

基于逆向积分算法的隔离开关闭合速度测试与控制技术探究

熔断器式隔离开关闭合速度的测试是国家标准的要求，目前大多数试验站大多采用人工操作方式，借助一定的辅助操作机构进行远距离的闭合操作，接通试验时的开关闭合速度无法准确测出，影响了对产品性能的判断。利用检测、自动控制技术和LabVIEW软件平台，开发了熔断器式隔离开关接通试验的闭合操作速度测试及控制装置，通过对隔离开关闭合加速度信号的采集，采用逆向积分算法，准确测量了隔离开关的闭合速度；通过运动执行机构实现了标准对隔离开关在带载接通试验时合闸速度的控制要求。该装置符合标准要求，功能完善、界面友好，提高了检测准确度和操作安全性，为电器企业、检验及科研机构等开展熔断器式隔离开关性能分析提供良好的测试分析平台，也为进一步开展低压电器的失效机理研究打下良好基础。

苏金州^{1,2} 许志红¹/1.福州大学电气工程与自动化学院 2.福建省产品质量检验研究院

0 引言

熔断器式隔离开关的发展与其相应测试手段的现代化是分不开的。通过试验可以检查、验证其性能是否符合国家标准的规定，检查产品在制造上是否存在影响运行的缺陷，从而找出改进设计、提高性能的途径。国家标准要求，额定短路接通能力超过10 kA的熔断器式隔离开关在接通试验闭合操作过程中，对其闭合速度进行测试。目前对速度的测量研究在离合器、开关阀、电动机及钻机上开展比较好，文献[1]基于微分几何方法研究了离合器接合过程的速度跟踪滑模控制；文献[2]对高速开关阀在液

压缸启动与到位过程中的速度控制进行了深入研究；文献[3]提出了一种改进的永磁同步主轴电动机速度估算方法；文献[4]研究分析了不同收放速度对海上钻机收放系统影响。而对隔离开关闭合速度的测控研究文献少，大多数试验站采用人工操作方式，借助一定的辅助操作机构进行远距离的闭合操作，这种做法存在较大的不稳定性，而且接通试验时的电流较大，容易危及操作者的人身安全。因此，本文对熔断器式隔离开关进行接通试验时的闭合操作及其闭合速度的测量和控制问题开展研究，提出合理的解决方案并设计出可靠的试验测控装置，采用逆向积分算法解决了闭合速度的测量问题。

1 隔离开关闭合速度测控装置的设计

国家标准GB 14048.3—2008第8.3.6.2条规定的接通操作试验速度应按以下规定^[5]：隔离开关应在空载条件下人力操作15次，3个人各操作5次，并测量闭合瞬间的手操动器的速度，平均速度应删去最高值和最低值后确定；之后带载试验中应确保隔离开关完全闭合，且实际闭合速度应不超过平均速度。因此，本文研究的开关电器合闸速度测控装置，使系统同步采集三相触头的闭合电压信号和手操动器柄的加速度信号数据，通过应用软件对采集到的闭合信号和加速度信号波形进行数学算法分析，得到触头闭合瞬间手操动器的速度（分



苏金州/博士研究生

关键词/Keywords

隔离开关·
逆向积分·
闭合速度·
测控装置·

国家自然科学基金项目（51277031），福建省科技厅重点项目（2014H0002），福建省科技厅产学研合作项目（2016H6008）。

析时以三相中最后一相的闭合时间为准)。该装置能够测试人工闭合开关时候的最终速度,然后通过运动控制卡控制伺服电动机驱动执行机构,使机械手臂以设定的闭合速度带载闭合隔离开关。测试过程包括两个基本流程:①开关不带载时,手工闭合、速度测量阶段。在本操作阶段,人工重复闭合开关15次,系统会采集三相触头闭合的时间,以及进行加速度的测量(通过对加速度积分计算出速度);系统会得到并显示15次闭合的速度,求出平均闭合速度。②开关带载下,运动机构驱动开关电器闭合测试。测控装置根据之前测量到的平均速度,进行隔离开关带载合闸速度的设定,完成通电合闸试验。系统总体硬件框架图如图1所示。

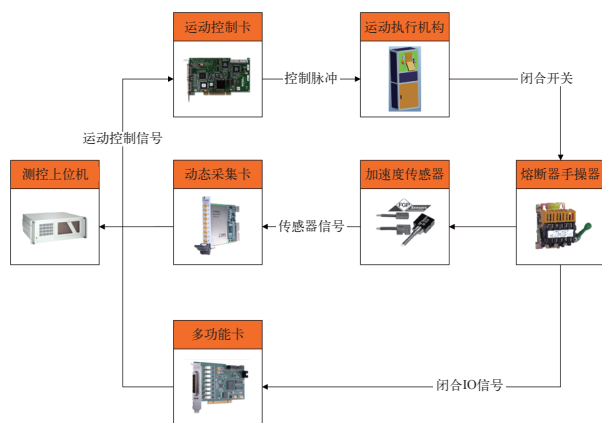


图1 系统硬件框图

可见,测控系统主要由以下几部分组成:工控机、多功能数据采集卡、加速度传感器、动态信号采集卡、运动控制卡、接线盒与屏蔽线缆、运动执行机构及测控机台等。测控装置的上位机软件系统,能实现测试数据的采集、分析、保存、回放以及报表生成等功能。

1.1 测试装置的硬件设计

1.1.1 加速度信号转换与采集设计

隔离开关闭合速度的测量准确与否直接关系到后面的研究,而且也是国家标准要求最终的测试目标,对其动态过程信号波形的采集处理至关重要。开关速度的测量方法有两种:①选择A、B两个测量点,测量物体通过两个测量点的时间。

②在开关的旋转轴上安装旋转编码器,来测试开关合闸的角速度,并通过开关的外形尺寸计算出闭合时刻的线速度。方案一和方案二都是不错的方案,但是由于安装和适应性问题,给实际的操作带来难题,所以考虑适应性更强的方案,即通过加速度传感器间接测量速度。本文选用一种微型压电式加速度传感器,其参考灵敏度可达到0.7%,测量频率范围在1~2 500 Hz。该加速度传感器能够很准确地测量被测对象的加速度,通过对加速度数据作积分运算就能够得到速度。该传感器贴装在隔离开关操作手柄水平位置,如图2所示。



图2 加速度传感器及其贴装位置

加速度传感器工作时还需要外部提供激励源^[6],本文选用的动态信号卡可以为加速度传感器的工作提供恒流源激励,又能采集加速度传感器输出的动态信号。该采集卡具有如下特性:①能够为加速度传感器提供IEPE恒流激励源;②具有4个输入通道;③每通道的最高采样率高达51.2 kHz;④具备交直流耦合两种耦合模式;⑤分辨率24 bit;⑥动态范围为102 dB;⑦内置抗混叠滤波器。

1.1.2 运动控制机构的设计

运动控制机构是为了模拟人为闭合和断开隔离开关的动态过程,其动作过程应具有柔性控制能力,能带动隔离开关操作手柄根据设定的运动速度进行一系列通断动作。本文将运动控制机构设计成一个机械柜,产品的夹具以及驱动结构安装在一个机柜中,内部包括一个安装样品架、伺

服电动机和电动机驱动器等。安装架能够灵活调整以适应不同电流等级产品的安装, 夹具结构方便脱离。机械柜中安装了伺服电动机来提供开关闭合的驱动力, 闭合的速度能够自由调节, 其电动机运行的电气原理图如图3所示。

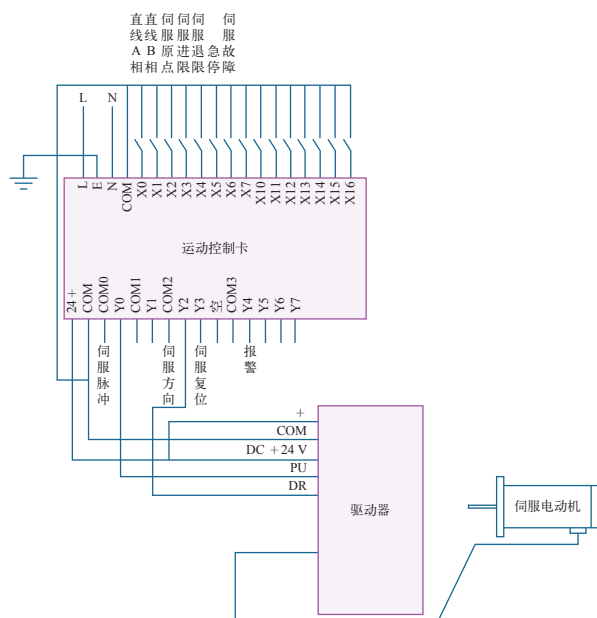


图3 电动机驱动的电气原理图

运动控制卡输出对应的PWM脉冲信号给伺服电动机, 伺服电动机驱动机构实现开关的闭合操作^[7]。在测控装置设计时采取信号屏蔽措施, 以防止测控系统受到电磁环境干扰。运动执行机构以及测控台之间使用屏蔽电缆进行远程连接, 实现人的操作环境和试验环境的隔离。运动机构及测控机台布置如图4所示。

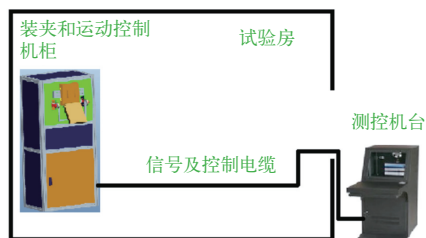


图4 运动机构及测控台布置图

1.2 测试装置的软件设计

LabVIEW是一个具有革命性的图形化开发环境，将广泛的数据采集、分析与显示、数据的保存、回放以及报表生成功能集中在了同一个环

境中,摒弃了传统开发工具的复杂性,让用户可以在自己的平台上无缝地集成一套完整的应用方案,为用户提供强大功能的同时还保证了系统灵活性,是目前测控领域广泛使用的开发软件^[8]。因此,本文研究的上位机软件系统是基于LabVIEW图形化编程语言开发的。

1.2.1 软件功能及架构设计

开发的上位机软件系统应能够实现对系统硬件的操作和控制,对加速度信号进行采集、分析、显示和存储以及报表生成等功能。

软件采用模块化设计的思想, 各功能模块之间的数据存储和传递遵循ATML标准进行。在设计中采用由上至下的设计方法, 根据系统的总体需求, 将系统划分为若干功能模块, 主要有运动控制模块、信号采集模块、分析算法模块、参数配置模块(包括多功能采集卡配置、动态数据采集卡配置、开关闭合速度配置、数据保存配置和报表生成配置)以及测试数据管理模块。各个模块又进行进一步细化, 细化后的总体设计方案如图5所示。

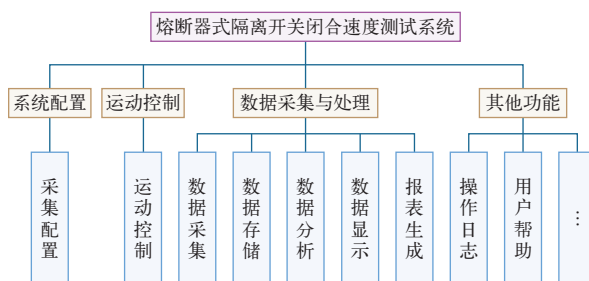


图5 软件功能架构图

对其中几个关键模块功能说明如下。

1) 运动控制模块。该模块能够控制运动机构, 以设定的速度合闸熔断器式隔离开关。

2) 数据采集模块。该模块能够实时采集开关三相触头闭合的电压信号和加速度传感器信号。

3) 数据分析模块。该模块能够配置速度计算中的关键参数。

4) 系统配置模块。该模块能够配置多功能数据采集卡、动态信号采集卡以及运动机构的运行速度等相关的参数。

5) 测试数据分析模块。能够对测试保存的数

据进行分析和处理,具有自动生成报表功能。

1.2.2 软件容错性设计

软件系统必须具备良好的容错性,避免系统出现不可恢复的错误,造成数据采集的错误,以致整个测试结果出现错误。当系统出现故障时,应按照相应的故障处理原则进行处理,给出故障报告并提示用户解决,尝试隔离此故障,避免整个测试系统崩溃。

故障处理原则:①当软件出现故障时提示相应的故障原因;②当软件出错后能够再启动;③软件具有备份数据的能力,当软件不能运行而必须重新安装时,不丢失以前的数据。

故障处理方法:①当软件运行出现故障时,使用信息框显示出现故障的环节和原因,并对故障立即进行处理。②当软件运行出错时,根据错误的性质、程度以及所导致的对运行过程的影响,分别设置不同的程序入点,使软件能够再启动并正常工作。③在软件运行过程中,数据定节点进行备份保存,以保证数据不丢失;④同时,在每次运行完毕退出系统时,对新增加或改变的数据信息以及系统的状态信息进行备份保存。

系统容错性设计主要包括操作界面的容错性设计、硬件控制的容错性设计和上层应用软件的容错性设计。

1) 操作界面的容错性设计。要求操作界面的设计应能保证用户正确、可靠地使用系统,对用户输入不适当的请求应能给用户提出相应的提示,并阻止用户继续操作,以保证有关程序或数据的安全性。在作界面设计中,考虑界面的容错性是界面设计的一项基本原则。

2) 应用软件的容错性设计。应保证在应用软件出现故障时,在尽量小的范围内发现故障,并进行故障处理。同时应保证在应用软件出现错误时受影响的应该仅是该次试验的数据,不能影响已经存盘的其他已处理完毕的有效数据。

2 开关闭合速度的算法研究

速度一般通过运动距离曲线微分,或加速度

波形的积分来获取。本文采取对加速度波形进行积分的算法来获得隔离开关闭合过程运行速度曲线,再通过开关闭合时刻的最后一相合闸触头信号来定位闭合速度。

2.1 逆向积分算法分析

速度和加速度的关系式为^[9]

$$V = V_0 + \int_0^t a \quad (1)$$

一般的做法是,通过对加速度正向积分算法得到速度,即对从速度0到 $V_{\max}$ 的过程进行积分运算。开关闭合的过程是开关从0加速到 $V_{\max}$,再从 $V_{\max}$ 减小到0的过程。为了得到 $V_{\max}$,可以测量开关从开始运动到开关闭合过程中加速度的值,并通过如下计算公式算出

$$V_{\max} = \sum_{t_0}^{t_{\max}} a_i t_i \quad (2)$$

式中, t_0 为开关开始运动的时刻点; $t_{\max}$ 为开关闭合的时刻点; a_i 为单元时间的平均加速度; t_i 为单元时间片段。

可见,最大速度等于时间细分片段中加速度的累加。通过大量的测量,可知加速度信号波形如图6所示。

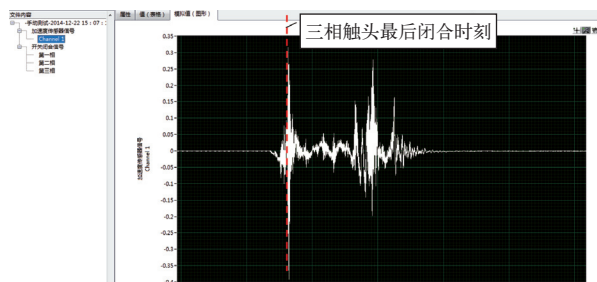


图6 测量到的加速度信号

由图6可见,以隔离开关三相触头闭合时刻为基准,左边波形信号量很少,右边的波形信号量占了很大部分。因此,如果通过正向积分算法从零积分到闭合时刻所得到的速度值不够准确,经过大量的测量比较发现,所得到的闭合速度值也不稳定。因此,本文提出采用逆向积分算法来实现隔离开关闭合时刻的速度值。

在开关的上盖和开关的底座发生接触之后,

碰撞过程加速度值出现了剧烈的变化, 开关的速度会在非常短的时间内从 $V_{\max}$ 变为 0, 但这个暂态过程也是隔离开关闭速度慢慢消耗的过程。把这个暂态过程的加速度波形信号当成一个数组, 通过对这个数组进行逆向积分, 便可得到开关在闭合之前最后阶段的速度, 即 $V_{\max}$ 。因此, 逆向积分, 即是对速度从 $V_{\max}$ 到 0 的过程进行积分, 可通过如下计算公式算出

$$V_{\max} = - \sum_{t_{\max}}^{T_i} a_i t_i \quad (3)$$

式中, $t_{\max}$ 为开关闭合的时刻点; T_i 为开关从运动状态重新回到静止状态的时刻点; a_i 为单元时间的平均加速度; t_i 为单元时间片段。

2.2 逆向积分算法的实现

要实现逆向积分算法,首先要对采集到的加速度波形信号进行数据的校准处理,然后依据开关最后一相闭合信号的时间点,截取出开关闭合瞬间的加速度传感器信号波形,并对这一段波形进行积分处理,才可得到开关闭合瞬间的速度数据。

1) 采集加速度波形信号。程序片段如图7所示, 程序中主要包含的操作: 打开设备、设置采样率和采样时钟、读取数据和关闭设备。

2) 加速度波形信号的校准处理。由于加速度传感器随着使用时间的增长以及环境噪声的影响,在系统被测对象没有运动的情况,会有偏移

量的输出。在系统静止的状态下进行传感器的校准就可以最大限度地消除这种偏移量的影响。校准的基本思路：采集系统在静止状态下的加速度传感器信号（采集5 s），计算出信号的平均值并保存在系统中，在系统开始正常测试时，将获取的测试值减去这个校准值。

3) 提取信号片段进行逆向积分。开关闭合过程系统会不断监控开关当前的开闭状态, 并能够准确捕捉开关最后一相闭合的时刻, 并把这个时刻测试得到的开关闭合速度作为最终闭合的速度。

4) 测试数据的保存与回放。测试的数据保存为TDMS的数据格式, 这种数据格式的优点是保存方便, 数据量小, 便于回放。数据保存与回放功能的软件编程如图8所示。

3 现场调试

试验要求按照国家标准GB 14048.3—2008第8.3.6.2条款进行。选择一台熔断器式隔离开关，型号规格：HR5—100，3P，AC 380 V，100 A，按正常安装在机械柜上。在机械柜操作界面上设置熔断器式隔离开关的闭合速度，点击“启动”按钮，等待隔离开关的闭合，当闭合后上位机测试台即可得到当次的闭合末速度，上位机上获得的速度与设定的运行速度一致。调试进行了15次

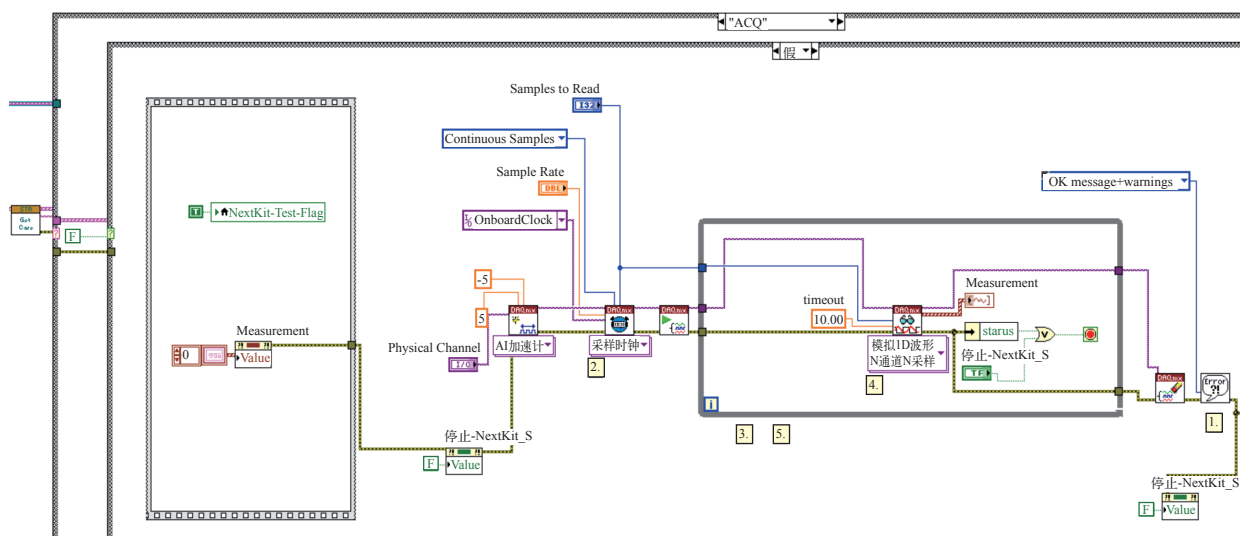


图7 加速度信号采集程序片段

软件平台,开发了熔断器式隔离开关接通试验的闭合操作速度测试及控制装置,通过对隔离开关闭合加速度信号的采集,采用逆向积分算法,准确测量了隔离开关的闭合速度;通过对运动执行机构的控制,实现了标准对隔离开关闭合速度的要求。该装置符合标准要求,功能完善、界面友好,提高了检测效率和操作安全性,提升了低压隔离开关产品的检测质量,具有实际意义,应用前景好。

参考文献

- [1] 赵韩,邱明明,黄康.基于微分几何的离合器接合过程速度跟踪滑模控制[J].中国机械工程,2015,26(17):2302-2307.
- [2] 高钦和,宋海洲,刘志浩,等.高速开关阀在液压缸起动与到位过程中的速度控制研究[J].中国机械工程,2013,24(1):47-51.
- [3] 黄科元,蒋智,黄守道,等.一种改进的永磁同步主轴电机速度估算方法[J].中国机械工程,2016,27(7):893-898.
- [4] 金永平,万步炎,刘德顺,等.不同收放速度对海上钻机收放系统影响分析[J].中国机械工程,2015,26(9):2537-2563.
- [5] GB 14048.3—2008 低压开关设备和控制设备 第3部分:开关、隔离器、隔离开关以及熔断器组合电器[S].北京:中国标准出版社,2008.
- [6] 陈艳香,石云波,智丹,等.一种高量程加速度传感器的性能测试与分析[J].仪表技术与传感器,2016(5):18-20.
- [7] 高永华.运动控制卡的机电控制系统实现研究[J].通信世界,2016(4):252.
- [8] 刘刚,王立香,等.LabVIEW 8.20中文版编程及应用[M].北京:电子工业出版社,2008.
- [9] 吴洁.逆向思维在求解积分问题中的应用[J].高等数学研究,2012,15(2):31-33.

(收稿日期:2017-07-19) EA

广告 | AD

全新改版

色彩丰富 凸显主题

2018《电气应用》以鲜明色彩和新颖版式呈现精彩内容,力求赏心悦目。

栏目设置 独具风格

坚持继承与开拓并举,以丰富内涵充实经典栏目,持续深化面对面、专家访谈、EA经理人等栏目,密切关注电气技术的发展和应

专家点评 精辟深刻

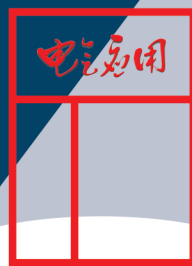
每期都将围绕一个热点话题,隆重推出一场专题讨论的盛宴,共邀知名专家、产品用户和生产厂家汇聚一堂,针对焦点问题作出评析。

行业案例 生动丰富

关注电力、建筑、石化和冶金等电气行业应用,以典型深刻的案例分析、方案设计构建技术互动的空间,促进应用经验交流。

国内邮发代号:82-341 国外发行代号:M1409

每期定价:15.00元 全年定价:360.00元



· 电气应用 盛情呈现 ·

2018