

【编者按】从本期起,在“电源工程师”栏目连续刊登中国空间技术研究院王增福和曲学基两位高级工程师撰写的《中小型 UPS 的工作原理及其应用》讲座,以后还要请其他专家从不同角度不同深度阐述这方面的内容,希广大读者关注。

# 中小型 UPS 的工作原理及其应用

中国空间技术研究院 王增福 曲学基

**摘要** 叙述商用中小型不间断电源(UPS)的工作原理及基本电路,重点介绍中小型 UPS 的使用方法和维护知识等有关内容。

## 0 引言

UPS 是英文 Uninterruptible Power Supply(System) 的缩写,不间断供电电源(系统)。在这样的系统中,市电只是其中一个组成部分,此外还有储能的蓄电池和能量变换的逆变器等。这样,如果市电不正常或发生中断事故时,UPS 会向负载继续提供交流电源,实现不间断供电要求。

早在上世纪 60 年代以前,国外就有使用不间断电源的历史,采用汽(柴)油机-电动机-发电机实现电能的变换。即平时由市电驱动电动机,再由电动机带动发电机向负载供电。系统中的储能装置用的是惯性很大的飞轮。在市电不正常或发生中断事故时,控制电路切断市电线路和电动机,利用飞轮的惯性,使发电机继续供电,同时立即启动油机,当油机转速与发电机转速相同时,油机离合器与发电机联上,完成由市电到柴油发电机的切换。这种不间断供电系统称为旋转型不间断供电系统,它的优点是稳定可靠、维修简单,缺点是设备庞大笨重,操作控制不灵活,效率低,噪音大等。

在 60 年代后期,由于高压大功率晶体管,尤其是晶闸管制造工艺的改进,加之控制电路的集成化,在不间断供电系统中,不论是主电路还是控制电路,均采用半导体固体器件,为有别于旋转型不间断供电系统,常称之为静止型不间断供电系统或固态变流不停电电源。

UPS 按应用领域不同可分为商业型和工业型

两类。

商业型 UPS 主要用在计算机及其网络,银行、医院、保险公司及其他数据处理中心。应用环境比较好,冷却空气干净。电源的中断会使数据丢失、通信中断和计算机硬盘损坏等。

工业型 UPS 主要应用于电力、石油、冶金工业中。应用环境比较恶劣,冷却空气灰尘较多。电源中断将可能导致发电、冶金和采油等连续生产过程中的中断,甚至危及人身安全。

在电力系统中使用的 UPS 可分为直流和交流两种。根据 DL5000-94《火力发电厂设计技术规程》和 SDGJ17-88《火力发电厂厂用电设计技术规定》,容量在 200MW 以上的机组,应安装机组交流 UPS。

本文只介绍商业型 UPS,关于工业型 UPS 的有关内容,读者可查阅相关书籍或专著。

目前在市场上可以购买到种类繁多的 UPS,其输出功率从几百伏安到几千伏安。用量最大的是微型计算机,因此着重介绍用于微型计算机的小型 UPS。因为晶闸管没有自关断和抗干扰能力差等固有缺陷,影响了 UPS 的稳定性和可靠性,所以采用晶闸管的 UPS 有被淘汰的趋势。为此只介绍使用功率晶体管、MOSFET、IGBT 作为功率变换器的 UPS。

## 1 UPS 的工作原理及主要技术指标

### 1.1 UPS 的工作原理

图 1 是最简单的 UPS 框图。在一般正常情况下,将市电变换成直流电后与储能的蓄电池并联,一方

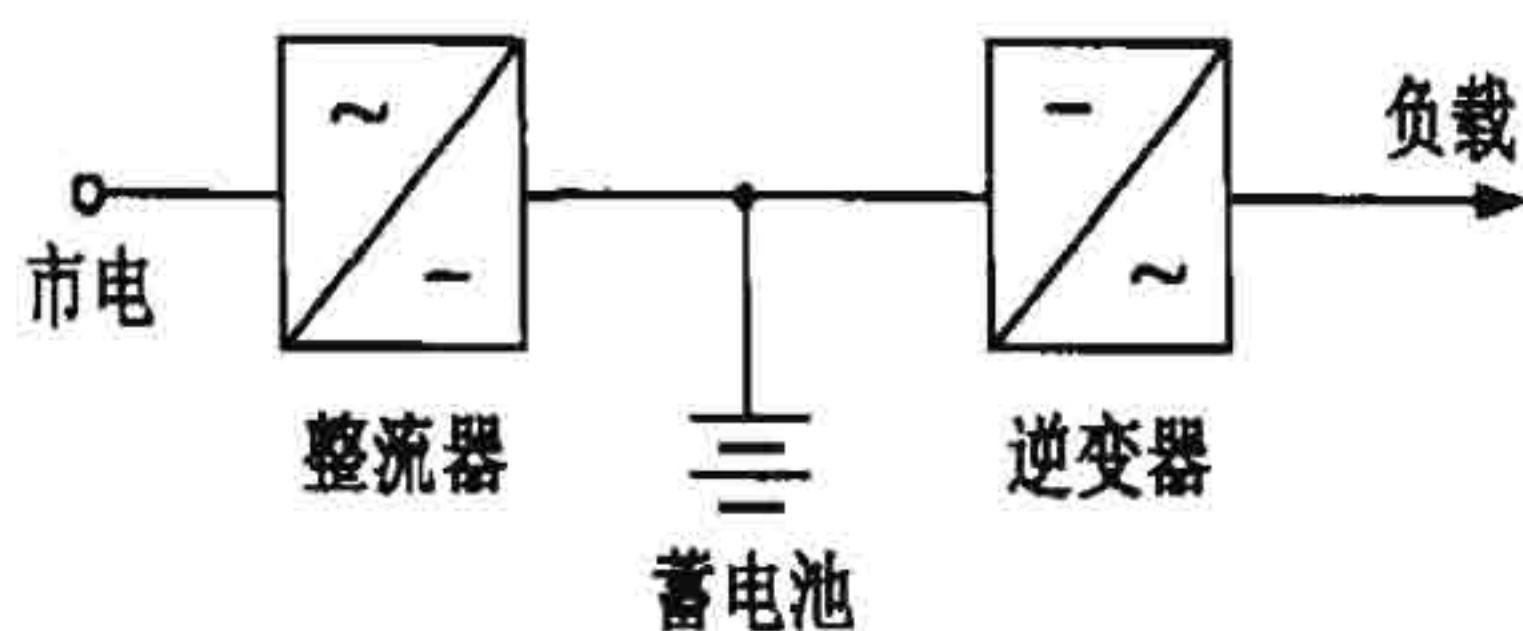


图1 简单的UPS

面它给蓄电池充电，同时也对逆变器供电，逆变器将直流电再变换成交流电，提供给负载。当市电出现故障或突然中断时，逆变器利用蓄电池的储能可以毫无间断地继续对负载供电。

无论是市电正常还是不正常，UPS 提供给负载的交流电都是稳定的。

这种 UPS 只能在市电中断时保证负载供电不间断，但是当逆变器出现故障时，就不可能对负载供电不间断，故称之为简单的 UPS。它不间断供电的可靠性基本上取决于逆变器的平均无故障时间，一般应在半年以上。

图 2 是具有静态开关的 UPS，图 (a) 是在线式，图 (b) 是后备式。在线式 UPS 在正常情况下，是将市电整流变为直流，然后逆变器将直流再变成交流提供给负载。当逆变器出现故障时，立刻转至静态开关，由市电直接向负载供电。逆变器修复正常后，UPS 又重新切换到由逆变器对负载供电。

后备式 UPS 在正常时，由市电向负载供电。当市电出现故障或中断时，蓄电池才对逆变器供电，并由逆变器向负载提供交流电源。也就是说，UPS

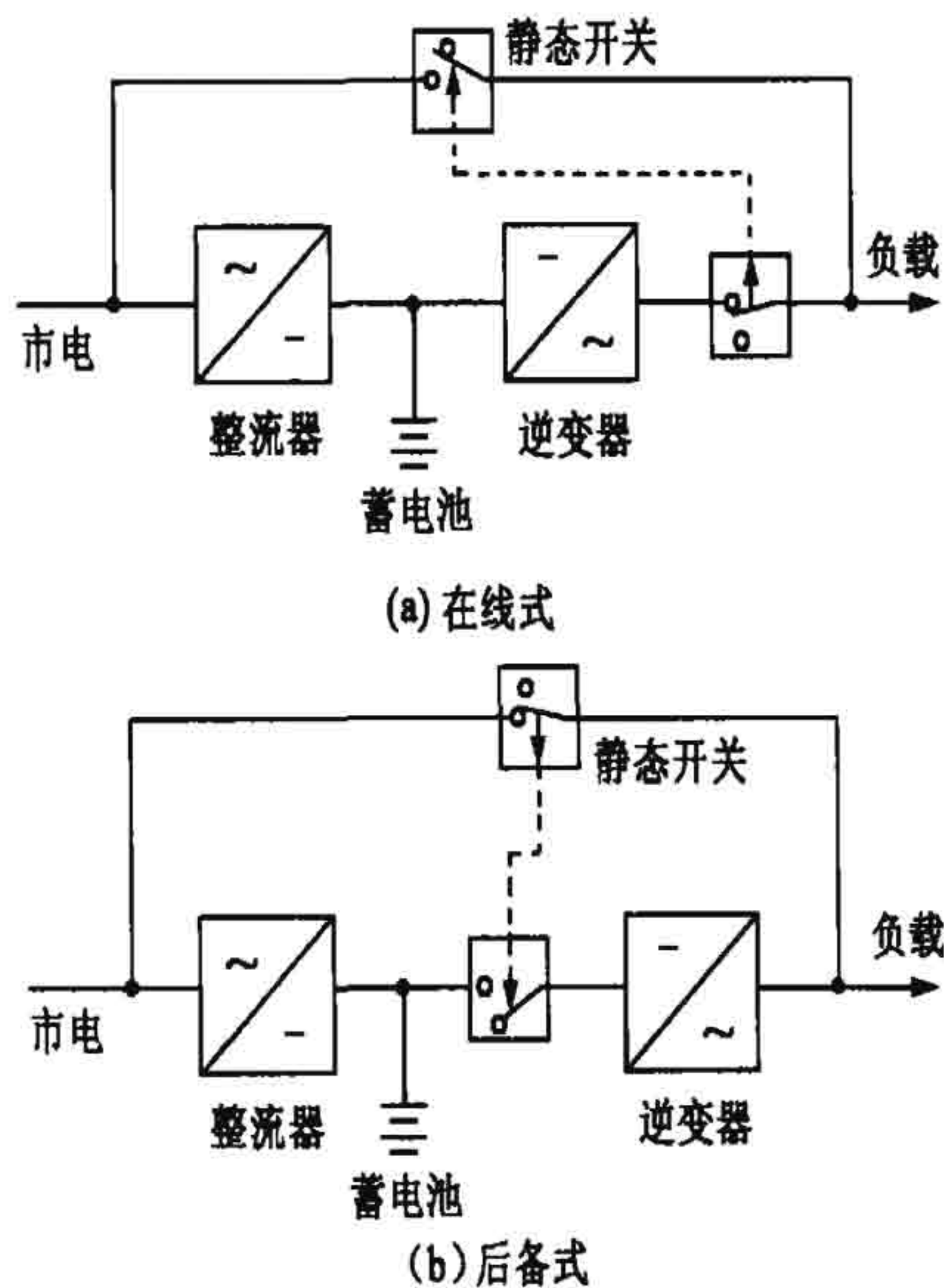


图2 带有静态开关的UPS

的逆变器总是处于对负载的后备供电状态。

这两种 UPS 相比，在线式供电质量明显优越于后备式。因此它易于实现对负载的稳定供电。然而，由于后备式 UPS 运行效率高、噪音小、价格相对便宜，所以，目前在市场上这两种产品同样受用户的欢迎。

上述的具有静态开关的在线式 UPS 比简单的 UPS 具备逆变与市电之间的切换功能，但在切换过程中负载上的电压将发生或大或小的波动，甚至会引起短暂的供电中断。要想做到无扰动切换，则可采用如图 3 所示的并机运行方式。两台 UPS 逆变器的输出电压并联后同时给负载供电。在正常情况下，两台 UPS 各承接一半负载。当一台 UPS 的逆变器发生故障时，则全部负载由另外一台 UPS 承担，负载上不会有电压波动，更不会发生短暂的供电中断。当另一台 UPS 也发生故障时，负载经静态开关切换由市电供电，同样可以做到不间断供电。因此可靠性更高，性能更加完善。

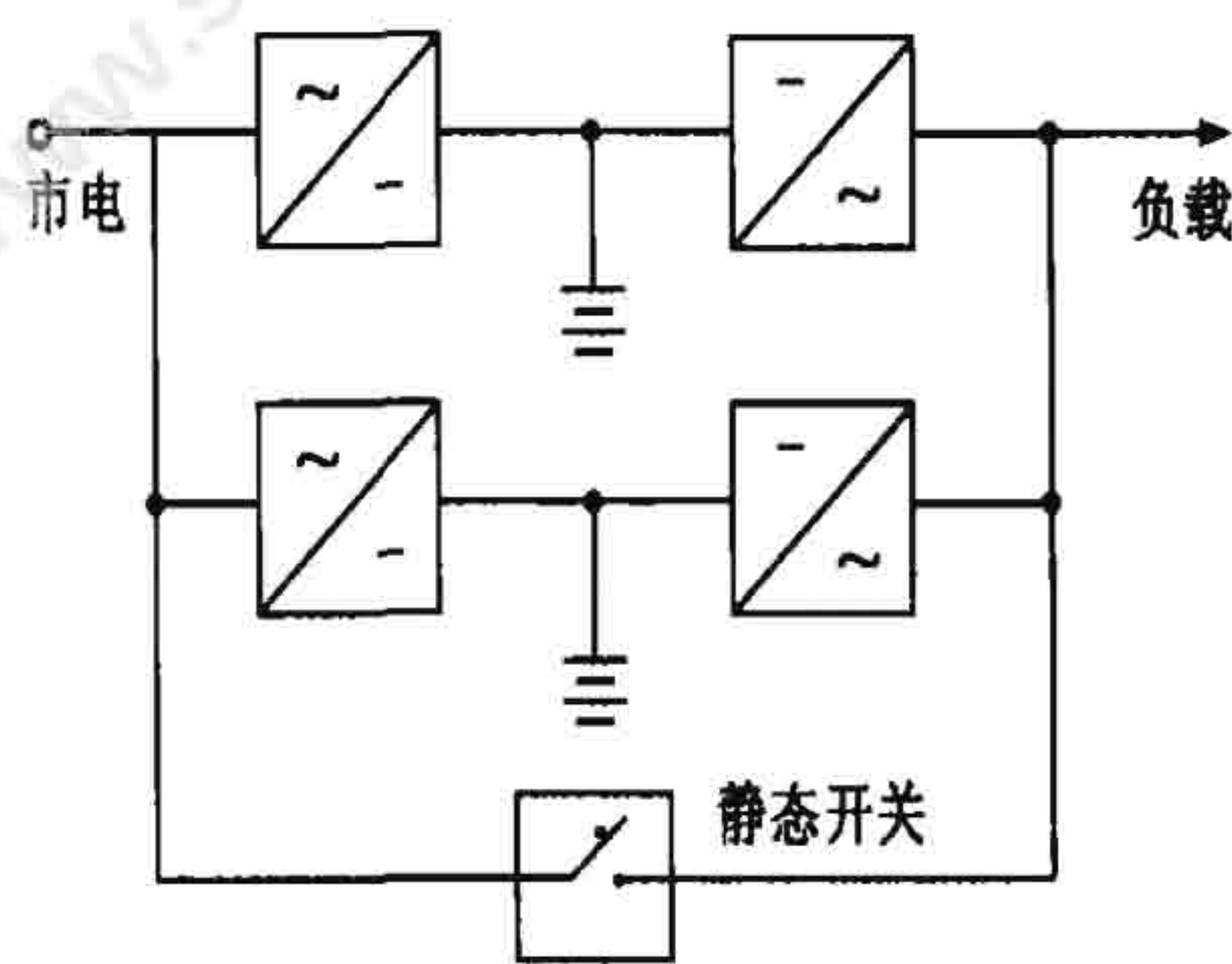


图3 并联运行的UPS

## 1.2 UPS 的主要技术指标

随着 UPS 技术的发展和成熟，UPS 由最初在市电掉电时可持续维持供电转变为一个中型的或者局部的高可靠、高性能、高度自动化的供电中心。对它的技术要求和基本功能可以概括为三个方面：

(1)能在各种复杂电网环境下可靠地运行，一般不污染电网；

(2)有很强的输出能力和可靠性，并能满足各种负载的要求；

(3)有很高的可用性和可维护性，有高度智能化的自检功能、状态显示、报警、状态记录和通讯功能，甚至有环境检测功能。

根据以上三方面的技术要求, UPS 的主要技术指标可以归纳为:

#### (1) 输出电压稳定精度

是指在市电供电时, 当输入电压在允许范围内变化, 输出电压的变化量与额定值的百分比。通常后备式和在线互动式等小功率 UPS 设计在  $\pm 5\%$  ~  $\pm 10\%$  范围内, 而在线式特别是大功率 UPS, 此项指标都可达到  $\pm 1\%$ 。

#### (2) 输出电压波形失真度

是指计算机输入交流电压中所有高次谐波有效值之和与基波有效值的百分比。各种电路结构 UPS 的输出波形失真度差别很大, 在线式 UPS 可控制在 5% 以内, 而后备式 UPS 在电池逆变工作状态下的波形失真度可达 30% (准方波)。

#### (3) 输出电压频率稳定精度

UPS 输出电压频率的变化量与额定频率 (50Hz) 的百分比。各种 UPS 在蓄电池供电状态下, 该项指标都可达到  $\pm 0.5\%$ , 有的还可以达到  $\pm 0.2\%$ 。

#### (4) 输出电压幅值的三相不平衡度

是指将 UPS 输入电压和频率调至 UPS 额定值, 在带载情况下的 UPS 输出交流电压中的负序分量与正序分量比值的百分数。

目前三相 UPS 的输出电压不平衡度在平衡负载情况下可做到 1%, 在不平衡负载情况下可做到 3%, 国家标准是  $\leq 5\%$ 。

#### (5) 三相负载不平衡能力

负载的平衡度是由负载决定的, 而能不能带动不平衡负载和能带动多大程度的不平衡负载, 则就是 UPS 的三相负载不平衡能力。客观条件要求三相 UPS 首先要具备带 100% 三相负载不平衡的能力。衡量三相负载不平衡能力的标准是在三相负载 100% 不平衡时的输出电压幅值的三相不平衡度。

#### (6) 市电掉电时的输出电压切换时间

市电掉电时, UPS 由市电供电转换为电池逆变供电, 在这种转换过程中, UPS 的输出电压可能出现短时间的中断时间, 称为输出电压切换时间。它的大小视 UPS 的电路结构不同而有差别, 后备式小于 10ms, 在线互动式小于 4ms, 在线式由于在这个

过程中静态开关并未动作, 所以切换时间是零。

#### (7) 输出电压的动态响应时间

当输入电压突然降低或负载突然增加时, 都会引起 UPS 输出电压瞬时地降低; 反之, 当输入电压突然升高或负载突然减小时, 都会引起 UPS 输出电压突然升高, 因为这种变化是突然的, 而 UPS 电路的调整是需要一定时间的, 这会使输出电压的变化超过输出电压稳定精度的范围, 形成一个变化幅度较大、有较长过渡时间的动态响应过程, 称为输出电压的动态响应特性, 并以动态响应幅度和动态响应时间来表述。用于计算机类的 UPS, 动态响应幅度用输出电压动态变化的最大幅值与额定输出电压的百分比来表示, 一般小于 10%。

#### (8) 双向隔离干扰的能力

对 UPS 来说, 双向隔离干扰的能力是指对抗高次谐波干扰的能力, 干扰的频率在几十 kHz ~ 几千 MHz 范围内, 既要使电网中的高次电压谐波不传输到输出端, 也要使负载中的高次电流谐波不传输到输入端, 使 UPS 不对电网造成污染。

#### (9) 平均无故障时间 (MTBF) 和平均维修时间 (MTTR)

一台供电设备的可靠性通常是用平均无故障时间 MTBF 来表示, 其值是越大越好。质量比较好的 UPS 平均无故障时间 MTBF 一般都在上万小时以上。

平均维修时间 MTTR 是指在某一阶段中出现故障的次数  $N$  和排除故障所花费时间的总和  $T(h)$  之比, 即

$$MTTR = T/N$$

#### (10) 效率

效率是指 UPS 输出有功功率与输入有功功率之比的百分数, 它反映 UPS 本身损耗的大小。

#### (11) 负载功率因数

UPS 负载功率因数的大小直接反映其输出有功功率和无功功率的能力。计算机类的非线性负载正常运行时, 不但要从电网吸收有功功率, 还要吸收无功功率。UPS 的负载功率因数和系统的效率有着密切的关系, 当 UPS 负载为纯电阻时, 其功率因数  $PF = 1$ ; 而当负载的  $PF < 1$  时, 负载的无功功率完全

由逆变器提供,这必然会增大系统的功耗,降低效率。

### (12) 输出过载能力

这是所有 UPS 都具有的常规指标,一般传统双变换 UPS、单变换 UPS 的过载能力多为 125% 10min, 150% 30s; 串并联调整式 UPS 却可以在过载 120% 的情况下不限时运行,在过载 200% 的情况下维持 60s。

## 2 UPS 的基本电路

UPS 由整流器、逆变器、充电器、静态开关及蓄电池等几部分组成,分别简单介绍如下。

### 2.1 几种基本电路

在 UPS 中,应用了运算放大器、电压比较器、555 时基电路、RS 触发器等几种基本电路,为了更好地理解和掌握 UPS 系统有关知识,不妨先介绍一下这几种基本电路。

#### (1) 运算放大器

运算放大器是一种高增益直流放大器。它一般采用双端输入、单端输出的结构形式。在外部反馈网络的配合下,它的输出与输入电压(或电流)之间可以灵活地实现各种特定的函数关系,因而具有对不同信号进行组合、运算和处理等多种功能。在 UPS 中应用比较多的有反相比例放大器、同相比例放大器、电压跟随器、电压差动放大器等几种形式。

#### ——反相比例放大器

反相比例运算放大器是反相运算器的一种基本形态。它的原理电路如图 4 所示。习惯上,把跨接在放大器输出端和反相端之间的电阻  $R_f$  叫做反馈回路电阻,把输入信号源与反相端之间的电阻  $R_i$  叫做输入回路电阻,把同相端与地之间的电阻  $R_p$  叫做补偿电阻。

为了分析的方便,在此引入理想运算放大器的

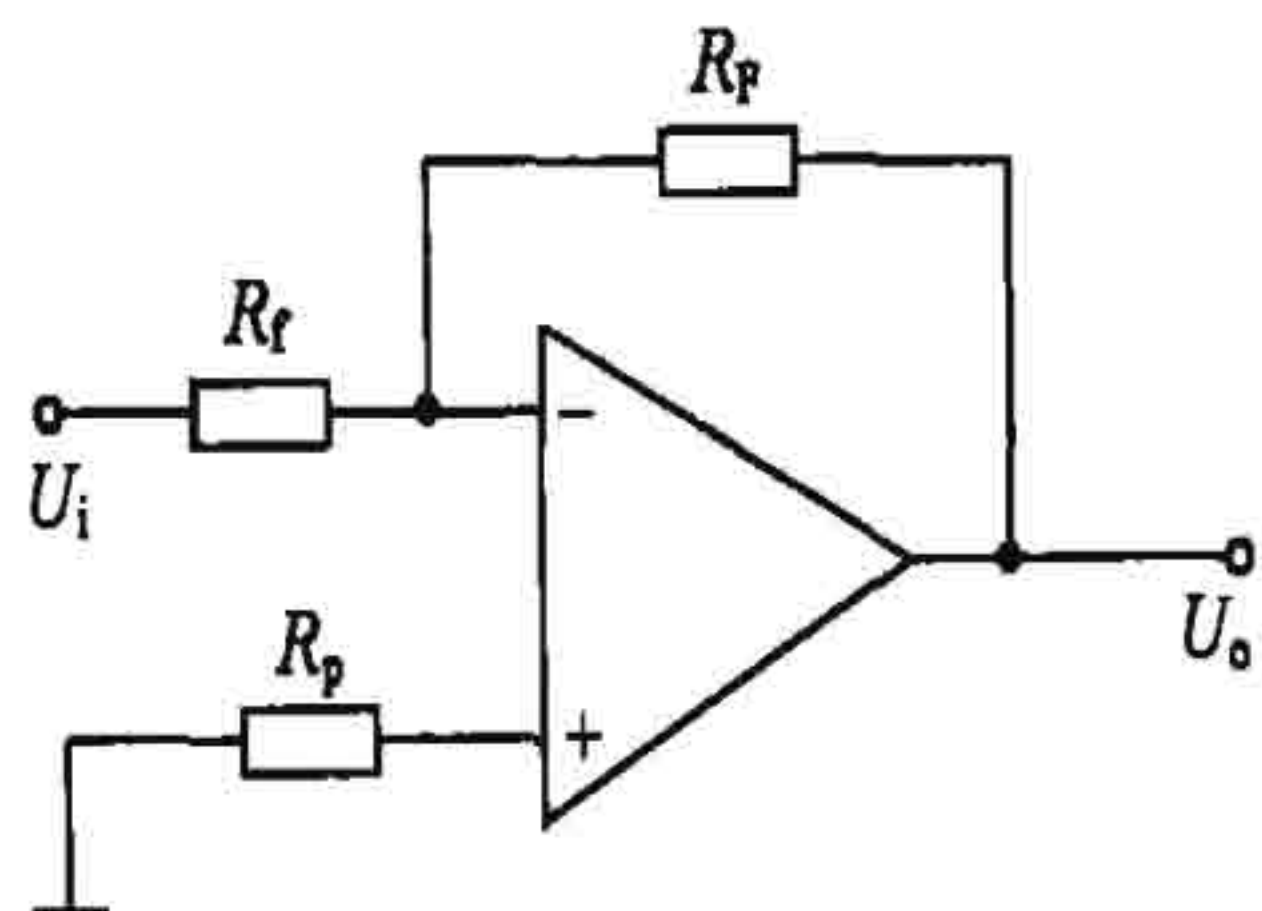


图 4 反相比例放大器

概念。理想运算放大器是指各项性能参数都等于理想值,即开环增益无穷大、输入阻抗无限大、输出阻抗为零、输入失调电压为零、共模抑制比无限大、频率响应好、频带宽度无限大。

理想运算放大器有两个重要特性:

第一,由于运算放大器开环增益无穷大,所以两个输入端之间的电压差等于零,即

$$U_+ - U_- = \frac{U_o}{K} = 0$$

第二,由于输入阻抗无穷大,所以输入偏流及流入或流出输入端的信号电流为零。因此不难得出

$$K_F = \frac{U_o}{U_i} = -\frac{R_f}{R_i} \quad (1)$$

式中  $K_F$  叫反相比例放大器的闭环增益,它仅与外部电路的电阻  $R_f$  和  $R_i$  有关。而与运算放大器本身的参数无关,选用不同的电阻比值  $R_f/R_i$  就可以得到数值不同的增益  $K_F$ 。式中的负号表示,输出电压  $U_o$  与输入电压  $U_i$  之间的相位相反,所以本电路取名为反相比例放大器。

#### ——同相比例放大器

同相比例放大器的输出信号与输入信号相位相同,其主要优点是输入阻抗比反相放大器更高,其原理如图 5 所示。

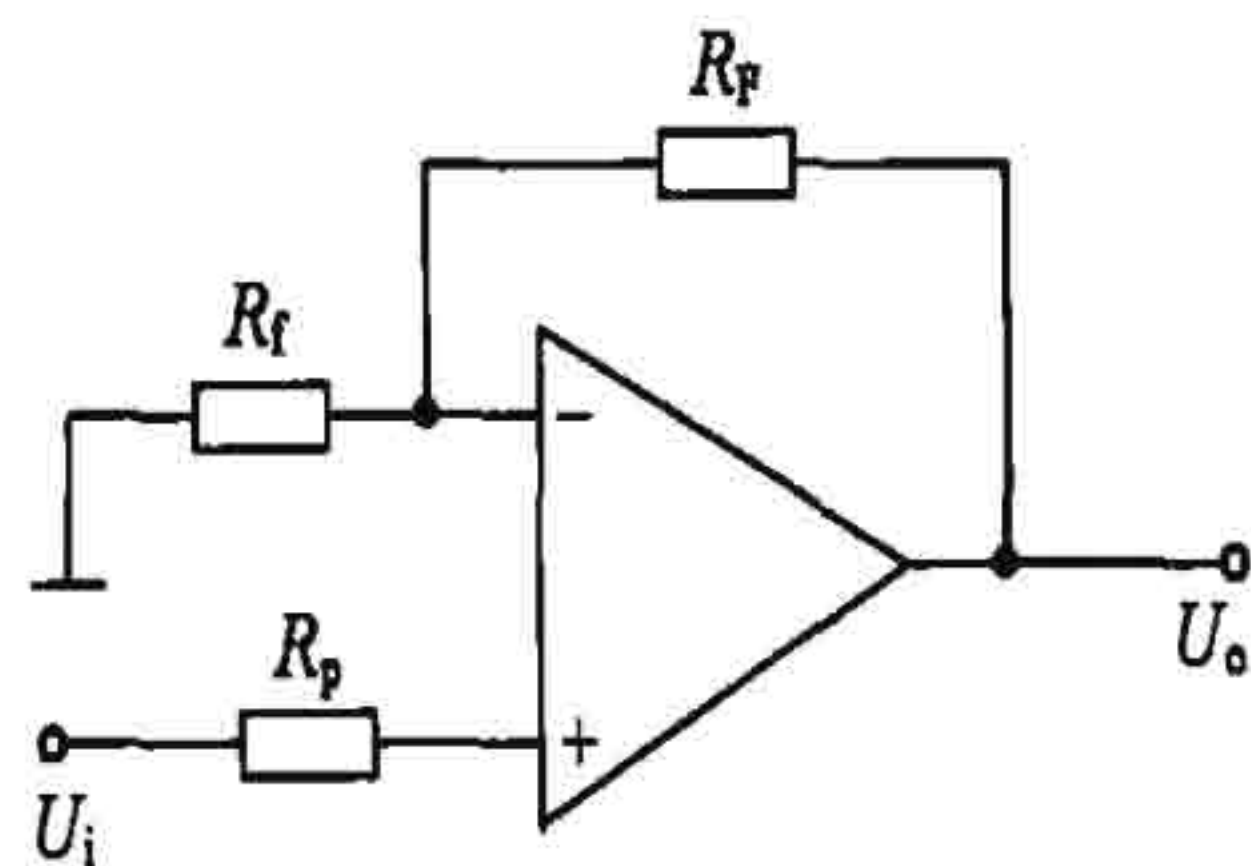


图 5 同相比例放大器

同相比例放大器闭环增益表达式为

$$K_F = \frac{U_o}{U_i} = 1 + \frac{R_f}{R_i} \quad (2)$$

由式(2)可以看出,和反相比例放大器一样,当运算放大器具有理想特性时,同相比例运算放大器的理想增益  $K_F$  仅与外部电路的电阻  $R_i$  和  $R_f$  有关,而与放大器本身参数关系不大,因此增益的精度和稳定性都很高。式(2)右边符号为正,表明输出电压与输入电压同相,所以本电路叫做同相比例运算放

大器。

——电压跟随器

同相比例运算放大器的重要优点是输入电阻高，输出电阻低。把同相比例放大器中的  $R_f$  取下，组成图 6 所示的电压跟随器。它的输出电压变化规律完全跟随输入电压变化，但其电压增益等于或小于 1。这种线路通常可分为反相电压跟随器和同相电压跟随器两种。因为它有极高的输入阻抗和较低的输出阻抗，所以常用于输入级和输出级之间需要阻抗匹配和隔离的场合，且有很强的负载驱动能力。

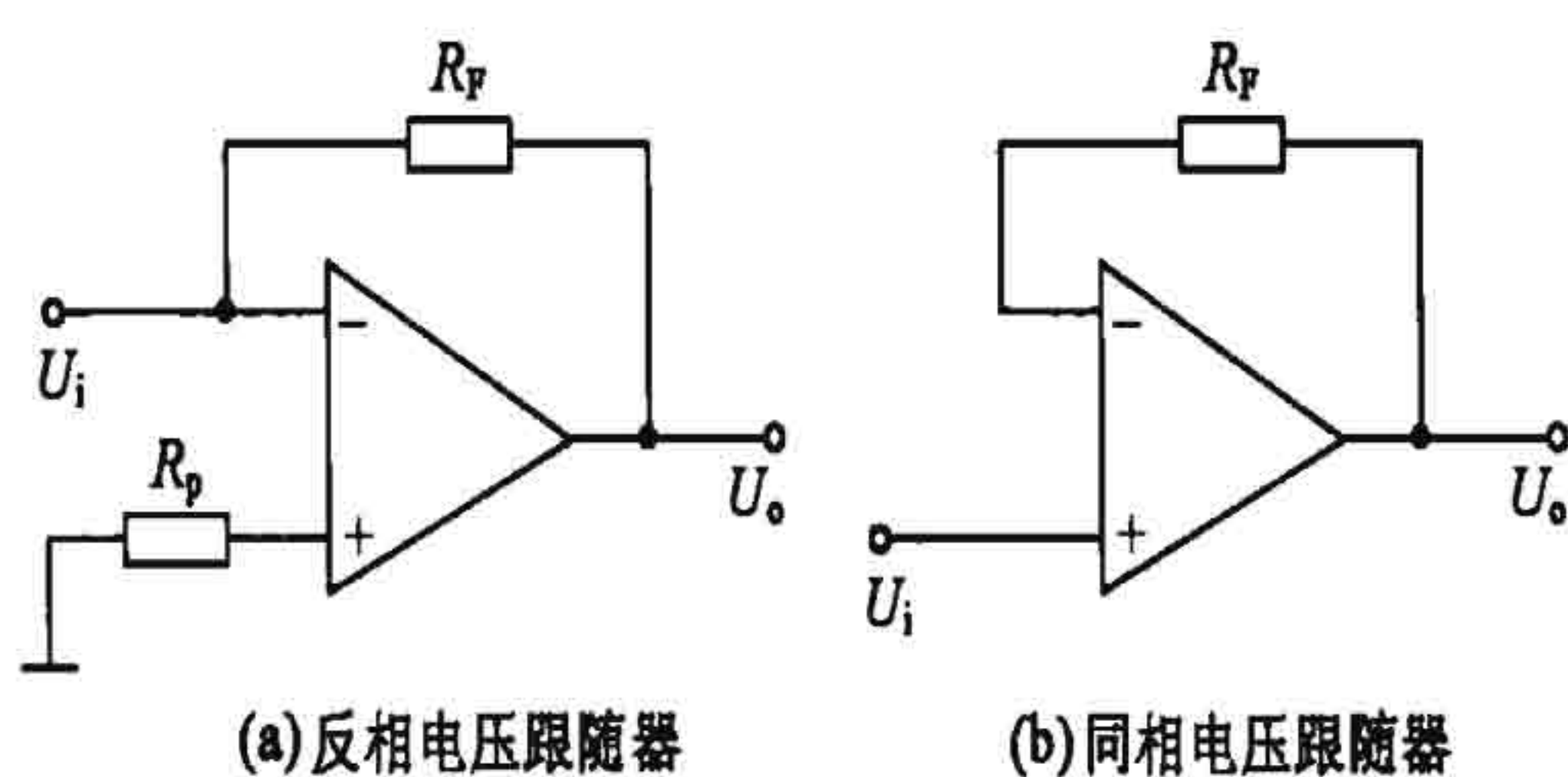


图 6 电压跟随器

——电压差动放大器

差动放大器由 1 只通用集成运算放大器和 4 只匹配电阻组成，电路如图 7 所示。差动放大器主要用途是在共模信号背景中提取并放大差模输出信号，因此被广泛地用于电桥线路中对不平衡信号的检测及传感器输出信号不大的场合，最大的优点是测定掩盖在大信号电压中的微小差值电压。由于它的输入阻抗较低，所以一般都需要用电压跟随器来作缓冲或隔离级。

当输入信号为交流电压时，一般要求输入信号应满足工作频率和相位都相同的条件。否则，差动放大器的输出将出现严重的畸变失真。当差动放大器输入端的电压出现相位差时，输出端的电压波形

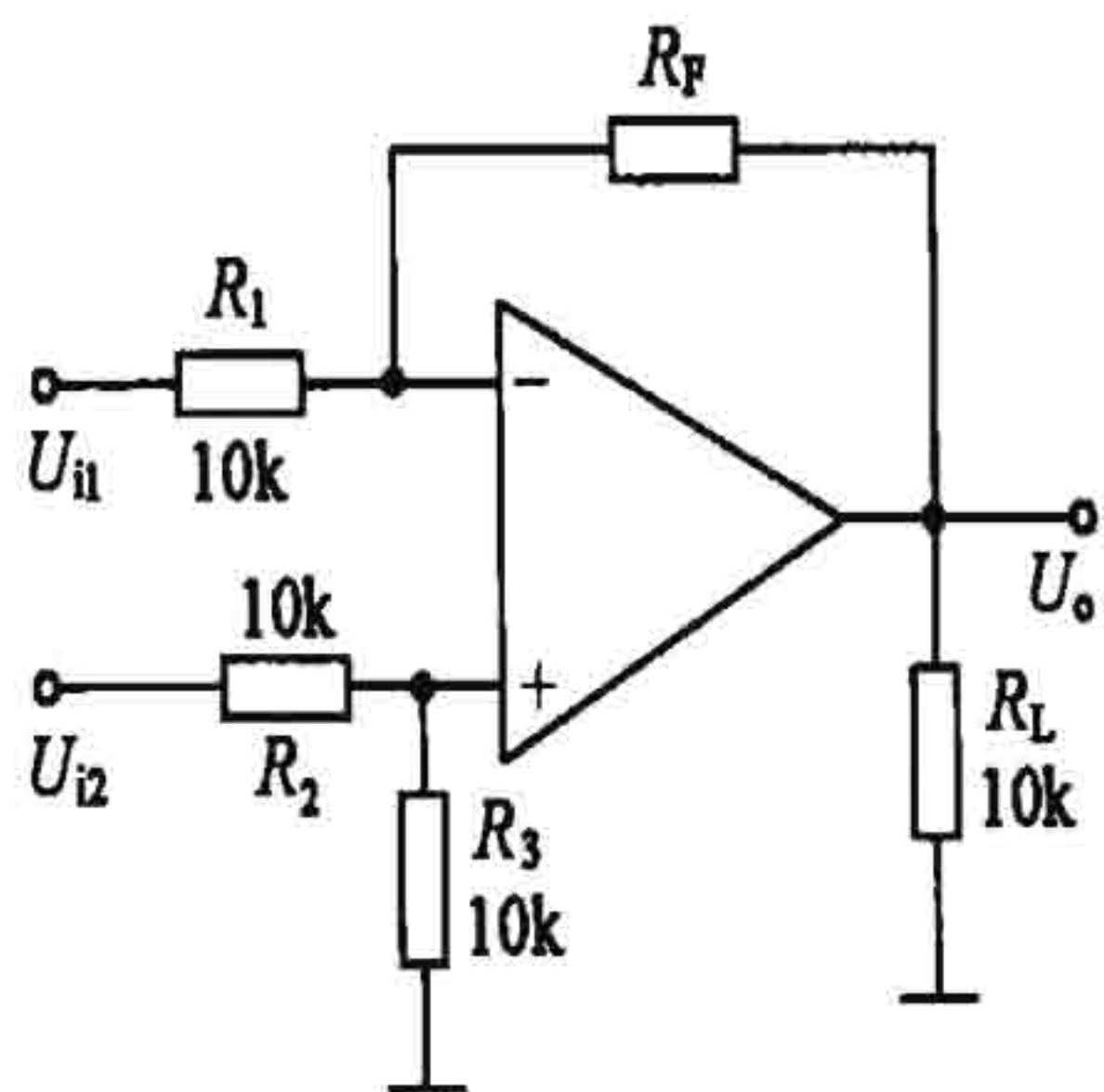


图 7 电压差动放大器

往往会变成一串正负相间的方波，如图 8 所示。这是因为只要两个输入信号之间出现相位差，两个输入端总会存在差动电压。由于差动放大器的开环放大倍数很大，所以其电压输出总是处于正负饱和状态。当电压  $U_1$  比  $U_2$  更高时，差放的输出为负饱和电压，反之为正饱和电压。当两个输入信号完全相同时，其输出才等于零。这就是 UPS 电源相测线路的工作原理。

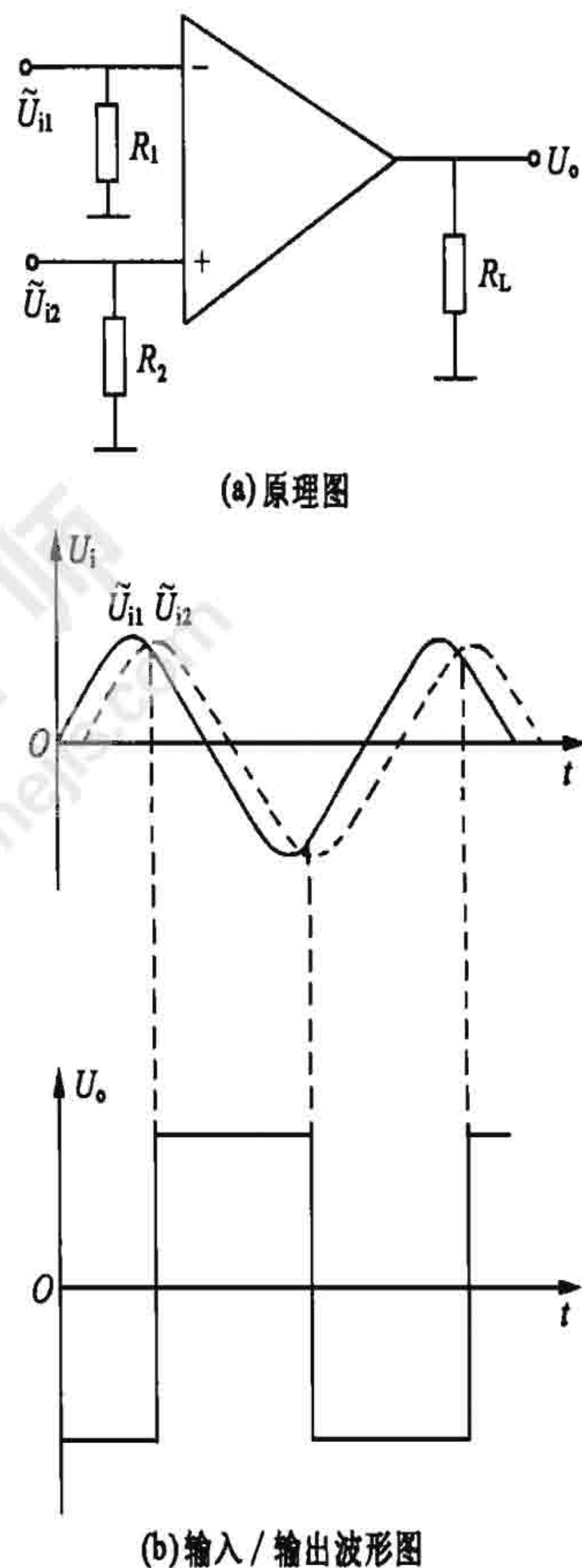


图 8 输入为交流的差动放大器

(2)电压比较器

电压比较器在 UPS 中得到了非常广泛的应用。一般用于各种过电压、过电流保护线路，脉宽调制控制线路及开关线路中。

电压比较器用来判断输入信号电位之间的相对大小。常规应用中是在一个输入端加上门限电位（或称电平） $U_m$  作为基准，另一个输入端加被比较的输入信号  $U_i$ ，如图 9 所示。比较器输出有两种电位，一个是高输出电位  $U_g$ ，一个是低输出电位  $U_d$ 。当输入信号高于或低于参考门限电位  $U_m$  时，比较器

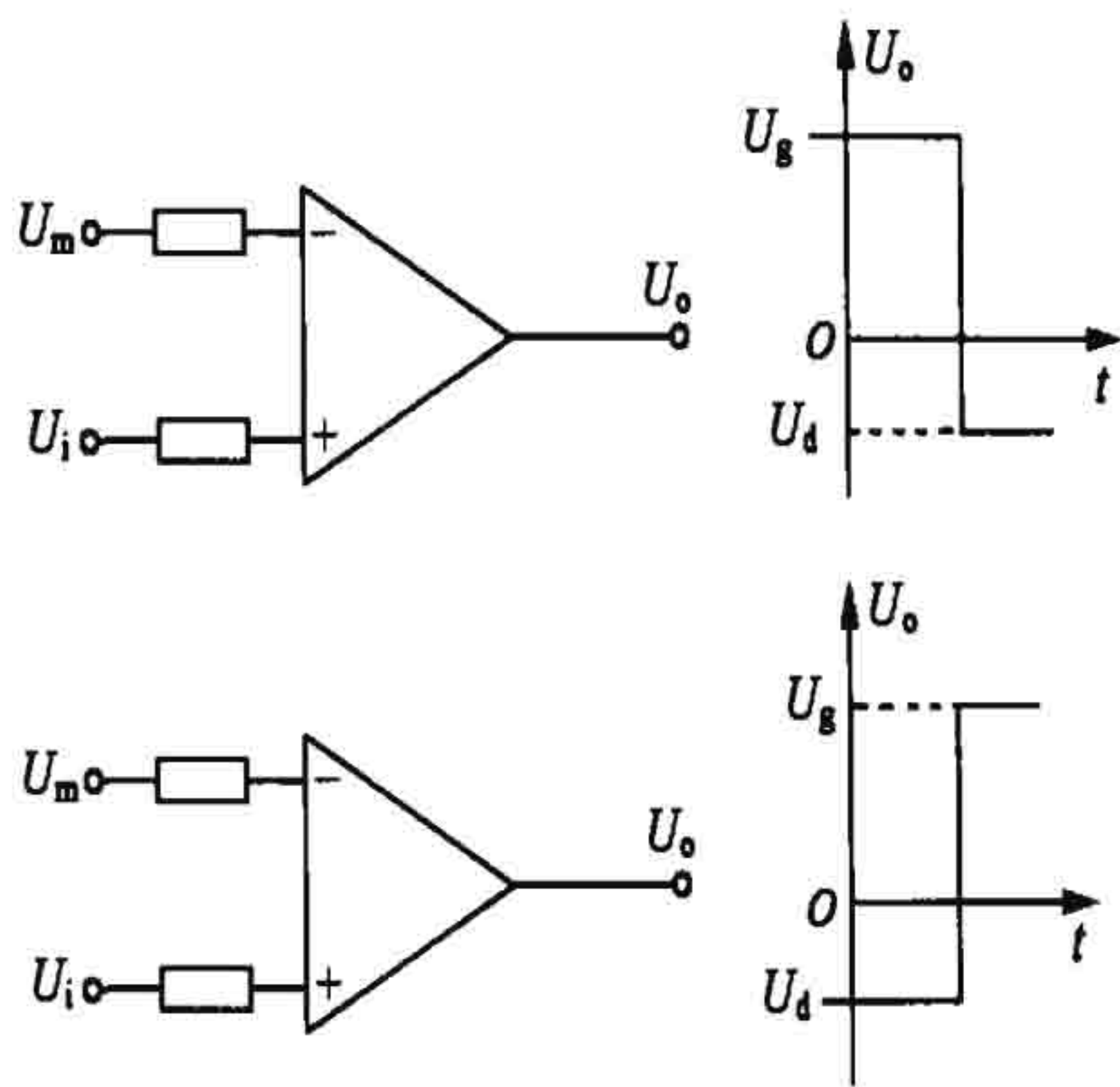


图9 单限电压比较器

的输出电位发生转换,由高电位  $U_g$  变为低电位  $U_d$  或由低电位  $U_d$  变为高电位  $U_g$ 。这里介绍几种最常用的基本比较器,它们是单限比较器、迟滞比较器和双限比较器。

这些比较器可用专用集成比较器组成,也可用通用运算放大器组成,两者功能相同。

### (1) 单限电压比较器

单限电压比较器只有一个门限电位  $U_m$ ,当输入电压超过或低于它时,比较器输出电位发生变化,它是比较器中最简单的一种。电路见图 9(a),当输入信号高于比较门限电位  $U_m$  时,输出电位由高变低,图(b)则相反,输入信号高于门限电位  $U_m$  时,输出电位由低变高。

### (2) 双限电压比较器

双限比较器是用来判断输入信号是否位于两个指定门限电位之间。当位于指定门限电位之间时,输出电压将为低电位或零电位。如果输入电压不在指定的门限电位之间时,输出电压将为高电位。图 10 是一个简单的双电位双限比较器电路。图中  $U_j$  是基准电压。

### (3) 迟滞电压比较器

迟滞电压比较器具有两个门限电位,数值大的门限电位叫上门限电位,数值小的门限电位叫下门限电位,两者之差叫门限宽度。当输入电压从低值达到上门限电位,比较器输出从低输出电位转到高输出电位,该比较器称为上行迟滞比较器。相反,当输入电压从低值达到上门限电位时,比较器输出从高电位转到低电位,称为下行迟滞比较器。原理如图 11 所示。

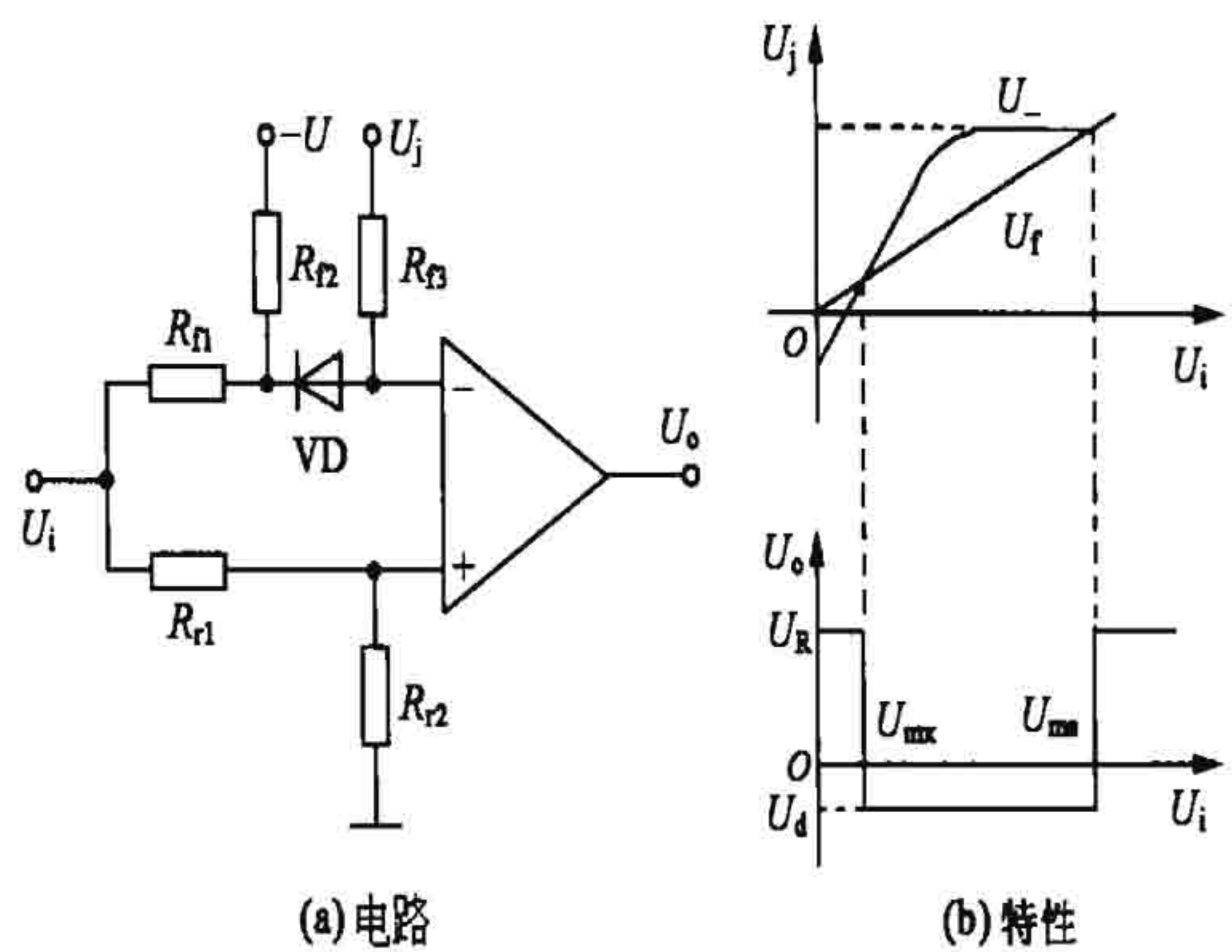


图10 简单双电位双限比较器

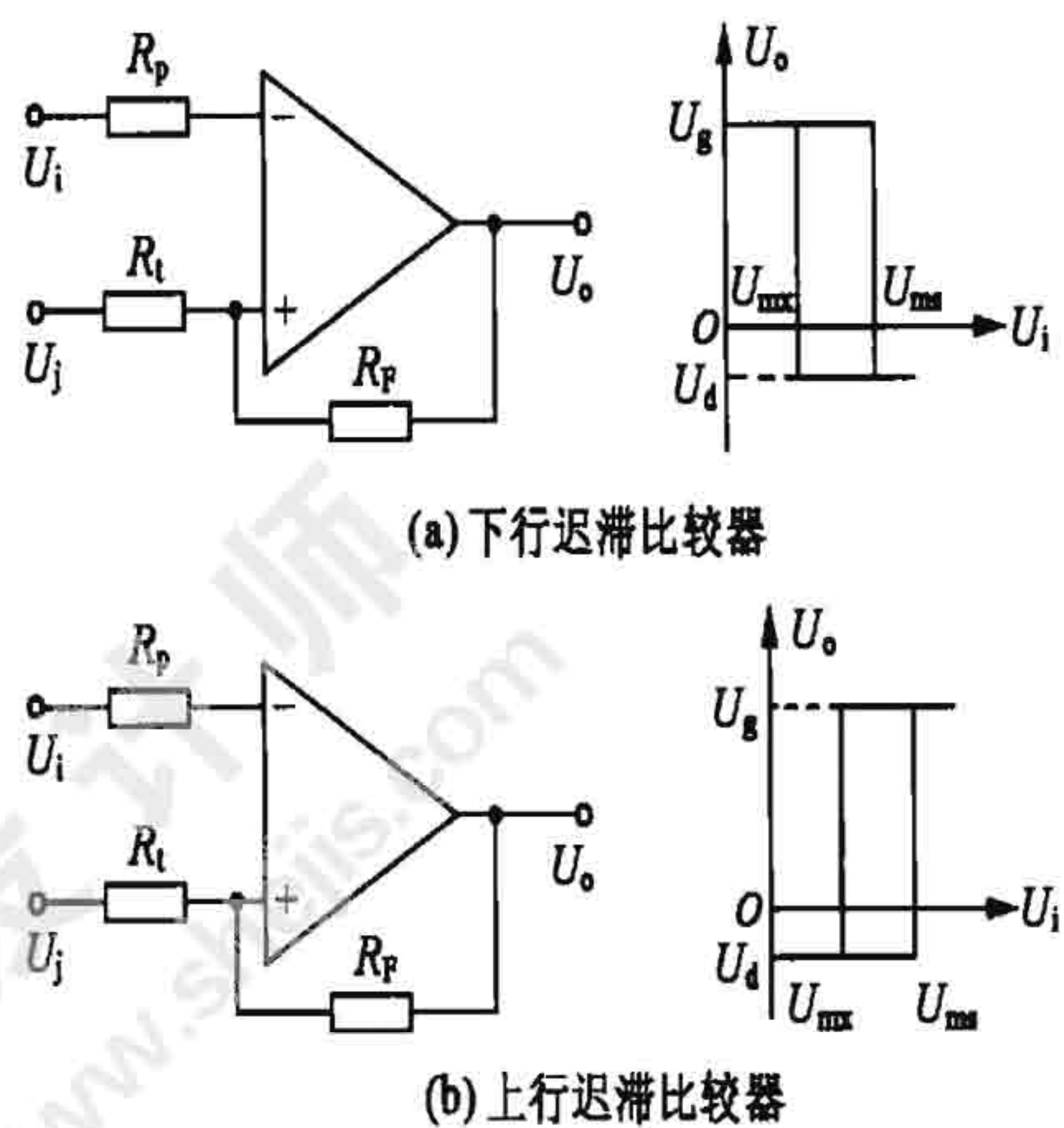


图11 迟滞比较器

所有迟滞比较器都具有正反馈回路,以便加速比较器的转换过程。输出电压经反馈电阻  $R_F$  送到比较器的同相端,一旦输出电压发生变化,正反馈迫使同相端电位随之下降,从而加速了输出电压的跳变过程。

在迟滞比较器中,改变基准电压  $U_j$ ,可以同时调节上、下门限的电位,而不影响门限宽度。改变反馈系数  $R_i / (R_i + R_F)$ ,可以调节门限宽度,但同时影响上、下门限电位。

### (4) 用数字电路组成的电压比较器

在叙述电压比较器工作原理时可知,当输入电压超过门限比较电压时,输出电位才会变化。这样用数字电路的与、或、非门也可以实现诸如此类的逻辑关系。在 UPS 中这种应用比较多。

### (5) 时基电路 555 和 556

“555”电路,国外叫“Timer”,国内叫“定时器”、“时基电路”等不一。它是一种极为广泛的模拟数字

混合式集成电路,可以用来组成性能稳定而精确的多谐振荡器,单稳态触发器等。图 12 是 555 的功能方块图。

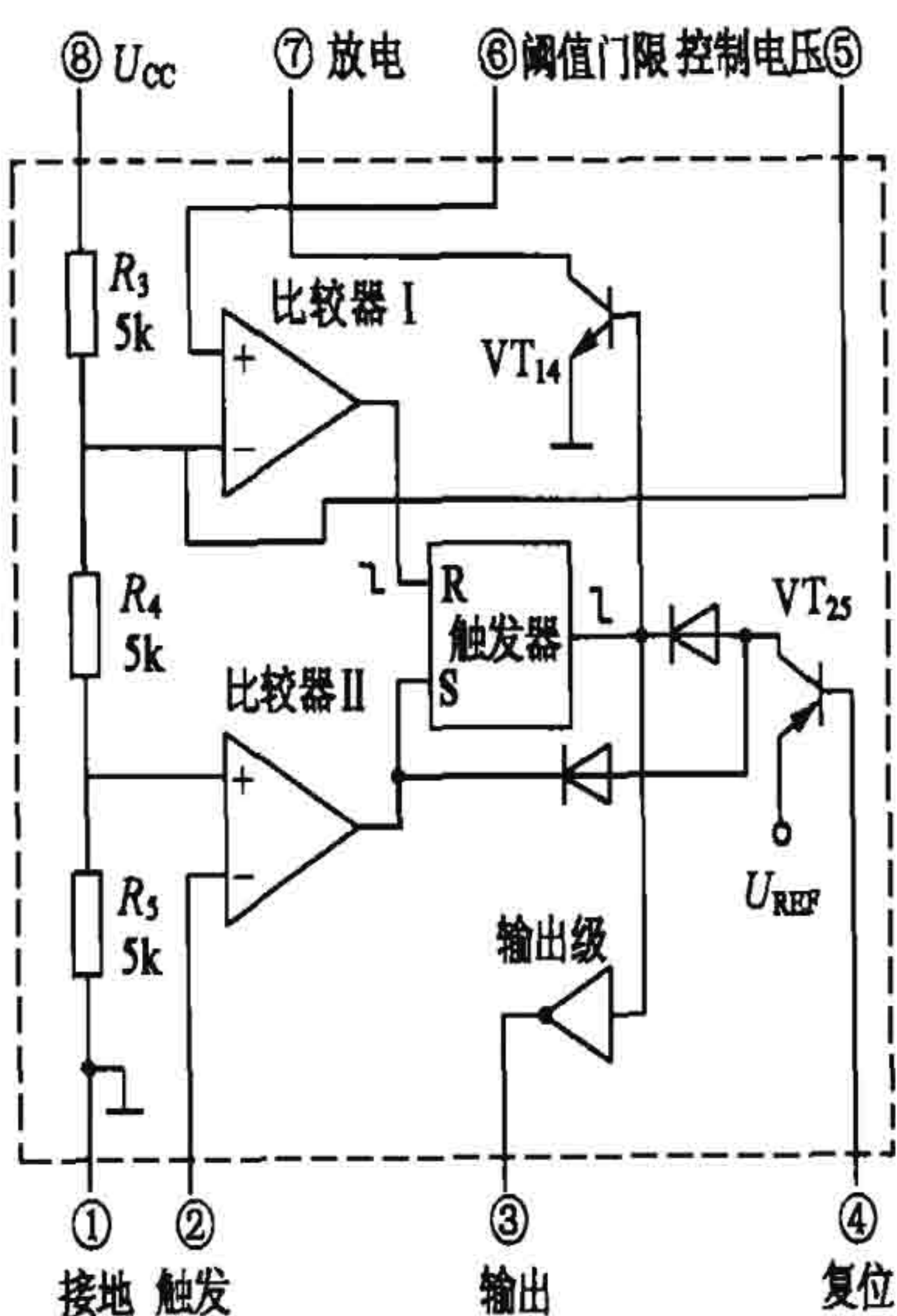


图 12 555 功能方块图

555 具有单稳态和无稳态两种基本的工作模式。图 13 是单稳态的原理图,在这种工作模式中,555 起单脉冲发生器的作用。外接电容  $C$  开始通过 555 内部的晶体管放电,在②脚上加了小于  $1/3U_{CC}$  的负触发脉冲后,就形成了双稳态触发电路,它使电容器充电并驱动输出到高电位状态。然后电容器两端的电压按指数形式增加,经过  $1.1R_A C$  时间后,电压等于  $2/3U_{CC}$ 。这时,比较器使双稳态触发电路复位,反过来又使电容器放电,并驱动输出回到低态。

在定时期间,当输出是高态时,再加触发脉冲对电路不起作用。但是,这时如加负脉冲到复位端

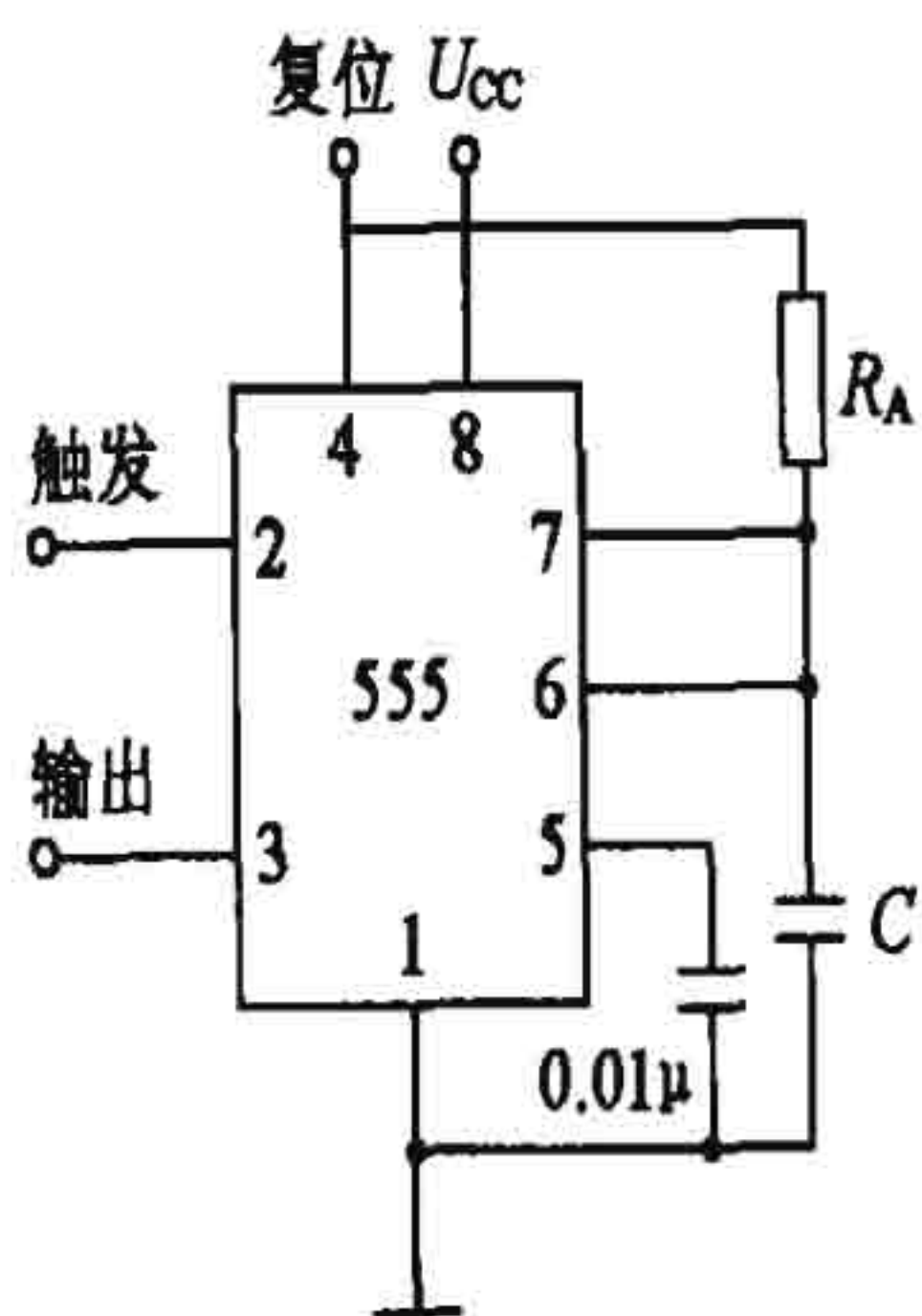


图 13 555 单稳态工作模式

(④脚),电路将被复位。直到再加触发脉冲为止,输出将一直保持低电平。要注意的是,在单稳态工作中,定时期间结束前,触发端一定要回到高电位。

假如电路如图 14 所示,将②脚和⑥脚相连接,它将自行触发,成为自激多谐振荡器,外接电容器通过  $(R_A + R_B)$  充电,再通过  $R_B$  放电,于是可由这两个电阻的比值准确地设置占空比。

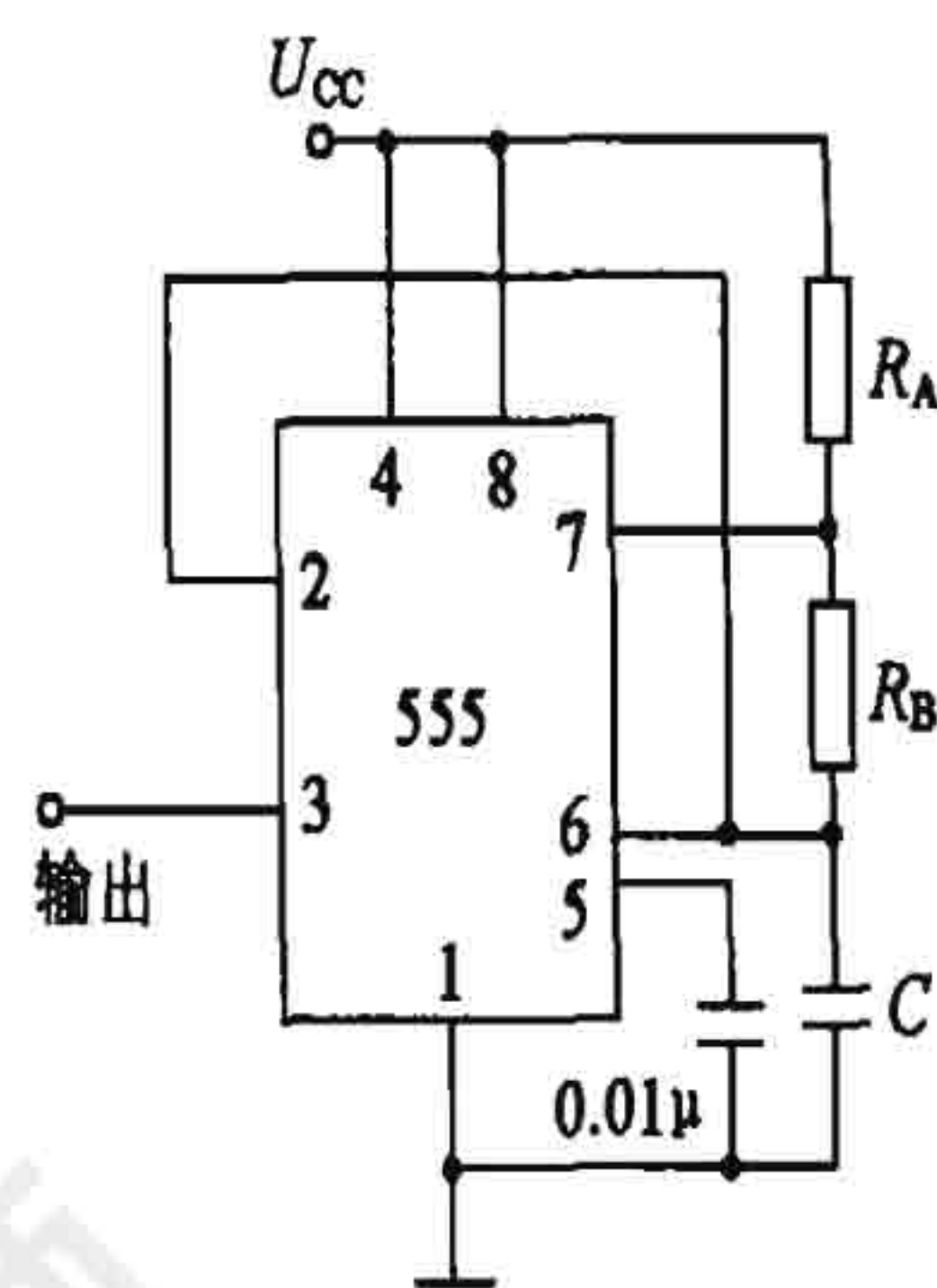


图 14 555 无稳态工作模式

在这种工作模式中,电容器在  $1/3U_{CC}$  和  $2/3U_{CC}$  之间充放电。充电时间(输出为高态)  $t_1$  等于  $0.693(R_A + R_B)C$ ; 放电时间(输出为低态)  $t_2$  等于  $0.693R_B C$ ; 振荡频率为  $\frac{1.44}{(R_A + 2R_B) \cdot C}$ , 占空比为  $\frac{R_B}{R_A + 2R_B}$ 。

“556”是双“555”,它有 14 个引线端子,其中⑭脚接电源电压,⑦脚接地,其他①~⑥脚为一个“555”时基电路,⑧~⑬脚为另一个“555”时基电路。

(未完待续)

