

基于失效物理的智能电能表可靠性综合分析

张创龙¹, 冯兴乐¹, 杨 涛², 王文皓¹

(1. 长安大学 信息工程学院, 陕西 西安 710064; 2. 青岛鼎信通讯股份有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要: 针对智能电能表在可靠性预计中普遍依赖预计手册, 难以有效结合故障模式、影响及危害性分析(FMECA)、故障树分析(FTA)等可靠性分析手段来指导改进; 且在故障分析与改进中过多依赖人工经验、不够底层, 难以保证分析结果的全面性与准确性等问题, 提出了一种基于失效物理(PoF)的综合分析方法。首先, 对涉及到的电子元器件进行失效机理分析并构建多失效机理下的可靠性预计模型, 获取元器件的失效率数据。之后以此为数据基础进行 FMECA 与 FTA 相结合的综合分析, 确定设计薄弱点。最后结合设计薄弱点的失效机理, 给出针对性改进措施。以某型智能电能表的计量模块为例进行分析, 综合分析中的 FMECA 与 FTA 结果一致、互为验证, 并给出了具体改进措施, 证明了此方法的可行性。

关键词: 智能电能表; 可靠性分析; 失效物理; FMECA 方法; 故障树分析

中图分类号: TM933

文章编号: 1000-0682(2025)02-0105-06

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2025.02.019

Comprehensive reliability analysis of smart electric meters based on physics of failure

ZHANG Chuanglong¹, FENG Xingle¹, YANG Tao², WANG Wenhao¹

(1. School of Information Engineering, Chang'an University, Shaanxi Xi'an 710064, China;

2. Qingdao Topscomm Communication Limited Company, Shandong Qingdao 266000, China)

Abstract: In response to the widespread reliance on estimation manuals for reliability prediction of smart electricity meters, which struggle to effectively integrate reliability analysis methods such as Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis (FMECA) and Fault Tree Analysis (FTA) to guide improvements, and the over-reliance on human experience and lack of depth in fault analysis and improvement that hampers the comprehensiveness and accuracy of the analysis results, this paper proposes an integrated analysis method based on Physics of Failure (PoF). Firstly, failure mechanisms of the involved electronic components are analyzed, and a reliability prediction model under multiple failure mechanisms is constructed to obtain the failure rate data of the components. Subsequently, an integrated analysis combining FMECA and FTA is conducted based on this data to identify design weaknesses. Finally, targeted improvement measures are proposed by integrating the failure mechanisms of the design weaknesses. Taking the measurement module of a certain type of smart electricity meter as an example for analysis, the results of FMECA and FTA in the integrated analysis are consistent and mutually validating, and specific improvement measures are provided, demonstrating the feasibility of this method.

Keywords: smart electric meter; reliability analysis; physics-of-failure; fmeca method; fault tree analysis

0 引言

智能电能表作为智能电网的终端设备, 负责电

力数据的采集、传输与智能控制, 其安全稳定运行对电力系统至关重要^[1-3]。2017 年以前, 我国对智能电能表实行“首次检定 + 到期轮换”的管理方式来保障其可靠性, 即在网运行 8 年后全部轮换。然而, 由于大规模轮换智能电能表所带来的高昂人力物力成本, 现行的管理策略已逐渐转变为到期后进行抽

收稿日期: 2024-07-09

第一作者: 张创龙(2000—), 男, 山西运城人, 硕士研究生, 研究方向为智能电能表可靠性。

样检测,合格批次延期使用 4 年,不合格批次进行淘汰更换^[4]。轮换政策的变化使得智能电能表生产厂商迫切需要一套行之有效的可靠性分析方法进行准确的寿命预计以及更底层的失效分析,为判别智能电能表是否符合新规要求以及进行精准改进提供依据。

目前针对智能电能表的可靠性研究学者们进行了许多相关工作,可靠性预计方面:文献[5-6]基于 GJB/Z 299C 中的元器件应力法进行智能电能表的可靠性预计,文献[7]基于 SR-332 手册对智能电能表进行寿命预计;故障分析与改进方面:文献[8-10]对智能电能表的常见故障与处理方法进行了汇总,文献[11]使用 FMECA 对智能电能表的关键元器件进行风险评估,文献[12]使用 FTA 实现电能表故障的快速定位。综上所述可以看出,智能电能表寿命预计普遍依赖预计手册,此类预计法以失效时间为主要指标,可以用于寻找设计薄弱点,但难以与 FMECA、FTA 这些可靠性分析的重要手段相结合来指导改进;而对于故障的分析与改进过多依赖人工经验且不够底层,分析过程仅使用单一方法容易受分析人员主观判断的影响,难以确保结果的全面性与准确性;同时寿命预计与故障分析工作大都相互独立,难以进行数据共享与流程整合,易导致分析结果出现偏差。

针对上述问题,该文提出一种基于 PoF 的可靠性综合分析法,通过构建多失效机理下的可靠性预计模型来获取元器件的失效率数据,为后续的故障分析提供数据支持并为薄弱点的改进提供依据,使用 FMECA 与 FTA 这两种工程中最常用的可靠性分析方法进行综合分析,以此获得设计薄弱点,分析结果互相验证,使结果具有较高可信度。

1 基于 PoF 的可靠性预计

1.1 失效机理分析

失效物理是一种从失效本质出发的可靠性分析方法,可以从物理与化学角度分析电子元器件的底层失效机理,并以此作为消除或减少失效发生原因的依据,以提升产品的可靠度。

智能电能表涉及到的电子元器件众多,进行整体分析篇幅过大,该分析选取智能电能表的计量模块来证明此方法的可行性,后续可推广至电能表整体。计量模块包含的电子元器件有电阻、电容、光耦、晶振等,根据前期的现场统计数据并结合工程师经验,可以得到各元器件的失效模式包括开路、短路

和参数漂移等,各失效模式对应的失效机理包括腐蚀(Corrosion, COR)、电迁移(Electro Migration, EM)、热载流子注入(Hot Carrier Injection, HCI)等,计量模块电子元器件的失效机理分析如表 1 所示。

表 1 计量模块电子元器件失效机理分析

电子元器件类别	失效机理	故障模式
小功率二极管、三极管	腐蚀	开路
	热载流子注入	短路
	电迁移	开路、短路、高阻、参数漂移
光耦	腐蚀	开路
	电迁移	开路、短路
	腐蚀	开路
电容	电迁移	开路、短路、参数漂移
电阻	腐蚀	开路
	电迁移	参数漂移
晶振	腐蚀	开路
	电迁移	开路、短路

1.2 多失效机理下的可靠性预计模型

平均失效前时间(Mean Time to Failure, MTTF)也称为平均寿命,是衡量可靠性水平的重要指标。表 1 已给出了计量模块中电子元器件涉及到的失效机理,下面表 2 给出各失效机理对应的寿命预计模型。

表 2 失效机理的寿命预计模型

失效机理	寿命预计模型
腐蚀(COR)	$MTTF_{COR} = A_0 \cdot (RH)^{-N} \cdot e^{\frac{E_a}{kT}}$
电迁移(EM)	$MTTF_{EM} = A_1 \cdot j^{-N} \cdot e^{\frac{E_a}{kT}}$
热载流子注入(HCL)	$MTTF_{HCI} = B \cdot (i_{sub})^{-N} \cdot e^{\frac{E_a}{kT}}$

其中: A_0, A_1, B 为缩放因子; RH 为相对湿度; N 为常数; E_a 为活化能; k 为玻尔兹曼常数; T 为工作温度; j 为电流密度; i_{sub} 为衬底电流。

由表 1 可知,一个电子元器件的失效可由多个失效机理共同导致,比如腐蚀与电迁移均可导致电容失效,此种情况在进行可靠性预计时采用“竞争模型”,并认为各失效机理是独立发生的。若引起电子元器件失效的失效机理有 n 种,设各失效机理对应的平均失效前时间分别为 $MTTF_1, MTTF_2, \dots, MTTF_n$ 且服从指数分布,则该元器件的平均失效前时间为:

$$MTTF = \min(MTTF_n, n = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

由平均失效前时间与可靠度关系可得:

$$MTTF = \int_0^\infty R(t) dt = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n} \quad (2)$$

其中:可靠度 $R(t)$ 表示正常工作时长 t 的概率; λ 为失效率。

则可得: $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \cdots + \lambda_n$ 。即多失效机理下的元器件失效率等于各失效机理下的失效率之和。

1.3 可靠性预计实例

以计量模块中的电容 C37 为例,计算其失效率。由表 1 可得,引起电容失效的失效机理有腐蚀和电迁移,分别计算两种失效机理下的失效率,计算中涉及到的参量取值如下^[13]。

表 3 寿命预计模型参量取值			
参量	取值	参量	取值
$A_0/(\mu\text{F} \cdot \text{cm}^{-2})$	2	N_{EM}	2
$A_1/(\mu\text{F} \cdot \text{cm}^{-2})$	2	Ea_{COR}/V	0.7
$RH/\%$	50	Ea_{EM}/V	0.9
$J/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	0.1×10^6	$k/(\text{eV} \cdot \text{K}^{-1})$	8.6×10^{-5}
N_{COR}	2	T/K	300

将上述参量取值带入寿命预计模型后可得:

$MTTF_{\text{COR}} = 485\ 594\ 327.1\ \text{h}$

$MTTF_{\text{EM}} = 282\ 382.3\ \text{h}$

则可得:

$\lambda_{\text{COR}} = 2.059\ 332\ 13 \times 10^{-9}$

$\lambda_{\text{EM}} = 3.541\ 298 \times 10^{-6}$

由 1.2 节构建的多失效机理下的可靠性模型可得: $\lambda_{\text{C37}} = \lambda_{\text{COR}} + \lambda_{\text{EM}} = 3.543\ 348 \times 10^{-6}$ 。

为了可以给后续的综合分析提供更加精细的数据,在得到电子元器件的失效率后,还可计算该元器件各故障模式的失效率,计算公式如下^[14]:

$\lambda_j = \lambda_p \alpha_j \beta_j$ (3)

其中: α_j 为故障模式频数比,表示第 j 种故障模式发生次数与所有可能的故障模式数的比率,具体取值可通过 GJB/Z 299C—2006 查询获得。 β_j 为故障模式影响概率,表示第 j 种故障模式发生的条件下,导致出现某严酷度等级的条件概率,GB 7826 及 GJB/Z 1391—2006 给出了推荐值,可结合分析对象的具体情况进行选取。 λ_p 表示电子元器件 p 的失效率。

电容 C37 的故障模式有三种:短路、参数漂移和开路,对应的频数比分别为 73%、11% 和 16%,故障模式影响概率分别为 1、0.5 和 0.5,将数值带入式(3)进行计算后得到失效率如表 4 所示。

表 4 C37 失效率			
名称	故障模式	失效率	故障模式失效率
C37	短路		$2.586\ 670\ 904 \times 10^{-6}$
	参数漂移	$3.543\ 348 \times 10^{-6}$	$1.948\ 861\ 64 \times 10^{-7}$
	开路		$2.834\ 707\ 84 \times 10^{-7}$

2 可靠性综合分析

FMECA 与 FTA 是工程中进行可靠性分析的重要手段,两者侧重点不同,分析角度不同,但都可用于寻找设计薄弱点,综合使用两种方法,其分析结果互为验证可以提高结果的可信度。上文使用 PoF 模型进行寿命预计时,已经进行了失效机理分析,不仅可以为综合分析提供数据上的支持,还可以使分析层次更加底层。同时综合分析找出的设计薄弱点可以与失效机理分析相结合从而给出更加精准的改进措施。

2.1 FMECA

2.1.1 FMECA 流程

FMECA 是一种系统化的分析方法,旨在识别产品或系统中所有可能发生的故障模式,并评估这些故障对系统性能的影响及其严重性^[15]。根据智能电能表自身特点制定的分析流程如下:

(1) 确定分析对象

由于智能电能表功能复杂,涉及电子元器件繁多。该文选取智能电能表的计量模块为分析对象。

(2) 故障模式分析

根据前期电能表的故障统计数据以及 GJB/Z 299C—2006,结合计量模块的功能与结构特点得出其故障模式,该文涉及到的故障模式均为器件级。

(3) 故障原因分析

结合失效机理分析以及工程师个人经验得出计量模块各故障模式所对应的故障原因。

(4) 故障影响及严酷度分析

根据前期的相似产品记录以及工程师经验确定各故障模式对分析对象的使用、功能或状态的影响,本次分析将计量模块功能的影响程度划分为 4 类,严酷度类别及其定义如表 5 所示。

表 5 严酷度类别及其定义	
严酷度类别	定义
I 类(灾难)	导致计量功能完全丧失并且不可自主恢复
II 类(致命)	导致计量精度发生较大偏差并且不可自主恢复
III 类(中等)	导致计量精度偶尔发生较小偏差,可自行恢复正常
IV 类(轻度)	不足以对计量功能产生影响,但会导致非计划性维修

(5) 危害性分析

为更加全面客观地分析每种故障模式对计量模块的影响,需综合考虑故障模式的发生频率以及影响程度计算出每种故障模式的危害度。

故障模式危害度 C_{mj} 为电子元器件 p 在 t 时间内第 j 种故障模式引起某严酷度等级下的危害度, 式为:

$$C_{mj} = \alpha_j \cdot \beta_j \cdot \lambda_p \cdot t \quad (4)$$

其中: t 为产品任务阶段的工作时间(h); $\alpha_j, \beta_j, \lambda_p$ 与式(3)一致。

电子元器件危害度 C_r 为电子元器件 p 各故障模式危害度之和, 即:

$$C_r = \sum_{j=1}^N C_{mj} \quad (5)$$

其中: N 为故障模式的个数。

2.1.2 FMECA 结果

根据 2.1.1 给出的分析流程, FMEA 结果直接填表, CA 结果经计算后得出。CA 部分以电容 C37 为例进行分析, C37 的故障模式共有 3 种, 分别是短

路、参数漂移和开路, 短路是由电应力击穿引起的, 会导致计量模块失效; 参数漂移是由环境温度变化引起的, 不影响计量模块, 但会导致非计划性维修; 开路是由腐蚀引起的, 会导致计量精度发生较大误差; 对照表 5 可得对应的严酷度分别为 I 类、IV 类、II 类。

由 1.3 节可得: λ_{C37} 为 $3.543\ 348 \times 10^{-6}$, 在现行政策下, 智能电能表的设计寿命一般为 16 年, 因此设定产品任务阶段的工作时间 t 为 140 160 h。

将上述数值代入式(4)可得: C37 短路故障模式危害度为 $C_{m1} = 0.362\ 547$, 参数漂移故障模式危害度 $C_{m2} = 0.027\ 315$, 开路故障模式危害度为 $C_{m3} = 0.039\ 731$ 。参照上述实例即可得出计量模块的 FMECA 表, 具体内容如表 6 所示。

表 6 计量模块 FMECA 表

名称	故障模式	故障原因	故障影响	严酷度	频数比	故障模式失效效率(10^{-6})	元器件失效率(10^{-6})	故障模式危害度	元器件危害度
C37	短路	电应力击穿	计量模块失效	I	73%	2.586 67		0.362 547	I : 0.362 547
	参数漂移	环境温度变化	不影响计量模块	IV	11%	0.194 88	3.541 2	0.027 315	II : 0.039 731
	开路	腐蚀引起的损坏	影响计量精度	II	16%	0.283 47		0.039 731	IV : 0.027 315
C644	短路	电应力击穿	计量模块失效	I	73%	2.586 67		0.362 547	I : 0.362 547
	参数漂移	环境温度变化	不影响计量模块	IV	11%	0.194 88	3.541 2	0.027 315	IV : 0.067 046
	开路	腐蚀引起的损坏	不影响计量模块	IV	16%	0.283 47		0.039 731	
C646	短路	电应力击穿	计量模块失效	I	73%	2.586 67		0.362 547	I : 0.362 547
	参数漂移	环境温度变化	不影响计量模块	IV	11%	0.194 88	3.541 2	0.027 315	IV : 0.067 046
	开路	腐蚀引起的损坏	不影响计量模块	IV	16%	0.283 47		0.039 731	
O5	开路	环境温湿度变化	计量模块失效	I	50%	6.781 94	15.071	0.950 556	I : 1.901 113
	短路	过流、静电击穿	计量模块失效	I	50%	6.781 94		0.950 556	
O9	开路	环境温湿度变化	计量模块失效	I	50%	6.781 94	15.071	0.950 556	I : 1.901 113
	短路	过流、静电击穿	计量模块失效	I	50%	6.781 94		0.950 556	
G2	开路	环境温湿度变化	计量模块失效	I	52%	1.657 28		0.232 284	I : 0.446 699
	短路	过压、过流、静电击穿	计量模块失效	I	48%	1.529 79	3.541 2	0.214 415	
R622	开路	环境温湿度变化、电过应力	计量模块失效	I	92%	0.001 68	0.002 1	0.000 236	I : 0.000 236 6
C5	参数漂移	环境温度变化	不影响计量模块	IV	8%	0.000 14		0.000 021	IV : 0.000 021
	短路	电应力击穿	计量模块失效	I	73%	7.760 01		1.087 643	I : 1.087 643
	参数漂移	环境温度变化	不影响计量模块	IV	11%	0.584 65	10.623	0.081 944	IV : 0.201 139
C16	开路	腐蚀引起的损坏	不影响计量模块	IV	16%	0.850 41		0.119 193	
	短路	电应力击穿	计量模块失效	I	73%	2.586 67		0.362 547	I : 0.362 547
	参数漂移	环境温度变化	不影响计量模块	IV	11%	0.194 88	3.541 2	0.027 314	IV : 0.067 046
	开路	腐蚀引起的损坏	不影响计量模块	IV	16%	0.283 47		0.039 731	

2.2 FTA

2.2.1 FTA 流程

FTA 是一种自上而下的分析方法,以某故障事件作为顶事件,逐级向下进行故障因果逻辑分析,通过将一系列事件与逻辑门进行连线,把复杂的故障逻辑分析图形化,以此分析导致顶层事件故障的原因,有助于在产品的设计阶段发现设计薄弱点,为产品的改进提供依据。根据智能电能表自身特点制定的分析流程如下:

(1) 确定分析对象

该次分析中 FTA 对象与 FMECA 对象一致,都选为智能电能表的计量模块。

(2) 确定顶事件

该次分析选取计量模块最严重的故障模式计量功能完全丧失为顶事件。

(3) 建造故障树

通过分析导致顶事件发生的原因有哪些,逐级向下直至最底层的基本事件。

(4) 定性分析

根据故障树求出故障树的所有最小割集。该次分析使用上行法计算最小割集,即从底事件出发,自下而上进行布尔运算。通过将顶事件用底事件乘积之和的最简式表示出来,则每个相加的乘积项构成一个最小割集,最终表示形式如下:

$$T = \sum_{j=1}^r \prod_{X_i \in C_j} X_i \quad (6)$$

其中: T 代表顶事件; X 代表底事件; C 代表最小割集。

(5) 定量分析

以 1.3 节计算出的失效率为依据,计算出顶事件的发生概率以及各底事件的重要度。顶事件发生概率可以作为判断该次设计是否符合标准要求的指标,底事件的重要度有助于确定设计薄弱点,从而进行针对性改进。

顶事件故障概率函数表达式为:

$$Q = 1 - \prod_{i=1}^r [1 - P(X_i)] \quad (7)$$

其中: $P(X)$ 代表底事件 X 发生的概率。

底事件重要度 $I_p(i)$ 表示第 i 个底事件的重要度,表达式为:

$$I_p(i) = \frac{\partial}{\partial q_i} Q(q_1, q_2, \dots, q_n), i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

2.2.2 FTA 结果

根据 2.2.1 给出的分析流程,以计量功能完全

丧失为顶事件建造故障树,结合 FMECA 结果得到的故障树如图 1 所示。

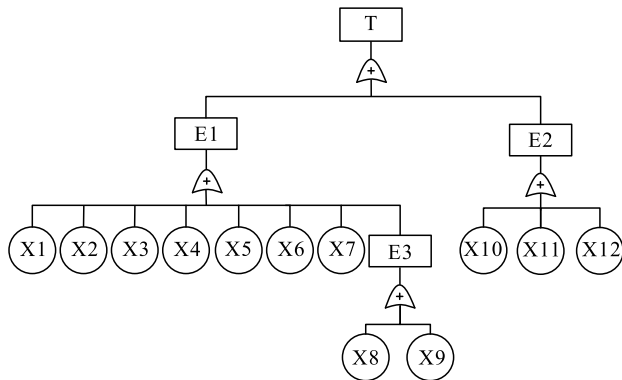


图 1 计量模块故障树

故障树事件编号与含义对应关系如表 7 所示。

表 7 故障树事件编号与含义

事件编号	含义	事件编号	含义
T	计量功能完全丧失	X5	O5 短路
E1	计量失效	X6	O9 开路
E2	供电失效	X7	O9 短路
E3	时钟失效	X8	G2 开路
X1	C37 短路	X9	G2 短路
X2	C644 短路	X10	C5 短路
X3	C646 短路	X11	C16 短路
X4	O5 开路	X12	R622 开路

根据故障树由上行法可得: $E1 = X1 + X2 + \dots + X7 + E3$, $E2 = X10 + X11 + X12$, $E3 = X8 + X9$, $T = E1 + E2$ 。

最终可得到: $T = X1 + X2 + X3 + \dots + X12$ 。

因此,一共有 12 个最小割集: $\{X1\}$, $\{X2\}$, \dots , $\{X11\}$, $\{X12\}$ 。

将上文 FMECA 表格中的相关数据带入式(7)

可得: $Q = 1 - \prod_{i=1}^{12} [1 - P(X_i)] = 4.842\ 219 \times 10^{-5}$,由式(8)可得:

表 8 底事件重要度

事件编号	重要度
X10	0.999 959 338
X4	0.999 958 359
X5	0.999 958 359
X6	0.999 958 359
X7	0.999 958 359
X1	0.999 954 164
X2	0.999 954 164
X3	0.999 954 164
X11	0.999 954 164
X8	0.999 953 235
X9	0.999 953 108
X12	0.999 951 579

2.3 综合分析结果与改进措施

对照 FMECA 得到的危害度以及 FTA 得到的重要度可以得出底事件对应的优先排序一致,都为: $X_{10} > X_4 = X_5 = X_6 = X_7 > X_1 = X_2 = X_3 = X_{11} > X_8 > X_9 > X_{12}$ 。因为 FMECA 与 FTA 两者都旨在识别和分析系统中的潜在故障,以预防或减少这些故障对可靠性的影响,因此结果具有一定的一致性。同时两个分析结果互为验证,提高了分析结果的可信度。

在工程实践中,一般认为前 30% 的故障就包含了大部分的影响因素,结合该次分析结果,可以认为 $X_{10}, X_4, X_5, X_6, X_7$ 这 5 个故障为关键故障。对照表 1 可得这 5 个关键故障由腐蚀和电迁移两种失效机理引起,同时根据计算结果可以看出,电迁移的影响占 99%,因此为了提高计量模块的可靠性,该文从元器件的选型、布局等方面提出以下改进措施:

(1) C5 电容选用金属薄膜和电极材料为铜或银的薄膜电容并增加焊点接触面。铜和银具有良好的导电性,并且其良好的基板粘附性可增大焊点接触面降低电流密度,有效降低电迁移引起的开路;

(2) 避免 C5, O5, O9 分布在热应力集中区,若不便调整位置,需增加散热片、风扇等设备控制工作温度。较低的工作温度可有效减缓电迁移效应;

(3) 对 C5, O5, O9 这些关键部位采用冗余设计,提高容错率。

3 结语

该文提出了一种基于 PoF 的智能电能表可靠性综合分析方法,并以智能电能表的计量模块为例进行了深入研究。该方法可以得出相关可靠性指标,以此判断当前设计是否符合要求;还可以找出关键的设计薄弱点,并结合失效机理给出了针对性的改进措施,为智能电能表的可靠性提升提供了科学依据。

参考文献:

- [1] 李若茜,肖霞,梅能,等. 基于 Bayes 和 Bootstrap 方法的智能电表可靠性评估[J]. 南方电网技术,2022,16(3):76-81.
- [2] 张乐平,周尚礼,谢文旺,等. 基于 GO 法与贝叶斯网络的智能电能表可靠性预计方法研究[J]. 电测与仪表,2021,58(10):177-184.
- [3] 马永超,赵伟,黄松岭. 提高智能电能表可靠性技术研究综述[J]. 电测与仪表,2022,59(4):1-7.
- [4] 解进军,周文斌,刘士峰,等. 考虑现场校验的智能电能表可靠性分析与改进[J]. 中国电力,2019,52(10):79-84.
- [5] 黄友朋,路韬,党三磊,等. 基于 GJB/Z299C 的智能电能表计量单元可靠性预计[J]. 哈尔滨理工大学学报,2021,26(6):104-111.
- [6] 李蕊,姜慧竹,韩柳,等. 基于 GJB/Z299C 的智能电能表关键元器件可靠性预计[J]. 电测与仪表,2019,56(4):147-152.
- [7] 徐锦涛,冯兴乐,赵峰. 智能电表可靠性预计技术研究[J]. 陕西电力,2018,46(4):28-32.
- [8] 李锋. 智能电表数据采集与故障分析[J]. 电力系统装备,2019(1):177-178.
- [9] 寇亮. 智能电表计量中的故障原因与对策分析[J]. 集成电路应用,2023,40(9):208-209.
- [10] 王乙童. 国网单相预付费智能电表故障及解决措施[J]. 电力系统装备,2022(12):146-148.
- [11] 胡珊珊,王保帅,尹家悦,等. 基于 FMECA 的智能电能表关键元器件风险评估[J]. 电测与仪表,2023,60(1):174-179.
- [12] 郭斌,刘珮琪,冯兴兴,等. 基于故障挖掘的电能表失效分析研究[J]. 中国新技术新产品,2019(23):51-54.
- [13] THADURI A, VERMA A K, GOPIKA V, et al. Reliability prediction of semiconductor devices using modified physics of failure approach[J]. International Journal of Systems Assurance Engineering and Management, 2013, 4(1):33-47.
- [14] 全国电工电子产品可靠性与维修性标准化技术委员会. 系统可靠性分析技术失效模式和影响分析(FMEA)程序:GB/T 7826—2012/IEC 60812:2006[S]. 北京:中国标准出版社,2006.
- [15] 中国人民解放军总装备部电子信息基础部. 故障模式、影响及危害性分析指南:GJB 1391—2006[S]. 北京:总装备部军标出版发行部,2006.