

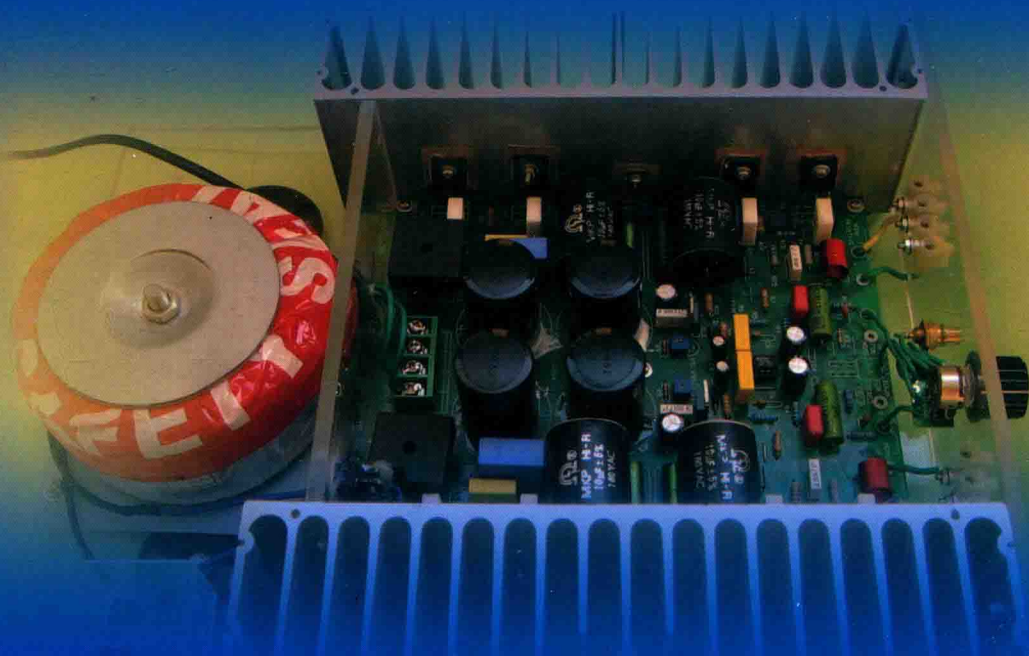
音频功率放大器

Audio Power Amplifier Design

设计

葛中海 ◎ 主 编
吕秋珍 陈 芳 ◎ 副主编

$$\frac{du_{od}}{du_{id}} = -\frac{I_{TALL} R_c}{2U_T} \left[1 - \tanh^2 \left(-\frac{u_{id}}{2U_T} \right) \right]$$



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

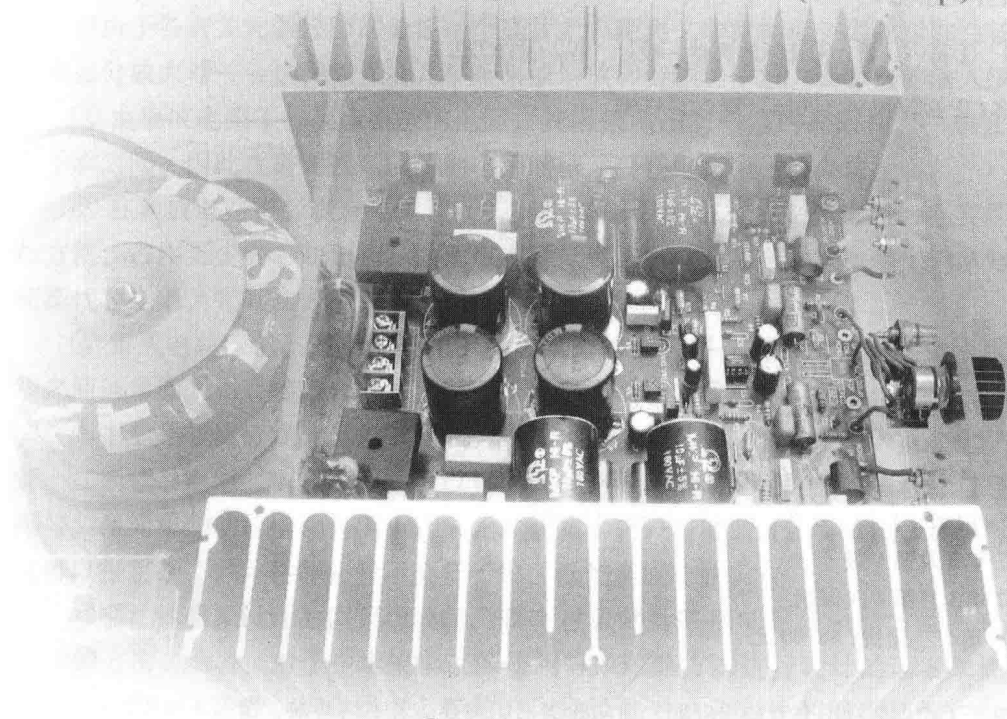
音频功率放大器

Audio Power Amplifier Design

设计

葛中海 ◎ 主 编
吕秋珍 陈 芳 ◎ 副主编

$$\frac{du_{od}}{du_{id}} = -\frac{I_{TAIL} R_c}{2U_T} \left[1 - \tanh^2 \left(-\frac{u_{id}}{2U_T} \right) \right]$$



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书面向工程应用,理论联系实际,通过大量具体的电路实验,通俗易懂地介绍音频功率放大器的设计理念与制作细节,向读者展现功率放大器“从小到大,由简至繁”的演化过程,充满了关于音频功率放大器设计的真知灼见。书中给出很多实测的电压数据、波形及完整的设计思路和图表,为讲述功率放大器的工作原理提供有力的佐证。无论是学习功率放大器知识的爱好者,还是设计音频功率放大器的从业人员,都能在本书中找到相关设计原则和实践数据。

本书适用于电子行业工程技术人员、相关专业的学生及广大的电子技术爱好者。

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

音频功率放大器设计 / 葛中海主编. —北京:电子工业出版社, 2017. 3
ISBN 978 - 7 - 121 - 30760 - 7

I. ①音… II. ①葛… III. ①音频放大器 - 设计 IV. ①TN722. 7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 322432 号

责任编辑: 富 军

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

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 × 1 092 1/16 印张: 16. 75 字数: 429 千字

版 次: 2017 年 3 月第 1 版

印 次: 2017 年 3 月第 1 次印刷

印 数: 2 500 册 定价: 48. 00 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, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: (010) 88254590; wangjd@phei.com.cn。

前 言

音频功率放大器（以下简称功放）是一种能量转换电路，要求在失真许可的范围内，可高效地为负载提供尽可能大的功率。因此，功放的工作电压与电流的变化范围大，常常处在大信号或接近极限运用状态。为了提高效率、降低损耗，电路采用互补推挽输出方式，功放的工作状态设置为 B 类或 AB 类，可减小交越失真。由于功放管承受高电压、大电流，因此必须重视功放管的过流保护和散热问题。

功率放大器既可由集成电路实现，也可由分立元器件组成，或二者兼具。集成功放因电路成熟，低频性能好，信噪比较小，内部设计具有保护电路，外围电路简单，无须调整，故可靠性高。虽然集成电路有很多优点，但功率不能做得太大，因为输出功率大，耗散功率也大，但芯片面积小，散热问题无法解决。由分立元器件组成的功放，如果电路选择得好、参数选择得恰当、元件性能优良、设计和调试好，性能可以做到非常优良。

目前，市场上集成功放与分立元器件功放分庭抗礼，各具特色，谁也无法取代谁。集成功放与分立元器件功放相比，具有以下几个方面的特点：

① 由集成电路工艺制造出来的元器件，虽然参数的精度不是很高，受温度的影响也较大，但由于各有关元器件都同处在一个硅片上，距离又非常接近，因此对称性较好，适用于构成差分放大器——这种放大器几乎是集成运放和音频功率放大器必选的输入级电路。

② 由集成电路工艺制造出来的电阻，其阻值范围有一定的局限性，一般在几十欧到几十千欧之间，因此在需要很高阻值的电阻时，就要在电路中另想办法。

③ 在集成电路中，制造晶体管（特别是 NPN 管）往往比制造电阻、电容等无源器件更加方便，占用更少的芯片面积，因而成本更低廉，所以在集成放大电路中，常常用晶体管恒流源代替电阻，尤其是大电阻。

④ 集成电路工艺不适于制造几十皮法以上的电容器，至于电感器就更困难，因此放大级之间通常都采用直接耦合方式，而不采用阻容耦合方式。

本书立足于由分立元器件组成的功放设计与制作，有利于电子爱好者学习，因为晶体管、二极管、电阻、电容等器件可以自由调整，可以根据个人的爱好去设计音色、音域、功率等。最简单的功放电路只要十几只元件就能实现，若增加过压、过流、过热等保护，电路也可以很复杂，并且性能一般不会低于中、低档集成功放。

本书在说明或设计晶体管功放时，既有过去常常采用的等效电路方法，又有“假设模型”的方法。前者，对于在学校学过的使用等效电路方法进行设计的读者来说可谓轻车熟路，得心应手；后者，笔者根据多年的工作经验和对电路理论的深刻理解，自创“假设模型”，通俗易懂。这些方法对于广大读者理解与掌握功放的工作原理别具匠心，非常有效，而且在电路设计时也不会感到不便。

参与本书编写的都是多年从事电子技术职业教育的老师，具有丰富的经验。其中，第1、2、4、10章由中山市技师学院葛中海老师编写，第3、8章由河源技师学院吕秋珍老师编写，第6、9章由河源技师学院陈芳老师编写，第5章由广东省核工业华南高级技工学校陈德生老师编写，第7章由中山市技师学院杨耿国老师编写。葛中海老师负责全书的策划、审阅和定稿。

由于编者能力和水平有限，书中疏漏、欠妥和错误之处在所难免，恳请各界读者多加指正，以便今后不断改进。有兴趣与葛中海老师交流或需要电路图及PCB图资料的朋友，敬请联系主编，QQ：1278685727。

编 者

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 功率放大电路的预备知识	1
1.1.1 理想化的“黑盒子”电路	1
1.1.2 分立件功放的优点	2
1.1.3 功放集成电路的热失真	3
1.2 晶体管和 FET 的工作原理	4
1.2.1 晶体管和 FET 是怎么进行放大的	4
1.2.2 晶体管的工作原理	5
1.2.3 晶体管各端子电流之间的关系	6
1.2.4 用数字万用表判断晶体管的类型	6
1.2.5 用数字万用表测量晶体管的直流放大倍数	7
1.2.6 FET 的工作原理	8
第 2 章 共发射极放大器	10
2.1 观察共发射极放大器的波形	10
2.1.1 5 倍的电压放大	10
2.1.2 基极与发射极电位及波形	12
2.1.3 集电极与发射极电位及波形	13
2.2 直流参数与电压增益	16
2.2.1 直流参数	16
2.2.2 电压增益	17
2.3 放大电路的设计	18
2.3.1 确定电源电压	18
2.3.2 晶体管的选择	19
2.3.3 确定发射极的静态电流	21
2.3.4 发射极电阻的确定	22
2.3.5 集电极电阻的确定	22
2.3.6 晶体管的静态损耗	23
2.3.7 基极偏置电路的设计	23
2.3.8 临界输入、输出电压	25
2.3.9 确定耦合电容 C_{in} 与 C_{out}	27
2.3.10 确定电源去耦电容 C_1 与 C_2	28
2.4 放大电路的交流性能	29
2.4.1 输入阻抗 R_i	29

2.4.2	输出阻抗 R_o	30
2.4.3	幅频特性	32
2.4.4	频率特性不扩展的原因	34
2.4.5	提高电压放大倍数的方法	35
2.4.6	噪声电压	35
2.4.7	总谐波失真	36
第3章	共集电极放大器	37
3.1	观察射极跟随器的波形	37
3.1.1	射极跟随器的工作波形	37
3.1.2	较低的阻抗输出	39
3.2	射极跟随器的设计	40
3.2.1	确定电源电压	40
3.2.2	晶体管的选择	40
3.2.3	晶体管集电极损耗	41
3.2.4	发射极电阻 R_e 的确定	42
3.2.5	基极偏置电路的确定	42
3.2.6	输入、输出电容的确定	42
3.3	射极跟随器的交流性能	43
3.3.1	输入、输出阻抗	43
3.3.2	加重负载或增大输入信号时的工作状况	44
3.3.3	互补对称功率放大器	47
3.3.4	改进后的互补对称功率放大器	48
3.3.5	幅频与相频特性	50
3.3.6	噪声及总谐波失真	51
第4章	小功率音频放大器	53
4.1	“发热”是功率放大器的重要问题	53
4.1.1	功率放大器的基本架构	53
4.1.2	功放管热击穿的机理	54
4.1.3	U_{BE} 倍增管与功放管热耦合防止热击穿	56
4.2	小功率放大器的设计	57
4.2.1	设计规格	57
4.2.2	电源电压的确定	59
4.2.3	静态电流的确定	59
4.2.4	集电极与发射极电阻的确定	60
4.2.5	基极偏置电阻的确定	61
4.2.6	U_{BE} 倍增电路	62
4.2.7	功放管的损耗	63
4.2.8	输出电路周边的组件	65
4.3	小功率放大器的性能	66

4.3.1	静态电流调整	66
4.3.2	工作波形与电压增益	66
4.3.3	$2\text{k}\Omega$ 的输入阻抗	68
4.3.4	负载 8Ω 时的最大输出电压	69
4.3.5	用 PNP 晶体管作为放大级	70
4.4	小功率音频放大器设计实例	72
4.4.1	电路结构及工作原理	72
4.4.2	功放管 TIP41 与 TIP42	73
第 5 章	单管输入级功率放大器	76
5.1	单管输入级小功率放大器	76
5.1.1	单管输入功放的电路结构	76
5.1.2	直流参数	78
5.1.3	提高输入阻抗	79
5.1.4	电压放大倍数	79
5.1.5	输入级偏置电阻的确定	80
5.1.6	反馈电阻和采样电阻的确定	81
5.1.7	输入级集电极电阻的确定	81
5.1.8	单管输入功放的工作波形	82
5.1.9	负反馈使放大倍数下降但稳定性提高	83
5.1.10	大电压输出的特殊情况	84
5.1.11	恒流源改善交流性能	86
5.1.12	用 NPN 晶体管做前置级的小功率放大器	88
5.2	复合管输出级功率放大器	89
5.2.1	复合管输出级的电路结构	89
5.2.2	静态参数	91
5.2.3	激励级电流的确定	92
5.2.4	前置级静态电流及有关电阻的确定	93
5.2.5	自举电容的作用	94
5.2.6	激励级输入端虚地	99
5.2.7	双电源供电的 OCL 电路	101
5.2.8	交流耦合与直流耦合	103
5.2.9	茹贝尔电路	105
第 6 章	差动放大器	107
6.1	差动放大器的工作原理	107
6.1.1	温度漂移	107
6.1.2	电路组成	108
6.1.3	对共模信号的抑制作用	109
6.1.4	对差模信号的放大作用	110
6.1.5	差动放大器的电压传输特性	111

6.2	差动放大器的其他三种接法	113
6.2.1	双端输入—单端输出	113
6.2.2	单端输入—双端输出	115
6.2.3	单端输入—单端输出	116
6.2.4	差动放大器的优点	117
6.2.5	集成运放中的差动放大器	117
6.3	观察差动放大器的波形	119
6.3.1	实验用差动放大器的电路结构	119
6.3.2	差模放大的工作波形	120
6.3.3	共模放大的基极与集电极波形	125
6.3.4	共模放大的基极与发射极波形	127
6.3.5	共模电压放大倍数与共模抑制比	127
6.3.6	发射极串接衰减电阻降低增益	128
6.3.7	输入、输出阻抗	129
6.4	差动放大器的设计	131
6.4.1	恒流源参数的确定	131
6.4.2	电源电压的确定	132
6.4.3	恒流源电流的确定	132
6.4.4	集电极电阻的确定	133
6.5	差动放大器在集成运放中的应用	133
第7章	差动输入级功率放大器	136
7.1	功放的历史、电路结构与工作方式	136
7.1.1	功放的历史	136
7.1.2	功放的电路结构	137
7.1.3	功放的工作方式	140
7.2	差动功放的基本原理	140
7.2.1	差动功放是如何工作的	140
7.2.2	功放的增益带宽积	143
7.2.3	传统功放线路的优点	144
7.2.4	功放中的负反馈	145
7.3	差动输入级功率放大器的设计	146
7.3.1	差动功放的电路结构	146
7.3.2	静态参数计算 (电源电压 $\pm 15\text{V}$)	149
7.3.3	动态参数估算	150
7.3.4	工作波形	152
7.3.5	用 NPN 管作为输入级的功放	155
7.4	输出级的结构类型	157
7.4.1	射极跟随器类型	158
7.4.2	倒置达林顿类型	159

7.4.3	准互补输出级	160
7.4.4	三重结构输出级	162
7.4.5	大信号失真的机理	163
7.4.6	功率管并联输出能减小失真	163
7.4.7	功率管并联输出的功放电路	164
第8章	深入研究小信号放大级	170
8.1	差动输入级	170
8.1.1	输入级产生的失真	170
8.1.2	单独测量输入级的失真	172
8.1.3	直流平衡能减小总谐波失真	174
8.1.4	镜像电流源负载能迫使差分对电流精确平衡	176
8.1.5	输入级的恒定跨导变换	177
8.1.6	直流失调电压	178
8.2	电压放大级	181
8.2.1	电压放大级的失真	181
8.2.2	电压放大级的仿真	182
8.2.3	改善电压放大级的线性: 有源负载技术	183
8.2.4	电压放大级的强化	184
8.2.5	平衡式电压放大级	186
8.2.6	“小钢炮”——平衡式电压放大级功放电路实例	187
8.2.7	50W (B类) Hi-Fi 功放	189
8.3	放大器的转换速率	192
8.3.1	放大器速率限制的基础知识	192
8.3.2	转换速率的提高	193
8.3.3	晶体管极间电容穿透效应对转换速率的影响	194
8.3.4	现实中的速率限制	194
8.3.5	其他影响速率的因素	195
8.3.6	具有电流补偿功能的 U_{BE} 倍增电路	196
8.3.7	改进转换速率的 50W (AB类) Hi-Fi 功放设计实例	197
第9章	功率放大器设计实例分析	208
9.1	全互补对称功率放大器	208
9.1.1	互补对称差分输入级	208
9.1.2	电压放大级	212
9.1.3	功率输出级	212
9.1.4	输出电感的作用	213
9.1.5	大功率 2SC5200 和 2SA1943 对管	213
9.2	功率放大电路的安全运行	216
9.2.1	功率管的二次击穿	216
9.2.2	功率管的安全工作区	217

9.2.3	功率管的散热问题	218
9.3	用 LM3886 制作双声道功放	220
9.3.1	LM3886 简介	220
9.3.2	电路结构及工作原理	221
第 10 章	A 类功率放大器设计	231
10.1	准 A 类功率放大器	231
10.1.1	A 类功放输出级工作分析	231
10.1.2	准 A 类功放的前置输入级工作状态	233
10.1.3	准 A 类功放的激励级的静态电流	235
10.1.4	功率输出级的电流分配	235
10.1.5	功率输出级的电流波形	236
10.1.6	电源电路及指示	239
10.1.7	场效应管 2SK246、晶体管 2SC2240 和 2SA970	240
10.2	集成运放 + 分立元件甲类功放	242
10.2.1	电路结构与工作原理	242
10.2.2	关键元器件	246
结束语		254
参考文献		256

第 1 章 概 述



观察手机和电脑内部，所能见到最多的元器件是 IC (Integration Circuit)、LSI (Large-scale Integration Circuit) 或 SLSI (Super-Large Scale Integration circuit)，可以说，当今是集成电路的全盛时代，想要找到单个晶体管或 FET^① 往往是一件很困难的事。然而，无论多么复杂的集成电路，都是由成千上万只晶体管、电阻和电容构成的。这些“元器件”通过光刻技术在硅片上以微晶体的形式存在。即使在这样的 IC、LSI 或 SLSI 的全盛时代，对于那些由于空间布局、输出功率、电磁干扰等诸多因素限制的电气设备，如开关电源、分立功率放大器来说，晶体管仍能大行其道。

本书主要讲述晶体管和 FET 典型电路的结构、工作方式，希望读者能够从最基本的单管放大电路开始，理解电路的工作本质，顺畅地处理一些麻烦的问题。因此，即便仅使用分立的晶体管、电阻及电容等或用分立元器件与 IC 的组合，都能设计出性能优良的功率放大电路。在讲述器件和电路之前，本章先给出晶体管和 FET——最基本放大器件的预备知识。

1.1 功率放大电路的预备知识

1.1.1 理想化的“黑盒子”电路

放大器是电子电路中最常见的基本单元电路，既可以由晶体管（与阻容元件）构成，又可以由运算放大器^②与外围元件构成，且后者的结构往往比前者简单，稳定性、可靠性也优于前者，但就带宽的单项指标而言，往往是前者优于后者。

当深入掌握晶体管和 FET 电路的有关知识后，简单地把运算放大器作为“黑盒子”考虑时，在工程实践中往往出现工作波形与理论分析不符的现象。这是因为设计时默认运算放大器为理想器件，但从实际电路中发生的故障现象来看，运算放大器却不能完全理想化。

图 1-1 为使用运算放大器构成的电压放大器。其中，图 (a) 为将运算放大器视作“黑盒子”的电路，如果真像这样设计电路，那么当电源引线绕得比较远时，输出信号常常会出现波形畸变或不稳定现象（奇怪的杂波干扰或者发生随机性自激）；图 (b) 为考虑运算

① FET 指 Field Effect Transistor，场效应管。

② 运算放大器的英文是 Operational amplifier，简称 OP。

放大器内部实际结构状况的电路。正负电源都增加了对地滤波电容,可抑制高频干扰,防止出现自激振荡;同相输入端的外接电阻与反馈电阻取值相等,可减小失调电压;反馈电阻两端并联小电容,衰减高频信号,可防止相位反转引起自激;输入、输出端插入电解电容,可隔断集成运放与外电路的直流通路。

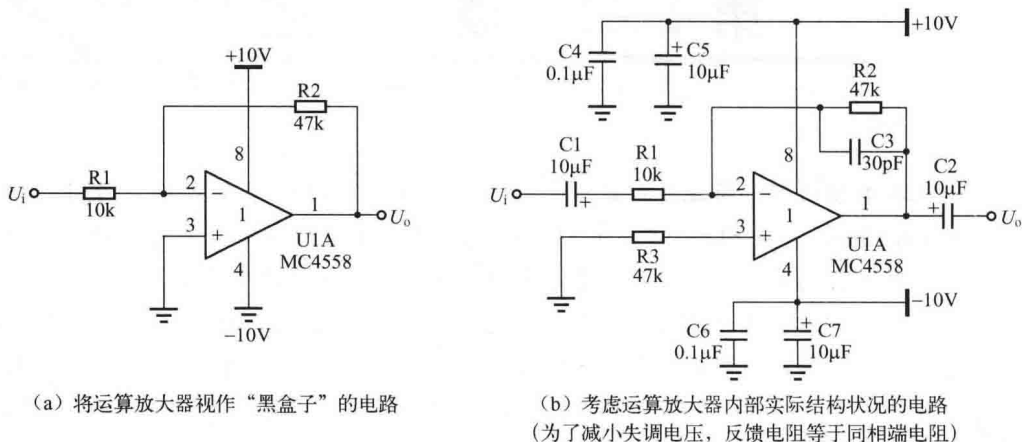


图 1-1 使用运算放大器构成的电压放大器

(将运算放大器看作是理想工作“黑盒子”的情况和看作是用晶体管组成的放大电路场合有很大差别。图(a)即使可以工作,但也可能发生输出电压波形畸变或不稳定的情况。图(b)则是比较完美的。)

由单个晶体管组成共发射放大电路的电压增益是有限的,输入信号以基极电流的形式存在。理想运算放大器的电压增益为无穷大,输入信号以电压形式存在,输入电流为零。当电路发生问题时,不能直接调整运算放大器的工作特性。如果是单个晶体管的放大电路,就可以采取多种对策应对。因此,如果能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:“**运算放大器的内部是这样的,所以在外接电路上要这样做的工作……**”。这种分析问题的方法不仅局限于运用运算放大器的电路,可以说对于全部的模拟电路和数字电路都是一样的。

1.1.2 分立件功放的优点

作为放大器的一个重要旁支——音频功率放大器,既有分立件功放又有集成功放,由晶体管、电阻、电容和电感等元件组成的分立件功放有许多集成功放无法比拟的优点。

首先,分立件功放元器件之间可以留足够的空间,元器件分散,利于散热,可避免输出级工作时高电压、大电流产生的热量传给输入级和激励级,防止因温升引起静态工作点的漂移(也叫**零点漂移**或**零漂**)与热噪声的增大。

其次,根据信号流向合理设计 PCB^① 布线的方向与区域。合理的 PCB 布线可以消除放大器各级之间(电压、电流显著不同)的寄生干扰,不合理的大、小环路布线或接地可能引起电路自激,严重时可能烧毁功率管。

① PCB 指 Printed Circuit Board。

最后, 根据电流大小合理设计 PCB 铜箔布线的宽度。合理的布线宽度能减小铜箔的电流密度, 降低引线电阻及损耗, 同时也使去耦电容位置的安放更加灵活、性能发挥更为卓越。此外, 由于所有元件都是开放的, 为自由调整静态电压、电流提供了方便之门。如果电路选择得好, 参数选择得恰当, 元件性能优良, 设计和调试得好, 那么性能将远远优于集成功放。

1.1.3 功放集成电路的热失真

音响书刊的作者有时对热失真做一些推测, 假定随着信号频率的周期性温度变化引起晶体管参数的调制。对于功放集成电路来说, 这毫无疑问确实成为一个问题。因为在同一小块硅芯片内, 输入器件与输出器件有紧密的热关系, 但分立件功放没有这样的热耦合, 也没有这样的失真。

推测起来, 热失真将使功放在低频端的 2 次谐波失真和 3 次谐波失真上升, 产生热失真效应最显著之处应是 B 类输出级, 因为整个信号周期在这里的功耗变化很大, 但分立件功放绝对看不到这样的热失真现象。热失真肯定存在于功放集成电路中。

图 1-2 是飞利浦集成功放 TDA1522 的失真曲线。这样的功放通常来说失真普遍都较大, 但失真曲线跌落到 40Hz 处形成一个低谷, 唯一合理的解释是两种不同的失真在此互相抵消。频率低于低谷时, 2 次谐波失真以 12dB/oct 的速率上升。低频失真的残余波形看上去与中频失真明显不同, 而中频失真的残余物中混有 2 次谐波、3 次谐波及交越失真的突峰。

失真曲线在越过 10kHz 后下跌, 是因为测量带宽设为 80kHz, 限制了对失真残余物的测量。高次谐波构成了交越失真。不包括因耦合电容容量不足带来的失真在内, 所有其他类型的低频失真呈上升之势。这里没有输出电容带来的失真, 因为输出是直接耦合至负载。

低频端失真曲线陡峭地上升看来明显是由热失真引起的。其热失真形式是从功率输出级反馈至放大器前端电路 (可能就是输入级) 的。正如预计的那样, 这种热失真现象在负载更重, 也就是热量更大时更明显。事实上, 在 40Hz 谷点频率以下的频段, 负载阻抗减半, 总谐波失真增大 1 倍。

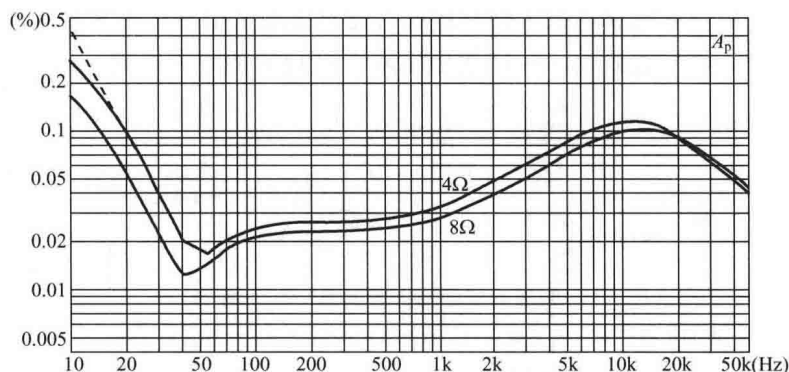


图 1-2 飞利浦集成功放 TDA1522 的失真曲线

(输出功率为 4.4W/8Ω 和 8W/4Ω 均为有效值。虚线标出的是 12dB/oct^① 的斜率线)

^① oct 是 octave 的简写, dB/oct 是分贝/倍频程, 有一阶 (6dB/oct)、二阶 (12dB/oct)、三阶 (18dB/oct) 和四阶 (24dB/oct) 之分, 阶数越高, 表示曲线斜率越大

1.2 晶体管和 FET 的工作原理

掌握晶体管和 FET 的工作原理，在理解电路时是非常重要的。在设计晶体管和 FET 电路时，只要能够形象地掌握放大器的工作状况，其后就只是单纯的计算了。但是在不能（或不会）设计晶体管电路或 FET 电路时，大部分读者都**对放大器的工作没有形象的概念**。如果能抓住建立晶体管或 FET 工作的形象概念，就可以很容易理解电子电路的工作原理。因此，在进入实际的设计之前，有必要形象地掌握晶体管或 FET 是如何工作的。

1.2.1 晶体管和 FET 是怎么进行放大的？

晶体管和 FET 是具有放大功能的器件，不仅可以用到放大电路中，还可以用到振荡电路和开关电路（包括数字电路）等电路中。无论多么复杂的 IC 和 LSI，都是由晶体管、电阻、电容和电感等元件及布线互连一起，制作在一小块或几小块半导体晶片或介质基片上，然后封装在一个管壳内，成为具有所需电路功能的微型结构。其中所有元件在结构上已组成一个整体，使电子元件向着微小型化、低功耗、智能化和高可靠性方面迈进了一大步。

初学者往往认为晶体管和 FET 放大作用的形象概念是如图 1-3 所示的那样，即认为在晶体管和 FET 中，输入信号直接被放大，实际上不是这样的。

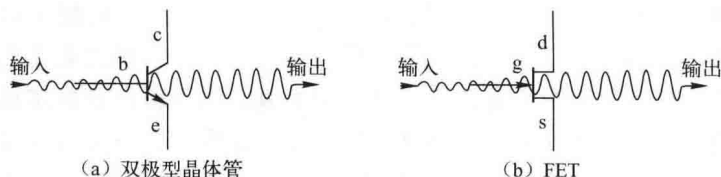


图 1-3 初学者想象的晶体管和 FET 的放大作用

实际的放大作用如图 1-4 所示，大小与输入信号成正比的输出信号是从电源来的；由电源变换而来的输出信号形状与输入信号相同，而且比输入信号的电平高，所以由外部看上去，可以理解为输入信号被放大——这就是晶体管和 FET 的放大原理。

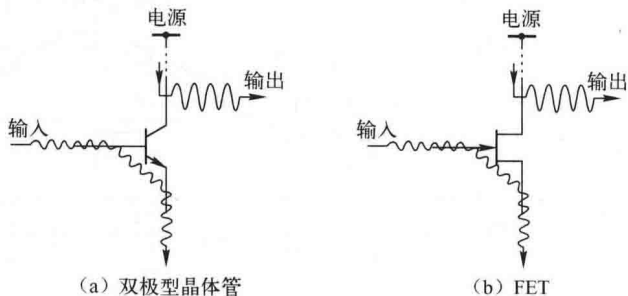


图 1-4 实际的放大作用

（晶体管和 FET 吸收输入信号的振幅和频率信息经由电源输出受控的输出信号，由于输出信号比输入信号大，可以看作晶体管和 FET 将输入信号放大而成为输出信号——这就是放大原理。放大输出信号的能量不是来自于器件，而是电源）



小知识

晶体管主要分为两大类：双极型晶体管（Bipolar Junction Transistor, BJT）和场效应晶体管（Field Effect Transistor, FET）。

双极型晶体管也称晶体三极管或晶体管，是**电流控制型器件**，由输入电流控制输出电流，具有电流放大作用，既有**多数载流子**又有**少数载流子**^①，数目受温度、辐射等因素影响较大）。

晶体管可分为硅管（Si）、锗管（Ge）：硅管的反向漏电流小，耐压高，温度漂移小，且能在较高的温度下工作和承受较大的功率损耗；锗管的噪声大，温度漂移大，但频率响应好，尤其适用于低压线路。

目前，我国生产的NPN晶体管多采用硅材料，PNP型晶体管既有采用硅材料，也有采用锗材料的。

场效应晶体管也称**单极型晶体管**，是**电压控制型器件**，由输入电压产生的电场效应来控制输出电流的大小。由于它工作时只有**多数载流子**参与导电，故称为**单极型晶体管**。场效应晶体管具有体积小、重量轻、寿命长等优点，而且输入回路的阻抗高达 $10^7 \sim 10^{12} \Omega$ ，噪声低，热稳定性好，抗辐射能力强，比晶体管省电，使其从20世纪60年代诞生起就广泛地应用于各种电子电路中。

场效应晶体管分为结型场效应管JFET（Junction Field Effect Transistor）和绝缘栅型场效应管IGFET（Insulated Gate FET）。

那么在晶体管和FET内部如何进行放大的呢？

1.2.2 晶体管的工作原理

晶体管内部的工作原理很简单，如图1-5所示。基极与发射极之间流过微小的电流，可引发集电极、发射极之间流过数十倍至数百倍（根据晶体管类型而定）的较大电流。也就是说，**晶体管是用基极电流来控制集电极、发射极电流的器件**。从外部来看，因为由基极输入的电流被变大，并出现在集电极与发射极，因此可以视为是晶体管将输入信号进行了放大。

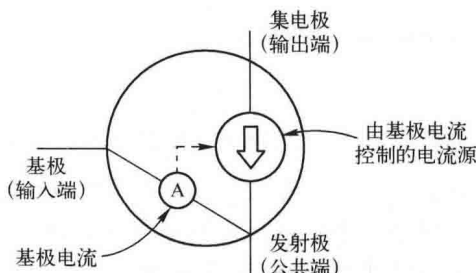


图1-5 晶体管内部的工作原理

（基极与发射极之间流过微小的电流，引发集电极、发射极之间流过数十倍至数百倍的较大电流）

① 半导体材料中有电子和空穴两种载流子。如果半导体中电子浓度大，电子就是多数载流子，空穴就是少数载流子。相反，如果半导体中空穴浓度大，空穴就是多数载流子，电子就是少数载流子。在N型半导体中，电子是多数载流子，空穴是少数载流子，N指negative的首字母。在P型半导体中，空穴是多数载流子，电子是少数载流子，P指positive的首字母。

1.2.3 晶体管各端子电流之间的关系

晶体管各端子的电流是以如图 1-6 所示方向流动的, 只有在这种情况下, 晶体管才得以工作在放大状态。在各端子的电流之间, $I_e = I_b + I_c$ 的关系成立。

NPN 晶体管各端子的电流关系式如图 1-7 所示 (这只是 NPN 型晶体管, 若是 PNP 型晶体管, 则电流方向相反, 但大小关系是相同的)。

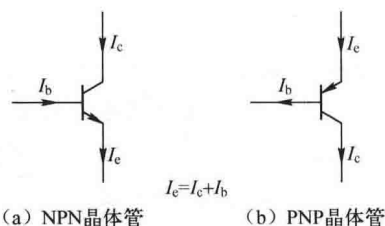


图 1-6 晶体管各端子之间的电流关系

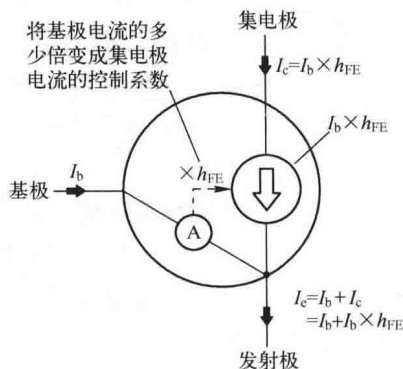


图 1-7 NPN 晶体管各端子的电流关系式

在图 1-7 中, h_{FE} 是共射直流电流放大系数, 我国常用 $\bar{\beta}$ 表示。 $\bar{\beta}$ 定义为

$$\bar{\beta} = \frac{I_c - I_{ceo}}{I_b + I_{ceo}} \quad (1-1)$$

式中, I_{ceo} 是基极 b 开路时, 在 c、e 极之间接正向电压所得的恒定 (当温度一定) 电流, 也叫穿透电流。当 $I_c \gg I_{ceo}$ 时, $\bar{\beta} \approx \frac{I_c}{I_b}$ 。

晶体管除了共射直流电流放大系数 $\bar{\beta}$ 之外, 还有共射交流电流放大系数 β 。 β 定义为

$$\beta = \frac{\Delta i_c}{\Delta i_b} \quad (1-2)$$

式中, Δi_c 、 Δi_b 分别是晶体管集电极与基极的动态电流。

$$\bar{\beta} \approx \beta \quad (1-3)$$

在一定范围内, 可以用晶体管在某一直流量下的 $\bar{\beta}$ 来取代在此基础上加动态信号时的 β 。由于在较宽的范围内 $\bar{\beta}$ 基本不变, 因此在近似分析中不对 $\bar{\beta}$ 与 β 进行区分。本书中均以 β 称谓。正如我们所知, 晶体管是对基极电流进行检测来控制集电极电流的器件。 β 是检测基极电流有多少倍转换成集电极电流的控制系数。 β 的值越大越好, 因为这样就能够以较小的电流控制较大的电流。然而, 通常小信号通用晶体管的 β 值为 100 至数百, 功率放大晶体管为数十至几百左右, 即便是同一型号的晶体管, β 值也有分散性, 故大多数晶体管都以 h_{FE} 的大小来分开档次 (高频晶体管除外)。

1.2.4 用数字万用表判断晶体管的类型

晶体管有两个 PN 结, 与二极管的单向导电特性一样, 在用万用表检测晶体管时, 可以