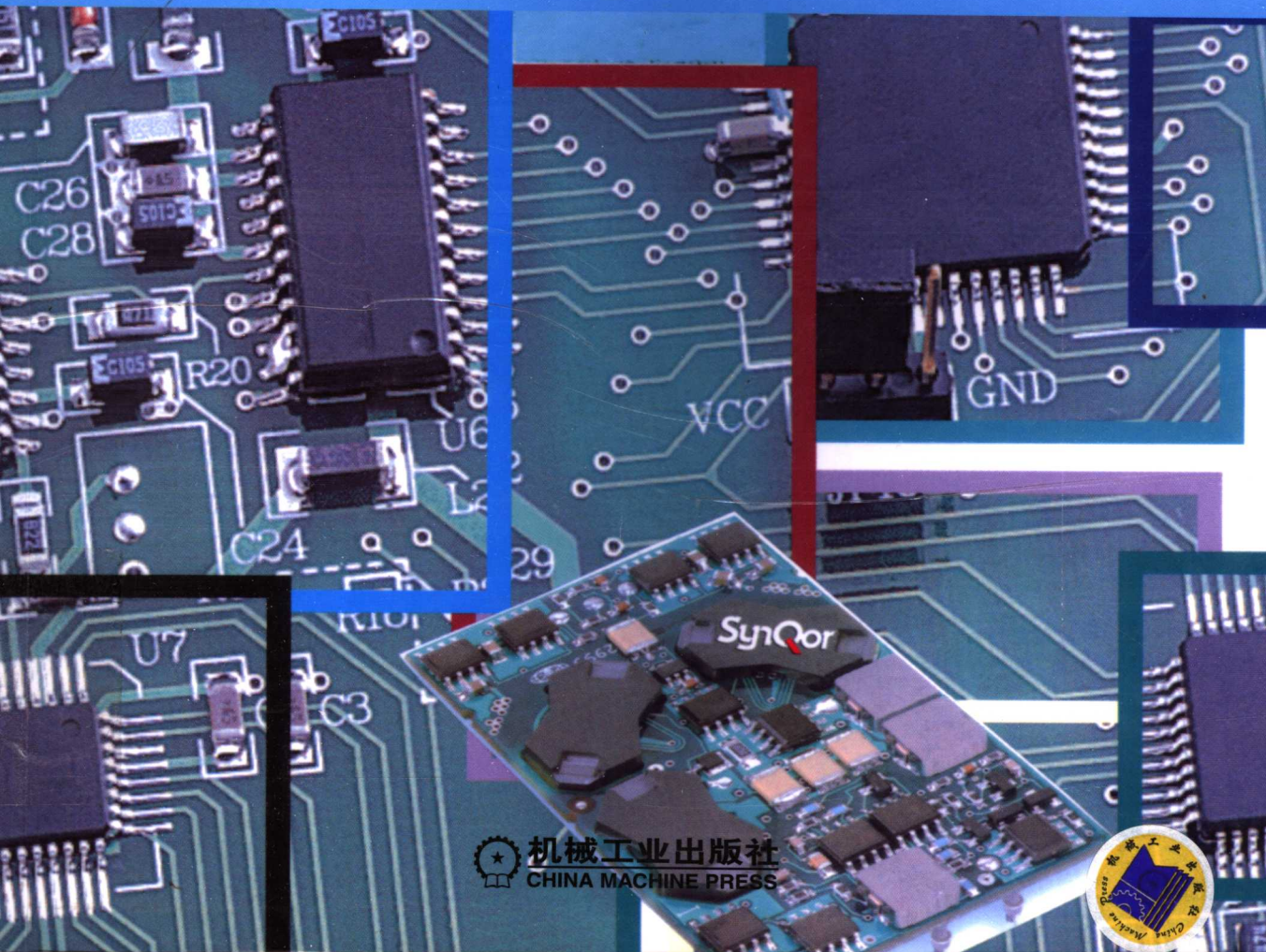


# 高频开关电源 实用新技术

刘胜利 编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



# 高频开关电源实用新技术

刘胜利 编著



机械工业出版社

本书给出了近几年高频开关电源实用新技术的三项重要内容：一是功率因数校正与脉宽调制二合一的 PFC/PWM 控制器新品实用电路分析；二是大幅提高电源整机效率的副边同步整流控制器 IC 新产品特性与应用；三是实体解剖 3500W、6000W 高档开关电源，全面测量直流输出 48V/70A 和 350V/10A 两种电源通电加载不同负载下的实测数据与波形等。

本书保留了《现代高频开关电源实用技术》(2001 年)中实验过程的大部分内容：实体制作 20W、40W 反激开关电源，制作 200~500W 正激双管、半桥式开关电源，制作 1000~2000W 等全桥软开关电源的所有试验数据、实测波形、主变压器绕制方法，以及监测原边电流来选择直流输出滤波电感器的最佳范围等。

本书可为研制高频开关电源的众多工程技术人员提供较新的实用电路分析，也可作大专院校高年级电力电子专业师生实验技能参考书，并对广大电源用户(包括能源、通信、电力、邮电、金融、交通、家电、航天、军工等行业)维修人员有阅读价值。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

高频开关电源实用新技术/刘胜利编著. —北京: 机械工业出版社, 2005.9

ISBN 7-111-17172-1

I. 高… II. 刘… III. 高频-开关电源 IV. TN86

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 091664 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 牛新国 版式设计: 冉晓华

责任印制: 洪汉军 责任校对: 吴美英 魏俊云

北京京丰印刷厂印刷

2006 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·33.75 印张·2 插页·838 千字

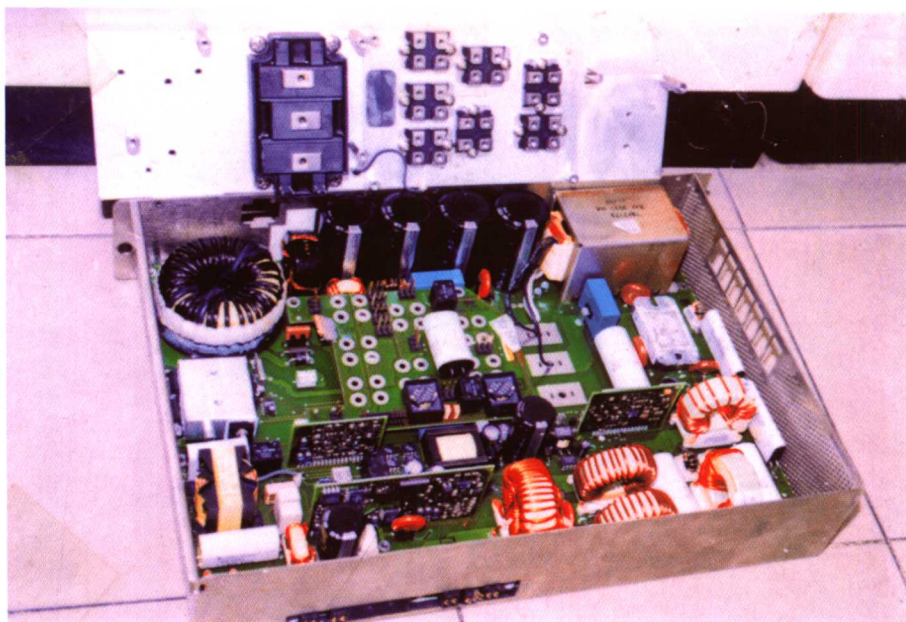
0 001—5 000 册

定价: 68.00 元

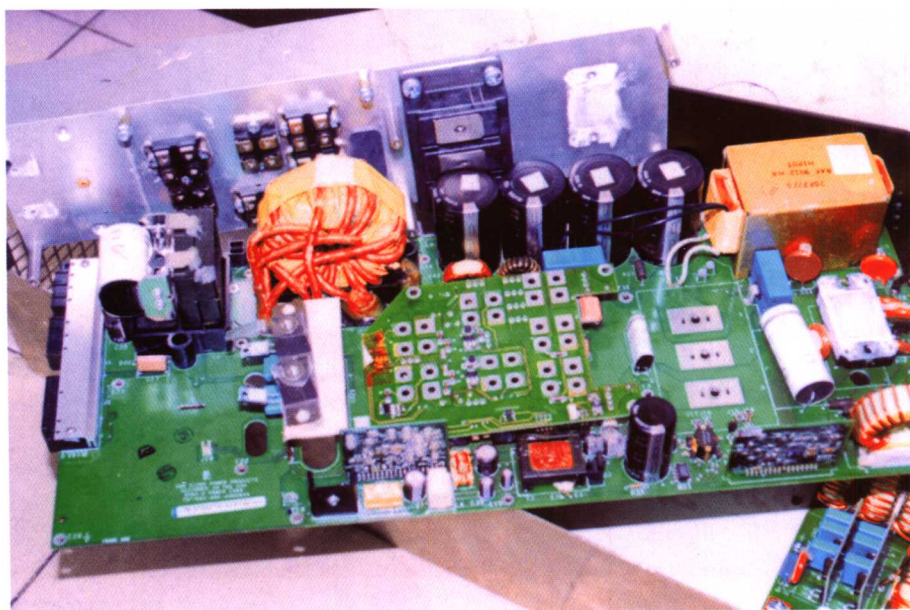
凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68326294

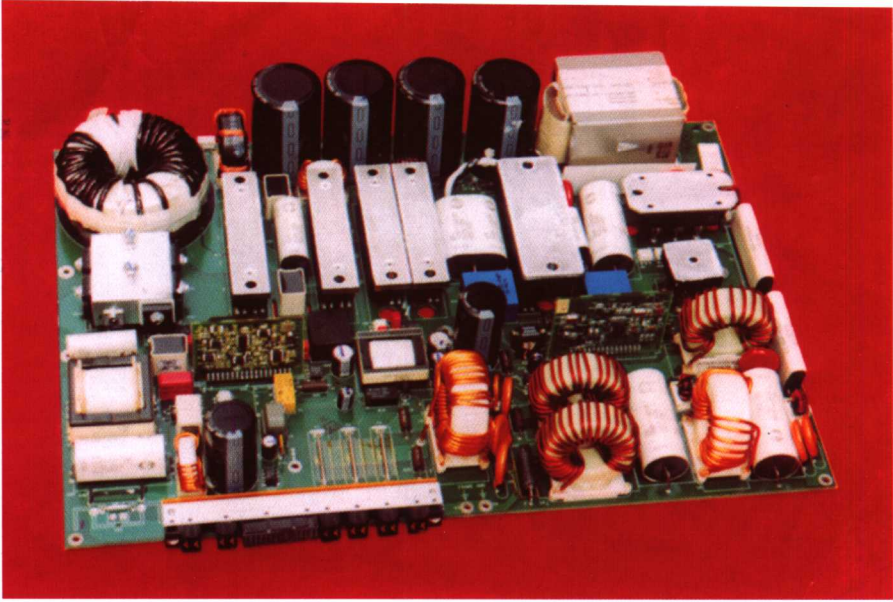
封面防伪标均为盗版



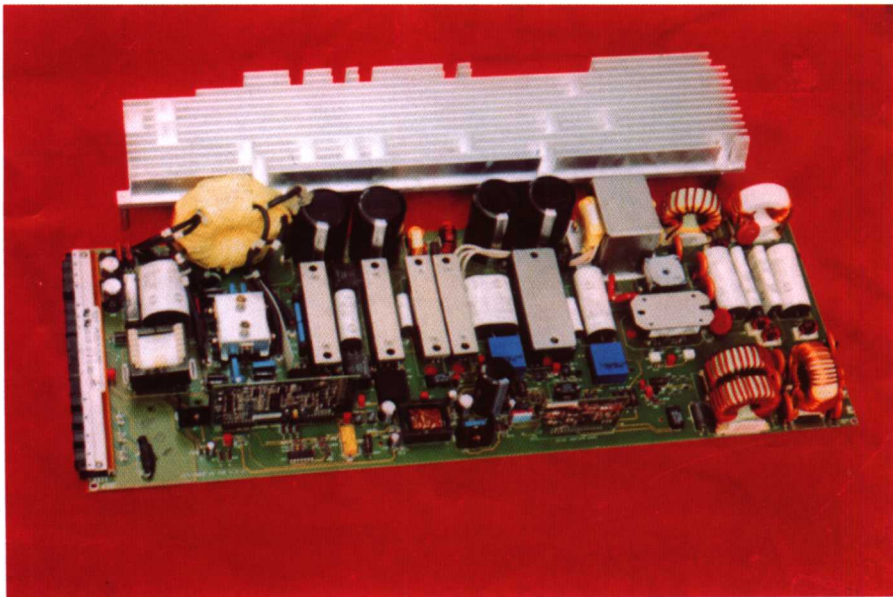
6000W 高档开关电源  
直流输出350V、17A(Ascom)  
(长40cm×宽30cm×高8cm)重约10kg



6000W 通信电源  
直流输出48V、112A(Ascom)  
(长70cm×宽22cm×高12cm)重约19kg



3500W 高档开关电源  
直流输出350V、10A(IBM)  
(长 40cm×宽 30cm×高 8cm)重约 9kg



3500W 通信电源  
直流输出 48V、70A(IBM)  
(长 70cm×宽 22cm×高 12cm)重约 14kg

# 前 言

2001年9月我编著的100万字的《现代高频开关电源实用技术》一书首印6000册，至今多次印刷超25000册。近两年我收到十几个省市百位电源技术人员的电话咨询。特别是在2003年11月上海召开的中国电源学会第15届学术年会，邀请我参加了全国电源技术爱好者网友联谊座谈会，得到两个令人鼓舞的消息：一是全国许多电源工程师赞扬该书试验数据多、实测波形多、实际绕制变压器和电感器的工艺过程详细具体、实用价值较高；二是有众多大专院校高年级电力电子专业师生，推荐该书为开关电源实验技能的重要参考书。

为了跟上高频开关电源新技术、新产品在部分领域的快速发展，需要抓紧学习、不断更新知识。在近几年有机会得到多台3500W、6000W高档开关电源，它们都是全桥变换器移相控制软开关电源电路技术的重要内容。我及时作了全面测量、深入解剖、专项分析、大量记录了几百页试验数据。在高档全桥软开关电源技术领域，又有了长足的进步。

一个好的电源产品，首先应该是一种“绿色”能源产品，它们必须具备对电网谐波污染尽量小的基本素质。这就要求电源设计上在电网交流输入整流端增加BOOST-PFC控制电路，又称之为高频有源功率因数校正器，这是本书的重心内容。从宏观上看，电源PFC的最佳设计方案：对中小功率电源尽量用复合PFC/PWM主芯片（共用一个IC）；而对于大功率电源，则用UC3854B等主芯片。需要反省的是：4年前编著的《现代高频开关电源实用技术》一书，在第二章过分看重了TOPSwitch的设计流程图、简化外围电路、降低元件成本等优点，而忽视了它没有PFC功能的根本缺陷。

本书删去了《现代高频开关电源实用技术》一书中已过时的IC等大部分章节，增加的主要新内容包括三项专题：

1. 复合PFC/PWM芯片新品：CM6805、CM6903/4、CM6800（见第2章、第3章）它们是美籍华人黄新年博士首创的“ICST”：具有输入电流整形技术的前沿调制PFC控制电路系统。黄先生是原ML4800开关电源的IC主设计师。PFC、PWM两个控制系统共用一个主振荡器，不但简化了外围电路，还避免了分别用两只IC时的高频差拍干扰。对提高中小功率电源整机性能很重要。PFC最佳工作频率为67kHz，PWM则用67kHz或134kHz。

2. 同步整流器控制专用集成电路新品 见第5章、第6章、第7章和第12章的LTC3900、STSR3、STSR2、LTC3901。在2002年翻译编写。李龙文是电源IC产业专家，最早消化、吸收、引进美国UNITRODE公司先进技术，是我的第一任导师。严仰光教授为审校《现代高频开关电源实用技术》一书付出了许多心血。1997年他引导我真正实现了完全的ZVS全桥软开关电源。并向我提供阮新波博士的几篇论文，特别是全桥变换器增加辅助谐振网络，对轻载时滞后臂实现ZVS具有实用价值。



3. 实体解剖 3500W、6000W 高档大功率开关电源(见第 8 章、第 9 章) 美国 IBM 公司、德国 ASCOM 公司大型电源的设计具有独特的创新而巧妙简化, 它们不用电路复杂、成本昂贵的“三电平”拓扑结构, 而是把电网三相输入先分解成两个单相输入, 然后分别经全波整流器(其一受控), 再叠加脉动输出(共地), 明显地降低了原三相整流后叠加的高电压。它又经 Buck-PFC (IGBT) 功率开关再次降压(分段式控制), 随后送往 Boost-PFC (功率 MOS-FET) 完成预稳压 + 400V 供全桥变换器。奇特的 UC3854B 复合 8 只 IC 控制板 PFC, 实现了超高功率因数校正值  $PF \geq 0.9995$ , 主变压器用多块扁平磁环压紧绕线、Boost-PFC 储能电感器用四对 8 块 EE55 磁心组件, 不但优良可靠, 还首创廉价方法解决了国际难题。

特别要指出: 构成高频开关电源产品的元器件种类繁多、规格成百上千, 并不断换代改进。高频开关电源技术所涉及的内容极其广泛和十分复杂, 它横跨了三个学科: 一是微电子精细加工的智能化专用集成电路控制芯片系统; 二是正在快速更新的高性能功率半导体开关管 (MOSFET 和 IGBT 等电力电子器件); 三是各种高频变压器和电感器等磁性材料: 其开关损耗、磁滞损耗、涡流损耗等特性在不同条件下的真实工作状态变化很大。

高频开关稳压电源是现代电子设备的重要“心脏供血系统”。它能把电网提供的强电和粗电, 变换成各种电气设备和仪器所需要的高稳定度精电和细电(有多种不同的直流输出电压和电流值)。由于新技术飞速地发展, 不断涌现了许多电力电子器件、高智能化 IC 和新电路技术, 创造出十年前意想不到的多种新型稳压电源, 它们具有高性能、高效率、高可靠性和低噪声、低污染品质。

刘胜利

2004 年 6 月于深圳

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 “绿色”电能主帅：PFC 高频有源功率因数校正技术</b> .....	1
1.1 谐波电流污染的发生与两大危害 .....	1
1.2 功率因数校正 (PFC) 技术的原理与分类概况 .....	3
1.3 高频有源功率因数校正技术的两种基本控制方法 .....	5
1.4 复合 PFC/PWM 控制器 IC 共用一个振荡器, 明显减小高频干扰.....	8
1.5 形象比喻功率因数校正器 (PFC) 是一个平稳的预储能开关 .....	13
<b>第 2 章 CM6805、CM6903/4 复合 PFC/PWM 特性; 具有 “ICST” 输入电流整形技术的前沿调制 PFC 控制电路</b> .....	18
2.1 CM6805、CM6903/4 的功能框图、引脚安排、电气参数、应用电路.....	18
2.2 用 CM6805 制作 90W 笔记本电脑稳压电源实用电路与试验数据 .....	27
2.3 输入电流整形技术 (ICST) 原理、斜坡补偿对前沿调制和后沿调制的作用 .....	35
2.4 CM6903 与 ML4803 瞬态响应的测量比较 .....	44
2.5 CM6503/4 单路输出 PFC 控制脉冲 (带 PWM 同步时钟) .....	45
<b>第 3 章 用 CM6800/01 制作 300 ~ 800W 高功率因数的开关稳压电源</b> .....	48
3.1 CM6800/01 功能概况、引脚安排、电气参数 .....	48
3.2 用 CM6800 制作 300W、500W 两种高功率因数开关电源的几个实用电路图.....	54
3.3 CM6800/01/02/24 的增益调制、电压环路、电流环路设计要点 .....	61
3.4 CM6802、CM6902 定时波形、空载频率跳变控制.....	65
3.5 单路输出 PFC 控制脉冲的 CM6500/01/02 .....	66
<b>第 4 章 能直观灵敏、精确地测量打印出电源电网输入电流波形, 真实反映功率因数校正结果的 “三合一” 简捷方法</b> .....	67
4.1 高分辨力 PF9811 智能电量测量仪的使用特点 .....	67
4.2 测量打印 350V/10A 电源在四种负载时的电流电压波形、频谱特性和谐波数值.....	70
4.3 测量打印 48V/70A 电源四种不同负载时的输入电流电压波形、频谱特性和谐波数值 .....	77
<b>第 5 章 LTC3900 同步整流控制器新品用于正激变换器输出低压大电流的开关电源</b> .....	87
5.1 LTC3900 用于正激变换器副边同步整流控制电路简况 .....	87





5.2	LTC3900 电路设计特点、外部 MOSFET 保护、定时器电路	90
5.3	LTC3900 的电流传感器、同步信号输入电路、 $V_{CC}$ 调节器	93
5.4	LTC3900 用于输出 3.3V/40A 开关电源的应用电路	95
<b>第 6 章</b>	<b>用同步整流控制器 STSR3 大幅提高反激变换器电源整机效率</b>	<b>100</b>
6.1	STSR3 反激变换器副边同步整流智能控制电路简况	100
6.2	STSR3 各单元电路的分析	104
6.3	STSR3 典型应用电路、元器件清单、印制板布局	109
6.4	用 STSR3 电路板简便替换原反激电源副边整流二极管示意图	113
6.5	STSR3 的电气参数、极限值、特性曲线	113
<b>第 7 章</b>	<b>LTC3901 同步整流控制器用于推挽变换器和全桥变换器开关电源</b>	<b>118</b>
7.1	LTC3901 同步整流控制器特性与应用简介	118
7.2	LTC3901 电路设计分析	122
7.3	LTC3901 电气特性曲线	127
7.4	同步整流管的损耗分析	130
<b>第 8 章</b>	<b>实体解剖、全面测量两种 3500W 高档大功率开关电源： 直流输出 48V/70A 和 350V/10A</b>	<b>134</b>
8.1	实体解剖两种 3500W 高档开关电源；绘制印制板铜箔、焊点走线电路图	134
8.2	用 PF9811 智能电量测量仪、配合联想电脑实测打印出多台 3500W 电源各项数据	143
8.3	测量记录两种 3500W 电源单机在多种负载时的数据	157
8.4	奇特的高密度、高功率因数控制板，8 只 IC、上百个贴片元件组合使 $PF \geq 0.9995$	162
8.5	两种 3500W 电源不同的全桥变换器控制板贴片元器件拆解及等效电路初拟	167
<b>第 9 章</b>	<b>实体解剖两种 6000W 高档开关电源，自制成功多块 PFC 控制板的技术价值</b>	<b>173</b>
9.1	两种 6000W 电源的改进概况，拆解 350V/17A 电源主板绘图、全桥控制板新图	173
9.2	基本相同的 PFC 控制板电路设计，在 6000W 电源改进了贴片元件的双夹层 铜箔走线设计有较大变化	179
9.3	两种 6000W 电源 6 只 MOSFET 紧固螺孔专用功率开关管转接电路印制板图	182
9.4	350V/17A 电源主板上新增加 CPU 数字信号处理监控板	185
9.5	$\pm 15V$ 稳压电源、PFC 控制板、开关电源全桥变换器控制电路图	189
9.6	自制成功多块分立元器件 PFC 控制板：完成单面接线试验，实现低成本、高性能、 国产化的技术价值（调正掌握关键电路参数，与贴片阻容值有差异）	190
9.7	350V 电源的副边整流有源钳位电路	192
9.8	6000W 电源用 SOT-227 封装四螺孔连线 MOSFET：FA57SA50LC	196
9.9	三相电网输入整流桥模块：VVY40（两端受控）	201
<b>第 10 章</b>	<b>3kW、6kW 电源用高速 IGBT、四螺孔接线封装 MOSFET、单相受控 整流桥、精密电流传感器、高性能驱动器 IC</b>	<b>203</b>
10.1	6000W 电源用两种高频、高压、大电流 IGBT 厚型模块新品	203
10.2	P425 型 1200V/40A 单相电网整流器受控桥	206
10.3	几种 IXYS 公司四螺孔接线、SOT-227B 封装 MOSFET 功率模块	209



10.4	MIC4421/4422 高性能 8 引脚 IC 驱动器: 峰值输出 9A 的低端 MOSFET 驱动器 .....	215
10.5	MIC4420/4429 高性能 8 引脚 MOSFET 驱动器 (峰值输出 6A) .....	222
10.6	LEM “莱姆” (瑞士) 高精度电流传感器 .....	226
10.7	三种 IXYS 公司功率开关管 IGBT 模块 .....	230
<b>第 11 章</b>	<b>制作简化的 20W、40W 反激式开关电源, 主变压器绕制, 实测多组高压脉冲波形 .....</b>	<b>236</b>
11.1	单端反激式开关电源的工作原理与连续、非连续工作状态 .....	236
11.2	用 EI28、TOP202 制作 20W 反激式开关电源的试验数据、实测波形、主变压器绕制详解 .....	246
11.3	用 PQ26/25、TOP202 制作 40W 反激式电源的试验数据、实测波形 .....	255
<b>第 12 章</b>	<b>STSR2 同步整流与同步续流控制器在正激变换器的应用电路分析 .....</b>	<b>265</b>
12.1	STSR2 正激变换器副边同步整流与同步续流智能控制器简况 .....	265
12.2	STSR2P 的各单元电路分析 .....	266
12.3	STSR2P 的典型应用电路、印制板图、简便替换方法 .....	274
<b>第 13 章</b>	<b>LTC3722 同步双模式移相全桥控制器设计特点: 提供自适应 ZVS 延迟导通, 显著减少占空比丢失 .....</b>	<b>278</b>
13.1	LTC3722 全桥控制器功能特性、应用电路、引脚概况 .....	278
13.2	LTC3722 全桥开关转换特性、4 个工作状态的分析 .....	283
13.3	LTC3722 各单元电路设计与应用要点 .....	287
13.4	LTC3722 的电气参数与特性曲线 .....	298
<b>第 14 章</b>	<b>全桥变换器移相控制软开关电源一个完整工作周期的 12 个过程分析 (正、负半周不同) .....</b>	<b>304</b>
14.1	论文产生的背景说明 .....	304
14.2	软开关移相控制全桥变换器的工作原理波形图 (两大组群), 有独特详细展览的原边与副边电流、电压波形相位关系 .....	305
14.3	一个完整开关周期中正半周的 6 个工作过程详细分析 .....	308
14.4	一个完整开关周期中负半周的 6 个工作过程详细分析 .....	312
14.5	试制移相控制全桥变换器软开关稳压电源的体会 .....	315
14.6	UC3875 全桥软开关电源移相谐振控制器的电气参数 .....	317
<b>第 15 章</b>	<b>制作两种 1000W 全桥软开关电源的试验数据、实测波形、主变压器绕制方法 .....</b>	<b>324</b>
15.1	两种 1000W (直流输出 15V/60A 和 48V/20A) 全桥软开关电源电路和印制板总体布局图 .....	324
15.2	全桥变换器工作原理与 1000W 全桥软开关稳压电源的实测波形 .....	329
15.3	用 PQ50/50 型磁心的 1000W 全桥主功率变压器的参数设计与绕制工艺 .....	333
15.4	全桥变换器驱动电路设计特点与驱动变压器绕制技术 .....	338
15.5	1000W 全桥变换器附加谐振电感器的设计与制作 .....	344
15.6	全桥软开关电源的辅助谐振网络工作原理与电感器的制作 .....	350



<b>第 16 章 制作 2000W 全桥软开关电源的输出电感器参数试验、重视以监测原边电流波形变化来选 <math>L_0</math> 值</b> .....	356
16.1 2000W 移相控制全桥软开关电源电路和总体布局 .....	356
16.2 2000W 全桥变换器主功率变压器的参数设计与绕制工艺 .....	359
16.3 大功率高频开关电源输出滤波电感器的设计与制作；重视监测原边电流波形变化来调节选择 $L_0$ 恰当值 .....	365
16.4 核算辅助谐振网络的各项参数 .....	372
16.5 大功率高频开关电源的散热、假负载群制作、整机效率计算 .....	374
16.6 原边电流互感器与单向的副边电流互感器的制作 .....	378
<b>第 17 章 UCC3895 和 UC3879 全桥变换器移相控制专用集成电路</b> .....	382
17.1 UCC3895 功能框图、设计特点和电气参数 .....	382
17.2 UCC3895 全桥变换器移相控制芯片典型应用电路 .....	390
17.3 新颖的 ZCZVS PWM Boost 全桥变换器 .....	394
17.4 UC3879 全桥变换器移相控制专用 IC 产品简介 .....	396
<b>第 18 章 大型开关电源功率因数校正经典专用集成电路 UC3854 (N) /A/B 详解</b> .....	400
18.1 UC3854 功能设计、三种规格、电气参数及特性曲线 .....	400
18.2 UC3854 A/B 功能特点、性能优化及电气参数 .....	409
18.3 UC3854 构成的 250W 典型 PFC 电路设计步骤与计算数值 .....	414
18.4 用 UC3854 制作 500 ~ 2000W 高频有源功率因数校正器的试验数据 .....	424
<b>第 19 章 设计制作双管正激变换器高可靠 200 ~ 300W 开关电源实验</b> .....	431
19.1 单端正激变换器的工作原理及实用电路 .....	431
19.2 200W 正激变换器主功率变压器的设计与绕制工艺 .....	436
19.3 TL494 设计特点、脉宽调制特性与死区时间控制试验 .....	438
19.4 4N35/TL431 光耦控制电路的计算方法 .....	447
19.5 驱动电路设计、实测波形与变压器的绕制 .....	452
<b>第 20 章 设计制作半桥变换器 500W 开关电源实验</b> .....	456
20.1 半桥变换器工作原理及 500W 开关电源实用电路 .....	456
20.2 半桥变换器主功率变压器的绕制方法 .....	459
20.3 500W 开关电源驱动变压器的绕制方法 .....	463
<b>第 21 章 开关电源控制电路用精密运算放大器</b> .....	467
21.1 OP177 超级精密运算放大器 .....	467
21.2 AD620 高性能、低功耗运算放大器 .....	473
21.3 OP297 双重低偏置电流精密运算放大器 .....	483
<b>第 22 章 开关电源控制电路用光耦集成电路</b> .....	489
22.1 MOC8030/8050 光耦合器（达林顿型） .....	489
22.2 MOC3081、MOC3082、MOC3083 光耦合 IC 零穿越电路三端双向晶闸管驱动输出 .....	492



---

22.3	CNY64/65/66 光耦合器 .....	494
22.4	H11AV1, A/H11AV2, A 光耦合器 .....	499
<b>第 23 章</b>	<b>开关电源控制电路用精密电压基准集成电路 .....</b>	<b>504</b>
23.1	MAX873、MAX875、MAX876 精密电压基准 IC (低功耗、低漂移、三种基准值 + 2.5V/+ 5V/+ 10V) .....	504
23.2	AD586 高精度 5V 电压基准 .....	510
<b>第 24 章</b>	<b>ML4425 无传感器的直流无刷三相电机控制器及应用 .....</b>	<b>514</b>
24.1	ML4425 直流电机三相控制器的结构与参数 .....	514
24.2	ML4425 的电路功能与设计原理 .....	518
24.3	设计依据三相桥式功率级的接口技术 .....	526
<b>第 25 章</b>	<b>高频开关电源专用集成电路的分类与发展概况 .....</b>	<b>528</b>

# 第 1 章

## “绿色”电能主帅：PFC 高频有源功率因数校正技术



### 1.1 谐波电流污染的发生与两大危害

谐波电流污染发生的病根是整流之后直接由大电容器滤波。

近 10 年来，迅猛发展的电力电子技术使大量的直流开关电源更加广泛地应用在计算机、通信设备、电力系统、家电、邮电、金融、舰船、飞机等领域，老式的笨重、低效电源被众多轻巧、高性能新电源所替代。

但直到现在，为了降低成本而竞相压价，许多中小功率电源产品不用功率因数校正器 PFC，模糊技术指标，以低价格或回扣来竞争市场。

传统的开关电源产品，其交流电网输入端接口电路一般采用 4 只二极管桥式整流、加高压大电容器滤波电路，然后再接 DC/DC 直流变换器（先不计输入端的串联 LC 电感、电容滤波网络等）。传统开关电源简化电路如图 1-1 所示。

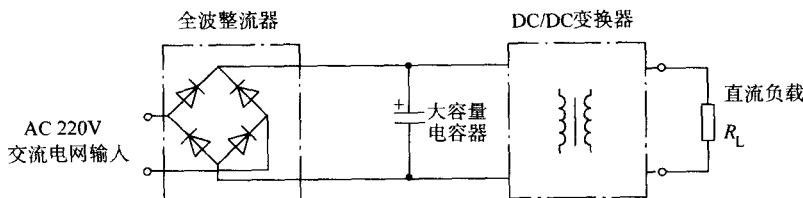


图 1-1 传统开关电源示意图

传统的 AC/DC（交流/直流）电能变换器和开关电源，其输入电路普遍采用了全桥二极管整流，输出端直接接到大电容量电容器滤波器。虽然不可控整流器电路简单可靠，但它们会从电网中吸取高峰值电流，使输入端交流电流波形发生畸变。也就是说，大量的电气设备自身的稳压电源，其输入前置级电路实际上是一个峰值检波器，在高压电容滤波器上的充电电压，使得整流器的导通角减少为  $1/3$ ，电流脉冲变成了非正弦波的窄脉冲，因而在电网输入接口端产生失真很大的谐波尖峰分量，它会倒窜流入电网，对邻近的计算机等重要电子设备的稳定工作产生严重的电磁干扰。

峰值检波是传统的电源发生严重电流谐波污染的致命病根：电网输入整流器的导通时间只出现在输入电压幅度高于电容器充电电压值的一个较窄区间里。使交流电网一侧的功率因数 PF（Power Factor）值下降到  $0.5 \sim 0.65$ 。谐波电流干扰已成为强噪声发射源，危害了电网的正常工作，使 220V 交流电网输送线路上损耗剧增，浪费了大量的电能。交流电网输入电流波形发生的畸变，如图 1-2 所示。



谐波电流污染的两大危害可概括为：1) 对稳压电源本身增大输入损耗，降低整机效率（无功损耗过大）；2) 对电网邻近用户尖刺噪声干扰，可能使电脑失控，配电盘过电流过热、温升过高而起火，危及电网的安全运行。

无 PFC 电路时，典型的单相整流滤波后产生的主要电流谐波分量百分比见表 1-1。

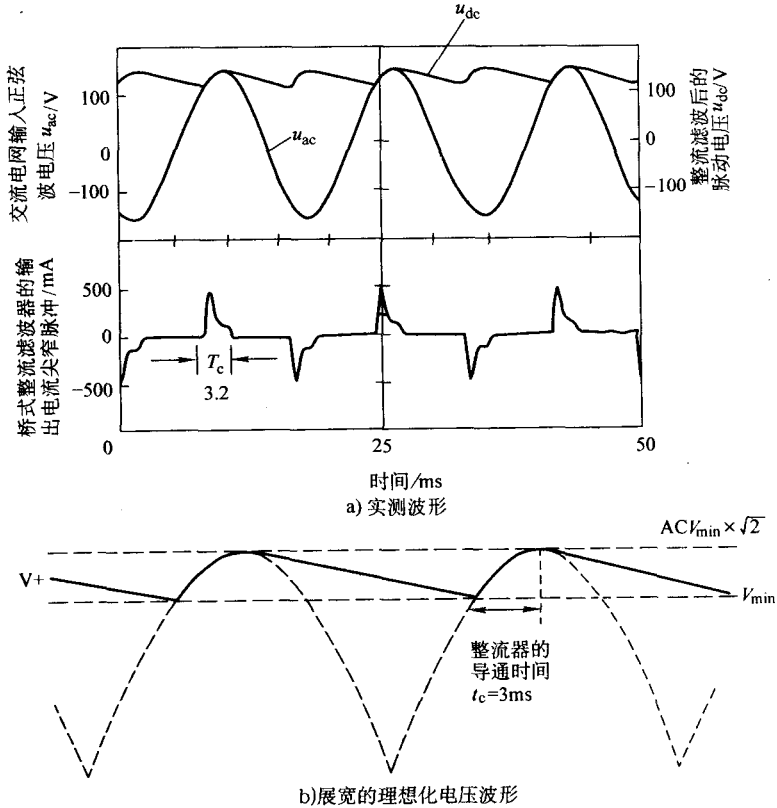


图 1-2 无 PFC 开关电源的电网交流输入电压、整流滤波后脉动输出电压与电流波形

表 1-1 无 PFC 电路时典型的单相整流滤波后产生的主要电流谐波分量百分比

谐波次数	3	5	7	9	11	13	15	17
$\frac{I_h}{I_1} (\%)$	73.2	36.6	8.1	5.7	4.1	2.9	0.8	0.4

由于无 PFC 的电网输入整流滤波电路，直接接到大电容量高压电容器，它只有在电网输入的交流电压幅度高于大容量电容器上的充电电压时，才会让二极管整流器导通输出电流，而在大部分时间里整流器处于截止状态，这使电流波形变成了非正弦的窄脉冲，产生了大量的谐波干扰分量，其中 3 次谐波百分比最高达 73.2%，第二是 5 次谐波为 36.6%，7 次为 8.1%，9 次为 5.7%，11 次为 4.1%，13 次为 2.9% 等等。

当用杭州远方仪器厂的 PF9811 测量一台小功率开关电源时，这台没有 PFC 功能的电源功率因数值为  $PF = 0.794$ ，输入功率  $P_{IN} = 69.3W$ ，输入电压  $V_{IN} = AC 230.8V$ ，输入电流  $I_{IN} = 0.375A$ 。测量打印单给出：电压总谐波  $V_E = 4.3\%$ ，电流总谐波  $A_E = 67.8\%$ ，表 1-2 列出



主要奇次电流谐波数值。

表 1-2 一台无 PFC 的小功率电源主要奇次电流谐波值

主要奇次谐波/次数	3	5	7	9	11	...
电流谐波分量(%)	63.5	30.4	2.8	12.3	7.8	...

用另一种仪表测量一台无 PFC 的大功率电源整流电路输入端交流电压、电流波形示意图如图 1-3 所示。主要测量数据：3 次谐波电流为 77.5%，5 次为 50.3%，总的谐波电流分量 THD = 95.6%，PF = 0.683。其输入功率达 3680W，而负载输出功率只有 2000W。当电源的整流器输出端加设 Boost-PFC 电路隔开后续主功率变换器之后，电流波形由窄脉冲变为正弦波形，PF = 0.992，THD = 8.18%，3 次谐波电流降到 7.86%，5 次为 16.15%，7 次为 0.75%，11 次为 0.91%...

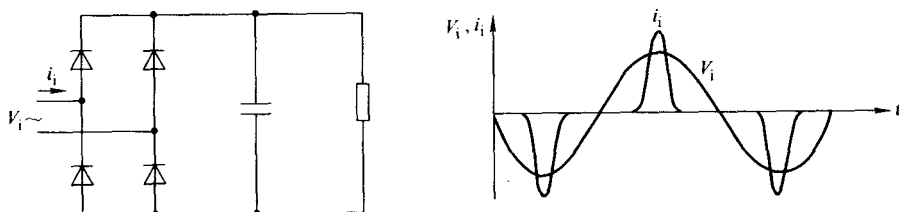


图 1-3 AC/DC 整流电路和输入电压、电流波形

又用 PF9811 测量打印一台小功率开关电源参数，无论从极差的尖窄电流波形（相位明显超前正弦波电压），还是电流谐波百分数值特别大（见图 1-4），均说明该电源是一台强电磁干扰危害源，其 THD = 178.9%，3 次谐波电流为 79.5%，5 次为 53.9%，7 次为 46.6%，9 次为 52.5%，11 次为 52.8%，13 次为 48.9%，15 次为 47.4%，...21 次为 39.5%，...，它的 PF = 0.468。

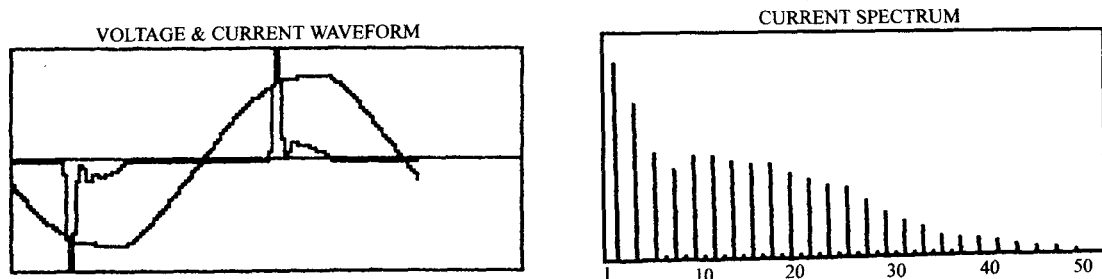


图 1-4 用 PF9811 测量打印的电源输入电压、电流波形和谐波次数电流频谱特性



## 1.2 功率因数校正 (PFC) 技术的原理与分类概况

传统的开关电源就像是交流电网上的非线性负载，电源的输入端均使用桥式整流器和紧接大容量滤波电容器，它的峰值充电效应产生的高次谐波电流从输电线辐射出去而污染电网。功率因数校正 PFC (Power Factor Correction) 是十几年电源技术进步的领域，它的基本原理就是从电路上采取措施，使电源输入电流实现正弦波，并与输入电压保持同相位，正弦



化就是要使其谐波为零，两波形同相位，就实现了功率因数  $PF = 1$  的重要目标。

功率因数校正的主要方法有两种：一是无源 PFC 技术，即采用体积庞大的电感、电容滤波器来提高功率因数，它难以实现功率因数  $PF = 1.0$  的单位功率因数校正；二是采用有源 PFC 技术，特别是高频有源功率因数校正技术，能实现  $PF \geq 0.99$ ，也就是让电网输入端的电流波形逼近正弦波，并与输入的电网电压保持同相位。

功率因数校正 (PFC) 大部分是指高频有源功率因数校正技术，即高频开关脉冲控制的有源器件 PFC 电路。它主要由四部分组成：一是 Boost 储能电感，二是整流器二极管，三是功率开关管 MOSFET，四是集成电路控制系统，如图 1-5 所示。

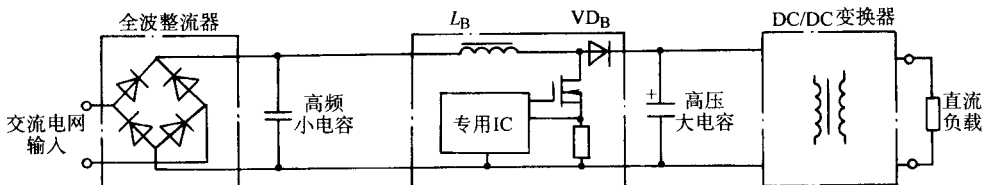


图 1-5 加有高频 PFC 电路的开关电源示意图

有源功率因数校正 (PFC)，就是在交流电网输入经整流之后，先不接大容量的电容器，而是插入 PFC 电路隔离开，即串联储能电感和升压二极管、并接 MOSFET 开关管等，然后再接大电容器滤波。这就把传统开关电源严重失真的输入电流波形校正为近似正弦波形，并且与输入电压同相位，从而抑制了严重的谐波干扰，使功率因数升到 0.99 左右。

为使电源输入电流能保持与输入电压同相位，并成比例，必须找到一种方法来防止该设备加载时，其电流不能按瞬时电网电压成比例地变化。高频有源功率因数校正器 PFC 电路，使用一种 Boost (升压) DC/DC 变换器来完成这一任务。变换器的输入是全波整流交流电网电压。由于在桥式整流器之后，没有马上接大电容滤波，所以升压变换器的输入电压脉动频率两倍于电网频率。通过迫使升压变换器同时满足两个条件，就有可能确保变换器从电网流入的电流，能匹配瞬时的线电压：1) 升压变换器的输出电压必须设得高于线电压的峰值，常用的值是 DC 385V，允许的高线电压的有效值为 AC 270V；2) 变换器在任何瞬间从电网中取得的电流，必须与电网电压成比例。

功率因数校正技术大致可分为无源 PFC 与有源 PFC 两类。

(1) 无源 PFC

1) 早期的无源 PFC：电网输入端先串联笨重的大电感器、大电容器 LC。

2) 改进的无源 PFC：在全波整流器之后再串接 C-L-C 滤波网络，如图 1-6 所示。C<sub>1</sub> 是高频小电容，C<sub>2</sub> 是低频大电容器。它可用于镇流器、中小功率电源。

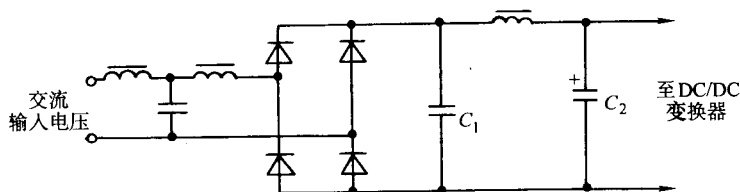


图 1-6 改进的无源 PFC 电路





3) 新型的无源 PFC: 在全波整流器之后串接多个二极管与电容器组合 D-C 网络, 它又称为“填谷式” PFC 电路, 如图 1-7 所示。

### (2) 有源 PFC

1) 低频有源 PFC: 主要指大功率晶闸管电路。

2) 高频有源 PFC: 是基于 Boost 变换器的 PFC 电路。

3) 其他 PFC 新技术: 软开关 PFC、三电平 PFC、磁放大器 PFC 技术等, 如图 1-8 所示。

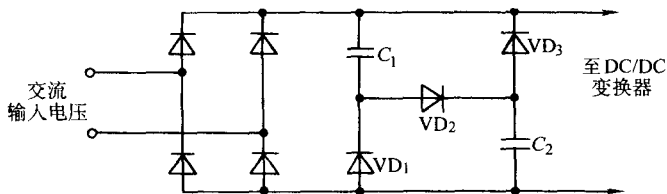


图 1-7 新型的“填谷式”无源 PFC 电路

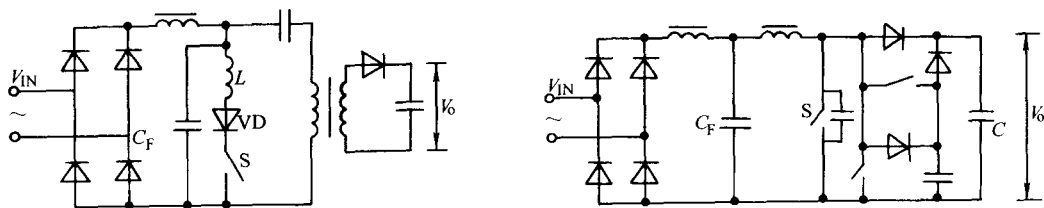


图 1-8 两种 ZCS、ZVS 软开关 PFC 电路框图

按电感器电流是否连续, 高频有源功率因数校正 (PFC) 技术, 又可分为两种基本的控制方式: 乘法器和电压跟随器控制电路。

(1) 连续导通模式 CCM (Continuous Current Mode): 采用“乘法器”控制技术的 PFC, 主要适用于大功率开关电源, 核心控制电路是电流调节环路。

(2) 不连续导通模式 DCM (Discontinuous Current Mode): 采用“电压跟随器”控制技术 PFC, 主要适用于中、小功率开关电源, 可简化控制电路。



## 1.3 高频有源功率因数校正技术的两种基本控制方法

高频有源功率因数校正技术是抑制电网交流输入谐波电流污染的最佳方法。它是通过相应的一个或者两个反馈控制电路, 使输入电流平均值能自动跟随全波整流电压基准, 并维持直流输出电压稳定。PFC 电路使变换器的输入电流与输入电压波形均为正弦波形, 并把两者校正成相位相同, 它的作用可看成把变换器电路作为一个纯电阻器, 故也称之为“电阻仿真器”。按 Boost 储能电感器电流是否连续, 高频有源功率因数校正技术主要有两种基本控制方法: 一是在连续导通模式 (CCM) 时, 用乘法器实现 PFC; 二是在断续导通模式 (DCM) 时, 用电压跟随方法实现 PFC。

由于 Boost (升压) 变换器具有电感电流连续、储能电感又是滤波器, 可抑制电磁干扰 EMI (Electro Magnetic Interference) 和射频干扰 RFI (Radio Frequency Interference), 电流波形失真小、输出功率大、共源极可简化驱动电路等优点, 因此 Boost 变换器常用作 PFC 的主电路拓扑。另外, 其他还有 Buck、Boost-Buck、Zeta、Cuk 和 Sepic 等变换器也可作主电路拓扑。为了得到稳定的输出电压, 需要引入输出电压反馈控制。