

An Automatic Line Load and Fault Detection Device Based on a Self-Balancing Bridge and STM32

Anguo Yang Yue Jiang Qinghua Sheng

School of Electronics and Information, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang, 310018, China

Abstract

This paper presents a device capable of automatically detecting line load conditions and short-circuit faults, featuring real-time load identification, fault alarming, and short-circuit location without human intervention. The system employs an STM32H743IIT6 microcontroller as the main controller, utilizing its built-in 14-bit SAR ADC together with an external 24-bit Δ - Σ ADC (ADS131A04) for high-precision signal acquisition. A relay module switches between load-detection and fault-detection modes. The load detection is based on a self-balancing bridge method to accurately measure the amplitude and phase of voltage and current, while short-circuit distance estimation uses a high-frequency phase-comparison technique. On the software side, low-pass sampling, Fast Fourier Transform (FFT), and All-Phase FFT (AP-FFT) algorithms are integrated to extract impedance characteristics, classify load types (resistive, inductive, capacitive, and their combinations), compute component parameters, and estimate fault distances. Experimental results demonstrate that the measurement error of component parameters is less than 3%, and the short-circuit localization error remains below 5% even under interference, confirming the system's high accuracy and robustness.

Keywords

line load and fault detection; FFT; AP-FFT; IDFT; self-balancing bridge

一种基于自平衡电桥与 STM32 的自动线路负载及故障检测装置

杨安国 姜越 盛庆华

杭州电子科技大学电子信息学院, 中国·浙江 杭州 310018

摘要

本文设计并实现了一种可自动检测线路负载状态与短路故障的装置, 具备实时负载识别、故障报警及短路点定位功能, 无需人工干预。系统以 STM32H743IIT6 为主控, 结合内置 14-bit SAR ADC 与外置 24-bit Δ - Σ ADC (ADS131A04) 进行高精度信号采集, 并通过继电器切换负载检测与故障检测模式。负载检测采用自平衡电桥法, 精确获取电压电流幅值与相位; 短路距离测量采用高频鉴相法。软件上融合低通采样、FFT 与全相位 FFT (AP-FFT) 算法, 实现阻抗特性提取、负载类型判别 (R/L/C 及其组合)、元件参数计算及短路距离估算。测试结果表明, 参数测量误差小于 3%, 短路定位误差在干扰下仍低于 5%, 系统具备良好的精度与鲁棒性。

关键词

线路负载及故障检测; FFT; AP-FFT; IDFT; 自平衡电桥

1 引言

在智能电网、工业自动化及轨道交通等领域, 输电线路的负载状态识别与短路故障快速定位对保障系统安全至关重要。传统 LCR 表仅支持离线测量, 而直流电阻法定位

易受温度与接触阻抗影响。本文提出一种融合自平衡电桥与高频鉴相测距的在线检测方案, 通过 AP-FFT 精确提取相位信息, 并结合频域直流分量抑制导线抖动噪声, 实现高精度、高鲁棒性的负载识别与故障定位。

2 系统检测原理与论证

2.1 LCR 及负载类型检测

传统串联采样法在连接处存在对地漏电流, 影响测量精度。为解决此问题, 本装置采用自平衡电桥法。该拓扑利用运放深度负反馈将负载与采样电阻连接点钳位至虚地, 有效消除了分流误差, 确保流经两者的电流严格一致。

在原理层面, 利用扫频信号获取负载网络的阻抗模值

【基金项目】2024年浙江省大学生新苗人才计划项目《面向集成电路装备精密运动控制系统的高精度电机驱动器》

(项目编号: 2024R407A006)。

【作者简介】杨安国 (2004-), 男, 中国浙江温州人, 本科, 从事仪器仪表、FPGA, 嵌入式系统等研究。

与相位。依据阻抗公式，通过的正负及变化趋势判别负载呈阻性、感性或容性（及其组合结构），并据此计算 R、L、C 具体参数，实现高精度识别。

2.2 短路故障定位

相比恒流源测距法存在的电流波动与温漂干扰问题，本装置采用高频鉴相法。基于传输线理论，高频激励下导线视为分布参数网络（如图 1 所示），其等效电感会引起信号相移，且相移大小与导线长度成正比。

系统选用 AD9959 产生高频正弦激励，利用 AD8302 鉴相器检测信号经过导线前后的相位差。通过建立相位差与线长的映射关系，克服了集总参数模型在定位上的局限性，从而实现高精度的短路距离测量。

3 电路与程序设计

3.1 系统框图

系统硬件框图如图 2 所示，装置以 STM32H7 为核心控制器，AD9959 产生正弦激励信号，电源模块由 SX1308 与 TPS5430 级联输出 ±5V。系统利用继电器灵活切换检测回路：负载检测模式下，信号经自平衡电桥与 INA821 仪

表放大器调理后，由 MCU 片上 ADC 采集；故障检测模式下，信号经 AD8302 鉴相转换为直流电压，通过外置高精度 ADC ADS131A04 获取数据。最终处理结果通过串口屏实时显示。

3.2 激励信号发生电路设计

激励信号源选用四通道 DDS 芯片 AD9959，DDS 与 STM32 通过 SPI 协议通信，可以分别调整输出信号的频率、幅度和相位，频率步进 1Hz，输出串联带通滤波器以减小 DDS 高频输出时波形失真。

3.3 信号检测及处理电路设计

3.3.1 信号调理与采集

采用高带宽（4.7MHz）仪表放大器 INA821 差分采集负载与采样电阻（299Ω）两端的电压信号。外部 ADC 选用 24 位 ADS131A04，利用其多通道同步采样特性，消除通道间延时对相位测量的影响。

3.3.2 电源与切换

负电源由 TPS5430 构建，产生稳定 -5V 电压。系统利用继电器在负载检测与故障检测回路间灵活切换：负载模式下接入自平衡电桥，故障模式下接入鉴相电路。

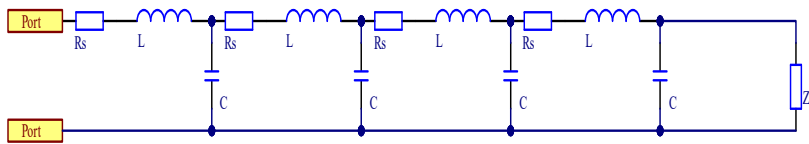


图 1 高频同轴电缆等效模型

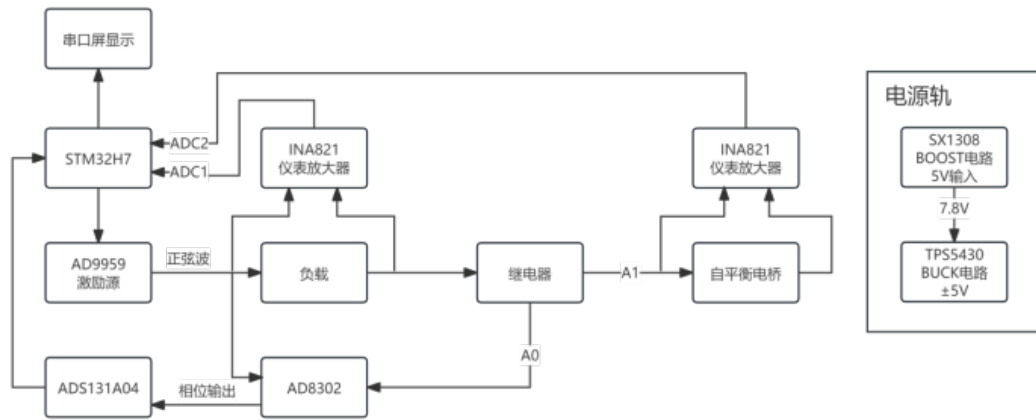


图 2 硬件系统框图

3.4 信号处理程序设计

3.4.1 总框图

软件总程序流程图如图 3 所示。系统开始先对外设以及计算变量初始化，然后利用继电器切换到负载类型检测电路，计算负载的阻抗与相位，判断负载网络是否短路。如果负载未开路或短路，则进一步扫频获得幅频、相频响应，判断网络类型和 L、R、C 参数；如果负载开路或短路，则利用继电器切换到故障检测电路，实时测量短路线距离。

3.4.2 信号处理程序设计

信号处理程序部分框图如图 4 所示，系统上电默认进入负载检测模式，控制 AD9959 输出 100Hz-300KHz 扫频信号。MCU 利用双 ADC 同步采集并经全相位 FFT（AP-FFT）算法提取幅响应，优选频点计算阻抗。若判定为开路或短路，自动切换至故障检测回路，输出 10MHz 高频激励，经 ADS131A04 采集 AD8302 输出的鉴相电压后解算短路距离。

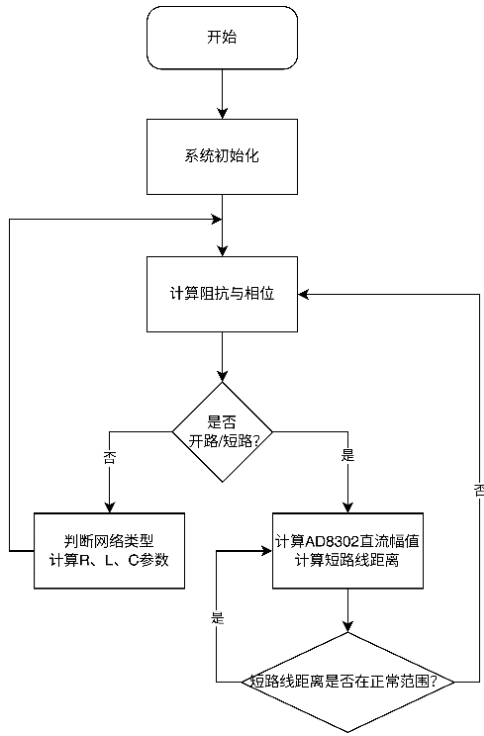


图 3 系统总框图

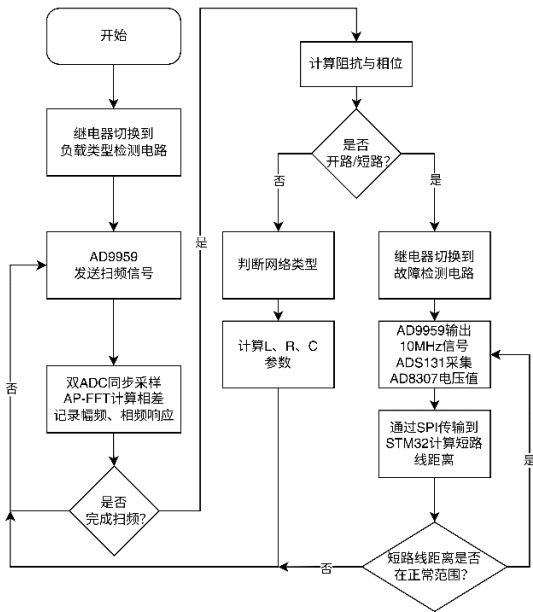


图 4 信号处理部分框图

4 测试方案与测试结果

4.1 系统测试方案

4.1.1 测试仪器

测试仪器型号如表 1 所示。

表 1 测试仪器列表

序号	仪器类别	仪器型号	数量	性能参数
1	信号源	SSG3032X	1	3.2GHZ
2	示波器	SDS2352X-E	1	350MHz
3	学生电源	MPS-3005L-3	1	30V、3A

4.1.2 测试方法

第一，进行线路负载与故障检测测试。

(1) 模拟负载开路与短路故障，验证系统报警功能是否正常。

(2) 给定电阻、电容和电感元件，进行测量，记录测量值并计算相对误差，确认测量精度是否在要求范围内。

(3) 检测系统能否识别出任意 2-3 个元件串联或并联组成的负载网络结构。

第二，进行系统抗干扰测试。

(1) 设置两根导线上的短路故障点使其与 A 点或 B 点距离相等，测量故障点与 A 点（或 B 点）的距离并验证误差。（如图 5 所示）

(2) 加入另一信号发生器产生的扫频信号，分别只接入导线 A 点和同时接入 A 点和 B 点处，再次测量故障点距离，验证系统抗干扰能力，确保在干扰情况下测量的准确性与稳定性。

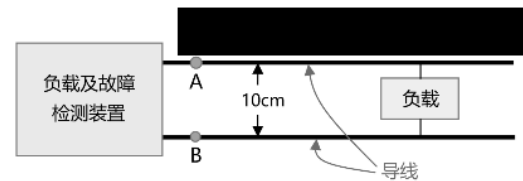


图 5 测试示意图

4.2 测试结果与分析

4.2.1 负载开路和短路异常的测试结果

负载开路和短路异常的测试，测试结果如表 2 所示。

表 2 异常情况测试

测试情况	测量情况
开路	开路
短路	短路

4.2.2 L、C、R 负载类型判断以及参数测量测试结果

负载测量分别采用 3 种不同参数的 L、C、R，结果如表 3 所示。

4.2.3 负载网络结构测量测试结果

给定由电阻、电容、电感串并联形成的负载网络，检测网络结构，结果如表 4 所示。

表 3 负载测试数据

实际器件	325.7uH	219.8uH	439.8uH	979.3Ω	1.970kΩ	268.1Ω	1.991uF	1.034uF	218.4nF
显示类型	电容	电容	电容	电阻	电阻	电阻	电感	电感	电感
负载参数	319.3uH	220.2uH	437.0uH	962.1Ω	1.952kΩ	263.0Ω	1.947uF	1.012uF	213.051nF
相对误差	1.962%	0.180%	0.633%	1.756%	0.914%	1.902%	2.210%	2.128%	2.449%

表 4 负载网络测试数据

实际负载网络	理论情况	测量情况	测量结果
506.2nF 981.8Ω	R C	R C	正确
957.2uH + 987.9Ω + 221.4nF	R + L + C	R + L + C	正确
218.4nF + 212.3uH	C + L	C + L	正确
979.4Ω + 1.034uF	C + R	C + R	正确
452.4uH + 1.970kΩ	L + R	L + R	正确
228.9n 439.8uH	C L	C L	正确
268.1Ω 332.1uH	L R	L R	正确

4.2.4 系统抗干扰测试结果

分别在不加噪声、仅在 A 点接入噪声 1、在 A 点和 B 点分别接入噪声 1 和 2 条件下，测量短路故障点距离，结果如表 5。

表 5 不同条件下短路故障点距离测试数据

实际值 /cm	条件	测量值 /cm	长度差值 /cm	相对误差
21	无噪声	20.028	0.972	4.629%
35	无噪声	34.065	0.935	2.671%
47	无噪声	46.994	0.006	0.013%
27	噪声 1	26.428	0.572	2.119%
37	噪声 1	36.420	0.580	1.568%
43	噪声 1	42.589	0.411	0.956%
40	噪声 1+2	39.370	0.630	1.575%
49	噪声 1+2	49.113	0.113	0.231%

4.2.5 结果分析

对上述测量数据进行分析计算可知，线路负载类型判断准确，L、C、R 参数测量误差小于 3%，在不同类型的噪声干扰下，短路故障点距离测量误差小于 5%，展现出较强的鲁棒性，充分满足设计要求。

5 总结

本文设计并实现了一种基于自平衡电桥与 STM32 的自动线路负载及故障检测装置。系统通过自平衡电桥消除漏电流干扰，结合 AP-FFT 算法精确提取电压电流相位信息，实现 R/L/C 负载类型判别与参数测量；短路故障下切换至高频鉴相模式，利用 AD8302 测量相移以估算故障距离。测试结果表明，元件参数测量误差小于 3%，短路定位误差在干扰环境下仍低于 5%，具备高精度、强鲁棒性与全自动运行能力，可广泛应用于工业在线监测与智能运维场景。

参考文献

- [1] 吴润强,项璟晨,郝鸣,等.基于FPGA的LCR测量仪的设计与实现[J].大学物理实验,2023,36(04):62-68.DOI:10.14139/j.cnki.cn22-1228.2023.04.013.
- [2] 李娟,马利祥.LCR自动测量系统设计[J].黑龙江工程学院学报,2022,36(01):25-30.DOI:10.19352/j.cnki.issn1671-4679.2022.01.005.
- [3] 扈蓓蓓,吴康,金海彬,等.基于自动平衡电桥的LCR阻抗测量仪设计[J].计量学报,2019,40(S1):111-115.
- [4] 宋永,杨阔.LCR测量仪的研究与设计[J].仪表技术与传感器,2019,(05):43-45+72.吴永乐.基于传输线理论的广义史密斯圆图、扩展型阻抗匹配器及多性能功率分配器研究[D].北京:北京邮电大学,2011.