

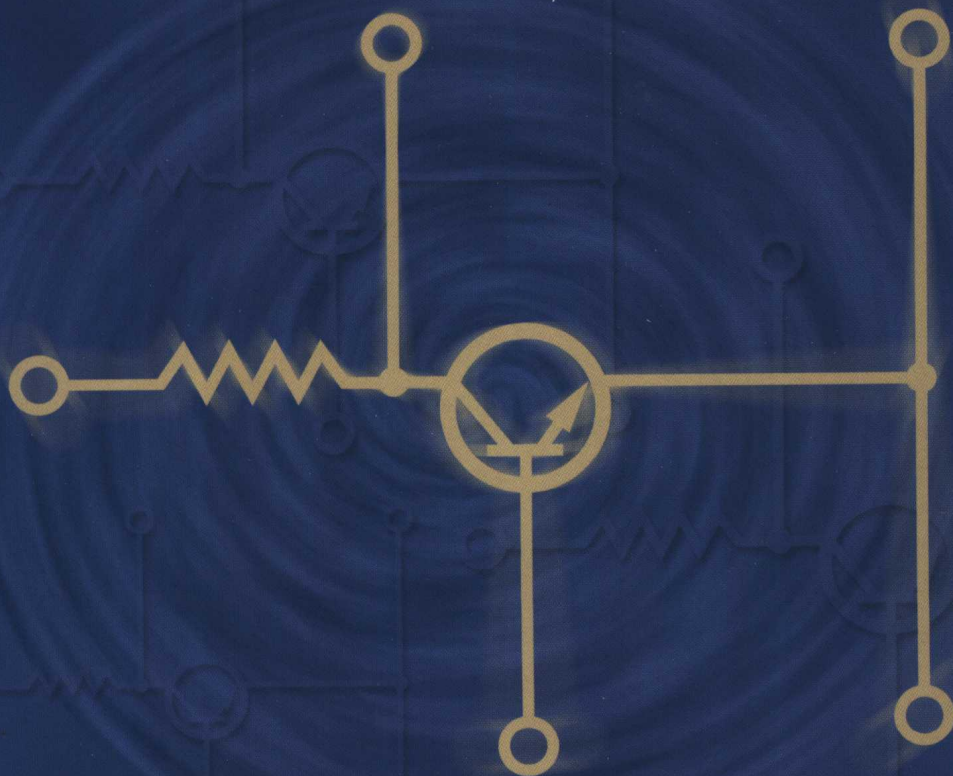
实用电子电路设计丛书

晶体管电路设计

上

[日] 铃木雅臣 著
周南生 译
张文敏 校

放大电路技术的实验解析



科学出版社

www.sciencep.com

实用电子电路设计丛书

晶体管电路设计 (上)

放大电路技术的实验解析

〔日〕 铃木雅臣 著

周南生 译

张文敏 校

科学出版社

北京

图字：01-2003-7938 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。本书作为上册主要内容有晶体管工作原理，放大电路的性能、设计与应用，射极跟随器的性能与应用电路，小型功率放大电路的设计与应用，功率放大器的设计与制作，共基极电路的性能、设计与应用，视频选择器的设计与制作，共射-共基电路的设计，负反馈放大电路的设计，直流稳定电源的设计与制作，差动放大电路的设计，运算放大电路的设计与制作。下册则共分 15 章，主要介绍 FET、功率 MOS、开关电源电路等。

本书面向实际需要，理论联系实际，通过大量具体的实验，通俗易懂地介绍晶体管电路设计的基础知识。

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大学生、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(上)/(日)铃木雅臣著；周南生译. —北京：科学出版社，2004
(实用电子电路设计丛书)

ISBN 7-03-013308-0

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 042072 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：18

印数：1—4 000 字数：321000

定 价：29.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换〈新欣〉)

前 言

现在,电子电路的元器件正逐渐地被由 IC(集成电路)和 LSI(大规模集成电路)代替。因此,在数字电路的基板上很难找到电阻。

随着电路元件黑盒子化的逐步进展,电路设计更趋于便利。因此,当使用晶体管或 FET 也能制作简单电路的场合,使用 IC 的设计者也越来越多。

由于将 IC 视为黑盒子的缘故,不能适当处理小故障的工程师不断增多。

本书的目的在于通过模拟体验放大电路的实验,充分掌握最基本的放大元件,即晶体管的工作原理,从而达到从容设计利用晶体管的分立电路。

另一个目的是不要将 IC 和 LSI 看成简单的黑盒子,而是看成“晶体管和 FET,电阻和电容等分立元件的集合体”。也就是说,能够看懂 IC 内部的电路为目的。

这样一来,在不能满足 IC 性能时(不是换成别的 IC),将采取晶体管电路来弥补其性能上的不足,并且,即使有了故障也能够采用考虑到 IC 内部工作状态的适当处置方法。

掌握晶体管电路的好处是,对电路的整体——从一个角落到另一个角落都能按自己所喜欢的方式来组合。

使用 IC 的优点是能够简单地、小型地制作各种电路。在性能方面,也许使用 IC 时要好一些;在使用方面,IC 也是方便的。然而,IC 的不足之处使技术人员不能在电路技术方面得到真正的锻炼,其结果导致不能以自身的力量来考虑新的电路——即原始电路。

当体验经过自己百分之百的努力设计的电路时,即使采用了 IC 也会感受到风格不同的乐趣。这样对于今后认为是重要的模拟 ASIC(Application Specific IC,特殊用途定制的 IC,即专用集成电路),也不会感到手足无措。

本书中,在说明或设计晶体管电路时,并没有采用等效电路、负载线等过去常考虑的方法。因此,对于在学校和参考书中学过使用等效电路和负载线进行设计方法的读者,或许有些不协调的感觉。

等效电路和负载线的考虑方法是从事设计电子电路的前辈们为了有助于理解电路工作、进行简单的设计而提出的。但是以笔者的经验,即使不采用这些方法,也能掌握电路的工作原理,而且在电路设计时也没有感到不便。

最后,在本书出版之际,衷心感谢 CQ 出版株式会社晶体管技术总编蒲生良治先生、担任编写本书第 5 章的 Accuphase 株式会社技术部的山本诚先生、通过工作

给予技术指导的前辈们以及提供编写场所的日本国立市中央图书馆与JR南武线。

著 者

目 录

第 1 章 概 述	1
1.1 学习晶体管电路或 FET 电路的必要性	1
1.1.1 仅使用 IC 的场合	1
1.1.2 晶体管电路或 FET 电路的设计空间	2
1.2 晶体管和 FET 的工作原理	3
1.2.1 何谓放大工作	3
1.2.2 晶体管的工作原理	4
1.2.3 FET 的工作原理	6
1.3 晶体管和 FET 的近况	7
1.3.1 外形(封装)的改进	7
1.3.2 内部结构的改进	9
1.3.3 晶体管和 FET 的优势	9
第 2 章 放大电路的工作	11
2.1 观察放大电路的波形	11
2.1.1 5 倍的放大	11
2.1.2 基极偏置电压	12
2.1.3 基极-发射极间电压为 0.6V	13
2.1.4 两种类型的晶体管	13
2.1.5 输出为集电极电压的变化部分	14
2.2 放大电路的设计	16
2.2.1 求各部分的直流电位	16
2.2.2 求交流电压放大倍数	17
2.2.3 电路的设计	18
2.2.4 确定电源电压	19
2.2.5 选择晶体管	19
2.2.6 确定发射极电流的工作点	21
2.2.7 确定 R_C 与 R_E 的方法	21
2.2.8 基极偏置电路的设计	22

2.2.9	确定耦合电容 C_1 与 C_2 的方法	23
2.2.10	确定电源去耦电容 C_3 与 C_4 的方法	24
2.3	放大电路的性能	25
2.3.1	输入阻抗	25
2.3.2	输出阻抗	26
2.3.3	放大倍数与频率特性	27
2.3.4	高频截止频率	29
2.3.5	高频晶体管	29
2.3.6	频率特性不扩展的理由	30
2.3.7	提高放大倍数的手段	31
2.3.8	噪声电压特性	33
2.3.9	总谐波失真率	34
2.4	共发射极应用电路	35
2.4.1	使用 NPN 晶体管与负电源的电路	35
2.4.2	使用 PNP 晶体管与负电源的电路	35
2.4.3	使用正负电源的电路	36
2.4.4	低电源电压、低损耗电流放大电路	37
2.4.5	两相信号发生电路	38
2.4.6	低通滤波器电路	39
2.4.7	高频增强电路	40
2.4.8	高频宽带放大电路	41
2.4.9	140MHz 频带调谐放大电路	42
第 3 章	增强输出的电路	45
3.1	观察射极跟随器的波形	45
3.1.1	与输入相同的输出信号	45
3.1.2	不受负载电阻的影响	47
3.2	电路设计	47
3.2.1	确定电源电压	48
3.2.2	选择晶体管	48
3.2.3	晶体管集电极损耗的计算	49
3.2.4	决定发射极电阻 R_E 的方法	50
3.2.5	偏置电路的设计	50
3.2.6	电容 $C_1 \sim C_4$ 的确定	50

3.3	射极跟随器的性能	51
3.3.1	输入输出阻抗	51
3.3.2	输出负载加重的情况	52
3.3.3	推挽型射极跟随器	54
3.3.4	改进后的推挽型射极跟随器	55
3.3.5	振幅频率特性	56
3.3.6	噪声及总谐波失真率	57
3.4	射极跟随器的应用电路	58
3.4.1	使用 NPN 晶体管与负电源的射极跟随器	58
3.4.2	使用 PNP 晶体管与负电源的射极跟随器	59
3.4.3	使用正负电源的射极跟随器	59
3.4.4	使用恒流负载的射极跟随器	61
3.4.5	使用正负电源的推挽型射极跟随器	62
3.4.6	二级直接连接型推挽射极跟随器	63
3.4.7	OP 放大器与射极跟随器的组合	64
3.4.8	OP 放大器与推挽射极跟随器的组合(之一)	65
3.4.9	OP 放大器与推挽射极跟随器的组合(之二)	66
第 4 章	小型功率放大器的设计与制作	68
4.1	功率放大电路的关键问题	68
4.1.1	电压放大与电流放大	68
4.1.2	简单的推挽电路	69
4.1.3	对开关失真进行修正	69
4.1.4	防止热击穿	70
4.1.5	抑制空载电流随温度的变动	70
4.1.6	实际的电路设计	71
4.2	小型功率放大器的设计方法	72
4.2.1	电路规格	72
4.2.2	确定电源电压	73
4.2.3	共发射极放大电路的工作点	74
4.2.4	决定放大倍数的部分	74
4.2.5	射极跟随器的偏置电路	75
4.2.6	射极跟随器的功率损耗	77
4.2.7	输出电路周边的元件	80

4.3	小型功率放大器的性能	81
4.3.1	电路的调整	81
4.3.2	电路工作波形	81
4.3.3	声频放大器的性能	82
4.4	小型功率放大器的应用电路	84
4.4.1	用 PNP 晶体管制作的偏置电路	84
4.4.2	由 PNP 晶体管进行电压放大的电路	84
4.4.3	微小型功率放大器	85
第 5 章	功率放大器的设计与制作	87
5.1	获得大功率的方法	87
5.1.1	关键点是如何解决发热问题	87
5.1.2	控制大电流的方法	87
5.1.3	达林顿连接的用途	88
5.1.4	使用并联连接增大电流	89
5.1.5	并联连接时电流的平衡是至关重要的	90
5.1.6	并联连接的关键是热耦合	91
5.1.7	空载电流与失真率的关系	91
5.1.8	空载电流与发热的关系	92
5.1.9	考虑散热的设计	93
5.1.10	决定热沉的大小	93
5.1.11	晶体管的安全工作区	94
5.2	功率放大器的设计	95
5.2.1	放大器的规格	95
5.2.2	电源电压	96
5.2.3	由 OP 放大器组成的电压放大级的设计	97
5.2.4	射极跟随器的输入电流	97
5.2.5	偏置电路的参数确定	98
5.2.6	功放级射极跟随器的设计	99
5.2.7	功放级的消耗功率与热沉	103
5.2.8	不可缺少的元件	104
5.3	功率放大器的性能	104
5.3.1	电路的调整	104
5.3.2	电路工作波形	104

5.3.3	音频放大器的性能	105
5.3.4	附加的保护电路	107
5.4	功率放大器的应用电路	108
5.4.1	桥式驱动电路	108
5.4.2	音频用 100W 功率放大器	109
第 6 章	拓宽频率特性	113
6.1	观察共基极放大电路的波形	114
6.1.1	非反相 5 倍的放大器	114
6.1.2	基极交流接地	115
6.2	设计共基极放大电路	116
6.2.1	电源周围的设计与晶体管的选择	116
6.2.2	交流放大倍数的计算	116
6.2.3	电阻 R_C 、 R_E 与 R_3 的决定方法	117
6.2.4	偏置电路的设计	117
6.2.5	决定电容 $C_1 \sim C_5$ 的方法	118
6.3	共基极放大电路的性能	118
6.3.1	输入输出阻抗	118
6.3.2	放大倍数与频率特性	119
6.3.3	频率特性好的理由	121
6.3.4	输入电容 C_i 的影响	122
6.3.5	噪声及谐波失真率	123
6.4	共基极电路的应用电路	123
6.4.1	使用 PNP 晶体管的共基极放大电路	123
6.4.2	使用 NPN 晶体管与负电源的共基极放大电路	124
6.4.3	使用正负电源的共基极放大电路	124
6.4.4	直至数百兆赫[兹]的高频宽带放大电路	125
6.4.5	150MHz 频带调谐放大电路	127
第 7 章	视频选择器的设计和制作	129
7.1	视频信号的转换	129
7.1.1	视频信号的性质	129
7.1.2	何谓阻抗匹配	130

7.1.3	对视频信号进行开关时	131
7.2	视频放大器的设计	132
7.2.1	共基极电路十射极跟随器	132
7.2.2	各部分直流电位的设定	133
7.2.3	增大耦合电容的容量	135
7.2.4	观察对矩形波的响应	135
7.2.5	频率特性与群延迟特性	136
7.2.6	晶体管改用高频晶体管	137
7.2.7	视频选择器的应用	138
7.3	视频选择器的应用电路	139
7.3.1	使用 PNP 晶体管的射极跟随器	139
7.3.2	以 5V 电源进行工作的视频选择器	140
第 8 章	渥尔曼电路的设计	141
8.1	观察渥尔曼电路的波形	141
8.1.1	何谓渥尔曼电路	141
8.1.2	与共发射极电路一样	143
8.1.3	增益为 0 的共发射极电路	144
8.1.4	不发生密勒效应	145
8.1.5	可变电流源十共基极电路=渥尔曼电路	146
8.2	设计渥尔曼电路	147
8.2.1	渥尔曼电路的放大倍数	147
8.2.2	决定电源电压	148
8.2.3	晶体管的选择	149
8.2.4	工作点要考虑到输出电容 C_{ob}	149
8.2.5	决定增益的 R_E 、 R_3 与 R_2	150
8.2.6	设计偏置电路之前	151
8.2.7	决定 R_1 与 R_2	151
8.2.8	决定 R_4 与 R_5	152
8.2.9	决定电容 $C_1 \sim C_8$	153
8.3	渥尔曼电路的性能	153
8.3.1	测量输入阻抗	153
8.3.2	测量输出阻抗	154
8.3.3	放大度与频率特性	155

8.3.4	注意高频端特性	156
8.3.5	频率特性由哪个晶体管决定	157
8.3.6	观察噪声特性	159
8.4	渥尔曼电路的应用电路	160
8.4.1	使用 PNP 晶体管的渥尔曼电路	160
8.4.2	图像信号放大电路	161
8.4.3	渥尔曼自举电路	162
第 9 章	负反馈放大电路的设计	165
9.1	观察负反馈放大电路的波形	165
9.1.1	如何获得大的电压放大倍数	165
9.1.2	100 倍的放大器	166
9.1.3	Tr_1 的工作有些奇怪	168
9.1.4	Tr_2 的工作	168
9.2	负反馈放大电路的原理	169
9.2.1	放大级的电流分配	169
9.2.2	加上负反馈	170
9.2.3	确实是负反馈吗	171
9.2.4	求电路的增益	171
9.2.5	反馈电路的重要式子	173
9.3	设计负反馈放大电路	173
9.3.1	电源周围的设计与晶体管的选择	174
9.3.2	NPN 与 PNP 进行组合的理由	175
9.3.3	决定 $R_5 + R_3$ 与 R_2	176
9.3.4	决定 R_4 与 R_5	176
9.3.5	决定 R_1 、 R_5 与 R_3	177
9.3.6	决定偏置电路 R_1 与 R_6	177
9.3.7	决定电容 $C_1 \sim C_4$	178
9.3.8	决定电容 $C_5 \sim C_7$	179
9.4	负反馈放大电路的性能	179
9.4.1	测量输入阻抗	179
9.4.2	测量输出阻抗	180
9.4.3	放大度与频率特性	181
9.4.4	正确的裸增益	181

9.4.5	高频范围的特性	182
9.4.6	观察噪声特性	184
9.4.7	总谐波失真率	186
9.4.8	将 T_{r1} 换成 FET	187
9.5	负反馈放大电路的应用电路	188
9.5.1	低噪声放大电路	188
9.5.2	低频端增强电路	190
9.5.3	高频端增强电路	192
第 10 章	直流稳定电源的设计与制作	195
10.1	稳定电源的结构	195
10.1.1	射极跟随器	195
10.1.2	用负反馈对输出电压进行稳定化	196
10.2	可变电压电源的设计	197
10.2.1	电路的结构	197
10.2.2	选择输出晶体管	199
10.2.3	其他控制用的晶体管	199
10.2.4	误差放大器的设计	199
10.2.5	稳定工作用的电容器	201
10.2.6	整流电路的设计	201
10.3	可变电压电源的性能	202
10.3.1	输出电压/输出电流特性	202
10.3.2	波纹与输出噪声	202
10.3.3	在正负电源上的应用	205
10.4	直流稳定电源的应用电路	206
10.4.1	低残留波纹电源电路	206
10.4.2	低噪声输出可变电源电路	208
10.4.3	提高三端稳定器输出电压的方法	209
第 11 章	差动放大电路的设计	212
11.1	观察差动放大电路的波形	212
11.1.1	观察模拟 IC 的本质	212
11.1.2	输入输出端各两条	213
11.1.3	两个共发射极放大电路	214

11.1.4	在两个输入端上加相同信号	215
11.2	差动放大电路的工作原理	216
11.2.1	两个发射极电流的和为一定	216
11.2.2	对两个输入信号的差进行放大	217
11.2.3	对电压增益的讨论	218
11.2.4	增益为共发射极电路的 1/2	218
11.2.5	差动放大电路的优点	220
11.2.6	双晶体管的出现	221
11.3	设计差动放大电路	222
11.3.1	电源电压的决定	222
11.3.2	Tr_1 与 Tr_2 的选择	223
11.3.3	Tr_1 与 Tr_2 工作点的确定	224
11.3.4	恒流电路的设计	225
11.3.5	决定 R_3 与 R_4	225
11.3.6	决定 R_1 与 R_2	227
11.3.7	决定 $C_1 \sim C_6$	228
11.4	差动放大电路的性能	228
11.4.1	输入输出阻抗	228
11.4.2	电压放大度与低频时的频率特性	229
11.4.3	高频特性	231
11.4.4	噪声特性	232
11.5	差动放大电路的应用电路	232
11.5.1	渥尔曼化	232
11.5.2	渥尔曼-自举化	235
11.5.3	差动放大电路+电流镜像电路	236
11.5.4	渥尔曼-自举电路+电流镜像电路	239
第 12 章	OP 放大器电路的设计与制作	241
12.1	何谓 OP 放大器	241
12.1.1	设计 OP 放大器的原因	241
12.1.2	表记方法与基本的工作	241
12.1.3	作为放大电路工作时	243
12.1.4	作为同相放大电路工作时	244
12.2	基于晶体管的 OP 放大器的电路结构	244

12.2.1	通用的 $\mu\text{PC} 4570$	245
12.2.2	OP 放大器 $\mu\text{PC} 4570$ 的电路结构	246
12.2.3	要设计的 OP 放大器的电路结构	247
12.2.4	要设计的 OP 放大器的名称—4549	248
12.3	求解晶体管 OP 放大器 4549 的电路常数	249
12.3.1	晶体管的选择	250
12.3.2	差动放大部分的的设计	250
12.3.3	用 LED 产生恒压	251
12.3.4	求 Tr_1 的负载电阻 R_1	252
12.3.5	共发射极放大部分的的设计	252
12.3.6	射极跟随器部分的的设计	253
12.3.7	决定相位补偿电路 C_1 与 R_4	253
12.3.8	决定 $C_2 \sim C_5$	254
12.4	晶体管 OP 放大器 4549 的工作波形	254
12.4.1	作为反相放大电路工作时	254
12.4.2	作为同相放大电路工作时	256
12.5	晶体管 OP 放大器 4549 的性能	257
12.5.1	输入补偿电压	257
12.5.2	观察速度即通过速率	259
12.5.3	频率特性	260
12.5.4	噪声特性	262
12.5.5	总谐波失真率	264
12.5.6	4549 与 $\mu\text{PC} 4570$ 的“胜败”结果	264
12.6	晶体管 OP 放大器电路的应用电路	265
12.6.1	JFET 输入的 OP 放大器电路	265
12.6.2	将初级进行渥尔曼-自举化的 OP 放大器	266
12.6.3	在初级采用电流镜像电路的 OP 放大器电路	267
12.6.4	将第二级进行渥尔曼-自举化后的 OP 放大器电路	268
	结 束 语	270
	参 考 文 献	271

第 1 章 概 述

现在的 IC 技术是日新月异的技术。无论是模拟电路,还是数字电路都能进行 IC 化或 LSI 化。观察电视机和计算机内部,除了电源电路以外,几乎所有的电路都被 IC 化或 LSI 化,找到晶体管和 FET(场效应晶体管)等单个放大器件是很困难的。

即使在这样的 IC 或 LSI 全盛时代,笔者仍想在本章研究一下掌握晶体管和 FET——最基本的放大器件的重要意义。

在进入器件和电路的说明之前,先给出晶体管和 FET 的预备知识。

另外,本书主要介绍晶体管电路的设计方法,而对于 FET 的使用方法,则在其他书中进行阐述。

1.1 学习晶体管电路或 FET 电路的必要性

1.1.1 仅使用 IC 的场合

现在,如果想制作电路,将几个 IC 组合起来就能简单地完成。例如,以放大电路为例,如果使用 OP 放大器 IC 就能简单地完成。

然而,掌握晶体管电路和 FET 电路有关知识的场合和仅使用 OP 放大器的情况如图 1.1 所示,电路的认识上会产生相当大的不同。

将 OP 放大器作为“黑盒子”考虑时,是将 IC 作为进行理想工作的器件来进行设计的。但从实际电路中发生的故障来看,其原因往往是由于 IC 不是理想的器件。

以最简单的单个晶体管放大电路为例,电压增益是有限的(理想的 OP 放大器的电压增益为无限大),输入电流也以基极电流的形式存在(理想 OP 放大器的输入电流为 0)。电压增益的频率特性也存在许多问题。

当电路发生问题时,不能直接调整 OP 放大器的特性。但是,如果是单个晶体管的放大电路,就能采取多种对策。

因此,如果在单个晶体管放大器中积累一些经验,就会得到如下的预测:“OP

放大器内部是这样的,所以在外接电路上要做这样的工作……”。

如果具备了晶体管电路和 FET 电路的知识,在使用 OP 放大器时即使发生麻烦或者产生不符合要求的特性,也能采取各种对策。这不仅局限于使用 OP 放大器电路,而且可以说,对于全部的模拟电路和数字电路都是一样的。

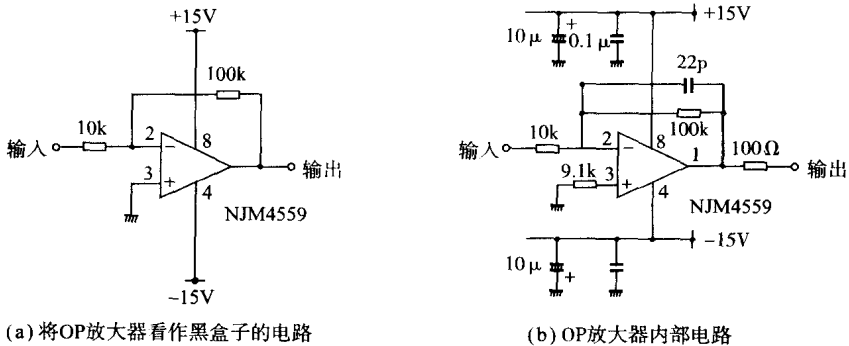


图 1.1 使用 OP 放大器的放大电路

(将 OP 放大器看作是进行理想工作的“黑盒子”的情况和看作是用晶体管组成的放大电路的场合有很大的差别。图(a)的电路即使也工作,只不过会出现输出补偿电压大,根据布线和负载的状况会发生振荡等现象。图(b)电路则是比较完美的)

也就是说,如果掌握了晶体管电路和 FET 电路,则不会将 IC 和 LSI 看作理想的器件或“黑盒子”,而会看作“与自己设计的电路一样,是由晶体管和 FET 集合起来的电路”。其结果是,对电路的工作本质有所了解,能够顺畅地处理一些麻烦问题。同样,即使仅使用 IC 和 LSI,也能设计出更好的电路。

1.1.2 晶体管电路或 FET 电路的设计空间

最近,几乎在所有的场合,电路设计都使用 IC 和 LSI,但是由于 IC 和 LSI 的电源引脚,输入引脚,已被确定,所以限制了用 IC 和 LSI 能够实现的电路设计。一般人们就会看在数据表上写着的数字或使用说明,不会去想自己动手做什么的。

所以,仅仅使用 IC 和 LSI 的电路设计,只是选择符合电路设计说明书的性能与功能的 IC 和 LSI,因此不能说是创造性的工作。

然而,所谓的晶体管或 FET 是电子电路的基本器件,所以在组装电路时必须接上电阻和电容,很显然,还必须接上电源。总之,谁也不会给我们铺好道路,从哪里到哪里都必须由自己来完成。

虽然这样做有些麻烦,但这是一件非常有创造性的工作。这是由于不受 IC 和 LSI 的束缚,如果再加上设计者的本事,就能制作出超过 IC 和 LSI 功能与性能的