



电源系列丛书

# 直流开关电源 技术及应用

侯振义 等编著

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



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

电源系列丛书



# 直流开关电源技术及应用

侯振义 夏 峥 柏雪倩 孙 进 编著

電子工業出版社

**Publishing House of Electronics Industry**

北京 · BEIJING

# 前 言

近年来，国内直流开关电源技术无论理论研究，还是生产应用已有相当的成果和规模。高频、高效、高功率密度、高功率因数、高可靠性、高电气指标等特征，使开关电源具有更强的竞争力，应用领域不断扩大。20 世纪 80 年代，国内高频开关电源只在计算机、电视机等设备上使用，现在许多领域，如邮电通信、军事设备、交通设施、仪器仪表、工业设备、家用电器等越来越多应用开关电源，取得了显著效益。开关电源涉及多个学科，是一个技术密集型产品，不再是一个普通电源，但是目前用户对其了解甚少，维护使用方面存在问题较多，因此越来越普及使用的开关电源产品，与多数用户对开关电源知识的缺乏这一矛盾日渐突出。

随着开关电源应用的普及，以及科学技术的进步，对开关电源提出了新的更高的要求，例如计算机、自控、信息处理等行业，信息处理速度越来越高，供电电压一降再降，由原来 5V 降至 3.3V、1.8V、1.2V 等；而工作电流越来越大，使得原来的电路技术特别是整流技术效率大大下降而不再适用。因此，必须采用新的器件，研究新的电路。随着我国加入世贸组织，产品绿色化成为必然，开关电源的电磁兼容标准的执行，将从软执行阶段进入强制执行阶段，其电磁兼容技术将得到高度重视和特别研究。另外，随着电子技术、电力电子技术、计算机技术、集成电路技术的发展，开关电源新的控制理论、新的变换技术、新的电子器件、新的电磁材料、新的生产工艺不断出现，丰富了直流开关电源技术的内容，提高了开关电源的水平，使开关电源不再是傻、大、笨、重的设备，而成为具有智能、轻薄、短小的装置，其精致、灵巧程度可与主机媲美。而反映直流开关电源技术以上新进展、揭示最新开关电源产品奥秘的书籍资料，已成为众多读者的迫切需求。

关于直流开关电源的著述较多，有的成书较早，加之直流开关电源技术发展迅猛，难以反映近年来的新成果、新理论，有的则是侧重某一应用领域的开关电源专著，如计算机开关电源、电视机开关电源、通信开关电源等，未能从直流开关电源技术的高度全面、系统地阐述其原理及应用。本书试图从开关电源构成的功能电路出发，全面系统地介绍其工作原理、实用电路，特别突出反映了近年来开关电源方面的新技术、新成果。本书侧重理论基础和原理分析，侧重测试方法和测试技巧，旨在使读者打牢有关开关电源方面的理论基础和实践基础，跟上开关电源发展的步伐。为了使读者对开关电源技术有一个完整深刻的了解，本书第 12 章给出了具有代表性的应用实例，不仅有硬开关实例，也有软开关实例；不仅有小型开关电源实例，而且有大型开关整流器实例。本书可作为大、中专院校相关专业选修课教材及开关电源维护使用人员的培训教材，还可供从事开关电源设计、使用、维护的工程技术人员及其他从事电力电子工程的技术人员参考。

本书第 1 章、第 5 章、第 8 章、第 10 章、第 12 章由侯振义同志编写，第 2 章、第 4 章、第 6 章由夏峥同志编写，第 9 章、第 11 章由柏雪倩同志编写，第 3 章、第 7 章由孙进同志编写，全书由侯振义综合整理并作了文字加工。

本书在编写过程中得到了中国电源学会、陕西省电源学会、西安市电源学会专家的指导，特别是中国电源学会常务理事、哈尔滨工业大学谭信教授对本书的系统编排、章节内容

等给予了具体指导。本书经陕西省电源学会赵建统理事长审阅，提出了许多宝贵的修改意见。在此谨向上述专家教授致以衷心的感谢。

作者在编写时查阅参考了许多文献，在此对文献作者表示感谢。

开关电源技术浩如烟海，一书实难尽述。另外，电源新技术不断涌现，加之作者实践有限，不妥之处在所难免，敬请专家及读者批评指正。

编 著 者  
2005 年于西安

# 目 录

|   |    |
|---|----|
| <b>第 1 章 开关电源概论</b> .....               | 1  |
| 1.1 开关电源稳压原理 .....                      | 1  |
| 1.1.1 开关电源稳压原理 .....                    | 1  |
| 1.1.2 开关电源三种调制方式 .....                  | 1  |
| 1.2 PWM 控制模式及其特点 .....                  | 2  |
| 1.2.1 电压型 PWM 控制 .....                  | 2  |
| 1.2.2 峰值电流型 PWM 控制 .....                | 3  |
| 1.2.3 平均电流型 PWM 控制 .....                | 4  |
| 1.2.4 滞环电流型 PWM 控制 .....                | 5  |
| 1.2.5 相加型 PWM 控制 .....                  | 6  |
| 1.3 开关电源主要技术指标及测试 .....                 | 7  |
| 1.3.1 开关电源输入技术指标 .....                  | 7  |
| 1.3.2 开关电源输出技术指标 .....                  | 8  |
| 1.3.3 其他指标 .....                        | 10 |
| 1.3.4 开关电源主要指标测试 .....                  | 11 |
| <b>第 2 章 开关电源中的关键元器件</b> .....          | 14 |
| 2.1 压控型功率开关 .....                       | 14 |
| 2.1.1 功率开关发展综述 .....                    | 14 |
| 2.1.2 功率 MOSFET .....                   | 14 |
| 2.1.3 绝缘门极晶体管 IGBT .....                | 17 |
| 2.1.4 IGBT/MOSFET 并联组合管 .....           | 20 |
| 2.2 智能功率模块 IPM .....                    | 21 |
| 2.2.1 智能功率模块 (IPM) 工作原理 .....           | 21 |
| 2.2.2 IPM 基本性能 .....                    | 22 |
| 2.3 智能功率开关 .....                        | 23 |
| 2.3.1 智能功率开关简介 .....                    | 23 |
| 2.3.2 PWM 电流型智能开关 .....                 | 23 |
| 2.3.3 PWM 电压型智能开关 .....                 | 24 |
| 2.3.4 ON/OFF 控制型智能开关 .....              | 25 |
| 2.3.5 RF 变频控制型智能开关 .....                | 26 |
| 2.3.6 复合控制型 (PWM 型+ON/OFF 型) 智能开关 ..... | 26 |
| 2.4 高频整流管 .....                         | 27 |
| 2.4.1 二极管的性能参数 .....                    | 27 |
| 2.4.2 快恢复二极管 (FRD) .....                | 28 |

|              |                      |           |
|--------------|----------------------|-----------|
| 2.4.3        | 超快恢复二极管 (UFRD)       | 29        |
| 2.4.4        | 肖特基二极管               | 29        |
| 2.5          | 电容器                  | 31        |
| 2.5.1        | 电容器的分类、型号及其特点        | 31        |
| 2.5.2        | 电容器的选择及其应用技巧         | 34        |
| 2.6          | 开关电源中的电磁器件           | 36        |
| 2.6.1        | 常规高频变压器              | 36        |
| 2.6.2        | 铁氧体平面高频电磁器件          | 37        |
| 2.6.3        | 薄膜高频电磁器件             | 39        |
| 2.6.4        | 高频电感                 | 39        |
| 2.7          | 开关电源中的其他器件           | 40        |
| 2.7.1        | 可调精密基准               | 40        |
| 2.7.2        | 线性光耦                 | 41        |
| 2.7.3        | 瞬态电压抑制器              | 42        |
| 2.7.4        | 自恢复熔丝                | 44        |
| 2.7.5        | 热敏电阻器                | 46        |
| 2.7.6        | 压敏电阻避雷器              | 48        |
| <b>第 3 章</b> | <b>高频整流电路</b>        | <b>50</b> |
| 3.1          | 同步整流                 | 50        |
| 3.1.1        | 普通整流的缺陷              | 50        |
| 3.1.2        | MOSFET 模型            | 50        |
| 3.1.3        | 自驱动电压型同步整流           | 51        |
| 3.1.4        | 外驱动同步整流              | 52        |
| 3.1.5        | 同步整流专用控制驱动器          | 53        |
| 3.2          | 异步整流                 | 55        |
| 3.2.1        | 异步整流工作原理             | 55        |
| 3.2.2        | 异步整流驱动电路             | 55        |
| 3.3          | 倍流整流电路               | 56        |
| <b>第 4 章</b> | <b>硬开关 DC/DC 变换器</b> | <b>58</b> |
| 4.1          | 非隔离型硬开关 DC/DC 变换器    | 58        |
| 4.1.1        | 升压型 DC/DC 变换器        | 58        |
| 4.1.2        | 降压型 DC/DC 变换器        | 60        |
| 4.1.3        | 降压-升压型 DC/DC 变换器     | 62        |
| 4.2          | 单端反激 DC/DC 变换器       | 64        |
| 4.2.1        | 单端反激 DC/DC 变换器主电路    | 64        |
| 4.2.2        | 单端反激 DC/DC 变换器特性     | 65        |
| 4.2.3        | 主要参数计算及选择            | 65        |
| 4.3          | 单端正激 DC/DC 变换器       | 66        |
| 4.3.1        | 单端正激 DC/DC 变换器主电路    | 66        |
| 4.3.2        | 单端正激 DC/DC 变换器磁复位技术  | 67        |

|              |                                  |            |
|--------------|----------------------------------|------------|
| 4.3.3        | 单端正激 DC/DC 变换器特性 .....           | 67         |
| 4.3.4        | 主要参数计算及选择 .....                  | 68         |
| 4.4          | 推挽型 DC/DC 变换器 .....              | 68         |
| 4.4.1        | 推挽型 DC/DC 变换器主电路 .....           | 68         |
| 4.4.2        | 推挽型 DC/DC 变换器特性 .....            | 69         |
| 4.4.3        | 主要参数计算及选择 .....                  | 70         |
| 4.5          | 半桥型 DC/DC 变换器 .....              | 70         |
| 4.5.1        | 半桥型 DC/DC 变换器主电路 .....           | 70         |
| 4.5.2        | 半桥型 DC/DC 变换器特性 .....            | 72         |
| 4.6          | 全桥型 DC/DC 变换器 .....              | 73         |
| <b>第 5 章</b> | <b>软开关 DC/DC 变换器 .....</b>       | <b>74</b>  |
| 5.1          | 谐振电路原理 .....                     | 74         |
| 5.1.1        | LC 串联谐振电路 .....                  | 74         |
| 5.1.2        | 零电流谐振开关 .....                    | 75         |
| 5.1.3        | 零电压谐振开关 .....                    | 75         |
| 5.2          | 变频控制软开关 DC/DC 变换器 .....          | 76         |
| 5.2.1        | 零电流准谐振降压变换器 .....                | 76         |
| 5.2.2        | 零电压准谐振正激变换器 .....                | 78         |
| 5.2.3        | 零电流准谐振半桥变换器 .....                | 80         |
| 5.3          | 恒频控制零电压 PWM 和零电流 PWM 变换器 .....   | 83         |
| 5.3.1        | 降压型零电流 PWM 变换器 .....             | 83         |
| 5.3.2        | 降压型零电压 PWM 变换器 .....             | 85         |
| 5.3.3        | 正激型零电压 PWM 变换器 .....             | 87         |
| 5.4          | 恒频控制零转换 PWM 变换器 .....            | 93         |
| 5.4.1        | 零电流转换 PWM 变换器 .....              | 94         |
| 5.4.2        | 零电压转换 PWM 变换器 .....              | 96         |
| 5.5          | 恒频移相控制全桥零电压 PWM 变换器 .....        | 96         |
| 5.5.1        | 恒频移相控制全桥零电压 PWM 变换器工作原理 .....    | 97         |
| 5.5.2        | 带辅助支路的恒频移相控制全桥零电压 PWM 变换器 .....  | 102        |
| 5.6          | 全软开关 PWM 变换器 .....               | 105        |
| 5.6.1        | 双管降压型全软开关 PWM 变换器 .....          | 105        |
| 5.6.2        | 带反馈降压型全软开关 PWM 变换器 .....         | 108        |
| <b>第 6 章</b> | <b>控制电路 .....</b>                | <b>112</b> |
| 6.1          | 电压型脉宽调制控制器 .....                 | 112        |
| 6.1.1        | 电压型脉宽调制控制器型号及特点 .....            | 112        |
| 6.1.2        | 电压型脉宽调制控制器 TL494 .....           | 113        |
| 6.1.3        | 电压型脉宽调制控制器 CW3525A/CW3527A ..... | 116        |
| 6.2          | 电流型脉宽调制控制器 .....                 | 117        |
| 6.2.1        | 电流型脉宽调制控制器型号及特点 .....            | 117        |
| 6.2.2        | 电流型脉宽调制控制器 UC3842/3/4/5 .....    | 119        |

|              |                                |            |
|--------------|--------------------------------|------------|
| 6.2.3        | 电流型脉宽调制控制器 UC3846 .....        | 122        |
| 6.3          | 变频控制软开关控制器 .....               | 125        |
| 6.3.1        | 变频控制软开关控制器型号及其特点 .....         | 125        |
| 6.3.2        | 变频控制软开关控制器 UC3861~UC3868 ..... | 126        |
| 6.4          | 移相式全桥零电压 PWM 控制器 .....         | 132        |
| 6.4.1        | 移相式全桥零电压 PWM 控制器型号及其特点 .....   | 132        |
| 6.4.2        | 移相式控制器 UC1875 工作原理 .....       | 133        |
| 6.4.3        | 改进型移相式控制器 UC1879 .....         | 142        |
| 6.4.4        | 低功耗移相式控制器 UCC1895 .....        | 142        |
| <b>第 7 章</b> | <b>驱动电路 .....</b>              | <b>143</b> |
| 7.1          | 功率晶体管基极驱动电路 .....              | 143        |
| 7.1.1        | 晶体管的理想驱动波形 .....               | 143        |
| 7.1.2        | 晶体管抗饱和驱动电路 .....               | 143        |
| 7.1.3        | 晶体管固定反偏压驱动电路 .....             | 144        |
| 7.1.4        | 晶体管单极性脉冲变压器驱动电路 .....          | 144        |
| 7.1.5        | 晶体管比例驱动电路 .....                | 145        |
| 7.2          | 功率 MOS 管栅极驱动电路 .....           | 145        |
| 7.2.1        | 功率 MOS 管对驱动电路的要求 .....         | 145        |
| 7.2.2        | 非隔离型 MOS 管驱动电路 .....           | 146        |
| 7.2.3        | 单端隔离型 MOS 管驱动电路 .....          | 146        |
| 7.2.4        | 双端隔离型 MOS 管驱动电路 .....          | 147        |
| 7.3          | IGBT 栅极驱动电路 .....              | 147        |
| 7.3.1        | IGBT 对驱动电路的要求 .....            | 147        |
| 7.3.2        | 非隔离 IGBT 驱动电路 .....            | 148        |
| 7.3.3        | 小功率 IGBT 隔离驱动电路 .....          | 148        |
| 7.3.4        | 大功率 IGBT 隔离驱动电路 .....          | 149        |
| 7.3.5        | 光耦隔离 IGBT 驱动电路 .....           | 149        |
| <b>第 8 章</b> | <b>功率因数校正电路 .....</b>          | <b>151</b> |
| 8.1          | 概述 .....                       | 151        |
| 8.1.1        | 功率因数的基本定义 .....                | 151        |
| 8.1.2        | 低功率因数电源存在的问题 .....             | 151        |
| 8.2          | 有源功率因数校正原理 .....               | 152        |
| 8.2.1        | 不连续工作模式校正原理 .....              | 152        |
| 8.2.2        | 连续工作模式校正原理 .....               | 153        |
| 8.3          | 有源功率因数校正功率级电路 .....            | 155        |
| 8.3.1        | PFC 充电泵电路 .....                | 155        |
| 8.3.2        | 大功率功率因数校正电路 .....              | 158        |
| 8.3.3        | 软开关功率因数校正电路 .....              | 161        |
| 8.3.4        | 单级隔离型功率因数校正电路 .....            | 163        |
| 8.3.5        | 三相功率因数校正电路 .....               | 166        |



|             |                           |            |
|-------------|---------------------------|------------|
| 8.4         | 有源功率因数校正控制器及应用            | 168        |
| 8.4.1       | 平均电流型功率因数校正控制器            | 168        |
| 8.4.2       | 软开关功率因数校正控制器              | 173        |
| 8.4.3       | PWM/PFC 二合一控制器及应用         | 182        |
| <b>第9章</b>  | <b>开关电源中的其他功能电路</b>       | <b>191</b> |
| 9.1         | 误差放大和校正电路                 | 191        |
| 9.1.1       | 误差放大电路                    | 191        |
| 9.1.2       | 校正电路                      | 191        |
| 9.2         | 输入软启动电路                   | 193        |
| 9.2.1       | 热敏电阻组成的软启动电路              | 193        |
| 9.2.2       | 晶闸管组成的软启动电路               | 193        |
| 9.3         | 保护电路                      | 194        |
| 9.3.1       | 输入过压、欠压及过热保护电路            | 194        |
| 9.3.2       | 输出过流、短路及过热保护电路            | 195        |
| 9.3.3       | 多重过流保护                    | 196        |
| 9.3.4       | 缺相保护电路                    | 197        |
| 9.4         | 待机电路                      | 198        |
| 9.4.1       | 具有待机功能的电流型 PWM 控制芯片 L5991 | 199        |
| 9.4.2       | 普通 PWM 控制芯片增加待机功能         | 200        |
| 9.5         | 无源缓冲电路                    | 201        |
| 9.5.1       | 原边缓冲电路                    | 201        |
| 9.5.2       | 开关管缓冲电路                   | 202        |
| 9.5.3       | CD <sup>2</sup> 型无损缓冲电路   | 203        |
| 9.6         | 显示电路                      | 205        |
| 9.6.1       | 数码管电压、电流显示电路              | 205        |
| 9.6.2       | 数字液晶电压、电流显示电路             | 207        |
| <b>第10章</b> | <b>开关电源干扰及抑制</b>          | <b>208</b> |
| 10.1        | 开关电源干扰                    | 208        |
| 10.1.1      | 开关电源电磁兼容标准                | 208        |
| 10.1.2      | 开关电源内部干扰                  | 209        |
| 10.1.3      | 开关电源外部干扰                  | 209        |
| 10.2        | 开关电源干扰耦合途径                | 210        |
| 10.2.1      | 传导耦合                      | 210        |
| 10.2.2      | 辐射耦合                      | 212        |
| 10.3        | 采用 EMI 滤波抑制开关电源干扰         | 213        |
| 10.3.1      | EMI 滤波器基本电路、技术参数及测试方法     | 213        |
| 10.3.2      | EMI 滤波器选用、安装及注意事项         | 216        |
| 10.4        | 采用接地技术抑制开关电源干扰            | 217        |
| 10.4.1      | 开关电源接地系统类别                | 217        |
| 10.4.2      | 单点接地                      | 217        |

|               |  |            |
|---------------|--|------------|
| 10.4.3        | 多点接地                                     | 219        |
| 10.4.4        | 混合接地                                     | 219        |
| 10.4.5        | 悬浮接地                                     | 220        |
| 10.5          | 采用屏蔽技术抑制开关电源干扰                           | 220        |
| 10.5.1        | 屏蔽效能                                     | 220        |
| 10.5.2        | 屏蔽设计难点及要点                                | 220        |
| 10.5.3        | 采用电磁密封衬垫减少电磁泄漏                           | 221        |
| 10.6          | 采用新的控制方法抑制开关电源干扰                         | 223        |
| 10.6.1        | 调制频率控制原理                                 | 223        |
| 10.6.2        | 新型控制方法应用                                 | 224        |
| <b>第 11 章</b> | <b>开关电源并联技术</b>                          | <b>226</b> |
| 11.1          | 并联均流的基本方法                                | 226        |
| 11.1.1        | 内阻法                                      | 226        |
| 11.1.2        | 主/从控制法                                   | 227        |
| 11.1.3        | 自动负载均流法                                  | 227        |
| 11.1.4        | 最大电流自动均流法                                | 228        |
| 11.1.5        | 强迫均流法                                    | 228        |
| 11.2          | 均流控制器 UC3907 及其应用                        | 229        |
| 11.2.1        | 均流集成控制器 UC3907                           | 229        |
| 11.2.2        | 均流控制器 UC3907 应用                          | 231        |
| 11.3          | 均流控制器 UC3902 及其应用                        | 234        |
| 11.3.1        | 均流控制器 UC3902 工作原理                        | 235        |
| 11.3.2        | 均流控制器 UC3902 外围电路设计                      | 236        |
| 11.3.3        | 均流控制器 UC3902 应用                          | 237        |
| <b>第 12 章</b> | <b>开关电源技术应用</b>                          | <b>240</b> |
| 12.1          | 开关电源技术在通信领域的应用                           | 240        |
| 12.1.1        | 24V 开关电源 (硬开关)                           | 240        |
| 12.1.2        | 1000W、48V 开关电源 (软开关)                     | 246        |
| 12.1.3        | 智能软开关整流器                                 | 247        |
| 12.2          | 直流开关电源技术在直流调速中的应用                        | 255        |
| 12.2.1        | 在有刷和无刷直流电动机中的应用                          | 255        |
| 12.2.2        | 在步进电动机细分驱动中的应用                           | 256        |
| 12.2.3        | 在开关磁阻电动机调速控制中的应用                         | 257        |
| 12.3          | 直流开关电源技术在辅助电源中的应用                        | 259        |
| 12.3.1        | 输出 $\pm 12\text{V}$ 、 $+5\text{V}$ 的辅助电源 | 259        |
| 12.3.2        | 三相逆变器辅助电源                                | 260        |
| 12.3.3        | 复合型辅助电源                                  | 261        |
| 12.3.4        | 零电压谐振型辅助电源                               | 262        |
| 12.4          | 直流开关电源技术在家电中的应用                          | 263        |
| 12.4.1        | 彩色电视机新型开关电源                              | 263        |

|                   |                        |            |
|-------------------|------------------------|------------|
| 12.4.2            | 摄录像机电池快速充电器 .....      | 263        |
| 12.4.3            | 机顶盒电源 (35W) .....      | 265        |
| 12.5              | 直流开关电源技术在其他方面的应用 ..... | 267        |
| 12.5.1            | 大功率超声波电源 .....         | 267        |
| 12.5.2            | 脉冲电弧焊接电源 .....         | 269        |
| <b>参考文献</b> ..... |                        | <b>272</b> |

# 第 1 章 开关电源概论

## 1.1 开关电源稳压原理

线性稳压电源，虽然电特性优良，但由于功率调整器件串联在负载回路里，而且工作在线性区，因此功率转换效率比较低。为了提高效率，就必须使功率调整器件处于开关工作状态。作为开关而言，导通时压降很小，几乎不消耗能量，关断时漏电流很小，也几乎不消耗能量，所以开关稳压电源的功率转换效率可达 80% 以上。

### 1.1.1 开关电源稳压原理

开关电源示意图如图 1-1 所示。

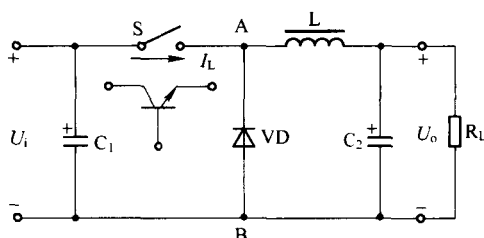


图 1-1 开关电源示意图

开关 S 以一定的时间间隔重复地接通和断开，在开关 S 接通时，输入电源  $U_i$  通过开关 S 和电感 L 滤波电路提供给负载  $R_L$ ，在整个开关接通期间，电源  $U_i$  向负载提供能量，同时电感 L 储存能量；当开关 S 断开时，储存在电感 L 中的能量通过二极管 VD 释放给负载，使负载得到连续而稳定的能量。在滤波电路 AB 间得到的电压平均值  $U_{AB}$  可用下式表示：

$$U_{AB} = \frac{t_{ON}}{T} U_i \quad (1-1)$$

式中， $t_{ON}$  为开关每次接通的时间， $T$  为开关通断的工作周期（即开关接通时间  $t_{ON}$  和关断时间  $t_{OFF}$  之和）。由式（1-1）可知，改变开关接通时间和工作周期的比例，AB 间电压的平均值也随之改变。因此，随着负载及输入电源电压的变化自动调整  $t_{ON}$  和  $T$  的比例便能使输出电压  $U_o$  维持不变。改变开关接通时间  $t_{ON}$  和工作周期  $T$  的比例亦即改变脉冲的占空比，这种方法称为“时间比率控制”。

### 1.1.2 开关电源三种调制方式

按时间比率控制原理，开关电源有三种调制方式，即脉冲宽度调制方式、脉冲频率调制方式和混合调制方式。

### 1. 脉冲宽度调制 (Pulse Width Modulation, PWM)

脉冲宽度调制方式指开关周期恒定, 通过改变脉冲宽度来改变占空比的方式。因为周期恒定, 滤波电路的设计容易。但受最小未通时间的限制, 输出端需接假负载。

### 2. 脉冲频率调制 (Pulse Frequency Modulation, PFM)

脉冲频率调制方式是指导通脉冲宽度恒定, 通过改变开关工作频率来改变占空比的方式。因为  $t_{ON}/T$  可以在很宽的范围内变化, 输出电压的可调范围也较 PWM 方式大, 同时, 只需极小的假负载。当然, 滤波电路要能在较宽的频率范围内正常工作, 因而, 滤波器体积较大是其不足之处。

### 3. 混合调制

混合调制方式是指导通脉冲宽度和开关工作频率均不固定, 彼此都能改变的方式, 它是上两种方式的混合。 $t_{ON}$  和  $T$  相对地发生变化, 在频率变化不大的情况下, 可以得到非常大的可调范围的输出电压, 因此, 用来制作要求能宽范围调节输出电压的实验室用电源非常合适。

## 1.2 PWM 控制模式及其特点

在开关电源三种调制方式中, 脉冲宽度调制 (PWM) 方式应用最普遍, 因此, 本节主要讲述五种 PWM 控制模式及其特点。

### 1.2.1 电压型 PWM 控制

#### 1. 电压型 PWM 控制基本原理

电压型 PWM 控制是 20 世纪 60 年代后期开关稳压电源刚刚开始发展时所采用的第一种控制方法。该方法与一些必要的过电流保护电路相结合, 至今仍然在工业界广泛应用。

电压型 PWM 控制只有一个电压反馈闭环, 采用脉冲宽度调制法, 即将电压误差放大器采样放大的慢变化的直流信号  $U_e$  与恒定频率的三角波电压  $U_s$  上斜坡相比较, 通过脉冲宽度调制原理, 得到当时的脉冲宽度  $t_{on}$ , 该信号经过驱动电路功率放大得到开关管控制信号  $U_g$ , 如图 1-2 (a) 中所示的波形。逐个脉冲的限流保护电路必须另外附加。当输入电压突然变小或负载阻抗突然变小时, 因为主电路有较大的输出电容  $C$  及电感  $L$  相移延时作用, 输出电压的变小也延时滞后。输出电压变小的信息还要经过电压误差放大器的补偿电路延时滞后, 才能传至 PWM 比较器将脉宽展宽。这两个延时滞后作用是暂态响应慢的主要原因。

#### 2. 电压型 PWM 控制的优缺点

##### 1) 电压型 PWM 控制的优点

- (1) 单一反馈电压闭环设计、调试比较容易;
- (2) 对输出负载的变化有较好的响应调节;
- (3) PWM 三角波幅值较大, 脉冲宽度调节时具有较好的抗噪声裕量;
- (4) 对于多路输出电源, 它们之间的交互调节效应较好。

##### 2) 电压型 PWM 控制的缺点

- (1) 对输入电压的变化动态响应较慢;
- (2) 补偿网络设计本来就较为复杂, 闭环增益随输入电压变化而变化, 使其更为复杂;
- (3) 输出 LC 滤波器给控制环增加了双极点, 在补偿设计误差放大器时, 需要将主极点

低频衰减，或者增加一个零点进行补偿。

### 3. 加快电压型 PWM 控制瞬态响应速度的方法

加快电压型 PWM 控制瞬态响应速度的方法有两种：

一是增加电压误差放大器的带宽，保证具有一定的高频增益。但是这样容易受高频开关噪声干扰影响，需要在主电路及反馈控制电路上采取措施进行抑制或同相位衰减平滑处理。

另一种方法是采用电压前馈模式控制 PWM 技术，原理如图 1-2 (b) 所示。用输入电压  $U_i$  对电阻电容 ( $R_{FT}$ 、 $C_{FT}$ ) 充电产生的具有可变化的三角波取代传统电压型 PWM 控制中振荡器产生的固定三角波。此时，输入电压变化能立刻在脉冲宽度的变化上反映出来。因此，该方法对输入电压的变化引起的瞬态响应速度明显提高。对输入电压的前馈控制是开环控制，而对输出电压的控制是闭环控制，目的是增加对输入电压变化的动态响应速度。这是一个由开环和闭环构成的双环控制系统。

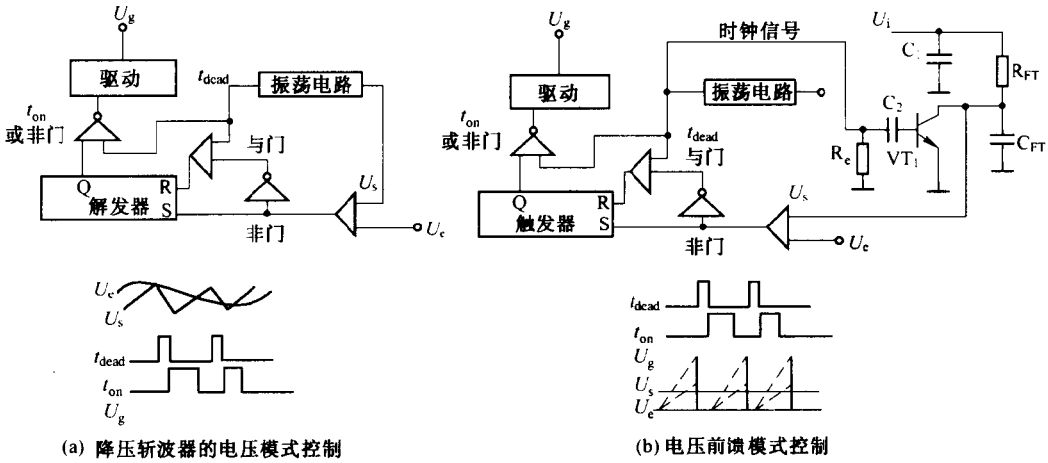


图 1-2 电压型 PWM 控制原理图

## 1.2.2 峰值电流型 PWM 控制

### 1. 峰值电流型 PWM 控制基本原理

峰值电流型 PWM 控制 (Peak Current-mode Control PWM) 简称电流型控制，其控制原理如图 1-3 所示，误差电压信号  $U_e$  送至 PWM 比较器后，与合成波形信号  $U_\Sigma$  比较，而合成波形信号  $U_\Sigma$  要有斜坡补偿信号与实际电感电流信号两部分合成才能构成，所以电流型控制并不是像电压型那样与振荡电路产生的固定三角波状电压斜坡比较，而是与一个变化的，其峰值代表输出电感电流峰值的三角波形或梯形尖角状合成波形信号  $U_\Sigma$  相比较，然后得到 PWM 脉冲关断时刻。因此，电流型控制是一种固定时钟开启，峰值电流关断的控制方法，先直接控制输出侧电感电流峰值的大小，然后间接地控制 PWM 脉冲宽度。

峰值电流型 PWM 控制是双闭环控制系统，电压外环控制电流内环。电流内环是瞬时快速按照逐个脉冲工作的。功率级是由电流内环控制的电流源，而电压外环控制此功率级电流源。在该双环控制中，电流内环只负责输出电感的动态变化，因而电压外环仅需控制输出电容，不必控制 LC 储能电路。因此，峰值电流型 PWM 控制具有比电压型控制大得多的带宽。



比较器比较得到 PWM 关断时刻。  $U_{ca}$  的波形与电流波形  $U_i$  反相，所以是由  $U_{ca}$  的下斜坡（对应于开关器件导通时期）与三角波  $U_T$  或  $U_s$  的上斜坡比较产生关断信号。显然，这就无形中增加了一定的斜坡补偿。为了避免次谐波振荡，  $U_{ca}$  的上斜坡不能超过三角锯齿波信号  $U_T$  或  $U_s$  的上斜坡。

图 1-4 (b) 为增加输入电压前馈功能的平均电流型 PWM 控制原理图，非常适合我国电网输入电压变化幅度大、变化速度快的情况。

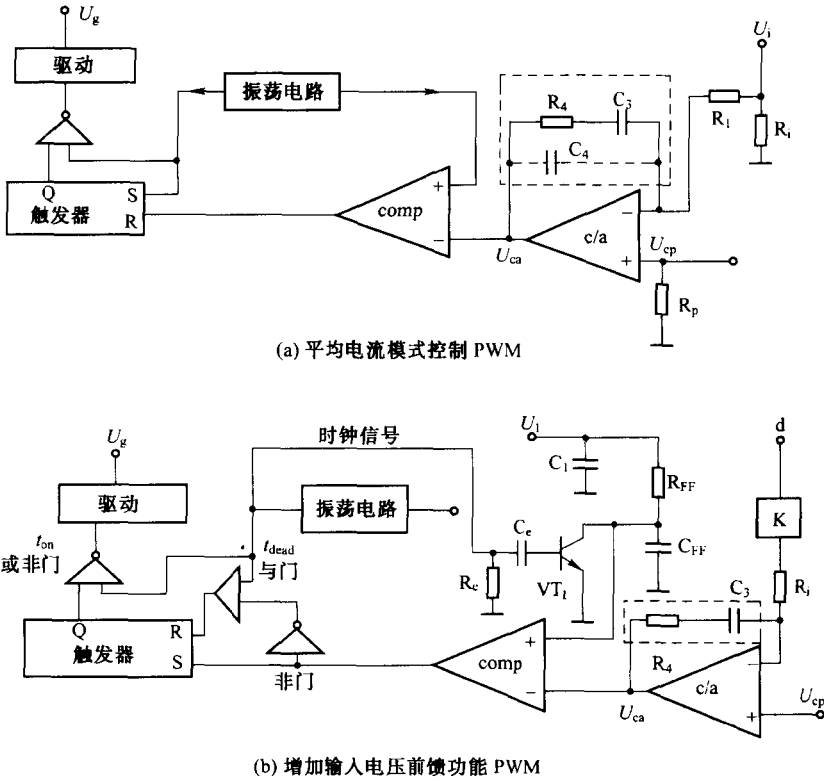


图 1-4 平均电流型 PWM 控制原理图

## 2. 平均电流型 PWM 控制的优缺点

### 1) 平均电流型控制的优点

- (1) 平均电感电流能够高度精确地跟踪电流基准信号；
- (2) 不需要斜坡补偿；
- (3) 调试好的电路抗噪声性能优越；
- (4) 适合于任何电路拓扑对输入或输出电流的控制；
- (5) 易于实现均流。

### 2) 平均电流型控制的缺点

- (1) 电流放大器在开关频率处的最大增益有限制；
- (2) 双闭环放大器带宽、增益等配合参数设计调试复杂。

## 1.2.4 滞环电流型 PWM 控制

### 1. 滞环电流型 PWM 控制基本原理

滞环电流型 PWM 控制 (Hysteretic Current-mode Control PWM) 为变频调制，也可以为



定频调制。如图 1-5 所示为变频调制的滞环电流型 PWM 控制。将电感电流信号  $U_c$  与两个电压值比较，第一个较高的控制电压值  $U_o$  为输出电压，它控制开关器件的关断时刻；第二个较低的控制电压值  $U_{ch}$  由电压  $U_o$  减去一个固定电压值  $U_h$  而得到， $U_h$  为滞环带， $U_{ch}$  控制开关器件的开启时刻。滞环电流型控制由输出电压值  $U_o$ 、控制电压值  $U_c$  及  $U_{ch}$  三个电压值确定一个稳定状态，比电流型控制多一个控制电压值  $U_{ch}$ ，减少了发生次谐波振荡的可能性。

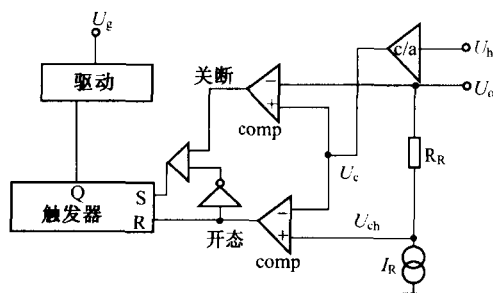


图 1-5 滞环电流型 PWM 控制原理图

## 2. 滞环电流型 PWM 控制的优缺点

### 1) 滞环电流型控制的优点

- (1) 不需要斜坡补偿；
- (2) 稳定性好，不容易因噪声而发生不稳定振荡。

### 2) 滞环电流型控制的缺点

- (1) 需要对电感电流进行全周期的检测和控制；
- (2) 变频控制容易产生变频噪声。

## 1.2.5 相加型 PWM 控制

### 1. 相加型 PWM 控制基本原理

图 1-6 为相加型 PWM 控制（Summing-mode Control PWM）的原理图。与图 1-2 所示的电压型控制有些相似，但有两点不同：一是放大器（c/a）是比例放大器，没有电抗性补偿元件。控制电路中电容  $C_1$  较小，起滤除高频开关杂波作用。主电路中较小的  $L_f$ 、 $C_f$  滤波电路（如图中虚线所示，也可以不用）也起减小输出高频杂波的作用。若输出高频杂波小的话，均可以不加。因此，电压误差放大没有延时环节，电流放大也没有大延时环节。二是经过滤波后的电感电流信号  $U_i$  也与电压误差信号  $U_c$  相加在一起构成一个综合信号  $U_\Sigma$ ，再与三角锯齿波比较，得到 PWM 控制脉冲宽度。相加型 PWM 控制是单环控制，但它有输出电压、输出电流两个输出参数。如果输出电压或输出电流变化，那么占空比将按照补偿它们变化的方向而变化。

## 2. 相加型 PWM 控制的优缺点

### 1) 相加型控制的优点

- (1) 动态响应快（比普通电压型控制快 3~5 倍）；
- (2) 动态过冲电压小；
- (3) 输出滤波电容需要较小；
- (4) 相加型控制中的  $U_i$  注入信号容易用于电源并联时的均流控制。