

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210880

基于 FMEDA 的气体探测器 SIL 验证研究*

武传伟¹ 方雁群¹ 陈海永^{1,2} 古瑞琴^{2,3} 刘欢² 张朋¹ 贾林涛¹

(1. 汉威科技集团股份有限公司 郑州 450001; 2. 华中科技大学集成电路学院 武汉 430074;

3. 郑州炜盛电子科技有限公司 郑州 450001)

摘要: 为了验证一款运用于爆炸性环境的功能安全型气体探测器的硬件安全完整性等级,通过 FMEDA 的方法,对气体探测器的元器件进行了失效模式及其影响的分析和随机硬件失效率的计算,并在所采用的在线故障诊断措施基础上量化分析了气体探测器的功能安全相关参数。分析结果表明,该款 1001 架构、B 类系统、工作在低要求模式的气体探测器的安全失效分数达到 94%,安全功能在要求时的危险失效平均概率为 6.8×10^{-4} ,其设计符合标准 IEC 61508 所规定的硬件安全完整性等级 SIL 2 的要求。

关键词: 功能安全;气体探测器;SIL;FMEDA;失效率

中图分类号: TB114.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 535.1099

Research for SIL verification of gas detector based on FMEDA

Wu Chuanwei¹ Fang Yanqun¹ Chen Haiyong^{1,2} Gu Ruiqin^{2,3} Liu Huan² Zhang Peng¹ Jia Lintao¹

(1. Hanwei Electronics Group Corporation, Zhengzhou 450001, China;

2. School of Integrated Circuits, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

3. Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to verify the hardware safety integrity level of a functional safety gas detector used in the explosive atmosphere, a method of FMEDA is adopted to analyze the failure modes and effects and calculate the random hardware failure rates of the gas detector elements, the functional safety related parameters are quantified based on the adopted fault online diagnosis measures. The analysis results show that the safe failure fraction of the gas detector which is 1001 architecture, B type system and low demand mode of operation reaches 94%, the average probability of a dangerous failure on demand of the safety function is equal to 6.8×10^{-4} , therefore the hardware design of this functional safety gas detector satisfies the requirements of the safety integrity level SIL 2 specified in the standard IEC 61508.

Keywords: functional safety; gas detector; SIL; FMEDA; failure rate

0 引言

伴随着国民经济的飞速发展,可燃性气体的安全问题显得越发重要,近年来可燃性气体爆炸事故频发,给国家和人民群众的生命财产安全造成了重大损失,如 2021 年 6 月 13 日湖北十堰市燃气爆炸事故,造成 26 人死亡、138 人受伤,其中重伤 37 人,直接经济损失约 5 395.41 万元^[1]。可燃气体探测器作为监测可燃性气体泄漏的重要手段,安装在具有潜在泄漏源的室内或室外场所,及时发现并指示危险气体泄漏,以便相关人员第一时间采取应对措施,已广泛运用在石油、化工等工业领域,以及商业建筑和居民住宅。

气体探测器在气体泄漏探测领域发挥重要作用,若其器件失效将带来巨大潜在风险,功能安全型气体探测器日益引起关注,从功能安全的角度,通过系统的设计方法,有效地提高了气体探测器的功能可靠性和安全性。

安全性是安全相关系统的一种固有属性,并以安全完整性等级(safety integrity level, SIL)的形式来表征,它表示系统成功完成安全功能的概率^[2]。按照 IEC 61508《电气/电子/可编程电子安全相关系统的功能安全》系列标准(GB/T 20438 等同采用该标准)的定义, SIL 划分为 1、2、3 和 4 四个等级,4 为最高等级。气体探测系统很难达到 SIL 4 的安全完整性等级,且固定式气体探测系统极少被定义为

收稿日期:2022-07-29

* 基金项目:国家重点研发计划(2019YFB2005703)、2020 年度郑洛新国家自主创新示范区创新引领型产业集群专项(201200210100)资助

高于 SIL 2 的安全完整性等级^[9]。

硬件安全完整性体现了系统元件随机硬件失效所导致的系统危险失效对安全功能的执行所产生的影响。通常将待分析的系统抽象为静态模型或动态模型,典型的静态模型有可靠性框图(reliability block diagram, RBD)和故障树,它们描述了系统元件与系统失效之间的静态逻辑关系;而动态模型则可以体现系统对于事件响应而出现的状态跳转,如马尔可夫模型和佩特里网。张宏扬等^[4]在铁路信号系统冗余结构可靠性分析中,评估了利用 RBD 推导出的危险失效率计算公式的适用性。赵智聪等^[5]利用故障树法自上而下地分析系统故障,提出了一种可提高安全仪表功能要求时危险失效平均概率的预估准确性的数学模型。罗来军等^[6]采用故障树法分析计算汽车电控系统的双点故障同时发生的概率。谢雨飞等^[7]利用隐马尔可夫模型实现并验证了一种通信系统故障诊断的方法。刘二林等^[8]基于佩特里网模型,利用设备的实时状态信息对车门系统进行在途故障诊断。

在系统模型建立后,很重要的一步工作是预估系统元件的随机硬件失效率。失效率数据主要源自元件制造商或第三方机构,他们通过系统的可靠性分析方法获得失效率数据^[9]。王哲等^[10]利用有限元法分析力学模型来预估传感器失效率,并通过 1.08 亿次应力疲劳试验验证了传感器寿命预估方法。佐磊等^[11]基于热-电双应力模型实现小样本数据的加速寿命测试方法。

本文所述的失效模式、影响及其诊断分析(failure modes effects and diagnostic analysis, FMEDA)采用可靠性框图描述气体探测器的安全架构,简单直观,并依据国际公认的失效率数据源进行相关安全参数的分析与计算。IEC 61508 系列标准仅从概念和架构的角度介绍了安全完整性等级,但相关分析验证过程的描述比较分散和抽象,本文较为完整地展现了一款气体探测器的硬件安全完整性等级的验证过程。

1 FMEDA 分析方法

1.1 FMEDA 的特点与目的

FMEDA 是进行安全关键设备的安全性和可靠性评估的一种重要方法,其在传统的失效模式与影响分析方法(Failure mode and effects analysis, FMEA)的基础上,增加了故障诊断功能的影响分析,引入定量的随机硬件失效率,实现了设备 SIL 等级指标性参数的定量计算^[12]。

通过对待评估设备进行 FMEDA 分析,计算可检测的危险失效率 λ_{DD} 、不可检测的危险失效率 λ_{DU} 、安全失效率 λ_S ,继而推导设备的诊断覆盖率(diagnostic coverage, DC)、安全失效分数(safe failure fraction, SFF)、安全功能在要求时的危险失效平均概率(average probability of a dangerous failure on demand, PFD_{avg}), (系统为低要求运行模式)或安全功能的每小时危险失效平均频率(average frequency of a

dangerous failure, PFH), (系统为高要求或连续运行模式)等安全参数,用于最终评估产品是否符合设计需求所宣称的硬件安全完整性等级。

1.2 FMEDA 分析方法

FMEDA 方法分析流程如图 1 所示,包含以下步骤:

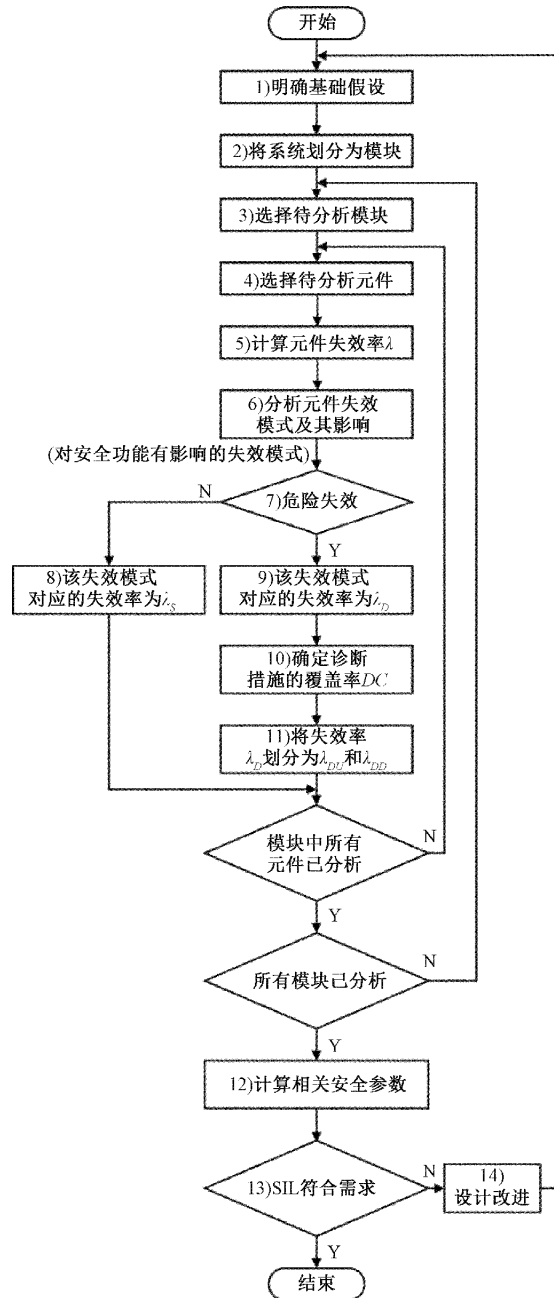


图 1 FMEDA 的分析流程

- 1)明确 FMEDA 分析中的基础假设。
- 2)根据待评估系统的结构与特性,将系统划分为多个功能模块。与故障树法不同,FMEDA 是一种自下而上的分析方法^[13]。
- 3)选择一个待分析模块。所有模块应逐一进行分析。

4) 选择一个待分析元件。模块中所有元件应逐一进行分析。

5) 计算元件失效率。功能安全相关模块中的所有元件都应计算失效率。非功能安全相关模块中的元件虽不需要计算失效率,但应分析其失效模式及其影响,用以验证将其划分为非安全相关模块是否正确。

元件失效率的单位 FIT 为 $10^{-9}/\text{hour}$ 。业界公认的元件失效率来源主要有:西门子电子元件可靠性手册 SN-29500,可靠性数据手册 IEC 62380,中国军标 GJB/Z 299C,美国军标 MIL-HDBK-217F 以及 Telcordia 332 等。另外,部分有实力的厂家对出品的元件进行了充分及规范的可靠性测试,由此预估了该产品的失效率数据,可在公司官网查询或直接向厂家索取。

整个生命周期中元件失效率符合浴盆曲线,当 FMEDA 分析基于所有元件都处于随机失效期(即老化后至报废前的阶段)的假设,则元件失效率可视为常量^[14]。此基础假设应在 FMEDA 分析初始予以明确。

6) 分析元件的失效模式及其影响。与元件失效率类似,元件失效模式也有一些业界公认的标准可供参考,例如可靠性数据手册 IEC 62380,ISO 13849-2(GB/T 16855.2 等同采用该标准),IEC 61709(GB/T 7289 等同采用该标准)。基于不同检测原理的气体传感器的失效模式分析,还需要考虑诸如光学传感器气路或光路因冷凝、灰尘或障碍物而堵塞,光源衰减;催化型传感器的催化剂中毒;半导体型传感器的敏感体老化等因素^[15-16]。

在不考虑诊断措施的前提下,根据失效所导致的结果对失效模式进行分类;对执行安全功能有影响的失效,应划分为安全失效或危险失效;执行安全功能的元件失效但不直接影响安全功能,应划分为无影响失效;不执行安全功能的元器件的失效,应划分为无关失效。无影响失效与无关失效将不用于安全失效分数的计算^[14]。

每种元件基本上都有多种失效模式,每种失效模式对于元件总失效率都存在一定的贡献比例,每个元件的总失效率将根据各个失效模式所对应的比例进行分配。标准 IEC 62380 中明确列出了元件各种失效模式所对应的百分比。在实践中也经常假设每种失效模式所对应的比例是相等的,此基础假设应在 FMEDA 分析初始阶段予以明确。在特定情况下,某些元件的某些失效模式可以排除,不予考虑^[17]。标准 ISO 13849-2 中列举了一些可以排除的失效模式以及前提条件。应谨慎处理此类操作,以避免人为判断失误而忽略危险失效,继而导致分析结果的偏差。

7) 对执行安全功能有影响的失效模式,应对其分配相对应的元件失效率。

8) 对于元件的安全失效模式,所分配的元件失效率应被划分为安全失效率 λ_s 。

9) 对于元件的危险失效模式,所分配的元件失效率应被划分为危险失效率 λ_D 。

10) 对于元件的危险失效模式,还应根据 IEC 61508-2 的附录 A,确定所采用的故障诊断措施的诊断覆盖率 DC,该附录推荐了诊断措施可实现的最大诊断覆盖率。

11) 根据已判定的诊断覆盖率 DC,将危险失效率 λ_D 划分为可检测的危险失效率 λ_{DD} 和不可检测的危险失效率 λ_{DU} :

$$\lambda_{DD} = \lambda_D \times DC \quad (1)$$

$$\lambda_{DU} = \lambda_D \times (1 - DC) \quad (2)$$

12) 计算相关的安全参数。当分析是基于元件随机硬件失效率为常量的基本假设,总的危险失效率等于模块/系统内各元件的危险失效率之和,总的安全失效率等于模块/系统内各元件的安全失效率之和。

模块/系统的安全失效分数为:

$$SFF = \frac{\sum \lambda_s + \sum \lambda_{DD}}{\sum \lambda_s + \sum \lambda_{DD} + \sum \lambda_{DU}} \quad (3)$$

模块/系统的诊断覆盖率为:

$$DC = \frac{\sum \lambda_{DD}}{\sum \lambda_{DD} + \sum \lambda_{DU}} \quad (4)$$

随后根据系统架构以及相关的安全参数计算安全功能在要求时的危险失效平均概率 $PF_{D,avg}$ (系统为低要求运行模式)或安全功能的每小时危险失效平均频率 PFH (系统为高要求或连续运行模式)。

13) 通过系统的安全相关参数 SFF , $PF_{D,avg}$ 或 PFH 评估产品是否符合设计需求所宣称的系统硬件安全完整性等级。

14) 当上述指标不符合要求时,应对设计方案,尤其是诊断措施进行整改,随后重复进行验证,直至指标符合要求。

2 气体探测器的 FMEDA 分析及结果

按照上述 FMEDA 的分析方法,对一款双光源双光路红外气体探测器进行了硬件安全完整性等级的分析与验证,此为该产品的功能安全认证相关工作的重要步骤之一。

2.1 双光源双光路红外气体探测器简介

由朗伯比尔定律可知,当气体成分的红外吸收谱线与穿过气体的红外光的发射波长一致时,将产生共振吸收,吸收强度与气体浓度、有效光程等因素相关。该款双光源双光路红外气体探测器通过测量和分析穿过气室的特定波长红外光的光强衰减来反演计算目标气体的浓度。该气体探测器采用参考光路信号对测量光路信号进行补偿,有效降低了光源衰减,光电探测器漂移和气室环境等因素对气体浓度测量精度的影响。

该气体探测器的安全功能是监测目标气体的浓度并将其转换为 4~20 mA 电流输出至后级控制单元,指示潜在的爆炸性风险。

2.2 基础假设与约束

气体探测器FMEDA分析的基础假设与约束:

1) 假设所有元件的随机硬件失效率都为常量。FMEDA分析基于所有元件都处于随机失效期。

2) 假设简单元件的所有失效模式都是平均分配的。

3) 假设复杂元件的失效划分为50%安全失效和50%危险失效^[18]。

4) 气体探测器工作环境的温度范围为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。气体探测器仅在额定工作环境温度范围内才可确保安全功能的正常执行。电子元器件受温度的影响尤为明显,高温上限是计算元器件随机硬件失效率的重要参数之一。

5) 气体探测器为低要求运行模式。该气体探测器的应用场景中,可燃气体的泄露并达到探测器测量范围是偶发事件,探测器仅在要求时才执行安全功能,且要求的频率不大于每年一次。

6) 气体探测器的平均维修时间(mean repair time, MRT)和平均恢复时间(mean time to restoration, MTTR)皆设定为8 h。

2.3 功能模块划分

按照气体探测器的结构与功能特点,将其划分为若干功能模块,如图2所示。除人机交互模块、显示模块和数字通信模块以外,其余皆为功能安全相关模块。非功能安全模块中的元件仅分析其失效模式及其影响。

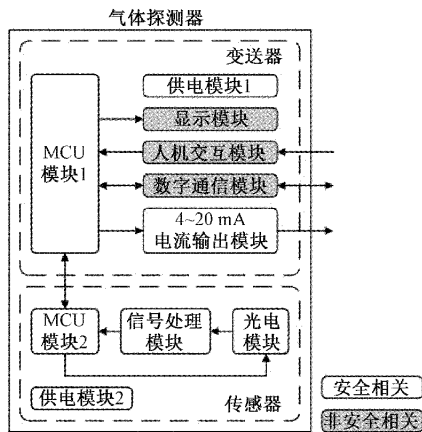


图2 气体探测器功能模块图

2.4 可靠性框图

气体探测器的可靠性框图如图3所示,其中仅包含功能安全相关的模块。本款气体探测器为1oo1架构,即通道中任何一个元器件的危险失效,都将导致气体探测器丧失安全功能。由硬件故障裕度(hardware fault tolerance, HFT)的定义可知,该气体探测器的HFT为0。

2.5 元件失效率计算及失效模式分析

所有安全相关功能模块中的元件都按照西门子电子元件可靠性手册SN 29500计算元件失效率。SN 29500为系列标准,包含了集成电路、半导体分立器件和无源器件等诸多种类的元件,提供了参考条件下的元件参考失效率,以及

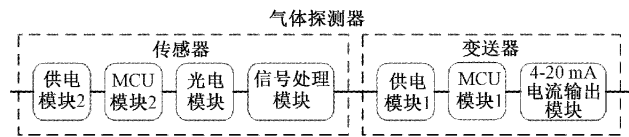


图3 气体探测器的可靠性框图

将失效率由参考条件向实际条件转换的公式。以电阻为例,其元件失效率公式:

$$\lambda_R = \lambda_{ref} \times \pi_T \quad (5)$$

λ_{ref} 为元件参考失效率,它是电阻在参考环境条件和参考应力条件下的随机硬件失效率,可在SN 29500-4根据电阻类型直接查表获取,温度影响因子 π_T 可在SN 29500-4中根据电阻类型和电阻实际温度(电阻环境温度加上电阻温升)查表获取,电阻温升 $\Delta\theta$ 的计算如下:

$$\Delta\theta = P_D \times R_{th} \quad (6)$$

其中, P_D 为电阻功耗功率, R_{th} 为电阻的热阻。

接下来,基于标准ISO 13849-2的附录D分析所有功能模块中各个元件的失效模式,以及分析失效模式对于模块和探测器安全功能的影响,并要完成安全相关模块中各元件的失效率的分配。对于简单元件(如电阻、电容等),假设其所有失效模式是平均分配的。对于复杂元件(如MCU),由于不可能对每一种失效模式进行详细分析,故假设其失效为50%安全失效和50%危险失效。表1为气体探测器FMEDA分析中的一个实例,10 k Ω 电阻 R_3 位于供电模块2,为24 V转5 V的DC-DC芯片输出电压的匹配电阻。经计算,该电阻在70 $^{\circ}\text{C}$ 的工作环境温度下,失效率为0.6 FIT。电阻有3种失效模式需要考虑:短路、断路和阻值变化(变化范围为0.5~2倍的标称阻值 R_N)。由于电阻 R_3 的任何一种失效都将导致5 V电压的异常,继而导致传感器部分无法正常工作,故三种失效都被判定为危险失效。为了诊断5 V电压,诊断电路采用了电压监测芯片,可有效监测5 V电压的过压/欠压故障,该诊断措施对于电阻 R_3 失效的诊断覆盖率DC可达90%,所以该电阻每种失效模式都分配了0.2 FIT的危险失效率,这其中又有0.18 FIT被继续划分为可检测的危险失效率 λ_{DD} ,0.02 FIT被划分为不可检测的危险失效率 λ_{DD} ,如式(1)和(2)所示。

2.6 系统硬件安全完整性的指标与验证

本文所述气体探测器为1oo1架构,工作在低要求模式,硬件故障裕度HFT为0,B类系统,气体探测器在整个安全回路系统中的占比为30%,硬件安全完整性等级的设计目标为SIL2。

依据IEC 61508,对于整个系统而言,安全失效分数SFF,安全功能的目标失效量与安全完整性等级SIL的对应关系如表2和3所示。由于设计目标为SIL2,且硬件故障裕度HFT为0,故气体探测器的安全失效分数应位于90%~99%区间范围内,而安全功能在要求时的危险失效平均概率 $PF_{D,avg}$ 则应位于 $10^{-3}\sim 10^{-2}$ 区间范围内。

表 1 元件失效率及失效模式分析实例

位号	类型	失效率 (FIT)	失效模式	分配 比例	失效 影响	失效 类型	DC	λ_s λ_D λ_{DD} λ_{DU} (FIT)			
R ₃	10 kΩ	0.6	开路	33.3%	U2 输出异常	危险 失效	90%	0	0.20	0.18	0.02
			短路	33.3%	U2 输出异常	危险 失效	90%	0	0.20	0.18	0.02
			阻值变化 (0.5R _N < R < 2R _N)	33.3%	U2 输出异常	危险 失效	90%	0	0.20	0.18	0.02

表 2 B 类系统最大允许安全完整性等级

安全失效分数 SFF/%	硬件故障裕度 HFT		
	0	1	2
<60	不允许	SIL1	SIL2
60~<90	SIL1	SIL2	SIL3
90~<99	SIL2	SIL3	SIL4
≥99	SIL3	SIL4	SIL4

表 3 低要求模式下安全功能的目标失效率

安全完整性等级 SIL	安全功能在要求时的 危险失效平均概率 PFD _{avg}
1	≥10 ⁻² ~ <10 ⁻¹
2	≥10 ⁻³ ~ <10 ⁻²
3	≥10 ⁻⁴ ~ <10 ⁻³
4	≥10 ⁻⁵ ~ <10 ⁻⁴

按照 2.5 小节所描述方法,对气体探测器各个安全相关的功能模块中的每一个元器件进行元件失效率和失效模式的计算与分析。气体探测器安全相关模块的分析数据如表 4。

表 4 气体探测器失效率分析

	λ_s λ_D λ_{DD} λ_{DU} (FIT)				SFF/ %
	MCU 模块 1	227.4	201.9	182.7	
供电模块 1	117.7	73.5	66.2	7.3	96.2
4~20 mA 电流 输出模块	190.7	320.5	290.5	30.0	94.1
MCU 模块 2	219.2	193.6	176.3	17.3	95.8
供电模块 2	154.1	88.7	80.1	8.6	96.5
信号处理模块	22.9	161.7	146.6	15.1	91.8
光电模块	19.2	564.2	507.8	56.4	90.3
总计	951.2	1 604.1	1 450.2	153.9	94.0

1oo1 架构的等效平均不工作时间^[19]:

$$t_{CE} = \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \left(\frac{T_1}{2} + MRT \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} MTTR \quad (7)$$

其中,检验测试间隔 T_1 设定为 12 个月,平均修理时间 MRT 与平均恢复时间 $MTTR$ 皆设定为 8 h。

1oo1 架构的气体探测器在低要求模式下,安全功能在要求时的危险失效平均概率:

$$PFD_{avg} = (\lambda_{DU} + \lambda_{DD}) \times t_{CE} = 6.8 \times 10^{-4} \quad (8)$$

在硬件故障裕度 HFT 等于 0 的条件下,气体探测器各个模块以及总的失效分数满足表 2 中 SIL2 的要求,考虑到气体探测器在整个安全回路系统中 30% 的占比,式(8)的计算结果满足表 3 中对 SIL2 的危险失效平均概率 PFD_{avg} 的要求,即 $3 \times 10^{-4} \leq PFD_{avg} < 3 \times 10^{-3}$ 。

综上所述,该款气体探测器的硬件安全完整性等级为 SIL2,满足设计需求。

3 结 论

FMEDA 是功能安全产品验证工作的重要工具,可让设计人员系统性地分析及改进设计方案。元件失效率的获取是 FMEDA 分析的重要基础,厂家通过充分及规范的可靠性测试所提供的元件失效率数据也是一个重要来源,这方面国内厂家明显落后于国外厂家。另外,技术人员加强对于功能安全技术的理解,尤其是提升对于失效模式和影响,以及诊断措施的分析能力,才能确保最终验证结论的真实性。

参考文献

- [1] 湖北十堰“6·13”重大燃气爆炸事故调查报告公布[J]. 安全与健康,2021(11):20-22.
- [2] 李倩如,杨振荣,王鑫. 功能安全浮筒液位计的研究与实现[J]. 电子测量技术,2017,40(8):6-9.
- [3] Explosive atmospheres part 29-3: Gas detectors-guidance on functional safety of fixed gas detection systems; IEC 60079-29-3 [S]. Spanish Society of Standardization,2014.
- [4] 张宏扬,卢佩玲,张浩. IEC 61508 中 RBD 法在铁路信号冗余结构中的适用性分析[J]. 铁道标准设计,2022,66(11):175-181.
- [5] 赵智聪,靳江红,王庆,等. 基于多故障冲击模型和故障树的 PFD_{avg} 计算方法研究[J]. 中国安全生产科学技术,2021,17(4):42-46.

- [6] 罗来军,李兵. 功能安全硬件指标计算的实践[J]. 传动技术,2019,33(2):37-43.
- [7] 谢雨飞,田启川. 基于隐马尔可夫模型的高铁无线通信系统故障诊断[J]. 北京交通大学学报,2021,45(5):22-29.
- [8] 刘二林,彭玮,陈丽涵. 一种基于 Petri 网和 SDG 的车门系统故障诊断方法[J]. 城市轨道交通研究,2020,23(12):33-40.
- [9] 付建民,李成美,东静波,等. 数据不确定条件下安全仪表系统 SIL 等级验证方法研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(3):129-135.
- [10] 王哲,陈启梦,孟祥凯,等. 基于弹性支撑式体外凝血检测传感器疲劳极限寿命评估方法[J]. 仪器仪表学报,2021,42(5):121-130.
- [11] 佐磊,胡小敏,何怡刚,等. 小样本数据处理的加速寿命预测方法[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(11):26-32.
- [12] 熊文泽,王璐,唐春娥. 基于 FMEDA 的医疗设备硬件可靠性和安全性分析[J]. 劳动保护,2022(1):101-105.
- [13] 刘强. 基于 FMEDA 方法的弹簧全启式安全阀可靠性分析[D]. 杭州:浙江工业大学,2016.
- [14] Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems part 4: definitions and abbreviations; IEC 61508-4 [S]. International Electrotechnical Commission,2010.
- [15] 徐鹏. 气体传感器系统健康管理技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020, DOI: 10.27061/d.cnki.ghgdu.2020.004774.
- [16] 孙永义. 半导体型氢气传感器故障诊断方法研究[D]. 黑龙江大学,2022, DOI: 10.27123/d.cnki.ghlju.2022.001321.
- [17] 陆妹,蔡福全,孙京浩. FMEDA 在功能安全温度变送器验证中的应用[J]. 自动化仪表,2015,36(4):37-40,43.
- [18] 张瀚方. 基于 IEC 61508 标准的功能安全型安全栅的设计研究[D]. 上海:华东理工大学,2015.
- [19] 薛利俊. 化工装置安全仪表系统安全完整性等级计算[J]. 自动化仪表,2018,39(5):77-80.

作者简介

武传伟,高级工程师,主要从事传感器技术及仪器仪表技术研究。

E-mail: wucw@hanwei.cn

陈海永(通信作者),高级工程师,主要从事光学气体传感技术研究。

E-mail: chenhy@hanwei.cn