

基于数字孪生技术的电力设备 RFID 传感器数据可靠性研究

陈曦[†], 苏冰, 李深山

(北京国电网络技术有限公司供应链管理业务事业部, 北京 100070)

摘要: 基于环境干扰、传感器故障、数据传输错误等原因, 电力设备 RFID 传感器数据可能存在噪声、漂移或失真, 无法确保传感器数据的可靠性。为此, 提出了基于数字孪生技术的电力设备 RFID 传感器数据可靠性分析方法。通过分析 RFID 传感器的热传导路径以及接触电阻, 构建传感器孪生模型, 实现对传感器内部温度场的分析。在此基础上, 从时间和空间两个维度选取传感器数据可靠性分析指标, 结合数字孪生模型输出数据的置信度, 对数据可靠度进行计算。实验结果表明, 本方法对传感器数据的可靠性评估期望误差值较低, 能够有效提高电力设备 RFID 传感器数据可靠性分析精度。

关键词: 数字孪生技术; 电力设备; RFID 传感器; 数据可靠性

中图分类号: TP85

文献标识码: A

Research on the Reliability of RFID Sensor Data for Power Equipment Based on Digital Twin Technology

CHEN Xi[†], SU Bing, LI Shenshan

(Supply Chain Management Department, Beijing Guodentsu Network Technology Co., Ltd., Beijing 100070, China)

Abstract: Due to environmental interference, sensor failures, data transmission errors, and other reasons, the RFID sensor data of power equipment may have noise, drift, or distortion, which cannot ensure the reliability of the sensor data. Therefore, a reliability analysis method for RFID sensor data of power equipment based on digital twin technology is proposed. By analyzing the thermal conduction path and contact resistance of RFID sensors, a sensor twin model is constructed to analyze the internal temperature field of the sensor. On this basis, the reliability analysis indicators of sensor data are selected from both temporal and spatial dimensions, and combined with the confidence level of the digital twin model output data, the data reliability is calculated. The experimental results show that the expected error value of the reliability evaluation of sensor data using this method is low, and it can effectively improve the reliability analysis accuracy of RFID sensor data for power equipment.

Key words: digital twin technology; electrical equipment; RFID sensor; data reliability

电力设备 RFID 传感器受到数据采集环境以及数据传输路径的影响, 其测量得到的传感数据通常存在不稳定的情况。且传感器在进行数据采集的过程中, 通常会受到噪声影响, 导致数据中包含

大量的噪声数据和冗余数据, 冗余程度过高的数据无法作为后续研究的基础数据集。除此之外, 传感器设备在进行数据传输的过程中, 也会因传输路径的不同而受到不同程度的第三方干扰, 从而出现数

据丢失以及数据泄露的情况,更严重的还有可能被第三方恶意篡改。因此,为保证传感器所采集到的数据具有一定的精度,能够为电力设备通信研究提供依据,需要对传感器数据的可靠性进行研究。

文献[1]结合数据分解算法以及因果推理手段,对电力设备的可靠性进行预测。文献[2]采用 FTA 技术,对电力调度过程中的通信可靠性进行分析,从而明确影响数据可靠性的不同因素。文献[3]通过结合多源信息融合技术,提出了一种针对数据中心可靠度的评估方法。文献[4]采用贝叶斯网络模型,对多源异构数据的可靠度进行合理预估。上述方法均可以在一定程度上实现对数据可靠性的分析,但由于分析的维度过于单一,分析结果缺乏全面性,从而影响了数据可靠度的分析效果。

为此,基于数字孪生技术,提出了一种针对电力设备 RFID 传感器数据的可靠性分析方法,旨在优化分析效果,提高可靠性分析精度。

1 电力设备 RFID 传感器数据可靠性研究

1.1 电力设备 RFID 传感器孪生模型搭建

电力设备 RFID 传感器数据的可靠性研究主要针对传感器的温度分布代表性进行分析,通过分析传感器的温度分布情况,改变传感器的热传导和对热流,从而提升传感器数据的可靠性^[5-7]。由于目前传感器布控方式容易降低传感器的测量精度,从而影响数据可靠性分析,因此,本文基于数字孪生技术,对电力设备 RFID 传感器的孪生模型进行搭建,从而实现模型的温度场分析。本文所提出的电力设备 RFID 传感器孪生模型主要是基于电力设备数字孪生系统构建的。为此,本文首先对电力设备数字孪生系统原理进行分析,并在此基础上对 RFID 传感器的温度场进行仿真建模,从而构建 RFID 传感器孪生模型。电力设备的数字孪生系统结构如图 1 所示。

通过上述电力设备数字孪生系统结构可以看出,在数字孪生系统中,虚拟层中存储的数据信息与电力设备的实体信息是存在虚拟映射关系的^[8]。在数字孪生系统的虚拟层中,可以通过构建虚拟模型,对电力设备的信息进行仿真计算与分析,从而实现对电力设备的数字化管理。通过对虚拟层中的映射信息进行调用,可以得到关于 RFID 传感器数据的虚拟映射信息,从而搭建传感器孪生模型,实现对传感器温度场的仿真分析。其中,RFID 传

感器的温度场分布情况主要与两个因素相关,分别为热传导路径以及传感器内部的接触电阻。对此,本文分别针对这两个因素进行分析,从而搭建传感器孪生模型。

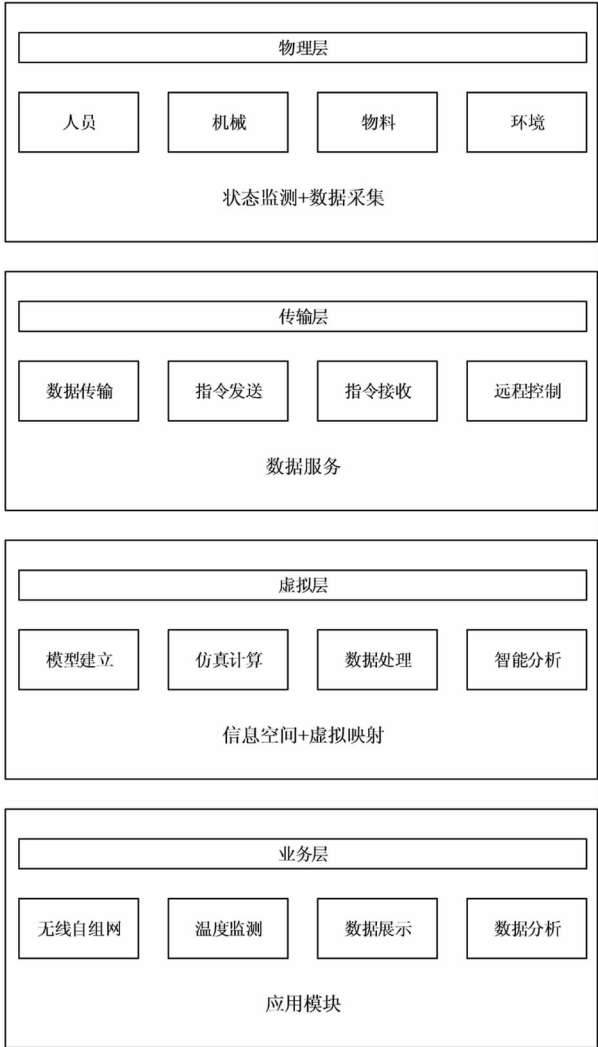


图 1 电力设备数字孪生系统结构

首先是对 RFID 传感器接触电阻的仿真计算,根据对传感器工作原理的分析,可知传感器接触电阻属于附加电阻,具体附加形式可以体现在电流收缩以及接触表面上。常规的接触电阻计算方法一般通过对接触点数以及电流传输半径进行计算,但电流传输情况较不稳定,导致传输半径难以测量。为此,本文利用经验公式计算等效接触电阻,其计算公式如下所示。

$$R = \frac{k_j}{F^m}$$

(1)

其中, R 代表 RFID 传感器的接触电阻, F 代表传感器的接触压力, m 代表接触点数, k_j 代表电流阻碍系数。对于热传导情况,可以结合导热面积

以及导热系数对换热速率进行求解,具体计算公式如下所示。

$$Q = -\frac{A \cdot \Delta T}{\lambda R} \quad (2)$$

其中, Q 代表 RFID 传感器的换热速率, λ 代表导热系数, ΔT 代表相邻导热面温差, A 代表与热流方向互相垂直的导热接触面积^[9]。通过上述步骤即可实现对传感器接触电阻与热传导路径的分析,由此构建的 RFID 温度传感器数字孪生模型以及温度分布情况如图 2 所示。

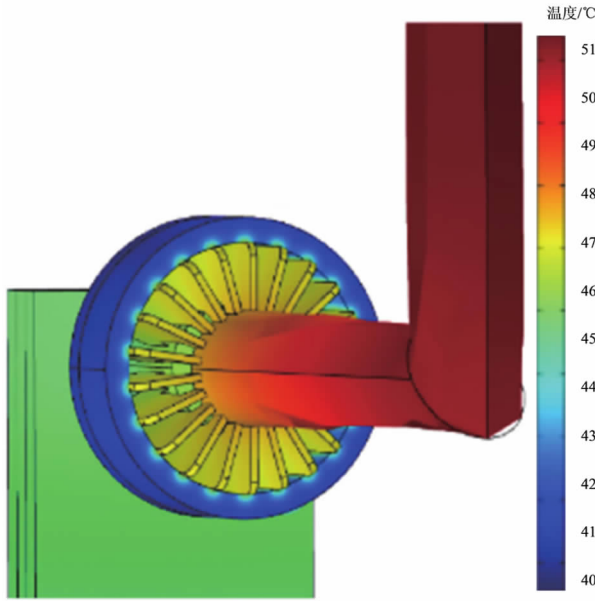


图 2 RFID 传感器数字孪生模型及温度分布

通过上述步骤,即可构建 RFID 传感器的数字孪生模型,从而完成对传感器内部温度场的分析,为后续的数据可靠性研究提供帮助。

1.2 RFID 传感器可靠性分析指标构建

基于上述构建的传感器数字孪生模型以及温度场分析情况,可以看出传感器数据的可靠性主要受到温度场分布影响。而温度场分布差异又在时间和空间角度呈现出规律性变化^[10]。因此为实现对传感器数据的可靠性分析研究,本文以时间相关性和空间相关性作为分析指标,对 RFID 传感器可靠性分析体系进行构建,为后续的可靠度计算提供可靠标准。

在传感器的时间相关性方面,使用了与不同的传感器节点的环境数据相对应的相关系数,来对时间相关性进行表征,具体表达式如下所示。

$$Z_i^m(t) = Q[z_i^m(t-n+1), \dots, z_i^m(t-1), z_i^m(t)] \quad (3)$$

其中, $z_i^m(t)$ 代表在采样时刻为 t 时传感器节

点 m 在指标 x_i 下的数据, $Z_i^m(t)$ 为传感器数据集合,其方差计算公式为:

$$\text{Var}(m) = \frac{\sum_{i=0}^n [z_i^m(t-1) - \overline{Z_i^m(t)}]^2}{p-1} \quad (4)$$

其中, $\overline{Z_i^m(t)}$ 代表数据节点为 m 时,数据集合在 n 维数据下的平均值, p 代表数据的评估等级, $\text{Var}(m)$ 代表传感器数据集合的方差^[11]。设定传感器网络中有两个相邻的节点,其中一个节点是 m ,另一个节点是 l ,其对应的传感器数据协方差为 $\text{Cov}(l, m)$,由此可以得出相邻两个节点在采样时刻为 t 时的时间性相关系数,具体计算公式如下所示。

$$X_{l,m}(t) = \frac{\text{Cov}(l, m)}{\sqrt{\text{Var}(l) \text{Var}(m)}} \quad (5)$$

其中, $X_{l,m}(t)$ 代表时间相关性系数,该值的波动范围在 -1 和 1 之间。当时间相关性系数 $X_{l,m}(t)$ 的值越接近 0 ,则代表两个传感器数据在时间上完全不相关,当时间相关性系数越趋近于 1 或者 -1 ,则代表两个传感器数据在时间维度上呈现正相关或负相关。对于空间相关性,本文采用相邻传感器节点的绝对误差对其进行表征,具体计算公式如下所示。

$$\phi_m(t) = X_{l,m}(t) |Z_i^m(t) - \overline{Z_i^l(t)}| \quad (6)$$

其中, $\phi_m(t)$ 代表传感器节点 m 在滑动时间窗口为 t 时的邻域绝对误差^[12-13]。通过上述公式即可计算出相邻传感器节点数据的绝对误差,该值可以作为空间相关系数对传感器的数据可靠性进行研究与分析。

通过上述步骤,即可构建传感器数据可靠性分析指标体系,基于时间和空间相关性,分析了传感器数据可靠性。

1.3 数据可靠性分析

基于上述所构建的数字孪生模型以及数据可靠性分析指标,本文通过对分析指标的权重进行计算,实现对传感器数据可靠性的评估,具体可靠性评估流程如图 3 所示。

通过上述传感器数据可靠性分析流程图可以看出,本文所提出的分析方法主要通过分析指标的置信分布形式以及指标权重,实现对传感器数据的可靠性分析。对此,首先针对上述构建的数字孪生模型,对输入值的置信度进行计算,具体计算公式如下所示^[14]。

$$p_{i,j} = \frac{\phi_m(t)(I-J)}{z_{i,j} \cdot h_{i,j}} \quad (7)$$

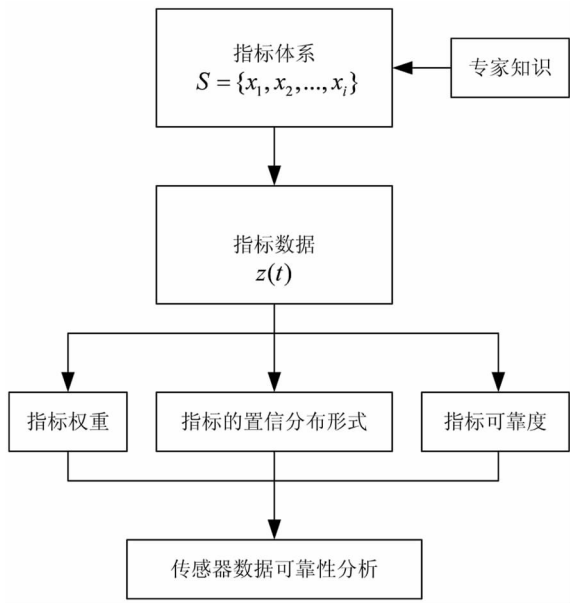


图 3 数据可靠性分析流程图

其中, $p_{i,j}$ 为对应第 j 个参考等级分析指标的置信度, $h_{i,j}$ 为对应该分析指标的参考值, I 和 J 分别代表指标和参考值的总个数, $z_{i,j}$ 代表传感器数字孪生模型的输入值。基于上述指标置信度的计算结果,对指标权重进行分配,具体权重计算公式如下所示。

$$w_i = p_{i,j} \frac{\sum_{i=1}^n v_i - s_i}{p_i + p_j}$$

(8)

其中, w_i 代表可靠性分析权重, v_i 代表可靠性分析指标在采样时刻为 t 时的样本均方差, s_i 代表指标变化幅度, p_i 和 p_j 分别代表两种分析指标对应的置信度。指标变化幅度可以对指标的稳定情况进行表征,一般来说,变化幅度越小的指标,其分析出来的结果也就越稳定,因此本文选择指标变化幅度为 0.1 的指标对数据可靠性进行分析。传感器数据可靠度可以根据测试数据的平均距离进行表征,具体计算公式如下所示。

$$d_{i,j} = |z_i(t) - z_j(t)|$$

(9)

$$r_i = \frac{D_{i,j}}{w_i}$$

(10)

其中, $d_{i,j}$ 代表传感器数据 i 和 j 之间的平均距离, r_i 代表传感器数据可靠度, $D_{i,j}$ 代表传感器数据集合的平均距离。从上述计算公式可以看出,传感器数据的可靠性越大,代表数据波动情况越低,从而证明传感器的测试精度更为准确^[15]。

通过上述步骤即可完成对于传感器数据的可靠性分析。通过对分析指标的权重进行计算,并结合指标置信度的计算结果,对传感器数据可靠度进

行计算。将本节内容与上述构建的 RFID 传感器数字孪生模型以及可靠性分析指标进行结合,至此,基于数字孪生技术的电力设备 RFID 传感器数据可靠性分析方法设计完成。

2 实验分析

为了验证本文提出的基于数字孪生技术的电力设备 RFID 传感器数据可靠性分析方法的有效性,在理论部分的设计完成后,构建实验环节,对本文方法的分析效果进行验证。

2.1 实验说明

本次实验选取文献[2]方法和文献[3]方法作为对比方法,分别记为常规方法 1 和常规方法 2。通过构建实验平台,采用三种方法对同一组数据可靠性进行分析,对比不同方法的实际分析效果。

2.2 实验准备

本次实验选取的实验对象为热电式 RFID 传感器,通过对该传感器的参数进行调取,并使用 MATLAB 仿真软件对传感器进行仿真建模,从而模拟传感器正常运行。并结合实测传感数据对实验数据集进行构建,实现对三种方法的有效测试。对此,本文通过构建分布式传感器网络,获取实验数据,对分布式传感器网络中的节点数据进行随机采样,并进行统一归一化处理,得到测试用例数据。本文所构建的电力设备 RFID 传感器分布如图 4 所示。

为保证构建的仿真电力设备 RFID 传感器性能较为真实,本文通过对电力设备 RFID 传感器的参数进行调用,实现仿真建模,电力设备 RFID 传感器仿真参数如表 1 所示。

表 1 电力设备 RFID 传感器仿真参数	
电力设备 RFID 传感器参数	参数配置
测量范围	0~999 μg/m ³
测量精度	±10 μg/m ³
响应时间	1.5 s
质量浓度分辨率	1 μg/m ³
工作电压	DC5.0 V
工作电流	≤100 mA
工作温度	10~15℃
工作湿度	≤95%RH
ΔT	7.5℃
λ	0.15

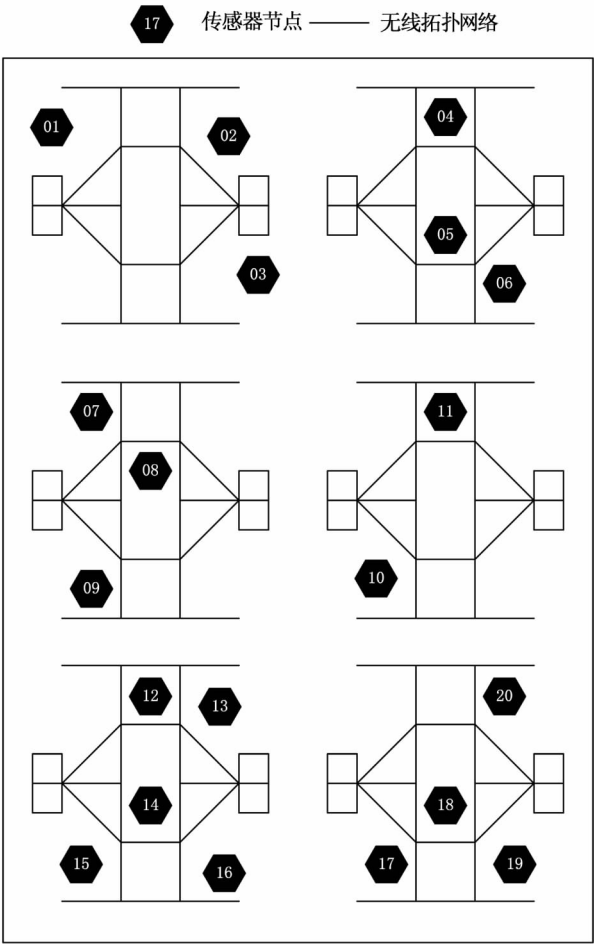


图 4 电力设备 RFID 传感器分布图

为对电力设备 RFID 传感器数据可靠性进行分析,本文首先针对测试数据的置信度分布情况进行获取。结合本文方法,对分析指标权重进行赋值。时间和空间相关性指标的可靠性置信分布分别如图 5 和图 6 所示。

由图 5 和图 6 可知,在本文方法中,可靠性指标权重 w_i 的值设为 0.21,时间和空间相关性的权重值分别为 0.15 和 0.16。

2.3 可靠性分析精度对比结果

根据上述可靠性置信分布情况,对不同测试用例数据的可靠性进行评估。为了对比不同方法的实际分析精度,本文模拟了两种实验环境,分别为单节点传输路径以及多节点传输路径。其中,多节点传输路径中的电力设备 RFID 传感器节点设为 10,通过对电力设备 RFID 传感器网络中的节点数据进行随机采集,构建多节点传输路径的测试用例数据。本次对比实验选取的对比指标为不同可靠性分析方法的分析精度,具体衡量指标为可靠性评估期望误差值,该值越低,代表方法的分析精度越

高,单节点和多节点传输下的可靠性评估期望误差分别如图 7 和图 8 所示。

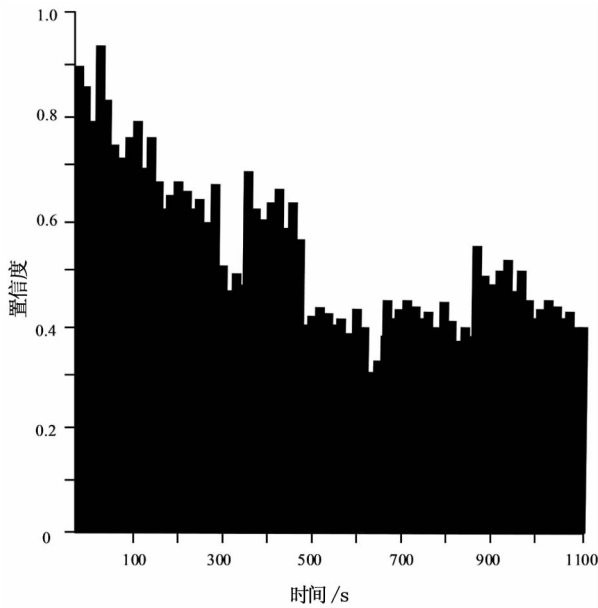


图 5 时间相关性指标的可靠性置信分布

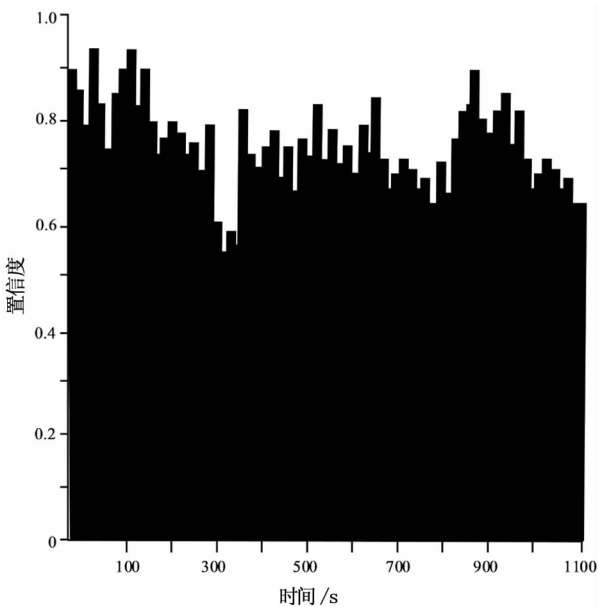


图 6 空间相关性指标的可靠性置信分布

从图 7 和图 8 中的实验结果可以看出,在不同节点传输环境下,不同方法得到的可靠性评估期望误差值有所不同。通过观察实验结果可以明确,多节点传输条件下的期望误差要明显高于单节点传输。将三种不同分析方法得出的可靠性评估期望误差进行对比可以看出,本文提出的基于数字孪生技术的可靠性分析方法所得到的期望误差值更低,由此可以证明本文方法的可靠性分析精度更高。

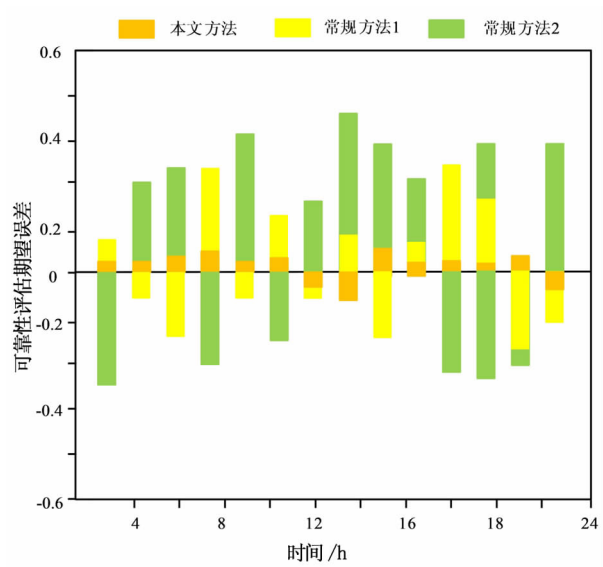


图 7 单节点传输下的可靠性评估期望误差

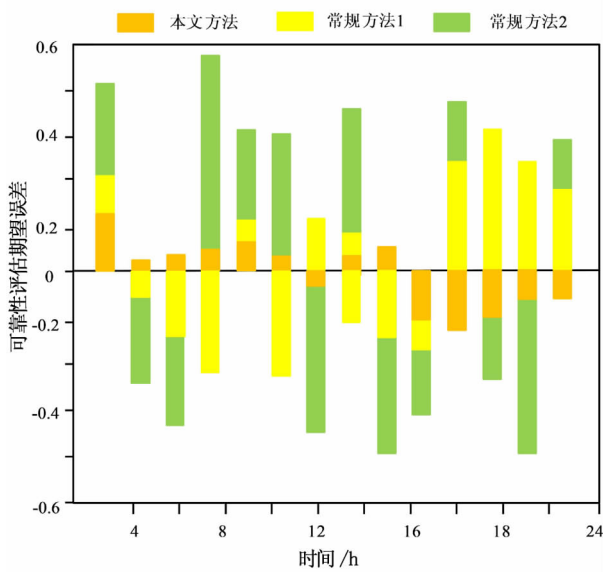


图 8 多节点传输下的可靠性评估期望误差

3 结 论

为提高电力设备 RFID 传感器数据可靠性分析精度,基于数字孪生技术提出了一种新型的数据可靠性分析方法。通过构建传感器孪生数字模型,对传感器温度场进行分析,在此基础上,构建可靠性分析指标体系,能够有效提高方法的分析精度。在今后的研究工作中,还需对可靠性分析体系进行优化,从而提高分析效果。

参考文献

[1] 孙淑娟,田昕怡,何泽昊,等. 基于数据分解及因果推理的设备可靠性预测模型[J]. 中国安全生产科学技术,2023,19(5):44—50.

[2] 姚映帆,张旭,彭浩,等. 基于 FTA 的电厂电力调度数据网通信系统可靠性分析[J]. 工业控制计算机,2023,36(2):4—6+8.

[3] 张青春. 基于多源信息融合的数据中心配电可靠性评估技术研究[J]. 大众用电,2023,38(2):44—45.

[4] 唐莉,程世娟,张晓洁,等. 多源异构数据贝叶斯变权融合可靠性评估模型[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2023,37(2):272—277.

[5] 陈瑞. 提高电力调度中心和省级集控中心数据可靠性研究[J]. 云南电力技术,2023,51(1):55—59.

[6] 韩良文,赵鹏,邓云李,等. HFETR 设备可靠性数据库的研究与设计[J]. 核安全,2022,21(6):67—74.

[7] 李燕华,林文鹏,范富波,等. 引入失效信息的无失效数据可靠性评估[J]. 环境技术,2022,40(4):192—198.

[8] 王珂琦,张耀. 关于跨域虚拟网络的优化狼群映射研究仿真[J]. 计算机仿真,2021,38(2):291—295.

[9] 董建华,唐家银. 基于主特征映射的多权重数据统计融合可靠性评估模型[J]. 统计与决策,2022,38(7):26—30.

[10] 王鑫,周泽宝,余芸,等. 一种面向电能量数据的联邦学习可靠性激励机制[J]. 计算机科学,2022,49(3):31—38.

[11] 杨洋. 基于大数据技术的配电网运行可靠性分析[J]. 无线互联科技,2022,19(5):22—23.

[12] 唐莉,唐家银,程世娟. 多源异构数据贝叶斯统计融合可靠性评估模型[J]. 机械强度,2022,44(1):126—132.

[13] 陈秀海,祁宏,陈默,等. 基于 LabVIEW 的大规模电力设备可靠性评价系统[J]. 自动化与仪器仪表,2021(12):147—150.

[14] 王瑞果,丁健,王颖舒,等. 基于数字孪生的配电开关柜温度传感器数据可靠性研究[J]. 电力大数据,2021,24(6):27—35.

[15] 贾俊青,段玮頔. 基于互联网的电力设备可靠性监测分析[J]. 集成电路应用,2021,38(3):134—135.