

分类号 TM835.4

学校代码 10495

U D C 621.3

密 级 公开

武汉纺织大学

硕士学位论文

带高压自动切断装置的电容式电压互感器误差 现场校验系统的研制

作者姓名：	黄胜英
学 号：	1215123002
指导教师：	夏定纯 教授
学科门类：	工学
专 业：	物理电子学
研究方向：	人工智能
完成日期：	二零一五年六月

Wuhan Textile University

M. E. Dissertation

**Capacitive Voltage Transformer Calibration System With
High Pressure Automatic Auto-shut-off Device**

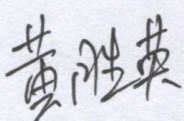
Candidate: **Huang Shengying**

Supervisor: **Prof. Xia Dingchun**

Time: **June 2015**

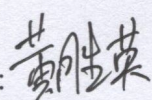
独创性声明

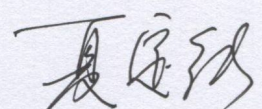
本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名： 签字日期：2015年6月3日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 武汉纺织大学 有关保留、使用学位论文的规定。特授权 武汉纺织大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。（保密的学位论文在解密后适用本授权说明）

学位论文作者签名：
签字日期：2015年6月3日

导师签名：
签字日期：2015年6月3日

摘 要

电力系统是一个应用电力设备来供应、传输和使用电能的网络。它大致可以被分为供电系统，输电系统和配电系统。随着电力系统的高速发展，电容式电压互感器已在电网运用广泛。按照国家规定的互感器检定规程的要求，所有正在使用的互感器都必须进行周期性的检定，以确保互感器的安全性与准确度。然而高压互感器不仅体积大、重量重，而且运行的电压等级高，需要拆卸至实验室才能进行检定，不但费时费力，还会影响电网的正常运行，因此绝大多数高压互感器都需在安装现场进行检定。

传统的电容式电压互感器误差现场校验采用测差原理进行检定，需要电源系统、标准电压互感器、负载箱、互感器误差校验仪等设备才能完成误差校验工作。由于这种测试方式其接线复杂、外围设备众多、设备笨重、难以搬运，现场安装设备时仍然存在费时费力以及安全隐患等问题，这为互感器误差现场检验工作增加了不小的阻力。

针对于现有的电容式电压互感器的测试方法和设备，本文提出了一种基于现有的电容式电压互感器低校高误差测试方法，通过高压自动切断实现电容式电压互感器的现场校验。该方法便于实现，现场操作安全可靠，有效的防止了由于操作的失误而导致事故，确保了人身安全及设备安全。

关键词：电力系统；电容式电压互感器；互感器校验；控制系统；高压自动切断

研究类型：应用研究

Abstract

An electric power system is a network of electrical components used to supply, transmit and use electric power. This power system is known as the grid and can be broadly divided into the generators that supply the power, the transmission system that carries the power from the generating centers to the load centers and the distribution system that feeds the power to nearby homes and industries. With the rapid development in power system, the high-voltage capacitive voltage transformer has been widely used in power grid. In accordance with requirements of the transformer verification regulations, capacitive voltage transformer must be periodically checked. But high-voltage transformer is not only large but operating high-voltage, it is not suitable for disassembling to lab for testing, so majority transformers are required to test at the scene of the installation.

Usually, Traditional method for testing capacitive voltage transformer is comparison principle. And it is necessary to use the power system, standard voltage transformer, load box, calibration instrument and so on many devices to complete checking. However, because of the complex wiring and multitudinous and heavy equipment, there is an obstacle to completing work conveniently, effectively and efficiently.

Based on the existed field calibration methods for capacitor voltage transformers, a new kind of capacitor voltage transformer field calibrators with auto-shutoff high-voltage installation has been put forward in this article, since its operation is safe and simple. With this apparatus, inspectors will finish the field calibration of capacitor voltage transformer only by few simple operations, at the same time, accidents caused by operational error will be effectively prevented and ensure the safety of operators and equipment.

Key words: Power system; Capacitor voltage transformer; Transformer field calibration; Control systems; Auto-shut-off high-voltage installation;

Thesis: application reseach

目 录

1 绪论.....	1
1.1 研究背景及目的.....	1
1.2 国内外研究现状.....	1
1.3 现阶段存在的问题.....	3
1.4 本章小结.....	3
2 系统原理分析.....	4
2.1 概述.....	4
2.2 基本原理分析.....	7
2.2.1 电容式电压互感器误差现场校验传统方法.....	7
2.2.2 电容式电压互感器误差现场校验低较高方法.....	10
2.2.3 高压自动切断装置基本原理.....	14
2.3 本章小结.....	15
3 互感器校验仪设计.....	16
3.1 概述.....	16
3.2 系统组成.....	16
3.2.1 环形电源变压器.....	16
3.2.2 标准电压互感器.....	17
3.2.3 升压器.....	17
3.2.4 电源模块.....	17
3.2.5 模拟信号处理模块.....	18
3.2.6 数字信号处理模块.....	19
3.2.7 数据校验模块.....	20
3.2.8 量程选择模块.....	21
3.2.9 功率放大模块.....	21
3.2.10 高压切断模块.....	22
3.2.11 ARM 控制器.....	22
3.3 设备控制流程.....	23
3.4 本章小结.....	24
4 上位机数据管理系统设计.....	25

4.1 概述.....	25
4.2 系统设计.....	25
4.2.1 界面设计.....	25
4.2.2 功能设计.....	26
4.2.3 数据库设计.....	29
4.3 详细设计.....	36
4.3.1 数据结构设计.....	36
4.3.2 数据处理方法设计.....	42
4.4 数据通讯接口设计.....	49
4.4.1 EIA-RS-232 标准.....	49
4.4.2 L-2303HX.....	49
4.4.3 通讯方式设计.....	50
4.5 本章小结.....	50
5 系统实现及试验结果分析.....	52
5.1 系统实现.....	52
5.2 现场测试.....	54
5.3 本章小结.....	60
6 总结.....	61
参考文献.....	62
附录.....	65
致谢.....	66

1 绪论

1.1 研究背景及目的

电力对于现代社会的重要作用已不容忽视，人类的生产生活已经离不开电力系统，甚至已产生出了一定程度的依赖，电力系统的飞速发展也有目共睹。随着电力系统的发展，电力系统的元件也越来越受重视，作为电力系统中最重要元件之一，电压互感器在其中起到了不可或缺的作用。电压互感器的主要作用是把高压侧的高电压转换为二次侧的低电压，用于给自动设备、测量装置和继电保护装置等供电。同时电压互感器能够将二次系统和一次高电压系统进行隔离开来，从而保障工作人员和电力设备的安全。

电压互感器的发展经历了从电磁式电压互感器到电子式电压互感器的过程。根据 IEC60044-7 标准定义，电子式电压互感器都具有两个重要部件：一次转换部件和二次转换部件。一次转换部件一般采用光学装置或电容、电阻分压器，二次转换器与一次转换器之间使用光纤作为传输系统，并装上能传输和放大测量信号的电子器件，具有数字量输出和模拟量输出的电压测量接口。经过半个世纪的发展，越来越多的电子式互感器产品被开发出来，可以根据产品的原理将他们分为“有源式”和“无源式”两类，传感头部分需要供电电源的电子式电压互感器称作有源式的电压互感器，而另外一种无源式电压互感器，它的高压侧传感头部分不需要供电电源。

随着电力系统的迅猛发展，电压互感器已在电网中得到广泛运用，其中尤以高电压等级的电容式电压互感器为多。按照互感器检定规程要求，必须周期性校验变电站现场安装的电容式电压互感器^[1]。这就会遇到很多必须解决的问题，如高压互感器的运行电压高、体积大，并且有不适合拆卸、不适于在实验室中检定的特点，所以检定大部分都需要在安装现场进行。对传统的电容式电压互感器误差现场校验，一般采用测差原理进行，需要电压标准、校验仪、电源系统、负载箱等等诸多设备才能完成，所需设备总类之繁多、设备体积之笨重、测试连接线之复杂都为实验增加了不小的阻力。

1.2 国内外研究现状

自从上世纪 90 年代以来，国内就开始进行电容式电压互感器误差现场的校验工作，绝大多数的现场校验都是采用串联谐振升压法和并联谐振升压法进行的。这种方法需要配置像升压变压器、调谐电感、调谐电容、标准电压互感器、校验仪外围设备。由于这种测试方式的接线复杂、外围设备众多、设备笨重、难以搬运，因此现场安装设备时不

仅费时费力，而且存在很大的安全隐患。此外，电容式电压互感器的大容性负载需要大容量、高电压的试验变压器和电源，这给现场试验的操作带来较大的困难，有时甚至根本没有办法进行现场校验。然而国外早已经研究出一些校验电压互感器的方法。

在国外，有几种不同的方法来测量电压互感器的比差和角差。Harris 将他们归类为直接法与比较法，这两种方法中要么使用到偏转装置，要么使用不计量技术。使用直接测量的方式，其测量质量能够被保证，并且无需与其他标准做比较。在直接偏移法中，初次级电压相量分别被直接测量。总体来说，这个方法是最好的测量低压互感器的方法，其初级电压只有 100V。即便如此，更精确、更简单的测量方法可以通过使用其他技术来实现。

在以前，美国国家标准与技术研究院 (National Institute of Standards and Technology, NIST) 用过比空法来校验电压互感器，将测互感器与 NIST 的标准互感器作比较。这个标准互感器使用的是由可变电阻的分压器和互感器组成的电压比较器，变比在 1/1 到 2000/1 之间。如果被测互感器与标准互感器所测量的误差为 $\pm 0.01\%$ 的比差和 ± 0.3 分的角差，那么这个标准互感器的比差和角差被与被测互感器认为几乎相同。但是，这种方法存在几个缺陷，主要在于比较器的变比范围有限，以及一些标准变压器必须达到用户预期的要求。

这些变压器的比差和角差必须满足二次电压的范围。这些变压器不得不做定期的检查，以确保其比差和角差没有发生改变。如果有一个可行的直接测量的方法，那么校验标准互感器将成为一个简单的工作，并且这个方法也能够直接校验客户的互感器。

在 NIST，直接测空法最开始用于包括通过连接一个可变互感器来提供相位角的平衡，从而保持标准变压器的二次侧和电阻分压器输出端的平衡。但是，由于这个电阻分压比在受热后会发生改变，因此这个方法实现起来有困难。在 60 年代末，直接测空法是可行的，因为这个方法比较简单直接，它通过未知电容器与一些标准类型的桥结构的平衡来测量电容器，并且该方法被用来替代比较法。在过去 60 年间，高压设备中最常用的标准桥结构是西林桥结构，如图 1.1 所示。这个桥结构中的两个高压支路由标准电容器和未知电容器组成^[12]。两个低压支路是电阻，其中一个电阻并联一个平衡电容器来平衡相位角。西林桥结构最主要的局限性在于低压支路中的未知电容和标准电容相对于地的电压不再是桥臂平衡的参数指标。因此，要是没有仔细的对桥结构中的组件进行校正检查，离散电流将会影响通过桥结构所测数据的准确性。要想消除这些离散电流就必须调整电压的幅值和相位角。可是，不幸的是这个方式并不是最好的而且桥的精度必然会受到影响。西林电桥的另外一个限制因素是两个低压支路中的电阻本身的误差。

Kusters 和 Petersons 提出电流比较仪电桥，它允许两个电容通过低压终端的对地点

位进行相互比较，从而消除西林电桥的主要问题。电流比较仪电桥用于对电压互感器和电容的校验，从而消除西林电桥的主要问题。在 NIST 中，校验电容和校验电压互感器有个重要的区别。电压互感器的校验是直接空类型的，而电容的校验是比空类型的。换句话说，电容测量的精确度最终取决于配备的标准电容的大小。而该标准电容可以通过电容经行直接追踪计算得到，也就是说标准电容是个已知的基本长度单位。

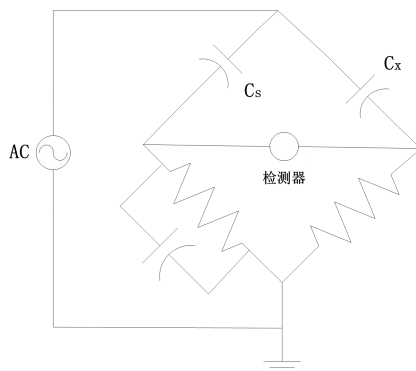


图 1.1 西林桥结构示意图

1.3 现阶段存在的问题

现有的电容式电压互感器误差现场校验主要采用比较法进行。在现场校验时，首先利用升压器经行升压，并向标准互感器和被测电容式电压互感器的一次侧提供一个合适的试验电压^[2]。然后，在标准电压互感器的二次绕组的输出端采集输出电压，计算或者测量出被测电容式电压互感器的二次绕组的输出误差。接着，在被测互感器二次侧施加测试电压，由此测得相关所需参数。此时，必须拆除一次高压线，否则将在互感器一次侧产生过高的电压，导致装置过压损坏，同时危及现场工作人员的人身安全。本文主要研究电容式电压互感器检验的技术方法，通过增加高压自动切断装置，实现在进行电容式电压互感器校验时，在不拆除互感器一次侧的高压线的情况下，完成电容式电压互感器的检验工作。

1.4 本章小结

本章主要介绍了本文的研究对象为电容式电压互感器，研究内容为电容式电压互感器误差现场校验方法，研究目的为减少在进行电容式电压互感器误差现场校验时的工作量、工作强度，以及减小现场校验过程中潜在的人身和设备危险。

2 系统原理分析

2.1 概述

电力系统是由生产、变换、传送、分配和消耗电能的电气设备在一起组成统一整体。它是由发电系统、输电系统、变电系统、和用电系统等部分组成，它的功能是将自然界之中的一次能源转化成电能供应给用户使用。该过程通过发电装置将一次能源转化电能，通过传输设备、变压设备将电能传输到各地，最后通过配电设备将电能供应给各种用户。为了实现这个过程，电力系统在每个环节和各个层次中都具有相对应的信息与控制系统，主要包括各种检测设备、通信设备、安全保护装置、自动控制装置以及监控自动化、调度自动化系统，以便于对电能的生产过程进行测量、调节、控制、保护、通信和调度，从而能够确保用户可以获取到既安全又经济同时优质的电能。图 2.1 为动力系统、电力系统和电力网的示意图。

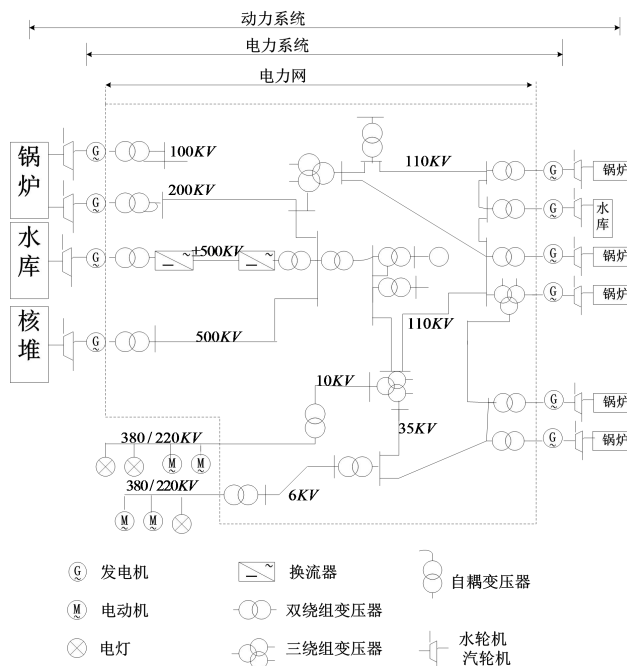


图 2.1 动力系统、电力系统和电力网的示意图

电力系统又可以被称作输电网络，它是一种连接供应电能端和使用电能端的供电网络。电力系统主要包括发电系统、输电系统、配电系统三个部分。发电系统包括各种类型的发电站以及发电设备发电设备；输电系统是指从各个发电厂以及发电设备产生的电

能传输到输电网之间的系统，主要包括高压电缆、铁塔、以及多组变电站等；配电系统是指从输电网传输电能到使用电能的用户端之间的系统，主要包括变电站、变压器、变电箱、电表等设备。由于我国地域面积相当辽阔，各种能源丰富，因此各发电厂通常都处于相对偏远地区。为了将发电厂所产生的电能送到中心城区的用户端，并且降低在电能传输过程中的功率损失，同时提高所供电能的电能品质的稳定，我国对使用的输电系统和配电系统进行了升降压，并实现长距离电能传输。输电网络将多种不同的发电系统并联运转，不仅利用煤、石油等一次能源发电，同时利用了太阳能、水、风等可循环的无污染的绿色能源发电，这样不仅能够节省经济成本又能够减少环境污染。正是由于我国采用的是多能源并网发电，因此，我国输电网络上的任一节点，都被设计成了可以随时加入网络或者切离网络，而不会对整个输电网络的供电品质造成重大影响的拓扑的应用结构。

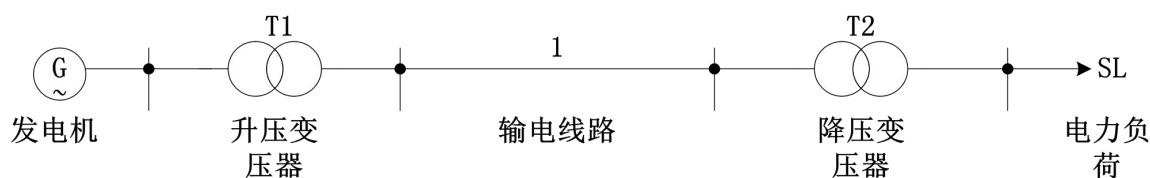


图 2.2 简单电力系统示意图

由于电力系统组成复杂，在对于电力系统进行分析的时候，通常使用如图 2.2 所示的简化过的电力系统示意图来表示整个电力系统的主要过程。

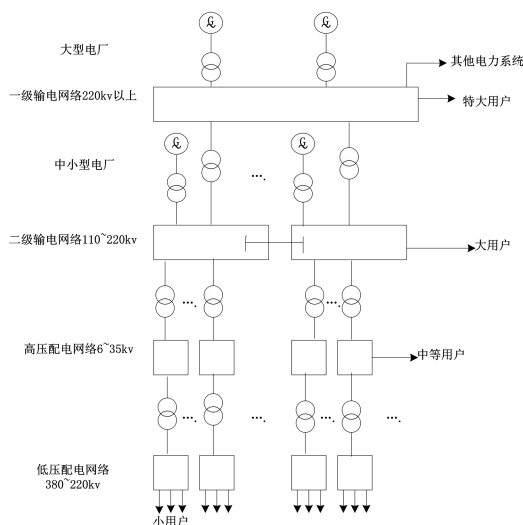


图 2.3 电力网的结构示意图

一个大的电力网络总是由很多个子电力网络组成的，因此，电力网络具有一个很大的特点就是分层结构。一般的电力网络可以被划分为一级输电网、二级输电网、高压配电网和低压配电网等层次。一级输电网一般是由电压为 220kV 及以上的主干电力线路组成，它连接着各个大型大电厂、特大容量用户和相邻的子电力网络。二级输电网的电压一般为 110kV 到 220kV，它上面连接着一级电力网络，下面连接着高压配电网，是一个区域性的网络，能够连接区域性的发电厂和大用电量用户。配电网是向中等用电用户和小型用电用户供电的网络，其中高压配电网的电压在 6kV 到 35kV 之间的，而低压配电网的电压在 1kV 一下。电力网的结构如图 2.3 所示。

在输电过程中，电能通过输电线路传输给用户。传输的电能可以表示为式 1.1，其中 P 表示传输的有功功率， t 表示传输的时间， U 表示输电网的电压， I 表示导线中的电流， $\cos\varphi$ 表示功率因。在电能传输给用户的过程中，电流在导线中流过时会使导线发热，造成电压下降、功率损耗以及导致电能损耗，同时，电压的下降与流过导线的电流成正比，功率的损耗和电能的损耗与流过导线的电流的平方成正比。因此，为了提高运行的经济性，减小电能在传输过程中的损耗，在保证传输功率不变的情况下，提高电能传输过程中的电压，可以减小电能传输过程中的电流。这样一来不仅可以降低电能传输过程中的电压和电能的损耗，同时还可以通过使用较细的导线来节约电力系统的建造成本。当电能传输到负荷中心时，又必须将电压降低，以便于提供给不同需求的用户使用。因此，在电力系统中，需要使用变压器来实现对电压进行升高和降低等一系列的变换。

$$A = Pt = \sqrt{3}UI \cos \varphi t \quad \text{式 (1.1)}$$

变压器在电力系统中得到了十分广泛的应用，占据了极其重要的地位，无论是在发电厂或者是变电站，都可以看到各种型号和不同容量的变压器。图 2.4 给出的变压器在电力系统中的基本应用情况。

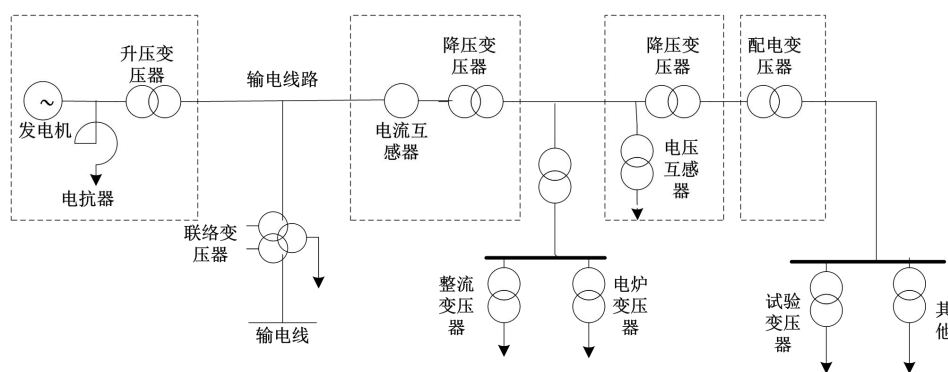


图 2.4 变压器在电力系统中的应用示意图

变压器的种类很多，能将高电压按比例转变成 100V 标准低电压或者是将大电流按比例转变成 5A 或 1A 的标准小电流的变压器称作仪用变压器，也叫互感器。其中，将高压按比例转变成 100V 的标准低压的互感器为电压互感器，能将大电流按比例转换成标准小电流的互感器叫做电流互感器。通过互感器将高压、大电流转变成低压、小电流，能够方便地使用测量仪表直接测量电压与电流，不仅对电力设备起到了保护作用，而且对于人员和设备的安全也起到了保护作用。

本文所研究的对象是电容式电压互感器。在电力系统中，电容式电压互感器被用于逐步降低额外的高压信号、保护低压信号，为计量或者操作继电器提供安全保障。电容式电压互感器的最基本的结构由电容分压器和电磁单元两个部分组成。其中电容分压器的两个分离的电容，一个用于调整线路频率的电感和一个用于隔离以及进一步逐步降低电压来计量设备或者保护继电器的电压互感器。实际上，其中一个电容通常由许多小电容串联构成。这样一来，通过电容能够承担更高的电压降，并且使得另外一个电容承受较小的电压降。正是由于绝大多数的电压降由其中一个电容承担，这样就能够减少电压互感器的隔离等级。同时在超过 100kV 的高压下，其他类型的电压互感器需要使用更多的绕组和材料才能达到与电容式电压互感器相同的隔离效果。

2.2 基本原理分析

2.2.1 电容式电压互感器误差现场校验传统方法

通过电压互感器校验仪测量电压互感器误差时，一般情况下，采用比较法测量。比较法的测量方法是用一个与被测电压互感器的电压比相同的标准电压互感器作为标准，把两个互感器的二次的差压输入互感器校验仪进行测量，读出被测互感器相对于标准互感器的电压误差 f 和相位差 δ 。被测互感器的电压误差 f_x 和相位差 δ_x 为

$$f_x = f + f_0(\%) \quad \text{式 (2.1)}$$

$$\delta_x = \delta + \delta_0(^{\circ}) \quad \text{式 (2.2)}$$

在式 2.1、2.2 中， f_0 和 δ_0 分别表示标准互感器的电压误差和相位差。

根据电压互感器检定规程的规定，当标准互感器的准确度等级比被测互感器高两级时，标准互感器的误差可忽略不计，通过电压互感器校验仪，直接读出被测电压互感器的电压误差和相位差^[3]。于是有式 2.3、2.4。

$$f_x = f(\%) \quad \text{式 (2.3)}$$

$$\delta_x = \delta(') \quad \text{式 (2.4)}$$

(1) 一般电压互感器检定线路

当被测互感器的准确度等级为 10 级到 0.05 级的时候，可以采用一般电压互感器检定线路^[4]。使用标准电压互感器作为标准器的检定线路来测试电压互感器时，根据误差测量装置类型，可以选择从高电位端取出差压或者从低电位端取出差压进行误差测量。图 2.5 为一般互感器检定线路图。如图 2.5 所示， T_1 为调压器， T_2 为升压器， P_0 为标准电压互感器， P_x 为被测电压互感器。标准电压互感器 P_0 与被测电压互感器 P_x 的一次侧并联，也就是说两互感器的一次极性端(A)对接，两互感器的非极性端(X)对接并且接地^[5]。两互感器的二次侧的二次极性端(a)对接，两互感器的二次非极性端(x)，输入仪器进行测量， P_0 的 x 端接入仪器的 K 端， P_x 的 x 端接入一起的 D 端，并且仪器的 D 端接地，那么输入仪器的 K 端和 D 端的信号为两互感器的差压。由于电压互感器的误差是加在一次端上的电压经过折算后与二次端上的电压之差，因此，二次差压直接从互感器二次端上取出。由于当差压从低电位端取出时，标准电压互感器的一次和二次绕组之间的电容电流反向流入被测互感器，所引起的附加应该不大于备件互感器误差限值的 1/20。

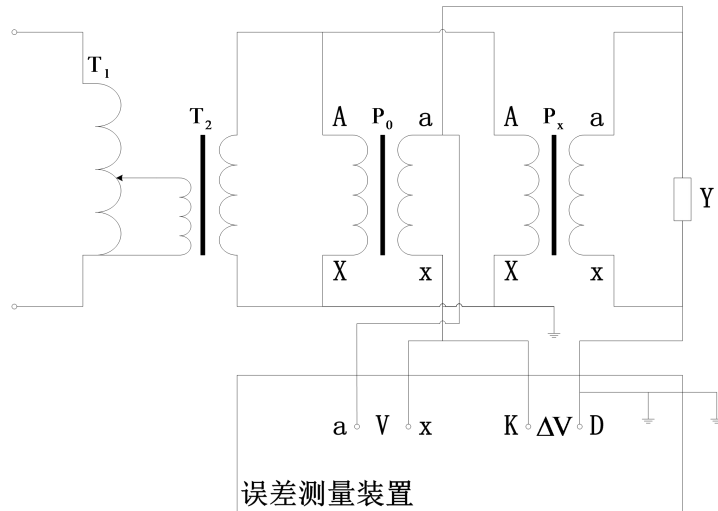


图 2.5 一般互感器检定线路示意图

(2) 参数测量

低压电压互感器的误差由两部分组成，一是空载误差，一是负载误差。由式 2.5 可

知，通过试验测得电压互感器的一次绕组内阻抗 Z_1 、二次绕组内阻抗 Z_2 、空载励磁导纳 Y_m 和二次负荷导纳 Y ，就能够通过该公式计算出电压互感器的误差。

$$\tilde{\varepsilon} = \tilde{\varepsilon}_k + \tilde{\varepsilon}_f = -Y_m Z_1 - Y(Z_1' + Z_2) \quad \text{式 (2.5)}$$

首先，测量绕组内阻抗可以通过使用直流电桥进行测量。低压电压互感器的绕组内阻非常小，一般在 0.1Ω 到 10Ω 之间，因此，必须采用双臂电桥进行测量。高压电压互感器的高压绕组的内阻非常大，一般在 $0.1K\Omega$ 到 $10K\Omega$ ，因此可以用单臂电桥或者数字万用表进行测量。在测量绕组直流电阻的时候，必须将不会使用到的绕组给短路掉，这样才能避免电感所造成的过渡过程影响测量的准确度。因此，在测量一次绕组的内阻时，应该将二次绕组短路，同理，测量二次绕组的内阻的时候，要将一次绕组短路。这样，就能够测量出一次绕组的内阻 R_1 和二次绕组的内阻 R_2 。之后，利用互感器校验仪测量绕组的漏抗。此时将一次绕组短路，电源电流通过二次绕组和校验仪的工作电流回路，获取二次绕组上的压降，通过互感器校验仪进行测量。仪器所得到的数据为折算至二次的一次绕组的内阻抗和二次绕组的内阻抗之和，如式 2.6 所示。

$$Z_1' + Z_2 = (R_1' + R_2) + j(x_1' + x_2) = R + jx(\Omega) \quad \text{式 (2.6)}$$

其次，测量空载励磁导纳可以通过使用互感器校验仪测量。将电源电压加在被测电压互感器的一次侧和供电电压互感器的一次侧，此时，两电压互感器的额定一次电压相同，供电电压互感器的额定二次电压为 $100V$ ，用于给电压互感器校验仪供电。被测互感器的二次回路开路，此时，通过被测互感器的一次空过在励磁电流由绕组的 X 端输入到校验仪中，通过校验仪的测量得到导纳 Y 并经过计算可以得到被测互感器的空载励磁导纳。计算公式如式 2.7 所示。

$$Y_m = \frac{\dot{I}_0}{\dot{U}_1} = \frac{\dot{I}_0}{-K_n \dot{U}_2} = \frac{1}{K_n} Y \quad \text{式 (2.7)}$$

其中 \dot{I}_0 为待测互感器一次侧的空在励磁电流； \dot{U}_1 为待测互感器一次侧的电压； \dot{U}_2 为待测互感器二次侧电压； K_n 为供电互感器的电压比。

将测量电压折算到额定二次电压为 $100V$ 时，被测互感器的空载励磁导纳如式 2.8 所示

$$Y_m' = K_n^2 Y_m = K_n Y \quad \text{式 (2.8)}$$

由于励磁导纳不是一个常数，会随着回路电压的改变而呈非线性变化，因此，需要

测量每个规程点下的励磁导纳值，即 20%、50%、80%、100%以及 120%额定电压下的励磁导纳值。

最后，需要测量二次负荷导纳。将互感器的二次电压加载在校验仪的工作电压回路，并且把通过二次负荷的电流由 x 端引入校验仪，就可以通过校验仪直接得到被测互感器的二次负荷导纳值。

那么，通过之前所测得的被测互感器绕组的内阻、被测互感器的空载励磁导纳以及被测互感器二次负荷导纳就能够计算出被测互感器的空载误差和负载误差，最终得到被测互感器的总体误差。

2.2.2 电容式电压互感器误差现场校验低较高方法

(1) 电容式电压互感器的结构

电容式电压互感器由电容分压器和电磁单元组成，其中，电磁单元包含中间变压器、补偿电抗器和阻尼器等部分。其原理图如图 2.6 所示。图中 C_1 表示高压电容器； C_2 表示中压电容器； T 表示中间变压器； L_k 表示补偿电抗器； Z_L 表示二次负荷； Z_X 表示阻尼器； a, n 表示二次绕组端子； da, dn 表示剩余绕组端子。

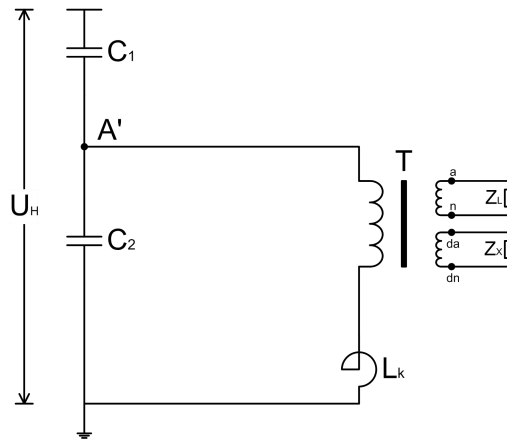


图 2.6 电容式电压互感器原理图

当施加高压 U_H 于高压电容 C_1 和中压电容 C_2 组成的分压器时，假设电路中未接入电磁单元等并联阻抗，从 A' 向电容分压器看进去，该部分可视为一个有源二端口网络。应用 Thevenin's theorem，可将该部分等效为一个恒压源和内阻串联的电源。

其中等效恒压源的电压如式 2.9 所示，其中电容的容抗如式 2.10 所示，故可得该二端口网络的等效电压如式 2.11 所示。而等效内阻为高压电容 C_1 和中压电容 C_2 并联的复

阻抗。等效容抗为高压电容 C_1 和中压电容 C_2 并联的容抗。如式 2.12 所示

$$U'_H = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot U_H = \frac{X_{C_1}}{X_{C_1} + X_{C_2}} \cdot U_H \quad \text{式 (2.9)}$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad \text{式 (2.10)}$$

$$U'_H = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \cdot U_H \quad \text{式 (2.11)}$$

$$X_C = \frac{1}{\omega(C_1 + C_2)} \quad \text{式 (2.12)}$$

通过等效变换后，一次电压从 U_H 下降到 $\frac{C_1}{C_1 + C_2} \cdot U_H$ ，而二次电压 U_a 保持不变。

电容式电压互感器的电压变比则从 $\frac{U_H}{U_a}$ 降低成了 $\frac{C_1}{C_1 + C_2} \cdot \frac{U_H}{U_a}$ 。

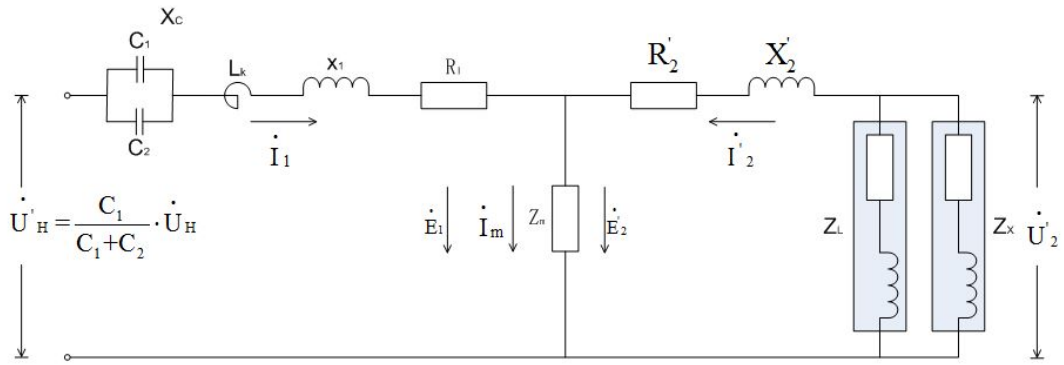


图 2.7 电容式电压互感器等值电路图

将原电路通过 Thevenin's theorem 进行电源等效，并且，将中间变压器经行等效后得到电容式电压互感器的等值电路，其等值电路图如图 2.7 所示。其中： X_C 为等效电容 ($C_1 + C_2$) 的电抗； X_k 为补偿电抗器的电抗； X_1 为中间变压器的一次绕组漏抗； X_2' 为中间变压器将二次绕组的漏抗归算到一次绕组后，二次绕组的漏抗的归算值； R_1 为中间变

压器一次绕组和补偿电抗器绕组直流电阻以及电容分压器的损耗等值电阻之和，即

$R_1 = R_C + R_K + R_{X1}$ ； R'_2 为中间变压器二次绕组的直流电阻归算到一次绕组后，二次绕组的直流电阻的归算值； Z_m 为中间变压器的励磁阻抗； \dot{E}_1 为中间变压器一次绕组的感应电动势； \dot{E}'_2 为中间变压器二次绕组的感应电动势归算到一次绕组后，二次绕组的感应电动势的归算值。

(2) 电容式电压互感器误差产生的原因

电容式电压互感器的误差主要有两个部分组成，一个是由激磁支路所产生的的空载误差，而另一个是由包括阻尼器在内的负荷支路所产生的的负载误差^[7]。

① 空载误差

空载误差是由于空载电流 \dot{I}_m 在一次阻抗上产生的电压降 $\Delta \dot{U}_0$ 而引起的。空载时，电容式电压互感器一次侧等效电路如图 2.8 所示。在电容式电压互感器一次电压不变的情况下，空载励磁电流也基本不变^[8]。如式 2.13、2.14 所示。

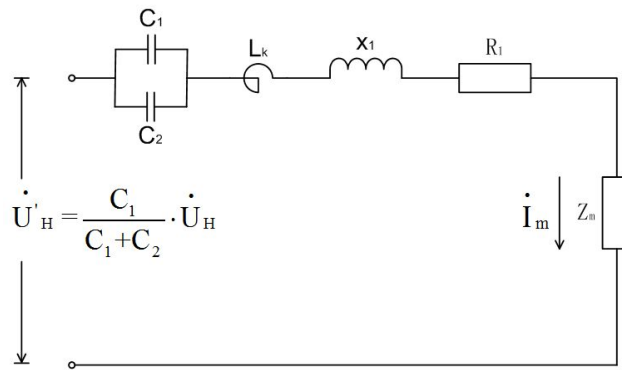


图 2.8 电容式电压互感器空载时一次侧等效电路图

$$\Delta \dot{U}_0 = \dot{I}_m R_1 + \dot{I}_m (-j) X_C + \dot{I}_m j X_k + \dot{I}_m j X_1 \quad \text{式 (2.13)}$$

$$\Delta \dot{U}_0 = \dot{I}_m \left\{ R_1 + \left[\omega (L_K + L_1) - \frac{1}{\omega (C_1 + C_2)} \right] \right\} \quad \text{式 (2.14)}$$

② 负载误差

负载误差是由负载电流 \dot{I}_2 在电容式电压互感器二次侧回路阻抗上产生的电压降

$\Delta \dot{U}_L$ 引起的。如式 2.15 所示。

$$\Delta \dot{U}_L = \dot{I}_2 (R_1 + R_2') + j \left[\omega (L_K + L_{T1} + L_{T2}') - \frac{1}{\omega (C_1 + C_2)} \right] \quad \text{式 (2.15)}$$

当电容式电压互感器的二次绕组通过负载阻抗而闭合时，在二次绕组中产生负载电流，并引起一次绕组电流发生变化。一次绕组电流除了用以产生主磁通的激磁电流外，还将增加一个负载电流，以抵消二次电流的影响。一次绕组上的负载电流和二次绕组上的负载电流分别在一次绕组和二次绕组的阻抗上产生电压降以及漏磁压降，导致负载误差。由于负载误差只和负载电流以及绕组内的阻抗有关^{[6][7][9]}，而且绕组内的阻抗不随负载电流的变化而变化，即可认为是线性的。因此，可以认为负载误差和负载电流成正比。

(3) 降低误差的措施

通过上述对于电容式电压互感器的电压误差产生原因的分析，为了降低电容式电压互感器的电压误差，则要使得电路的阻抗最小。由于电容式电压互感器的等效电路电路中含有电容和电感，因此，可使电容式电压互感器的等效电路中容抗和感抗在额定频率下呈串联谐振^{[6][7]}。如式 2.16 所示。

$$\omega (L_K + L_{T1} + L_{T2}') = \frac{1}{\omega (C_1 + C_2)} \quad \text{式 (2.16)}$$

此时，电路阻抗最小。当电源电压不变时，电路中的电流可以达到最大。同时，在电路发生谐振时，该电路呈现为纯电阻特性，能量的转换只在电路内部的电感和电容之间进行，此时的无功功率的代数和为零，因此，电路与电源之间没有能量的转换。

(4) 电容式电压互感器低校高方法基本过程

在开始做误差试验时，首先采集一次侧数据，在电容式电压互感器二次侧开路的情况下，在被测电容式电压互感器的电容单元高压端和电磁单元低压接线端之间施加一个不超过 3KV 的交流测试信号，在二次侧采集二次侧端子的电压信号。通过式 2.17 与 2.18 计算得到该被测互感器的空载误差和实际变比。之后通过控制系统给与一个控制信号，该电容式电压互感器校验装置自动在被测电容式电压互感器的二次侧接入负载，通过在一次侧施加交流电压测试信号，在二次侧获取二次端子的电压和电流，并通过式 2.17 计算得到该电容式电压互感器的负载误差。之后，断开互感器的载波端和电磁单元的低压端，并将电容单元的高压端和载波端短接，在互感器一次侧电容单元高压端和电磁单元低压端施加交流测试信号，并在二次侧空载时测得二次端子的电压，通过式 2.19 计算得到互感器的变比。在采集二次侧数据时，断开一次侧的电容单元高压端、电磁单元

低压端和载波端。通过向二次侧施加一个低频小信号，在互感器二次回路中采集回路电流，通过式 2.20 计算出等效一次电压测试点下的一次空载导纳，并求得一次回路的阻抗。然后，在被测互感器二次侧接入负载，并在互感器二次侧施加低频小电压信号，通过测量和计算获取在接入二次负载时，等效一次电压点下的励磁导纳值。最后，通过获取的相关数据计算出在接入二次负载时的等效一次电压下的比差和角差。通过改变每次测量时给互感器二次侧施加的低频小电压信号的大小，可以测试出不同电压点下的比差和角差。由此得到被测电容式电压互感器的完整数据，从而完成对被测电容式电压互感器的校验工作。

$$\varepsilon = f + jB \quad \text{式 (2.17)}$$

$$K_1 = V_1^2 / V_2^2 \quad \text{式 (2.18)}$$

$$K_2 = V_1' / V_2' \quad \text{式 (2.19)}$$

$$Y_{V_1} = \frac{I_2}{V_{TP}} \quad \text{式 (2.20)}$$

2.2.3 高压自动切断装置基本原理

如图 2.9、图 2.10 所示，在高压自动切断装置电路中，用于提供电压的电源为 12V，高压自动切断装置分别连接电容式电压互感器的 A、N、XL 端，以及测量装置的输入端的 A1，X 端；KZPO8、KZPO9、KZPO10，用于获取电平控制开关的电平信号。

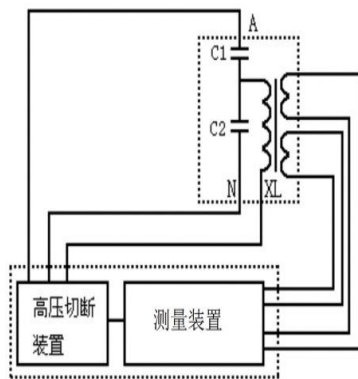


图 2.9 设备的结构示意图

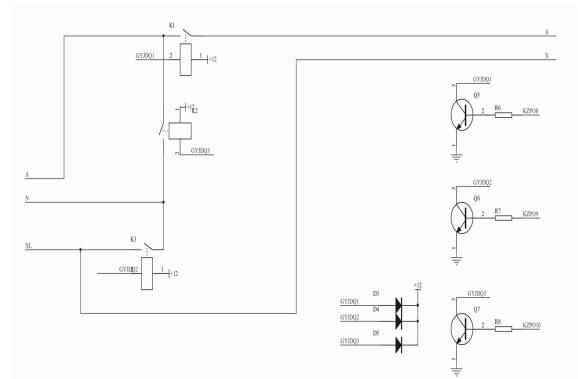


图 2.10 高压自动切断装置的电路图

在对电容式电压互感器进行校验时，首先，为了采集一次侧电压、电流信号，通过电平控制开关提供给高压自动切断装置一个高电平信号，使得高压自动切断装置处于闭

合状态，接通一次侧的高压信号，从而采集到一次侧的电压、电流信号。之后，为了采集二次侧的电压、电流信号，需要提供给二次侧电压信号。为了防止提供给二次侧电压信号后，一次侧的高压信号导致电容式电压互感器校验仪过压损坏，此时通过电平控制开关提供给高压自动切断装置一个低信号，使得高压自动切断装置处于断开状态，阻止一次侧的高压信号，测量装置直接与二次侧连接，采集到二次侧的电压、电流信号。

2.3 本章小结

本章分析了电容式电压互感器的基本结构、电容式电压互感器误差传统测量方法和低中高测量方法的原理和高压自动切断装置的原理及结构，为后文设计电容式电压互感器误差现场校验仪提供了理论依据。

3 互感器校验仪设计

3.1 概述

本文所述的带高压自动切断装置的电容式电压互感器误差现场校验设备是基于 ARM+DSP 架构，其中 ARM 使用的是 Tiny210 开发板，并且搭载了 WinCE6.0 系统，主要用于实现良好的人机交互和与其他设备进行通讯。DSP 使用的是 TMS320F206 处理器，主要用于进行数据处理。

3.2 系统组成

带高压制动切断装置的电容式电压互感器误差现场校验仪包含升压器、标准电压互感器、环形电源变压器、电源模块、模拟信号处理模块、数字信号处理模块、数据校验模块、量程选择模块、功率放大模块、高压自动切断装置、ARM 及通讯接口和液晶触摸屏等部分组成。如图 3.1 所示。设备核心为 TMS320F206 芯片，通过 DSP 对其他模块的控制和相互通讯，才采集数据并对采集到的数据进行处理。图 3.2 为 DSP 系统框图。

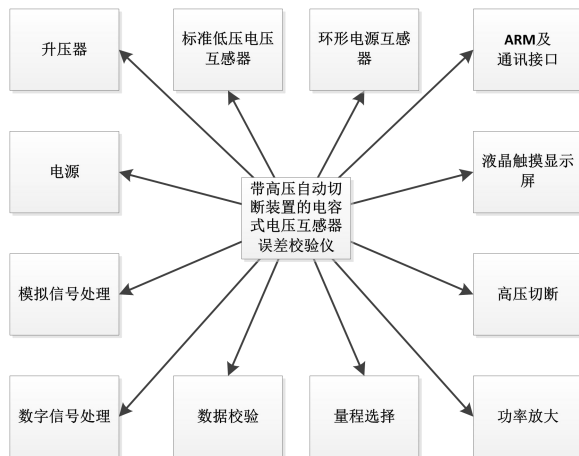


图 3.1 设备组成示意图

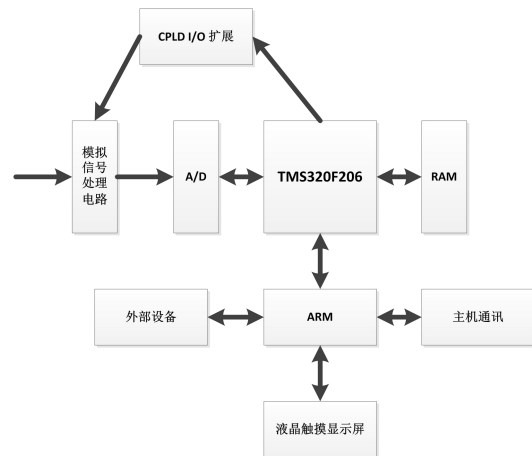


图 3.2 DSP 系统框图

3.2.1 环形电源变压器

本设备应用环形电源变压器是为了给设备的各个模块供应不同等级大小的电压。这

样既可以减少所接电源个数，同时可以减小设备体积大小。该环形电源变压器通过接入 220V 交流电压，通过该环形电源变压器能够得到 1V/4A、10V/2A、11V/1A、14V/0.5A、20V/5A 等不同电流和电压等级的交流电。

3.2.2 标准电压互感器

标准电压互感器是按照实验室和现场校验状况来设计的，它既能够在实验室中使用，也适合于在进行现场校验时使用。其绝缘是采用环氧树脂浇注，一体性能好，结构紧凑，并且体积小，重量轻，方便运输和携带。同时标准电压互感器的精确度高、性能更好、误差余量较大，其适应性很强，能广泛适用于高温高湿及低湿的地区使用，平原地区及高原地均可以使用，性能稳定。本设备应用标准电压互感器作为参照和标准，能够有效检验出待检验的互感器的精确度是否在误差允许的范围内。本设备使用该标准变压器是为了在校验过程中与被测电容式电压互感器作为对比，以判断被测电容式电压互感器是否符合标准。该标准互感器可提供包括变比 2200、变比 1100、变比 1100、变比 350、变比 100 在内的 5 种变比。

3.2.3 升压器

升压器又叫交流高压试验变压器，是发电站和供配电系统以及科研单位的基本实验设备。升压器主要用于对电气设备进行规定电压下的绝缘强度试验，能够衡量产品和承受过电压的能力。本设备使用升压器是为了满足试验所需高电压 3.3KV，该升压器采用硫化硅树脂浇灌，外壳采用绝缘树脂封装，该样式有利于封装，并且能够达到高压绝缘的效果，阻止了高压击穿外壳，有利于防止升压器外壁被击穿，导致的设备损毁。

3.2.4 电源模块

电源模块用于给系统供电，包括给 ARM，DSP，继电器等设备供电。其输入为 10V 的交流电压，经过整流滤波稳压电路后输出 5V 的直流电压给系统的芯片供电。

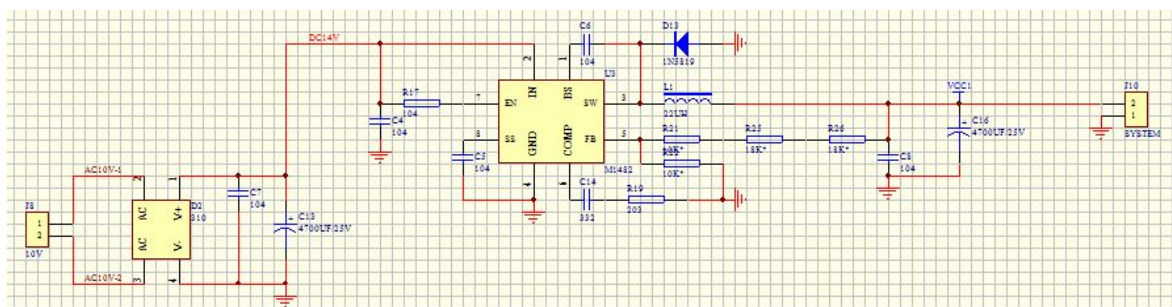


图 3.3 电源模块电路图

如图 3.3 所示，10V 的交流电压通过桥式整流电路，整流之后，再通过 4700 微法，25V 的极性电容滤波，得到大约 14V 的直流电压。该电压接入稳压器的输入端，通过直流转直流逐步降压得到 5V 的系统电压。

3.2.5 模拟信号处理模块

模拟信号处理模块的作用主要是将输入的小信号放大为系统可以识别的大信号。在此电路中共完成了差分信号，标准电压信号，二次绕组的导纳以及直流电阻信号的处理。该部分使用了最大放大倍数为 16 倍的可编程放大器和最大放大倍数为 1000 倍的仪用可编程放大器。

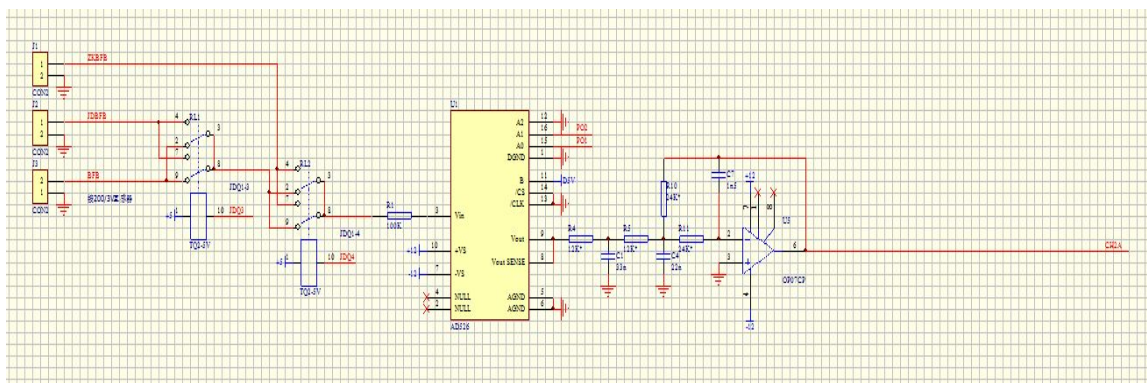


图 3.4 模拟信号处理第一部分电路图

如图 3.4 所示电路，其输入端电压，经过可编程放大器，将电压信号放大之后，通过巴特沃斯有源低通滤波器，最终得到的标准电压信号，供给下一级的采样芯片的采样端口进行采样。

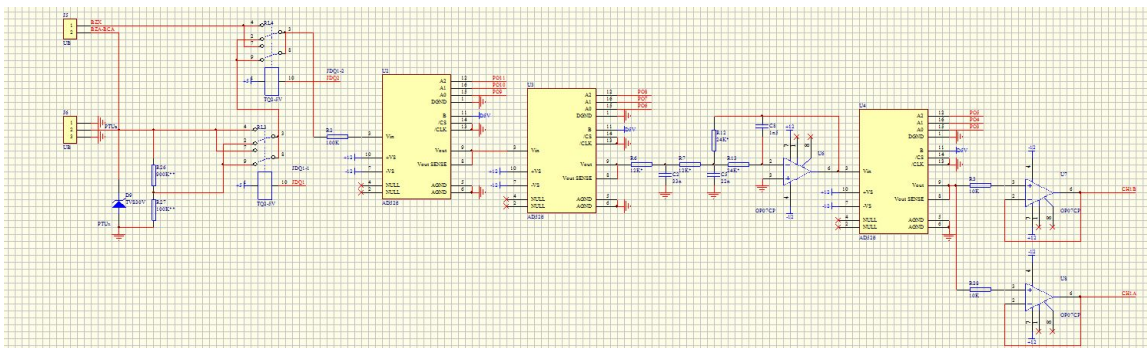


图 3.5 模拟信号处理第二部分电路图

如图 3.5 所示电路，将微小的电压信号通过可编程放大器进行放大，以及巴特沃斯有源低通滤波器得到的采样芯片可识别电压信号，通过继电器的切换，可以分别得到一个差分电压信号和一个电压信号。

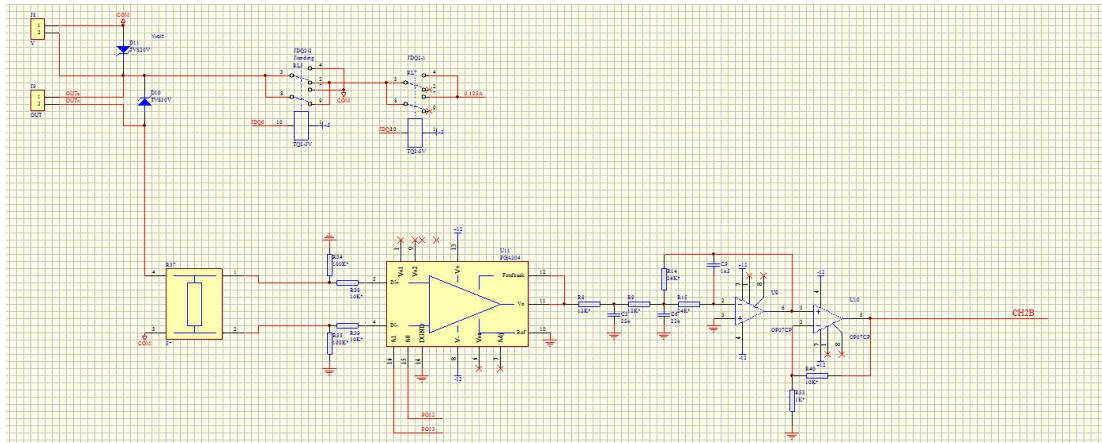


图 3.6 模拟信号处理第三部分电路图

如图 3.6 所示电路，将微小的电流信号，通过精密四角电阻，所得到的电压信号，经过仪用可编程放大器的放大和巴特沃斯有源低通滤波器的滤波，得到了采样可识别的电压信号，通过该电压信号可以得出该路中的电流信号大小。

3.2.6 数字信号处理模块

数字信号处理模块主要用于进行 AD 采样，通过 DSP 进行数据处理，同时该部分包含一个正弦波发生器，并且该模块还包括扩展控制 I/O 口，能够可靠有效的支持其他外部设备。

该模块使用的正弦波发生器是一个可变频率、可变幅值的 14 位正弦波发生器。该正弦波发生器在一个周期内能产生 512 个数据点，并且每个点的最大误差不超过 $\pm 2^{-14}$ ，约为 $\pm 6.1 \times 10^{-6}$ 。因此，该正弦波发生器所产生的正弦波波形与标准正弦波十分接近，其误差可忽略不计。

数字信号处理模块中所使用的信号采集电路应用了采样芯片，如图 3.7 所示，该部分主要使用了其中四个端口采集模拟电路中的四个电压信号。其中第一个端口采集的是模拟信号处理模块中第二路电路中输出的差分电压信号。第二个端口采集的是模拟信号处理模块中第二路电路中输出的电压信号。第三个端口采集模拟信号处理模块中的第一路电路输出的标准电压信号。第四个端口采集的是模拟信号处理模块中第三路电路中输

出的电压信号，以得到该路中的电流信号。

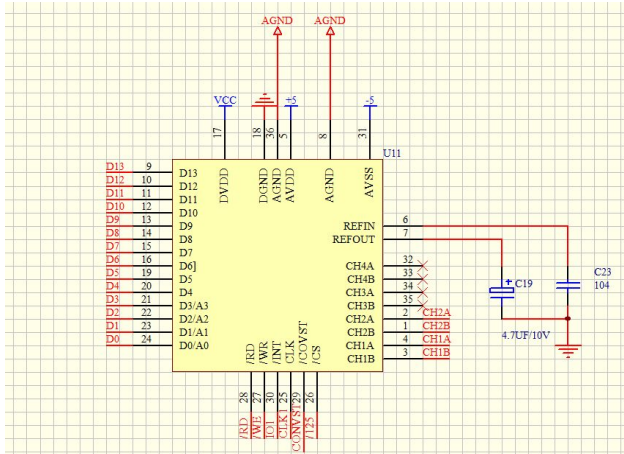


图 3.7 采样芯片电路图

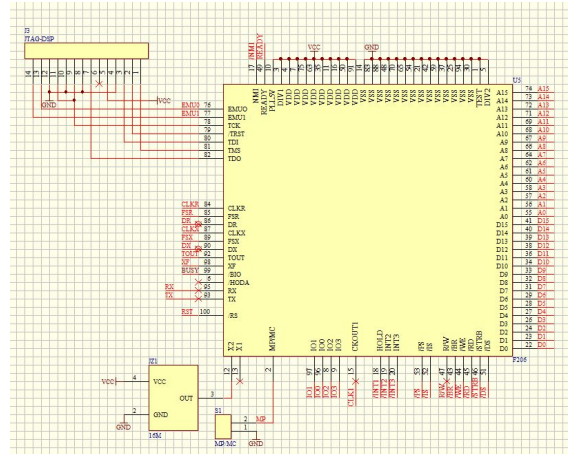


图 3.8 TMS320F206 芯片外围电路图

数字信号处理模块中所使用的数据处理电路，通过 D_0 到 D_{13} 端口获取采样芯片输出的 14 位数字信号，经过 DSP TMS320F206 处理后得到采集到的差分电压、标准电压、待测互感器二次侧的电压、待测互感器二次侧的电流，经过计算后得到差分电压与标准电压的比差和角差，以及待测互感器二次侧的导纳值。图 3.8 所示为 TMS320F206 芯片外围电路图。

3.2.7 数据校验模块

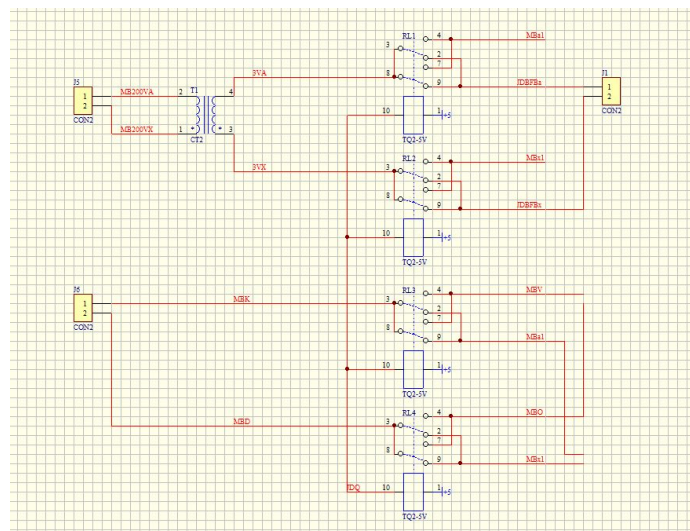


图 3.9 数据校验模块电路图

数据校验模块主要是针对于设备自检所用。通过外接电容式电压互感器整体检定装置，对本设备的精确度进行检测。根据《JJG 314-2010 测量用电压互感器检定规程》中所规定的，对于电容式电压互感器误差现场校验设备的精确度要求，设备的误差精确度不能超过 1%，而本文所述设备能够将检测的误差精确度控制在 0.2% 以内^[10]。图 3.9 为数据校验模块电路图。

3.2.8 量程选择模块

量程选择模块分为 5 种量程，分别为 220kV/100V、110kV/100V、35kV/100V、10kV/100V、6kV/100V。其中 110kV/100V 档位中有两种电压，一个为百分表电压，即标准电压，一个为与被检测电容式电压互感器进行差分用。该部分与标准电压互感器配套使用，将输入的小电压通过变压器输出所需的符合试验要求的大电压。

如图 3.10 所示为量程选择模块的电路图，通过 DSP 对 5 组继电器的控制，来实现对于 5 个档位量程的选择，分别为 220kV、110kV、35kV、10kV 和 6kV，从而实现对于被测电容式电压互感器加载不同大小的高电压的效果。

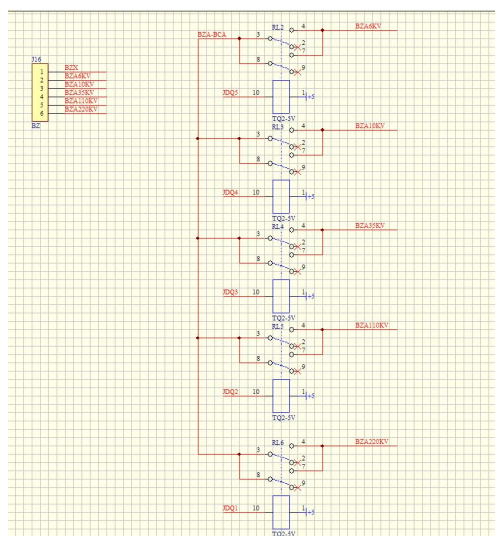


图 3.10 量程选择模块电路图

3.2.9 功率放大模块

图 3.11 所示为功率放大模块的实物图。其中包含两个芯片，一个用作隔离运放，用于隔离系统的接地端和功放的接地端。另一个是个高电压高电流的运算放大器，通过该运算放大器能够将正弦波发生器产生的电压信号放大到系统所需的电压信号，同时能够

补偿放大过程中所损失的功率，最终满足升压器的功率要求。如图 XX 所示为功率放大模块的电路图。

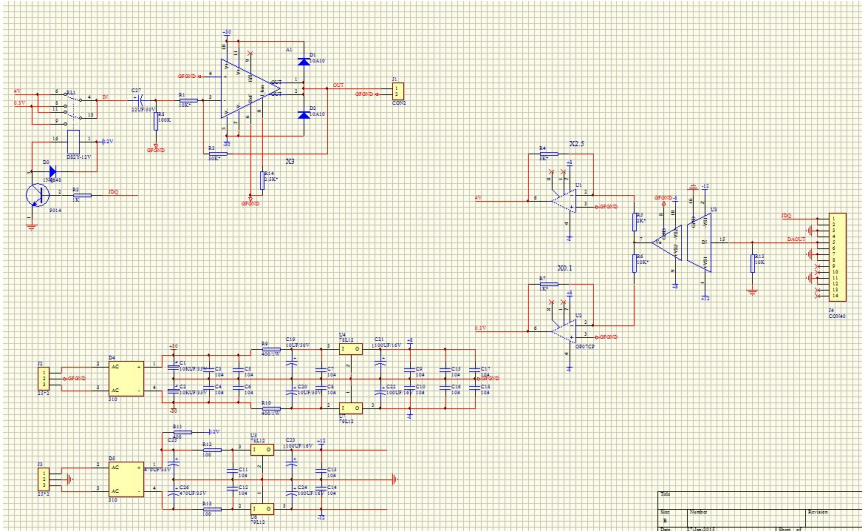


图 3.11 功率放大模块的电路图

3.2.10 高压切断模块

高压切断模块用于控制在检测电容式电压互感器时，对于一次侧的线路通过控制实现自动闭合和切断的处理。在采集一次侧电压、电流信号时，通过电平控制开关提供给高压自动切断装置一个高电平信号，使得高压自动切断装置处于闭合状态，接通一次侧的高压信号，从而采集到一次侧的电压、电流信号。然而，在采集二次侧的电压、电流信号时，需要提供给二次侧小电压信号。为了防止提供给二次侧电压信号后，一次侧的所产生的高电压导致电容式电压互感器校验仪过压损坏，此时通过电平控制开关提供给高压自动切断装置一个低信号，使得高压自动切断装置处于断开状态，阻止一次侧的高电压，测量装置直接与二次侧连接，采集到二次侧的电压、电流信号。

3.2.11 ARM 控制器

本设备使用的是 Tiny210 开发板，并搭载 Windows CE 6.0 系统。其功能主要是与液晶触摸显示屏共同提供友好的人机交互界面、与 DSP 进行数据传递、与 PC 机通过串口进行数据通讯、与外部便携式存储设备实现便捷的数据存储等功能。

Tiny210 开发板是一款采用基于 Cortex-A8 架构、S5PV210 作为主要处理器的高性能的核心板，其主频可以到达 1GHz。并且板载单通道、32 位数据总线、运行频率

200MHz、512M DDR2 内存。基于以上硬件性能，该开发板能够流畅的运行 WinCE6 这类高级操作系统。

选用 Windows CE 6.0 作为操作系统，它支持基于 x86 和 ARM 的处理器，通过直接搭载支持包运行该系统，对于设备的最小内存进行了优化。WinCE 符合具有确定性中断延迟的实时操作系统的定义，该系统能够支持 256 个优先级级别并能够使用优先级继承处理优先级反转。由于线程是该系统执行的基本单元，因此，这能够帮助系统简化接口并且缩短执行时间。

3.3 设备控制流程

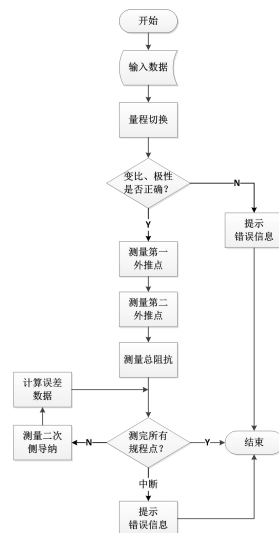


图 3.12 控制程序流程图

系统采用程序控制，检测过程无需人工干预，其控制流程图如图 3.12 所示。当校验仪启动后，可以通过人工在校验仪上输入被试品的相关参数，点击开始测试或者通过 PC 机输入参数，发送参数和开始测试命令执行测试。程序开始后，校验仪获取外部数据该数据包括待测互感器的功率因数、一次电压、二次电压等信息。之后系统将检测输入的变比与极性是否与被试品相同，如果发现所输入的数据与被试品不同，则提示错误信息并且结束测量。如果与被试品信息相同，则开始测试。校验仪依次测量第一外推点和第二外推点，即被试品的二次侧空载电压。之后测量被试品的总阻抗，即折算至二次的一次绕组的内阻抗和二次绕组的内阻抗之和。最后开始测量被试品在 5 个规程点（包括 20%、50%、80%、100%、120% 的额定电压）下二次侧的导纳，计算出误差数据。

如果测量过程中检测线路被误断或者出现接触不良等情况导致测试无法进行,则测试终止,并提示错误信息。当测试完成后,校验仪将显示测试数据,并将测试数据存入便携式存储设备中,或者将数据传送回 PC 端,并显示于相应测试数据处,待工作人员做进一步处理。

3.4 本章小结

本章详细描述了电容式电压互感器误差现场校验仪的组成,以及各部分硬件模块的功能和硬件电路的设计。同时,对于控制系统对于各模块的控制方式和流程进行了详细的说明。

4 上位机数据管理系统设计

4.1 概述

系统在对待测电容式电压互感器检测完成后，需要对所获取的相关检测数据进行整理分类，以便于相关人员存档、抄送、公示等。因此针对于该设备以及相关用户的需求开发了配套的上位机数据管理系统。该系统不仅能有效的管理测试后各个电容式电压互感器的误差数据，同时能够按照规定样式打印出检定证书，并且能够将检测后的误差数据以及检测的设备、检测时的环境等相关信息导入使用单位的内部数据库，方便单位进行后续存档、查看、统计等相关工作。并且，该数据管理系统能够通过串口与上述电容式电压互感器误差现场校验仪通讯，通过上位机操作该电容式电压互感器误差现场校验仪，进行对待测电容式电压互感器的检测操作，检测完成之后，将相关的检测数据时时传回到数据管理软件以及相应的数据库中，实现了操作方便简单智能化的效果。

4.2 系统设计

4.2.1 界面设计

界面以左右结构分成两部分，左侧为数据列表显示区，右侧为数据显示操作区。对于数据列表显示区，包含三个显示数据的列表控件，分别用于显示电压互感器列表、实测电压互感器列表和待关联电压互感器列表。对于数据显示操作区又分为上下结构，上方显示数据的详细信息，下方列出数据操作按键。在数据显示操作区通过两个标签将基本结论数据和测试数据的详细信息和操作分开。对于基本结论数据的数据详细信息区又可分为基本信息、标准器信息、测试环境、测试结论和其他信息。每个部分均列举出相关信息，由用户填写。对于基本结论数据的操作区包含新增电压互感器、修改电压互感器信息、删除电压互感器信息、查找电压互感器、联网上传数据、打印检定证书、退出等功能可供用户操作。对于测试数据的详细信息和操作区又分为上下结构，上方显示测试数据的详细信息，下方列出数据操作按键。对于测试数据的详细信息区以左右结构分为测试基本信息和测试数据显示两个部分。在测试基本信息区列举出测试时的基本信息包括证书编号、测试编号、额定一次电压、额定二次电压、满载负荷、轻载负荷、相别、准确度等级、功率因数、一次接线方式和二次接线方式等信息。其中部分信息在导入数据时自动填写，其余信息需要用户填写。对于测试数据显示部分为一个表格，对应显示的是在 20%、50%、80%、100%和 120%点处所测得的满载和轻载时的数据，其中满载

和轻载时测试的数据包括比值差和相位差值（角差值），比值差和相位差值又包括上升值、下降值、平均值和修约值四项。因此对于测试数据显示的部分为由 16 行 5 列组成的表格。对于测试数据的操作区包含增加新的测试数据，修改指定的测试数据和删除指定的测试数据，其中增加新的测试数据包括增加单个测试数据和批量增加测试数据。

4.2.2 功能设计

通过分析需求之后，对于互感器误差校验数据管理程序分基本结论数据管理和测试数据管理为两大部分。其中基本结论数据管理部分包含新增互感器信息功能、删除互感器信息功能、修改互感器信息功能、查找互感器信息功能、联网上传数据功能、打印检定证书功能等六大功能，而测试数据管理部分包含新增测试数据功能、批量增加测试数据功能、删除测试数据功能、修改测试数据功能、查找测试数据功能、关联检定证书功能。对于互感器校验数据管理程序的功能结构图如图 4.1 所示。

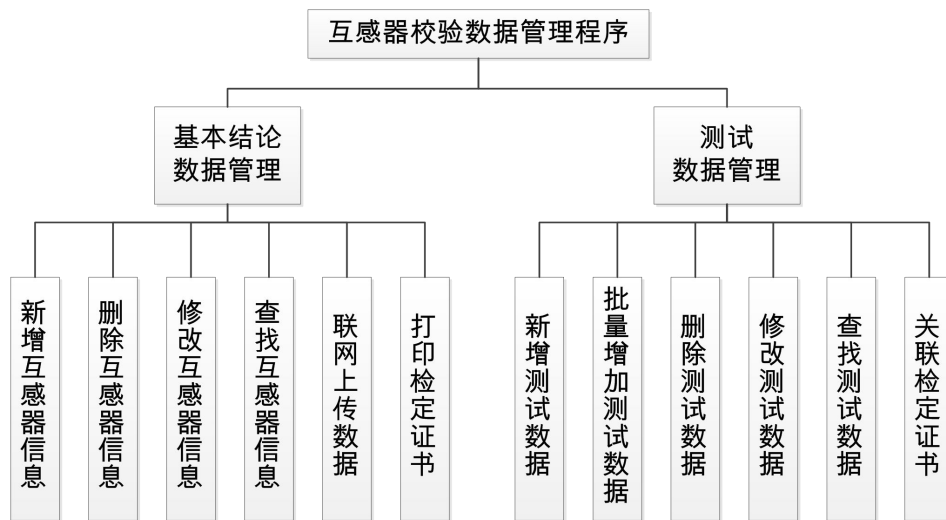


图 4.1 互感器校验数据管理程序的功能结构图

（1）基本结论数据管理

基本结论数据管理功能，是对于每个电压互感器的信息、测试条件、检定结论进行有效管理的功能。其中包括对于电压互感器信息的增、删、改、查的功能；对于数据的联网上传的功能；以及对于所测试的电压互感器的检定结果出具统一证书的功能。

① 新增互感器信息

新增互感器信息功能，可以使用户增加新的待测电压互感器信息，包括待测互感器的基本信息、测试用标准互感器器信息、测试环境状况、测试结论信息以及其他信息。

新增的互感器在电压互感器列表中显示。

② 删除互感器信息

删除互感器信息功能，可以使用户删除已存在与列表中的互感器，删除后，该互感器以及所有跟该互感器相关联的测试数据同时被删除。

③ 修改互感器信息

修改互感器信息功能，可以使用户修改待测电压互感器的详细信息，包括待测互感器的基本信息、测试用标准互感器器信息、测试环境状况、测试结论信息以及其他信息。在修改了待测电压互感器的信息后，如果尚未提交修改信息，可以将已修改的信息还原；如果提交修改信息，那么该待测电压互感器的信息将会被更新，并且不能再自动还原。

④ 查找互感器信息

查找互感器信息功能，可以使用户通过证书编号查询指定待检定的电压互感器或者已检定的电压互感器；通过模糊查询缩小查找指定互感器的范围；通过日期查询可以查找在指定日期检定的电压互感器或者在指定日期到期的电压互感器等功能。

⑤ 联网上传数据

联网上传数据功能，可以使用户将本机数据库中的数据上传到电网的公司数据库中。对于电网的不同子公司，数据库结构存在差异，因此，对于不同用户需要编写指定的联网上传数据的代码。图 4.2 为联网上传数据功能流程图

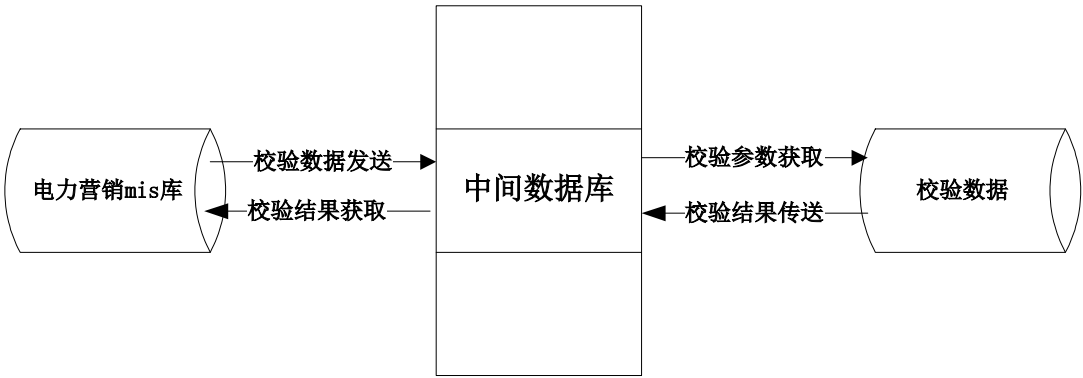


图 4.2 联网上传数据流程图

⑥ 打印检定证书

打印检定证书功能，可以使用户对于已经检定完成的电压互感器，出具统一格式的检定证书。该证书中包含待测电压互感器的基本信息，检定时的环境因素，检定时的客观条件参数，测试数据以及检定结果和建议等信息。该证书格式由国家统一制定。本程序的证书格式采用中华人民共和国国家计量检定规程中关于测量用电压互感器检定规

程中所指定的证书格式作为标准格式进行打印。

(2) 测试数据管理

测试数据管理功能，是对于每组测试数据进行有效管理的功能。其中包括对于每组测试数据进行增、删、改、查的功能以及对于每个检定的互感器和其实际测量出的每组数据进行有效关联的功能。

① 新增测试数据

新增测试数据功能，可以使用户增加新的测试数据。增加新的测试数据时必须填写该数据的证书编号、测试编号以及准确度等级。原则上来说当添加新数据时测试编号和准确度等级已经自动填写，用户需要填写证书编号，以便将该数据与对应证书相关联。测试数据将会在实测电压互感器列表中显示，并且该列表所显示的数据为电压互感器列表中所选中的电压互感器下所有与其相关联的测试数据。

② 批量增加测试数据

批量增加测试数据功能，可以使用户批量增加新的测试数据。一般情况下，用户在对同一待测电压互感器测试多组数据或者对于多台待测电压互感器经行测试完成后，才会统一添加测试数据。因此，对于批量添加的数据将被显示于待关联电压互感器列表中。用户在对于每组待关联的数据填写其所对应的电压互感器的证书编号后，该组数据就会被关联到对应的电压互感器的测试数据中。并且在电压互感器列表中选中该电压互感器后，这组数据会被显示于实测电压互感器列表中。

③ 删除测试数据

删除测试数据功能，可以使用户删除指定的测试数据。在用户选定了一组测试数据后，可以对该组数据进行删除操作。由于删除操作是一个不可逆的过程，因此，在用户删除测试数据前，将提示用户是否确定删除该组数据。当用户同意删除后，该组数据就会从对应的电压互感器下被删除，同时，在数据库中删除该组数据的基本测试信息和测试数据。

④ 修改测试数据

修改测试数据功能，可以使用户修改测试数据的基本测试信息的值，但是不能修改实际的测量值。基本测试信息包括与该组测试数据相对应的证书编号，该组测试数据的测试编号，待检测电压互感器的额定一次电压，额定二次电压、满载负荷、轻载负荷、测试所对应的相别、准确度等级、功率因数等信息。

⑤ 查找测试数据

查找测试数据功能，可使用户查找相关的测试数据。用户可通过准确的测试编号来查找指定的测试数据，也可以通过部分测试编号经行模糊查询。对于每台电压互感器而

言，在实测互感器列表中显示的测试数据信息，默认才去的是根据电压互感器的证书编号进行查询的。同一台电压互感器原则上只有一个证书编号，那么在测试基本信息中对于所有与电压互感器列表中所选中的互感器的证书编号相同的测试数据，将被显示在实测电压互感器列表中。除此之外，查找测试数据功能还支持对于相关时间进行查询。

⑥ 关联检定证书

关联检定证书功能，可以使用户将测试数据与所需打印的证书相关联，根据测量用电压互感器检定规程中所规定的检定证书格式，每份检定证书都需要提供对应的一组或多组检定数据。通过证书编号和测试编号，能够将检测的电压互感器和检测所得到的检测数据相互关联起来，同时也能在打印检定证书的时候自动调用相关测试数据。对于用户所填写的证书编号，如果电压互感器列表中已有的证书编号，那么，将该组测试数据与对应的电压互感器进行关联，在选中该电压互感器后，在实测电压互感器列表中显示该组数据以及与该电压互感器已经关联过的测试数据；如果电压互感器列表中不存在用户所填写的证书编号，则把该组数据在待关联电压互感器列表中显示，表示无法和当前已有的电压互感器相关联，当增加了与此相同的电压互感器的证书编号后，自动将该组数据与拥有相同证书编号的电压互感器相关联。

4.2.3 数据库设计

根据需求分析所知，对于所需存储的信息可分为经行分类，可分为基本结论数据和测试数据两类，其中基本结论数据包含基本信息、标准器信息、测试环境、测试结论以及其他信息，测试数据包含测试基本信息和电压数据。由于所需存储的数据量较大，并且基本结论数据中包含的数据属于通用性数据，而测试数据中包含的数据属于相对独立的数据。因此，将这两大类数据按子类分表存放，则一共需要建立七个表分别存储每类数据。

(1) 基本结论数据

基本结论数据，是用于存储每个电压互感器的信息、测试时的客观因数条件信息以及测试后的检定结果信息。其中包括五张数据库表：基本信息表、标准器信息表、测试环境表、测试结论表和其他信息表。

① 基本信息表 tabJiBenXinXi

基本信息表中存储被检测电容式电压互感器的一些通用信息以及电容式电压互感器检定证书的基本信息，如表 4.1 所示，包括证书编号，送检单位，器具名称，型号规格，额定电压，额定频率，额定负荷，功率因数等。

表 4.1 基本信息表 tabJiBenXinXi

字段名称	数据类型	字段大小	说明
ID	自动 编号	长整型	流水编号
证书编号	文本	255	主键，存储每个证书的编号，此编号唯一且不为空，通过证书编号关联基本结论数据中各表之间的信息
局编号	文本	255	存储局编号
传单编号	文本	255	存储传单编号
送检单位	文本	255	存储送检单位
生产厂家	文本	255	存储生产厂家
型号规格	文本	255	存储设备型号规格
出厂日期	文本	255	存储设备出厂日期
器具名称	文本	255	存储设备名称
准确度等级	文本	255	存储检测的准确度等级
用途	文本	255	存储设备用途
额定一次	文本	255	存储额定一次电压值
额定二次	文本	255	存储额定二次电压值
额定负荷	文本	255	存储额定负荷值
轻载负荷	文本	255	存储轻载负荷值
额定频率	文本	255	存储额定频率
功率因数	文本	255	存储功率因数
额定电压	文本	255	存储额定电压值
资产归属	文本	255	存储资产归属信息
出厂编号	文本	255	存储出厂编号信息
资产编号	文本	255	春初资产编号信息
一次接线方式	文本	255	存储一次接线方式
二次接线方式	文本	255	存储二次接线方式

② 标准器信息表 tabBiaoZhunQiXinXi

标准器信息表中存储用于检测的电容式电压互感器时所需要的标准互感器的基本信息，如表 4.2 所示，包括器具名称、标准器型号、准确度等级、有效日期等信息。

表 4.2 标准器信息表 tabBiaoZhunQiXinXi

字段名称	数据类型	字段大小	说明
ID	自动编号	长整型	流水编号
证书编号	文本	255	主键，存储每个证书的编号，此编号唯一且不为空
器具名称	文本	255	存储标准器名称
准确度等级	文本	255	存储标准器准确度等级
资产编号	文本	255	存储标准器资产编号
出厂编号	文本	255	存储标准器出厂编号
标准器型号	文本	255	存储标准器型号
有效日期	文本	255	存储标准器有效日期

③ 测试环境表 tabCeShiHuanJing

测试环境表中存储检定电容式电压互感器时，检定现场的环境信息，如表 4.3 所示包括检测时的环境温度，环境湿度，检测地点等信息。

表 4.3 测试环境表 tabCeShiHuanJing

字段名称	数据类型	字段大小	说明
ID	自动编号	长整型	流水编号
证书编号	文本	255	主键，存储每个证书的编号，此编号唯一且不为空
温度	文本	255	存储检测时的环境温度
湿度	文本	255	存储检测时的环境湿度
检测地点	文本	255	存储检测地点

④ 测试结论表 tabCeShiJieLun

测试结论表中存储检测电容式电压互感器时的检测项目，相关参数以及检定结果，如表 4.4 所示，包括外观检测、绝缘检测、耐压检测、检测结论等信息。

表 4.4 测试结论表 tabCeShiJieLun

字段名称	数据类型	字段大小	说明
ID	自动	长整型	流水编号

	编号		
证书编号	文本	255	主键，存储每个证书的编号，此编号唯一且不为空
外观检测	文本	255	存储外观检测结论
极性	文本	255	存储极性信息
局部放电	文本	255	存储局部放电信息
绝缘电阻	文本	255	存储绝缘电阻大小
绝缘一次对二次及地	文本	255	存储绝缘一次对二次及地测试的阻值
绝缘一次对地	文本	255	存储绝缘一次对地测试的阻值
绝缘二次对地	文本	255	存储绝缘二次对地测试的阻值
耐压测试	文本	255	存储耐压测试结论
耐压一次对二次及地_电压	文本	255	存储耐压一次对二次及地测试的电压大小
耐压一次对二次及地_时间	文本	255	存储耐压一次对二次及地测试的时间
耐压一次对地_电压	文本	255	存储耐压一次对地测试的电压大小
耐压一次对地_时间	文本	255	存储耐压一次对地测试的时间
耐压一次对二次_电压	文本	255	存储耐压一次对二次测试的电压大小
耐压一次对二次_时间	文本	255	存储耐压一次对二次测试的时间
最大角差变差	文本	255	存储最大角差变差的值
最大比差变差	文本	255	存储最大比差变差的值
耐压人	文本	255	存储耐压测试测试人的信息
结论	文本	255	存储耐压测试结论
备注	文本	255	存储备注信息

⑤ 其他信息表 tabQiTaXinXi

其他信息表中存储检定电容式电压互感器的相关人员信息以及有效期限，如表 4.5 所示，包括测试人员、核验人员、主管、测试日期、有效日期等信息。

表 4.5 其他信息表 tabQiTaXinXi

字段名称	数据类型	字段大小	说明
ID	自动编号	长整型	流水编号
证书编号	文本	255	主键，存储每个证书的编号，此编号唯一且不为空
测试	文本	255	存储测试人员信息

主管	文本	255	存储主管信息
核验	文本	255	存储核验人员信息
周期	文本	255	存储有效周期
测试日期	文本	255	存储测试日期
有效日期	文本	255	存储有效日期

(1) 电压测试数据

电压测试数据，是用于存储对于电压互感器做测试时，实际测试条件和实际测试得到的数据。其中包括两张表：测试基本信息表和电压数据表。

① 测试基本信息表 tabCeShiJiBenXinXi

测试基本信息表中存储检测电容式电压互感器时各项参数的信息，如表 4.6 所示，包括额定一次电压、额定二次电压、满载负荷、轻载负荷、准确度等级、功率因数等信息。

表 4.6 测试基本信息表 tabCeShiJiBenXinXi

字段名称	数据类型	字段大小	说明
ID	自动编号	长整型	主键，流水编号
证书编号	文本	255	存储每个证书的编号，标识测试数据所属证书
测试编号	文本	255	存储每个测试的编号，通过测试编号关联每组测试的数据
额定一次	文本	255	存储测试时额定一次电压值
额定二次	文本	255	存储测试时额定二次电压值
满载负荷	文本	255	存储测试时满载负荷值
轻载负荷	文本	255	存储测试时轻载负荷值
相别	文本	255	存储三相测试时测试的相位
准确度	文本	255	存储测试时的准确度等级
功率因数	文本	255	存储测试时的功率因数
一次接线	文本	255	存储测试时一次侧接线的方式
二次接线	文本	255	存储测试时二次侧接线的方式
比差最大变差	文本	255	存储测试时比差最大变差
角差最大变差	文本	255	存储测试时角差最大变差

② 电压数据表 tabDianYaData

测试数据表中存储检测电容式电压互感器后得到的各项结果数据，如表 4.7 所示，包括满载比差值、满载角差值、轻载比差值、轻载角差值等信息。

表 4.7 电压数据表 tabDianYaData

字段名称	数据类型	字段大小	说明
ID	自动编号	长整型	主键，流水编号
测试编号	文本	255	存储每个测试的编号，通过测试编号关联每组测试的数据
满载比差上升值 20	文本	255	存储 20%点的满载比差上升值
满载比差上升值 50	文本	255	存储 50%点的满载比差上升值
满载比差上升值 80	文本	255	存储 80%点的满载比差上升值
满载比差上升值 100	文本	255	存储 100%点的满载比差上升值
满载比差上升值 120	文本	255	存储 120%点的满载比差上升值
满载比差下降值 20	文本	255	存储 20%点的满载比差下降值
满载比差下降值 50	文本	255	存储 50%点的满载比差下降值
满载比差下降值 80	文本	255	存储 80%点的满载比差下降值
满载比差下降值 100	文本	255	存储 100%点的满载比差下降值
满载比差平均值 20	文本	255	存储 20%点的满载比差平均值
满载比差平均值 50	文本	255	存储 50%点的满载比差平均值
满载比差平均值 80	文本	255	存储 80%点的满载比差平均值
满载比差平均值 100	文本	255	存储 100%点的满载比差平均值
满载比差平均值 120	文本	255	存储 120%点的满载比差平均值
满载比差修约值 20	文本	255	存储 20%点的满载比差修约值
满载比差修约值 50	文本	255	存储 50%点的满载比差修约值
满载比差修约值 80	文本	255	存储 80%点的满载比差修约值
满载比差修约值 100	文本	255	存储 100%点的满载比差修约值
满载比差修约值 120	文本	255	存储 120%点的满载比差修约值
满载角差上升值 20	文本	255	存储 20%点的满载角差上升值
满载角差上升值 50	文本	255	存储 50%点的满载角差上升值

满载角差上升值 80	文本	255	存储 80%点的满载角差上升值
满载角差上升值 100	文本	255	存储 100%点的满载角差上升值
满载角差上升值 120	文本	255	存储 120%点的满载角差上升值
满载角差下降值 20	文本	255	存储 20%点的满载角差下降值
满载角差下降值 50	文本	255	存储 50%点的满载角差下降值
满载角差下降值 80	文本	255	存储 80%点的满载角差下降值
满载角差下降值 100	文本	255	存储 100%点的满载角差下降值
满载角差平均值 20	文本	255	存储 20%点的满载角差平均值
满载角差平均值 50	文本	255	存储 50%点的满载角差平均值
满载角差平均值 80	文本	255	存储 80%点的满载角差平均值
满载角差平均值 100	文本	255	存储 100%点的满载角差平均值
满载角差平均值 120	文本	255	存储 120%点的满载角差平均值
满载角差修约值 20	文本	255	存储 20%点的满载角差修约值
满载角差修约值 50	文本	255	存储 50%点的满载角差修约值
满载角差修约值 80	文本	255	存储 80%点的满载角差修约值
满载角差修约值 100	文本	255	存储 100%点的满载角差修约值
满载角差修约值 120	文本	255	存储 120%点的满载角差修约值
轻载比差上升值 20	文本	255	存储 20%点的轻载比差上升值
轻载比差上升值 100	文本	255	存储 100%点的轻载比差上升值
轻载比差平均值 20	文本	255	存储 20%点的轻载比差平均值
轻载比差平均值 50	文本	255	存储 50%点的轻载比差平均值
轻载比差平均值 80	文本	255	存储 80%点的轻载比差平均值
轻载比差平均值 100	文本	255	存储 100%点的轻载比差平均值
轻载比差平均值 120	文本	255	存储 120%点的轻载比差平均值
轻载比差修约值 20	文本	255	存储 20%点的轻载比差修约值
轻载比差修约值 50	文本	255	存储 50%点的轻载比差修约值
轻载比差修约值 80	文本	255	存储 80%点的轻载比差修约值
轻载比差修约值 100	文本	255	存储 100%点的轻载比差修约值
轻载比差修约值 120	文本	255	存储 120%点的轻载比差修约值
轻载角差上升值 20	文本	255	存储 20%点的轻载角差上升值
轻载角差上升值 100	文本	255	存储 100%点的轻载角差上升值

轻载角差平均值 20	文本	255	存储 20%点的轻载角差平均值
轻载角差平均值 50	文本	255	存储 50%点的轻载角差平均值
轻载角差平均值 80	文本	255	存储 80%点的轻载角差平均值
轻载角差平均值 100	文本	255	存储 100%点的轻载角差平均值
轻载角差平均值 120	文本	255	存储 120%点的轻载角差平均值
轻载角差修约值 20	文本	255	存储 20%点的轻载角差修约值
轻载角差修约值 50	文本	255	存储 50%点的轻载角差修约值
轻载角差修约值 80	文本	255	存储 80%点的轻载角差修约值
轻载角差修约值 100	文本	255	存储 100%点的轻载角差修约值
轻载角差修约值 120	文本	255	存储 120%点的轻载角差修约值

4.3 详细设计

4.3.1 数据结构设计

在互感器误差校验数据管理程序中,通过对于需求分析后,对程序中所涉及的数据进行分类,并结合数据库的设计,以及相关功能的考虑,定义三个数据大类:基本结论数据类 ClassJiBenJieLunShuJu、电压测试数据类 ClassDianYaCeShiShuJu 和打印数据类 ClassPrintData。其中基本结论数据类 ClassJiBenJieLunShuJu 由五个类构成,用于存储基本结论数据,对应于数据库中的存储基本结论数据所用的五张表;电压测试数据类 ClassDianYaCeShiShuJu 由两个类构成,用于存储电压互感器测试数据,对应于数据库中存储测试数据所用的两张表;而打印数据类 ClassPrintData 则是个独立的存储打印检定证书时所需要的数据的类。为了便于程序对数据的处理以及转换,所有类中的属性均为字符串类型。

(1) 基本结论数据类 ClassJiBenJieLunShuJu

基本结论数据类 ClassJiBenJieLunShuJu,如图 4.3 所示,由基本信息类 ClassJiBenXinXi、标准器信息类 ClassJiBenXinXi、测试环境类 ClassCeShiHuanJing、测试结论类 ClassCeShiHuanJing 和测试结论类 ClassCeShiJieLun 五个类构成。基本信息类 ClassJiBenXinXi 用于存储送检的电压互感器的基本信息,对应数据库中的基本信息表 tabJiBenXinXi;标准器信息类 ClassJiBenXinXi 用于存储测试电压互感器时所用到的标准器的信息,对应于数据库中的标准器信息表 tabBiaoZhunQiXinXi;测试环境类 ClassCeShiHuanJing 用于存储测试电压互感器时,实际的环境信息,对应于数据库中的

测试环境表 tabCeShiHuanJing；测试结论类 ClassCeShiHuanJing 用于存储检定电压互感器的检定结果，对应于数据库中的测试结论表 tabCeShiJieLun；其他信息类 ClassQiTaXinXi 用于存储其他与测试相关的信息，对应于数据库中的其他信息表 tabQiTaXinXi。

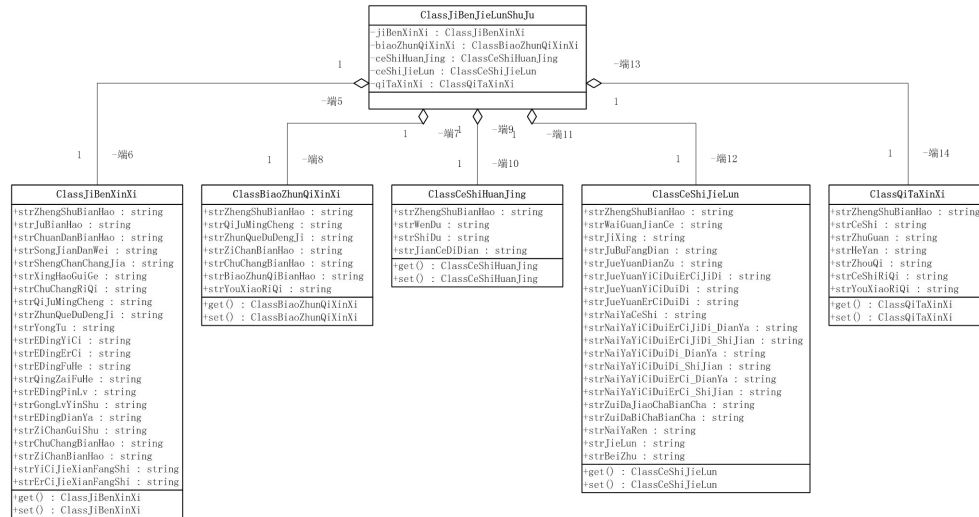


图 4.3 基本结论数据类

① 基本信息类 ClassJiBenXinXi

基本信息类 ClassJiBenXinXi，包含 22 个属性和 2 个方法。该类的属性包含证书编号、局编号、传单编号、送检单位、生产厂家、型号规格、出厂日期、器具名称、准确度等级、用途、额定一次、额定二次、额定负荷、轻载负荷、额定频率、功率因数、额定电压、资产归属、出厂编号、资产编号、一次接线方式和二次接线方式。其命名方式以 str 加各属性名称的拼音全拼表示。其中证书编号用于标识每台送检的电压互感器，以及每份不同的检定证书，是唯一不可重复不能为空值的属性。同时证书编号是关联基本信息类和基本结论数据类中其他类的数据的标识符。该类的方法有获取基本信息的方法 get() 和设置基本信息的方法 set()。

基本信息类，主要存储的是送检的电压互感器的基本信息。该类对应于数据库中基本信息表 tabJiBenXinXi 中的数据字段。由于该类信息无法自动获取或者预先设置，因此，该类数据主要来自用户在界面中对应的输入框中输入的值。

② 标准器信息类 ClassBiaoZhunQiXinXi

标准器信息类 ClassBiaoZhunQiXinXi，包含 7 个属性和 2 个方法。该类的属性包含

证书编号、器具名称、准确度等级、资产编号、出厂编号、标准器型号和有效日期。其命名方式为 str 加各属性名称的拼音全拼表示。其中证书编号用于标识每台送检的电压互感器，以及每份不同的检定证书，是唯一不可重复不能为空值的属性。同时证书编号是关联标准器信息类和基本结论数据类中其他类的数据的标识符。该类的方法有获取标准器信息的方法 `get()` 和设置标准器信息的方法 `set()`。

标准器信息类，主要存储的是测试电压互感器时所用到的标准器的信息。该类对应于数据库中的标准器信息表 `tabBiaoZhunQiXinXi` 中的数据字段。由于每个地方所使用的标准互感器不同，因此该信息不能预先设置，但是在用户首次填写标准器信息之后，可以将该信息保存下来，下次使用时能够直接选取，而不需要反复填写。因此，该类的数据来自用户界面中对应的输入框中的值。

③ 测试环境类 `ClassCeShiHuanJing`

测试环境类 `ClassCeShiHuanJing`，包括 4 个属性和 2 个方法。该类的属性包括证书编号、温度、湿度和检测地点。其命名方式为 str 加各属性名称的拼音全拼表示。其中证书编号用于标识每台送检的电压互感器，以及每份不同的检定证书，是唯一不可重复不能为空值的属性。同时证书编号是关联测试环境类和基本结论数据类中其他类的数据的标识符。该类的方法有获取测试环境信息的方法 `get()` 和设置测试环境信息的方法 `set()`。

测试环境类，用于存储测试电压互感器时，实际的环境信息。该类对应于数据库中的测试环境表 `tabCeShiHuanJing` 中的数据字段。由于每次测试的时候，环境温度、湿度存在差异，测试地点不尽相同。但是，对于温度和湿度一般偏差不大，可以预设部分常用值以供用户选取，而测试地点可以在用户首次填写测试地点信息之后，将该信息保存下来，下次使用时能够直接选取，而不需要反复填写。因此，该类的数据来自用户界面中对应的输入框中的值。

④ 测试结论类 `ClassCeShiJieLun`

测试结论类 `ClassCeShiJieLun`，包括 20 个属性和 2 个方法。该类的属性包括证书编号、外观检测、极性、局部放电、绝缘电阻、绝缘一次对二次及地、绝缘一次对地、绝缘二次对地、耐压测试、耐压一次对二次及地_电压、耐压一次对二次及地_时间、耐压一次对地_电压、耐压一次对地_时间、耐压一次对二次_电压、耐压一次对二次_时间、最大角差变差、最大比差变差、耐压人、结论和备注。其命名方式为 str 加各属性名称的拼音全拼表示。其中证书编号用于标识每台送检的电压互感器，以及每份不同的检定证书，是唯一不可重复不能为空值的属性。同时证书编号是关联测试结论类和基本结论数据类中其他类的数据的标识符。该类的方法有获取测试结论信息的方法 `get()` 和设置测

试结论信息的方法 `set()`。

测试结论类，用于存储检定电压互感器的检定结果。该类对应于数据库中的测试结论表 `tabCeShiJieLun` 中的数据字段。由于对于电压互感器的校验包含多项内容，对于不同的测试，采用的设备也不同，而且对于同一个电压互感器每次测试的结果都会存在差异，所以该部分的值不能够预先设置，只能让用户填写。因此，该类的数据来自用户界面中对应的输入框中的值。

⑤ 其他信息类 `ClassQiTaXinXi`

其他信息类 `ClassQiTaXinXi`，包含 7 个属性和 2 个方法。该类的属性包括证书编号、测试、主管、核验、周期、测试日期和有效日期。其命名方式为 `str` 加各属性名称的拼音全拼表示。其中证书编号用于标识每台送检的电压互感器，以及每份不同的检定证书，是唯一不可重复不能为空值的属性。同时证书编号是关联其他信息类和基本结论数据类中其他类的数据的标识符。该类的方法有获取其他信息的方法 `get()` 和设置其他信息的方法 `set()`。

其他信息类，用于存储其他与测试相关的信息。该类对应于数据库中的其他信息表 `tabQiTaXinXi` 中的字段。由于其他信息中存储的是关于测试人、主管和核验人等执行人员的信息以及周期、测试日期和有效日期等时间信息，在一段时间内执行人员几乎不变，而对于电压互感器的测试的有效周期为一个或者几个固定的天数，而且有效日期可以通过测试日期和周期推算出来，所以该类的大多数值可以预先设置，供用户选取，并且有效日期可以在用户选取周期和填写测试日期后自动推算出来显示。因此，该类的数据来自用户界面中对应的输入框中的值。

(2) 电压测试数据类 `ClassDianYaCeShiShuJu`

电压测试数据类 `ClassDianYaCeShiShuJu`，如图 4.4 所示，由测试基本信息类 `ClassCeShiJiBenXinXi` 和电压数据类 `ClassDianYaData` 两个类构成。测试基本信息类 `ClassCeShiJiBenXinXi` 用于存储测试电压互感器时的客观条件参数，包括额定一次电压、额定二次电压、准确度等级、功率因数等信息和与测试数据所对应的互感器信息，对应于数据库中的测试基本信息表 `tabCeShiJiBenXinXi`；电压数据类 `ClassDianYaData` 用于存储实际测试时电压互感器的测试数据，其中包括在 20%点、50%点、80%点、100%点和 120%点的满载与轻载的比值差和相位差，对应于数据库中的电压数据表 `tabDianYaData`。

① 测试基本信息类 `ClassCeShiJiBenXinXi`

测试基本信息类 `ClassCeShiJiBenXinXi`，包含 13 个属性和 2 个方法。该类的属性包括证书编号、测试编号、额定一次、额定二次、满载负荷、轻载负荷、相别、准确度、功率因数、一次接线、二次接线、比差最大变差和角差最大变差。其命名方式为 `str` 加

各属性名称的拼音全拼表示。其中证书编号用于标识每台送检的电压互感器，以及每份不同的检定证书，是唯一不可重复不能为空值的属性。同时证书编号是关联测试基本信息类和基本结论数据类中各个类的数据的标识符。测试编号用于标识每组测试数据，以及每组测试数据所对应的测试基本信息，是唯一不可重复不能为空值的属性。通过测试基本信息类中的证书编号和测试编号将基本结论数据类和电压测试类相关联，同时关联每台送检的电压互感器的不同测试数据。该类的方法有获取测试基本信息的方法 `get()` 和设置测试基本信息的方法 `set()`。

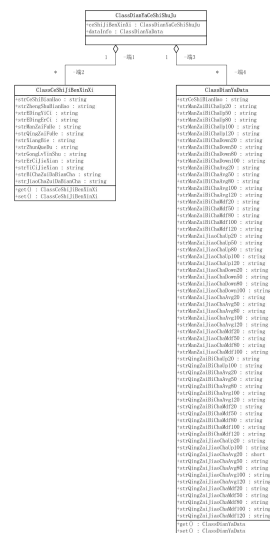


图 4.4 电压测试数据类

测试基本信息类，用于存储测试电压互感器时的客观条件参数信息和与测试数据所对应的电压互感器信息，对应于数据库中的测试基本信息表 `tabCeShiJiBenXinXi` 中的数据字段。由于该类中存储的是电压互感器测试时的客观条件参数，该类的部分参数在检测时，被自动记录下来。所以，大部分值在数据导入的时候就能够自动导入到程序当中，无需用户填写。但是对于每组测试数据与每台电压互感器相关联的部分还是得用户自主填写。通过填写测试基本信息中的证书编号来关联每组测试数据与每台电压互感器。若未填写，则将该组数据分类到待关联电压互感器测试数据当中。因此，该类的数据来自测试数据导入的值和用户界面中对应的输入框中的值。

② 电压数据类 ClassDianYaData

电压数据类 `ClassDianYaData`，包括 63 个属性和 2 个方法。其中该类的属性包括测试编号、20%点、50%点、80%点、100%点和 120%点的满载比差上升值、20%点、50%

点、80%点和 100%点的满载比差下降值、20%点、50%点、80%点、100%点和 120%点的满载比差平均值、20%点、50%点、80%点、100%点和 120%点的满载比差修约值、20%点、50%点、80%点、100%点和 120%点的满载角差上升值、20%点、50%点、80%点和 100%点的满载角差下降值、20%点、50%点、80%点、100%点和 120%点的满载角差平均值、20%点、50%点、80%点、100%点和 120%点的满载角差修约值、20%点和 100%点的轻载比差上升值、20%点、50%点、80%点、100%点和 120%点的轻载比差平均值、20%点、50%点、80%点、100%点和 120%点的轻载比差修约值、20%点和 100%点的轻载角差上升值、20%点、50%点、80%点、100%点和 120%点的轻载角差平均值、20%点、50%点、80%点、100%点和 120%点的轻载角差修约值。其命名方式为 str 加各属性名称的拼音全拼表示，而上升值、下降值、平均值、修约值分别用 Up、Down、Avg 和 Mdf 表示。其中测试编号用于标识每组测试数据，以及每组测试数据所对应的测试基本信息，是唯一不可重复不能为空值的属性。该类的方法有获取电压数据的方法 get() 和设置电压数据的方法 set()。

电压数据类，用于存储实际测试时电压互感器的测试数据。该类对应于数据库中的电压数据表 tabDianYaData 中数据字段。由于该类中所有的数据都是通过仪器测试得到，用户只需要导入测试数据，所有的数据将会自动导入到程序中。因此，该类的数据全部来自测试数据导入的值。

(3) 打印数据类 ClassPrintData

ClassPrintData
+EDEC : string
+EDYC : string
+GLYS : string
+MZBC1 : string
+MZBC2 : string
+MZBC3 : string
+MZBC4 : string
+MZBC5 : string
+MZFH : string
+MZJC1 : string
+MZJC2 : string
+MZJC3 : string
+MZJC4 : string
+MZJC5 : string
+QZBC1 : string
+QZBC2 : string
+QZBC3 : string
+QZBC4 : string
+QZBC5 : string
+QZFH : string
+QZJC1 : string
+QZJC2 : string
+QZJC3 : string
+QZJC4 : string
+QZJC5 : string
+ZQDDJ : string
+getPTPrintData() : ClassPrintData

图 4.4 打印数据类

数据打印类 `ClassPrintData`，如图 4.5 所示，是个独立的类，用于存储打印检定证书时误差数据打印页面所需要的数据。由于检测时，对于同一电压互感器，需要测量在不同额定一次电压、额定二次电压、满载负荷、轻载负荷时的数据，因此，得到的测试数据会有多组，均需要在误差数据表中打印出来。为了便于打印，将误差数据打印页面的打印功能单独提炼出来，进行单独打印操作。数据打印类 `ClassPrintData`，包含 26 个属性和一个方法。该类中的属性包含额定一次电压 `EDYC`、额定二次电压 `EDEC`、功率因数 `GLYS`、满载负荷 `MZFH`、轻载负荷 `QZFH`、准确度等级 `ZQDDJ` 和 20%点、50%、80%点、100%点、120 点的满载比值差 `MZBC1-MZBC5`、满载相位差 `MZJC1-MZJC5`、轻载比值差 `QZBC1-QZBC5`、轻载相位差 `QZJC1-QZJC5`，用于存储指定客观条件下的测试数据。该类的方法为获取测试数据方法 `getPTPrintData()`，用于从不同类获取指定的打印误差数据时所需要的数据。

4.3.2 数据处理方法设计

(1) 数据操作方法类

数据操作方法类 `Function`，如图 4.5 所示，包含 12 个方法，主要用于实现程序中的逻辑功能，包括实现数据传递、实现数据同步、实现证书打印以及程序异常处理等功能。

Function
<pre> +getInfo() +setInfo() +getDataInfo() +setDataInfo() +getDianYaFileDate() : ClassDianYaCeShiShuJu +drawFengMian() +drawJianDingZhengShu_1() +drawDianYaJianDingZhengShu_2() +drawPrintData() +refreshDGV() +refreshDGV_3() +getError() </pre>

图 4.5 数据操作方法类

① 数据传递方法

`getInfo()`是获取电压互感器的基本结论信息的方法，通过该方法，将电压互感器的基本结论信息类中的数据显示到用户界面中的指定位置。

`setInfo()`是设置电压互感器的基本结论信息的方法，通过该方法，将用户界面中的指定位置的电压互感器的基本结论信息获取到电压互感器基本结论信息类中。

`getDataInfo()`是获取电压测试数据的方法,通过该方法,将电压测试数据类中的数据显示到用户界面中的指定位置。

`setDataInfo()`是设置电压测试数据的方法,通过该方法,将用户界面中的指定位置的电压测试数据获取到电压测试数据类中。

`getDianYaFileDate()`是获取电压文件数据的方法,通过该方法,将用户导入的电压测试数据文件中的数据对应添加到电压测试数据类中。

② 证书打印方法

`drawFengMian()`是绘制封面的方法,通过该方法,绘制电压互感器检定证书的封面页。通过调用打印函数后,可打印出电压互感器检定证书的封面页。

`drawJianDingZhengShu_1()`是绘制检定证书 1 的方法,通过该方法,绘制电压互感器检定证书内页。通过调用打印函数后,可打印出电压互感器检定证书内页。

`drawDianYaJianDingZhengShu_2()`是绘制检定证书 2 的方法,通过该方法,绘制电压互感器检定证书的误差数据页。通过调用打印函数后,可打印出电压互感器检定证书的误差数据页。

`drawPrintData()`是绘制打印数据的方法,通过该方法,绘制电压互感器检定证书的误差校验数据。该数据可能由一组也可能为多组组成。通过调用打印函数后,可打印出电压互感器检定证书的误差校验数据。

③ 数据同步方法

`refreshDGV()`是刷新列表的方法,通过该方法,可以刷新显示电压互感器基本结论信息的电压互感器列表和显示电压测试数据的实测电压互感器列表。在数据库中的数据变更后,调用此方法,实现用户界面的信息与数据库中的信息同步。

`refreshDGV_3()`是刷新列表 3 的方法,通过该方法,可以刷新显示尚未关联电压互感器的待关联电压互感器列表。在数据库中的数据变更后,调用此方法,实现用户界面的信息与数据库中的信息同步。

④ 异常处理方法

`getError()`是获取错误信息的方法,通过该方法,可以将程序运行过程中出现的错误记录到指定的文件当中,便于对程序的维护和更新。

(2) 数据库操作方法类

数据库操作方法类 `DBFun`,如图 4.6 所示,包含 1 个属性和 40 个方法,主要用于实现数据库操作功能,包括对于数据的增、删、改、查以及校验等功能。

① 数据校验方法

`checkZhengShuBianHao()`是检测证书编号方法,用于检测证书编号是否存在,如果

存在，则返回 **false**，处理数据时，对该编号所对应的电压互感器基本结论数据信息进行数据更新操作，如果不存在，则返回 **true**，处理数据时，在数据库中新建该证书编号的电压互感器基本结论信息。

checkCeShiBianHao()是检测测试编号方法，用于检测测试编号是否存在，如果存在，则返回 **false**，处理数据时，对该编号所对应的电压测试数信息据进行数据更新操作，如果不存在，则返回 **true**，处理数据时，在数据库中新建该测试编号的电压测试数据信息。

DBFun
+strConnLocal : string
+addBiaoZhunQiXinXi ()
+addCeShiHuanQing ()
+addCeShiJiBenXinXi ()
+addCeShiJieLun ()
+addDianYaCeShiShuJuXinXi () : int
+addDianYaDataInfo ()
+addDianYaJiBenJieLunShuJu () : int
+addJiBenXinXi ()
+addQiTaXinXi ()
+checkCeShiBianHao () : bool
+checkZhengShuBianHao () : bool
+deleteBiaoZhunQiXinXi ()
+deleteCeShiHuanJing ()
+deleteCeShiJiBenXinXi ()
+deleteCeShiJieLun ()
+deleteDianYaCeShiShuJuXinXi () : int
+deleteDianYaDataInfo ()
+deleteDianYaJiBenJieLunShuJu () : int
+deleteJiBenXinXi ()
+deleteQiTaXinXi ()
+getAllCeShi () : object
+getAllHuGanQi () : object
+getBiaoZhunQiXinXi () : ClassBiaoZhunQiXinXi
+getCeShiHuanJing () : ClassCeShiHuanJing
+getCeShiJiBenXinXi () : ClassCeShiJiBenXinXi
+getCeShiJieLun () : ClassCeShiJieLun
+getDianYaCeShiShuJuXinXi () : ClassDianYaCeShiShuJu
+getDianYaDataInfo () : ClassDianYaData
+getDianYaJiBenJieLunShuJu () : ClassJiBenJieLunShuJu
+getJiBenXinXi () : ClassJiBenXinXi
+getQiTaXinXi () : ClassQiTaXinXi
+updateBiaoZhunQiXinXi ()
+updateCeShiHuanJing ()
+updateCeShiJiBenXinXi ()
+updateCeShiJieLun ()
+updateDianYaCeShiShuJuXinXi () : int
+updateDianYaDataInfo ()
+updateDianYaJiBenJieLunShuJu () : int
+updateJiBenXinXi ()
+updateQiTaXinXi ()

图 4.6 数据库操作方法类

② 数据查询方法

getAllHuGanQi()是获取全部互感器信息方法，通过该方法可以获取到数据库中所有

电压互感器的基本结论信息，其中包括基本信息、标准器信息、测试环境、测试结论和其他信息。

`getAllCeShi()`是获取全部电压测试数据信息的方法，通过该方法可以获取到数据库中同一测试互感器的全部测试数据信息，其中包括测试基本信息和电压数据。

`getDianYaJiBenJieLunShuJu()`是获取电压互感器的基本结论信息的方法，通过该方法可以获取到数据库中指定证书编号的电压互感器的基本结论信息。由于电压互感器的基本结论信息由基本信息、标准器信息、测试环境、测试结论和其他信息五个部分组成，所以该方法由获取基本信息的方法、获取标准器信息的方法、获取测试环境的方法、获取测试结论的方法和获取其他信息的方法五个方法构成。

`getJiBenXinXi()`是获取基本信息的方法，通过该方法可以获取到数据库中指定证书编号的互感器的基本信息。

`getBiaoZhunQiXinXi()`是获取标准器信息的方法，通过该方法可以获取到数据库中指定证书编号的互感器的标准器信息。

`getCeShiHuanQing()`是获取测试环境的方法，通过该方法可以获取到数据库中指定证书编号的互感器的测试环境。

`getCeShiJieLun()`是获取测试结论的方法，通过该方法可以获取到数据库中指定证书编号的互感器的测试结论。

`getQiTaXinXi()`是获取其他信息的方法，通过该方法可以获取到数据库中指定证书编号的互感器的其他信息。

`getDianYaCeShiShuJuXinXi()`是获取电压测试数据信息的方法，通过该方法可以获取到数据库中指定测试编号的电压测试数据信息。由于电压测试数据信息由测试基本信息和电压数据 2 个部分组成，所以该方法由获取测试基本信息的方法和获取电压数据的方法 2 个方法构成。

`getCeShiJiBenXinXi()`是获取测试基本信息的方法，通过该方法可以获取到数据库中指定测试编号的测试基本信息。

`getDianYaDataInfo()`是获取电压数据的方法，通过该方法可以获取到数据库中指定测试编号的电压数据。

③ 数据添加方法

`addDianYaJiBenJieLunShuJu()`是添加电压基本结论数据的方法，通过该方法可以将指定的证书编号的互感器的电压基本结论数据添加到数据库中。由于电压互感器的基本结论信息由基本信息、标准器信息、测试环境、测试结论和其他信息五个部分组成，所以该方法由添加基本信息的方法、添加标准器信息的方法、添加测试环境的方法、添加

测试结论的方法和添加其他信息的方法五个方法构成。如果添加数据成功则返回 1；如果添加数据失败则返回 0，同时将错误记录在指定文档中；否则返回-1。

addJiBenXinXi()是添加基本信息的方法,通过该方法可以将指定的证书编号的互感器的基本信息添加到数据库中。

addBiaoZhunQiXinXi()是添加标准器信息的方法,通过该方法可以将指定的证书编号的互感器的标准器信息添加到数据库中。

addCeShiHuanQing()是添加测试环境的方法,通过该方法可以将指定的证书编号的互感器的测试环境添加到数据库中。

addCeShiJieLun()是添加测试结论的方法,通过该方法可以将指定的证书编号的互感器的测试结论添加到数据库中。

addQiTaXinXi()是添加其他信息的方法,通过该方法可以将指定的证书编号的互感器的其他信息添加到数据库中。

addDianYaCeShiShuJuXinXi()是添加电压测试数据信息的方法，通过该方法可以将指定的测试编号的电压测试数据信息添加到数据库中。由于电压测试数据信息由测试基本信息和电压数据 2 个部分组成，所以该方法由添加测试基本信息的方法和添加电压数据的方法 2 个方法构成。如果添加数据成功则返回 1；如果添加数据失败则返回 0，同时将错误记录在指定文档中；否则返回-1。

addCeShiJiBenXinXi()是添加测试基本信息的方法,通过该方法可以将指定的测试编号的互感器的测试基本信息添加到数据库中。

addDianYaDataInfo()是添加电压数据的方法，通过该方法可以将指定的测试编号的互感器的电压数据添加到数据库中。

④ 数据删除方法

deleteDianYaJiBenJieLunShuJu()是删除电压基本结论数据的方法，通过该方法可以将指定的证书编号的互感器的电压基本结论数据从数据库中删除。由于电压互感器的基本结论信息由基本信息、标准器信息、测试环境、测试结论和其他信息五个部分组成，所以该方法由删除基本信息的方法、删除标准器信息的方法、删除测试环境的方法、删除测试结论的方法和删除其他信息的方法五个方法构成。如果删除数据成功则返回 1；如果删除数据失败则返回 0，同时将错误记录在指定文档中；否则返回-1。

deleteJiBenXinXi()是删除测试基本信息的方法,通过该方法可以将指定的测试编号的互感器的测试基本信息从数据库中删除。

deleteBiaoZhunQiXinXi()是删除标准器信息的方法,通过该方法可以将指定的证书编号的互感器的标准器信息从数据库中删除。

`deleteCeShiHuanQing()`是删除测试环境的方法,通过该方法可以将指定的证书编号的互感器的测试环境从数据库中删除。

`deleteCeShiJieLun()`是删除测试结论的方法,通过该方法可以将指定的证书编号的互感器的测试结论从数据库中删除。

`deleteQiTaXinXi()`是删除其他信息的方法,通过该方法可以将指定的证书编号的互感器的其他信息从数据库中删除。

`deleteDianYaCeShiShuJuXinXi()`是删除电压测试数据信息的方法,通过该方法可以将指定的测试编号的电压测试数据信息从数据库中删除。由于电压测试数据信息由测试基本信息和电压数据 2 个部分组成,所以该方法由删除测试基本信息的方法和删除电压数据的方法 2 个方法构成。如果删除数据成功则返回 1; 如果删除数据失败则返回 0, 同时将错误记录在指定文档中; 否则返回-1。

`deleteCeShiJiBenXinXi()`是删除测试基本信息的方法,通过该方法可以将指定的测试编号的互感器的测试基本信息从数据库中删除。

`deleteDianYaDataInfo()`是删除电压数据的方法,通过该方法可以将指定的测试编号的互感器的电压数据从数据库中删除。

⑤ 数据更新方法

`updateDianYaJiBenJieLunShuJu()`是更新电压基本结论数据的方法,通过该方法可以更新数据库中指定的证书编号的互感器的电压基本结论数据的信息。由于电压互感器的基本结论信息由基本信息、标准器信息、测试环境、测试结论和其他信息五个部分组成,所以该方法由更新基本信息的方法、更新标准器信息的方法、更新测试环境的方法、更新测试结论的方法和更新其他信息的方法五个方法构成。如果更新数据成功则返回 1; 如果更新数据失败则返回 0, 同时将错误记录在指定文档中; 否则返回-1。

`updateJiBenXinXi()`是更新基本信息的方法,通过该方法可以更新数据库中指定的证书编号的互感器的基本信息。

`updateBiaoZhunQiXinXi()`是更新标准器信息的方法,通过该方法可以更新数据库中指定的证书编号的互感器的标准器信息。

`updateCeShiHuanQing()`是更新测试环境的方法,通过该方法可以更新数据库中指定的证书编号的互感器的测试环境。

`updateCeShiJieLun()`是更新测试结论的方法,通过该方法可以更新数据库中指定的证书编号的互感器的测试结论。

`updateQiTaXinXi()`是更新其他信息的方法,通过该方法可以更新数据库中指定的证书编号的互感器的其他信息。

updateDianYaCeShiShuJuXinXi()是更新电压测试数据信息的方法,通过该方法可以更新数据库中指定的测试编号的电压测试数据信息。由于电压测试数据信息由测试基本信息和电压数据 2 个部分组成,所以该方法由更新测试基本信息的方法和更新电压数据的方法 2 个方法构成。如果更新数据成功则返回 1;如果更新数据失败则返回 0,同时将错误记录在指定文档中;否则返回-1。

updateCeShiJiBenXinXi()是更新测试基本信息的方法,通过该方法可以更新数据库中指定的测试编号的互感器的测试基本信息。

updateDianYaDataInfo()是更新电压数据的方法,通过该方法可以更新数据库中指定的测试编号的互感器的电压数据。

4.4 数据通讯接口设计

数据通信是本系统十分重要的一个部分,它是连接电容式电压互感器误差现场校验仪和 PC 机的一个桥梁。PC 机将指令通过通讯接口发送给校验仪,校验仪执行 PC 机发送的指令后,将对电容式电压互感器进行校验,当校验完成后,将校验结果通过数据通讯接口返回给 PC 机,供 PC 机对于校验后的结果做进一步的处理。

本系统针对于电容式电压互感器误差现场校验仪与上位机数据管理软件的特点,选取了 EIA-RS-232 标准的串口与校验仪相连接,并且通过连接 PL-2303HX USB 转串口桥控制器,将串口转为 USB 口,与电脑相连接,这样就能使得上位机与下位机能够进行数据通讯了。

4.4.1 EIA-RS-232 标准

EIA-RS-232 标准是由美国电子工业联盟(EIA)所制定的串行数据通信接口的标准。它正式的定义了像电脑终端这类数据终端设备与数据通信设备之间的信号连接方式,并且该标准被观念广泛的应用于计算机串行端口。该标准定义了通讯所使用的电的要求、时间信号、信号的意义以及连接设备的规格和引脚的分配意义。

RS-232 串口曾经是个人的电脑用于连接调制解调器、打印机、鼠标、数据存储设备、不间断电源以及其他外部设备的标准方式。然而,由于 RS-232 受到传输速率低、大电压幅摆等性能的阻碍,现代个人电脑已经使用 USB 来取代 RS-232 作为外围接口的角色。虽然如此,配备 RS-232 串口的设备还是得到了广泛的应用,尤其是在工业机器、网络设备和科学仪器等方面。因此,现在要使得电脑与某些设备通讯,就必须使用一个外部的 USB 和 RS-232 串口转换器来连接电脑和特定的外围设备。

4.4.2 L-2303HX

PL-2303HX 是 USB 转串口桥控制器。它能将具有 RS-232 这类全双工异步串行设备与任何拥有通用串行总线的主机相连接。PL-2303HX 的高度的兼容性能够在大多数操作系统上模仿传统的 COM 口，同时允许基于 COM 口的现有的应用程序轻松地移植。通过利用 USB 批量传输的模式、大型的数据缓冲区和自动流量控制，PL-2303HX 能够实现比传统通用异步接收发送器端口更高速的吞吐量。PL-2303HX 拥有灵活的波特率发生器，并且能够通过编程控制其产生 75bps 到 12M bps 的波特率，同时其数据位提供长度为 5 位、6 位、7 位或 8 位的数据位；奇数校验(Odd)、偶数校验(Even)、设置校验位为 1 的 MARK 校验(Mark)、设置校验位为 0 的 SPACE 校验(Space)以及无校验(None) 5 种奇偶校验方式；提供 1 位、1.5 位和 2 位三种停止位，同时拥有外部 RS-232 设备断电控制、CTS/RTS 自动硬件流控制以及独立串口电源。

4.4.3 通讯方式设计

本系统中 PC 机与设备之间采用 RS-232 串口进行通讯，通过 PL-2303HX 控制器的转换，使得 RS232 串口和 USB 之间能够相互传送消息。控制器的传输模式被设置为 RS-232 串行传输，其通讯参数被设置为，波特率 9600 bps，数据位 8 位，奇偶校验位值为 1，即采用 Odd 奇数校验模式，停止位大小为 1.5 位，超时时间为 10 毫秒。并且提供包括 CRC-8 和 CRC-16 两种 CRC 循环冗余码校验方式。所有发送和接收的数据将被以十六进制的 ASCII 码的样式处理。图 4.7 所示为本系统串口通讯的状态图。

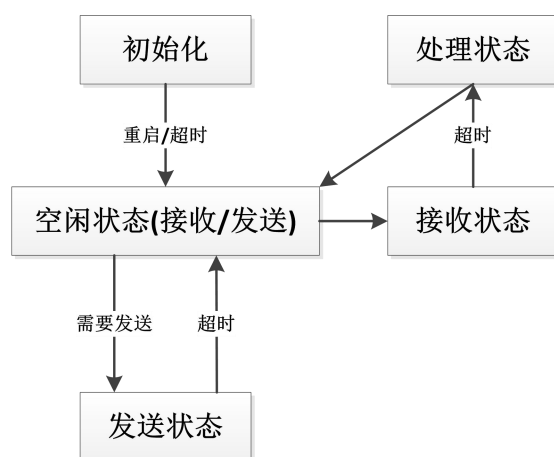


图 4.6 串口通讯状态图

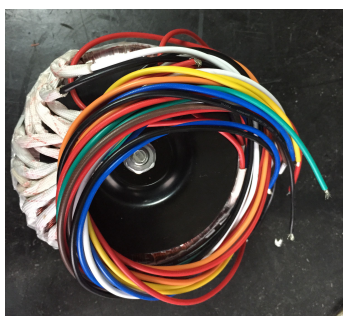
4.5 本章小结

本章对于上位机的数据管理软件设计过程进行了详细的说明，包括上位机软件的界面、功能和数据库的设计。并且针对于不同的需求给出了各个模块的数据结构设计以及每个类结构的设计。最后说明了上位机和校验仪的通讯方式。

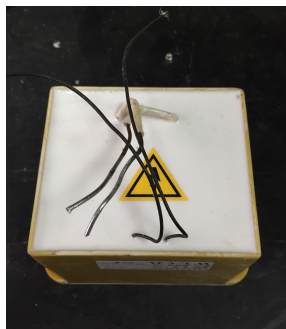
5 系统实现及试验结果分析

5.1 系统实现

图 5.1 所示为带高压自动切断装置的电容式电压互感器误差现场校验仪各部分及整体实物图。



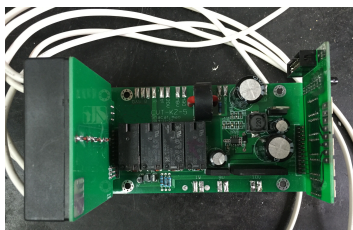
(a) 环形电源变压器



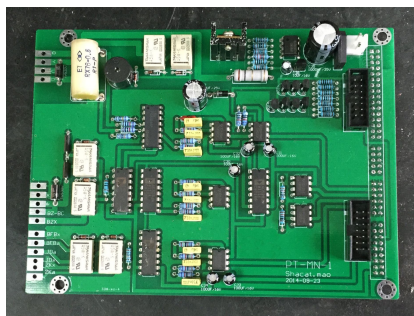
(b) 升压器



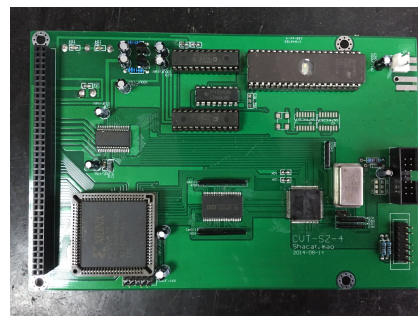
(c) 标准电压互感器



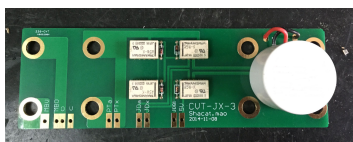
(d) 电源模块



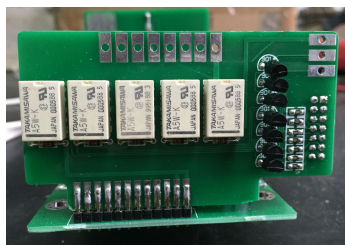
(e) 模拟信号处理模块



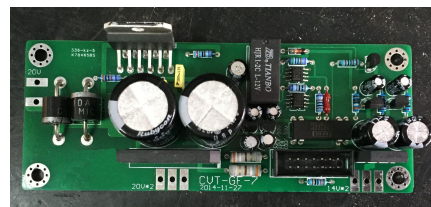
(f) 数字信号处理模块



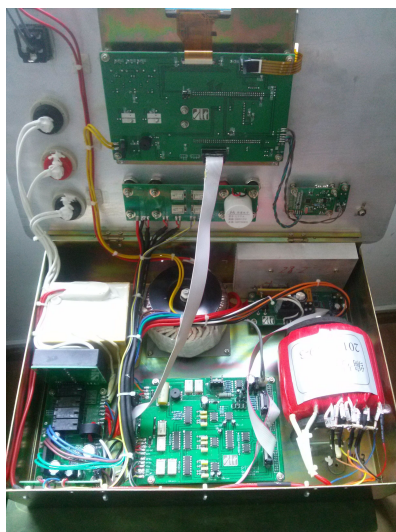
(g) 数据校验模块



(h) 量程选择模块



(i) 功率放大模块



(k) 校验仪实物图

图 5.1 带高压自动切断装置的电容式电压互感器误差现场校验仪各部分及整体实物图

图 5.2 为上位机数据管理系统。该系统用于管理被试电容式电压互感器的基本信息和测试信息。



(a) 数据管理软件主界面图



(b) 互感器列表



(c) 实测互感器列表



(d) 待关联互感器列表

基本结论数据

测试数据管理

基本信息

原编号

证书编号

20141010

传单编号

送检单位

生产厂家

型号规格

出厂日期

器具名称

用途

准确度等级

用

额定一次

额定二次

额定频率

Hz

额定电压

KV

出厂编号

一次接线方式

二次接线方式

其他信息

测试

主管

铁

周

年

测试日期

有效日期

备注

标准器信息

器具名称

准确度等级

资产编号

出厂编号

证书编号

标准器型号

有效日期

测试环境

温度

℃

湿度

%

检测地点

测试结论

外观检测

绝缘电阻

一次对地

二次对地

耐压测试

一次对二次

一次对地

二次对地

耐压

人

结论

新互感器只数

新互感器

修改

删除

查找

联网上传

打印

退出

(e) 基本结论数据管理

基本结论数据

测试数据管理

基本信息

证书编号

20141010

测试编号

DT-20140822-1746

一次电压

110/√3KV

二次电压

100V

负载

20

轻载

5

相

别

准

确

度

0.1

功率因数

0.8

一次接线

二次接线

比差最大变比

角差最大变比

百分表

20

50

80

100

120

高数

比差

上升值

0.000

0.000

0.000

0.000

0.000

下降值

0.000

0.000

0.000

0.000

0.000

平均值

0.000

0.000

0.000

0.000

0.000

修约值

0.00

0.00

0.00

0.00

0.00

低数

比差

上升值

0.000

0.000

0.000

0.000

0.000

下降值

0.000

0.000

0.000

0.000

0.000

平均值

0.000

0.000

0.000

0.000

0.000

修约值

0.00

0.00

0.00

0.00

0.00

新量程

修改

删除

(f) 测试数据管理

图 5.2 上位机数据管理系统

5.2 现场测试

为了测试本文所述系统的稳定性及正确性，因此选取了衡阳市华仪电力互感器有限公司的电容式电压互感器进行实际测试试验。该电容式电压互感器参数如表 XX 所示

表 5.1 被试电容式电压互感器参数

型号	TYD 110/√3-0.01H		
额定一次电压	110/√3KV		
额定频率	50HZ		
额定绝缘水平	230/550kV		
额定中间电压	13kV		
分压器	0WF 110/√3-0.01H		
额定总电容	0.01μF		
实测电容	0.00993μF		
生产日期	2013 年 5 月		
基本二次	额定电压	额定输出	精确度等级
a1-n1	100√3V	100VA	0.2 级
a2-n2	100√3V	50VA	0.5 级
a3-n3	100√3V		
da-dn	100V	100VA	3P 级

为保证数据的可靠性，对该电容式电压互感器的 0.2 级和 0.5 级分别做 3 次测试，从而分析测试结果的可靠性及稳定性。图 5.3 为实际试验现场状况。



图 5.3 实际试验现场状况

表 5.2 和表 5.3 所示，在相同的环境下，当功率因数为 0.8，精确度等级为 0.2，第一绕组满载负荷 100VA，第二绕组满载负荷 50VA 时，所测得的三组比差和角差值。图 5.4 为三组比差和角差的对比折线图。

表 5.2 0.2 级满载比差值测试结果

	20%	50%	80%	100%	120%
比差值 1	-0.109	-0.107	-0.107	-0.106	-0.106
比差值 2	-0.114	-0.112	-0.112	-0.112	-0.112
比差值 3	-0.113	-0.112	-0.111	-0.111	-0.111

表 5.3 0.2 级满载角差值测试结果

	20%	50%	80%	100%	120%
角差值 1	11.650	11.260	11.080	11.010	11.050
角差值 2	11.580	11.200	11.040	10.980	11.000
角差值 3	11.620	11.240	11.070	11.020	11.040

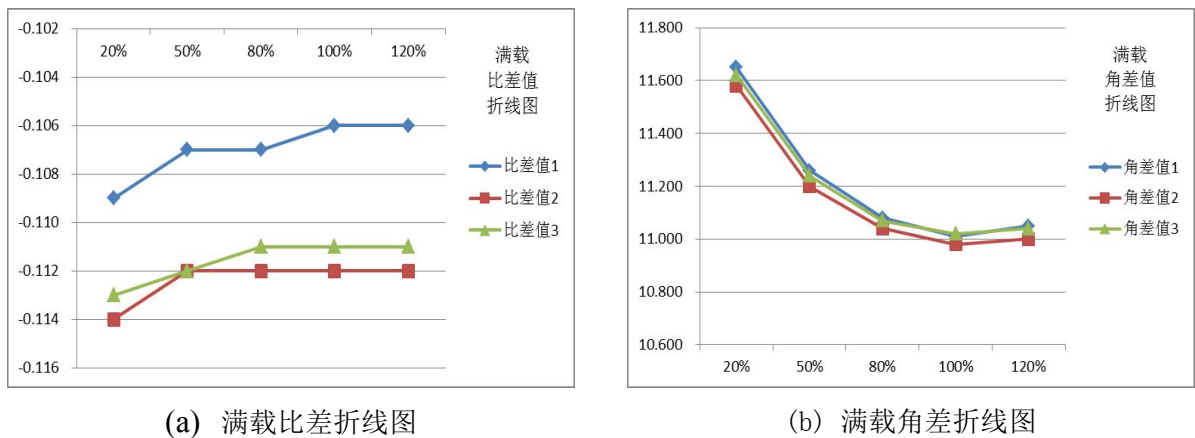


图 5.4 0.2 级满载比差、角差折线图

表 5.4 和表 5.5 所示，在相同的环境下，当功率因数为 0.8，精确度等级为 0.2，第一绕组轻载负荷 25VA，第二绕组轻载负荷 0VA 时，所测得的三组比差和角差值。图 5.5 为三组比差和角差的对比折线图。

表 5.4 0.2 级轻载比差值测试结果

	20%	50%	80%	100%	120%
比差值 1	0.166	0.167	0.168	0.168	0.168
比差值 2	0.163	0.164	0.164	0.165	0.165
比差值 3	0.161	0.163	0.163	0.163	0.163

表 5.5 0.2 级轻载角差值测试结果

	20%	50%	80%	100%	120%
角差值 1	3.730	3.340	3.170	3.090	3.130
角差值 2	3.760	3.380	3.210	3.150	3.180
角差值 3	3.720	3.340	3.180	3.120	3.150

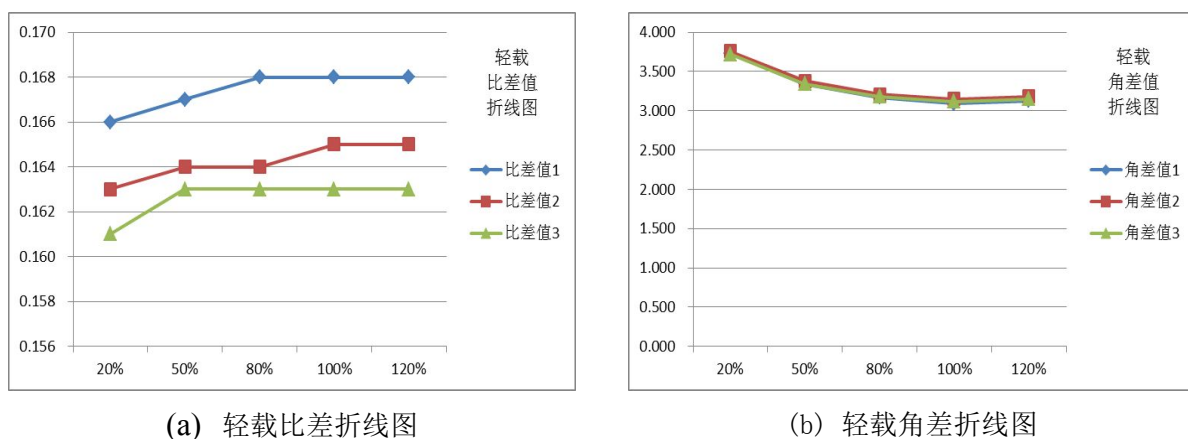


图 5.5 0.2 级轻载比差、角差折线图

表 5.6 和表 5.7 所示，在相同的环境下，当功率因数为 0.8，精确度等级为 0.5，第一绕组满载负荷 50，第二绕组满载负荷 100 时，所测得的三组比差和角差值。图 5.6 为三组比差和角差的对比折线图。

表 5.6 0.5 级满载比差值测试结果

	20%	50%	80%	100%	120%
比差值 1	-0.166	-0.164	-0.164	-0.164	-0.164
比差值 2	-0.181	-0.179	-0.179	-0.178	-0.179
比差值 3	-0.166	-0.164	-0.164	-0.163	-0.163

表 5.7 0.5 级满载角差值测试结果

	20%	50%	80%	100%	120%
角差值 1	3.970	3.600	3.450	3.390	3.420
角差值 2	3.890	3.530	3.380	3.320	3.350
角差值 3	3.790	3.430	3.280	3.210	3.250

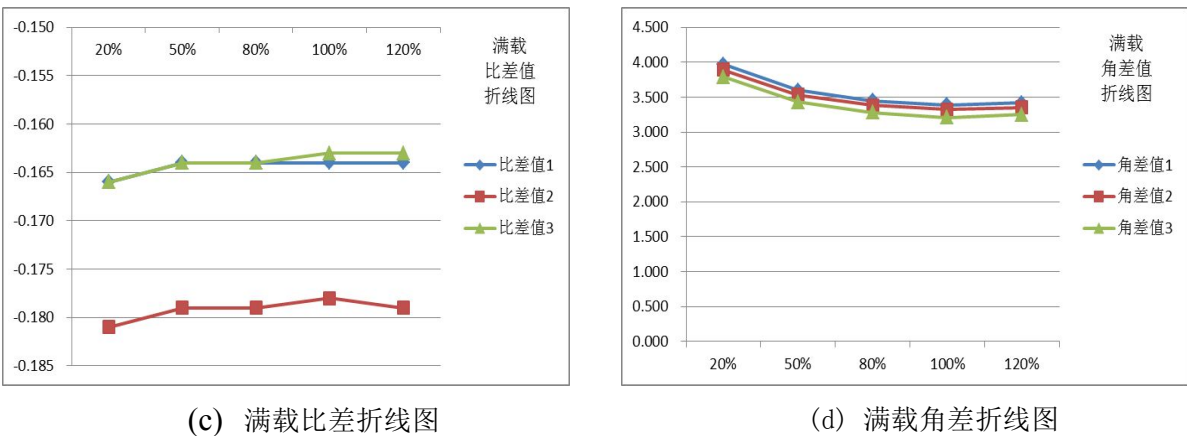


图 5.6 0.5 级满载比差、角差折线图

表 5.8 和表 5.9 所示，在相同的环境下，当功率因数为 0.8，精确度等级为 0.5，第一绕组轻载负荷 12.5VA，第二绕组轻载负荷 0VA 时，所测得的三组比差和角差值。图 5.7 为三组比差和角差的对比折线图。

表 5.8 0.5 级轻载比差值测试结果

	20%	50%	80%	100%	120%
比差值 1	0.179	0.180	0.181	0.181	0.181
比差值 2	0.165	0.166	0.167	0.167	0.167
比差值 3	0.179	0.181	0.182	0.182	0.182

表 5.9 0.5 级轻载角差值测试结果

	20%	50%	80%	100%	120%
角差值 1	1.510	1.140	0.990	0.930	0.960
角差值 2	1.480	1.120	0.970	0.910	0.940
角差值 3	1.350	0.990	0.840	0.770	0.810

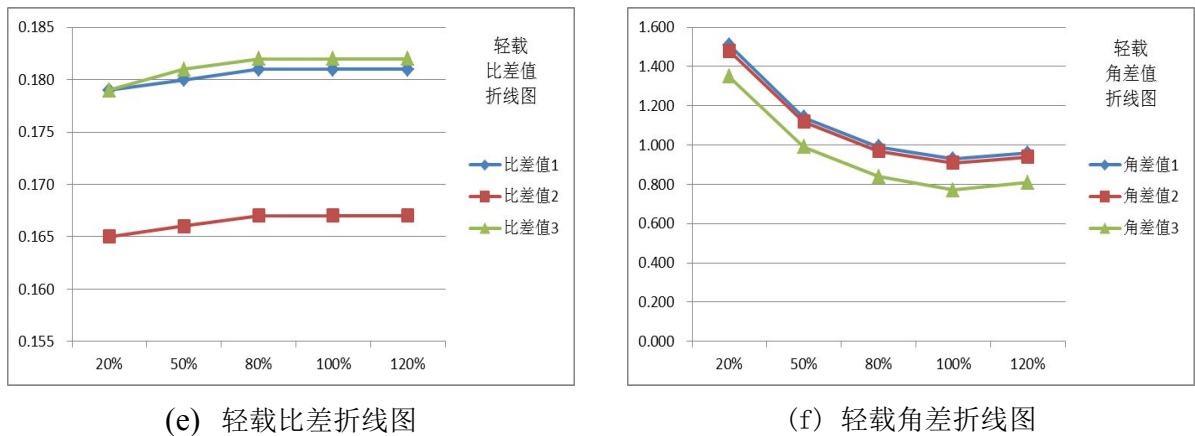


图 5.7 0.5 级轻载比差、角差折线图

通过上述测试数据和对折线图可以看出，对于同一电容式电压互感器做测试时，其每个规程点的比差值和角差值总体趋势相同，实际值有微小差距，但是都在允许范围之内。说明本文所述系统对于电容式电压互感器的校验结果是稳定的。

将测量结果与该电容式电压互感器的出厂报告作对比，如表 5.10 所示。通过对比实际测量结果与出厂报告，实际测量结果中的比差值与出厂报告相差均小于 0.05%，并且实际测量值中的角差与出厂报告相差均小于 2 分。因此，实际测量结果符合国家规定的 0.2 级电电压互感器的误差标准。所以，本文所述系统对于电容式电压互感器的校验结果是正确的。

表 5.10 电容式电压互感器误差校验装置测量数据对比表

检测 绕组	负荷 ($\cos \phi = 0.8$ 滞后) VA				0.8UN		1.0UN		1.2UN	
	a1n1	a2n2	a3n3	dadn	比差	角差	比差	角差	比差	角差
					%	'	%	'	%	'
通过传统方法测量的数据										
a1n1	100	50	/	/	-0.12	9	-0.12	8	-0.10	8
	25	0	/	/	0.16	3	0.18	3	0.18	2
通过本文所述方法测量的数据										
a1n1	100	50	/	/	-0.141	9.12	-0.141	9.05	-0.141	9.09
	25	0	/	/	0.131	2.14	0.132	2.07	0.132	2.11

综上所述,本文所述带高压自动切断装置的电容式电压互感器误差现场校验仪对于电容式电压互感器的误差现场校验结果是稳定可靠的。

5.3 本章小结

本章展示了该系统中的各个模块的实物图,以及整装后的设备实物图。同时,对于数据管理软件展示了其运行界面。最后,通过实际的测试,得到了测试数据,并且通过对比分析试验数据得出结论。

6 总结

本文所述带高压自动切断装置的电容式电压互感器校验装置与传统电容式电压互感器校验装置相比较有明显优势。首先，通过一种新的技术对电容式电压互感器进行校验时，所测得的数据精确度与传统测试方式相比，所测数据的误差在 0.05% 和 2 分之内，确保了数据的稳定性和准确性；其次，与传统方式相比较而言，本文所述的设备轻便、小巧、易于携带，而避免了用传统方法做测试时所需要的谐振升压装置、电压互感器标准等设备，解决了设备笨重、工作效率低等问题；并且，应用本电容式电压互感器校验装置，在测试的过程中，在不用拆除一次侧的高压线的情况下，通过装置中的高压切断装置，自动切断一次侧的高压信号后，测量二次侧的电压、电流信号；同时，本装置电路结构简单，能够有效的防止施工人员在测量二次侧的电压、电流信号的时候，忘记拆除一次侧的高压线，而造成设备过压损坏。因此，本装置能有效减少现场工作人员的劳动程度，节省测试时间，确保了现场工作人员的人身安全，解决了电容式电压互感器误差试验实施复杂、困难的问题。

参考文献

- [1] 张鑫,刘延泽,姚胜红,方璟. 超高压 CVT 误差低校高测试设备的研制. 电测与仪表. 2012
- [2] 杨成,理查德·道林,陈耀高,林玉涵. 电容式电压互感器现场校验装置. 专利库.2010
- [3] 李光伟,张伟,谷晓冉,孙琪,梁怀进,刘海洋. 一种电压变比特殊的电压互感器的检定. 河南电力. 2013.
- [4] 胡顺杰. 试论虚拟仪器技术在计量检定领域的应用. 中国计量. 2008
- [5] 刘昊,王雍,阎东,刘韶林,王英杰. 互感器带电比对技术研究. 现代电力. 2009
- [6] 邓泽官,王龙华,姚胜红,朱昌林. 电容式电压互感器低校高误差测试方法的研究. 电测与仪表. 2010.
- [7] 王德忠,王季梅. 电容式电压互感器误差特性的研究. 高压电器. 2001
- [8] 黄足平. 现阶段谐波测量存在的问题及建议. 电气化铁道. 2007
- [9] 李俊,李帆,汪司珂. 基于自激法测电容式电压互感器检测技术的分析研究. 电测与仪表. 2013.
- [10]王勤,雷民,王乐仁.JJG 314-2010.测量用电压互感器检定规程.北京:中国计量出版社,2011.
- [11]王之浩,陈文中,赵锦华. 电容式电压互感器误差的现场校验方法. 华东电力, 1997,9:12-16.
- [12]William E. Anderson . Calibration of Voltage Transformers and High- Voltage Capacitors at NIST. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology. 1989, 94(3): 179-180.
- [13]D. L. Hillhouse,O. Peterson,W. C. Sze.A Simplified System for Calibration of Coupling Capacitor Voltage Transformers. IEEE Trans. 1984, 103(5):1092-1098.
- [14]D. L. Hillhouse, A.E.Peterson. A 300-kV Compressed Standard Capacitor With Negligible Voltage Dependence. IEEE Trans. 1973, 22(4): 408-416.
- [15]Li.Kojovic, M.Kesunovic, C.W.Fromen. A New Method for the CVT Performance Analysis Using Field Measurements, SignalProcessing and EMTP Modeling. IEEE Trans.1994, 9(4): 1907-1915.
- [16]赵修民,赵屹涛.高压外推法测定电压互感器误差及外推点的选择和论证. 电测与仪表, 2005, 1, 42, 469: 29-31.

- [17]邓泽官,王龙华,姚胜红,朱昌林. 电容式电压互感器低校高误差测试方法的研究. 电测与仪表, 2010, 9, 47, 537: 27-30.
- [18]Williams, Jasmin. Edison Lights The City. New York Post, 2008.
- [19]Grant, Casey.The Birth of NFPA. National Fire Protection Association, 2008.
- [20]Katz, Evgeny. Lucien Gaulard. Archived from the original, 2008.
- [21]John W. Klooster, Icons of Invention: The Makers of the Modern World from Gutenberg to Gates, 305
- [22]Blalock, Thomas. Alternating Current Electrification. IEEE, 2008.
- [23]Quentin R. Skrabec Jr, The 100 Most Significant Events in American Business. 2012.85
- [24]Voith Siemens (company). HyPower, 2007. 7.
- [25]Adams Hydroelectric Generating Plant. IEEE, 2008.
- [26]All About Circuits, Tony R. Kuphaldt et al., 2009.
- [27]Roberto Rudervall, J.P. Charpentier and Raghuveer Sharma. High Voltage Direct Current (HVDC) Transmission Systems Technology Review Paper. World Bank.
- [28]Ned Mohan, T. M. Undeland and William P. Robbins (2003). Power Electronics: Converters, Applications, and Design. United States of America: John Wiley & Sons, Inc.ISBN 0-471-22693-9.
- [29]S. Stoft. Power System Economics. IEEE, 2002.
- [30]Chapman, Stephen (2002). Electric Machinery and Power System Fundamentals. Boston: McGraw-Hill. pp. Chapter 4. ISBN 0-07-229135-4.
- [31]Chapman, Stephen (2002). Electric Machinery and Power System Fundamentals. Boston: McGraw-Hill. pp. Chapters 6 and 7. ISBN 0-07-229135-4.
- [32]Electricity around the world, Conrad H. McGregor, 2010.
- [33]Chapman, Stephen (2002). Electric Machinery and Power System Fundamentals. Boston: McGraw-Hill. pp. Chapter 11. ISBN 0-07-229135-4.
- [34]Brief power quality tutorials for engineers, PSL, 2010.
- [35]Marshall Brain, How Power Grids Work, howstuffworks.com, 2000.
- [36]Practical Applications of Electrical Conductors, Stefan Fassbinder, Deutsches Kupferinstitut, 2010.
- [37]Naval Engineering Training Series, U.S. Navy, 2007.
- [38]Conductor ampacity, All About Circuits, Tony R. Kuphaldt et al., 2000.
- [39]Grigsby, Leonard. Electric Power Generation, Transmission, and Distribution. 2007. pp.

Chapter 14. ISBN 978-0-8493-9292-4.

[40] Switching Characteristics of Thyristors During Turn-On. 2009.

[41] Calverley, H.B.; Jarvis, E.A.K.; Williams, E.; (October 1957). Electrical equipment for rectifier locomotives. Proceedings of the IEEE - Part A: Power Engineering: 341–354.

[42] Cyber Attacks Caused Power Outages in Brazil, Kevin Poulsen, WIRED Threat Level blog, November 7, 2009.

[43] T. Davies Protection of industrial power systems second edition, Butterworth-Heinemann, 1996 ISBN 0-7506-2662-3, 55

[44] Stanley H. Horowitz, Arun G. Phadke Power system relaying third edition, John Wiley and Sons, 2008 ISBN 0-470-05712-2, 64–65

[45] Wince

[46] Special Report: Windows CE 6 arrives with 100% kernel source. windowsfordevices.com. 2011.

[47] Microsoft announces general availability of Windows Embedded Compact 2013. Microsoft News Center. Microsoft. Retrieved. 2013.

[48] Windows CE overview. Archived from the original on 28 May 2011.

[49] Windows Embedded CE. Microsoft. Microsoft. 2015.

[50] Windows Embedded Homepage. Microsoft.com. 2010.

[51] How does Windows Embedded CE 6.0 Start?. Windows CE Base Team Blog. Microsoft. 2010.

[52] Board Support Package (Compact 2013). MSDN. Microsoft. 2013.

[53] OAL Memory Mapping Structures (Compact 2013). MSDN. Microsoft. 2013.

[54] Create or Modify a BSP (Compact 2013). Microsoft Developer Network. Microsoft. 2014.

[55] Priority Levels. Msdn.microsoft.com. 2010.

[56] Embedded Platform Integrated Development Environment (IDE) Windows CE. Microsoft.com. 2010.

附录

附录 I 本人在攻读学位期间所发表的论文

[1] 黄胜英.带高压自动切断装置的电容式电压互感器校验仪的研究.电子技术与软件工程,2015,53:129

致谢

本文所有的研究工作是在导师夏定纯教授的指导下完成的，夏教授在人工智能和工业控制方面有着很厚的理论基础和实践经验。在学习和研究的过程中，夏教授对学生细心指导，耐心的讲解学生难以理解的理论知识。他对科研的严谨态度和对学生的关心令人由衷敬佩。在此，祝愿夏教授身体健康，全家幸福。

同时，还需要特别感谢韩谷静副教授，韩老师在学习上对学生严格要求，在生活中对学生关心爱护，在工作中为学生指明了方向，是位难得的好老师。在此，祝愿韩老师身体健康，工作顺利。

其次，还要特别感谢武汉德利特电力科技有限公司的各位领导及同事。在我研究生学习阶段，我在该公司实习。在此期间，他们给予了我巨大的帮助。每当我有在技术上遇到困难的时候，他们总是热心的帮助我，解决各种技术问题。

然后，感谢同学们对我的关心和爱护。在研究生三年的学习中，不论是学习还是生活上遇到了困难，同学们都会积极地帮助我解决困难，走出逆境。祝各位同学前程似锦，万事顺利。

最后，要特别感谢栽培了我多年的父母亲。正是他们对我无私的关心、教育和支持，才能使我顺利完成学业。