

# 精益设计

Lean Design

(日) 渡边 明祯 · 著

彭 刚 范华婵 刘朝楠 · 译

## 晶体管电路实用设计

多谐振荡器的应用

用于功率晶体管的实用散热设计法

耳机放大器的设计和制作

对称型电流反馈放大器

由功率MOSFET组成的9W音频功率放大器

由双二型滤波器组成的振荡电路



科学出版社

精益设计

# 晶体管电路实用设计

〔日〕渡边 明禎 著

彭刚 范华婵 刘朝楠 译

科学出版社

北京

图字：01-2013-1075号

## 内 容 简 介

本书旨在让刚接触到电子技术的初学者尽快上手，充分了解和掌握晶体管电路的基本知识及应用设计。本书共分3部分，内容涉及分立器件的基础知识，电源电路、低频功率放大电路、低频振荡电路、模拟电路、逻辑与接口电路、高频放大电路、高频振荡电路等的实用设计，以及耳机放大器的设计与制造和电路读取的技巧。

本书可供高等院校计算机、通信、电子信息、自动化等专业师生阅读，也可作为相关技术人员的参考书。

### 图书在版编目（CIP）数据

晶体管电路实用设计 / (日) 渡边明禎著；彭刚译. —北京：科学出版社，2016.1

ISBN 978-7-03-046442-2

I . 晶… II . ①渡… ②彭… III . ①晶体管电路—电路设计 IV . ①TN710.2

中国版本图书馆CIP数据核字（2015）第274539号

责任编辑：杨 凯 / 责任制作：魏 谨  
责任印制：赵 博 / 封面设计：张鹏伟

北京东方科龙图文有限公司制作  
<http://www.okbook.com.cn>

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>

天津斯科印刷厂·印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2016年1月第 一 版 开本：720×1000 1/16  
2016年1月第一次印刷 印张：19 1/2  
印数：1—3500 字数：330 000

定价：45.00元

（如有印装质量问题，我社负责调换）

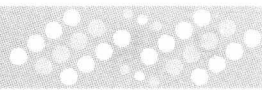
# 目 录

绪论 欢迎来到晶体管电路的世界!	1
0.1 半导体器件简史	1
0.2 成为实力与魅力兼具的技术人员	3
0.3 关于本书的内容	5

## 第1部分 分立器件的基础

第1章 何谓二极管	10
1.1 硅原子与硅晶	10
1.2 电子激发	13
1.3 费米能级	15
1.4 N型半导体与P型半导体	16
1.5 绝缘体、金属与半导体的区别	17
1.6 半导体PN结的性质	18
1.7 肖特基接触	24
附录A 一种用万用表来检测半导体部件好坏的判定方法	24

第2章 了解FET	31
2.1 FET	31
2.2 JFET	32
2.3 MESFET	36
2.4 MOSFET	37
2.5 FET的特性	41
2.6 三种基本放大电路	43
2.7 共源共栅连接FET	44



2.8 基于2SK30ATM上的单管低频放大电路	45
--------------------------	----

### 第3章 理解晶体管 50

3.1 何谓晶体管	50
3.2 晶体管的电气特性与最大额定值	52
3.3 晶体管的等效电路	58
3.4 3种基本放大电路	60
3.5 3种基本偏置电路	61
3.6 达林顿接法	64
3.7 单晶体管放大电路的简易设计法	66

### 第4章 可控硅、GTO、TRIAC等 69

4.1 可控硅	70
4.2 GTO	72
4.3 TRIAC与DIAC	74

## 第2部分 分立器件的应用电路设计

### 第5章 电源电路的实用设计 80

5.1 整流电路	80
5.2 滤波电路	86
5.3 由齐纳二极管组成的恒压电路	87
5.4 带有电流增压器的齐纳二极管恒压电路	89
5.5 使用晶体管的可变输出电压的恒压电路	91
5.6 使用了OP放大器和晶体管的输出稳定性高的恒压电路	99
5.7 恒流电路	100

5.8	CVCC电源	103
5.9	跟踪稳压器	108
5.10	3端子稳压器的性能提升	110
5.11	有源纹波滤波器	112
5.12	电子负载	113
附录B	用于功率晶体管的实用散热设计法	116
<b>第6章</b>	<b>低频放大电路的实用设计</b>	<b>121</b>
6.1	DC放大器	121
6.2	互补性SEPP放大器	127
6.3	多段放大电路	131
6.4	对称型电流反馈放大器	132
6.5	由功率MOSFET组成的9W音频功率放大器	140
6.6	由功率晶体管组成的30W的音频功率放大器	145
<b>第7章</b>	<b>低频振荡电路的实用设计</b>	<b>152</b>
7.1	正弦波振荡电路	152
7.2	CR移相振荡电路	153
7.3	由双T型滤波器组成的振荡电路	155
7.4	文氏电桥振荡电路	159
<b>第8章</b>	<b>模拟功能电路的实用设计</b>	<b>165</b>
8.1	多谐振荡器电路	165
8.2	多谐振荡器的应用	169
8.3	波形整形电路	174
8.4	计时器	176
8.5	继电器与电灯的驱动电路	182

8.6 噪声发生器 .....	185
<b>第9章 逻辑与接口电路的实用设计</b> .....	<b>187</b>
9.1 逻辑IC的DC特性 .....	187
9.2 逻辑反相器 .....	188
9.3 与电路和或电路 .....	192
9.4 用于EIA-232/574的线性驱动器/接收器 .....	194
<b>第10章 高频放大电路的实用设计</b> .....	<b>196</b>
10.1 高频基础知识 .....	196
10.2 用于高频的电路 .....	203
10.3 晶体管的动作点 .....	209
<b>第11章 高频振荡电路的实用设计</b> .....	<b>218</b>
11.1 LC振荡电路 .....	218
11.2 由水晶振子和陶瓷振子组成的振荡电路 .....	226
<b>第3部分 制作的基础知识与实践</b>	
<b>第12章 电子设备的设计及制作的基础知识</b> .....	<b>238</b>
12.1 无源器件的基础知识 .....	238
12.2 锡焊的基本方法 .....	245
12.3 实验电路布线和组装的方法 .....	248
<b>第13章 耳机放大器的设计和制作</b> .....	<b>251</b>
13.1 决定规格 .....	251

13.2 设 计 .....	252
13.3 制 作 .....	259
13.4 动作试验 .....	263
13.5 初次试制的耳机放大器电路的讨论 .....	272
13.6 改良型耳机放大器 .....	274
13.7 关于保护电路 .....	277
13.8 故障排除 .....	278
<b>第14章 理解电路的一些方法</b> .....	<b>280</b>
14.1 理解电路与电路设计的区别 .....	280
14.2 绘制电路图的几大原则 .....	281
14.3 如何理解电路 .....	281
14.4 例 题 .....	290
附录C 半导体器件的相关字母符号及其省略写法 .....	292
参考文献 .....	297
译后记 .....	298



## 绪论

# 欢迎来到晶体管电路的世界！

## 0.1 半导体器件简史

从我最初开始对电路产生兴趣至今已经有35年了，这之间，半导体也取得了巨大的发展。表0.1中汇集了与半导体发展有关的大事件，除此以外仍有许多发现或是发明。

表0.1 半导体相关的重要事件

年份	事件
1839	发现硫化银导电率的温度变化现象 ( Michael Faraday )
1873	发现硒的导电率受光影响会发生变化 ( William R.Smith )
1874	发现方铅矿上的金属线影响下的金属 - 半导体结合的二极管特性 ( Karl F.Braun )
1920	硒整流器与氧化铜整流器的普及
1931	量子力学中半导体的威尔逊模型 ( Harold A.Wilson )
1948	发明点接触式晶体管 ( John Bardeen, W.H.Brattain )
1951	发明结型晶体管 ( Willian Bradford Shockley )
1959	固态电路的发明为 IC 的制造奠定了基础 ( Texas Instruments 公司的 Jack S.Kilby ) 制造出硅平面晶体管 ( Fairchild Semiconductor 公司的 Jean A. Hoerni )
1961	发明制造出了硅平面 IC ( Fairchild Semiconductor 公司的 Robert W.Noyce )
1968	Intel 公司的创建 ( Robert W.Noyce, Gordon Moore )
1970	最早的动态 RAM “1101” 上市 ( Intel 公司 )
1971	发布了世界上最早微处理器 “4004” ( Intel 公司 )

### 1. 发现时期

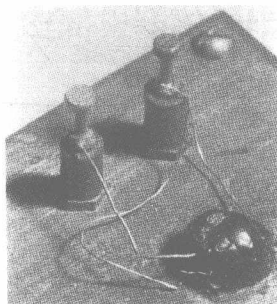
法拉第发现了硫化银，1839年，人们从硫化银导电率的温度变化注意到了半导体的特性。但当时，半导体的理论还不成系统，即使是到了1920年，硒整流器已经投入使用，它的动作原理仍然没有大白于世。直到1931年，威尔逊模型成为半导体理念确立的起点，之后，半导体开始了大跨步地发展与进步。

### 2. 发明时期

1948年，点接触式晶体管（照片0.1）作为第一个可以放大的半导体器件被发明出来，之后的1951年，结型晶体管（照片0.2）问世，这样就使得今天的双极晶体管的基础得以确立。从那之后，半导体的进步可谓是日新月异，1959年出现了IC这一概念，也创造出了IC中不可欠缺的平面技术。



照片0.1 最早点接触式晶体管



照片0.2 最早的结型晶体管

### 3. 晶体管的应用时期

图0.1呈现了身边的电器中所使用的晶体管器件的变迁。1955年，Regency公司（美国）发售了世界上第一个晶体管收音机，1959年，日本的索尼公司发售了世界第一台晶体管电视。当时锗晶体管是晶体管中的主流。直到1960年左右，在这个可谓是真空管的全盛期里，电视与收音机基本上全是真空管式的。

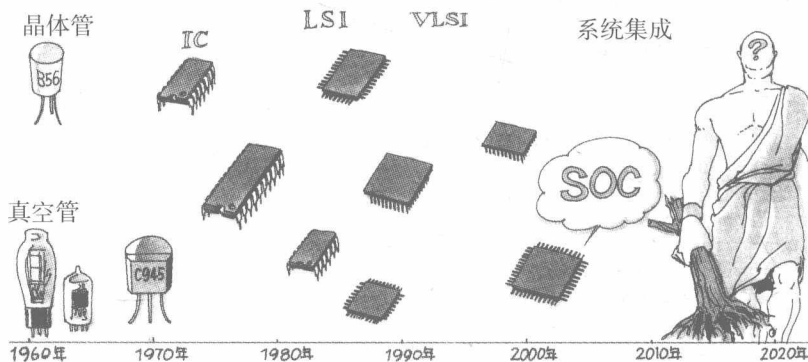


图0.1 身边常见的半导体器件的历史变迁

进入到1960年，使用晶体管的制品大幅度增多。那个时期，晶体管式立体声被称作“固态方式”，受到人们的追捧。时间来到现代，主流变成了硅晶体管，因为它的稳定性高且故障少等原因，很快就取代了诸晶体管的地位。

#### 4. IC的应用时期

之后IC登场。在学生时代的在我看来，数字电路始于IC。IC集成化大体遵循的是于1975年进行过修正的摩尔定律（半导体元件上集成的晶体管数目，每24个月便会增加一倍），现在仍在不断发展。预测说大约在2020年前后，受物理法则制约，它将迎来自己的极限，但不排除新技术的发现将打破这个预测这一可能性。甚至可以说，想到2020年将会出现什么样的明星级器件这个问题，难掩内心的兴奋。

像这样不过短短数十年，电子领域正在以令世人惊叹的速度不断向前发展。请看图0.2。现在，微处理器的运转速度已经超过了3GHz，据说到2011将达到10GHz。然而，这就是发展的终点了吗？答案是否定的。世人曾多次说它已经到了自己的极限，然而它还在不断发展，在集成度与速度上不断超越，令世人惊叹。

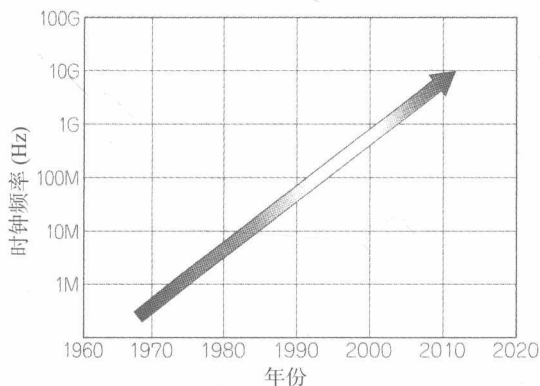


图0.2

## 0.2 成为实力与魅力兼具的技术人员

### 1. 重要的是要有持之以恒的干劲儿与行动力

对于刚开始对电子电路产生兴趣的人来说，恐怕对电子领域是最有感触的吧。诸如，一个微型计算机中要掌握的知识就多如牛毛，就算是同一个模式，也不能简单地进行连接了事等。但是，也不会手足无措。同以前相比，现在的社会

信息获取非常简单，工具的准备也相对容易。最为重要的是，要有持之以恒的干劲儿与行动力。

相反，因为现在的水平已经相当高，比如使用FPGA（Field-Programmable Gate Array），很快就可能制造出数十个TTL逻辑门电路。测量器中也使用函数IC的话，操作也会变得简单，并且性能也能得到保证。从这些例子来看，可以说现在是一个相当便利的时代。

## 2. 现如今的技术人员不仅要勇攀高峰，还要培养自己广阔视野

图0.3是一幅我作为新人时在研修课上见到的画，距今也有二十多年了。画的横轴显示的是专业、领域等的分类，纵轴显示的应该是学习程度、水平之类的东西。这一幅画中的曲线具有峰值。该峰值越高，说明该学习者在这一领域中的能力越高。举例来说，如果给一个人一个样式，他就可以设计、制造出这个电路，经过一定的调整使之与设计中的样式完全相同的话，这个人的水平就处在图中所示的高峰处。并且，如果他用时极短的话，那么在这个图上的位置就更高了。但是，以一己之力设计并制作出一个电路，并让它受到世人肯定还能普及开来，从而提高自己的位置，是视情况而定的。

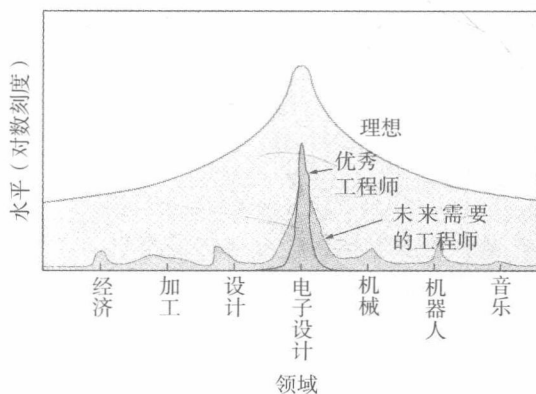


图0.3

除外，还要知道当今的时代，并不是所处位置越高就越好，还有必要以所处高位为中心获得一个更广阔的视野。换句话说，所掌握的知识的领域越宽越好，这也是极为重要的。不能成为一个除了自己的专业就一无所知的人。他山之石可以攻玉，如果视野开阔的话，就可以由此及彼，从而提高本专业的水平。

我觉得当今的时代越来越需要这样的技术人员。拥有不输于任何人的专业能力是一个必要条件，之外，还需要领域宽广的知识，这些最终都关系着一个技术人员的魅力。

虽然如此，我自己还处于一个马马虎虎的水平。但我的目标是提高自己的能力水平，开阔自己的视野，并且至今仍以这幅图为行动指针进行自身的工作。

## 0.3 关于本书的内容

在IC与LSI的发展下，晶体管等分立器件渐渐退出了应用市场，但作为简单的开关电路、放大电路与功能电路等电路的配角，它的使用度仍不低。而且可以说，在功率要放大电路与高频电路中，它仍然是主角。

因此，本着让刚接触到电子的初学者可以尽快上手之心，我下笔进行了描写。希望初学者们从二极管、FET与晶体管这三大基本器件的基础知识到应用电路的实际设计都可以掌握自如。

除外，这本书还选取了一些诸如如何拓宽知识视野之类的、与半导体有关的各种各样的课题，也许与工作并没有直接关系，但可以触摸到半导体的本质与特性。这样的描述可能让一些人感到难以理解，但我想，这样做的话可以让平常司空见惯的半导体零件重新被人们认识，使人们看到它是一种这样用心地被设计出来的东西。

### 0.3.1 第1部分 分立器件的基础

考虑到大多数人是从中学理科的知识或是高等学校的物理知识开始接触到半导体这一概念，本书对半导体的动作原理与特性等进行了详细的解说。另外，通过实际动手设计使用了晶体管的放大电路，可以理解它的动作原理。

#### 第1章 何谓二极管

对作为半导体动作原理基础的能带理论进行了简单的说明。运用能带理论，对PN结二极管的特性进行了理论上的说明。然后，又运用能带理论，分析说明了半导体与导体的区别以及半导体的光特性在内等各种各样的特性。

#### 第2章 了解FET

详细说明了使用了PN结的结型FET的动作原理，并解说了使用肖特基结构的MESFET。除外，也介绍了现在成为IC主流的CMOS器件中所使用的MOSFET。以设计出一个FET放大电路为例，加深了对FET的理解。

#### 第3章 理解晶体管

详细解说了晶体管的特性与用于晶体管电路设计中的 $h$ 参数。然后又对偏压电路进行了说明介绍，通过实际设计使用了一个晶体管的放大电路，加深对晶体

管的理解。

#### 第4章 可控硅、GTO、TRIAC等

这些器件利用了半导体特性，作为电路中的控制元件，使用范围极广。对这些情况进行解说之外，还介绍了触发元件DIAC，以及使用TRIAC设计了一个简单的功率控制电路。

### 0.3.2 第2部分 分立器件的应用电路设计

这里介绍了可以说是最为常见的通用电路，并对它的设计方法进行了详细的说明。通过测定在实际制作过程中电路的特性，使之成为一种实际可用的电路。

#### 第5章 电源电路的实用设计

本章介绍了整流电路的基本动作原理与特性，并设计出了输出电流在10mA与3A间的各式各样的稳压电路。接下来在设计出了恒流电路之后，又设计出了作为实验用电源所使用的20V、5A的稳压恒流电源电路。并且设计了20A的电子负载用来测量电源电路特性等。

#### 第6章 低频放大电路的实用设计

DC放大器是低频放大电路中的主流，本章对DC放大器的基本——差动放大电路、低频振荡电路、电流镜电路与共源共栅电路进行了解说。详细介绍了功率放大部分中互补电路的动作情况，设计了使用OP放大器的低功率放大电路。

#### 第7章 低频振荡电路的实用设计

对CR移相式正弦波振荡电路、双T正弦波振荡电路、文氏电桥正弦波振荡电路等电路的动作进行了解说，并进行了具体的电路设计。

#### 第8章 模拟功能电路的实用设计

本章对多谐振荡电路、信号发生电路、VCO电路、波形整形电路与时序电路以及继电器或是电灯驱动电路等稍带模拟功能的电路进行了介绍与设计。

#### 第9章 逻辑与接口电路的实用设计

逻辑与接口电路的主流是IC。但是，不同的用途与场合，有时也可以便利地使用由一个晶体管构成的逻辑电路。本章介绍了逻辑电路与接口电路，日后必有大用。

#### 第10章 高频放大电路的实用设计

本章介绍了高频的基础知识，并解说了小信号放大电路、宽带放大电路与AGC电路等。

## 第11章 高频振荡电路的实用设计

本章对LC振荡电路，以及由水晶振子与陶瓷振子组成的振荡电路等进行了解说。

### 0.3.3 第3部分 制作的基础知识与实践

实际地动手制作并测定电路的特性，从而体验电路的动作无疑是掌握电路的捷径。该部分介绍了与制作相关的基础知识，并实践制作耳机放大器来深化理论理解。除外，为了回答现有的电路是如何进行动作这一问题，进行了电路的读取说明。

#### 第12章 电子设备的设计及制作的基础知识

在电子电路的制作过程中，比较重要的是零部件的相关知识与制作技巧。本章介绍了电阻、电容器与线圈等基本零件的基础知识，以及制作过程中无法避免的焊接方法和实际安装的技巧等。

#### 第13章 耳机放大器的设计和制作

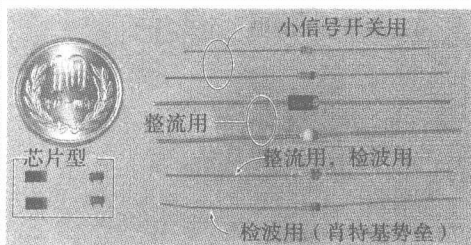
耳机放大器由DC放大器构成，在制作它的同时，还会介绍设计过程与试作结果的评价考察与故障排除等过程，直到制作完成。首先，设计比较简单的基本电路，并通过制作与评价，提出问题，然后为了解决这些问题，再加入一些电路，完成对新电路的设计与制作。

#### 第14章 理解电路的一些方法

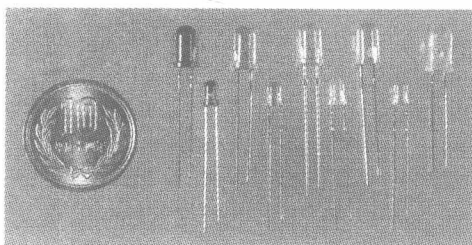
除了自己动手设计电路之外，重要的是如何理解别人设计制作的电路。本章以一些电路图的示例为基础，介绍了一些必要的技巧以便于这些电路的读取。

### 晶体管、FET、二极管的形态

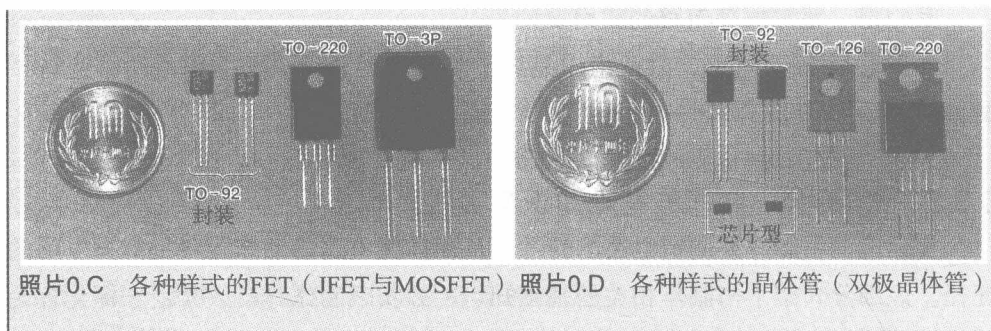
照片0.A到照片0.D呈现了实际中这些器件形态。电子元件渐渐退去了1980年后适合于表面安装用的封装形式。照片中呈现的芯片型只是其中的一种形态。尤其对高频用器件来说，没有引线的器件的性能更好，所以芯片封装化明显。



照片0.A 各种样式的二极管



照片0.B 发光二极管 (LED)



照片0.C 各种样式的FET (JFET与MOSFET) 照片0.D 各种样式的晶体管 (双极晶体管)



# 第1部分

## 分立器件的基础