

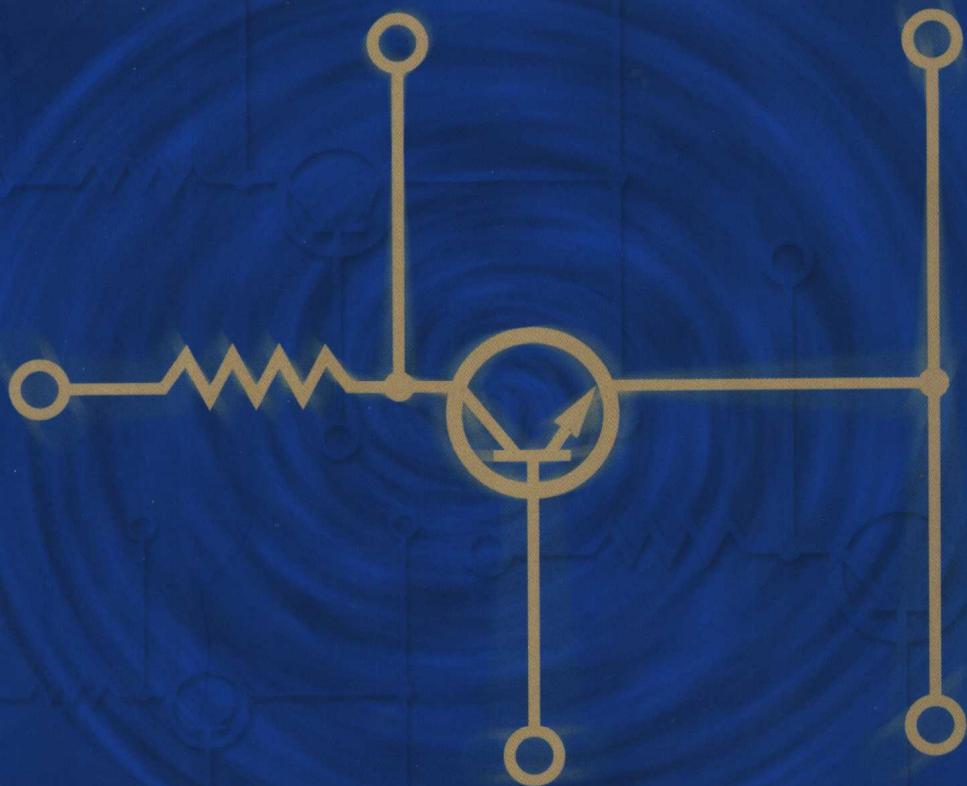
实用电子电路设计丛书

# 晶体管电路设计

下

〔日〕铃木雅臣 著  
彭 军 译

FET/功率 MOS/开关电路的实验解析



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

实用电子电路设计丛书

# 晶体管电路设计 (下)

FET/功率 MOS/开关电路的实验解析

〔日〕 铃木雅臣 著

彭 军 译

科学出版社

北 京

图字: 01-2003-7937 号

## 内 容 简 介

本书是“实用电子电路设计丛书”之一,共分上下二册。本书作为下册主要介绍晶体管/FET 电路设计技术的基础知识和基本实验,内容包括 FET 放大电路、源极跟随器电路、功率放大器、电压/电流反馈放大电路、晶体管/FET 开关电路、模拟开关电路、开关电源、振荡电路等。上册则主要介绍放大电路的工作、增强输出的电路、功率放大器的设计与制作、拓宽频率特性等。

本书面向实际需要,理论联系实际,通过大量具体的实验,抓住晶体管、FET 的工作图像,以达到灵活运用这些器件设计应用电路的目的。

本书适用对象是相关领域与部门工程技术人员以及相关专业的本科生、研究生;还有广大的电子爱好者。

### 图书在版编目(CIP)数据

晶体管电路设计(下)/(日)铃木雅臣著;彭军译. —北京:科学出版社,2004  
(实用电子电路设计丛书)

ISBN 7-03-013278-5

I. 晶… II. ①铃…②彭… III. 晶体管电路-电路设计 IV. TN710.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 039627 号

责任编辑:杨 凯 崔炳哲 / 责任制作:魏 谨

责任印制:刘士平 / 封面设计:李 力

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

北京东方科龙图文有限公司 制作

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

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2004 年 9 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2004 年 9 月第一次印刷 印张: 20 1/4

印数: 1—4 000 字数: 362 000

定价: 32.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

# 前 言

近年来电子电路的设计进入了以 IC/LSI(集成电路/大规模集成电路)为中心的阶段。小小的管壳内凝缩了各种功能的 IC/LSI 给人们带来了极大的方便,可以说没有它就没有现代的电子电路。现在是 IC 的全盛时代。IC/LSI 今后还将进一步集成周边部件及功能,使之规模更大、功能更强、性能更高。

最近有这样的说法,虽然使用晶体管或 FET(场效应晶体管)简单而方便,但是现在的趋势更倾向于使用 IC。也有人感到专用 IC 的价格昂贵,但是不知道怎样才能把 IC 与晶体管、FET 巧妙地组合起来获得性能更高的电路。

诸如“用晶体管或(和)FET 做成的分立电路最好”之类的说法并没有过时,只不过对于 IC/LSI 以及晶体管、FET 构成的许多放大/开关器件来说,各自都有有效利用它们优点的使用方法。

在这样的背景下,本书通过具体的实验,抓住晶体管、FET 的工作图像,以达到灵活运用这些器件的目的。

已经出版的本系列《晶体管电路设计(上)》一书中进行了以晶体管放大电路为中心的许多实验。本书是它的续编,将介绍有关 FET 放大电路、开关电路、模拟开关、振荡电路等方面的实验。

本书若能对提高读者的电子电路的应用技能有所帮助,著者将深感荣幸。

最后,对在本书的出版、发行过程中给予支持和帮助的有关各方面表示感谢。

借此机会,还对在本书的策划、编辑等许多方面给予很大帮助的 CQ 出版(株) C&E 出版部蒲生良治次长、编写本书第 7 章的 Accuphase(株)山本诚先生、对《晶体管电路设计(上)》提出过宝贵意见的读者表示深深的谢意。

著 者

# 目 录

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| <b>第 1 章 晶体管、FET 和 IC</b>      | 1  |
| 1.1 晶体管和 FET 的灵活使用             | 2  |
| 1.1.1 使用 IC 的优缺点               | 2  |
| 1.1.2 使用晶体管和 FET 的优缺点          | 3  |
| 1.1.3 灵活使用 IC 以及晶体管、FET        | 3  |
| 1.1.4 灵活使用技术                   | 4  |
| 1.2 进入自我设计 IC 的时代              | 5  |
| 1.2.1 自己设计 IC                  | 5  |
| 1.2.2 模拟电路今后也将采用 (CMOS) FET 器件 | 6  |
| <b>第 2 章 FET 放大电路的工作原理</b>     | 8  |
| 2.1 放大电路的波形                    | 8  |
| 2.1.1 3 倍放大器                   | 8  |
| 2.1.2 栅极上加偏压                   | 10 |
| 2.1.3 栅极-源极间电压为 0.4V           | 10 |
| 2.1.4 FET 是电压控制器件              | 12 |
| 2.1.5 输出是源极电流的变化部分             | 12 |
| 2.1.6 漏极的相位相反                  | 13 |
| 2.1.7 与双极晶体管电路的差别              | 14 |
| 2.2 FET 的工作原理                  | 14 |
| 2.2.1 JFET 与 MOSFET            | 14 |
| 2.2.2 FET 的结构                  | 15 |
| 2.2.3 FET 的电路符号                | 16 |
| 2.2.4 JFET 的传输特性               | 17 |
| 2.2.5 放大倍数是跨导 $g_m$            | 17 |
| 2.2.6 实际器件的跨导                  | 18 |
| 2.2.7 MOSFET 的传输特性             | 19 |
| 2.2.8 MOSFET 的跨导               | 20 |

|                              |           |
|------------------------------|-----------|
| <b>第 3 章 源极接地放大电路的设计</b>     | <b>23</b> |
| 3.1 设计放大电路前的准备               | 23        |
| 3.1.1 源极接地电路的直流电位            | 23        |
| 3.1.2 求解交流电压放大倍数             | 25        |
| 3.1.3 更换 FET 器件的品种           | 25        |
| 3.1.4 用晶体管替代 FET             | 27        |
| 3.2 放大电路的设计                  | 28        |
| 3.2.1 确定电源电压                 | 28        |
| 3.2.2 选择 FET                 | 28        |
| 3.2.3 使用低频低噪声器件 2SK184       | 29        |
| 3.2.4 决定漏极电流工作点              | 30        |
| 3.2.5 确定 $R_D$ 和 $R_S$       | 31        |
| 3.2.6 功率损耗的计算                | 32        |
| 3.2.7 栅极偏压电路的设计              | 32        |
| 3.2.8 进行必要的验算                | 33        |
| 3.2.9 确定电容 $C_1$ 、 $C_2$ 的方法 | 34        |
| 3.2.10 FET 电路中旁路电容也是重要的      | 35        |
| 3.3 放大电路的性能                  | 36        |
| 3.3.1 测定输入阻抗                 | 36        |
| 3.3.2 确认输入阻抗的高低              | 37        |
| 3.3.3 输出阻抗                   | 38        |
| 3.3.4 放大倍数与频率特性              | 40        |
| 3.3.5 高频截止频率                 | 40        |
| 3.3.6 更换 FET 时的高频特性          | 42        |
| 3.3.7 使输入电容变大的米勒效应           | 44        |
| 3.3.8 如何提高放大倍数               | 45        |
| 3.3.9 电压增益与频率特性的关系           | 46        |
| 3.3.10 噪声特性                  | 47        |
| 3.3.11 总谐波失真                 | 49        |
| 3.4 源极接地放大电路的应用电路            | 50        |
| 3.4.1 使用 N 沟 JFET 和负电源的电路    | 50        |
| 3.4.2 使用零偏置 JFET 的电路         | 51        |
| 3.4.3 150MHz 调谐放大电路          | 53        |
| 3.4.4 高增益、高输入阻抗放大电路          | 55        |

|            |                     |           |
|------------|---------------------|-----------|
| 3.4.5      | 高输入阻抗低噪声放大电路        | 56        |
| 3.4.6      | 简单的恒流电路             | 58        |
| <b>第4章</b> | <b>源极跟随器电路的设计</b>   | <b>60</b> |
| 4.1        | 源极跟随器的工作            | 60        |
| 4.1.1      | 与源极接地电路的不同之处        | 60        |
| 4.1.2      | 输出与输入的波形是相同的        | 61        |
| 4.1.3      | 输出阻抗低的原因            | 62        |
| 4.2        | 源极跟随器电路的设计          | 63        |
| 4.2.1      | 确定电源电压              | 63        |
| 4.2.2      | 选择 FET              | 63        |
| 4.2.3      | 对 FET 的要求           | 64        |
| 4.2.4      | 偏置电路的设计             | 64        |
| 4.2.5      | 确定源极电阻 $R_S$ 的方法    | 65        |
| 4.2.6      | FET 的发热——计算漏极损耗     | 65        |
| 4.2.7      | 确认最高使用温度            | 66        |
| 4.2.8      | 决定电容 $C_1$ 和 $C_2$  | 67        |
| 4.2.9      | 电源的去耦电容器            | 67        |
| 4.3        | 源极跟随器的性能            | 67        |
| 4.3.1      | 输入阻抗的测定             | 67        |
| 4.3.2      | 输出阻抗                | 68        |
| 4.3.3      | 负载电阻变重时的情况          | 69        |
| 4.3.4      | 推挽                  | 70        |
| 4.3.5      | 使用功率 MOSFET         | 71        |
| 4.3.6      | 测定振幅频率特性            | 73        |
| 4.3.7      | 噪声和总谐波失真            | 75        |
| 4.4        | 源极跟随器电路的应用电路        | 76        |
| 4.4.1      | 采用 N 沟 JFET 和负电源的电路 | 76        |
| 4.4.2      | 采用 P 沟 JFET 和负电源的电路 | 77        |
| 4.4.3      | 源极跟随器+恒流负载          | 78        |
| 4.4.4      | 采用 JFET 的推挽源极跟随器    | 79        |
| 4.4.5      | FET 与晶体管混合的达林顿连接    | 80        |
| 4.4.6      | 源极跟随器+OP 放大器        | 82        |
| 4.4.7      | OP 放大器+源极跟随器        | 83        |

|                                |           |
|--------------------------------|-----------|
| <b>第 5 章 FET 低频功率放大器的设计与制作</b> | <b>85</b> |
| 5.1 低频功率放大电路的构成                | 85        |
| 5.1.1 晶体管电路中的基极电流              | 85        |
| 5.1.2 使用 MOSFET 能够使电路简单化       | 87        |
| 5.1.3 晶体管电路中必须有防热击穿电路          | 87        |
| 5.1.4 MOSFET 电路中没有热击穿问题        | 88        |
| 5.1.5 简单的温度补偿电路                | 89        |
| 5.2 MOSFET 功率放大器的设计            | 90        |
| 5.2.1 放大器的设计指标                 | 90        |
| 5.2.2 首先确定电源电压                 | 91        |
| 5.2.3 OP 放大器的电源电路是 3 端稳压电源     | 92        |
| 5.2.4 关于源极跟随器级的电源              | 93        |
| 5.2.5 整流电路的输出电压和电流             | 93        |
| 5.2.6 整流电路中的二极管与电容器            | 94        |
| 5.2.7 选择源极跟随器用的 FET            | 94        |
| 5.2.8 需要有散热片和限流电阻              | 96        |
| 5.2.9 源极跟随器偏置电路的构成             | 97        |
| 5.2.10 偏置用恒流源的讨论               | 98        |
| 5.2.11 选择温度补偿用晶体管              | 98        |
| 5.2.12 确定偏置电压 $V_B$            | 99        |
| 5.2.13 OP 放大器构成的电压放大级          | 100       |
| 5.2.14 输入电路外围使用的器件             | 100       |
| 5.2.15 为使电路正常工作所加入的各元件         | 101       |
| 5.2.16 对于扬声器负载的措施              | 101       |
| 5.3 功率放大器的调整及性能评价              | 102       |
| 5.3.1 电路的工作波形                  | 102       |
| 5.3.2 温度补偿电路的工作                | 103       |
| 5.3.3 低频放大器的性能——频率特性和噪声特性      | 104       |
| 5.3.4 与晶体管放大器的失真率特性比较          | 105       |
| 5.4 低频功率放大器的应用电路               | 106       |
| 5.4.1 并联推挽源极跟随器                | 106       |
| 5.4.2 100W 低频功率放大器             | 108       |



|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| <b>第 6 章 栅极接地放大电路的设计</b>              | 110 |
| 6.1 栅极接地的波形                           | 110 |
| 6.1.1 实验电路的结构                         | 110 |
| 6.1.2 非反转 3 倍放大器                      | 111 |
| 6.1.3 源极波形与漏极波形同相                     | 112 |
| 6.2 栅极接地电路的设计                         | 114 |
| 6.2.1 电源电压与 FET 的选择                   | 114 |
| 6.2.2 求交流放大倍数                         | 114 |
| 6.2.3 确定 $R_S$ 、 $R_g$ 、 $R_D$ 的方法    | 115 |
| 6.2.4 求最大输出电压                         | 115 |
| 6.2.5 偏置电路的设计                         | 116 |
| 6.2.6 确定电容 $C_1 \sim C_5$ 的方法         | 116 |
| 6.3 栅极接地电路的性能                         | 116 |
| 6.3.1 输入输出阻抗的测定                       | 116 |
| 6.3.2 针对高输出阻抗的措施                      | 117 |
| 6.3.3 放大倍数与频率特性                       | 118 |
| 6.3.4 高频范围的特性                         | 118 |
| 6.3.5 频率特性好的原因                        | 119 |
| 6.3.6 输入电容 $C_i$ 不影响特性的证据             | 120 |
| 6.3.7 使用 2SK241 时为什么没有变好?             | 121 |
| 6.3.8 噪声和总谐波失真                        | 122 |
| 6.4 栅极接地放大电路的应用电路                     | 123 |
| 6.4.1 视频放大器                           | 123 |
| 6.4.2 栅-阴放大连接                         | 125 |
| 6.4.3 栅-阴放大连接自举电路                     | 126 |
| 6.4.4 低噪声高输入阻抗放大电路                    | 128 |
| <b>第 7 章 电流反馈型 OP 放大器的设计与制作</b>       | 131 |
| 7.1 电流反馈型 OP 放大器                      | 131 |
| 7.1.1 过去的 OP 放大器——电压反馈型               | 131 |
| 7.1.2 新型的 OP 放大器——电流反馈型               | 132 |
| 7.1.3 电流反馈型 OP 放大器与电压反馈型<br>OP 放大器的比较 | 133 |
| 7.2 电流反馈型 OP 放大器的基本构成                 | 135 |

|              |                                |            |
|--------------|--------------------------------|------------|
| 7.2.1        | 输入缓冲与跨阻抗 .....                 | 135        |
| 7.2.2        | 输出级的构成——射极跟随器 .....            | 136        |
| 7.3          | 电流反馈型视频放大器的设计、制作 .....         | 136        |
| 7.3.1        | 视频放大器的设计 .....                 | 136        |
| 7.3.2        | 电源电压和晶体管的选定 .....              | 137        |
| 7.3.3        | 由发射极电流决定各电阻值 .....             | 138        |
| 7.3.4        | 源极跟随器的设计 .....                 | 138        |
| 7.4          | 视频放大器的性能 .....                 | 139        |
| 7.4.1        | 电路的检验 .....                    | 139        |
| 7.4.2        | 输出阻抗的测定 .....                  | 139        |
| 7.4.3        | 增益及频率特性的测量 .....               | 140        |
| 7.4.4        | 与电压反馈型 OP 放大器比较 .....          | 141        |
| 7.4.5        | 频率特性的改善 .....                  | 141        |
| 7.4.6        | 方波的响应 .....                    | 143        |
| 7.4.7        | 视频放大器的噪声特性 .....               | 144        |
| 7.4.8        | 跨阻抗的测定 .....                   | 145        |
| 7.4.9        | 输出偏移的原因是什么 .....               | 145        |
| 7.5          | 电流反馈型 OP 放大器的应用电路 .....        | 146        |
| 7.5.1        | 栅-阴放大连接自举化的视频放大器 .....         | 146        |
| 7.5.2        | 输入级采用晶体管的电流反馈型放大器 .....        | 147        |
| 7.5.3        | 使用电流反射镜的电流反馈型放大器 .....         | 148        |
| <b>第 8 章</b> | <b>晶体管开关电路的设计 .....</b>        | <b>150</b> |
| 8.1          | 发射极接地型开关电路 .....               | 150        |
| 8.1.1        | 晶体管的开关 .....                   | 150        |
| 8.1.2        | 从放大电路到开关电路 .....               | 151        |
| 8.1.3        | 观测开关波形 .....                   | 152        |
| 8.1.4        | 如果集电极开路 .....                  | 153        |
| 8.2          | 发射极接地型开关电路的设计 .....            | 154        |
| 8.2.1        | 开关晶体管的选择 .....                 | 154        |
| 8.2.2        | 当需要大的负载电流时 .....               | 155        |
| 8.2.3        | 确定偏置电路 $R_1$ 、 $R_2$ .....     | 157        |
| 8.2.4        | 开关速度慢—— $\mu\text{s}$ 量级 ..... | 158        |
| 8.3          | 如何提高开关速度 .....                 | 159        |

|              |                              |            |
|--------------|------------------------------|------------|
| 8.3.1        | 使用加速电容 .....                 | 159        |
| 8.3.2        | 肖特基箝位 .....                  | 160        |
| 8.3.3        | 如何提高输出波形的上升速度 .....          | 161        |
| 8.4          | 射极跟随器型开关电路的设计 .....          | 162        |
| 8.4.1        | 给射极跟随器输入大振幅 .....            | 162        |
| 8.4.2        | 开关速度 .....                   | 164        |
| 8.4.3        | 设计开关电路的指标 .....              | 165        |
| 8.4.4        | 晶体管的选择 .....                 | 165        |
| 8.4.5        | 偏置电阻 $R_1$ 的确定 .....         | 166        |
| 8.5          | 晶体管开关电路的应用 .....             | 166        |
| 8.5.1        | 继电器驱动电路 .....                | 166        |
| 8.5.2        | LED 显示器动态驱动电路(发射极接地) .....   | 168        |
| 8.5.3        | LED 显示器动态驱动电路(射极跟随器) .....   | 170        |
| 8.5.4        | 光耦合器的传输电路 .....              | 171        |
| <b>第 9 章</b> | <b>FET 开关电路的设计 .....</b>     | <b>174</b> |
| 9.1          | 使用 JFET 的源极接地型开关电路 .....     | 174        |
| 9.1.1        | 给 N 沟 JFET 输入正弦波 .....       | 174        |
| 9.1.2        | 给 P 沟 JFET 输入正弦波 .....       | 175        |
| 9.1.3        | JFET 的传输特性 .....             | 176        |
| 9.1.4        | 正弦波输入波形被限幅的原因 .....          | 176        |
| 9.1.5        | 开关波形——正常导通与正常截止 .....        | 177        |
| 9.1.6        | FET 用于高速开关的可能性 .....         | 178        |
| 9.1.7        | 设计 JFET 开关电路时应该注意的问题 .....   | 179        |
| 9.2          | 采用 MOSFET 的源极接地型开关电路 .....   | 179        |
| 9.2.1        | 给 MOSFET 输入正弦波 .....         | 179        |
| 9.2.2        | MOSFET 电路的波形 .....           | 180        |
| 9.2.3        | MOSFET 源极接地型开关电路的设计指标 .....  | 181        |
| 9.2.4        | MOSFET 的选择 .....             | 181        |
| 9.2.5        | 确定栅极偏置电阻的方法 .....            | 183        |
| 9.2.6        | 开路漏极电路 .....                 | 183        |
| 9.3          | 源极跟随器型开关电路的设计 .....          | 184        |
| 9.3.1        | 使用 N 沟 JFET 的源极跟随器开关电路 ..... | 184        |
| 9.3.2        | 采用 P 沟 JFET 的源极跟随器开关电路 ..... | 185        |

|                                                 |            |
|-------------------------------------------------|------------|
| 9.3.3 采用 MOSFET 的源极跟随器开关电路 .....                | 186        |
| 9.3.4 源极跟随器开关电路中需要注意的几个问题 ...                   | 187        |
| <b>第 10 章 功率 MOS 电动机驱动电路 .....</b>              | <b>188</b> |
| 10.1 电动机驱动电路的结构 .....                           | 188        |
| 10.1.1 电动机正转/逆转驱动电路的结构<br>——H 电桥电路 .....        | 188        |
| 10.1.2 MOSFET H 电桥电路 .....                      | 188        |
| 10.1.3 驱动源极跟随器型 MOSFET 的方法 .....                | 190        |
| 10.1.4 H 电桥控制电路的结构 .....                        | 190        |
| 10.2 H 电桥电动机驱动电路的设计 .....                       | 191        |
| 10.2.1 电路的设计指标 .....                            | 191        |
| 10.2.2 选择驱动 15V/1A 的 H 电桥的 FET .....            | 193        |
| 10.2.3 FET 中内藏续流二极管 .....                       | 193        |
| 10.2.4 控制 H 电桥的逻辑电路 .....                       | 194        |
| 10.2.5 发射极接地型开关电路中的内藏电阻型<br>晶体管 .....           | 196        |
| 10.2.6 驱动电路用的电源用 DC-DC 变换器升压 ...                | 197        |
| 10.2.7 DC-DC 变换器的基础是施密特触发<br>振荡电路 .....         | 198        |
| 10.3 电动机驱动电路的工作波形 .....                         | 199        |
| 10.3.1 驱动电路用电源——DC-DC 变换器部分的<br>波形 .....        | 199        |
| 10.3.2 驱动输出的波形 .....                            | 201        |
| 10.3.3 提高开关速度时的问题 .....                         | 202        |
| 10.4 电动机驱动电路的应用电路 .....                         | 203        |
| 10.4.1 采用 P 沟 MOSFET 和 N 沟 MOSFET 的<br>电路 ..... | 203        |
| 10.4.2 使用晶体管的 H 电桥 .....                        | 204        |
| <b>第 11 章 功率 MOS 开关电源的设计 .....</b>              | <b>206</b> |
| 11.1 开关电源的结构 .....                              | 206        |
| 11.1.1 与串级型直流电源的不同 .....                        | 206        |
| 11.1.2 升压型开关电源的结构 .....                         | 207        |

|               |                               |            |
|---------------|-------------------------------|------------|
| 11.1.3        | 开关电源的基本要素 .....               | 208        |
| 11.2          | 升压型开关电源的设计 .....              | 209        |
| 11.2.1        | 制作的开关电源的指标 .....              | 209        |
| 11.2.2        | 开关器件——MOSFET 的选择 .....        | 211        |
| 11.2.3        | 确定电感 .....                    | 212        |
| 11.2.4        | 脉冲整流电路的结构 .....               | 213        |
| 11.2.5        | 开关用振荡电路的结构 .....              | 214        |
| 11.2.6        | 稳定电压的措施 .....                 | 215        |
| 11.2.7        | 确定反馈电路的参数 .....               | 215        |
| 11.2.8        | 各电容器的确定 .....                 | 217        |
| 11.3          | 电源电路的波形和性能 .....              | 218        |
| 11.3.1        | 电源的输出波形 .....                 | 218        |
| 11.3.2        | 各部分的开关波形 .....                | 219        |
| 11.3.3        | 开关用 MOSFET 的电流波形 .....        | 221        |
| 11.3.4        | 取出的最大输出电压 .....               | 222        |
| 11.3.5        | 电路的功率转换效率 .....               | 222        |
| 11.3.6        | 输出电压：输出电流特性——加载调整 ...         | 223        |
| 11.3.7        | 输出电压：输入电压特性——线性调整 ...         | 223        |
| 11.4          | 升压型开关电源的应用电路 .....            | 224        |
| 11.4.1        | 固定输出电压的开关电源 .....             | 224        |
| 11.4.2        | 使用晶体管开关器件的电源电路 .....          | 225        |
| <b>第 12 章</b> | <b>晶体管开关电源的设计 .....</b>       | <b>227</b> |
| 12.1          | 降压型电源的结构 .....                | 227        |
| 12.1.1        | 给低通滤波器输入方波 .....              | 227        |
| 12.1.2        | 开关电路+滤波器=降压型开关电源 .....        | 228        |
| 12.1.3        | SW 断开时需要续流二极管 .....           | 229        |
| 12.2          | 降压型开关电源的设计 .....              | 230        |
| 12.2.1        | 电源电路的设计指标 .....               | 230        |
| 12.2.2        | 开关器件的选择——首先考虑电流值 .....        | 231        |
| 12.2.3        | 晶体管的耐压 .....                  | 231        |
| 12.2.4        | 决定基极电流大小的 $R_3$ 、 $R_4$ ..... | 232        |
| 12.2.5        | 续流二极管的选择 .....                | 233        |
| 12.2.6        | 低通滤波器部分的设计 .....              | 233        |

|               |                          |            |
|---------------|--------------------------|------------|
| 12.2.7        | 驱动开关的振荡电路                | 234        |
| 12.2.8        | 稳定电压的反馈电路                | 234        |
| 12.2.9        | 设定输出电压                   | 235        |
| 12.2.10       | 周边各电容器的确定                | 236        |
| 12.3          | 电源的波形与特性                 | 236        |
| 12.3.1        | 输出波形的确认                  | 236        |
| 12.3.2        | 控制电路的波形                  | 237        |
| 12.3.3        | $Tr_1$ 的开关波形             | 238        |
| 12.3.4        | 开关晶体管的电流波形               | 239        |
| 12.3.5        | 电路的转换效率                  | 240        |
| 12.3.6        | 输出电压: 输出电流特性(加载调整)       | 240        |
| 12.3.7        | 输出电压: 输入电压特性(线性调整)       | 241        |
| 12.4          | 降压型开关电源的应用电路             | 241        |
| 12.4.1        | 无须调整的电路(1)               | 241        |
| 12.4.2        | 无须调整的电路(2)               | 242        |
| 12.4.3        | 开关器件采用 MOSFET 的电路        | 243        |
| <b>第 13 章</b> | <b>模拟开关电路的设计</b>         | <b>245</b> |
| 13.1          | 模拟开关的结构                  | 245        |
| 13.1.1        | 模拟开关                     | 245        |
| 13.1.2        | 使用二极管的开关                 | 246        |
| 13.1.3        | 使用晶体管的开关                 | 246        |
| 13.1.4        | 使用 FET 的开关               | 247        |
| 13.1.5        | FET 开关的输出波形与机械开关<br>完全相同 | 248        |
| 13.1.6        | 输入信号原封不动地出现在栅极           | 249        |
| 13.1.7        | 改变 $V_{GS}$ 控制开关的接通/断开   | 250        |
| 13.2          | JFET 模拟开关的设计             | 251        |
| 13.2.1        | 开关用 FET 的选择              | 251        |
| 13.2.2        | 开关器件 2SK330 的特性          | 252        |
| 13.2.3        | FET 开关的栅极驱动电路            | 252        |
| 13.2.4        | 开关的电平变换电路                | 254        |
| 13.2.5        | 各部分的电位和周边电阻值             | 254        |
| 13.3          | 模拟开关电路的性能                | 255        |

|               |                               |            |
|---------------|-------------------------------|------------|
| 13.3.1        | 开关的动作                         | 255        |
| 13.3.2        | 导通电阻的大小                       | 255        |
| 13.3.3        | 截止隔离                          | 256        |
| 13.4          | 模拟开关的应用电路                     | 257        |
| 13.4.1        | 改善截止隔离的电路                     | 257        |
| 13.4.2        | 采用 P 沟 JFET 的电路               | 258        |
| 13.4.3        | 利用 OP 放大器的假想接地的切换电路           | 259        |
| 13.4.4        | 减小 FET 导通电阻影响的 OP 放大器<br>切换电路 | 260        |
| 13.4.5        | 采用光 MOS 的模拟开关                 | 261        |
| 13.4.6        | 使用晶体管的短开关                     | 262        |
| 13.4.7        | 晶体管差动型模拟开关                    | 263        |
| <b>第 14 章</b> | <b>振荡电路的设计</b>                | <b>265</b> |
| 14.1          | 振荡电路的构成                       | 265        |
| 14.1.1        | 正反馈                           | 265        |
| 14.1.2        | 使用共振电路和负阻元件                   | 266        |
| 14.1.3        | 负阻元件                          | 268        |
| 14.2          | RC 振荡电路的设计                    | 269        |
| 14.2.1        | 移相振荡的结构                       | 269        |
| 14.2.2        | 振荡的条件                         | 270        |
| 14.2.3        | 电路的增益                         | 271        |
| 14.2.4        | 实际的振荡波形                       | 273        |
| 14.3          | LC 振荡电路的设计                    | 274        |
| 14.3.1        | 应用共振电路和负阻产生振荡                 | 274        |
| 14.3.2        | 变形考毕兹电路                       | 274        |
| 14.3.3        | 确定实际电路的常数                     | 275        |
| 14.3.4        | 观察振荡波形—— $C_1$ 、 $C_2$ 的重要性   | 277        |
| 14.3.5        | 通过缓冲器输出                       | 277        |
| 14.4          | 石英振荡器的设计                      | 278        |
| 14.4.1        | 使用石英振子                        | 278        |
| 14.4.2        | 设计振荡电路——考毕兹型振荡电路              | 280        |
| 14.4.3        | 实际的振荡波形—— $C_1$ 、 $C_2$ 的重要性  | 282        |
| 14.4.4        | 谐波振荡电路                        | 283        |

|                                  |            |
|----------------------------------|------------|
| 14.5 各种振荡电路 .....                | 284        |
| 14.5.1 FET 移相振荡电路 .....          | 284        |
| 14.5.2 LC 振荡电路的频率调整 .....        | 285        |
| 14.5.3 使用 MOSFET 的 LC 振荡电路 ..... | 286        |
| 14.5.4 应用陶瓷振子的振荡电路 .....         | 286        |
| 14.5.5 集电极输出的石英振荡电路 .....        | 287        |
| <br>                             |            |
| <b>第 15 章 FM 无线话筒的制作 .....</b>   | <b>289</b> |
| 15.1 无线话筒的结构 .....               | 289        |
| 15.1.1 频率调制音频信号——FM .....        | 289        |
| 15.1.2 FM 调制的构成 .....            | 290        |
| 15.2 无线话筒的设计 .....               | 292        |
| 15.2.1 无线话筒的设计指标 .....           | 292        |
| 15.2.2 话筒和 AF 放大器 .....          | 293        |
| 15.2.3 FM 调制电路的构成 .....          | 293        |
| 15.2.4 振荡电路的构成 .....             | 295        |
| 15.2.5 RF 放大器的构成 .....           | 298        |
| 15.2.6 天 线 .....                 | 299        |
| 15.2.7 电路的调整方法 .....             | 299        |
| 15.2.8 电路的性能 .....               | 300        |
| 15.2.9 如果希望变更频率偏移 .....          | 300        |
| 15.3 FM 无线话筒的应用电路 .....          | 301        |
| 15.3.1 给 RF 放大器附加调谐电路 .....      | 301        |
| 15.3.2 振荡电路中采用陶瓷振子(1) .....      | 302        |
| 15.3.3 振荡电路中采用陶瓷振子(2) .....      | 304        |
| <br>                             |            |
| <b>参考文献 .....</b>                | <b>306</b> |

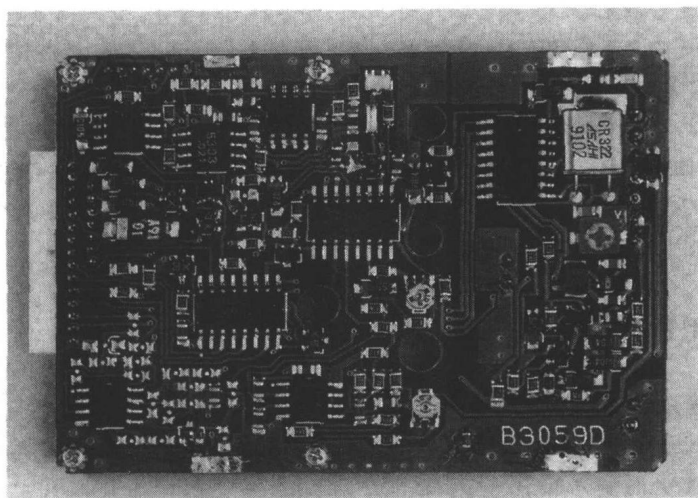


# 第 1 章 晶体管、FET 和 IC

现在是 IC 的全盛时代!

我们身边有各种各样的电器,例如电视、VTR、CD 组合式收录机、计算机等,打开这些电器的机壳就会发现内部几乎全是 IC,已经很难找到晶体管或 FET 等分立的放大器件了。在计算机的主机板上,甚至连电阻都很难见到。

电子电路的这种 IC 化方向当然是工程技术人员所向往的,因为它能够在有限的空间内很方便地满足使用者所要求的解决各种难题的功能,而且更廉价(参见照片 1.1)。



照片 1.1 实际的小型化的电路基板(由 IC 和部件构成)

当然,目前的现状也不是完全不再使用晶体管、FET 等分立的半导体器件。在一些最先进的大功率/大电流电路、低噪声放大电路、高频电路等电子电路中除 IC 外仍然还使用着多种分立器件(参见照片 1.2)。

可以说目前的电子电路中,IC 通常应用于一般电路中,而分立的晶体管和 FET 应用于追求高性能的最先进的电路中。

也不完全拘泥于这种区分。在我们身边当然还有考虑到晶体管和 FET 的特