



变压器工程技术

贺以燕 著

中国标准出版社

变压器工程技术

贺以燕 著

中国标准出版社

内 容 提 要

本书共收集我国知名的变压器专家贺以燕教授级高级工程师撰写的有关变压器工程技术方面的文章 126 篇,包括变压器、高压技术、强电流技术、标准与标准化活动、国外考察和其他六部分。内容涉及变压器专业技术知识讲解、专题讨论、理论论述、问题探讨、国外考察纪实、国外先进企业和先进产品介绍、国家标准和 IEC 标准等方面,内容广泛,理论与实践紧密结合。

本书可使从事变压器及其相关行业的工作人员了解我国变压器行业的发展历程和国外同行业的发展水平,并可为变压器专业技术人员提供系统的、有力的理论与实践指导。

图书在版编目(CIP)数据

变压器工程技术/贺以燕著. —北京:中国标准出版社, 2000. 2

ISBN 7-5066-2089-8

I. 变… II. 贺… III. 变压器-技术-文集
IV. TM4-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 53858 号

中国标准出版社出版
北京复兴门外三里河北街 16 号

邮政编码:100045

电 话:68522112

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

版权专有 不得翻印

*

开本 787×1092 1/16 印张 32¼ 字数 754 千字

2000 年 9 月第一版 2000 年 9 月第一次印刷

*

印数 1—2 500 定价 78.00 元

《变压器技术丛书》编辑委员会

主 任 于海年

副主任 朱英浩 高 鹏

委 员 (按姓氏笔划为序)

计宏伟 尹克宁 刘玉仙 孙定华

李文海 张文相 张德明 应百川

杨治业 陈 奎 陈道辉 肖耀荣

周贤土 贺以燕 郭振岩 唐任远

自序

自 1885 年发明变压器以来,我国在解放以前仅能生产 35 kV 2 000 kVA 及以下的配电变压器,全国装机容量不足 200 万 kVA。变压器及能源工业处于十分低下的状况。

新中国成立以后,从第一个五年计划开始,国家即在沈阳建立了沈阳变压器厂,成为我国最大的变压器专业生产工厂;1953 年起在该厂筹建中厅高压试验室,工频电压 1 500 kV、冲击电压 2 500 kV,于 1957 年建成,成为国内第一个高压试验室;1958 年起该厂又着手筹建大厅高压试验室,内设工频电压 2 250 kV、冲击电压 3 600 kV,于 1964 年建成,成为国内最大的高压试验室;1985 年起国家在沈阳虎石台筹建强电流试验室,该试验室吸取法国 EDF 的先进经验,于 1993 年末建成,成为国内最大的变压器强电流试验室。

随着电力工业的发展,50 年代末,沈阳变压器厂试制了 220 kV 级电力变压器;70 年代初,试制了 330 kV 级电力变压器;80 年代初试制了 500 kV 级电力变压器。

作者在变压器行业 40 多年的工作中,先后参加了沈阳变压器厂中厅、大厅两个高压试验室与虎石台强电流试验站的设计、建设与运行;从事了几十年 220~500 kV 级变压器(包括系统调试)的科研工作;还参与了全国变压器标准化技术委员会,绝缘配合及高压试验标准化技术委员会,电压、电流、频率标准化技术委员会的工作,以及中国电机工程学会高压专业技术委员会、中国电工技术学会理论电工、电工测试、强电流专业技术委员会等学会工作。改革开放以后受国家委派,20 多次到英、美、日等十几个国家,参加 IEC、ISH、ICEM 的国际标准制定、学术研讨与会议,考察、验收设备以及科研工程技术合作(工作)等。

本书是作者对上述几十年工作与实践的论述与总结。80 年代和 90 年代作者在国内专业杂志上发表大量文章和论文,包括专业技术知识讲解、专题讨论、理论论述、问题探讨、设想、国外考察纪实、国外先进企业和先进产品介绍、我国国家标准及 IEC 标准介绍,内容广泛,理论与实践紧密结合。此次将作者已发表及尚未发表和未发表的但有理论价值的文章共 126 篇汇集成册,包括六部分:第一部分是变压器,收集了有关变压器的超高压建立、局部放电、系统调试、提高变压器质量等

论文共 19 篇；第二部分是高压技术，收集了有关高压试验设备、高压测量、冲击试验、高压试验室接地系统及屏蔽和安全措施等论文共 14 篇；第三部分是强电流技术，收集了有关强电流试验站的现在和未来、强电流试验、短路试验及承受短路能力问题的探讨等论文共 14 篇；第四部分是标准介绍，收集了有关变压器方面的国家标准介绍、IEC 标准介绍等论文共 15 篇；第五部分是国外考察，收集了赴意大利、法国、荷兰、瑞士、英国、德国、日本等国考察介绍文章共 51 篇；第六部分是其他，收集了有关中国变压器制造业的发展历程、城网的基本情况及其对变压器的要求、全世界变压器的产量、国外箱式变电站等论文共 13 篇。

本书可使从事变压器及其相关行业的工作人员了解我国变压器行业的发展历程和国外同行业的发展水平，并可为技术人员提供系统的、有力的理论与实践指导。

鉴于书中所收集的文章发表在不同时期，其中某些国名现已变更、引用的某些标准现已修订，请读者注意查询。

对我合写有关文章的朱英浩、景颐梁、张田林、J. P. Martin(法)、应百川等，在本书正式出版之际特表衷心的感谢。

对于为全书校审的徐国梁、郑时伊和为全书图样校对的苗艳伟以及在工作中合作及给予本书支持、编辑和帮助的人员一并表示衷心的感谢。

贺 以 燕

1999 年 8 月

作者简介

贺以燕，男，1931年1月生，原籍湖北省蒲圻县，1952年毕业于武汉大学电机系，1952~1955年任湘潭电机厂技术员，1955年初至1956年8月在清华大学电机系高压电器研究生班学习，1956年9月，在沈阳变压器厂历任技术员、助理工程师、工程师、高级工程师、教授级高级工程师、沈阳变压器厂副总工程师、沈阳变压器研究所副所长。获国家科技进步一、二等奖4次，并享受国务院特殊政府津贴。

1991年至今为沈阳变压器研究所顾问、中国电工技术学会理事、强电流专业技术委员会主任、全国变压器标准化技术委员会顾问。

目 录

变 压 器

中国第一组 500 kV 超高压电力变压器	3
中国第一组 500 kV 超高压电力变压器现场局部放电试验	9
国产首批 500 kV 级变压器在系统中的调试	11
我国 500 kV 线路及其变压器、电抗器	14
500 kV 变压器质量调查概况 ¹⁾	15
提高 500 kV 电力变压器质量的根本途径	17
防灾型变压器的发展	19
生产壳式电力变压器的探讨	23
干式变压器的现状及其发展	30
110 kV 级 8 型电力变压器	38
组合式变电站系列产品	42
特高压(UHV)系统及变压器发展的设想	51
关于提高变压器可靠性的思考	55
关于国内生产高压直流换流变压器的思考	59
论电力变压器的零序阻抗	65
关于建立“变压器选用导则”的思考	70
对电力变压器“Smit”绕组结构的探讨	82
壳式变压器生产技术介绍	85
不燃液、难燃液、SF ₆ 及其变压器的发展 ²⁾	86

高 压 技 术

2 250 kV 工频串级设备设计及理论分析	95
2 250 kV 4 A 工频高压串级变压器	105
工频高压试验设备的现状及其发展	108
高压测量技术	116
电力变压器冲击试验技术的新发展	128
冲击电压发生器及变压器冲击试验的波形计算	134
高压电力变压器绝缘的科研方向	143
变压器冲击试验技术	149

1) 为 1992 年机械、电力两部 500 kV 电力变压器质量专家组的调查报告,作者参加了调查和执笔,一并列出。

2) 贺以燕、应百川合写。

220 kV 电流互感器绝缘性能	158
变压器试验技术总论	165
局部放电测量及其发展	168
高压试验室接地系统、屏蔽和安全措施	182
大型变压器温升试验机组补偿	185
为某研究所设计试验变压器的原理性方案	187

强 电 流 技 术

沈阳强电流试验站的现在和将来 ³⁾	193
建立变压器短路试验站的必要性	198
电流互感器的强电流试验	202
虎石台强电流试验站	208
变压器短路试验有关问题的探讨	217
强电流短路试验变压器的磁密	224
电力变压器的短路试验	231
110 kV 级电力变压器短路试验(第一阶段)总结	246
变压器短路试验站的基本问题	249
关于电力变压器承受短路能力问题的探讨	257
关于电力变压器承受短路能力问题的再探讨	263
从设计、工艺、结构与试验等方面探讨提高变压器抗短路能力的问题	266
减少电力变压器短路事故应考虑的问题	278
建议用电抗法检查变压器短路事故	282

标准与标准化活动

关于电力变压器短路标准的探讨	285
关于国家标准五项电压基础标准	291
变压器技术的几个问题——1996 年沈阳 IEC 变压器技术座谈会简介 ⁴⁾	295
国际电工委员会(IEC)概况	298
新的 IEC 测量系统	299
IEC 互感器新标准	303
HVDC 换流变压器 IEC 新标准(草案)介绍	313
IEC76-3《电力变压器 绝缘水平和绝缘试验》的发展近况	320
IEC76-5《电力变压器 承受短路的能力》的发展近况	328
电磁兼容(EMC)现状及发展	333
IEC 箱式变电站标准(草案)简介	339
IEC 变压器温升新、老标准对照	342

3) 景颐梁、贺以燕、JP·Matin(法)、张田林合写。

4) 朱英浩、贺以燕合写。

IEC TC42 华盛顿会议总结	350
国际电工委员会 TC38 互感器技术委员会会议在芬兰赫尔辛基举行	351
国际电工委员会电力变压器技术委员会(IEC TC14)1996 年年会在沈阳市举行	352

国 外 考 察

意大利 TIBB 公司变压器厂	357
意大利 Ansaldo 公司变压器厂	357
意大利网路试验站	359
意大利 Rondissone 400 kV 变电所	360
意大利 INVEX 电缆厂	360
意大利 CESI 电工技术试验研究中心	360
意大利 1 000 kV 工程的户外试验场	364
法国 Alsthom 公司变压器厂	370
法国 Sens 铁塔试验站	371
法国 Jeumont Schnieder 变压器厂	371
法国 Chesnoy 400 kV 变电所	372
法国电力公司(EDF)对变压器、互感器减少事故的政策	374
法国 EDF Melun 调度中心及 Moret 一次变电所	376
法国电力公司	376
法国雷纳第超高压实验室概况	381
法国雷纳第强电流试验室	386
赴法国考察短路发电机与电网并联运行	390
荷兰 Smit 变压器厂	394
荷兰 Nnon Transport 调度中心及变电所	397
荷兰 KEMA 电工器材试验所	398
赴瑞士、法国验收 1 000 kV、1 200 kV 标准电容器	405
瑞士魏德曼公司及纸板	408
瑞士塞切容变压器公司	409
瑞士 Haefely-Trench 公司	413
瑞士麦克菲尔公司及其高压试验室	418
瑞士哈佛雷公司及其高压试验室、帝特克斯公司	421
英国 GEC-ALSTHOM 变压器厂	423
英法海峡 HV DC(Sellindge)换流站	425
英国 Leicester 广场 132 kV 地下变电所	426
德国 TU 纽伦堡变压器厂	426
德国 MR 分接开关厂	428
德国 MWB 互感器厂	429
澳大利亚 Wilson 变压器公司	430
澳大利亚 TCA 公司	431

澳大利亚 TMC 公司	432
ABB 公司及其变压器厂	433
ABB 美国门西变压器厂	433
ABB 加拿大 Varennes 变压器厂	435
ABB 公司 Ludvika 试验室	435
日本电力工业	437
日本 NGK 公司	439
日本三菱公司	441
日本东芝公司	441
日立公司	443
美国 UL 安全试验所	448
加拿大魁北克水电研究所	448
比利时 Pauwels 公司	452
挪威 SINTEF 简介	455
印度 CPRI 简介	456
国际上四大高压、强电流中心	457
IEC 新标准(草案)和国外变压器短路试验情况	459

其 他

中国变压器制造业的过去、现在及将来	465
我国城网的基本情况	471
城网改造中有关变压器产品的概况	475
“九五”城网对变压器的要求	481
国外百万伏级线路发展与国内展望	482
事故率与变压器的寿命分析	484
乌克兰变压器专家来访	486
全世界变压器的产量	488
绝缘纸板与变压器机械强度	488
双分裂变压器事故调查分析报告	489
国内外箱式变电站	492
从变压器行业实际情况出发开展好行评工作	494
关于“沈阳虎石台强电流试验站引进法国技术”的状况	500

变 压 器

中国第一组 500 kV 超高压电力变压器

一、概述

本文介绍了中国第一组超高压 500 kV 电力变压器,它是沈阳变压器厂 1982 年生产的。

除陈述技术条件,特别是设计与结构外,工厂试验结果和锦辽线现场试验在本文内也有详细的叙述。

在锦辽高压线上,这组变压器的运行记录是满意的。到 1987 年底,它在超高压电网上已安全运行了 4 年。

二、简介

新中国成立后,许多特殊的变压器厂一个接一个地建立起来了,沈阳变压器厂即为其中之一,现在它已成为中国最大的变压器工厂,其主要大容量高电压车间为 $36\text{ m} \times 232\text{ m} \times 30\text{ m}$ (高),有二台 200 t 桥式吊车。

起初,沈阳变压器厂仅能生产 35 kV 级变压器,1953 年生产 110 kV 级电力变压器,1958 年开发了 220 kV 级电力变压器,14 年后,开发了 330 kV 级电力变压器,1982 年开发了第一组 500 kV 电力变压器(4 台单相、1 台为用户备用),已生产的最大变压器为:

——单相 250 MVA/500 kV

——三相 360 MVA/500 kV

现在,沈阳变压器厂年生产能力约 20 000 MVA,除电力变压器外,还生产 500 kV 电流互感器,220 kV 电压互感器。

为了发展 500 kV 超高压变压器产品,开展了许多研究工作,例如分解模型试验、部分模型试验和实体模型试验等。与上述项目相配合,将与这些模型相关的主、纵绝缘电场强度作了计算,得到了各种绝缘设计数据。从而解决了关键技术与结构问题。在此基础上,结合锦辽超高压输电的要求,经过仔细地比较,选择了 500 kV 变压器的较好方案,第一组 500 kV 变压器才顺利地生产出来。

三、输电线路的概况

元宝山—锦州—辽阳—海城输电线路和超高压变压器开发工程都是中国第一条超高压电网工程目标。正如当局计划,全部工程设备均由中国制造。第一组 500 kV 超高压电力变压器已安装于锦辽线,它是电网的一部分。锦辽线长 160 km,电网包括 2 座 500 kV 变电所,锦州变电所和辽阳变电所,每一所含有三台单相 250 MVA 变压器,锦州变电所为升压端,它装有沈阳变压器厂生产的变压器,辽阳变电所为降压端,安装有西安变压器电炉厂生产的变压器,二个变电所总容量为 1 500 MVA。

除变压器外,三台 BKDFP-40 000/500 电抗器已装在锦州变电所。它们为单相,强油强风冷却电抗器,电抗器额定技术规范为 40 000 kvar/500 kV/126 A。

其他电器,如断路器、仪用互感器、避雷器、绝缘子、电缆等均为中国其他电工厂生产。

四、变压器的技术规范

本文主要介绍中国沈阳变压器厂生产的第一组 500 kV 变压器,设计最终选用主变压器带单独的调压变压器,有载调压变压器串联于主变压器中性点。

主变压器 DFPS-250 000/500 为单相,强油强风冷却、三绕组:

——额定容量 250 000/250 000/21 800 kVA

——额定电压 $(510/\sqrt{3})/(235/\sqrt{3})/36.75$ kV

有载调压器 TDFPZ-21 800/35 为单相,强油强风冷却有载调压:

——额定容量 21 800 kVA

——额定电压 23.56/36.75 kV

组合范围:

——额定容量 250 000/250 000/30 000 kVA

——额定电压 $(510\pm 8\%/\sqrt{3})/(235/\sqrt{3})/36.75$ kV

——单相联结 $I I_0$

——三相联结 $Y_N Y_0 d_{11}$

——调压方式 高压中性点调压

五、变压器结线图

由于其是中国第一组变压器,因此对是主变压器带调压器还是主变压器带单独调压器,作了仔细的长期分析和比较。鉴于当时铁路运输的限制和电网运行的可靠性,决定选用主变压器带单独的调压器。

主变压器绕组联结见图 1(主变压器有 4 个铁心柱,内 2 个为旁铁轭)。

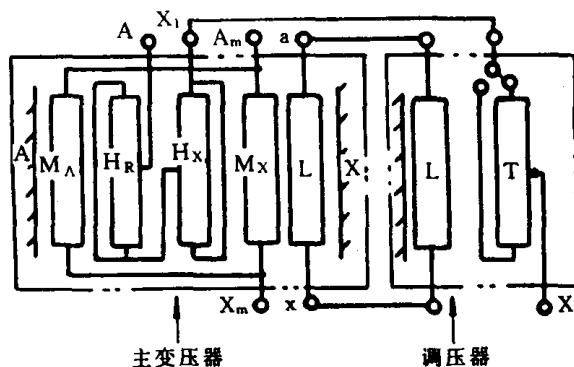


图 1 变压器绕组联结图

六、主变压器结构

采用 4 心柱单框铁心,由于直径比一般的大(大于 1 m),而采取了一些措施,铁心结构得到简化,因而截面利用系数增加了。

用了上述主接线可以得到如下优点:

——500 kV 绕组在二心柱串联,于是绕组饼数增加,施加于匝绝缘的长期工作电压降低了,因而绕组也是变压器的可靠性提高了。

——A 柱绕组绝缘水平高而 X 柱绕组绝缘水平低,则 X 柱绝缘距离可以降低,于是铁心和绕组安装重量较轻,变压器性能得到较大的改善。

——HV 线饼比正常的多,带纵向电容补偿的若干区容易得到,藉合理地分区和逐渐降低补偿电容,于是较好线性冲击分布可以得到,呈现在向外油道的梯度小于 6%,这是我们的期望值,冲击特性的改善达到了要求。

——低压绕组只布置在 X 柱,它向调压器供电,中压绕组并联地装在二个柱上,他们对低压绕组起平衡绕组的作用,这种布置使 HV-LV 有较高的阻抗,有低的低压短路电流倍数,这正适合于低压侧低的额定容量,有效地改善技术性能和产品的经济利益。

——调压器和主变压器分开,因而总重量增加,但如有载开关发生故障,主变压器仍可在额定分接运行,这对提高系统运行的可靠性非常有利。

主变压器引线与高压套管有两种连接方式,即间接方式与直接方式,藉计算机电场计算和按比例模型试验作出比较,得到了较好的结果,比较结果表明,间接方式对三相变压器更合适。此外间接方式对现场安装也很方便,器身安装在空气中暴露的时间比通常的短。因此无疑应选用间接方式,使用成型绝缘件。

变压器油箱为钟罩式,设计为全真空,残压 13.3 Pa。

七、工厂试验

生产了 4 台 500 kV 变压器,它们均通过了出厂和型式试验,一台做了声级测定。主要特性和试验数据如下:

主变压器:

——空载损耗 290 kW

——负载损耗(高压对中压) 800 kW

——阻抗(高压对中压) 15%

——空载电流 0.9%

——对 500 kV 端 BIL 全波 1 550 kV、截波 1 550 kV、操作波 1 240 kV、工频 680 kV (1 min)

——对 220 kV 端 BIL 全波 825 kV、截波 900 kV、工频 360 kV (1 min)

——局部放电试验 按 $IEC\ 1.5 \times (550/\sqrt{3}) = 476\text{ kV}$ 加压 30 min, 500 kV 端 $<100\text{ pC}$, 220 kV 端 $<200\text{ pC}$

——声级 安装完后,按 IEC 沿轮廓周线,测量了 46 点,平均值 83 dB(A)

——总重 286 t

调压器:

——空载损耗 20.6 kW

——最大负载损耗 137 kW

——总重 37.5 t

联合试验:

主变压器带调压变压器承受 BIL 1 550 kV 全部分接均测量了阻抗。

用 3.6 MV 冲击发生器,施加冲击与操作波。

500 kV 全波波形(1.94/46 μs)见图 2。

500 kV 端截波波形(截断时间 3.6 ms 过零系数 $K_0=0.25$)见图 3。
 500 kV 端操作冲击波波形(79/202 μs 90%电压以上 227 μs)见图 4。
 变压器外貌见图 5。

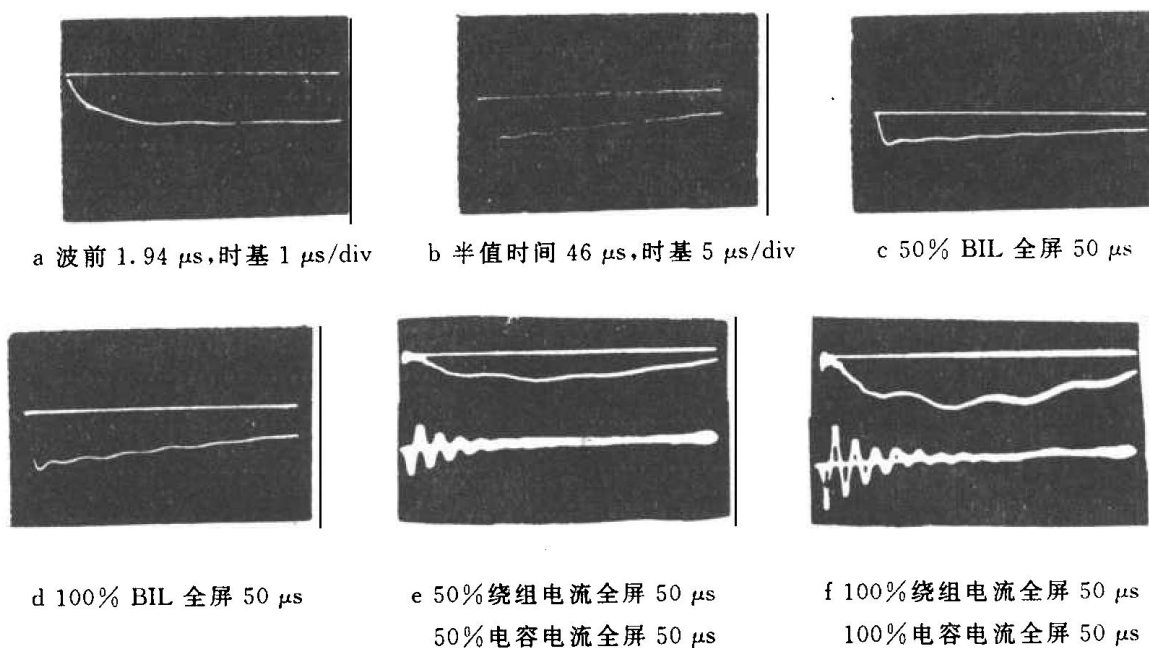


图 2 冲击全波波形(负极性)

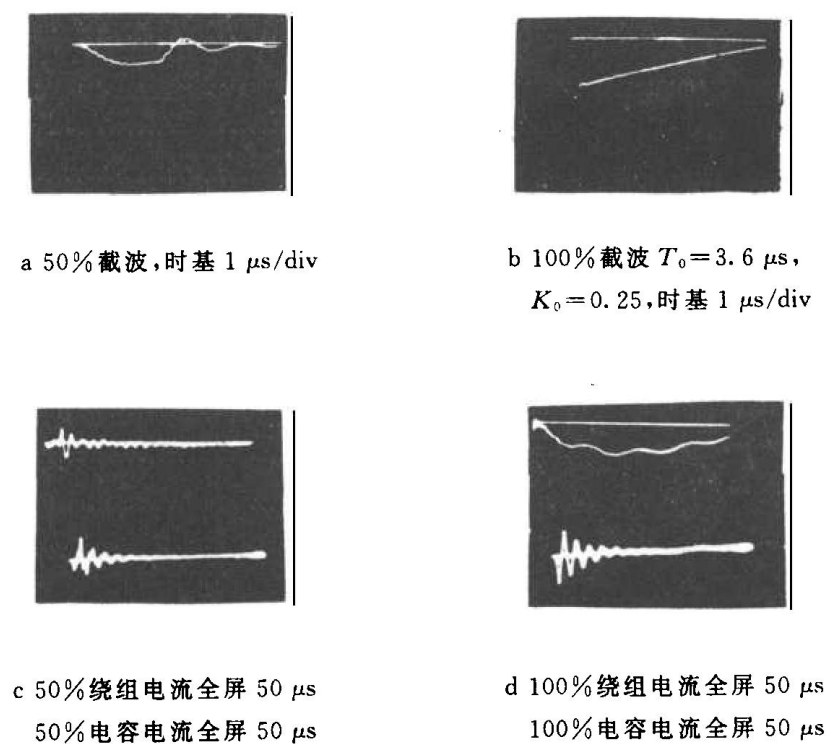


图 3 冲击截波波形(负极性)