



开关电源设计与制作系列丛书

# 开关电源模块化 与数字化技术

◎ 庚 雷 李龙文 刘胜利 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

014010063

TN86  
156

开关电源设计与制作系列丛书 内容简介

# 开关电源模块化与数字化技术

庚 雷 李龙文 刘胜利 编著



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING



北航

C1696596

TN86  
156

## 内 容 简 介

模块化和数字化是开关电源工程技术的发展方向。本书的模块化部分重点讲述了 Vicor 电源模块的结构原理、应用技巧和应用实例；数字化部分讲述了数字化开关电源的特点，解析了数字电源控制器 Si8250，数字 PWM 系统控制器 UCD9240、UCD8220，数字式双相同步 Buck 控制器 UCD9112，电源程序器和监视器 UCD9081、UCD9080，数字控制兼容的 MOSFET 驱动器 UCD7100、UCD7230、UCD7201 等多款实用的数字化开关电源控制 IC，以及用 Si8250 等设计数字电源的应用实例。本书可供开关电源工程技术人员研发参考，也可供大专院校相关专业师生阅读。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有，侵权必究。

## 图书在版编目(CIP)数据

开关电源模块化与数字化技术 / 庚雷, 李龙文, 刘胜利编著. —北京: 电子工业出版社, 2013. 9  
(开关电源设计与制作系列丛书)  
ISBN 978-7-121-21508-7

I. ①开… II. ①庚… ②李… ③刘… III. ①开关电源-模块化 ②开关电源-数字化 IV. ①TN86  
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 219737 号

策划编辑: 苏颖杰

责任编辑: 夏平飞 文字编辑: 韩奇桅

印刷: 北京京师印务有限公司

装订: 北京京师印务有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787 × 1 092 1/16 印张: 13.25 字数: 339.2 千字

印 次: 2013 年 9 月第 1 次印刷

印 数: 3 000 册 定价: 39.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 [zlt@phei.com.cn](mailto:zlt@phei.com.cn)，盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线: (010) 88258888。

## “开关电源设计与制作系列丛书”编委会

主 任：倪本来

副主任：陈永真 赵丽松

委 员（按姓氏笔画排序）：

|     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|
| 刁成明 | 马传添 | 王 聪 | 王其英 |
| 艾多文 | 吕征宇 | 任元元 | 刘胜利 |
| 苏颖杰 | 李文华 | 李龙文 | 李宗光 |
| 李厚福 | 何 发 | 张广明 | 张卫平 |
| 张志国 | 张忠相 | 杨 耕 | 杨继深 |
| 庚 雷 | 陈建业 | 赵争鸣 | 赵金龙 |
| 钱振宇 | 倪海东 | 徐之文 | 徐兰筠 |
| 徐德鸿 | 路秋生 | 腾 霖 |     |

## 丛 书 序

开关电源是电源“家族”中的重要成员，是发展较快的前沿电源技术。在电源领域还有不间断电源、逆变器、变频器、交流电源、焊接电源、充电器、精密电源、工业电源、医用电源、军用电源、特种电源等，但几乎所有的电源迟早都会向开关电源靠拢。传统的电源技术正在让位于高频开关电源技术，传统应用领域中的电源正逐渐被新的开关电源升级换代。新能源的开发利用又催生了绿色电能变换这一最能体现开关电源高频逆变核心技术应用的庞大的市场需求。越来越多的电源科技工作者、新电源产品的开发者、各行业传统电源产品面临升级换代的革新者都希望读到最新的有关开关电源的实用设计指导书。这正是编撰“开关电源设计与制作系列丛书”的初衷。丛书内容围绕实用设计展开，为设计者提供实用电路、关键技术、简明实用的设计方法、成功案例，将成为读者得心应手的案头书。

丛书目前包括《开关电源设计与制作基础》、《反激式开关电源原理与设计》、《开关电源设计与制作实践》、《开关电源模块化与数字化技术》、《开关电源的电磁兼容性设计、测试和典型案例》、《开关电源计算机仿真技术》。计划出版的还有《小型风力发电技术及应用》、《家用太阳能发电技术》、《快速充电技术与应用》、《防爆型开关电源设计与应用》、《小型逆变器设计及应用》等。丛书作者均为当今知名的电源技术领域专家。

辽宁工业大学陈永真教授编著的《反激式开关电源原理与设计》和中电公司刘胜利高级工程师编著的《开关电源设计与制作实践》，详解了单端变换、双正激变换、半桥变换和全桥变换等常见的几种典型开关电源电路原理、设计和制作要领，均为编著者长期工程实践的总结。

开关电源的数字化控制代表了开关电源技术一个重要的发展方向，其发展前景较之传统的模拟、开关模拟混合控制有划时代的突破。上海福基公司庚雷高级工程师、北京半导体器件五厂微电子研究所李龙文高级工程师和中电公司刘胜利高级工程师共同编著的《开关电源模块化与数字化技术》，提供的是大家较为熟悉、应用较广的 Vicor 电源模块，其他优秀的模块电源如果存在类似的应用问题，可以相互借鉴。该书提供的资料可将初涉该领域的工程师们引领入门。

电磁兼容工程实用技术在开关电源中的地位极其重要，但往往在设计初期被忽视。全国电磁兼容标准化技术委员会委员、上海三基电子工业有限公司总工程师钱振宇研究员在《开关电源的电磁兼容性设计、测试和典型案例》一书中，以生动的笔触进行了详尽的具有可操作性的介绍。

开关电源的现代设计离不开计算机仿真，然而借助现有的仿真软件针对开关电源的应用设计，系统而透彻的介绍并不多见。清华大学陈建业教授编著的《开关电源计算机仿真技术》一书能帮助读者在开关电源的计算机仿真技术方面打下坚实的基础。

《开关电源设计与制作基础》是清华大学蔡宣三教授生前遗墨，曾经在《电源世界》期刊由倪本来主编辑连载。蔡宣三教授的关于开关电源基础原理的叙述是此类文字中的经典之一。蔡宣三教授曾担任中国电源学会理事长，对我国电源技术的发展做出了重大贡献。谨

以此书纪念蔡宣三教授。

在能源短缺和环境污染日益严重的今天，绿色能源向电能的转换具有重大意义。开关电源及其高频逆变核心技术在绿色能源转换中起着关键性作用。为此，丛书选编了《小型风力发电技术及应用》、《家用太阳能发电技术》、《快速充电技术及应用》、《防爆型开关电源设计与应用》、《小型逆变器设计及应用》等相关图书，并已列入出版计划，希望它们能在改变人们衣食住行的绿色浪潮中推波助澜。

丛书由电能变换专家、中国电源学会副理事长、北京富来电能设备公司倪本来高级工程师担任总策划。参与丛书策划，为丛书提供资料、建议，以及帮助审稿的人员还有北京信息职业技术学院路秋生教授，中国矿业大学王聪教授，工业与信息化部华北计算所王其英高级工程师，中国计量科学研究院于百江高级工程师，浙江大学吕征宇教授，北方工业大学张卫平教授，中国航天科技集团张志国研究员、张忠相研究员，中国科学院计算技术研究所张广明研究员，电子工业出版社赵丽松编审和苏颖杰编辑等。

限于水平，书中错误在所难免，恳请读者斧正。

“开关电源设计与制作系列丛书”编辑委员会

编委：倪本来、路秋生、王聪、王其英、于百江、吕征宇、张卫平、张志国、张忠相、张广明、赵丽松、苏颖杰

编委：倪本来、路秋生、王聪、王其英、于百江、吕征宇、张卫平、张志国、张忠相、张广明、赵丽松、苏颖杰

编委：倪本来、路秋生、王聪、王其英、于百江、吕征宇、张卫平、张志国、张忠相、张广明、赵丽松、苏颖杰

编委：倪本来、路秋生、王聪、王其英、于百江、吕征宇、张卫平、张志国、张忠相、张广明、赵丽松、苏颖杰

编委：倪本来、路秋生、王聪、王其英、于百江、吕征宇、张卫平、张志国、张忠相、张广明、赵丽松、苏颖杰

编委：倪本来、路秋生、王聪、王其英、于百江、吕征宇、张卫平、张志国、张忠相、张广明、赵丽松、苏颖杰

编委：倪本来、路秋生、王聪、王其英、于百江、吕征宇、张卫平、张志国、张忠相、张广明、赵丽松、苏颖杰

编委：倪本来、路秋生、王聪、王其英、于百江、吕征宇、张卫平、张志国、张忠相、张广明、赵丽松、苏颖杰

编委：倪本来、路秋生、王聪、王其英、于百江、吕征宇、张卫平、张志国、张忠相、张广明、赵丽松、苏颖杰

编委：倪本来、路秋生、王聪、王其英、于百江、吕征宇、张卫平、张志国、张忠相、张广明、赵丽松、苏颖杰

编委：倪本来、路秋生、王聪、王其英、于百江、吕征宇、张卫平、张志国、张忠相、张广明、赵丽松、苏颖杰

编委：倪本来、路秋生、王聪、王其英、于百江、吕征宇、张卫平、张志国、张忠相、张广明、赵丽松、苏颖杰

编委：倪本来、路秋生、王聪、王其英、于百江、吕征宇、张卫平、张志国、张忠相、张广明、赵丽松、苏颖杰

## 反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，本社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市海淀区万寿路173信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036



北航

C1696596

# 目 录

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 第 1 章 模块化开关电源         | 1  |
| 1.1 模块化电源的特点          | 1  |
| 1.1.1 模块化电源的优势        | 1  |
| 1.1.2 电源模块的主要工作模式     | 1  |
| 1.1.3 电源模块的主要特性       | 1  |
| 1.1.4 电源模块的发展动向       | 2  |
| 1.2 电源模块的基本原理和特性      | 2  |
| 1.2.1 Vicor 电源模块的电路原理 | 2  |
| 1.2.2 Vicor 电源模块的特性   | 4  |
| 1.3 电源模块的基本应用         | 5  |
| 1.3.1 电源模块的参数选择       | 5  |
| 1.3.2 电源模块各引脚功能       | 7  |
| 1.3.3 电源模块的最简单连接方法    | 7  |
| 1.3.4 电源模块的 PCB 设计要点  | 8  |
| 1.3.5 电源模块的测量和检验      | 8  |
| 1.4 系统模块的选用           | 10 |
| 1.4.1 概述              | 10 |
| 1.4.2 AC 交流前级         | 11 |
| 1.4.3 DC 直流前级保护       | 13 |
| 1.4.4 有源前级滤波器         | 13 |
| 1.4.5 输出滤波模块          | 13 |
| 1.4.6 有源输出滤波器         | 15 |
| 1.4.7 可自行定制 VIPAC 电源  | 15 |
| 1.4.8 用电源模块做成的配置式电源   | 16 |
| 1.5 电源模块应用技巧          | 17 |
| 1.5.1 输出纹波的衰减         | 17 |
| 1.5.2 电源模块的并联应用       | 18 |
| 1.5.3 电源模块的串联应用       | 19 |
| 1.5.4 模拟负载            | 20 |
| 1.5.5 大容量负载的使用        | 21 |
| 1.6 电源模块的热设计和可靠性      | 21 |
| 1.6.1 电源模块的热设计        | 21 |
| 1.6.2 热设计实例           | 23 |
| 1.6.3 电源模块的可靠性指标      | 24 |

|        |                              |    |
|--------|------------------------------|----|
| 1.7    | V · I Chip 晶片式电源和分比式架构       | 25 |
| 1.7.1  | 新的电路拓扑 - 正弦能量转换器             | 25 |
| 1.7.2  | 分比式供电架构 FPA 简介               | 26 |
| 1.7.3  | 分比式供电架构的基本单元简介               | 26 |
| 1.7.4  | 分比式供电的优势                     | 30 |
| 1.7.5  | VI BRICK                     | 30 |
| 1.7.6  | 系统模块和 V · I Chips 晶片式电源模块的应用 | 31 |
| 1.8    | 电源模块应用实例                     | 31 |
| 1.8.1  | 1kW 电源的设计实例                  | 31 |
| 1.8.2  | Vicor 电源模块在新能源汽车上的应用         | 35 |
| 第2章    | 数字化开关电源的特点                   | 37 |
| 2.1    | 开关电源数字化概况                    | 37 |
| 2.2    | 数字化开关电源的特点                   | 37 |
| 2.2.1  | 数字化电源的优势                     | 37 |
| 2.2.2  | 最新数字开关电源控制 IC - ADP1046      | 38 |
| 第3章    | 数字电源控制器 Si8250               | 40 |
| 3.1    | 系统展示                         | 40 |
| 3.1.1  | 10MHz 控制处理器 ADC              | 40 |
| 3.1.2  | DSP 滤波器发动机                   | 40 |
| 3.1.3  | 六通道的 D - PWM                 | 42 |
| 3.1.4  | 峰值电流限制比较器                    | 42 |
| 3.1.5  | 自排序的 12 位 ADC                | 43 |
| 3.1.6  | 系统管理程序                       | 44 |
| 3.1.7  | 开发工具                         | 45 |
| 3.1.8  | 存储器                          | 46 |
| 3.1.9  | 比较器                          | 46 |
| 3.1.10 | 串行接口                         | 47 |
| 3.1.11 | 输入/输出接口                      | 47 |
| 3.1.12 | 可调的计数器阵列                     | 48 |
| 3.2    | 系统工作                         | 48 |
| 3.2.1  | 系统上电工作预置                     | 48 |
| 3.2.2  | Si8250/1/2 在隔离 DC - DC 中的应用  | 49 |
| 3.2.3  | 在非隔离 DC - DC (POL) 中的应用      | 49 |
| 3.2.4  | 时钟源                          | 50 |
| 3.2.5  | PWM 限制、保护及工作点的设置             | 50 |
| 3.2.6  | Si8250 的引脚功能和外形              | 50 |
| 3.3    | 功能电路单元介绍                     | 51 |
| 3.3.1  | 数模转换器 DAC                    | 51 |
| 3.3.2  | ADC0 (12 位自排顺序的 ADC)         | 51 |

|              |                             |            |
|--------------|-----------------------------|------------|
| 3.3.3        | ADC1 (10MHz 环路的 ADC)        | 60         |
| 3.3.4        | DSP 滤波器发动机                  | 61         |
| 3.3.5        | 峰值电流限制检测器                   | 66         |
| 3.3.6        | 数字 PWM (DPWM)               | 67         |
| 3.3.7        | 电压基准                        | 76         |
| 3.3.8        | 比较器 0                       | 77         |
| 3.3.9        | CIP-51 CPU                  | 79         |
| 3.3.10       | 存储器结构和 SFRs                 | 82         |
| 3.3.11       | 预取的发动机                      | 87         |
| 3.3.12       | 循环的冗余检测单元 (CRCO)            | 87         |
| 3.3.13       | 复位源                         | 88         |
| 3.3.14       | 闪存存储器                       | 91         |
| 3.3.15       | 外部 RAM                      | 93         |
| 3.3.16       | 输入/输出接口                     | 94         |
| 3.3.17       | 振荡器                         | 98         |
| 3.3.18       | SM 总线                       | 100        |
| 3.3.19       | UART0                       | 108        |
| 3.3.20       | 定时器                         | 111        |
| 3.3.21       | 可编程的计数器阵列                   | 117        |
| 3.3.22       | C2 接口                       | 125        |
| <b>第 4 章</b> | <b>用 Si 8250 设计数字电源</b>     | <b>126</b> |
| 4.1          | 数控技术一览                      | 126        |
| 4.2          | 新型数字控制器芯片 Si 8250 系列展示概述    | 127        |
| 4.3          | 设计实例                        | 129        |
| 4.3.1        | 功率级元件设计                     | 130        |
| 4.3.2        | 控制环路设计                      | 130        |
| 4.4          | Si 8250 的工具设备               | 133        |
| 4.4.1        | Si 8250 的工具简介               | 133        |
| 4.4.2        | 给 BUCK 拓扑设计控制环参数的应用步骤       | 135        |
| <b>第 5 章</b> | <b>几款实用的数字化开关电源控制 IC</b>    | <b>139</b> |
| 5.1          | 数字 PWM 系统控制器 UCD9240        | 139        |
| 5.1.1        | UCD9240 设计特点                | 139        |
| 5.1.2        | UCD9240 典型应用电路、内部功能框图及各引脚安排 | 140        |
| 5.1.3        | UCD9240 电气参数                | 142        |
| 5.1.4        | UCD9240 芯片部分内电路与特性测量简介      | 149        |
| 5.2          | 数字式双相同步 Buck 控制器 UCD9112 详解 | 152        |
| 5.2.1        | UCD9112 芯片主要设计特点            | 152        |
| 5.2.2        | UCD9112 功能框图及典型应用电路         | 152        |
| 5.2.3        | UCD9112 电气参数                | 154        |

|       |                                                               |     |
|-------|---------------------------------------------------------------|-----|
| 5.2.4 | UCD9112 各引脚功能简介                                               | 157 |
| 5.2.5 | UCD9112 部分单元电路及特性                                             | 157 |
| 5.3   | 具有误差记录存入功能的八信道电源程序器和监视器 UCD9081                               | 158 |
| 5.3.1 | UCD9081 主要设计特点                                                | 158 |
| 5.3.2 | UCD9081 的典型应用电路与应用领域                                          | 159 |
| 5.3.3 | UCD9081 芯片内部功能框图与各引脚内容安排                                      | 159 |
| 5.3.4 | UCD9081 电气参数                                                  | 162 |
| 5.3.5 | UCD9081 数字输出特性曲线 (在一段时间内只有一路输出加载)                             | 164 |
| 5.4   | 数字控制八信道电源程序器和监视器 UCD9080                                      | 166 |
| 5.4.1 | 芯片主要设计特性及典型应用电路                                               | 166 |
| 5.4.2 | UCD9080 的应用领域                                                 | 166 |
| 5.4.3 | UCD9080 电气参数                                                  | 166 |
| 5.4.4 | UCD9080 芯片的数字群连接参数存储结构图表                                      | 169 |
| 5.5   | 数字控制兼容的单低边 $\pm 4\text{A}$ 、MOSFET 驱动器 UCD7100<br>(具有电流检测功能)  | 171 |
| 5.5.1 | UCD7100 设计特点及典型的应用电路 (单端正激变换器)                                | 171 |
| 5.5.2 | UCD7100 两种典型的应用电路                                             | 172 |
| 5.5.3 | UCD7100 的极限值与电气参数                                             | 174 |
| 5.6   | 数字控制兼容的同步 Buck 栅极驱动器 UCD7230 (有电流检测限定放大器)                     | 175 |
| 5.6.1 | UCD7230 主要设计特性、内部功能框图与简化电路                                    | 175 |
| 5.6.2 | UCD7230 的单项、多项同步 Buck 变换器 (与 UCD9112 组合)                      | 176 |
| 5.6.3 | UCD7230 的极限值及其电气参数                                            | 178 |
| 5.6.4 | UCD7230 应用简图                                                  | 181 |
| 5.7   | 数字控制兼容的双低边 $+4\text{A}$ 、MOSFET 驱动器 UCD7201<br>(具有可编程的公用电流检测) | 183 |
| 5.7.1 | UCD7201 主要设计特点及典型的应用电路                                        | 183 |
| 5.7.2 | UCD7201 内部功能框图与各引脚安排                                          | 184 |
| 5.7.3 | UCD7201 极限值与电气参数                                              | 186 |
| 5.8   | 数字管理式推挽变换器——模拟 PWM 控制器 UCD8220                                | 189 |
| 5.8.1 | UCD8220 主要设计特点及两种应用电路 (推挽式、半桥变换器)                             | 189 |
| 5.8.2 | UCD8220 内部功能框图与两种不同封装的各引脚安排                                   | 191 |
| 5.8.3 | UCD8220 的极限值及电气参数                                             | 192 |
| 5.8.4 | UCD8220 部分电路应用概况                                              | 194 |
| 附录 A  | Vicor 的模块选型资料                                                 | 197 |

# 第 1 章 模块化开关电源

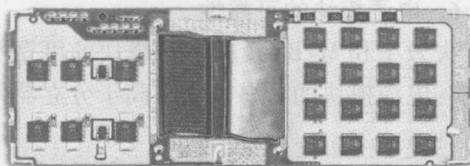
## 1.1 模块化电源的特点

### 1.1.1 模块化电源的优势

模块化电源一般称为电源模块，有时简称模块。在当今科学技术高度发展的时代，电源应用更加广泛，这也对电源功能提出了更高的要求。因此，在进行电源设计时，都希望缩短开发周期，使产品变更参数时设计灵活，降低开发成本，减小电源体积，使其可靠性高，输出电压的可调性好，便于冗余设计，具有优良的电磁兼容性（EMC）等。电源模块由于优化了开关电源的电路，采用先进的制造工艺，将复杂的开关电源浓缩成小体积电源模块，适合了上述技术要求，因此得到广泛的应用。

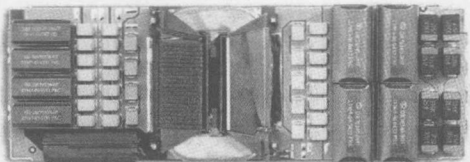
图 1.1 所示为美国 Vicor 公司生产的 FasTrak 系列 Maxi 电源模块的剖视图，复杂的电源被集成得非常简洁。

- Standard MLP power devices
- Efficient pick-and-place assembly



Bottom View

Top View



- Surface mount components for greater manufacturing efficiency
- Standard reflow process

图 1.1 美国 Vicor 公司生产的 FasTrak 系列 Maxi 电源模块的剖视图

### 1.1.2 电源模块的主要工作模式

目前电源的转换模式主要有线性电源和开关电源两大类，我们这里主要讨论开关电源的工作模式。电源模块转换形式主要有：直流 - 直流即 DC - DC 转换、交流 - 直流即 AC - DC 转换和直流 - 交流即 DC - AC 转换（称逆变电源）等。我们这里主要讨论输出直流的直流电源。

电源模块的主要电路拓扑有 PWM 固频谐振、准谐振调频方式，关键技术有软开关技术、同步整流技术等，这些对提高电源模块的品质和效率起了很大作用。

### 1.1.3 电源模块的主要特性

#### 1. 电源模块的输入参数

电源模块的输入参数主要有：输入标称电压  $V_{in}$ 、输入电压范围、输入电流、要求输入



端的过电压和欠压保护等。

## 2. 电源模块的输出参数

电源模块的输出参数主要有：输出标称电压  $V_o$ 、输出电压精度、输出电压调整范围、源电压效应、负载效应、输出电压噪声和纹波、输出电压的温度系数等。

## 3. 电源模块的绝缘特性

电源模块的绝缘特性指输入端和输出端的绝缘耐压值、输入端和基板之间的耐压值及输出端和基板之间的耐压值。它表示电源模块的安全特性。

## 4. 电源模块的效率

电源模块的效率是指电能利用率，也就是向负载输出功率与外部输入功率两者之比值。高效率的电源可以降低电源的自身功耗和发热量。效率计算公式为：

$$\eta = [(\text{输出电压} \times \text{输出电流}) \div (\text{输入电压} \times \text{输入电流})] \times 100\%$$

## 5. 电源模块的工作温度

电源模块的工作温度范围表示了电源模块工作的允许最高温度和可以启动的最低温度，反映电源模块允许工作的环境温度和机壳、基板的极限温度。

## 6. 电源模块的可靠性

失效率和 MTBF 反映电源模块的可靠性水平，由于元器件高度集成和生产制造中的先进工艺，电源模块的可靠性水平高于分立器件的开关电源。

### 1.1.4 电源模块的发展动向

电源模块经过电路拓扑的优化和工艺的更新，达到了一定的水平。以 Vicor 公司生产的电源模块为例，输入电压在 DC10 ~ 425V 间任选，输出电压在 DC1 ~ 95V 间任选，最大可调范围为输出标称电压的 10% ~ 110%，工作温度范围 -55 ~ 100℃，效率最高达 90% 以上。最新推出的晶片化电源模块 V · I Chip，更是把电源模块提高到更高的水平。不仅做到电源模块器件化，还可以做成 SMD 加工形式，为电源模块的应用开创了新纪元。图 1.2 所示为 V · I 晶片电源模块的外形图。外形尺寸为 32.5mm × 22.0mm × 6.6mm，功率密度 1036W/in<sup>3</sup>，效率最高可达 97%。

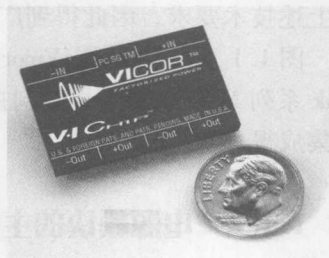


图 1.2 V · I 晶片电源模块的外形图

## 1.2 电源模块的基本原理和特性

### 1.2.1 Vicor 电源模块的电路原理

#### 1. VI—200 和 VI—J00 系列电源模块基本方框图

1984 年，Vicor 公司就率先生产出电源模块产品，称为 VI—200 系列和 VI—J00 系列。采用准谐振工作电路，最早实现了 ZCS 零电流软开关技术，电源模块基本方框图见图 1.3。

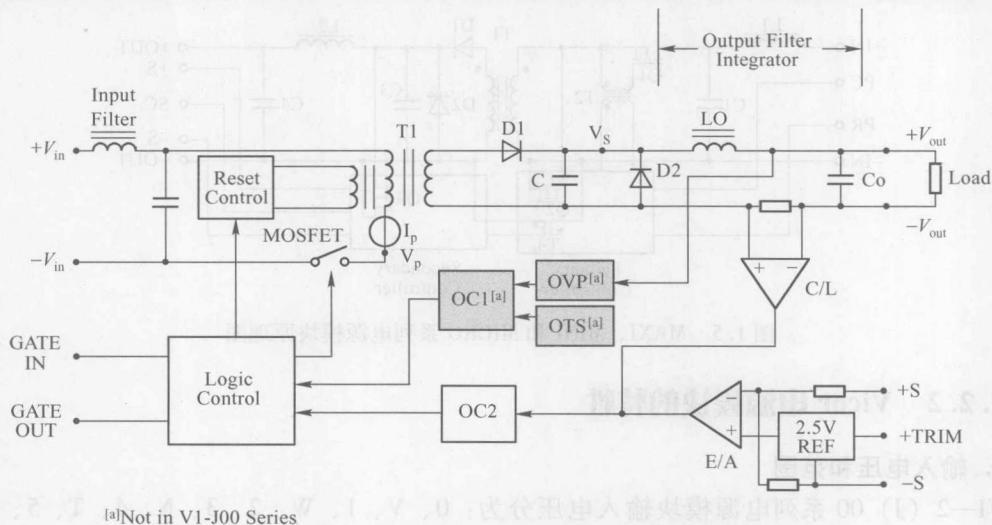


图 1.3 VI—200 和 VI—J00 系列电源模块基本方框图

谐振电路由变压器 T1 的漏感和电容 C 组成，开关管在电流过零时导通和关断，实现软开关 ZCS，避免了能量传输过程的损耗，减小了传导噪声和辐射噪声。整流管 D1 只允许单向传输能量，所以只谐振出近似正弦波的半波的波形来传输能量。电路具有过电流保护、过电压保护和过热保护功能（注：VI—J00 系列模块由于体积较小，没有过电压保护和过热保护功能），并能够以 2.5V 电压为基准，通过输出端 TRIM 脚调整输出电压。各部分工作波形见图 1.4。

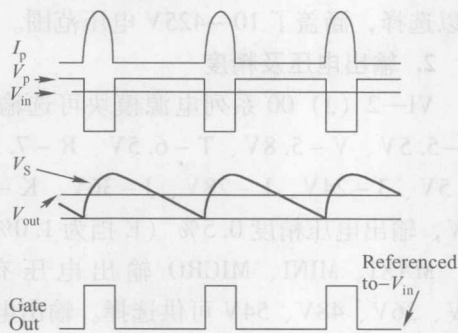


图 1.4 Vicor 电源模块各部分工作波形

Vicor 公司生产的 VI—2 (J) 00 系列模块采用变频工作的方式来调整输出功率，稳定输出。开关频率与负载电流成正比，与输入电压之平方成反比。最高工作频率可达 1MHz。

从图 1.3 可以看出，电源模块在输入端和输出端加入了 LC 滤波器。可以减小输出纹波和噪声。

## 2. MAXI、MINI 和 MICRO 系列电源模块的方框图

Vicor 公司在 2000 年前后，在 VI—200 和 VI—J00 的基础上，推出了新一代电源模块——MAXI、MINI 和 MICRO 系列电源模块。基本原理图见图 1.5。

首先，在准谐振电路的基础上，在共漏极主开关管实现了零电流 ZCS 和零电压 ZVS 软开关技术，进一步减小了损耗和噪声。其次，输入和输出分别采用主控 MCU 和输出控制 MCU 智能管理，并有变压器隔离，增加了控制功能和抗干扰能力。最高工作频率可达 2MHz。

在工艺上，增加了器件的集成度，减少了元件数量，减小了主要功率部件的热阻。总之在效率和功率密度上都有了较大的提高。

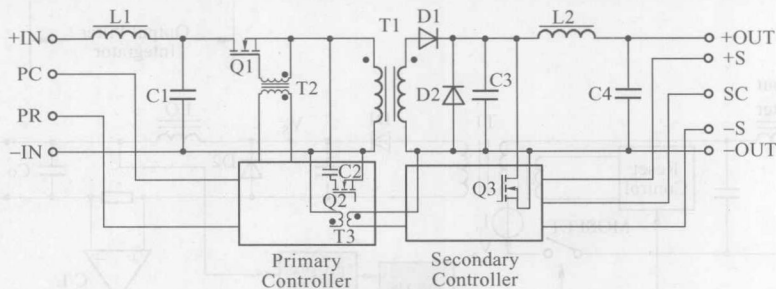


图 1.5 MAXI、MINI 和 MICRO 系列电源模块原理图

## 1.2.2 Vicor 电源模块的特性

### 1. 输入电压和范围

VI—2 (J) 00 系列电源模块输入电压分为：0、V、1、W、2、3、N、4、T、5、6、7 等 12 个参数可以选择，涵盖了 10~400V 的电压范围。

MAXI、MINI、MICRO 输入电压有 24V、28V、48V、72V、110V、150V、300V、375V 可以选择，涵盖了 10~425V 电压范围。

### 2. 输出电压及精度

VI—2 (J) 00 系列电源模块可选输出电压为：Z—2V、Y—3.3V、0—5V、X—5.2V、W—5.5V、V—5.8V、T—6.5V、R—7.5V、M—10V、1—12V、P—13.8V、2—15V、N—18.5V、3—24V、L—28V、J—36V、K—40V、4—48V、H—52V、F—72V、D—85V、B—95V，输出电压精度 0.5% (E 挡为 1.0%)

MAXI、MINI、MICRO 输出电压有：2V、3.3V、5V、8V、12V、15V、24V、28V、32V、36V、48V、54V 可供选择。输出电压设定精度为  $\pm 1\%$ ，源电压效应为  $\pm 0.02\%$ ，负载效应为  $\pm 0.02\%$ 。

### 3. 输出电压调整

VI—2 (J) 00 系列电源模块输出电压调整范围：50%~110%；

MAXI、MINI、MICRO 系列电源模块输出电压调整范围：10%~110%；

用一只电阻  $R_u$  或  $R_d$ ，可以完成固定输出电压的上调或下调，见图 1.6；

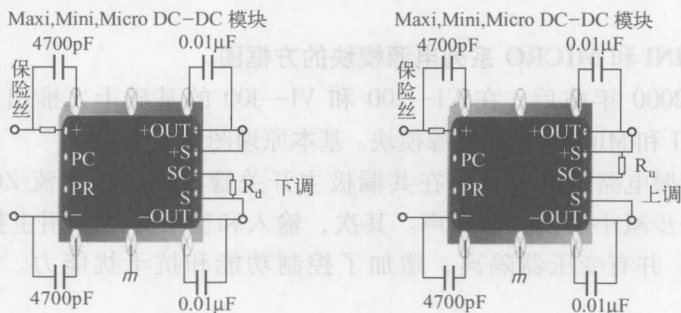


图 1.6 输出电压调节

用电位器或光耦可以完成连续调节，电位器 VI—2 (J) 00 系列模块用 10k $\Omega$ ，MAXI、MINI、MICRO 系列模块用 1k $\Omega$ 。 $R_u$  和  $R_d$  的数值可以在 Vicor 公司网站上的设计计算器中直



接获取，见图 1.7。

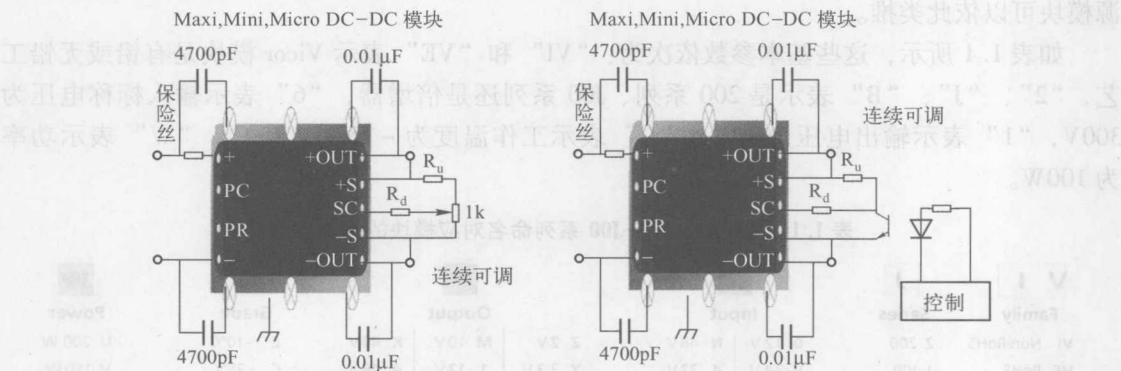


图 1.7 输出电压的连续调节

4. 工作温度等级 - 基板温度

VI—200 系列

E: -10 ~ +85℃

C: -25 ~ +85℃

I: -40 ~ +85℃

M: -55 ~ +85℃

VI—J00 系列

E: -10 ~ +100℃

C: -25 ~ +100℃

I: -40 ~ +100℃

M: -55 ~ +100℃

MAXI、MINI、MICRO 系列

E: -10 ~ +100℃

存储温度: -20 ~ +125℃

C: -20 ~ +100℃

-40 ~ +125℃

T: -40 ~ +100℃

-40 ~ +125℃

H: -40 ~ +100℃

-55 ~ +125℃

M: -55 ~ +100℃

-65 ~ +125℃

5. 绝缘强度

输入 - 输出: 3000V

输入 - 基板: 1500V

输出 - 基板: 500V

6. 安全认证

cULus、cTUVus、CE 标签。

7. Vicor 公司承诺

- (1) 网上可直接下载每一块电源模块的出厂测试和试验报告；
- (2) 模块正常工作损坏，两年内免费更换，同时会出具检测报告，告知模块的可能损坏原因。

1.3 电源模块的基本应用

1.3.1 电源模块的参数选择

以 Vicor 公司的 VI—200、VI—J00 系列为例，我们可以从电源模块型号的命名中了解到



模块的基本参数。同样，我们选取了某一组数值，就有对应的唯一参数的模块。其他品牌电源模块可以依此类推。

如表 1.1 所示，这些基本参数依次为：“VI”和“VE”表示 Vicor 模块是有铅或无铅工艺，“2”、“J”、“B”表示是 200 系列、J00 系列还是倍增器，“6”表示输入标称电压为 300V，“1”表示输出电压为 12V，“C”表示工作温度为  $-25 \sim +85^{\circ}\text{C}$ ，“W”表示功率为 100W。

表 1.1 V—200, V—J00 系列命名对应模块的基本参数

| VI - J |          | 6      |         | 1      |            | C      |         | W     |         |       |       |
|--------|----------|--------|---------|--------|------------|--------|---------|-------|---------|-------|-------|
| Family |          | Series |         | Input  |            | Output |         | Grade |         | Power |       |
| VI     | Non-RoHS | 2      | 200     | 0 12 V | N 48V      | Z 2V   | M 10V   | K 40V | E -10°C | U     | 200 W |
| VE     | RoHS     | J      | J00     | V 24 V | 4 72V      | Y 3.3V | 1 12V   | 4 48V | C -25°C | V     | 150 W |
|        |          | B      | Booster | 1 24V  | T 110V     | 0 5V   | P 13.8V | H 52V | I -40°C | W     | 100 W |
|        |          |        |         | W 24 V | 5 150V     | X 5.2V | 2 15V   | F 72V | M -55°C | X     | 75 W  |
|        |          |        |         | 2 36 V | 6 300V     | W 5.5V | N 18.5V | D 85V |         | Y     | 50 W  |
|        |          |        |         | 3 48 V | 7 150/300V | V 5.8V | 3 24V   | B 95V |         | Z     | 25 W  |
|        |          |        |         |        |            | T 6.5V | L 28V   |       |         |       |       |
|        |          |        |         |        |            | R 7.5V | J 36V   |       |         |       |       |

表 1.2 中数据表示全砖的 VI-2 (B) 00 系列模块和半砖的 VI-J00 系列模块对应输入和输出参数，单块模块可选的最大输出功率值。

表 1.2 单元模块对应输入输出设置可提供的最大输出功率

|            |               | Maximum Power available for VI-2(B)xx-xx |     |   |     |     |     |     |     |    |    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
|------------|---------------|------------------------------------------|-----|---|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|------|----|------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--|
|            |               | Output Voltages                          |     |   |     |     |     |     |     |    |    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| $V_{in}$   | Input         | 2                                        | 3.3 | 5 | 5.2 | 5.5 | 5.8 | 6.5 | 7.5 | 10 | 12 | 13.8 | 15 | 18.5 | 24 | 28 | 36 | 40 | 48 | 52 | 72 | 85 | 95 |  |
| Designator | Voltage       | Z                                        | Y   | 0 | X   | W   | V   | T   | R   | M  | 1  | P    | 2  | N    | 3  | L  | J  | K  | 4  | H  | F  | D  | B  |  |
| 0          | 12 (10-20)    | X                                        | X   | X | X   | X   | X   | X   | X   | X  | X  | X    | X  | X    | X  | X  | X  | X  | X  | X  | X  | X  | X  |  |
| V          | 24 (10-36)    | --                                       | X   | Y | Y   | Y   | Y   | Y   | X   | X  | X  | X    | X  | X    | X  | X  | X  | X  | X  | -- | -- | -- | -- |  |
| 1          | 24 (21-32)    | U                                        | U   | U | U   | U   | U   | V   | U   | U  | U  | U    | U  | U    | U  | U  | U  | U  | U  | U  | U  | U  | U  |  |
| W          | 24 (18-36)    | V                                        | V   | V | V   | V   | V   | W   | W   | V  | V  | V    | V  | V    | V  | V  | V  | V  | V  | V  | V  | V  | V  |  |
| 2          | 36 (21-56)    | W                                        | V   | W | W   | W   | W   | W   | W   | W  | W  | W    | W  | W    | W  | W  | W  | W  | W  | W  | -- | -- | -- |  |
| 3          | 48 (42-60)    | U                                        | U   | U | U   | U   | U   | U   | U   | U  | U  | U    | U  | U    | U  | U  | U  | U  | U  | U  | U  | U  | U  |  |
| N          | 48 (36-76)    | V                                        | U   | U | U   | U   | U   | U   | U   | U  | U  | U    | U  | U    | U  | U  | U  | U  | U  | U  | U  | U  | U  |  |
| 4          | 72 (55-100)   | U                                        | U   | U | U   | U   | U   | V   | V   | U  | U  | U    | U  | U    | U  | U  | U  | U  | U  | U  | U  | U  | U  |  |
| T          | 110 (66-160)  | V                                        | V   | V | V   | V   | V   | W   | W   | V  | V  | V    | V  | V    | V  | V  | V  | V  | V  | V  | -- | -- | -- |  |
| 5          | 150 (100-200) | U                                        | U   | V | V   | V   | V   | V   | V   | U  | U  | U    | U  | U    | U  | U  | U  | U  | U  | U  | U  | U  | U  |  |
| 7          | 150 (100-375) | W                                        | W   | Y | Y   | Y   | Y   | W   | W   | W  | W  | W    | W  | W    | W  | W  | W  | W  | W  | W  | -- | -- | -- |  |
| 6          | 300 (200-400) | U                                        | U   | U | U   | U   | U   | V   | V   | U  | U  | U    | U  | U    | U  | U  | U  | U  | U  | U  | U  | U  | U  |  |

|            |               | Maximum Power available for VI-Jxx-xx |     |   |     |     |     |     |     |    |    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
|------------|---------------|---------------------------------------|-----|---|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|------|----|------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--|
|            |               | Output Voltages                       |     |   |     |     |     |     |     |    |    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| $V_{in}$   | Input         | 2                                     | 3.3 | 5 | 5.2 | 5.5 | 5.8 | 6.5 | 7.5 | 10 | 12 | 13.8 | 15 | 18.5 | 24 | 28 | 36 | 40 | 48 | 52 | 72 | 85 | 95 |  |
| Designator | Voltage       | Z                                     | Y   | 0 | X   | W   | V   | T   | R   | M  | 1  | P    | 2  | N    | 3  | L  | J  | K  | 4  | H  | F  | D  | B  |  |
| 0          | 12 (10-20)    | X                                     | X   | Y | Y   | Y   | Y   | Y   | Y   | X  | X  | X    | X  | X    | X  | X  | X  | X  | X  | X  | X  | X  | X  |  |
| V          | 24 (10-36)    | --                                    | Y   | Y | Y   | Y   | Y   | Y   | Y   | Y  | Y  | Y    | Y  | Y    | Y  | Y  | Y  | Y  | Y  | -- | -- | -- | -- |  |
| 1          | 24 (21-32)    | W                                     | W   | W | W   | W   | W   | X   | X   | W  | W  | W    | W  | W    | W  | W  | W  | W  | W  | W  | W  | W  | W  |  |
| W          | 24 (18-36)    | W                                     | W   | W | W   | W   | W   | X   | X   | W  | W  | W    | W  | W    | W  | W  | W  | W  | W  | W  | W  | W  | W  |  |
| 2          | 36 (21-56)    | Y                                     | Y   | Y | Y   | Y   | Y   | Y   | Y   | X  | X  | X    | X  | X    | X  | X  | X  | X  | X  | -- | -- | -- | -- |  |
| 3          | 48 (42-60)    | W                                     | W   | W | W   | W   | W   | X   | X   | W  | W  | W    | W  | W    | W  | W  | W  | W  | W  | W  | W  | W  | W  |  |
| N          | 48 (36-76)    | W                                     | W   | X | X   | X   | X   | X   | X   | W  | W  | W    | W  | W    | W  | W  | W  | W  | W  | W  | W  | W  | W  |  |
| 4          | 72 (55-100)   | W                                     | W   | W | W   | W   | W   | X   | X   | W  | W  | W    | W  | W    | W  | W  | W  | W  | W  | W  | W  | W  | W  |  |
| T          | 110 (66-160)  | W                                     | W   | X | X   | X   | X   | X   | X   | W  | W  | W    | W  | W    | W  | W  | W  | W  | W  | W  | -- | -- | -- |  |
| 5          | 150 (100-200) | W                                     | W   | W | W   | W   | W   | X   | X   | W  | W  | W    | W  | W    | W  | W  | W  | W  | W  | W  | W  | W  | W  |  |
| 7          | 150 (100-375) | Y                                     | Y   | Y | Y   | Y   | Y   | Y   | Y   | X  | X  | X    | X  | X    | X  | X  | X  | X  | X  | X  | -- | -- | -- |  |
| 6          | 300 (200-400) | W                                     | W   | W | W   | W   | W   | X   | X   | W  | W  | W    | W  | W    | W  | W  | W  | W  | W  | W  | W  | W  | W  |  |