



国际电气工程先进技术译丛

电力系统谐波 ——基本原理、分析 方法和滤波器设计 附习题解答

**Power Systems Harmonics
Fundamentals,
Analysis and
Filter Design**

(奥) George J. Wakileh 著

徐政 译

 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

电力系统谐波——基本原理、 分析方法和滤波器设计

· 附习题解答

(奥) George J. Wakileh 著

徐 政 译

机 械 工 业 出 版 社

附习题解答版译者的话

本书中文版自 2003 年出版以来，得到了同行的热烈欢迎和高度评价，到目前为止已印刷 3 次，印数 9000 册。原著作者在前言中曾提到本书有相配的习题解答，因此这些年来，有很多读者询问能否出版本书的习题解答，这次附习题解答版的出版可以说是满足了很多读者的热切期望。

电力系统的谐波计算和滤波器设计是一项计算工作量特别大的工作，即使对于本书的算例和习题，采用手算完成也几乎是不可能的。而对于实际工程中的滤波器设计问题，必须采用计算机软件才能解决。为此，译者的研究团队基于本书的理论，开发了“企业电网专用谐波分析和滤波器设计软件”，有兴趣的读者可以登录网站 www.hvdc.cn 查询。

限于译者水平，这部分的翻译难免存在错误和不妥之处，恳请广大读者批评指正。

译 者

译 者 的 话

电力系统的谐波问题近几十年来在世界范围内得到了十分广泛的关注，国际电工委员会（IEC）、国际大电网会议（CIGRE）、国际供电会议（CIRED）及美国电气和电子工程师协会（IEEE）等国际性学术组织，都相继成立了专门的电力系统谐波工作组，并已制定出了限制电力系统谐波的相关标准。我国随着改革开放政策的实施，国民经济高速发展，直流输电和柔性交流输电技术的采用，电气化铁道的快速发展，化工、冶金、煤炭等工业部门中大量应用电力电子设备，以及节能工作中电力电子技术的应用等，使得电力系统的谐波问题日益严重，从而将谐波的管理、监测和治理等摆到了十分重要的位置。奥地利学者 George J. Wakileh 博士编写的《电力系统谐波——基本原理、分析方法和滤波器设计》一书，于 2001 年由 Springer 出版社出版，是我所见到的对谐波问题阐述得最为系统和深入的一本著作。现在，将本书翻译出来，希望能对我国同行有所帮助。本书有两个显著特点，第一个特点是理论阐述深入浅出，重要概念反复提示，公式推导详尽细致；第二个特点是资料搜集完备系统，应用实例非常丰富，可操作性极强，很多实际工程问题完全可以仿照书中的实例得到解决。因此本书既可作为学习和研究谐波问题的教材，也可作为解决工程实际问题的参考手册。

本书的翻译得到了国家自然科学基金（项目批准号 50277034）的资助，在翻译过程中，研究生黄莹、王冠、程华、于兵、王超、杨汾艳同学做了大量工作，在此深表谢意。

限于译者水平，书中难免存在错误和不妥之处，恳请广大读者批评指正。译者联系方式：电话 0571 - 87952074，电子信箱 xufeng@hzcnc.com。

徐 政
于浙江大学求是园

原 序

近年来,变速传动在工业界的广泛应用以及电力电容器组在电力系统中的大量使用,使得电能质量问题备受关注,人们必须严肃对待电流和电压的畸变问题,而电流和电压畸变的主要形式是谐波畸变。

谐波研究的主要目的是计算母线谐波电压、支路谐波电流、电压和电流的总谐波畸变率(THD),以及找出谐振的条件。因此在进行谐波研究时,准确模拟系统元件,以保证获得精确和可靠的谐波畸变结果是十分重要的。已有的商业化软件可以用来分析谐波问题。用来评估谐波畸变的更深入的国际性标准正在制定中。

本书的第2章叙述一些基础知识,包括谐波的特性和谐波畸变的度量方法,利用电容器组来提供无功功率和功率因数校正,以及谐振的起因等。第3章阐述了谐波畸变的起源。第4章的目的是量化谐波畸变对电力系统设备和负荷的影响。第5章讨论降低电力系统谐波的方法。第6章介绍由IEEE、IEC、EN和NORSOK制定的标准中对电流和电压谐波畸变的限制值。第7、8和9章讨论电力系统元件的模拟方法,以保证获得精确和可靠的谐波畸变结果,包括高压电力网络、发电机、并联和串联电容器组、感应电动机、负载、双绕组变压器、三绕组变压器、四绕组变压器以及电力线路的模型等。第10章给出了分析和求解电力系统谐波问题的一种简单方法。

附录A简短回顾了变换矩阵 A 和对称分量的概念。附录B详细推导了由 Y_d 、 D_y 、 D_d 和 Y_y 联结变压器导出的所有联结组标号下的相导纳矩阵和序导纳矩阵,这在模拟三相双绕组变压器时是必需的。附录C推导了三相变压器的传输矩阵。

在本书的各章中分析了很多实际算例。本书对电力系统谐波进行了定量的讨论和入门性的分析,并提供了背景材料、推导了相关方程、分析了实例系统,还阐述了实际应用中需考虑的因素。本书的取材在于引导读者更好地理解本书的主题。本书适用于从事实际工作的工程师、大学本科生和研究生,也可以作为电力系统谐波的自学教材。

本书每章后面习题的详细解答可从解题指导书中找到,该小册子已经出版。

感谢我的甥女 Hala A. Masri, 她仔细地校读了本书的手稿。

G. J. Wakileh

目 录

译者的话

原序

第 1 章 引言 1

第 2 章 谐波的基本原理 4

2.1 引言	4
2.2 谐波波形举例	4
2.3 谐波表示法	6
2.4 电力系统谐波的特性	8
2.4.1 对称性	8
2.4.2 相序性	12
2.4.3 独立性	13
2.5 谐波畸变的度量方法	13
2.5.1 电压和电流有效值	14
2.5.2 电压和电流的畸变因数	14
2.5.3 有功功率和无功功率	16
2.5.4 视在功率	17
2.5.5 畸变功率	17
2.5.6 功率因数	17
2.5.7 电流和电压的峰值因数	17
2.5.8 电话干扰和 $I \cdot T$ 乘积	18
2.6 无源元件中的功率	19
2.6.1 纯电阻中的功率	19
2.6.2 纯电感中的功率	20
2.6.3 纯电容中的功率	21
2.7 畸变的计算	21
2.8 谐振	22
2.8.1 串联谐振	23
2.8.2 并联谐振	24
2.9 电容器组和无功功率供给	25
2.10 电容器组和功率因数校正	29

2.11 母线电压升高和谐振	30
2.12 变压器中的谐波	33
2.12.1 一次侧三角形联结	34
2.12.2 一次侧星形联结	34
2.13 小结	34
习题	35

第 3 章 电力系统中的谐波——它们的起因 37

3.1 引言	37
3.2 谐波源	37
3.3 变压器	37
3.4 旋转电机	38
3.5 荧光灯	38
3.6 静止无功补偿器	38
3.7 变频器	39
3.8 单相可控整流器	39
3.8.1 交流线路电抗的影响	40
3.8.2 零直流电抗情况 ($L_d=0$)	41
3.8.3 零直流电抗 ($L_d=0$)——特殊情况 $\alpha=0$	45
3.8.4 连续电流情况 (大 L_d)	46
3.8.5 间断电流情况 (小 L_d)	53
3.9 三相电力变流器	55
3.9.1 直流/交流逆变器	55
3.9.2 电池变流器	55
3.9.3 6 脉波变流器	56
3.9.4 12 脉波变流器	58
3.9.5 p 脉波变流器	60
3.9.6 典型谐波的频谱	61
3.9.6.1 6 脉波变流器	61
3.9.6.2 12 脉波变流器	62
3.9.6.3 24 脉波变流器	62

3.10 小结	65	5.7.1 串联调谐滤波器	96
习题	65	5.7.2 2 阶阻尼滤波器	101
第 4 章 谐波畸变对电力系统的影响	67	5.7.3 滤波器组的阻抗图	103
4.1 引言	67	5.7.3.1 三支路 33kV 滤波器的 阻抗图	103
4.2 谐波环境中的热损耗	67	5.7.3.2 四支路 20kV 滤波器的 阻抗图	105
4.2.1 铜耗	67	5.7.3.3 五支路 690V 滤波器的 阻抗图	107
4.2.2 铁耗	67	5.8 有源滤波器	109
4.2.3 介质(绝缘)损耗	69	5.9 小结	113
4.3 谐波对电力系统设备的影响	70	习题	114
4.4 电容器组	70	第 6 章 谐波畸变的限制值	116
4.4.1 谐波放大	70	6.1 引言	116
4.5 变压器	75	6.2 电压谐波畸变的限制值	116
4.6 旋转电机	76	6.2.1 IEEE 的限制值	116
4.6.1 感应电动势	76	6.2.2 IEC 的限制值	116
4.6.2 短距(分数极距)绕组	78	6.2.3 EN 的限制值	118
4.6.3 分布绕组	78	6.2.4 NORSOK 的限制值	119
4.6.4 绕组因数	79	6.3 电流谐波畸变的限制值	119
4.6.5 感应电动势和电压总谐波畸 变率	79	6.3.1 IEC 的限制值	119
4.7 保护、通信和电子设备	85	6.3.2 IEEE 的限制值	121
4.8 小结	85	6.3.3 NORSOK 的限制值	121
习题	85	第 7 章 谐波分析计算——系统元件 的模拟	123
第 5 章 电力系统谐波的抑制 方法	87	7.1 引言	123
5.1 引言	87	7.2 谐波存在情况下的阻抗	124
5.2 谐波滤波器	87	7.3 集肤效应	124
5.2.1 串联调谐滤波器	87	7.4 高压电网的模拟	124
5.2.2 双带通滤波器	88	7.5 发电机的模拟	127
5.2.3 阻尼滤波器	88	7.6 并联电容器组的模拟	128
5.2.4 解谐(反谐振)滤波器	88	7.7 并联电容器组模型——单相 等效	130
5.2.5 有源滤波器	88	7.8 串联电容器组的模拟	130
5.3 电力变流器	89	7.9 负荷模型	130
5.4 变压器	89	7.9.1 串联负荷模型	131
5.5 旋转电机	91	7.9.2 并联负荷模型	131
5.6 电容器组	92		
5.7 谐波滤波器的设计方法	95		

7.9.3 负荷模型——单相等效	131	8.2.8.2 Y-Y、 Δ - Δ 、Z-Z、 Δ -Z 和 Z- Δ 联结变压器	175
7.9.4 三角形联结负荷	132	8.2.8.3 传输矩阵 T 和 T_e	177
7.9.5 星形联结负荷	133	8.2.9 传输矩阵和相导纳矩阵	178
7.9.6 通用负荷模型	134	8.3 三绕组变压器的模拟	179
7.10 感应电动机的模拟	136	8.4 四绕组变压器的模拟	182
7.11 感应电动机模型——单相 等效	139	8.5 小结	184
7.12 小结	141	习题	185
习题	141		
第 8 章 变压器的模拟	143	第 9 章 输电线路和电缆的模拟 ..	188
8.1 引言	143	9.1 引言	188
8.2 双绕组变压器的模拟	143	9.2 集肤效应	188
8.2.1 3 倍数次谐波	144	9.3 电力线路的模拟	188
8.2.2 零序模型	144	9.4 线路的串联阻抗	189
8.2.3 星形联结绕组	144	9.5 导体间的耦合	193
8.2.4 三角形联结绕组	144	9.6 耦合线路	194
8.2.5 关于 Δ -Y 与 Y- Δ 联结变 压器的美国国家 标准 (ANSI)	145	9.7 线路的并联电容	195
8.2.6 双绕组变压器模型——单相 等效	146	9.8 波阻抗和传播速度	197
8.2.7 相导纳矩阵和序导纳矩阵 ..	147	9.9 线路的串联阻抗和并联电容—— 单相等效	198
8.2.7.1 变换和匝数比	148	9.10 传输矩阵 ($ABCD$)	198
8.2.7.2 Y_g - Δ 联结变压器	150	9.11 导纳矩阵	199
8.2.7.3 Y- Δ 联结变压器	154	9.12 传输矩阵与导纳矩阵间的相互转 换	200
8.2.7.4 Δ - Y_g 联结变压器	156	9.13 标称 π 模型——单相等效	205
8.2.7.5 Δ -Y 联结变压器	157	9.14 等效 π 模型——沿线电压 和电流	206
8.2.7.6 Δ - Δ 联结变压器	159	9.15 无损耗线	214
8.2.7.7 Y_g - Y_g 联结变压器	161	9.16 等效 π 模型——单相等效	215
8.2.7.8 Y_g -Y 联结变压器	162	9.17 网络短路容量的变化	223
8.2.7.9 Y- Y_g 联结变压器	163	9.18 实例——标称和等效 π 模型 ..	223
8.2.7.10 Y-Y 联结变压器	164	9.18.1 一条 300kV、300km 的输 电线路	223
8.2.7.11 小结	165	9.18.2 一条 6.6kV、30km 的电 缆	225
8.2.8 电压和电流在双绕组变压器 中的传输	168	9.19 小结	229
8.2.8.1 Y- Δ 和 Δ -Y 联结变压 器	169	习题	231

第 10 章 电力系统谐波分析计算

——一种简单方法	236	10.9.8 增加电动机负荷的影响 ...	287
10.1 引言	236	10.9.9 增加无源负荷的影响	290
10.2 使用计算机程序进行谐波分析	236	10.10 一个 132/22kV 工业电力系统的谐波分析	293
10.3 使用电子表格进行谐波分析 ...	236	10.10.1 谐波分析	297
10.3.1 数据输入	237	10.10.1.1 系统阻抗	297
10.3.2 网络分析	237	10.10.1.2 阻抗扫描	299
10.3.3 谐波滤波器设计	241	10.10.1.3 谐波注入	299
10.4 谐波畸变限制值	243	10.10.2 短路容量变化的影响	301
10.5 谐波滤波器的额定值	243	10.10.3 变压器停运的影响	303
10.6 实际应用中应考虑的因素	248	10.10.4 增加变压器阻抗的影响 ...	304
10.7 一个谐波分析实例	249	10.10.5 增加电动机负荷的影响 ...	307
10.8 对一个 300/22kV 工业电力系统的谐波分析	253	10.10.6 增加无源负荷的影响	307
10.8.1 谐波分析	257	10.11 一个 400/33kV 工业电力系统的谐波分析	309
10.8.1.1 系统阻抗	257	10.11.1 谐波分析	310
10.8.1.2 阻抗扫描	259	10.11.1.1 系统阻抗	310
10.8.1.3 谐波注入	259	10.11.1.2 阻抗扫描	313
10.8.2 短路容量变化的影响	261	10.11.1.3 谐波注入	313
10.8.3 变压器停运的影响	263	10.11.1.4 输出结果	314
10.8.4 增加变压器阻抗的影响 ...	265	10.12 低压系统谐波分析	315
10.8.5 增加电动机负荷的影响 ...	266	10.12.1 谐波分析	317
10.8.6 增加无源负荷的影响	268	10.12.1.1 系统阻抗	317
10.8.7 谐波滤波器的额定值	268	10.12.1.2 阻抗扫描	319
10.9 对一个 300/33kV 工业电力系统的谐波分析	271	10.12.1.3 谐波注入	319
10.9.1 系统描述	271	10.12.1.4 输出结果	320
10.9.2 谐波分析	273	10.13 小结	322
10.9.2.1 系统阻抗	273	习题	322
10.9.2.2 阻抗扫描	277	参考文献	324
10.9.2.3 谐波注入	278	附录	328
10.9.3 输出结果	278	附录 A 变换及对称分量复习	328
10.9.4 谐波滤波器的额定值	279	A.1 变换矩阵 A	328
10.9.5 高压网络短路容量变化的影响	281	A.2 对称分量	329
10.9.6 变压器停运的影响	286	附录 B 三相变压器的相导纳和序导纳矩阵	332
10.9.7 减小变压器阻抗的影响 ...	286	B.1 $Y_g - \Delta$ 联结变压器	333
		B.1.1 Y_{gd1} 联结变压器	333

B.1.2	$Y_g d3$ 联结变压器	336	B.9.2	$Dd2$ 联结变压器	383
B.1.3	$Y_g d5$ 联结变压器	337	B.9.3	$Dd4$ 联结变压器	385
B.1.4	$Y_g d7$ 联结变压器	339	B.9.4	$Dd6$ 联结变压器	386
B.1.5	$Y_g d9$ 联结变压器	341	B.9.5	$Dd8$ 联结变压器	388
B.1.6	$Y_g d11$ 联结变压器	342	B.9.6	$Dd10$ 联结变压器	389
B.2	$Y-\Delta$ 联结变压器	344	B.10	小结	390
B.2.1	$Yd1$ 联结变压器	344	附录 C	三相变压器的传输矩阵	394
B.2.2	$Yd3$ 联结变压器	345	C.1	$\Delta-Y$ 和 $Y-\Delta$ 联结变压器	394
B.2.3	$Yd5$ 联结变压器	347	C.1.1	$Y-\Delta$ 联结变压器	395
B.2.4	$Yd7$ 联结变压器	349	C.1.1.1	$Yd1$ 联结变压器	395
B.2.5	$Yd9$ 联结变压器	351	C.1.1.2	$Yd3$ 联结变压器	395
B.2.6	$Yd11$ 联结变压器	353	C.1.1.3	$Yd5$ 联结变压器	396
B.3	$\Delta-Y_g$ 联结变压器	354	C.1.1.4	$Yd7$ 联结变压器	397
B.4	$\Delta-Y$ 联结变压器	357	C.1.1.5	$Yd9$ 联结变压器	398
B.5	Y_g-Y_g 联结变压器	358	C.1.1.6	$Yd11$ 联结变压器	399
B.5.1	$Y_g y_g0$ 联结变压器	359	C.1.2	$\Delta-Y$ 联结变压器	400
B.5.2	$Y_g y_g2$ 联结变压器	360	C.1.2.1	$Dy1$ 联结变压器	400
B.5.3	$Y_g y_g4$ 联结变压器	362	C.1.2.2	$Dy3$ 联结变压器	401
B.5.4	$Y_g y_g6$ 联结变压器	363	C.1.2.3	$Dy5$ 联结变压器	402
B.5.5	$Y_g y_g8$ 联结变压器	364	C.1.2.4	$Dy7$ 联结变压器	403
B.5.6	$Y_g y_g10$ 联结变压器	366	C.1.2.5	$Dy9$ 联结变压器	403
B.6	Y_g-Y 联结变压器	367	C.1.2.6	$Dy11$ 联结变压器	404
B.6.1	$Y_g y0$ 联结变压器	367	C.1.3	小结	405
B.6.2	$Y_g y2$ 联结变压器	368	C.2	$Y-Y$ 、 $\Delta-\Delta$ 、 $Z-Z$ 、 $\Delta-Z$ 和 $Z-\Delta$ 联结变压器	407
B.6.3	$Y_g y4$ 联结变压器	369	C.2.1	$Yy0$ 和 $Dd0$ 联结变压器	408
B.6.4	$Y_g y6$ 联结变压器	370	C.2.2	$Yy2$ 和 $Dd2$ 联结变压器	408
B.6.5	$Y_g y8$ 联结变压器	371	C.2.3	$Yy4$ 和 $Dd4$ 联结变压器	409
B.6.6	$Y_g y10$ 联结变压器	373	C.2.4	$Yy6$ 和 $Dd6$ 、 $Dz6$ 联结变 压器	410
B.7	$Y-Y_g$ 联结变压器	374	C.2.5	$Yy8$ 和 $Dd8$ 、 $Dz8$ 联结变 压器	410
B.8	$Y-Y$ 联结变压器	375	C.2.6	$Yy10$ 和 $Dd10$ 联结变压器	411
B.8.1	$Yy0$ 联结变压器	375	C.2.7	小结	412
B.8.2	$Yy2$ 联结变压器	376	C.3	传输矩阵 T 和 T_e	413
B.8.3	$Yy4$ 联结变压器	377	习题解答		415
B.8.4	$Yy6$ 联结变压器	378	第 2 章 习题解答		415
B.8.5	$Yy8$ 联结变压器	379			
B.8.6	$Yy10$ 联结变压器	381			
B.9	$\Delta-\Delta$ 联结变压器	382			
B.9.1	$Dd0$ 联结变压器	382			

第3章 习题解答	420	第8章 习题解答	451
第4章 习题解答	433	第9章 习题解答	458
第5章 习题解答	439	第10章 习题解答	467
第7章 习题解答	444		

第 1 章 引 言

谐波存在于电力系统已经很多年了，但是，近年来这个问题因为同时出现的两种趋势而变得更加重要。这两种趋势为：电力公司为改善功率因数而大量增加使用电容器组；工业界为提高系统的可靠性和效率而广泛使用电力电子变流器。

电力公司对运行于高功率因数状态一直非常关注，因为高功率因数运行可以降低设备所需的额定值以及线路损耗和电压降落，从而减少对电压调节设备的需求。然而，电力公司的上述要求是与工业界大量增加使用变速传动和电力电子设备相并行的。变速传动和电力电子设备是某些不希望出现的现象的根源，这些设备与功率因数校正电容器组相互作用导致了电压和电流的放大效应。

半导体电子工业近年来的迅猛发展导致了一批精密设备的诞生，与过去粗笨的设备相比，这些精密设备对电力公司供给的电能质量更加敏感，但同时这些设备又导致交流电流和电压稳态波形的畸变。

传统的供电系统被设计成按正弦波形运行。目前，电力公司正努力为用户提供可靠而清洁的基波频率正弦电能，这种电能不会对用户的设备造成损害。

上述三种相互冲突的局面决定了电能质量问题备受关注，人们必须严肃对待电流和电压的畸变问题，而电流和电压畸变的主要形式是谐波畸变。

以下例子是从 Dranetz 公司电能质量分析的现场手册中摘取的，这些例子原先被诊断为过负荷、过电压或其他不正常情况，但后来表明这些现象是谐波畸变的症状：

(1) 用于医疗诊所的灵敏仪器经历了计算机死机和元件故障。监视器确认上述问题是由功率因数校正电容器组投切所产生的扰动引起的。

(2) 在一个新建的大楼中电梯不能可靠地工作。分析显示问题是由电动机控制器中的一个电路对谐波畸变敏感而引起的。

(3) 一个办公大楼经历了配电设备的重复故障（配电变压器、断路器和电连接器）。尽管负荷是平衡的，但测量到的中性线电流与相电流几乎相等，这使得问题是由谐波电流引起变得非常明显。谐波电流来源于众多的开关电源，开关电源是现代大多数办公电子设备如个人计算机和复印机中采用的电源。

谐波是畸变周期波形的分量，它们的频率是基波频率的整数倍。

谐波研究是用来检查非线性装置的影响和分析特定的谐波情况的，研究的目的是找出谐振点和计算畸变因数。阻抗扫描也称为频率扫描，得到的是待研母线输入端阻抗的模值与谐波次数或谐波频率之间关系的一张图，这张图对于找出谐

振点是十分有用的。阻抗值的突然降低意味着串联谐振,而阻抗值的突然上升标志着并联谐振。谐波潮流计算得出的是线路电流和母线电压的基波值和谐波值。谐波问题不同解决方法的结果最终可以通过对各种滤波方案的仿真来得到检验。在简单系统中,谐波问题可以通过一个电子表格来分析。商业化的谐波分析程序可以用来进一步分析大型电力系统,并允许对产生谐波的各类装置进行详细的模拟。有志于实现工业对象谐波分析的工程师需要如下的信息:

- (1) 待研母线上的电网短路容量和 X/R 之比。
- (2) 配电变压器的额定容量 (MVA) 值、 X/R 比值和短路阻抗百分值。
- (3) 既存的功率因数校正电容器组的电压和额定容量 (MVA) 值。
- (4) 谐波源电流的测量值。

这样系统中不同元件和不同地点的谐波阻抗都可以被计算出来,然后就可以计算母线谐波电压、线路谐波电流和畸变因数。如果结果超出标准规定的限制值,出现问题则是在意料之中的。

因此在进行谐波计算时,系统元件被准确模拟,以保证获得精确的谐波畸变结果就变得非常重要。

本书讨论了电力系统中的谐波问题,在可能情况下都给出了定量的分析,相关的方程都作了推导。

第2章阐述了某些基本原理,以帮助大家理解谐波问题。内容包括傅里叶级数、谐波的特性、与度量谐波畸变相关的方程式、用以供给无功功率和功率因数校正的电容器组、谐振问题以及变压器的谐波问题。

一般来说,谐波是由非线性设备引起的,例如变压器、旋转电机、电弧炉、荧光灯、电子控制器和晶闸管控制设备等。第3章阐述了电力系统谐波的起源。

谐波对电力系统的影响可以被归结为损耗增加、设备过热及寿命损失、对继电保护、控制和通信电路的干扰以及对用户负荷的干扰。第4章试图总结并量化谐波畸变对电力系统设备和负荷的影响,重点考察了谐波畸变对如下设备的影响:电容器组、变压器、旋转电机、继电保护装置、通信装置和电子装置。

避免和克服谐波问题的方法很多,在此只举几例,例如相位抵消、使用滤波器、使电路失谐等。已经制定并正在进一步制定相关标准,以使谐波保持在一个低的无危害的水平上。第5章阐述降低和抑制电力系统谐波的方法。讨论了谐波问题的解决办法,即能使电容器组、电力变流器、变压器和旋转电机承受谐波的措施。对串联调谐滤波器和2阶阻尼型滤波器的设计也作了进一步的讨论。

第6章给出了由IEEE、IEC、EN和NORSOK标准规定的电压和电流谐波畸变限制值。

第7章讨论了电力系统不同元件的模拟问题,例如高压电网、发电机、并联和串联电容器组、感应电动机和负荷等,以确保得到精确和可靠的谐波畸变

结果。

对双绕组、三绕组和四绕组变压器的模拟在第8章中介绍。第9章讨论了输电线路和电缆的模拟问题。

谐波研究的主要目的是计算母线谐波电压、支路谐波电流、电压和电流的总谐波畸变率 (THD)，以及找出谐振的条件。第10章介绍了一种实现谐波计算的简单方法，并提供了背景材料，分析了实例系统，还进一步给出了实际使用中应考虑的因素。

附录A对相关问题作了一个简短回顾，即变换矩阵 $\mathbf{A}$ 和对称分量。附录B给出了由 Y_d 、 D_y 、 D_d 和 Y_y 联结变压器导出的所有联结组标号下的相导纳矩阵和序导纳矩阵的详细推导。附录C推导了三相变压器的传输矩阵。

为了将讨论的问题解释清楚，各章中对许多实际算例进行了分析，并给出了结果和对结果的评论。另外，本书各章总共包含了大约80个习题。解题指导书可以从出版商处获得。

本书对电力系统谐波进行了定量的分析和入门性的讨论，并给读者展示了某些谐波问题的真实场景，从而能够帮助读者更好地理解本书的主题。本书适用于从事实际工作的工程师、大学本科生和研究生，也可以作为电力系统谐波的自学教材。

第 2 章 谐波的基本原理

2.1 引言

本章将给出谐波的定量分析，包括谐波的基本原理和一些预备知识，如傅里叶级数、谐波的特性、度量谐波畸变的相关方程、使用电容器组来提供无功功率和功率因数校正的原理、谐振的解释等。

人们偏爱正弦波形是因为正弦波形不包含谐波，从而能够减少铁损^[2]并提高效率。更进一步，电机、变压器和电气设备设计时都假定了供电电源是正弦的，从而简化了设计计算。然而，正弦波形只是某种理想状态，实际上是不可能实现的。一个畸变的波形是由不同频率的正弦波形组成的，即一个基本频率下的基波波形加上一系列频率为基本频率整数倍的谐波分量。

以下各节将叙述一些基础知识，这些知识能引导读者更好地理解谐波问题。

2.2 谐波波形举例

图 2-1 和图 2-2 中画出了一些波形的示例。这些图可以通过 gnuplot[⊖]很容易地画出。

- (1) 保存以下命令到一个文本文件中，例如 ‘hrm.gnu’。
 - (2) 运行 gnuplot。使用 “Open or File|Open” 找到文件 ‘hrm.gnu’ 并打开它。
 - (3) 在光标处，可以看到 gnuplot>Load ‘hrm.gnu’ 和该画图程序打开的图形窗口。
 - (4) 为了将图形放到文档中，右击图形窗口并选择 ‘Copy to Clipboard’。
- 用 “Paste” 或 “Ctrl-V” 粘贴图形到希望的位置。

```
set grid
set angles degrees
```

⊖ gnuplot 是一个命令驱动的交互式函数和数据画图程序——版权 Copyright (C), 1986~1993, 1998、1999, Thomas Williams、Colin Kelley 和其他一些人。它可以从 <ftp://ftp.gnuplot.org/pub/gnuplot/> 上免费下载。

```

set title "sin (wt) + 1/5 sin (5wt) + 1/7 sin (7wt)"
set xlabel "wt,°"
set ylabel "Magnitude"
set xtics 45
f (wt) = sin (wt) + 1/5. * sin (5 * wt) + 1/7. * sin (7 * wt)
plot [wt=0:360] f (wt) notitle

```

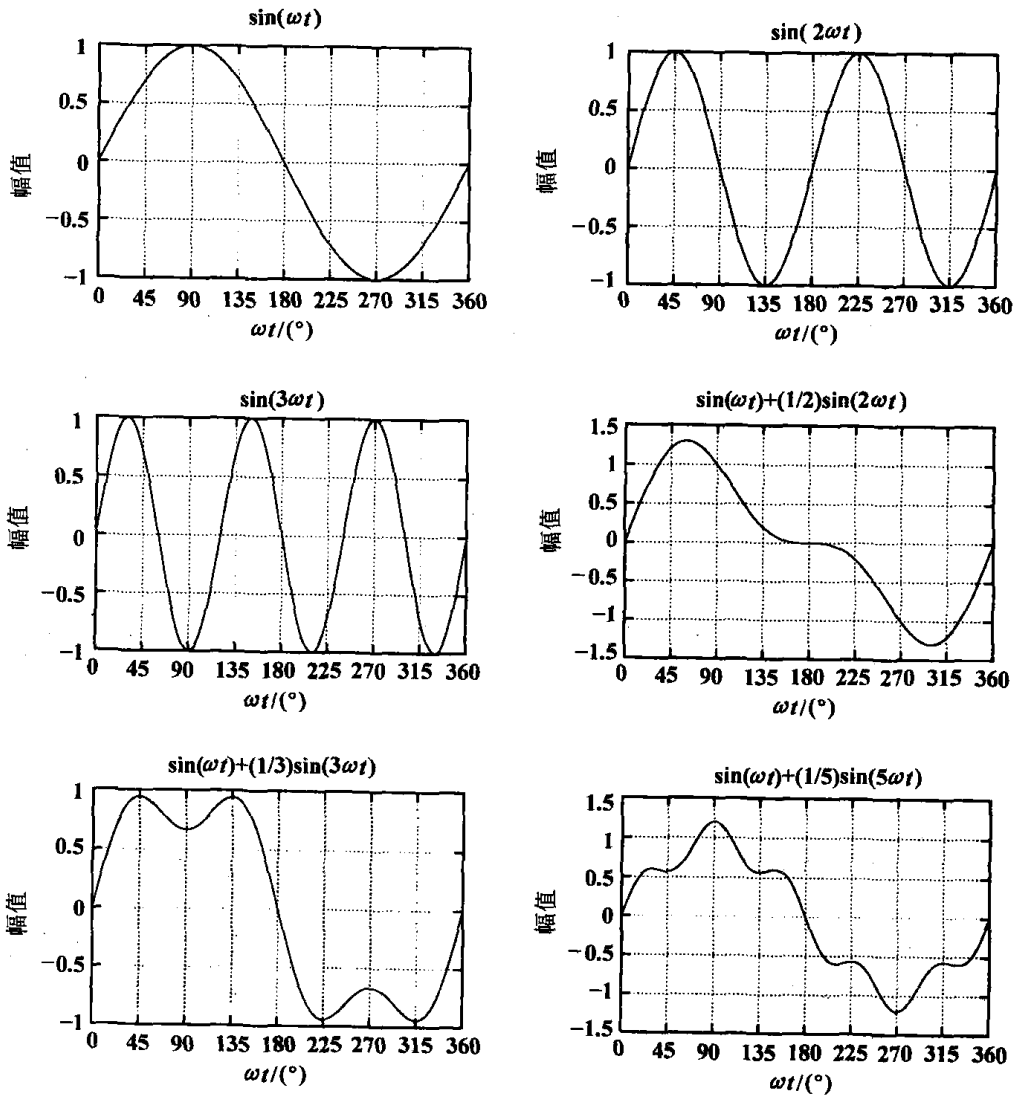


图 2-1 一些典型的谐波波形

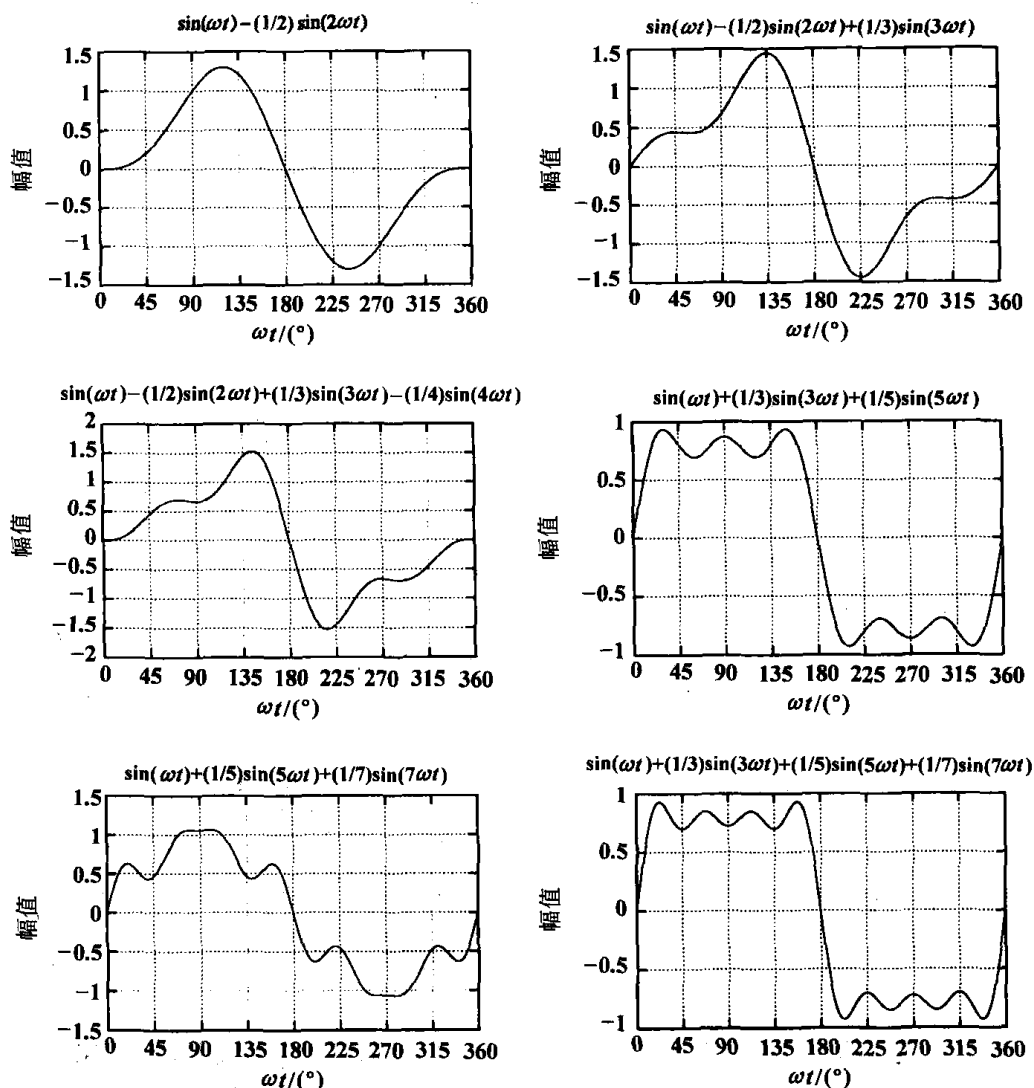


图 2-2 一些典型的谐波波形

2.3 谐波表示法

傅里叶级数是一种研究和分析谐波畸变的有效方法。通过傅里叶分解能够对畸变波形的各种分量进行检查。

一般来说,任何周期波形都可以被展开为傅里叶级数,即

$$f(t) = A_0 + \sum_{h=1}^{\infty} [A_h \cos(h\omega_0 t) + B_h \sin(h\omega_0 t)] \quad (2-1a)$$

$$= A_0 + \sum_{h=1}^{\infty} C_h \sin(h\omega_0 t + \phi_h) \quad (2-1b)$$