

第 1 章

绪 论

高电压技术以其电压很高的特殊性形成了一门独特的学科,又以其应用的广泛性,在电力工程、医疗器械、高新科技、建筑、邮电、计算机、家用电器等领域得到了广泛的应用。而且高电压试验技术与各学科,尤其是与电力工程、电子工程紧密相关。

本书将以电力工程为主论述高电压的试验方法、测量手段和绝缘性能(主要以电力设备为对象)的判断方法。

高电压试验技术的著作有多种版本,各有特点。本书将根据实际的试验方法、试验线路和有关的国家标准来论述电气设备绝缘的试验原理、绝缘优劣的判断方法。具体的电气设备有:电力变压器、电力电缆、电力电容器、高压线路绝缘子等。

电力系统发、变电站及输电线路杆塔接地装置是确保电力系统安全运行的保证,另外也是确保人身安全的保障,符合要求的接地装置能将危险的接触电压和跨步电压限制在安全范围内。进行接地装置的设计时需要了解土壤的地质结构,即要进行土壤电阻率的测量;考察设计好的接地装置是否达到要求,运行多年的接地装置的接地电阻是否发生变化,即需要对接地装置进行接地电阻测量。因此本书还介绍了土壤电阻率和接地电阻测量的有关内容。

通过本书的学习,可掌握高压电力设备绝缘的试验方法、有关标准和高压试验的安全技术等,这对电工设备制造部门的技术人员来说是必备的知识;对电力部门的科技人员来说,更是非常重要的,因为电力设备在运行中,其绝缘的状态如何,能否保证正常运行,是电力部门运行人员最关心的事。因此,必须掌握电力设备绝缘的各种试验方法,如离线测试的预防性试验方法、在线监测的方法等。所以,本书对电力部门中负责绝缘监督,发、变电站地网及输电线路杆塔接地测试与设计的人员,有着很好的参考作用。

1.1 高电压试验的意义

高电压试验是高电压技术的基础与关键。任何高压电力设备都要进行高压试验,否则不能投入电力线路运行。即使是经过试验已投入运行的设备,为了安全、正常的供电还要进行经常性的预防性试验,保证在各种环境条件,如晴天、下雨、下雪、打雷的天气或空气很污

浊的情况下,都能正常供电;而且在工作电压、大气过电压及内部(电力系统)过电压下也要正常运行。

为了进一步了解高压试验的意义,必须进一步了解高压试验的对象和有关标准。

1. 高电压试验的对象

高电压试验,主要是对电气设备绝缘进行试验。如对线路绝缘子的绝缘试验,是在绝缘子上、下金具间施加各种高压(工频高压、冲击高压),在规定的电压下不发生击穿、闪络或异常时,该绝缘子被视为合格的绝缘子,可以投入运行;又如电力变压器的绝缘试验,是在电力变压器的高压部位与低压部位、铁芯与外壳之间施加交流或冲击电压,在规定的电压下不发生击穿、闪络或异常时,该变压器可视为合格的变压器。

从以上两例可以看出,所谓高压绝缘的试验,就是对高、低电位之间的绝缘介质(如绝缘子两金具之间的瓷介质,变压器高、低压部位的主、纵绝缘——油纸介质)的试验。从电容器的定义可知,两电极间有电介质存在时,就形成了一电容器。所以,实际上,高压绝缘的试验,就是对电容负荷的试验。

2. 高压试验的标准

电力设备多种多样,前面也已提到,各种设备都有它自身的试验标准。但从高压的角度来看,一般可按电压等级来规定其标准。在某一电压等级下,作用于电力设备上的最大电压有以下几种。

(1) 最高工作电压,为 $(1.10 \sim 1.15)U_N$ (U_N 为额定电压)。这样,线路上出现的最高工作相电压的峰值为

$$U_m = \frac{(1.10 \sim 1.15)U_N \sqrt{2}}{\sqrt{3}}$$

(2) 雷电过电压。大气中的雷电现象将会给电力设备造成很大危害,而这种现象又是经常发生的,且其能量很大,所以,各种电压等级的电力设备都要有一定的抗雷击的能力。经试验研究,规定雷电过电压的标准波形为 $\pm 1.2/50\mu s$,还有截断波形。试验的峰值可按表 1.1.3 中的规定,其中极性以负极性居多。

(3) 操作过电压。在电力系统内部,负荷的投入、切断使系统参数发生变化时,会引起电磁能量的转化而造成电压的升高。这种过电压比雷电更为频繁,对电力设备危害也很大,其试验的标准波形为 $\pm 250/2\ 500\mu s$, $\pm 100/2\ 500\mu s$ 或 $\pm 500/2\ 500\mu s$ 。

通过了解电力设备上将要承受什么样的电压、过电压,可以规定试验电压。但在进行高电压耐压试验以前,往往先要对电力设备进行检查性的试验。检查性试验相当于对电力设备的绝缘进行初步的诊断,看其绝缘有无明显的故障。检查性试验的内容很多,大致可归纳如下。

(1) 外观检查。零配件是否齐全,有无碰伤等现象,有无漏油现象等。

(2) 无破坏型试验。即对电力设备施加不太高的电压(无破坏型电压),测量一组数据,若不超过规定,可认为该设备可进行高电压的耐压试验;否则就不能进行高电压的试验。其试验内容有:绝缘电阻的测量、吸收比计算、泄漏电流、介质损耗因数($\tan\delta$)、局部放电、变压器油性能的测试等。具体测试方法和有关标准将在以后的章节中予以叙述。

对于高电压的耐压试验标准,我国国家标准 GB 311.1—1997《高压输变电设备的绝缘配合和高电压试验技术》,电力行业标准 DL/T 596—1996《电力设备预防性试验规程》,对

电力设备的试验有明确的规定。在不同的场合,对试验电压的数值还有一些特殊的规定,如验收试验标准等。这可以根据具体情况在有关规定中查得,如试验与其规定不符,则易造成电力设备的损坏,所以不同场合的试验电压值是有差别的。下面将我国国家标准 GB 311.1—1997 对输变电设备的标准绝缘水平和试验标准的规定分别列于表 1.1.1~表 1.1.5。

表 1.1.1 电压范围 I ($1\text{kV} < U_m \leq 252\text{kV}$) 的设备的标准绝缘水平 kV

系统标称电压 (有效值)	设备最高电压 (有效值)	额定雷电冲击耐受电压(峰值)		额定短时工频耐 受电压(有效值)
		系列 I	系列 II	
3	3.5	20	40	18
6	6.9	40	60	25
10	11.5	60	75 95	30/42 ^③ ; 35
15	17.5	75	95 105	40,45
20	23.0	95	125	50,55
35	40.5	185/200 ^①		80/95 ^③ ,85
66	72.5	325		140
110	126	450/480 ^①		185,200
220	252	(750) ^②		(325) ^②
		850		360
		950		395
		(1 050) ^②		(460) ^②

注：系统标称电压 3~15kV 所对应设备的系列 I 的绝缘水平,在我国仅用于中性点直接接地系统。

① 该栏斜线之下数据仅用于变压器类设备的内绝缘。

② 200kV 设备,括号内的数据不推荐选用。

③ 为设备外绝缘在干燥状态下之耐受电压。

表 1.1.2 电压范围 II ($U_m > 252\text{kV}$) 的设备的标准绝缘水平 kV

系统标称电压 (有效值)	设备最高电压 (有效值)	额定操作冲击耐受电压(峰值)					额定雷电冲击耐 受电压(峰值)		额定短时工频耐 受电压(有效值)
		相对地	相间	相间与相 对地之比	纵绝缘 ^②		相对地	纵绝缘	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 ^③
330	363	850	1 300	1.50	950	850	1 050	见 4.7.1.3 条的规定	(460)
		950	1 425	1.50		(+295) ^①	1 175		(510)
500	550	1 050	1 675	1.60	175	1 050	1 425		(630)
		1 175	1 800	1.50		(+450) ^①	1 550		(680)
							1 675		(740)

① 栏 7 中括号中之数值是加在同一极对应相端子上的反极性工频电压的峰值。

② 纵绝缘的操作冲击耐受电压选取栏 6 或栏 7 之数值,决定于设备的工作条件,在有关设备标准中规定。

③ 栏 10 括号内之短时工频耐受电压值仅供参考。

表 1.1.3 各类设备的雷电冲击耐受电压								kV
系统标称电压 (有效值)	设备最高电压 (有效值)	额定雷电冲击(内、外绝缘)耐受电压(峰值)						截断雷电冲击耐受电压(峰值)
		变压器	并联电抗器	耦合电容器、电压互感器	高压电力电缆 ^②	高压电器	母线支柱绝缘子、穿墙套管	变压器类设备的内绝缘
3	3.5	40	40	40		40	40	45
6	6.9	60	60	60		60	60	65
10	11.5	75	75	75		75	75	85
15	17.5	105	105	105	105	105	105	115
20	23.0	125	125	125	125	125	125	140
35	40.5	185/200 ^①	185/200 ^①	185/200 ^①	200	185	185	220
66	72.5	325	325	325	325	325	325	360
		350	350	350	350	350	350	385
110	126	450/480 ^①	450/480 ^①	450/480 ^①	450	450	450	530
		550	550	550	550			
220	252	850	850	850	850	850	935	950
		950	950	950	950 1 050	950	950	1 050
330	363	1 050				1 050	1 050	1 175
		1 175	1 175	1 175	1 175 1 300	1 175	1 175	1 300
500	550	1 425			1 425	1 425	1 425	1 550
		1 550	1 550	1 550	1 550	1 550	1 550	1 675
			1 675	1 675	1 675	1 675	1 675	

① 斜线之下数据仅用于该类设备的内绝缘。
② 对高压电力电缆是指热状态下的耐受电压值。

表 1.1.4 各类设备的短时(1min)工频耐受电压(有效值)							kV
系统标称电压 (有效值)	设备最高电压 (有效值)	内、外绝缘(干试与湿试)				母线支柱绝缘子	
		变压器	并联电抗器	耦合电容器、高压电器、电压互感器和穿墙套管	高压电力电缆	湿试	干试
1	2	3 ^①	4 ^①	5 ^②	6 ^②	7	8
3	3.5	18	18	18/25		18	25
6	6.9	25	25	23/30		23	32
10	11.5	30/35	30/35	30/42		30	42
15	17.5	40/45	40/45	40/55	40/45	40	57
20	23.0	50/55	50/55	50/65	50/65	50	68
35	40.5	80/85	80/85	80/95	80/85	80	100

续表

系统标称电压 (有效值)	设备最高电压 (有效值)	内、外绝缘(干试与湿试)				母线支柱绝缘子	
		变压器	并联电抗器	耦合电容器、高压电器、电压互感器和穿墙套管	高压电力电缆	湿试	干试
66	72.5	140	140	140	140	140	165
		160	160	160	160	160	185
110	126.0	185/200	185/200	185/200	185/200	185	265
220	252.0						
		360	360	360	360	360	450
		395	395	395	395	395	495
					460		
330	363.0	460	460	460	460		
		510	510	510	510 570		
500	550.0						
		630	630	630	630		
		680	680	680	680		
				740	740		

注：表中给出的 330~500kV 设备之短时工频耐受电压仅供参考。
① 该栏中斜线下的数据为该类设备的内绝缘和外绝缘干状态之耐受电压。
② 该栏中斜线下的数据为该类设备的外绝缘干耐受电压。

表 1.1.5 电力变压器中性点绝缘水平

kV

系统标称电压 (有效值)	设备最高电压 (有效值)	中性点接地方式	雷电冲击全波和截波耐受电压(峰值)	短时工频耐受电压(有效值) (内、外绝缘,干试与湿试)
110	126	不固定接地	250	95
220	252	固定接地	185	85
		不固定接地	400	200
330	363	固定接地	185	85
		不固定接地	550	230
500	550	固定接地	185	85
		经小电抗接地	325	140

1.2 高电压试验的安全

高电压试验的安全是非常重要的。

流过人体的电流达数十毫安时,就会使人死亡。所以,凡有高压设备的场所都要有足够的
的安全距离。在实际工作中,要有严格的管理制度、操作规程。进行高压试验时,因为电

力设备的试验电压比正常工作电压还要高许多倍,所以安全问题更为突出。另外,做高压试验时,不仅对人身安全要特别重视,也要重视试验设备的安全,因为试验仪器设备都比较昂贵。

为保证安全,应该在思想上对安全工作高度重视,各单位要经常进行安全教育,开展安全知识的学习,树立安全第一的观点。除思想重视以外,试验人员必须掌握必要的安全技术。下面介绍高压试验的安全技术。

1. 高压试验的基本安全技术

(1) 做高压试验,必须有一定的安全措施,包括遮栏、连锁、接地和安全距离等。在加高压以前,一定要进行细致的检查。

(2) 按高压试验规则,要呼叫口令,并按试验操作规程进行。

(3) 试验者必须熟练地使用安全工具,如接地杆(放电杆)。

2. 高压试验中的安全操作规程

试验的操作规程包括四个部分,即试验前的工作、试验程序、试验后的整理以及其他注意事项。

1) 试验前的工作

(1) 组织。高压试验必须要有严密的组织,要设试验组长及安全监护人,各项操作要有专人负责。

(2) 认真准备。参加试验的人员必须做好试验前的准备工作,包括了解被试品、试验设备、试验标准、试验方法、测量方法等。

(3) 试验前的检查。具体有:

① 检查设备、仪器、仪表是否正常,如有损坏,应及时更换。

② 检查接线是否正确。

③ 安全距离是否符合规定。带高压的部分与周围物体的距离必须符合表 1.2.1 的规定。

表 1.2.1 试验电压-安全距离表

电压/kV	距离/cm	
	交流或直流	冲击
100 以下	30	30
100~200	60	60
500	180	180
1 000	350	300

④ 接地和接地杆。

接地必须可靠,固定设备的地线可用扁钢、铜条或铝条做成。

接地杆上的接地线需用多股裸线牢固地接在地线带上。加高压前,应将接地杆从高压端取下。凡不参与试验的设备,外壳均需接地,尤其是电容器,应将其短路接地。

⑤ 遮栏与连锁。做高压试验,必须有遮栏。对于专用试验室,应设置固定接地的金属网或板(铁板、铁网最好)作为永久性的遮栏。对于临时性的现场试验,也应有临时设置的明

显的“高压危险”、“不可靠近”标志的围栏。任何人必须在遮栏外,并不得向试区内探头、伸手。

固定的高压试验室,还应装有必要的连锁装置,如门连锁、零位连锁等。调压设备应处于零位。

⑥ 防止反击的保护应完好。当高压试验中有放电或进行冲击电压、冲击电流试验时,应装设防止反击的保护装置。一般可用电容、非线性电阻等保护,也可用过电压保护器(浪涌抑制器)来保护。

2) 试验程序

(1) 做高压试验必须严肃、认真、精力集中。高压操作者的手不要离开跳闸按钮,注意监视电表及现场,不得擅自离职守。试验时,不得谈笑或进行其他的工作,假若要讨论问题,应先跳闸、暂停试验后进行。

(2) 呼叫口令。在进行几项重要操作时,操作者要分别呼叫“高压合闸”、“放电”、“去掉接地杆”等口令,当监护人员同意并重复上述口令后,方能进行具体操作。

(3) 升压时,必须从零均匀缓慢地升压:做完试验,应使调压器退回零位。当试品放电、击穿或加压过程中出现异常现象时,应立即跳闸,随即将调压器退回零位。当对电气设备进行耐压试验时,若试验正常,试验完毕应先将调压器退回零位后再跳闸。

(4) 故障处理。当试验中发生故障时,应立即跳闸,随即将调压器退回零位。若发生人身事故,应立即全力抢救,及时进行人工呼吸;若酿成火灾,应用灭火器扑火或报火警。

(5) 放电。试验完毕或更换试件时,应切断电源,将调压器退回零位,并用接地杆对高压部位放电。当对电容器放电时,应先经电阻对电容器放电,然后再短路放电。

3) 试验后

(1) 试验完毕,应对电容器、高压部位充分放电,并将接地杆挂在高压设备上。

(2) 清理场地,保持试验场地整洁。

4) 其他注意事项

(1) 试验时,不得吸烟、点火。

(2) 发烧、头晕、精神不佳、精神失常者,不得进行试验。

(3) 高压试验不得少于两人。

3. 高压试验其他安全问题

当试验电压很高且持续时间较长时,还应注意一些安全问题,如电磁场对人体的作用、高压放电时的辐射、高压试验时产生的臭氧等。

1.3 高电压试验的分类

电气设备在不同的场合要进行各种不同的试验,一般可归纳为电气设备制造部门的试验和电气设备运行中的试验。

1. 按电气设备制造厂生产的角度来分类

(1) 检查性试验:在生产过程中,对成品、半成品的无破坏型的试验。

(2) 耐压试验:制造厂生产出的产品,必须要进行耐压试验。其试验方法和试验标准必须符合国家标准的规定。

(3) 型式试验: 制造厂新设计、新研制、定型或改型的产品, 必须要进行的全部性能的试验。

(4) 研究性试验: 制造厂为设计新产品改用新工艺而进行的试验。

2. 按电力部门运行的角度来分类

(1) 验收试验: 电气设备从制造厂运输到运行部门后, 运行前进行的检查性和耐受试验。

(2) 预防性试验: 电气设备在运行中对其绝缘质量进行定期的检查试验。

① 离线测试: 定期将电气设备退出运行, 对其绝缘质量进行测试。其标准可参见 DL/T 596—1996《电力设备预防性试验规程》。

② 在线监测: 为提高供电的可靠性, 随时监测电力设备绝缘情况, 可在设备运行的情况下对其绝缘进行监测。

(3) 研究性试验: 从运行角度出发, 开展一些对绝缘监督、改进产品运行所进行的研究性的试验。

3. 按试验方法分类

从高压试验的对象可知, 主要是对绝缘介质进行试验。绝缘介质包括气体、液体、固体或几种介质组合的绝缘。对绝缘介质, 可看成一等值的电容性的试品。因此, 其试验方法可归纳为:

(1) 无破坏型的检查试验。前面已论述。

(2) 耐压试验。由于电压高, 容易造成电气设备的破坏, 耐压试验一般都在检查性试验以后进行。

(3) 在运行电压下的在线监测。通过它可以随时监测电气设备的绝缘状态。

(4) 研究性试验。无论制造单位、运行单位都要进行新产品、新工艺的研究, 此试验方法就是为研究而进行的试验。

1.4 高电压试验的设备和测量

为进行高压试验, 必须要有一系列的试验设备和测量方法。根据电力系统经常出现的电压和国家标准所作出的规定, 电力设备一般要进行交流耐压试验、直流耐压试验和冲击试验, 所以要有相应的测量设备:

(1) 交流试验及测量装置, 一般频率为 50Hz。

(2) 直流试验及测量装置。

(3) 冲击试验及测量装置, 又分为冲击电压发生器及测量系统和冲击电流发生器及测量系统。

(4) 无破坏型试验的测量仪器。

在我国, 对高电压试验设备和测量仪器设备非常重视, 如北京的国家电力科学研究院、武汉高压研究所、西安高压电器研究所, 以及各省市都有高电压等级的试验研究院所。设备的电压等级都很高。表 1.4.1 列出了目前国内外高压实验室的设备参数, 其中包括工频试验变压器、冲击电压发生器和直流高压发生器。

表 1.4.1 国内外一些高电压实验室的主要特性参数

实验室名称	国别	试验厅	工频试验变压器		冲击电压发生器		直流高压发生器	
		长×宽×高 /m×m×m	电压/MV	电流/A	电压/MV	能量/kJ	电压/MV	电流/mA
西安高压电器研究所	中国	72×36×30	2.25	1	4.8	194	1.5	100
沈阳变压器研究所	中国	100×34×32	2.25	2	3.6	162		
天威集团保定变压器厂	中国	60×40×40	1.6	4	4.8	480		
上海电缆研究所	中国	60×36×24	1.5 (谐振装置)	4	4.2	220.5		
中国电力科学研究院	清河试验厅	中国	43×30×26.5	2×0.55	2	3.6	300	
	昌平试验场地	中国	露天			7.2	±1.2 1.6 1.0	500 500 2 000
	昌平试验厅	中国	86×60×50	1.5	1	6.0	450	1.8 200
沈阳高压开关厂	中国	72×40×32.5	4×0.4	每台 2	4.8	360		
电力科学研究院 武汉高电压研究所	中国	露天	2.25	4	5.4	530		
东北电力试验研究院	中国	露天	1.5	2	4.5	439		
上海交通大学	中国	36×24×19.5	1.0	1	3.0	63		
国家高电压计量站	中国	50×40×30	1.35	2	4.0	300	2	25
华东电力试验研究院	中国	48×33×24	2×0.6	4	3.6	360		
Eindhoven 大学	荷兰	24×18×14	0.9 (谐振装置)	2	2.4	30		
全俄电工研究所	俄罗斯		2.25	1	7.2	420		
中央电力研究所	英国	41×28×22	1.2 0.5	1 10	4.0	100	1.0	30
魁北克水电局	加拿大	82×68×50	2.1	1.2	6.4	400	2.2	30
慕尼黑工业大学	德国	34×23×19	1.2	0.5	3.0	50	1.6	60
ASEA 公司	瑞典	55×32×35	1.5	1	3.2	140		
通用电气公司	美国	54×29×23	1.75		2×5.1	2×84	1.0	15
东芝公司	日本	54×61×43	2.35	10.6	6.0	640		
电力公司雷纳第试验站	法国	65×65×45	2.2	0.5	6.0	450		
Delft 大学	荷兰	50×40×22	1.5	1	4.0	200		

北京清华大学的高电压技术专业是 20 世纪 50 年代成立的。同时也建立了新的高压实验室,图 1.4.1 就是 20 世纪 70 年代的高压试验厅照片。进入 21 世纪,为了更加适用教学、科研的需要,高压试验厅进行了改造,图 1.4.2 就是高压试验厅的近照。虽然规模不大,但可进行 110kV、220kV 电压等级的工频直流和雷电冲击的试验以及研究性的试验,为国家培养了高电压技术的人才。图 1.4.3 是高压实验室创始人张仁豫教授与高压室同事们的合影。

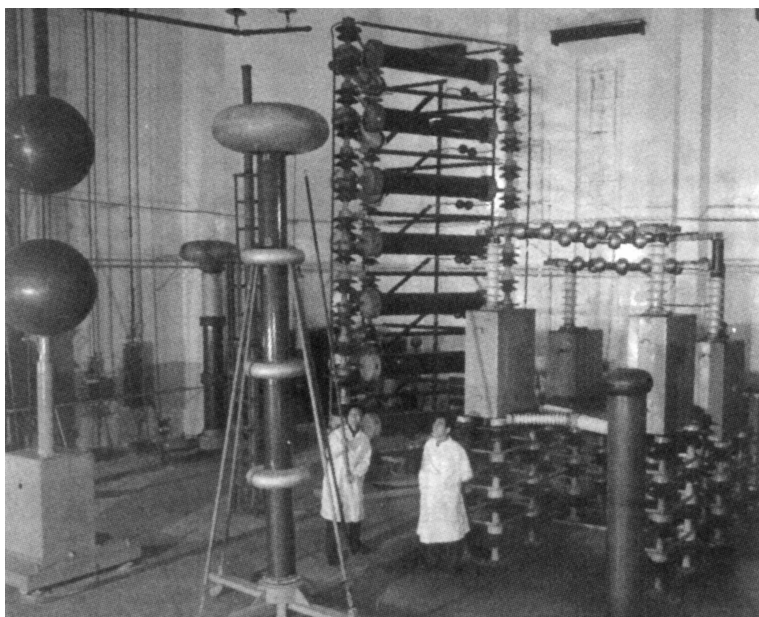


图 1.4.1 20 世纪 70 年代清华大学高压实验室试验厅的主设备图

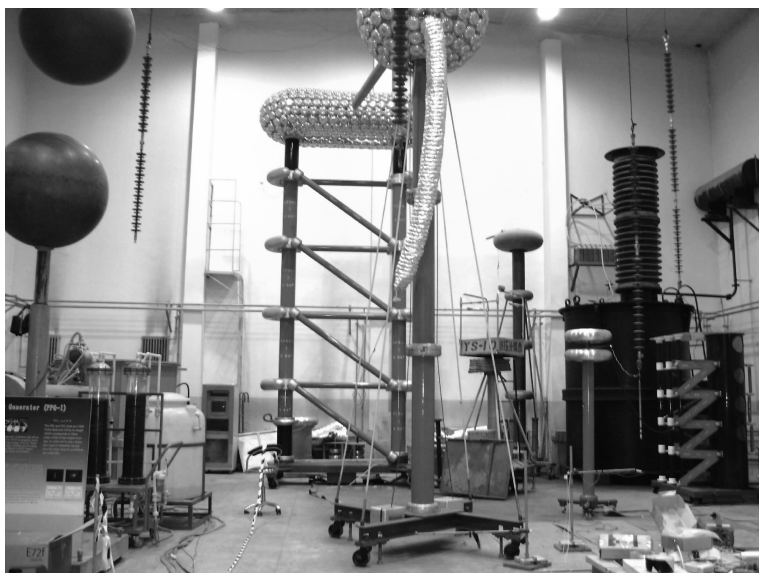


图 1.4.2 清华大学高压试验厅 21 世纪近照