

电力工程设计手册



上海科学技术出版社

R72.073
187
301

电力工程设计手册

(第四册)

水利电力部西北电力设计院
水利电力部华东电力设计院 编
水利电力部东北电力设计院

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书介绍晶体管电路在电力工程中的应用,内容包括常用晶体管元件的基本特性,整流电路、滤波电路和对称分量滤波器,小容量变压器和电感元件的设计,晶体管放大器与正弦振荡器,逻辑电路,晶体管数字电路,直流电源回路,出口和信号装置,提高晶体管设备可靠性方面的问题及措施,主设备的晶体管保护装置,电网的晶体管保护装置,晶体管远动装置,巡回检测装置,晶体管集中控制装置,自动装置。可供从事发变电工程电气设计、运行、安装、制造人员和电力专业师生参考。

电 力 工 程 设 计 手 册

(第 四 册)

水利电力部西北电力设计院

水利电力部华东电力设计院 编

水利电力部东北电力设计院

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 上海市印刷三厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 47.5 插页 13 字数 1,622,000

1982年3月第1版 1982年3月第1次印刷

印数 1—28,000

书号: 15119·2001 定价: 6.00元

前 言

《电力工程设计手册》(一)、(二)、(三)册介绍了电力工程设计的基本原理、常用接线和各种设备,自出版以来,得到广大电力工作者的欢迎。随着电子工业的迅速发展,电子技术和自动化的应用日广,在电力工业中各种晶体管继电保护、自动和远动装置等得到了推广使用。通过科研、设计、制造和运行单位的积极努力,更多的晶体管装置已正式生产,其中不少装置通过运行的检验,证明性能良好,满足电力系统运行的要求。为了适应四化建设需要,促使新技术和新设备在电力工业中进一步推广使用,而编写本手册。

本手册中的晶体管电路是从设计计算、元件参数选择开始,介绍各种晶体管继电保护、自动和远动装置的原理和接线等内容,希望能做到实用化和系统化,以便读者参考。

本分册是在总结已有运行经验的装置的基础上编写的,由华东电力设计院王春生同志,东北电力设计院梁懋同志,西北电力设计院邢若海、卓乐友等同志分章编写。在编写过程中得到许多科研、学校、制造和运行单位同志的支持和帮助,在此表示深切的谢意。由于编者水平有限,错误和不足之处,欢迎广大读者批评指正。

编 者 1980年11月

目 录

第四十二章 概述	2251	四、电容滤波器	2289
第四十三章 常用晶体管元件的基本特性	2252	五、L型滤波器	2290
43-1 节 二极管	2252	六、 π 型滤波器	2291
一、常用晶体二极管	2252	七、并联的谐振滤波器	2292
二、稳压二极管	2253	八、串联的谐振滤波器	2292
三、隧道二极管	2254	九、有源滤波器	2293
四、单结晶体管	2254	44-5 节 对称分量滤波器	2293
43-2 节 三极管	2255	一、对称分量滤波器的作用和分类	2293
一、晶体三极管	2255	二、对称分量滤波器的组成原理	2294
二、场效应晶体管	2257	三、滤波器的输出电压和电流	2294
43-3 节 可控硅元件	2259	四、滤波器的输出功率	2295
第四十四章 整流电路、滤波电路和对称分量 滤波器	2261	五、滤波器的制作要求	2296
44-1 节 整流电路	2261	六、负序电压滤波器	2296
一、单相半波整流电路	2261	七、负序电流滤波器	2297
二、单相全波整流电路	2262	八、零序电压滤波器	2300
三、单相桥式整流电路	2263	九、复合电流滤波器	2301
四、三相整流电路	2263	十、综合变流器	2304
五、三相桥式整流电路	2264	第四十五章 小容量变压器和电感元件的设计	2309
六、裂相整流电路	2265	45-1 节 小容量变压器的材料和结构	2309
七、负载为电阻和电感时的整流电路	2266	一、磁导体	2309
八、负载为电阻和电容时的整流电路	2268	二、导线	2309
九、倍压整流电路	2272	三、铁芯结构	2309
十、整流电路的功率、效率和功率因数	2275	四、线圈	2310
十一、整流元件的电压和电流	2276	45-2 节 电源变压器的计算	2311
44-2 节 可控硅整流电路	2276	一、变压器的功率	2311
一、单相半波可控整流电路	2276	二、最大工作磁通密度 B_m	2311
二、单相全波可控整流电路	2278	三、导线电流密度 J	2311
三、单相桥式可控整流电路	2279	四、铁芯截面的填充系数 k_F	2311
四、三相半波可控整流电路	2280	五、窗口的填充系数 k_c	2312
五、三相桥式半控整流电路	2281	六、铁芯截面和窗口面积乘积 $S_F S_w$	2312
44-3 节 可控硅整流器的触发电路	2283	七、线圈的匝数	2312
一、对触发电路的要求	2283	八、导线的直径和截面	2313
二、单个晶体管触发电路	2283	45-3 节 整流变压器的计算	2313
三、单结晶体管触发电路	2284	45-4 节 中间变流器的计算	2313
四、电阻-电容桥式移相的触发电路	2285	一、中间变流器的分析	2313
五、交流正弦同步电压三角波移相触发电路	2286	二、中间变流器的计算	2314
六、带电流正反馈锯齿波移相控制触发电路	2287	45-5 节 电抗变压器的计算	2315
44-4 节 滤波电路	2288	一、电抗变压器的特性	2315
一、整流电路输出电压的脉动	2288	二、磁路计算	2316
二、滤波电路的质量指标	2288	三、电抗变压器的磁阻计算法	2318
三、电感滤波器	2289	四、电抗变压器的简化磁路计算法	2320
		五、电抗变压器的综合磁化曲线计算法	2321

45-6 节 脉冲变压器的计算	2321	46-8 节 石英晶体振荡器	2391
一、脉冲变压器的参数对脉冲波形的影响	2321	一、石英晶体的特性与参数	2391
二、脉冲变压器的计算	2323	二、振荡频率接近于并联谐振频率的晶体振荡器	2391
45-7 节 电感元件的计算	2325	三、振荡频率接近于串联谐振频率的晶体振荡器	2392
一、电感元件的特性	2325	四、四端式晶体振荡器	2393
二、带气隙电感元件的计算	2326	五、晶体稳频稳幅桥式电路	2393
三、电感元件的计算步骤	2327	46-9 节 压电音叉振荡器	2394
附录 45-1 电源变压器的工作特性计算	2328	一、压电音叉元件的基本特性	2394
附录 45-2 各种导线的牌号及规格表	2333	二、压电音叉振荡器的设计方法	2394
附录 45-3 各种硅钢片的数据及标准	2338	第四十七章 逻辑电路	2395
第四十六章 晶体管放大器与正弦振荡器	2342	47-1 节 开关反相器(非门电路)	2395
46-1 节 晶体管小信号放大器	2342	47-2 节 门电路	2397
一、晶体管放大器的基本特点	2342	一、或门电路	2397
二、晶体管放大电路的基本关系式	2343	二、与门电路	2401
三、RC 耦合单级放大器	2345	三、否门电路	2405
四、带变量器单级放大器	2353	四、复合门电路	2406
五、RC 耦合多级放大器	2356	47-3 节 触发器	2410
六、复合管放大器	2358	一、继电器触发器	2410
七、晶体管小信号多级放大器的设计方法	2359	二、双稳态触发器	2412
46-2 节 晶体管功率放大器	2360	三、单稳态触发器	2416
一、甲类单端变量器耦合功率放大器	2360	四、发射极耦合触发器(施密特触发器)	2417
二、乙类推挽功率放大器	2364	47-4 节 时间元件	2420
三、无变量器功率放大器	2366	一、利用电容充电原理构成的延时电路	2420
46-3 节 晶体管的散热与并联运用	2368	二、利用电容放电原理构成的延时电路	2423
一、散热的方法	2368	三、延时动作的复合时间电路	2424
二、基本关系式	2368	四、记忆电路	2425
三、散热板的设计方法	2369	五、一次脉冲电路	2427
四、晶体管的并联运用	2369	第四十八章 晶体管数字电路	2429
46-4 节 负反馈放大器	2370	48-1 节 计数编码与寄存器	2429
一、常用负反馈放大器的结构形式	2370	一、计数编码环节	2429
二、四种常用的负反馈放大器	2370	二、寄存器	2433
三、混合线圈负反馈放大器	2376	48-2 节 译码与分配器	2436
四、负反馈放大器的设计方法	2378	一、译码器	2437
五、防止负反馈放大器自激的方法	2378	二、分配器	2439
46-5 节 晶体管正弦振荡器	2379	48-3 节 数-模转换器(D-A 转换)	2442
一、晶体管正弦振荡器的分类	2379	一、并行 D-A 转换器	2443
二、晶体管正弦振荡器的工作特征	2379	二、串行 D-A 转换器	2445
46-6 节 RC 振荡器	2380	48-4 节 模-数转换器(A-D 转换)	2445
一、电流放大型 RC 振荡器	2380	一、逐次反馈比较式 A-D 转换器的工作特征	2446
二、电压放大型 RC 振荡器	2382	二、逐次反馈比较式 A-D 转换器的设计方法	2446
三、RC 相移振荡器	2383	48-5 节 数字显示电路	2458
46-7 节 LC 振荡器	2384	一、辉光数字管显示电路	2458
一、变量器反馈式振荡器(LC 谐振型)	2384	二、投影显示器与边光显示器的显示电路	2460
二、电感三点式振荡器(哈脱莱型)	2385	三、荧光数码管显示电路	2460
三、电容三点式振荡器(科皮兹型)	2386	第四十九章 直流电源回路	2463
四、电容三点式改进型振荡器(克拉普式)	2386	49-1 节 概述	2463
五、LC 振荡器的设计方法	2387		
六、稳定振荡频率的措施	2390		

一、直流电源回路的方式	2463
二、直流电源回路的要求	2463
49-2 节 稳压二极管稳压电路	2463
一、稳压二极管稳压电路的接线	2463
二、稳压电路的质量指标	2464
三、稳压电路的计算	2465
49-3 节 并联型晶体管稳压电路	2465
一、并联型晶体管稳压电路的接线	2465
二、稳压电路的质量指标	2466
三、稳压电路的计算	2466
49-4 节 串联型晶体管稳压电路	2467
一、工作原理和方框图	2467
二、稳压电路的各个组成部分	2468
三、稳压电路的质量指标	2469
四、稳压电路的计算	2470
五、提高稳压电路稳定性的措施	2471
六、提高稳压电路温度特性的措施	2472
七、稳压电路的过载和短路保护	2473
八、输出电压可调的稳压电路	2474
九、稳压电路的测量	2476
49-5 节 晶体管电源变换器	2476
一、晶体管电源变换器的方框图	2476
二、单管式变换器	2477
三、推挽式变换器	2478
四、带功率放大器的变换器	2479
五、变换器的计算	2479
49-6 节 逆变换器	2481
一、晶体管逆变换器	2481
二、可控硅并联逆变换器	2482
三、并联逆变换器的计算	2484
四、逆变换器的触发电路	2485
第五十章 出口和信号装置	2488
50-1 节 出口电路	2488
一、有接点出口电路	2488
二、可控硅出口电路	2489
三、无接点控制的可控硅开关电路	2491
50-2 节 信号电路	2492
一、利用电压自保持线圈实现自保持的信号电路	2492
二、用微型中间继电器实现自保持的信号电路	2492
三、采用小可控硅实现自保持的信号电路	2492
四、无接点信号电路	2493
五、信号电路的电源	2496
六、出口或信号电路用继电器	2496
第五十一章 提高晶体管设备可靠性方面的问题及措施	2498
51-1 节 电子元件的老化筛选	2498
一、电子元件老化筛选的要求	2498
二、电子元件老化筛选的方法	2502
51-2 节 提高设备的焊接、组装工艺质量和绝缘水平	2504
一、提高焊接质量	2504
二、提高接插件质量保证接触可靠	2505
三、提高绝缘水平	2505
51-3 节 电路设计方面提高可靠性措施	2505
一、逻辑方块图的设计方面	2505
二、电路的选择和设计	2506
三、元件参数设计方面提高可靠性措施	2512
四、电源方面应注意的问题	2512
五、加装防止设备误动的闭锁措施	2513
51-4 节 关于干扰问题及抗干扰措施	2513
一、二次回路暂态过电压(干扰)产生的原因	2513
二、干扰过电压侵入到二次回路的途径	2515
三、干扰的分类	2516
四、减少干扰影响的措施	2516
五、抗干扰试验标准	2520
51-5 节 加强晶体管继电保护、通信、远动、控制等设备的调试、运行和维护工作	2522
第五十二章 主设备的晶体管保护装置	2523
52-1 节 电流速断及过电流保护装置	2523
一、整流、滤波式电流速断和过电流保护	2523
二、测量瞬时值的电流继电器	2529
52-2 节 电压继电器	2530
一、动作原理	2530
二、调相机的低电压保护装置	2531
三、厂用电动机的低电压保护装置	2532
四、测量瞬时值的电压继电器	2535
52-3 节 反时限过电流继电器	2535
一、用三极管元件构成的反时限过电流继电器	2535
二、由单结晶体管元件构成的反时限过电流继电器	2536
52-4 节 负序电流继电器	2538
52-5 节 负序电压继电器	2541
52-6 节 发电机定子匝间短路保护装置	2541
一、九个引出线端子的匝间短路保护	2541
二、六个引出线端子的匝间短路保护	2542
52-7 节 发电机负序反时限电流保护	2544
一、负序反时限继电器的设计依据	2544
二、负序反时限保护装置	2547
52-8 节 发电机定子接地保护	2548
52-9 节 转子接地保护	2554
一、利用迭加直流电源原理的转子接地保护装置	2554
二、利用迭加交流电源原理的转子接地保护装置	2557
52-10 节 方向继电器	2559

一、电流方向继电器	2562	二、距离保护装置的起动元件	2657
二、负序方向继电器	2563	三、阻抗测量元件	2657
三、零序电流方向继电器	2568	四、晶体管距离保护装置的接线	2669
52-11 节 变压器高压侧中性点接地的接地保护装置	2568	53-3 节 高频保护装置	2671
52-12 节 差动保护	2571	一、高频保护的方式	2671
一、纵联差动保护装置的动作原理	2571	二、电流相位比较式高频保护	2674
二、二次谐波制动原理构成的纵联差动保护	2574	三、方向比较式高频保护	2687
三、按鉴别波形间断原理构成的纵联差动保护	2579	四、分支线对高频保护的影响	2698
四、发电机、调相机的纵联差动继电器	2593	五、单相重合闸式两相运行对高频保护的影响	2703
52-13 节 发电机的失磁保护	2594	六、长线路对高频保护的影响	2708
一、失磁的原因及危害	2594	七、串联电容对高频保护的影响	2714
二、失磁后状态和作为失磁保护装置的判据分析	2595	53-4 节 综合重合闸装置	2717
三、发电机失磁保护装置	2597	一、综合重合闸装置应满足的要求	2717
四、失磁保护装置的分析	2606	二、综合重合闸装置的主要组成部分	2719
52-14 节 逆功率保护	2610	三、综合重合闸在运行中应注意的几个问题	2721
52-15 节 瓦斯保护	2612	四、综合重合闸装置的接线	2724
52-16 节 主设备保护装置的出口、信号及闭锁、监视和检测回路的特点	2613	53-5 节 线路纵联差动保护装置	2728
一、出口回路	2613	一、相位比较式纵联差动保护装置	2728
二、信号回路	2615	二、桥式接线纵联差动保护装置	2731
三、闭锁、监视和检测回路	2616	53-6 节 母线保护装置	2733
52-17 节 主设备保护装置电源设备的特点	2618	一、母线保护的应用	2733
附录 52-1 发生接地故障时基波零序电压和三次谐波电压的分析计算	2620	二、元件固定连接的母线差动保护	2733
一、基波电压与三次谐波电压的一般概念	2620	三、电流相位比较式母线保护	2734
二、基波零序电压的分析	2621	四、母联相位比较式母线保护	2739
三、三次谐波电压的分析	2624	五、电压差动母线保护	2740
附录 52-2 发电机失磁后测量阻抗的变化及特殊运行情况下对测量阻抗影响的试验与分析	2626	六、带制动特性的母线保护	2741
一、发电机失磁后的测量阻抗	2626	53-7 节 电流保护和三相自动重合闸装置	2742
二、发电机和系统运行状态的阻抗表示方法	2627	一、电流保护和三相重合闸装置的方框图	2742
三、发电机失磁特性的试验分析	2629	二、电流保护和三相重合闸装置的接线	2743
四、特殊运行情况下的阻抗变化特性的试验与分析	2630	三、检查无电压和同期回路	2744
第五十三章 电网的晶体管保护装置	2635	53-8 节 接地信号装置	2744
53-1 节 零序方向电流保护装置	2635	一、单相接地时的电压和电流	2744
一、零序方向电流保护装置的方框图	2635	二、反应工频电容电流的接地保护装置	2746
二、零序功率方向元件	2636	三、反应五次谐波分量的接地保护装置	2748
三、零序方向电流保护装置的接线	2642	四、反应暂态分量首半波的接地保护装置	2750
四、单相重合闸或两相运行对零序电流保护的影响	2643	第五十四章 晶体管运动装置	2753
五、变压器零序阻抗对零序电流保护的影响	2648	54-1 节 电量变送器	2753
53-2 节 距离保护装置	2656	一、交流电流变送器	2753
一、距离保护装置的主要组成部分	2656	二、交流电压变送器	2754
		三、三相有功与无功功率变送器	2754
		四、工频频率变送器	2763
		五、直流毫伏变送器	2764
		六、电阻模拟式功率总加器	2769
		七、磁调制式功率总加器	2771
		八、直流电压变送器	2774
		九、直流电流变送器	2776
		十、直流阻抗变送器	2777
		54-2 节 单路遥测装置	2778
		一、遥测发送装置	2778

二、遥测接收装置	2783	号回路	2931
54-3 节 远动音频载波机	2786	56-3 节 中央信号装置	2933
54-4 节 综合远动装置	2791	一、事故信号装置	2935
一、模拟式综合远动装置	2791	二、预告信号装置	2936
二、YZY1 系列数字式综合远动装置	2823	三、闪光信号装置	2936
三、其他系列数字式综合远动装置	2861	四、亮屏与暗屏信号装置	2936
第五十五章 巡回检测装置	2867	五、自动停电钟装置	2939
55-1 节 概述	2867	六、强电系统的晶体管中央信号装置	2939
一、用途	2867	56-4 节 测量系统接线	2942
二、分类	2867	56-5 节 晶体管集控装置的电源系统及其 保护、信号装置	2944
三、巡回检测装置中的集成电路	2867	一、电源系统	2944
55-2 节 SJBZ-3000 系列巡回检测装置	2870	二、晶体管集控装置电源系统的保护、信号装 置	2946
一、主要技术性能	2870	56-6 节 晶体管集控装置的闭锁和监视接 线	2953
二、整机工作原理	2874	56-7 节 晶体管集控屏的结构和布置	2954
三、被测量输入回路	2874	第五十七章 自动装置	2955
四、采样控制器	2878	57-1 节 自动准同期装置	2955
五、数据放大器	2880	一、ZZQ-3A 装置特点	2955
六、模数转换器	2880	二、ZZQ-3A 动作原理	2955
七、运算器	2887	三、ZZQ-3A 和 ZZQ-4 的主要技术数据	2966
八、程序控制器	2895	四、ZZQ-5 型自动准同期装置的特点	2966
九、制表打印控制器	2900	五、设计配合的几个问题	2968
十、报警逻辑控制器	2901	57-2 节 备用电源自动投入装置	2972
十一、报警打印控制器	2902	57-3 节 水电站水轮机自动程序控制	2977
十二、数字钟	2903	一、对操作系统的设计要求	2977
十三、选测寄存器	2905	二、操作接线	2977
十四、数码输出回路	2905	57-4 节 输煤集中控制与自动化	2982
十五、整定盘	2905	一、输煤集中控制的设备及范围	2983
十六、调整维护盘	2907	二、输煤集控与自动化的原理接线	2983
十七、操作指示盘	2907	三、输煤设备的控制、信号回路	2991
十八、装置的保护	2908	四、中央信号及闪光信号装置	2997
十九、远方控制台	2909	57-5 节 自动按周率减负荷装置	2997
二十、装置的电源	2910	一、动作原理	2999
第五十六章 晶体管集中控制装置	2912	二、设计注意事项	3000
56-1 节 控制方式及接线	2912	附录	3001
一、模拟选线开关操作的“四合一”控制方式	2913	附录 1 逻辑电路图例符号	3001
二、编码选线控制方式	2919	附录 2 特殊元件图例符号	3001
56-2 节 信号系统接线	2927		
一、断路器的位置信号	2927		
二、断路器事故跳闸信号回路	2930		
三、隔离开关的模拟信号	2931		
四、继电保护或自动装置动作的事故和预告信			

近年来,我国电子工业及其应用技术得到很大的发展,在电力工业中,采用晶体管电路的继电保护、运动、通信、各类自动和控制设备已在发电厂和变电所中应用。随着社会主义革命与建设的飞跃发展,这些设备将更普遍地得到推广使用。

电力系统的迅速发展,对继电保护、运动、通信、自动和控制设备提出了更高的要求,由半导体器件构成的设备比机电型设备更能适应这些要求,它具有动作迅速、灵敏度高、体积小、精度高、节省原材料和维护、调试方便等优点。我国从1958年起就有一些科研、设计、制造和学校等单位开始研究和试制各种晶体管继电保护、运动、通信、自动和控制设备,但进展缓慢。近年来,广大工人、干部和技术人员结合许多工程项目(如刘家峡水电站,330 kV 输变电工程、210 电厂等),实行科研、设计、制造、学校和运行单位相结合,加快了晶体管设备在电力工业中应用的步伐,研究试制成功多种设备。这些设备投入运行以来,对电力系统的安全发电和供电作出了很大贡献。此外,许多单位编写了有关技术资料,举办了各种学习班,为晶体管知识的普及和晶体管设备的应用创造了有利条件。

晶体管继电保护装置在各个部门的努力下取得了很大的成绩,许多制造厂生产了各种系列的产品,质量有很大的提高,同时也制造了一些机电型产品难于实现的新颖装置。已经投入运行的继电保护装置在保证电力系统的安全运行方面发挥了积极的作用,不少单位的晶体管继电保护装置的正确动作率已经接近或超过机电型设备的水平。

晶体管逻辑控制方式在一些发电厂和变电所中试用,多年来动作可靠性较高,调试、运行和维护较为方便,尤其是变电所将测量、控制、信号和继电保护装置联合设计的“四合一”控制台方案,接线简单,操作方便,得到运行部门的好评,制造厂已作为正式产品投入生产。

晶体管运动装置近年来发展很快,有许多产品已代替原有机电型及电子管型的装置,如已成批生产的YZM 系列及SZY 系列等,它们在保证电力系统安全、经济运行中发挥了一定的作用。

晶体管电力线高频载波机已广泛得到使用,如ZDD-5 型及ZDD-7 型等载波机是在不断总结运行经验的基础上加以改进的产品,现已正式投入生产。

其他如晶体管及集成电路构成的巡回检测装置、各种数字式仪表、水轮机自动启停、输煤设备集中控制、自动准同期和备用电源自动投入等装置,在电力系统中正在逐步推广使用。

在对待晶体管设备这个问题上容易产生两种偏向:一种是只看到它的优点,未经认真的运行考验,即大量推广使用;另一种是只看到它存在的问题,不做细致的分析和研究工作,一概不予采用。两者都是片面的,都影响了各类晶体管设备的应用与发展。我们应采取积极、慎重的态度,对待存在的问题应在深入调查研究的基础上,总结运行经验,做认真的试验与分析工作,不断改进与提高,使这些设备在电力系统中发挥更大的作用。根据调查研究和统计资料表明,当前,晶体管设备的主要问题是可靠性问题,影响可靠性的原因主要是:使用的元件没有进行严格的筛选,制造工艺不良,抗干扰措施不够完善,电路设计考虑不周,运行维护不当等。针对这些问题,广大工人及技术人员通过反复实践,对各种产品已采取一系列提高可靠性措施;对已投入运行的晶体管设备也进行了整顿和提高,这样就大大提高了这些设备的可靠性;对于存在的一些问题,如抗干扰措施,电气原理设计等,不少单位都做了大量的试验和研究工作,取得了许多成果,给晶体管设备的推广使用提供了数据与经验。这说明可靠性问题通过努力是可以解决的,晶体管设备今后必将得到更大的发展。

43-1 节 二 极 管

一、常用晶体二极管

常用的晶体二极管有以下几种:

1. 普通二极管: 如 2AP、2CP 系列等, 用于高频检波、鉴频、限幅和小电流整流等。
2. 开关二极管: 如 2AK 系列等, 多用于电子计算机、脉冲控制、开关电路等。
3. 整流二极管: 如 2CZ 系列等, 用于各种功率的整流电路。

此外还有稳压二极管(如 2CW、2DW 系列)、隧道二极管(如 2BS 系列)等, 这在以后再介绍。

晶体二极管的伏安特性如图 43-1 所示。

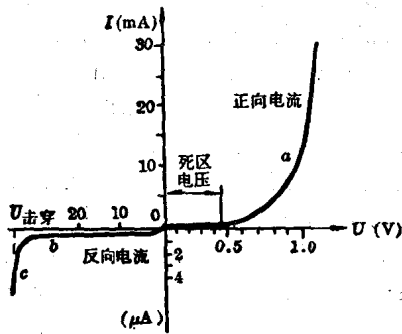


图 43-1 二极管的伏安特性

设计选择时应注意以下几点:

1. 长期使用时, 二极管通过的正向电流应小于规定的最大整流电流, 否则时间长了 PN 结就会烧坏。一般大于 1A 的较大功率二极管, 多按规定加装散热片。

产品样本中规定二极管的整流电流, 有些二极管的这个电流范围很大, 如 2CP10~2CP20 为 5~100 mA, 是制造厂考虑产品性能的差异性, 设计时一般应按下限电流 5 mA 来考虑。

选用时要有一定的安全系数, 以保证工作的可靠性。

2. 工作时的最高电压, 应小于二极管的最大反向电压, 否则二极管就会被击穿。选用时要有一定的安全系数, 以保证工作的可靠性。

3. 二极管的正向压降: 锗管为 0.2~0.4 V; 硅管为 0.6~0.8 V。二极管的死区电压, 锗管一般为 0.2

V, 硅管一般为 0.6 V, 在正向电压小于死区电压时, 管子仍处于截止状态。因此, 一般信号电压小时宜选用锗管。图 43-1 所示为硅二极管的特性曲线。

4. 最大反向电流应越小越好, 如过大会使整流效率下降, 甚至可使二极管烧坏。硅管的反向电流较小(约几个 μA), 锗管大一些(约几十到几百 μA)。

5. 二极管的伏安特性将随温度变化而变化。温度升高, 如工作电压不变, 电流增加; 温度下降, 正向与反向电流均减少。产品型录中规定二极管的最高使用温度, 是指二极管在长期工作时所允许的最高工作温度, 如超过此温度时, 反向电流加大, 影响整流工作, 甚至会把管子烧坏。

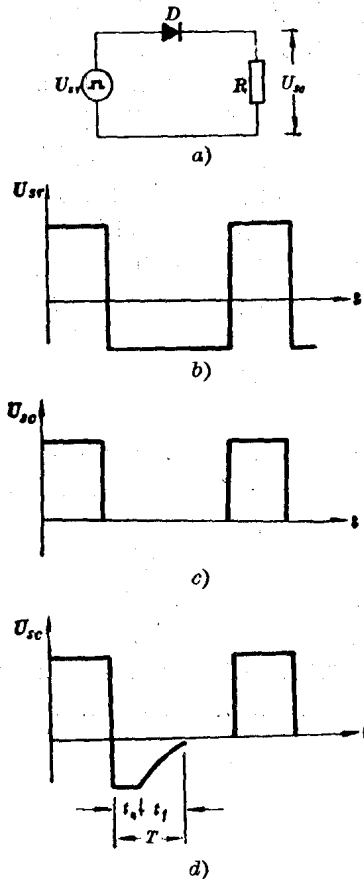


图 43-2 二极管的开关特性

a—电路; b—输入电压; c—理想的 PN 结输出特性; d—实际输出特性

6. 二极管的开关特性: 从图 43-2 可看出, 如输入电压 U_{in} 是矩形电压波, 实际的输出电压 U_{out} 将发生畸变。因为二极管自正向工作突然转为反向工作时, 反向电流 I_r 并不立即趋于反向饱和电流值。电流的大小取决于回路电压和电阻值。经时间 t_s 后, I_r 开始下降, 经时间 t_f 后, I_r 到达反向饱和值。 t_s 称为存贮时间, t_f 称为下降时间, $t_s + t_f = T$, T 称为反向恢复时间。

时间 T 的存在影响二极管在开关电路中的应用。因此, 在开关电路选用 T 值较小的开关管。

7. 二极管的频率特性: 图 43-3 为二极管的高频等值电路。 R_s 为二极管本身的电阻和电极的引线电阻, R_D 为 PN 结电阻, C_{PN} 为 PN 结电容, C_D 为扩散电容, $C_0 = C_{PN} + C_D$ 称为极间电容。

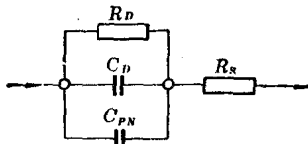


图 43-3 二极管的高频等值电路

在正向电压作用下, $R_D \ll R_s$, R_D 与 C_0 并联, 因此正向阻抗基本上等于 R_s 。在反向电压作用下, R_D 很大, 因 C_0 很小, 低频时容抗 $\frac{1}{j\omega C_0}$ 很大, 它们并联的阻抗值远比 R_s 大, 因此可略去 R_s 。但在高频运行情况下, $\frac{1}{j\omega C_0}$ 值又比 R_D 小, 所以反向时的阻抗 Z_r 为:

$$Z_r = \frac{\frac{1}{j\omega C_0} R_D}{R_D + \frac{1}{j\omega C_0}} \approx \frac{1}{j\omega C_0} \quad (43-1)$$

由上面得出的反向阻抗与正向阻抗之比为 $\frac{1}{R_s \omega C_0}$ 。当 $R_s \omega C_0$ 趋于 1 时, 二极管就失去检波作用, 因此二极管的截止频率 f_D 为:

$$f_D = \frac{1}{2\pi R_s C_0} \quad (43-2)$$

对用于高频回路的二极管应选用 f_D 值较高的二极管。

二、稳压二极管

稳压二极管的伏安特性如图 43-4 所示。

设计选择原则除与上述常用二极管相同外, 尚有以下儿点:

1. 稳定电压: 每一种型号的稳压管的稳定电压都具有分散性, 如 2CW11 型稳压管的稳定电压为 3.2~4.5V, 管子的稳定电压可能是其中的某一电压值。因

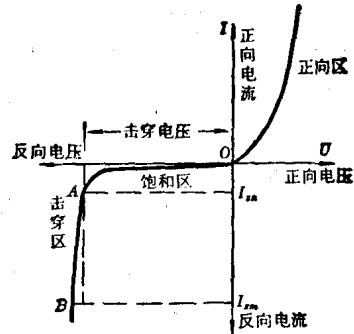


图 43-4 稳压管的伏安特性

此应根据需要的稳定电压值, 选择管子的型式, 使用时应以实测电压为准。

2. 稳定电流和最大稳定电流: 产品样本中规定的稳定电流 I_{zm} (或称齐纳电流) 是指具有稳压特性的最小稳定电流, 如 2CW11 型管为 10mA, 稳压管的实际工作电流应大于此值。

最大稳定电流 I_{sm} 是指稳压管允许通过的最大电流。如产品样本中无此值时, 可由下式计算:

$$I_{sm} = \frac{P_z}{U_z} \quad (43-3)$$

式中: P_z ——稳压管的耗散功率;

U_z ——稳定电压。

3. 稳压管的温度特性: 稳压管的稳定电压值随温度的变化而变化, 可用温度系数 α_z 表示:

$$\alpha_z = \frac{\Delta U_z}{U_z \Delta T} \quad (43-4)$$

式中: $U_z, \Delta U_z$ ——相应为稳压管的稳定电压和电压的变化;

ΔT ——温度的变化。

稳定电压值不相同, 它的 α_z 值也不相同, 图 43-5 示出 2CW21 系列的温度特性曲线。一般来说, 低于 5~6V 的稳压管, α_z 为负值, 这是齐纳效应的特点; 高于 5~6V 的稳压管, α_z 为正值, 这是雪崩击穿效应的特点。6V 左右的稳压管, 稳定电压受温度影响较小。

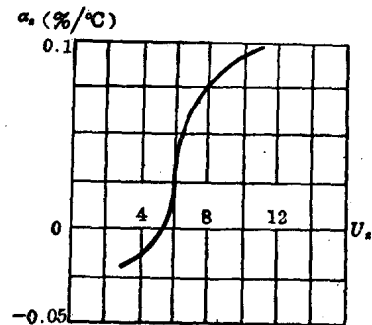


图 43-5 2CW21 系列稳压管的温度系数特性

因此对稳定度要求较高的情况，以选用 6V 左右的稳压管为宜。在稳定度要求更高时，可以将具有相反符号的温度系数的稳压管串联使用。当温度变化时引起的电压变化可抵消，使总的稳定电压基本上保持不变。

另外，可选用一种标准稳压管，它是将两个稳压管反向串联起来的稳压管，如图 43-6 所示。其中正向稳压管的 α_z 为负值，反向稳压管的 α_z 为正值。由于正、负值的 α_z 相互抵消，这种稳压管的 α_z 值很小(约 $10^{-4} \sim 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$)，使用此管时，正负极可随意接入。

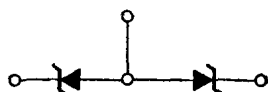


图 43-6 标准稳压管

4. 稳压管动态电阻: 动态电阻 R_z 为:

$$R_z = \frac{\Delta u_z}{\Delta I_z} \quad (43-5)$$

式中: Δu_z ——稳压管两端的电压变化;

ΔI_z ——通过稳压管的电流变化。

R_z 越小, 稳定性能越好。 R_z 值和稳压管的稳定电压与工作电流有关。图 43-7 示出 2DW7 系列稳压管的动态电阻 R_z 与工作电流的关系曲线。为了减少 R_z , 一般可在不超过稳压管的耗散功率的前提下, 将工作电流适当地取得大一些。但在此时, 稳压管的温度系数也将有所提高。

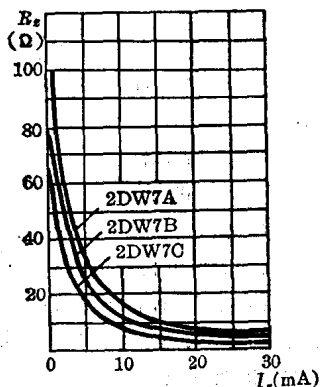


图 43-7 2DW7 系列稳压管的动态电阻 R_z 与工作电流的关系曲线

三、隧道二极管

隧道二极管的特点是在小的正向电压作用下呈现负阻现象, 可在很高的频率下工作, 开关时间可达 2 毫微秒, 故常用于高频和开关电路中。此外还有很好的温度特性和耐辐射性。缺点是输入和输出是同一端点, 不易隔离。

隧道二极管的符号、等值电路和特性曲线示于图 43-8。当外加电压为零时, 电流也为零。当正向电压

增加时, 电流急剧加大; 电压为 U_P 时, 电流达到最大值 I_P 。如电压继续加大, 电流反而减少, 即出现“负阻”特性。经过电压 U_V 后, 电流又随着电压的增加而增大。 P 点称为峰点, U_P 为峰点电压, I_P 为峰点电流。 V 点称为谷点, U_V 为谷点电压, I_V 为谷点电流。在峰点与谷点之间是负阻特性区。在谷点之后又表现出普通二极管的正向特性。与 P 点对应的 F 点电压 U_F 称为正向电压。

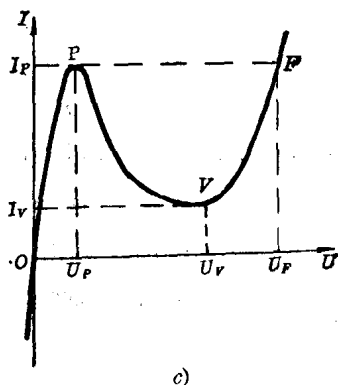
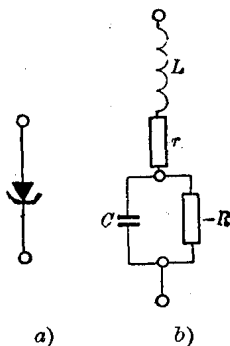


图 43-8 隧道二极管

a—符号; b—等值电路; c—特性曲线

等值电路图的符号意义如下: L 是二极管的引线电感; r 是损耗电阻, 数值与频率有关; $-R$ 是二极管的等值负阻, 数值与工作点有关; C 是 PN 结电容。

四、单结晶体管

单结晶体管的符号、等值电路和特性曲线示于图 43-9。它有两个基极 B_1 和 B_2 , 发射极 E 与 B_1 间的电阻为 R_{B1} , E 与 B_2 间的电阻为 R_{B2} 。基极间的电阻 $R_{BB} = R_{B1} + R_{B2}$ 。在发射极开路时, R_{BB} 一般为 $3 \sim 10 \text{ k}\Omega$ 。

如在 B_2 和 B_1 间加正向电压 E_B , B_2 与发射极 E 之间的电压和 B_1 与 E 之间的电压将按 R_{B1} 与 R_{B2} 的比例分配:

$$U_B = \frac{R_{B1}}{R_{B1} + R_{B2}} E_B = \frac{R_{B1}}{R_{BB}} E_B = \eta E_B \quad (43-6)$$

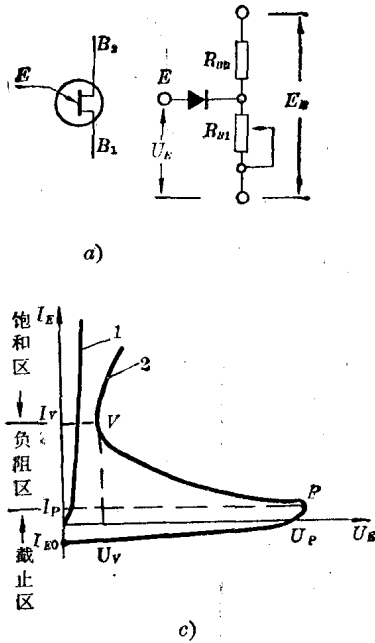


图 43-9 单结晶体管

a—符号; b—等值电路; c—特性曲线

式中: $\eta = \frac{R_{B1}}{R_{B2}}$ 称为分压比, 一般在 $0.3 \sim 0.9$, 由管子结构决定。

当 $U_E = 0$ 时, 由于二极管的 PN 结处于 ηE_B 的反向电压作用下, 发射极电流 $I_E = I_{E0}$, I_{E0} 为 PN 结的反向电流。如在 E 与 B_1 间加以电压 U_E 时, E 与 B_1 间的 PN 结相当于二极管, 随着 U_E 的增加, 发射极电流 I_E 迅速增加, 如图 43-9c 的曲线 1。当 U_E 继续增加到 $U_E = \eta E_B + U_V$ (U_V 为 PN 结的正向压降, 约为 $0.6V$), PN 结处于正向电压之下, 于是 I_E 增加。由于通过 E 与 B_1 间的电流增大, 使 R_{B1} 相应减少, 又使 ηE_B 下降, 此时 PN 结处于更大的正向电压之下, 从而 I_E 又进一步增大。在这一正反馈作用下, I_E 急剧增加, U_E 反而减少, 出现了负阻特性, 如图 43-9c 中的负阻区。随着 I_E 不断增加, U_E 降低到 V 点, 此后 U_E 又将开始随 I_E 的增加而上升, 恢复了正阻特性, 这个过程如图 43-9c 的曲线 2。

图中 P 点为峰点, 对应的峰点电压为 U_P , 峰点电流为 I_P 。 $U_P = \eta E_B + U_V$, 它与分压比有关, 并且是电压 E_B 的线性函数。 I_P 一般小于 $2\mu A$ 。 V 点为谷点, 对应的谷点电压为 U_V , 一般为 $1 \sim 2.5V$, 谷点电流 I_V 一般为几个 mA 。通常称电流 $I_E > I_V$ 的区域为饱和区, $I_E = 30mA$ 时的电压为单结晶体管的饱和电压 U_{ES} 。在饱和区域内, 电流很大, 但饱和压降很小, 因而可利用由单结晶体管构成弛张振荡器等使产生电流

脉冲去触发可控硅。

43-2 节 三 极 管

一、晶体三极管

晶体三极管的输入特性与输出特性见图 43-10。

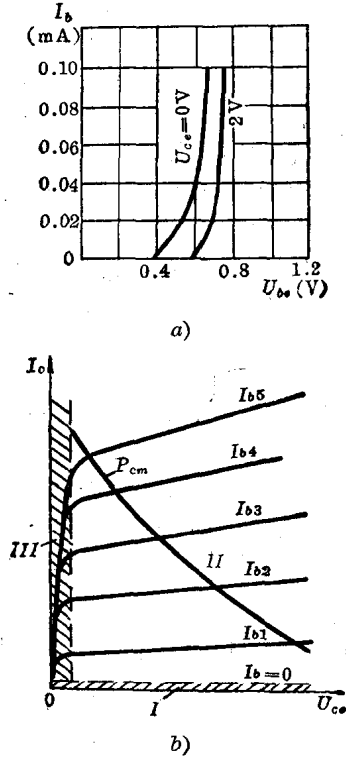


图 43-10 三极管的输入和输出特性曲线

a—输入特性; b—输出特性

选择三极管时应注意以下几点:

1. 最大集电极电压: 它相当于 PN 结的最大反向电压, 使用时不能超过。三极管连接方式不同时反向击穿电压也不相同, 当共基极连接时, 击穿电压取决于集电结的反向击穿电压。但当共发射极连接, 特别是基极电流 $I_b = 0$ 时, 由于集电极的反向饱和电流 I_{c0} 流过发射极并经放大 β 倍后, 比共基极接法时更易把集电极击穿。所以共发射极接法时的击穿电压要比共基极接法时低一些, 一般要降低到共基极时的 $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}$ 。如 3AG1 的 BU_{c0} 为 $20V$, BU_{e0} 为 $10V$ 。

通常三极管的发射极-基极反向击穿电压 BU_{e0} 值较低, 在使用时应注意。

2. 加在集电极的功率和电流不得超过三极管的集电极最大耗散功率 P_{cm} 和最大允许工作电流 I_{cm} 。 P_{cm} 与 I_{cm} 决定于集电极的最高结温。 P_{cm} 和环境温度有关, 因此三极管要受环境温度的限制。锗管的最

高结温约为 75°C ，硅管为 150°C 。

当有反向电流 I_{ce0} 流过时，集电结即有功率损耗，这时集电结温度升高。当耗散功率 P_{cm} 太大时， I_{ce0} 增加很大，这时集电极将失去单向导电能力，放大作用也消失。所以三极管的工作应受到 P_{cm} 的限制，在输出特性曲线上可给出一条 P_{cm} 曲线，如图 43-10b 所示。

3. 反向饱和电流 I_{cbo} 和穿透电流 I_{ce0} : I_{cbo} 为发射极开路时集电极-基极的反向电流，它随温度的上升呈指数规律上升。通常锗管温度每升高 12°C ， I_{cbo} 值增大一倍；硅管温度每升高 8°C ， I_{cbo} 值增大一倍。 I_{cbo} 对管子的特性影响很大，质量差的管子 I_{cbo} 很大，硅管的 I_{cbo} 比锗管的小得多。

穿透电流 $I_{ce0} = (1 + \beta)I_{cbo}$ ，因此 I_{ce0} 与温度关系很大，它对温度更为敏感。穿透电流大的管子，工作极不稳定，寿命也短。

当工作温度变化较大时，选用硅管较好。为了避免 I_{ce0} 的增大而影响装置的工作，设计时必须注意加以补偿。

4. 电流放大倍数 β : 温度升高时 β 值将增大，图 43-11 示出 3DG4 的 β 与温度的关系曲线。温度升高时，在相同的基极电流 I_b 情况下，集电极电流 I_c 将增大

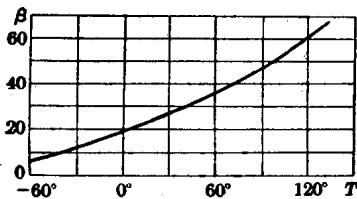


图 43-11 3DG4 的 β 和温度的关系曲线

由于制造工艺关系，同类型管子的 β 值也不同，同时它与工作点和信号频率有关，因而在使用管子时，要经严格筛选。

β 值太大，会使工作性能不稳定，一般 β 值以 30~90 为宜。

5. 三极管的开关特性: 在图 43-12a 电路中，三极管的基极输入一矩形脉冲时，理论上可得图 43-12b 所示的输出波形，但实际上得到如图 43-12c 的波形。从图中可看出， I_c 并不是随输入信号同时突变，而是将延迟一个时间， I_c 与输入信号在时间上的差别可分四个阶段:

(1) 延迟时间 t_d : 从输入信号由负向正变化的时间开始，到集电极电流上升到 $0.1 I_{cs}$ (I_{cs} 为集电极饱和电流) 所对应的时间称为延迟时间。

(2) 上升时间 t_r : 集电极电流自 $0.1 I_{cs}$ 上升到 $0.9 I_{cs}$ 所对应的时间称为上升时间。通常， $t_d + t_r = t_{on}$

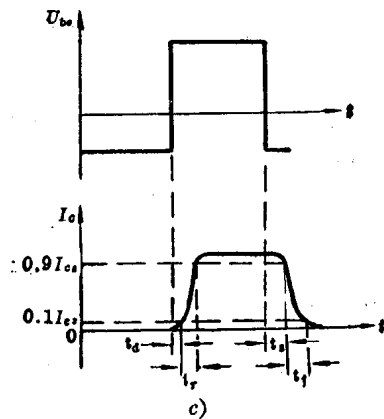
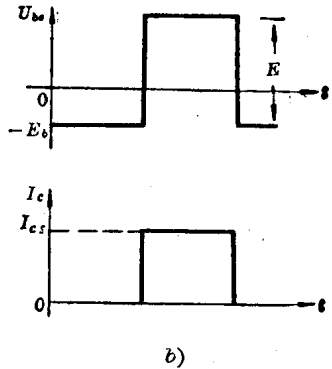
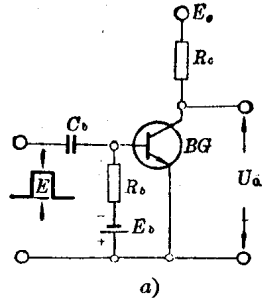


图 43-12 三极管的开关特性

a—电路图; b—理想的三极管波形; c—实际波形

称为开启时间。

(3) 存贮时间 t_s : 从输入信号由正向负变化的时间开始，到集电极电流下降到 $0.9 I_{cs}$ 所对应的时间称为存贮时间。

(4) 下降时间 t_f : 集电极电流自 $0.9 I_{cs}$ 下降到 $0.1 I_{cs}$ 所对应的时间称为下降时间。通常， $t_s + t_f = t_{off}$ ，称为关闭时间。

由于上述四个时间的存在，使开关电路中 I_c 的变化总比 I_b 的变化延迟一段时间，而且输出脉冲变宽。这种现象影响了晶体管在高速开关电路中的工作，因此必须适当选择管子，并在电路中采取措施，如为缩短

延迟和上升时间,基极负偏压应小些,基极注入电流应大一些;为了缩短存贮与下降时间,使管子不工作在深度饱和区等。

6. 三极管的频率特性:当频率很高时,三极管可能失去放大作用,放大系数 β 与频率 f 的近似关系为:

$$\beta \approx \frac{\beta_0}{1 + j \frac{f}{f_\beta}}, \quad (43-7)$$

式中: β_0 ——共发射极电路低频电流增益;

f_β ——当 $\beta = 0.707\beta_0$ 时的频率,称为共发射极电路的截止频率。

在高频时电流 I_c 与 I_b 之间有一定的相位差,因此 β 值是一个复数。由于在低频时共发射极电流放大系数 β_0 远大于1,当运用频率大于 f_β 时,共发射极电流仍有放大作用,因此实际运用频率可比 f_β 高。

在共基极电路中电流放大系数为 $\alpha = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_e}$ 。当频率升高时 ΔI_e 维持不变, ΔI_c 要下降, α 也要降低,但比 β 的降低要慢。 α 与频率的近似关系为:

$$\alpha \approx \frac{\alpha_0}{1 + j \frac{f}{f_\alpha}}, \quad (43-8)$$

式中: α_0 ——共基极电路低频电流增益;

f_α ——当 $\alpha = 0.707\alpha_0$ 时的频率,称为共基极电路的截止频率。

可以看出, $f_\alpha > f_\beta$, f_α 与 f_β 的关系为:

$$f_\beta = \frac{f_\alpha}{1 + \beta_0} \quad (43-9)$$

当工作频率大于 f_β 后, β 将随频率的增加作比例的下降,如图43-13所示,也就是 $\beta f = \text{常数}$ 。 β 与 f 的乘积称为特征频率 f_T ,即

$$\beta f = f_T \quad (43-10)$$

如 $\beta = 1$ 时, $f = f_T$,因此特征频率 f_T 就是 β 下降到1时的频率。 f_T 可同时反映三极管的频率和放大特性。

上述三个频率参数的数量关系,一般为:

$$f_\beta < f_T < f_\alpha \quad (43-11)$$

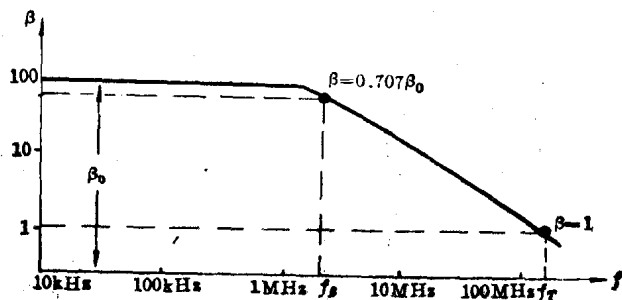


图 43-13 β 与 f 的关系曲线

其他如工作温度范围、噪声系数等要求,可在有关晶体管手册中查出。

必须指出:为了保证三极管在装置中的可靠性,应使其工作电压、电流数值与制造厂提出的极限参数相比有充分的裕度,但多大的裕度目前无统一的规定,设计时可根据电路参数、管子型式等考虑。

二、场效应晶体管

场效应管(简称 FET)是一种新型的半导体器件。与晶体三极管相比,它具有输入阻抗高、噪声系数低(可做到 0.5~1 分贝)、耐辐射能力强、制造工艺简单和便于大面积集成等特点,因此近年来得到广泛使用。

场效应管按结构可分为结型场效应管和绝缘栅场效应管两种。按半导体材料的性质,每种结构又可分为 N 型沟道和 P 型沟道。对于绝缘栅场效应管来说,又有增强型和耗尽型两种类型。增强型是指在零栅压下无电流输出,耗尽型是指在零栅压下就有电流输出。

场效应管的一部分性能可通过转移特性和漏极特性来表示。转移特性为当漏源极间的电压 U_{DS} 为某一固定值时,栅极电压 U_{GS} 和漏极电流 I_D 的关系,代表栅极的控制能力。漏极特性反映了以栅压为参变量

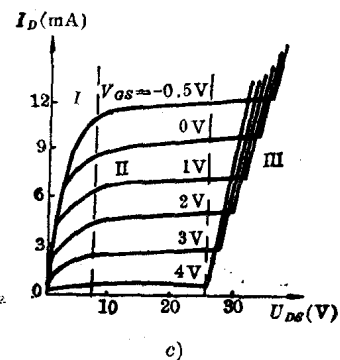
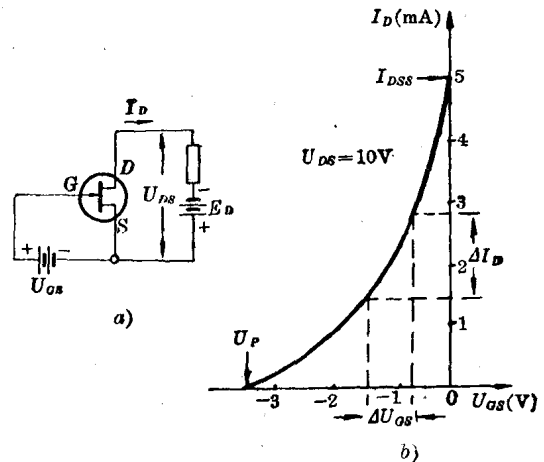


图 43-14 N 型沟道结型场效应管
a—电路图; b—转移特性; c—漏极特性

的情况下,漏极电压 U_{DS} 和漏极电流 I_D 的关系,代表漏极的工作能力。现以结型场效应管为例介绍如下。

转移特性如图 43-14b 所示。当 $U_{GS}=0$ 时的漏极电流称为饱和漏电流 I_{DSS} ,使 I_D 接近于零的栅极电压称为夹断电压 U_P 。随着 U_{GS} 的变化,电流 I_D 也相应变化。曲线的斜率即是跨导 g_m ,可用来表示场效应管的放大能力,其值为:

$$g_m = \left. \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}} \right|_{U_{DS}} = \text{常数} \quad (43-12)$$

漏极特性如图 43-14c 所示。场效应管的工作情况可分三个区域。区域 I 是可变电阻区,当电压 U_{DS} 较小时,沟道的电阻主要由栅压所决定。当栅压一定时,沟道的电阻也一定,此时如 U_{DS} 增大, I_D 也增大。

当继续增大 U_{DS} 时, I_D 的增大变慢,最后 I_D 基本上维持恒定,管子工作在区域 II,即线性放大区。场效应管作放大用时,一般都工作在这个区域。

如继续增大 U_{DS} ,将使反向偏置的电压超过 PN 结能承受的电压,从而发生击穿现象。此时 I_D 突然增大,管子进入区域 III,如果对电流不加限制,将使管子损坏。

结型场效应管的输入阻抗可达 $10^6 \sim 10^8 \Omega$ 。

绝缘栅场效应管的输入阻抗更大,可达 $10^{12} \Omega$ 。它的转移特性见图 43-15,漏极特性见图 43-16。图 43-15a 中的 U_T 为场效应管的开启电压,一般常将

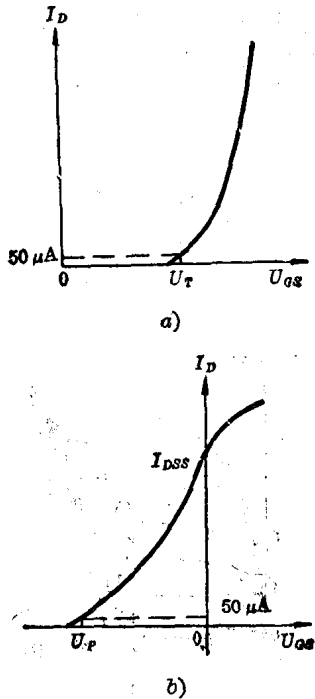


图 43-15 N 型沟道绝缘栅场效应管的转移特性
a—增强型; b—耗尽型

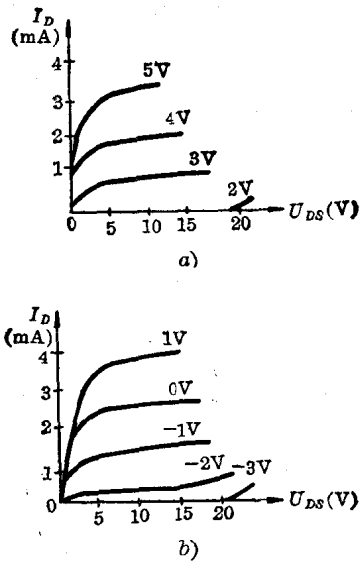


图 43-16 N 型沟道绝缘栅场效应管的漏极特性
a—增强型; b—耗尽型

表 43-1 场效应管的符号、电压极性和转移特性表

结构 种类	工作 方式	符号	电压极性		转移特性
			U_P 或 U_T	U_{DS}	
绝缘栅 N 型沟道	耗尽型		-	+	
	增强型		+	+	
绝缘栅 P 型沟道	耗尽型		+	-	
	增强型		-	-	
结型 P 沟道	耗尽型				
	耗尽型				