



国际电气工程先进技术译丛

CRC Press
Taylor & Francis Group

开关功率变换器 —— 开关电源的原理、 仿真和设计(原书第3版)

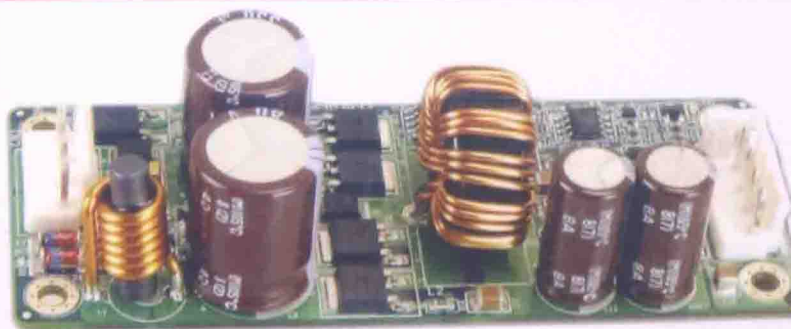
Power-Switching Converters (3rd edition)

(美) Simon Ang 著
Alejandro Oliva

张懋 徐德鸿 张卫平 等译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

开关功率变换器

——开关电源的原理、仿真和设计

(原书第3版)

(美) Simon Ang 著
Alejandro Oliva

张 懋 徐德鸿 张卫平 等译



机械工业出版社

本书除介绍基本开关变换器的拓扑之外,还介绍了开关变换器控制策略、开关变换器的闭环控制和稳定性设计方法;开关变换器的仿真工具,包括开关变换器的 PSpice 和 MATLAB 仿真软件;交错并联变换器和开关电容变换器等内容。与第 2 版相比,本版书重新梳理了开关电源的知识结构,对部分章节进行了重新修订,并增加了开关变换器数字控制以及开关变换器应用等内容。本书中的开关变换器设计案例很有特色,可以系统地培养读者综合各部分知识的运用能力。

本书可以作为电气工程技术人员系统学习开关电源技术知识的参考书。

Power-Switching Converters (3rd edition) /by Simon Ang & Alejandro Oliva/ISBN: 9781439815335

Copyright © 2011 by CRC Press.

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved.

本书中文简体翻译版授权由机械工业出版社独家出版并限在中国大陆地区销售。未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签,无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记号图字:01-2012-4223 号

图书在版编目 (CIP) 数据

开关功率变换器:开关电源的原理、仿真和设计:第 3 版/(美)安格 (Ang, S.), (美)奥利弗 (Oliva, A.) 著;张懋等译. —北京:机械工业出版社,2014.8

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文:Power-switching converters: 3rd edition

ISBN 978-7-111-47517-0

I. ①开… II. ①安… III. ①开关电源-功率变换器
IV. ①TM761

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 169982 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:牛新国 责任编辑:牛新国

责任校对:樊钟英 封面设计:马精明 责任印制:乔宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2014 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 28 印张 · 532 千字

0001—3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-47517-0

定价:98.00 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

社服务中心:(010) 88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者服务部:(010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

原书第3版译者序

为了适应时代发展和新技术的不断出现,本书第3版在第2版的基础上,重新梳理了开关电源的知识结构,对部分章节进行了重新修订,并增加了开关变换器数字控制以及开关变换器应用等内容。

第3版的翻译原则是:

1. 与第2版内容基本一致的章节,遵从第2版的译文;
2. 对于新增加的章节及其内容进行了全文翻译;
3. 对于第2版有重大修改的章节及其内容,尽可能保持第2版译文的风格,对修改内容进行了翻译;
4. 在忠实于原著的基础上,遵从“信、达、雅”的基本翻译原则,对新增译文采用“意译”而非“直译”,以便使其符合中文的叙述方式和中国人的阅读习惯。

参加第3版新增内容翻译的还有翟鹏伟、闫博宇、崔赛华、雷歌阳、田峻宇和陈小平等研究生。

由于译音对原著的理解不够透彻,难免有“望文生义”之嫌,恳请同行学者以及前辈不吝赐教,雅正为盼!

第3版 译者

前 言

在本书第3版中，增加了许多新的资料和一个新的章节。对许多章节进行了彻底的修订与更新；关于建模和开关变换器控制的部分编写在第4章中，并增加了一个新的章节——开关变换器的应用。

与前两版类似，在开关变换器领域，本书可以作为电气/电子工程师高级课程的教科书。第1~4章为基础课程，介绍了开关变换器的基本拓扑，随后在第5章中介绍了开关变换器的基本控制技术。教师在概括介绍开关变换器的拓扑时，可以选择略过第10章交错变换器和第11章开关电容变换器的内容。第6~9章介绍了开关变换器的建模、闭环控制以及在设计开关变换器时稳定性的考虑因素。具体为，第6章和第7章介绍了开关变换器的连续时域模型及其控制技术，而第8章和第9章介绍了开关变换器的离散时域模型以及数字控制技术。本书的一些内容可以略过，在今后更高级的课程中学习。

第12章介绍了一些开关变换器的仿真工具，包括应用 PSpice 和 MATLAB 进行仿真的方法。在第2章学习结束后，可介绍一部分本章的内容，并在第4、5、6章学习时进行穿插教学，指定一些仿真练习以增进对开关变换器拓扑和工作过程的理解。

第13章介绍了一些基本概念。这些概念对于理解各种各样实际的以及新兴的开关变换器的应用是必要的，例如功率因数校正、LED 驱动、低噪声变换器以及太阳能电池和燃料电池的开关变换器拓扑。

一个完整的开关变换器的研究要经历变换器的分析、设计以及最后样机的实验的过程。第14章包含了一些完整的设计实例，包括实验设计，这些实例可以作为技术参考或者学校实验室的教学实验参考。

补充的信息和材料会定期地更新，读者可以在 <http://www.crcpress.com> 找到。其中包括课件、精选的 PSpice 实例和 MATLAB 源文件。PSpice 实例可以在 OrCAD 9.2 学生版本或 PSIM 软件中运行。

还有许多人对本书第3版的出版贡献了力量。第14章中的设计实例改编自阿肯色州大学的毕业研究生参与的一些项目，特别是 Kien Truong 和 Lan Phuong Bui Pham。感谢苏尔国立大学的学生 Leandro Stefanazzi、Germán Oggier、Hernán López、

Juan Ugarte、Luciano García Rodríguez、Gastón Lanchas、Ángel Soto、Martín Ceci 和 Alfredo Falcón 为本书绘制插图、编辑公式以及校对文本。最后衷心感谢我们的家庭给予我们的爱和支持。

Simon S. Ang

Alejandro Oliva

MATLAB 软件是 MathWorks 的注册商标，如需了解更多的公司产品信息，请联系：MathWorkshop 公司 3 Apple Hill Drive Natick, MA 01760 - 2098 USA

电话：5086477000

传真：5086477001

电子邮件：info@mathworks. com

网址：www.mathworks. com

目 录

原书第 3 版译者序

前言

第 1 章 开关变换器简介	1
1.1 简介	1
1.1.1 工业发展趋势	1
1.2 线性变换器	2
1.2.1 串联式线性调整器	2
1.2.2 并联式线性调整器	4
1.3 开关变换器	5
1.3.1 带有阻性负载的基本开关变换器	5
1.3.2 带有阻感性负载的开关变换器	7
1.4 变换器稳态原理分析	9
1.4.1 电感伏秒平衡	9
1.4.2 电容电荷平衡	10
1.5 习题	10
第 2 章 基本的开关变换电路	12
2.1 简介	12
2.2 Buck 变换器	12
2.2.1 连续模式	12
2.2.2 断续模式	16
2.3 同步整流	21
2.4 纹波抑制	22
2.5 Boost 变换器	24
2.5.1 连续模式	25
2.5.2 断续模式	28
2.6 Buck-Boost 变换器	31
2.6.1 连续模式	32
2.6.2 断续模式	35
2.7 Cuk 变换器	38
2.8 SEPIC 变换器	44

2.8.1 连续模式	44
2.8.2 设计要素	46
2.9 Zeta 变换器	46
2.10 非理想元器件实现的变换器	48
2.10.1 电感模型	49
2.10.2 电容模型	49
2.10.3 半导体器件损耗	50
2.10.4 半导体器件损耗对输出电压的影响	51
2.11 习题	52
第3章 谐振变换器	54
3.1 简介	54
3.2 并联谐振电路综述	55
3.3 串联谐振电路综述	56
3.4 准谐振开关的分类	57
3.5 零电流开关准谐振 Buck 变换器	59
3.6 零电流开关准谐振 Boost 变换器	65
3.7 零电压开关准谐振 Buck 变换器	70
3.8 零电压开关准谐振 Boost 变换器	74
3.9 串联负载谐振变换器	78
3.9.1 断续模式 ($0 < f_s < 0.5f_n$)	78
3.9.2 连续模式 ($f_s > f_n$ 或称为高于谐振频率模式)	80
3.9.3 连续模式 ($0.5f_n < f_s < f_n$ 或称为低于谐振频率模式)	82
3.10 并联负载谐振变换器	84
3.10.1 断续模式 ($0 < f_s < 0.5f_n$)	85
3.10.2 连续模式 ($f_s > f_n$ 或称为高于谐振频率模式)	88
3.10.3 连续模式 ($0.5f_n < f_s < f_n$ 或称为低于谐振频率模式)	90
3.11 习题	92
第4章 隔离型变换器	95
4.1 简介	95
4.2 正激变换器	95
4.3 双管正激变换器	100
4.4 推挽变换器	102
4.5 半桥变换器	105
4.6 全桥变换器	106
4.7 反激变换器	108

4.8	双管反激变换器	112
4.9	双向有源桥变换器	114
4.9.1	功率流控制	123
4.10	零电流开关准谐振半桥变换器	125
4.11	习题	129
第5章	开关变换器的控制策略	130
5.1	简介	130
5.2	脉宽调制	130
5.2.1	电压模式 PWM 策略	131
5.2.2	电流模式 PWM 策略	134
5.3	滞环控制：开关电流源	138
5.3.1	t_{on} 时段稳态分析	139
5.4	商业化集成电路控制器	140
5.4.1	SG3524 固定频率电压模式控制器	140
5.4.2	TL497 变化频率电压模式控制器	143
5.4.3	UC3842 固定频率电流模式 PWM 控制器	144
5.4.4	TinySwitch-II 系列小功率离线开关管	146
5.5	谐振变换器控制策略	148
5.5.1	谐振变换器离线控制器	149
5.5.2	L6598 的工作原理	149
5.6	习题	160
第6章	开关变换器的连续时域模型	161
6.1	简介	161
6.2	经典控制技术分析开关变换器	161
6.2.1	开关变换器的基本开环线性模型	162
6.2.2	PWM 调制器模型	162
6.2.3	平均开关变换器模型	166
6.2.4	输出滤波器模型	168
6.3	开关变换器小信号模型概述	176
6.4	有外部扰动的电压调整器线性模型	179
6.4.1	输出阻抗和稳定性	180
6.5	开关变换器的状态空间表示	181
6.5.1	线性系统分析概述	181
6.5.2	状态空间平均	183
6.6	开关变换器传递函数	194

6.6.1 源至状态变量的传递函数	195
6.7 输入 EMI 滤波器	197
6.7.1 稳定性分析	197
6.8 习题	203
第 7 章 开关变换器的模拟控制	204
7.1 简介	204
7.2 经典控制技术中的负反馈	204
7.2.1 闭环增益	204
7.2.2 稳定性分析	205
7.2.3 相对稳定性	205
7.3 开关变换器的闭环线性模型	206
7.3.1 反馈网络	206
7.3.2 误差放大器补偿网络	206
7.3.3 PI 补偿网络	207
7.3.4 比例积分微分 (PID) 补偿网络	209
7.3.5 比例控制	212
7.4 考虑输出电容 ESR 的 Buck 变换器的反馈补偿	212
7.5 无输出电容 ESR 的 Buck 变换器的反馈补偿	215
7.6 全状态反馈	216
7.6.1 全状态反馈控制系统设计	216
7.6.2 极点选择	217
7.6.3 反馈增益	217
7.7 习题	221
第 8 章 开关变换器的离散时域建模	222
8.1 简介	222
8.2 连续时域系统	222
8.3 直接离散时域模型	222
8.4 直接离散模型的线性化	223
8.5 连续时域状态空间平均模型	224
8.6 开关变换器的离散时域平均模型	226
8.7 习题	227
第 9 章 开关变换器的数字控制	228
9.1 简介	228
9.2 比例控制器	228
9.3 PID 控制器的连续化设计方法	229

9.4	全状态反馈的离散控制系统设计	230
9.4.1	极点配置	231
9.4.2	反馈增益	231
9.4.3	电压控制模式	231
9.4.4	电流控制模式	233
9.5	习题	236
第10章	交错并联变换器	237
10.1	简介	237
10.2	交错并联 Buck 变换器	237
10.2.1	状态空间平均模式	239
10.3	交错并联 Boost 变换器	240
10.3.1	状态空间平均模式	240
10.4	基于电流模式工作的交错并联变换器	244
10.4.1	纹波的计算	245
10.4.2	变换器的数量	247
10.5	功率因数校正	247
10.6	习题	249
第11章	开关电容变换器	251
11.1	简介	251
11.2	单向功率传输 SCC	251
11.2.1	基本升压变换器	251
11.2.2	基本降压变换器	253
11.2.3	基本电压极性反向变换器	255
11.3	其他开关电容变换器拓扑	256
11.3.1	降压变换器	256
11.3.2	升压变换器	259
11.3.3	n 阶降压 SCC	261
11.3.4	n 阶升压 SCC	261
11.4	双向功率传输 SCC	263
11.4.1	升降压变换器	263
11.4.2	罗氏变换器	265
11.5	谐振变换器	270
11.5.1	零电流开关 (ZCS)	270
11.6	开关电容功率变换器的损耗	273
11.7	习题	274

第 12 章 开关变换器的仿真	275
12.1 简介	275
12.2 Spice 电路描述	275
12.2.1 采用“.CIR”文本输入文件的 PSpice 仿真	276
12.2.2 采用电路图输入的 PSpice 仿真	285
12.2.3 开关变换器的小信号分析	299
12.2.4 创建可用于 PSpice 仿真的 Capture 符号	314
12.2.5 解决收敛问题	314
12.3 使用 MATLAB 对开关变换器进行仿真	318
12.3.1 使用传递函数	318
12.3.2 使用矩阵	320
12.4 使用 Simulink 仿真开关变换器	323
12.4.1 用 Simulink 仿真传递函数的例子	323
12.4.2 用 Simulink 仿真状态空间矩阵的例子	324
12.5 习题	325
第 13 章 开关变换器的应用	327
13.1 功率因数校正	327
13.1.1 简介	327
13.1.2 基本概念回顾	327
13.1.3 功率因数校正原理	328
13.1.4 开关变换器的功率因数自校正特性	329
13.1.5 功率因数校正器的控制技术	334
13.1.6 功率因数校正电路	338
13.2 低噪声 DC – DC 变换器	341
13.2.1 简介	341
13.2.2 降低 EMI 的技术	342
13.3 用于太阳能电池的开关变换器	345
13.3.1 简介	345
13.3.2 太阳能电池模型	345
13.3.3 最大功率点跟踪	347
13.3.4 用于太阳能电池的开关变换器	347
13.4 用于燃料电池的开关变换器	348
13.5 LED 驱动器用开关变换器	351
13.5.1 Buck 型 LED 驱动器	351
13.5.2 Boost 型 LED 驱动器	352
13.5.3 C $\dot{u}$ k 型 LED 驱动器	352

13.5.4	SEPIC 型 LED 驱动器	353
13.5.5	交流输入型 LED 驱动器	353
第 14 章	开关变换器设计：案例学习	354
14.1	简介	354
14.2	电压型断续工作模式的 Buck 变换器设计	355
14.2.1	控制器设计	356
14.2.2	小信号模型	359
14.2.3	设计补偿网络和误差放大器	359
14.2.4	闭环 Buck 变换器	363
14.2.5	仿真结果	364
14.2.6	实验结果	366
14.3	电压型同步 Buck 变换器的数字控制	370
14.3.1	电路参数	371
14.3.2	闭环极点选择	371
14.3.3	离散时间模型	372
14.3.4	反馈增益	373
14.3.5	控制策略	374
14.3.6	用于 PSpice 仿真的模拟模型	375
14.3.7	仿真结果	376
14.3.8	与负载变化相关的闭环极点灵敏度	378
14.3.9	实验结果	378
14.4	电流型同步 Buck 变换器的数字控制	380
14.4.1	连续时间状态模型	380
14.4.2	推导离散时间模型	380
14.4.3	电流型控制不稳定的问题	381
14.4.4	跟踪调整器的扩展状态模型	381
14.4.5	反馈增益	382
14.4.6	控制策略	384
14.4.7	仿真结果	384
14.4.8	闭环极点对负载变化的敏感度	384
14.4.9	实验结果	386
14.4.10	DSP 编程	387
14.5	基于 UC3842 的反激变换器设计	393
14.5.1	设计规格	394
14.5.2	断续导通模式	394
14.5.3	初步计算	395

14.5.4	开环仿真	396
14.5.5	电流环	397
14.5.6	电压环	397
14.5.7	小信号模型	400
14.5.8	频率补偿	401
14.5.9	电磁干扰 (EMI) 滤波器的设计	403
14.5.10	印制电路板 (PCB) 设计	404
14.5.11	实验结果	406
14.6	基于 TopSwitch 的反激变换器设计	407
14.6.1	设计规格	408
14.6.2	初步计算	408
14.6.3	实验结果	409
14.7	基于 TinySwitch 的反激变换器设计	410
14.7.1	实验结果	411
14.8	开关音频放大器	412
14.8.1	案例学习	415
	参考文献	422

第 1 章 开关变换器简介

1.1 简介

一个开关变换器或者工作于开关模式的功率变换器是一个电力电子系统，它是通过开关的开通或者关断，把一个等级的电压变换为负载端另一个等级的电压。开关变换器始于 1950 年，然而，由于功率晶体管的可靠性和成本问题使开关变换器最初只能应用于军事和航空领域。从 1970 年开始，随着现代功率器件的发展和应用，电源中越来越多地采用开关变换器。在 DC - DC 开关变换器电路中，半导体开关器件调节电源与负载之间的连接时间，控制功率从输入到输出负载的动态传输。开关变换器常被用于高效率电源和直流电动机驱动中。与线性电压变换器或线性电压调整器相比，开关电源具有较高的效率和较高的功率密度。新型功率半导体器件，如功率 MOSFET（金属氧化物半导体场效应晶体管）和绝缘栅双极型晶体管（IGBT）、集成磁元件、新型拓扑和集控制与管理功能的超大规模集成 PWM 控制电路的发展使开关变换器的功率密度得到了很大的提高。除了在电源中的应用外，开关变换器同样可以应用于开关音频放大器、光伏阵列中的最大功率点跟踪器（MPPTs）以及 LED 显示与照明的驱动中。

1.1.1 工业发展趋势

在过去的几年里，DC - DC 开关变换器技术经历了巨大的变化。许多集成电路和它们的辅助电路所需的供电电压从过去的 5V 电压标准降低到了小于 1.5V。同时，负载电流也增大到了几年前不可想象的程度。现在一些电子系统需要电源能够提供输出电压为 2.5V、电流为 60A，或输出电压为 1.8V、电流为 60A，或输出电压为 1V、电流为 100A。在不久的将来，预计一些微处理器的供电电压会降到 0.5V，电流会增大到 400A。通常对 DC - DC 开关变换器的动态要求为对从电流 75-100-75A 以 $100\text{A}/\mu\text{s}$ 变化的突变负载，要求变换器输出电压偏差小于 60mV。同时要求变换器在 $4\mu\text{s}$ 内恢复到输出电压的 $\pm 1.5\%$ 以内。这些要求使集中式电源传输低压大电流的能量变得非常困难。设计者现在逐渐转向分布式电源系统结构，用来满足现今复杂负载对低压大电流的需求。

分布式电源系统产生一个高压直流母线（比如 48V），并且分配较小的电流到不同的负载，在每个负载附近，有一个或者多个 DC - DC 开关变换器模块把母线电

压变换成负载所需的较低的电压源（比如 1V）。这些 DC - DC 开关变换器模块除了降压的功能外，还提供电气隔离和增加负载动态响应性能的功能。分布式电源系统消除了集中式电源系统由于需要厚铜母线而产生的机械结构和成本问题。其较低的输出电压导致较大的输出电流并且使电压调整率降低^[1]。

在 1999 年，标准规定变换器在 5V 时的高功率密度为 25W/in^3 ^①，到 2001 年，功率密度增加到在 3.3V 时的 40W/in^3 ，现今功率密度可达到高于 50W/in^3 ，而高功率密度被认为大约为 90W/in^3 。磁元件和无源元件集成的不断发展对增加功率密度而不牺牲性能起到了很大的作用^[2]。特别对低压变换器，同步整流实现了变换器效率和功率密度的较大提高。同步整流技术和交错并联技术的结合使商用变换器的效率能够达到高于 92%，而常规的变换器效率为 85%^[1]。

交错并联（或多重）变换器在单级功率变换器中有以下几个优点：输入、输出电容上的低电流纹波；负载变化时的快速动态响应；提高变换器的功率处理能力，使效率高于 90%。商业化的控制器可以使每相变换器工作在兆赫兹的频率范围，从而有效地降低变换器的尺寸^[3]。新一代开关变换器控制器是基于数字信号处理（DSP）技术实现数字控制、监控、通信功能于一个 DSP 芯片中，这样既简化了设计又显著减少了计数器数目。这种简化设计使得多重化的开关电源产品只需一个简单的控制结构，通过软件就可以实现每个电源的标准化。DSP 的计算辅助软开关技术（比如说 ZVS，即零电压开关，或 ZCS，即零电流开关），可用于提高变换器的效率。除此之外，很多高效率的拓扑通过利用高级非线性数字控制技术能使电源在全工作范围内都得到优化的性能^[4]。

1.2 线性变换器

线性变换器（又称电压调整器）有两种类型，分别为串联式调整器和并联式调整器，它们主要的区别在于输出电压的调节方式。

1.2.1 串联式线性调整器

串联式电压调整器如图 1.1 所示，它本质上是一个可变电阻，这个可变电阻是由一个工作于线性区的晶体管和负载串联组成。

直流输出电压通过采样电阻网络 R_1 和 R_2 后，和参考电压分别加到误差放大器的输入端进行比较。误差放大器的输出电压通过一个电流放大器来驱动串联型 NPN 晶体管的基极。电源的输出电压就是通过驱动串联型 NPN 晶体管的基极来进行调整的。当采样电阻 R_2 上的电压增加时，串联型 NPN 晶体管的基极驱动电流减小，使传送到输出端的电流减小，进而使输出电压降低。调整后的输出电压值 V_{out}

① $1\text{in}^3 = 1.638\ 71 \times 10^{-5}\text{m}^3$ 。

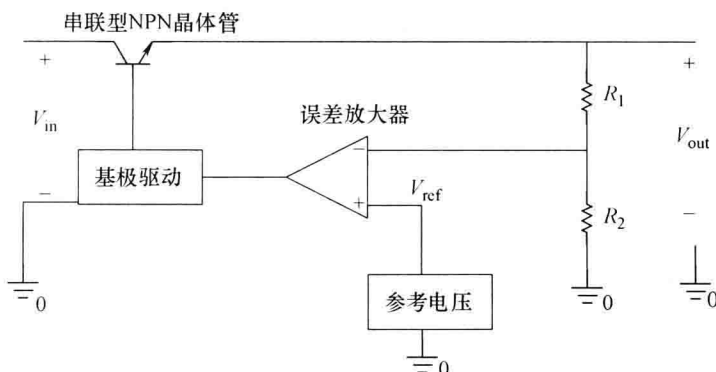


图 1.1 串联式电压调整器

可表示为

$$V_{\text{out}} = V_{\text{ref}} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \quad (1.1)$$

式 (1.1) 是假定串联晶体管是理想情况下的放大器工作电路的关系。输入电压的变化会导致串联晶体管的等效电阻 R_S 的变化。这个电阻 R_S 和负载电流 I_{load} 的乘积得到一个变化的电压差 V_{diff} ，用来补偿输入电压的变化，输出电压可以表示为

$$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} - V_{\text{diff}} \quad (1.2)$$

和

$$V_{\text{diff}} = I_{\text{load}} R_S \quad (1.3)$$

或

$$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} - I_{\text{load}} R_S \quad (1.4)$$

那么，对一个变化的输入电压来说，有

$$\Delta R_S = \frac{\Delta V_{\text{in}}}{I_{\text{load}}} \quad (1.5)$$

假定输出电压 V_{out} 和输入电压 V_{in} 是固定的，对一个变化的负载电流来说

$$\Delta R_S = \frac{-R_S \Delta I_{\text{load}}}{I_{\text{load}}} \quad (1.6)$$

输入电压的任何变化主要作用在串联晶体管上，输出电压的稳定性主要由反馈放大器的开环增益决定。一个串联式调整器可以实现一个简单的、低成本的输出电压源；然而，它只能提供一个比输入电压低的输出电压。即使这种线性调整器输入电压和输出电压之间一直有一端共地，但是通常需要在输入和输出之间加入直流隔离。这种串联式调整器的主要缺点是在大电流应用场合时串联晶体管上有过多的功耗，在串联晶体管的发射极和集电极之间的功耗可以表示为

$$P_{\text{diss}} = (V_{\text{in}} - V_{\text{out}}) I_{\text{load}} \quad (1.7)$$