

文章编号 1004-924X(2010)08-1914-08

IEEE 1451 网络化智能传感器的通用建模方法及应用

黄国健, 刘桂雄, 洪晓斌, 陈铁群

(华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640)

摘要: 为提高网络化智能传感器的互操作性, 在分析 IEEE 1451 标准传感器的定义和功能需求的基础上, 利用统一建模语言(UML), 分别从静态用例建模、动态顺序描述和系统部署 3 个层面构建了一系列面向网络化测控的通用型智能传感器系统模型, 搭建了一款可用于在线检测绝缘子污秽状况的网络化智能传感器。相对于从传感器原型开始开发, 该方法减少了 60% 以上的开发时间。实验结果表明, 利用 UML 统一建模方法可以有效描述基于 IEEE 1451 标准的网络化智能传感器的简化模型, 为后续研制及优化高性能的智能传感器提供理论参考和模型基础。建立的传感器模型具有通用性和可扩展性, 能关联不同的物理接口; 结合实际需求, 可在该模型的基础上快速扩展构建所需的网络化智能传感器, 能实现传感器的“即插即用”和实现良好的网络互操作性。

关键词: 智能传感器; 建模; IEEE 1451; 通用性; 统一建模语言

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101808.1914

Universal modeling method and application for network intelligent sensors based on IEEE 1451

HUANG Guo-jian, LIU Gui-xiong, HONG Xiao-bin, CHEN Tie-qun

(*School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China*)

Abstract: A universal modeling method for network intelligent sensors based on IEEE 1451.0 standard is presented to improve the networking interoperability of intelligent sensors. The universal network intelligent sensor frameworks including static use-case model, dynamic behaviour models and system deployment model are described by using Unified Modeling Language(UML). Then, an insulator contamination status online monitoring sensor is rapidly constructed from these frameworks. Research results indicate that the UML-based modeling method could be used to effectively describe the simplified intelligent sensor model based on IEEE 1451 standards. The model shows well universal and expandable characteristics and can correlate different physical interfaces and realize network interoperability. Moreover, the development time for IEEE 1451-based network intelligent sensors has decreased over 60% as compared with those traditional methods.

Key words: intelligent sensor; modeling; IEEE 1451; universality; Unified Modeling Language (UML)

收稿日期: 2009-12-03; 修订日期: 2010-03-10.

基金项目: 广东省教育部产学研结合项目 (No. 2007A090302039); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目 (No. NCET-08-0211)

1 引言

基于 IEEE 1451 标准的网络化智能传感器是目前的研究热点,然而该系列标准的几个子标准之间虽有相似的技术特征,但在通用功能、通信协议和 TEDS 格式的设置等方面有所差异,这给通用传感器建模构建一个复杂智能传感器系统带来了许多困难。Kang Lee 等基于 UML 建立了智能传感器的面向对象应用框架,并应用于污水处理传感器系统中,该框架主要针对 IEEE 1451.1 子标准而言,尚未推广应用到 IEEE 1451 的其它系列标准^[1-2];Sorribas J 等基于 IEEE 1451 标准网络化智能传感器节点研制了一套大型分布式海洋传感器测控系统,但没有采用从通用框架出发的设计方法^[3];吴仲城等针对机器人传感器应用的特点,探索使用 STIM 的 TEDS 文件的可视化自动配置方法,然而其参考标准仅限于 IEEE1451.2 标准及其修订建议^[4];Gurkan, D 等开始依据 IEEE 1451.0 标准,使用 NET 框架规划电子数据表格,该工作专注于定义完整的 TEDS,而对传感器整体框架的通用性考虑略有欠缺^[5];Rossi S R 等利用 VHDL 语言在一款低成本 FPGA 上实现了网络化智能传感器的基本需求,其工作主要围绕 IEEE 1451.2 协议进行,还有待引入 IEEE 1451.0 协议以增强传感器的通用性^[6]。本文研究利用 IEEE1451 标准高效地搭建网络化智能传感器系统的方法,从 IEEE 1451.0 标准入手,力求构建一个网络化智能传感器的通用模型框架。

要对网络化智能传感器进行建模,首先必须选择一种合适的建模语言,确保其能较形象化、规范化地描述系统的静态结构和动态行为并统一规划系统的部署,使 IEEE 1451 智能传感器系统的软、硬件结构体系清晰明了,并能充分满足网络化智能传感器的模块化、互操作性和扩展性的要求。目前在主流的建模语言中,统一建模语言(Unified Modeling Language, UML)是一种定义良好、易于表达、功能强大且普遍适用的可视化建模语言,其致力于减少软件代码、显著提升软件质量和其面向对象的设计思想使其较为适合应用在基于 IEEE 1451 智能传感器的模型构建中。

2 网络化智能传感器静态用例建模

用例建模作为 UML 建模的一部分,其主要功能是为了表达系统静态的功能性需求或行为。图 1 为基于 IEEE 1451.0 标准的通用智能传感器的静态用例图。从图中可以看出,智能传感器必须具备同时完成对多个具有 IEEE 1451 接口的传感器、执行器进行识别、配置和数据采集的能力,对采集的数据在传感器端进行初步的非线性校正,校正后的数据通过网络接口传递到远程客户端,同时在本地亦可以显示测量数据。

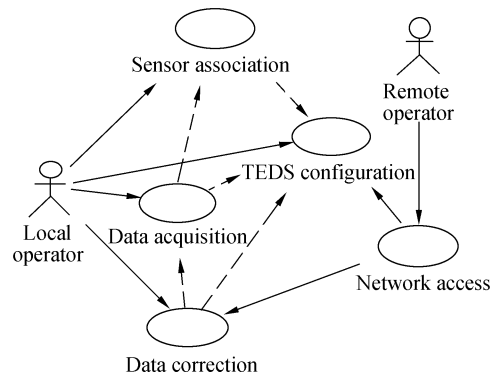


图 1 网络化智能传感器系统用例图

Fig. 1 Use-case model of intelligent sensor

必须强调传感器电子数据表格(Transducers Electronic Data Sheet, TEDS)及其相关操作是传感器系统数据采集的核心,通过在线对传感器进行识别和配置,可实现传感器的“即插即用”。采集过程的触发,采集数据的校正和显示,网络数据包的封装都靠 TEDS 中保存的数据来协调和统一指挥。各个传感器的 TEDS 信息可以分别通过网络和本地操作进行在线设置和更改。

IEEE 1451.0 标准应用对传感器信号进行非线性和多变量校正的思想,在 TEDS 中存储传感器校正系数^[7]。图 2 为智能传感器数据校正模型图,所涉及到的校正引擎通过特定的数学函数将来自 1 个或多个智能变换器接口模块(Smart Transducer Interface Module, STIM)的数据融合起来,为每个传感通道校正出一个较为精确的传感量。校正引擎把传感器获取的数据转换成工程量和将工程量转换成执行器所需的表达形式,由此实现了由浮点数表示的工程量与传感器获得数据或者执行器要接收的数据之间的映射关系。

校正引擎运行在网络适配处理器模块 (Network Capable Application Processor, NCAP) 中, 它利用存储在 STIM 中校正 TEDS 的各种校正系数对原始传感数据进行融合变换, 并在完成校正后输出传感数据。

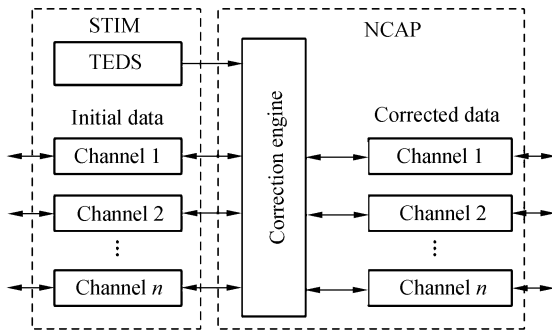


图 2 智能传感器数据校正模型图
Fig. 2 Correction model of data

根据 IEEE 1451.0 标准, 校正引擎一般采用多项式表示, 为限制多项式次数, 校正引擎可应用分段的多项式函数, 根据输入量的特性采用相应的校正系数。设 n 为校正模型的输入通道数, X_n 为从传感器输出或向执行器输入的变量值, 可得到以下校正多项式:

$$\sum_{i=0}^{D(1)} \sum_{j=0}^{D(2)} \dots \sum_{p=0}^{D(n)} C_{i,j,\dots,p} [X_1 - H_1]^i [X_2 - H_2]^j \dots [X_n - H_n]^p, \quad (1)$$

式中: H_n 为各输入量的修正值; $D(k)$ 为输入量阶数; $C_{i,j,\dots,p}$ 为多项式各项系数, 这 3 类数值都储存在校正 TEDS 中。

执行数据校正时, 首先要找出检测值所在的分段区间, 然后校正引擎采用特定的校正方法对传感信息进行融合校正。常用的校正方法有查表法、最小二乘拟合法和分段多项式插值法 3 类, 具体的校正方法可以根据所要校正数据量的大小、硬件资源的分配情况以及校正方法的效率和能耗方面综合考虑选择。本文在前期研究的基础上, 应用的是基于多尺度解耦的线性插值方法^[8-10]。

3 网络化智能传感器动态描述

表示 UML 模型的消息序列有顺序图 (突出消息的时间顺序) 和协作图 (突出交换消息的对象间的关系)。其中顺序图可将系统各独立对象的类元角色的交互关系表示为一个直观的二维图,

在本智能传感器模型中, 使用顺序图进行描述系统信息交互和动态需求。结合 IEEE 1451.0 标准, 笔者对网络化智能传感器所涉及到的动态顺序结构进行如下细化规划: ①纵向轴为时间信息轴, 时间沿竖线向下延伸; ②横向轴表示在用例协作中各独立对象的类元角色; ③用生命线表征类元角色, 当对象存在时, 角色用一条虚线表示; 当对象的过程处于激活状态时, 生命线变为双道线。

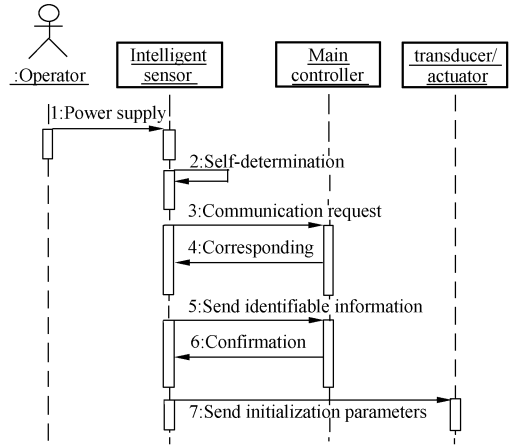


图 3 初始化传感器顺序图
Fig. 3 Initialization process of intelligent sensor

下面介绍用顺序图及协作图来表示网络化传感器的初始化、参数调节、信息处理、传感器关联及驱动等动态过程的方法。

图 3 描述的是网络化智能传感器初始化动态过程。该过程的参与者包括操作者、智能传感器、控制器以及有可能会涉及到的关联传感器。在操作者完成系统连接, 接通电源后, 马上执行该初始化的动态过程: ①智能传感器启动完毕, 完成自检; ②向网络发送通信请求, 并侦听网络, 等待控制器响应; ③传感器与控制器建立通信后, 获取控制器发送的身份识别 ID 等参数, 监测变送器信号的变化, 侦听关联传感器及控制器的通信数据。

图 4 描述的是传感器参数调节顺序。该过程的参与者包括智能传感器、控制器和驱动器。智能传感器侦听网络通信, 通过网络接收控制器发出的数据或指令; 在收到存储控制器发送数据后; 根据控制器信号, 发送相应处理指令。

图 5 描述的是传感器信号处理顺序。该过程的参与者包括智能传感器、总控制器、驱动器。在完成传感器参数调节过程后, 进入传感器信号处理过程: ①智能传感器通过各个检测通道

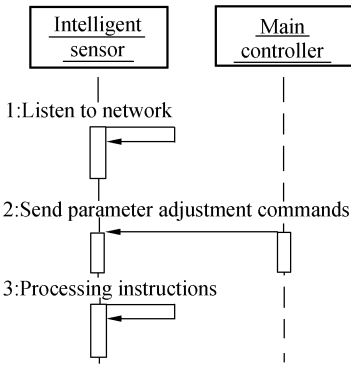


图 4 传感器参数调节顺序图

Fig. 4 Parameter adjustment process of intelligent sensor

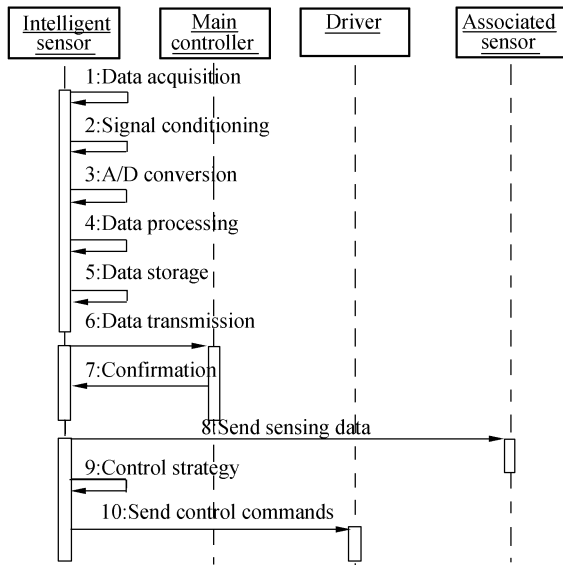


图 5 传感器信号处理顺序图

Fig. 5 Signal processing process of intelligent sensor

连接的传感头获取目标信号;②对信号进行调理,然后存储数据;③向总线控制器发送数据;④与关联传感器进行数据通信;⑤根据预设参数选择控制决策,向驱动器发送控制指令和监测数据。

除前述动态顺序外,还有传感器关联的顺序等动作需求,在完成以上一系列动态顺序规划后,可以比较完整地描述智能传感器工作时的各种动态顺序行为以及传感器组成对象间的交互关系,为下一步建立智能传感器的系统部署模型打下基础。

4 网络化智能传感器的系统部署

为了使传感器的智能功能尽可能接近实际的

测量和控制点,IEEE1451 将传感器模型功能分为 NCAP 和 STIM 两个模块。一个 STIM 能支持单个或多个(最多 255)通道,每个通道可以与传感器或执行器相联结,各外接的变换器可视为 STIM 的一部分。STIM 亦可作为 NCAP 的一个存储设备,数据读取和功能实现可以通过相应的功能地址(包括被访问通道和需要实现的功能)获取。根据 IEEE 1451.0 命令和服务集,STIM 内部软件支持与 NCAP 双向通信,两者之间通过变换器独立接口(Transducer Independent Interface, TII)实现短距离的同步传感数据传输,完整的 TII 包括 10 根按照 SPI 标准串行通讯方式的连线接口,但实际设计时,可以根据需要进行相应的调整或简化。

UML 采用部署视图实现自身的结构建模,它提供将系统中的类映射成物理构件和节点的机制,展现对运行时处理节点以及其中构件方面的配置,在本模型中主要描述传感器硬件的物理拓扑结构(包括网络布局和构件在网络上的位置)以及在此结构上执行的软件分布情况。

根据上面对网络化智能传感器系统的静态分析和动态描述,确定出网络化智能传感器模块结构的系统部署情况,并在 Rational Rose 中规划传感器系统的通用部件模型如图 6 所示。模型用带箭头的虚线表示构件之间的编译依赖关系,箭头从用户构件指向它所依赖的服务构件,若从一个构件指向另一个构件上的接口可以采用虚线表示。其中,智能传感器 STIM 的系统部件主要包括:多通道数据采集模块、A/D 转换模块、信号调理模块、数据存储模块、与 NCAP 或其他 STIM 进行数据传输的模块、控制决策模块、数据处理模块、驱动模块及状态显示模块等单元。智能传感器 NCAP 的系统部件主要包括:与 STIM 通信的数据传输模块、数据存储模块、数据处理模块、数据编码模块及与网络通信模块等。

根据这个通用系统部署框图可以构建传感器的硬件体系结构。其中的微处理核心单元是智能传感器的核心,主要完成信号数据的采集、处理(如数字滤波、非线性补偿、自诊断)和数据的输出调度(包括数据通信和传感量的本地输出)等工作。为简化硬件设计,从智能传感器高可靠性、低功耗、低成本和微体积等特点出发,高运算主频的嵌入式微处理器是控制核心模块的最佳选择,

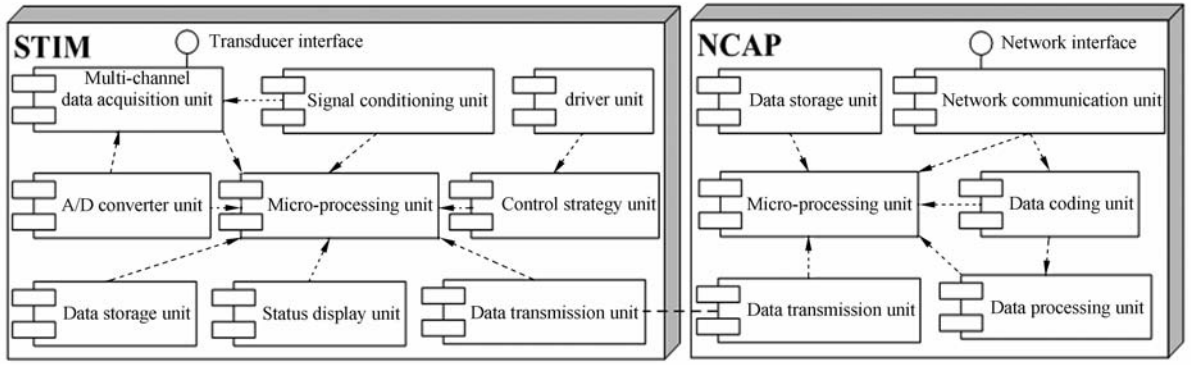


图 6 智能传感器系统部署框图

Fig. 6 System deployment of 1451-based networked intelligent sensor

且所有的控制逻辑和数据计算可以由主控制器的软件实现。需要指出的是,网络化智能传感器因为同时具备多路传感器识别配置、现场数据采集和处理以及传感信息网络通信等功能,且具有体积小、低功耗、高性能的特征,所以在硬件电路选择上应高于普通的嵌入式系统的要求。

5 应用举例

下面介绍如何利用上述建模方法迅速搭建一款在线检测绝缘子污秽状况的网络化智能传感器。绝缘子表面沉积的污秽层受潮后使绝缘子的外绝缘能力下降,并会常引起污闪事故的发生,因此对绝缘子表面污秽状况进行在线监测非常重要。由于高压输电线路绝缘子污秽检测中节点分布区域广阔且距离遥远(可达数十公里),遵循而不囿于 IEEE 1451 标准,采用 GSM/GPRS/CDMA 网络作为更高一级数字通信网络。相对于通用模型,该实际模型省略了执行器部分,只需要对传感器进行操作,因此可简化设计步骤如下:

(1) 根据静态通用用例模型,确定传感器所涉及的用例。由于绝缘子表面的积污是一个复杂的物化过程,积污速度取决于多种因素,是一个典型的非线性多变量函数关系,所以要在线检测绝缘子表面污秽状况,首先需要选择表征污秽绝缘子运行状态的特征量,其中泄漏电流是指运行电压作用下受污表面受潮后流过绝缘子表面的电流,是运行电压、气候、污秽三要素综合作用的结果。通过实时获取流过绝缘子表面上的泄漏电流可以评定绝缘子表面的污秽状况并在污秽过度时预警,所以智能传感器必须具备同时完成对多个具有

IEEE 1451 接口的包括泄漏电流传感器,温度、湿度传感器等气象类传感器进行识别、配置和数据采集的功能,采集的数据在传感器端进行初步的非线性校正,并能将校正后的数据进行打包通过无线网络接口传递到远程客户端的功能。在此静态用例分析中,对 TEDS 的设计尤为关键, TEDS 存储了所有传感器通道对应的传感器类型、物理单位、数据模型、校正模型以及厂商 ID 等信息。通过配置完整的 TEDS,可以完成泄露电流传感器和各类气象传感器的识别和配置,实现传感器的“即插即用”;同时,NCAP 获取校正 TEDS,通过校正引擎实现传感器的非线性校正,体现传感器“智能”的特点。

(2) 根据智能传感器的通用动态描述模型规划传感器的动态描述模型,描述绝缘子污秽检测传感器工作时的各种动态顺序行为以及传感器组成对象间的交互关系,包括传感器初始化顺序、传感器参数调节顺序、传感器信号处理顺序等。

(3) 根据前面的静态用例模型和动态行为描述,对传感器进行系统部署,描述传感器各组成部件的物理结构及各部件之间的依赖关系。按照 IEEE1451 标准,绝缘子污秽检测传感器的 STIM 模块主要执行各传感器的识别和配置,进而对泄露电流数据和温湿度等气象参数进行数据采集,其中对 TEDS 的配置也在 STIM 模块进行;而 NCAP 模块主要执行传感信息的非线性校正和转换,并将数据压缩打包,通过 GSM/GPRS/CDMA 网络与远程控制终端主机进行通信。根据这一思路,规划出如图 7 所示的智能传感器框图,其中 STIM 模块的核心处理器必须具有快速的运算能力和良好的抗电磁干扰能力,因此选用 TI 工

业级的 32 位 DSP 作为前端的处理核心;而 NCAP 模块的处理器除了必须具有强大的运算能力外,还必须考虑嵌入式系统的资源配置,因此

选用了三星公司专门的 32 位 ARM 处理器。连接 STIM 部分与 NCAP 部分的 TII 在此试验装置中简化成 RS232 通信接口。

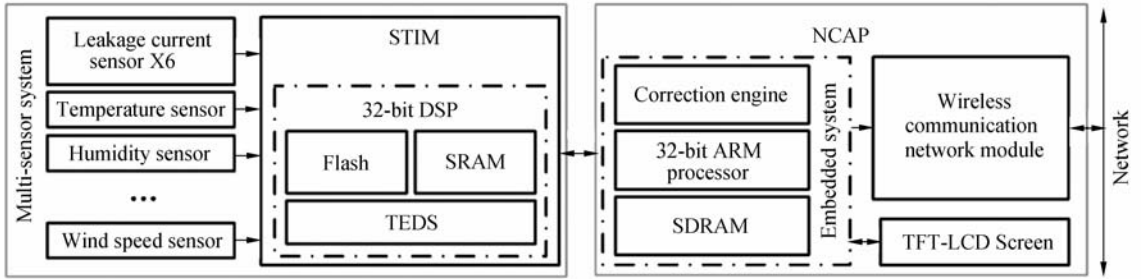


图 7 绝缘子污秽程度智能传感器硬件部署

Fig. 7 Hardware architecture of insulator contamination monitoring sensor

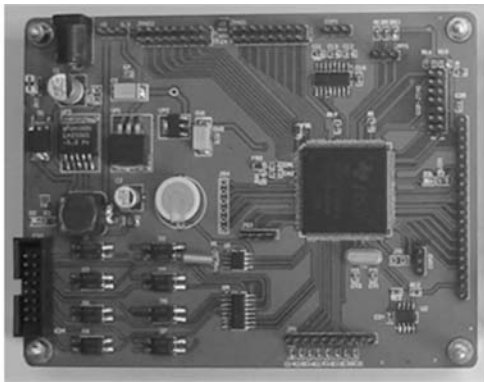
根据模型所开发的网络化智能传感器实物见图 8,相对于从传感器原型开始开发,显著减少了 60%的开发时间。通过热插拔传感器显示,传感器可以自动识别,实现了良好的“即插即用”性,并

获得如下指标:①为兼顾泄露电流测量时对弱信号的高精度和强信号的宽量程需求,STIM 部分关联两款量程分别为 0~30 mA、1~500 mA,分辨率为 0.01、1 mA 的泄露电流传感器,共 6 个,传感数据根据传感信号阈值进行量程切换;②温度测量范围:−20~120 °C,±1 °C;③湿度测量范围:0%~100%,±3% RH;④风速测量范围:0.0~45.0 m/s,±3%;⑤传感器远程通信网络可选用 GSM/GPRS 网络模式。

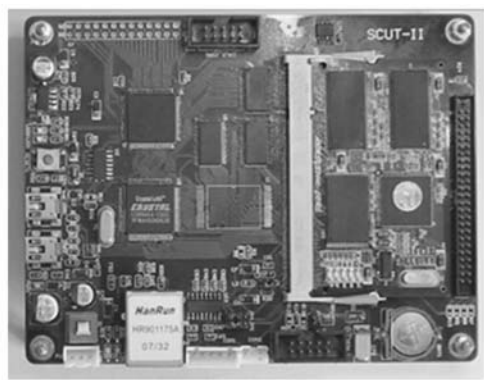
传感器实时检测流经绝缘子表面的泄露电流以及周围环境的气象参数,包括温度、湿度、降雨量、日照强度等,通过确定各维传感信息分辨级的大小次序,采用具有自主知识产权的解耦校正算法^[8-12],对单一测量目标进行收敛的逐步逼近插值运算,剔除其它传感信号的耦合干扰,获得 $y_i = f(x_i)$ 形式的单输入-单输出的特征函数,实现传感器的非线性校正,通过对上述所有校正后的传感信息进行专家系统分析,最终对工作状态下高压输电线路绝缘子表面污秽程度做出综合评判。

6 结 论

基于 IEEE 1451 系列标准的几个子标准之间在通用功能、通信协议和 TEDS 格式的设置等方面有所差异,影响了网络化智能传感器的互操作性,本文利用 UML 构建了一个网络化智能传感器的通用模型框架。该框架分为三个层次,即用于描述传感器静态的功能性需求的静态用例建



(a) STIM 模块
(a) STIM module



(b) NCAP 模块
(b) NCAP module

图 8 绝缘子污秽程度智能传感器实物图
Fig. 8 Prototypes of STIM and NCAP

模;用于描述传感器系统信息交互和动态需求的动态行为建模;用于描述系统硬件的物理拓扑结构以及在此结构上执行的软件的系统部署建模。实验结果表明,基于 IEEE 1451 标准的网络化智能传感器的简化模型所建立的传感器模型具有通用性、可扩展性,变换器与网络无关,并可关联不

同的物理接口,为后续研制及优化高性能的智能传感器提供理论参考和模型基础。基于该通用模型可以快速拓建所需的网络化智能传感器,实现传感器的“即插即用”并获得良好的网络互操作性,相对于从传感器原型开始开发,可显著减少 60% 以上的开发时间。

参考文献:

- [1] LEE K, SONG E Y. UML model for the IEEE 1451. 1 Standard [C]. *Proceedings of the 20th IEEE Information and Measurement Technology, United States*, 2003:1587-1592.
- [2] LEE K, SONG E. Y. Object-oriented application framework for IEEE 1451. 1 standard [C]. *Proceedings of the 21st IEEE Instrumentation and Measurement Technology, United States*, 2004: 1182-1187.
- [3] SORRIBAS J, DEL RIO J, TRULLOLS E, *et al.*. A smart sensor architecture for marine sensor networks [C]. *International Conference on Networking and Services, Piscataway, New Jersey, United States*, 2006:1-8.
- [4] 罗双胜,吴仲城,申飞. 基于 IEEE1451. 2 的机器人传感器接口 STIM 的设计 [J]. *自动化与仪表*, 2008 (3):37-40.
LUO SH SH, WU ZH CH, SHEN F. Design of robotic sensor interface's STIM based on IEEE1451. 2 [J]. *Automation & Instrumentation*, 2008(3):37-40. (in Chinese)
- [5] MANDA S, GURKAN D. IEEE 1451. 0 compatible TEDS creation using . NET framework [C]. 2009 *IEEE Sensors Applications Symposium (SAS 2009)*. New Orleans, LA, USA, 2009:281-286.
- [6] ROSSI S R, MORENO E D, DE CARVALHO A A, *et al.*. A VHDL-based protocol controller for NCAP processors [J]. *Computer Standards and Interfaces*, 2009, 31(2):515-522.
- [7] Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE Std1451. 0-2007, IEEE standard for a smart transducer interface for sensors and actuators-common functions, communication protocols, and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) formats [S]. New York:Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2007.
- [8] 叶廷东,刘桂雄,黄国健,等. 基于多尺度逼近的多维传感信息解耦方法 [J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2009, 37(4):86-89,110.
YE T D, LIU G X, HUANG G J, *et al.*. Novel approach of multi-dimensional sensing information decoupling based on multi-scale approximation [J]. *Journal of South China Univ. of Technology (Natural Science Edition)*, 2009, 37(4):86-89, 110. (in Chinese)
- [9] 戴光智,陈铁群,薛家祥,等. 小波图像融合改善超声图像分辨率 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16(11): 2290-2295.
DAI G ZH, CHEN T Q, XUE J X, *et al.*. Improvement of resolution for ultrasonic image based on wavelet image fusion [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11):2290-2295. (in Chinese)
- [10] 刘桂雄,黄国健,洪晓斌,等. 一种基于多维插值解耦的输电线路运行状态参数的传感方法:中国, CN101393247 [P]. 2008-11.
LIU G X, HUANG G J, HONG X B, *et al.*. A transmission line running state parameters sensing method based on multi-dimensional interpolation decoupling technology: China, CN101393247 [P]. 2008-11. (in Chinese)
- [11] 刘桂雄,林绪虹. 基于 CMAC 的图像融合快速算法 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16(5):950-956.
LIU G X, LIN X H. Image fusion fast algorithm based on CMAC [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(5):950-956. (in Chinese)
- [12] 李慧,沈湘衡. 光电经纬仪的机电动力学建模与耦合 [J]. *光学精密工程*, 2007, 15(10):1577-1582.
LI H, SHEN X H. Electromechanical dynamic modeling and coupling for optoelectronic theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10):1577-1582. (in Chinese)

作者简介:



黄国健(1981—),男,广东清远人,博士研究生,2005年于华南理工大学获得学士学位,主要从事智能传感技术的研究。E-mail: gj. h@mail. scut. edu. cn



洪晓斌(1979—),男,广东揭阳人,博士后,助理研究员,2007年在华南理工大学获得博士学位,主要研究方向为新型智能传感技术、仪器仪表技术及网络化测控技术。E-mail: mexbhong@scut.edu.cn



刘桂雄(1968—),男,广东揭阳人,教授,博士生导师,1990年、1995年在重庆大学分别获得学士和博士学位,主要从事智能传感技术、现代检测技术与网络化控制的研究。E-mail: megxliu@scut.edu.cn



陈铁群(1946—),男,广东五华人,教授,博士生导师,1989年在比利时鲁汶大学获博士学位,主要研究方向为智能传感技术、现代检测技术。E-mail: tqchen@scut.edu.cn

(本栏目编辑:白雨虹)

●下期预告

中阶梯光栅光谱仪的 optical 设计

唐玉国¹, 宋楠^{1,2}, 巴音贺希格¹, 崔继承^{1,2}, 陈今涌¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

为了在更宽波段范围内获得较高的分辨率,实现全谱直读,以中阶梯光栅为分光元件,二维面阵 CCD 为探测器的中阶梯光栅光谱仪优先选择。本文简述了中阶梯光栅及中阶梯光栅光谱仪的基本原理,分析并比较了中阶梯光栅光谱仪与普通平面闪耀光栅光谱仪的区别。利用光学成像原理与消像差理论进行了 Czerny-Turner 结构形式中型高分辨率中阶梯光栅光谱仪原理样机的光学系统设计与分析。该光学系统工作在原子谱线最为密集的 200~500 nm 波长,为简化计算在设计中对 350 nm 波长消除了所有像差,光线对中阶梯光栅在准 Littrow 条件下入射以获得高衍射效率,使用折反射棱镜作为交叉色散元件以分离重叠的级次,在 CCD 探测器上获得二维光谱面。光学系统有较好的平场特性及点对点成像能力,在整个工作波长范围内分辨率可以达到 2 000~15 000,满足设计要求。该仪器可用于原子发射和吸收光谱的研究工作,通过替换不同的探测器及增加外围电路与软件平台,仪器的工作性能具备进一步发掘的空间。