



中华人民共和国电力行业标准

DL / T 1351 — 2014

电力系统暂态过电压在线测量及 记录系统技术导则

Guide for transient over-voltage measurement and recording
system used in electric system

2014-10-15 发布

2015-03-01 实施

国家能源局 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 电力系统暂态过电压在线测量系统概述	2
4.1 暂态过电压在线测量系统的结构	2
4.2 暂态过电压分压系统的功能	2
4.3 暂态过电压记录系统的功能	2
4.4 在线测量及记录系统的基本要求	2
5 电力系统暂态过电压分压系统	2
5.1 暂态过电压分压系统的构成	2
5.2 暂态过电压分压系统的暂态特性要求	3
6 电力系统暂态过电压记录系统	3
6.1 概述	3
6.2 系统的不确定度	3
6.3 记录系统的特性要求	4
6.4 记录系统的试验项目	4
6.5 暂态过电压数据记录	4
6.6 数据记录系统的基本设置	5
6.7 数据记录系统的触发方式	5
6.8 信号的传输	5
6.9 采样装置采样位数与采样速率的影响	5
7 在线测量及记录系统的组建	5
7.1 仪器的选用	5
7.2 在线测量设备的连接与布置	6
8 整体测量及记录系统的性能校核及校核记录	7
9 暂态过电压的类型识别及在线测量数据不确定度的估算	8
9.1 暂态过电压的类型识别及特征量分析	8
9.2 暂态过电压在线测量数据不确定度的估算	8
10 过电压测量系统其他注意事项	9
附录 A (资料性附录) 电磁式电压互感器暂态冲击电压响应特性仿真分析	10
附录 B (资料性附录) 由套管末屏电压传感器构成的电网过电压测量装置的误差分析	16
附录 C (资料性附录) 电压互感器在线实测雷电过电压波形分析	17
附录 D (资料性附录) 过电压分层模式识别及典型过电压波形	18
参考文献	23

前 言

电力系统中的变电设备随时都可能会受到雷电过电压或操作过电压的侵袭，当变电站出线较多或处于多雷区时，雷电过电压会随线路入侵造成故障；当系统进行切空载线路和变压器等操作时，会产生内部过电压；当系统出现接地故障时，会产生弧光接地过电压。这些过电压，幅值都非常高（可达系统工作电压的2倍~5倍）。当变电站保护配置不当或避雷器有缺陷时，过电压会对一次变电设备造成危害。同时，一些绝缘存在缺陷或老化的变电设备，在较高的过电压作用下更容易造成绝缘击穿，在工频电压作用下都有可能出现故障。现有过电压测量与记录标准主要针对电力系统工频过电压，不适用于暂态过电压。电力系统暂态过电压与工频过电压在波形、幅值、测量设备、测量方法方面均有差异，因此，有必要编制《电力系统暂态过电压在线测量及记录系统技术导则》，对电力系统暂态过电压在线测量及记录的要求和方法进行规范。

本标准按照 GB/T 1.1—2009《标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编写》给出的规则起草。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由电力行业高压试验技术标准化技术委员会归口。

本标准主要起草单位：国网四川省电力公司电力科学研究院。

本标准参加起草单位：国网电力科学研究院、中国电力科学研究院、广安电业局、重庆大学、苏州电器科学研究院股份有限公司、广元电业局、安徽一天电气技术有限公司、福建省电力试验研究院、华北电力科学研究院有限责任公司、清华大学、湖北省电力试验研究院。

本标准主要起草人：李建明、陈勇、廖蔚明、曹永兴、罗高、胡德霖、廖瑞金、艾建红、王有元、文丽、张孔林、陈凌、余银钢、周远翔、张致。

本标准在执行过程中的意见或建议反馈至中国电力企业联合会标准化管理中心（北京市白广路二条一号，100761）。

电力系统暂态过电压在线测量及记录系统技术导则

1 范围

本标准规定了暂态过电压的测量仪器和整个测量系统的各项试验要求以及具体实施方法。

本标准适用于变电站、发电厂的暂态过电压的定性测量，其结果用于电力系统运行情况的分析。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 20840.5—2013 互感器 第5部分：电容式电压互感器的补充技术要求

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

暂态过电压 transient over-voltage

指峰值电压高于系统额定电压，但持续时间介于数微秒到数毫秒的脉冲电压，在本标准中主要包括雷电过电压和操作过电压。

3.2

分压测量系统 voltage divider system

将高电压通过分压系统进行分压后转换成便于检测的低电压的测量系统。

3.3

雷电过电压 lightning over-voltage

电力系统中由大气环境中雷电放电引起的瞬态过电压，通常为单极性。

3.4

操作过电压 switching over-voltage

指电力系统中由于存在电场惯性元件和磁场惯性元件，当存在开关操作时系统元件中的电磁能量要重新分配，在振荡过程中参数配合不当时出现的过电压。

3.5

暂时过电压 temporary over-voltage

在电力系统中由于故障或操作引起的过渡过程之后的一段时间内出现的稳态性质的过电压，包括工频电压升高和谐振过电压。

3.6

工频过电压 power frequency over-voltage

电力系统中故障或操作等异常状况下出现的超过系统最高工作电压的工频或接近工频的过电压。

3.7

暂态数据记录 transient data recording

系统及时准确并完整地记录下整个过电压的发生过程，包括过电压时刻前后的过渡过程。

3.8

采样率 sampling rate

每秒从连续信号中提取并组成离散信号的采样个数，单位为赫兹（Hz）。

3.9

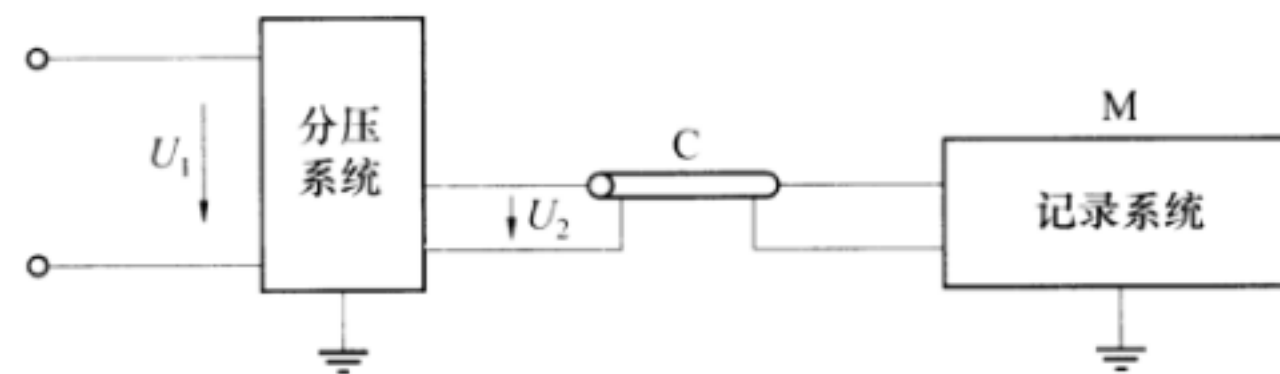
共模干扰 common mode interference

测量电缆或触发信号电缆外皮中暂态电流引起的电磁干扰。

4 电力系统暂态过电压在线测量系统概述

4.1 暂态过电压在线测量系统的结构

电力系统暂态过电压测量系统通常由暂态过电压分压系统、电缆或光缆传输系统以及暂态过电压记录系统等部分组成，如图 1 所示。



说明：

C——传输部件，包括同轴电缆或光纤和隔离滤波等装置；

M——记录系统；

U_1 ——分压系统输入电压；

U_2 ——分压系统输出电压。

图 1 暂态过电压在线测量系统的结构

4.2 暂态过电压分压系统的功能

在不改变系统原有运行方式的条件下，通过电力系统现有的电气设备（如电容式电压互感器、电磁式电压互感器、电子式电压互感器或变压器高压套管等）实时监测电力系统电气量（如三相电压）的变化，并在线实时获取暂态过电压。

4.3 暂态过电压记录系统的功能

将通过现有电气设备在线实时监测到并经过判断符合一定条件的电气量（如三相电压），按相应的时间实时记录，并通过传输系统将数据保存到存储器，供日后数据提取分析。

4.4 在线测量及记录系统的基本要求

4.4.1 应能进行严格的同步测量，真实地反映被测电气量的相关状态，以及系统运行时各电气量的时间关系。

4.4.2 应有 A、B、C 三相电压（ U_A 、 U_B 、 U_C ）的 3 个模拟量测量通道，并且各个通道都是独立的、不共地的，避免共地系统的信号干扰。

4.4.3 能将经过数据记录仪器判定符合一定条件的电气量（三相电压），按日期和时间命名后，准确、可靠、实时地记录，并将数据保存至存储器。

4.4.4 能在线测量并记录过电压产生的整个暂态过渡过程。测量系统应能记录过电压事故发生过程 5 个~20 个周期内的电压波形，包括过电压发生前及发生后的波形。

4.4.5 能快速、高精度地记录过电压波形。应有较高的数据采集速率和采样位数。

4.4.6 具有大容量的数据存储空间和高速的数据传输能力。

4.4.7 在线测量系统应不影响到设备和人员的安全，也不影响电力系统的正常运行。

5 电力系统暂态过电压分压系统

5.1 暂态过电压分压系统的构成

5.1.1 概述

暂态过电压分压系统主要由电压互感器或变压器电容式高压套管构成。其中，电压互感器可为电子

式电压互感器、电磁式电压互感器或电容式电压互感器。暂态过电压分压系统高压臂的输入电压即被监测的暂态过电压，由高压端和接地回路引入，低压臂的输出电压通过测量电缆或光纤输出。

5.1.2 电子式电压互感器

电子式电压互感器不仅能满足正常使用条件下测量用，在电网出现异常现象，一次电压 U_1 和频率 f 与额定值明显不同时也能正确传送信号，将电网的任何重要变化记录下来。

5.1.3 电磁式电压互感器

电磁式电压互感器的特点是容量小且比较稳定，正常运行时处于线性状态。电磁式电压互感器多用于 220kV 及以下的电力系统中，其误差特性和暂态特性优于电容式电压互感器。

5.1.4 电容式电压互感器

电容式电压互感器由串联电容器抽取电压，再经变压器变比，不会因铁芯饱和引起铁磁谐振。电容式电压互感器多用于 110kV 以上的电力系统，其冲击绝缘强度比电磁式电压互感器高。

5.1.5 利用电容式套管构成的分压系统

电容式套管是目前高压、超高压系统中最常用的型式。采用变压器电容式套管作为分压器的高压臂，在套管的末屏测量抽头处安装标准电容，作为分压器的低压臂，可形成套管末屏分压系统。

5.2 暂态过电压分压系统的暂态特性要求

5.2.1 电网中暂态条件的考虑

除正常使用条件外，对电网中由以下现象引起的暂态过电压信号的响应应纳入对高压设备的要求范畴：

- a) 高压架空线上的大气放电；
- b) 开关操作；
- c) 连续过电压。

电网中一次侧遭受这些影响或侵袭时，二次侧应能很好地反映一次侧的变化情况，即要求响应的转换装置具有良好的暂态响应特性。

5.2.2 暂态响应要求

暂态响应特性即一次短路后规定时间 t_s 的二次电压 $U_2(t)$ 与一次短路前的二次电压峰值 $\sqrt{2} U_2$ 的比值。

在高压端子与接地端子之间的电源短路后，暂态过电压分压系统的二次电压应在额定频率的一个周期内衰减到短路前电压峰值的 10% 以下。

在暂态条件下，应与高压端子的电压波形对比，保证所测得的二次电压波形的保真度。

5.2.3 传递过电压要求

按规定的试验和测量条件，由一次传递至二次端子的过电压应不超过规定的限值，见 GB/T 20840.5—2013。A 型冲击波适用于空气绝缘变电站中的电容式电压互感器或电磁式电压互感器，B 型冲击波适用于安装在气体绝缘金属封闭变电站（GIS）内的电容式电压互感器或电磁式电压互感器。

5.2.4 分压系统的变比校正

分压系统应用便携雷电冲击发生器做电压互感器暂态冲击电压响应特性测量变比校正（具体方法参见附录 A）。

套管末屏电压传感器构成的电网过电压测量装置的误差分析参见附录 B。

6 电力系统暂态过电压记录系统

6.1 概述

暂态过电压记录系统主要由暂态数据记录仪（简称数据记录仪）构成。数据记录仪应同时具有数据采集、数据存储和数据分析处理的功能。

6.2 系统的不确定度

6.2.1 不确定度的来源

系统不确定度包括以下因素：

- a) 仪器冲击刻度因数的不确定度引起过电压峰值的不确定度;
- b) 确定仪器的基准电平时,由于数据记录仪的噪声影响过电压幅值造成的不确定度而引起过电压峰值的不确定度;
- c) 传递特性测定装置与实际测量装置之间的变动产生的不确定度引起过电压峰值的不确定度;
- d) 测量系统本身对波前时间测量的不确定度引起的过电压波前时间测量的不确定度;
- e) 互感器本身的电容量(入口电容)对波前时间的影响。

6.2.2 不确定度的要求

数据记录仪的测量不确定度应满足以下要求:

- a) 冲击电压峰值测量: $\pm 5.0\%$;
- b) 冲击时间参数(波前时间、截断时间等)测量: $\pm 15.0\%$ 。

数据记录仪输出的原始数据在未经信号处理前应满足上述要求。在满足上述要求时,可进行信号处理以进一步提高数据的准确度,但原始数据仍应保留。

6.3 记录系统的特性要求

6.3.1 采样率

采样率应不小于 $30/t_x$ (采样数/s), t_x 为被测时间间隔,可由记录读出。

示例:在测雷电冲击全波波前时间 t_1 时, t_x 为 t_{30} 和 t_{90} 之间的时间间隔。 t_{30} 和 t_{90} 分别为达到冲击峰值的 30% 和 90% 处的时间。

6.3.2 采样频率

对于雷电过电压(即大气过电压),采集卡的采样频率应不低于 20MHz。对于操作过电压,采样时间应不少于 1s。

6.3.3 额定分辨率

用于现场测量用的数据记录仪宜选取分辨率为 9 位~10 位的存储器。

6.3.4 采样深度及存储容量

在暂态冲击过电压测量中,记录长度应足够长,宜为 4×10^6 个点以上(单相)。

6.3.5 带宽

仪器的带宽应能满足测量到雷电过电压波形上叠加的振荡。

6.4 记录系统的试验项目

每台新的数据记录仪以及在大修后或对其性能有疑问时应检定下列特性:

- a) 静态特性,包括静态刻度因数、静态整体非线性和静态局部非线性;
- b) 动态特性;
- c) 时基的整体非线性。

6.5 暂态过电压数据记录

6.5.1 应对变电设备中各相线路中的暂态过电压进行在线监测,实时自动记录每次暂态过电压波形数据,包括:

- a) 母线上各相过电压的幅值;
- b) 母线上各相过电压的波形;
- c) 母线上各相过电压持续时间、正波和负波的次数;
- d) 出现时间。

6.5.2 能按照事先设定的触发记录条件自动记录暂态数据波形,其中包括工频周期的事故发生前的正常数据。

6.5.3 线路中任意相上的电压出现异常都应自动启动全部通道进行采集记录,各相线路中的暂态过电压波形应同步无相差。

6.5.4 每次记录的数据应自动形成过电压数据文件，标明记录开始到结束的时间，并自动保存到仪器电子硬盘相应位置。

6.5.5 应能通过 USB 通信口从硬盘连续调出所有存储内容，详细分析过电压波形及有关参数，判定故障发生过程及状况。

6.5.6 系统应具有完善的网络通信功能，既能通过远端计算机终端控制系统运行，也能通过网络将现场采集数据送至运行管理部门。

6.6 数据记录系统的基本设置

6.6.1 数据记录仪应能随时监测各相过电压的发生过程，自动采集记录每次过电压事件，并自动存储至硬盘，每次过电压记录自动依次生成一个文件名，包含波形、记录时间等数据。

6.6.2 数据记录仪硬盘空间应大于 1GB。

6.6.3 数据记录仪应设置合适的量程，包括采样深度、采样频率和带宽等。应根据被测暂态过电压的峰值和分压系统的刻度因数选用合适的量程，使数据记录仪的输入电压占满量程的一半以上，最好是 80% 左右。

6.6.4 数据记录仪的启动条件应设置在大于额定电压的 1.3 倍~2 倍，可适应 110kV~220kV、330kV~500kV 及更高电压等级电力系统的暂态过电压监测。

6.6.5 数据记录仪应设计预触发功能（负延时），能观察到过电压发生时工频电压的相位值。为保证数据的同步性，数据采集卡应设定为任意通道内触发机制。

6.7 数据记录系统的触发方式

6.7.1 仪器的触发应采用负延时外触发方式。

6.7.2 负延时外触发方式是测量仪器直接对输入信号采样 1 个~2 个工频周期，后面的采样数据覆盖前面的数据，保存最新采样的 5 个工频周期数据。

6.7.3 外触发方式是由测量仪器外部引入信号去触发，触发电压阈值宜设为额定电压的 1.3 倍。每个通道（A、B、C 三相）都应设有触发电路，并且正、负极性都可触发。

6.8 信号的传输

暂态过电压分压系统取得监测信号后，由电缆将信号送入信号采集装置进行 A/D 转换。信号电缆、连接导线和电源线均应采用屏蔽电缆。

6.9 采样装置采样位数与采样速率的影响

数据记录仪的采样装置在进行模拟信号到数字信号的转换时，如受到采样位数和采样速率的限制，可采用变频采样技术。

7 在线测量及记录系统的组建

7.1 仪器的选用

7.1.1 一般原则

在线测量系统的组建和设备的选取应根据现有电力系统高压设备的安装情况并充分考虑测量与记录系统的一般要求来进行。

7.1.2 分压器

电子式电压互感器可供测量和保护使用，不仅能满足正常使用条件下测量用，在电网出现异常现象时，一次电压 U_1 和频率 f 可能与额定值明显不同时也能正确传送信号，将电网的任何重要变化记录下来。

电容式电压互感器多用于 110kV 及以上中性点直接接地的电力系统，冲击绝缘强度比电磁式电压互感器高。

电磁式电压互感器的误差特性和暂态特性优于电容式电压互感器，多用于 220kV 及以下的电力系统中。

可根据电力系统的运行方式、电压等级、遭受雷电过电压侵袭的程度等相关因素考虑选用何种电压互感器或变压器电容型套管。

7.1.3 接地回路

接地回路宜采用宽度为 30cm~1m 的铜、铝等非磁性金属带或薄板，以减少回路阻抗。若有大面积的金属板或细孔金属网，则可以利用它作为接地回路。

7.1.4 传输系统

传输系统是将转换装置的输出信号传递到记录仪器系统的一套装置，一般由带终端阻抗的同轴电缆组成，还包括转换装置与记录仪器所连接的隔离滤波、二次分压等装置。

测量电缆应选用高频同轴电缆或双屏蔽同轴电缆。

同轴电缆波阻抗应与仪器输入阻抗相匹配。同轴电缆波阻抗的数值宜以实测值为准。

可选用光缆取代测量电缆。所选光缆两端光电转换器的频带宽度应满足暂态过电压测量要求，并按光缆传送信号的幅度合理配置分压器的输出电压。

电磁暂态过电压传输系统应满足无线网络和局域网实时传输监测数据的要求。

7.1.5 数据记录仪

选用的数据记录仪应满足第 6 章的规定。

7.2 在线测量设备的连接与布置

7.2.1 测量设备与电力系统的连接示意图

测量设备与电力系统的连接示意图如图 2 所示。

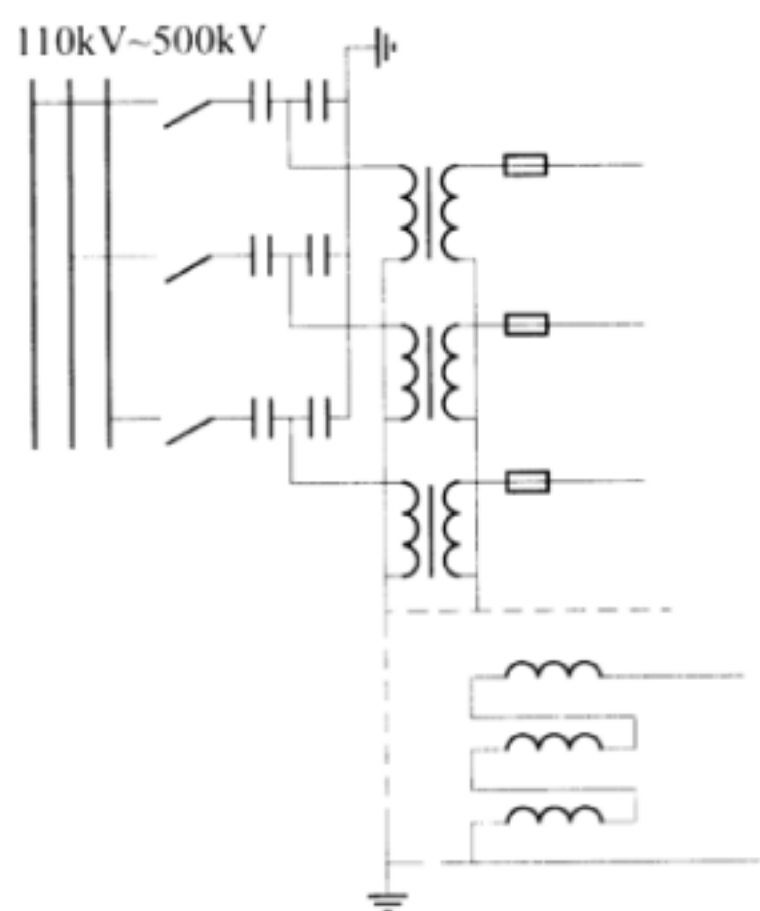


图 2 测量设备与电力系统的连接示意图

7.2.2 暂态过电压分压系统与数据记录仪的连接

暂态过电压分压系统与数据记录仪通过传输系统连接。

7.2.3 数据记录仪的布置

宜将数据记录仪布置在专门放置二次设备的专用柜内。

7.2.4 测量设备的接地

暂态过电压分压系统到数据记录仪之间的接地连线的阻抗应尽量减小。

紧靠暂态过电压分压系统附近应有集中的接地极，电压互感器接地端应用最短的宽铜带或铝带接地连线与接地极连接。

暂态过电压分压系统应采用低阻抗的接地回路连接。

7.2.5 信号传输电缆的匹配

信号传输电缆两端与暂态过电压分压系统及数据记录仪的连接应采取匹配措施。电容型分压系统应采用始端匹配，若一端匹配不够完善，也可采用两端匹配。

7.2.6 抗干扰措施

7.2.6.1 暂态过电压测量中电磁干扰主要来源于以下三方面：

- a) 信号传输电缆及触发信号电缆外皮中流过的暂态电流。
- b) 间隙放电时产生的空间电磁波辐射。
- c) 数据记录仪电源线引入的干扰和相位。

在线测量系统中，对这三方面干扰来源均应采取相应的抗干扰措施。

7.2.6.2 对于 7.2.6.1 中的 a) 项，应采取如下措施，减少信号传输电缆及触发信号电缆中的暂态电流：

- a) 电压互感器应置于紧靠集中接地极的地点，并以最短的连线相连，此连线应采用宽的铜带或铝带。
- b) 从电压互感器到数据记录仪应敷设较宽的金属板或金属带作为接地连线，使电压互感器与数据记录仪尽量处于等电位的状况。信号传输电缆应沿此接地连线紧靠地面敷设，使电缆外皮与接地线构成的回路面积尽量小。电缆宜直接敷设在接地连线的金属板或金属带之下。
- c) 信号传输电缆应尽可能短。
- d) 采用双屏蔽同轴电缆时，电缆首端的内、外层屏蔽或金属管应接地，电缆末端的外层屏蔽或金属管也应接地。电缆内层屏蔽末端是否接地由干扰试验确定。如有可能，电缆外层屏蔽或金属管应多点接地。
- e) 当数据记录仪具有对称输入通道时，可采用平衡接线，使引入的共模干扰彼此抵消。
- f) 电缆采取两端匹配的接线方式。
- g) 提高同轴电缆中传送的信号电平，使共模干扰所占比重减少，即提高信噪比。当被测信号电平高于数据记录仪输入的允许限值时，数据记录仪可加外设衰减器或二次分压器。

7.2.6.3 对于 7.2.6.1 中的 b) 项，测量设备可采用如下屏蔽措施，加强测量设备的屏蔽：

- a) 分压器低压臂应有接地的金属屏蔽套，信号传输电缆与分压器低压臂及与数据记录仪的连接均应采用同轴电缆。
- b) 仪器应采用金属外壳等作为屏蔽。使用时，数据记录仪应尽量远离放电点。
- c) 对于灵敏度较高的数据采集系统，应采用金属网或金属板制成的全封闭的双层或单层屏蔽室或屏蔽箱，将数据记录仪放在屏蔽室（箱）中，屏蔽箱应直接接地。

7.2.6.4 对于 7.2.6.1 中的 c) 项，数据记录仪供电电源宜采取如下隔离与滤波措施：

- a) 数据记录仪应采用单独的隔离变压器供电。隔离变压器两个绕组之间的屏蔽应与测量仪器的屏蔽室（箱）相连。若隔离变压器放在屏蔽室（箱）外，它的二次绕组及出线应全部屏蔽；若放在屏蔽室（箱）内，则其一次绕组及连线应全部屏蔽。
- b) 宜在屏蔽室（箱）或数据记录仪的电源入口处串接低通滤波器，抑制高频干扰。

8 整体测量及记录系统的性能校核及校核记录

测量及记录系统的性能校核及校核记录应包括：

- a) 测量系统性能试验的次序（首次，第二次，……）。
- b) 测量系统性能试验日期。
- c) 现场环境条件。
- d) 校准机构。
- e) 校准用仪器设备的型号和编号。
- f) 校准试验方法。
- g) 测定的标称刻度因数。
- h) 冲击波时间参数或阶跃响应。
- i) 干扰电平。

- j) 按标准规定的要求判断校核结果是否合格。
- k) 响应的处理情况等。

9 暂态过电压的类型识别及在线测量数据不确定度的估算

9.1 暂态过电压的类型识别及特征量分析

对过电压在线测量数据进行分析时,应用特征量区分暂态过电压中内部操作过电压与不同类型的雷电过电压。暂态过电压通过电容式电压互感器的隔离变换后,低压侧测得的响应波形不是按照变比传递,而是出现了伴随有高频振荡过程的失真现象。可对畸变的高频暂态过电压信号进行频谱分析,在高频的各个频段进行后期补偿,各频段补偿系数利用实验数据与理论计算综合计算,补偿后的高频暂态过电压信号与原始过电压波形在误差范围内一致(具体参见附录 C 和附录 D)。

9.2 暂态过电压在线测量数据不确定度的估算

暂态过电压测量的总不确定度由若干分量组成,这些分量按其数值估算所用的方法分为 A 类和 B 类。A 类分量考虑随机因素的影响,根据多次重复测量的结果用统计方法进行估算。B 类分量根据环境条件和仪器设备性能等已知的影响因素,用不同于统计的其他方法进行估算。

电压互感器在暂态条件下的一次和二次电压规定如下:

$$U_1(t) = U_1 \sqrt{2} \sin(2\pi ft + \varphi_1) + U_{1d}(t) + U_{1r}(t) \quad (1)$$

$$U_2(t) = U_2 \sqrt{2} \sin[2\pi f(t - t_d) + \varphi_2] + U_{2d}(t) + U_{2r}(t) \quad (2)$$

式中:

- $U_1(t)$ —— $U_{1d}=0$ 和 $U_{1r}=0$ 时的一次电压方均根值;
- $U_2(t)$ —— $U_{2d}=0$ 和 $U_{2r}=0$ 时的二次电压方均根值;
- $U_{1d}(t)$ ——一次直流电压;
- $U_{2d}(t)$ ——二次直流电压;
- φ_1 ——一次相位移;
- φ_2 ——二次相位移;
- $U_{1r}(t)$ ——一次剩余电压,包含谐波和分数谐波分量;
- $U_{2r}(t)$ ——二次剩余电压,包含谐波和分数谐波分量;
- t ——时间瞬时值;
- t_d ——电压互感器的延迟时间。

注:暂态是一次电压公式中的一个或多个参量突然变化而产生的。

暂态下的瞬时误差 $\varepsilon_u(t)$ 计算公式如下:

$$\varepsilon_u(t) = \frac{K_N u_2(t) - u_1(t - t_d)}{u_1 \sqrt{2}} \times 100\% \quad (3)$$

式中:

K_N ——互感器额定变比。

电子式电压互感器、电磁式电压互感器和电容式电压互感器在对最后测量的数据进行误差估算时均可采用以下两种方法相结合的方法实施:

- a) 通过现场采样的大量数据进行数据拟合。因测量得到的数据都是在真值附近,具有一定的分散性,可根据以往测量得到的大量数据得出暂态过电压数据分布特性的曲线,然后进行误差估算。
- b) 计算机模拟仿真。通过对现场互感器建立模型,然后对不同的暂态过电压波形的响应特性仿真,得出该互感器对暂态过电压波的响应特性,包括对过电压幅值和时间的影响,最后根据相应的误差数据对现场数据进行误差修正。

10 过电压测量系统其他注意事项

- 10.1 隔离变压器一次侧和二次侧应采用不共地连接，以保证二次设备的绝缘安全性。
- 10.2 仪器输入阻抗宜为大于 $100\text{k}\Omega$ 的高阻接入。
- 10.3 对于 35kV 非直接接地的 V 形连接方式，仪器应设定特殊连接方式。

附录 A

(资料性附录)

电磁式电压互感器暂态冲击电压响应特性仿真分析

A.1 变电站的雷电过电压建模与仿真

因变电站采用了进线段保护,在进线段内绕击或反击而产生入侵雷电流的机会非常小。在进线段以外落雷时,则由于进线段导线本身阻抗的作用使流经避雷器的雷电流受到限制,同时,由于在进线段内导线上冲击电晕的影响将使入侵波陡度和幅值下降。

图 A.1 中细线为导线 A 相雷击处电压,粗线为距雷击处 2km 变电站母线 (A 相) 上电压互感器处电压。

仿真结果表明,进线段以外落雷时 (2km 以外),由于进线段导线本身阻抗的作用使流经避雷器的雷电流受到限制,同时,在进线段内导线上冲击电晕的影响将使入侵波陡度和幅值下降。

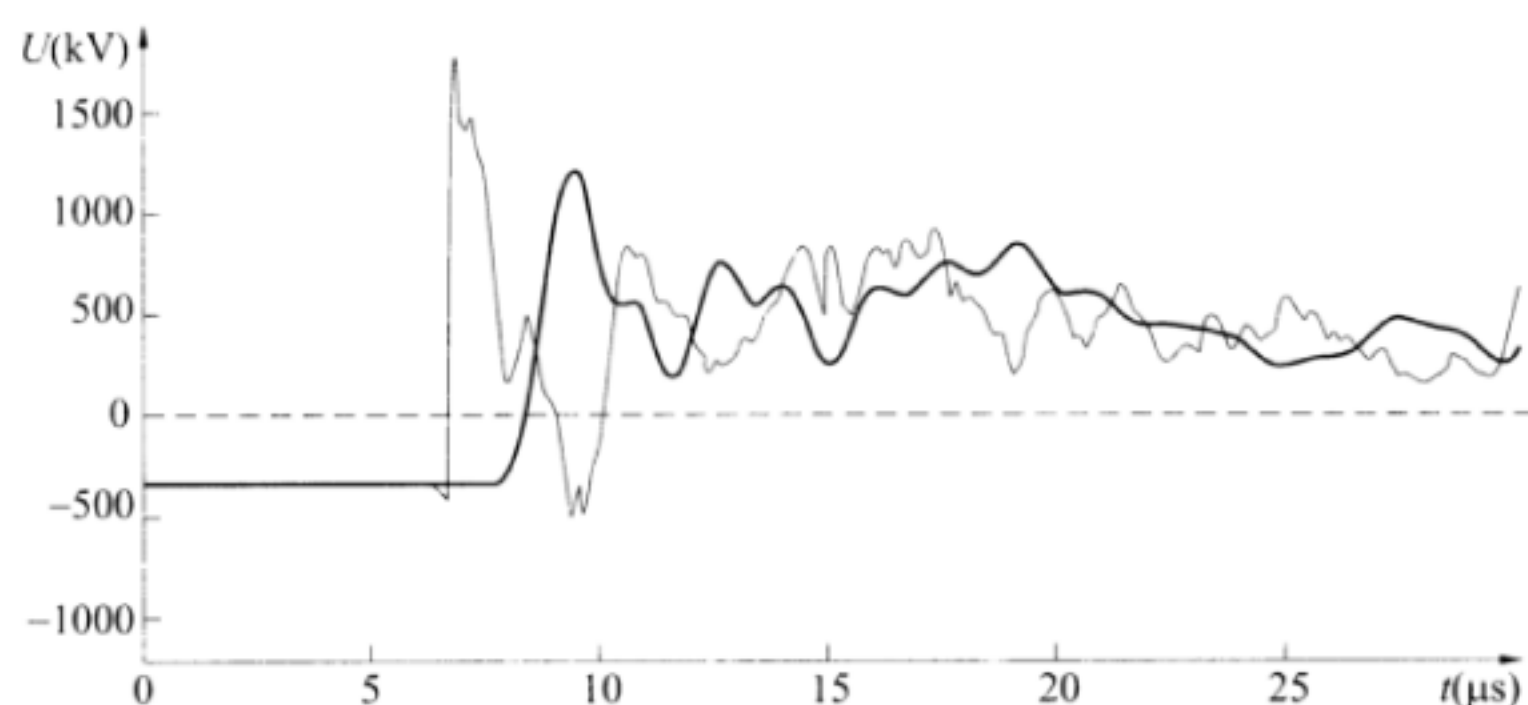


图 A.1 ATP (电磁暂态的仿真程序) 仿真结果

A.2 电压互感器的波过程

A.2.1 概述

电压互感器是一种特殊的变压器。互感器绕组在冲击电压作用下产生绕组间的电容耦合、电磁感应和绕组内部的自由振荡。

A.2.2 绕组之间的电容耦合电压

将互感器等效为一电容耦合电路,如图 A.2 所示,其中 C_1 、 C_2 分别为一次、二次绕组单位长度的对地电容, K_1 、 K_2 为一次、二次绕组单位长度的纵向电容, C_{12} 为一次、二次绕组之间的电容。假定电容参数沿绕组均匀分布,当电压作用于一次绕组首端时,若二次绕组首端开路 (首端电流等于 0),可得到二次绕组首端的电容耦合电压:

$$u_2(0) = \frac{C_{12}}{C_{n2} + \sqrt{\frac{K_2}{K_1}}(C_1 C_{n2} + C_2 C_{12})} \quad (\text{A.1})$$

式中:

$$C_{n2} = C_{12} + C_2。$$

电容耦合电压分布瞬间完成,感应信号与原突变信号同时出现且极性相同,电容耦合电压分布为绕组内部电压的起始分布。

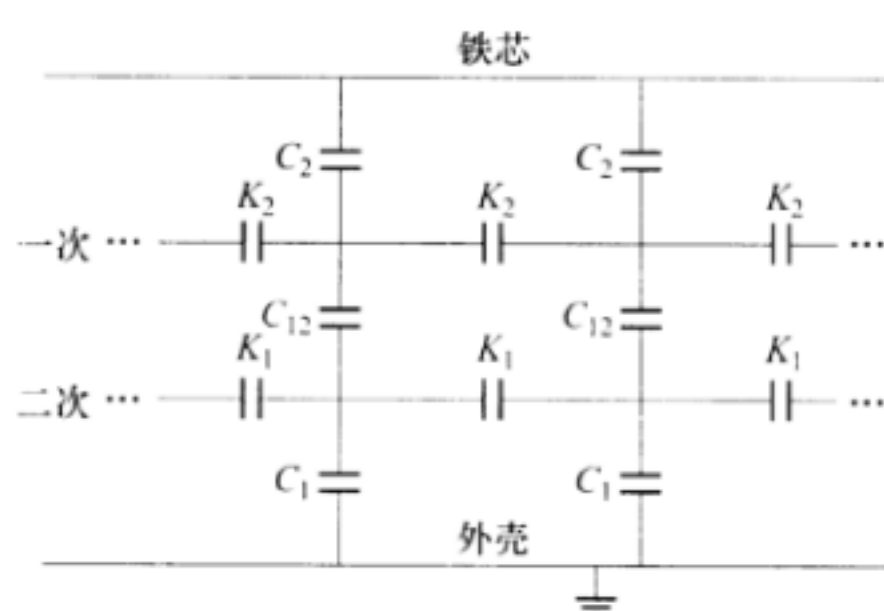


图 A.2 一次和二次绕组的电容耦合电路

A.2.3 绕组之间的电磁感应电压

不考虑内部杂散电容，互感器参数模型如图 A.3 所示。图中 L_1 、 L_2 分别代表 2 个绕组的自感， M 代表它们之间的互感， n 代表变比。由于绕组电感电流不能突变，铁芯存在有磁滞效应，因此互感器二次绕组电磁感应电压不能突变。一次绕组脉冲信号在二次绕组电磁感应信号上升沿变缓，二次绕组电压滞后于一次绕组电压，且互感器暂态过程的最终电压为电磁感应电压。

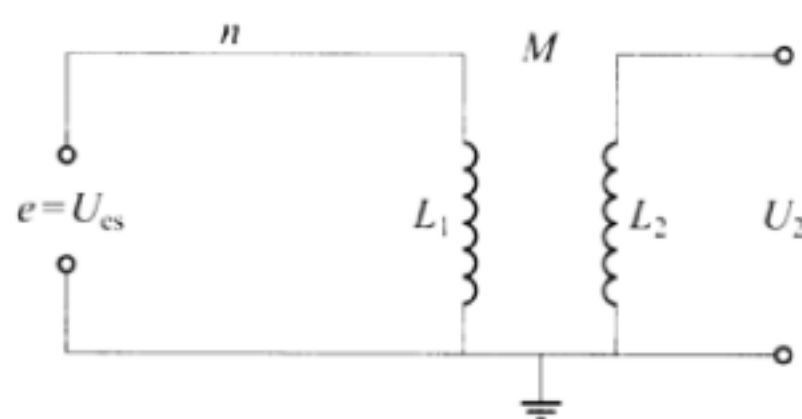


图 A.3 互感器参数模型

A.2.4 绕组的振荡过电压

当脉冲信号作用于互感器一次绕组时，由于起始电压分布和最终电压分布不同，一次绕组内部将产生自由振荡。在该一次绕组自由振荡电压的作用下，将在二次绕组中感应自由振荡电压。同时，整个互感器等效为一个由电感、电阻和电容串并联组成的回路，二次绕组输出由最初电容耦合电压到最终的电磁感应电压之间会存在一个自由振荡的过渡过程。起始分布电压（静电感应电压）和最终分布电压（电磁感应电压）相差越大，自由振荡分量越大，振荡越强烈。

A.3 电压互感器仿真分析

A.3.1 仿真模型

仿真分析模型如图 A.4 所示。其中， L_1 、 L_2 分别为高、低压绕组线圈单元长度电感（包括自感和匝间互感）； C_1 、 C_2 分别为高、低压绕组的对地电容； K_1 、 K_2 分别为高、低压绕组纵向（匝间）等值电容； R_1 、 R_2 分别为高、低压绕组相应的等值损耗电阻； L_{r1} 、 L_{r2} 分别为高、低压绕组的对地寄生电感； C_3 为高、低压绕组间电容； N 为级联的集中参数单元个数，本模型取为 10。

A.3.2 仿真结果及分析

A.3.2.1 电压互感器同一绕组在相同时间参数的冲击电压下对幅值的响应特性

图 A.5 为电磁式电压互感器在冲击电压作用下一次绕组和二次绕组的电压波形。由图中可以看到，当冲击电压作用到互感器一次绕组后，互感器二次绕组产生较明显的电容耦合电压，二次绕组的电容耦合电压与一次绕组的冲击电压同时出现，且极性一致。而二次绕组的电磁感应电压小于且滞后于电容耦合电压，在电容耦合电压过渡到电磁感应电压的过程中还存在较大的自由振荡电压。

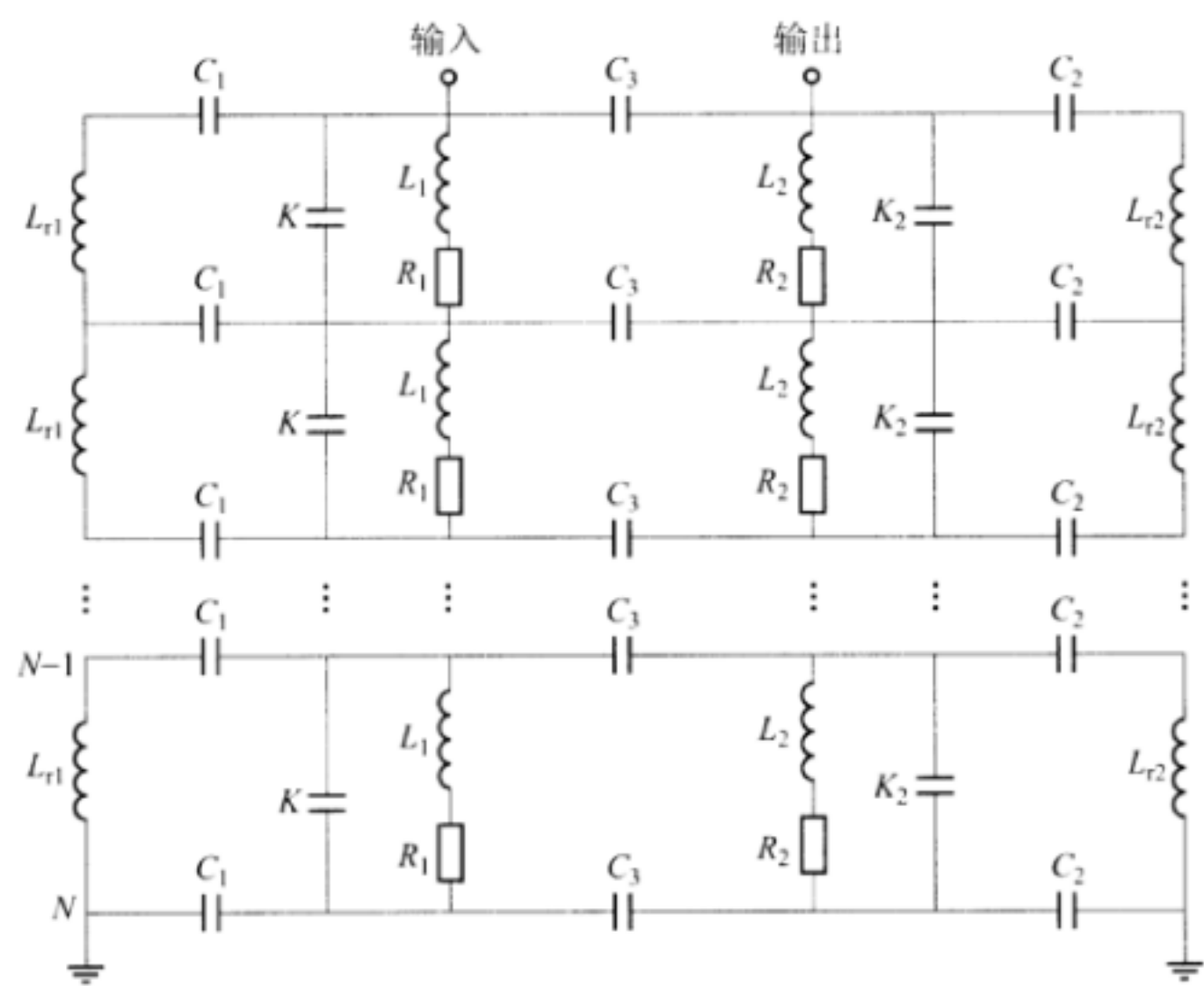


图 A.4 电压互感器仿真分析模型

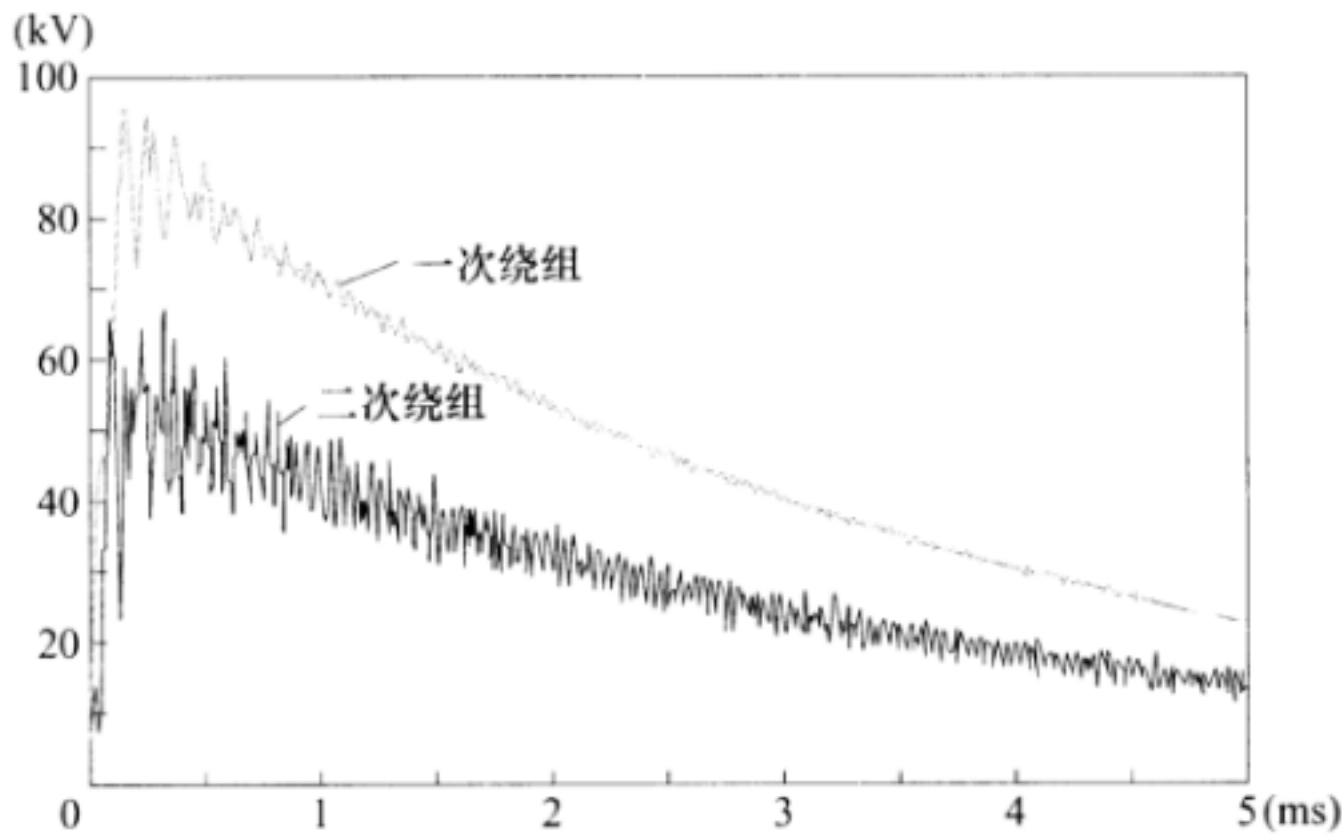


图 A.5 电磁式电压互感器冲击波形图（波前时间 $t_f=25\mu s$ ）

电压互感器在同一时间参数下进行试验，测得一次绕组电压和二次绕组电压幅值关系如图 A.6 所示。由图中可以看出，电压互感器一次绕组和二次绕组的电压幅值呈线性关系。互感器的传递函数计算公式如下：

$$U_{2m} = kU_{1m} + b \tag{A.2}$$

式中：

U_{1m} ——一次绕组电压幅值；

U_{2m} ——二次绕组电压幅值；

k ——传递比；

b ——常数。

对于相同时间参数冲击电压下的同一绕组来说，式中 k 和 b 都为定值。如在工频下， k 即为绕组的额定电压比的倒数， b 为 0。

A.3.2.2 电磁式电压互感器在不同时间参数冲击电压下的幅值响应特性

对仿真模型的同一绕组进行不同时间参数的冲击电压下的幅值响应计算，得出的波形如图 A.7 所示。

随着一次绕组冲击电压的波前时间的减小，二次绕组传递电压波形中的自由振荡、过程时间变长，且幅值逐渐变大。按照 GB/T 16927.1 中的规定对有振荡或过冲的一次电压峰值进行处理后，得出的同一绕组不同时间参数冲击电压下的幅值响应特性如图 A.8 所示。

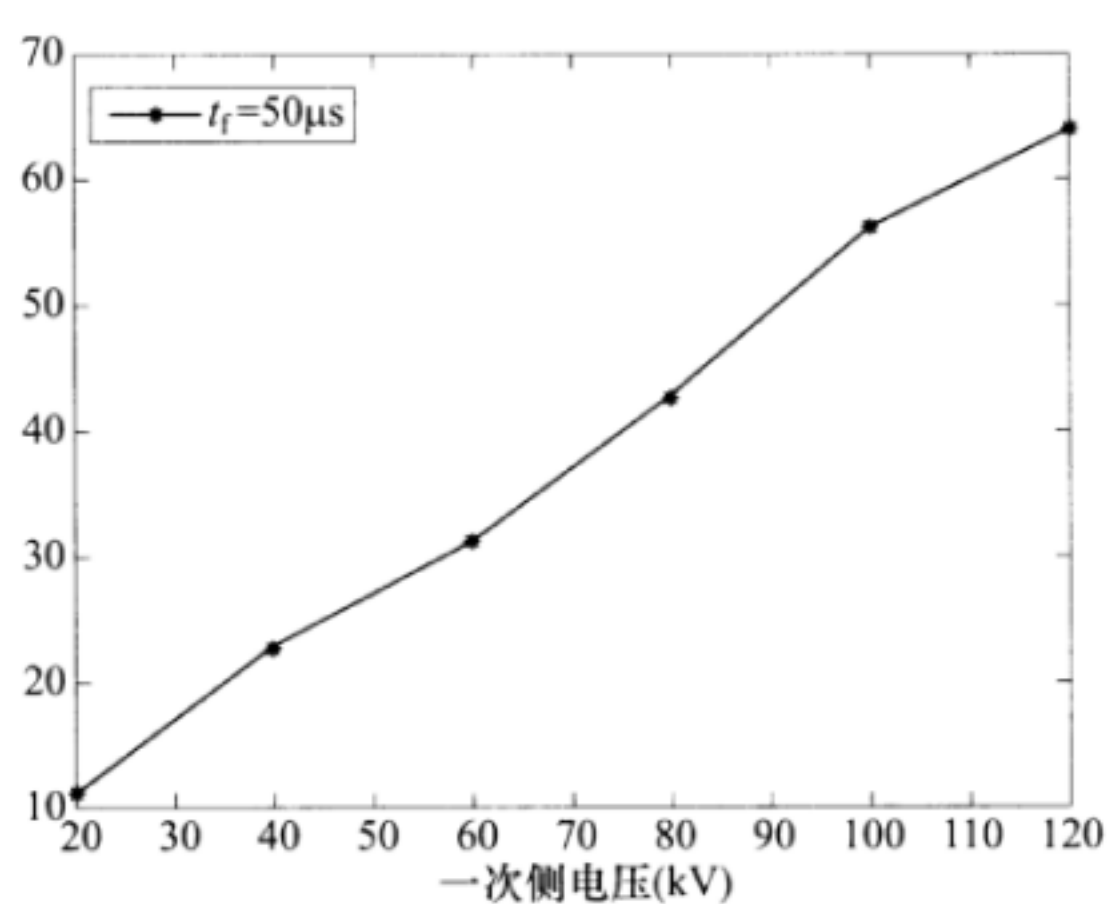


图 A.6 同一时间参数（波前时间 $t_f=50\mu s$ ）下电磁式电压互感器一次绕组和二次绕组电压幅值关系

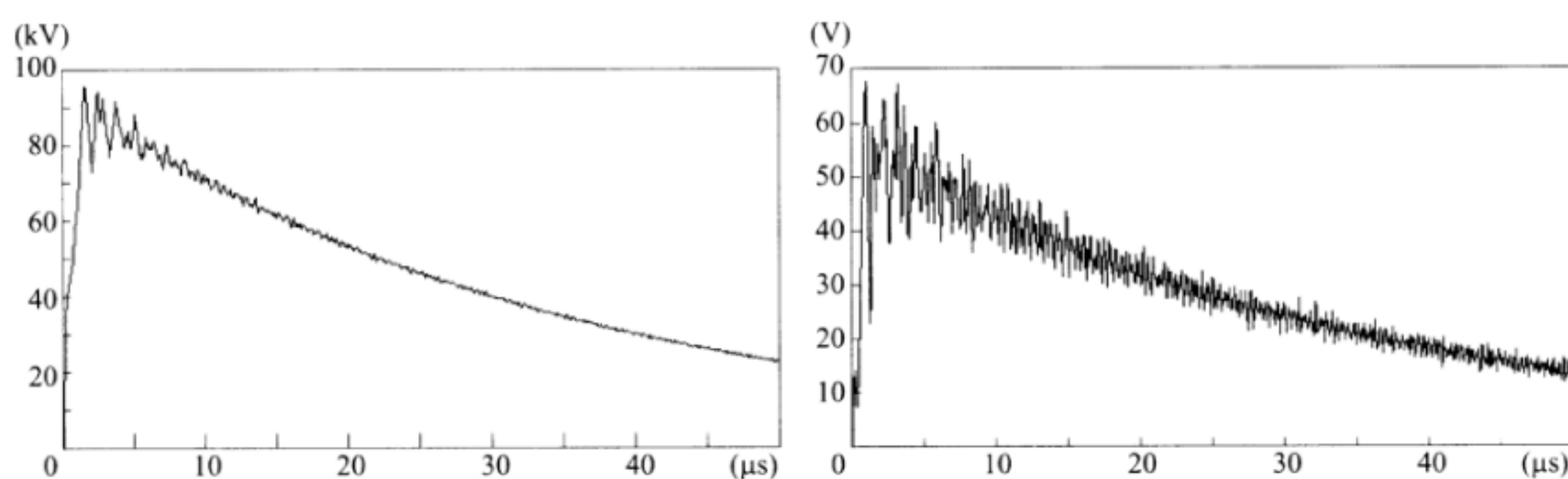


图 A.7 不同波前时间冲击电压下的幅值响应仿真典型波形（一次电压波前时间 $t_f=3\mu s$, $U_p = 96 \text{ kV}$ ）

由图 A.8 可以得出冲击电压时间参数对电磁式电压互感器传递函数的影响,波前时间越短,式(A.1)中的 k 值越大。

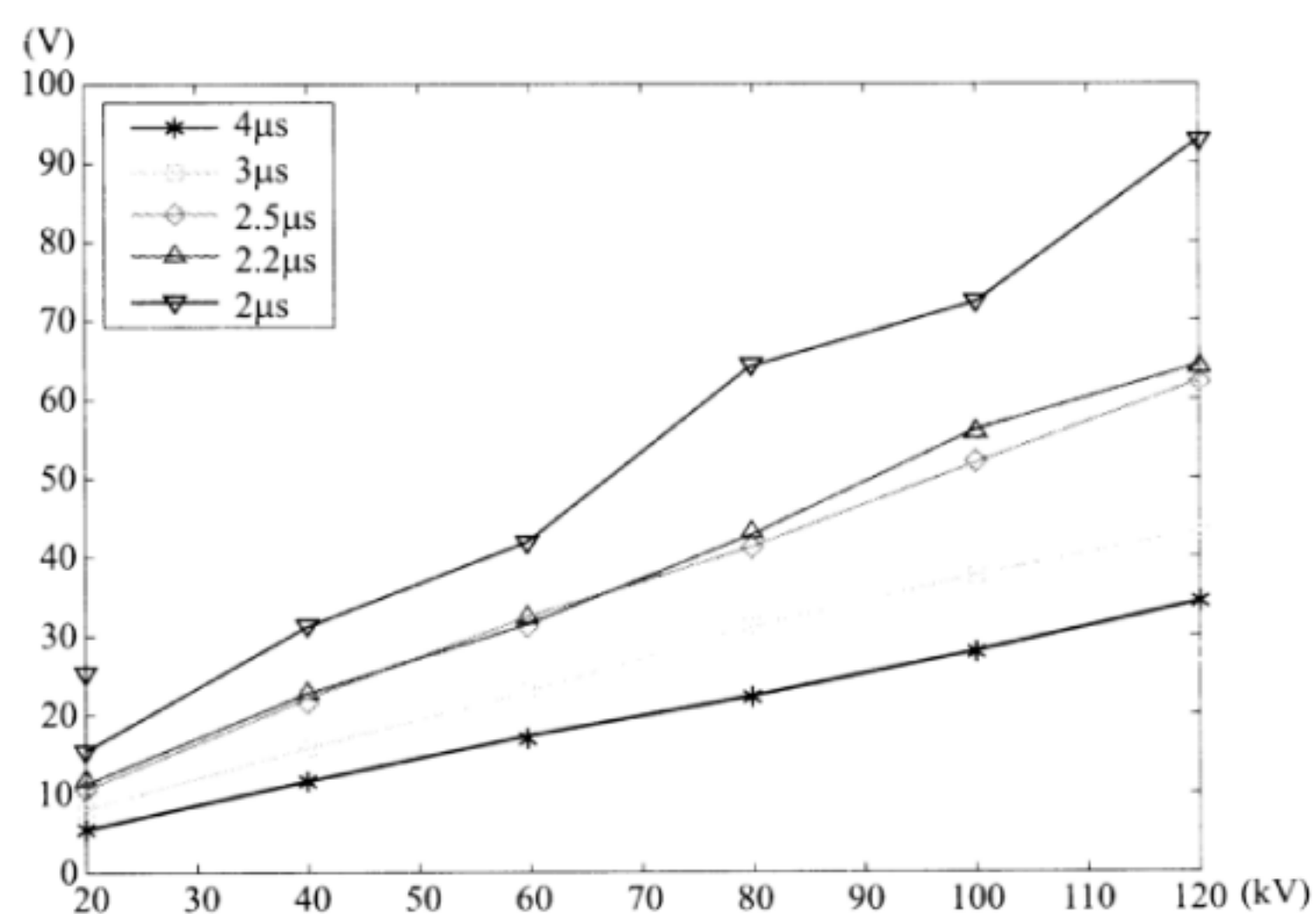
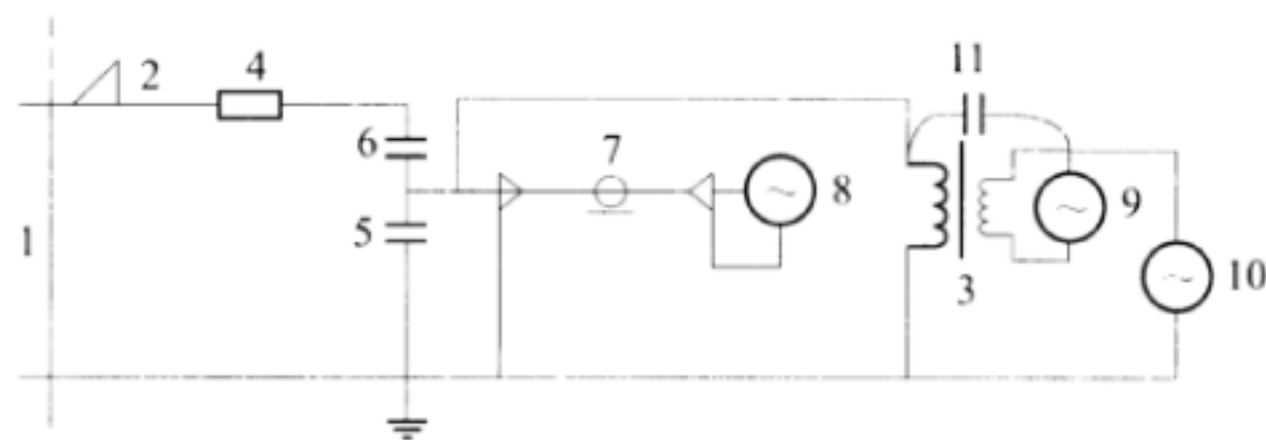


图 A.8 不同波前时间下电压的幅值响应特性

A.4 互感器冲击响应特性实测校验

A.4.1 测试原理

测试原理如图 A.9 所示。



说明：

- 1 ——冲击电压发生器；
- 2 ——引线；
- 3 ——被测电压互感器；
- 4 ——阻尼电阻；
- 5 ——电容分压器低压臂；
- 6 ——电容分压器高压臂；
- 7 ——同轴电缆；
- 8、9、10 ——示波器；
- 11 ——一、二次绕组间的耦合电容。

图 A.9 互感器冲击响应特性测试原理图

分别用 10kV 电磁式电压互感器、110kV 及 220kV 电容式电压互感器进行响应特性测试。在互感器高压、低压端子之间施加冲击电压。电容分压器的低压端子、示波器、被测电压互感器一次绕组的一个端子和底座均应接地。其中，示波器 8 测试的是被测电压互感器一次侧电压，示波器 9 测试的是被测电压互感器二次侧电压的电磁分量，示波器 10 测试的是被测电压互感器二次侧的电容耦合电压分量。负载阻抗为二次侧测量提供电压信号，负载阻抗 $Z_f = U^2 / P$ ，其中 P 为电压互感器二次侧输出功率， U 为测量时电压互感器二次侧输出电压。

A.4.2 测试数据

被测电压互感器一次侧及二次侧未加负载的情况下，冲击响应波形如图 A.10 所示。

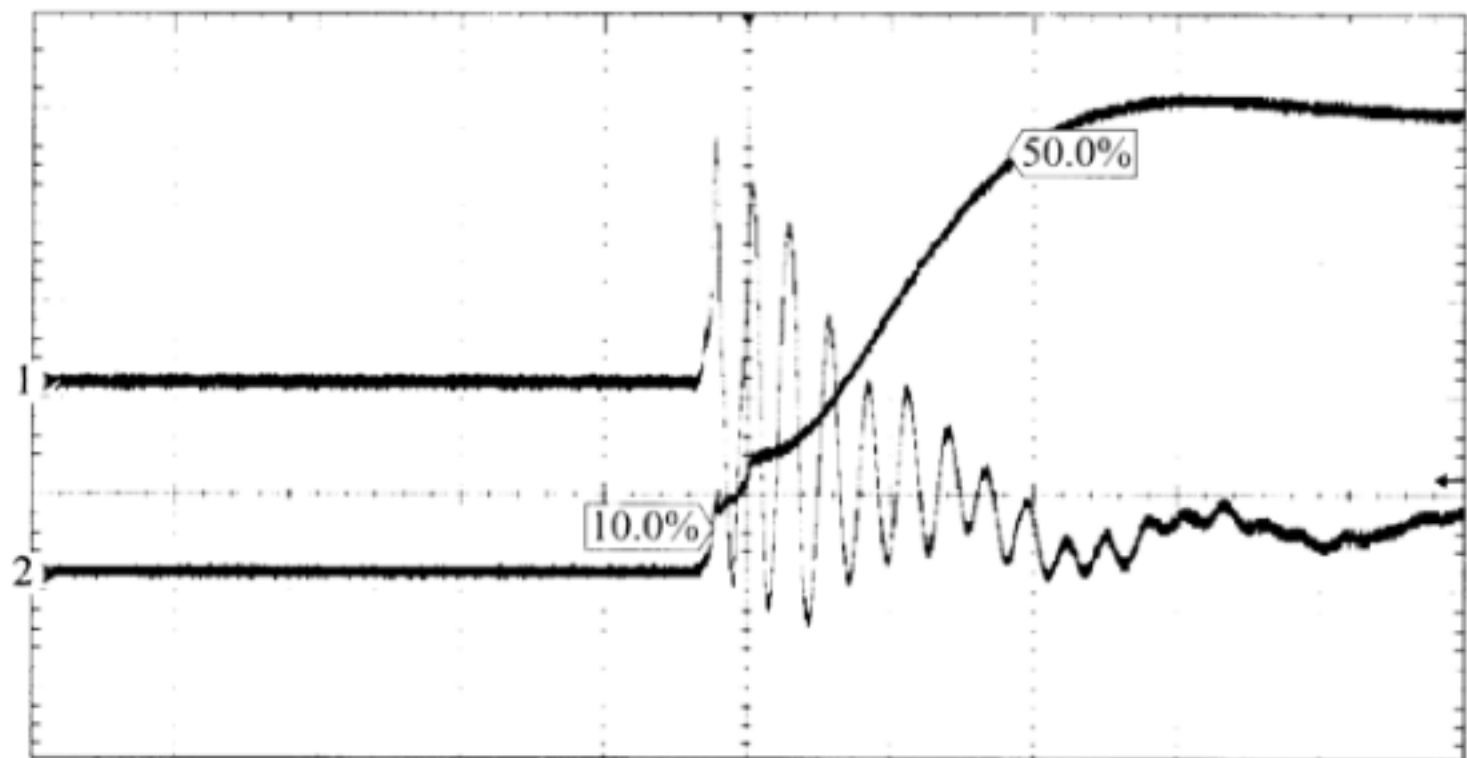


图 A.10 电压互感器不接负载时冲击响应特性

一次侧电阻为 5Ω，二次侧电阻为 8Ω，10kV 电磁式电压互感器的冲击特性响应如图 A.11 所示。图中曲线 2 代表被测互感器冲击电压作用下一次侧的电压，曲线 1 则为二次侧电压。测量得到的 10kV 电磁式电压互感器在冲击电压作用下一、二次电压和波前时间，以及根据测试数据得出的变比和峰值误差见表 A.1。

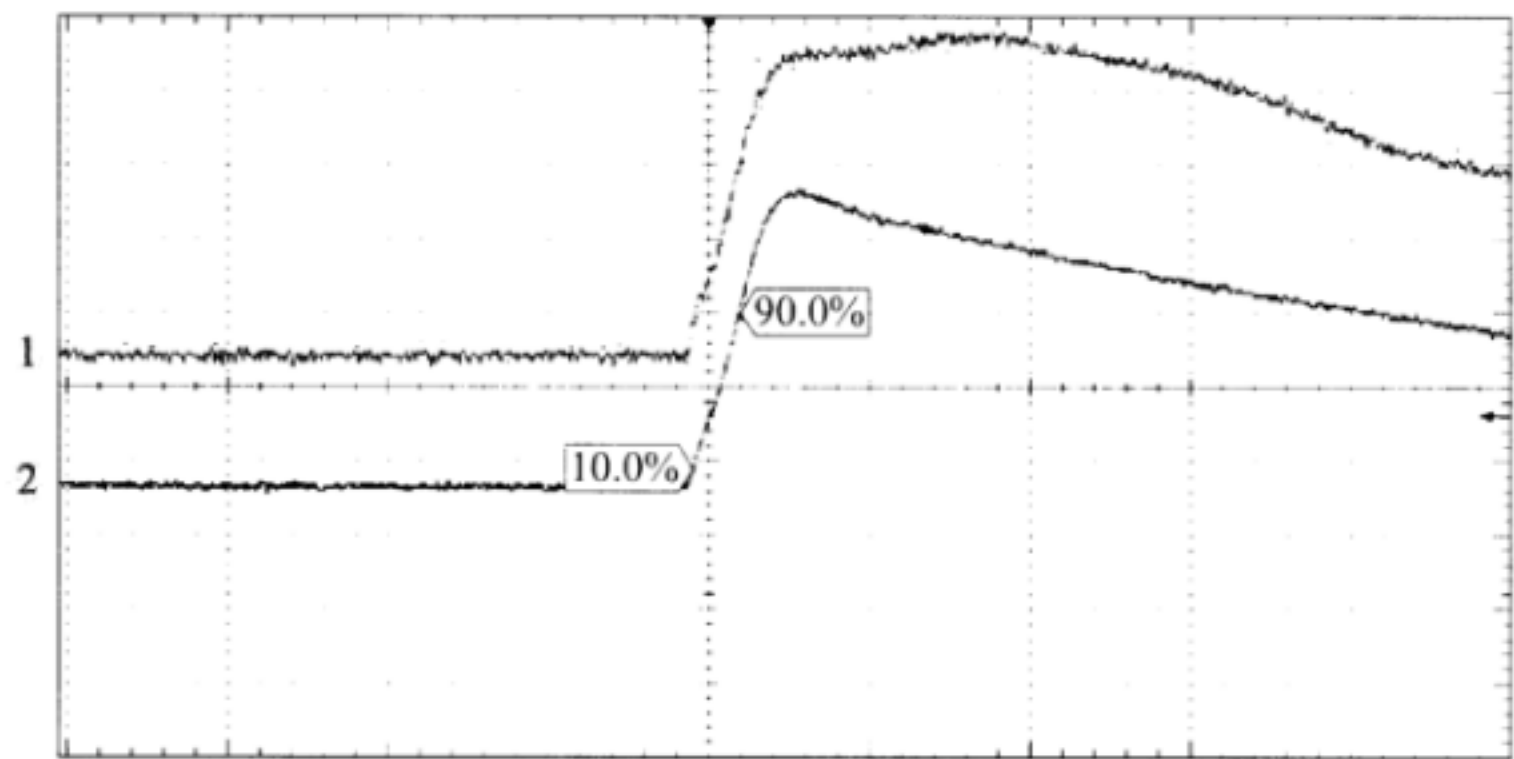


图 A.11 一次侧及二次侧均有电阻负载时电压互感器的冲击响应特性

表 A.1 10kV 电压互感器暂态响应测试记录表

一次电压峰值 V	二次电压峰值 V	一次波前时间 μs	二次波前时间 μs	变比	峰值误差 %
406	4.62	2.52	3.91	100	13.7
404	3.90	2.58	2.927	100	-3.46

电压互感器受到冲击电压作用时，因其分压电容对一次绕组的影响，实际测试得到的二次电压响应比单独按变比的测量值要高，未进行误差校正的条件下，实际测得的峰值误差可能高达 25%。

电压互感器在响应冲击电压信号时，波前时间响应误差和幅值响应误差与实际电路参数有关，只要测得线路参数，就可计算得到响应的误差范围。利用测量值再计及误差校正后就可得到实际暂态冲击电压波形参数。在进行校正后，电压互感器对于冲击暂态电压的幅值响应误差在 10%以内，波前时间响应误差在 15%以内，能够满足实际工程的应用。电压互感器完全满足对操作过电压的采集要求，虽然对雷电过电压的瞬变响应没有对操作冲击波那样灵敏，在允许一定误差的范围内，用互感器获取的雷电过电压数据完全可以对事故的原因做出判断和分析。

附录 B (资料性附录)

由套管末屏电压传感器构成的电网过电压测量装置的误差分析

B.1 原理

过电压测量装置由套管末屏电压传感器、信号调理电路、触发电路、数据采集卡、工控机及后台分析软件构成，其构成原理如图 B.1 所示。

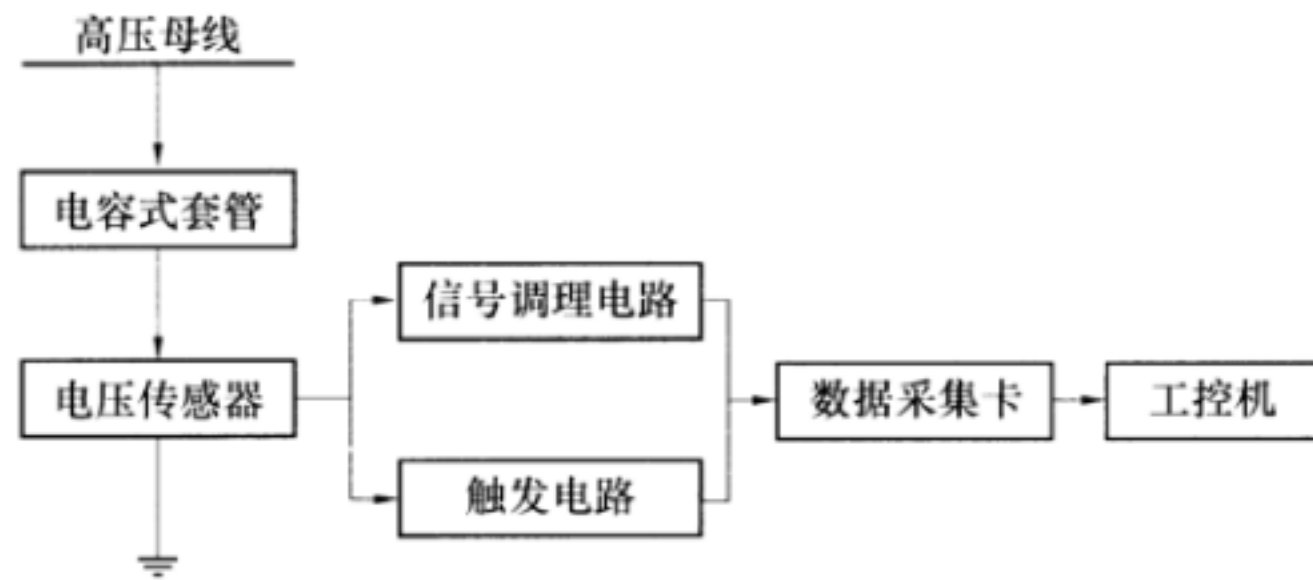


图 B.1 过电压测量装置系统构成原理框图

当电网出现过电压时，电压传感器采集到过电压信号，信号经过调理电路传送至数据采集卡，数据采集卡将输入的模拟电压信号转换为计算机所能识别的数字信号，并以文件形式保存在计算机硬盘上。后台数据分析软件提供了过电压数据特征信息提取、分类模式识别等功能，完成对过电压数据的分析处理，并以图形和故障报告的形式显示。

电容式套管是目前高压、超高压系统中最常用的型式，其绝缘主要为油纸内绝缘和外绝缘的结合。油纸电容式套管的电容芯子以矿物油浸电缆纸为绝缘，在导杆上包以多层绝缘，在层间设计所要求的位置上夹有铝箔，其等效电路为一串同轴圆柱形电容器串联。

采用变压器电容式套管作为分压器的高压臂，在套管的末屏测量抽头处安装电容，作为分压器的低压臂，形成电容分压器电压传感器。

B.2 误差分析

在电容分压器的首末端达到完全匹配时，套管电容分压系统分压比 k 为

$$k = \frac{2(C_1 + C_2)}{C_1} \quad (\text{B.1})$$

其中， C_1 为套管等值电容， C_2 为接入到末屏接地处的传感器电容。如果在系统运行过程中，套管主电容的变化量为 ΔC ，当 ΔC 很小时，可认为仍满足首末端匹配，新分压比 k' 为

$$k' = \frac{2(C_1 + \Delta C + C_2)}{C_1 + \Delta C} \quad (\text{B.2})$$

则分压比误差 Δk 为

$$\Delta k = k - k' = \frac{2C_2\Delta C}{C_1(C_1 + \Delta C)} \quad (\text{B.3})$$

采用套管末屏电压传感器在末屏出线处获取电压信号安装简便，但分压器的高、低压臂之间有电的直接联系，容性设备的末屏接地线要解开后与电压传感器相连，改变了一次设备的接地方式，电气安全性较差。

附录 C

(资料性附录)

电压互感器在线实测雷电过电压波形分析

图 C.1 是利用电容式电压互感器在线检测系统采集到的一组直击雷过电压波形。记录显示断路器 205 的 C 相动作两次，断路器 206 的 A、C 两相各动作一次。

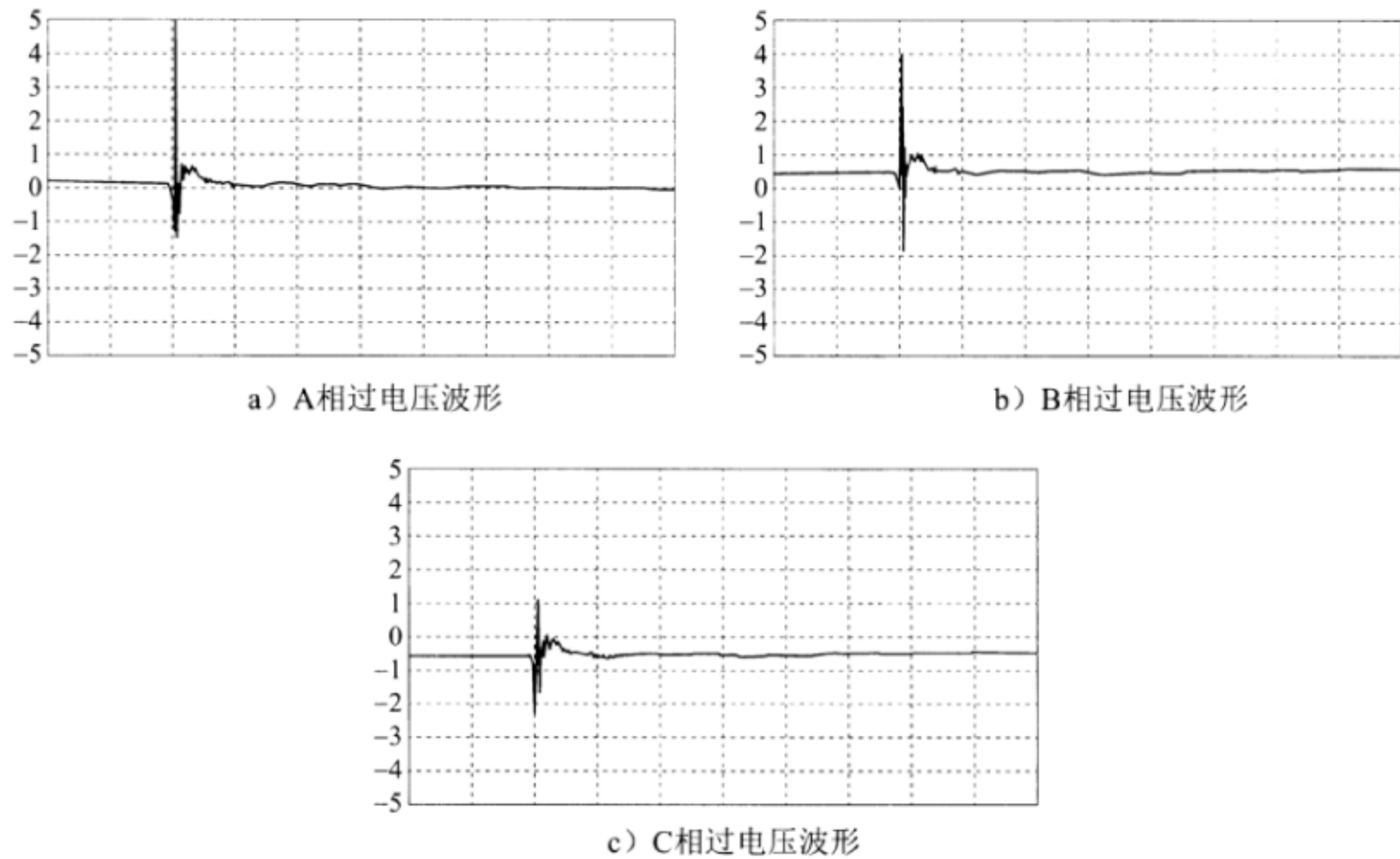


图 C.1 电容式电压互感器雷电过电压波形图

由图 C.1 波形可以看出，A 相过电压幅值最高，达到 5（标么值）以上，超出暂态过电压监测仪记录量程。单就 A 相波形分析得到，其波头为 $2\mu\text{s}$ ，整个波过程持续时间为 $50\mu\text{s}\sim 80\mu\text{s}$ ，可断定 A 相过电压为雷击过电压。B、C 两相为感应雷电过电压，B、C 相最高电压幅值标么值分别达到 3.98、2.31。B、C 两相感应过电压在数值上的差别是因为导线悬挂的高度不同而引起的。

对现场采集的雷电过电压波形分析表明，单就 A 相波形分析得到其波头为 $2\mu\text{s}$ ，互感器能对雷电冲击信号进行传递。电压互感器完全可以满足对操作过电压的采集，虽然对雷电过电压的瞬变响应没有对操作冲击波那样灵敏，但从采集的过电压数据来看用此种方法获取的雷电过电压数据完全可以对事故的原因做出判断和分析。

附录 D
(资料性附录)
过电压分层模式识别及典型过电压波形

D.1 分层模式识别方法

电力系统中的各类过电压发生机理、发展过程、波形特点皆不尽相同，根据过电压能量的来源不同，一般分为雷电过电压和内部过电压。目前，对过电压的分类如图 D.1 所示。

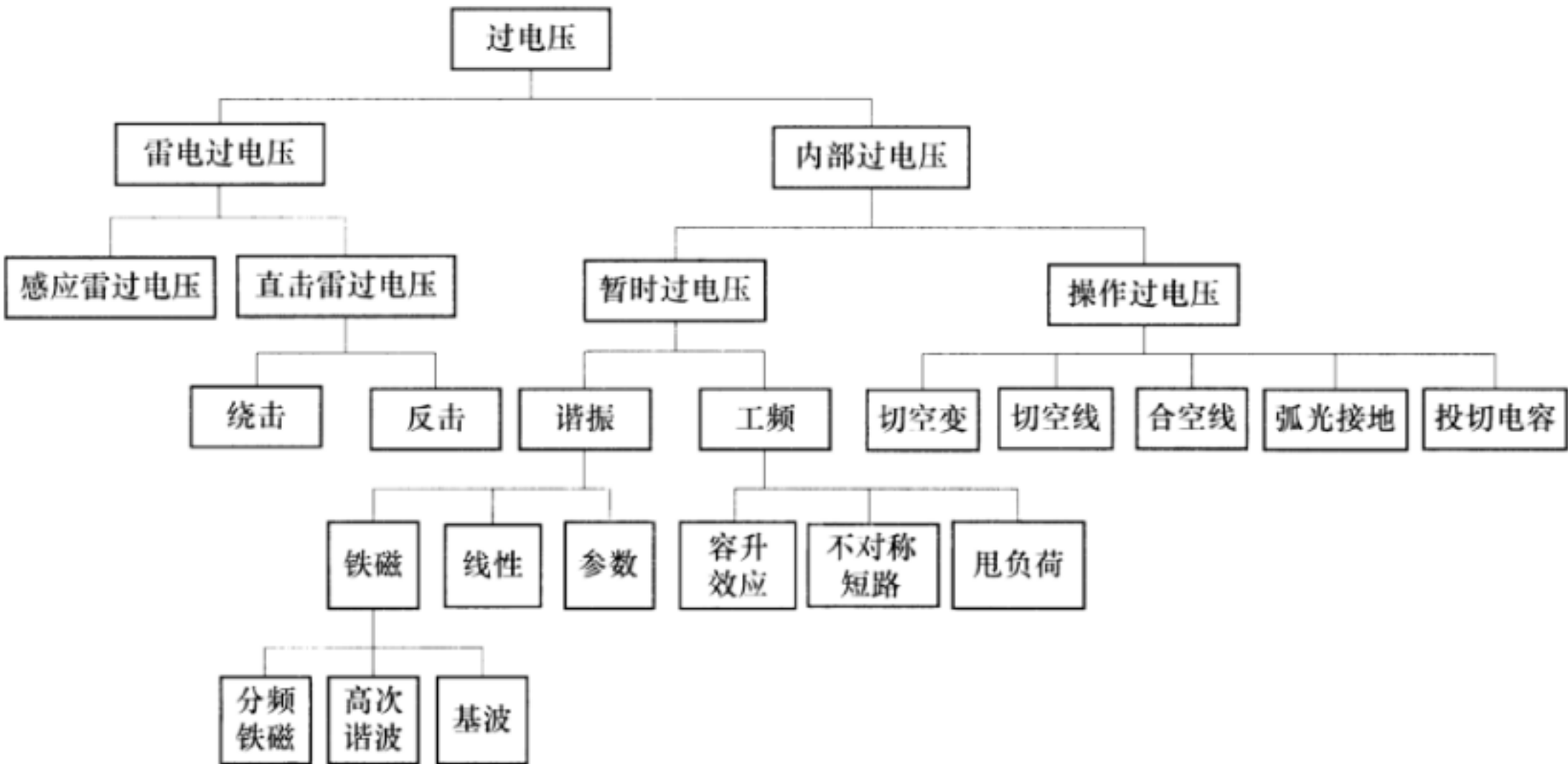


图 D.1 过电压分类示意图

分层识别与传统识别算法最大的区别在于，分层识别并不像传统识别算法那样试图一次将过电压类型进行识别，而是采用逐层分类识别的方式，一层层进行细分。每个层次的分类器之间互相独立，每一层次的分类器只需要以上一层次的识别结果为依据，提取本层所需要的特征量作为输入进行识别判定，并输出结果，而不必将过电压类型一次识别到底。

分层识别算法，根据需要识别的过电压类型的电磁暂态过程特征，综合考虑时域、频域、小波变换、S 变换等多种数学方法，提取信号特征量，筛选出独立反映各种过电压电磁暂态过程特征的过电压特征量，考虑本层分类器对识别算法的要求，综合筛选建立适合于该分类器的识别算法，对上述确定的需要识别的过电压类型，建立过电压类型识别诊断系统进行识别。

由于不同类型的过电压在电网中发生概率差别很大，综合考虑过电压监测装置的安装对象及工程实用性，主要对 D.2 中几种过电压进行识别。但是，对于其他类型的过电压，该分层识别系统依然适用，需要添加其他类型的过电压进行识别时，只需要对相应的分类器进行改进即可，而不必对整个系统框架进行修改。图 D.2 为过电压分层识别系统示意图，该图中的每个分类器，其内部结构如图 D.3 所示。

D.2 典型过电压波形

D.2.1 感应雷过电压

感应雷过电压发生时，其波形主要特征为：在短时间内，三相电压幅值急剧抬升，三相波形呈单极性脉冲性，相序保持不变，三相波形高度相似，并逐渐回落到正常电压。

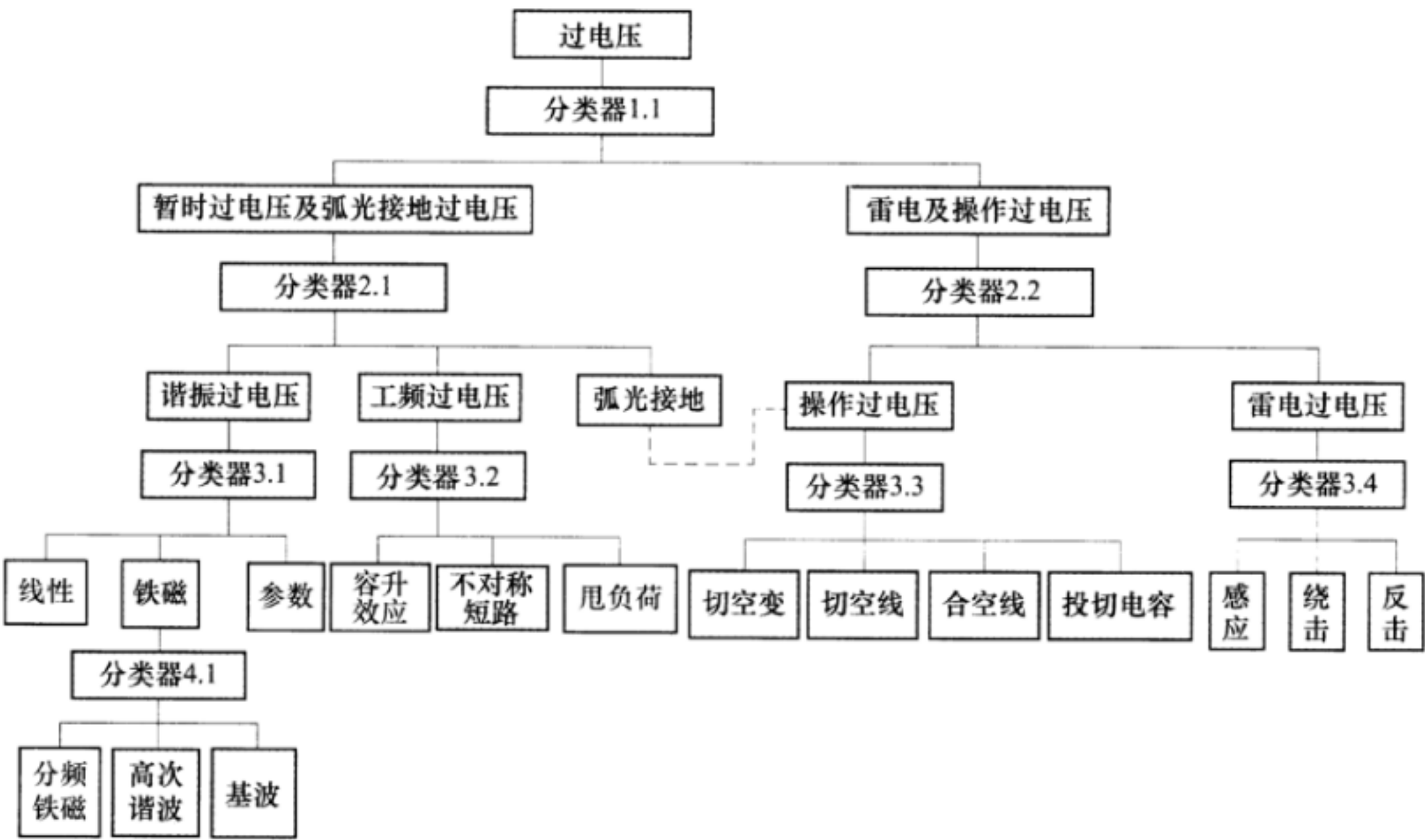


图 D.2 过电压分层识别系统示意图

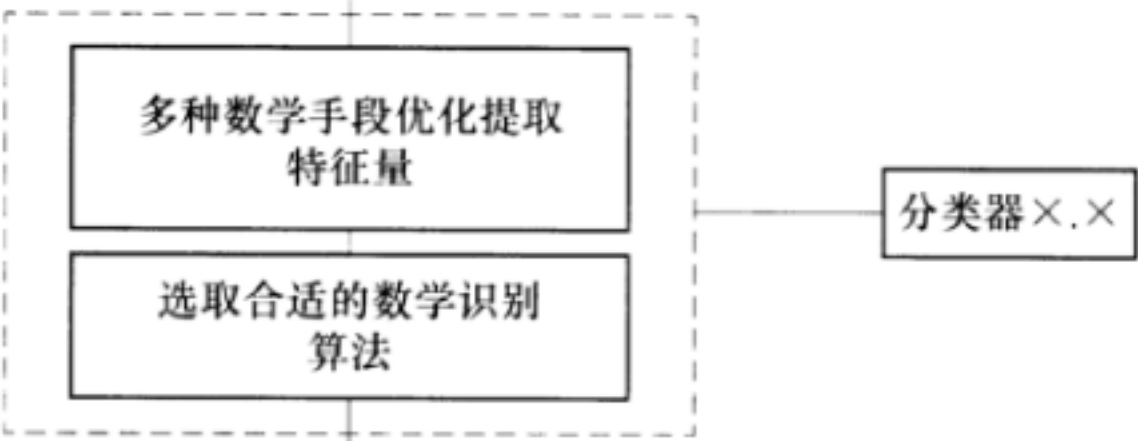


图 D.3 分类器结构图

图 D.4 为雷击 10kV 系统输电线路附近时，变电站内过电压监测系统所记录的感应雷过电压实测波形。由图可知，波形的幅值约为 27kV，波头较陡，波前上升时间约为 30μs，波尾波形有一定的振荡，波长约持续 1000μs。上述波形参数远大于 1.2μs/50μs 的标准雷电过电压波形，是由于雷电侵入波在传输的过程中，受到雷击点远近、线路冲击电晕、电阻损耗和折反射等的影响，导致实测感应雷过电压的波前和波长时间延长，波头陡度降低，波形参数存在较大的分散性。

D.2.2 暂时过电压

- a) 工频电压升高。不对称短路故障引起的过电压波形主要特征为：接地相的电压骤降，接地期间，故障相存在高频振荡分量，幅值较低；而正常相的工频电压升高，其持续时间也较长。单相接地过电压的波形如图 D.5 所示。
- b) 谐振过电压。电路中的变压器、电抗器和互感器等电感元件因铁芯而产生饱和现象，电感参数会随着电流或磁通的变化而改变，当电源频率和系统参数满足 $\omega > 1/\sqrt{L_0 C_0}$ 时，回路激发产生铁磁谐振，并常常伴有跃变和相位反倾的现象。对于中性点不接地或非直接接地系统，电磁式电压互感器因铁芯饱和而导致的铁磁谐振是配电网中出现次数最多、危害最大的过电压之一。根据谐振的主要频率成分不同，铁磁谐振包括分频、基波以及高频谐振，图 D.6 a) 为 35kV 系统实测的分频谐振过电压波形，图 D.6 b) 和 c) 分别为 10kV 系统产生的基波谐振和高频谐振过电压波形。

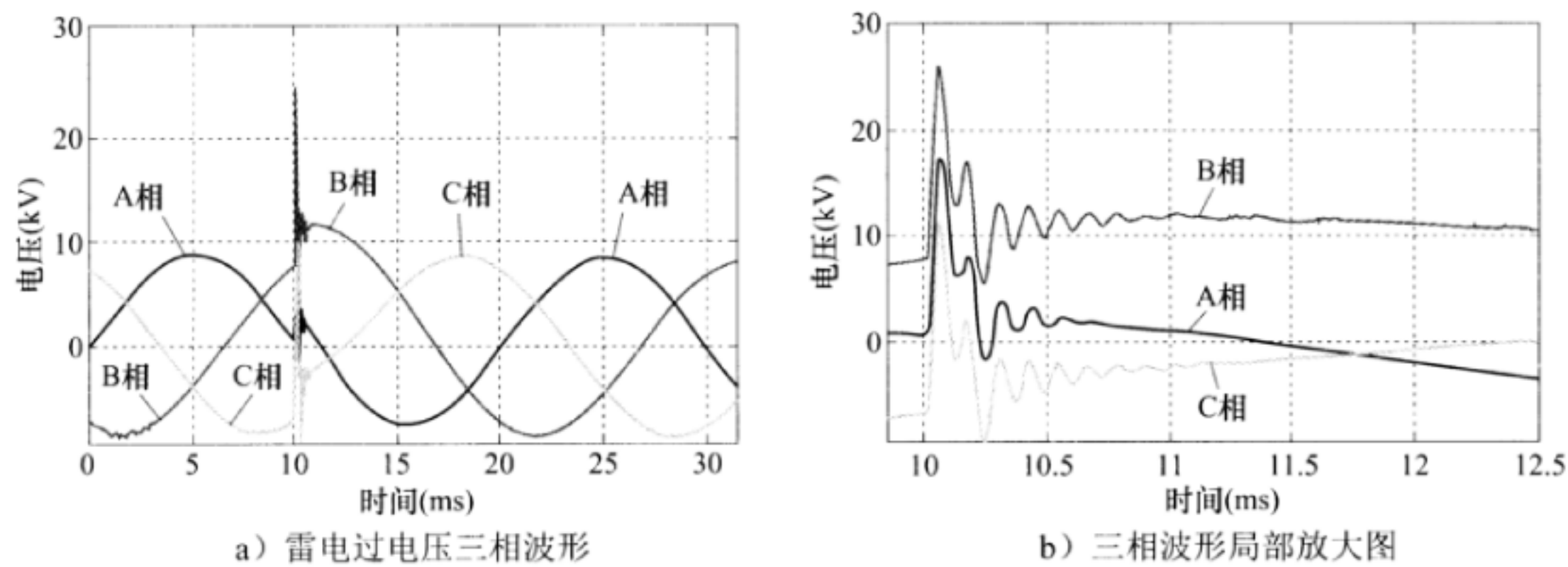


图 D.4 感应雷过电压波形

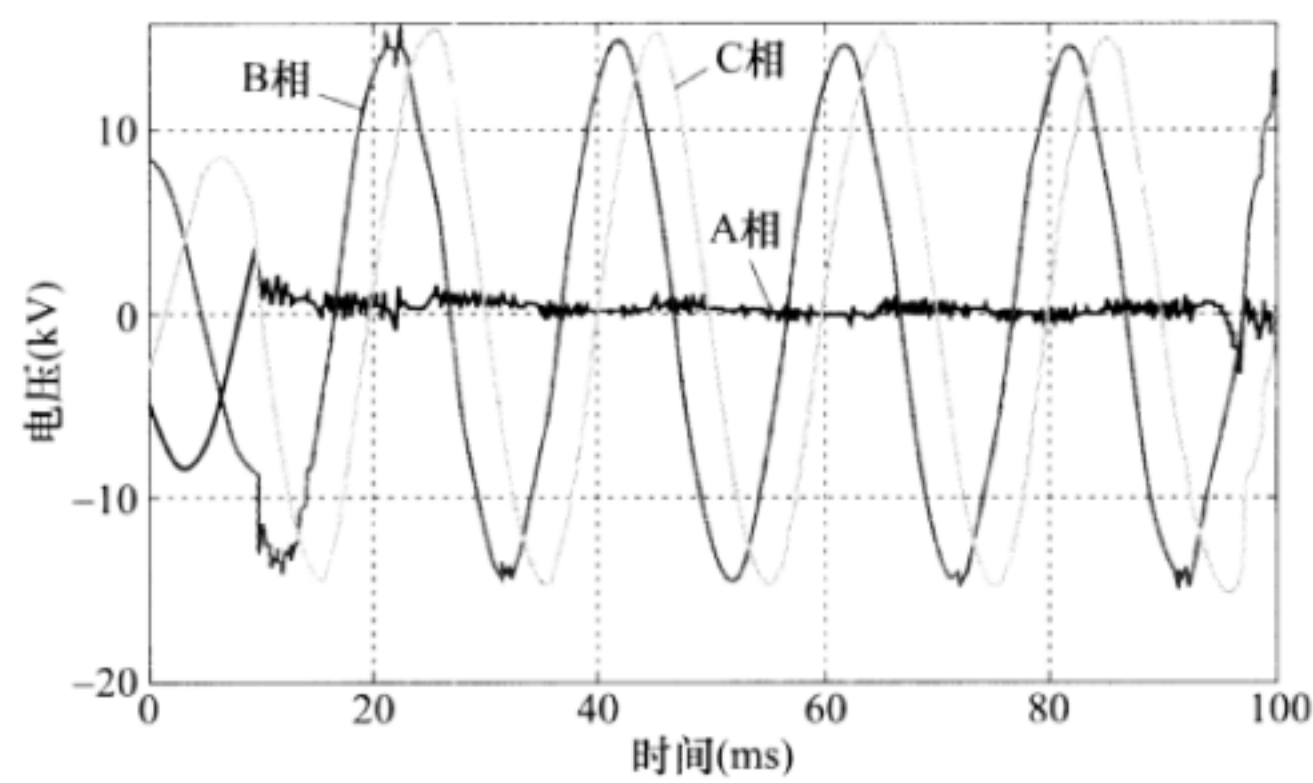


图 D.5 单相接地过电压的波形

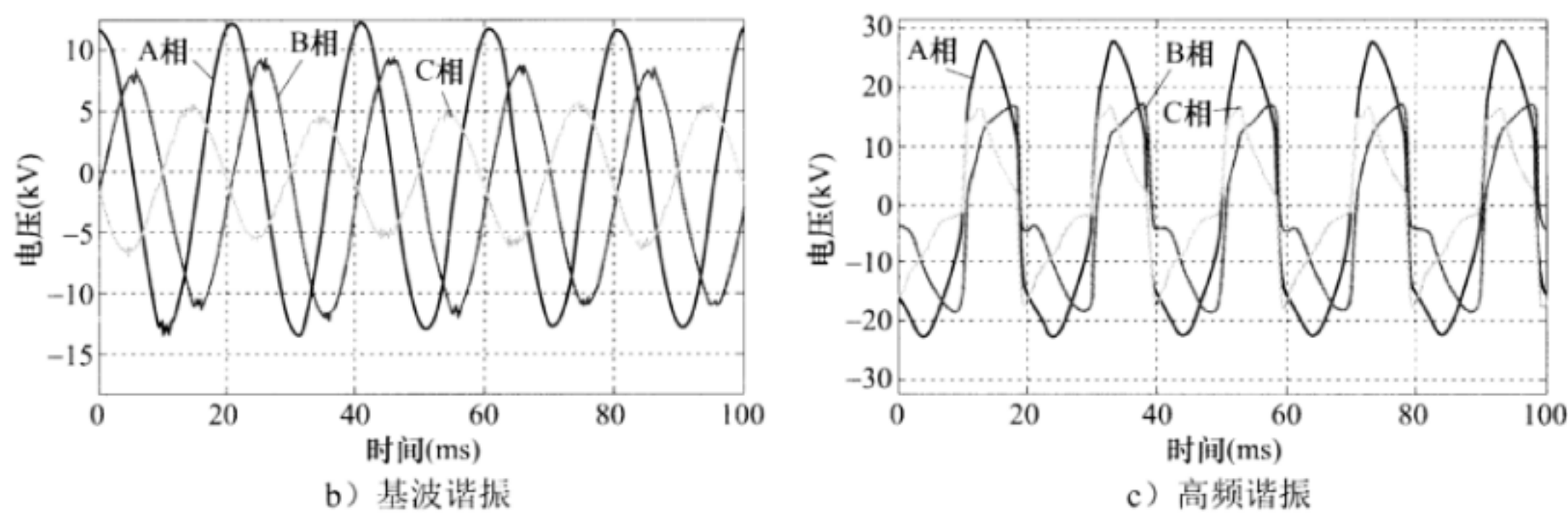
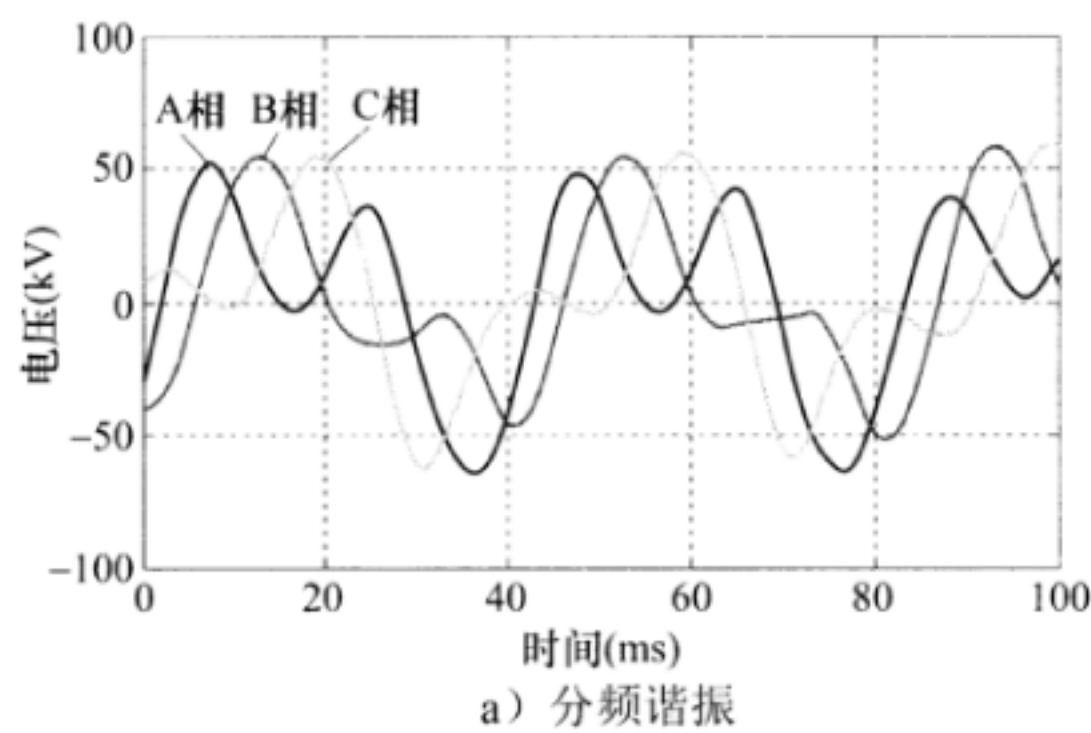


图 D.6 铁磁谐振过电压波形

D.2.3 操作过电压

a) 弧光接地过电压。对于 110kV 及以下系统，由于系统中性点非直接接地，当发生单相接地短路

故障时，流过故障点的容性电流不大，不能形成稳定的电弧燃烧，因此，会产生间歇性的电弧燃烧—熄灭—再燃烧的过程，导致系统的电感和电容产生电磁振荡，从而产生弧光接地过电压。图 D.7 为中性点非直接接地 10kV 系统产生的实测弧光接地过电压波形。

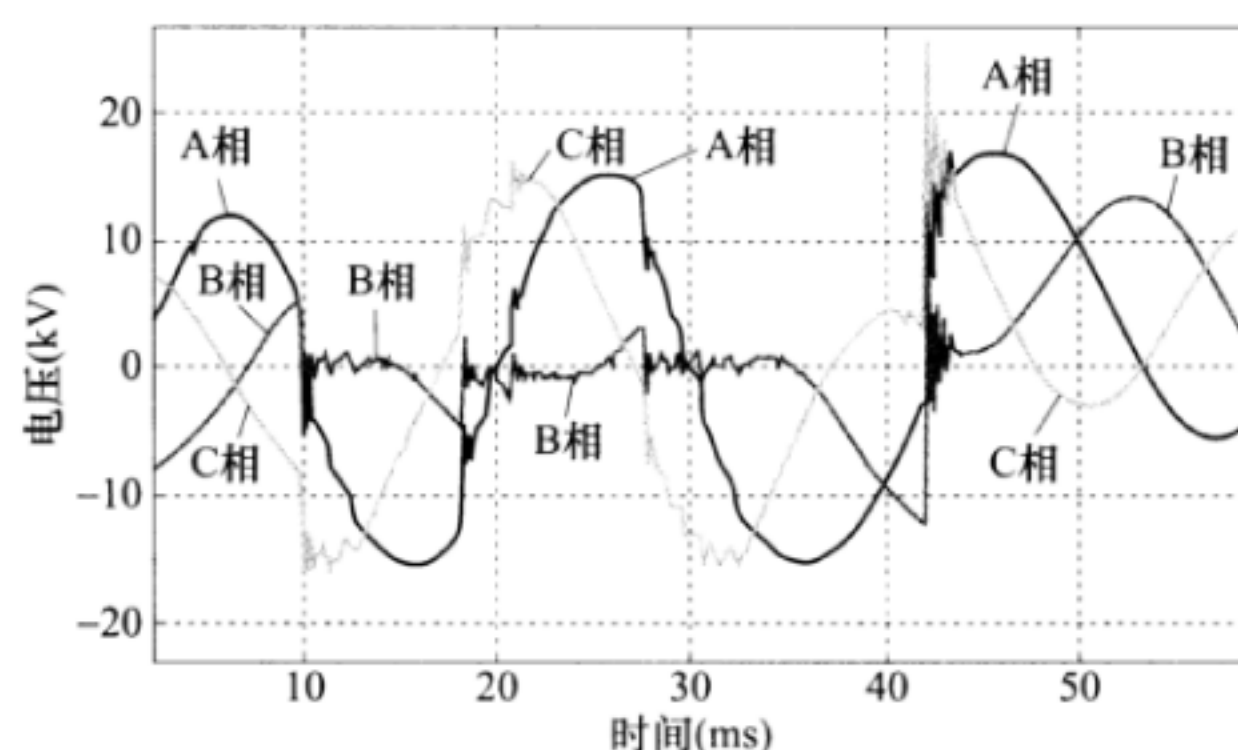


图 D.7 弧光接地过电压波形

- b) 投切电容器组过电压。在进行电容器组分合闸操作时，由于断路器的电弧燃烧，会在线路上产生高频电磁振荡，此外，由于 10kV 系统母线存在较小的对地电容，电容器操作时，会引起三相波形产生低频振荡。图 D.8 为装有 3600kvar 和 4200kvar 两组电容器的 10kV 系统现场记录到的投切电容器过电压实测波形，此次电弧燃烧持续 1.4ms 左右，B 相电压幅值升高到原幅值的 1.48 倍左右，同时引起三到四个工频周期的低频振荡。

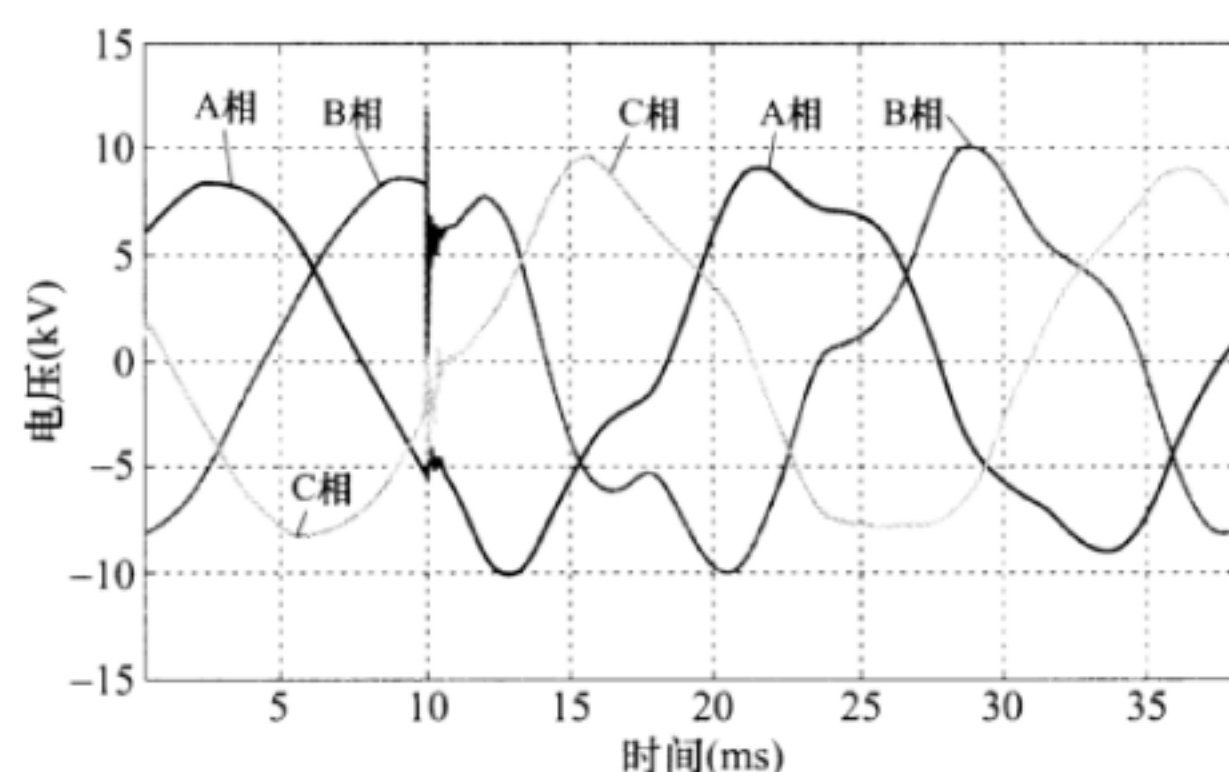


图 D.8 投切电容器组过电压波形

- c) 合闸空载线路过电压。合闸空载线路包括两类：一类是电网计划内的正常合闸，另一类是自动重合闸。线路在合闸时，系统中的电感和电容参数发生变化，引起电磁能量重新分配，同时伴有电弧燃烧，三相波形产生高频振荡，形成幅值较高的过电压。但由于受合闸相位、线路损耗、线路残压、三相合闸的非同期性以及一些限制措施的采取等的影响，一般不会超过 3 倍。图 D.9 为 110kV 系统发生的合闸空载线路过电压。
- d) 分合闸空载变压器过电压。对变压器元件检修时，利用断路器对其进行分合闸操作，被操作的感性元件存在电磁能量的转换，产生电磁振荡，将形成分、合闸过电压。变压器检修时，断路器的分闸会产生截流现象，形成断路器的分闸过电压；变压器检修完后，合闸时，变压器励磁绕组也将出现涌流，产生合闸过电压。断路器分、合闸时，变压器的特性参数和断路器的灭弧性能都会影响过电压幅值的大小。图 D.10 a) 和 b) 分别为 110kV 系统中分、合闸空载变压器的过电压波形。

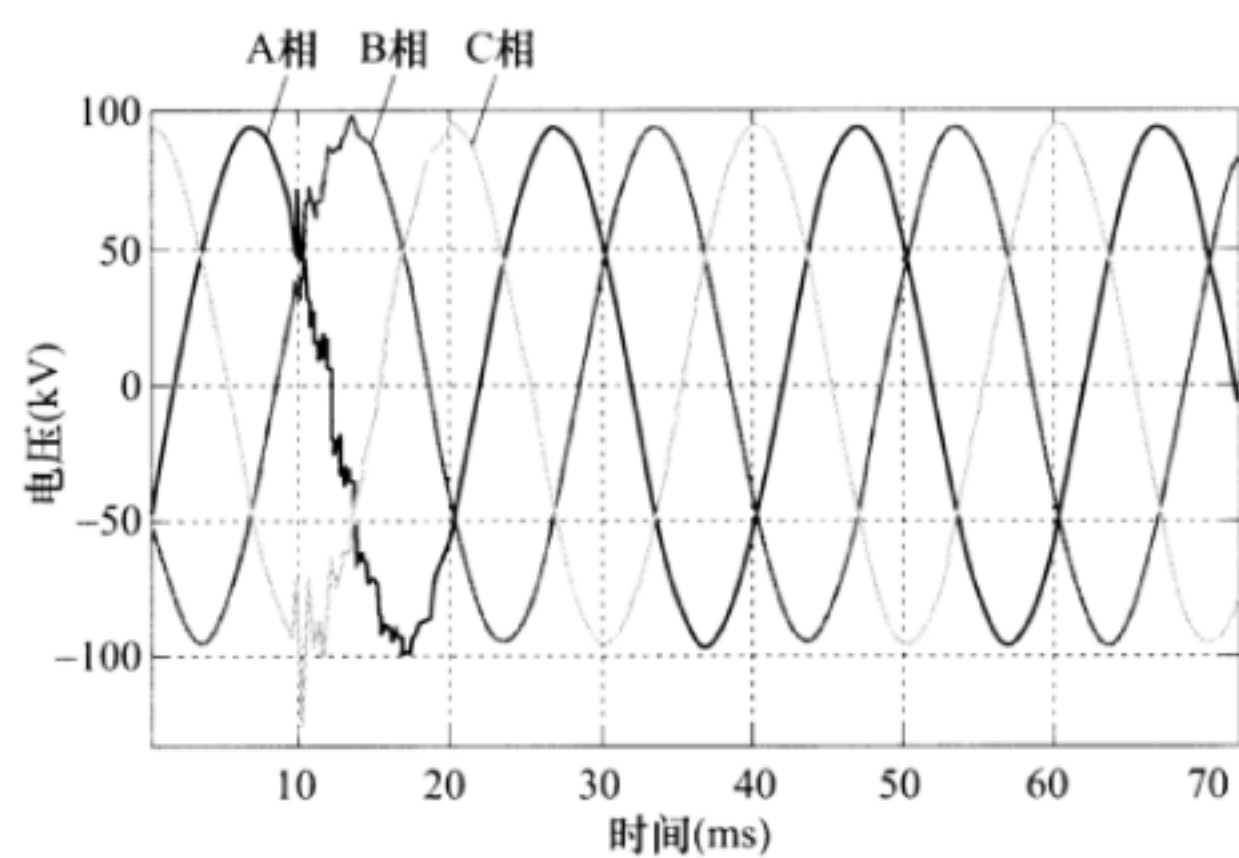
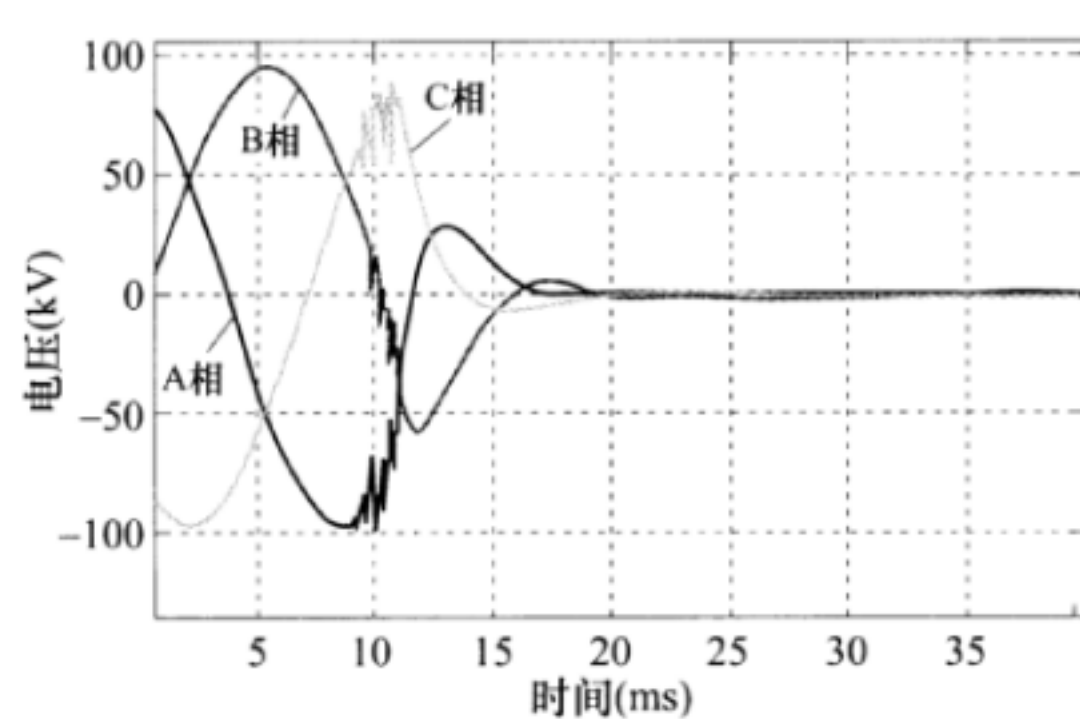
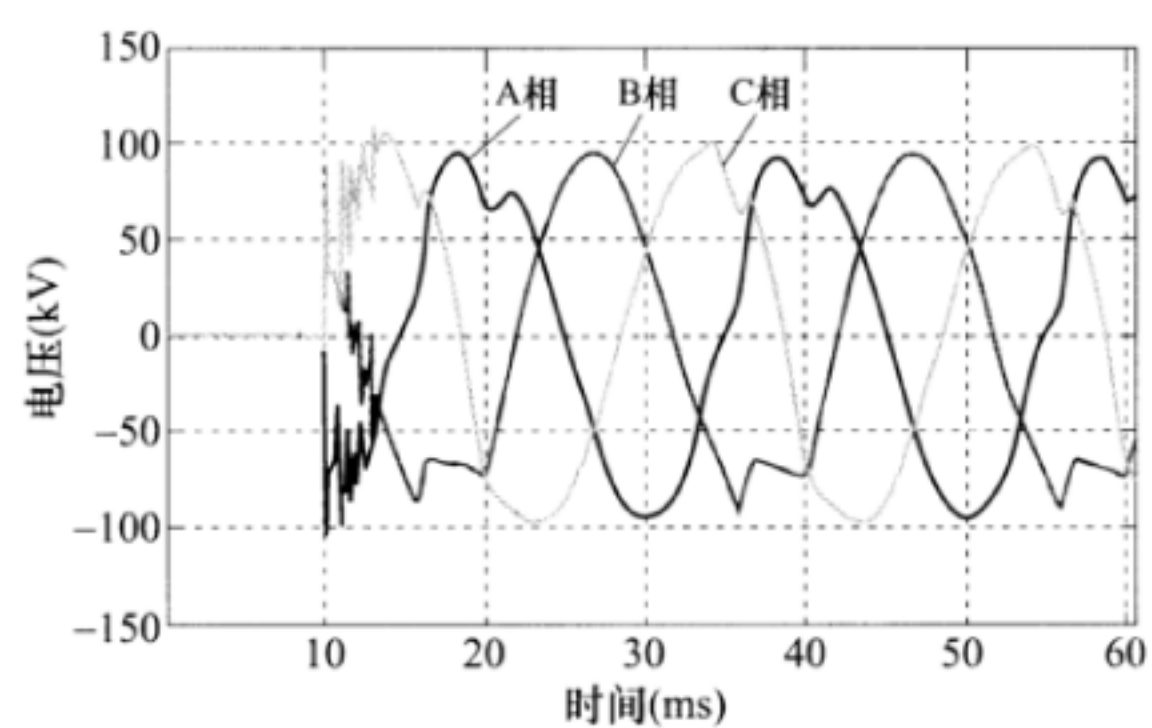


图 D.9 合闸空载线路过电压波形



a) 分闸空载变压器过电压



b) 合闸空载变压器过电压

图 D.10 分、合闸空载变压器过电压波形

参 考 文 献

- [1] GB/T 16927.1 高电压试验技术 第1部分：一般定义及试验要求
-