

电源工程师研发笔记

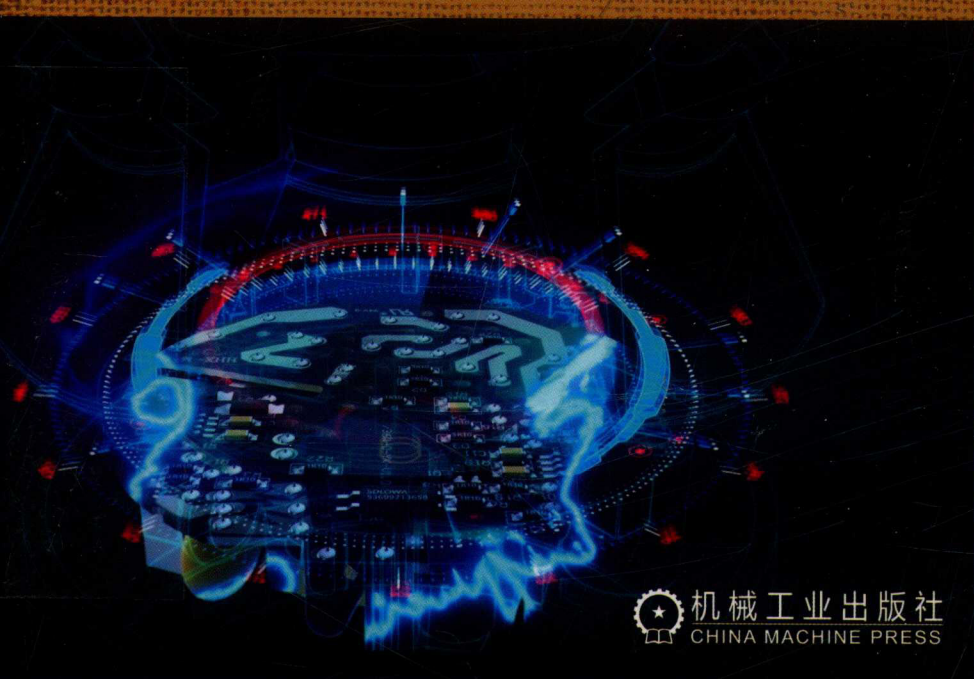
开关电源工程化 设计与实战

从样机到量产

文天祥 符致华 编著



彩色印刷
4 - color printing



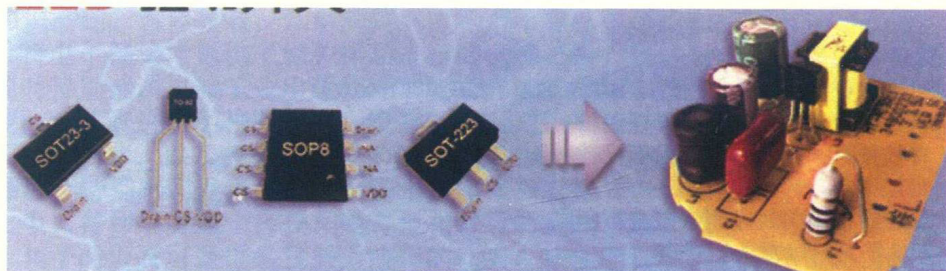
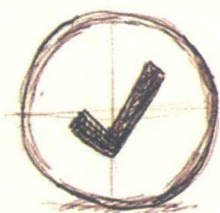
机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

电源工程师研发笔记

开关电源工程化设计与实战

——从样机到量产

文天祥 符致华 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书针对中小功率范围的开关电源,对最为热门的LED驱动电源、适配器电源中主流拓扑进行了分析及实际设计,逐步给出了完整的工程化产品研发过程。并从项目管理角度对电源类产品研发生产的整个产品生命周期给出了一般性指导方法,以期给读者提供满足实际设计调试的经验补充。作为一本实践为导向的书籍,本书作者对当前电源的能效标准、安全标准、性能要求做了深刻解读,给读者提供了开关电源产品全流程的设计指导,同时给出了电源设计过程中的一些小技巧。

本书适合刚进入电源设计行业,以及长期工作在电源设计行业的一线工程技术人员使用参考。同样也适合各大院校电力电子、电子信息工程、自动化等专业的师生作为指导教材或是实验课程教材。

图书在版编目(CIP)数据

开关电源工程化设计与实战:从样机到量产/文天祥,符致华编著.
—北京:机械工业出版社,2019.6

(电源工程师研发笔记)

ISBN 978-7-111-62263-5

I. ①开… II. ①文… ②符… III. ①开关电源—设计
IV. ①TN86

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第049536号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:江婧婧 责任编辑:江婧婧

责任校对:肖琳 封面设计:鞠杨

责任印制:孙炜

保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

2019年5月第1版第1次印刷

169mm×239mm·22.75印张·477千字

标准书号:ISBN 978-7-111-62263-5

定价:135.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
电话服务 网络服务

服务咨询热线:010-88361066 机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294 机工官博:weibo.com/cmp1952

金书网:www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版 教育服务网:www.cmpedu.com

序

P R E F A C E

当今消费性电子产品更新换代越来越快，对供电电源的要求也越来越高，特别是高效、节能、高频、小体积化已成为各电源生产厂商追求的目标。国内从事电源研发设计的工程技术人员基数众多，纵观市面上的关于开关电源设计的书籍，公式繁多且侧重于理论，一定程度上脱离了现行工程技术，让初入门的电源研发人员感到十分困惑，而国外的经典书籍，全英语的内容，阻挡了一部分工程师的学习之路，因为翻译版本难免理解起来会容易产生偏差，对于工程师的指导意义有限。所以，本书的写作是基于作者十多年的一线电源研发设计经验，亲手实测数据及波形，总结实际量产产品中出现过的问题，并提炼出工程化技巧。目的是希望通过本书，能设计出符合安规认证，可靠性高，适合批量生产的电源。毫不夸张地说，这是当今市面上少有的关于开关电源工程化设计的书籍。本书针对中小功率范围，对开关电源领域最为热门的LED驱动电源和适配器电源中主流拓扑进行了分析及实际设计，并给出了完整的工程化产品研发过程。最后本书将一些电源设计中的小技巧单独列出进行总结分析，并从项目管理角度对电源类产品研发生产的整个产品生命周期给出了一般性指导方法，以期给读者提供满足实际设计调试的经验补充。

历史总站在巨人的肩膀上前行，本书的写作也一样，在写作的过程中笔者通过翻阅海量行业技术资料，以及大量全球主流电源相关标准条款文档，对当前电源的能效标准、安全标准、性能要求做了深刻解读。通过对全球优秀的技术资料进行引证和解析，同时融入笔者多年实践经验的理解，希望给广大读者提供有价值的参考。由于篇幅所限，本书无法列出所有参考文献，如有需求，请联系笔者。书中全部电路原理图使用软件 Altium Designer 绘制，仿真使用的软件为 LTspice。

知识浩瀚，苦修数载，几易其稿终成本书。本书成稿过程得到多方的支持，好友东莞贝特电子杨培增提供了相关样品进行测试和分析，台达电子徐朋提供部分测试结果，同时特别感谢机械工业出版社电工电子分社的编辑江婧婧，是她统筹协调整个出版进度，并认真进行了校对编排，没有她的帮助，难以完成此书的出版工作。同时对电源领域的前辈，以及各大厂家技术资料的开源奉献一并致谢。

最后，特别感谢爱妻王牡丹女士十多年来的支持、包容和帮助，写作期间适逢小儿的出生，各种辛劳难于言表，没有她在背后的默默奉献，撰写此书梦想只能束之高阁，儿子的天真可爱也是我努力前行的动力，从他咿呀学语到蹒跚走路再到如今的健步如飞，他的每一步成长既让我感到生命的奇妙，也让我更迫切地希望自己努力学习成为一个越来越好的父亲，希望他将来能看到这本书，并为父亲感到骄傲！

本书适合刚进入电源设计行业，以及长期工作在电源设计行业的一线工程技术人员使用参考。同样也适合各大院校电力电子、电子信息工程、自动化等专业的师生作为指导教材或是实验课程教材。因笔者水平有限，所接触的也仅是电源知识的极小一部分，我们努力为读者提供完整、严谨、易懂的知识体系，但无法避免存在瑕疵，请读者不吝给出意见和建议，邮箱地址 eric.wen.tx@gmail.com，谢谢！

作者简介

About author

文天祥，中国电源学会照明电源专业委员会委员，中国电源学会青年工作委员会委员，IEEE 会员。电力电子专业研究生毕业后，十年来一直从事电力电子研发设计工作，历任研发工程师、资深工程师、研发经理、平台架构师等，期间主导研发了多款行业及至全球领先的产品，销售数量累计达千万级，为所在公司带来了巨大的经济效益。在技术积淀上，在开关电源拓扑、半导体元器件应用、LED 照明电子及系统应用、消费性电子产品可靠性设计等方面有丰富的经验和独到的见解，并在电源设计及应用领域获得多项国际专利。熟悉电子产品项目管理，以及消费性电子产品完整生命流程管控。作为电源学会委员，积极参与行业标准的制定和起草，并多次负责联系国际知名电源专家来中国举办电源类培训事宜，翻译出版电源相关书籍多部，代表性著作如下：

1. 译著 (唯一译者)：Robert A.Mammano 写作的《Fundamentals of Power Supply Design》，中文版书名：《电源设计基础》，2018 年 10 月出版，辽宁科学技术出版社。

2. 译著 (唯一译者)：Sanjaya Maniktala 写作的《Intuitive Analog to Digital Control Loops in Switchers》，中文版书名：《开关变换器环路设计指南——从模拟到数字控制》，2017 年 5 月出版，机械工业出版社。

3. 译著 (唯一译者)：Morgan Jones 写作的《Building Valve Amplifier》(2nd edition)，中文版书名：《电子管放大器搭建手册》(第 2 版) 2016 年 9 月出版，人民邮电出版社。

符致华，IEEE 会员，电子专业本科毕业八年来一直从事开关电源研发设计工作，在开关电源拓扑、半导体元器件应用及消费性电子产品可靠性设计等方面有丰富的经验和独到的见解。主要研发各类开关电源和 LED 照明电子及应用，曾任高级研发工程师、研发经理等职位，负责产品从研发端到量产的整个流程，包括准确的元器件选型、系统失效异常分析和 EMC 的评估，为公司节省的研发成本达几千万元。曾就职于松下电子、欧普照明研发中心等公司。



目 录

序
作者简介

第 1 章 单级功率因数校正 (PFC) 电路工程化设计 1

1.1 功率因数 (PF) 的历史渊源	1
1.1.1 有功功率、无功功率及其他概念	5
1.1.2 相移因数和 THD 的各自影响	7
1.2 现行标准 IEC 61000—3—2 及其他	10
1.3 PF 与 THD	12
1.4 信息技术类和 LED 照明产品现行标准关于 PF 的要求	14
1.5 产品真的需要这么严格的 PF 要求吗	18
1.6 PF 与 THD 优化的工程化方法	20
1.6.1 填谷式 PFC 电路	21
1.6.2 电荷泵 PFC 电路	23
1.6.3 电荷泵填谷 PFC 电路	25
1.6.4 升压有源功率因数校正 (APFC) 电路	25
1.6.5 单级反激式 APFC 电路和双级 APFC 电路	27
1.7 单级 PFC LED 驱动电源工程研发实例	30
1.7.1 LED 驱动电源一般性能指标要求	30
1.7.2 元器件工程化设计指南	30
1.7.3 Mathcad 理论计算	65
1.7.4 实物验证分析	68
1.8 频闪以及去纹波方案	87
1.8.1 频闪的背景	87
1.8.2 晶体管消除纹波方案	90
1.8.3 MOSFET 消除纹波方案	93
1.8.4 ASIC 方案	93
1.9 主流芯片概览	94

1.10	参考文献	96
------	------	----

第2章 PFC和反激准谐振(QR)组合电源的工程化设计 97

2.1	准谐振的起源	97
2.1.1	永恒的话题——能效	97
2.1.2	现行主流能效标准一览	98
2.1.3	如何提升效率并满足能效等级要求	104
2.2	QR的工作原理深入解析	111
2.2.1	波形振荡的定性和定量分析	111
2.2.2	定性以及定量分析两个振荡的频率	113
2.3	QR的工作原理和实现方式	113
2.3.1	谷底的意义	113
2.3.2	第一个谷底	115
2.3.3	QR操作的优点和缺点	120
2.3.4	QR具体转换过程中的4个时序区间	125
2.3.5	多个谷底,从满载到轻载时频率控制方式—不同芯片的设计方式	131
2.3.6	RCC与QR的关系	134
2.4	QR反激变换器中变压器的工程化设计实例	135
2.4.1	一次绕组和二次绕组的匝比	135
2.4.2	反射电压的选择	137
2.4.3	一次电流峰值计算	138
2.4.4	一次侧电感量计算	139
2.4.5	一次、二次电流有效值计算	139
2.5	Boost APFC+QR反激变换器拓扑的研发工程实例	140
2.5.1	本项目主要指标	142
2.5.2	器件参数计算和选型	142
2.5.3	Mathcad理论计算	148
2.5.4	电压环和电流环分析	152
2.5.5	实测波形	156
2.6	主流芯片概览	176
2.7	其他双级式电源	177
2.8	参考文献	178

第3章 LLC谐振变换器工程化设计 179

3.1	LLC的起源	179
-----	--------	-----

3.1.1	LLC 的起源和重新得到重视	179
3.1.2	零电压开关 (ZVS) 和零电流开关 (ZCS)	179
3.1.3	基本谐振拓扑比较	181
3.2	LLC 现有的分析方法及不足	194
3.2.1	两个谐振频率的由来	194
3.2.2	通俗易懂介绍 FHA	195
3.2.3	现存各种各样的 LLC 设计参考资料	197
3.2.4	FHA 的缺陷和误差	200
3.3	工作状态的变化	202
3.3.1	不同情况下的增益	202
3.3.2	ZVS 实现的条件	205
3.3.3	上谐振或下谐振的选择	206
3.4	LLC 简化设计步骤	207
3.5	LLC 的仿真定性分析	207
3.6	实物验证	217
3.6.1	器件选型	219
3.6.2	样机实测波形	227
3.7	主流芯片概览	239
3.8	参考文献	241

第 4 章 电磁兼容 (EMC) 工程化设计..... 243

4.1	基本概念	243
4.2	其他容易混淆的概念	246
4.2.1	IEC、CISPR、FCC、EN 之间的关系	246
4.2.2	CE 与 EMC	248
4.2.3	FCC 与 EMC	249
4.2.4	UL	249
4.2.5	CCC、CQC 与 EMC	249
4.3	EMI (传导和辐射) 最新限值	251
4.3.1	A 类和 B 类	251
4.3.2	EN55032、EN55035 和 RED	252
4.3.3	FCC Part15 和 Part18	256
4.4	EMI (CE+RE) 测试过程中遇到的问题	257
4.4.1	测试场地、机构资质、人员的素质	257
4.4.2	6dB 裕量的故事	258
4.4.3	EMI 测试过程的小技巧	260

4.4.4	无线法和 CDN 法的对比	260
4.5	工程设计中 EMC 的考虑	263
4.5.1	EMC 与产品成本的关联度	263
4.5.2	EMI 考虑总的原则	265
4.5.3	地线的干扰以及 PCB 走线的影响	266
4.5.4	变压器的屏蔽与工艺实现	268
4.5.5	MOSFET 驱动电路的影响	269
4.5.6	MOSFET 寄生电容的影响	270
4.5.7	工作频率的选择	270
4.5.8	差模、共模干扰和抑制方法	271
4.5.9	隔离保护环	273
4.5.10	数字电路中的电源和地	273
4.6	具体实例分析	274
4.6.1	器件及参数的影响	274
4.6.2	系统接地与否的影响	280
4.6.3	变压器外屏蔽的影响	283
4.6.4	EMI 测试 L、N 线差异	285
4.6.5	神奇的磁环	285
4.6.6	调光及功率变化的影响	288
4.6.7	一个完整的 LED 球泡灯 EMI 传导整改过程	290
4.7	本章小结	298
4.8	参考文献	298

第 5 章 电源设计小技巧 and 工程化经验方法 300

5.1	启动时间和效率以及 V_{CC} 供电技术	300
5.1.1	待机功耗的降低	300
5.1.2	快速启动设计	302
5.1.3	电荷泵辅助电源供电技术	303
5.2	保护相关技巧	309
5.2.1	LED 电源中的抗浪涌设计	309
5.2.2	电源软启动和抗饱和设计	311
5.3	电源性能相关技巧	311
5.3.1	LED 灯出现关机回闪或开机多次启动	311
5.3.2	电源低温或高温时的设计技巧	312
5.4	非隔离类辅助电源设计指南	312
5.5	其他设计杂谈	315

5.5.1	电解纹波电流测试	315
5.5.2	待机功耗测试具体要求	317
5.5.3	元器件噪声和振动处理	317
5.5.4	反激多路输出计算	321
5.5.5	平面 MOSFET 和超结 MOSFET	323
5.5.6	取代电解电容	326
5.5.7	磁心几何形状的影响	328
5.5.8	电网对电源的影响	329
5.5.9	输入开机浪涌电流的意义	333
5.5.10	电感失效问题	337
5.5.11	测试报告的规范化	338
5.5.12	LED 驱动电源和适配器电源测试项目异同	339
5.5.13	对标准的理解和批判	340
5.5.14	开关电源 PCB 设计实际经验	342
5.5.15	从研发到量产的过程	345
5.5.16	专业英语的重要性	350
5.6	参考文献	351

第 1 章

单级功率因数校正 (PFC) 电路工程化设计

1.1 功率因数 (PF) 的历史渊源

功率因数 (Power Factor, PF) 一词, 是电源工程师最为熟悉的一个名词, 基本上从刚接触电源伊始, 就会接触到 PF 这个名词。与之相对应的是, PF 的概念及意义, 却是让众多工程师疑惑的问题, 不管新手乃至经验丰富的工程师, 在此概念上都或多或少存在过困惑。本节希望正本清源, 理清 PF 这一概念, 同时希望纠正网络上众多资料中错误的概念及表述。

本书的读者至少在如下一些描述中遇到过令他们头痛的问题, 很多情况是在面试中被问到, 它们看起来是那么理所当然, 但实际回答时却无从下手:

问题 1: PF 会大于 1 吗?

问题 2: PF 有负数吗?

问题 3: PF 与电路负载有关系吗?

问题 4: 直流电也存在 PF 的概念吗?

问题 5: PF 是表征电源的特性还是表征输入电网的特性?

问题 6: PF 是政府与产品生产者 / 使用者之间的博弈吗? 即 PF 代表谁的立场? 或者说为什么对 PF 有要求?

问题 7: PF 与电源电路拓扑结构有关系吗?

问题 8: PF 与电源效率有关系吗? PF 高了, 效率会提高吗?

问题 9: PF 和总谐波失真 (Total Harmonic Distortion, THD) 成反比吗? (这一点后面有一小节专门会讨论到)

问题 10: 为什么信息技术类设备在 75W 以上会要求 “PF” (而目前国内照明类产品却一般在 25W 以上要求 “PF” (注意: 此处的 PF 都加了引号)?

问题 11: PF 和 PFC (Power Factor Correction, 功率因数校正) 的混淆 (众多资料混淆了二者的概念)?

面对上述这些表面看似简单的问题, 我们还是一步步从源头出发, 拿起我们曾经忘记过的课本 (不需要很复杂的数学理论分析, 也不需要很高深的电路理论分析, 只需

要最简单的电路学或是电工学即可),有些电源行业从业者并不一定系统地学过电路分析等专业课程,但是这不妨碍我们的理解,在这里我们试图以一种较为简洁的方式来说明 PF 这一参数的意义和价值,为后面电源电路设计提供一定的理论基础。注意,本书不刻意去强调理论的重要性,因为本书的宗旨即是一本工程化研发笔记,如果过多着墨于理论分析,那就有悖于本书出版的目的,因为大量的公式和理论分析会让 80% 以上的工程技术人员望而却步,从而造成的结果是,一本书总是翻在前几页,而永远不会看完。在海量知识包围的今天,工程技术人员受到“快餐式”研发流程的影响,让他们花大量的时间在阅读理论分析上有点不太现实,所以在本书里,我们只讲最关键最必要的公式,也会把公式讲透。

从图 1-1 中可以看到,功率因数包括两个部分,一个称之为相移因数(这里用 $\cos\varphi$ 表示);一个称之为畸变因数。用数学公式表达为

$$\lambda = \cos\varphi \times \frac{1}{\sqrt{1+\text{THD}^2}} \quad (1-1)$$

注意,在抛出所有的问题之前,读者需要知道的是,PF 的符号是希腊字母 λ ,而不是 $\cos\varphi$ 。

诚如之前所述,读者对公式不太敏感,故我们仍以图形化来表示。

假设:对于从发电装置里出来的电压信号,我们默认将其作为基准,其波形是正弦曲线。在这里,我们定义如下:

相移因数 $\cos\varphi$ 被定义:固定在某一参考点下,电压与电流之间的相位差,即电流与电压不同步,这是从时序上去看,从图 1-2 看到可知,它是有正负向之分的。

$$\text{功率因数 (PF)} \lambda = \cos\varphi \times \frac{1}{\sqrt{1+\text{THD}^2}}$$

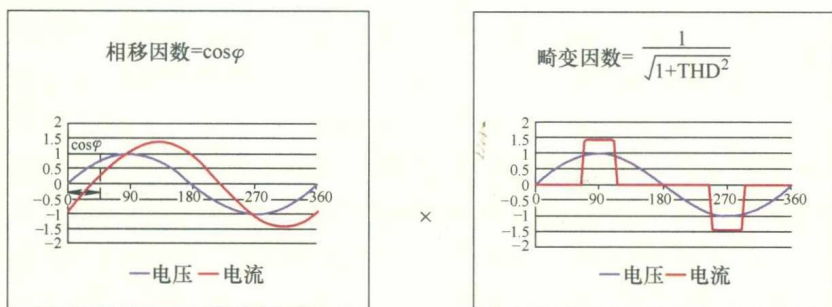


图 1-2 功率因数两个部分的图形化表示

功率因数



图 1-1 功率因数的两个部分

畸变因数被定义为电流与电压的波形形状不同,因为如前面设定,电压为完美的正弦曲线,但电流由于接在电网上的负载不同,导致汲取的电流波形形状与电压波形不同,这是从波形角度来看。

基于式(1-1)我们可以看到,相移因数,其值为 $-1\sim 1$ 。而畸变因数永远 ≤ 1 ,所以我们可以知道PF的数值范围为 $-1\sim 1$,不会超过1,这即回答了问题1。同时我们一般是从电网端去观察,所以PF同时也反映出设备接入电网后,电网受到的影响程度,所以PF是同时反映出电源和电网端的性能。

由于接入电网的负载有各种各样不同的形态,PF会受到负载的不同影响进而不同,一般有如下三种情况:

1. 纯阻性负载,即负载对相移没有影响,对畸变也不构成影响。典型负载如白炽灯泡,加热器等。

2. 纯无功元件(电容或是电感)负载,这只对相移产生影响,同样对畸变不构成影响。典型负载有电机类负载。

3. 非线性负载,是1与2的组合,这样即为我们通常见到的情况,这类负载不仅影响了相移,还导致了畸变的产生。典型负载如各类电子产品,如节能灯、电源类产品等。

仍旧以图形化来表征上述三类情况(见图1-3)。

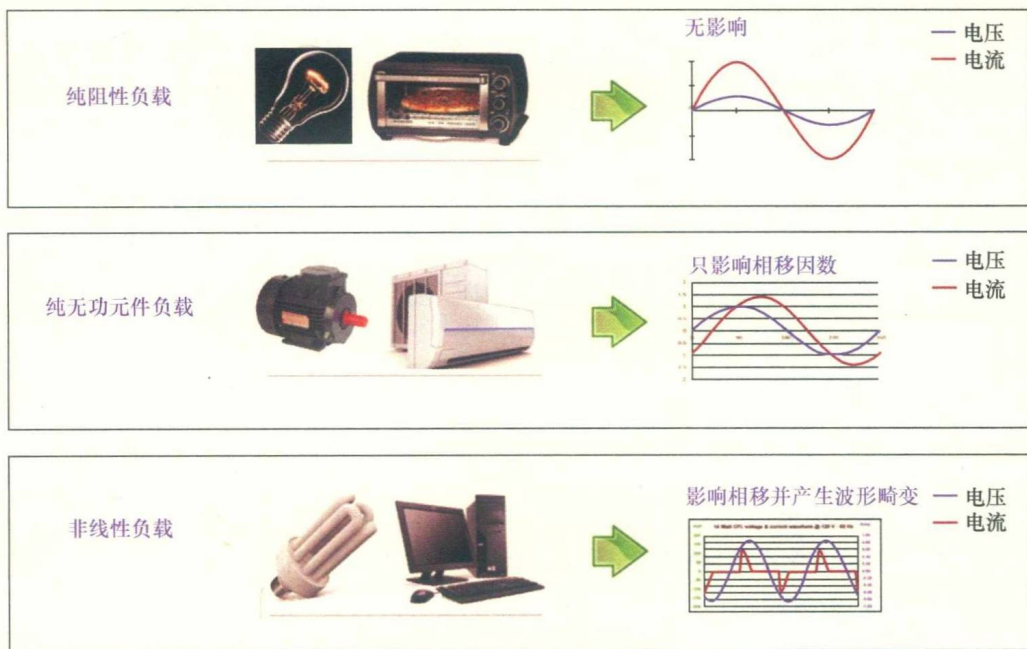


图 1-3 不同负载对 PF 的影响

不同负载下对应的 PF 结果如图 1-4 所示。

$$PF = \cos \varphi \times \frac{1}{\sqrt{1 + THD^2}}$$

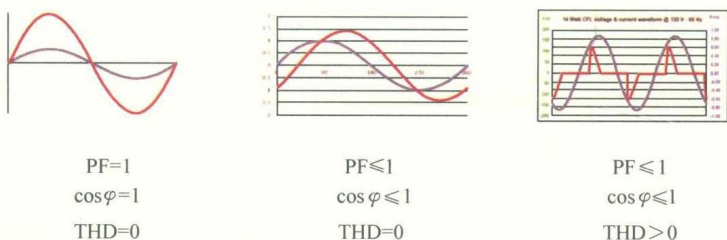


图 1-4 不同负载对 PF 的影响（图形化表示）

当读者看到这里的时候，应该可以回答上面提出的多个问题的其中几个了。

问题 1：PF 会大于 1 吗？

不会大于 1，从数值维度上看，PF 介于 0 到 1 之间，最大为 1，不会超过 1，测量出超过 1 的情况，一般是测试仪器出现了问题或测试方法有误，这里要说明的是，许多低端的 PF 测量仪器，由于受测试准确度和带宽的限制，测出来的 PF 出现超过 1 的情况，这对于输入电流为非标准正弦时，测试结果错误更为明显，所以要尽量选择高带宽（尽量涵盖更多次谐波检测的）仪器来进行 PF（以及 THD）测量。

问题 2：PF 有负数吗？

PF 是可以存在负数的，因为从公式中可以看到，相移这一项，电流如果超前于电压，即为负数，而畸变这一项永远不会为负，这里必须说明下，从本书涉及的产品角度来看，只考虑 PF 的绝对值，即我们常说的 PF 为 0 或正值，处于 0 到 1 之间。

问题 3：PF 与电路负载有关系吗？

有，上述图 1-4 中可以清楚地看到不同的实际应用负载会影响到 PF。

问题 4：直流电也存在 PF 的概念吗？

不存在，因为 PF 定义是在交流供电系统中，而且是以正弦信号作为参考。

再回到更复杂的两个问题：

问题 5：PF 是表征电源的特性还是表征输入电网的特性？

从定义来看，PF 是电源（或是其他负载）与电网共同依赖存在的一个参数，因为参考量即为电网电压，而从电网汲取的电流（不管大小、相位还是形状）却与负载相关。只是我们现在众多场合，以及众多教科书中将其表达简化了，默认电网及其形态是固有存在，而负载总是变化不可预知的，所以 PF 更多时候是用来表征电源（负载）本身。

问题 6：PF 是政府与产品生产者 / 使用者之间的博弈吗？即 PF 代表谁的立场？或者说为什么对 PF 有要求？

这是一个很有意思的问题，当各种标准条例出来后，政府（或者说是供电方）对消费者使用的产品 PF 值提出了要求，后面会详细分析当今全球主流市场 / 国家对 PF 的要求。为什么会这样出现这样的情况，这还仍然需要从 PF 的定义源头上去看。

1.1.1 有功功率、无功功率及其他概念

有功功率：又叫平均功率，因为交流电的瞬时功率不是一个恒定值，功率在一个周期内的平均值称之为有功功率，它是指在电路中电阻部分所消耗的功率，对电动机来说是指它的出力大小，以字母 P 表示，单位为瓦（W）。

无功功率：在具有电感（或电容）的电路中，电感（或电容）在半个周期的时间里把电源的能量变成磁场（或电场）的能量贮存起来，在另外半个周期的时间里又把贮存的磁场（或电场）能量送还给电源。它们的存在，只是与电源进行能量交换，并没有真正消耗能量。我们把与电源交换能量的振幅值叫作无功功率，以字母 Q 表示，单位乏（var）。

视在功率：在具有电阻和电抗的电路内，电压与电流的直接乘积叫作视在功率，以字母 S 表示，单位为伏安（VA）。

而真正用于做功（消耗）的功率我们用有功功率来表示。所以我们经常看到电厂的总装机容量用的是有功功率来表征，也即用来向使用都收费的那部分功率（这里简化概念，仅对民用家庭用电的计费来进行理解），但下面会引出另一个问题：

$$\text{产生的功率} = \frac{\text{消耗的功率}}{\text{功率因数}} \quad (1-2)$$

$$\text{PF} = \frac{P}{S} \quad (1-3)$$

从式（1-2）和式（1-3）可以看到，如果 PF 越低，需要供电方提供的功率就越多，即供电方需要的成本也相应要升高，但是消费者是以进线电表的功率形式（即为有功功率）来支付电费，那问题就来了，低的 PF 导致的无功功率谁来承担。举例说明，一个负载为 400W，由于负载 PF 只有 0.8，那么供电局需要提供的功率为 $400\text{W}/0.8=500\text{VA}$ ，用户只为 400W 的负载交纳电费，而供电方需要提供 500VA 的功率，那多出来的 100VA 谁来承担？这样即出现了供电方，一般也是政府会要求使用者产品 PF 尽量要高，以尽可能地减少无功功率的产生。

外文资料对于功率因数（有功功率、无功功率）有一个类比，将功率三角形（有功功率、无功功率、视在功率）和一杯啤酒进行类比，这个类比极为恰当，如图 1-5 所示。



图 1-5 功率三角形与啤酒的类比图

而对应于不同功率因数下的情况如图 1-6 和图 1-7 所示。



图 1-6 不同功率因数下对应的啤酒类比

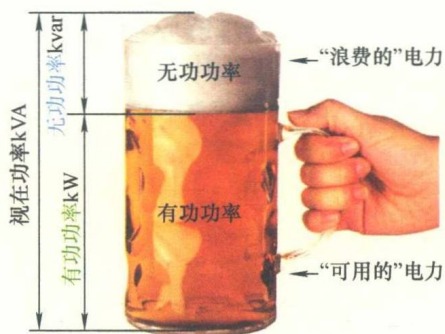


图 1-7 可用 / 浪费的电力与啤酒的类比

“浪费”的电力（无功功率部分）即为这杯啤酒产生的“泡沫”。

当然，电费问题（关系到供电方的设备容量问题）只是这个博弈之中的一部分，如果大量的低 PF 用电负载加在电网上面，其危害还体现在另一个方面，它增加了传输线路的损耗。这里的传输线路，包括从发电机经过输送线缆、配变电站变压器，到终端用户之间的所有线路，线路中消耗的功率见图 1-8。

$$P = V I \lambda$$

\uparrow \uparrow \uparrow \downarrow
 定值 定值 线路中消耗的功率

图 1-8 线路中消耗的功率

因为消耗的功率一定， V 即电网的端口输出电压一定，那么传输线上的电流和功率因数成反比，当 PF 降低的时候，那么线路上的电流增加，这是一个很恐怖的事情，

因为电流的增加,意味着整个传输线路上的线缆、绝缘材料、变压器都需要更大的电流额定,通俗地来说,即传输线路会因为功率因数的降低而要升级,那么同样增加了成本,而更为严重的是传输配电线路中的损耗,其关系见图 1-9。

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{loss}} &= V_{\text{loss}} I \\ V_{\text{loss}} &= I R_{\text{loss}} \end{aligned} \right\} \Rightarrow P_{\text{loss}} = I^2 R_{\text{loss}}$$

图 1-9 传输配电线路中损耗关系

在这里, P_{loss} 是指线路中的损耗; R_{loss} 为整个路径上的阻抗; I 为线路中的电流; V_{loss} 即为压降。

线缆和导线中总是存在电阻,这样在传输中的损耗如图 1-9 所示,可以看到,损耗与线路电流的二次方成正比,所以提高 PF,可以减少线路中的电流,也可以减少输电线路中的损耗。

在这里我们可以得到关于问题 2 的答案了:

- 低的 PF 用电设备,对供电系统及输电系统存在不利影响。
- PF 与消耗的实际有功功率无关,对终端用电用户不存在影响,因为终端用户只对有功功率付费,即产品消耗的实际功率。

再回到定义:

$$\text{PF} = \cos \varphi \times \frac{1}{\sqrt{1 + \text{THD}^2}} \quad (1-4)$$

那么不利影响产生的原因是因为相移因数还是因为畸变因数,抑或是二者的综合影响呢?

1.1.2 相移因数和 THD 的各自影响

如图 1-10 所示,发电厂产生的高压,经过电力传输变压器,最终供给终端用户使用,其电压范围一般为 220~380V (中国地区)。

注意这里,用电设备产生的谐波 THD 及相移因数 $\cos \varphi$ 会呈现在 220~380V 的电网中,但是谐波却不能通过电力隔离传输变压器,返回到发电厂,而相移因数却可以。如果是从终端用户来看,二者对消费者都没有影响,即消费者感受不到一个设备的 PF 是高还是低的区别。

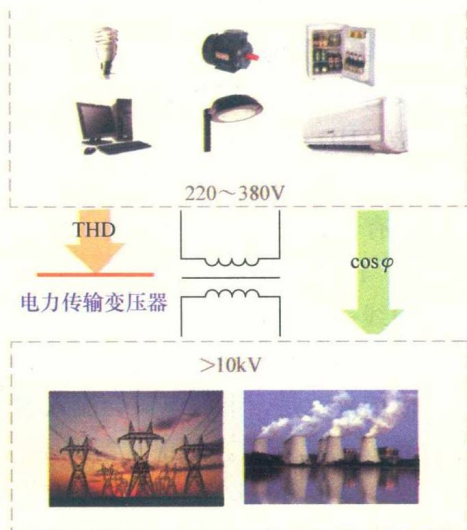


图 1-10 配电传送路径中谐波和波形相移的传输