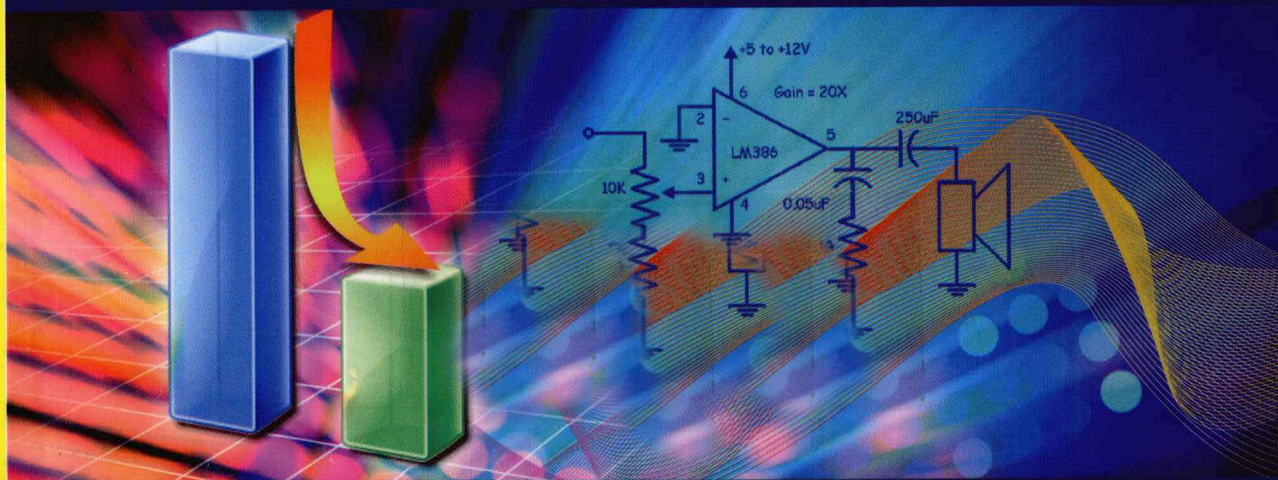


电子工程技术丛书

# 低功耗系统设计

## ——原理、器件与电路

● 黄智伟 编著



电子工程技术丛书

# 低功耗系统设计

## ——原理、器件与电路

黄智伟 编著

電子工業出版社

**Publishing House of Electronics Industry**

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

电路与系统的低功耗设计一直都是电子工程技术人员设计时需要考虑的重要因素。本书共分为 10 章,介绍了低功耗系统设计的一般原则、低功耗微控制器电路设计、低功耗微控制器外围电路设计、低功耗接口与控制电路设计、低功耗 ADC 和 DAC 电路设计、低功耗数据采集系统设计、低功耗放大器电路设计、低功耗比较器电路设计、低功耗滤波器电路设计。

本书内容丰富,叙述详尽清晰,图文并茂,通过大量的设计实例说明低功耗系统设计中的一些技巧与方法,以及应该注意的问题,工程性好,实用性强。

本书可以作为电子工程技术人员进行低功耗系统设计的参考书,或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、计算机应用等专业学习低功耗系统设计的教材,也可以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

低功耗系统设计:原理、器件与电路/黄智伟编著. —北京:电子工业出版社,2011.8  
(电子工程技术丛书)

ISBN 978 - 7 - 121 - 14119 - 5

I. ① 低… II. ① 黄… III. ① 电路设计 IV. ① TM02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 144701 号

策划编辑:赵丽松

责任编辑:刘 凡

印 刷:北京东光印刷厂

装 订:三河市鹏成印业有限公司

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:21.75 字数:557 千字

印 次:2011 年 8 月第 1 次印刷

印 数:4 000 册 定价:49.00 元



凡所购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,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 zlls@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

电路和系统的低功耗设计一直都是电子工程技术人员设计时考虑的重要因素,随着如 MP3、MP4、移动电话、便携式 DVD、便携式数字电视、便携式 GPS、便携式笔记本计算机等各种便携式电子产品的快速发展,产品的功能越来越强大,内容越来越丰富,体积也越来越小巧,更小、更轻和功能更强大已经成为便携式电子产品发展的必然趋势。更小、更轻意味着产品体积和内置电池的体积和容量不能够加大甚至需要减小,功能更强大则需要消耗更多的电能,所以设计功耗更低的电路和系统已经成为设计人员面临的重要挑战。但低功耗设计面临着如电源管理、应用软件、电池的发展、芯片的设计制造、电路和系统设计等诸多问题。应该说,解决产品的功耗问题实际上是一个系统工程。

对于设计工程师而言,如何在设计中平衡功耗与性能,如何使设计满足性能、体积、功耗的综合要求,如何使设计变得更简捷,如何使产品更快地投入市场,这一切都是在设计工作中实实在在存在的难题。

本书是为电子工程技术人员编写的一本介绍低功耗系统设计基本知识、要求与方法的参考书。本书没有大量的理论介绍和公式推导,而是从工程设计要求出发,通过介绍大量的低功耗器件和电路设计实例,详尽清晰、图文并茂地说明低功耗系统设计中的一些技巧、方法以及应该注意的问题,具有很好的工程性和实用性。

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、计算机应用等专业学习低功耗系统设计的教材,或作为全国大学生电子设计竞赛的培训教材。

本书共分为 10 章。第 1 章低功耗系统设计的一般原则,介绍了集成电路的功耗产生,降低微处理器功耗和降低外围器件功耗的途径,选择低功耗的电源供给电路,低功耗的软件设计方法的一般原则与方法。

第 2 章低功耗微控制器电路设计,介绍了低功耗微控制器的选择, PIC 单片机的低功耗设计, STM8 单片机的低功耗设计, Blackfin 嵌入式处理器的低功耗设计, SBC 的低功耗设计, 38D2 系列单片机的低功耗设计, STM32 的硬件设计的方法与技巧。

第 3 章低功耗微控制器外围电路设计,介绍了采用低功耗微控制器的微处理器监控电路,低功耗微处理器的上电复位电路,低功耗看门狗电路,超低功耗微处理器监控电路,便携式微处理器内核的供电,以及 SDRAM 的功耗优化设计的方法与技巧。

第 4 章低功耗接口与控制电路设计,介绍了低功耗 RS-232 收发器、高速/全速 USB 2.0 开关、CAN 收发器、LVDS 多媒体接口电路,低功耗隔离电路,低功耗触摸屏控制器与触摸开关电路,低功耗继电器驱动电路的设计方法与技巧。

第 5 章低功耗 ADC 电路设计,介绍了 8/12/16/24 位、单通道/双通道/多通道等多种低功耗类型 ADC 的器件特性以及应用电路设计,以及基于低功耗、20 位  $\Sigma$ - $\Delta$  型和 24 位  $\Sigma$ - $\Delta$  型 ADC 的精密电子秤设计。

第 6 章低功耗 DAC 电路设计,介绍了 32 通道 14 位电压输出低功耗 DAC,低功耗 16 位环

路供电型 4 ~ 20mA DAC,低功耗 14 位宽带串行接口乘法 DAC,16 位双通道并行输入电流输出低功耗 DAC,低功耗 12/14/16 位缓冲电压输出 DAC,低功耗 16 位缓冲电压输出 DAC 的器件特性以及应用电路设计。

第 7 章基于 SoC 的低功耗数据采集系统设计,介绍了三相多功能电能计量 IC ,12 位 100 ksps 低功耗 DAS,低功耗多功能多相 AFE 的器件特性及应用电路设计,以及智能数据采样系统的电路设计。

第 8 章低功耗放大器电路设计,介绍了单电源运算放大器电路设计应考虑的问题,多种低功耗、低功耗、低噪声、零漂移、轨至轨输出的运算放大器,低功耗、高速、差分放大器,差分 ADC 驱动器,低功耗仪表放大器等器件的特性和应用电路设计。

第 9 章低功耗比较器电路设计,介绍了低功耗比较器的选择,低功耗、低功耗比较器的器件特性和应用电路设计。

第 10 章低功耗滤波器电路设计,介绍了低功耗的滤波器 IC 的选择,低功耗滤波器的器件特性和应用电路设计。

本书在编写过程中,参考了大量的国内外著作和资料,参考并引用了 Texas Instruments、Analog Devices、Maxim、Microchip Technology、Linear Technology、National Semiconductor 等公司提供的技术资料和应用笔记,得到了许多专家和学者的大力支持,听取了多方面的意见和建议。李富英高级工程师对本书进行了审阅,南华大学李圣副教授、湖南师范大学李扬宗、肖志刚、刘聪、张翼、李军、戴焕昌、张强、税梦玲、欧科军、周望、黄政中、许俊杰等人也参加了本书的编写,在此一并表示衷心的感谢。

由于水平有限,不足之处在所难免,敬请各位读者批评斧正。

黄智伟  
于南华大学  
2011 年 2 月 18 日

# 目 录

<b>第 1 章 低功耗系统设计的一般原则</b> .....	1
1.1 集成电路的功耗 .....	1
1.1.1 CMOS 倒相器的传输特性 .....	1
1.1.2 开关功耗 .....	2
1.1.3 短路功耗 .....	3
1.1.4 冒险功耗 .....	3
1.1.5 静态功耗 .....	4
1.2 降低微处理器的功耗 .....	5
1.2.1 选择低功耗的微处理器 .....	5
1.2.2 降低供电电压和时钟频率 .....	6
1.2.3 选择合适的总线宽度 .....	6
1.2.4 设计低功耗的接口电路 .....	7
1.2.5 选取不同工作模式 .....	7
1.2.6 关闭不必要的外设控制器 .....	8
1.2.7 控制微处理器的供电 .....	8
1.3 降低外围器件的功耗 .....	9
1.3.1 SDRAM .....	9
1.3.2 NOR Flash .....	10
1.3.3 RS-232-C 接口 .....	10
1.3.4 以太网接口 .....	11
1.4 选择低功耗的电源供给电路 .....	12
1.4.1 线性稳压电路 .....	12
1.4.2 DC-DC 电路 .....	14
1.5 软件低功耗设计 .....	14
1.5.1 编译优化 .....	15
1.5.2 指令排序 .....	15
1.5.3 常用的降低软件功耗的方法 .....	17
<b>第 2 章 低功耗微控制器电路设计</b> .....	19
2.1 选择低功耗的微控制器 .....	19
2.1.1 低功耗 8 位 PIC 单片机系列 .....	19
2.1.2 意法半导体(ST)超低功耗 8 位 MCU 系列 .....	21



2.1.3	16 位超低功耗 MCU MSP430FG4270 .....	22
2.1.4	意法半导体(ST)32 位超低功耗微控制器 .....	23
2.1.5	超低功耗的 32 位 AVR UC3L 微控制器 .....	25
2.1.6	低功耗精密模拟微控制器 ADuC7060/ADuC7061 .....	27
2.2	PIC 单片机的低功耗设计 .....	30
2.2.1	纳瓦技术和 nanoWatt XLP 技术 .....	30
2.2.2	深度休眠模式 .....	32
2.2.3	休眠模式 .....	34
2.2.4	空闲和打盹模式 .....	36
2.2.5	时钟切换 .....	37
2.2.6	关闭外部电路/控制占空比 .....	38
2.2.7	功耗预算 .....	39
2.2.8	合理配置端口引脚 .....	40
2.2.9	在 I/O 引脚使用高阻抗值上拉电阻 .....	41
2.2.10	降低器件的工作电压 .....	41
2.2.11	使用外部电源为 CPU 内核供电 .....	41
2.2.12	备用电池的使用 .....	42
2.2.13	双速驱动 .....	42
2.2.14	使用内部 RC 振荡器 .....	43
2.2.15	使用外设模块禁止(PMD)位 .....	44
2.2.16	低功耗 Timer1 振荡器的使用 .....	44
2.2.17	使用 LVD 来检测电池低电量 .....	44
2.2.18	使用外设 FIFO 和 DMA .....	45
2.2.19	使用超低功耗唤醒外设 .....	45
2.3	STM8 单片机的低功耗设计 .....	45
2.3.1	影响器件功耗的主要因素 .....	45
2.3.2	STM8 单片机的电源系统 .....	46
2.3.3	STM8 单片机的时钟管理 .....	49
2.3.4	STM8 单片机的运行模式和低功耗模式 .....	51
2.3.5	功耗测量的设置 .....	55
2.3.6	运行模式下的功耗 .....	56
2.3.7	等待模式下的功耗 .....	57
2.3.8	活跃停机模式下的功耗 .....	57
2.3.9	停机模式下的功耗 .....	58
2.3.10	功耗管理的一般性原则 .....	58
2.4	Blackfin 嵌入式处理器的低功耗设计 .....	59
2.4.1	Blackfin 处理器简介 .....	59

2.4.2	Blackfin 处理器的内部功耗	61
2.4.3	Blackfin 处理器的外部功耗	65
2.4.4	Blackfin 处理器实时时钟的功耗	66
2.4.5	Blackfin 处理器的总功耗	66
2.4.6	Blackfin 处理器的时钟频率控制	67
2.4.7	Blackfin 处理器的工作模式转换	68
2.4.8	片内外设控制	69
2.4.9	内核电压控制	69
2.4.10	采用外部开关电源为 Blackfin 处理器供电	70
2.5	系统基础芯片(SBC)的低功耗设计	72
2.5.1	TLE7810 简介	72
2.5.2	SBC 集成的外设控制	73
2.5.3	SBC 睡眠模式(Sleep Mode)	73
2.5.4	SBC 停止模式(Stop Mode)	74
2.5.5	TLE7810 低功耗应用例	74
2.6	38D2 系列单片机的低功耗设计	75
2.6.1	38D2 系列单片机特性	75
2.6.2	38D2 系列单片机的低功耗设计技巧	77
2.6.3	38D2 系列单片机的引脚端连接	79
2.7	STM32 的硬件设计	81
2.7.1	消除影响 ADC 精度的因素	81
2.7.2	PCB 的设计	83
2.7.3	$V_{DD}$ 与 $V_{DDA}$ 的处理	84
2.7.4	低功耗模式的选择	86
2.7.5	I/O 引脚的处理	87
2.7.6	STM32 振荡器电路设计	87
<b>第 3 章</b>	<b>低功耗微控制器外围电路设计</b>	<b>94</b>
3.1	采用低功耗微控制器的微处理器监控电路	94
3.1.1	采用 MAXQ3210 构成的微处理器监控电路	94
3.1.2	使用 MAXQ3210 为微处理器供电	94
3.1.3	复位和电源监控	95
3.1.4	设置唤醒定时器	96
3.1.5	设置看门狗复位	97
3.1.6	注意两个器件的 I/O 电平	97
3.2	低功耗微处理器的上电复位电路	97
3.2.1	上电复位(POR)的时序	97
3.2.2	确定单电源处理器的 POR 门限电压	98



3.2.3	确定双电源处理器的 POR 门限电压	100
3.2.4	手动复位	100
3.2.5	分立的 POR 和处理器内置的 POR	101
3.2.6	电源失效和欠压信号	102
3.2.7	电压排序和电压跟踪	103
3.2.8	复位顺序	103
3.3	低功耗看门狗	104
3.3.1	看门狗定时器	104
3.3.2	热看门狗	105
3.4	超低功耗微处理器监控电路	106
3.5	便携式微处理器内核的供电	106
3.5.1	DC-DC 转换器对负载阶跃的响应	107
3.5.2	DC-DC 转换器增加电压定位功能	108
3.5.3	等效效率	110
3.6	SDRAM 的功耗优化设计	110
3.6.1	连接 SDRAM 到 Blackfin 处理器	110
3.6.2	SDRAM 的 PCB 布局	113
3.6.3	降低 SDRAM 功耗的技巧	116
<b>第 4 章</b>	<b>低功耗接口与控制电路设计</b>	<b>119</b>
4.1	低功耗接口电路设计	119
4.1.1	1Mbps 低功耗 RS-232 收发器	119
4.1.2	高速/全速 USB 2.0 开关	120
4.1.3	低功耗高速 CAN 收发器	121
4.1.4	低功耗 LVDS 多媒体接口	123
4.2	低功耗隔离电路设计	127
4.2.1	电路隔离的必要性	127
4.2.2	常用的电路隔离技术	129
4.2.3	隔离器的技术特性	132
4.2.4	低功耗的电容耦合隔离电路	133
4.2.5	低功耗的磁耦合数字隔离电路	134
4.2.6	USB 电缆隔离电路	135
4.3	低功耗触摸屏控制器与触摸开关电路设计	137
4.3.1	低功耗电容式触摸传感器控制电路	137
4.3.2	低功耗触摸屏数字转换器电路	139
4.3.3	低功耗触摸屏控制器电路	139
4.3.4	低功耗 4 线电阻触摸屏控制器电路	139
4.3.5	低功耗单通道电容式触摸按键电路	140

4.3.6	低功耗 S-Touch 触摸传感器控制电路	143
4.4	低功耗继电器驱动电路设计	153
4.4.1	具有节电模式的继电器驱动电路	153
4.4.2	利用模拟开关降低继电器的功耗	155
<b>第5章</b>	<b>低功耗 ADC 电路设计</b>	<b>157</b>
5.1	低功耗 12 位 ADC	157
5.1.1	基于 12 位 ADC 的低功耗温度测量电路	157
5.1.2	基于 12 位 ADC 的低功耗信号调理电路	157
5.2	低功耗 16 位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型 ADC	158
5.2.1	基于 16 位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型 ADC 型的低功耗温度测量电路	158
5.2.2	基于 16 位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型 ADC 型的低功耗信号调理电路	159
5.3	12 位低功耗双核 1Msps 的 ADC	159
5.4	16 位 125/105/80Msps 1.8V 低功耗 ADC	161
5.5	16 位 20/40/65/80Msps 1.8V 双通道低功耗 ADC	162
5.6	12 位 65Msps 8 通道低功耗 ADC	163
5.7	16 位 250ksps 微功耗 ADC(一)	163
5.8	16 位 250ksps 微功耗 ADC(二)	165
5.9	10 位超低功耗单/双通道全差分 ADC	166
5.10	低功耗 500ksps 单通道/双通道 12 位 ADC	167
5.11	3V 双通道 8 位低功耗 ADC	168
5.11.1	QAM 的基本结构	168
5.11.2	输入耦合电路	169
5.11.3	外部基准电压电路	170
5.11.4	共模电压的设置	170
5.12	低功耗 24 位 4 通道同时采样可级联的 $\Sigma$ - $\Delta$ ADC	173
5.13	16 位/14 位高精度低功耗 4/6/8 通道 SAR ADC	174
5.13.1	多通道同时采样数据采集系统	175
5.13.2	三相电力线监测系统	181
5.14	低功耗双通道 8 位 130Msps ADC	184
5.15	8/16 通道 12 位 65Msps 低功耗 ADC	186
5.16	基于低功耗 ADC 的电子秤设计	186
5.16.1	称重传感器的结构与要求	186
5.16.2	电子秤系统结构与要求	187
5.16.3	为电子秤选择最佳的 ADC	189
5.16.4	基于 20 位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型 ADC 的电子秤设计	190
5.16.5	基于 24 位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型 ADC 的电子秤设计	193
5.16.6	基于 24 位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型 ADC 的精密电子秤设计	194

5.16.7	基于 24 位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型 ADC 的精密电子秤设计	195
5.16.8	基于 3 通道 24 位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型 ADC 的精密电子秤设计	196
<b>第 6 章</b>	<b>低功耗 DAC 电路设计</b>	<b>200</b>
6.1	32 通道 14 位电压输出低功耗 DAC	200
6.1.1	32 通道可编程电压输出电路	200
6.1.2	32 通道监控电路	201
6.2	低功耗 16 位环路供电型 4 ~ 20mA DAC	202
6.3	低功耗 14 位宽带串行接口乘法 DAC AD5446	203
6.3.1	AD5444/AD5446 的典型应用电路	203
6.3.2	高精度可编程电流源电路	205
6.4	16 位低功耗 DAC	206
6.4.1	正电压输出电路	206
6.4.2	双极性电压输出电路	207
6.4.3	高精度可编程电流源电路	207
6.5	16 位双通道并行输入电流输出低功耗 DAC	208
6.5.1	精密双极性数据转换电路	208
6.5.2	精密单极性同相数据转换电路	210
6.5.3	精密单极性反相数据转换电路	211
6.6	低功耗 12/14/16 位缓冲电压输出 DAC	212
6.6.1	双极性电压输出电路	212
6.6.2	可编程 4 ~ 20mA 过程控制器电路	212
6.6.3	低功耗的 DDS 幅度控制电路	213
6.7	低功耗 16 位缓冲电压输出 DAC	214
6.7.1	双极性电压输出电路	214
6.7.2	可编程 4 ~ 20mA 过程控制器电路 1	215
6.7.3	可编程 4 ~ 20mA 过程控制器电路 2	216
6.7.4	16 位全隔离 4 ~ 20mA 电流输出模块	217
6.7.5	16 位全隔离电压输出模块	218
6.8	功耗低于 4mW 的 DAC	219
<b>第 7 章</b>	<b>基于 SoC 的低功耗数据采集系统设计</b>	<b>220</b>
7.1	三相多功能电能计量 IC	220
7.2	12 位 100ksps 低功耗数据采集系统 (DAS)	221
7.2.1	精密定位电路	221
7.2.2	桥式传感器测量电路	222
7.3	低功耗多功能多相 AFE	222
7.3.1	电气参数测量电路	222
7.3.2	低功耗测量模式与停止模式的使用	224

7.4	智能数据采集系统 .....	228
7.4.1	16 位智能数据采集系统 .....	228
7.4.2	12/16 位智能数据采集系统 .....	228
<b>第 8 章</b>	<b>低功耗放大器电路设计 .....</b>	<b>231</b>
8.1	单电源 OP 电路设计应考虑的问题 .....	231
8.1.1	输入级和输出级 .....	231
8.1.2	失调电压和输入偏置电流 .....	232
8.1.3	增益与负载的关系 .....	233
8.1.4	摆率、开环增益与输出摆幅 .....	234
8.1.5	噪声 .....	234
8.1.6	失真 .....	236
8.1.7	正确地为单电源运算放大器电路提供退耦 .....	236
8.1.8	为单电源运算放大器电路提供负电源 .....	238
8.2	低功耗零漂移轨至轨输出的运算放大器 .....	238
8.2.1	双向电流检测放大器电路 .....	238
8.2.2	高增益精密直流耦合放大器 .....	239
8.3	1.8V 330nA 低功耗运算放大器 .....	240
8.4	零漂移低噪声低功耗运算放大器 .....	240
8.4.1	传感和检测系统对 OP 精度的要求 .....	240
8.4.2	桥式传感器放大和 ADC 输入匹配电路 .....	241
8.5	低功耗自动调零运算放大器 .....	242
8.5.1	输入端保护和电源退耦电路 .....	242
8.5.2	同相和反相放大器电路 .....	243
8.5.3	差分放大器电路 .....	243
8.5.4	同相差分放大器电路 .....	243
8.5.5	桥式传感器放大电路 .....	244
8.5.6	RTD 传感器放大电路 .....	244
8.5.7	K 型热电偶传感器放大电路 .....	245
8.5.8	失调电压校正电路 .....	245
8.5.9	高精度比较器电路 .....	246
8.5.10	低功耗热电偶测量电路 .....	246
8.6	1.8V2.9 $\mu$ A 90kHz 轨到轨运算放大器 .....	247
8.6.1	电池电压监测电路 .....	247
8.6.2	窗口比较器 .....	248
8.6.3	单极性信号链配置电路 .....	249
8.6.4	桥式传感器放大电路 .....	249
8.6.5	电流监测电路 .....	250

8.6.6	两运算放大器构成的差分放大器电路	251
8.6.7	气体传感器放大电路	251
8.7	低功耗精密零漂移 CMOS 运算放大器	252
8.7.1	K 型热电偶温度测量电路	252
8.7.2	单 OP 桥式传感器放大器电路	252
8.7.3	电流监测电路	253
8.7.4	热敏电阻测量电路	254
8.7.5	仪表放大器电路	254
8.7.6	单电源低功耗的 ECG 放大器电路	254
8.8	8 通道超低功耗低噪声前置放大器	255
8.9	400 $\mu$ A 高速运算放大器	257
8.10	1.5V 11 $\mu$ A 低功耗运算放大器	257
8.11	低功耗 RF 驱动放大器	257
8.12	20 $\mu$ A 低功耗轨到轨输入/输出运算放大器	259
8.12.1	脉搏血氧仪电流源电路	259
8.12.2	四阶低通 Butterworth 滤波器	260
8.13	微功率轨对轨输入与输出运算放大器	261
8.14	低功耗单位增益差动放大器	261
8.14.1	仪表放大器电路	261
8.14.2	差分输出的仪表放大器电路	262
8.14.3	差分放大器电路	262
8.14.4	精密电流源电路	263
8.15	驱动高速 ADC 的 50mW 差分放大器	267
8.15.1	应用电路形式	267
8.15.2	ADC 驱动电路	270
8.16	低功耗高速全差动放大器	270
8.16.1	应用电路形式	270
8.16.2	24 位 216kHz 采样四通道音频 ADC 驱动电路	272
8.16.3	24 位八通道 144kHz $\Sigma - \Delta$ ADC 驱动电路	273
8.16.4	16 位高速低功耗 ADC 驱动电路	274
8.17	1.5GHz 电流反馈差分放大器	274
8.17.1	单端输入差分输出的 ADC 驱动电路	274
8.17.2	AC 耦合输入电路	275
8.17.3	105 Msps 14 位 ADC 驱动电路	276
8.18	750MHz 差分 ADC 驱动器	276
8.19	2.2GHz 高速差分 ADC 驱动器	277
8.20	电压输出和电流输出 DAC 的单端差分转换器电路	278

8.20.1	用于电压输出 DAC 的单端差分转换器电路	278
8.20.2	用于电流输出 DAC 的单端差分转换器电路	279
8.21	低功耗差分视频接收器电路	281
8.22	40 $\mu$ A 超低功耗仪表放大器	283
8.22.1	应用电路形式	283
8.22.2	应用中应注意的一些问题	284
8.22.3	具有高通滤波器特性的放大器电路	287
8.22.4	低功耗心率监测电路	288
8.23	50 $\mu$ A 低功耗仪表放大器	288
8.23.1	应用电路形式	288
8.23.2	输出电压偏移调节电路	289
8.23.3	提供输入共模电流通道	290
8.23.4	单电源桥式传感器电路	290
8.23.5	心电(ECG)放大器电路	291
8.24	低功耗低成本可编程增益仪表放大器电路	291
8.25	低功耗单电源满摆幅精密仪表放大器电路	292
<b>第9章</b>	<b>低功耗比较器电路设计</b>	<b>295</b>
9.1	比较器的选择	295
9.1.1	比较器的性能指标	295
9.1.2	可选择的比较器类型	297
9.1.3	比较器的典型应用	298
9.2	低功耗比较器	300
9.2.1	低功耗精密电池低电压检测电路	300
9.2.2	精密高温开关电路	300
9.2.3	环境温度监测用温度控制窗口检测器	301
9.2.4	双低端电流监测电路	302
9.2.5	自动关机电源电路	302
9.3	低电压低功耗上拉输出的比较器	303
9.4	低功耗高速单电源 OP + 比较器 + 电压基准	303
9.4.1	报警和检测器用的无线电接收器	303
9.4.2	用于遥控和数据链前端的红外线接收器	304
9.4.3	精密三角波发生器	305
9.5	1.8V 纳安级功耗超摆幅比较器	307
9.5.1	过零检测器电路	307
9.5.2	逻辑电平转换器	307
9.6	利用低功耗比较器自动检测插入附件	308
9.6.1	插孔检测	308



9.6.2	耳机检测 .....	308
9.6.3	压簧开关检测 .....	310
<b>第 10 章</b>	<b>低功耗滤波器电路设计 .....</b>	<b>312</b>
10.1	低功耗的开关电容滤波器 .....	312
10.1.1	低通滤波器的频域特性 .....	312
10.1.2	低功耗 5 阶低通滤波器 .....	314
10.1.3	低功耗 8 阶低通滤波器 .....	315
10.2	低噪声低失真有源 RC 四通道通用滤波器 .....	315
10.2.1	175kHz 8 阶 Elliptic 高通滤波器 .....	315
10.2.2	100kHz 8 阶带通滤波器 .....	316
10.2.3	200kHz 9 阶 Elliptic 低通滤波器 .....	317
10.3	功耗可控的双通道 10MHz 低通滤波器 .....	318
10.3.1	低通滤波器电路 .....	318
10.3.2	16 位差分 ADC 驱动电路 .....	320
10.4	利用数字电位器实现数控低通滤波器 .....	320
10.4.1	数控低通滤波器结构 .....	320
10.4.2	数字电位器的选择 .....	321
10.4.3	运算放大器的选择 .....	322
10.5	低功耗 8 极点 Sallen-Key Butterworth 低通滤波器 .....	322
10.5.1	8 极点低通滤波器电路结构 .....	322
10.5.2	8 极点低通滤波器频率响应 .....	324
<b>参考文献</b>	.....	<b>326</b>

# 第 1 章

## 低功耗系统设计的一般原则

### 1.1 集成电路的功耗

#### 1.1.1 CMOS 倒相器的传输特性

集成电路的功耗包含有动态功耗 (Dynamic Power) 和静态功耗 (Static Power) 两大部分<sup>[1~6]</sup>。

动态功耗是电路处于活动期间所消耗的功耗, 在电路的工作状态发生变化时产生, 主要包括: 由于逻辑跳变引起的电容功耗、由于通路延时引起的竞争冒险功耗、由于电路瞬间导通引起的短路功耗。动态功耗是电路功耗的主要组成部分。

静态功耗是指当电路处于电源供电状态而没有信号翻转时所消耗的功率。在 CMOS 电路中, 静态功耗主要是由漏电流引起的。当电路工艺进入深亚微米和纳米阶段后, 漏电流带来的静态功耗也成为集成电路功耗的主要组成部分。

在进行集成电路延迟时间和功耗的分析时常采用 CMOS 倒相器。CMOS 倒相器电路结构和传输特性曲线如图 1.1 所示。从图 1.1 (b) 中的 AB 段和 CD 段可见, 当电路处在静态时, 如果忽略器件的漏电流, CMOS 反相器的功耗几乎为零。当电路发生状态翻转时 (BC 段), N 管和 P 管具有一段同时导通的时间, 此时, 存在一个从电源通过两个管子流向地的电流  $i_D$ 。 $i_D$  的存在表示器件在 BC 段存在着功率消耗。这个功率消耗在时钟频率较高时尤为突出, 时钟速度越高, 意味着每秒状态的切换次数越多, 也就意味着存在更多的功率消耗。除此之外, 器件还存在一个有漏电流产生的静态功耗。

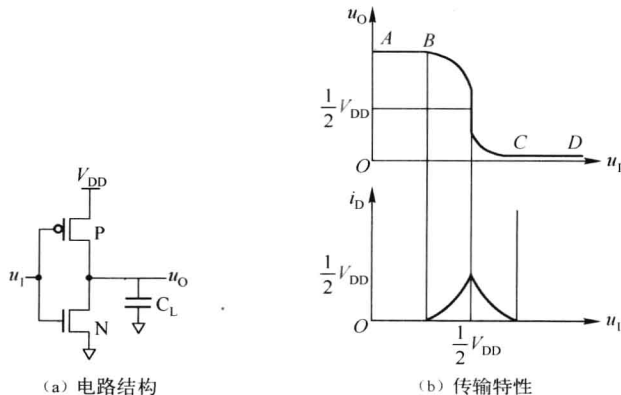


图 1.1 CMOS 倒相器的电路结构和传输特性

### 1.1.2 开关功耗

开关功耗 (Switching Power) 是动态功耗中最主要组成部分, 是电路驱动负载充放电所需的功耗<sup>[1~3]</sup>。开关功耗电路模型如图 1.2 所示。

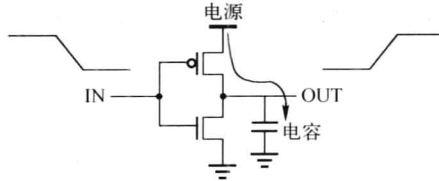


图 1.2 开关功耗电路模型

如图 1.2 所示, 电流经过开关管对电容充电, 电源的能耗为

$$E_{0-1} = \int_0^T I(t) V_{DD} dt \quad (1.1)$$

因为  $I(t) = C_L \frac{dV_0}{dt}$ ,  $t = T$  时,  $V_0 = V_{DD}$ , 所以有

$$E_{0-1} = \int_0^{V_{DD}} C_E V_{DD} dV_0 = C_L V_{DD}^2 \quad (1.2)$$

从式 (1.2) 可见, 当电路的输出由低电平跳到高电平时, 电源  $V_{DD}$  需要提供  $C_L V_{DD}^2$  的电能。其中, 电容上的储能为

$$E_{0-1} = \int_0^T I(t) V_0 dt = \int_0^{V_{DD}} C_L V_0 dV_0 = \frac{1}{2} C_L V_{DD}^2 \quad (1.3)$$

即有  $\frac{1}{2} C_L V_{DD}^2$  的电能存储在负载电容  $C_L$  中, 而另一半能量被 PMOS 管消耗。

同理, 当电路输出从高电平跳到低电平时, 储存在  $C_L$  中的能量在放电过程中消耗在 NMOS 管上。因此, 每一个开关周期都需要消耗  $C_L V_{DD}^2$  的电能。

要计算开关功耗, 还必须考虑电路的开关 (翻转) 频率, 所以有

$$P_{\text{switching}} = \alpha C_L V_{DD}^2 f \quad (1.4)$$

式中,  $\alpha$  为开关活动因子, 即每个时钟周期中发生状态变化器件的个数;  $C_L$  为负载电容;  $f$  为电路的工作频率;  $V_{DD}$  为电路的电源电压值。

开关功耗是 CMOS 电路功耗的主要成分, 从式 (1.4) 可以看出, 通过减小负载电容、电源电压、工作频率以及节点的开关活动性, 能够降低开关功耗。

电源电压对开关功耗呈二次方关系, 因此在改变电路结构的情况下, 降低电源电压就可以取得降低功耗的显著效果。但是当电源电压接近阈值电压时, 电路的延迟会显著增加, 且漏电流也会迅速增大, 为了避免这种情况, 一般  $V_{DD}$  应不小于  $2V_T$ 。

开关功耗与负载电容成正比, 可以通过减小负载电容来优化功耗。在 CMOS 电路中, 电容主要由两部分构成: 一部分是器件栅电容和节点电容, 它们和器件工艺有关; 另一部分是连线电容。值得注意的是, 随着工艺精度走向深亚微米, 布线电容已经在寄生电容中占据主要地位。为了减小电容, 在工艺方面要保持器件有尽可能或合理的最小尺寸, 物理设计时要减小连线长度。