



高等学校电气信息类规划教材

总主编 王耀南

模拟电子技术

张万奎 主编

湖南大学出版社

高等学校电气信息类规划教材

总主编 王耀南

模 拟 电 子 技 术

主 编 张万奎

副主编 孔照荣 王小华 潘湘高

编 著 李春树 汪鲁才 周君求

张学军 吴文君 余晓峰

康 江 王俊年

湖南大学出版社

2004 年 · 长沙

内 容 简 介

本书内容分为 10 章:绪论,半导体器件,放大电路基础,功率放大电路,集成运算放大器,负反馈放大电路,信号处理和信号产生电路,直流稳压电源,模拟电子线路设计,电子电路的计算机辅助分析与设计。每章都附有思考题,习题和推荐推荐阅读书目。

本书是高等学校电气信息类专业本科教材,也可作为高职、高专、成人高校相关专业教材,还可供有关工程技术人员自学和参考。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术/张万奎主编. —长沙:湖南大学出版社,2004.7

(高等学校电气信息类规划教材).

ISBN 7-81053-777-6

I. 模... II. 张... III. 模拟电路—电子技术—高等学校—教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 061124 号

模拟电子技术

Moni Dianzi Jishu

主 编:张万奎

责任编辑:李继盛

封面设计:张 毅

出版发行:湖南大学出版社

社 址:湖南·长沙·岳麓山

邮 编:410082

电 话:0731-8821691(发行部),8821315(编辑室),8821006(出版部)

传 真:0731-8649312(发行部),8822264(总编室)

电子邮箱:press@hnu.net.cn

网 址: <http://press.hnu.net.cn>

印 装:湖南新华印刷集团有限责任公司(邵阳)

总 经 销:湖南省新华书店

开本:787×1092 16 开 印张:21.75

字数:503 千

版次:2004 年 7 月第 1 版 印次:2004 年 7 月第 1 次印刷

印数:1~4 000 册

书号:ISBN 7-81053-777-6/TN·17

定价:32.00 元

版权所有,盗版必究

湖南大学版图书凡有印装差错,请与发行部联系

高等学校电气信息类规划教材

编辑委员会

主任:章兢

(湖南大学副校长,教授,博士生导师)

总主编:王耀南

(湖南大学电气与信息工程学院院长,教授,博士生导师)

常务副主任:彭楚武 罗安 何怡刚 黄辉先 黎福海 黄守道 王英健

副主任:(按姓氏笔画为序)

王新辉 邓曙光 朱荣辉 刘志壮 陈日新 杨家红 张万奎

张忠贤 周少武 贺达江 黄绍平 彭解华 瞿遂春

委员:(按姓氏笔画为序)

丁跃尧 方厚辉 王辉 王群 王建君 田学军 包艳

刘祖润 肖强晖 李益华 李正光 李茂军 李春树 李欣然

余建坤 汪鲁才 张学军 金可音 孟凡斌 欧青立 唐勇奇

康江 黄智伟 揭屿 曾喆昭 熊芝耀 戴瑜兴

参编院校

(排名不分先后)

湖南大学

国防科学技术大学

湘潭大学

湖南师范大学

长沙理工大学

湖南科技大学

湖南农业大学

南华大学

株洲工学院

湖南工程学院

吉首大学

湖南商学院

湖南理工学院

湖南文理学院

湖南城市学院

邵阳学院

怀化学院

零陵学院

长沙学院

湖南工学院(筹)

序

我国高等教育已经发展到大众化教育的新阶段。随着国家工业化建设迅猛发展,电气信息类专业技术人才的需求也日益增大。为了适应人才培养的这种新形势,跟踪科学技术的前沿进展,我们根据教育部面向 21 世纪电气信息类课程改革的要求,结合湖南大学和兄弟院校长期教学教改的经验,为大学电气信息类本科生编写了这套教材。

电气信息类课程是培养电类专业人才的基础课程,大量概念、理论、方法和工程案例构成了一个完整的技术知识体系。学生要开启心智、培育形成电类专业思维、打下电类专业人才的技术知识基础,必须系统地扎实地学好这些课程。为此,我们在组织编写这套教材时,特别注意了以下几个方面:

一是保证基础。作为大学基础课程,应确保基本概念、基本原理和基本方法的学习。只有透彻地理解和掌握了基础知识,才能顺利地进入电气信息技术领域的大门,才有可能进一步深造。

二是跟踪新技术。电气信息技术发展日新月异,大学教材必须及时吸纳最新技术,使学生了解学科发展动态。本套教材一方面注意反映学科各方面的最新进展,安排了扩充阅读的相关文献题录,指引学生直接接触学科前沿;另一方面还根据学科与技术的发展趋势,对经典知识进行重新组织编排。本套教材还将及时再版,及时更新内容,确保与时俱进,始终处于技术发展的最前沿。

三是注重应用。电气与信息理论源于工程实践,源于科学发现和技术发明,就像艺术源于生活一样。本套教材在讲述基本理论的同时,注重联系工程实际,并把作者的研究成果应用到其中。在正文、例题和习题中,特意安排了大量工程实用问题,通过理论和工程实际的结合,使学生学到知识并掌握方法。

四是文理渗透、启发诱导。为了提升素质,开阔视野,培养科学创新意识,理工科学生应适当了解与学科相关的课程外知识。为此,在许多教材中精心安排了“扩展与思考”的内容,以使从中体会科学思想、科学方法以及科技与人文、科学与艺术相互交融的精神和境界。

五是部分教材以多媒体 CAI 课件配合。这样可以将重要的知识点以生动形象的画面表现出来,深化认识,提高学习效果,也便于课堂教学。

本套教材经过充分研讨和论证,聘请各院校教学经验丰富、科研基础深厚的教授和副教授担任主编和编写者,是湖南所有电气信息类院校团结协作的成果,是全省最优秀的电气信息工程学科专家学者集体智慧的结晶。

本套教材的编写和出版,得到了湖南大学、国防科学技术大学、湘潭大学、湖南师范大学、长沙理工大学、湖南农业大学、湖南科技大学、南华大学、株洲工学院、湖南工程学院、吉首大学、湖南商学院、湖南理工学院、湖南城市学院、湖南文理学院、邵阳学院、怀化学院、零陵学院、长沙学院、湖南工学院(筹)等高校的通力合作,得到了湖南大学出版社的支持和帮助,在此一并表示衷心感谢。

总主编 王耀南
2004 年 6 月于岳麓山

前 言

2003年12月,在湖南长沙召开了电气信息类专业教材编写工作会议。20多所高校的相关院系负责人参加会议,会议制订了“电子技术基础”教材编写大纲,分《模拟电子技术》和《数字电子技术》两册书出版,供高等学校电气信息类各专业“电子技术基础”课程教学使用。

根据上述会议决定的原则,《模拟电子技术》在内容安排上,突出应用特点,强化工程背景,体现专业特色。半导体器件单独设一章;三极管放大电路及场效应管放大电路整合为放大电路基础;功率放大电路以互补对称电路为重点;反馈放大电路加强频率补偿技术部分;信号处理以有源滤波电路为重点;增加模拟电子线路设计一章;用 OrCAD/PSPICE 仿真和设计,使学生学会获得网络学习资源的方法。

《模拟电子技术》在编写过程中加强了基本概念和典型放大电路的介绍,插图较多,并配有一定数量的电子元器件的结构图。每章都有应用实例,综合应用放在模拟电子线路设计部分,以培养学生分析问题和解决电子方面实际问题的能力。

本书由张万奎教授主编,副主编有孔照荣、王小华、潘湘高。参加本书编写工作的有湖南理工学院张万奎(第1、第2章),零陵学院李春树(第3章第1~第6节,第8节),湖南师范大学汪鲁才(第3章第7节),湖南大学孔照荣(第4章),邵阳学院周君求(第5章),湖南文理学院潘湘高(第6章),长沙理工大学王小华(第7章),湖南城市学院张学军(第8章),株洲工学院吴文君(第9章第1节),湖南理工学院余晓峰(第9章第2节),湖南农业大学康江(第9章第3节),湖南科技大学王俊年(第10章)。

本书承湖南大学周子群教授主审。主审审阅了全部书稿,提出了许多宝贵的修改意见,编者在此深表谢意。在本书的编写过程中,参考了大量有关教材和资料,我们对这些教材和资料的作者谨致深切的感谢。在本书的出版过程中,得到湖南大学电气与信息工程学院和湖南大学出版社的大力支持和帮助,在此也表示衷心的感谢。

编 者

2004年6月

本书常用符号表

A	增益,放大倍数
a	整流元件的阳极(正极)
A_f	反馈放大器的增益,反馈放大器的放大倍数
A_v	电压增益,电压放大倍数
A_i	电流增益,电流放大倍数
A_{vc}	共模电压增益,共模电压放大倍数
A_{vd}	差模电压增益,差模电压放大倍数
A_{vo}	开环电压增益,开环电压放大倍数
A_{Av}	闭环电压增益,闭环电压放大倍数
A_{vm}	中频电压增益,中频电压放大倍数
A_{vs}	源电压增益,源电压放大倍数
A_{vsm}	中频源电压增益,中频源电压互感器放大倍数
B	势垒
b	三极管的基极
BW	频谱宽度,带宽
C	电容
c	三极管的集电极
C_b	隔直电容(耦合电容)
C_e	发射极旁路电容
C_B	势垒电容
C_D	扩散电容
C_j	结电容
C_f	反馈电容
C_i, C_o	输入电容,输出电容
C_L	负载电容
D	二极管
d	场效应管的漏极
E	电场强度
e	电子的电荷量
e	三极管的发射极
F	反馈系数,调制频率
F_v	电压反馈系数,
f	频率
f_L	放大器的下限频率

f_H	放大器的上限频率
f_T	特征频率
f_a	三极管共基极截止频率
G	电导
g	微变电导
g_m	双口有源器件的互导(跨导)
g	场效应管的栅极
H	双口网络的混合参数
I, i	电流
I_s	信号源电流
I_i, I_o	输入电流, 输出电流
I_{cc}	空载正电源电流
I_{DD}	空载漏电源电流
I_{EE}	空载负电源电流
I_L	负载电流
I_{IB}	输入偏置电流
I_{IO}	输入失调电流
I_{OM}	最大输出电流
I_{OS}	输出短路电流
I_{REF}	参考电流(基准电流)
J	电流密度
K	热力学温度的单位(开尔文)
k	玻耳兹曼常数
k	整流元件的阴极(负极)
K_{CMR}	共模抑制比
L	自感系数, 电感
L	负载
M	互感系数
m	调制系数
N	电子型半导体
N	绕组匝数比
P	功率
P	空穴型半导体
Q, q	电荷
Q	静态工作点, 品质因数
R	电阻(直流电阻或静态电阻)
R_b, R_c, R_e	三极管的基极、集电极、发射极电阻
R_g, R_d	场效应管的栅极、漏极电阻

R_s	信号源内阻
R_L	负载内阻
R_w	电位器(可变电阻)
r	微变电阻(交流电阻或动态电阻)
r_{be}	三极管的输入电阻
r_{ce}	三极管的输出电阻
R_i, R_o	放大电路交流输入、输出电阻
R_f	反馈电阻
s	复频率变量
s	场效应管的源极
S/N	信噪比
T	温度(热力学温度以 K 为单位,摄氏温度用 $^{\circ}C$ 表示)
T	双口有源器件
T_r	变压器
t	时间
V, v	电压
V_s, v_s	信号源电压
V_i, v_i	输入电压
V_{th}	三极管的门坎电压、比较器门限电压
V_{on}	场效应管的开启电压
V_T	温度的电压当量
V_{off}	场效应管的夹断电压
$+V_{cc}, V_+, V_{BB}, V_{DD}$	正电源电压
V_{EE}, V_-	负电源电压
V_{OO}	输出失调电压
V_{REF}	参考电压(基准电压)
$V_{(BR)CBO}$	发射极开路,集电极-基极反向击穿电压
$V_{(BR)EBO}$	集电极开路,发射极-基极反向击穿电压
$V_{(BR)CEO}$	基极开路,集电极-发射极反向击穿电压
$V_{(BR)DS}, V_{(BR)GD}, V_{(BR)GS}$	漏源击穿电压、栅漏击穿电压和栅源击穿电压
X, x	电抗、反馈电路中的信号量
Y, y	导纳
Z, z	阻抗
α	三极管共基极接法的电流放大系数
β	三极管共射极接法的电流放大系数
γ	稳压系数
η	效率
θ	整流元件的导电角

ρ	电阻率
σ	电导率
φ	时钟脉冲, 相角
τ	时间常数
Ω, ω	角频率

目 次

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 电子技术发展概述	(1)
1.1.1 从电子管到集成电路	(1)
1.1.2 可编程模拟器件	(2)
1.2 放大电路的基本知识	(3)
1.2.1 模拟电路	(3)
1.2.2 放大电路模型	(4)
1.2.3 放大电路的主要性能指标	(7)
思考题	(12)
习 题	(12)
推荐阅读书目	(12)
第 2 章 半导体器件	(13)
2.1 半导体的物理特性	(13)
2.1.1 本征半导体	(13)
2.1.2 杂质半导体	(14)
2.2 PN 结	(16)
2.2.1 PN 结的形成	(16)
2.2.2 PN 结的特性	(17)
2.3 半导体二极管	(21)
2.3.1 半导体二极管的结构	(21)
2.3.2 半导体二极管的伏安特性	(21)
2.3.3 二极管的主要参数	(22)
2.3.4 二极管模型	(24)
2.3.5 二极管应用电路举例	(25)
2.3.6 特殊二极管简介	(28)
2.4 双极型三极管	(31)
2.4.1 双极型三极管的结构及工作原理	(31)
2.4.2 双极型三极管的特性曲线	(34)
2.4.3 双极型三极管的主要参数	(36)
2.5 场效应管	(39)
2.5.1 结型场效应管	(39)

2.5.2 金属-氧化物-半导体场效应管	(43)
思考题	(47)
习 题	(47)
推荐阅读书目	(50)
第3章 放大电路基础	(51)
3.1 共发射极放大电路	(51)
3.1.1 电路结构	(51)
3.1.2 电路工作原理	(52)
3.2 放大电路的图解分析法	(54)
3.2.1 静态与静态工作点	(54)
3.2.2 放大电路的静态图解分析	(55)
3.2.3 放大电路的动态图解分析	(57)
3.2.4 输出电压的最大不失真输出幅度与非线性失真分析	(57)
3.2.5 交流通路与交流负载线	(59)
3.2.6 图解法的适用范围	(60)
3.3 小信号模型分析法	(60)
3.3.1 晶体管 h 参数等效模型	(60)
3.3.2 晶体管的微变等效电路	(62)
3.3.3 晶体管的输入电阻 $r_{be}(h_{ie})$ 的近似估算	(62)
3.3.4 用微变等效电路法分析放大电路	(63)
3.4 放大电路工作点稳定问题	(65)
3.4.1 静态工作点不稳定的原因	(65)
3.4.2 典型的静态工作点稳定电路	(65)
3.5 共集电极电路和共基极电路	(69)
3.5.1 基本共集放大电路	(69)
3.5.2 基本共基放大电路	(71)
3.5.3 三种接法的比较	(73)
3.6 多级放大电路	(73)
3.6.1 多级放大电路的级间耦合方式	(73)
3.6.2 多级放大电路的分析方法	(74)
3.7 场效应管基本放大电路	(77)
3.7.1 场效应管静态工作点的分析	(77)
3.7.2 场效应管放大器的微变等效电路分析法	(80)
3.8 放大电路的频率响应	(83)
3.8.1 单时间常数 RC 电路的频率响应	(83)
3.8.2 单级放大电路的高频响应	(86)
3.8.3 单级放大电路的低频响应	(91)

3.8.4 多级放大电路的频率响应	(92)
思考题	(93)
习 题	(94)
推荐阅读书目	(100)
第4章 功率放大电路	(101)
4.1 功率放大电路的几个主要问题	(101)
4.1.1 功率放大电路的特点及主要研究的对象	(101)
4.1.2 放大电路工作状态及提高效率的主要途径	(102)
4.2 乙类双电源互补对称功率放大电路	(103)
4.2.1 电路组成	(103)
4.2.2 工作原理	(104)
4.2.3 乙类双电源互补对称功放电路功率参数的计算	(104)
4.3 甲乙类双互补对称功率放大电路	(107)
4.3.1 甲乙类双电源互补对称功率放大电路(OCL)	(107)
4.3.2 甲乙类单电源互补对称功率放大电路(OTL)	(109)
4.4 集成功率放大电路	(110)
4.4.1 集成功率放大电路分析	(111)
4.4.2 集成功率放大电路的主要性能指标	(112)
4.4.3 集成功率放大电路的应用	(113)
4.5 功率器件	(115)
4.5.1 双极型大功率晶体管(BJT)	(115)
4.5.2 功率 MOS 器件	(117)
4.5.3 绝缘栅-双极型功率管(IGBT)及功率模块	(118)
4.5.4 功率管的保护	(119)
思考题	(119)
习 题	(120)
推荐阅读书目	(123)
第5章 集成运算放大器	(124)
5.1 集成运算放大器的特点	(124)
5.2 集成运算放大器的基本单元电路	(125)
5.2.1 电流源电路	(125)
5.2.2 差分放大电路	(127)
5.3 集成运算放大器简介	(135)
5.3.1 集成运放的典型电路	(135)
5.3.2 集成运放的性能指标	(138)
5.3.3 理想运算放大器及输入、输出电位约定	(139)

5.4 电压比较器	(140)
5.4.1 简单比较器	(140)
5.4.2 滞回比较器	(142)
5.4.3 双限比较器	(144)
5.5 运算电路	(145)
5.5.1 集成运放的线性工作区	(145)
5.5.2 比例运算电路	(146)
5.5.3 求和电路	(148)
5.5.4 积分电路和微分电路	(150)
5.5.5 对数和指数运算电路	(152)
5.6 模拟乘法器	(153)
5.6.1 对数式乘法和除法运算电路	(153)
5.6.2 变跨导式模拟乘法器	(154)
5.6.3 模拟乘法器的应用	(155)
5.7 实际运算放大器电路的误差分析	(157)
5.7.1 产生误差的原因	(157)
5.7.2 集成运放几个主要非理想参数产生的误差	(157)
思考题	(159)
习 题	(160)
推荐阅读书目	(170)
第6章 负反馈放大电路	(171)
6.1 反馈的基本概念	(171)
6.1.1 放大器中的反馈	(171)
6.1.2 反馈的分类	(171)
6.1.3 四种类型的反馈组态	(172)
6.2 反馈放大器的方框图和一般表达式	(177)
6.2.1 反馈放大器的方框图	(177)
6.2.2 反馈放大器的基本方程	(177)
6.3 负反馈对放大器性能的影响	(179)
6.3.1 负反馈对放大倍数的影响	(179)
6.3.2 负反馈对通频带宽和失真的影响	(180)
6.3.3 负反馈可减小反馈环内的噪声和干扰	(183)
6.3.4 负反馈放大器对输入、输出阻抗的影响	(184)
6.4 负反馈放大电路主要性能指标的定量计算	(189)
6.4.1 深度负反馈条件下放大倍数的近似计算	(189)
6.4.2 两种基本反馈组态的集成运算放大器	(190)
6.4.3 分立元件负反馈放大器的分析计算	(193)

6.5 负反馈放大电路的稳定性	(200)
6.5.1 产生自激振荡的原因与条件	(200)
6.5.2 负反馈放大电路稳定性的判断	(201)
6.5.3 负反馈放大电路消除自激振荡的方法	(202)
思考题	(206)
习 题	(207)
推荐阅读书目	(212)
第7章 信号处理和信号产生电路	(213)
7.1 有源滤波器	(213)
7.1.1 低通滤波电路	(214)
7.1.2 高通滤波电路	(215)
7.1.3 带通和带阻滤波电路	(216)
7.2 正弦波振荡电路	(217)
7.2.1 正弦波振荡产生的条件	(217)
7.2.2 RC 正弦波振荡电路	(218)
7.2.3 LC 正弦波振荡电路	(220)
7.3 非正弦波产生电路	(226)
7.3.1 矩形波产生电路	(226)
7.3.2 三角波产生电路	(228)
7.3.3 锯齿波产生电路	(229)
7.4 集成函数发生器 ICL8038 及其应用电路	(230)
7.4.1 ICL8038 的结构及工作原理	(230)
7.4.2 应用电路	(232)
思考题	(234)
习 题	(234)
推荐阅读书目	(239)
第8章 直流稳压电源	(240)
8.1 小功率整流滤波电路	(240)
8.1.1 单相小功率整流电路	(240)
8.1.2 滤波电路	(242)
8.1.3 倍压整流电路	(246)
8.2 串联反馈式稳压电路	(247)
8.3 串联开关式稳压电路	(249)
8.4 集成稳压器及其应用电路	(251)
8.4.1 集成稳压器的主要参数	(251)
8.4.2 三端集成稳压器	(252)

8.4.3 精密稳压电源	(258)
8.5 直流变换型电源	(260)
思考题	(262)
习 题	(262)
推荐阅读书目	(265)
第9章 模拟电子线路设计	(266)
9.1 电子系统设计方法	(266)
9.1.1 模拟电子系统设计流程	(266)
9.1.2 单元电路设计	(271)
9.2 仪用测量放大器的设计	(281)
9.2.1 设计任务书	(281)
9.2.2 仪用测量放大器的基本工作原理	(282)
9.2.3 方案的论证与选择	(286)
9.2.4 电路设计与主要参数计算	(288)
9.3 现代可编程模拟电路	(290)
9.3.1 可编程模拟电路概述	(290)
9.3.2 常用可编程模拟器件介绍	(290)
9.3.3 其他系列可编程模拟器件介绍	(298)
第10章 电子电路的计算机辅助分析与设计	(300)
10.1 电子电路仿真软件 OrCAD/PSpice 简介	(300)
10.1.1 OrCAD/PSpice A/D 简介	(300)
10.1.2 OrCAD/Capture 简介	(305)
10.2 OrCAD/PSpice 仿真分析实例	(312)
10.2.1 OrCAD 仿真的一般步骤	(312)
10.2.2 基本电路特性分析	(312)
10.2.3 仿真运行及结果的显示和分析实例	(318)
参考文献	(328)

第 1 章 绪 论

从 20 世纪初真空电子管发明以来,电子器件已由电子管发展到今天的超大规模集成电路。集成电路的诞生,使电子技术出现了划时代的革命,成为现代电子技术和计算机发展的基础。今天,电子技术在科学研究、国防、工业、通信、医学、计算机技术以及人们的社会生活等方面都得到了广泛的应用。

电子技术的研究对象是电子器件和由电子器件组成的各种基本功能电路,以及由基本功能电路组成的各种用途的装置或系统。电子电路可分为模拟电路和数字电路两大类,相应地形成了模拟电子技术和数字电子技术两大技术领域。本书在介绍常用半导体器件的基础上,着重讨论模拟电路的基本概念、基本原理、基本分析方法及基本应用。

本章作为绪论,首先对电子技术的发展作一概述,然后介绍模拟电路中最常用的放大电路的主要性能指标。

1.1 电子技术发展概述

由于物理学的重大突破,电子技术在 20 世纪取得了惊人的进步。随着世界进入信息时代,作为其发展基础之一的电子技术必将以更快的速度前进。

1.1.1 从电子管到集成电路

1905 年 Sir John Ambrose Fleming(1849~1945)研制出了世界上第一只二极管真空管,也称为佛来明真空管(Flemings valve),1907 年 Lee De Forest(1873~1961)在佛来明真空管上加了一个栅型电极而研制成了三极真空管,后来经过改进并称为三极管。电子管是电子器件的第一代,在晶体管发明以前的近半个世纪里,电子管几乎是各种电子设备中唯一可用的电子器件。以此为基础,电子技术此后取得了许多令人惊叹的成就;电视机、雷达、计算机的发明,都是和电子管的开发与应用分不开的。但由于电子管在体积、功耗、寿命等方面都存在局限性,促使人们不得不进一步研制新型的性能更好的器件。1948 年 William Bradford Shockley(1910~1989), John Bardeen(1908~1991)和 Walter Houser Brattain(1902~1987)三人共同为贝尔实验室发明了晶体管,三人因此而共同分享了 1956 年的诺贝尔物理学奖。初期的晶体管是点触式的,制造比较困难,稳定性也较差,但它毕竟使人们在电子器件的设计制造方面迈出了标志性的一步。1957 年,贝尔实验室的 D·斯帕克斯发明了面触型晶体管,克服了点触式晶体管的缺点,使得问世不久的晶体管的地位巩固下来。晶体管的发明将电子技术推向了一个新的发展阶段,电子技术在此后取得的许多成就,如集成电路、微处理器和微型计算机等,都是从晶体管发展而来的。

到了 20 世纪 60 年代,真空管很快被晶体管所取代,因为后者更便宜、工作时更不易