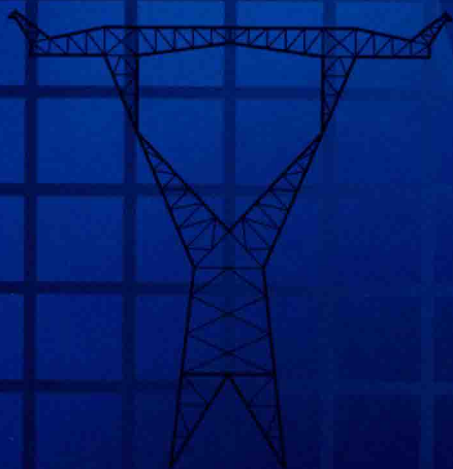


电能质量

林海雪 编著

讲座



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

电能质量

讲座

林海雪 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

电能质量关系到国民经济的总体效益,日益引起广泛关注。为了使电能质量专业和管理人员获得必要的基础知识,以便尽快掌握相关技能,特编写了本书。

本书从10个方面对电能质量进行了系统全面的介绍,包括电能质量的基本概念、电能质量的重要性、电能质量的影响、电能质量干扰源的特性、敏感性负荷的供电问题、电能质量主要标准、改善电能质量的技术措施、电能质量测量、电能质量的经济评估、电功率理论的概况与发展。

本书深入浅出、逻辑清晰,每个章节自成体系,又彼此呼应,适合作为电能质量专业和管理人员的培训教材,也适合作为高等院校电气专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电能质量讲座 / 林海雪编著. —北京: 中国电力出版社, 2017.1

ISBN 978-7-5123-8136-0

I. ①电… II. ①林… III. ①电能-质量
IV. ①TM60

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 130467 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>)

北京九天众诚印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2017年1月第一版 2017年1月北京第一次印刷

710毫米×980毫米 16开本 15.625印张 241千字

印数 0001—1500册 定价 75.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
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

现今社会的发展对电力的需求正在迅速增长。与此同时，对电能质量的要求也越来越高，这是由于现代电网负荷的结构发生了“质”变：一方面非线性和冲击性负荷比重不断增加，这些负荷对供电系统电能质量造成了严重的污染，恶化了电气设备的电磁环境；另一方面，以微电子控制技术为核心的现代高度自动化和智能化的电气设备、新型的电力电子装置和 IT 产业对电能质量的变化十分敏感。许多电能质量问题会导致产品质量的下降，生产流程的中断，甚至产品报废、设备损坏，给用户造成巨大的损失。实际上，目前电能质量已经关系到国民经济的总体效益了。

当前国内外的经济形势、能源形势正在发生深刻的变化，面对新形势、新挑战，国家电网公司根据我国的能源结构、资源和用电负荷分布的特点，加速开发以风电为代表的清洁能源，提出了建设以特高压电网为骨架、各级电网协调发展，以信息化、自动化、互动化为特征的坚强智能电网的战略目标。围绕这个宏伟目标，电力建设各方面工作正在加快前进的步伐，而保障电能质量将面临更为严峻的挑战。

本书的内容涉及以下 10 个方面：① 电能质量的基本概念；② 电能质量的重要性；③ 电能质量的影响；④ 电能质量干扰源的特性；⑤ 敏感性负荷的供电问题；⑥ 电能质量主要标准；⑦ 改善电能质量的技术措施；⑧ 电能质量测量；⑨ 电能质量的经济评估；⑩ 电功率理论的概况与发展。

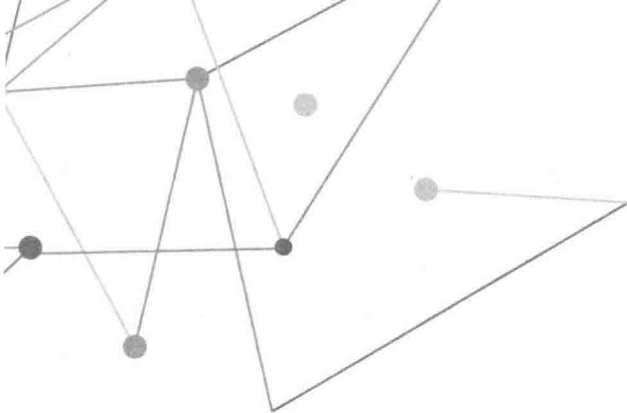
电能质量问题是一个覆盖诸多技术领域的系统工程，需要各级电力企业、相关电力用户、科研、设计、制造企业以及管理部门协同努力。为此，对广大电气技术人员普及电能质量知识是十分必要的。编写本书的目的是使参与电能质量工作的员工获得必要基础知识，以便尽快掌握相关专业技能，提高

工作水平。因此，本书可以作为电能质量的入门培训教材。本书从应用角度出发，结合作者对相关问题的研究心得，尽量全面反映电能质量基本技术概况，同时力图跟踪最新动态，对从事电能质量专业技术人员或高等院校相关专业的师生也是有参考价值的。

由于编者的水平有限，书中的不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

作 者

2016年9月



目 录

前 言

1 电能质量的基本概念	1
1.1 电力系统的组成	1
1.2 电力系统运行特点	2
1.3 电力系统中的电磁现象	4
1.4 电能质量的定义	6
1.5 电能质量的分类	9
1.6 我国电能质量标准概况	9
2 电能质量的重要性	13
2.1 电能质量关系到国民经济总体效益	13
2.2 现代负荷结构导致电能质量矛盾尖锐化	14
2.3 保证电能质量是电力可持续发展的必要条件	14
2.4 由电能质量问题造成的经济损失巨大	19
2.5 电力市场机制必将推动电能质量提高	21
3 电能质量的影响	22
3.1 电压水平	22
3.2 频率水平	25
3.3 谐波	27
3.4 电压波动和闪变	31
3.5 三相电压不平衡	34
3.6 过电压	38
3.7 间谐波	39

3.8	电压暂降和短时供电中断	40
3.9	电网信号传输	49
3.10	高频(50次谐波以上)电压的畸变	51
3.11	直流及地磁干扰	52
3.12	换相缺口	53
4	电能质量干扰源的特性	58
4.1	主要谐波源	58
4.2	间谐波源	66
4.3	主要波动源	72
4.4	三相不平衡负荷	83
4.5	有功功率冲击在发电机间的分配	88
5	敏感性负荷的供电问题	92
5.1	敏感度定义及负荷分类	92
5.2	设备对电压暂降敏感度的影响因素	93
5.3	常用的电压暂降敏感性设备分析	94
5.4	程控设备忍受能力的标准	98
6	电能质量主要标准	102
6.1	供电电压偏差	102
6.2	电力系统频率偏差	108
6.3	公用电网谐波	111
6.4	电压波动和闪变	115
6.5	三相电压不平衡	119
6.6	暂时过电压和瞬态过电压	122
6.7	公用电网间谐波	125
6.8	电压暂降与短时中断	130
7	改善电能质量的技术措施	134
7.1	概述	134
7.2	电力系统电压调整综述及基本公式	135
7.3	增加换流装置的脉动数	139
7.4	防止并联电容器组对谐波的放大	140

7.5	交流滤波装置	143
7.6	改善三相不平衡的措施	144
7.7	静止无功补偿器 (SVC)	147
7.8	静止无功发生器 (SVG, STATCOM)	158
7.9	可控并联电抗器 (CSR)	160
7.10	故障电流限制器 (FCL)	163
7.11	固定串联电容器和晶闸管控制串联电容器 (FSC, TCSC)	164
7.12	“定制电力”(CP) 技术	167
7.13	电力储能技术	177
7.14	优质电力园区的基本概念	181
7.15	减小暂降影响的技术措施	182
7.16	降低有功功率冲击影响的技术措施	183
8	电能质量测量	185
8.1	概述	185
8.2	电能质量测量的方式	185
8.3	电能质量监测仪器分类和特点	186
8.4	影响电能质量测量准确度的几个因素	187
8.5	电能质量指标的测量方法	190
8.6	电能质量在线监测	200
9	电能质量的经济评估	205
9.1	概述	205
9.2	电能质量变化型指标的经济评估	205
9.3	突发事件型指标的经济评估	209
9.4	经济评估其他一些考虑因素	216
9.5	总结	217
10	电功率理论的概况与发展	218
10.1	引言	218
10.2	传统正弦电路功率理论	218
10.3	非正弦频域功率理论	222
10.4	非正弦时域功率理论	224

10.5 瞬时无功理论	226
10.6 IEEE Std 1459: 现代电力系统功率定义	230
10.7 总结	237
参考文献	239

1.1 电力系统的组成

电力系统主要有五个组成部分：发电机、变压器、输电线、配电网及负荷，或者说，发电厂中发电机所产生的电力（电功率），升压后经过输电线送出，而后降压由配电网把电力分配到电能用户（负荷），这样的一个统一整体叫作电力系统。用一个简单的线路图来表示电力系统，如图 1-1 所示。

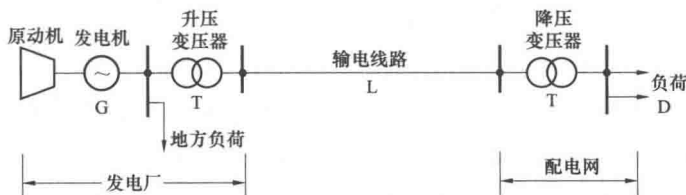


图 1-1 电力系统接线图

发电厂的基本任务是通过原动机和发电机把一次能源转变成电能（这里指的是常规的发电方式）。现在我国用于发电的能源（即原动机的消耗）主要是火力（煤炭、天然气、石油等）、水力和核能，其他如地热、风力、生物质、太阳能、潮汐、波浪、电池等分布式能源比例还很小（发电量不到 2%），目前尚处于大力发展阶段。

以上概述的电力系统五个组成部分构成了电力系统的躯干，叫做“一次系统”。电力系统在运行中需要对其状态工况进行测量、监视和调控以保证供电的质量。另外电力系统在运行中经常要进行运行操作（例如启停发电机、切换变压器、投切线路等），同时也不可避免要发生事故或异常，引起过（或低）电压或大电流，以致损坏电力设备，中断对用户供电。因此，电力系统中设有调度、通信以及保护和自动控制装置。这些都是电力系统不可缺少的

组成部分，通常叫做“二次系统”。电力系统是由一、二次系统组成的特殊电磁环境，其中存在着多种电磁现象和相互作用。

1.2 电力系统运行特点

1.2.1 功率平衡

电能与其他能量不同，一般不能大量储存，其生产过程是连续的，发、输、变、配电与用电在同一瞬间进行并完成。电力系统输送电能过程一定服从能量守恒定律。具体表现为有功功率平衡和无功功率平衡。

电力系统中所有发电机的有功功率之和，与所有连接的有功负荷及所有电网元件中有功功率损耗之和相等。有功负荷是指将电能转换为其他形式能量的用电设备。例如：电动机可将电能转换为机械能；电热设备可将电能转化为热能（电网的有功功率损耗也包括在内）；电解设备可将电能转换为化学能；照明设备可将电能转换为光能等。

电力系统中所有发出的无功功率之和，与所有无功负荷（包括所有电网元件中无功功率损耗）之和相等。无功负荷一般指需要感性功率（建立磁场用）的设备，例如电动机、变压器、线路电感、串并联电抗器等，而发出的无功功率则指容性功率（建立电场用），即由发电机、调相机（包括同步电动机）、并联和串联电容器、电气设备或线路电容等产生。无功功率平衡是电力系统内部磁场和电场能量的交换，并没有将电能转换为其他形式的能量，故而称之为“无功”。电磁能量的变换只存在于交流电网中，当电流瞬时为零时，磁场消失；而当电压为零时，电场消失。因而无功功率平衡是交流电网的一种特殊能量平衡形式。在不加任何补偿装置条件下（即只是由发电机提供无功功率），电网自然无功负荷系数 $k = \frac{Q_M}{P_M} \approx 1 \sim 1.4$ ，式中 Q_M 为无补偿时的最大无功负荷； P_M 为最大有功负荷。一般电网中发电机的功率因数为 $0.8 \sim 0.9$ ，也就是发电的无功功率比有功功率小，因此电网中必须增加无功补偿设备，以维持正常无功功率平衡。

1.2.2 功率平衡对频率和电压的影响

电力系统运行中一般因负荷不断地变化以及各种扰动而使功率平衡发生

变化。有功负荷的变化（或发电机有功功率的变化）将引起系统频率波动（这是由于原动机功率不能马上改变，变化负荷的能量只能由系统转动的动能提供），不断地使有功功率在某一新的频率上达到平衡。据研究，频率降低 1% 时，有功负荷变化约减小 1%~2%。但频率不能偏离标称值（50Hz）过大，为了恢复到正常频率，电力系统通过调节装置（调速器和频率调节器）作用，使原动机增加输入量（例如，在火电厂中增加蒸汽的输入量，加大汽轮机出力），从而增加了发电机的有功功率，使系统频率恢复正常。这个过程约需几十秒时间。为了减小负荷变化引起的频率波动，就应使负荷变化量相对于系统容量的比例很小。因此电力系统总体上是向高电压、大容量发展。现代大电力系统（例如我国的东北、华北、华东、华中、西北以及南方电网系统）频率对标称值 50Hz 的偏差一般能控制在 $\pm 0.1\text{Hz}$ 以内。

无功功率的平衡影响系统的电压水平。负荷的无功功率是随电压降低而减少的，一般综合负荷的无功功率—电压静特性如图 1-2 中实线所示。正常运行在 Q_n 和 U_n 位置，从图可以看出，要想保持负荷端电压水平，就得向负荷供应所需要的无功功率，当供应不足时，负荷端电压将被迫降低，如图中的 Q_1 和 U_1 所示。当无功负荷增加时，无功负荷的电压静特性要平行上移，如图中虚线所示。但如果系统对负荷所供应的无功功率不能相应地增加 ΔQ ，则负荷端电压也将被迫降低，如图中的 U_2 。

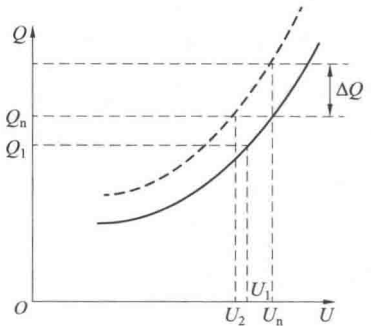


图 1-2 负荷的无功功率—电压静特性

由此可知，电力系统的无功功率必需保持正常的平衡，即正常发出的无功功率要与无功负荷（即负荷吸收的无功功率）需求（包括无功损耗）平衡，这是维持电力系统电压水平的必要条件。

1.2.3 运行状态变化的多样性、复杂性和传播的快速性

电力系统运行状态处在经常变动之中，其首要原因是用电负荷是变化的。由于用电负荷容量不同，性能各异，其变化直接影响系统有功功率和无功功率的平衡，从而引起电网频率和电压的各种变化。另外，电网中运行操作（投切线路、变压器，开停机组等）是经常发生的，各种事故和雷击等也

是不可避免的。所有这些，我们均称为对电网的扰动。扰动必然要破坏正常的功率平衡。只有电网恢复正常平衡才能保持合格的供电频率和电压。恢复期间有一个暂态过程。暂态过程的快慢取决于扰动的性质、大小以及电网参数和运行调控手段。一般暂态过程相当迅速。电磁暂态过程将在毫秒级甚至微秒级时间内完成，而短路、开关切换、发电机振荡和系统丧失稳定的过程，则在几个周波至几秒内完成^[1]。由于整个电网通过线路、变压器等元件连在一起，因此某处的扰动或暂态会迅速传播到别处。特别是近区电网首当其冲，会受到显著的影响。在电网参数不利的配合下，甚至某些远处供电点也会受到严重波及，可能会大大降低其供电性能（电压状态），使用电设备受到损伤。

1.2.4 运行可靠性和供电连续性

电力是国民经济的命脉，它和工农业生产、国防、信息产业、交通和日常生活等都密切相关，电力的这一特点就要求电网能够保证足够高的运行可靠性和供电连续性。考虑到电能生产、使用的同时性和可变性，因此系统的各元件（发电机、变压器和线路等）应具有经济上合理的备用容量，同时要求电力系统的发展应超前于国民经济其他部门的发展。据国际上统计，1kWh（一度）电能可以创造比电能自身价值高 44 倍的产值^[2]，因此缺电或停电给国民经济带来的损失绝不能仅仅用电量费用来衡量。

1.3 电力系统中的电磁现象

电力系统中的各种电气设备通过电的或磁的关系彼此紧密相联，相互影响。由于运行方式的改变、开关操作、故障、雷击等引起电磁振荡会很快（以 μs 、 ms 和 s 计）波及很多电气设备，使其工作受到影响或遭到破坏，甚至危及人体的健康。即使在正常运行状态下，某些整流及非线性设备产生的谐波、冲击负荷引起的电压波动和闪变、单相负荷造成电压不平衡也会危害其他设备。因此，电力系统内部存在着大量的电磁兼容问题，所有一次回路都面对非常复杂的高电压、强电磁环境，而一次回路中开关操作、雷电流及短路电流在接地网上引起的电位升高，甚至二次回路的操作通过电缆之间的电磁耦合，都会对二次回路产生干扰。电力系统中存在大量的电场干扰、磁场

干扰、静电干扰以及谐波、电压波动和闪变、不平衡、电压暂降和短时中断、过电压、频率变化等传导性干扰，均可能造成一次设备以及微机保护、综合自动化系统和调度自动化系统等二次设备异常或故障，特别是二次装置系统大都是以微电子元件为核心，对电磁干扰十分敏感。同时这些干扰会对用电设备、IT 产业及现代自动化生产线的正常工作带来威胁，可能造成巨大的损失。

电能质量的研究以电力系统中的电磁现象为基础。国际电工委员会(IEC)把电磁现象按其来源和频率分成如下几大类^[3]：

(1) 低频传导现象：谐波、间谐波（或谐间波），信号电压，电压波动，电压暂降和短时中断，电压不平衡，电源频率变化，低频感应电压，交流电网中的直流。

(2) 低频辐射现象：磁场、电场。

(3) 高频传导现象：感应连续波（CW）电压和电流、单向瞬态、振荡瞬态。

(4) 高频辐射现象：磁场、电场、电磁场（连续波、瞬态）。

(5) 静电放电（ESD）现象。

(6) 核电磁脉冲（NEMP）。

美国 IEEE 标准协调委员会（IEEE SCC22）提出电力系统电磁现象的分类，如表 1-1 所列^[4]。

表 1-1 电力系统电磁现象的分类和典型特征

种 类		典型频谱成分	典型持续时间	典型电压幅值
电磁冲击瞬态	ns 级	5ns 上升	<50ns	
	μs 级	1μs 上升	50ns~1ms	
	ms 级	0.1ms 上升	>1ms	
电磁振荡瞬态	低频	<5kHz	0.3~50ms	0~4p.u. ^①
	中频	5~500kHz	20μs	0~8p.u.
	高频	0.5~5MHz	5μs	0~4p.u.
瞬时电压变动 (rms)	暂降		0.5~30 周波	0.1~0.9p.u.
	暂升		0.5~30 周波	1.1~1.8p.u.
暂时电压变动 (rms)	中断		0.5 周波~3s	<0.1p.u.
	暂降		30 周波~3s	0.1~0.9p.u.
	暂升		30 周波~3s	1.1~1.4p.u.

续表

种类		典型频谱成分	典型持续时间	典型电压幅值
短时电压变动 (rms)	中断		3s~1min	<0.1p.u.
	暂降		3s~1min	0.1~0.9p.u.
	暂升		3s~1min	1.1~1.2p.u.
长期电压变动 (rms)	持续中断		>1min	0.0p.u.
	欠电压		>1min	0.8~0.9p.u.
	过电压		>1min	1.1~1.2p.u.
	过电流		>1min	
不平衡	电压		稳态	0.5%~2%
	电流		稳态	1.0%~30%
波形畸变	直流偏移		稳态 ^①	0~0.1%
	谐波	0~9kHz	稳态 ^③	0~20%
	间谐波	0~9kHz	稳态 ^③	0~2%
	缺口		稳态 ^③	
	噪声	宽带	稳态 ^③	0~1%
电压波动		<25Hz	间歇	0.1%~7% 0.2~2 P_{st} ^②
工频变动			<10s	

① 本表中 p.u. 为标么值, 对于瞬态, 以标称峰值为基值; 对于方均根值 (rms, 或称有效值), 以标称 rms 为基值。所谓“标称”, 一般指“标称电压”。

② 闪变指标 P_{st} 在 IEC61000-4-15 中定义。

③ 表中所谓的“稳态”是指经常存在, 不是恒定不变。

对于表 1-1 中列出的各种现象, 可以进一步用其适当的属性来描述。对于稳态现象, 可利用以下属性来描述: 幅值、频率、频谱、调制、电源阻抗、缺口深度、缺口面积; 对于非稳态现象, 可能需要另外一些属性来描述: 上升率、幅值、持续时间、频谱、频率、发生率、能量、电源阻抗等。

1.4 电能质量的定义

迄今为止, 对电能质量的技术含义还存在着不同的看法。

什么是电能质量? 这一研究领域的许多文献和报告中使用过的相关术语如下: ① 电压质量 (voltage quality) 即用实际电压与理想电压间的偏差 (应理解为广义偏差, 即包含幅值、波形、相位等), 反映供电企业向用户供给的

电力是否合格。此定义虽然能表达电能质量实质，但不直接反映用电（电流）对质量的影响。② 电流质量（current quality）即对用户取用电流提出恒定频率、正弦波形要求，并要求电流波形与供电电压同相位，以保证系统以高功率因数运行。这个术语有助于用电质量的改善，并降低线损，但不能概括基本上由电压原因造成的质量问题，而后者并不总是由用电造成的。③ 供电质量（quality of supply）应包含技术含义和非技术含义两部分：技术含义有电压质量和供电可靠性；非技术含义是指服务质量（quality of service），包括供电企业对用户投诉的及时处理和电能价格的合理性、透明度等。④ 用电质量（quality of consumption）应包括电流质量和非技术含义，如用户是否遵守用电规则、是否按时缴纳电费等，它反映用电方的责任和义务。

需指出，“power”一词通常译为“功率”“电力”“电源”等，在国家标准中将“power quality”和“电能质量”相对应，是考虑到电能作为商品在市场上流通，其质量问题和国际上这个术语（power quality）的含义，是完全吻合的，尽管国内不少文献资料中仍有用“电力质量”“电源质量”等不太规范的译法。

IEEE 标准协调委员会（SCC22）已正式采用“power quality”这一术语，并且给出了相应的技术定义：“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均适合于该设备正常工作的”。这个定义的缺点是不够直接和简明。有的文献采用的电能质量定义为：“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”。这个定义的主要缺点是不全面（只提用户设备），且未将频率偏差归入电压参数（即电压的周期）。还有文献定义为：“对比一组基准技术参数进行评估的电力系统某一指定点上电的特性”。对于基准技术参数不明确是这个定义的缺点。另一文献则定义为：“关系到供用电设备正常工作（或运行）的电压、电流的各种指标偏离规定范围的程度”。作为质量的好坏，用一个范围来衡量是不确切的。这个定义中如把“规定范围”改为“基准技术参数”，同时加注说明基准技术参数一般是指理想供电状态下的指标值就较为完整了。定义中“理想指标值”有多种含义，但均比较确切。例如标称电压值，频率 50Hz，波形正弦（谐波含量为零），三相对称（不平衡度为零）等。此定义突出了“供用电设备正常工作（或运行）”，这是评判电能质量的出发点。从这个定义出发，所有涉及供电可靠性即供电连续性的问题，也应属于电能质量范畴，但在电力企业中，供电可靠性和电能质量是分别管理和

统计的。本书基本上不涉及可靠性问题。该定义将电压和电流并列为质量内容，虽然从电气设备正常工作角度，只要保证电压各种指标合格就可以了，但考虑到电网中电流和电压密切相关，例如用电电流非正弦是引起电压畸变的主要原因，而这部分责任在用户。全面保证电能质量是供用电双方的职责，因此在定义中将电流也包括在内是有积极意义的。此外，在某些情况下，电压不是影响设备安全性的唯一因素，例如雷击影响中必须考虑雷电流的大小。

电能是一种特殊产品，同样具有产品的若干特征，如其质量可以用各种指标加以描述、可被测量等。但电能质量与一般产品质量不同，有如下特点：① 不完全取决于电力生产企业，甚至有的质量指标（例如谐波、电压波动和闪变，三相电压不平衡）往往由用户的负载决定，还有一部分是由难以预测的事故和外力（如雷击）引起的；② 对于不同的供（或用）电点和不同的供（或用）电时刻，电能质量指标往往是不同的。也就是说，电能质量在空间上和时间上均处于动态变化之中，且变化形态具有多样性。

特点①说明，全面保障电能质量既是电力企业的责任，也是用户（干扰性负荷）以及设备制造商应尽的义务。

特点②说明电能质量指标测量的复杂性，一般宜用概率统计结果来衡量，并且需要指明监测点或衡量点。国内外大多取 95% 概率值作为衡量依据。这样一个指标特点也对用电设备性能提出了相应的要求，即电气设备不仅应能在规定范围之内正常运行，而且应具备承受一定的短时超标运行的能力（即抗扰度）。图 1-3 以不同的波形畸变形式反映几种主要的电能质量状况。

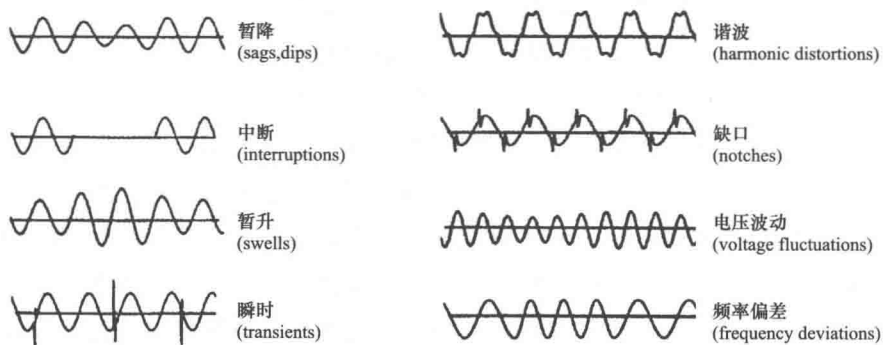


图 1-3 与不良电能质量有关的几个最重要的波形畸变