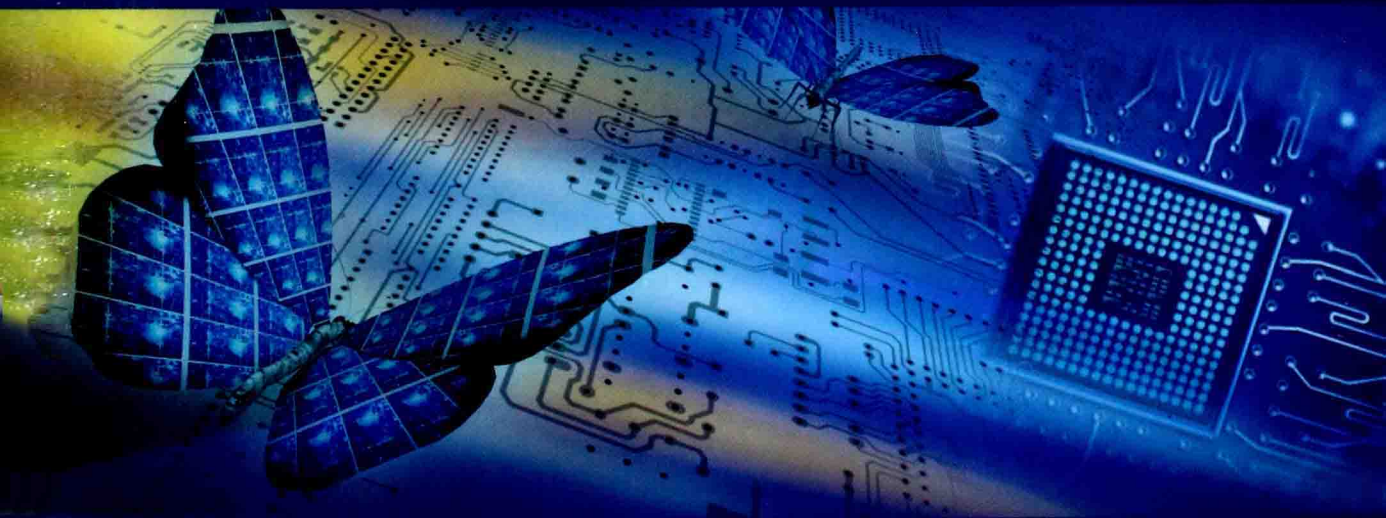


电子工程技术丛书

# 电子系统的 电源电路设计

● 黄智伟 编著



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

电子工程技术丛书

# 电子系统的电源电路设计

黄智伟 编著

电子工业出版社

**Publishing House of Electronics Industry**

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

电源电路是电子系统的重要组成部分。本书从工程设计要求出发,图文并茂地介绍了模拟电路的电源电路、RF(射频)系统的电源电路、ADC和DAC的电源电路、高速数字电路(FPGA)的电源电路、无线电源电路、开关稳压器电源电路、基准电压源/电流源等电源电路设计和制作中的一些方法和技巧,以及应该注意的问题,具有很好的工程性和实用性。

本书是为从事电子系统设计的工程技术人员编写的一本学习电源电路设计与制作基本知识、方法和技巧的参考书。本书也可以作为本科院校和高职高专电子信息工程、通信工程、自动化、电气工程等专业学习电源电路设计和制作的教材,以及作为全国大学生电子设计竞赛的培训教材。

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

电子系统的电源电路设计 / 黄智伟编著. —北京: 电子工业出版社, 2014.5

(电子工程技术丛书)

ISBN 978-7-121-22952-7

I. ①电… II. ①黄… III. ①电源电路—电路设计 IV. ①TN710.02

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第073371号



责任编辑: 刘海艳 (lhy@phei.com.cn)

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订: 涿州市京南印刷厂

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: 30.25 字数: 775千字

印 次: 2014年5月第1次印刷

印 数: 3000册 定价: 79.80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 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

第 1 章 模拟电路的电路电源设计	1
1.1 与电源有关的放大器参数	1
1.1.1 电源电压和电流 ( $V_{DD}$ 、 $V_{SS}$ 和 $I_{DD}$ 、 $I_Q$ )	1
1.1.2 电源抑制比 (PSRR)	1
1.1.3 电源抑制比参数 $k_{SVR}$	3
1.1.4 绝对最大值	4
1.1.5 推荐的工作条件	5
1.1.6 电特性	5
1.1.7 输入电压范围	7
1.1.8 共模抑制比 (CMRR)	8
1.2 LDO 线性稳压器电源电路	11
1.2.1 LDO 线性稳压器与 DC-DC 转换器的差异	11
1.2.2 模数混合系统的放大器电源电路结构	13
1.2.3 LDO 线性稳压器简介	16
1.2.4 选择 LDO 线性稳压器的基本原则	18
1.2.5 LDO 线性稳压器的参数	20
1.2.6 LDO 线性稳压器的噪声分析	27
1.2.7 LDO 线性稳压器的 PSRR	41
1.2.8 LDO 线性稳压器电容选型	48
1.2.9 线性稳压器输出电压公差分析	57
1.3 线性稳压器电路设计实例	61
1.3.1 可供选择的系列 LDO 线性稳压器产品	61
1.3.2 $\pm 15V$ 输出的低噪声线性稳压器电路	62
1.3.3 500mA 超低噪声、高 PSRR 射频 LDO 线性稳压器电路	64
1.3.4 200mA 超低噪声、高 PSRR 射频 LDO 线性稳压器电路	65
1.3.5 36V/1A/4.17 $\mu V$ (RMS 值) 射频 LDO 线性稳压器电路	66
1.3.6 2A 输出电流 RMS 值 6 $\mu V$ 噪声 RF LDO 线性稳压器	68
1.3.7 -36V 1A 超低噪声负电压线性稳压器电路	71
1.3.8 -20V 200mA 低噪声负电压线性稳压器电路	72
1.3.9 低噪声快速瞬态响应 1.5A LDO 线性稳压器电路	72
1.3.10 24V 输入、50mA 输出 SC70 封装 LDO 线性稳压器电路	74

1.3.11	500nA 超低静态电流 150mA LDO 线性稳压器电路	75
1.3.12	1.25~125V 可调输出电压 700mA 输出电流线性稳压器电路	76
1.3.13	40V 高压超低静态电流 LDO 线性稳压器电路	78
1.3.14	500mA 低压降 CMOS 线性稳压器电路	78
1.3.15	3A 输出电流、快速响应、高精度的 LDO 线性稳压器	79
1.3.16	具有反向电流保护功能的 1%高准确度 1A LDO 线性稳压器电路	80
1.3.17	无输出电容器 150mA LDO 线性稳压器电路	81
1.3.18	极低输入极低压差 2A LDO 线性稳压器电路	82
<b>第 2 章</b>	<b>RF (射频) 系统的电源电路设计</b>	<b>84</b>
2.1	RF 系统的电源要求	84
2.1.1	RF 系统的电源管理	84
2.1.2	RF 系统的电源噪声控制	87
2.1.3	手持设备射频功率放大器 (RFPA) 的供电电路	92
2.2	RFPA 电源电路设计	96
2.2.1	基带和 RFPA 电源管理单元 (PMU)	96
2.2.2	用于 RFPA 的可调节降压 DC-DC 转换器	98
2.2.3	具有 MIPI <sup>®</sup> RFFE 接口的 RFPA 降压 DC-DC 转换器	107
2.2.4	用于 3G 和 4G 的 RFPA 降压-升压转换电路	117
2.2.5	具有 MIPI <sup>®</sup> RFFE 接口的 3G/4G RFPA 降压-升压转换器	121
2.2.6	300mA 3.6V RFPA 电源电路	124
<b>第 3 章</b>	<b>ADC 和 DAC 的电源电路设计</b>	<b>126</b>
3.1	ADC 和 DAC 电源电路的结构形式	126
3.1.1	开关稳压器+低噪声 LDO 线性稳压器形式	126
3.1.2	利用开关稳压器为 ADC 供电	127
3.2	ADC 和 DAC 电压基准的选择	135
3.2.1	电压基准对 ADC 和 DAC 的影响	135
3.2.2	选择电压基准源需要注意的一些问题	136
3.2.3	可供选择的电压基准芯片	138
3.3	ADC 和 DAC 电压基准电路设计实例	139
3.3.1	10 位 ADC 基准电压电路	139
3.3.2	12 位 ADC 基准电压电路实例 1	139
3.3.3	12 位 ADC 的电压基准电路实例 2	140
3.3.4	16 位 ADC 基准电压电路	140
3.3.5	18 位 ADC 基准电压电路	141
3.3.6	精密 DAC 电压基准	141
3.4	通过调节电压基准来增加 ADC 的精度和分辨率	142

3.4.1	采用多路开关调节电压基准的测量电路	142
3.4.2	基准电压对 ADC 精度和分辨率的影响	143
3.5	影响 ADC 的其他因素	144
3.5.1	ADC 的选择	144
3.5.2	系统精度和分辨率	145
3.6	模数混合电路 PCB 的分区与分割	146
3.6.1	PCB 按功能分区	146
3.6.2	分割的隔离与互连	149
3.7	模数混合电路的接地和电源 PCB 设计	151
3.7.1	模拟地 (AGND) 和数字地 (DGND)	151
3.7.2	设计理想的接地和电源参考面	158
3.7.3	模拟地和数字地分割	159
3.7.4	采用“统一地平面”形式	160
3.7.5	数字和模拟电源平面的分割	161
3.7.6	最小化电源线和地线的环路面积	162
3.8	模数混合系统的电源和接地布局示例	164
3.8.1	温度测量系统的电源和接地布局示例	164
3.8.2	ADC ADC774 的电源和接地布局示例	166
3.8.3	优化 16 位 SAR ADC 性能的 PCB 布局示例	168
3.8.4	24 位 $\Delta$ - $\Sigma$ ADC 的电源和接地布局示例	173
<b>第 4 章</b>	<b>高速数字电路的电源电路设计</b>	<b>177</b>
4.1	PDN 与 SI、PI 和 EMI	177
4.1.1	PDN 是 SI、PI 和 EMI 的公共互连基础	177
4.1.2	优良的 PDN 设计是 SI、PI 和 EMI 的基本保证	177
4.2	FPGA PDN 的模型	178
4.2.1	PDN 的拓扑结构	178
4.2.2	FPGA PDN 的通用模型	179
4.2.3	简化的 FPGA PDN 模型	181
4.3	VRM (电压调整模块)	181
4.3.1	FPGA 的供电要求	181
4.3.2	DC-DC 转换电路	182
4.3.3	负载点 (POL) DC-DC 转换器	186
4.3.4	线性稳压器	188
4.3.5	线性稳压和 DC-DC 的混合 IC 电路	190
4.4	去耦电容器	193
4.4.1	不同位置的去耦电容器	193

4.4.2	电容器的阻抗频率特性	193
4.4.3	电容器的衰减频率特性	195
4.4.4	电容器的 ESR 和 ESL 特性	196
4.4.5	电容器的有效频率	197
4.4.6	去耦电容器的安装位置	198
4.4.7	电容器的并联和反谐振	201
4.5	电流通道上的 PCB 电感	203
4.5.1	PCB 导线的电感	203
4.5.2	PCB 的过孔电感	205
4.5.3	PCB 导线的互感	206
4.5.4	PCB 电源和接地平面电感	207
4.6	IC 封装的电感	207
4.7	贴装电感	210
4.7.1	电容器贴装电感	210
4.7.2	FPGA 贴装电感	211
4.8	PCB 电源/地平面	211
4.8.1	PCB 电源/地平面的功能	211
4.8.2	PCB 电源/地平面设计的一般原则	212
4.8.3	PCB 电源/地平面叠层和层序	214
4.8.4	PCB 电源/地平面的负作用	216
4.9	同时开关噪声 (SSN) 的控制	217
4.9.1	SSN 的成因	217
4.9.2	降低 SSN 的一些常用措施	218
4.9.3	利用 EBG 结构抑制 SSN 噪声	219
4.10	基于目标阻抗的 PDN 设计	221
4.10.1	目标阻抗的定义	221
4.10.2	基于目标阻抗的 PDN 设计方法	223
4.10.3	利用目标阻抗计算去耦电容器的电容量	225
4.11	基于功率传输的 PDN 设计方法	226
4.11.1	稳压电源电路的反应时间	226
4.11.2	去耦电容的去耦时间	227
4.11.3	电源系统的输出阻抗	228
4.11.4	利用电源驱动的负载计算电容量	229
4.12	平面 PDN 的一维分布模型	229
4.12.1	去耦网络的瞬态响应	229
4.12.2	去耦网络的稳态响应	230

4.12.3	功率传输延迟的估算	230
4.13	FPGA PDN 设计和验证	232
4.13.1	确定 FPGA 的参数	232
4.13.2	去耦网络设计	234
4.13.3	模拟	236
4.13.4	性能测量	237
4.13.5	优化去耦网络设计	239
4.13.6	存在问题的分析和改进	240
4.14	设计实例: Virtex™-5 FPGA 的 PDN 设计	241
4.14.1	Virtex™-5 FPGA 的 VRM	241
4.14.2	必需的 PCB 去耦电容器	242
4.14.3	替代电容器	243
4.14.4	PCB 设计检查项目	245
4.14.5	Virtex™-5 的 PCB 布局示例	251
4.15	仿真工具	252
4.15.1	常用的一些 PDN 设计和仿真 EDA 工具	252
4.15.2	Altera PDN 设计工具	253
4.15.3	TI 公司的 FPGA 电源管理解决方案和设计工具	258
4.16	FPGA 电源电路设计实例	263
4.16.1	Xilinx® Virtex-5™ FPGA 的电源解决方案	263
4.16.2	Xilinx® Virtex™-6 FPGA 的微型电源解决方案	266
4.16.3	Xilinx® Virtex™-6 和 Spartan™-6 FPGA 的电源解决方案	270
4.16.4	Xilinx® 的 Spartan™-3、Virtex™-II、Virtex-II Pro™ 的电源管理解决方案	273
4.16.5	Altera® Cyclone® FPGA 电源电路	274
4.16.6	Altera® Arria II GX FPGA 开发板电源电路	277
4.17	多电源系统的监控和时序控制	289
4.17.1	电源时序控制和跟踪类型	289
4.17.2	多电源系统的监控和时序控制设计实例	290
4.17.3	模拟电压和电流监控	291
4.17.4	时序控制和监控的结合	292
4.17.5	电源余量微调	292
4.17.6	开关调节器的同步	294
4.18	利用铁氧体磁珠为 FPGA 设计电源隔离滤波器	295
4.18.1	铁氧体磁珠的选择	295
4.18.2	铁氧体磁珠建模与仿真	296
4.18.3	Stratix IV GX 设计实例	297



4.18.4	反谐振	298
4.18.5	LC 谐振振荡	300
4.18.6	传输阻抗	300
4.18.7	直流电流和 IR 压降考虑因素	301
4.18.8	PCB 结构	302
4.18.9	设计建议	305
<b>第 5 章</b>	<b>无线电源电路设计</b>	<b>306</b>
5.1	无线电源技术简介	306
5.1.1	无线电源技术的应用	306
5.1.2	无线电源技术方案简介	307
5.2	无线电源联盟 (WPC, Wireless Power Consortium)	308
5.2.1	无线电源联盟简介	308
5.2.2	WPC 标准定义的无线电源系统结构	310
5.2.3	WPC 5.1.2 版本所定义的无线电源发射器类型	311
5.3	A 型无线电源发射器设计实例: A1 型无线电源发射器设计	312
5.3.1	A1 型无线电源发射器的结构形式	312
5.3.2	一次线圈	312
5.3.3	屏蔽	313
5.3.4	基站的接口表面	314
5.3.5	对准	314
5.3.6	多个线圈的间隔距离	314
5.3.7	A1 型无线电源发射器的等效电路	314
5.3.8	A1 型无线电源发射器的功率传输控制	315
5.3.9	A2~A18 型无线电源发射器设计	316
5.4	B 型无线电源发射器设计实例: B1 型无线电源发射器设计	316
5.4.1	B1 型无线电源发射器的结构形式	316
5.4.2	一次线圈阵列	316
5.4.3	屏蔽	317
5.4.4	基站的接口表面	318
5.4.5	B1 型无线电源发射器的等效电路	318
5.4.6	B1 型无线电源发射器的功率传输控制	319
5.4.7	可扩展性	319
5.4.8	B2~B5 型无线电源发射器设计	320
5.5	无线电源接收器设计	320
5.5.1	无线电源接收器的结构	320
5.5.2	二次线圈的安装	321

5.5.3	双谐振电路	321
5.5.4	谐振频率特性	322
5.5.5	大信号二次谐振测试	322
5.5.6	功率传输控制	323
5.6	无线电源接收器设计实例 1	323
5.6.1	无线电源接收器设计实例 1 电路	323
5.6.2	二次线圈的结构和尺寸	324
5.6.3	二次线圈屏蔽	325
5.7	无线电源接收器设计实例 2	325
5.7.1	无线电源接收器设计实例 2 电路	325
5.7.2	二次线圈的结构和尺寸	326
5.7.3	二次线圈屏蔽	326
5.8	无线电源解决方案	327
5.9	发射器端的解决方案	328
5.9.1	TI 公司可提供的发射器端控制器	328
5.9.2	自由定位符合 Qi 标准的无线电源发射器控制器 bq500410A 和评估模块	328
5.9.3	5V WPC 1.1 兼容的无线电源发射器控制器 bq500211A 和评估模块	330
5.9.4	符合 Qi 标准的无线电源发射器控制器 bq500210 和评估模块	332
5.9.5	bqTESLA 发射器线圈供应商的信息	334
5.10	接收器端的解决方案	335
5.10.1	TI 公司可提供的符合 Qi 标准的接收器	335
5.10.2	bq51011/bq51013 无线电源接收器和评估模块	336
5.10.3	bq51050B/bq51051B 高效 Qi v1.1 兼容无线电源接收器和电池充电器	338
5.10.4	无线电源接收器用通信和电力监控 IC	341
5.11	符合 Qi 标准的无线电源接收器线圈设计	341
5.11.1	传统变压器的结构和模型	342
5.11.2	Qi 标准系统的变压器模型	343
5.11.3	无线电源接收器 (Rx) 线圈的电气要求	343
5.11.4	无线电源接收器 (Rx) 线圈设计的步骤	344
5.11.5	屏蔽材料	344
5.11.6	Rx 线圈线材规范	345
5.11.7	线圈匝数	345
5.11.8	Rx 线圈电感测量	346
5.11.9	Rx 线圈调谐	347
5.11.10	Rx 线圈的负载线分析	348
5.12	Vishay 公司的无线充电接收线圈	350

第 6 章 开关稳压器电源电路设计	351
6.1 降压型 (BUCK) DC-DC 开关稳压器	351
6.1.1 降压型 DC-DC 开关稳压器电源拓扑结构	351
6.1.2 步降型 (降压型) 易电源电源模块和转换器	351
6.1.3 步降型 (降压型) 易电源纳米模块和转换器	359
6.1.4 步降型 (降压型) MicroSiP™ 电源模块电路设计实例	362
6.1.5 步降型 (降压型) SWIFT™ 电源模块和转换器	363
6.1.6 步降型 (降压型) POL (负载点) 电源模块	369
6.1.7 同步降压 NexFET™ 电源模块和功率级	372
6.2 升压型 (BOOST) DC-DC 开关稳压器	377
6.2.1 升压型 DC-DC 开关稳压器电源拓扑结构	377
6.2.2 MicroSiP™ 升压型电源模块	377
6.2.3 DC-DC 步升型 (升压型) 转换器	377
6.2.4 易电源步升型 (升压型) 纳米稳压器	379
6.3 降压-升压型 (BUCK BOOST) DC-DC 开关稳压器	384
6.3.1 降压-升压型 DC-DC 开关稳压器电源拓扑结构	384
6.3.2 降压-升压型转换器应用电路实例	385
6.4 SEPIC DC-DC 开关稳压器	387
6.4.1 SEPIC DC-DC 开关稳压器电源拓扑结构	387
6.4.2 SEPIC 转换器应用电路实例	387
6.5 反激式 (FLYBACK) DC-DC 开关稳压器	390
6.5.1 反激式 DC-DC 开关稳压器电源拓扑结构	390
6.5.2 反激式稳压器应用电路实例	391
6.6 正激式 (FORWARD) DC-DC 开关稳压器	396
6.6.1 正激式 DC-DC 开关稳压器电源拓扑结构	396
6.6.2 正激式稳压器应用电路实例	396
6.7 双开关正激式 (2 SWITCH FORWARD) DC-DC 开关稳压器	398
6.7.1 双开关正激式 DC-DC 开关稳压器电源拓扑结构	398
6.7.2 双开关正激式稳压器应用电路实例	398
6.8 有源钳位正激式 (ACTIVE CLAMP FORWARD) DC-DC 开关稳压器	403
6.8.1 有源钳位正激式 DC-DC 开关稳压器电源拓扑结构	403
6.8.2 有源钳位正激式转换器应用电路实例	403
6.9 半桥式 (HALF BRIDGE) DC-DC 开关稳压器	407
6.9.1 半桥式 DC-DC 开关稳压器电源拓扑结构	407
6.9.2 半桥式转换器应用电路实例	407
6.10 推挽式 (PUSH PULL) DC-DC 开关稳压器	408

6.10.1	推挽式 DC-DC 开关稳压器电源拓扑结构	408
6.10.2	推挽式转换器应用电路实例	409
6.11	全桥式 (FULL BRIDGE) DC-DC 开关稳压器	410
6.11.1	全桥式 DC-DC 开关稳压器电源拓扑结构	410
6.11.2	全桥式转换器应用电路实例	410
6.12	相移 (PHASE SHIFT) ZVT DC-DC 开关稳压器	411
6.12.1	相移 ZVT DC-DC 开关稳压器电源拓扑结构	411
6.12.2	相移 ZVT 转换器应用电路实例	411
6.13	数字电源电路设计	417
6.13.1	数字电源控制解决方案简介	417
6.13.2	非隔离式的 UCD92xx 系列降压型控制器	418
6.13.3	隔离式的 UCD3xxx 系列 PWM 数字电源控制器	420
6.13.4	UCD7xxx 数字互补功率级	423
6.13.5	PTD08A/Dxxxx 系列模块	424
6.14	开关电源的交流电源线的降噪处理	425
6.14.1	交流电源线上存在差模噪声与共模噪声	425
6.14.2	交流电源线降噪处理用的共模扼流线圈	427
6.14.3	交流电源线降噪处理用的混合扼流线圈	429
6.14.4	开关电源的交流电源线降噪处理措施	431
<b>第 7 章</b>	<b>基准电压源/电流源电路设计</b>	<b>432</b>
7.1	电压基准的选择	432
7.1.1	选择电压基准源的一些考虑	432
7.1.2	齐纳基准源	432
7.1.3	带隙基准源	433
7.1.4	XFET 基准源	434
7.1.5	串联型电压基准	435
7.1.6	并联型电压基准	436
7.1.7	串联型或并联型电压基准的选择	437
7.2	并联型电压基准应用电路实例	439
7.2.1	可选择的并联电压基准芯片	439
7.2.2	并联稳压器电路	440
7.2.3	扩展输出电流的并联稳压器电路	440
7.2.4	扩展输出电流的串联稳压器电路	441
7.2.5	吸入式恒流源电路	441
7.2.6	以接地为参考的电流源电路	442
7.2.7	低温度系数的端电流源电路	442

7.2.8	0~100℃线性输出温度计电路	443
7.2.9	热电偶冷端补偿电路	443
7.3	串联型电压基准应用电路实例	444
7.3.1	可供选择的串联电压基准芯片	444
7.3.2	输出±2.5V电压的基准电压电路	445
7.3.3	输出±5V电压的基准电压电路	445
7.3.4	输出负电压的基准电压电路	446
7.3.5	可编程电流源电路	446
7.3.6	350Ω应变计桥路电源电路	447
7.4	电流源应用电路实例	447
7.4.1	可供选择的电流源芯片	447
7.4.2	基本电流源电路	448
7.4.3	零温度系数电流源	449
7.4.4	扩展电流输出的电流源电路	450
7.4.5	低电压的电压基准电路	451
7.4.6	华氏温度计	451
7.4.7	开氏温度计	451
7.4.8	斜坡发生器电路	452
7.4.9	精密三角波和方波发生器电路	452
7.4.10	死区电路	453
7.4.11	双向限幅电路	454
7.4.12	窗口比较器电路	454
	参考文献	456

# 第 1 章

## 模拟电路的电路电源设计

### 1.1 与电源有关的放大器参数

#### 1.1.1 电源电压和电流 ( $V_{DD}$ 、 $V_{SS}$ 和 $I_{DD}$ 、 $I_Q$ )

电源电压定义为可使放大器工作在线性区的可接受的  $V_{DD}$  (或  $+V_{CC}$ ) 和  $V_{SS}$  (或  $-V_{CC}$ ) 之间的差值。如果电压差小于规定值, 则放大器很可能无法可靠地工作。如果电源电压高于规定值, 虽然放大器可以按预期工作, 但由于施加给放大器内晶体管的电压过大, 很可能导致器件损坏。在产品数据手册的参数表中, 通常会给出该放大器的绝对最大额定值 (Absolute Maximum Ratings), 放大器的电源电压一定不能超过该数值。例如, OPA690 的电源电压最大额定值为  $\pm 6.5V$ 。

电源电流 ( $I_{DD}$ 、 $I_Q$  或  $I_{CC}$ ) 指定为空载条件下的电流。通常, 当放大器带有负载时, 拉电流主要会从  $V_{DD}$  引脚输出, 流经运放的输出级然后流向负载, 而灌电流主要会导致  $V_{SS}$  增加。

电源参数 ( $V_{SS}$ 、 $V_{DD}$  和  $I_{DD}$ 、 $I_Q$ ) 通常作为独立项出现在产品数据手册的参数表中。该参数偶而也会作为 PSRR 参数的测试条件。图 1.1.1 所示为<sup>[1]</sup>THS4011、THS4012 数据表的电源参数。

PARAMETER	TEST CONDITIONS <sup>(1)</sup>	THS4011C/I THS4012C/I			UNIT
		MIN	TYP	MAX	
<b>POWER SUPPLY</b>					
$V_{CC}$ Supply voltage	Dual supply	$\pm 4.5$		$\pm 16.5$	V
	Single supply	9		33	
$I_{CC}$ Supply current (each amplifier)	$V_{CC} = \pm 15 V$	$T_A = 25^\circ C$	7.8	9.5	mA
		$T_A = \text{Full range}$		11	
	$V_{CC} = \pm 5 V$	$T_A = 25^\circ C$	6.9	8.5	
		$T_A = \text{Full range}$		10	
PSRR Power-supply rejection ratio	$V_{CC} = \pm 5 V \text{ to } \pm 15 V$	$T_A = 25^\circ C$	75	83	dB
		$T_A = \text{Full range}$	68		

图 1.1.1 THS4011、THS4012 数据表的电源参数

#### 1.1.2 电源抑制比 (PSRR)

##### 1. 电源电压抑制比的定义

电源抑制比 (PSRR, Power Supply Rejection Ratio) 是与电源抑制比参数  $k_{SVR}$  相同的。它

被定义为电源电压的改变量与由此引起的输入失调电压改变量之比的绝对值。在一般情况下，电源的两个端电压是对称变化的。它的单位是分贝（dB）<sup>[2]</sup>。

电源电压会影响到输入差分对的偏置点。由于输入电路固有不匹配，偏置点的改变会引起失调电压的改变，进而引起输出电压的改变。

对于双电源运放， $PSRR = \Delta V_{CC\pm} / \Delta V_{OS}$  或者  $\Delta V_{DD\pm} / \Delta V_{OS}$ 。 $\Delta V_{CC\pm}$  中的正负号表示正负电源是对称地改变的。对于单电源运放， $PSRR = \Delta V_{CC} / \Delta V_{OS}$  或者  $\Delta V_{DD} / \Delta V_{OS}$ 。同时还应该看到，PSRR 的生成机理是与共模抑制比 CMRR 相同的。因此，在数据手册中，PSRR 也被归入直流参数。当把 PSRR 与频率的关系画成曲线时，这条曲线将随频率的增加而下降。

如果改变运放的供电电压，其输出电压本不应该发生变化，但是实际上它的确会有变化。如果供电电压改变  $X$  伏时引起的输出电压变化量与差分输入改变  $Y$  伏引起的输出变化相等，那么运放的  $PSRR = X/Y$ 。在 PSRR 的定义中，假设电源正负电压同时向相反方向改变同样的大小，否则将引起共模变化，令分析更为复杂。PSRR 不同，对电源正负电压的抑制效果也不同<sup>[2]</sup>。

## 2. 电源电压波动对输出电压的影响

电源电压波动对输出电压有直接的影响。

【举例】对于电池供电的放大器电路要求运放必须具有良好的电源抑制性能。在图 1.1.2 所示电路<sup>[3]</sup>中，使用电池来为放大器供电，放大器被配置为具有高闭环增益 101V/V。

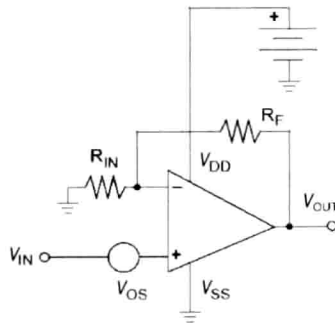


图 1.1.2 电池供电的放大器电路

在电池的生命周期中，随着使用时间的推移，电池的输出电压会从 5.75V 逐渐降至 4.75V。如果该放大器的电源抑制比为  $500\mu\text{V/V}$ （或 66dB），随着时间推移，放大器输出端的误差将为 50.5mV。在一个满量程为 4.096V 的 12 位系统中，这相当于在电池的生命周期中，失调电压变化量的 50.5 倍。

$$PSR (\text{V/V}) = \Delta V_{OS} / \Delta V_{SUPPLY} \quad (1.1.1)$$

$$V_{OUT} = (1 + R_F/R_{IN}) (V_{IN} + V_{OS}) \quad (1.1.2)$$

在电池供电应用中，可以看见电池供电电压会在电池的整个生命周期中变化几百毫伏。若将此类应用中运放配置为高闭环增益，则要求运放必须具有良好的电源抑制性能。

## 3. 电源抑制比的频率响应

电源抑制比参数量化了放大器对电源变化的敏感度。理想情况下，电源抑制比应该是无穷大。一般放大器的电源抑制比的范围为 60~100dB。

与放大器的开环增益 ( $A_{OL}$ ) 特性一样, PSRR 也是频率的函数, 随着频率的升高, PSRR 的数值开始下降。如图 1.1.3 所示<sup>[4]</sup>, 电源产生的变化 (或者噪声, 叠加在电源上的噪声也会引起电源电压的变化) 在 1kHz 以下,  $+PSRR$  约为 130dB; 之后, 随着频率的上升, PSRR 不断下降。而  $-PSRR$  随着频率的上升, 不断下降。很明显, 对高频电源变化 (噪声) 的抑制能力要低于对直流和低频电源变化 (噪声) 的抑制能力。

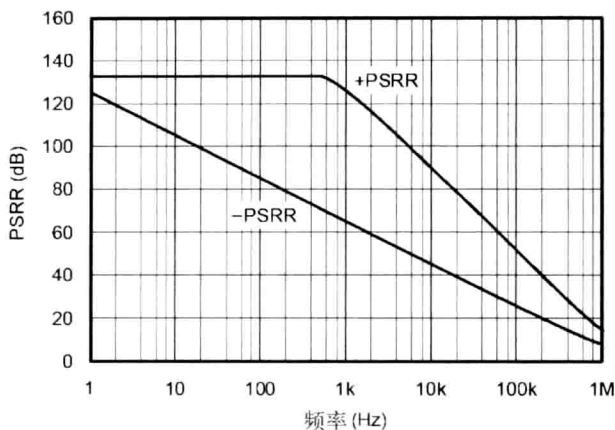


图 1.1.3 电源抑制比与噪声频率 (OPA2734)

**注意:** 开关电源产生的噪声频率为 50~500kHz 或者更高。在这些频率范围, PSRR 的几乎为零。所以, 在电源上的噪声会引起运算放大器在输出端产生噪声。对此, 必须采用适当的旁路 (去耦) 技术。

在闭环系统中, 放大器的电源抑制能力略低于理想情况, 它表现为失调电压误差的形式 ( $PSRR_{ERROR} = \Delta V_{OS}$ )。描述这一误差的公式如下:

$$PSRR(dB) = 20 \lg (\Delta V_{SUPPLY} / \Delta V_{OS}) \quad (1.1.3)$$

描述电源抑制能力的公式为

$$PSR(V/V) = \Delta V_{OS} / \Delta V_{SUPPLY} \quad (1.1.4)$$

式中,  $V_{SUPPLY} = V_{DD} - V_{SS}$ ;  $\Delta V_{OS}$  表示电源电压变化  $\Delta V_{SUPPLY}$  时, 引起输出电压变化  $\Delta V_O$  折合到输入端的失调电压,  $\Delta V_{OS} = \Delta V_O / \Delta A_{vd}$ 。  $\Delta A_{vd}$  为放大器的直流放大倍数。

【举例】带有最小 5 倍增益的宽电源范围、轨到轨输出仪器放大器 INA827 的 PSRR (电源抑制比) 与增益和频率的关系<sup>[5]</sup>如图 1.1.4 所示,  $\pm PSRR$  (电源抑制比) 随着增益的增加而加大, 随着频率的增加而减小。

### 1.1.3 电源抑制比参数 $k_{SVR}$

电源抑制比参数  $k_{SVR}$  是与电源抑制比 PSRR 相同的<sup>[2]</sup>, 以分贝 (dB) 为单位。它被定义为电源电压的改变量与由此引起的输入失调电压改变量之比的绝对值。在一般情况下, 电源的两个端电压是对称变化的。

电源电压会影响到输入差分对的偏置点。由于输入电路固有的不匹配, 偏置点的改变会引起失调电压的改变, 进而引起输出电压的改变。



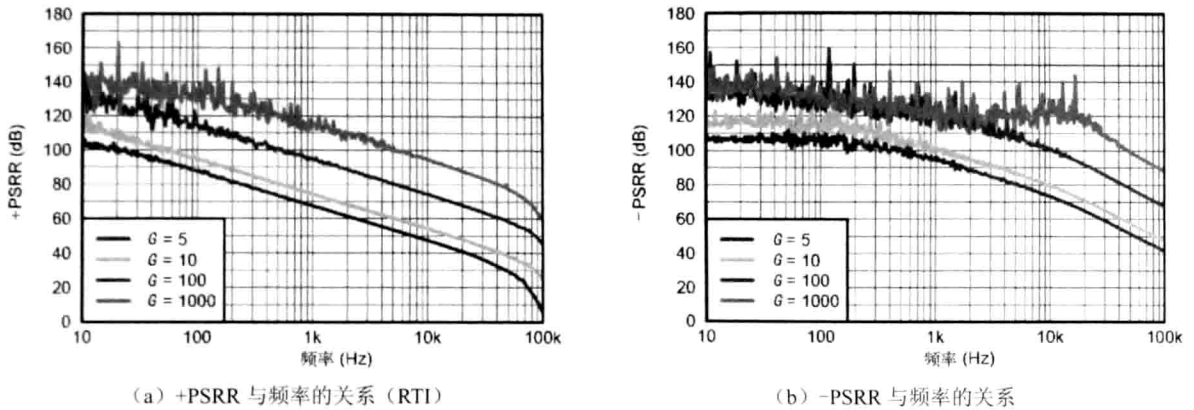
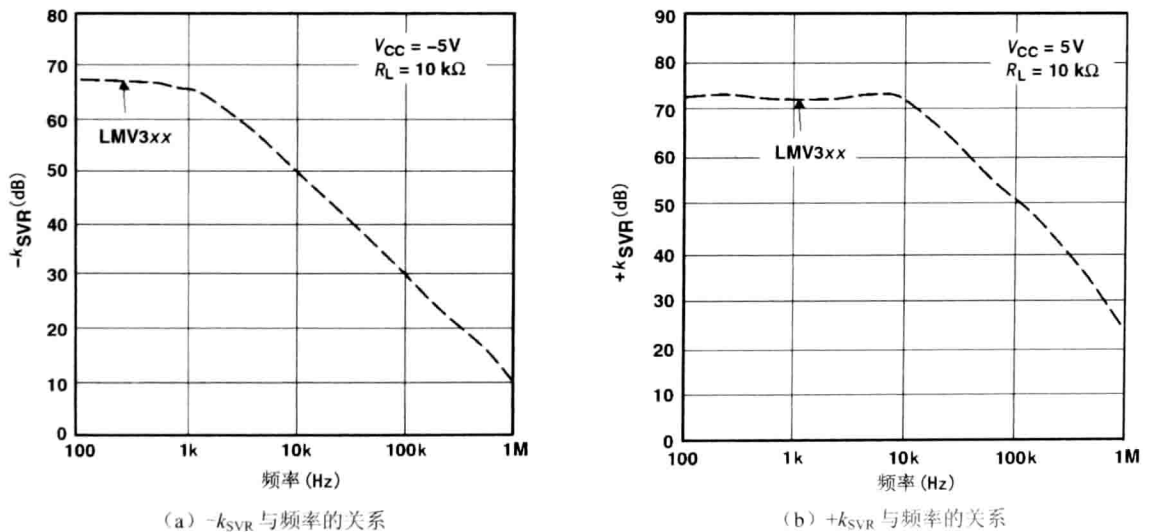


图 1.1.4 PSRR 与频率的关系

对于双电源运放,  $k_{\text{SVR}} = \Delta V_{\text{CC}\pm} / \Delta V_{\text{OS}}$  或者  $\Delta V_{\text{DD}\pm} / \Delta V_{\text{OS}}$ 。  $\Delta V_{\text{CC}\pm}$  中的正负号表示正负电源是对称地改变的。对于单电源运放,  $k_{\text{SVR}} = \Delta V_{\text{CC}} / \Delta V_{\text{OS}}$  或者  $\Delta V_{\text{DD}} / \Delta V_{\text{OS}}$ 。同时还应该看到, 产生  $k_{\text{SVR}}$  的机理是与共模抑制比 (CMRR) 相同的。因此, 在数据手册中,  $k_{\text{SVR}}$  也被归入直流参数。当把  $k_{\text{SVR}}$  与频率的关系画成曲线时, 这条曲线将随频率的增加而下降。

【举例】 LMV321-Q1/LMV358-Q1/LMV32 的  $k_{\text{SVR}}$  与频率的关系<sup>[6]</sup>如图 1.1.5 所示。从图 1.1.5 可见,  $k_{\text{SVR}}$  随频率的增加而下降。

图 1.1.5  $k_{\text{SVR}}$  与频率的关系

### 1.1.4 绝对最大值

绝对最大值 (也称为绝对最大额定值) 是一些极限值, 超过了这些极限值, 器件的寿命也许会受损。所以, 在使用和测试中绝不可超过这些极限值。根据定义, 所谓极限值就是最大值, 极限值指定的两个端点所包含的区域就叫做范围 (比如, 工作温度范围)。

【举例】 厂家提供的放大器 THS3092/THS3096 的绝对最大额定值<sup>[7]</sup>如图 1.1.6 所示。从图 1.1.6 可见 THS3092/THS3096 的一些极限值, 如电源电压  $V_{\text{S}+}$  到  $V_{\text{S}-}$  不能够超过 33V, 输入