

73.6
1.1
2.3

业余中等专科学校教材

电 子 技 术

第 三 册

运算放大、振荡和电源电路

(修 订 版)

上海市工农教育教材编写组

内 容 提 要

《电子技术》第三册新编内容为直流放大、运算放大、直流稳压电源、正弦波振荡和可控硅应用技术五章。第七章直流放大器,重点分析差动放大电路的原理、增益、输入阻抗、输出阻抗以及差动放大电路级间耦合多级差动放大电路的工作原理;第八章运算放大器叙述运算基本原理、简介运放应用;第九章直流稳压电源中,补充线性集成元件构成的稳压源;第十章正弦波振荡器论述振荡器的基本概念和基本分析方法以及设计与应用;第五章可控硅及其应用为新增内容,扼要介绍可控硅工作原理、触发电路、可控硅单相整流、交流调压和开关电路。可控硅开关电路一节起了承上(线性电路)启下(第四册脉冲技术、第五册逻辑电路)的作用。

业余中等专科学校教材

电 子 技 术

第 三 册

运算放大、振荡和电源电路

(修 订 版)

上海市工农教育教材编写组

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所发行 上海东方印刷厂印刷

开本 787×1092 $1/32$ 印张 7.75 字数 168,000

1979年3月第1版 1988年2月第4次印刷

印数 127,001—132,600

ISBN 7-5323-0625-9/TN·16 (课)

统一书号: 15119·1997 定价: 1.50 元

目 录

第七章 直流放大器	1
第一节 概述.....	1
第二节 级间耦合与零点漂移.....	2
一、耦合方式.....	2
二、零点漂移.....	6
三、产生零点漂移的原因及抑制办法.....	7
第三节 差动放大电路.....	10
一、差动放大电路的基本形式.....	10
二、改进电路.....	13
三、差动放大电路的几种接法.....	17
四、具有共模反馈的两级差动放大电路.....	21
五、线性组件 F 001 简介.....	22
第四节 应用举例.....	26
一、电压电流变换器.....	26
二、滑差电机调速系统.....	28
三、SR-8 型双踪示波器 X 轴放大电路的末级.....	31
本章小结.....	32
习题.....	33
第八章 线性集成运算放大器	36
第一节 概述.....	36
一、线性集成运算放大器的功能.....	37
二、集成运算放大器的简化图及输入方式.....	37

三、理想集成运算放大器的特性·····	39
第二节 集成运算放大器实现数学运算·····	41
一、反相比例运算·····	41
二、反相求和运算·····	43
三、积分运算·····	45
四、微分运算·····	48
五、同相比例运算·····	49
六、双端输入求差运算·····	50
七、指数运算·····	51
八、对数运算·····	52
九、乘法运算·····	53
十、除法运算·····	54
第三节 集成运算放大器实现信号产生·····	54
一、正弦波振荡器·····	55
二、方波发生器·····	56
三、锯齿波发生器·····	57
第四节 集成运算放大器实现信号处理·····	59
一、电压-电流转换型的恒流源·····	59
二、有源滤波器·····	60
三、线性半波整流器·····	61
第五节 集成运算放大器的主要参数·····	63
第六节 集成运算放大器应用举例·····	67
一、恒温控制·····	67
二、低漂移的信号放大电路·····	68
本章小结·····	74
习题·····	75
第九章 直流稳压电源·····	78

第一节 稳压原理	78
第二节 硅稳压管	79
第三节 并联型稳压器	82
一、工作原理	82
二、设计方法	83
三、稳压电源的参数	85
第四节 串联型稳压器的基本电路	87
一、简单的串联型稳压器	87
二、串联型稳压器的基本电路	89
第五节 串联型稳压器的改善措施	93
一、输出电压可调	93
二、用复合管作调整管	94
三、放大环节用差放电路	95
四、采用辅助电源	96
五、其他措施	98
第六节 稳压电源的保护措施	100
一、限流式保护电路	100
二、截流式保护电路	102
三、切断式保护电路	103
第七节 集成稳压电源	104
一、工作原理	104
二、主要参数	107
三、应用线路	108
第八节 稳压电源的安装和调试	109
一、安装要点	109
二、调试步骤	111
三、测试质量指标	112

四、调试保护电路	113
本章小结	113
习题	114
第十章 正弦波振荡器	117
第一节 振荡回路中的振荡现象	117
一、振荡现象	117
二、自由振荡的频率	120
第二节 振荡器的基本原理	121
一、从放大器到振荡器	121
二、自激振荡器	122
三、振荡条件	123
四、振荡器的起振和稳定	125
第三节 LC 振荡器	126
一、 LC 选频电路	126
二、 LC 振荡电路	130
三、 LC 振荡器的频率稳定	137
四、 LC 振荡器的设计调整	141
五、 LC 振荡器应用举例	146
第四节 RC 振荡器	148
一、桥式 RC 振荡器	148
二、 RC 移相式振荡器	153
第五节 石英晶体振荡器	156
一、石英晶体的结构特性	157
二、石英晶体振荡器电路	160
三、石英晶体谐振器的正确使用	164
本章小结	166
习题	167

第十一章 可控硅及其应用	170
第一节 可控硅元件	170
一、概述	170
二、结构与原理	173
第二节 可控硅的型号和参数	175
第三节 触发电路	176
一、单晶体管的结构及特性	177
二、单晶体管的工作原理	179
三、单晶体管触发电路	180
第四节 可控硅整流电路	183
一、电路形式	184
二、工作过程	184
第五节 可控硅交流调压	186
一、电路形式	186
二、工作过程	186
第六节 可控硅开关电路	188
一、电路形式	188
二、工作过程	188
本章小结	189
习题	190
实 验	191
一、直流差动放大电路	191
二、集成运算放大器实现数学运算	194
三、晶体管稳压源	198
四、RC 移相振荡器	201
五、RC 正弦波振荡电路	203
六、可控硅直流调压	205

附 录	207
一、线性集成电路	207
二、硅稳压二极管参数	220
三、半导体稳压电源	226
四、常用稳压电源	231
五、可控硅整流元件	240

第七章 直流放大器

第一节 概 述

在前面的章节中，我们讨论的对象是变化不太缓慢的信号，因此放大电路各级之间通常采用阻容耦合的方式，就可以较好地达到既隔住直流成分，使每级的静态工作点独立而互不影响，又可以使交流信号顺利地传送；但当信号频率很低时，电容的容量必须非常大，以致这种耦合方式往往不能实现。

在自动控制及自动测量系统中，常常先要将一个非电量（如压力、流量、温度、转速、厚度、光照度等）的变化，用传感器（如测速装置、光电管、热电偶、拉压力传感器等）转变成电量（如电压、电流、电阻等）的变化，然后加以放大输送到控制机构（如电动机、继电器、电磁铁等）去进行控制或输送到仪表中去显示读数，以达到自动控制及自动测量的目的。而这些要进行放大的信号大多是变化极其缓慢的非周期性的直流信号，且非常微弱，往往只有几个 mV 甚至更小。

对于这种变化十分缓慢的非周期性的直流信号进行放大就不能用交流放大器，因为如采用阻容耦合放大器，则直流信号无法通过耦合电容，如采用变压器耦合同样直流信号是无法从初级感应到次级。为此人们采用了直接耦合放大器的形式即直流放大器。

我们来分析一下交流放大器和直流放大器在本质上有什

么区别。

为了能放大直流信号，无论在输入端、输出端或级与级之间都不能用电容或变压器耦合，只能是直接连通。由于采用了直接耦合，每一级放大器和它的输入信号之间，及与负载之间，都有直流通路存在。这样在考虑每一级的静态工作点时，必须同时考虑到输入、输出回路对放大器工作点的影响，而在交流放大器中，由于隔直元件存在，每一级静态工作点都是独立的，这样，在多级直流放大器中，静态工作点的计算和设置要比交流放大器复杂。

在交流放大器中，假设隔直电容容量足够大，则在相应的频率内电容可视作短路，而短路后的电路形式和直接耦合放大器类同。因此对变化量而言，由交流放大器等效电路所推导出来的有关放大倍数、输入电阻、输出电阻的计算公式对直流放大器依然适用，不同的是在直流放大器中，电压放大倍数是以输出电压变化量与输入电压的变化量之比来定义，即：

$$K = \frac{\Delta U_{so}}{\Delta U_{sr}}$$

此外，在多级放大器中，由于采用了直接耦合，使各级间存在着直流通路，当工作点不稳定而引起前级各点电位的变化，将被后面各级逐一放大，致使输出电压严重地偏离起始值，这个现象称作“零点漂移”。当然这成为多级直流放大器中必须解决的主要矛盾。

第二节 级间耦合与零点漂移

一、耦合方式

直流信号往往是非常微弱的，同样需要几级放大器来进

行放大,而直流放大器是不能用变压器或阻容耦合的,即只能用一根导线把前后级连接起来,如图 7-1 所示。

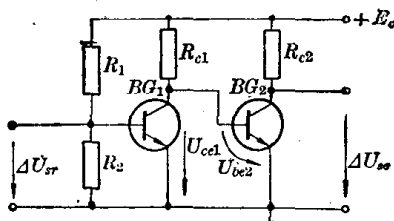


图 7-1 简单的直接耦合

由图可看出, BG_1 的集电极电位与 BG_2 的基极电位是相同的,但晶体管的 U_{be} 总是很小的,约 0.7 V,而 U_{ce} 应是几 V,若取 U_{be2} 为 0.7 V,则 U_{ce1} 亦为此值,致使 BG_1 管进入饱和区;若取 U_{ce1} 为几 V,则 U_{be2} 亦为几 V,致使 BG_2 管工作电流太大而烧毁,因此不能简单地连接了事。

解决办法之一是提高后级发射极电位,以增加前级的集电极工作电压,从而使工作点在线性区。如图 7-2 所示,在 BG_2 的发射极串一电阻 R_{e2} ,当 I_{e2} 流过 R_{e2} 时产生一个压降 $U_{e2} = I_{e2}R_{e2}$,而 $U_{ce1} = U_{be2} + U_{e2}$,这样使 BG_1 的集电极电位提高从而工作点进入了线性区。

但是接入 R_{e2} 后, R_{e2} 的负反馈作用将削减电压放大倍

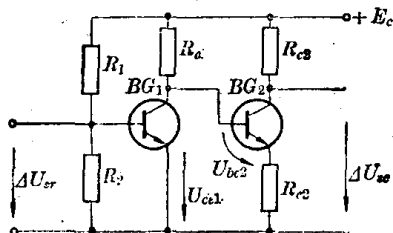


图 7-2 串接 R_{e2} 后的直耦放大器

数，又不能采用像交流放大电路中加接旁路电容的办法来解决，为克服这一缺点，我们常用几只硅二极管串接起来代替 R_{e2} ，或用稳压管来代替 R_{e2} ，如图 7-3(a)、(b) 所示。

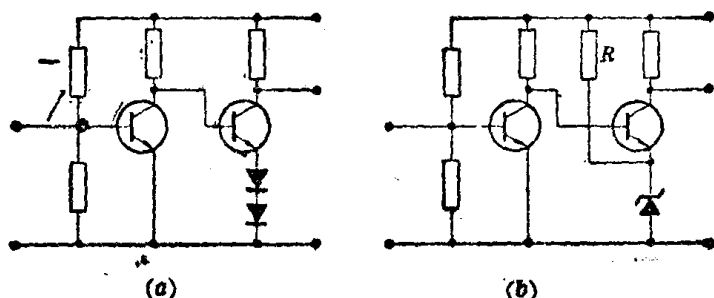


图 7-3 用硅二极管或稳压管代替 R_{e2}

因为硅二极管和稳压管都具有动态电阻远小于静态电阻的特性，因此用它们来代替 R_{e2} 之后，它对于直流工作点的建立，呈阻性，有压降，在直流情况下能起 R_{e2} 同样的作用，但对于被放大的变化信号则电阻极小，如同短路，信号在它上面几乎没有损失，可不降低原有的放大倍数。

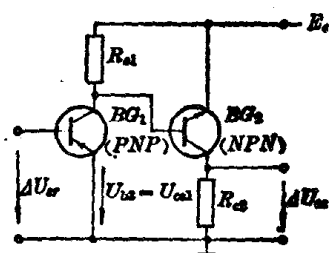
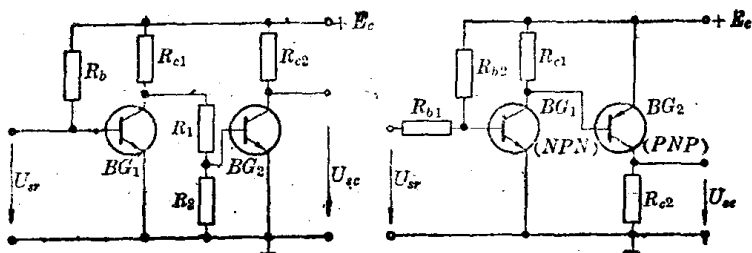


图 7-4 NPN 管与 PNP 管配合使用

配合使用，如图 7-4 所示。

还有一种解决办法是将 PNP 型管子与 NPN 型管子配合使用，如图 7-4 所示。

由于 NPN 管和 PNP 管的工作电压极性相反， BG_1 的发射极接电源正极，而 BG_2 的发射极须接电源负极，这样 BG_2 的基极电位 U_{b2} 的大小将接近 E_e ， BG_1 的 U_{ce1} 也可接近 E_e ，克服了 U_{ce1} 数值不能加大的缺点。另外，还有一些解决级间耦合的办法如图 7-5(a)、(b) 所示，其原理不再一一叙



(a) 电压分压耦合电路

(b) PNP 与 NPN 另一种组合电路

图 7-5 解决级间耦合的几种办法

述了。

例 7-1 在图 7-6 电路中，电源 $E_c = 20\text{ V}$ ，工作点取 $U_{ce1} = U_{ce2} = 6\text{ V}$ ， $I_{c1} = 1\text{ mA}$ ， $I_{c2} = 10\text{ mA}$ ， $R_{e1} = 1\text{ k}\Omega$ ，试计算 R_{b1} ， R_{e2} 和 R_{c2} 。

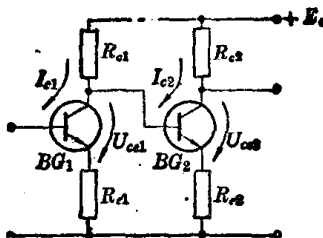


图 7-6 级间耦合计算举例

解 忽略 BG_1 的基极电流，则

$$I_{e1} = I_{c1} = 1\text{ mA}$$

R_{e1} 上压降

$$\begin{aligned} U_{Re1} &= E_c - U_{Rc1} - U_{ce1} = E_c - I_{c1}R_{c1} - U_{ce1} \\ &= 20 - 1 \times 1 - 6 = 13\text{ V} \end{aligned}$$

$$\therefore R_{b1} = \frac{U_{Re1}}{I_{e1}} = \frac{13}{1} = 13\text{ k}\Omega$$

$$BG_1 \text{ 的集电极电位 } U_{c1} = E_c - U_{Re1} = 20 - 13 = 7\text{ V}$$

如果没有 R_{e2} ，则 BG_2 的基极偏流将大大增加，会破坏 BG_2 的正常工作，甚至烧毁管子，为此必须把后级发射极的电位提高到 $U_{Re2} = U_{b2} - U_{be2} = 7 - 0.7 = 6.3 \text{ V}$ 左右。

$$\because I_{e2} \approx I_{c2}$$

$$\therefore R_{e2} = \frac{U_{Re2}}{I_{e2}} = \frac{6.3}{10} = 0.63 \text{ k}\Omega (\text{取 } 620 \Omega)$$

$$R_{e2} = \frac{E_c - I_{e2}R_{e2} - U_{ce2}}{I_{e2}} = \frac{20 - 10 \times 0.63 - 6}{10} = 0.77 \text{ k}\Omega (\text{取 } 750 \Omega)$$

为使 R_{e2} 加入后不降低放大倍数，可挑选一只工作电流为 10 mA 、稳定电压值为 6.3 V 的稳压管(为 $2\text{DW}7\text{C}$) 来代替 R_{e2} 。

二、零点漂移

解决了耦合方式以后，是不是就可以随意地增加级数来提高放大倍数呢？

在实验中能看到：对于两级以上的放大器，即使将输入端短接，输出电压也会出现忽大忽小、忽快忽慢的波动，如图 7-7 所示，这就是“零点漂移”现象。

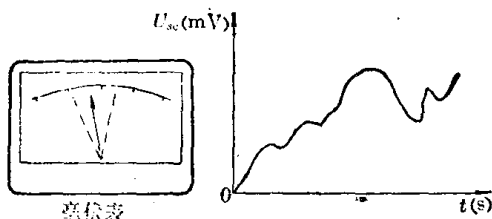


图 7-7 零点漂移现象

这种现象随着级数增多而增大，图 7-8 所示的三级直流放大器各级增益均为 10，当输入信号为零时，而由于温度变

化使每级输出电压变化了 0.1 V ，这样第二级输出电压的漂移除了本身的 0.1 V 以外，还包含第一级输出的漂移经第二级的放大后所引起的变化，可达 1 V 之多，同样第三级输出电压的漂移主要是第一级经第二、第三级放大后的结果，这样可使我们得到两个十分有用的结论：

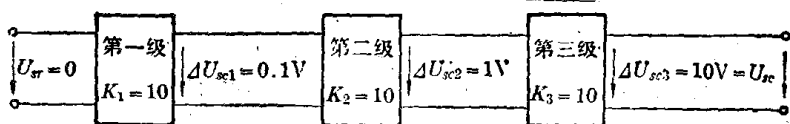


图 7-8 多级放大器中的零点漂移

第一、放大器总的放大倍数愈高，输出电压的漂移也愈严重。

第二、在多级放大器中，输出端的零点漂移，主要是由输入级的零点漂移所决定，因此要减小零点漂移，须着重在第一级加以解决。

当然在比较两个放大器的零点漂移时，单看输出电压漂移的大小是不够的，还必须考虑到放大倍数的不同。

也就是说：当我们为了提高放大倍数而增加级数时，也加大了输出的零点漂移，可见既要提高放大倍数，又要减少零点漂移，就成了设计高放大倍数的直流放大器的主要矛盾了。

三、产生零点漂移的原因及抑制办法

产生零点漂移的因素很多，如电路元器件参数的变化，外界的干扰信号，电源的波动以及晶体管参数随温度的变化等，都会引起输出电压的漂移，但实践证明，温度变化是产生零点漂移的主要因素，也是最难克服的因素。这是因为电源波动可采用稳压源来解决，电阻参数的变值，可通过老化处理来

提高它的稳定性。而温度变化对晶体管参数影响就成为主要因素了。

现在分别讨论 U_{be} , β , I_{cbo} 几个主要参数受温度影响的情况。

1. U_{be} 的温度特性

从图 7-9 看出, U_{be} 是温度 t 的函数, 亦是 I_b 的函数, 当然与 I_c 亦有关, 因此在讨论 U_{be} 的温度特性时, 还应说明是在多大的 I_b 下取得的。例如图中当 $I_b = 40 \mu A$ 时, 查出 $t = 150^\circ C$ 时 $U_{be} = 0.49 V$; $t = -70^\circ C$ 时, $U_{be} = 0.9 V$; 则 U_{be} 与 t 相对变化量为:

$$\frac{\Delta U_{be}}{\Delta t} = \frac{0.49 - 0.90}{150 - (-70)} = -0.00186 V/^\circ C$$

或为 $-1.86 mV/^\circ C$

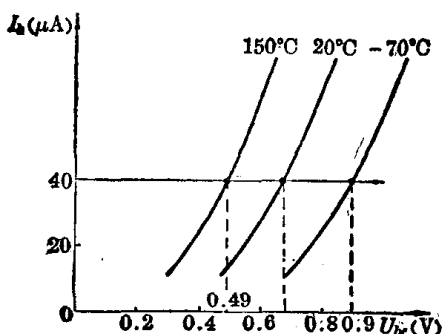


图 7-9 温度变化对 U_{be} 的影响

2. β 的温度特性

根据实验可得图 7-10, 当温度升高时, 对应于 I_{b2} 的 I_{c2} 要比对应于 I_{b1} 的 I_{c1} 增加得更多些。

即:

$$\frac{I'_{c2} - I'_{c1}}{I'_{b2} - I'_{b1}} > \frac{I_{c2} - I_{c1}}{I_{b2} - I_{b1}}$$

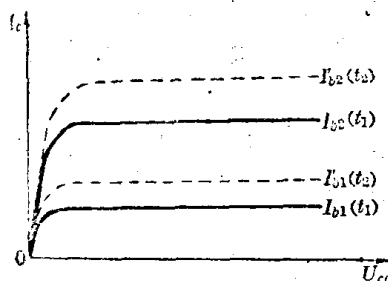


图 7-10 温度变化对 β 的影响

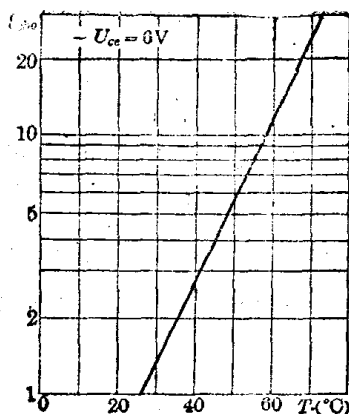


图 7-11 温度变化对 I_{c0} 的影响

一般有这样的关系：温度每升高 1°C ， β 值要增加 $0.5 \sim 1\%$ ，但它的分散性较大，即对同一型号且 β 值相同的管子来说，它们的温度系数可以相差很大。

3. I_{c0} 的温度特性

图 7-11 画出了三极管 3 AG 1 的 I_{c0} 与温度的关系，从图中可看出温度每升高 10°C ， I_{c0} 就增加一倍。

由前面讨论，如要抑制漂移，首先要解决第一级放大管的参数受温度变化的影响，一般可采用以下措施：

(1) 选用高质量的硅管补偿零点漂移。硅管的 I_{c0} 绝对值比锗管小几十到几百倍，所以硅管受温度的影响要比锗管小得多。

(2) 利用热敏元件去补偿放大管的零漂，如图 7-12 所示。阻

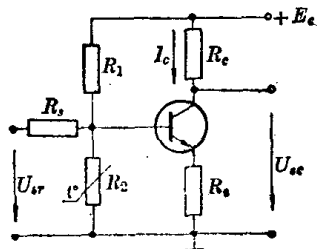


图 7-12 利用热敏元件补偿零点漂移