

基于拓扑层级关系结构的便携式低压智能检测仪设计

黄吕超¹, 冯笑², 陈明辉², 陈正华², 吕东东¹, 蒋演²

(1. 国网信息通信产业集团有限公司, 北京 100000;

2. 国网信通亿力科技有限责任公司, 福州 350000)

摘要: 针对传统智能检测仪灵活性差、灵敏度较低的问题, 基于低压台区拓扑层级结构进行智能检测仪的设计, 对低压台区拓扑关系进行星型拓扑改造, 使低压台区结构更加简洁, 数据完成互通; 将智能检测仪管理模块进行集成化设计, 使仪表检测数据控制力度更强; 采用 TMS320 芯片加强检测仪数据处理速度, 同时将检测仪功能模块集成化处理, 缩小检测仪体积; 利用多层次拓扑优化算法对检测仪采集数据分层次划分, 并分析检测数据与时间周期的关系, 从而完成条理化处理, 最后通过测试网点对测量误差进行分析, 发现该设计最大误差为 0.9%, 最小误差为 0.2%; 通过仿真实验发现该设计灵敏度最大, 最高达到 96%; 通过对比实验发现该设计模型强控比率最大为 0.8, 控制时间为 30 s; 从而验证了该设计方法的优越性, 证实了该研究的可行性。

关键词: 星型拓扑层级结构; 便携式智能检测仪表; 集成化管理模块; TMS320 数据处理芯片; 多层次拓扑优化算法

Design of Portable Low-voltage Intelligent Detector Based on Topology Hierarchy Structure

HUANG Lvchao¹, FENG Xiao², CHEN Minghui², CHEN Zhenghua², LU Dongdong¹, JIANG Yan²

(1. State Grid Information & Telecommunication Group Co. Ltd., Beijing 100000, China;

2. State Grid Info-telecom Great Power Science and Technology Co. Ltd., Fuzhou 350000, China)

Abstract: The traditional intelligent detector has the problems of poor flexibility and low sensitivity. In this paper, an intelligent detector is designed based on the topology hierarchy of the low-voltage station area, and the topological relations of the low-voltage station area are transformed into star topology. The management module of the intelligent detector is integrated to make the data control of the instrument more powerful, the data processing speed of the detector is enhanced by using TMS320 chip, and the function module of the detector is integrated to reduce the volume of the detector. The multi-level topology optimization algorithm is used to divide the collected data into different levels and analyze the relationship between the detected data and the time period. Finally, the measurement error is analyzed through the test network, and it is found that the maximum error is 0.9%, the minimum error is 0.2%. Through the contrast experiment, it is found that the maximum intensity control ratio is 0.8 and the control time is 30 s. Thus the superiority of the design method is verified, and the feasibility of the research is confirmed.

Keywords: star topology hierarchy; portable intelligent instrument; integrated management module; TMS320 data processing chip; multilevel topology optimization algorithm

0 引言

为了提升产品和拓展更大的市场, 同时契合 2020 年国网互联网部重点工作方向以及意向客户的需求, 开展低压台区便携式智能检测仪研发项目, 达到提高设备灵敏度, 增强台区故障诊断和通信数据分析能力的目的。

经过参考电力元器件研发机构的发明专利, 发现多种智能检测仪设计方案, 其中文献 [1] 利用嵌入式 ARM 结构设计智能检测仪的内部芯片, 提高了智能检测仪数据控制能力。但由于设计单片机为 8 位处理器, 因此检测数据灵敏度较差, 从而形成数据采集误差^[1]; 文献 [2] 基于

RATI 设计理论, 对智能检测仪进行研发, 设计出微型 RATI 检测芯片, 固化了系统指令, 加强了仪器数据控制力度。但这种检测只能应用在指定场合, 灵活性较差, 不具有普遍适用性^[2]。

综合上述智能检测仪研发方案技术上的不足, 本文在此基础上进行设计, 主要创新点在于:

1) 利用 CAN 控制器设计智能检测仪集成模块, 加强检测仪内部控制能力。

2) 采用嵌入式方式设计微处理器, 利用 TMS320 芯片, 增加检测仪采集数据灵敏度。

收稿日期: 2021-02-01; 修回日期: 2021-03-15。

作者简介: 黄吕超(1983-), 男, 北京市人, 大学本科, 高级工程师, 主要从事配变电终端方向的研究。

引用格式: 黄吕超, 冯笑, 陈明辉, 等. 基于拓扑层级关系结构的便携式低压智能检测仪设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(10): 228-232.

3) 利用多层次拓扑优化算法对检测数据进行归纳处理, 数据输出能够层级化显示, 清晰显示出其规律变化。

本课题开展便携式低压智能检测仪硬件架构设计与研发, 完成设备外观及硬件功能设计, 进行主控芯片的选型, 接口元件等硬件选型, 使设备具有便携式特点; 采用安卓操作系统, 内置计算模块和通信监听模块, 完成整个仪表的设计^[8]。

1 台区拓扑层级关系结构

本文设计的智能检测仪应用于低压台区设备, 对整个低压台区结构进行规划, 在保证系统稳定运行的前提下, 设计出层级拓扑关系结构, 便于检测台区设备异常, 增加台区安全运维, 符合电力客户的利益^[4]。台区设计层级结构如图 1 所示。

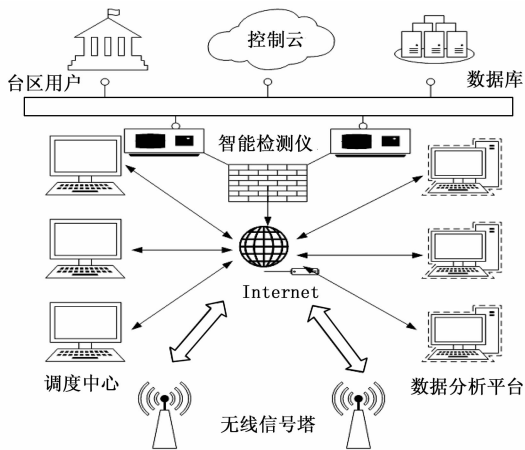


图 1 拓扑层级关系结构

图 1 中低压台区关系设计采用星型拓扑层级结构, 以因特网为核心, 四周扩散的数据连接方式进行设计。数据传输通道负责台区用户、控制云和数据库的无线传送, 智能检测仪与 3 种数据库建立连接通道, 完成低压台区设备更新, 智能检测仪负责收集设备运行数据。因特网将调度中心、数据分析平台、无线信号塔和智能检测仪联结, 组成星型关系结构, 调度计算机负责设备的运维和管理, 并对现场设备进行合理化调度; 数据分析平台负责台区数据整理, 进行汇总, 将汇总数据传输到调度中心; 无线信号塔负责用户网络连接, 完成整个低压台区的网络覆盖; 智能检测仪与因特网之间设有隔离墙, 防止检测数据泄露, 为检测仪数据安全增加了保障^[5-7]。通过采集台区关系数据信息汇总, 得到检测仪设计流程如图 2 所示。

整个检测仪流程的设计使本论文思路更加清晰, 保证台区设备数据互通, 使智能检测仪采集数据更加简洁, 加快了数据采集速度, 采用星型拓扑结构加强了系统控制能力, 便于掌握整个台区的运行过程^[8]。

2 智能检测仪集成模块设计

为保证检测仪适用于低压环境, 并加强检测仪对数据的控制能力, 本文对传统智能检测仪内部结构进行集成化

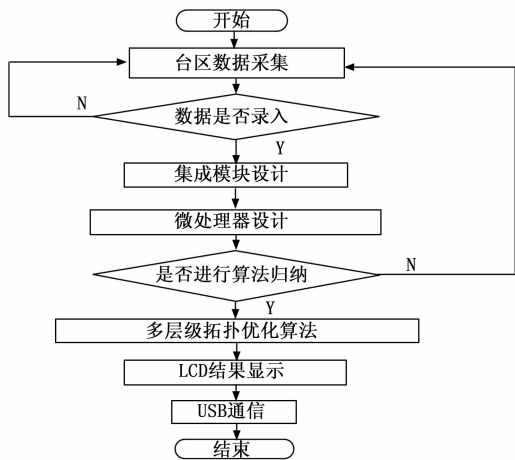


图 2 检测仪设计流程

处理, 使检测仪小型化, 便于携带^[9]。检测仪集成模块如图 3 所示。

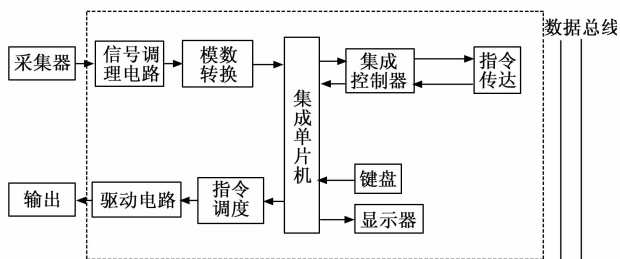


图 3 检测仪集成模块

智能检测仪集成模块以集成单片机为核心, 数据总线为传输手段, 搭配外联硬件设备键盘和显示器等。集成单片机主要功能通过模数转换、指令调度和集成控制器来实现, 采集器得到的设备信息转换为电信号, 经过信号调理分批输入到集成芯片中, 经过芯片中各项功能的处理分析最终传达出切合实际的指令数据; 集成器负责传达芯片各功能块的数据指令; 集成单片机发出模拟信号经过转换输出, 最终被台区现场设备捕获^[10]。

检测仪信号调理模块负责联通数据采集模块和信号传输通道, 调理电路如图 4 所示。

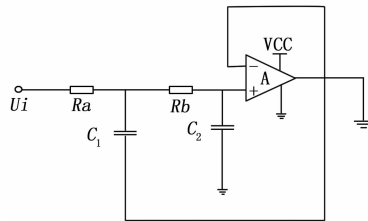


图 4 信号调理电路图

信号调理过程主要由运算放大器来完成, 通过对信号的放大使后续电路的识别更加准确, 根据输入的电压 U_i 经过两级电阻和电容的加工处理, 将电压输入到放大器的正极, 最终输出较为明显的放大信号, 更容易进行识别。

检测仪的驱动电路决定了设备工作的起始状态, 设备

的驱动能力能够直接反映出其性能，本文设计的驱动电路如图 5 所示。

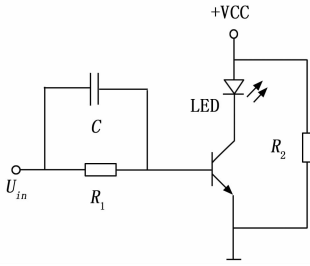


图 5 驱动电路简图

驱动电路设计有 LED 显示灯，负责监视驱动状态，有电容和电阻并联完成信号输入，通过三极管的导通状态决定设备的开关，并联的电阻 R2 对三极管进行保护，整个驱动电路的设计保证了检测仪的正常运行状态，是集成模块的重要组成部分。

检测仪集成模块的设计能够识别采集器转换的模拟信号，并进行处理，将指令输送到控制器和指令调度中心，完成一个信号处理周期^[11]。

3 嵌入式微处理器

对于智能检测仪的数据处理中心，本文采用嵌入式微处理器，利用 TMS320 芯片多个引脚完成检测仪的数据对接，对低压台区多种数据类型进行分类处理，增加检测仪内部数据处理速度^[12]。微处理器集成芯片如图 6 所示。

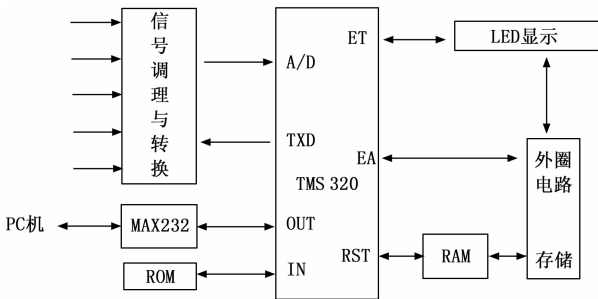


图 6 微处理器集成芯片图

微处理器芯片采用 TI 公司研发的 TMS320 处理芯片，整体设计符合 ISO 研发标准，在输出 PC 机上建立无线通讯线路，利用片外 RAM 负责数据储存，ROM 与芯片输出完成对接，负载输出为 MAX232 传输机和 PC 机输出信号。采用锂离子电池供电，保证接入系统的稳定运行，TXD 和 A/D 引脚与信号调理转换功能块连接，中间设有继电器保护电路，主要利用多开路继电器进行电路安全防护，通过 I/O 控制开关与 ET 引脚相连，通过 LED 显示屏输出，EA 引脚与外圈电路相连，使芯片作用范围能够根据配网电压等级调整，使智能检测仪符合低压台区设备使用条件^[13]。

TMS320 芯片通过 32 位引脚进行控制，增加了无线数据录入和输出位置，加快了集成模块数据初始化速度，能够完成低压台区检测数据筛选，芯片处理数据采用微秒级

计算方式，提高了检测仪的灵敏度^[14]。

4 多层级拓扑优化算法

本文采用多层级拓扑优化算法对智能检测仪数据进行归纳处理，将处理结果传达至指令控制中心，从而完成数据收录，便于低压台区用户检索。多层级拓扑优化算法主要根据智能检测仪采集数据样本，对低压台区设备进行调度控制，具有自适应性^[15]。

忽略低压台区设备运行中产生的不可控因素，将台区采集数据参数化，对数据参数微分计算即构建出多层级模型：

$$J(\Phi^{MA}, \Phi^{ME}) = \int_{\Omega^{MA}} (u^{MA})^T k^{MA}(\Phi^{ME}) u^{MA} d\Omega^{MA} \quad (1)$$

式中， $J(\Phi^{MA}, \Phi^{ME})$ 表示智能检测仪数据目标函数， Φ^{MA} 表示宏观约束条件下的仪表数据， Φ^{ME} 表示约束坐标系纵坐标， u^{MA} 表示检测设备数据偏差， k^{MA} 表示拓扑模型层级数， Ω^{MA} 表示拓扑模型输入自变量，即检测仪电阻参数。

将图 4 中微处理器输出的拓扑数据作为算法输入量，拓扑模型数据量取决于采集数据在约束条件下的纵坐标数值^[16]，因此得到关系式：

$$k^{MA}(\Phi^{ME}) = k_{mm}^{ME} - k_{ms}^{ME} (k_{ss}^{ME})^{-1} k_{sm}^{ME} \quad (2)$$

$$k_{ss}^{ME} = \int_{\Omega^{ME}} k_0^{ME} d\Omega^{ME}$$

式中， k_{mm}^{ME} 表示约束纵坐标下的量化， k_{ms}^{ME} 表示单位量， k_{ss}^{ME} 表示约束横向条件， k_{sm}^{ME} 表示约束纵向条件， k_0^{ME} 表示纵坐标下的层级初始值， Ω^{ME} 表示拓扑模型截止电阻阻值。

将模型层级关系式进行线性处理^[17]，经过宏平衡条件得到拓扑模型的双线性方程：

$$a^{MA}(u^{MA}, v^{MA}) = \int_{\Omega^{MA}} (u^{MA})^T k^{MA}(\Phi^{ME}) v^{MA} d\Omega^{MA} \quad (3)$$

式中， u^{MA} 表示双线性拓扑层检测电压，即检测仪电压参数， v^{MA} 表示双线性拓扑层检测误差。

对式 (1) 的模型结构进行细化分析，对其载荷进行形式化分析^[18]，得到层级模型载荷线性函数为：

$$l^{MA}(v^{MA}) = \int_{\Omega^{MA}} f^{MA} v^{MA} d\Omega^{MA} + \int_{\Gamma_N^{MA}} g^{MA} v^{MA} d\Gamma_N^{MA} \quad (4)$$

式中， f^{MA} 表示拓扑层级载荷密度， g^{MA} 表示层级结构的关系深度测量，即为检测仪深度测量参数， Γ_N^{MA} 表示模型中相邻两个层级临界值。

为计算组建层级模型消耗时间与检测结果之间的关系^[19]，对宏观建设模型时间周期进行求导：

$$\frac{dJ(\Phi^{MA})}{dt^{MA}} = - \int_{\Omega^{MA}} \gamma^{MA} \delta(\Phi^{MA}) | \nabla \Phi^{MA} | (v^n)^{MA} d\Omega^{MA} \quad (5)$$

$$\gamma^{MA} = (u^{MA})^T k^{MA}(\Phi^{ME}) u^{MA}$$

式中， t^{MA} 表示宏观建模时间周期， γ^{MA} 表示层级建模受影响程度，为模型构建约束条件， $\delta(\Phi^{MA})$ 表示检测仪采集的数据样本函数， v^n 表示层级建模速度，即检测仪速度参数。

对式 (5) 时间导数函数与层级建设模型函数对比，得到层级拓扑模型导数函数式：

$$\frac{dJ(\Phi^{MA})}{dt^{MA}} = - \sum_k \int_{\Omega^{MA}} \gamma^{MA} \delta(\Phi^{MA}) \varphi_k^{MA}(x^{MA}) \frac{d\alpha_k^{MA}(t^{MA})}{dt^{MA}} d\Omega^{MA} \quad (6)$$

式 (6) 中, φ_k^{MA} 表示层级模型参数化动态微分系数, x^{MA} 表示层级坐标变量, α_k^{MA} 表示拓扑模型进行层级拓展向量。

结合式 (5)、(6) 的时间周期导数函数, 采用链式结构将两式按周期变化结合得到:

$$\frac{dJ(\Phi^{MA})}{dt^{MA}} = \sum_{k=1}^N \frac{\partial J(\Phi^{MA})}{\partial \alpha_k^{MA}(t^{MA})} \frac{d\alpha_k^{MA}(t^{MA})}{dt^{MA}} \quad (7)$$

式 (7) 中, $\partial J(\Phi^{MA})$ 为拓扑关系层级结构边界。

为了解层级拓展向量变化规律, 对其进行求导:

$$\frac{d\alpha_k^{MA}(t^{MA})}{dt^{MA}} = - \int_{\Omega^{MA}} \gamma^{MA} \delta(\Phi^{MA}) \varphi_k^{MA}(x^{MA}) d\Omega^{MA} \quad (8)$$

由此得到宏观函数与时间周期的关系:

$$\frac{dG^{MA}(\Phi^{MA})}{dt^{MA}} = \sum_k \int_{\Omega^{MA}} \delta(\Phi^{MA}) \varphi_k^{MA}(x^{MA}) \frac{d\alpha_k^{MA}(t^{MA})}{dt^{MA}} d\Omega^{MA} \quad (9)$$

式 (9) 中, G^{MA} 表示表示宏观层级函数式。根据两者的关系推导出时间周期是影响宏观层级结构的关键因素。

对两者关系进行验证, 将时间周期导数代入到宏观层级函数中, 然后进行求导:

$$\frac{dG^{MA}(\Phi^{MA})}{dt^{MA}} = \sum_{k=1}^N \frac{\partial G^{MA}(\Phi^{MA})}{\partial \alpha_k^{MA}(t^{MA})} \frac{d\alpha_k^{MA}(t^{MA})}{dt^{MA}} \quad (10)$$

通过计算两者关系, 将检测仪表数据输入到层级模型, 使输出的宏观数据具有普遍适用性。

根据输入的检测仪表运行规律, 将宏观层级表达式求导:

$$\frac{dG^{MA}(\Phi^{MA})}{d\alpha_k^{MA}} = \int_{\Omega^{MA}} \varphi_k(x^{MA}) \delta(\Phi^{MA}) d\Omega^{MA} \quad (11)$$

经过计算发现, 最终输出的宏观函数能够引起单个微观层级模型的变化。

为解释这种变化产生的原因, 将宏观层级求导函数进行微观化处理, 得到数据输入后的层级微观结构^[20], 其表达式为:

$$J(\Phi^{MA}, \Phi^{ME}) = \int_{\Omega^{MA}} \int_{\Omega^{ME}} (u^{ME})^T k_0^{ME} u^{ME} d\Omega^{ME} d\Omega^{MA} \quad (12)$$

式 (12) 中, u^{ME} 表示微观化层级结构输入电压, Ω^{ME} 表示微观函数层级变量。

对其微观函数进行求导, 得到层级关系拓扑模型与微观层级系数关系式:

$$\frac{dG^{ME}(\Phi^{ME})}{d\alpha_l^{ME}} = \int_{\Omega^{ME}} \varphi_l(x^{ME}) \delta(\Phi^{ME}) d\Omega^{ME} \quad (13)$$

式 (13) 中, α_l^{ME} 表示微观层级关系, φ_l 表示微观层级结构动态微分系数, x^{ME} 表示微观横坐标变量, δ 表示微观层级样本系数, Φ^{ME} 表示微观约束条件下空间坐标。

多层次拓扑优化算法对智能检测仪采集的样本数据进行分层处理, 通过计算宏观层次模型和微观层次模型与时间周期函数关系进行分类, 根据设定的数据边界完成数据划分, 使仪表显示更加具有条理化^[21]。

5 试验结果与分析

本实验低于 380 V 低压台区测试网点进行, 根据现场实验测试记录, 对传感器采集的台区数据进行分析, 根据具体结果数据验证其性能^[22]。现场实验环境设置, 台区变压设备额定功率为 450 V, 传感器数据采集精度为 94%, 微机计算误差小于 5%, 无线传输速度为 4.5 MB/s^[23]。测试网点配置参数如表 1 所示。

表 1 实验环境参数

实验环境	配置参数
检测仪表	JY-ST-FU3001
CPU	Intel i9 9600KF
微机配置	64G+128G 内存, 64 位
芯片仿真	Proteus 8.6
曲线仿真	Matlab 2019

实验室计算机在安卓操作系统下, 对 2 240 V 电压等级台区设备进行数据统计, 根据实验记录报表, 经过后续分类汇总, 将采集数据和误差进行列举, 根据实验记录和式 (1)、(5) 计算数据, 从而得到智能检测仪数据如表 2 所示。

表 2 检测仪数据采集表

序号	标称电阻/ Ω	仪表电压/V	测量电阻值/ Ω	测量误差/%
1	10	3.4	9.8	0.2
2	20	5.8	19.5	0.5
3	47	6.5	47.2	0.2
4	96	6.5	95.1	0.9
5	151	6.5	150.7	0.7

分析表 2 测试结果, 仪表电压最高为 6.5 V, 此时标称电阻为 47 Ω , 测量电阻与标称电阻阻值接近, 最大测量误差为 0.9%, 最小测量误差为 0.2%, 验证了本设计检测仪具有较高精度。

为验证本文设计的检测仪对设备数据的灵敏度, 通过计算 3 种方法的超调量, 然后利用 Matlab 仿真软件对 3 种设计方法进行对比, 仿真结果如图 7 所示。

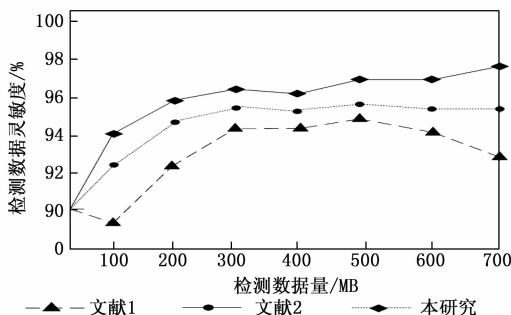


图 7 检测数据灵敏度对比

图 7 中仿真本研究检测仪灵敏度, 并与文献 [1] 设计的 ARM 检测仪和文献 [2] 设计的 RATI 检测仪进行对比, 分析可知, 本研究总体灵敏度高于另外两种设计方法, 其

中本研究在 200 MB 就达到最大灵敏度,并稳定在 96%;而文献 [1] 在 300 MB 达到最大灵敏度,稳定在 95%;文献 [3] 在 300 MB 达到最大灵敏度,稳定在 94%,但在 600 MB 时灵敏度极具下降。分析可知,存在这种明显差异的原因在于微处理器的选择,也表明了集成模块对数据处理能力的强弱对比,可见本研究灵敏度较高。

为验证本设计模型的控制能力,与传统 BP 神经模型进行对比,通过微机显示式 (13) 的计算结果,将多组数据结果曲线化,得到两种方法控制能力对比曲线如图 8 所示。

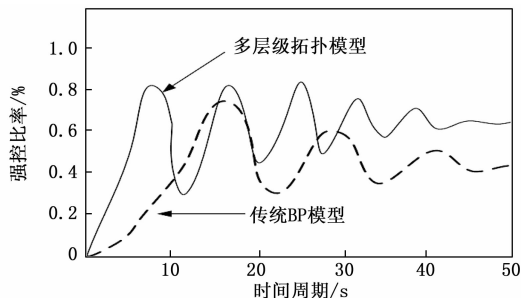


图 8 模型控制能力对比

分析图 8 中曲线,可以看出传统 BP 模型强控比率最大为 0.77,控制时间周期为 20 s;本研究多层次拓扑模型强控比率最大为 0.8,控制时间周期为 30 s。明显本文设计模型强控力度更大,控制时间更长。

综合上述实验分析,本文设计的低压智能检测仪采集精度更高,对于台区设备检测更加灵敏,控制能力更强,整体性能较为优越,解决了低压台区检测灵敏度差,检测仪灵活性不足的问题,同时加强了台区设备监管力度^[24]。

6 结束语

本文主要研究应用于低压台区的智能检测仪设计,通过参考多项发明专利,对低压台区拓扑关系进行改造,设计出星型拓扑关系结构;同时对智能检测仪进行设计,通过更新其集成模块提高仪表对数据控制能力,采用 TMS320 芯片更新仪表的信号调理线路,加强了仪表检测数据的分析能力;利用多层次拓扑优化算法对低压台区数据进行建模,使检测仪表数据显示具有条理化。最后通过实验测试,根据测试数据结果验证了本设计仪表的可行性,对仪表检测灵敏度和模型控制能力进行对比,验证了本设计方案的优越性。

但是本研究在实验测试中仍存在一些不足,由于进行了便携式改造,因此仪表检测覆盖面较窄;对于较大型电力设备检测较为困难等问题亟待解决。希望后续能够针对这些问题加以完善。

参考文献:

[1] 温锦辉. 对嵌入式 ARM 系统在电子领域的研究及分析 [J]. 电子制作, 2020 (9): 96-97, 62.
[2] 葛丹. 匈牙利零排放建筑 RATI 塑料技术研发中心的设计理念和方法 [J]. 工业建筑, 2018, 48 (10): 199-203.

[3] 段晓超, 段玲琳, 李化雷. 星型拓扑 RS422 信号传输特性研究 [J]. 雷达科学与技术, 2016, 14 (1): 91-94.
[4] 肖建波, 石然, 代作伟, 等. 基于星型拓扑结构的全台数字通话系统 [J]. 电声技术, 2017, 041 (6): 73-78.
[5] WANG X, WEI H, OU Z J. et al. A STATCOM compensation scheme for suppressing commutation failure in HVDC system [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46 (5): 135-142.
[6] 梁 颀, 马铁华. 光纤与测试节点的星型拓扑测试网络构建方法 [J]. 中北大学学报 (自然科学版), 2015 (36): 592-596.
[7] 张国华, 刘文龙. 基于压缩感知的星型拓扑结构无线传感网络信号检测算法 [J]. 太原理工大学学报, 2018, 49 (3): 473-477.
[8] 石 鑫, 曾枣红, 李程远. 星形拓扑无线传感器网络低功耗技术研究 [J]. 压电与声光, 2015 (4): 629-633.
[9] 梁 晶, 谭劲松, 史记征. 一种智能化甲醛检测仪设计与实现 [J]. 网络安全技术与应用, 2020, 231 (3): 121-124.
[10] GUO J L, YANG K. Design of natural gas outlet flow detector based on embedded ARM [J]. Intelligent computers and applications, 2018, 8 (4): 140-143.
[11] 熊强强, 尹建平, 姚卫国, 等. 一种智能型腕带式心率检测仪的设计与实现 [J]. 国外电子测量技术, 2020, 39 (2): 93-97.
[12] 郑小龙. 国产嵌入式微处理器的探索与开拓 [J]. 电子产品世界, 2015 (8): 20-21.
[13] 韩琛晔. 基于 STM32 嵌入式微处理器的农业气象物联网数据采集系统设计 [J]. 现代电子技术, 2020, 43 (5): 10-13.
[14] 刘金明. 嵌入式微处理器应用技术项目课程的教学资源研究与设计 [J]. 科学与财富, 2019 (35): 170.
[15] 付永清, 张宪民. 多层渐进黑白拓扑优化设计方法 [J]. 中国机械工程, 2017, 28 (11): 1292-1299.
[16] 刘 浩, 张连明, 贺文华. 一种基于互惠能力的 P2P 网络拓扑优化算法 [J]. 计算机工程与科学, 2016 (6): 1091-1096.
[17] BAO L I, YAN S N, HONG J. Growth topology optimization method for structures under harmonic force excitation [J]. Journal of Zhejiang University—Science A (Applied Physics & Engineering), 2016 (12): 933-946.
[18] 焦凡苇, 梁海龙. 3-UPU 柔顺并联机构构型拓扑优化设计与实验测试 [J]. 包装工程, 2019, 40 (5): 187-195.
[19] 张鹤志, 张 棒, 谢献忠, 等. 渐进演化类拓扑优化算法的优化准则对比研究 [J]. 土木与环境工程学报 (中英文), 2020, 42 (3): 73-79.
[20] 孟 宇, 肖小凤, 赵坤. 基于 UWB 的地下定位算法和拓扑优化 [J]. 工程科学学报, 2018, 40 (6): 743-753.
[21] 王红艳, 刘 璋. 基于稳定链路的 WSNs 拓扑优化算法设计及仿真研究 [J]. 现代电子技术, 2017 (19): 45-48.
[22] 胡云冰, 童世华. 一种便携式智能跌倒检测仪的设计与实现 [J]. 自动化仪表, 2015, 36 (2): 84-87.
[23] 高 婕, 高 洁. 基于单片机技术的智能气密性检测仪设计 [J]. 安阳师范学院学报, 2017 (5): 63-67.
[24] 黄应敏, 胡超强, 邹科敏, 等. 基于混合式拓扑的智能化电能质量检测系统 [J]. 电子设计工程, 2019, 27 (23): 68-72.