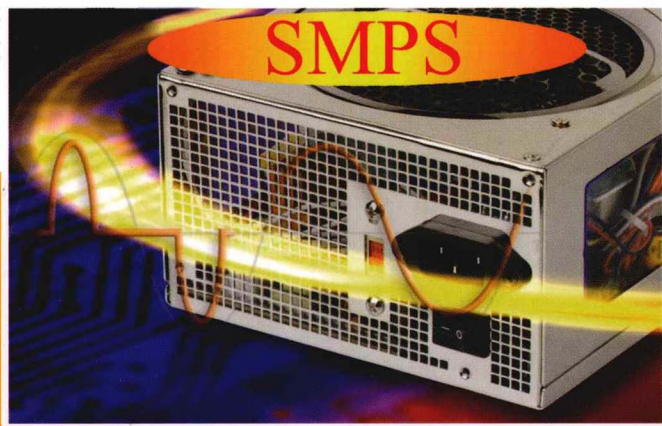


第二版

开关电源 优化设计

沙占友 王彦朋 马洪涛 王晓君 等著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



开关电源 优化设计

沙占友 王彦朋 马洪涛 王晓君 等著

 中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书全面、深入、系统地阐述了开关电源的优化设计。全书共十二章。第一章为开关电源综述，第二章专门阐述开关电源的新技术及其应用。第三~五章分别介绍DC/DC变换器的拓扑结构、单片开关电源及关键外围元器件的特点和选择方法。第六~十章重点阐述开关电源功率因数校正电路的设计、高频变压器的设计、开关电源优化设计实例、设计要点及利用软件实现开关电源的优化设计。第十一、十二章分别介绍开关电源的测试技术和保护及监控电路的设计。本书对广大读者自行研发新型开关电源具有重要的参考价值。

本书内容丰富、深入浅出、图文并茂，具有很高的实用价值，可供各类电子技术人员、高校师生和电子爱好者阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

开关电源优化设计/沙占友等著. —2版. —北京: 中国电力出版社, 2012.7

ISBN 978-7-5123-3333-8

I. ①开… II. ①沙… III. ①开关电源—最优设计 IV. ①TN86

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 169910 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 11 月第一版

2013 年 1 月第二版 2013 年 1 月北京第三次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 26.5 印张 533 千字

印数 5001—8000 册 定价 59.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

近年来，随着现代电源技术的迅速发展和国内外市场的大量需求，对开关电源的优化设计也提出了更高要求。所谓优化设计，是指从多种设计方案中选择最佳设计方案的方法。实现开关电源优化设计的途径很多，大致可归纳为以下几个方面：①采用新器件（如新型单片开关电源集成电路）；②采用新技术（如磁放大器、同步整流、有源钳位、有源功率因数校正、数字电源等）；③采用新软件（最新版本的计算机辅助设计软件）。

鉴于目前国内已出版的专门介绍开关电源优化设计的书籍还很少，而且大多为翻译国外的专著，内容侧重于开关电源的基本原理和入门知识，难以满足实用设计的需要。为此，作者曾撰写《开关电源优化设计》，该书于2009年出版后已经过多次印刷，受到广大读者的欢迎。近几年来，我国政府积极支持和鼓励绿色节能电源的发展和推广应用。本书第一作者应工业和信息化部中国电子技术标准化研究所、中国电子企业协会等多家单位的邀请，先后在北京、上海、苏州、宁波、杭州、深圳等地举办的高级研修班讲授了15期“开关电源优化设计”、“LED驱动电源优化设计”课程。为适应新形势、新技术的发展需要，现对原书做了较大幅度的增删，补充了作者多年的教学与科研经验后撰成此书，以飨广大的新、老读者。

本书第二版与第一版相比主要有以下特点：

第一，新增加了第六章、第七章，专门介绍开关电源功率因数校正电路的设计和 高频变压器的设计。

第二，在第九章开关电源设计要点中，新增加了降低开关电源空载及待机功耗的方法、开关电源的布局与布线、印制电路设计、开关电源的 EMC 及安规设计、功率开关管（MOSFET）散热器的设计等内容，并对其他内容做了改写。

第三，将第十章利用软件实现开关电源的优化设计中所介绍 PI 公司的 PI Expert 7.1 版（2008 年 12 月推出）设计软件，全部更新为 2012 年最新推出的 PI Expert 8.5.5.3 升级版（本书简称为 PI Expert 8.5），对利用该软件设计开关电源的实例也都重新撰写。

第四，本书内容深入浅出，实用性强，具有很高的实用价值。在给出各种开关电

源设计实例的同时，还详细介绍了电路设计要点、测试方法、关键外围元器件选择及保护电路的设计，对广大读者自行研发开关电源具有重要参考价值。

第五，信息量大，知识面宽，便于读者触类旁通，举一反三，灵活运用。

沙占友教授撰写了第一、二章、第六~九章，并完成了全书的审阅和统稿工作。王彦朋教授、马洪涛副教授、王晓君教授合撰写了第三~五章、第十~十二章。

李学芝、沙江、韩振廷、沙莎、张文清、宋怀文、陈庆华、王志刚、刘立新、张启明、刘东明、赵伟刚、宋廉波、刘建民、李志清、郑国辉、王金和、赵仁明、李新华、张丽荣、林志强同志也参加了本书撰写工作。

由于作者水平有限，书中难免存在缺点和不足之处，欢迎广大读者指正。

作 者

前言

第一章 开关电源综述	1
第一节 集成稳压电源的分类	1
第二节 开关电源的主要特点	4
一、开关电源的主要特点	4
二、开关电源与线性稳压电源的性能比较	5
第三节 开关电源发展的新趋势	5
一、开关电源发展的新趋势	5
二、开关电源领域的新技术	8
第四节 开关电源的基本原理	11
一、开关电源的工作方式	11
二、脉宽调制器的基本原理	11
三、脉宽调制器的产品分类	13
第五节 开关电源的控制类型	14
一、电压控制型开关电源	14
二、电流控制型开关电源	15
第六节 开关电源的工作模式	16
一、连续模式与不连续模式的设定	16
二、两种工作模式的功耗比较	17
第七节 开关电源的反馈类型	18
一、开关电源反馈电路的基本类型	18
二、单片开关电源的反馈原理	20
第八节 开关电源的负载特性	23
第二章 开关电源的新技术及其应用	26
第一节 开关电源的单片集成化	26
第二节 利用计算机设计开关电源	28

一、开关电源设计软件的主要特点	28
二、开关电源设计与仿真软件的分​​类	29
三、开关电源软件的设计流程	30
第三节 开关电源的内部保护电路	33
第四节 同步整流技术	35
一、同步整流技术简介	35
二、同步整流的基本原理	36
第五节 有源钳位技术	37
第六节 磁放大器稳压技术	39
第七节 可编程稳压技术	42
一、数字电位器的基本工作原理	42
二、可编程开关稳压器的电路设计	45
第八节 数字电源系统	48
一、数字电源的主要特点	49
二、数字电源的基本构成	52
三、数字电源的电路设计	54
第九节 开关电源的节能环保技术	56
第三章 DC/DC 变换器的拓扑结构	59
第一节 DC/DC 变换器的拓扑结构	59
一、DC/DC 变换器的拓扑结构	59
二、DC/DC 变换器典型产品的主要技术指标	64
第二节 降压式变换器的基本原理	64
一、降压式变换器的基本原理	64
二、降压式变换器的简化电路	65
第三节 升压式变换器的基本原理	66
一、升压式变换器的基本原理	66
二、升压式变换器的简化电路	67
第四节 降压/升压式变换器的基本原理	68
第五节 电荷泵式变换器的基本原理	69
第六节 单端一次侧电感式变换器的基本原理	70
第七节 反激式变换器的基本原理	71
一、反激式变换器的基本原理	71
二、多路输出反激式变换器的基本电路	72
第八节 正激式变换器的基本原理	74

第九节	推挽式变换器的基本原理	75
一、	推挽式变换器的基本原理	75
二、	推挽式变换器的两种类型	76
第十节	半桥/全桥式变换器的基本原理	77
一、	半桥式变换器的基本原理	77
二、	全桥式变换器的基本原理	77
第十一节	软开关变换器的基本原理	78
一、	谐振式变换器的基本原理	78
二、	准谐振式变换器的基本原理	79
三、	全桥零电压变换器的基本原理	80
第十二节	半桥 LLC 谐振变换器的基本原理	80
一、	半桥 LLC 谐振变换器的基本原理	80
二、	半桥 LLC 谐振变换器的等效电路及电压增益特性曲线	82
第十三节	双开关正激式变换器的基本原理	83
第四章	单片开关电源的特点及选择方法	85
第一节	单片开关电源集成电路的主要特点	85
第二节	通用单片开关电源集成电路的产品分类	90
一、	第二代至第四代单片开关电源集成电路的产品分类	90
二、	第五代至第六代单片开关电源集成电路的产品分类及性能比较	92
第三节	微型单片开关电源集成电路的产品分类	96
一、	第二代、第三代微型单片开关电源集成电路的产品分类	96
二、	高效节能微型单片开关电源集成电路的产品分类	97
第四节	峰值功率输出式单片开关电源集成电路的产品分类	100
一、	PeakSwitch 系列单片开关电源集成电路的产品分类	100
二、	TinySwitch-PK 系列微型单片开关电源集成电路的产品分类	100
第五节	半桥式 PFC 及 LLC 控制器集成电路	101
一、	PLC810PG 的性能特点及引脚功能	101
二、	PLC810PG 的工作原理	102
三、	PLC810PG 的典型应用	104
第六节	双开关正激式加反激式变换器集成电路	106
一、	HiperTFS 系列产品的性能特点	106
二、	HiperTFS 系列产品的工作原理	107
三、	HiperTFS 系列产品的典型应用	109
第七节	单片开关电源的选择方法	113

第五章 开关电源关键外围元器件的选择方法	117
第一节 固定电阻器的选择方法	117
一、固定电阻器的选择方法	117
二、电流检测电阻的选择方法	120
第二节 电容器的选择方法	123
一、开关电源常用电容器的分类	123
二、理想电容器与实际电容器的比较	124
三、输入滤波电容器的选择方法	125
四、输出滤波电容器的选择方法	127
第三节 电感器特性及磁珠的选择方法	128
一、电感器的特性	128
二、磁珠的选择方法	129
第四节 EMI 滤波器的选择方法	133
一、EMI 滤波器的结构原理及选择方法	133
二、EMI 滤波器中电容及电感的选择方法	136
第五节 输入整流桥的选择方法	143
一、整流桥的选择方法	143
二、整流桥的导通时间与选通特性	144
第六节 输出整流管的选择方法	145
一、快恢复及超快恢复二极管的选择方法	145
二、肖特基二极管的选择方法	148
第七节 瞬态电压抑制器的选择方法	151
一、瞬态电压抑制器 (TVS) 的工作原理	151
二、瞬态电压抑制器的选择方法及典型应用	154
第八节 功率开关管的选择方法	156
一、BJT 功率开关管的选择方法	156
二、MOSFET 功率开关管的选择方法	157
三、IGBT 功率开关管的选择方法	159
第九节 光耦合器的选择方法	162
一、光耦合器的基本原理	162
二、线性光耦合器的选择方法	163
第十节 可调式精密并联稳压器的选择方法	164
一、TL431 型可调式精密并联稳压器	165
二、NCP100 型低压输出可调式精密并联稳压器	166

三、LMV431 型低压可调式精密并联稳压器	168
第十一节 开关电源保护元件的选择方法	169
一、熔丝管的选择方法	169
二、熔断电阻器的选择方法	172
三、压敏电阻器的选择方法	173
第六章 开关电源功率因数校正电路的设计	177
第一节 功率因数校正 (PFC) 简介	177
一、功率因数与总谐波失真	177
二、功率因数校正方法	179
第二节 无源 PFC 电路的基本原理	180
一、无源 PFC 的基本电路	180
二、基于无源填谷电路的 PFC 工作原理	181
第三节 无源 PFC 电路的设计实例	184
第四节 有源 PFC 电路的基本原理	186
一、有源 PFC 升压式变换器的基本原理	186
二、有源 PFC 的基本原理	189
三、升压式 PFC 二极管的选择	191
第五节 有源 PFC 电路的设计实例	192
一、L6561、L6562 型有源 PFC 变换器的工作原理	192
二、L6561、L6562 型有源 PFC 变换器的典型应用	194
第六节 大功率 PFC 的原理与应用	196
一、HiperPFS 系列产品的性能特点	196
二、HiperPFS 系列产品的工作原理	197
三、由 PFS714EG 构成的 347W 高效大功率升压式 PFC 电源	198
四、电路设计要点	202
第七节 抑制 PFC 电磁干扰的措施	205
一、利用 EMI 滤波器抑制 PFC 的电磁干扰	205
二、降低 PFC 电磁干扰的其他措施	206
第八节 PFC 的配置方案	208
一、PFC 类型、级数及工作模式的选择	208
二、PFC 电源的 4 种配置方案	209
第七章 高频变压器的设计	211
第一节 根据经验公式或输出功率表格选择磁心的方法	211
一、用经验公式选择磁心的方法	211

二、	根据输出功率选择磁心的方法	214
第二节	高频变压器电路中的波形参数	216
一、	波形系数与波形因数分析	216
二、	开关电源中 6 种常见波形的参数	217
第三节	基于 AP 法选择高频变压器磁心的公式推导	218
第四节	反激式高频变压器的设计	221
一、	反激式高频变压器的设计方法	222
二、	反激式高频变压器的设计实例	225
第五节	正激式高频变压器的设计	227
一、	设计正激式高频变压器的步骤	227
二、	常用的三种磁复位电路	229
第六节	高频变压器的损耗	229
一、	高频变压器的损耗	229
二、	集肤效应和临近效应	230
第八章	开关电源优化设计实例	232
第一节	多路输出式开关电源的设计	232
一、	多路输出式单片开关电源的电路设计方案	232
二、	多路输出式高频变压器的设计	234
第二节	改善多路输出式开关电源交叉负载调整率的方法	236
第三节	带磁放大器的 PC 开关电源的设计	238
一、	145W 多路输出式 PC 开关电源的主电路设计	238
二、	3.3V 磁放大器的电路设计	240
第四节	同步整流式 DC/DC 变换器的设计	242
第五节	峰值功率输出式音频功率放大器开关电源的设计	243
第六节	基于倍压整流的工业控制电源的设计	247
第七节	基于悬浮式高压恒流源的工业控制电源的设计	248
第八节	基于 StackFET™ 技术的微型开关电源的设计	251
第九节	数字电视机顶盒电源的设计	253
第十节	USB 接口手机充电器的设计	256
第九章	开关电源的设计要点	258
第一节	开关电源的设计要求	258
一、	开关电源的设计要求	258
二、	设计开关电源的注意事项	259
第二节	高效率开关电源的设计	260

一、开关电源的功率损耗	261
二、设计高效率开关电源的原则	261
三、提高开关电源效率的方法	262
第三节 降低开关电源空载及待机功耗的方法	265
一、开机后消除泄放电阻功率损耗的方法	265
二、开机后消除热敏电阻功率损耗的方法	269
三、消除待机模式下检测电阻功率损耗的方法	270
第四节 开关电源的布局与布线	273
一、开关电源布局与布线的一般原则	273
二、开关电源布局与布线的注意事项	274
三、设计印制板的注意事项	277
第五节 恒压/恒流式开关电源的设计	278
一、恒压/恒流输出型开关电源的工作原理	278
二、恒压/恒流输出型开关电源的电路设计	279
第六节 精密恒压/恒流式开关电源的设计	281
一、精密恒压/恒流输出型开关电源的工作原理	282
二、精密恒压/恒流输出型开关电源的电路设计	283
第七节 开关电源远程关断电路的设计	285
一、TOPSwitch-GX 的远程关断电路	285
二、PC 开关电源的远程关断电路	286
第八节 新型单片开关电源的典型应用及印制电路设计	287
一、TOPSwitch-HX 系列单片开关电源的典型应用及印制电路设计	287
二、TOPSwitch-JX 系列单片开关电源的典型应用及印制电路设计	290
第九节 开关电源的电磁干扰波形分析及安规设计	295
一、开关电源的电磁干扰波形分析	296
二、开关电源的安全规范	298
第十节 单片开关电源散热器的设计	300
一、散热器的工作原理	300
二、单片开关电源的散热器设计方法	303
三、单片开关电源散热器设计实例	303
第十一节 功率开关管 (MOSFET) 散热器的设计	307
一、功率开关管散热器设计方法	307
二、功率开关管散热器设计实例	308
三、设计功率开关管散热器的注意事项	309

第十二节	开关电源常见故障检修方法	309
第十章	利用软件实现开关电源的优化设计	313
第一节	PI Expert 8.5 设计软件简介	313
一、	PI Expert 8.5 的主要特点	313
二、	PI Expert 8.5 的主菜单和工具栏	315
第二节	利用 PI Expert 8.5 设计向导设计开关电源的实例	316
第三节	PI Expert 8.5 产品选择指南的使用方法与设计实例	323
第四节	利用设计树检查并修改设计的方法	330
一、	导航树的结构	330
二、	利用设计树检查并修改设计的实例	330
第五节	单片开关电源的优化设计	338
一、	优化类型及优化结果提示	338
二、	自动及手动优化设计方法	341
第十一章	开关电源的测试技术	342
第一节	开关电源的参数测试	342
一、	开关电源主要参数的测试方法	342
二、	功率测量技术	344
第二节	开关电源的性能测试	345
一、	开关电源主要参数的测试方法	345
二、	高频变压器的电气性能测试方法	347
第三节	开关电源的测量技巧	348
一、	采用非接触法测量开关电源的输入电流	348
二、	准确测量输出纹波电压的方法	349
三、	测量开关稳压器效率的方法	350
四、	测量隔离式交流开关电源输入功率的简便方法	351
五、	测量开关电源负载功率的方法	352
第四节	准确测量占空比的方法	354
第五节	利用示波器检测高频变压器磁饱和的方法	356
一、	高频变压器磁饱和特性及其对开关电源的危害	356
二、	利用示波器检测高频变压器磁饱和的方法	356
第六节	数字式在线电流/电阻测量仪	358
一、	在线测量直流电流的原理与应用	359
二、	在线测量电阻的原理与应用	361
第七节	开关电源的电磁兼容性测量	363

一、电磁兼容性的研究领域	363
二、电磁兼容性的测量	366
第八节 开关电源的波形测试及分析	368
一、PWM 控制器关键波形的测试方法	368
二、测量一次侧电压及电流波形	369
三、测量二次侧电压及电流波形	372
第十二章 开关电源保护及监控电路的设计	374
第一节 漏极钳位保护电路的设计	374
一、漏极上各电压参数的电位分布	374
二、漏极钳位保护电路的基本类型	375
三、漏极钳位保护电路的设计实例	376
第二节 由分立元件构成的过电压保护电路	378
一、由晶闸管构成的输入/输出过电压保护电路	378
二、由双向触发二极管构成的输出过电压保护电路	381
三、由稳压管构成的输出过电压保护电路	382
四、由压敏电阻器构成的过电压保护电路	383
第三节 集成过电压保护器的应用	383
一、由 NCP345 构成的过电压保护电路	383
二、由 MAX4843 构成的过电压保护电路	384
三、由 MC3423 构成的过电压保护电路	385
第四节 欠电压保护电路的设计	387
一、由光耦合器构成的输入欠电压保护电路	387
二、由偏置绕组构成的输入欠电压保护电路	387
三、具有欠电压锁定功能的开关稳压器	388
四、实现过电压、欠电压控制的外部驱动电路	389
第五节 过电流及过功率保护电路的设计	390
一、由功率热敏电阻构成的限流保护电路	390
二、由晶体管构成的过电流保护电路	391
三、由自恢复熔丝管构成的过电流保护电路	391
四、集成过电流保护器的应用	392
五、集成过功率保护器的应用	393
第六节 软启动电路的设计	394
一、软启动电路	394
二、具有软启动功能的 +5V/-5V 电源变换器	395

三、具有延时启动功能的开关稳压器	396
第七节 电源电压监视器	396
一、由 TL431 构成的电压监视器	396
二、由 LM3914 构成的欠电压和过电压监视器	397
三、由 HYM705/706 构成的电源电压监视器	397
四、由 MCP1316 系列产品构成的电源电压监视器	399
第八节 开关电源的瞬态干扰及音频噪声抑制技术	400
一、抑制瞬态干扰的方法	400
二、抑制音频噪声的方法	402
三、抑制其他干扰的方法	402
第九节 过热保护元器件及散热控制系统的设计	403
一、开关电源过热保护电路的基本原理	404
二、两种过热保护元器件的原理与应用	405
三、具有多重保护功能的散热控制系统的设计	406
参考文献	409

开关电源综述

开关电源(Switching Mode Power Supply, SMPS)被誉为高效节能电源,具有效率高、体积小、重量轻、应用广泛等优点,现已成为稳压电源的主流产品。本章重点阐述开关电源的基本原理、控制类型、工作模式、反馈类型及负载特性,最后介绍开关电源发展的新趋势。

第一节 集成稳压电源的分类

目前国内外生产的集成稳压器多达上万种,大致可分成线性集成稳压器和开关式集成稳压器两大类。集成稳压电源的分类及特点见表1-1-1。

表 1-1-1 集成稳压电源的分类及特点

集成稳压电源	线性电源 (Linear Power Supply)	标准线性稳压器 (Standard Linear Regulator)	固定式	三端固定式	正压输出, 负压输出	
				多端固定式	正压输出, 负压输出	
		可调式	三端可调式	正压输出, 负压输出, 跟踪式		
			多端可调式	正压输出, 负压输出, 跟踪式		
	低压差线性稳压器 (Low Dropout Linear Regulator)	PNP型低压差线性稳压器(LDO)	三端或多端固定式/可调式	正压输出, 负压输出, 跟踪式		
						准低压差线性稳压器(QLDO)
						超低压差线性稳压器(VLDO)
	开关电源 (SMPS)	脉宽调制器(PWM)	集成度较低, 外围电路复杂, 但可构成大功率开关电源			
		脉频调制器(PFM)	集成度较低, 外围电路复杂, 开关频率可达1MHz以上, 高效率			
		开关稳压器 (Switching Regulator)	集成度较高, 内含功率开关管, 需配工频变压器			
单片开关电源 (Single-Chip SMPS)		集成度很高, 外围电路简单, 适合构成中、小功率开关电源				

线性稳压器因其内部调整管与负载相串联且调整管工作在线性工作区而得名，又称作串联调整式集成稳压器。其优点是稳压性能好、输出纹波电压小、电路简单、成本低廉。主要缺点是调整管的压降较大，功耗高，稳压电源的效率比较低，一般为45%左右。线性集成稳压器主要包括两种：一种是采用NPN调整管的标准线性稳压器（Standard Linear Regulator），亦称NPN型线性稳压器；另一种是采用PNP调整管的PNP型低压差线性稳压器（LDO）。此外还有准低压差线性稳压器（QLDO）和超低压差线性稳压器（VLDO）。按照输出电压的特点来划分，又有固定输出、可调输出、正压输出、负压输出、多路输出（含跟踪式输出）等多种形式。传统的标准线性稳压器的效率仅为45%左右，而LDO、VLDO在低压输入时的效率可达80%~95%。

开关电源被誉为高效节能电源，它代表着稳压电源的发展方向，现已成为稳压电源的主流产品。开关电源内部的关键元器件工作在高频开关状态，本身消耗的能量很低，电源效率可达70%~90%，比标准线性稳压电源提高近一倍。开关电源集成电路主要包括以下4种：脉冲宽度调制（简称脉宽调制或PWM）器，脉冲频率调制（简称脉频调制PFM）器，开关稳压器，单片开关电源。

从电路原理上划分，稳压器亦可分成串联调整式线性稳压器、并联调整式线性稳压器、开关稳压器三种类型，它们的等效电路分别如图1-1-1(a)、(b)、(c)所示。图中的 R_s 代表调整管的等效电阻，S代表功率开关管。并联调整式线性稳压器的输出电压稳定度很高，但输出电流很小，一般只做基准电压源使用。下面分别介绍各类产品的主要特点。

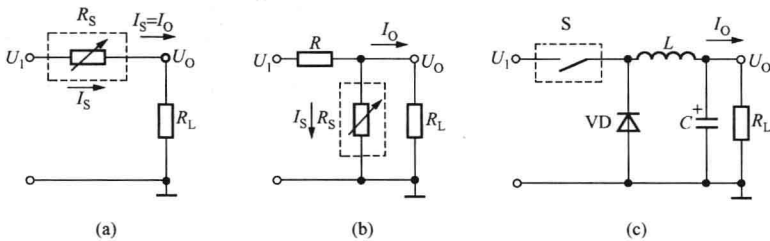


图 1-1-1 三种稳压器的等效电路

(a) 串联调整式线性稳压器；(b) 并联调整式线性稳压器；(c) 开关式稳压器

1. 三端固定式集成稳压器

美国仙童公司（现更名为飞兆公司）于20世纪70年代初首先推出 $\mu A7800$ 系列和 $\mu A7900$ 系列三端固定式集成稳压器。它的问世是电源集成电路的一大革命，极大地简化了电源的设计与应用。它能以最简方式（类似于三极管）接入电路，并具有较完善的过电流、过电压、过热保护功能。目前，7800系列和7900系列已成为世界通