

晶体管电路

第一册

清华大学电子工程系编
工业自动化系

科学出版社

3.67
11

晶体管电路

(第一册)

清华大学 电子工程系 编
工业自动化系

科学出版社

1973

内 容 简 介

本书是清华大学电子工程系和工业自动化系在最近几年的教育革命实践中编写的。第一册包括半导体器件原理及交流放大器、直流放大器、反馈放大器、调制式放大器、运算放大器等晶体管小信号放大电路的内容；第二册包括功率放大器、正弦波振荡器、直流稳压电源、可控硅元件及其应用等内容。

本书对于晶体管电路的基本概念、基本原理和基本分析方法作了比较深入的讨论,并通过各部分的例题和习题介绍了一批工程实用电路。

本书可供大学自动控制或相近类型的专业作为电子学课程的教材使用,也可供具有初中以上文化程度的工人和工程技术人员自学和参考。

晶 体 管 电 路

(第一册)

清华大学 电子工程系 编
工业自动化系

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

北京新华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1973 年 8 月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1973 年 8 月第一次印刷 印张: 18 1/4 插页: 2

印数: 0001—302,900 字数: 482,000

统一书号: 15031·72

本社书号: 234·15—7

定 价: 1.50 元

前 言

本书是为我校自动控制、工业自动化、热工量测及自动化等专业编写的电子学教材。1971—1972年曾在校内若干专业中试用，这次又作了修改和补充。

为了便于广大工农兵学员和读者自学，我们力图以辩证唯物论的认识论为指导，从典型电路开始，按由浅入深，由特殊到一般，由感性认识上升到理性认识的原则组织教材的内容。对晶体管电路的基本概念、基本原理与基本分析方法作了较多的讨论。各章的内容提要与小结归纳了学习的重点和基本要求，编入书中的思考题、练习题和实验提纲可供学员在自学过程中进行复习和考查。

培养学员具有应用理论知识分析和解决一定的工程实际问题的能力，改变旧学校“三脱离”的弊病，这是我们在编写工作中注意到的另一个问题。遵照毛主席关于“**理论的基础是实践，又反过来为实践服务**”的教导，在总结群众的经验和教改实践的基础上，本书确定以“定性分析、定量估算与实验调整”相结合的方法来研究各种晶体管电路，力求将理论与实践、数学方法与物理概念更紧密地结合起来。同时，通过各章的例题和习题介绍一些工程实用电路，以期学员对原理电路有了初步了解之后能进一步提高对于工程电路的分析能力。

在这次改编过程中，我们还补充了一些比较深入的内容，以备学员在学习某些后续课程或参加实际工作时参考。这些内容或编入附录或以小字排印，可不列入本课程的教学计划。至于书中的其他内容，各专业也可按照自己的教学要求决定取舍。

由于我们对马克思列宁主义、毛泽东思想学习得不够，实践经验又少，书中肯定会有不少缺点错误，恳切希望广大工农兵学员和读者批评指正。

在本书的编写和试用过程中,曾得到北京电子管厂、北京建中
机器厂、北京无线电一厂、北京无线电二厂、上海市业余工业大学、
北京航空学院、北京工业大学和其他许多兄弟单位的热情帮助和
指教,在此表示由衷地感谢。

清华大学 电子工程系
工业自动化系

一九七三年七月

2P36/3015

目 录

第一章 晶体管的放大作用	1
第一节 晶体管的放大作用	1
第二节 从几个实例看晶体管的放大作用	4
一、光电控制	4
二、纸张折角自动检测	6
三、水位控制	7
本章小结	10
第二章 利用 PN 结组成的一些半导体器件	11
第一节 半导体的导电特性	11
一、什么是半导体?	11
二、半导体中的另一种载流子——空穴	12
三、P 型和 N 型半导体	14
第二节 PN 结的特性	16
一、感性的认识	16
二、PN 结的根本矛盾——扩散运动与漂移运动的矛盾	17
三、外加正向电压促使 PN 结转化为导通状态	19
四、外加反向电压促使 PN 结转化为截止状态	20
第三节 半导体二极管的特性和参数	21
一、半导体二极管的结构	21
二、二极管的特性和参数	23
三、二极管参数举例	26
四、二极管极性的简易辨别方法	29
第四节 稳压管	31
一、为什么一个二极管能够稳压?	31
二、关于击穿的原理	31
三、稳压管的特性和参数	33

第五节 晶体管	36
一、晶体管的结构	36
二、晶体管的电流放大作用——扩散运动和复合运动的矛盾	38
三、晶体管的输入特性与输出特性	41
四、晶体管的主要参数	46
五、温度对晶体管参数的影响	52
六、利用万用表检查晶体管	54
第六节 场效应管	58
一、场效应管的基本导电规律	58
二、结型场效应管的特性和它的放大作用	60
三、绝缘栅场效应管	67
四、场效应管的主要参数和使用注意事项	73
五、场效应管和晶体管的比较	77
小结	78
本章小结	79
*附录 几种晶体管的性能和参数特点	80
第三章 交流放大器	88
第一节 简单的交流放大电路和静态工作点的设置	90
一、简单的交流放大电路	90
二、不设置静态工作点行不行?	92
三、怎样才能使放大器不失真?	94
四、电源的简化和放大电路的表示方法	97
小结	98
第二节 放大电路的基本分析方法	99
一、计算法	99
二、图解法	109
三、单管交流放大器的设计举例	120
小结	122
第三节 工作点的稳定	125
一、温度对放大器工作点的影响	125
二、工作点稳定的典型电路	127
三、工作点稳定的双管直接耦合放大电路	136

*四、其他工作点稳定的放大电路	139
小结	141
第四节 晶体管等效电路及交流放大器的其他基本单元电路	145
一、简化的 h 参数及其等效电路	146
二、放大器输入电阻与输出电阻的概念	157
三、应用晶体管等效电路计算放大器的输入电阻、输出电阻和放大倍数	162
四、利用输入电阻和输出电阻计算多级放大器的放大倍数	164
五、具有电流负反馈的共发射极放大电路	170
六、射极输出器	174
小结	189
*附录一 晶体管的 h 参数等效电路	195
*附录二 共基极放大器及晶体管三种接法的比较	200
*第五节 放大器的频率特性	203
一、从 RC 电路的频率特性谈起	203
二、晶体管的频率参数	211
三、放大器的频率特性	213
四、放大器的低频特性与耦合电容、旁路电容的选择	216
五、放大器的高频特性与晶体管频率参数的选择	223
小结	224
第六节 场效应管放大器	226
一、静态工作点	227
二、场效应管的微变等效电路	229
三、放大倍数和输入、输出电阻	230
四、源极输出器	233
第七节 放大器的设计、调整与制造工艺	234
一、放大器设计的一些原则	235
二、静态工作点的调试	237
三、输入交流信号的调试	239
四、干扰与噪声的抑制	243
五、工艺要求	252
第四章 直流放大器	255

第一节	为什么要用直流放大器	255
一、	直流放大器的用途	255
二、	直流放大器和交流放大器的关系	256
第二节	多级直流放大器的耦合方式和零点漂移现象	258
一、	两个单级放大器直接耦合时产生的新问题	258
二、	几种常用的耦合方式	260
三、	零点漂移现象	263
第三节	产生零点漂移的原因及温度补偿电路	266
一、	晶体管参数随温度变化所引起的零点漂移	266
*二、	单管放大器温度漂移的计算	268
三、	电源电压变化所引起的零点漂移	274
四、	温度补偿电路	275
第四节	差动式放大电路	277
一、	差动式放大电路的工作原理	277
二、	典型的差动式电路及共模抑制比	280
三、	晶体管恒流源电路	285
四、	差动式电路的其他几种接法	289
*第五节	差动式电路的零点漂移	293
一、	双端输出差动电路的零点漂移计算	293
二、	单端输出差动电路的零点漂移计算	300
三、	进一步减小差动式电路零点漂移的方法	303
四、	抑制零点漂移的工艺措施	307
第六节	直流放大器的设计	309
一、	设计数据	309
二、	电路方案选择	310
三、	各级工作情况	311
四、	各级参数计算	313
五、	静态工作点的校核	319
六、	输入电阻的估算	322
七、	各级电压放大倍数的估算	323
八、	调整	325

九、设计小结	328
本章小结	329
第五章 反馈在放大器中的应用	331
第一节 反馈的基本概念	331
一、什么叫反馈?	331
二、反馈的极性——正反馈和负反馈	333
三、反馈的表达方式——方块图	334
四、反馈的一般关系式——开环放大倍数与闭环放大倍数的 关系	336
五、反馈的一个重要指标——反馈深度	341
小结	342
第二节 负反馈对放大器性能的影响	346
一、放大倍数下降	346
二、放大倍数的稳定性提高	347
三、频带展宽	350
四、对输入电阻和输出电阻的影响	352
五、波形失真的改善	355
小结	356
第三节 负反馈的四种连接形式	359
一、电压串联负反馈	360
二、电流串联负反馈	364
三、电压并联负反馈	365
四、电流并联负反馈	366
小结	369
*第四节 反馈放大器的分析方法	373
一、晶体管等效电路	373
二、方块图	374
三、迭加原理	374
四、方块图的变换	380
小结	387
第五节 反馈放大器的自激振荡	387
一、自激振荡的原因	388

二、自激振荡的条件	390
三、多级放大器的自激振荡和反馈深度的关系	391
第六节 反馈放大器的应用举例	393
一、DDZ-II 型自动调节仪表中的电压-电流变换器	393
二、JB-1B 型晶体管毫伏表	395
第六章 调制式直流放大器	402
第一节 调制与解调的原理	402
一、调制式直流放大器如何解决漂移和放大的矛盾?	402
二、调制器原理	403
三、解调器原理	411
小结	413
第二节 调制器	414
一、机械斩波器	414
二、晶体管调制器	416
三、场效应管调制器	425
四、抑制调制器尖峰电压的一种方法——尖峰箝位	433
小结	437
第三节 解调器	438
一、晶体管作为开关用的解调器	438
二、晶体管作为放大用的解调器——相敏放大器	440
三、二极管环形解调器	449
小结	455
第四节 调制式直流放大器实用电路	456
一、温度变送器	456
二、JF-12型晶体管放大器	461
第五节 自激振荡的调制式直流放大器	472
一、方案的特点	472
二、电路的工作原理	474
本章小结	476
第七章 运算放大器的性能和应用	478

第一节 运算放大器的基本性能	478
一、什么是运算放大器?	478
二、如何保证运算精度?	483
三、运算放大器的一般关系	488
小结	496
*附录一 关于积分运算的误差分析	497
第二节 固体组件运算放大器	500
一、线性组件的电路结构特点	500
二、BG 301 线性组件的电路工作原理和技术指标	502
三、8FC 2 线性组件的电路工作原理和技术指标	509
四、固体组件运算放大器主要技术指标的意义和它们的 测试方法	511
*五、固体组件运算放大器在使用中常遇到的几个问题	517
*附录二 用开环对数频率特性分析运算放大器的稳定性	530
第三节 自动稳零运算放大器	541
一、自动稳零运算放大器的特点	541
二、FD-2A 型晶体管运算放大器的工作原理和技术指标	545
第四节 运算放大器的应用举例	550
一、实现数学运算	550
*二、作有源校正 (PID 放大器) 和有源滤波	561
三、作高输入阻抗放大器	566
四、实现非线性特性	569
五、应用固体组件的晶体管参数自动测量电路	570
小结	573

注：在章节标题前面有“*”号标记的是用小字排印的内容。

第一章 晶体管的放大作用

无产阶级文化大革命，粉碎了刘少奇一类骗子推行的反革命修正主义路线，广大革命群众在工人阶级领导下，全面地贯彻执行毛主席提出的“鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义”的总路线和“抓革命，促生产，促工作，促战备”的伟大指示，电子工业和其他事业一样，取得了飞速的发展。

随着电子工业的发展，广大工农兵群众采用电子技术进行技术革新的成果不断涌现，无数动人的事例雄辩地说明电子技术并不神秘。

第一节 晶体管的放大作用

毛主席教导我们：“认识开始于经验——这就是认识论的唯物论。”

晶体管电路在工农业生产、国防建设以及人民生活中都有广泛的应用，晶体管是组成电子设备的关键元件，所以，人们在实践中都不同程度地接触到它。

例如在集会或者游行的时候，组织者常常通过扩音器指挥和调动队伍，不用扩音器，由于讲话的声音弱，就难于使成千上百的人都听得很清楚。如果人数更多，没有扩音器，简直办不到。扩音器能把本来很微弱的声音放大，这是大家所熟悉的。但是扩音器为什么能有这个作用呢？让我们打开扩音器看一看，这个秘密就不难揭穿了。

图 1-1 是手提半导体扩音器的结构图。它由三个部分组成：第一部分叫话筒，它把说话的声音转换成变化的电压(或电流)；第二部分叫晶体管放大器，它的作用是把转换出来的微弱电压和电

流(统称为电信号)增强,即担负“放大”的任务;第三部分是喇叭,



图 1-1 手提半导体扩音器结构图

把电信号变成声音。显然,正是依靠晶体管放大器的放大作用,才使喇叭发出的声音远远超过了讲话的声音,而起放大作用的关键又是晶体管。那么什么是晶体管呢?

晶体管是由半导体材料(锗或硅)制成的电子器件,它的外形如图 1-2 所示。管子有三个电极:集电极、基极和发射极,分别用字母 c , b , e 表示。一般查阅半导体手册,就知道如何识别不同型号管子的三个管脚,也可以用万用表辨别管脚(可参阅第二章)。为了方便起见,通常用图 1-3 所示的符号*代表晶体管。

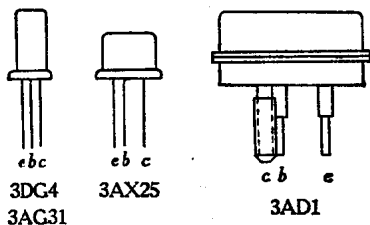


图 1-2 几种晶体管的外形图

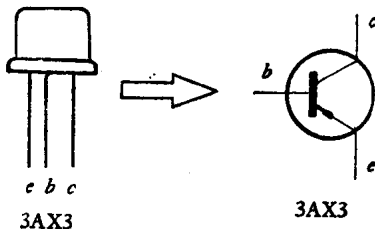


图 1-3 晶体管的符号

* 还有一种类型的晶体管它的箭头向外,将在第二章介绍。

晶体管具有什么特性，它又是怎样起放大作用的呢？让我们首先通过实验了解一下三个电极电流的相互关系。把晶体管按图 1-4 的接法连起来，其中 E_c 、 E_b 是电源，分别为 15V 和 3V，电流

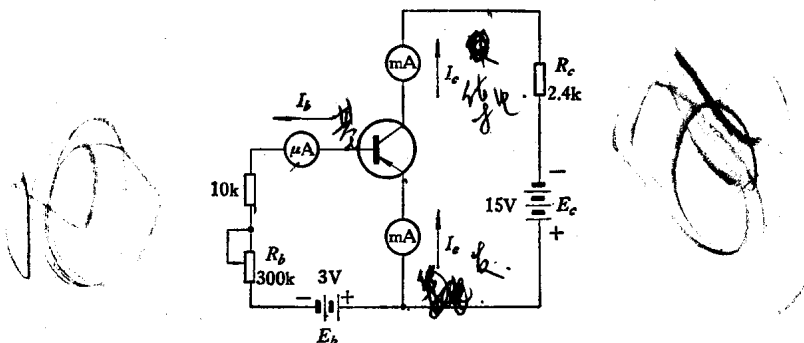


图 1-4 晶体管的电流关系

的方向标在图上。改变电阻 R_b ，电流 I_c 、 I_b 、 I_e 都发生变化，它们的变化规律，可以用电流表分别测出，如表 1-1 所示。

表 1-1 晶体管电流关系的测试数据

电 流 \ 实验次数	1	2	3	4	5	6
基 极 电 流 $I_b(\text{mA})$	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.06
集电极电流 $I_c(\text{mA})$	0.55	1.10	1.94	2.69	3.41	4.62
发射极电流 $I_e(\text{mA})$	0.55	1.11	1.96	2.72	3.45	4.68

从以上实验数据可以看出：

1. 晶体管要工作，必须加上电源 E_c 、 E_b ，即必须“通电”。
2. 电流 $I_e = I_c + I_b$ ，即发射极电流 I_e 等于基极电流 I_b 和集电极电流 I_c 之和，符合节点电流定律。

3. I_b 比 I_c 及 I_e 小得多，基极电流 I_b 的少量变化，可以引起集电极电流 I_c 的较大变化，这就是晶体管的电流放大特性。比如 I_b 由 0.02 mA 变到 0.04 mA 时， I_c 由 1.94 mA 变到 3.41 mA，它们之间变化量的比例，称为电流放大系数 β （读作贝塔）。例如

$$\beta = \frac{I_{c5} - I_{c3}}{I_{b5} - I_{b3}} = \frac{3.41 \text{ mA} - 1.94 \text{ mA}}{0.04 \text{ mA} - 0.02 \text{ mA}} = \frac{1.47 \text{ mA}}{0.02 \text{ mA}} = 73.5$$

其中, I_{b3} , I_{c3} 是第三次测得的基极电流和集电极电流; I_{b5} , I_{c5} 是第五次的测量数据。

电流放大特性是晶体管最重要和最基本的特性, 扩音器正是利用它实现对声音的放大。话筒把人讲话的声音转换成微弱的电流变化, 输入到管子的基极, 由于电流放大的作用, 集电极电流的变化增强了几十倍, 接上几个管子, 每个管子 I_c 都比 I_b 大几十倍, 在最后的那个晶体管集电极回路中就可以得到很大的电流变化。如果在集电极回路中接上喇叭, 就可以发出很强的声音, 这时我们说讲话的声音被放大了。自然, 这个很强声音的能量是电源提供的, 不加电源晶体管便不能工作。换句话说, 电源供给能量, 晶体管只是根据需要加以利用和控制。因此所谓“放大”, 实质上就是“以小控制大, 以弱控制强”的意思。

第二节 从几个实例看晶体管的放大作用

广大工农兵群众和科技人员, 依靠战无不胜的毛泽东思想, 根据自己的实践经验, 利用晶体管的电流放大特性进行技术革新, 解决大量生产实际问题。下面仅举几个例子来说明这方面的丰硕成果。

一、光电控制

生产塑料丝的塑料拉丝机, 要求在断丝时立即停车。原来由人工看管, 一个人只能看一台机器, 能不能多看几台? 这就要想办法装上一个断丝自动停车装置。工人老师傅破除迷信, 解放思想, 成功地革新了一套光电自动控制设备, 这样一来, 一个人就完全能够看管多台机器, 节省了大量劳动力。

图 1-5 是它的原理图, 在正常工作时, 挡板挡住了光源, 光照不到光敏电阻 R 上, 这时它的阻值很大(可大于 $50 \text{ M}\Omega$), 因此基极

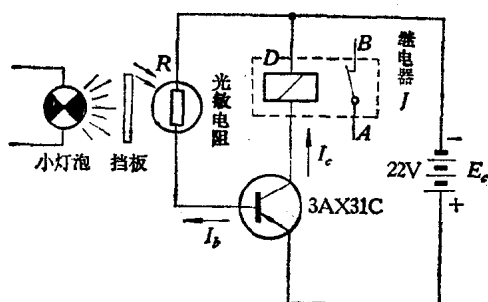


图 1-5 断丝自动停车原理图

电流 I_b 很小, 集电极电流 $I_c = \beta I_b$ (即流过继电器线圈 D 的电流) 也很小, 它的常闭接点*闭合, 机器正常工作。断丝时, 挡板偏转, 光线直接照到光敏电阻上, 它的阻值大大减小 (约 $50 \text{ k}\Omega$), 这时基极电流是

$$I_b = \frac{E_c - |U_{be}|}{R} \approx \frac{22\text{V}}{50 \text{ k}\Omega} = 0.44 \text{ mA}$$

而

$$I_c = \beta I_b = 30 \times 0.44 = 13.2 \text{ mA}$$

这里, 晶体管的电流放大系数 $\beta = 30$, U_{be} 是晶体管基极到发射极的电压降, 一般约 -0.2 V 。由于流过继电器线圈的电流增大, 常闭接点打开, 切断机器的电源。

继电器的工作原理见图 1-6。线圈不通电流时, 弹簧使衔铁

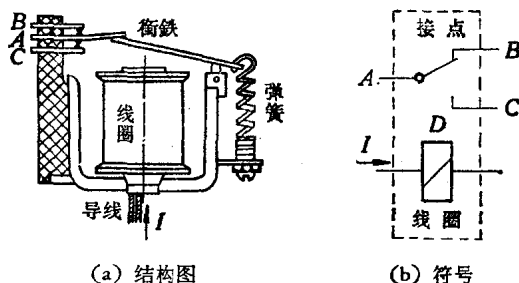


图 1-6 继电器的结构图和符号

* 通常把线圈不通电流时处于闭合状态的接点 (A, B) 称为常闭接点, 反之, 称为常开接点 (A, C), 见图 1-6。