

# 实用电源电路设计

从整流电路到开关稳压器

〔日〕户川治朗 著

高玉苹 唐伯雁 李大寨 译

宗光华 校



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

# 实用电源电路设计

从整流电路到开关稳压器

〔日〕户川治朗 著

高玉苹 唐伯雁 李大寨 译

宗光华 校

科学出版社

北京

图字: 01-2005-1160 号

## 内 容 简 介

本书根据各种应用领域的电源装置实例,详细讲解了电源的设计方法。全书内容共分两篇:第1篇主要介绍线性稳压器的设计方法,包括整流电路的设计方法,如何选择整流二极管和平滑电容器以及如何抑制冲击电流,稳压二极管和基准电压 IC 的基本性能及利用技术,3 端子稳压器和串联稳压器的实用设计方法,设计串联稳压器时的技巧等;第2篇主要介绍开关稳压器的设计方法,包括开关稳压器的概念及特征,如何选择变压器及扼流线圈,各种方式开关稳压器的设计方法及实例,电路设计中降低噪声的技术技巧等。另外,本书附录介绍了电源设计过程中散热及散热器安装技巧和电源电路的新技术。

本书注重基础,为帮助读者动手设计,采用了大量篇幅介绍相关的基础知识,甚至包括一些复杂的公式推导,同时还介绍了很多设计过程中的技术技巧,避免读者走弯路。另外本书列举了大量应用实例,能够激发读者的学习热情,指导读者如何综合运用知识进行应用设计和实践。

本书可作为计算机、通信、工业自动化等专业学生的参考用书,也可供从事电源设计的相关技术人员阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

实用电源电路设计/户川治朗著;高玉苹等译;宗光华校. —北京:科学出版社,2005  
ISBN 7-03-016512-8

I. 实… II. ①户…②高…③宗… III. 电源电路-电路设计-技术手册  
IV. TN710.02-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 139332 号

责任编辑:杨 凯 崔炳哲/责任制作:魏 谨

责任印制:刘士平/封面设计:李 力

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.sciencecp.com>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2006年1月第一版 开本: B5(720×1000)

2006年1月第一次印刷 印张: 23 3/4

印数: 1—4 000 字数: 462 000

定 价: 42.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

# 译者的话

随着计算机、通信、工业自动化、电机电器和家用电器等行业的发展,电源——电子电路的动力源也迅猛发展。当今电源的设计潮流不仅表现在对电源更加准确的稳定度要求、更加优良的性能要求,还表现在对便携、使用寿命及节能等方面的要求。

本书作者根据方方面面应用领域的电源装置实例,讲解了设计方法。全书的内容分为两篇。

第1篇介绍了线性稳压器的设计方法。第1章首先介绍了整流电路的设计方法,即如何得到直流电压。接下来介绍了如何选择整流二极管和平滑电容器以及如何抑制冲击电流。另外,还特别介绍了有关扼流线圈输入型整流的知识。第2章介绍了最简单的稳压电源——稳压二极管和基准电压 IC,并详细说明了利用技术。第3、4章详细说明了3端子稳压器和串联稳压器的实用设计方法。第5章说明了设计串联稳压器时的技巧。

从安排上说,第1篇和第2篇的开关稳压器是分开说明的,但是开关稳压器的某些方面是靠线性稳压技术来实现的。也就是说,在很多场合,线性稳压技术是电源电路技术的基础技术。因此,把第1篇“线性稳压器的设计方法”作为电源电路的入门技术。

第2篇介绍了开关稳压器的设计方法。作者首先在第1章总体概括了什么是开关稳压器和它的特征,并说明如何选择变压器及扼流线圈。接下来在第2~8章详细地介绍了各种方式开关稳压器的设计方法及实例。主要有斩波方式稳压器、RCC方式稳压器、正向变换器、多管式变换器、DC-DC变换器、不间断电源及高压电源。在第9章详细介绍了电路设计中降低噪声的技术技巧。

在附录部分作者向读者介绍了电源设计过程中散热及散热器安装技巧及电源电路的新技术。

本书的一个特点是注重基础。为了帮助读者动手设计,作者用了大量篇幅介绍相关的基础知识,甚至包括一些复杂的公式推导。同时作者还介绍了很多设计过程中的技术技巧,避免读者走弯路。

本书的另一个特点是列举了大量应用实例。这很适合我国学生的知识结构和知识层次。通过举例,生动具体地讲解了重要知识点。比起枯燥的纯理论,这更能激发学生的学习热情。同时也教导学生如何综合运用知识进行应用设计和实践。

由于译者的水平有限,书中难免存在错误和缺点,恳请批评指正。

# 前 言

当今以存储器为代表的 IC 相关技术的发展瞬息万变,使得电子设备的性能和功能呈现出日新月异的发展,同时,产品在价格和小型化方面的变化也十分惊人。

其中尤其值得注目的是 VTR 照相机、文件处理机、膝上电脑等以电池驱动的便携式电子设备的迅速普及,这类设备的特点是小型、轻便、耗电低,所以如何延长这一类电源的工作时间成为一个需要着力研究的重要课题。

满足这个要求,就是必须根据装置本身的技术规格对各种电路、元器件的电源装置进行最佳设计。因为问题不能像以往仅仅供应必要的电压和电流那样简单了。

正因为如此,市场上出售的通用电源模块已经越来越难以满足电源在特性和经济性方面的新要求了,为个性化产品提供专用电源装置往往呈现出强烈的需求。

有些人误认为电源装置仅仅用于电压和功率的变换,电路又不大复杂,设计比较简单,因而往往轻视它,结果元器件的使用不当、可靠性不高等问题时有发生。

众所周知,电子装置消耗的功率都来自于电源,所以用于稳定电压控制的晶体管、IC 稳压器等必须在高压、强电流状态下工作,因此在半导体中功率损耗和发热问题不可避免。

开关稳压器还会有严重的噪声。电源电路可以称为电子装置运转的中枢,如果上述问题处理得不得当,肯定无法得到预期的性能。

有鉴于此,本书给出了涉及方方面面应用领域的电源装置的电路实例,讲解了设计的方法,包括整流电路的工作机理到大型开关稳压器,而且特别详尽地收录了有关 DC-DC 变换器、专用 IC 芯片的应用实例,这对机载局部稳压器的应用十分有用。除了电路设计外,对散热、噪声有关的元器件的安装也做了说明。

为了有助于读者动手设计,本书花了大量篇幅来介绍相关的基础技术,甚至包含若干读者也许觉得很繁杂的计算公式。变压器和线圈之类的设计是十分重要的内容,颇有难度,有时即使做了数值计算也未必能得到满意的结果。因此,作者还尽可能地介绍了一些技术诀窍,不过建议读者要做好思想准备,很多因素都必须靠实验才能最后敲定。

电源装置虽然简单,但是经过自己的设计和组装,圆满地实现了预期的目标,这不能不说是一件令人愉悦的事情。好,那就照着书上说的动手试试吧!

作 者

# 目 录

绪 论 电源电路技术总论 .....	1
0.1 为什么要稳压电源 .....	1
0.2 稳压电源的两种方式 .....	4
【专栏】 电源装置的功率转换效率 .....	7

## 第 1 篇 线性稳压器的设计方法

第 1 章 整流电路的设计方法——如何得到直流电压 .....	10
1.1 各种整流电路 .....	10
1.2 整流二极管的选择方法 .....	15
1.3 平滑电容器的选择方法 .....	21
【专栏】 扼流线圈输入型整流 .....	24
1.4 冲击电流的抑制 .....	27
第 2 章 最简单的稳压电源——直流稳压的基础知识 .....	31
2.1 稳压二极管和稳压电源 .....	31
2.2 基准电压 IC 及其应用技术 .....	37
【专栏】 TL431 在恒流电源中的应用 .....	42
第 3 章 3 端子稳压器的应用设计方法——常用的串联稳压 IC .....	43
3.1 78/79 系列 IC 的使用方法 .....	43
3.2 78/79 系列的应用技术 .....	50
3.3 低损耗型 3 端子稳压器的使用方法 .....	53
3.4 电压可调型 3 端子稳压器的使用方法 .....	60
【篇外话】 100V 输入的串联稳压器 IC MAX610 的应用 .....	65
第 4 章 串联稳压器的实用设计方法——理解稳压电源的本质 .....	69
4.1 串联稳压器的基本组成 .....	69
4.2 可调电压稳压器的设计 .....	77
4.3 正负跟踪稳压器的设计 .....	82

<b>第 5 章 串联稳压器的设计技巧</b>	
<b>——电源变压器的选择及散热措施</b>	88
5.1 选定电源变压器	88
5.2 半导体的发热	93
5.3 散热器的选择	96
【专栏】 稳压二极管的安装方法	97

## 第 2 篇 开关稳压器的设计方法

<b>第 1 章 开关稳压器概述——电路结构及元器件的要点</b>	104
1.1 开关稳压器	104
1.2 开关稳压器的基本形式	109
1.3 如何选择变压器和扼流线圈	112
1.4 电子元器件	123
【篇外话】 开关晶体管的功率损耗	133
<b>第 2 章 斩波稳压器的设计方法</b>	
<b>——适用非绝缘、小型单板的电路</b>	136
2.1 斩波稳压器	136
2.2 自激振荡斩波稳压器	139
2.3 利用 IC 设计斩波稳压器	144
<b>第 3 章 RCC 方式稳压器的设计方法</b>	
<b>——小型、经济、高效的稳压方式</b>	182
3.1 回扫变换器的基础知识	183
3.2 RCC 方式的基础	189
3.3 变压器的设计方法	197
3.4 平滑用电容器的求法	203
3.5 扩大输入电压的范围	207
3.6 实际 RCC 稳压器的设计	214
<b>第 4 章 正向变换器的设计方法</b>	
<b>——适用于中容量、高速度的方式</b>	225
4.1 正向变换器基础	225
4.2 变压器复位分析	231
4.3 输出变压器的设计	236
4.4 次级整流电路的设计	239
4.5 辅助电源电路的设计	243

4.6	基于 TL494 的控制电路设计	246
4.7	开关晶体管的驱动电路设计	252
<b>第 5 章</b>	<b>多管式变换器的设计方法——实现大容量变换器</b>	<b>269</b>
5.1	推挽式变换器的原理	269
5.2	半桥式变换器的原理	275
<b>第 6 章</b>	<b>DC-DC 变换器的设计方法</b>	
	——得到彼此绝缘、且互不同值的电压	284
6.1	洛埃耶式 DC-DC 变换器	284
6.2	约翰逊式 DC-DC 变换器	290
	【篇外话】泵电源型 DC-DC 变换器 IC——ICL7660 的应用	295
<b>第 7 章</b>	<b>不间断电源的设计方法——微型计算机的停电补偿</b>	<b>299</b>
7.1	什么是不间断电源	299
7.2	逆变器部分的设计	300
7.3	充电器部分的设计	304
<b>第 8 章</b>	<b>高压电源的设计方法</b>	
	——利用 DC-DC 变换器和倍压整流	308
8.1	高压电源的原理	309
<b>第 9 章</b>	<b>降低噪声的技术技巧——噪声抑制技术详解</b>	<b>318</b>
9.1	噪声源	318
9.2	噪声的分类	322
9.3	噪声的传递方法	324
9.4	抑制噪声的具体方法	327
	【专栏】关于噪声的感应	329
<b>附 录</b>	<b>散热及散热器安装技巧</b>	<b>339</b>
▶	热设计分析	339
▶	散热元器件的安装	343
▶	线路设计	346
<b>小 结</b>	<b>电源电路的新技术</b>	<b>350</b>
▶	现有整流电路的缺点	350
▶	有源平滑滤波器	354
▶	开关频率的高频化	361
▶	什么是共振型电源	363
▶	共振型电源的课题	366
	<b>参考文献</b>	<b>368</b>



# 绪论 电源电路技术总论

- ※ 为什么要稳压电源
- ※ 稳压电源的两种方式

## 0.1 为什么要稳压电源

### 0.1.1 靠直流电源供电工作的电子电路

众所周知,电气设备没有电源就无法工作(图 0.1)。大部分的设备需要 5V 或 12V 稳压直流电源,虽然获得直流电源的方式多种多样,但便携式设备大都采用电池,其余都采用 100V/200V 商业交流电源<sup>1)</sup>。

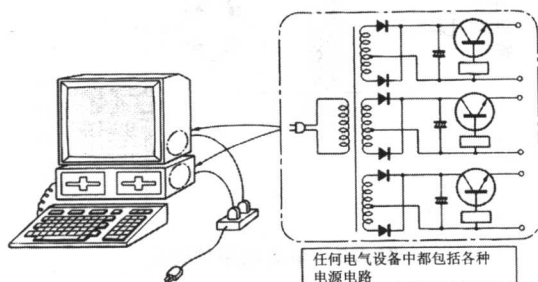


图 0.1 电源电路是电气设备的心脏

图 0.2 中的输入电源是交流的,所以需要经过变压器转换成所需要的电压值,再由整流变成直流电供给电路或设备。仅仅被整流过的直流电源,受到输入 AC100V 的变化、变压器和整流二极管本身电压降等的影响,电压的稳定性和精度都不大好,严重时足以使电路或设备无法达到预期的性能要求。

1) 该电源是日本标准,我国为 220V/380V。

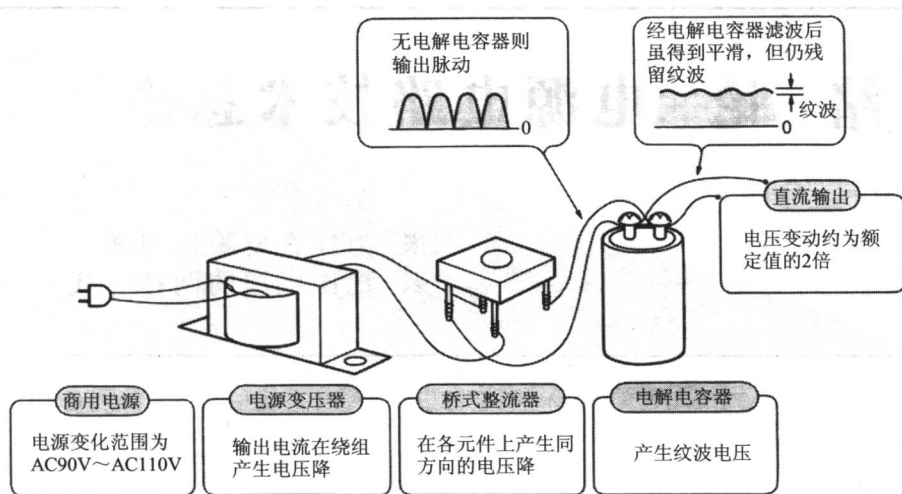


图 0.2 制作简单的直流电源

### 0.1.2 电压变动的原因

图 0.3 是图 0.2 的接线图,从这个两个图中可以看到直流输出电压变化的主要原因。

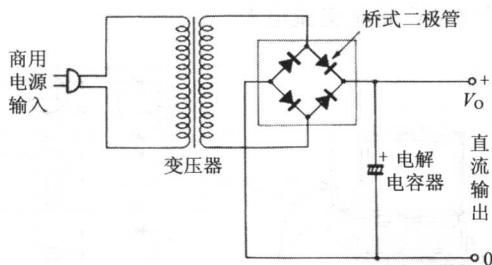


图 0.3 整流电路的构成

#### 1. 交流电源电压的变化

日本的电源品质是相当不错的,商用电源电压的波动也很小。其电压的波动范围通常在  $100\text{V} \pm 5\text{V}$  以内。在个别特殊情况下,如附近有大型空调之类的电动机时,每当电动机起动,100V 的电源电压可能下降到 90V 左右。

#### 2. 电源变压器的电压降

变压器的大小不同电压降也不同,变压器内部的线圈由细铜线反复绕制数百匝而成,导线本身的电阻也产生电压降。

另外,变压器初级和次级之间存在的漏电感也会引起电压降。

### 3. 整流二极管的电压降

整流大都采用桥式二极管,如图 0.3 所示,它是由四个二极管构成的。二极管两端的电压降与流过它的电流方向相同。

### 4. 纹波电压

交流电源属于正弦波,即使通过电解电容器后能够得到一定程度的平滑,仍然存在纹波电压。纹波电压可看成是以 2 倍的电源频率连续变化的电压脉动。

实际上,还必须考虑图 0.4 所示的负载变化。因此,图 0.3 所示的仅仅经过整流处理的电源,其电压的波动是相当大的。如果考虑所有因素,那么输出电压的波动变化大约是商用电源输入波动的 2 倍以上。

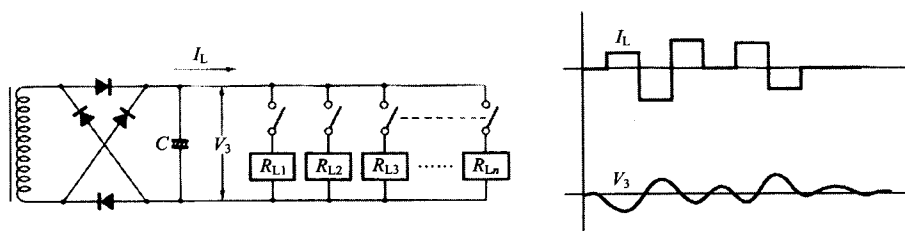


图 0.4 电子电路的负载变化

## 0.1.3 适合 IC 或电子元件工作的电压

不用说晶体管或 IC 等半导体元器件,就连电机、继电器、指示灯等电子元器件的外加电压都有规定的最大值。越接近这个电压值,电子元器件越容易损坏,使用寿命越短。

例如,数字集成电路 TTL 元件的额定电压为 +5V,保证正常工作的电压为 4.5~5.5V,最大电压为 7V。

再如指示灯,如果外加电压上升 10%,消耗的功率就按平方关系增加至原来的 1.2 倍,而元器件的寿命将降低一半。

在 OP 放大器构成的微弱信号放大电路中,电源电压的变化往往与信号叠加后引起信号变化或噪声。其后果是精度或稳定性达不到要求。

可见,电源电压的变化是影响电子设备性能和可靠性的重要因素。

应该说,电源电路是电子设备的心脏。普通整流电源不能满足大部分电子设备的工作要求。因此,需要借助电子技术制作稳压电源,从而得到稳定的电压供应。

## 0.2 稳压电源的两种方式

目前,构成直流稳压电源的方法主要有两种:线性稳压器和开关稳压器。

### 0.2.1 稳定性优先时采用线性稳压器

图 0.5 表示线性方式,所谓的串联稳压器和并联稳压器都属于这种方式。该方式特别适合在电压精度(稳定性)要求高或小功率的场合下使用。

也就是说,线性稳压器很少产生电气噪声,直流输出电压包含的纹波也小,可充当稳定性相当好的电源。那些对噪声非常敏感的无线电传输、测量仪器等采用这种电源是适当的选择。

然而线性稳压电源中输入电源的整流电压与输出电压之差全部施加在控制晶体管上,而且输出电流就是流过控制晶体管的集电极电流。显然,当输出电流较大时,晶体管上的功率损耗也比较大。

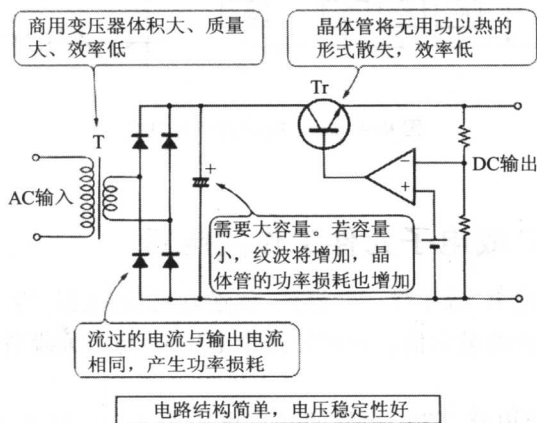


图 0.5 线性稳压器(串联型)的构成

由于功率损耗全部转化成热能,为了防止控制晶体管或二极管等半导体器件的温升超过容许值,必须安装面积很大的散热器。

大功率的应用场合(如输出功率超过 20W)很少采用这样的电源,因为电源部分的功率损耗已经相当可观了。

其十分难得的优点是电路简单、可靠性高,因此在小型局部稳压器中(图 0.6)应用非常广泛。

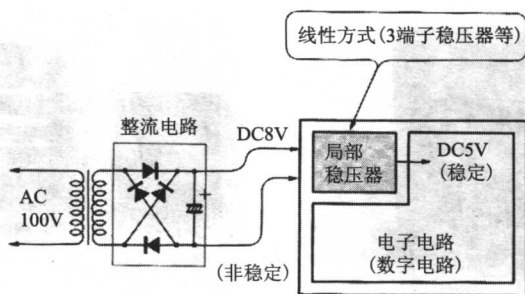


图 0.6 线性稳压器在小型局部稳压器中应用广泛

### 0.2.2 小型高效率开关稳压器

与线性稳压器（串联稳压器、并联稳压器）相比，图 0.7 所示的开关稳压器的转换效率高达 70% 以上。如 5V、6A 的电源，如果是线性稳压器，损耗约为 70W，换成开关稳压器，损耗可降至约 12W。这样散热器的面积也就相应地减少了。

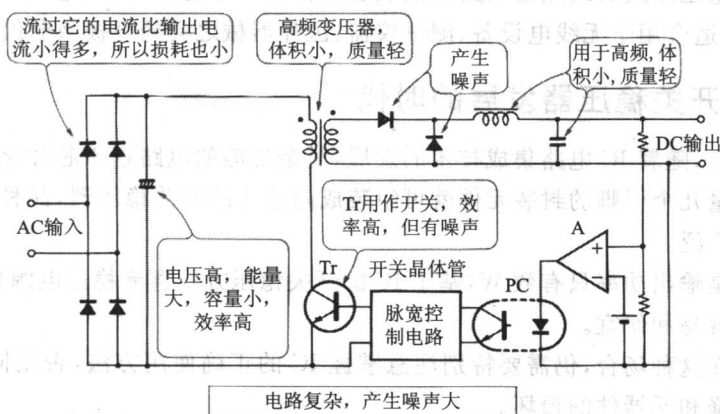


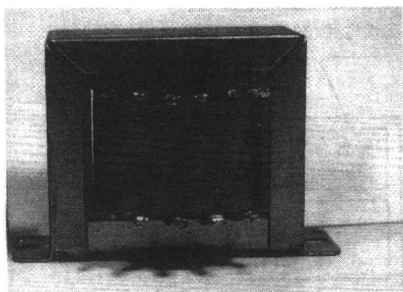
图 0.7 开关稳压器的构成

另外，电源变压器的工作频率越低，它的体积越大。如果用线性稳压器转换交流电源（50Hz/60Hz），那么电源变压器会既重又大。

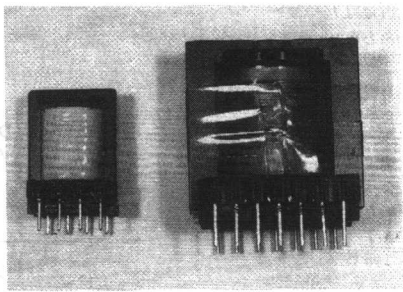
比较之下，开关稳压器的工作频率一般都在数十千赫以上，它使用的功率变换晶体管体积既小质量又轻。

照片 0.1 给出普通串联稳压电源变压器和开关稳压电源变压器的对比。

在线性稳压器中，通过交流电源变压器使电压下降后整流得到直流电，因此，流过整流电路的电流就是输出电流，结果整流二极管的损耗很大，而且需要大容量的平滑电容器。



(a) 串联稳压器用(50/60Hz商用输入)



(b) 开关稳压器用(20~50kHz)

照片 0.1 电源变压器的比较

对比之下,开关稳压器的的工作频率达到数十千赫以上,因此采用小型平滑电容器即可。

开关稳压器还有一个优点就是能把 AC100V 直接整流成直流输入,输入电压高,那么输入电流就相应地降低,所以整流二极管的损耗也就减小。

开关稳压方式的缺点是电路构成以及动作都非常复杂,而且电气噪声相当大。可见,它不适合用于无线电设备、测量仪器、医疗器械之类处理极微弱信号的设备。

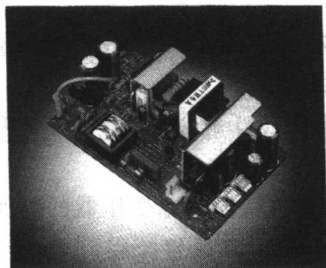
### 0.2.3 开关稳压器发展的时代

近年来,随着 IC 电路集成技术的发展,复杂功能的电路趋于芯片化,逐渐地仅用具有少量几个引脚的封装元件就可组装成高效率的开关稳压器,品种应有尽有,用途极其广泛。

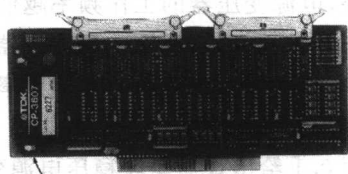
哪怕是输出功率只有数 W,基于 IC 的开关稳压方式直流稳压电源也比串联稳压器来的容易和便宜。

不过在这种场合,仍需要特别注意掌握 IC 的正确使用方法,否则同样会导致可靠性下降和元器件的损坏。

照片 0.2 给出市售的开关稳压器模块和单板开关稳压器。



(a) 100V输入电源模块



机载开关稳压器(DC-DC转换)

(b) 小型机载开关稳压器

照片 0.2 开关稳压器的内部

本书后续各章将分别介绍各种形式的电源电路的设计实例,内容如下:

第1篇 线性稳压器的设计方法

第2篇 开关稳压器的设计方法

全书将分别对这两部分内容进行说明。基于时代背景的关系,将第2篇“开关稳压器的设计方法”单独分离出来,并占用了大量篇幅。

从安排上来说,第1篇和第2篇是分开的,但是开关稳压器的某些方面是靠线性稳压技术来实现的。也就是说,在很多场合线性稳压技术是电源电路技术的基础技术。因此,应该把第1篇“线性稳压器的设计方法”作为电源电路的入门技术来学习。

## 专栏

### 电源装置的功率转换效率

设电源装置的转换效率为 $\eta$ ,则电源内部的功率损耗 $P_L$ 为:

$$P_L = (1/\eta) - 1 \cdot P_O$$

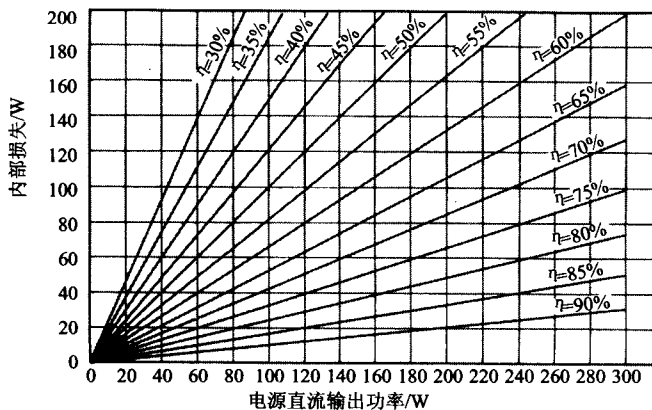
式中: $P_O$ 为输出功率,可通过直流输出电压 $V_O$ 和输出电流 $I_O$ 的乘积( $V_O \times I_O$ )求得。图A给出输出功率与功率转换效率的关系。

通常,串联稳压器输出电压越低,转换效率越差。

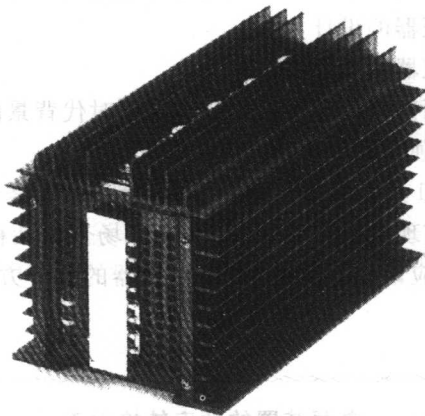
具体地说,采用串联稳压器方式驱动微处理器的5V电源,功率转换效率大约只有30%,其余的70%变成了热能。例如,5V、6A的电源,输出功率为30W,而损耗的功率却达到70W。

70W功率是以热的形式损耗的,为了使元器件保持在适当温度以下,需要采用很大的散热器。显然,将它做得又轻又薄并不现实。因此,串联稳压器仅用于高精度的电源和数W的小功率系统中。

照片A给出以往经常采用的大型串联稳压电源的实例。表面上看全是散热片。



图A 电源效率与内部损耗的关系



照片 A 带有大量散热器的串联稳压电源

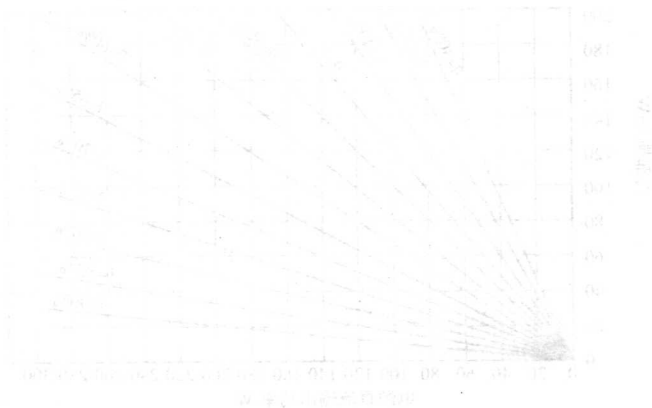


图 1-1-10 串联稳压电源的电压调整率特性



第

1

篇

# 线性稳压器的设计方法

摘要：(线性稳压器的设计方法) 摘要：(线性稳压器的设计方法) 摘要：(线性稳压器的设计方法) 摘要：(线性稳压器的设计方法) 摘要：(线性稳压器的设计方法)

1.1 引言 线性稳压器的设计方法 摘要：(线性稳压器的设计方法) 摘要：(线性稳压器的设计方法) 摘要：(线性稳压器的设计方法) 摘要：(线性稳压器的设计方法)

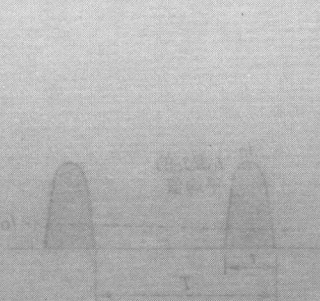


图 1-1 线性稳压器的输出纹波电压

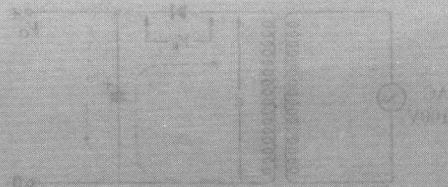


图 1-2 线性稳压器的典型电路