

电能质量技术讲座 (概念、影响、标准)

演讲人：林海雪

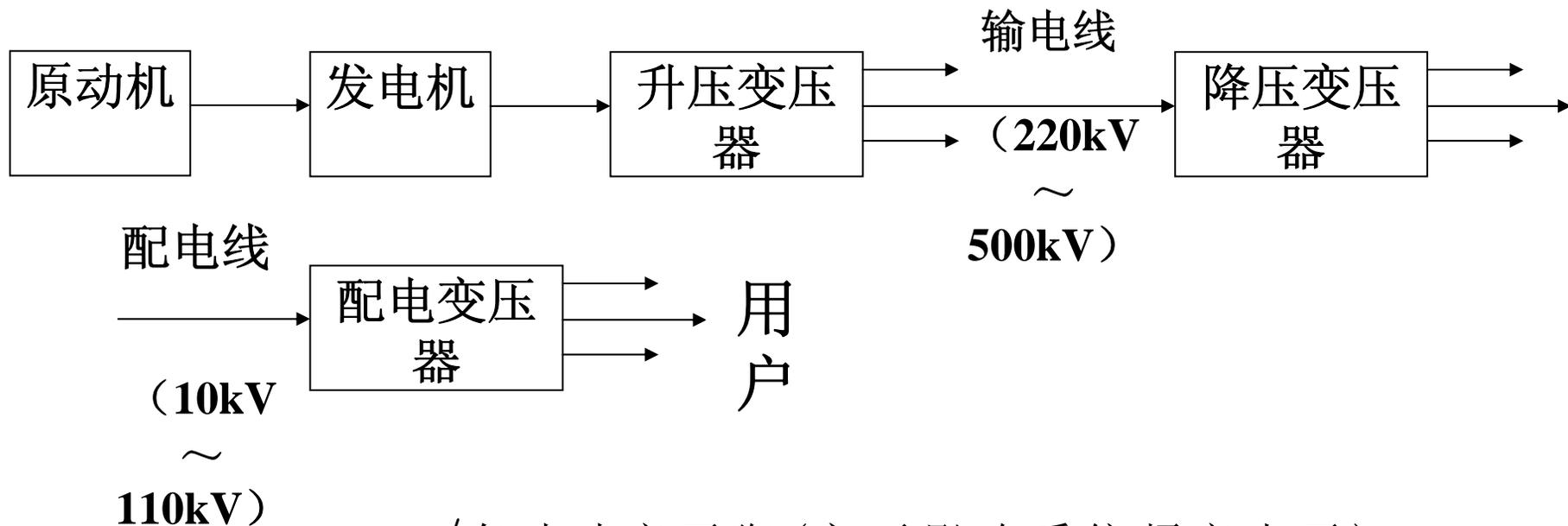
中国电力科学研究院

本讲座主要内容

1. 电能质量基本概念
2. 电能质量的影响
3. 电能质量标准

电能质量基本概念

1.1 电力系统的组成和特点



功率平衡 { 有功功率平衡 (主要影响系统频率水平)
无功功率平衡 (主要影响系统电压水平)

各种干扰: 负荷变化; 运行操作; 故障; 雷击

电能质量基本概念



1.2 电力系统中的电磁现象

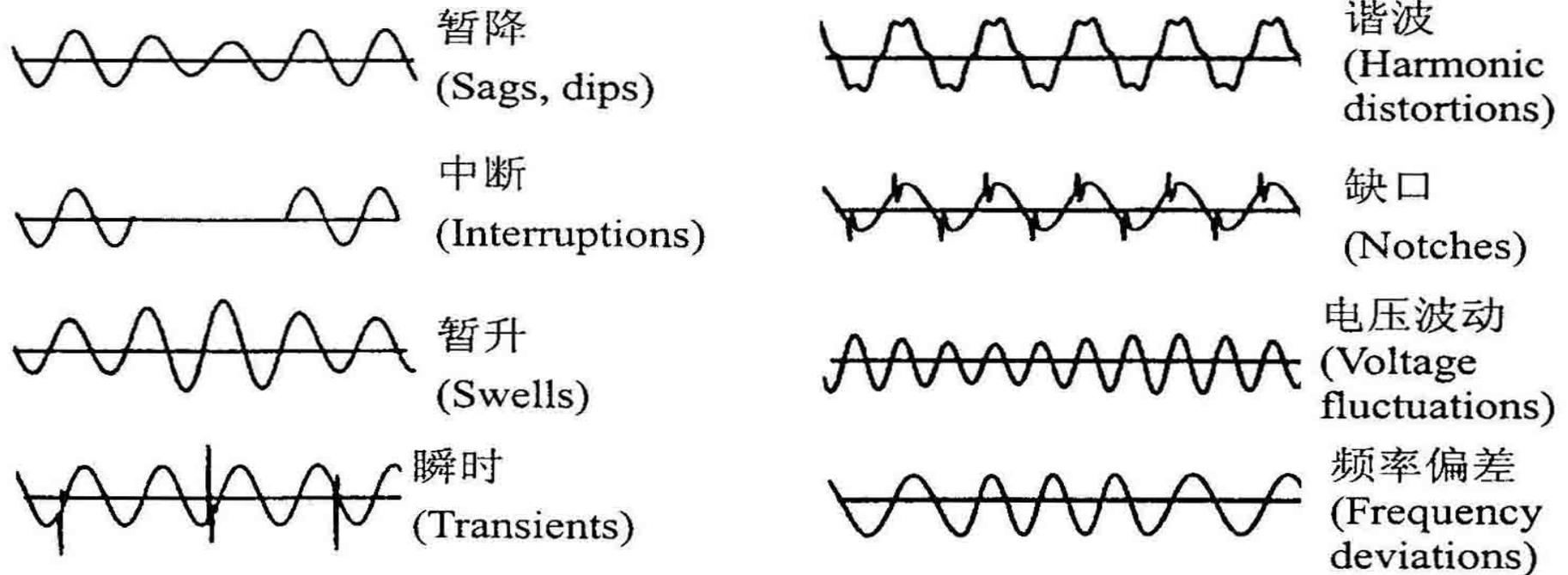


图1 与不良电能质量有关的几个最重要的波形畸变

电能质量基本概念



表1-1 电力系统电磁现象的种类和特征

种类		典型频谱成分	典型持续时间	典型电压幅值/pu
电磁瞬态 冲击	ns级	5ns上升	<50ns	
	μs级	1 μs上升	50ns~1ms	
	ms级	0.1ms上升	>1ms	
电磁瞬态 振荡	低频	<5kHz	0.3~50ms	0~4
	中频	5~500kHz	20 μs	0~8
	升高	0.5~5MHz	5 μs	0~4
瞬时电压 变动	中断		0.5~30周波	<0.1
	暂降		0.5~30周波	0.1~0.9
	升高		0.5~30周波	1.1~1.8

电能质量基本概念

表1-2 电力系统电磁现象的种类和特征

暂时电压变动	中断		30周波~3s	<0.1
	暂降		30周波~3s	0.1~0.9
	升高		30周波~3s	1.1~1.4
短时电压变动	中断		3m~1min	<0.1
	暂降		3m~1min	0.1~0.9
	升高		3m~1min	1.1~1.2
长期电压变动	持续中断		>1min	0.0
	欠电压		>1min	0.8~0.9
	过电压		>1min	1.1~1.2

电能质量基本概念

电压不平衡			稳态	0.5% ~ 2%
波形失真	直流偏移		稳态	0 ~ 0.1%
	谐波	0 ~ 100th	稳态	0 ~ 20%
	间谐波	0 ~ 6kHz	稳态	0 ~ 2%
	缺口		稳态	
	噪声	宽带	稳态	0 ~ 1%
电压波动		< 25Hz	断续	0.1% ~ 7%
频率偏差*			< 10s	

* 频率偏差一般控制在±1%范围内。

1.3 电能质量定义

Power Quality——电能质量（电源质量、电力质量、电力品质）

- 导致用户设备故障或不能正常工作的电压、电流或频率偏差。
- 合格电能质量的概念是指给敏感设备提供的电力和设置的接地系统是都适合于该设备正常工作的。

➤在电力系统中某一指定点上电的特性，这些特性可根据预定的基准技术参数来评价。

➤电压质量、电流质量、供电质量、用电质量。

实际上电能质量就是供电电压特性，即关系到用电设备工作（或运行）的供电电压各种指标偏离理想值（额定值或标称值）的程度。

电能质量基本概念

1.4 电能质量问题的由来

- 随电力工业诞生而存在的一个传统问题；
- 现代用电负荷结构发生了质的变化。电力电子技术广泛应用，家用电器普及，炼钢电弧炉的发展等，由于其非线性、冲击性以及不平衡的用电特性引起电能质量的恶化。
- 计算机的普及、IT产业的发展、微电子控制技术应用导致对电能质量要求越来越高。

例如：一个计算中心失电2s就可能破坏几十个小时数据处理结果，导致几十万美元产值损失；

电能质量基本概念

1~2周波供电电压暂降，就可能破坏半导体生产线，导致上百万美元损失。

据统计美国因电能质量问题造成的损失每年高达260亿美元。

2005年由国际铜业协会（中国）主持的一次“中国电能质量行业现状与用户行为调研报告”中，调查了32个行业，共92个企业中有49个企业，因电能质量问题，在经济上损失2.5~3.5亿元（人民币），每个企业年经济损失约10万~100万（人民币）（其中有四家年损失1000万元以上）。

电能质量的影响

2.1 电能质量指标

电压偏差、频率偏差、谐波、电压波动和闪变、三相电压不平衡度、暂时过电压和瞬态过电压、电压暂降、波形缺口、.....

2.2 电能质量指标特点

- a. 空间上、时间上不断变化
- b. 需要供、用电双方共同合作维护

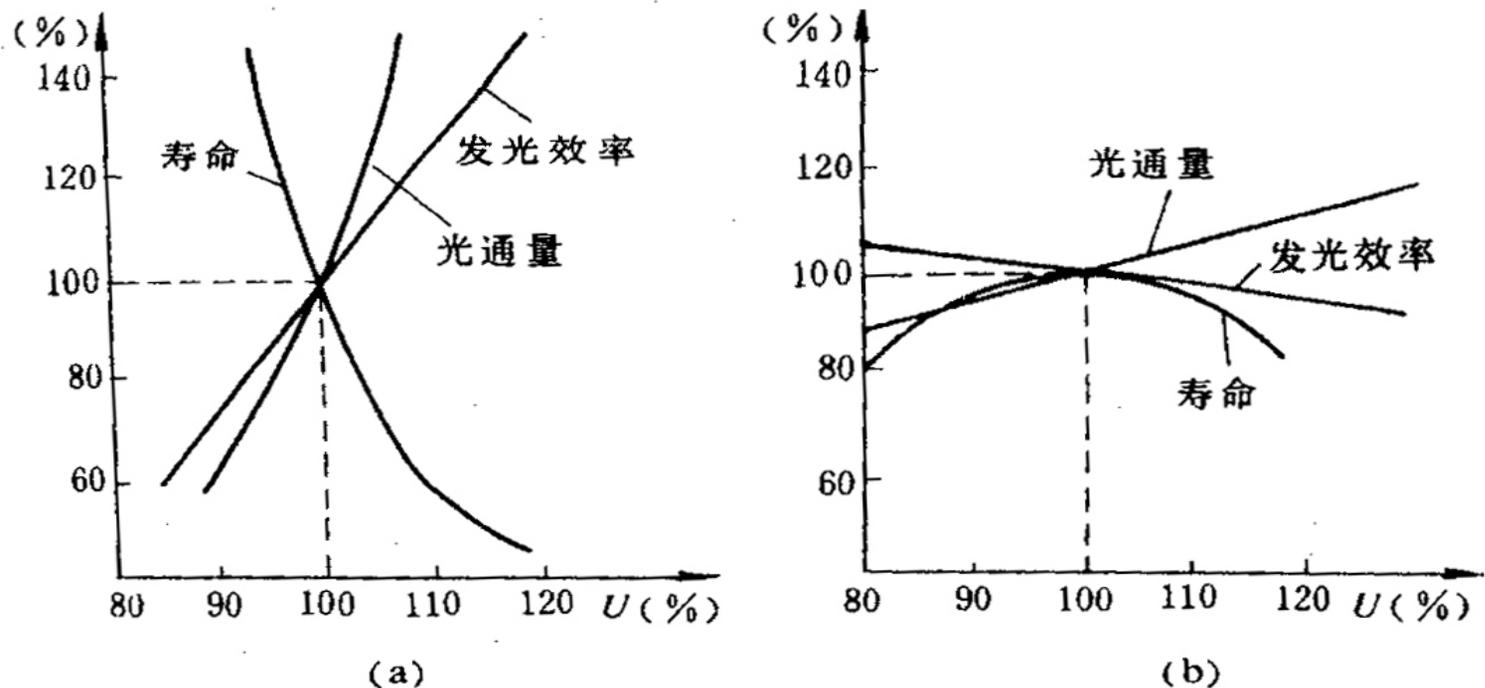
2.3 超标的危害

(1) 供电电压偏差

照明设备的发光和寿命（图2）；电动机的力矩、转速、发热、工效以及产品质量（图3）；变压器的发热、温升、损耗；并联电容器无功出力、寿命；家用电器如电视机的视感、寿命；电子计算机和控制设备不正常；

电能质量的影响

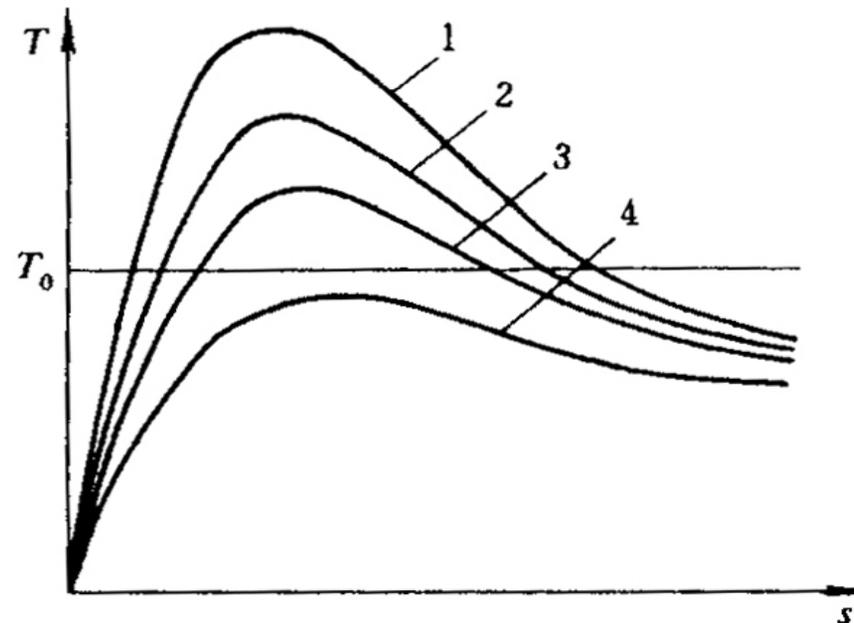
图2 照明灯的电压特性



(a) 白炽灯; (b) 荧光灯

电能质量的影响

图3 不同端电压时异步电动机的转矩—转差特性



1— $U=100\% U_N$; 2— $U=90\% U_N$
3— $U=80\% U_N$; 4— $U=70\% U_N$

电能质量的影响

表2 电压偏差与电解铝生产工况的统计表

电压偏差 (%)	0	-4.0	-6.7	-8.6
电耗 (kWh/t)	17200	17600	18250	18600
电解槽生产率 (%)	100	96.0	90.0	87.0

工业设备（如电解、电热）效率降低（表2）；电力系统稳定性降低，线损增加。

2.3 超标的危害

(2) 电力系统频率偏差

电动机转速变化，影响纺织、造纸等产品质量；传动机械出力变化，影响生产效率；对测量、控制和计时等电子设备精度和性能影响；使感应式电能表计量误差加大；影响发电机和电力系统安全；冲击负荷对近区电网的危害。

电能质量的影响

2.3 超标的危害

(3) 谐波

降低电力设备的利用率，使电气设备（如旋转电机、电容器、变压器）以及导线（如低压中性线、电缆、母排等）过载运行（发热、振动、异常声响等），缩短使用寿命、增加线损；降低断路器遮断容量。例如，馈供给整流负荷的普通电力变压器，其出力应相应的降低。降低值和变压器的杂损比（即附加损耗与基本损耗之比）有关，如表3所列。

电能质量的影响

表3 馈供整流负荷时变压器容量降低（%）

杂损比 整流器脉动数	0.5	1.0	1.5
6	33	40	45
12	20	24	28

电能质量的影响

2.3 超标的危害

(3) 谐波

干扰继电保护、自动装置和计算机系统；使电子设备工作不正常；使测量和计量仪器（感应式电度表）、仪表误差加大；降低信号传输质量，干扰通信系统；增加电力网中谐振可能性，诱发过电压或过电流的危害；减少白炽灯使用寿命。

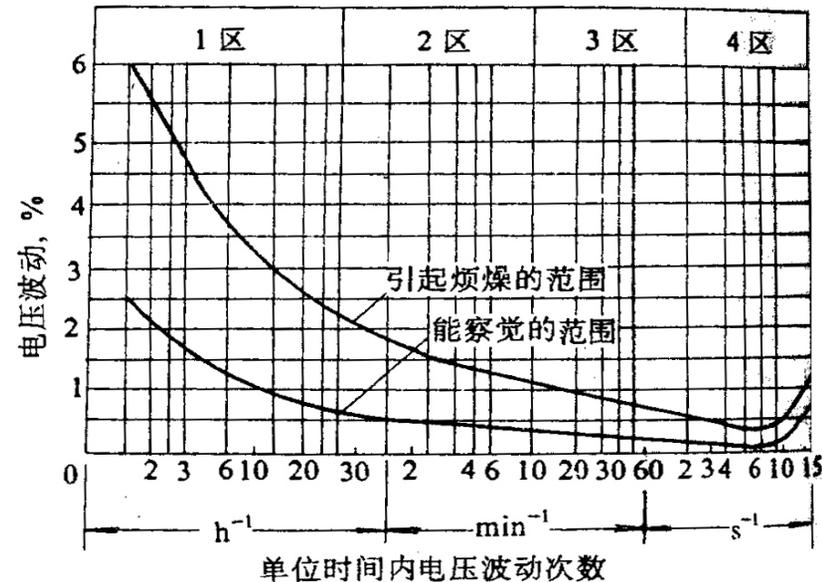
2.3 超标的危害

(4) 电压波动和闪变

照明灯光闪烁，引起人的视觉疲劳；电视机屏幕图像失真、摆动翻滚和亮度变化；电动机转速不均匀、振动、异响，影响产品质量；电子计算机、监测和控制设备等工作不正常（图4）。

电能质量的影响

图4 某些用电设备允许电压波动与其允许波动频度的关系



- 1区—调节设备用的泵、剧院照明、喷油器等；
- 2区—独立升降机、提升机、桥式起重机、X光设备等；
- 3区—电弧炉、手动点焊、落锤、电弧焊、锯、成组升降机等；
- 4区—活塞泵、空压机、自动点焊机

电能质量的影响

2.3 超标的危害

(5) 三相电压不平衡

电机附加发热，并引起二倍频的附加振动力矩使电机负载能力降低（图5、表4）；

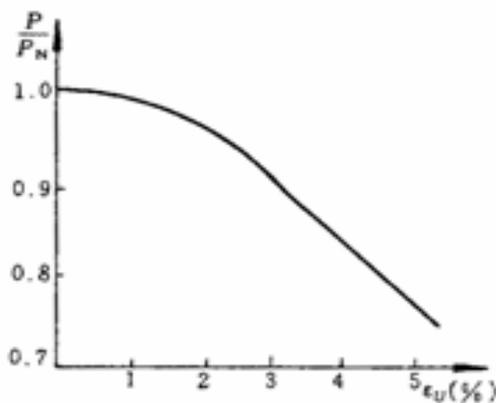


图 5 感应电动机的降容系数曲线

电能质量的影响

表4 4kW笼式感应电动机实测数据

三相电压不平衡度		$\varepsilon_U=0$			$\varepsilon_U=5.34\%$		
		AB	BC	CA	AB	BC	CA
三相线电压 (V)		380	380	380	380	380	350
空载	空转损耗 p_0 (W)	156.5			220		
	铁损 p_{Fe} (W)	708.3			1994.7		
	定子铜损 p_{Cu0} (W)	93.7			95.3		
额定负载	输入功率 P_1 (W)	4880			4960		
	定子铜损 p_{Cu1} (W)	683.5			744.9		
	转差率 s (%)	4.06			4.26		
	功率因数 $\cos \phi$	0.7			0.63		
	定子相电流 (A)	A	B	C	A	B	C
	8.8	8.8	9.4	11	10	7.4	

2.3 超标的危害

(5) 三相电压不平衡

引起以负序分量为启动元件的多种保护误动作；换流设备产生附加的谐波电流（非特征谐波）；变压器负载能力下降；在低压配电线路中，引起照明灯的寿命缩短或烧损、电视机损坏、中性线过负荷等；引起线损及线路电压损失增大；影响正常通信质量。

2.3 超标的危害

(6) 暂时过电压和瞬态过电压
使设备绝缘破坏，引发事故。

2.3 超标的危害

(7) 电压暂降（包括短时中断）

引起变速驱动装置（ASD）跳闸、程序逻辑控制器（PLC）损坏、各种数字式自动控制装置误动、计算机系统失常，数据丢失；导致相关加工生产线（例如塑料、玻璃、石化、纺织、造纸、半导体以及橡胶等）停顿，大型场所照明失电（例如镝灯，灯灭后需冷却好几分钟后才能启动）等等。

电能质量的影响

图6为国外统计的一次电压暂降对不同行业可能造成的经济损失。表5为电压暂降对一些设备的危害。

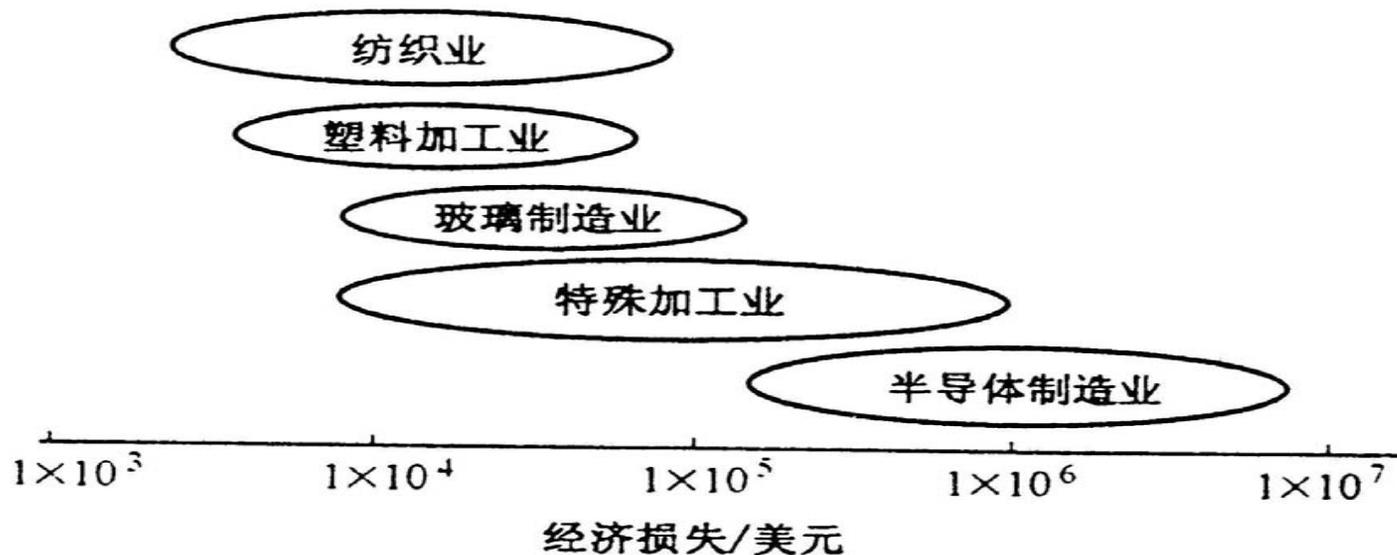


图6 每次电压暂降对不同用户造成的损失数量级

电能质量的影响

表5 电压暂降对一些设备的危害

设备	电压暂降造成的影响结果
冷却控制器	当电压低于 80% 时，控制器动作将制冷电机切除，导致巨大生产损失
芯片测试仪	当电压低于 85% 时，测试仪停止工作，芯片、主板被毁坏
可编程控制器	当电压低于 81% 时， PLC 停止工作；一些 I/O 设备，当电压低于 90% 、持续时间仅几十毫秒，就会被切除
机器人	由机器人控制对金属部件进行钻、切割等精密加工的机械工具，为保证产品质量和安全，工作电压阈值一般设为 90% ，当电压低于此值、持续时间超过 40~60ms 时，被跳闸
直流电机	当电压低于 80% 时，直流电机被跳闸

电能质量的影响

表5 电压暂降对一些设备的危害

变频调速器	当电压低于 70% 且持续时间超过 120ms 时， ASD 被切除。而对于一些精细加工业中的电机，当电压低于 90% 且持续时间超过 60ms 时，电机就会跳闸而退出运行
电动机接触器	当电压低于 50% 、持续时间超过 20ms ，接触器就会脱扣；而有的研究表明，当电压低于 70% 、甚至更高，接触器就会脱扣
计算机	当电压低于 60% ，持续时间超过 240ms 时，计算工作将会受到影响，如数据丢失

(8) 电压波形缺口

由变流装置换相过程造成的电压波形缺口可能影响交流装置的同步或以电压过零进行控制的电子装置正常工作。注意，电压缺口虽然属于波形畸变，但不能用谐波分析来说明它的影响。一般用缺口的深度和面积描述。

2.4 案例

- 上海某高层大厦一台变压器设计为全部带空调负荷，但投运后由于大量谐波的存在，使得变压器根本就没有办法正常运行。
- 90年亚运会期间，网球中心电压暂降造成照明失电10余分钟（照明灯为镝灯，需冷却启动），使场内照明黑了一半，这次事故在国际上造成了非常不好的影响。
- 某商厦工程大量采用日光灯，全部采用电子镇流器，正常情况下，零线中产生很大电流，造成电缆发热，变压器温升过高（典型的谐波问题）。

2.4 案例

- 某证券公司由于谐波使得网络速度变慢、数据出错，实时交易的动态信息显示屏幕出现大片空白，数据刷新和交易的速度都极慢，且经常中断，根本无法进行交易。
- 某宽带运营商由于突然断电造成宽带网络客户不能正常上网，客户索赔几百万。
- 北京某化工厂2005年1月18日，外网波动引起断电，聚氯乙烯装置爆炸，停电5-6小时，直接损失30万元。
- 某钢铁企业2004年一次停电导致所有生产线上的产品作废，损失上亿元。

2.4 案例

- 2004年3-8月吉林省农电局一条10kV配电线（约40km）末端49个台区先后发生了500多次低压电器设备（包括电视机、计算机、冰箱温控器、交换机模块、VCD、加油机电源板等等）烧损事故，经测试分析，是某钢厂中频炉谐波，因长线“谐波容升电压”效应所致。
- 1993年2月河南省信阳和驻马店地区220kV计驻线（双回线，一回线停电检修）因电气化铁路牵引站的谐波引发高频保护误动，引起大面积停电事故（两个220kV 2×240 MVA变电站停电）。
- 河南省220kV柳林变电站原10kV8组6600kVar并联电容器，因3次谐波影响及串联电抗器选配不当等原因大量损坏，不得不全部更换（现为8 \times 8000kVar）。

2.5 结论

电能质量涉及国民经济各行各业和人民生活用电，优质电力可以提高用电设备效率，增加使用寿命，减少电能损耗和生产损失，电能质量关系到电力可持续发展，也关系到国民经济总体效益，是实现节约型社会的必要条件之一。

3.1 电能质量国家标准

➤ 电能质量指标国家标准

1. 供电电压允许偏差 (GB/T 12325—2003)
2. 电压波动和闪变 (GB 12326—2000)
3. 公用电网谐波 (GB/T 14549—93)
4. 三相电压允许不平衡度 (GB/T 15543—1995)
5. 电力系统频率允许偏差 (GB/T 15945—1995)
6. 暂时过电压和瞬态过电压 (GB/T 18481—2001)

3.1 电能质量国家标准

➤ 电能质量测量国家标准

1. 供电系统及相连设备的谐波、谐间波的测量和测量仪器导则（GB/T 17626.7—1998）
2. 电能质量监测设备—通用要求
（**GB/T 19862—2005**）

3.1 电能质量国家标准

➤ 相关的设备国家标准

1. 低压电气及电子设备发出的谐波电流限值（设备每相输入电流 $\leq 16\text{A}$ ）（GB 17625.1—1998）
2. 对额定电流不大于16A设备在低压供电系统中产生的电压波动和闪烁的限制（GB 17625.2—1999）

电能质量标准

3. 对额定电流大于16A的设备在低压供电系统中产生的电压波动和闪烁的限制（GB/Z 17625.3—2000）
4. 半导体变流器与供电系统的兼容及干扰防护导则（**GB/T 10236—2007**）
5. 中、高压电力系统中畸变负荷发射限值的评估（GB/Z 17625.4-2000）

3.1 电能质量国家标准

➤ 电能质量治理设备（装置）国家标准

1. 输配电系统静止无功补偿器用晶闸管阀的试验
（待批）
2. 静止型无功功率补偿装置（SVC）功能特性
（GB/T 20298—2006）
3. 静止型无功功率补偿装置（SVC）现场试验
（GB/T 20297—2006）

3.2 电能质量国外标准简介

3.2.1 欧盟

1995年欧盟（欧共体）颁布了《公用配电系统供电电压特性》（EN50160），包括5大类13个指标。

1. 频率

(1) 互联电网： (50 ± 0.5) Hz

(2) 孤立电网： (50 ± 1) Hz

2. 电压幅值

(1) 慢速电压变化: $\pm 10\%U_N$

(2) 电压波动: 低压系统 $5\%U_N$; 中压系统: $4\%U_N$ 。

闪变: $P_{1t} = 1.0$

(3) 电压暂降: 每年可能发生几十至一千次, 大部分持续时间小于 $1s$, 增幅不大于 $60\%U_N$ 。

(4) 短时断电: 每年可发生几十次至几百次, 约70%的短时断电小于 $1s$

2. 电压幅值

(5) 长时断电：超过3分钟的长时断电，每年在10次以内或不超过50次。

(6) 暂时工频过电压：低压系统一般不超过1.5倍相电压，中压系统不超过1.7-2.0倍相电压（和中性点接地情况有关）。

(7) 瞬态过电压：低压系统一般不超过6kV。

3. 电压不平衡

负序分量占正序分量RMS（方均根值）的2%。

4. 电压波形

- (1) 整数次谐波：40次谐波以下的总畸变率（THD）不超过8%，且各次谐波上限均有明确规定。
- (2) 间谐波：缺乏公认的实验数据，未作规定（但IEC61000-2-4规定一般限值为0.2%）

5. 电压信号电压

指的是工频电压上又叠加的一个正弦传输信号电压。低频段幅值小于 $10\%U_N$ ，中频段幅值小于 $5\%U_N$ 。

实际上欧盟各国都有相关的国家标准，例如2001年英国颁布《英国电气协会（EA）工程导则G5/4》，就是英国现行的谐波标准。

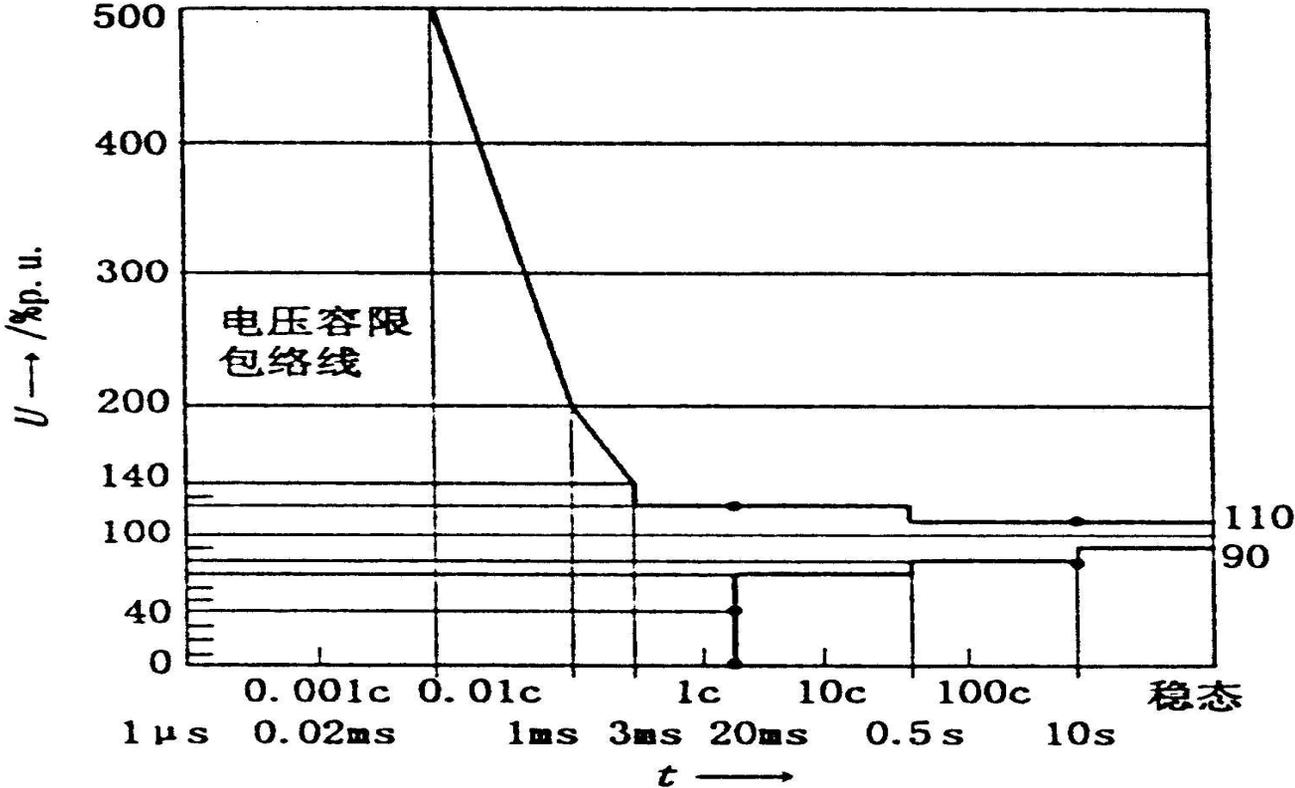
3.2 电能质量国外标准简介

3.2.2 美国

计算机和商用设备制造商协会（Computer and Business Equipment Manufacturers Association, 即CBEMA）出于大型计算机及其控制装置对电能质量要求，提出了电压容限曲线（称为CBEMA曲线）。该协会后改称为信息技术工业协会（Information Technology Industry Council, 即ITIC），并将电压容限曲线作了一定改进，如图3所示。

电能质量标准

图7 ITIC曲线



电能质量标准

美国的标准相当全面和丰富，基本由美国国家标准局（ANSI）和各个协会（例如IEEE）制定。现行的谐波标准为IEEE Std 519-1992 《IEEE关于电力系统中谐波控制的推荐规程和技术要求》。

3.2.3 电能质量标准和电磁兼容标准的关系

(1) 电磁兼容的概念

(2) IEC 61000系列标准

六大部分：《总论》、《环境》、《限值》、《试验和测量技术》、《安全装置和抑制导则》和《其他》。

(3) 标准限值的协调

电能质量标准

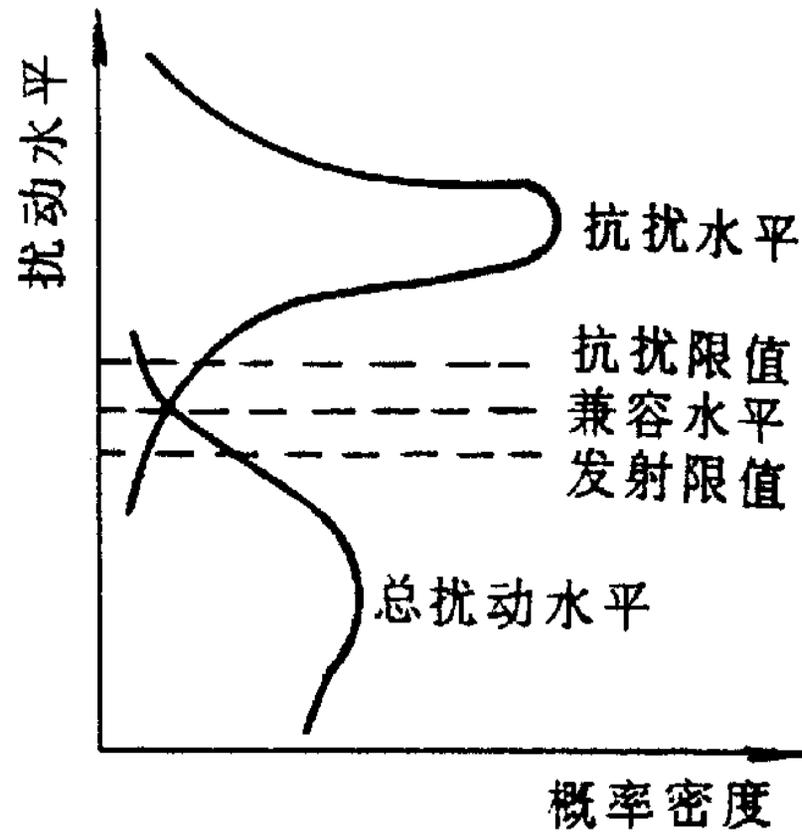
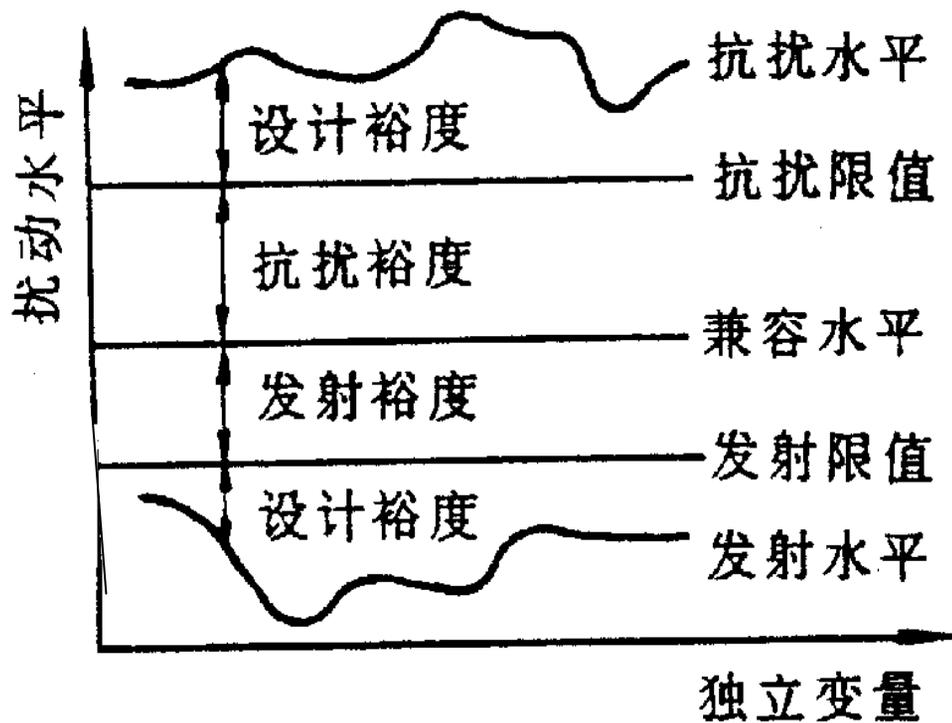


图8 电磁兼容协调中的有关参数

图9 扰动水平和概率密度关系

电能质量标准

表6 已采用为国标的与谐波相关的IEC 61000标准文件

国标编号	国家标准名称	相应的IEC标准	采用程度
GB/T 17626.7-1998	电磁兼容 试验测量技术 供电系统及所连设备谐波、谐间波的测量和测量仪器导	IEC 61000-4-7: 1991 (国际标准)	等同
GB17625.1-1998	耐压电器及电子设备发出的谐波电流限值 (设备每相输入电流 $\leq 16A$)	IEC 61000-3-2: 1995 (国际标准)	等效
GB/Z 17625.4-2000	电磁兼容 限值 中、高电力系统中畸变负荷发射限值的评估	IEC 61000-3-6: 1996 (第三类技术报告)	等同
GB/Z 18039.1-2000	电磁兼容 环境 电磁环境的分类	IEC 61000-2-5: 1995 (第二类技术报告)	等同

电能质量标准



表6 已采用为国标的与谐波相关的IEC 61000标准文件

国标编号	国家标准名称	相应的IEC标准	采用程度
GB/T18039.2-2000	电磁兼容 环境 工业设备电源低频传导骚扰发射水平的评估	IEC 61000-2-6: 1995 (第三类技术报告)	等同
GB17625.2-1999	电磁兼容 限值 对额定电流不大于 16A 的设备在低压供电系统中产生的电压波动和闪烁的限制	IEC 61000-3-3: 1995 (国际标准)	等同
GB/Z 17625.3-2000	电磁兼容 限值 对额定电流不大于 16A 的设备在低压供电系统中产生的电压波动和闪烁的限制	IEC 61000-3-5: 1994 (第二类技术报告)	等同