一步开展分配。

### 2.1 失效类型的定义扩展

首先,将检验测试覆盖率同步扩展为 2 个方面:$PTC_1$ 是对于 $\lambda_{DU}$ 的测试覆盖率;$PTC_2$ 是对于诊断功能失效的测试覆盖率;

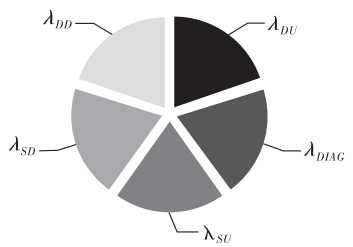
对于 $\lambda_{DU}$ 是否能够被检验测试覆盖定义:可以被检验测试覆盖的部分($\lambda_{DU,PTC1}$)和不能被检验测试覆盖的部分($\lambda_{DU,UPTC1}$),即:

$$PTC_1 = \frac{\lambda_{DU,PTC1}}{\lambda_{DU}} \tag{5}$$

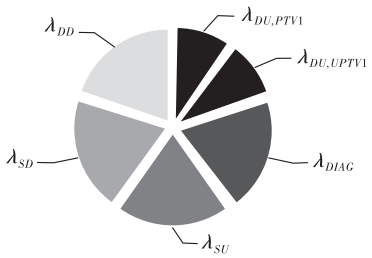
为了对 $PTC_2$ 进行合理的定义,对于诊断部分的失效也进行了专门定义,在国际标准 IEC 61508 的第三版修订讨论中[12],对于诊断部分的失效可以采用如下的划分:(1)$\lambda_{DIAG}$ 为诊断失效总的失效率;(2)$\lambda_{DIAG,DD}$ 为能够被检测到的诊断功能失效,从而可以通过启动某个动作来实现或保持安全状态;(3)$\lambda_{DIAG,DU}$ 为不能够被检测到的诊断功能失效,从而不能通过启动某个动作来实现或保持安全状态;(4)$\lambda_{DIAG,\text{safe}}$ 为诊断功能失效直接导致进入或保持在安全状态;(5)$\lambda_{DIAG,DU,PTC2}$ 为不能够被检测到的诊断功能失效,但可以通过检验测试发现;(6)$\lambda_{DIAG,DU,UPTC2}$ 为不能够被检测到的诊断功能失效,也不能通过检验测试发现。

### 2.2 基于失效类型的失效划分

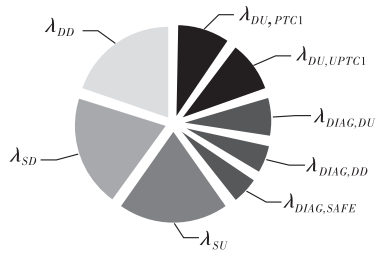
基于以上内容,对于失效进行了重新划分,如图 4 所示。通过图 4 可以看出,为了对 $\lambda_{DU}$ 进行深入分析,将其分解为 6 类失效,这 6 类失效对于 $PFD_{\text{avg}}$ 的影响是不相同的,如果按照简单的概率组合方式是难以开展分析的,因此该文将介绍采用 Markov 方法开展的概率计算。



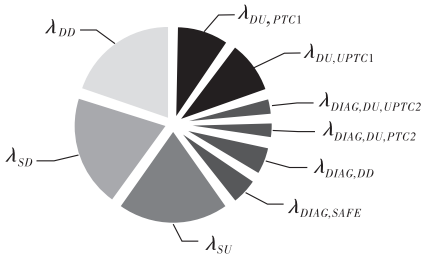

(a)单独诊断部分失效的失效划分




（b）考虑$PTC_1$的失效划分




（c）考虑诊断部分失效后状态的失效划分




（d）考虑$PTC_2$后的失效划分

图 4　考虑到 $PTC_1$ 和 $PTC_2$ 的失效划分

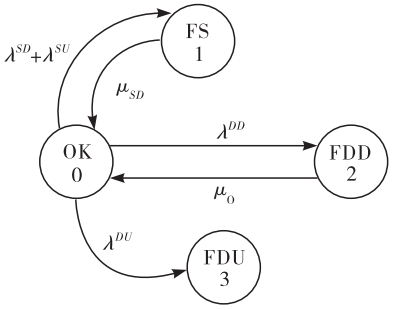
## 3　基于 Markov 方法的不完全检验测试的 $PFD_{avg}$ 计算

### 3.1　使用 Markov 方法开展 SIS 建模的方法概述

马尔科夫（Markov）模型的基本原理是将系统用状态转移图的方式表达出来，然后使用差分方程组或矩阵等数学工具进行分析计算。在 SIS 的 Markov 模型中，每个状态并不是固定不变的，例如在正常状态下刚开始使用该系统和工作一段时间后的该系统状态会发生性能的细微变化，即使仍然处在正常工作状态，但工作一段时间后的系统或设备更容易出现故障，所以其安全可靠性更低。

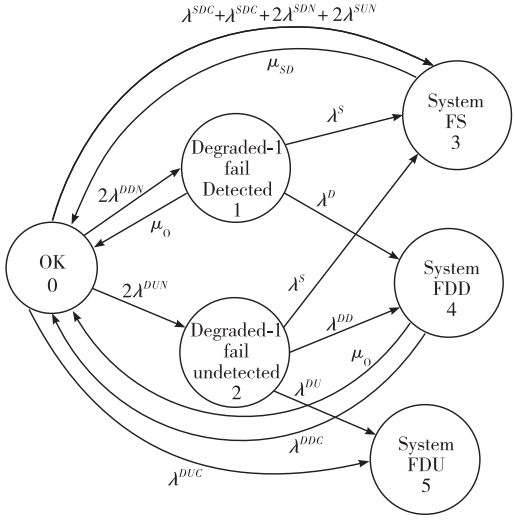
用 Markov 链建立模型可准确地计算出影响 SIS 的因素 $PFD_{avg}$ 等，Markov 模型通过状态转移图来表示状态的变化。圆圈表示 SIS 的各个状态（包括正常状态、中间转换状态和失效状态），失效和维修的过程用一个带箭头的弧线表示（如图 5 所示）[13]。

对于建立的 Markov 模型，其求解方式在工程上通常使用离散时间矩阵相乘的方式来求值，以 $\Delta t$ 为基本时间单位，状态转移的概率是维修率或失效率组成的转移矩阵和 $\Delta t$ 的乘积（$u\Delta t$ 或 $\lambda\Delta t$）。根据 Markov 模型的状态转移图可得转移矩阵 $\boldsymbol{P}$。若 SIS 的初始状态为 $\boldsymbol{S}_0=[1\ 0\ \cdots\ 0]$，则 $\boldsymbol{S}_0\times\boldsymbol{P}$ 是经过一个 $\Delta t$ 后 SIS 各个状态，同理经过 $n$ 个 $\Delta t$ 之后 SIS 各个状态为 $\boldsymbol{S}_0\times\boldsymbol{P}^n$[14]。




状态0表示没有失效；状态1表示安全失效状态;状态2表示诊断到的危险失效状态；状态3表示没有诊断到的危险失效

（a）1oo1结构SIS的Markov模型示例




状态0表示没有失效；状态2表示1个通过到发生诊断到的危险失效;状态3表示1个通道发生没有诊断到的危险失效；状态3表示安全失效状态；状态4表示诊断到的危险失效状态；状态5表示没有诊断到的危险失效

（b）1oo2结构SIS的Markov模型示例

图 5　典型 SIS 结构的状态转移模型示例

### 3.2　考虑 $PTC_1$ 和 $PTC_2$ 的 Markov 建模方法

在图 5 所示模型中可以明显看出来，危险不可诊断到的故障（$DU$）是吸收态，因此该模型仅表示在一个检验测试周期内的状态转移关系，没有考虑长周期检验测试以及非完全检验测试情况下的状态转移关系。

因此将 $PTC_1$ 的影响导入，以 1oo1 为例新的模型结构，如图 6 所示（图中的 3 和 4 为新增的状态）。

图 6 所示模型的构建主要考虑如下：

（1）将原来的 FDU 状态扩展为 2 个状态，一个是可以通过检验测试发现的不可诊断失效（$DU$，$PTC_1$，状态 3），一个是不同通过检验测试发现的不可诊断失效（$DU$，$UPTC_1$，状态 4）；

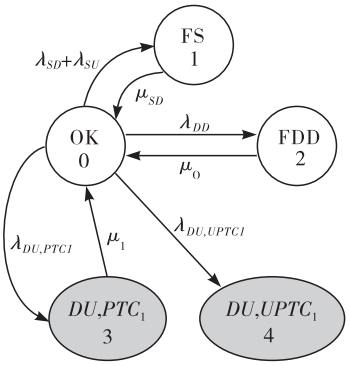



图 6 考虑 $PTC_1$ 情况下的状态转移模型

(2)从状态 0 到状态 3 和状态 4 的转移率即为考虑到检验测试覆盖率 $PTC_1$ 情况下对于 $\lambda_{DU}$ 失效的重新划分;

(3)对于状态 3 的可以通过周期性检验测试返回到正常状态,因此增加转移率 $\mu_1$,其数值等于检验周期周期的倒数 $1/T_1$;

(4)对于状态 4 是新的吸收态,其无法在转移到任何其他状态;

(5)在初始状态 0 的概率为 1 的情况下,可以通过 3.1 节中的求解方法,计算处于状态 3 和状态 4 的平均概率之和,即为系统的 $PFD_{avg}$。

通过以上分析可以发现,通过建立 Markov 模型,将长周期不完全检验测试覆盖率的影响导入 $PFD_{avg}$ 计算,而对于检验测试间隔不固定的情况,可以调整 $\mu_1$ 的数值将其对 $PFD_{avg}$ 的影响引入,初步解决了该文开头提出的 2 个问题。

在 $PTC_1$ 的状态转移模型基础上,考虑将 $PTC_2$ 的影响导入,仍然以 1oo1 为例新的模型结构,如图 7 所示(图中的 5 和 6 为新增的状态及其对应的转移关系,对于新增的状态转移率在图中没有标识出来)。

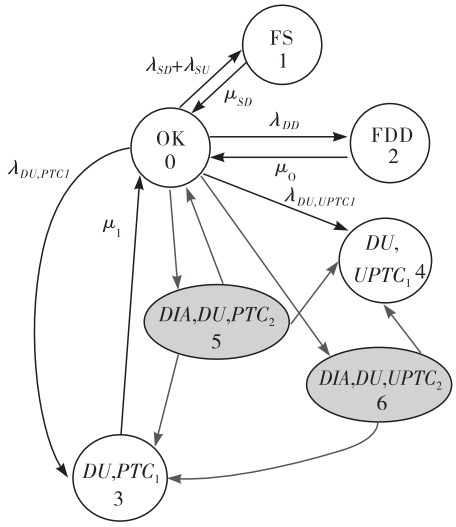



图 7 考虑 $PTC_1$ 和 $PTC_2$ 情况下的状态转移模型

图 7 所示模型的构建主要考虑如下几点:

(1)考虑诊断失效是否能够被检验测试发现,新增了状态 5 和状态 6 这 2 个状态;

(2)从状态 0 到状态 5 的转移率为 $\lambda_{DIAG,DU,PTC2}$,从 OK 状态到状态 6 的转移率为 $\lambda_{DIAG,DU,UPTC2}$;

(3)从状态 5 到状态 0 的转移率为检验测试间隔的倒数 $1/T_1$;从状态 5 到状态 3 和状态 4 存在转移的原因是在诊断发生失效之后,还系统的安全功能执行组件还可能进一步发生 $\lambda_{DU}$,从保守的角度认为诊断失效发生之后所有的 $\lambda_D$ 都变为 $\lambda_{DU}$,因此状态 5 到状态 3 的转移率为 $\lambda_D \times PTC_1$,状态 5 到状态 4 的转移率为 $\lambda_D(1-PTC_1)$(需要注意这和从状态 0 ~ 状态 3 和状态 4 的转移率不同,因为状态 0 的时候诊断功能仍然有效);

(4)从状态 6 无法返回状态 0,但是状态 6 和状态 5 类似,可以向状态 3 和状态 4 转移,转移率分别为 $\lambda_D \times PTC_1$ 和 $\lambda_D \times (1-PTC_1)$;

(5)在求解 $PFD_{avg}$ 时,并不需要将状态 5 和状态 6 纳入计算,因为此时系统仍然可以执行安全功能,状态 5 和状态 6 可以理解为系统处于诊断失效的安全降级状态;此时计算的仍然是处于状态 3 和状态 4 的平均概率之和,但由于状态 5 和状态 6 的影响,其数值与仅考虑 $PTC_1$ 的情况将不同。

### 3.3 考虑 $PTC_1$ 和 $PTC_2$ 的 Markov 建模方法示例

以某实际 1oo1 系统为例,开展上述过程的建模和计算。计算的输入参数见表 1,表中参数来源于 GB/T 20438.6 的附录表 B.3(见表 2,在标准的表中,按照传统概率方法计算的结论为 2.2E - 05)[15]。当使用仅考虑 1 个检验测试周期内的 Markov 模型开展计算时,其数值也为 2.2E - 05(概率曲线如图 8 所示),和标准中的计算结论一致。

**表 1 计算的输入参数**

| 参数 | 数值 |
|---|---|
| $\lambda_D$ | 0.5E - 06 |
| $\lambda_S$ | 0.3E - 06 |
| $\lambda_{DIAG}$ | $\lambda_{DIAG,DU}$ |
| $\lambda_{DIAG,DU}$ | 0.2E - 06 |
| $DC$(诊断覆盖率) | 90% |
| $MTTR$(平均恢复时间) | 8 h |
| $\lambda_{DD}$ | 0.45E - 06 |
| $PTC_1$ | 70% |
| $\lambda_{DU,PTC1}$ | 0.035E - 06 |
| $\lambda_{DU,UPTC1}$ | 0.015E - 06 |
| $PTC_2$ | 40% |

**续表 1**

| 参数 | 数值 |
|---|---|
| $\lambda_{DU}$ | 0.05E－06 |
| $T_1$ | 8760 h |
| $\lambda_{DIAG,DU,PTC2}$ | 0.8E－07 |
| $\lambda_{DIAG,DU,UPTC2}$ | 1.2E－07 |

**表 2　GB/T 20438.6 中 1oo1 结构的 $PFD_{avg}$ 计算结论**

| 结构 | DC | $\lambda_D$ = 0.5E－0.7 | | |
|---|---|---|---|---|
| | | $\beta$0.5 $\beta_D$ = 1% | $\beta$ = 1% E $\beta_D$ = 5% | $\beta$ = 5% E $\beta_D$ = 10% |
| 1oo1 | 0% | 2.2E－04 | | |
| | 60% | 8.8E－05 | | |
| | 90% | 2.2E－05 | | |
| | 99% | 2.6E－06 | | |

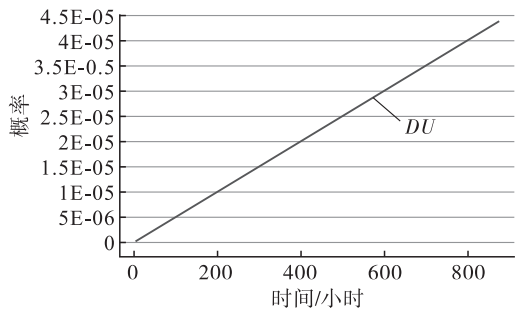
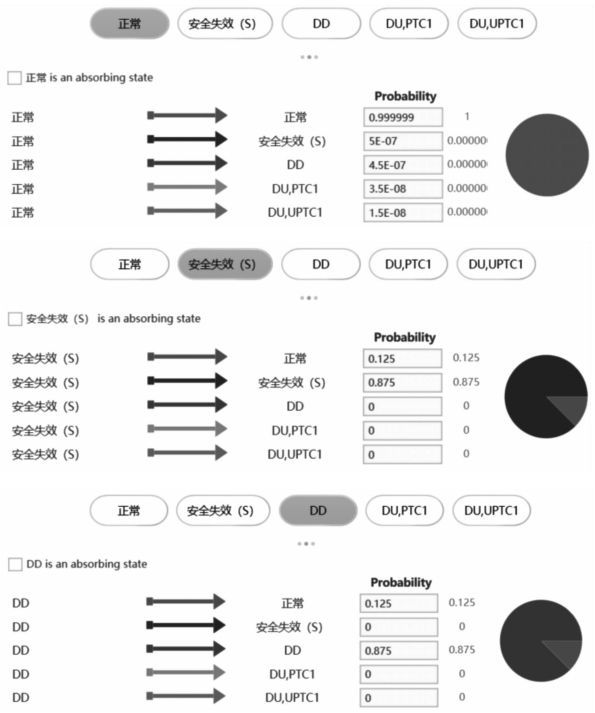



图 8　基于传统 Markov 模型获得 1oo1 结构的概率曲线

在考虑 $PTC_1$ 的情况下重新构建 Markov 模型，其状态转移关系如图 9，图中没有（$DU$，$UPTC_1$）到其他状态的转移率，因为（$DU$，$UPTC_1$）为吸收态，其不会再向其他状态转移。



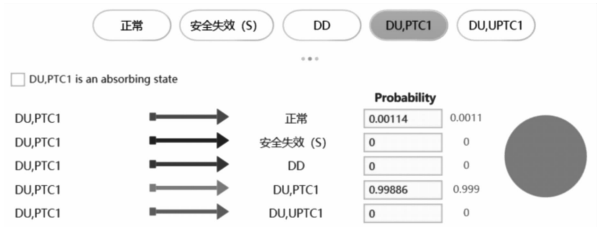




图 9　考虑 $PTC_1$ 和 $PTC_2$ 情况下的状态转移模型

基于图 9 状态转移关系，可以构建图 10 所示的状态转移图，获得的（$DU$，$PTC_1$）和（$DU$，$UPTC_1$）这 2 个状态的概率曲线如图 11 所示。

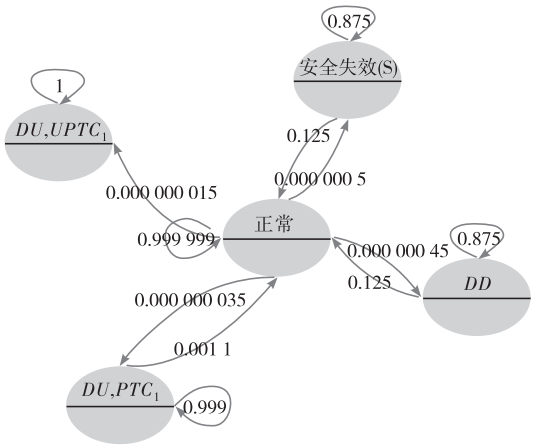



图 10　实际系统考虑 $PTC_1$ 的状态转移模型

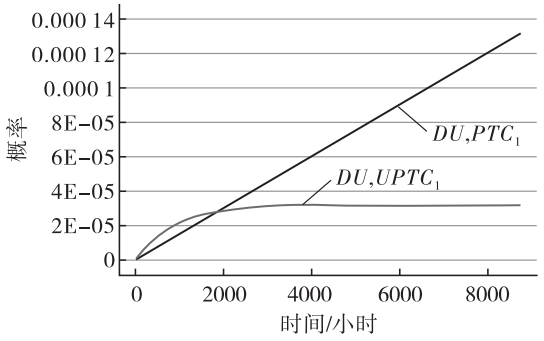



图 11　实际系统考虑 $PTC_1$ 的失效概率曲线

进一步的将 $PTC_2$ 考虑进来，获得的状态转移图和失效概率曲线如图 12 和图 13 所示（状态转移关系不再详述）。

基于以上曲线可以计算 $DU$，$PTC_1$ 在一年 8760 小时内的平均值为 2.8E－05，以及 $DU$，$UPTC_1$ 在一年 8760 小时内的平均值为 6.6E－05，两者均对 $PFD_{avg}$ 产生贡献，因此整体 $PFD_{avg}$ 为两者之和，也就是 9.4E－05。从结论可以看出来，失效概率增大，相对于传统的 1oo1 增加了 4 倍多，因此通过该建模体现出来了不完全检验测试覆盖率对于 $PFD_{avg}$ 的影响。

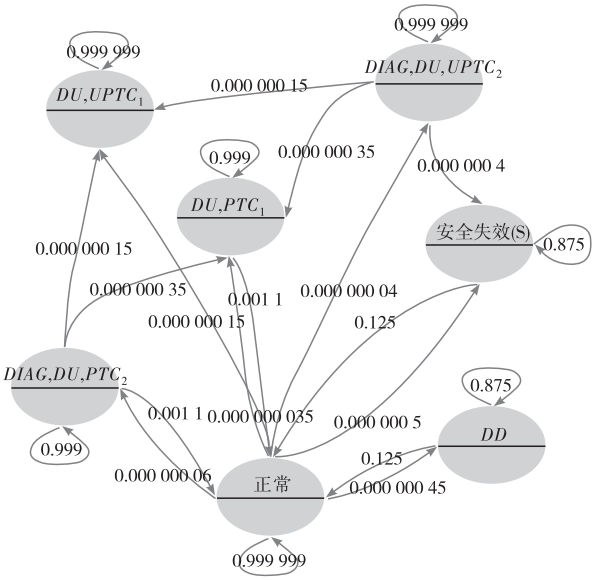



图 12 实际系统考虑 $PTC_1$ 和 $PTC_2$ 的状态转移模型

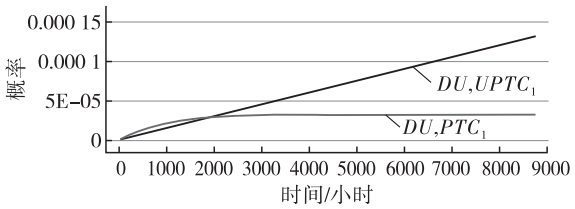



图 13 实际系统考虑 $PTC_1$ 和 $PTC_2$ 的失效概率曲线

对于 1oo2 和 2oo3 等其他结构，采用该研究方法再结合有关安全仪表系统失效概率的 Markov 基础模型，即可实现对不完全检验测试影响的有效分析，对于异形冗余结构的基础建模可以参考相关已有研究[16]。

## 4 结语

（1）首先创造性的对 SIS 的失效划分进行了改进，该新分类综合考虑到了检验测试对于危险不可诊断失效检测的不完全性，诊断功能的失效以及检验测试对于诊断功能失效检测的不完全性 3 个维度，新的失效划分方式也是目前功能安全基础国际标准 IEC 61508 修订的新方向，同时也是对 SIS 运行状态更加细致的表征；

（2）基于以上失效分类，对于 $PFD_{avg}$ 的计算方法进行了优化，采用 Markov 模型构建了新的更加贴合 SIS 运行状态的状态转移模型，详细分析了在新模型下如何开展 $PFD_{avg}$ 计算；

（3）以实际的 1oo1 系统为例，对 Markov 状态转移模型的构建和 $PFD_{avg}$ 计算的过程进行了分析验证，结果表明了该过程的可操作性以及能够更准确的反应不完全检验测试对于 $PFD_{avg}$ 的影响；

（4）从检验测试覆盖率分析以及基于不完全检验测试的概率建模方面给出了相关方法，但完整的检验测试需要遵循一套系统化的程序和工作流程[17]，需要执行测试的单位基于安全仪表系统的实际应用建立测试指南。

**参考文献：**

[1] 国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会. 过程工业领域安全仪表系统的功能安全 第 1 部分：框架、定义、系统、硬件和应用编程要求：GB/T 21109.1—2022 [S]. 北京：中国标准出版社，2022.

[2] 国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会. 电气/电子/可编程电子安全相关系统的功能安全 第 4 部分：定义和缩略语：GB/T 20438.4—2017 [S]. 北京：中国标准出版社，2017.

[3] Redutskiy Yury, Camitz - Leidland Cecilie M. Safety systems for the oil and gas industrial facilities: Design, maintenance policy choice, and crew scheduling[J]. Reliability Engineering and System Safety. Volume 210 , Issue . 2021, 210(1):107545.

[4] 朱东利. SIS 周期性测试探讨[J]. 石油化工自动化，2023, 59(01):35 - 39 + 51.

[5] 刘黎，朱杰，张则立，等. 安全仪表系统一体化检验测试平台设计[J]. 石油化工自动化，2022，58(06)：6 - 9 + 26.

[6] 高彦飞，王汉辉，俞文光. 化工安全仪表系统检验测试[J]. 工业控制计算机，2020，33(11)：50 - 52.

[7] 王海清，乔丹菊，刘祥妹. KooN 表决结构多阶段马尔可夫模型简化算法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版)，2017，41(6)：147 - 153.

[8] 姬康，王璐，王明锋，等. 基于检验测试的安全仪表系统安全评价 Markov 简化模型[J]. 安全与环境工程，2021，17(2)：18 - 28.

[9] 张哲，王璐，徐长峰，等. 基于检验测试策略的 PFD 模型建立与分析[J]. 中国安全生产科学技术，2021，17(02)：128 - 134.

[10] KhalilY F . New statistical formulations for determination of qualification test plans of safety instrumented systems (SIS) subject to low/high operational demands [J]. Reliability Engineering and System Safety [J]. 2019，189(C)：196 - 209.

[11] 熊文泽. 功能安全中表决结构的分析与应用[J]. 仪器仪表标准化与计量，2009(4)：14 - 17.

[12] IEC 61508 ED3 65A/1056/CD, https://www. iec. ch/dyn/ www/f? p = 103:7:0::::FSP_ORG_ID, FSP_LANG_ID:1250,25.

（下转第 74 页）

由图 7 可以出,第 10 h 时,当加入阶跃扰动时,引入 Smith 预估补偿器与积分分离算法后的供热系统受干扰幅度为 0.7 左右,传统 PID 算法的供热系统受干扰幅度为 2.2 左右。其原因是引入 Smith 预估补偿器与积分分离算法后可以使 PID 控制器与系统的适配性提升,可在减小时延影响的同时,提升系统抗扰性能。

## 6 结论

Smith 预估补偿与积分分离算法在供热系统中的应用与部署,可最大限度地减小热惰性、热时滞对系统的不利影响,在提升系统的控制性能与稳定性同时,可有效提高供热系统的控制精度,实现精细化调控与运行。此外,Smith 预估补偿器与积分分离算法算例简单易实现,较容易在 PLC 控制器中部署与应用,有较强的鲁棒性能与工程应用价值。

**参考文献:**


[1] 田庆华,李锐,梁源. 智慧供热 DCS 系统的开发与实践应用研究[J]. 装备维修技术,2023(06):79 - 82.

[2] 方修睦,杨大易,周志刚. 智慧供热系统数据运行核查方法研究[J]. 暖通空调,2024,54(01):69 - 74 + 139.

[3] 孙鹏. 城市集中供热系统热负荷预测与二次网节能控制方法[J]. 区域供热,2023(06):54 - 60.

[4] 王雅然,宋子旭,由世俊,等. 集成奇异谱分析与神经网络的热负荷预测算法[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2023,56(06):573 - 578.

[5] 赵广昊,薛贵军,张亦睿. 变论域 Smith - Fuzzy - PID 在集中供热系统二网控制中的应用[J]. 华北理工大学学报(自然科学版),2023,45(04):50 - 57.

[6] 齐世炜,孙畅,付主木,等. 煤炭自动定量装车控制策略设计[J]. 河南科技大学学报(自然科学),2021,42(05):32 - 38 + 44 + 6.

[7] 彭继文,叶俊峰,刘士杰,等. 基于积分分离 PID 的起重机自动恒速落幅控制研究[J]. 液压气动与密封,2023,43(11):56 - 61.

[8] 王森,王成龙,孙婷婷. 积分分离 PID 在集热管热损测试系统中的应用[J]. 计算机与数字工程,2023,51(05):1012 - 1017.

[9] 景思伟,陈梦婵,张青山. 基于 PLC 与 HMI 的卷绕控制系统设计及应用[J]. 自动化与仪表,2023,38(03):19 - 21 + 26.

[10] 刘宝芹,夏广越,王童,等. 基于仿真模型计算的供热系统预测性调控方法[J]. 区域供热,2023(03):8 - 14.


(上接第 63 页)


[9] 石永强,李雨菲,车录锋. 基于 MEMS 加速度计阵列的测斜仪设计[J]. 传感器与微系统,2020,39(9):66 - 72.

[10] 诸颖,郭彦,潘伟强,等. 自动化测斜技术在深基坑工程风险管控中的应用[J]. 上海建设科技,2020(5):55 - 58.

[11] ZHANG L, LI R Z, HU L. Analysis of inclinometer in foundation pit[J]. International Journal of Research in Engineering and Science,2017(5):06 - 09.

[12] 高开强. 自动化监测系统在深基坑工程中的应用及可靠性分析[J]. 经纬天地,2021(1):75 - 86.

[13] 建筑基坑工程监测技术标准:GB 50497 - 2019[S]. 2019.

[14] 唐爱武,陈天佑. 复杂工况条件下齿轮传动过程中磨损量预测研究[J]. 机械传动,2024(1):143 - 150.

[15] 程胜一,褚伟洪,陈杰,等. 深层水平位移监测技术分析[J]. 城市勘测,2011(6):167 - 170.


(上接第 70 页)


[13] Andreas Hildebrandt. Calculating the " Probability of Failure on Demand" (PFD) of complex structures by means of Markov Models[C]. 2007 4th European Conference on Electrical and Instrumentation Applications in the Petroleum & Chemical Industry. Paris, 2007: PA - 02.

[14] 原红丽. 基于 D - S 证据理论与 Markov 模型的安全仪表系统可靠性研究[D]. 重庆:西南大学,2013.

[15] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 电气/电子/可编程电子安全相关系统的功能安全 第 6 部分:GB/T 20438.2 和 GB/T 20438.3 的应用指南:GB/T 20438.6—2017 [S]. 北京:中国标准出版社,2017.

[16] 姚竣瀚,郑威,王海清,等. 高要求模式 SIS 异型冗余结构 PFH 计算模型[J]. 中国安全生产科学技术,2022,18(11): 105 - 111.

[17] 朱杰,张则立,俞文光,等. 安全仪表系统检验测试程序完整性研究[J]. 自动化仪表,2023,44(05):14 - 19.