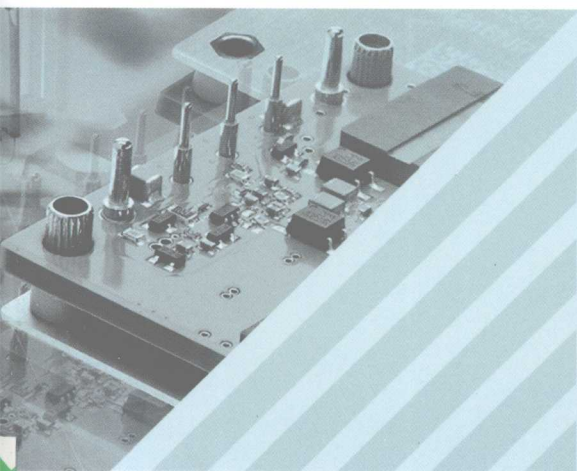


“十一五”国家重点图书出版规划项目
现代节能工程技术系列丛书

高效变换器 设计与应用电路

■ 周志敏 周纪海 纪爱华 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

“十一五”国家重点图书出版规划项目
现代节能工程技术系列丛书

高效变换器 设计与应用电路

周志敏 周纪海 纪爱华 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书结合国内外高效变换器的应用和发展,在概述高效变换器的基础上,全面、系统地阐述了低压差线性稳压器、TOPSwitch 系列器件应用电路、TinySwitch 系列器件应用电路、LinkSwitch 系列器件应用电路、PeakSwitch 系列器件应用电路、DPA-Switch 系列器件应用电路及电荷泵应用电路等最新应用技术。本书题材新颖实用,内容丰富,深入浅出,文字通俗,具有很高的实用价值。

本书可供电信、信息、航天、汽车、国防及家电等领域从事变换器开发、设计和应用的工程技术人员和高等院校师生阅读参考。

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

高效变换器设计与应用电路/周志敏,周纪海,纪爱华编著. —北京:电子工业出版社,2009.4

(现代节能工程技术系列丛书)

“十一五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-121-08475-1

I. 高… II. ①周… ②周… ③纪… III. ①变换器-设计 ②变换器-电路 IV. TN624

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 033891 号

策划编辑:富 军

责任编辑:韩玲玲

印 刷: 北京市李史山胶印厂

装 订:

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: 787×1092 1/16 印张: 23.25 字数: 595.2 千字

印 次: 2009 年 4 月第 1 次印刷

印 数: 4000 册 定价: 46.00 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 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

在全球倡导节能环保、提高能效的背景下，电源系统的设计正面临着前所未有的挑战。这些挑战来自两个方面：一方面，环境的恶化迫使人们不得不考虑采用更加清洁的替代能源；另一方面，电子设备的迅猛发展急需提升现有电源系统的转换效率，在满足政府及相关组织提出的节能环保标准和规范的同时，电源工作效率必须达到最佳水平已成为众望所归。北美、欧洲、日本和中国的相关机构所制定的计划，都对电源在待机和带载模式下的功耗设定了最高水平。如 CEC 提出的强制性要求和“能源之星”倡议，都已被各制造商广泛接受。现在，政府和行业组织已经开始制定一套针对更广泛的电气电子产品的新功率标准。从当前的技术水平来看，改善电源转换效率，优化不同负载条件下的功耗仍然是半导体厂商及电源设计人员所关注的焦点。

为此，本书结合国内外高效变换器技术的发展方向，系统地介绍了高效变换器的最新应用技术；在简要介绍高效变换器技术特性的基础上，重点介绍了高效变换器应用电路的设计。本书尽量做到有针对性和实用性，力求通俗易懂并结合实际，使得从事电源变换器的开发、设计、应用的技术人员从中获益。读者也可以以此为“桥梁”，系统、全面地了解和掌握高效变换器的设计和应用技术。

本书在写作过程中，无论从资料的收集还是技术信息的交流上，都得到了国内专业学者和变换器厂商的大力支持，在此一并表示衷心的感谢。

由于时间短，作者水平有限，故书中难免有不当之处，敬请读者批评指正。

编著者

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 绿色变换器	1
1.1.1 绿色变换器的分类及效率	1
1.1.2 绿色变换器的特性	5
1.1.3 三种开关式 DC/DC 变换器性能比较	10
1.2 AC 适配器	14
1.2.1 AC 适配器效率及散热管理	14
1.2.2 笔记本电脑 AC 适配器	19
第 2 章 低压差线性稳压器	23
2.1 低压差稳压技术	23
2.1.1 线性稳压器存在的问题	23
2.1.2 超低压差稳压技术	24
2.1.3 LDO 稳压器的分类和特性	28
2.2 LDO 稳压器特性及应用电路	30
2.2.1 LDO 稳压器特性及技术参数	30
2.2.2 LDO 稳压器的选择	58
2.2.3 低压差集成稳压器的应用	59
2.2.4 便携式电子设备微处理器内核电源	63
第 3 章 TOPSwitch 系列器件应用电路	66
3.1 TOPSwitch 系列器件简介	66
3.1.1 TOPSwitch 系列器件	66
3.1.2 TOPSwitch-II 系列器件	68
3.1.3 TOPSwitch-FX 系列器件	69
3.1.4 TOPSwitch-GX 系列器件	71
3.1.5 TOPSwitch-HX 系列器件	74
3.2 TOPSwitch 系列器件设计要素	76
3.2.1 TOPSwitch 设计要点	76
3.2.2 TOPSwitch-GX 设计要素	78
3.2.3 TOPSwitch-HX 设计要素	81
3.3 TOPSwitch 系列器件应用电路	84
3.3.1 5V/0.8A 精密开关电源应用电路	84
3.3.2 4W、5V 开关型稳压电源应用电路	85
3.3.3 16W 音频放大器电源	85
3.3.4 30W、宽范围输入、12V 输出电源应用电路	86

3.3.5	30W、12V 输出电源应用电路	88
3.3.6	25W 多路输出电源应用电路	89
3.3.7	57W、230V AC 多输出电源电路	94
3.3.8	7W(DVB-T)电源应用电路	96
3.3.9	180W PCSFX 主电源应用电路	97
3.3.10	13W、空载功耗 70mW DVD 电源应用电路	97
3.3.11	43W、100/115V AC 多输出电源应用电路	100
3.3.12	20W(峰值 25W)DVD 电源应用电路	102
3.3.13	45W(60W)多路输出电源应用电路	104
3.3.14	45W 通用输入的 LCD 显示器外部适配器应用电路	106
3.3.15	70W、19V 笔记本电脑外部适配器应用电路	107
3.3.16	16W 宽电压输入铅酸电池充电器应用电路	108
3.3.17	带 PFC 电路的 20W LED 驱动电路	109
3.3.18	隔离式、带功率因数校正(PFC)的 17W LED 驱动电路	112
3.3.19	17W PC 待机电源应用电路	113
3.3.20	35W 双输出-宽范围输入电源应用电路	115
3.3.21	150W 输出的高效电源应用电路	117
3.3.22	20W(峰值 80W)连续输出电源应用电路	118
3.3.23	65W 高效率、宽范围输入电源应用电路	120
3.3.24	多路输出的 35W 机顶盒开关电源电路	122
3.3.25	50W(峰值 70W)输出电源电路	123
3.3.26	30W /12V 输出电源电路	124
3.3.27	能进行外部限流的 12V、30W 开关电源电路	126
3.3.28	70W、19V 输出电源电路	127
3.3.29	250W、48V 输出的高效电源电路	129
3.3.30	150~300W 高功率、高效率功放电源电路	131
3.3.31	7.5V/1A 恒压/恒流输出式开关电源电路	135
3.3.32	双输出单端反激式电源电路	138
3.3.33	12V、20W 开关电源电路	140
3.3.34	通用绿色电源电路	142
第 4 章	TinySwitch 系列器件应用电路	148
4.1	TinySwitch 系列器件简介	148
4.1.1	TinySwitch 系列器件	148
4.1.2	TinySwitch-II 系列器件	149
4.1.3	TinySwitch-III 系列器件	150
4.1.4	TinySwitch-PK 系列器件	152
4.2	TinySwitch 应用电路设计要素	153
4.2.1	TinySwitch-III 设计要素	153
4.2.2	TinySwitch-PK 设计要素	155

4.3	TinySwitch 系列器件应用电路	157
4.3.1	反激式高效率 12V/1A 输出电源电路	157
4.3.2	14W 高效率 LED 驱动电路	159
4.3.3	4.56W CV/CC 充电器应用电路	161
4.3.4	15W、12V 适配器应用电路	163
4.3.5	10W 便携式音频播放器适配器应用电路	165
4.3.6	25W(峰值 28W)多路输出电源应用电路	167
4.3.7	65W 双输出电源应用电路	169
4.3.8	3W/5V 输出电源电路	171
4.3.9	1.25W/5V 输出电源电路	173
4.3.10	20W 双输出电源电路	174
4.3.11	9W/9V 输出电源电路	175
4.3.12	13W(峰值 17.2W)输出电源电路	177
4.3.13	12W 通用输入恒压适配器应用电路	178
4.3.14	5W 高效率充电器应用电路	180
4.3.15	无源 PFC LED 驱动电路	181
4.3.16	7.5W(峰值 13W)宽范围多路输出电源电路	183
4.3.17	17.7W(峰值 29.7W)多路输出电源电路	185
4.3.18	5V/2A(峰值 3A)输出电源电路	187
4.3.19	2.5W 恒流/恒压式手机电池充电器电路	189
4.3.20	15W 和 10W 的 PC 待机电源	190
第 5 章	LinkSwitch 系列器件应用电路	194
5.1	LinkSwitch 系列器件简介	194
5.1.1	LinkSwitch 系列器件	194
5.1.2	LinkSwitch-TN 系列器件	195
5.1.3	LinkSwitch-LP 系列器件	196
5.1.4	LinkSwitch-HF 系列器件	197
5.1.5	LinkSwitch-XT 系列器件	198
5.2	LinkSwitch 系列器件应用电路设计要素	199
5.2.1	LinkSwitch 系列器件设计要素	199
5.2.2	LinkSwitch-TN 系列器件设计要素	201
5.2.3	LinkSwitch-XT 系列器件设计要素	203
5.3	LinkSwitch 系列器件应用电路	205
5.3.1	2.75W 恒压/恒流(CV/CC)输出电源电路	205
5.3.2	2.75W CV/CC 充电器或适配器应用电路	207
5.3.3	3.1W、12V 输出电源电路	208
5.3.4	1.5W CV/CC 充电器或适配器应用电路	209
5.3.5	1.5W CV/CC 充电器或适配器应用电路	210
5.3.6	2.5W 充电器/适配器应用电路	212

5.3.7	2.5W 稳压充电器/适配器应用电路	213
5.3.8	1.44W、12V 输出电源电路	214
5.3.9	3W、12V 输出电源电路	215
5.3.10	0.6W、12V 输出非隔离电源电路	217
5.3.11	1.2W 非隔离双输出电源应用电路	218
5.3.12	非隔离降压式 LED 驱动电路	219
5.3.13	可调光 LED 驱动电路	220
5.3.14	高效 LED 驱动电路	222
5.3.15	1.25W 非隔离恒流 LED 驱动电路	223
5.3.16	2W、6.2V 输出电源电路	224
5.3.17	0.75W、5V 输出电源电路	225
5.3.18	9W 多输出非隔离式电源电路	226
5.3.19	2W 低成本恒压适配器应用电路	227
5.3.20	2.75W 高效率恒压/恒流输出 USB 充电器应用电路	229
5.3.21	1.75W 高效率充电器应用电路	230
5.3.22	2W 充电器应用电路	231
5.3.23	3W 高效率恒压/恒流充电器应用电路	232
5.3.24	4.56W 无绳电话适配器应用电路	234
5.3.25	2.4W、12V 输出高效率电源电路	235
5.3.26	1W、7V 输出电源电路	236
5.3.27	0.5W 非隔离恒流 LED 驱动电路	238
第 6 章	PeakSwitch 系列器件应用电路	240
6.1	PeakSwitch 系列器件	240
6.1.1	PeakSwitch 系列器件简介	240
6.1.2	PeakSwitch 系列器件设计要素	241
6.2	PeakSwitch 系列器件应用电路	246
6.2.1	峰值输出达 2.7A 的反激式电源电路	246
6.2.2	36W(峰值 72W)变速直流电机驱动电源	248
6.2.3	峰值输出功率大于 2 倍连续输出功率的音响用电源电路	250
6.2.4	32V、2.2A(峰值功率 70W)音频放大器电源电路	252
6.2.5	12V、2A 峰值功率(36W)的音频放大器电源电路	254
6.2.6	33W(峰值 60W)PVR 电源电路	256
第 7 章	DPA-Switch 系列器件应用电路	259
7.1	DPA-Switch 系列器件简介	259
7.1.1	DPA-Switch 系列器件性能特点及引脚功能	259
7.1.2	DPA-Switch 系列器件应用电路设计要素	261
7.2	DPA-Switch 系列 IC 应用电路	270
7.2.1	高效 30W 正激式变换器	270
7.2.2	高效、低成本的 6.6W 反激式变换器	273

7.2.3	低成本的 PoE Vo IP 电话用变换器	274
7.2.4	30W DC/DC 变换器应用电路	276
7.2.5	25W 反激式 DC/DC 变换器应用电路	278
7.2.6	5V、70W DC/DC 同步整流变换器应用电路	280
7.2.7	16.5W DC/DC 变换器应用电路	282
7.2.8	2.5V、20W DC/DC 同步整流变换器应用电路	284
7.2.9	5W 反激式 DC/DC 变换器应用电路	286
7.2.10	60W 同步整流 DC/DC 变换器应用电路	288
7.2.11	50W DC/DC 双输出变换器应用电路	290
7.2.12	19.2W DC/DC 变换器应用电路	292
7.2.13	60W DC/DC 变换器应用电路	293
第 8 章	电荷泵应用电路	296
8.1	电容式开关变换器	296
8.1.1	电荷泵工作原理	296
8.1.2	新型电荷泵电路	310
8.2	电荷泵应用电路	316
8.2.1	CAT3636 驱动白光 LED 电路	316
8.2.2	SP 系列电荷泵驱动 LED 闪光灯方案	322
附录 A	集成开关变换器典型应用电路图	330
参考文献		359

第 1 章

概 述



1.1 绿色变换器

如今，在能源成本不断攀升，以及对全球变暖的担忧日益加剧的背景下，电源工作效率达到最佳水平已成为众望所归。而且，相关法规正变得越来越成熟，并开始要求电子设备在所有负载条件下提高效率。根据美国劳伦斯伯克力国家实验室（LBNL）的研究，住宅内所有电力能耗的 5% ~ 10% 都是电器在待机模式下产生的，因为大部分电气及电子设备在其使用寿命中的大多数时间内都处于待机模式。鉴于此背景下功率要求的重要性，加州能源委员会（CEC）、“能源之星”和联邦能源管理计划（FEMP）出台的法规，以及欧洲、日本和中国的同类机构所制定的计划，都对外部电源在待机和带载模式下的功耗设定了最高功耗水平。虽然许多此类标准都是非强制性标准，但其中的某些标准，如 CEC 提出的强制性要求和“能源之星”的倡议，都已被各制造商广泛接受。现在，政府和行业组织已经开始着手制定一套针对更广泛的电气电子产品的新功率标准。

为了符合能效标准，大部分电源都采用某种形式的开关技术设计而成。尽管开关电源 SMPS 的拓扑结构有很多种，但它们都可以归为三种基本类型：降压型、升压型和降升压型（或逆变器）。在降升压变换器的标准扩展中，变压器取代电感在初级和次级之间提供电气隔离，从而构成隔离反激式变换器。每个这样的变换器都有一个开关 MOSFET，其栅极驱动用于调节电源输出。可以利用不同的技术来实现对 MOSFET 的驱动。传统的 PWM（脉宽调制）技术在高负载条件下具有很高的效率，但在低输出负载条件下损耗较大。变频模式能在低负载条件下提供较高的效率，但它存在 EMI 问题并产生听得见的噪声。

1.1.1 绿色变换器的分类及效率

1. 绿色变换器的分类

目前，电源 IC 已发展成为半导体器件中的一个大类，新型电源 IC 在这方面有很大的改进。电源 IC 分类如图 1-1 所示。

(1) 线性稳压器（LDO）

首先，线性稳压器最大的损耗是压差大，而新型线性稳压器一直在为减小压差而努力。两年前低压差的水平是几百 mA 输出的 LDO 电源 IC，可以做到 100mA 输出时，压差为 100mV 左右的水平（压差的大小与输出电流几乎成正比关系），1999 年可做到 60 ~

80mV/100mA，但到2000年已能做到每100mA输出压差为40~50mV（典型值）的水平。例如，MAX1735负压LDO线性稳压器在200mA输出时，其压差典型值仅为80mV。

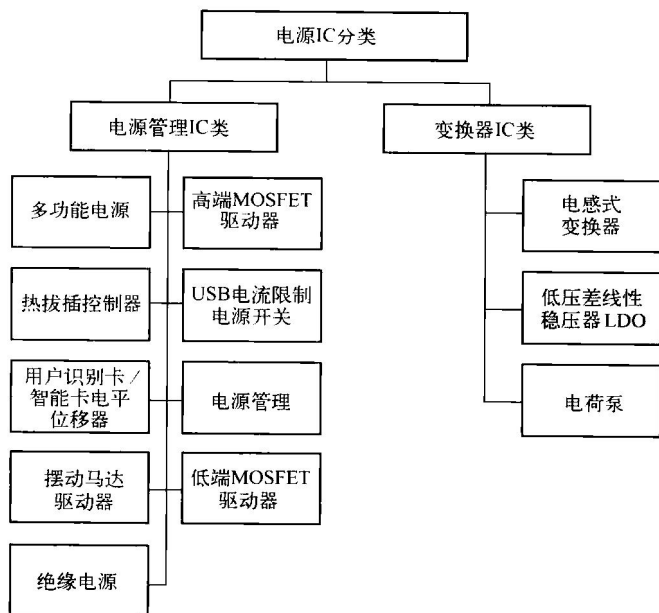


图 1-1 电源 IC 分类

在大电流输出的情况下，压差与输出电流的比值可做得更小，而且压差与输出电流关系不大。例如，在1~7.5A输出电流时，其典型的压差为200~700mV。例如，德州仪器公司的TPS75133Q在1.5A输出时，典型压差为160mV；TPS75233Q在2A输出时，典型压差为210mV（2000年3月的产品）。

其次是减小静态电流及工作电流（它们都是流入地而不流经负载的电流），它们也是一种损耗。目前有超低静态电流的器件，其典型值为1 μ A至几 μ A，有些输出电流小的可做到1 μ A以下，而较小的低功耗电源IC的工作电流为几十 μ A，超低功耗的为几 μ A。例如，MAX1725（输出20mA）的工作电流典型值仅为2 μ A。

（2）电感式开关变换器

电感式开关变换器是高效率器件，采用同步整流技术，效率可提高3%~5%，其效率可达88%~97%。例如，LTC3402低功耗同步整流升压式变换器，其效率高达97%。过去认为电感式开关变换器的工作电流比线性稳压器大，但现在已做到同一水平了。例如，MAX1605升压反转器，其工作电流仅18 μ A。

（3）电荷泵

电荷泵电路主要用于电压反转器，即输入为正电压、输出为负电压，它可以简化电气电子产品的电源设计。由于工作频率采用2~3MHz，因此电容容量较小，可采用多层陶瓷电容（损耗小、ESR低），不仅可提高效率及降低噪声，并且减小了电源的空间。

近年来，利用电荷泵的倍压功能、由稳压电路组成正输出的稳压电源，其效率高于LDO线性稳压器。例如，MAX1730降压式电荷泵加稳压的器件，可输出1.8V（或1.9V）的电压及50mA的电流，其峰值效率可大于85%。LTC1503电荷泵加线性稳压器输出为2V、

100mA, 其典型效率比 LDO 高 25%。

上述三种电源 IC 都有关闭电源控制功能 (或选通电源功能), 在关闭状态时一般耗电在 $1\mu\text{A}$ 左右, 而个别的可做到 10nA 的水平。关闭电源控制不仅仅使电源 IC 的耗电降到最小, 而且更主要的是将它所供电的电路都关闭了, 可大大地节省电能。

电源 IC 是一个功率器件, 工作时会产生较大的热量及较高的温度, 所以以前它一直是一个较易损坏的器件。近年来, 电源 IC 中加进了不少的保护电路, 这使其工作得更为安全、可靠。这些保护措施有: 输出电流限制 (内部电流限制或外部由用户来设定); 过流保护及短路保护; 过热关闭; 输入过压保护及欠压锁存 (包括 EMI 抑制); 电感式开关变换器中还有软启动 (防止上电时有过大的冲击电流); 防止电池极性接反保护等。

电源 IC 的封装主要取决于其输出功率, 在大电流输出时一般采用 TO-220 或 TO-263 这一类的封装, 而在从几十或几百毫安输出至 2A 输出的电源 IC 一般都采用小尺寸 SOIC、MSOP、 μMAX 、SOT-23 等小尺寸封装。近年来, 电源 IC 也有采用尺寸更小的 SC-70 封装的, 甚至采用微 SMD 最小尺寸封装。例如, 美国国家半导体公司 (NS) 在 1999 年开发出型号为 LP2980 的 LDO 电源 IC (输出电流为 50mA), 采用微 SMD 封装 (一种倒装式 BGA 封装)。LP2980 的外尺寸是 1.107mm (长) $\times 0.93\text{mm}$ (宽) $\times 0.85\text{mm}$ (高), 实际上这是管芯的尺寸。它是目前业界最小尺寸的电源 IC。

无论线性稳压器还是电感式开关变换器、电荷泵电路, 其输出电压中都有一定的噪声 (一种杂乱无章的高频成分), 在电感式开关变换器中也称为纹波电压。有些模拟电路要求低噪声, 所以近年来开发出一类低噪声电源 IC。

线性 LDO 的输出噪声最低, 一般可以做到数十 μV_{rms} , 最好的可以做到 $30 \sim 20\mu\text{V}_{\text{rms}}$ 。电感式开关变换器及电荷泵的输出噪声则大得多, 一般低噪声产品是几十 $\text{mV}_{\text{p-p}}$, 如 $60 \sim 30\text{mV}_{\text{p-p}}$; 而普通不是低噪声产品的则可达上百 $\text{mV}_{\text{p-p}}$ 。近年来, 输出电压一直在降低, 如 2.5V 、 1.8V , 个别的为 1.5V , 则噪声与输出电压的比值显得高了, 所以在降低噪声上还需要作进一步的改进。

电感式开关变换器及电荷泵电路中的噪声与外接的电容容量及其串联等效电阻 (ESR) 有关, 新型多层陶瓷电容的出现对降低噪声有较好的效果。例如, TC3684 电荷泵电路在输出电流 $I_{\text{OUT}} = 1\text{mA}$ 、 $C_{\text{OUT}} = 3.3\mu\text{F}$ ($\text{ESR} = 0.1\Omega$) 时, 其纹波电压 $V_{\text{RIPPLE}} = 7\text{mV}_{\text{p-p}}$ 。

由于线性 LDO 的低噪声产品比电感式开关变换器的低噪声产品的噪声要小 1000 倍左右, 所以在某些模拟电路中, 虽然线性 LDO 的效率低, 但依然被选用。

除了上述一些主要的发展外, 电源 IC 在设计上还考虑了用户使用上的方便, 如下所述。

① 双模式电源 IC。虽有较多系列化的固定输出电压品种, 但在应用中可通过外设两电阻来设定需要的输出电压, 以满足特殊输出电压的需要, 即所谓双模式电源 IC。

② 电池的寿命。为了延长电池的寿命, 把电感式开关变换器设计成降压/升压式变换器。当电池电压高于输出电压时为降压式; 当电池电压降到低于输出电压时, 它又是升压式, 于是延长了电池的使用寿命。

③ PFM 及 PWM 可自行设定。电感式开关变换器的效率与负载大小有关, 如 PWM 型电感式开关变换器在大负载时效率较高, 但在很轻负载时则效率很低; 而 PFM 型则在小负载时效率较高 (甚至输出 1mA 时也有大于 90% 以上的效率), 这样在电源 IC 上设有轻、重负载选择端, 用户可以根据负载大小来选择, 十分方便。也有 PWM 与 PFM 根据负载大小而自

动转换的品种, 则更为方便, 效率也可保持较高的水平。

④优化组合。电感式开关变换器中集成了线性稳压器。电感式开关变换器效率高但噪声高, 线性稳压器噪声低但效率低。在对噪声不敏感的大部分电路中采用电感式开关变换器作为电源, 仅小部分对噪声敏感的模拟电路用线性稳压器作为电源, 则一个电源 IC 就足够了 (如 MAX1705 升压式 DC/DC 变换器中有 200mA 输出的线性稳压器)。

总之, 电源 IC 的发展满足了电子产品的需要, 并且促进了电子产品更进一步的发展。

2. 绿色变换器的效率

在电子设备的电源系统设计中, 应提高产品性能, 进一步提高电源效率。但因电子设备对成本和体积的要求比较苛刻, 所以设计中会牺牲系统的某些指标而采取一些折中的解决方案。新型供电电路的出现弥补了电子设备的电源系统设计中的不足, 能够保证系统高可靠性、高性能指标的要求, 并有效地提高了电源效率。供电电路的主要参数有成本、效率 (电池寿命)、输出纹波、噪声及静态电流。表 1-1 列出了这些参数 (即供电电路特性) 与电路结构、输入/输出电压范围的关系。

表 1-1 供电电路特性与电路结构、输入 (V_{IN}) / 输出 (V_{OUT}) 电压的关系

变换器	低成本	高效率	低噪声	低静态电流	变换器	低成本	高效率	低噪声	低静态电流
$V_{IN} \gg V_{OUT}$					$V_{IN(MAX)} = V_{OUT}$				
LDOLDO	A	D	A	A	电荷泵稳压器	B	C	C	C
电荷泵稳压器	B	B	C	C	电荷 + LDO	C	C	A	D
电荷 + LDO	C	B	A	D	电感式升压	C	A	D	B
电感式降压	C	A	C	B	电感式升压 + LDO	D	B	B	C
电感式降压 + LDO	D	B	A	C					
$V_{IN} = V_{OUT}$					$V_{IN} \ll V_{OUT}$				
LDOLDO	A	B	A	A	电荷泵稳压器	B	C	C	C
电感式	C	A	C	B	电荷 + LDO	C	C	A	D
电感式降压 + LDO	D	C	A	C	电感式升压	C	A	D	B
电感式升压 + LDO	D	B	B	C	电感式升压 + LDO	D	B	B	C
电感式升降压	D	B	D	C					
$V_{IN(MIN)} < V_{OUT} < V_{IN(MAX)}$									
电荷泵稳压器	B	C	C	C					
电荷 + LDO	C	D	A	D					
电感式升压 + LDO	D	A	B	C					
电感式升降压	D	B	D	C					

注: A—非常好; B—好; C—一般; D—不好。

虽然电感式开关变换器可以发挥近 100% 的效率, 但若以低负载电流工作, 则其效率会大幅下降, 甚至比 LDO 的效率还低。只有采用断续导电模式 (DCM) 再配合多种不同的工作模式, 才能提高电感式开关变换器的效率。

目前, 市场上有多种不同的电感式开关变换器可供选择, 如采用升压、降压及反相配置等不同的电感式开关变换器, 而其电感式降压开关变换器广泛应用于采用电池供电的电子设备电源方案中。其原因是电感式降压开关变换器的效率接近 100%, 能否发挥这样高的效率则取决于工作环境及电感式降压开关变换器在系统设计中连接的负载。以较高的负载电流工作时, 电感式降压开关变换器的效率比 LDO 高一倍, 但若负载电流很小, 其效率便会大打折扣。

1.1.2 绿色变换器的特性

1. LDO 与电感式降压开关变换器

LDO 与电感式降压开关变换器在不同负载电流下所发挥的效率比较如图 1-2 所示。从图 1-2 中可以看到,在大部分的负载情况下 LDO 只能发挥约 40% 的效率,而电感式降压开关变换器的效率则超过 90%。但当负载电流降至近 0.1mA 的极低水平时,电感式降压开关变换器的效率会跌至比 LDO 的效率还低的水平。

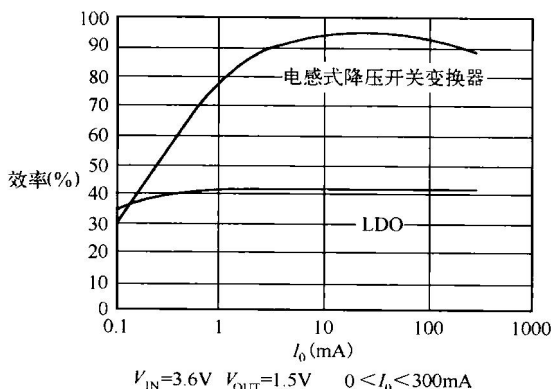


图 1-2 LDO 与电感式降压开关变换器的效率比较图

电子设备中的微处理器、数字信号处理器的工作模式为：备用、待机、第 1 次工作、第 2 次工作、满载工作。在这个工作模式下，LDO 的平均总效率和电感式降压开关变换器的平均总效率分别为

$$\eta_1 = I_o / I_g \quad (1-1)$$

式中， η_1 为 LDO 的平均总效率 (%)； I_o 为负载电流 (mA)； I_g 为电池电流 (mA)。

$$\eta_2 = I_g / I_p \quad (1-2)$$

式中， η_2 为电感式降压开关变换器的平均总效率 (%)； I_p 为这个模式的平均 I_g (mA)。

例如，移动电话中的微处理器、数字信号处理器有 90% 的时间工作在低负载的待机模式，此期间只耗用 0.1mA 的电流。若采用 LDO 为微处理器、数字信号处理器提供电源供应，则电池只需要提供 0.12mA 的供电电流便可驱动 LDO。但若采用电感式降压开关变换器，则电池需要提供 0.14mA 的供电，耗电量比 LDO 高 15%。

电感式降压开关变换器在其余的 10% 时间内可以发挥远比待机模式更高的效率，对于以电池供电的系统来说，电感式降压开关变换器是一个较为理想的选择，但有多个方法可以进一步提高电感式降压开关变换器在低负载电流工作时的效率。

改善电感式降压开关变换器效率的方法是：尽量减少电感式降压开关变换器在低负载电流工作时产生的导电损耗；尽量减少开关损耗。理想的电感式降压开关变换器电路如图 1-3 所示，若开关处于位置 1，则电感器的电压为 $V_{IN} - V_o$ ；若开关处于位置 2，则电感器的电压为 $-V_o$ 。

若开关处于位置 1，则电感器的电流斜率为正数，可以利用以下公式计算电感器电流斜

率的数值:

$$V_L = \frac{di}{dt} \quad (1-3)$$

式中, V_L 为电感器端电压。

斜率为

$$K = \frac{V_{IN} - V_L}{L} \quad (1-4)$$

若开关处于位置 2, 则电感器的电流斜率为负数, 其斜率为

$$K = \frac{-V_L}{L} \quad (1-5)$$

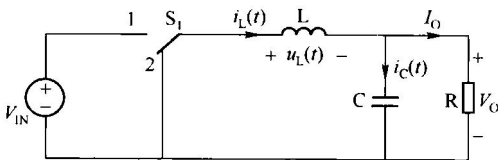


图 1-3 理想的电感式降压开关变换器电路图

电感式降压开关变换器在稳定状态时, 其直流输出电压与占空度及输入电压成正比, 即 $V_O = D \times V_{IN}$ 。流经电感器的平均电流等于输出电流。因此, 若负载电流上升, 则电感器的平均电流也随着上升。若负载电流下降, 则电感器的平均电流也随着下降。但无论负载电流如何波动, 纹波电流的波幅都保持不变。纹波的波幅 (DIL) 取决于输入及输出电压, 也取决于电感器的电感值, 但不受电流的影响。每当负载电流跌至较低的水平时, 电感器电流的极性就会逆转, 电感器电流在周期结束前下跌至零, 导电损耗便由此产生。

在示波器上观看流经电感器的电流, 便可看到电感器电流中直流部分的纹波。若调低电感式降压开关变换器的负载电流, 便会发现电感器电流的直流部分也会随着下跌, 但纹波的波幅则不会出现任何变动。若不断将负载电流调低, 直到低至某一点时电感器电流会在一瞬间低于零。为避免电感器电流在一瞬间低于零, 可采用过零检测电路, 图 1-3 中的 S_1 开关在电感器电流跨越零点时立即导通。 S_1 开关导通之后, 电感器中的电流将以断续的方式流动。此时电感式降压开关变换器已改为断续导电模式工作。

由于电感器电流会跌至零, 电流甚至会停止一段时间, 为此开关管必须执行二极管的功能, 让电流只能单向流动, 以确保电感式降压开关变换器在较低负载电流下仍能以较高的效率工作。美国国家半导体的 LM26XX 系列电感式降压开关变换器都具备这个功能。

2. 电源变换器的不同工作模式

电源变换器既然有多种开关损耗, 那么在实际应用中需要解决的问题就是如何将这些损耗减至最少。一般来说, 采用 PWM 技术的电感式开关变换器在进入 PWM 工作模式时可以将开关的开关频率保持在一个固定的水平。虽然 PWM 的优点很多, 但其中一个缺点是每当电感式开关变换器在较低负载电流工作时, 其效率就会下降。

当电感式开关变换器以接近满载或较大负载电流工作时, 导电损耗远比瞬态开关损耗

高。若负载电流下降,则导电损耗也会按比例下跌,但大部分开关损耗则不会下跌,因为振荡器及电感式开关变换器的开关频率一直保持不变,并继续以这个较高的频率进行开关。因此开关损耗会占电感式开关变换器总体损耗的一个较大的比例。正是由于这个原因,负载电流若下跌,则效率也会随着下降。

PFM 模式可以降低开关损耗。令开关频率随着负载电流的下跌而下跌,可降低开关损耗,提高效率。PFM 模式属于可以降低开关频率以便减少开关损耗的工作模式。若电感式开关变换器采用 PFM 模式运行,则其开关频率与负载的大小成正比,但开关频率也与其他系数成正比。电感式开关变换器若采用 PFM 模式运行,即使负载电流较低,也可发挥比 PWM 模式高的效率。电感式开关变换器只要灵活采用 PWM 及 PFM 两种工作模式,便可以在较宽的低负载范围内发挥更高的效率。

美国国家半导体公司的 LM2618 电感式开关变换器的测试数据如图 1-4 所示。这种电感式开关变换器设有简单的控制装置,可以在 PFM 及 PWM 两种工作模式之间不断转换。

LM2618 若以接近 400mA 的满载电流工作,则效率非常高。但当负载下降,负载电流跌至约 50mA 时,LM2618 的效率开始急降,主要因为 LM2618 采用 PWM 模式工作,此时开关损耗占较大的比例。若 LM2618 的负载电流下跌至 50mA 时改用 PFM 模式工作,则虽然 LM2618 的效率比之前稍低,但仍然远比采用 PWM 模式时的效率高。由于电感式开关变换器可以根据负载电流的高低在两种不同的工作模式之间灵活转换,因此可在较宽的负载电流范围内发挥比单一工作模式更高的效率。在 PWM 及 PFM 两种模式之间灵活转换的电感式开关变换器可在极广阔的负载范围内以更高的效率工作,而且静态电流(I_Q)极低。但 PFM 模式也有其缺点,它的可变频率会对一些灵敏度极高的系统,如高灵敏度模拟系统或射频系统,造成干扰。

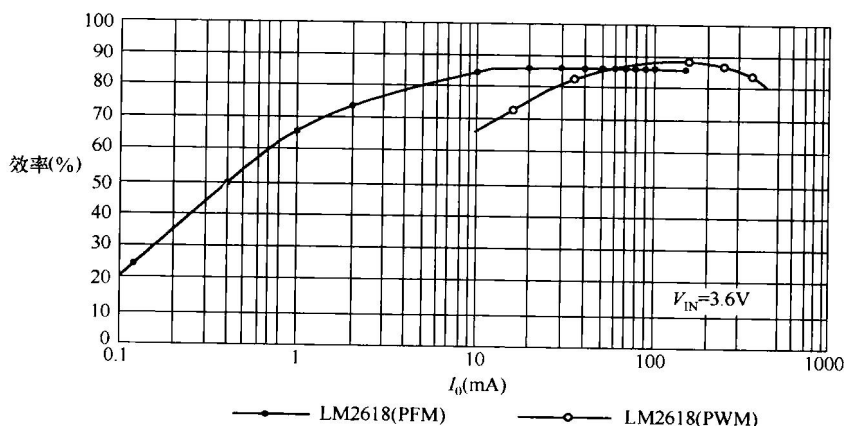


图 1-4 LM2618 电感式开关变换器的测试数据

PFM 模式的输出纹波电压比 PWM 模式的输出纹波电压高。所设计的系统若不能承受可变频率产生的噪声影响,并要求系统的电压纹波必须保持在极低的水平,则需要考虑采用另一种工作模式的电源变换器,以提高电源系统的效率。其解决办法是采用 LDO。

LDO 的静态电流低,系统若需要在一段很长的时间内采用待机模式,并希望在此期间耗用极低的负载电流,则采用 LDO 是一个较好的选择,此时系统的效率可得以提高,外部

电源提供的电流（即整体的输入供电电流）也会很低，因此可改善电源工作效率。LDO 产生的噪声远比任何类型的电感式开关变换器低，这也是 LDO 的主要优点。若要提高电感式开关变换器的效率，则可以一方面减低开关损耗，另一方面减低导电损耗，以确保电子设备在极低的负载电流工作时，仍然可提供高的电源效率。

3. 电感式升压开关变换器

电感式升压开关变换器是 LDO 无法取代的，尽管电荷泵稳压方式可以实现升压功能，但其效率较低，输出电流较小。因为电感式升压开关变换器的输出纹波和开关噪声较大，所以需要选择好的控制结构以消除振荡噪声和 MOSFET 引起的效率损失。

最新的电感式升压开关变换器内置同步整流管和开关管，实现了高效率、低功耗、小体积、多功能等特性。目前，电子设备的工作电流范围越来越宽，这就要求单个 IC 能够实现多种控制算法，其包含低噪声的 PWM 工作模式和低工作电流的 PFM 工作模式，可以提供很宽的负载电流，控制方式的改变可以瞬间完成而不会造成输出中断。如果采用外部同步时钟，则可以减小开关对系统尤其是射频系统的影响。IC 利用一个瞬时接通按钮进行通断控制，实现对电源系统的开关，以提高可靠性和减小体积。

将电感式升压开关变换器与 LDO 相结合可实现两个功能，即低噪声升压和高效率的升降压。典型的升降压应用是从锂离子电池得到 3.3V 的电压，因为在电池的大部分工作时间输出电压是 3.6V，这时电感式升压开关变换器待机，而 LDO 工作，所以效率非常高，与传统的 SEPIC 方式相比可以使用更小的外围器件。

为了进一步提高电感式开关变换器的效率，可选用 H 桥式变换器，这种结构需要一个电感、两个 MOSFET 开关和两个整流二极管。目前这些外围器件和控制结构的成本仍然较高，而且外部开关损耗也限制了其效率的提高，特性指标也有待于进一步的完善。随着集成工艺的发展，H 桥式变换器的应用会越来越多。

4. LDO 与电感式开关变换器

无论何种功率级别的电子设备，特征功能数量的增加都会极大地促进电子设备对低压输出的需求量，如面向图像处理应用的处理器，在视频捕获的过程中需要最高可达 360mW 的功率。在满负荷运转的情况下，系统内部负载需要的峰值功率可达 4W 以上。这种功率消耗水平很快就可以耗尽电池的能量。但是，影响电池运行时间的另外两个十分重要的因素是功率变换效率和系统功率管理水平。

较差的功率变换效率将导致设备发热，这些热量是由在能量转化过程中变换器损失的功率生成的。在电子设备内部，没有散热片，只有紧密布置在一起的 PCB 电路、器件和电池，所以没有办法为电子设备散热。发热将导致电池使用寿命缩短，反过来也会影响电子设备的可靠性。

效率的计算方法是将输出功率除以输入功率，或者将负载功率除以输入功率。应当指出的是，必须在电感式开关变换器的所有外部元件之前的节点处测量输入电压和输入电流。同样地，也必须在电感式开关变换器的所有外部元件之后的节点处测量输出电压和输出电流。

LDO 被认为是最简单的调节器，LDO 内没有开关装置，它将输入电压直接降为一个较低的电压值。LDO 最主要的缺点是产生的热量较高，这是由于 LDO 的转化效率近似等于输