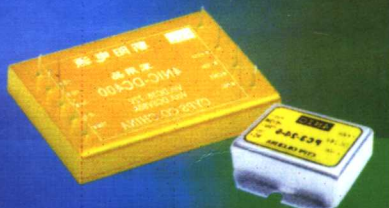
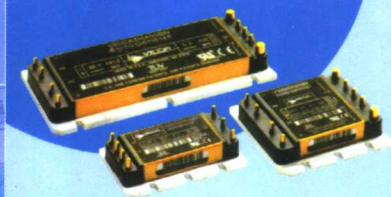


现代电源设计与应用丛书

集成电源

技术及应用

侯振义 夏 铮 等编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

现代电源设计与应用丛书

集成电源 技术及应用

侯振义 夏 铮 等编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



内 容 提 要

本书从实用出发,从原理和应用两个方面全面、深入、系统介绍了集成电源技术,主要包括:集成基准电压源、电流源原理及应用;普通线性集成稳压器原理及应用;低压差集成稳压器原理及应用;开关集成稳压器原理及应用;DC—DC 集成电源模块原理及应用;AC—DC 集成电源模块原理及应用;DC—AC 集成电源模块原理及应用;其他常用集成电源模块原理及应用;集成电源测试及总体设计;集成电源散热设计。读者阅读以上内容后,可方便、快捷地为自己的电子系统设计出最佳的电源系统。

本书内容新颖,实用性强,信息量大,知识面宽,便于读者触类旁通、灵活运用。本书可供从事科研、生产、维修工作的各类电子技术人员和电子爱好者阅读,也可作为高等院校有关专业的选修课教材及教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

集成电源技术及应用 / 侯振义, 夏铮等编著. —北京: 中国电力出版社, 2006

(现代电源设计与应用丛书)

ISBN 7-5083-4464-2

I. 集… II. ①侯… ②夏… III. 集成电路—电源 IV. TN86

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 064890 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2006 年 9 月第一版 2006 年 9 月北京第一次印刷

1000 毫米×1400 毫米 B5 开本 17 印张 345 千字

印数 0001—4000 册 定价 27.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

编委会成员

主任委员：季幼章

副主任委员：王兆安 罗方林 倪本来

委员：（以姓氏笔划为序）

刁成明	丁 钊	王其英	王 聪	艾多文
任元元	刘凤君	刘胜利	刘 勇	朱雄世
李龙文	李定宣	李厚福	阮新波	沙 斐
张广明	张占松	张谷勋	张忠相	张卫平
陆 鸣	陈永真	陈道炼	杨 耕	赵修科
赵良炳	赵建统	周雏维	林周布	倪海东
郝晓东	徐德鸿	徐兰筠	徐泽玮	徐 云
贾玉兰	曹仁贤	龚幼民	郭黎利	康 勇
路秋生	熊兰英			

序 言



随着经济的发展和科技的进步，自上世纪 90 年代至今，我国以计算机、移动通信、信息网络为代表的信息产业高速发展；以电力系统、铁路系统、通信系统为代表的传统工业需要进行全面改造；节约型社会的建设工作正在进行。所有这些成为中国电源产业和电源技术大发展的推动力。

目前世界排名前列的电源设计、制造企业的主体部分都设在中国，并在北京和上海等城市建有研发中心。中国企业已从原来简单的仿制向自主设计、研发转型，因此电源产品的研发设计人员需求猛增。而对于大部分的研发人员，设计与应用都是工作中的难点，本套丛书力图解决他们的难题。丛书由中国电源学会组织电源行业的专家、学者、工程技术人员共同编写，并不断吸纳符合要求的作者参加编写。丛书由中国电力出版社陆续出版。

本套丛书有如下特点：

1. 全面 涵盖现代电源技术的各个方面。
2. 实例 丛书在阐述设计思想、设计方法的同时，在应用部分辅以完整的设计实例，使读者在学习的基础上，根据实例就能做出相应的电源产品，这样就能解决他们的应用难题。
3. 先进 涉及到最新电路拓扑、功率器件和控制集成电路，力争体现出国内电源设计与应用领域的最高技术水平。
4. 作者 作者绝大部分是在研发一线工作多年，有丰富实践经验的专家、工程师，他们能带来最新的技术和对实际工作有指导意义的方案。

本套丛书以电源设计、研发的工程技术人员为主要读者对象，也可供科研人员和大专院校的师生参考。

现代电源技术和产品向高效率、低损耗、小型化、集成化、智能化、高可靠性方向不断发展，我们顺应发展组织了这套丛书，希望能对您的工作和学习有一定帮助。

我们衷心希望广大读者对这套丛书提出宝贵的意见和建议。我们的联系方式是 ding_zhao@cepp.com.cn。

《现代电源设计与应用丛书》编委员

前 言



电源是系统的核心，电源的好坏对整个系统的安全、正常、可靠运行至关重要。电源技术应用于各行各业，应用于各个领域。不同的系统、不同的工作场合、不同的负载需要不同规格种类、不同性能指标的电源。电源技术发展到目前，万能电源至少今天还未出现，所以应用的需求造就了电源方案的千差万别，造就了电源技术的丰富内涵。了解、掌握各类电源的性能、特点，为自己的系统设计出满足性能要求、成本低、体积小、重量轻、可靠性高的“完美”电源，是工程技术人员经常要面临的课题。

由于电源技术发展到今天，融会了电子、功率集成、自动控制、材料、传感、计算机、电磁兼容、热工等诸多技术领域的精华，已从多学科交叉的边缘学科成为独树一帜的功率电子学，因此要设计出上述“完美”电源，对于非电源工作者来说，并非易事。集成电源技术的发展使非电源专业工作者设计出自己的实用最佳电源成为可能。各种集成电源具有高集成度、高性价比、最简外围电路、最佳电路拓扑、最佳性能指标，可构成各种各样的实用电源方案，已广泛用于各个领域。本书试图应用集成电源技术，为非电源工作者解决可能遇到的电源问题提供具体指导和帮助。

本书从实用出发，从原理和应用两个方面，全面、深入、系统介绍了集成电源技术，主要内容包括：集成基准电压源、电流源原理及应用；普通线性集成稳压器原理及应用；低压差集成稳压器原理及应用；开关集成稳压器原理及应用；DC—DC 集成电源模块原理及应用；AC—DC 集成电源模块原理及应用；DC—AC 集成电源模块原理及应用；其他常用集成电源模块原理及应用；集成电源测试及总体设计；集成电源散热设计。读者阅读以上内容后，可方便、快捷地为自己的电子系统设计出最佳的电源系统。

本书内容新颖，实用性强，信息量大，知识面宽，便于读者触类旁通、灵活运用。本书可供从事科研、生产、维修工作的各类电子技术人员和电子爱好者阅读，并可作为高等院校有关专业的选修课教材及教学参考书。

本书第一章、第五章、第六章、第九章、第十章由侯振义同志编写；第三章、第四章、第七章由夏崢同志编写；第二章由王少坤同志编写、第八章由孔玲、朱磊同志编写。全书由侯振义同志综合整理并作了文字加工。

本书在编写过程中得到了陕西省电源学会、西安市电源学会专家教授的指导，

在此谨致以衷心的感谢；另外，在编写时查阅参考了许多文献，在此向文献作者表示衷心的感谢。

集成电源技术内容极其丰富，难免有漏、有缺，论述不全面甚至谬误之处，敬请专家及广大读者批评赐教。

编者

目 录



序言

前言

第一章 直流集成基准源原理及应用 (1)

第一节 直流集成基准源分类 (1)

第二节 直流集成基准电压源
原理及应用 (4)

第三节 直流集成基准电流源
原理及应用 (18)

第二章 普通线性集成稳压器及应用 (29)

第一节 普通线性集成稳压器分类
..... (29)

第二节 三端固定线性集成稳压
器原理及应用 (31)

第三节 三端可调线性集成稳压
器原理及应用 (36)

第四节 正负双固定集成稳压器
原理及应用 (42)

第三章 低压差线性稳压器原理及应用 (47)

第一节 低压差线性稳压器特点
及分类 (47)

第二节 输出电流小于 0.5A
的低压差线性稳压器
..... (48)

第三节 输出电流小于 1A 的
低压差线性稳压器 (57)

第四节 输出电流大于 1A 的
低压差线性稳压器 (64)

第五节 低压差线性稳压器控制器
..... (73)

第四章 开关集成稳压器原理及应用 (82)

第一节 开关集成稳压器原理 ... (82)

第二节 降压型开关集成稳压器
原理及应用 (88)

第三节 升压型开关集成稳压器
原理及应用 (109)

第四节 降压/升压型(反极型)
开关集成稳压器原理及
应用 (121)

第五章 DC—DC 集成电源模块原理及应用 (130)

第一节 隔离型硬开关 DC—DC
变换器原理 (130)

第二节 软开关 DC—DC 变换器
原理 (138)

第三节 DC—DC 集成电源模块
典型产品 (148)

第四节 DC—DC 集成电源模块
典型应用 (159)

第六章 AC—DC 集成电源模块
原理及应用 (166)

- 第一节 无功率因数校正 AC—DC
集成电源模块 (166)
- 第二节 AC—DC 功率因数校正
模块 (172)
- 第三节 AC—DC 集成电源模块
典型应用 (177)

第七章 DC—AC 集成电源模块
原理及应用 (184)

- 第一节 UCC3750 铃流发生器
控制器工作原理 (184)
- 第二节 DC—AC 集成铃流发生器
模块 (193)
- 第三节 陀螺、传感器专用
DC—AC 集成电源模块
..... (198)

第八章 其他集成电源模块 (201)

- 第一节 电磁干扰衰减模块及应用
..... (201)
- 第二节 直流输出纹波抑制模块

- 及应用 (210)
- 第三节 电池充电模块 (212)

第九章 集成电源测试及总体
设计 (218)

- 第一节 集成电源测试 (218)
- 第二节 集成线性电源设计 ... (223)
- 第三节 集成开关电源设计 ... (228)
- 第四节 模块电源设计 (234)
- 第五节 分布式电源系统设计
..... (238)

第十章 集成电源散热设计
..... (243)

- 第一节 散热设计基础 (243)
- 第二节 两种散热方式设计原理
及计算 (248)
- 第三节 集成稳压器散热设计
..... (254)
- 第四节 集成电源模块散热设计
..... (257)

参考文献 (262)

第一章 直流集成基准源 原理及应用

在电源、测量及其他领域,广泛使用着基准源,基准源的精度和可靠性直接决定着系统的精度和可靠性。基准源按性能分类,可分为交流基准源和直流基准源;按构成分类,又可分为分离基准源和集成基准源。本章主要介绍直流集成基准源原理及应用

第一节 直流集成基准源分类

直流集成基准源分为电压源和电流源两种,每种又根据精度不同、基准参数不同、工作温度不同、封装形式不同,分为多种类型。

一、集成基准电压源分类

目前国内外生产的基准电压源多达上百种,其主要分类如下:

(一) 按电压温度系数分类

根据电压温度系数 α_T 不同,产品大致可划分成三类:

- 1) 精密型基准电压源, $\alpha_T = (0.3 \sim 5) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$;
- 2) 准精密型基准电压源, $\alpha_T = (10 \sim 20) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$;
- 3) 普通型基准电压源, $\alpha_T = (30 \sim 100) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

每类中,有的型号划分成几挡,各挡电压温度系数不同。例如,MC1430 就分 A、B、C 三挡,以 C 挡的电压温度系数为最低, B 挡较高, A 挡最高。

(二) 按基准电压分类

在已形成的系列化产品中,按输出基准电压大致可分为两类:

- (1) 固定输出基准电压 输出电压分为 1.2、2.5、5、6.95 (可近似视为 7V)、10V 等 5 种。

表 1-1 列出国内外生产的基准电压源分类情况。由表 1-1 可见, LM399 的电压温度系数最低,典型值仅为 $0.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$;其次是 REF-05,为 $0.7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,然后是 LM3999、MAX672、MAX673,均为 $2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。表中所列出的 α_T 均为典型值,对同一产品而言,实际值与典型值还允许有一定的偏差。

表 1-1 国内外基准电压源产品分类

基准电压 典型值/V	国外型号 ^①	电压温度系数典型 值 $\alpha_T / (10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	最大工作电流 I_{RM}/mA	国产型号 ^②	封装形式
1.2	LM113、LM313	100	10	CJ313	TO-46
	TC04, TC9491	50	20		TO-52, TO-92, DIP-8
	LM385—1.2	20	10	CJ385—1.2	TO-46, TO-92
	MP5010 (分4挡)	10~100	10	SW5010	
	ICLB8069 (分4挡)	10~100	5		TO-52, TO-92
	AD589 (分7挡)	10~100	10		TO-99
2.5	MC1403 (分3挡)	10~100	10	5G1403, CH1403	DIP-8
	AD580 (分7挡)	10~40	10		TO-52
	LM336-2.5	20	10	CJ336-2.5	TO-46, TO-92
	LM368-2.5	11	30		TO-52
	LM385-2.5	20	10	CJ385-2.5	TO-46
	TC05	50	20		TO-52, TO-92, DIP-8
	μPC1060	≤ 40	10		DIP-8
5	MC1404 (分2挡)	10	10		DIP-8
	LM3336-5.0	30	10	CJ336-5.0	TO-46, TO-92
	MAX672	2	10		TO-99, DIP-8, SOIC
	REF-05	0.7	20		TO-99
6.95	LM129, LM329	20	15		TO-46
	LM199, LM399	0.3	10	CJ399, SW399	TO-46
	LM3999	2	10		TO-92
10	AD581 (分6挡)	5~30	10		TO-5
	MAX673	2	10		TO-99, DIP-8
	LM169, LM369	10	27		TO-92, SOIC
	REF-01	20	21		TO-99, DIP-8
	REF-10	3	20		TO-99

(续表)

基准电压 典型值/V	国外型号 ^①	电压温度系数典型 值 $\alpha_T / (10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	最大工作电流 I_{RM}/mA	国产型号 ^②	封装形式
2.5、5、 7.5、10 (可编程), 或在2.5~ 10内设定	AD584	5~10	10		TO-99

- ① 表中国外型号产品的生产厂家: LM—美国国家半导体公司 (NSC); AD—美国模拟器件公司 (AD); ICL—美国哈里斯公司 (Harris); MC—美国摩托罗拉公司 (Motorola); μPC —日电; MAX—美国马克西姆公司 (MAXIM); TC—美国泰康姆公司 (Telcom)。
- ② 表中国内型号产品的生产厂家: SW—上海无线电七厂; 5G—上海元件五厂; CH—上海无线电十四厂; CJ—北京半导体器件五厂。

(2) 可变输出基准电压 该类可编程输出, 也可设定连续输出。

AD584 就属于此类基准电压源, 它采用 TO-99 圆金属壳封装, 共有 8 个引出端。其输出电压可通过编程从 10、7.5、5、2.5V 这 4 种电压值中任意设定一种 (见表 1-2), 使用更加灵活。除典型输出电压之外, 它还可以通过外部电阻在 2.5~10V 范围内获得所需基准电压值。

表 1-2 AD584 输出电压的设定程序

输出电压 V_o/V	程序端接法	电压温度系数 $\alpha_T / (10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	最大工作电流 I_{RM}/mA
10.000	2 脚和 3 脚开路	5	10
7.500	2 脚与 3 脚短接		
5.000	2 脚与 1 脚短接		
2.500	3 脚与 1 脚短接		

(三) 按用途分类

在同一系列产品中又有军品、民品之分。例如, LM199 (军品)、LM299 (工业品)、LM399 (民品) 同属一个系列, 它们的内部电路与外形完全相同, 只是工作温度范围存在差异, 分别为 $-55 \sim +125^{\circ}\text{C}$ 、 $-25 \sim +85^{\circ}\text{C}$ 、 $0 \sim 70^{\circ}\text{C}$ 。

(四) 按封装形式分类

TO-52: 豆瓣形塑料封装; TO-46、TO-99: 圆形金属壳封装; DIP-8: 普通 8 引脚双列直插式封装, 相邻引脚中心距为 2.54mm (1/10in); SOIC: 小型双列直插式封装, 其相邻引脚的中心距仅为 1.27mm (1/20in)。

二、集成基准电流源分类

集成基准电流源集单片集成化、最佳性能指标、最简外围电路等优点于一身,

有的还能对输出电流进行连续调整，它代表着基准电流源的发展方向。集成基准电流源主要可分为以下 4 种类型。

(1) 三端可调型 三端可调基准电流源能在较大范围 (5 ~ 500mA) 内精确调节恒定电流。

(2) 四端可调型 四端可调基准电流源的显著特点是，它不仅能在极宽范围 (3 μ A ~ 2.5A) 内对恒定电流进行精细调节，而且能调节本身的电流温度系数，使 α_T 为正、为负或等于零，极大地方便了用户。

(3) 高压集成型 高压集成基准电流源的最高工作电压可达 100 ~ 150V。

(4) 集成温度传感器型 该类产品均属于集成温度传感器，但原理上它们等效于一个高内阻且输出电流与温度成正比的恒流源，此外，某些基准电流源（例如 LM134/234/334）亦可作为集成温度传感器使用，构成测温仪表。

目前，国内外生产的专用基准电流源器件的型号达数百种之多。集成基准电流源典型产品详见表 1-3。

表 1-3 国内外集成电流源的产品分类

产品名称	型号	恒定电流 I_H/mA	封装形式	生产厂家
三端可调	3DH010 ~ 3DH050 (5 种)	5 ~ 500	B-4 或 F-2	杭州大学
	3DH011 ~ 3DH031 (3 种)			
	W334、SL134/234/334	1 μ A ~ 10mA	TO-46 或 TO-92	北京半导体器件五厂等
	LM134/234/334			美国 NSC 公司
四端可调	4DH1 ~ 4DH5 (4 种)	3 μ A ~ 2.5A	B-3 或 F-2	杭州大学
高压集成	3CB3H (耐压 100V)	1.5 ~ 50	B-3 (三端)	杭州大学
	HVC2 (耐压 150V)	1 ~ 10	B-3 (四端)	
集成温度 传感器	AD590	1 μ A/ $^{\circ}\text{C}$	TO-52	美国 Harris 公司
	HTS1	1 μ A/ $^{\circ}\text{C}$	TO-92 或 B-3	杭州大学
	LM135/235/335	10mV/ $^{\circ}\text{C}$	TO-46 或 TO-92	美国 NSC 公司

第二节 直流集成基准电压源原理及应用

不同类型基准电压源工作原理差异较大，本节论述了精密型基准电压源、准精密型基准电压源、普通型可调基准电压源、多路基准电压源工作原理及应用。

一、精密型基准电压源原理及应用

在目前生产的基准电压源中，以 LM199、LM299 和 LM399 的电压温度系数为

最低,性能也最佳。它们属于四端器件,可等效于带恒温槽的稳压二极管。作为高稳定性的精密基准电压源,它们可取代普通的齐纳稳压管,用于 A/D 转换器、精密稳压电源、精密恒流源和电压比较器中。

(一) LM399 的结构原理

LM399 的内部电路可分成两部分:基准电压源和恒温电路。图 1-1 示出了它的引脚排列、结构框图及电路图形符号。1、2 脚分别为基准电压源的正、负极。3、4 脚之间接 9~40V 的直流输入电压。图中的 H 表示恒温器。LM399 的同类产品还有 LM199、LM299,均采用 TO-46 封装。电压温度系数的典型值为 $0.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,最大值为 $1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,只相当于普通基准电压源的 1/10。其动态阻抗为 0.5Ω ,能在 0.5~10mA 的工作电流范围内保持基准电压和温度系数不变。噪声电压的有效值为 $7\mu\text{V}$,25℃时的功耗为 300mW。

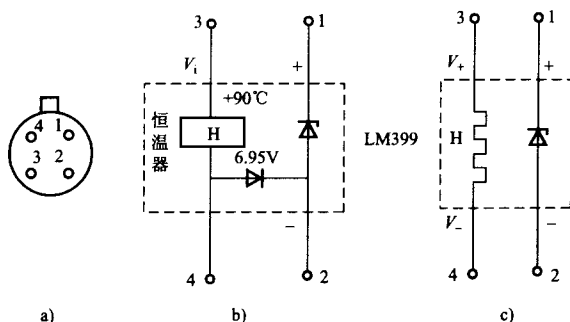


图 1-1 LM399 的结构

a) 引脚排列 b) 结构框图 c) 电路图形符号

LM399 的基准电压由隐埋齐纳稳压管提供。这种新型稳压管是采用次表面隐埋技术制成的。普通稳压管在半导体表面产生齐纳击穿,因此噪声电压高,稳定性较差。次表面隐埋技术则是在半导体内部(次表面)产生击穿,可使噪声电压显著降低,稳定性大幅度提高。恒温器电路能把芯片温度自动调节到 90℃,只要环境温度不超过 90℃,就能消除温度变化对基准电压的影响。正因为如此,LM399 的电压温度系数才降至 $1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 以下,这是其他基准电压源所难以达到的指标。

LM399 的基准电压实际上是由其稳压管的稳定电压 V_Z (6.3V) 与硅晶体管的发射结压降 V_{BE} (0.65V) 叠加而成。输出的基准电压为

$$V_o = V_{REF} = V_Z + V_{BE} = 6.3\text{V} + 0.65\text{V} \approx 7\text{V}$$

(二) LM399 的应用技巧

使用 LM399 时应注意环境温度不得超出 0~+70℃ 范围,安装位置应尽量远离发热器件(例如变压器、功率管等);输入电压不能超过 40V,否则会损坏恒温器;纹波电压必须很小;接地线力求短捷;工作电流 I_d 不超过 10mA,否则应加限流电阻。

1. 典型应用 LM399 的典型应用电路如图 1-2 所示。 R 为限流电阻。通常负载电流 $I_L \ll I_d$, 可忽略不计, 因此 $I_d \approx I_R$, R 值计算式为

$$R = \frac{V_i - V_{REF}}{I_R} \quad (1-1)$$

式中的 $V_i = +9 \sim 40V$, $V_{REF} = 7V$, $I_R = 0.5 \sim 10mA$ 。例如, 当 $V_i = 20V$, I_R 选 $2mA$ 时, 由式 (1-1) 计算出 $R = 6.5k\Omega$ 。

欲获得在 $0 \sim 7V$ 以内的非标称值基准电压, 可在图 1-2 的输出端并联一只 $10k\Omega$ 多圈电位器 RP 。调节滑动触头的位置, 即可获得 $0 \sim 7V$ 范围内的任意电压值。

2. 其他特殊应用

(1) 串联使用 将两片 LM399 串联使用, 可获得 $14V$ 的基准电压, 电路如图 1-3 所示。两者可共用一只限流电阻, 而恒温器只能并联在电路中。

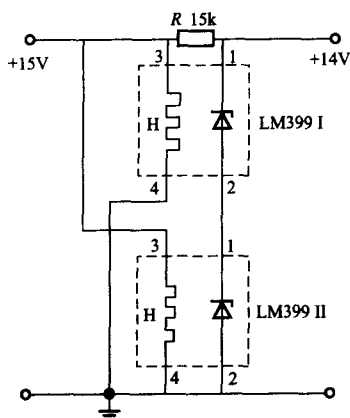


图 1-3 两片 LM399 串联使用

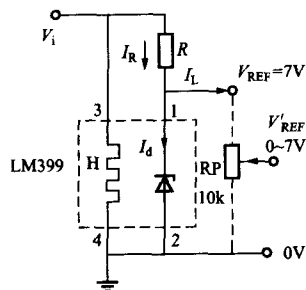


图 1-2 LM399 的典型应用电路

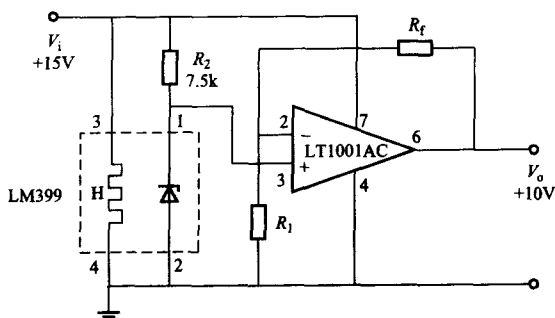


图 1-4 利用运算放大器获得其他 V_0 值

(2) 提高输出电压的方法 利用运算放大器作同相放大后, 可获得其他 V_0 值, 电路如图 1-4 所示, 有公式

$$V_0 = V_z \left(1 + \frac{R_f}{R_1} \right) \quad (1-2)$$

式中取 $V_z = 7V$, $R_f = 10k\Omega$, $R_1 = 20k\Omega$, 由式 (1-2) 算出 $V_0 = 10.5V$ 。 R_f 、 R_1 应选用电阻温度系数低的金属膜电阻。

为进一步提高 V_0 的温度稳定性, 还可采用斩波自稳零型精密运算放大器 ICL7650, 来代替普通运算放大器。

(3) 功率基准电源 能输出 $0 \sim 20V$ 、 $1A$ 的功率基准电源如图 1-5 所示。图

中使用 LM399、LM108、LM195 各一片。LM108 属于低温漂精密运算放大器，国产型号为 CF108。LM195 是集成化功率晶体管，内含过电流、过热、过电压等保护电路，输出电流大于 1A。调节电位器 RP，可获得 0~20V 范围内任何基准电压值。

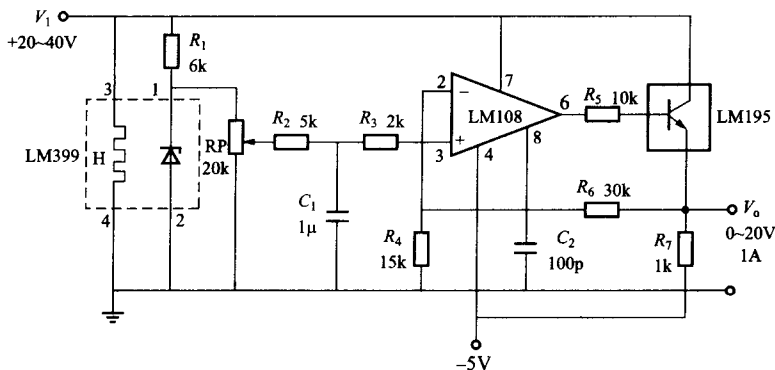


图 1-5 功率基准电源

二、准精密型基准电压源原理及应用

(一) 带隙基准电压源

所谓能带间隙是指硅半导体材料在热力学温度为零度 (0K) 时的带隙电压，其数值约为 1.205V，用符号 V_{g0} 表示。带隙基准电压源的基本工作原理，就是利用电阻上压降的正温漂去补偿 B-E 结正向压降的负温漂，从而实现了零温漂。因为它不使用工作在击穿状态下的齐纳稳压管，所以其噪声电压很低。

带隙基准电压源的简化电路如图 1-6 所示。VT1、VT2 是两只几何尺寸完全相同的硅管，在集成电路中称之为“镜像管”。假定 VT1、VT2 的共发射极电流放大系数 h_{FE} 很高，且忽略基极电流，则 $I_E = I_C$ 。由图 1-6 得到基准电压的表达式

$$V_{REF} = V_{BE3} + V_{R2} = V_{BE3} + I_{C2} R_2 \quad (1-3)$$

根据半导体理论进一步推导得

$$V_{REF} = V_{BE3} + \frac{R_2}{R_3} \frac{kT}{q} \ln \frac{R_2}{R_1} \quad (1-4)$$

在基准电压表达式 (1-4) 中，第二项仅与集成电路内部的电阻比 R_2/R_1 、 R_2/R_3 有关，其余量均为常数，故 V_{REF} 值可以做得很准。

下面分析带隙基准电压源的温漂表达式，以及实现零温漂的条件。

将式 (1-4) 对温度求导数，并用 V_{BE} 来代替 V_{BE3}

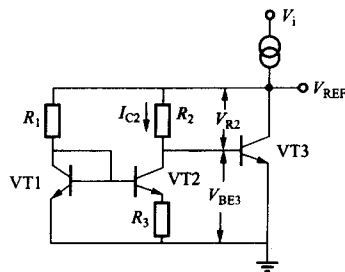


图 1-6 带隙基准电压源的简化电路

$$\frac{dV_{REF}}{dT} = \frac{dV_{BE}}{dT} + \frac{R_2}{R_3} \frac{k}{q} \ln \frac{R_2}{R_1} \quad (1-5)$$

式中，右边第一项为负数（ $dV_{BE}/dT = \alpha_T < 0$ ），第二项则为正数。因此，可选择适当的电阻比 R_2/R_3 和 R_2/R_1 ，使这两项之和等于零，从而实现零温漂。

上面推导中，忽略了基极电流 I_B 的影响，严格讲只是近似于零温漂。鉴于图 1-6 中未采用齐纳稳压管，因此这种基准电压源的热噪声电压可低至微伏级。

（二）精密型基准电压源结构原理

这里以 MC1403 为例，国产型号为 5G1403T 和 CH1403。

MC1403 采用 8 脚双列直式封装（DIP-8），引脚排列如图 1-7a 所示。其输入电压范围是 4.5 ~ 15V，输出电压的允许范围是 2.475 ~ 2.525V，典型值为 2.500V，电压温度系数可达 $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。为便于配 8P 插座，MC1403 上设置了 5 个空脚（NC）。

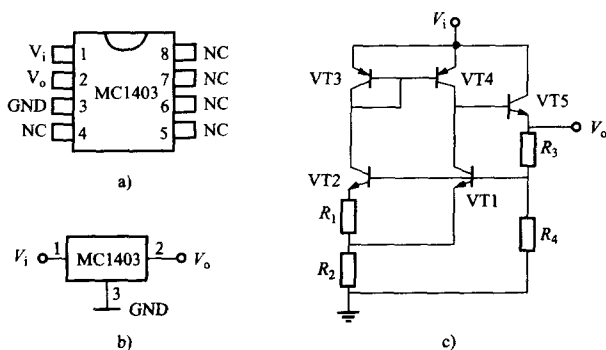


图 1-7 MC1403 的引脚排列与简化电路

a) 引脚排列 b) 电路图形符号 c) 简化电路

MC1403 的简化电路如图 1-7c 所示。在本节二、（一）中曾分析过带隙基准电压源的工作原理，对于 MC1403，其输出电压由下式确定：

$$V_o = \frac{R_3 + R_4}{R_4} \left(V_{g0} - C_T + \frac{2R_2}{R_1} \frac{kT}{q} \ln \frac{A_{e2}}{A_{e1}} \right) \quad (1-6)$$

式中 V_{g0} ——硅在 0K 时的带隙电压，约为 1.205V；

C_T ——比例系数；

A_{e1} 、 A_{e2} ——分别为 VT1、VT2 的发射极周长，设计的 $A_{e2}/A_{e1} = 8$ 。

只要选择合适的电阻比 R_2/R_1 ，就能使式（1-6）中括弧内的第二项与第三项之和等于零，从而实现了零温漂，即输出电压与温度无关。此时

$$V_o = \frac{R_3 + R_4}{R_4} V_{g0} \quad (1-7)$$

实取 $(R_3 + R_4)/R_4 = 2.08$ ，代入式（1-7）中计算出 $V_o = 2.08 \times 1.205\text{V} \approx 2.5\text{V}$ 。