doi:10.6043/j.issn.0438-0479.201705041

**可程控式继电器电气参数在线检测系统的开发**

洪永强，李其干，陈 源，薛文东\*，杜梓贤

（厦门大学航空航天学院，福建 厦门 361005）

**摘要：**随着“工业4.0”的发展，制造业需要生产过程更加网络化和智能化。针对目前继电器电气参数检测过程不能自适应不同型号继电器，网络化不足等缺点，设计了一种基于STM32单片机的电磁继电器电气参数在线检测仪。该仪器可以智能地调节励磁电流的大小来准确测量线圈电阻，而且也能测出触点接触电阻、吸合/释放电压以及吸合/释放时间等参数。该仪器使用基于LwIP（Light Weight IP）的Modbus通讯协议，通过有线或者无线的方式实现了数据的网络化在线传输，而用户可以通过本地或者以太网实现仪器参数的线下、线上设置。经过多次的随机测量实验，数据的变异系数和相对误差均小于5%，表明该仪器的稳定性好，精度高，达到了预期的设计要求。

**关键词：**STM32；继电器；参数检测；网络化；智能化

**中图分类号：**TM571 **文献标志码：**A

电磁继电器是一种核心的电气控制开关元件，通常是以小电流、小电压去控制大电流、大电压的通断，被广泛的应用于家电、汽车、电力、工控、航空航天等领域。近些年来，电磁继电器电气参数检测技术虽然已经得到了很大的发展，但是这些设备大多还是以传统的串行通讯方式与上位机交换数据[1-3]，与计算机或者服务器的接口较为繁琐、兼容性差、布线复杂、难以组网，不利于实现数据的直接上传和多台设备同时在线监测控制。而在文献[4-5]中，检测线圈电阻通入的励磁电流需要人工提前设定大小，无法自适应的根据线圈阻值大小选择合适的电流，限制了生产过程中工业自动化的程度。随着“工业4.0”和“中国制造2025”等新兴制造理念的提出，检测设备需要面向更加网络化和智能化的方向发展。

为了解决上述问题，设计出一种基于STM32F407的可程控式电磁继电器电气参数在线检测仪，该仪器可以智能的调节励磁电流的大小来准确测量线圈电阻，而且也能测出接触电阻、吸合/释放电压以及吸合/释放时间等参数。同时，本仪器通过有线或者无线的方式实现了数据的网络化在线传输，而用户可以通过本地或者以太网实现仪器参数的线上、线下设置，最后通过实验数据验证了参数检测仪的性能。

**1系统总体设计**

**1.1系统的主要技术指标**

继电器电气参数的准确测量，一方面是衡量继电器质量合格与否的重要标准，另一方面这些参数可以间接反映出继电器生产线上某些环节的生产状况，对生产设备的维护和产品质量预测具有重要的参考价值。目前市面上的继电器参数检测仪为了改变不同的测量范围，可能需要更换相应的硬件模块。为了使参数检测仪满足常规种类继电器的测量范围，在不改变硬件条件的基础上，保证测量的精度，提出了如下的技术指标：（1）线圈的额定电压范围：0~80 V；（2）吸合/释放时间测量精度为0.01 ms；（3）线圈电阻范围：10~5000 Ω；（4）接触电阻范围：5~50 mΩ；（5）仪器的精密度（变异系数）：≤5%；（6）仪器的准确度（相对误差）：≤5%。

**1.2系统的总体硬件结构**

如图1所示，电磁继电器电气参数检测系统包括继电器检测部分以及单片机主控部分。继电器检测部分包含：线圈电阻检测模块、触点电阻检测模块、吸合/释放电压检测模块和吸合/释放时间检测模块。单片机主控部分包含：JTAG接口、SRAM模块、以太网接口模块、温度传感器模块以及按键触摸屏模块。



图1 系统总体框架图

Fig. 1 General Structure of System

根据国标GB/T7261-2008，线圈电阻和触点电阻都利用欧姆定律来测量。吸合/释放电压的测量采取电压斜坡上升、下降，捕获线圈电流的尖峰处对应的电压的方法。吸合/释放时间的测量则是通过单片机的外部中断触发定时器计时。电阻的阻值会受到温度的影响，系统需要采集环境的温度，对测量的线圈电阻和接触电阻进行温度补偿。STM32F407本身含有以太网模块，而且该模块具有专门的DMA（直接内存存取）控制器和MAC 802.3（媒体接入控制器）控制器，支持MII （介质独立接口）和RMII（简化介质独立接口）[6]，这使得以太网接口部分的硬件电路大大简化。测量数据还可以选择通过无线模块发送，以减轻布线负担。为了方便电磁继电器参数检测仪的参数设定，管理员可以使用上位机利用以太网在线上修改参数，或者操作人员通过下位机的按键触摸屏模块在线下进行修改。修改好的参数会被写入STM32的flash，避免每次断电后都需要重新设置参数。

**2系统电路设计**

**2.1接触电阻测量原理**

系统测量接触电阻时使用了“四端法”的方式。主回路通过控制晶体管的导通向触点通入100 mA的短时直流电流，测量回路取出触点两端的电压经过滤波和放大后接入ADC处理，然后利用欧姆定律计算出触点电阻。为了使结果更加准确，需要将测量触点电压所用的导线提前用电桥测出，用于标定触点电阻的阻值。

**2.2线圈电阻测量电路**

目前，线圈电阻检测方式需要根据具体待测继电器的型号的不同线圈电阻范围，人工地预先设定好励磁电流的大小，导致参数的自动测量难以实现，效率低下。本系统中继电器线圈电阻测量可以实现不同型号继电器线圈电阻的自动化测量，测量系统可满足0~5000Ω范围内的继电器电阻测量。优势在于系统对于不同型号的继电器自动设定励磁电流，不需要人工调节，以达到量程自适应功能。测量方法将在本小节后面论述中给出，具体检测流程在后文中的图6给出。

基本原理是基于欧姆定律：首先给待测继电器线圈通入恒定的励磁电流，利用STM32的ADC读取线圈两端的电压，根据公式*R*=*U*/*I*计算出阻值。不同电压等级的继电器，其线圈阻值是不同的，表1展示了欧姆龙G5V-1系列继电器的线圈电阻参数。不仅如此，同一电压等级，不同厂家生产的继电器线圈电阻也有较大的差异。考虑到电阻的阻值容易受到温度的影响，应该控制通入线圈的励磁电流为额定电流的10%以减小线圈的发热。

表1 欧姆龙G5V-1系列继电器的线圈电阻参数

Tab. 1 OMRON G5V-1 Series Relay Coil Resistance Parameters

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 标称电压(VDC) | 标称电流(mA) | 线圈电阻(Ω) |
| 3 | 50 | 60 |
| 5 | 30 | 167 |
| 6 | 25 | 240 |
| 9 | 16.70 | 540 |
| 12 | 12.50 | 960 |
| 24 | 6.25 | 3840 |

针对以上特点，本系统采用了AD5422程控电流源芯片搭配AD8231程控运算放大器，检测出待测继电器额定电压下的线圈额定电流，为减少线圈的发热，取该电流的10%作为励磁电流的大小，单片机通过数据总线设置AD5422和AD8231相应的寄存器。实现原理如图2所示。图中半圆形弹性簧片为夹持继电器线圈引脚的机构，方便待测继电器的快速更换。系统也采用“四端法”将直流电流源与模拟信号的采集分隔开来，避免导线电阻所带来的误差。由于使用的是芯片内部的ADC，所以同时还需要注意采集的电压应满足0~3.3 V。



图2 线圈电阻测量原理示意图

Fig. 2 Coil Resistance Measurement Principle Diagram

AD5422是具有16位精度，0~20 mA输出的数字式可编程电流源芯片。系统可根据实际情况设置多个档位，例如：0~50 Ω范围通5 mA，50~500 Ω范围通2 mA，500~1000 Ω范围通1 mA，1000~5000 Ω范围通0.1 mA等。对于已知类型的继电器，可人工选择合适的电流档位，以提高检测效率；对于未知类型的继电器，系统可先给线圈通入额定电压，通过采样电阻上的电压计算出线圈的额定电流的大小，重新设置电流源的输出为额定电流的10%，对线圈电阻实现精确测量，进而实现自适应根据线圈阻值大小选择合适的励磁电流。在线圈电阻“自热”影响最小的情况下保证通入电流的最大化，归根结底是为了保证原始信号的最大化，从而降低噪声对信号的影响，提高信噪比。AD8231是一款零漂移、数字可编程式仪表放大器，系统通过该放大器将信号放大到适合ADC正常工作情况下能读取的电压，其目的是为了降低ADC采集过程中的噪声波动对信号的影响。

**2.3线圈电压驱动电路**

为了能驱动不同电压等级的继电器以及能够准确的测量出吸合和释放电压，系统需要一个能从0~80 V可以任意变化的可调电压源，而串联型稳压电路就可以满足这样的需求[7]。相比于开关型稳压电路，串联型稳压电路电压调节速度快，输出电压稳定。



图3 线圈电压驱动电路

Fig. 3 Coil Voltage Drive Circuit

图3中，STM32的DAC输出电压*Udac*与反馈电压的电压差值送入有运放搭建的PI调节器，进而控制由三极管T1和功率管T2组成的达林顿结构，使得将多变比变压器整流出来的直流电压线性可调。电路中的多变比变压器具有15V，48V和110V三个电压级别的抽头，根据待测继电器的额定电压的大小由继电器网络切换到相应电压等级的中心抽头。

值得一提的是，为了实现宽范围的电压可调，需要合理的选取*R*4~*R*9的阻值，让T1和T2始终工作在线性放大区。最大反馈电压不应超过DAC的最大输出电压：

*R*8， *R*9的取值在满足上述的不等式的同时，也不能超过自身电阻的功率限制，否则反馈电压会因为电阻发热的问题产生波动。同时为了保证输出电压的精度，最好是选取高精度的电阻。

设整流出来的电压，负载电流为*、*分别为T1、T2的集电极电流，分别为T1、T2的放大倍数，T1的射极电流不应超过运放OP3的最大输出电流，若给运放留20%的余量，则有：

设运放OP3输出电压最大值为，那么：

对于的选取，应保证T1始终工作在放大区，即：

由上面的不等式关系可知，R4的选取依赖于和，而的大小取决于和，同时和构成了负载电路的一部分，会影响负载电流的大小。所以需要按照，，和的顺序进行电阻的取值。

**2.4吸合和释放电压检测电路**

当线圈两端的电压慢慢升高时，线圈的励磁电流也会逐渐变大，吸引力大于动簧片的弹力时，衔铁开始运动。为了让触点可靠地接触，触点接触后会继续运动，直至超行程距离。当动簧片与静簧片接触以后，衔铁需要同时克服动簧片与静簧片的弹力，此时电流会微弱的下降，此时对应的线圈电压为一次吸合电压。当吸力大于两个簧片的弹力的合力时，衔铁会再次运动，直到到达限位装置，此时电流又会有一个微弱下降的过程，此时对应的线圈电压为二次吸合电压。最后，线圈的电流将会饱和。检测吸合/释放电压的方法有：二分法[8]，步进中值算法和差异比较算法。前两个算法无法测出二次吸合的电压，最后一种算法检测的时间较长。本系统采取步进增加或减少线圈电压，将线圈电流通过调理得到脉冲触发信号，脉冲触发信号直接触发单片机中断，ADC读取对应时刻的电压值，即为吸合/释放电压，解决了无法检测二次吸合和检测过程缓慢的问题。

图4给出了电流波形处理过后的效果，其中U1， U2 ，U3和UR在图5检测电路中的相应位置已经标出。U1即为图5中采样电阻R1上的电压经过反向放大得到的波形，U2为U1微分后的波形，U3为U2和阈值电压UR进行电压比较后的波形。图4（a）继电器的释放过程基本上是吸合的逆过程。随着电压的下降，励磁电流也在随之减少，当吸力小于弹力后，衔铁开始运动，反电动势使线圈上的电流微弱的上升，之后电流会慢慢下降到零[9]。图4（b）中的U1波形描述了这样的过程。

 

1. （b）

图4  继电器吸合和释放时的线圈电流处理波形

Fig. 4 The Coil Current Process Waveform When the Relay is Pulled and Released

继电器吸合和释放时电流的变化是极其短暂的，对于超行程距离比较小的继电器而言，一次吸合和二次吸合是很难分开的，需要通过外部调理电路，将线圈电流的波形进行放大、微分、滤波和比较[10]，从而给单片机提供触发信号，让ADC去测量对应时刻的线圈电压值。图5给出了本系统所搭建的硬件电路图。



图5 吸合和释放电压检测电路

Fig. 5 Pull-in and Release Voltage Detection Circuit

**3系统软件设计**

**3.1下位机程序设计**

本系统中所采用的主控芯片为STM32F407，该芯片是以Cortex-M4为内核的32位高性能微控制器。STM32支持C语言开发，下位机程序采用Keil集成开发环境来编写，使用J-LINK作为调试工具[11]。下位机程序在uC/OS III操作系统的基础上开发，以此来降低多个任务间的耦合度。本系统中下位机和上位机之间采用了基于LwIP的Modbus通讯协议，通过以太网以有线或者无线的方式将检测数据发送到服务器，以方便对采集到的数据做进一步的分析。相比于传统的串行通讯方式，以太网的通讯速度更快且更加稳定，无线的通讯方案也可极大的降低布线负担，能提高空间利用率。

检测线圈电阻的流程如图6所示，如果已知待测继电器的线圈电阻的大致范围，可提前选好相应的电流档位，以增加检测效率。



图6 线圈电阻检测流程

Fig. 6 Coil Resistance Detection Process

在检测线圈的吸合和释放电压时，应该步进的给线圈通增加或减少电压，当有下降沿中断产生时，执行相应的中断程序，图7给出了相应的检测程序。



图7 线圈电压检测流程

Fig. 7 Coil Voltage Detection Process

**3.2上位机程序设计**

上位机软件使用C++语言编写，使用Qt跨平台[C++](http://baike.baidu.com/view/824.htm)[图形用户界面](http://baike.baidu.com/view/185360.htm)应用程序框架来开发，利用Oracle数据库接口存储数据。上位机主要分为网络连接、数据库操作、参数发送、参数接收和趋势图5个功能块。网络连接显示网络基本信息，如IP地址和连接状态等。数据库操作部分提供了对以往数据的查询，增删的服务等。参数发送部分主要是对继电器时测试的参数预设置，如继电器电压的上下限，测量线圈电阻通入的电流大小等，可根据需求测试继电器的电气参数。参数接收部分实时刷新当前所测得的电气参数。趋势图部分可以对选择的数据添加趋势线，方便专业人员对数据进行分析。上位机界面如图8所示。



图8 上位机界面

Fig. 8 Host Computer UI

**4实验数据**

经测试，线圈电压驱动部分能够实现电压0~80 V范围内任意可调，图9给出了驱动电路在负载为电阻3.3 kΩ的条件下，电压阶跃上升的波形。第一段电压的设定值为24 V，第二段电压的设定值为50 V，从示波器实际的波形来看，输出电压能够与设定电压相吻合，误差较小。



图9 驱动电压阶跃上升波形

Fig. 9 Step Drive Voltage Waveform

同时，本系统对吸合和释放电压的检测电路确实能够稳定正常的工作。在对额定电压为12 V的继电器的测试中，能捕获到两个触发沿，图10为示波器测得的波形。其中，波形1为原始信号经放大、微分和滤波后的波形，波形2为同阈值电压UR比较后得到的波形。



图10 线圈电流的处理波形

Fig. 10 The Processing Waveform of Coil Current

表2和表3对电气参数检测仪的性能进行了验证，为了使测得的数据更具代表性，对不同样品随机测量了8次进行处理，在测试实验中所用的继电器类型为HF3FA/012-HSTF和G5V-2-DC5。其中，HF3FA/012-HSTF继电器的额定电压为12 V，实验中的励磁电流大小为3 mA，G5V-2-DC5继电器的额定电压为5 V，实验中的励磁电流大小为1 mA。由于不同参数的量纲并不一样，这里采用了变异系数来评价检测仪的精密度[12]。表中的变异系数均小于5%，可以反映出系统的各个测试项目的精密度都比较高，性能稳定，达到了预期的设计指标。在两次测量中，线圈电阻相比于其他电气参数的变异系数而言较小，说明智能的调节励磁电流的大小来准确测量线圈电阻方法的可行性。表2和表3中的相对误差是本系统测出的数据与参考值之间的相对误差，其中参考值是使用万用表，示波器和电桥等仪器测出来的数据，计算相对误差时，忽略了各仪器的自身误差。从表中可以看出，相对误差均小于5%，进一步说明了仪器的准确度也很好。

表2 HF3FA/012-HSTF继电器电气参数测试结果

Tab. 2 HF3FA/012-HSTF Relay Electrical Parameter Test Results

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 参数类型 | | 参考值 | 测试次数 | | | | | | | | 变异  系数/% | 相对  误差/% |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 线圈电阻/Ω | | 399.8 | 398.4 | 398.8 | 398.9 | 398.3 | 398.6 | 398.6 | 397.8 | 398.4 | 0.08 | 0.35 |
| 接触电阻/mΩ | 常开 | 11.81 | 11.35 | 11.42 | 11.50 | 11.34 | 11.44 | 11.40 | 11.40 | 11.54 | 0.60 | 3.30 |
| 常闭 | 11.27 | 10.94 | 10.91 | 10.83 | 10.81 | 10.84 | 10.90 | 10.83 | 10.76 | 0.55 | 3.73 |
| 吸合电压/V | | 8.21 | 8.21 | 8.20 | 8.18 | 8.19 | 8.18 | 8.20 | 8.21 | 8.18 | 0.16 | 0.24 |
| 释放电压/V | | 2.30 | 2.25 | 2.20 | 2.25 | 2.20 | 2.27 | 2.22 | 2.30 | 2.19 | 1.74 | 2.83 |
| 吸合时间/ms | | 3.08 | 2.89 | 2.98 | 2.87 | 2.92 | 3.07 | 3.11 | 3.17 | 3.05 | 3.63 | 2.35 |
| 释放时间/ms | | 2.59 | 2.69 | 2.68 | 2.66 | 2.67 | 2.69 | 2.67 | 2.66 | 2.68 | 0.45 | 3.28 |

表3 G5V-2-DC5继电器电气参数测试结果

Tab. 3 G5V-2-DC5 Relay Electrical Parameter Test Results

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 参数类型 | | 参考值 | 测试次数 | | | | | | | | 变异  系数/% | 相对  误差/% |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 线圈电阻/Ω | | 49.67 | 50.1 | 50.2 | 50.3 | 50.3 | 50.2 | 50.3 | 50.1 | 50.2 | 0.17 | 1.09 |
| 接触电阻/mΩ | 常开 | 41.30 | 41.67 | 41.72 | 41.76 | 41.74 | 41.76 | 41.76 | 41.82 | 41.62 | 0.15 | 1.04 |
| 常闭 | 45.95 | 46.31 | 46.36 | 46.33 | 46.31 | 46.31 | 46.29 | 46.35 | 46.27 | 0.06 | 0.81 |
| 吸合电压/V | | 2.26 | 2.25 | 2.23 | 2.24 | 2.20 | 2.24 | 2.21 | 2.21 | 2.23 | 0.80 | 1.33 |
| 释放电压/V | | 0.42 | 0.44 | 0.42 | 0.41 | 0.39 | 0.39 | 0.40 | 0.38 | 0.41 | 4.76 | 3.57 |
| 吸合时间/ms | | 2.52 | 2.44 | 2.45 | 2.45 | 2.45 | 2.45 | 2.45 | 2.45 | 2.46 | 0.22 | 2.78 |
| 释放时间/ms | | 2.65 | 2.60 | 2.60 | 2.60 | 2.58 | 2.69 | 2.59 | 2.59 | 2.60 | 0.29 | 2.08 |

**5结 论**

本文在目前现有的研究基础上，针对目前继电器参数检测存在的问题以及实际的生产需求，设计了一种基于STM32F407的可程控式电磁继电器电气参数在线检测仪。该仪器可以完整的测量出继电器电气参数，能够智能的调节励磁电流的大小来准确测量线圈电阻，使用了基于LwIP的Modbus通讯协议，实现了数据的网络化在线传输。最后通过实验表明，该仪器的稳定性好，精度高，达到了预期的设计要求。

**参考文献：**

[1] 杨备备, 张文超, 杨波,等. 基于ARM的电磁继电器参数检测仪[J]. 物联网技术, 2013(12): 16-18.

[2] 徐广瑞, 王宇野, 项巍. 基于TMS320F28335的继电器参数采集系统设计[J]. 电子科技, 2013, 26(8): 80-82.

[3] 王勇, 郝晓红. 基于STM32+FPGA的航空继电器时间参数测试系统[J]. 仪表技术与传感器, 2016(8): 56-59.

[4] 杨备备. 基于STM32的电磁继电器综合参数检测仪[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2013: 23-24.

[5] 冯晓. 基于ARM的智能继电器测试系统的设计与研究[D]. 上海: 东华大学, 2010: 26-28.

[6] 黄鸿国. 基于STM32的多通道液压伺服控制系统研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014: 11-13.

[7] 童诗白, 华成英. 模拟电子技术基础(第三版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 523-528.

[8] WANG S, REN W, FAN W. Simulation of spring system's operation process for electromagnetic relay[C]// Electrical Contacts, 2004. Proceedings of the, IEEE Holm Conference on Electrical Contacts and the, International Conference on Electrical Contacts. IEEE, 2004:453-458.

[9] 杜太行, 刘振海, 耿立辉,等. 电磁继电器二次吸合电压的研究与测量[J]. 电力系统保护与控制, 2002, 30(2): 51-53.

[10] 杜太行, 齐玲, 李雪,等. 基于单片机的电磁继电器参数检测系统的研究[J]. 电器与能效管理技术, 2009(17): 16-19.

[11] 孙玉胜, 马平, 邹玉炜. CPLD在多芯电缆测试仪中的应用[J]. 科技创新导报, 2008(6): 170-171.

[12] 高连华, 孙伟. 变异系数在可靠性中的应用[J]. 装甲兵工程学院学报, 2004, 18(4): 5-8.

**The Development of Online Programmable Electrical Parameter Detection System for Relay**

HONG Yongqiang, LI Qigan, CHEN yuan, Xue Wendong\*, Du Zixian

(School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** With the development of "industry 4.0", manufacturing needs to be more networking and intelligent. The current electrical parameter detecting process of relay can’t adapt to different types and is lack in networking. In order to solve these problems, this paper designs an online detector for electromagnetic parameters of electromagnetic relay based on STM32 MCU. The detector can not only intelligently adjust the excitation current size to measure the coil resistance accurately, but also can detect the contact resistance, the pull-in/release voltage, the pull-in/release time and so on. The detector uses the Modbus communication protocol based on the LwIP (Light Weight IP), which realizes the data transmission through wired or wireless way. Users can regulate the detector parameters offline or online by local or Ethernet. After repeated random measurement experiments, the variation coefficient and relative error of data is both less than 5%, which shows that the detector has a good performance at stability and precision, achieves the anticipated designed requirement.

**Key words:** STM32; relay; parameter detection; networking; intelligent