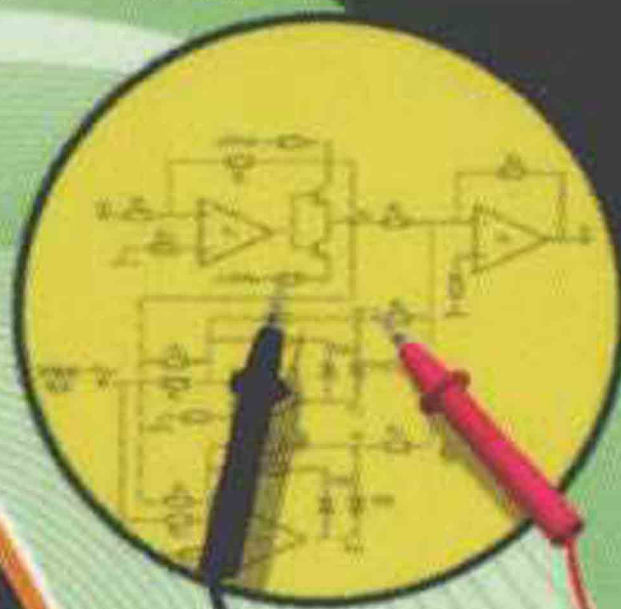


实用电子电路 设计与调试

陈梓城 汪临伟 胡敏敏 编著

(模拟电路)



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

实用电子电路 设计与调试

陈梓城 汪临伟 胡敏敏 编著

(模拟电路)



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书对实用模拟电子电路的设计和调试方法进行详细介绍。其中包括：分立元件放大电路、集成运放应用电路、波形产生及转换电路、功放电路、常用光电子应用电路、常用线性电源电路等。对各电路的构成、各元器件功用作简要介绍，对每一元器件选择给出估算公式或经验数据，使之选择有依据。本书增加了一些实用电路的设计，如采样保持电路原理与设计、线性化处理电路设计等，把重点放在模拟集成电路的应用设计上，由简到繁、由易到难，给出较多的设计示例。为增强模拟电路的综合应用能力和设计能力，本书增加了模拟电路综合应用电路设计示例一章，其中包括模拟电路与数字电路结合的数字仪表电路设计。

读者通过对本书的学习，对模拟电子电路及其系统的设计与调试会形成一个清晰的思路，培养电子电路设计能力和调试能力。本书读者对象为大、中专电类专业高年级学生、高级技工和工程技术人员，也可作为高校电子电路设计课程的教材和课程设计、毕业设计的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

实用电子电路设计与调试：模拟电路/陈梓城，汪临伟，胡敏敏编著. —北京：中国电力出版社，2011. 1

ISBN 978 - 7 - 5123 - 1365 - 1

I. ①实… II. ①陈…②汪…③胡… III. ①模拟电路 - 电路设计②模拟电路 - 调试 IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 015089 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2011 年 4 月第一版 2011 年 4 月北京第一次印刷
787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 14.625 印张 342 千字
印数 0001—3000 册 定价 29.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

刚参加工作的电子技术人员和大、中专学生在电子电路设计和调试过程中，常为缺乏较系统、较完整的参考资料、参考文献而犯难，给工作和学习带来不便，究其原因有三：一是所需资料散落在浩渺的参考文献之中，寻找困难；二是不少参考文献言犹未尽，有的缺乏依据，使人将信犹疑；三是有的电路尚无可信有据的元器件参数估算公式。电子电路调试是电子工程技术人员的基本功，在校学习期间通过实验、实习、实训进行过电子电路调试训练，大都在实验室条件下进行，和工程实际有一定差距且没有将实验技术进行系统的概括总结。为解决上述问题，编者编著了《实用电子电路设计与调试》一书，于2006年由中国电力出版社出版，出版后得到广大读者的厚爱，并提出不少意见和建议。为使电路设计方法介绍较系统、详尽，在原书的基础之上，增加最新的电路设计方法与调试实例，将其改编为《实用电子电路设计与调试丛书》出版，其中分《实用电子电路设计与调试（模拟电路）》、《实用电子电路设计与调试（数字电路）》、《实用电子电路设计与调试（电源电路）》3册陆续出版。

丛书编写过程中有以下特点。

(1) 可操作性。克服电子电路设计时电路一抄了之，不对元器件进行选择计算的错误倾向，力求做到电路设计元器件选择有根有据，有设计计算公式的代入公式计算，然后根据查手册选择元器件；无设计计算公式的则根据经验选用，并加以说明，使之科学、规范。

(2) 实用性。编入实用经验和大量设计实例，融入作者的工程实践和教学经验，增强实用性。

(3) 完整性。给读者一个较清晰的常用基本电子电路设计思路、设计方法和调试技术知识，为读者提供较完整、较系统的电子电路设计、调试方法步骤，具有较强的针对性、系统性。

(4) 直观性。书中给出较多的单元电路设计示例，并设“××电路综合应用电路设计示例”章节，为读者提供单元电路形成实用系统的实例和设计范例。读者可仿照示例进行训练，培养电子电路设计能力和调试能力。

(5) 先进性。突出集成电路的应用，适应电子技术发展新形势，加强先进性。

在本书编写过程中，尽力体现丛书编写指导思想，并注意了以下问题。

(1) 编写时以《模拟电子技术基础》为基础，简要介绍电路原理及元器件功用，一般不进行公式推导。

(2) 把重点放在常用模拟单元电路的设计与调试上，对高频放大、混频、调制、解调、高频功放等电路不予介绍。

(3) 本书增加了一些实用电路，增加了在工程实践中应用较多、在基础课教材中通常较少介绍的积分电路设计调试、采样保持电路原理与设计、线性化处理电路设计等内容，

给读者提供模拟电路实际综合应用的思路和实例。

(4) 集成电路应用日益广泛,分立元件应用日渐减少,所以本书把重点放在集成电路的应用电路设计上,并对较多专用集成电路及其设计实例进行介绍,如集成电压比较器、单片测量放大器、集成隔离放大器、单片有源滤波器、集成采样保持器等。

(5) 考虑到模拟电路在电子系统中常与数字电路配合应用,在第8章中列入了模拟、数字电路同时应用数字仪表的实用电路设计示例。

本书的读者对象为大中专相关专业的学生、高级技工和电子爱好者,也可作为高校《电子电路设计》课程的教材和电路设计、毕业设计的参考书。书中所述设计方法并不是唯一的,学习的高境界是学以致用、解决实际问题,希望读者通过本书的学习,能举一反三,解决在实践中以前遇到但未解决的问题。

本书由陈梓城、汪临伟、胡敏敏编著。其中第2章、第4章3.4、3.5节由汪临伟执笔,第5、6章由胡敏敏执笔,第8章由陈梓城、汪临伟共同编写,其余各章和附录由陈梓城执笔并负责全书的统稿工作。

本书编著过程中参考了大量参考文献,在此对参考文献的作者及关心支持本书的读者表示诚挚谢意。

由于编者水平有限,书中不当和错误之处在所难免,恳请同行、专家和读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 电子电路设计与调试综述	(1)
1.1 电子电路系统设计综述	(1)
1.1.1 电子电路系统设计的基本原则	(1)
1.1.2 电子系统设计、研制过程	(2)
1.1.3 单元电路设计	(6)
1.2 模拟电子电路设计概述	(8)
1.2.1 模拟电子电路的组成	(8)
1.2.2 模拟电子电路特点	(8)
1.2.3 模拟电子电路特点对设计者的要求	(10)
1.2.4 模拟电子电路设计的方法和步骤	(11)
1.3 电子电路调试技术综述	(12)
1.3.1 调试方案制定	(12)
1.3.2 调试前的准备工作	(13)
1.3.3 调试方法和步骤	(14)
1.3.4 调试注意事项	(16)
第 2 章 分立元件放大电路设计与调试	(17)
2.1 共射放大电路设计	(17)
2.1.1 放大电路的偏置电路、稳定度、组成原则和晶体三极管的选用	(17)
2.1.2 基本共射放大电路设计	(19)
2.1.3 分压式共射放大电路组成及性能指标估算	(21)
2.1.4 实用温度补偿电路	(22)
2.1.5 共射放大电路设计示例	(23)
2.2 共集、共基放大电路设计	(25)
2.2.1 基本共集放大电路组成及静态工作点计算	(25)
2.2.2 共集放大电路性能参数计算及其设计示例	(26)
2.2.3 共基放大电路设计	(27)
2.3 场效应晶体管放大电路设计	(28)
2.3.1 场效应晶体管放大电路组成及偏置电阻选择计算	(28)
2.3.2 场效应晶体管源极跟随器设计及其示例	(30)
2.4 分立元件放大电路调试	(32)

2.4.1	放大电路基本性能指标的测量	(32)
2.4.2	放大电路的静态调试	(35)
2.4.3	放大电路的动态调试	(36)
第3章	集成运放应用电路设计与调试	(37)
3.1	集成运放放大、运算电路设计	(37)
3.1.1	集成运放放大电路设计综述	(37)
3.1.2	反相输入放大电路设计	(41)
3.1.3	同相输入放大电路设计	(43)
3.1.4	差动输入放大电路	(44)
3.1.5	求和放大器设计	(45)
3.1.6	运放交流放大电路设计	(47)
3.1.7	反相积分电路设计	(50)
3.1.8	测量放大器、集成仪器放大器应用电路设计及其示例	(52)
3.2	电压比较器电路设计	(56)
3.2.1	单值电压比较器	(56)
3.2.2	滞回比较器	(57)
3.2.3	窗口比较器	(57)
3.2.4	集成电压比较器及其应用	(58)
3.2.5	比较器应用电路设计示例	(63)
3.3	<i>RC</i> 有源滤波器电路设计	(65)
3.3.1	有源滤波器设计概述	(65)
3.3.2	一阶 <i>RC</i> 低通滤波器	(68)
3.3.3	一阶 <i>RC</i> 高通滤波器	(69)
3.3.4	二阶 <i>RC</i> 有源滤波器设计	(69)
3.3.5	<i>RC</i> 带通滤波器和带阻滤波器设计	(72)
3.3.6	典型集成 <i>RC</i> 有源滤波器及其应用电路设计	(75)
3.4	采样保持电路原理与设计	(80)
3.4.1	采样保持器工作原理	(80)
3.4.2	采样保持电路主要参数	(81)
3.4.3	采样保持器设置原则	(82)
3.4.4	采样保持器芯片选用	(83)
3.4.5	保持电容器的选择	(84)
3.5	模拟乘法器与线性化处理电路设计	(85)
3.5.1	模拟乘法器及其主要应用基本电路	(85)
3.5.2	线性化处理电路原理与设计	(87)
3.5.3	线性化处理电路设计示例	(93)
3.6	集成运放应用电路调试	(95)
3.6.1	集成运放线性应用电路静态调试	(95)

3.6.2	集成运放放大电路动态调试	(97)
3.6.3	反相积分器调试	(98)
3.6.4	RC 有源滤波器电路调试	(99)
3.6.5	电压比较器电路调试	(100)
第 4 章	波形的产生、转换电路设计与调试	(101)
4.1	LC 振荡电路组成与设计	(101)
4.1.1	LC 振荡电路组成	(101)
4.1.2	LC 振荡电路设计	(105)
4.2	RC 正弦波振荡电路的组成与设计	(108)
4.2.1	RC 正弦波振荡电路组成	(108)
4.2.2	RC 正弦波振荡电路设计计算	(110)
4.2.3	RC 正弦波振荡电路设计示例	(110)
4.3	石英晶体振荡电路组成与设计	(112)
4.3.1	石英晶体振荡电路组成	(112)
4.3.2	石英晶体振荡电路设计	(116)
4.3.3	石英晶振电路设计示例	(116)
4.4	方波、矩形波、三角波、锯齿波产生电路组成与设计	(117)
4.4.1	矩形波、锯齿波产生电路的组成	(117)
4.4.2	矩形波、锯齿波产生电路的设计步骤	(119)
4.4.3	方波、三角波产生电路及其设计示例	(120)
4.5	波形产生、转换电路的调试	(122)
4.5.1	波形产生、转换电路性能参数指标测试	(123)
4.5.2	振荡电路不起振的调试	(124)
4.5.3	振荡波形不良的调试	(124)
4.5.4	其他非正常振荡现象及其消除	(125)
4.5.5	石英振荡电路调整	(126)
4.5.6	RC 正弦波振荡电路调整	(127)
4.5.7	方波、三角波发生器电路调整	(128)
第 5 章	功放电路设计与调试	(129)
5.1	分立元件 OCL、OTL 电路设计	(129)
5.1.1	分立元件 OCL 实用电路设计	(129)
5.1.2	分立元件 OTL 电路设计	(131)
5.1.3	分立元件 OCL 电路设计示例	(132)
5.2	集成功率放大器电路设计	(134)
5.2.1	LA4102 集成功率放大器应用电路设计	(135)
5.2.2	LM386 集成功率放大器应用电路设计	(137)
5.2.3	集成功放 TDA2030 应用电路设计	(138)

5.2.4	音调控制电路与集成扩音电路设计示例	(140)
5.3	功放电路调试	(146)
5.3.1	功放电路调试概述	(146)
5.3.2	分立元件 OCL、OTL 电路调试	(149)
5.3.3	集成功放电路调试	(149)
第 6 章	常用光电子器件应用电路设计与调试	(151)
6.1	LED 应用电路设计与调试	(151)
6.1.1	发光二极管分类	(151)
6.1.2	发光二极管的特性及使用注意事项	(151)
6.1.3	发光二极管驱动电路设计	(152)
6.1.4	发光二极管及其应用电路测试	(155)
6.2	光敏二极管、光敏三极管应用电路设计与调试	(155)
6.2.1	光敏二极管特性、主要参数	(155)
6.2.2	光敏二极管等效电路、使用注意事项	(157)
6.2.3	光敏二极管应用电路分析、设计	(158)
6.2.4	光敏二极管应用电路的频率特性	(162)
6.2.5	光敏三极管及其应用电路	(167)
6.2.6	光敏二极管、光敏三极管简易测试	(169)
6.3	光耦合器应用电路分析与设计	(170)
6.3.1	光耦合器工作原理、主要参数及其选用	(170)
6.3.2	数字信号光耦合应用电路设计	(173)
6.3.3	光耦合器组成的模拟信号放大电路分析	(176)
6.4	集成光耦型放大器应用电路设计	(177)
6.4.1	ISO100 集成光耦放大器主要参数	(177)
6.4.2	ISO100 内电路结构与基本接法	(178)
6.4.3	ISO100 应用电路设计	(179)
第 7 章	常用线性电源电路设计与调试	(181)
7.1	电源电路设计、调试概述	(181)
7.1.1	电源技术指标及其分析	(181)
7.1.2	电源电路设计步骤	(183)
7.1.3	电源电路调试步骤	(185)
7.1.4	电源电路主要性能参数测试	(185)
7.2	硅稳压管稳压电源设计与调试	(186)
7.2.1	硅稳压管稳压电路组成及适用场合	(186)
7.2.2	硅稳压管稳压电路元器件选择计算	(187)
7.2.3	硅稳压管稳压电路设计示例	(188)
7.2.4	整流滤波电路调试及常见故障排除	(190)

7.2.5	并联稳压电路调试	(190)
7.3	常用三端线性集成稳压器应用电路设计与调试	(191)
7.3.1	三端固定电压稳压器应用电路及元器件选择	(191)
7.3.2	三端固定输出稳压器应用电路设计示例	(195)
7.3.3	三端固定式集成稳压器应用电路调试	(196)
7.3.4	三端可调集成稳压器应用电路设计与调试	(197)
第8章	模拟电路综合应用电路设计示例	(200)
8.1	模拟报警器电路设计与调试	(200)
8.1.1	设计任务	(200)
8.1.2	设计任务分析	(200)
8.1.3	单元电路设计	(204)
8.1.4	电路调试与报警器的标定	(206)
8.2	桥式电阻应变片测量电路设计	(208)
8.2.1	设计任务	(208)
8.2.2	设计分析	(208)
8.2.3	设计说明	(208)
8.3	峰值检测系统电路设计	(210)
8.3.1	设计任务	(210)
8.3.2	设计分析及电路总体方案设计	(210)
8.3.3	单元电路设计	(211)
8.3.4	整机电路图绘制	(216)
附录A	电子电路设计常用元器件参数表	(217)
附表A-1	电阻器(电位器)的标称阻值	(217)
附表A-2	精密电阻器(电位器)的标称阻值	(217)
附表A-3	铝电解电容器的标称容量及允许误差	(218)
附表A-4	固定电容器的标称容量及允许误差	(218)
附表A-5	国产硅半导体整流二极管主要参数	(218)
附表A-6	国产硅半导体整流二极管最高反向工作电压 U_{RM} 分挡标志	(219)
附表A-7	几种典型晶体管主要参数	(219)
附表A-8	通用9011~9018、8050、8055晶体管的主要参数	(220)
附表A-9	2CW、2DW型稳压二极管主要参数	(221)
附表A-10	2EF系列发光二极管主要参数	(221)
参考文献	(223)

第 1 章

电子电路设计与调试综述

1.1 电子电路系统设计综述

1.1.1 电子电路系统设计的基本原则

1. 满足系统功能和性能要求

电子电路系统设计、研制过程自始至终是设计者满足适应设计任务书中规定的系统功能和性能要求的过程。好的设计必须完全满足设计要求的功能特性和技术指标。

2. 电路简单、成本低、体积小

在满足功能和性能要求的前提下，电路越简单、元器件越少、失效率越低、可靠性越高，越经济。必须指出，设计过程中采用系统集成技术是简化系统电路最好的方法。

3. 电磁兼容性好

符合国际、国家电磁兼容性标准，是现代电子产品尤其是高速、高频电子产品和电子系统鉴定定型的必备条件。产品要经过电磁兼容性认证。所以一个电子系统应具有良好的电磁兼容特性，要进行电磁兼容性及抗干扰设计。实际设计时，设计结果必须满足给定电磁兼容条件，以确保系统正常工作。如设计任务中未给出，应查国家电磁兼容性标准，按国家标准设计。

4. 可靠性高

电子电路系统的可靠性要求与系统的实际用途、使用环境等因素有关。一般情况下，大型电子系统必须进行可靠性设计。军品尤其如此，并专设可靠性设计师岗位从事可靠性设计、测试等工作。

任何一种工业系统的可靠性计算都是以概率统计为基础的，因此电子电路系统的可靠性是一种定性估算，所得到的结果也只是具有统计意义的数值。实际上，电子电路系统可靠性的计算方法和计算结果与设计人员的实践经验有相当大的关系。所以设计人员应当注意积累总结经验，提高可靠性设计水平。

可靠性设计的基本知识、系统可靠性设计、电路可靠性设计、可靠性预计及可维修性设计基本原理受篇幅限制，本书不能一一介绍。可靠性设计有不少专著，请读者查阅。

5. 系统集成度高

高集成度的电子系统，必定具有电磁兼容性好、可靠性高、制造工艺简单、体积小、质量容易控制及性能价格比高等一系列优点，所以在设计电子系统时，应最大限度地提高集成度，这是设计电子系统必须遵循的重要原则。

6. 调试简便

电子电路在设计时，必须同时考虑电路的调试问题。若一个电路系统，电子电路调试繁琐、困难或调试点过多，该系统质量难以保证，无法达到设计要求。

7. 生产工艺简单

生产工艺简单意味着以简单方式生产，成本低，质量易于控制。生产工艺是电子电路系统设计者应考虑的重要问题，无论是批量生产还是试制的样品，简单的生产工艺会对电路制作和调试带来很大的方便。

8. 操作简便

操作简单方便是现代电子电路系统的重要特征，只有操作简便的电子产品才有生命力，才有市场。

9. 节能

要求电子电路和电子系统效率高、耗电小。

10. 性能价格比高

通常我们希望所设计的电子电路能同时符合上述各项要求，但有时会出现互相矛盾的情况。例如设计中有时会遇到这样的情况：如果要使耗电最小或体积最小，则成本升高，或可靠性差，或操作复杂。在遇到矛盾的情况下，应视具体情况抓住主要矛盾来解决问题。例如对于用市电即交流电网供电的电子设备，在电路总功耗不大的情况下，功耗大小

不是主要矛盾。而对于用微型电池供电的航天电子仪器而言，功耗大小则是主要矛盾之一。

在设计过程中应注意运用“代价交换”原则。所谓“代价交换”是指牺牲一种次要性能为代价换取另一种必备性能的提高。最普通和最容易理解的例子是研制经费与设备性能之间的交换。费用也是设备的性能，但不是技术性能，它和许多性能之间都有矛盾，牺牲一些次要性能或功能以降低价格，或者不惜代价取得必要的高性能。

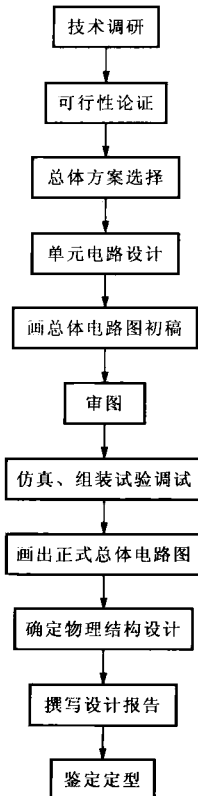


图 1-1 电子系统、电子产品设计、研制的一般过程框图

1.1.2 电子系统设计、研制过程

一个电子系统、电子设备的设计没有特定的程式可循。随着计算机科技发展，传统的设计方法与电子设计自动化共存，一个电子产品的设计、生产过程有很大差别。但凡产品设计，一般应先下设计任务书，根据任务书进行设计。对于一个电子系统、电子产品设计、研制的一般过程框图如图 1-1 所示。

1. 技术调研

技术调研的目的是了解同类系统产品的国内、国际水平，现有系统或产品的主要优缺点、主要关键技术、技术难点及其解决途径、关键元器件和材料供应情况、拟赶超的技术等，同时搜集技术资料。调研方法可外出调研，也可在互

联网上调研。

2. 可行性论证

可行性论证分为市场需求论证、经济可行性论证、技术可行性论证。

(1) 市场需求论证。市场需求论证的内涵是市场对该产品是否需要，何时需要，市场份额大小。市场论证是最重要的论证，它决定是否值得研制该产品，研制的最长允许周期（周期过长市场会被竞争对手抢占或市场需求消失），市场对产品哪些性能要求最高，有何特殊要求等。

(2) 经济可行性论证。是指进行成本估算和投资回报率的估算，同时考虑产品的社会效益。如效益很差，则取消项目，停止研制。

(3) 技术可行性论证。从技术角度论证能否在预定研制周期内完成质量合格的设计制造任务，并保证成本不高于预期目标。

3. 总体方案设计（选择）

所谓总体方案是指针对所提出的设计任务、要求和条件，从全局着眼，用具有一定功能的若干单元电路构成一个整体，来实现各项性能。在总体方案设计阶段不涉及具体电路，但涉及系统框图。总体方案设计的任务是把整个大系统划分为若干功能相对独立的分系统，确定各分系统的输入、输出信号及各分系统间的信号连接关系，对各分系统的功能作出规定，保证把分系统装接成大系统后能实现设计任务书给定的大系统功能。根据大系统性能指标，分配和制订各分系统的性能指标，如增益、带宽、时间延迟、脉冲宽度、幅度、前后沿等。制订各分系统必须遵守的内部协议，确定系统电源种类。确定各分系统之间的空间位置，并由此确定各分系统之间信号传输协议，插接件及插针定义。确定印制电路板的层次、层次分配及尺寸。设计过程中必须查阅并符合国际标准或国家标准，如电磁兼容性标准等。对自检和故障诊断提出建议，进行系统可靠性设计和可靠性指标分配等。

总体方案选择一般过程如下：提出方案，分析各方案的可行性和优缺点，比较、选择。

现在的较大电子系统一般为智能系统，由硬件和软件共同完成，在总体设计时，要划分硬件和软件各自完成的功能及其接口关系。

总体设计是整个产品设计的关键阶段。对于较成熟的产品，设计人员也要进行反复计算，关键部分还要进行实验验证。在电子设计自动化中，总体设计就是所谓的“高层次设计”或“概念设计”。在高层次设计完成后，应立即进行高层次的仿真验证。其目的是避免总体设计不当引起后续工作大量返工，甚至推倒重来。如分系统仍显得过大，可按上述方法再次细化，把分系统进一步划分为更小的子系统。

4. 分系统设计

这里所说的分系统相当于电子设计自动化中的寄存器传输级（RTL），据此开展电路设计工作。如进行手工设计，设计者必须自己画出电路框图、电原理图，进行电路参数计算、元器件选择、安装原理样机、原理实验和性能测试和调整，并改进设计，最后定型。如果分系统中包含软件，软件设计者（软件工程师）应进行软件设计，编写应用程序，调试时进行软件调试，并进行软硬件联调。

若用电子设计自动化工具进行设计时，设计者运用 EDA 软件自动完成门级以至 PCB 图的工艺设计并进行仿真验证。

5. 单元电路设计

单元电路设计详细内容见 1.1.3 节。

6. 审图

在设计过程中有的问题考虑不周，参数计算有误在所难免。为确保设计质量，在画出总原理图初稿并计算参数后，一般要进行审图。以便发现原理图中不当或错误之处，使组装试验阶段少走弯路。尤其是较复杂电路在仿真、组装试验之前一定要对图样进行全面审查，必要时可请经验丰富的同行、专家一起审图。

审图时应注意以下问题。

(1) 从全局观念出发，检查总体方案是否合理，有无问题，是否有更佳方案。

(2) 检查各单元电路是否正确，电路形式是否合适。

(3) 检查电路是否可以简化。

(4) 检查模拟电路的各单元电路之间耦合方式有无问题。数字电路各单元电路之间电平能否正常配合、时序配合有无问题、逻辑关系是否正确，是否会产生冒险竞争。

(5) 对图中标出的元器件型号、参数进行验算，能否达到性能指标，是否留有恰当裕量。

(6) 特别要检查电路图中各元器件能否满足安全工作，是否工作在额定值范围内。

(7) 在解决所发现问题后，若改动较多，应再次复查。

7. 仿真、组装试验调试

随着计算机广泛应用和 EDA 技术的发展，电子电路设计由电路组装、实验演变为仿真与组装试验调试相结合，仿真与组装试验调试成为电子系统、电路设计中不可缺少的步骤。仿真和组装试验调试要完成以下任务。

(1) 检查各元器件的性能、参数、质量能否满足设计要求。

(2) 检查各单元电路的功能和性能指标是否达到设计要求。

(3) 检查各个接口电路能否起到规定的作用。

(4) 将各单元电路组合起来，检查总体电路的功能，检查总电路性能参数是否达到或超过设计目标。

(5) 在组装试验调试前要编制调试方案，按方案进行试验、调试。在试验、调试过程中，要做好试验、调试记录，为编制生产中调试工艺作准备。

8. 总体电路图绘制

在原理电路设计完成后，应画出总体电路图；在仿真、实验调试后，应绘制正式总体电路图。绘制的电路图应做到：布局合理、排列均匀、稀密恰当、图面清晰、美观、比例协调、便于读图、便于理解，并注意以下问题。

(1) 注意信号流向。应从输入端或信号源画起，由左至右、由上而下按信号流向依次绘制各单元电路。

(2) 总图尽量绘制在一张图纸上。如电路较复杂，需分绘数张图纸时，应把主电路绘制在同一张图纸上，而把较独立或次要部分画到另一张图纸上，并在图的断口两端做好标记，标出信号从一张图到另一张图的引出点与引入点，以说明各图纸在电路连线之间的关系。

(3) 图形符号标准。符合国家标准或用国际通用符号。

(4) 连接线一般画成水平线或垂直线，并尽量减少交叉与拐弯。相接通的交叉线应在交叉处用实点标出。根据需要，可在连接线上加注信号名称或其他标记，表明其功能或去向。

9. 确定物理结构设计

物理结构设计包括电子设备的防护设计，电子设备、电子电路热设计，电子设备和电子电路的电磁兼容性设计，电子设备的减振与缓冲设计等。其他设计参阅有关文献。

10. 撰写设计报告或设计说明书

设计报告又称设计说明书，是设计工作的总结，又是完成设计任务的技术文件。一般设计说明书包括以下内容。

(1) 课题名称。

(2) 内容摘要。

(3) 设计任务和要求。

(4) 总体方案选择论证。包含曾考虑过的方案框图，简要原理和优缺点以及所选定最终方案之理由等。

(5) 单元电路设计。包括电原理图、参数计算和元器件的选择。

(6) 绘出总体电路图，并标出关键节点的电位或波形图，说明电路工作原理。

(7) 仿真、组装与调试。包括：① 仿真方法与结果；② 调试用的主要仪器、仪表的名称、型号、生产厂家和生产年月等；③ 测试的数据、波形，必要时与计算结果比较，进行误差分析；④ 组装与调试的方法、技巧和注意事项；⑤ 调试中出现的故障现象、故障原因分析与排除方法。

(8) PCB 图设计文件及 PCB 图。

(9) 元器件清单。将所用元器件编号列表，包含序号、在图中的编号，名称、型号与规格、数量以及必要的说明等。

(10) 小结。需继续做的工作及改进建议。

(11) 参考文献。按国家标准列出，含作者、文献名称（刊物名称）、出版社地名、出版单位、出版时间、卷号。

11. 鉴定、定型

召开鉴定会聘请业内专家对产品进行鉴定，申请报批或厂内批准定型。

12. 设计中需注意的几个问题

(1) 方案论证。在方案设计阶段必须做好方案论证工作，即对每个提出的方案进行分析比较，比较优劣，最后综合出最佳设计方案，这样可以保证设计研制过程中不出现大的返工。方案中采取的每一技术措施都必须有充分的论据。

把每一元器件型号的选用也列作方案设计的内容，因型号的选取也会直接影响系统和产品的性能。例如中低速电路中选用高速器件，不仅提高了成本，而且会增加对外部的电磁干扰，不符合电磁兼容设计原则。在高频振荡回路中的电容必须用损耗较小的品种，如果设备的空间有限，还要考虑电容的体积尺寸，选体积小的电容器；再如电路所用运算放大器的选用，对性能指标无特殊要求时，一般选廉价通用的型号。但究竟选用什么型号，可有多种考虑，例如库房现有型号、价格最低的型号、市场供应货源充足的型号、最熟悉的型号等。

方案论证一般应召开方案论证会，广泛听取意见。例如外购件所选型号价格虽低，但该型号已绝版，不利于今后生产，应认真听取各种反对意见。

设计时我们对单元电路中的元器件选用应有多种考虑，对于要采用的其他重要技术措施更应认真对待，充分论证。

在单元电路设计中，也有方案论证问题，如电路选用及改进方案论证、元器件选用等。设计者应在设计说明书中进行阐述，做到有根有据。

(2) 关于约束条件。设计任务中，大部分技术要求是很明确的，但也会有些很重要的设计要求在设计任务中没有明确提出，而包含在某种约束条件中，例如环境条件、经费限制、必用设备限定、研制周期、用户指定的材料等，在方案设计时，应认真分析予以解决。

(3) 标准化问题。对于一个正规企业应有专人管理标准化工作。标准化工作也是重要的技术工作。通过这一工作使得设计文件与设计产品符合国际标准或国家标准。

实际上如不符合标准，有时生产科研就无法进行。例如电阻、电容的数值要按标准系列选取，否则市场上买不到，除非到厂家定制。电阻的标称系列分7个，即 E_3 、 E_6 、 E_{12} 、 E_{24} 、 E_{48} 、 E_{96} 、 E_{192} ，其中 E_3 系列误差大于 $\pm 20\%$ ， E_6 是Ⅲ级精度 ($\pm 20\%$)， E_{12} 是Ⅱ级 ($\pm 10\%$)， E_{24} 是Ⅰ级 ($\pm 5\%$)。 E_{48} 、 E_{96} 、 E_{192} 属于精密电阻系列，其精度从 $\pm 2\% \sim 0.5\%$ ，它们的阻值取三位数。系列中的数字表示该系列电阻包含的标称阻值的数量，例如 E_{192} 系列表示该系列有 192 个标称阻值，这些阻值可用式 (1-1) 计算得到

$$R_n = 100 \times \left(\sqrt[192]{10} \right)^n \quad (1-1)$$

$E_6 \sim E_{192}$ 电阻标称阻值可查表得到，标称阻值表见本书附表 A-1、附表 A-2。例如经设计计算要用 75.5Ω 电阻，查附表 A-1、附表 A-2 得知，表中没有这个阻值，说明市场上买不到 75.5Ω 电阻，但经查附表 A-2 与 75.5Ω 相近的阻值是 75.0Ω 和 75.9Ω ，因此只能取与其相近的 75.9Ω 。

电容的标称系列与电阻相似，铝电解电容标称容量及允许偏差见附表 A-3，固定电容器标称容量及允许偏差见附表 A-4。

1.1.3 单元电路设计

在选定总体方案后，便可画出详细框图，设计单元电路。单元电路就是基本的功能电路。单元电路设计很重要。它可能是整个系统中最基本的部分，只占几分之一甚至百分之一、千分之一。但大系统中的整体性能是由各单元电路的性能来支持和保证的。其中某一单元电路性能达不到要求，可能会使整个系统瘫痪或达不到预定设计目标。

单元电路设计包括以下几个步骤：① 选电路，进行电路拓扑设计；② 计算参数；③ 选择元器件；④ 仿真或实验，对设计情况进行验证。

1. 选电路

选电路就是进行原理和电路拓扑结构的选择与设计。选电路时应尽量选用成熟的先进的电路，也可根据需要对成熟电路稍加改进。在设计过程中应查阅有关资料，以丰富知识、开阔眼界。从已掌握的知识和了解的诸多电路中进行分析比较，选择一个合适电路。如确实找不到性能指标完全满足要求的电路时，可选用与设计要求较接近的电路，然后调

整电路参数，使之达到要求。有些参数很难用公式计算确定，需要设计者具备一定的实际经验，也可查阅参考文献给出的经验取值。如确实无法确定，个别参数可待仿真或搭接电路实验后再确定。

在单元电路设计过程中，要有全局观念，要特别注意保证各功能模块协调一致地工作。在模拟电路系统中，要根据需要选用合适的耦合方式把它们级连。在数字电路系统中，主要通过控制器使之协调一致地工作。控制器不允许有竞争冒险和过渡干扰脉冲出现，以免发生控制失误，产生误动作。对于所选的功能模块进行设计时，要根据集成电路的技术性指标和功能块应完成的任务，正确计算外围电路的参数、选择元器件。对于数字集成电路，对各功能输入端应正确处理、连接。

2. 电路参数计算

电路参数计算是保证电路达到性能指标的基础和选择元器件的依据。因电子元器件性能参数的离散性及标称规格分级有限且存在误差，电路组装后必须进行调试，故元器件参数的计算常称为估算。设计者应熟知电路工作原理、性能特点，正确利用计算公式，所计算的参数才能准确无误，达到设计要求。计算电路参数时应注意以下问题。

(1) 在设计计算过程中，若出现理论计算结果不统一，应根据性能、价格、货源、体积等诸方面条件综合考虑、选择。

(2) 元器件的工作电压、电流和功耗等都要符合要求，并留有适当裕量。

(3) 对于环境温度、交流电网电压等工作条件，设计计算时应按最不利的情况考虑。

(4) 对元器件的极限参数必须留有足够裕量，一般应大于额定值 1.5 倍以上。例如，实际电路中晶体三极管 U_{CE} 最大值为 U_{CEm} ，反向击穿电压应按下式计算

$$U_{(BR)CEO} \geq 1.5 U_{CEm} \quad (1-2)$$

3. 元器件选择

在进行电路参数计算后，即可进行元器件选择。选择时应根据电路工作条件如环境温度、电源、电磁干扰以及可靠性要求等来选择。选择元器件时应注意如下问题。

(1) 在保证电路性能指标的前提下，应尽量减少元器件品种、规格、体积和厂家个数。

(2) 选用集成电路具有减小电路元件体积和成本、提高可靠性、简化设计、安装调试方便等优点，在元器件选择时应优先考虑选用。

(3) 电阻值尽可能在 $1M\Omega$ 范围选用，一般最大不应超过 $10M\Omega$ 。其数值应在常用电阻值标称系列之内选定，并根据设计要求及电路具体情况，正确选择电阻的品种，电阻标称系列表见附表 A-1，电阻的选用见附表 A-2。

(4) 非电解电容尽可能在 $100pF \sim 0.1\mu F$ 范围内选用，其数值应在常用电容器标称系列之内选定，并根据设计要求及电路工作具体情况选择电容品种。常见的固定电容器性能特点及适用范围见附表 A-3、附表 A-4。

(5) 电位器阻值亦应在标称范围内选择，电位器品种种类繁多，应根据设计电路的要求及电路工作的具体情况选定。

4. 仿真与实验

其内容与第 1.1.2 节中仿真、组装试验调试相同。