

Technology
实用技术

活学活用
电子技术

电源电路 设计技巧

〔日〕马场清太郎 著

丁志强 译



科学出版社

013057553

TN710.02
32

活学活用电子技术

电源电路设计技巧

〔日〕马场清太郎 著

丁志强 译



北航

C1668930

TN710.02

32

科学出版社

北京

013025253

图字:01-2012-1764 号

内 容 简 介

本书从实际应用出发,在介绍电源电路工作原理的同时,重点讲解电源电路的设计方法和技巧。本书涉及目前广泛使用的稳定电源电路,对电源电路进行实际的设计、制作,并对设计值和实验结果进行比较,以验证设计的正确性。

本书可作为从事模拟技术开发及电路设计的技术人员的参考书,也可供工科院校相关专业师生参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

电源电路设计技巧/(日)马场清太郎著;丁志强译. —北京:科学出版社, 2013. 7

(活学活用电子技术)

ISBN 978-7-03-037470-7

I. 电… II. ①马… ②丁… III. 电源电路-电路设计 IV. TN710.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 097408 号

责任编辑:孙力维 杨 凯 / 责任制作:魏 谨

责任印制:魏 谨 / 封面设计:卢雪娇

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京东海印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

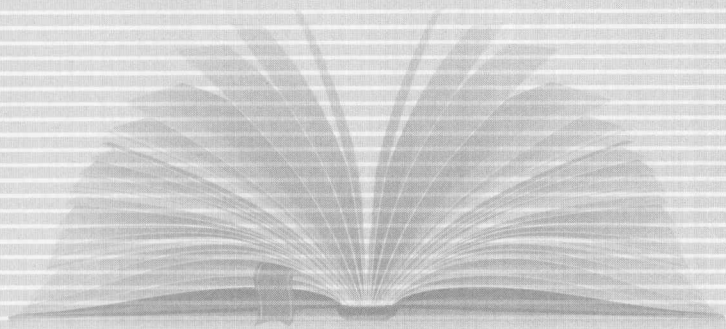
2013 年 7 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2013 年 7 月第一次印刷 印张: 21 3/4

印数: 1—4 000 字数: 420 000

定 价: 58.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前言

我们常说“电源电路是一切电子设备的心脏”，电子设备消耗的能量全部由电源电路提供。电源电路位于电子设备内部，可将商用交流电或电池输入的电能转换为满足电子电路需要的电能，以供设备使用。电源电路对于电子设备的运行来说，像心脏对于人一样，是必不可少的。

在设计电子设备时，为了使电路能够正常运行，设计人员必须具备必要的电源电路知识。在实际的设计过程中，设计人员往往优先设计能实现具体功能的电子电路，而“心脏部分”的设计却经常被忽视。因为出现了为数众多的使用方便的 IC(集成电路)，所以貌似简单的电源电路被放到最后设计，然后安装在电路板的剩余位置，这种情况很常见。但是，电源电路会产生噪声和热量，系统的重要功能会受其影响而不能实现，所以有时会导致要重新进行电路布局、散热等设计。

电子管时代的电源电路，除了一部分精密测量仪器外都不使用稳定电源，而是把变压器连接到商用交流电上，通过绝缘、变压、整流、滤波得到未稳定化的直流电源。离散半导体这类有源器件取代了电子管并开始广泛使用后，电源在耐压上变得没有裕量，稳定化电源的使用就多了起来。现在，IC 的广泛使用对电源电路提出了更为严格的要求，不使用稳定化电源的电子设备基本上已经销声匿迹了。

本书涉及目前广泛使用的稳定化电源电路。稳定化电源的电路形式可以大致分为使输出连续稳定化的线性调节器和用开关方式不连续稳定化输出的开关调节器两种。两者相比较，线性调节器因为采用连续运行方式，损耗大、体积大但不产生噪声；开关调节器在不连续点会产生较大的噪声，但损耗小、体积小。最近为了符合节能规范，对高效率化的要求越发严格。与此同时，对小型化、低价化的要求也越发严格，因此大部分的电子设备都已经开始采用开关调



节器了。

本书内容是针对上述情况,将连载于《晶体管技术》杂志上的“学会了!! 电源电路学习班”栏目大幅删改后再编而成的。

本书中,对电源电路进行了实际的设计、制作,并对设计值和实验结果进行比较,以验证设计的正确性。因此使用的是易于实验的频率(80kHz)和老式的电源用 IC。现在实用的电源用 IC,大部分采用表面贴装,不用专门的印刷电路板制作是无法进行实验的。虽然在实验中使用了旧型号的 IC,但是也介绍了适用于目前实际设计的电源用 IC。

本书中的实验电路采用能保证读者安全实验的低压非绝缘型调节器,对涉及高压的绝缘型 AC-DC 变换器只进行了介绍而未进行实验。

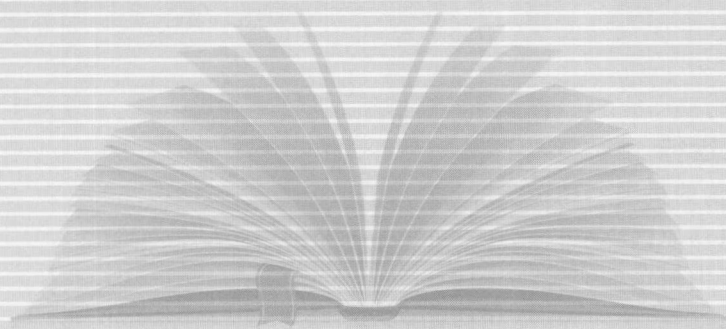
电源电路中未写明的参数有很多,要真正理解其运行原理,必须简单地列出易于理解的近似公式,然后进行设计,再通过实验加以验证。本书中,把各种电源的运行状态表示成近似的简单的一次方程式,然后给出设计方法。如果读者理解了这种一次近似的设计方法,遇到设计方法不详但特性优良且形式新颖的电源电路时,就能够自己完成设计了。随着通过实验不断积累设计经验,设计者代入近似式的参数精度也会提高,从而能在短时间内设计出符合要求的电源。

不过,书中列出的算式有些也有错误。我才疏学浅且性格马虎,料想本书中的错误也不在少数。关于本书中的公式和计算示例,务必请读者先验算之后再用于设计。如若发现内容错误或排版错误,经由编辑部告知于我则甚感荣幸。

电源电路是和电力密切相关的模拟电路,具有模拟电路特有的负反馈稳定性和噪声问题,还存在如何减小和如何处理作为热量散发掉的损耗问题。这都是需要学习多本专业书才能明白的问题。本书只对基本事项进行说明,在书后列举有参考文献,希望读者对照原著做更深刻的理解。

马场清太郎

2009 年 4 月



目 录

第 1 章 电源电路设计概要	1
1.1 电源电路正常运行才能实现其功能	1
1.2 制作输出稳定电压的电源电路	1
1.3 使用直流的两种电源电路	4
1.4 设计实用电源系统须知	6
1.5 进行电源电路设计时有必要考虑负载的性质	7
1.6 直流稳定电源的发展趋势	9
1.7 何谓理想的电源电路	11
1.8 电源电路的重要特性——效率	12
1.9 直流稳定电源设计的第一步是方式的选择	13
第 2 章 并联调节器	17
2.1 控制器件与负载并联接入的并联调节器	17
2.2 并联调节器 IC 的使用方法	23
2.3 齐纳二极管与并联调节器 IC 的特性	26
第 3 章 三端调节器	31
3.1 串联调节器简介	31
3.2 典型的三端调节器	33
3.3 使用三端调节器 IC 时的注意事项	34
附录 三端调节器的散热设计	38
第 4 章 LDO 调节器	45
4.1 输入输出的电压差小, LDO 调节器也能运行	45
4.2 串联调节器 IC 的使用方法	50
附录 输出晶体管的接地形式	55



第 5 章 线性调节器稳定运行	59
5.1 调节器产生振荡的机理	59
5.2 调节器 IC 的振荡原因	64
5.3 使调节器 IC 产生振荡的实验	67
附录 波德图的画法	72
第 6 章 开关调节器的基础	77
6.1 开关方式的特征	77
6.2 基本结构与运行	78
6.3 损耗的原因与对策	80
6.4 开关调节器的种类	83
6.5 制作简单的开关调节器	84
第 7 章 降压型变换器的基本电路	89
7.1 降压型变换器的电路	89
7.2 降压型变换器的设计步骤	94
7.3 试制降压型变换器	97
7.4 尝试让降压型变换器运行	100
7.5 降压型变换器实用化的条件	102
第 8 章 开关电源的电路形式	103
8.1 拓扑变换	103
8.2 电源电路的拓扑变换	105
8.3 各种电路的电压转换比	110
8.4 各种电路的特征	114
第 9 章 降压型变换器的实用电路	117
9.1 实用电源电路的功能	117
9.2 制作实用的降压型变换器	122
9.3 基于功率 MOSFET 的实用降压型变换器	126
9.4 目前采用的开关器件均是功率 MOSFET	129
9.5 目前常用的降压型变换器 IC 的例子	132
第 10 章 升压型变换器的实用设计	139
10.1 升压型变换器的设计方法	139
10.2 试制升压型变换器	144



10.3	升压型变换器的改良	149
第 11 章	升降压型变换器	151
11.1	升降压型变换器的设计	151
11.2	采用控制方式 I 的升降压型变换器	154
11.3	采用控制方式 II 的升降压型变换器	157
11.4	升降压型变换器控制 IC	159
第 12 章	反转型变换器与新型变换器	163
12.1	运行原理与特征	163
12.2	反转型变换器的设计与实验	165
12.3	新型变换器的设计与实验	169
12.4	反转型/升降压型/新型变换器的实用电路	178
第 13 章	DC-DC 变换器与效率	183
13.1	效率的计算方法	183
13.2	使用同步整流电路	185
13.3	同步整流电路的实验	187
附录	电源各部分损耗的计算方法	190
第 14 章	高效率 DC-DC 变换器用 IC	197
14.1	最高开关频率为 4MHz 的同步整流降压型变换器 LT3561	197
14.2	从 0.3V 开始运行的同步整流升压型变换器 TPS61200	200
14.3	最大效率为 96% 的同步整流升降压型变换器 TPS63000	203
14.4	2A 连续输出/宽输入电压范围的同步整流升降压型 变换器 LTC3533	206
第 15 章	DC-DC 变换器稳定运行	211
15.1	振荡的原因	211
15.2	降压型变换器的负反馈稳定性	214
15.3	通过仿真来预测稳定性	221
15.4	闭环增益的测量方法	224
15.5	通过实验确认负反馈稳定性	229
15.6	确保稳定性的另一种方法	231
15.7	降压型变换器的高频开关	233



15.8 其他形式的 DC-DC 变换器	234
第 16 章 DC-DC 变换器的高速控制	237
16.1 基于电流模式控制的高速化	237
16.2 电流模式控制的实验	242
16.3 实用的电流模式 DC-DC 变换器	245
16.4 基于 ON/OFF 控制的超高速 DC-DC 变换器	252
第 17 章 电感器与变压器	259
17.1 电学与磁学	259
17.2 安培定律与法拉第定律	264
17.3 磁性材料的性质	265
17.4 涡电流产生的损耗	269
17.5 求解电感器与变压器的电感	275
17.6 求磁通密度	278
17.7 保存的能量与损耗	280
17.8 电感器概要	281
17.9 变压器概要	284
附录 什么是电流互感器	288
第 18 章 电阻和电容器的基础知识	295
18.1 电 阻	295
18.2 电 容 器	298
18.3 缓冲电路	303
18.4 降 额	305
第 19 章 电力半导体的基础知识	309
19.1 高速二极管	309
19.2 双极型晶体管	312
19.3 功率 MOSFET	315
19.4 降 额	322
第 20 章 印制电路板的图案设计	325
20.1 开关电源的输出噪声	325
20.2 印制电路板设计	328
参考文献	333



第 1 章

电源电路设计概要

电子设备消耗电能才能进行必要的工作。电源电路位于电子设备内部,可将商用交流电或电池等输入的电能转换为电子电路需要的电能,以供电子设备使用。一言以蔽之,电源电路就是能量转换电路。

直流稳定电源的能量转换有两种电路方式,即把多余的能量变为热量的线性调节器和改变能量的形态但不散发热量的开关调节器。线性调节器几乎不产生噪声,开关调节器在以开关方式转换能量时可能会产生较大的噪声。

本章对根据负载特性选择电源电路的方法及电源电路的发展趋势进行简要介绍。

1.1 电源电路正常运行才能实现其功能

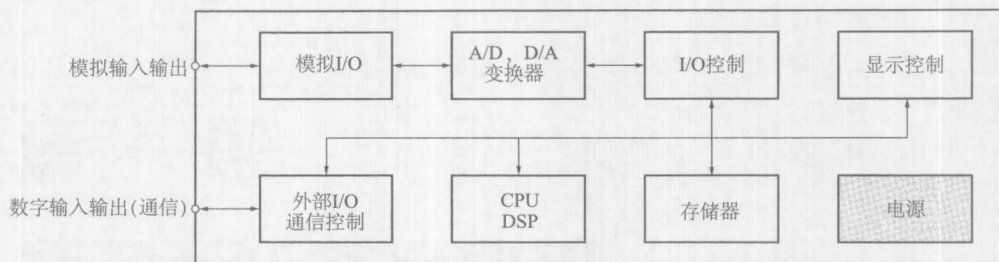
以信号为中心绘制的电子设备功能框图如图 1.1(a)所示,将其以电源为中心重新绘制则成为图 1.1(b)所示的形式。

从功能角度看一个电子电路时,常常会忽略电源电路部分,不过前提是电源电路正常运行。在排除故障时,常常对电源电路运行正常深信不疑,可是实际情况是电路状态不正常的原因往往在于电源,因而在查明故障原因时浪费了不少时间,大概谁都有过这种经历吧。信号如同“神经系统”,电源如同“血液循环”,应该先确保电源能够实现正常的供给,然后再检查信号的传送,希望读者养成这样的习惯。

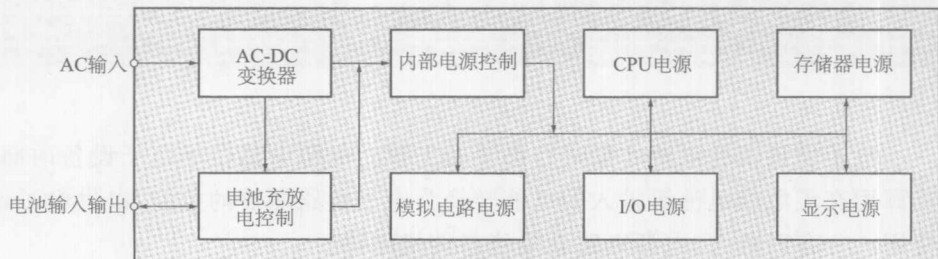
1.2 制作输出稳定电压的电源电路

1. 以往的电源电路中不稳定的居多

电子管时代的电源电路,除了部分精密测量仪器外,都不使用稳定电源。



(a) 功能框图



(b) 电源电路框图

图 1.1^[20] 电子设备的功能框图和电源电路框图

(对于目前的电子设备,功能框图中所需的电源电压有多种,对电源的上升/下降标准有规定(称为时序)的情况也在增加)

普遍情况是把变压器直接接到商用交流电源上,只经过绝缘/变压,再对变压器二次侧的交流电压进行整流/滤波,得到不稳定的直流电源。

2. 现在一般使用输出恒定电压的稳定电源

有源器件取代了电子管器件并开始广泛应用后,虽然在耐压上不如电子管有裕量,但稳定电源的使用变得多了起来。

直流稳定电源电路把输出的直流电压控制在恒定的数值上。导致输出电压变动的主要因素有输入电压、负载电流、环境温度。抑制这些可能引起输出电压变动的因素,得到恒稳的直流输出电压,就是直流稳定电源电路的功能。

3. 稳定电源的优点

若要问起是不是所有电子电路都有必要使用稳定电源,答案是否定的。稳定电源电路本身也是电子电路,它依靠未稳定的直流电源运行,将稳定的直流电压提供给实现具体功能的电路。那么,稳定电源的优点是什么呢?

1) 电路在实现功能的同时又要承受电源变动,难以兼顾

让实现功能的电路在波动大的非稳定直流电源下运行,需要使用耐压和功



耗都有裕量的半导体器件。这种半导体器件外形尺寸大且价格高。考虑到目前主流的 CMOS 型 IC, 其损耗与电源电压的平方及频率成正比, 因此电路难以在高速环境下运行。

2) 应对电源变动与实现功能相互分离, 简便易行

在制作价格便宜的小型电子设备时, 人们希望在实现具体功能的电路中使用虽在耐压上没有裕量但价格便宜、体积小巧的半导体, 而电源变动的部分由稳定电源电路承担就可以了。这样一来就降低了 IC 的电源电压, 可以低功耗高速地进行工作。

总而言之, 使用稳定电源的目的就是靠分工来提高半导体器件的利用率。并且, 如果稳定电源电路尽可能地使用内部损耗小的电路, 设备整体就能变得既造价低廉又体积小巧。

4. 不对电源电压进行稳定的后果

下面列举一个未对输出电压进行稳定的例子。某个额定输出为 DC 15V/350mA 的非稳定输出 AC 适配器, 其输出特性如图 1.2 所示。

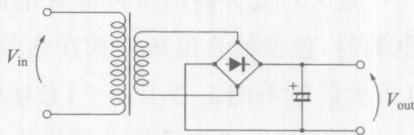
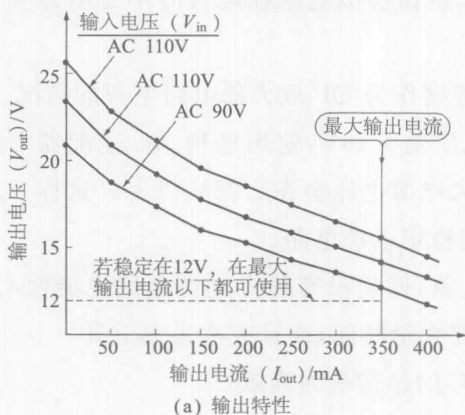


图 1.2 电压未稳定的 AC 适配器

(目前也有很多恒压输出的 AC 适配器)

输出电压由于输入电压或输出电流的变动会产生大幅度的变化。标称 15V 的输出电压值, 是在输入电压为 AC 100V*、输出电流为 300mA 的情况下实测得到的。

* 日本的市电电压为 100V。——译者注



而能从图 1.2 中看明白输出额定值为 DC 15V/350mA 的,恐怕只有专家吧。

虽说这只是一个例子,但是对于非稳定输出 AC 适配器来说,像这样输出特性不佳的情况还是很普遍的。

1) 电源电压变动大,数字电路不易设计

以作为数字 IC 代表的 74HC 系列 IC 为例,让我们考察一下使用这种非稳压电源能否让其运行。

74HC 系列推荐的电源电压是 2.0~6.0V。考虑额定输出电压为 DC 3.5V 左右的 AC 适配器,预计的电源电压变动范围为 3~6V,勉强可使 IC 运行。

但是,对于不同的电源电压,74HC 系列的运行速度会有所不同。针对运行速度问题,使用稳定电源在设计上可获得较高效率。

2) 模拟电路难以应对电源电压的变动

在使用模拟电路的场合,若是单电源的 OP 放大器电路,可以做出允许图 1.2 所示的电压变动程度的设计。但是,想让模拟电路在运行时不受电源变动的影响,是需要花费一番心思的。

让我们准备两个 AC 适配器,再来考察作为 OP 放大器电路电源的情况。

一般 OP 放大器的最大额定电源电压是 $\pm 18\text{V}$,使用这种 AC 适配器形式的电源时,包括输入电压变动在内的最大电源电压会在 $\pm 25\text{V}$ 以上。这样一来 OP 放大器就不能正常工作了,必须使用稳定电源电路。

若使用分立式半导体并设法改进电路,即使没有稳定电源电路也能使 OP 放大器正常运行。但是,这样做不但需要大量时间,而且成本也会上升。

综上所述,稳定电源+OP 放大器 IC 的结构最为高效。

1.3 使用直流的两种电源电路

1. 稳定电源种类繁多

稳定电源的电路形式大致可以分为使输出连续稳定的线性调节器和用开关方式使输出不连续稳定的开关调节器两种。

最近,出于小型化、低价格化的需要,大部分的电子设备都开始采用开关调节器了。



2. 使输出电压稳定的电源

直流稳定电源中,除了使输出电压稳定的恒压电源以外,还有使输出电流稳定的恒流电源以及使输出功率稳定的恒功率电源(图 1.3)。

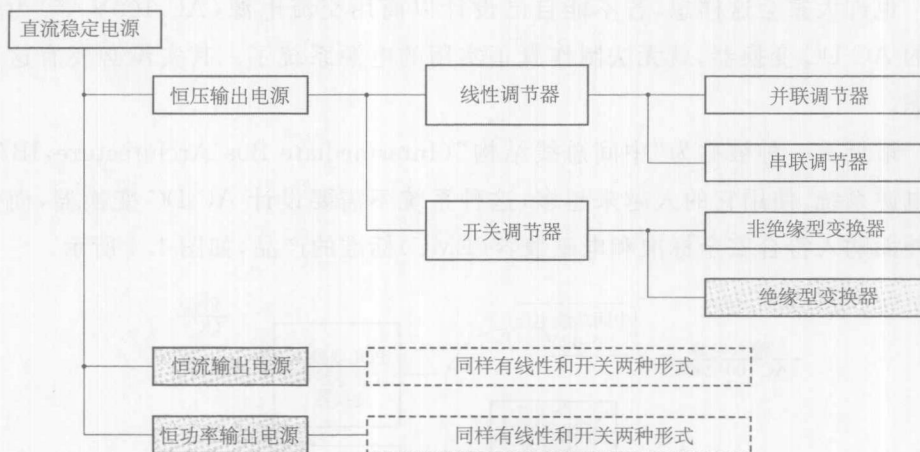


图 1.3 直流稳定电源的种类

(常用的采用 AC 100V 等商用交流电源供电的电源有开关调节器和线性调节器)

恒流输出与恒功率输出的直流稳定电源电路使用率较少,故本书并未涉及。

3. 线性调节器和非绝缘型开关调节器

如图 1.3 所示,开关调节器分为输入、输出之间未经绝缘的非绝缘型和使用变压器绝缘的绝缘型两种。

绝缘型开关调节器大多直接连接到商用交流电源上,这种情况下,因为输出与交流电源电路绝缘,安全性得以保证,故被称为离线变换器或含有输入整流电路的 AC-DC 变换器。

关于这种绝缘型开关调节器,因为高频绝缘变压器没有标准产品且不易入手,而且还要顾及安全标准,故本书只进行简单介绍而并未实际制作。

本书主要涉及能进行安全实验的线性调节器和非绝缘型开关调节器(DC-DC 变换器)。目标就是在通过实验对电源运行情况进行确认的同时,学习使用频率较高的两种恒压电源电路的设计、制作及使用等基本知识。



1.4 设计实用电源系统须知

1. 购买输入为 AC 100V 的电源电路

也许大家会这样想,若不能自己设计以商用交流电源(AC 100V 等)为输入的 AC-DC 变换器,就无法制作真正实用的电源系统了。其实没必要有这种顾虑。

最近有一种被称为“中间总线结构”(Intermediate Bus Architecture, IBA)的电源系统,使用它的人越来越多,这种系统不需要设计 AC-DC 变换器,而是从外面购入符合安全标准和电磁兼容(EMC)标准的产品,如图 1.4 所示。

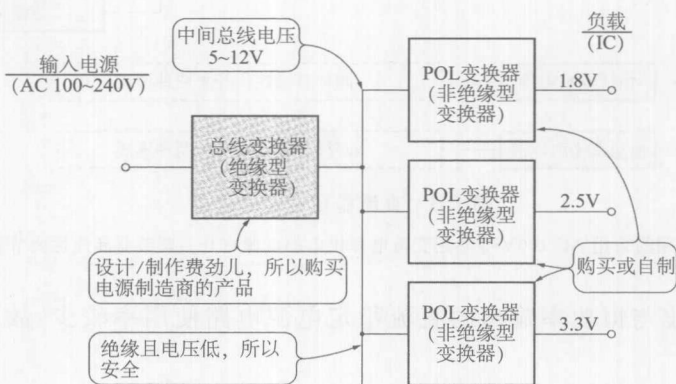


图 1.4 中间总线结构的电源系统概要

(适用于目前需要各种电源电压的电子设备)

2. 设计由直流电压得到直流电压的电路

二次侧的直流电压(称为中间总线电压)控制在安全且易于处理的 5~12V 水平。

在 IC 等的近旁,安装称为 POL(Point of Load,负载点)的 DC-DC 变换器或线性调节器,它把中间总线电压变换为需要的电压。

这样一来,就没有必要通过特别订货购入把必要的电源都放在其中的高价的多输出组合式电源了,使构建与负载电子电路相匹配的廉价高效电源系统成为可能。

目前,数字 IC 对电压的要求,不只是以前那样的 5V,还有 3.3V、2.5V 等



多种,因而 POL 这样的结构更为便利。

为了制作实用的电源系统,本书的目标是在对 DC-DC 变换器和线性调节器进行实验的同时,使读者学到基本的知识。

在实验时,基本上是使用直流电源。这里所说的直流电源是指实验用的台式电源,它是把绝缘变压器、整流/滤波电路、线性调节器组合到一起的高性能电源。

1.5 进行电源电路设计时有必要考虑负载的性质

1. 数字电路和模拟电路要求电源电路提供的电流波形有很大的差异

本节中假设负载是电子电路,其中,数字电路和模拟电路要求电源必须提供的电流波形有很大的差异(图 1.5)。

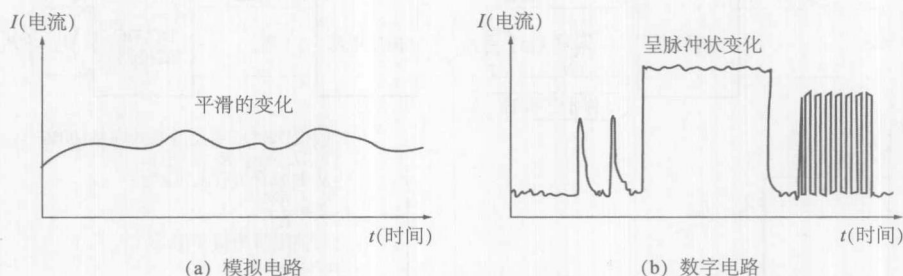


图 1.5 电源电路必须提供的电流波形

(为了响应数字电路消耗的脉冲状电流,选用恰当的输出电容尤为重要)

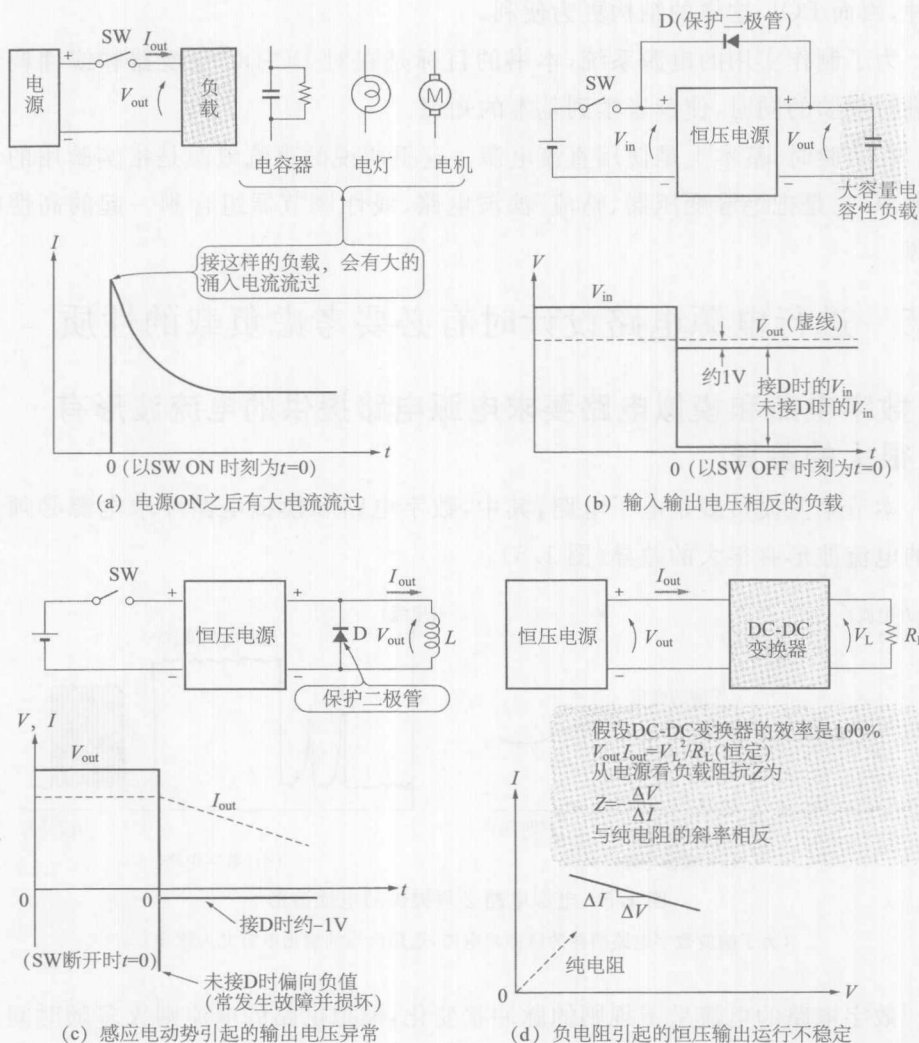
数字电路的电流呈不规则的脉冲状变化,模拟电路的电流则大多随时间变化而缓慢变化。

对于数字电路的脉冲性负载电流变化,电源电路的有源器件大部分情况下都不能响应。唯一能够进行响应的方式是输出端接入的电容对电荷的充放电。

2. 设计阶段有必要充分考虑的负载种类

一般要特别注意以下几种负载:电容性负载、电灯负载、电机负载、电感性负载、DC-DC 变换器,以及其他负载,如图 1.6 所示。

电容、电灯、电机负载在电源为 ON 时有过大的涌入电流,过流保护电路的设计会导致电源电路(以及后续的电路)不能启动。



电容负载在电源电路输入端为 OFF 的时候,输出与输入的电压会发生翻转,若无保护二极管,则损坏的可能性较大。

电机和电感负载在电源电路输入端 OFF 的时候,会产生反电动势,若无保护二极管,大部分情况下都会导致电源电路的损坏。

对于 DC-DC 变换器,若选用高效率的开关型 DC-DC 变换器,问题也会随之而来。