

电子式互感器 与数字化变电站

罗承沐 张贵新 等 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

电子式互感器 与数字化变电站

罗承沐 张贵新 秦应力 王廷云 编著
钱 政 申 烛 王 鹏 万 雄



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

互感器是在电力系统中获取电流和电压这两个最重要的物理量的必要设备,它们将高压母线中的高电压及大电流变换为低电压及小电流,供给继电保护、测量及控制设备之用。

本书主要包括概述、主要基于光学原理的电子式互感器、主要基于有源电子设备的电子式互感器、电子式互感器技术杂录、电子式互感器校验技术、电子式互感器在数字化变电站中的应用。

本书可供从事电气设备制造、试验,电力系统运行、设计的管理人员阅读,也可供高等院校相关专业领域学科的师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

电子式互感器与数字化变电站/罗承沐等编著. —北京:
中国电力出版社, 2012. 2

ISBN 978 - 7 - 5123 - 2680 - 4

I. ①电… II. ①罗… III. ①互感器-基本知识②数字
技术-应用-变电所-基本知识 IV. ①TM45②TM63 - 39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 021886 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2012 年 5 月第一版 2012 年 5 月北京第一次印刷

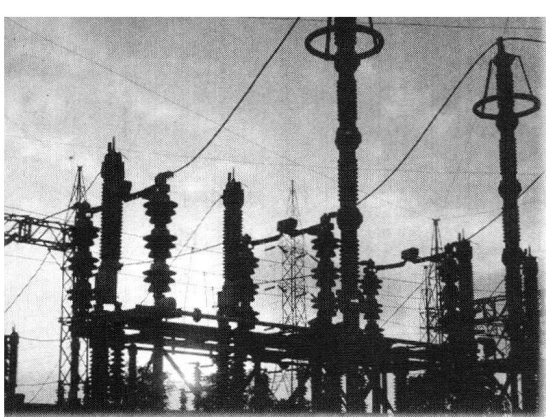
787 毫米×1092 毫米 16 开本 14.75 印张 334 千字

印数 0001—3000 册 定价 45.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



前

言

互感器是在电力系统中获取电流和电压这两个最重要的物理量的必要设备，它们将高压母线中的高电压及大电流变换为低电压及小电流，供给继电保护、测量及控制设备之用。传统的互感器具有类似变压器的结构，即有一个铁芯，以及绕在铁芯上的一次高压绕组和二次低压绕组。导电的铁芯作为一次高压绕组和二次低压绕组之间的必要的耦合介质。高压绕组和铁芯及低压绕组之间具有较为复杂的绝缘结构，这个绝缘结构要具有该互感器电压等级所要求的耐电强度。随着经济和技术的发展，电力系统的电压等级不断升高；电压等级的不断升高，传统互感器绝缘结构复杂和笨重的缺点日益彰显。

在 20 世纪 60 年代，激光技术和光纤传感技术已开始发展，人们开始应用这些新技术发展一些非传统的互感器（现在统称为电子式互感器），以解决互感器绝缘复杂的难题，这就是当时的动因。当时那些电子式互感器，其处于高电位侧的传感头利用了一些不同的物理原理和科学技术。例如：用于测量电流的法拉第磁光效应、用于测量电压的泡克尔电光效应，用它们做成所谓的无源电子式互感器；将电学模拟量转换为光学数字量的光电子技术，做成所谓的有源电子式互感器。光纤将高压侧的信息传到低电位侧的解调装置，从而得到与高压侧成比例的电流或电压值。在电子式互感器中，高低压侧之间通过具有绝缘性能的光纤耦合，从而大为简化了高压互感器的绝缘结构。

近年来，国内外掀起了建设所谓的智能电网的热潮，智能电网中的数字化变电站更是要求互感器具备数字量的输出，并具有智能化的特征，例如具有温度和环境检测、自适应、自身运行状况检测、异常工况报警等功能。传统的电磁式互感器已难以满足以上提到的种种要求，新型的电子式电流、电压互感器则会担当起这项重任。

电子式互感器本质上是一种将模拟量就地数字化的装置。它们将模拟的电流及电压信号，在尽可能靠近信号源的地方，采用最具有性价比的可靠方式，将其转换为数字量。从电子式互感器的发展历史中，可以看到其两种基本形式，无源式及有源式，在此消彼长，以不断竞争的方式，向前发展。每一种形式都有自己合理的生存空间，在当时技术发展的条件下，满足工业部门提出的使用及经济要求。无源式电子式互感器的最大优点在于它在高压端不需要电源，避免了给高压端传感部分供电的弊病；有源式电子式互感器的最大优点在于它享用了微电子及计算技术快速发展的盛宴，有可能在智能化方面有更大的突破。人们对于这两种类型的电子互感器共同具有的“不稳定、不可靠”的疑虑，将会在时间的长河中逐渐消融。

在回顾国内电子式互感器研究历程的时候，应提到受人尊敬的燕山大学郑绳楦教授。他诲人不倦，培养了大量优秀的专业人才；他领导的研究组在全光纤电流互感器、全光纤

电压互感器以及其他多种光纤传感器的研究方面，在国内做了很多领先的工作，取得了大量理论研究及工程实践的结果。他在教育及科研的岗位上，一直坚持到他生命最后的一刻。在这本撰写的书中，许多方面引用了他们的研究成果，以此缅怀郑绳植教授崇高的品德。

这本书是集体编写的成果，具体分工如下：

第一章，罗承沐；

第二章，王廷云、张贵新、罗承沐；

第三章，钱政、张贵新、罗承沐；

第四章，钱政、王鹏、万雄、罗承沐；

第五章，申烛；

第六章，秦应力。

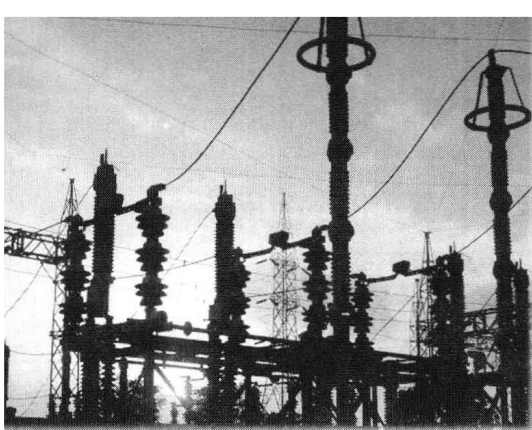
全书由罗承沐、张贵新、王鹏编辑校对。

在编写过程中得到高祖棉、安作平、魏朝晖、董平、张东波、冯亚东、罗苏南等专家的支持。在形成书稿的过程中，徐超然、徐曙光等人做了大量的工作。

电子式互感器随着每一个年代的可采用技术而逐渐发展起来，经过 50 多年漫长的岁月，多种形式的电子式互感器已经从实验室走向了工业生产和实际应用，产业部门有更多的人对电子式互感器感兴趣。编写这本书的目的：一是简要回顾一下国内外在此方面的研究历程和当今状况，借此温故知新，少走弯路；二是介绍一下电子式互感器的主要形式，以明白其原理和技术特征，正确地挑选和使用它们；三是讨论一些有意义的问题，希望能在工作中因地制宜，或可避免无谓的浪费。编写这本书的作者们在与电子式互感器发展相关的领域中做过一些研究，撰写的材料中有些内容出自于直接的经验。电子式互感器涉及众多的学科，发展也很迅速，我们所能谈到的，往往是挂一漏万。书中有的内容讲得较为简单，希望深入了解的读者，可参考书中提到的有关文献。总之，不妥之处希望能得到读者们的宽容和谅解，并提出宝贵的批评与修改意见，对此我们将表示深切的谢意。

作 者

2012 年 2 月



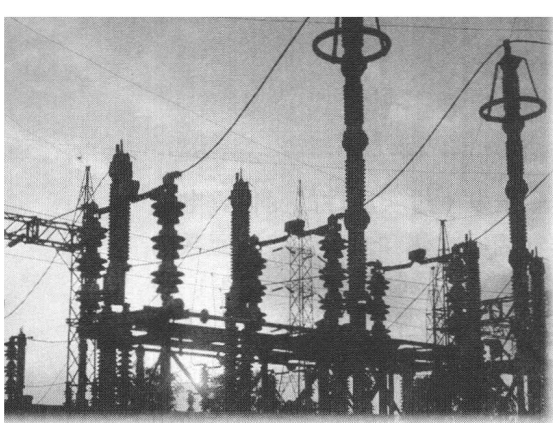
目

录

前言

第一章 概述	1
第一节 电子式互感器的优点及发展动力	1
第二节 电子式互感器的国家标准	4
第三节 电子式互感器的分类	9
第四节 电子式互感器的发展简史	10
参考文献	22
第二章 主要基于光学原理的电子式互感器	25
第一节 利用磁光效应的电子式电流互感器	25
第二节 利用干涉原理的电子式电流互感器	37
第三节 利用电光效应的电子式电压互感器	59
第四节 利用其他光学原理的电子式互感器	66
参考文献	75
第三章 主要基于有源电子设备的电子式互感器	80
第一节 有源电子式电流互感器	80
第二节 智能化插接组合电器中的电子式互感器	108
第三节 电子式电压互感器	119
参考文献	125
第四章 电子式互感器技术杂录	128
第一节 传统互感器的就地数字化	128
第二节 中压电子式互感器	131
第三节 电子式互感器的智能化	139
第四节 电子式互感器在电力系统中的其他应用	148
第五节 电子式互感器在高电压测试中的应用	151
参考文献	160
第五章 电子式互感器校验技术	163
第一节 电子式互感器的校验方法	163
第二节 电子式互感器校验算法	165
第三节 电子式互感器模拟输出通道的校验	168
第四节 电子式互感器数字输出通道的校验	171

第五节 电子式互感器校验仪的几个问题讨论.....	175
第六节 电子式互感器校验仪的实例.....	176
参考文献.....	183
第六章 电子式互感器在数字化变电站中的应用.....	185
第一节 数字化变电站发展过程.....	185
第二节 IEC 61850 与数字化变电站	195
第三节 电子式互感器的使用.....	209
第四节 智能断路器.....	218
参考文献.....	229



第一章

概述

第一节 电子式互感器的优点及发展动力

1. 电子式互感器的发展动力

在科学研究和工业生产中，需要对所涉及过程的多种物理量进行测量，常常还需要把由测量所得到的各种信息从一处传输到另一处，以便对这些过程进行监控。传感器是对这些物理量敏感的装置，用它们来获得这些物理量的信息，再用传输系统把得到的信息传输到合适的信息处理中心。图 1-1 是一般的信息获取和传输系统方框图（其中，并非每个部件都是必需的）。传输媒介可以是电缆、光缆、铁磁材料，也可以是自由空间。在信息源处的被测物理量可能是各种电量或非电量。这些电量或非电量可由各种传感器转换为载有被测量信息的电信号或光信号；电信号或光信号被送到发送器（调制器），在这里把它们变换为适合于通过传输媒介而传播的形式。例如，用这个电信号去调制作为载波的电磁波，以便在自由空间中传输这个信息。受调制的载波经传输媒介传播到合适的地点，在接收器（解调器）处，经解调后得到和原来信息相似的信号，最后在监控室的终端把所获得的信息加以应用。

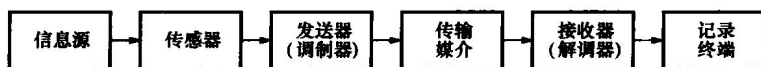


图 1-1 信息获取和传输系统方框图

在电力生产、电力传输及电力设备的运行中，也需要对其中各种物理量进行监测，其中最重要的物理量是电流和电压。获取电流和电压信息的传感设备是互感器（Instrument Transformer），包括电流互感器（Current Transformer）及电压互感器（Voltage Transformer）。它们将高电压侧的大电流或高电压变换为低压侧的小电流或低电压，供继电保护、电能计量及测量控制之用。准确、可靠、高性能的互感器是保证电网安全、可靠、高效运行的重要保证之一。

现今电网上大量使用的是所谓的传统互感器，即电磁式电流互感器、电磁式电压互感器或电容分压式电压互感器。电磁式互感器利用电磁感应的原理，其结构类似变压器。电磁式互感器具有悠久的历史，它的原理和结构，从法拉第（Farady）于 1831 年发明变压

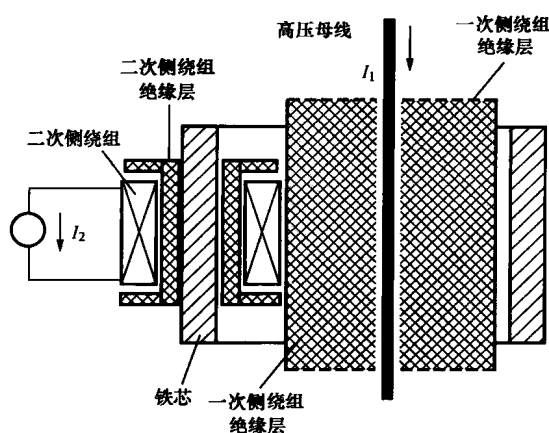


图 1-2 电磁式电流互感器的结构示意图

器以来^[1]，未发生过实质性的变化。电磁式互感器利用一次侧和二次侧绕组匝数的不同，进行电流及电压的变换。图 1-2 是电磁式电流互感器的结构示意图，一次侧绕组（高压母线）和二次侧绕组共同绕在一个的接地的硅钢片铁芯上。高压绕组和铁芯之间要经受高压母线上的工作电压，因此二者之间需要能耐受高电压的复杂的绝缘结构。当电压很高时，复杂的绝缘结构对设计制造和成本控制都是很困难的。电磁式电压互感器也具有与图 1-2 相似的绝缘结构，存在同样的问题。

随着电力生产、电力传输系统容量的增加，电网的运行电压等级越来越高，目前我国电网的电压等级最高已达到 1000kV。此时，传统的电磁式电流互感器和电压互感器暴露出一系列严重的缺点。以电磁式电流互感器为例，在如此高的电压下，它的绝缘结构将变得非常复杂，体积、重量以及它的造价也将急剧增加。此外，其不足之处还表现为：电磁式电流互感器所固有的磁饱和、铁磁谐振、动态范围小，频带范围窄以及有油、易燃、易爆炸等缺点。

传统的互感器相当于一个小的信息获取及传输系统，其中，硅钢片铁芯既是组成传感器的一部分，又担当了传输介质的角色。作为传感器一部分的铁芯材料具有非线性特征，当被测量超过其线性区域后，传感器的输出就会趋于饱和；由于硅钢片铁芯材料的涡流及磁滞效应造成的损耗，采用普通硅钢片铁芯材料的互感器不能工作在较高的频率。作为传输介质的铁芯是接地的，而且是导电的，在这种互感器中，高压绕组和铁芯之间就必须具有能够耐受高电压的绝缘结构。由此可见，造成电磁式互感器的上述缺点的主要原因是由于在传统互感器中的铁芯材料具有非线性，包含它的传感器也具有非线性，而且作为传输介质的铁芯是接地的导体。显然，在理想的互感器中，处于高电位的传感器部分应具有良好的线性和较高的频率特性；它的传输介质应该是不导电的而且具有较高的绝缘强度。

最近几年，国内已建成了许多试验性质的数字化变电站，数字化变电站要求互感器具有数字量的输出信号，而电磁式互感器只能输出模拟量。近来，国内外又掀起了建设所谓的智能电网的热潮，更是要求互感器具有智能化的特征，例如具有温度和环境检测、自适应、自身运行状况检测、异常工况报警等智能化的功能等。电磁式互感器已难以满足以上提到的种种要求，寻求更理想的新型电流互感器和电压互感器已是必然的趋势。

在科技发达的国家，利用光学传感技术、计算机与电子学技术、光通信技术等的最新成果，发展所谓的非常规互感器（Non- Conventional Instrument Transformer），即电子式互感器（Electronic Instrument Transformer），包括电子式电流互感器（Electronic Current Transformer- ECT）和电子式电压互感器（Electronic Voltage Transformer -

EVT)，以适应电力工业发展的新趋势。经过漫长的 50 多年的研究与发展，多种形式的电子式互感器已经从实验室走向了实际生产应用。

2. 电子式互感器的优点

在电子式互感器发展的早期，一般将这种互感器称之为光电互感器或光学互感器。电子式互感器的基本思想是：在高电位侧，利用光学或电磁学等类型的传感器获取电压/电流信息，利用光纤作为传输介质将信息传到低电位侧，进行解调并输出模拟量或数字量，以此来构成对高压侧电流/电压信息进行获取及传输的系统。

在这个系统里，在高压侧用光学或电磁学等方法建造一种线性度较好、频带较宽的传感器。传感器可分为有源型的传感器和无源型的传感器两大类：有源型的传感器需要在高压侧供给电源；无源型的传感器则不需要在高压侧供给电源。用此传感器去感知被测电流/电压；将所得到的感应信号经过调制，变为可通过光纤传输的光信号；光信号通过光纤传地电位处，进行解调，得到与被测电流/电压成比例的模拟或相应的数字信号。图 1-3 所示为有源型光纤信息获取和传输系统方框图，可以用来说明以上描述的系统。

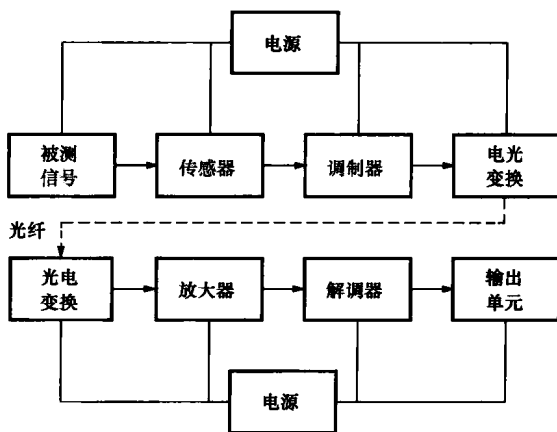


图 1-3 有源型光纤信息获取和传输系统方框图

由于光纤本身所固有的优点，如良好的绝缘性能、高带宽、对于多种物理量敏感、不受外界电磁干扰等，使得电子式互感器这种光纤信息获取和传输系统具有许多突出的优点，而且这些优点随着技术的进步而更加明显。光纤不仅可与其他元件一起可做成各种传感器。单是光纤本身就可制成各种光纤传感器，可以用来测量电流、电压，而且可以用来测量压力、振动、位移、磁场、速度、加速度、浓度、pH 值等其他多种物理量。光纤传感器还具有灵敏度高、测量密度大、响应快、非接触测量等优点。可以看出，它的应用面非常广，发展前途很大。

电子式互感器和传统的电磁式互感器比较起来，具有以下诸方面的优点：

(1) 优良的绝缘性能、体积小、造价低。

在电子式互感器中，具有绝缘特性的石英或塑料光纤用来作为高电位侧与低电位侧之间的信号传输介质。由于不采用导电的铁芯作为传输介质，因此大大简化了高压互感器中的内绝缘结构。使整个电子式互感器体积小、质量轻、造价低。例如，220kV 的电子式电流互感器质量约为 100kg；而同样电压等级的电磁式电流互感器的质量约为 1000kg，这给互感器的运输与安装带来了很大的方便。

(2) 不含铁芯，消除了磁饱和、铁磁谐振等问题。

电磁感应式互感器由于使用了铁芯，不可避免地存在磁饱和、铁磁共振和磁滞效应等问题；而电子式电流互感器不含铁芯，动态范围大，不会饱和。

(3) 低压侧无开路高压的危险。

电磁式电流互感器的低压侧开路时,有产生高压的危险。由于电子式电流互感器的高压侧与低压侧之间只存在光纤联系,而光纤具有良好的绝缘性能,不存在低压侧开路而产生高压的危险。

(4) 频率响应范围宽。

如果电子式互感器采用光学的传感头,它的频率响应范围应当很宽。作为载波的光,它的频率在 $10^{13} \sim 10^{16}$ Hz 的范围内(近红外光的频率在 10^{14} Hz,即 10^5 GHz 附近)。目前,光纤通信系统的带宽可以达到几个吉赫兹左右。可以想象,将来的光纤信息传输系统的带宽将有很大的提升空间,从而提供更强的携带信息的本领。电子式互感器的频率响应可达到 10MHz 以上。电子式互感器可以测出高压电力线路上的谐波,还可进行暂态电压/电流、高频电压/电流与直流电压/电流的测量。

(5) 没有因充油而产生的易燃、易爆炸等危险。

电磁感应式互感器一般采用充油或充气的办法来解决绝缘问题,这样不可避免地存在易燃、易爆炸等危险;而电子式电流互感器内绝缘结构简单,可以不采用油绝缘或气体绝缘。

(6) 适应了电力计量与保护数字化、智能化发展的潮流。

现代的电子式电流、电压互感器均有数字量及模拟量的输出。输出的数字接口的物理层和链接层符合中华人民共和国有关标准,以及国际电工委员会的有关标准:IEC 60870《遥控设备和系统》以及 IEC 61850《变电站的通信和系统》。这与电力系统中数字化的继电保护、通信及计量是兼容的。

(7) 绿色环保、电磁兼容性好、保密性强。

电子式互感器的二次输出信号,一般都采用光纤传输而不采用铜线。比较起来,光纤质量轻、价格低、减少了昂贵的铜的消耗。光纤的传输损耗小,这意味着,在没有中继电子设备的情况下,光信号可以传得较远,从而降低了系统的复杂程度和造价,并减轻了维护工作的负担。光纤不会对外界产生电磁干扰,因此传输信号时的保密性强;同时它也不会接收外界的电磁干扰。

第二节 电子式互感器的国家标准

1. 制定过程

在国内及国外,电子式互感器经历了长期的发展,它已逐步从实验室的研究,过渡到工业生产制造及电力工业实际应用之中。国内一些企业已生产了各种类型的电子式互感器产品,需要有一个全国的标准来规范电子式互感器的有关定义、使用条件、性能指标、设计要求、有关的试验标准和方法以及对于电子式互感器的一些特殊要求,以适应国内对电子式互感器产品生产、检验、性能评估和现场使用的需要。全国互感器标准化技术委员会秘书处在 2003 年全国互感器标委会年会上提出了根据 IEC 60044—7:1999《Instrument transformers - Part 7: Electronic voltage transformers》^[2]来制定中国国家标准《互感器 第 7

部分：电子式电压互感器》，根据 IEC 60044—8：2002《Instrument transformers - Part 8: Electronic current transformers》^[3]来制定中国国家标准《互感器 第 8 部分：电子式电流互感器》的计划建议。全国互感器标委会秘书处于 2003 年底向国家标准化管理委员会申报了制定该标准的项目计划建议，之后得到了批准。

实际上，早在这之前的几年里，沈阳变压器研究所即开始组织对 IEC 60044—7：1999 和 IEC 60044—8：2002 进行翻译的工作。这两份 IEC 标准的文稿最初是由沈阳变压器制造有限公司高祖棉先生翻译的，并先后经沈阳变压器研究所朱英浩、张宜倜、章国忠、魏朝晖等先生校对、整理和审查。在完成了《互感器 第 7 部分：电子式电压互感器》及《互感器 第 8 部分：电子式电流互感器》标准的草案稿后，于 2004 年 5 月全国互感器标准化技术委员会在沈阳召开了标准讨论会暨工作组会议，广泛征求了行业生产企业和电力部门的意见。根据会议的意见，于 2004 年 8 月完成了《互感器 第 7 部分：电子式电压互感器》、《互感器 第 8 部分：电子式电流互感器》标准讨论稿。

经过多次全国互感器标委会召开会议，认真地审查这两份讨论稿，在会议中广泛地征求了有关互感器生产及研究企业、研究单位和高等院校所提出的修改意见，于 2005 年整理成报批稿，并按规定程序报批。2007 年 8 月，国家质量监督检验检疫总局、国家标准化管理委员会正式批准实施这两个中华人民共和国国家标准：GB/T 20840.7—2007《互感器 第 7 部分：电子式电压互感器》^[4]；GB/T 20840.8—2007《互感器 第 8 部分：电子式电流互感器》^[5]。

2. 电子式互感器的定义

这两个国标^[4,5]指明，电子式互感器是一种装置，由连接到传输系统和二次转换器的一个或多个电流/电压传感器组成，用以传输正比于被测的量，供给测量仪器、仪表和继电保护或控制装置。在数字接口的情况下，一组电子式互感器共用一台合并单元（Merging Unit, MU）完成此功能。

这两个国标还进一步定义了电子式电流/电压互感器：它们是一种电子式互感器，在正常使用条件下，其二次转换器的输出实质上正比于一次电流/电压，且相位差在连接方向正确时接近于已知相角。以电子式电流互感器为例，图 1-4 是单相电子式电流互感器通用框图。图 1-1 中一次电流传感器是指一种电气、电子、光学或其他装置，产生与一次端子通过电流相对应的信号，直接或经过一次转换器送给二次转换器。一次转换器（Primary Converter）是一种装置，它将来自一个或多个一次电流传感器的信号转换成适合于传输系统的信号。传输系统（即传输媒介）是一次部件和二次部件之间传输信号的耦合装置，例如光纤、电缆、自由空间或铁磁材料等。一次电源（Primary Power Supply）是向一次转换器和/或一次电流传感器供电的电源。在无源式电子式互感器中，则不需要一次电源。二次转换器（Secondary Converter）将传输系统传来的信号转换成为正比于一次端子电流的量，供给测量仪器、仪表、保护及控制装置。对于模拟量输出的电子式电流互感器，二次转换器的输出直接供给测量仪器、仪表和保护或控制装置。对于数字量输出的电子式电流互感器，二次转换器的输出一般通过合并单元供给二次设备。合并单元是一种物理单元，用以对来自二次转换器的电流和/或电压数据作时间相干组合。合并单元可

以是现场变换器之一的一个部件，或是单独的单元，例如装在控制室里（见图 1-4）。

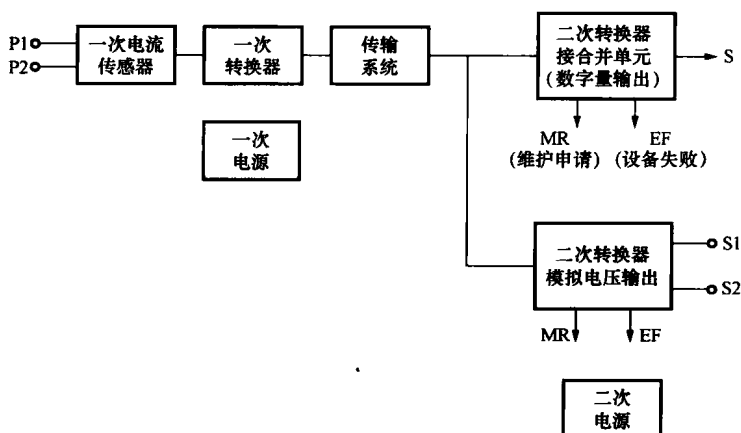


图 1-4 单相电子式电流互感器通用框图

按照国标，电子式互感器的含义包括所有的光电互感器及其他使用电子设备的互感器。从而将以前的多种关于电子式电流/电压互感器的称呼，诸如非传统互感器、光电电流/电压互感器、全光纤电流/电压互感器、磁光电流互感器、有源电子式电流/电压互感器等，统一称为电子式电流/电压互感器。

这个标准适用的电子式电流/电压互感器，其模拟量或数字量输出频率为 15~100Hz 的电气测量仪器和继电保护装置之用。电子式电流/电压互感器应在标准频率范围内满足准确度等级的要求：对测量用准确度等级，标准频率范围应为额定频率（ f_N ）的 99%~101%；对保护用准确度等级，此范围应为额定频率（ f_N ）的 96%~102%。通常额定频率 $f_N=50\text{Hz}$ 。

由于电网中大量使用电力电子设备，电网上会产生大量谐波。谐波对电能计量和继电保护皆有影响。该标准也列出了针对各种专门用途的互感器所应有的准确度等级。对于功率计量，列出了对于直到 13 次谐波的比值误差和相位误差的要求；对于电能品质测量，列出了对于直到 50 次谐波的比值误差和相位误差的要求；对于宽频带保护，例如行波保护，需要的频率高达 500kHz。电子式互感器的频带宽度（-3dB 截止频率）应至少为 500kHz。这个标准规定宽频带保护专用电子式互感器在 f_N （ $f_N=50\text{Hz}$ ）~50kHz 的频率范围内，其最大峰值误差为 $\pm 10\%$ 。

对于直流保护专用的电子式电压互感器，在 0Hz~ f_N （ $f_N=50\text{Hz}$ ）的频率范围内，其最大峰值误差为 $\pm 10\%$ 。

3. 关于相位误差的定义

通常，习惯将电磁式互感器的一次侧输入信号与二次侧输出信号之间的相位误差简称为角差。由于在电子式互感器中使用了与电磁式互感器不同的传感技术以及数字处理和传输引起的时间延迟，需要将相位误差（phase error）作较为详细的定义。

(1) 相位移（Phase Displacement） φ ，即

$$\varphi = \varphi_s - \varphi_p \quad (1-1)$$

式中 φ_p ——一次相位移 (Primary Phase Displacement);

φ_s ——二次相位移 (Secondary Phase Displacement)。

(2) 额定延迟时间 (Rated Delay Time) t_{dr} : 数字处理和传输所需时间的额定值。

(3) 额定相位偏移 (Rated Phase Offset) φ_{or} : 由于所采用的技术而造成的电子式互感器的额定相位移, 这个相位移不受频率的影响。

(4) 相位误差 φ_e : 相位移 φ 减去额定相位偏移 φ_{or} 以及额定延迟时间所造成的相位 φ_{idr} 之后所得到的数值, 即

$$\varphi_e = \varphi - (\varphi_{or} + \varphi_{idr}) \quad (1-2)$$

$$\varphi_{idr} = -2\pi f_N t_{dr} \quad (1-3)$$

相位误差 φ_e 是相对额定频率 f_N 而言。相位误差通常用分或厘弧表示。

由于要求数字量输出与同步脉冲同步, 此时相位误差是时钟脉冲与数字量传输值所对应的一次电流/电压采样瞬时之间的时间差, 这个时间对应于额定频率下的一个角度数值, 用角度的单位表示。

4. 额定值

相对于电磁互感器, 对电子式互感器有一些的不同要求:

唤醒时间 (Wake-Up Time) 的标准参考范围。有些电子式互感器由线路的电流/电压提供电源, 在一次电流/电压接通后, 需要一定的延迟时间, 这种互感器电源才建立起来。此延迟时间称为唤醒时间。电子式电流互感器国标^[5]规定, 在额定一次电流下唤醒时间的标准最大值为无、1ms、2ms、5ms。由于电子式电压互感器国家标准^[4]所参照的 IEC 标准制定得较早, 对此项没做规定, 但可参照电子式电流互感器国标^[5]所规定的数值。

在数字量输出的情况下, 额定延迟时间 (t_{dr}) 的标准值为 $2T_s$ 、 $3T_s$ (T_s 为数据速率的倒数)。数据速率 ($1/T_s$) 的额定值: 在额定频率 f_N 为 50Hz 或 60Hz 时, $1/T_s$ 为 $80f_N$ 、 $48f_N$ 、 $20f_N$; 在 f_N 为 $16\frac{2}{3}$ Hz 时, $1/T_s$ 为 $48f_N$ 。

在模拟量输出的情况下, 额定延迟时间 (t_{dr}) 的标准值为无, $50\mu s$ 、 $100\mu s$ 、 $200\mu s$ 、 $500\mu s$ 。

由于电子式互感器的负载一般为电子设备, 它们所要求的输出电压及功率均较小, 此外还有数字量输出的要求, 因而与电磁式互感器的二次输出有较大的差别。电子式互感器的模拟量额定二次输出标准值列于表 1-1 和表 1-2。

表 1-1 模拟量额定二次输出的标准值

标准值	电子式电压互感器 (EVT)	电子式电流互感器 (ECT)
额定二次输出的标准值	$1.625/\sqrt{3}$ 、 $2/\sqrt{3}$ 、 $3.25/\sqrt{3}$ 、 $4/\sqrt{3}$ 、 $6.5/\sqrt{3}V^*$	22.5、150、200、225mV, 4V
额定负荷的标准值	0.001、0.01、0.1、0.5、1、2.5、5、10、15、25、30VA	2k Ω 、20k Ω 、2M Ω

* 适用于三相系统对地的单相互感器。对于单相系统或三相系统线间的单相互感器、三相互感器, 以及接成开口角的互感器, 国标也规定二次输出电压标准值。

表 1-2 数字量额定二次输出的标准值

额定值	测量用 ECT (比例因子)	保护用 ECT (比例因子)	EVT (比例因子)
量程标志=0	2D41 H (十进制 11585)	01CF H (十进制 463)	2D41 H (十进制 11585)
量程标志=1	2D41 H (十进制 11585)	00E7 H (十进制 231)	2D41 H (十进制 11585)

5. 设计要求

一般要求：规定了电子式互感器所应达到的性能指标，这些性能指标由各种机械和电气的额定值来标明。例如，额定机械强度、设备最高电压、额定绝缘水平、额定一次电压/电流、额定二次电压、准确度等级、无线电干扰电压、传递过电压、温升、电磁兼容等。

正常和特殊使用条件。正常使用条件：环境温度分三挡， $-5/40^{\circ}\text{C}$ 、 $-15/40^{\circ}\text{C}$ 、 $-40/40^{\circ}\text{C}$ ；海拔不超过 1000m；开关操作或短路电动力产生的振动；户内及户外的电子式互感器的其他使用条件。

特殊使用条件：海拔超过 1000m；环境温度有低于 -40°C 或高于 40°C ；地震；所考虑的系统接地方式。

电磁兼容是针对电子式互感器的要求，这是因为在电子式互感器中具有电子装置，它们可能在受到外界电磁干扰时发生故障；而对于传统的互感器，这些要求是没有的。电磁兼容的要求包括两部分，即电子式互感器对外界干扰的发射限度和电子式互感器对于外界电磁干扰的抗扰度要求。抗扰度要求的各种试验包括谐波和谐波间抗扰度试验、电压慢变化抗扰度试验、电压暂降和短时中断抗扰度试验、浪涌抗扰度试验、快速瞬变脉冲群抗扰度试验、振荡波抗扰度试验、静电放电抗扰度试验、工频磁场抗扰度试验、脉冲磁场抗扰度试验、阻尼磁场抗扰度试验、射频电磁场辐射抗扰度试验等。

数字量输出的设计要求。数字接口的物理层（Physical Layer）和链路层（Link Layer）可采用两种方案：IEC 61850-9-1 所描述的以太网方案，在此，采用同步脉冲的方法从数个合并单元得到一次电流/电压的与时间相关的采样值；IEC 60870-5-1 所描述的 FT3 格式，在此，采用同步脉冲或插值的方法得到一次电流/电压的与时间相关的采样值。两种方案的应用层（Application Layer）是相同的。在物理层中，合并单元到二次设备的连接，可采用光纤传输系统或基于铜线的传输系统。国标对于这两种传输系统中有关参数的定义和要求做了规定。

链路层采用 IEC 60870-5-1 所描述的 FT3 格式。国标规定了传输规则，给出了依据 FT3 的帧格式。应用层，明确了数据类型规范、帧的存储内容。合并单元的时钟输入，可以采用电信号或光信号，并规定了输入脉冲信号的幅值、触发阈值、脉冲宽度、脉冲间隔等参数。

模拟量电压输出的设计要求：接插件的种类及其耐受的交流电压；输出电缆的接地方式。

6. 电子式互感器的试验

试验的种类包括型式试验、例行试验、特殊试验，型式试验，用于检验按统一技术规

范制造的互感器均应满足的全部要求；例行试验，每台电子式互感器均应承受的试验；特殊试验，型式试验或例行试验之外的，并经制造方与用户方商量同意的试验。

国标列出了这三种试验中应进行的各个试验条目及其要求。关于电子式互感器的试验的详细论述还可参阅刘延冰教授等人的专著^[6]。

第三节 电子式互感器的分类

1. 按用途分类^[4,5]

测量用电子式电压/电流互感器，它是将信息信号传输至指示仪表、积分仪表和类似装置的电子式电压/电流互感器。

保护用电子式电压/电流互感器，它是将信息信号传输至继电保护和控制装置的电子式电压/电流互感器。

电子式电压互感器还有另一种类型，即电子式剩余电压互感器，它是一种三相电子式电压互感器或三台单相电子式电压互感器组，用于传输表示三相电压加在一次端子时所存在的剩余电压的信号。

2. 按所利用物理原理分类^[7]

诸多物体在电磁场作用下，将会产生各种效应：物体本身的大小、形状发生变化；通过物体的光线的各种特征发生变化；电磁场本身的改变。利用这些效应，可以制成各种电子式电压/电流互感器。以下列出电子式电压/电流互感器主要采用的一些物理效应。

(1) 电子式电压互感器按所利用的物理原理分类。

1) 泡克尔效应 (Pockels Effect)。

泡克尔效应也称电光效应，当一束线偏振光通过处于电场中的电光晶体时，它的两个相互垂直的分量将具有不同的相速度，导致二者之间有一个相位差。一定的条件下，这个相位差与电场强度成正比。利用检偏器将此相位差的变化转换为光强的变化，从而间接地测出电场或电压。

2) 逆压电效应。

电介质在外电场的作用下，其内部正负束缚电荷的中心将发生位移，而引起电介质的形变。此形变与外加电场的大小成正比，测量出引起形变的应力的大小，即可间接地测出外加电场（或外加电压）的大小。

3) 克尔效应 (Kerr Effect)。

光学介质在外加电场的作用下，其折射率随外加电场的平方而变化。当线性偏振光通过此介质时，由于电场的作用变为椭圆偏振光，利用检偏器可检测出所发生的光强变化，从而间接地测量出电场（电压）的数值。

4) 传统技术加光纤传光。

将高电压加在传统的电阻分压器、电容分压器或电感分压器上，将分压器二次输出的低电压，经就地模数转换、电光转换，再将光信号通过光纤传到远端解调，得到模拟量及数字量的输出。在这种技术中，由分压器承受了线路的高电压，光纤只起了传输光信号的作用。

(2) 电子式电流互感器按所利用的物理原理分类。

1) 磁光效应, 即法拉第效应 (Farady Effect)。

光线与介质中的磁场会发生作用, 使光线的偏振面发生旋转, 其角度正比于磁场在光路方向上的强度, 即外加电流的大小。利用光学元件将旋转角度的变化, 转化为光强的变化; 经光电变换器件, 得到光电流强的变化, 从而间接地测量出外加电流的大小。利用法拉第效应的电子式电流互感器称为磁光式电流互感器。磁光式电流互感器具有全光纤和块状玻璃的两种结构形式。在全光纤的结构中, 光纤本身也是传感介质; 在块状玻璃的结构中, 传感介质是一个块状玻璃, 而光纤只作为传光介质。

2) Kerr 磁光效应。

线偏振在光磁化了的介质表面发生反射时, 反射光的偏振面会发生偏转, 通过检测此偏振角度的大小, 可以间接测量外加磁场 (电流) 的大小。

3) 磁致伸缩效应。

外加磁场可使某些物质的几何尺寸发生变化, 测量此变化, 可间接测量出磁场 (电流) 大小。

4) 霍尔效应。

在半导体材料做的霍尔片的法线方向 ($\vec{z}$ 方向) 施加磁场 $\vec{B}$, 并在控制电流端 ($\vec{x}$ 方向) 施加控制电流 $\vec{I}$, 由于半导体中的电子在磁场中受到洛伦兹力的作用, 则在 $\vec{I} \times \vec{B}$ 方向 ($\vec{y}$ 方向) 一端积累正电荷, 另一端积累负电荷, 在正负电荷之间建立起霍尔电场及相应的电动势。此电动势与外加磁场 (电流) 成比例, 测量此电动势, 即可间接地量出产生磁场 $\vec{B}$ 的电流。

5) 巨磁电阻效应。

巨磁电阻效应是指磁性材料或合金材料的电阻率在外磁场作用下会发生巨大变化的一种效应。可用电桥来检测这种材料片的电阻在磁场中发生的变化, 而间接地测量出外加磁场 (电流) 的大小^[8,9]。

6) 传统技术加光纤传光。

在高电压侧, 利用传统的电磁测量技术, 例如低功耗的电磁式电流互感器、Rogowski 线圈、分流器等, 将高压母线中的大电流, 转换为较低的电压。将此低电压经模数转换、电光转换, 再将光信号通过光纤绝缘子传到低电位侧解调, 得到模拟量及数字量的输出。

3. 按一次传感器及一次转换器供能的方式分类

(1) 无源电子式电压/电流互感器是指不需要给一次传感器及/或一次转换器供能的电子式电压/电流互感器。

(2) 有源电子式电压/电流互感器是指需要给一次传感器及/或一次转换器供能的电子式电压/电流互感器。

第四节 电子式互感器的发展简史

1. 国外研究情况

早在 20 世纪的 60 年代, 一些技术发达国家研制成了有源式的和无源式的 ECT 样机。