

集成运算放大器 应用电路集

金 晶 何玉表 编译

半导体技术编辑部

一九八四年

前 言

集成运算放大器是模拟集成电路家族中的佼佼者，无论是品种还是产量均居模拟集成电路之首。近年来，国产集成运算放大器的发展十分迅速，新品竞出，产量疾增，并日益广泛地应用于积分、微分、加、减、乘、除等模拟运算，以及精密测量，自动控制，电源，通讯，信息处理等领域。为了帮助各行各业从事电子线路和电子产品设计、研制、生产、维修、革新、教学等工作的人员更好地熟悉和应用集成运放，开阔思路，扩大应用范围，我们根据国内集成运放的研制、生产、引进和应用现状，选编了国外近期通用型运放、特殊型运放的应用线路150多个实例，以期读者从中得到启发和借鉴，为集成运放的推广应用尽一点薄力。

参加本书编译工作的还有王朝英、蒋桂清、吴孝金、马天然等同志。由于我们的水平有限，编译中的缺点、错误在所难免，恳请读者批评指正。

目 录

一、电源技术

- 1.1 可调、稳定、廉价的毫微安电流源…………… (1)
- 1.2 恒流源…………… (3)
- 1.3 精密可调恒流源…………… (4)
- 1.4 电源设备用的附加恒流源…………… (5)
- 1.5 15V, 0.5A的稳压电源 …………… (6)
- 1.6 具有正交特性的稳压稳流装置…………… (7)
- 1.7 电源的检验设备…………… (9)
- 1.8 差动变压器的励磁电路…………… (10)
- 1.9 电可改编程序只读存贮器(EPROM)的25V供
电…………… (11)
- 1.10 能保持良好的负载调整性能的并联三端稳压
器…………… (12)
- 1.11 采用低成本数/模转换器的可编程恒流源 …… (14)

二、波形发生

- 2.1 极低频数字正弦波发生器…………… (17)
- 2.2 由D/A转换器控制的正弦波发生器 …………… (19)
- 2.3 双向斜坡波发生器…………… (20)
- 2.4 可调相位低频双阶梯波发生器…………… (21)
- 2.5 阶梯电压发生器…………… (22)
- 2.6 改善音色的可调 e^x 波形发生器 …………… (24)

2.7	简易函数发生器	(25)
2.8	可变函数网络	(27)
2.9	频率稳定的函数发生器	(28)
2.10	用相位调节电路使函数发生器石英晶体稳定	(29)
2.11	音频扫描发生器	(30)
2.12	用曲线整形电路来修整波形	(31)

三、脉冲、放大技术

3.1	宽度可调的三角波电流脉冲发生器	(34)
3.2	时钟触发式三角形脉冲发生器	(36)
3.3	脉冲极性自动修正电路	(38)
3.4	时标发生器	(39)
3.5	线性集成电路警报颤音器、啸音器和扫频发生器	(40)
3.6	同步短脉冲串变换器	(42)
3.7	压电晶体驱动器	(45)
3.8	微分电路	(45)
3.9	自动适应光亮变化的光电放大器	(46)
3.10	数字电压表的放大器部分	(47)
3.11	消除积分器串音的差动放大器	(49)
3.12	视频加法放大器	(51)
3.13	用模拟乘法器实现自动增益控制	(51)
3.14	由D/A转换器控制建立的对数放大器	(52)
3.15	改善生物医学信号信噪比(S/N)的反对数放大器	(53)
3.16	自动调零电路	(54)
3.17	可变扩展单元	(56)

3.18 精密电压钳位电路	(57)
---------------------	--------

四、计算技术

4.1 用741型运放组成的模拟开方电路	(59)
4.2 输入电压范围较宽的模拟平方根电路	(61)
4.3 简单除法器	(63)
4.4 简单、准确的模拟乘法器和除法器电路	(65)
4.5 使用跨导运算放大器的乘法器/除法器	(67)
4.6 简单、廉价的绝对值电路	(69)
4.7 由一个微型机片子、两个RAM和一个运放组 成的多用计算机系统	(69)

五、变换技术

5.1 32路D/A转换器	(72)
5.2 双极性A/D转换器的符号位	(74)
5.3 模拟预定标器	(75)
5.4 用于压控振荡器的线性化电路	(76)
5.5 压控振荡器用运算放大器使特性曲线变直	(79)
5.6 一个数字角度值转换成一个模拟正弦值	(81)
5.7 消除频率/电压转换器波纹的电路	(82)
5.8 可调直流/交流电压变换器	(83)
5.9 廉价的线性电压/频率转换器	(84)
5.10 用于阶梯电流发生器的电压/电流转换器	(87)
5.11 无极性R-V变换器	(88)
5.12 无需电源稳压的电压/脉冲串转换器	(89)
5.13 电容/电压转换器	(90)

六、控制技术

6.1	单封装型温度监测/控制器	(92)
6.2	热敏电阻精确控制加热器	(93)
6.3	能精确地调节加热器的可编程控制器	(94)
6.4	马达恒速补偿控制器	(96)
6.5	用电阻伺服电路代替马达中的机械调速器	(97)
6.6	直流串激电动机的速度控制	(99)
6.7	用三端双向可控硅线性化来控制直流电机平 稳地双向运转	(100)
6.8	保护失速功率装置的快速电流限制器	(102)
6.9	变速风扇控制器	(103)
6.10	数控参数调节器	(104)
6.11	用负反馈电路中的电桥来稳定钨丝灯的色温	(105)
6.12	盒式录音机马达自动关断电路	(106)
6.13	开关晶体管电桥型直流伺服马达控制器	(108)

七、滤波技术

7.1	中心频率可数调的通用滤波器和振荡器	(110)
7.2	调整简便且稳定的有源滤波器	(112)
7.3	具有“有源电感”的LC抑制滤波器	(113)
7.4	具有恒定相移的低通滤波器	(116)
7.5	使用跨导运算放大器的滤波器	(117)
7.6	用于抑制交流声的可调陷波滤波器	(119)
7.7	无相位畸变的50Hz干扰滤波器	(120)
7.8	用维氏电桥代替双T滤波器	(122)
7.9	由D/A转换器控制的高通滤波器网络	(123)
7.10	用前馈有源滤波器作分步衰减器	(124)

7.11 用压控积分器调节滤波器的带宽·····	(127)
--------------------------	-------

八、检测与仪器仪表

8.1 由V-F、F-V变换器组成的高精度数字型停延表·····	(129)
8.2 消除环境光影响的调制光检测器·····	(130)
8.3 扬声器位移探测器·····	(132)
8.4 不用大电容的、不计瞬态过程的速率极限探测器·····	(133)
8.5 脉宽测量电路·····	(134)
8.6 用于存贮峰值的数字取样保持电路·····	(136)
8.7 D/A转换器的测试·····	(139)
8.8 器件无载特性的测量·····	(140)
8.9 用LR振荡器直接测量电感·····	(142)
8.10 模拟输出为10V的测温传感器·····	(143)
8.11 使用频率和振幅可编程函数发生器的听觉测试器·····	(145)
8.12 电容计·····	(149)
8.13 宽量程电容计·····	(150)
8.14 电导计·····	(151)
8.15 便携式干湿温度计·····	(153)
8.16 数字温度计·····	(154)
8.17 电子温度计·····	(155)
8.18 数字温度计的模拟部分·····	(156)
8.19 CMOS电路逻辑测试仪·····	(157)
8.20 场效应晶体管增益自动控制测试仪·····	(159)
8.21 NPN型和PNP型半导体元件特性曲线图示仪·····	(161)

8•22 振动检测/分析仪	(164)
8•23 带数字显示的电流放大测试仪	(166)
8•24 处理地震仪信号的实时信号处理仪	(168)
8•25 数字式测量值补偿器	(170)
8•26 峰值时间检测器	(171)
8•27 可自调整的直流耦合触发器	(173)
8•28 监控微波无线电传输线路导频音的稳定的交 流电平检波器	(174)
8•29 相敏检波器电路	(175)
8•30 异相信号测试仪	(177)

九、振荡器

9•1 压控振荡器	(178)
9•2 指数响应低频压控振荡器	(179)
9•3 能在整个音频范围内产生谐波的压控振荡器	(181)
9•4 用运算放大器的振荡器	(183)
9•5 同步马达振荡器	(184)
9•6 可控振荡器的应用	(185)
9•7 只用一个定时元件的三角形—90°相移振荡器	(187)

十、相位

10•1 精确的相位计	(189)
10•2 相位表电路	(190)
10•3 由运算放大器组成的简单锁相环	(191)

十一、显示与指示

11•1 发光二极管模拟计时砂漏	(194)
------------------------	-------

11.2 个人计算机直观显示装置用的跟踪发生器	(195)
11.3 信号静态特性的动态显示	(196)
11.4 互补晶体管的匹配	(197)
11.5 用两个条形信号驱动器将10个单元扩展到100个单元	(198)
11.6 能显示五种状态的动态逻辑探头	(200)
11.7 过载指示器	(201)

十二、调制与解调

12.1 振幅调制器	(203)
12.2 为函数发生器提供窄频扫频能力的低压调制器	(203)
12.3 由D/A转换器控制的脉冲宽度调制器	(205)
12.4 在脉宽调制器中使用脉冲变压器取代电源变压器	(206)
12.5 用跟踪滤波器解调两个音频带的频率调制信号	(207)

十三、其它

13.1 自动快速充电的镍镉充电器	(209)
13.2 高压精密极值信号选择器	(210)
13.3 精密双极性电流镜电路	(212)
13.4 由跨导运放和普通运放共同构成的压控均衡器	(214)
13.5 由取样-保持电路构成的可变参考电压整流器	(216)
13.6 高压直流去脉器	(217)

13·7 解决光路透明度变化的自平衡光遮断器·····	(218)
13·8 调节发光二极管输出的电路·····	(219)
13·9 用于暂停绘图指令的x-y绘图机的“就绪笔” ·····	(220)
13·10 交流配电系统电路的电压调整 ·····	(221)
13·11 光传感器与微处理机间的接口电路 ·····	(223)
13·12 新型导通角调整及空转稳定的晶体管式点火 装置·····	(225)
13·13 降低动态噪声的电路 ·····	(228)
13·14 铁芯磁滞分量模拟电路 ·····	(229)

一、电 源 技 术

1.1 可调、稳定、廉价的毫微安电流源

大量地生产工作电流小于 $1\mu\text{A}$ 的廉价、稳定的电流源是很困难的，但本电路能够做到。这种可调的毫微安电路是便宜而稳定的，且所用的元件很容易得到。与此相比，FET结构的恒流源电路虽然简单，但限制在 $1\mu\text{A}$ （最小值），其温度补偿也比较困难。

一般，毫微安电流使用在斜波扫描电路和计时器中电容器的线性充电上，用小的电容器可以得到特别长的时间间隔（充电电流的良好稳定性可保证斜波波形的良好线性度）。这样的电流也用于晶体管差分输入级上的集电极和发射极负载上，这种输入级要求低电源电压和高增益。当用稳定的毫微安电流偏置电阻时，能够测量绝缘电阻（ $10^9\Omega$ ）。

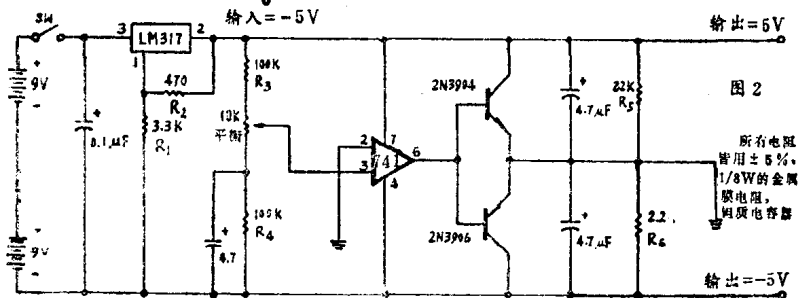
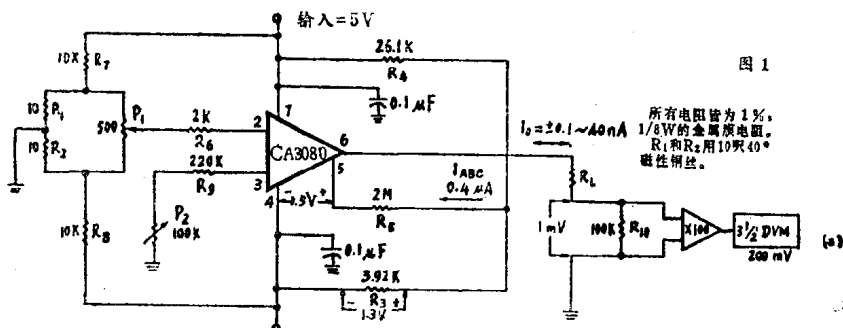
基本的电路元件是用一个RCA的CA3080做为程序电压-电流变换器（图1）。在5腿上加 $0.4\mu\text{A}$ 的放大器偏置电流，放大器的输出得到合适的毫微安电流。传输函数是 $I_o = 19.2 (I_{ABC}) \times (\pm e_{in})$ ，其中 I_o 是用毫微安表示的输出电流， e_{in} 是用mV表示的输入电压。以上均为 25°C 的情况。正的 e_{in} 产生负的 I_o （阱），负的 e_{in} 产生正的 I_o （源），电路有两种极性。

当选择CA3080有最小的正向失调时，简单的调零装置就有效。在 25°C 时，正向跨导 g_m 的温度系数大约是 $-0.33\%/^\circ\text{C}$ ，这个温度系数可以用铜线电阻 R_1 和 R_2 的正温度系数所补偿。整个的温度范围都可精确的补偿。

用电池供电可得到稳定的 $\pm 5\text{V}$ 电压（见图2），由电池提供约 6mA 的电流，有不到 1mA 的电流供给CA3080和有关的分压

器。在 13 到 18V 的电池电压范围内都可维持良好的稳定性（集成电路 CA3080 有高达 $20000\text{M}\Omega$ 的输出电阻，因此有很好的稳定性）。

为监测 R_L 从 0 变到 $10\text{M}\Omega$ 时 I_o 的变化，用一个 $100\text{k}\Omega$ 的检测电阻 R_{10} ，连接在 R_L 与地之间，当给定 e_{in} 使 I_o 为 10nA 时，在 R_{10} 上有 1mV 的压降，放大 100 倍后，在 3 位半数字电压表的 200mV 量程上有 0.1V 的电压，数字电压表的读数为 100.0，最后一位有效数字表示十分之一毫伏。由此得知，当 I_o 为 10nA 时， R_L 从 0 变到 $10\text{M}\Omega$ ，最后一位有效数字将不变化。因此， I_o 的稳定度好于 0.1% 。



1.2 恒流源

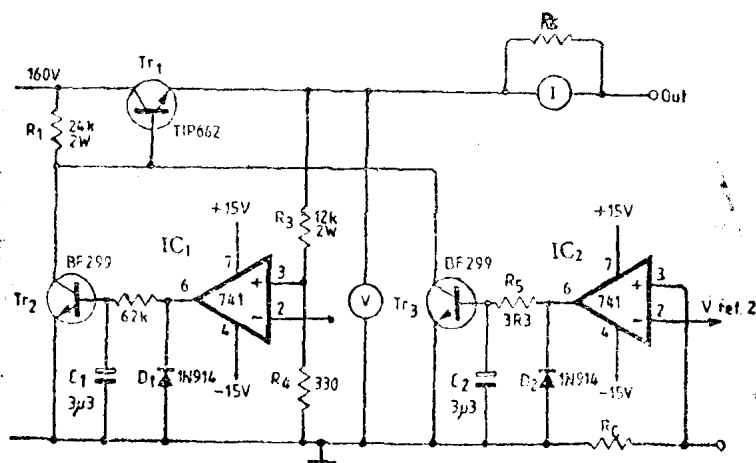
本电路非常简单,没有使用特殊元件,输出电流范围很大,从 $2\mu\text{A}$ 到 100mA 六个数量级的范围。输出仅受元件的额定值所限。此电路具有的性能可与价格更贵的仪器相比。

T_{r1} 、 T_{r2} 和 IC_1 组成一个恒压源,变化 V_{ref1} , 其输出电压便从 0 变到 100V 。在检验这部分电路时,电源电压从 150V 变到 250V 和突然加上 100mA 的负载后,用模拟系统和 3 位半数字电压表来检测,输出电压没有变化。

T_{r3} 和 IC_2 组成恒流源部分, R_c 是电流检测电阻。选取适当的 R_c 值或变换不同的数值,就可得到所需要的电流范围。

取 V_{ref2} 约为 0.7V , 此值等于 R_c 上的电压降,这样电压测量上的误差将不会超过这个数值加上电流表上的压降,总数值少于 1V 。用多次反射的电位差计测量 V_{ref2} 就可精确的调整电流。

电容 C_1 和 C_2 是消除振荡的,不加 C_1 、 C_2 将会发生振荡。 D_1 和 D_2 是为防止在变换 R_c 的瞬间产生的负电压损坏 T_{r2} 和 T_{r3} 。已经证实,在工作状态中变换 R_c 不会损坏电路。但是如果在输出大于 30V 而且负载是脉动的情况下,常常需要对 IC_2 加以另外的保护措施(在 3 腿与 7 腿之间加一个二极管有保护作用)。



1.3 精密可调恒流源

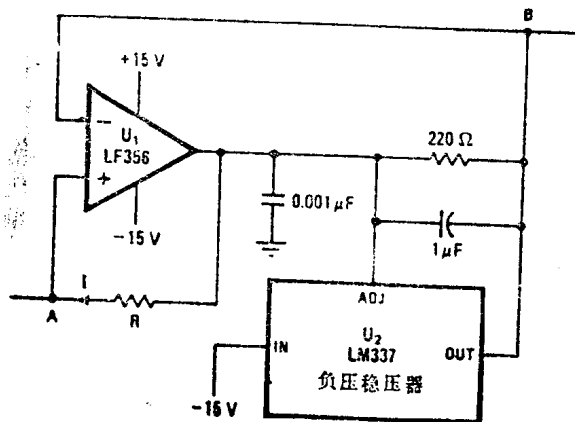
本恒流源由一个三端稳压器及一个运算放大器组成，可用于热敏电阻、电阻-温度检测器等元件的精确测量。电路可以极精确地输出 $1\text{ nA} \sim 10\text{ mA}$ 恒定电流，输出阻抗相当低，因而当电流流过一个外接电阻时，可根据电阻上的电压降极精确地测得电阻的阻值。在 $0 \sim 10\text{ V}$ 电压范围内电流保持恒定，变化率在 100 ppm 之内，电流温度系数为 100 ppm/K 。

三端负压稳压器 U_2 在其调整端与输出端之间产生 1.25 V 的恒定电压（见图）。此电压使运算放大器 U_1 倒相输入端的电压比其输出端更负 1.25 V ，这依次迫使非倒相输入端的电压等于倒相输入端的电压，补偿电压在 1 mV 以内，这就保证了精密电阻 R 两端的电压为 1.25 V 。因此，流出终端 A 的电流满足关系式

$$I = 1.25/R$$

且 B 点的电压等于 A 点的电压。

放大器输出端产生的 5 mA 电流经 220Ω 电阻流入稳压器的输出端。因 U_2 有效工作只需要 1 mA ，其余 4 mA 电流就可用来在 B



点驱动外部电路。运放的最大输出为 $+12\text{ V}$ ，它决定了压顺为 $0 \sim 10\text{ V}$ 。

相同的方法可用正压稳压器组成相反类型的恒流源。

可调恒流源线路图

1.4 电源设备用的附加恒流源

本电路为一简易恒流源电路，由输出电压约20V的稳压源扩展而成，可作晶体管测试用的基极电流源，与被测晶体管的型号无关，不接串联电阻可提供恒定的基极电流。经校正后，集电极电流的指示值可直接表示为增益值。此外，亦可在光度计中给测试灯提供恒流，在用正或负温度系数精确测定温度时，以及在用恒定电流使电容器充电而产生锯齿波电压时，均可用这种电路。

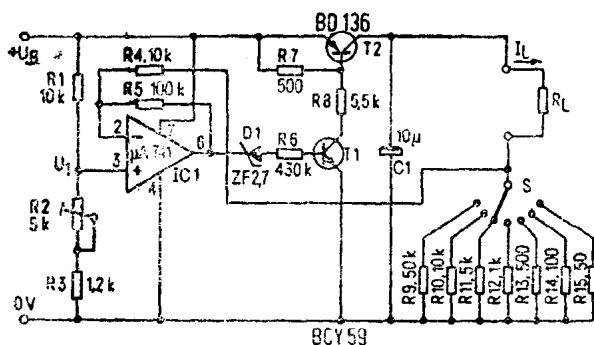
此电路为一可调电路，按所需的恒流范围调整电阻 $R_9 \sim R_{15}$ 的实际值。用741型运算放大器可对测定值和基准值进行比较，即以运放作比较器，通过晶体管 T_1 控制晶体管 T_2 。所需的恒流可由转换开关S在0.1~100mA之间进行调整。表中列出常用电流值、电阻实际值和负载电阻范围，在表列范围内可保证恒流，这时的工作电压 $U_B = +20V$ ，经微调电位器 R_2 调整，S点的电压约为+5V。

恒定电流可通过 R_2 进行精确调整，根据电路的不同应用，择用微调电位器或旋转式电位器。因只进行一次调整，故电阻实际值和工作电压的容许误差必须很小（约0.5%）。

此外，该电路常用于构成专用电流表。

恒 流 源 的 量 程

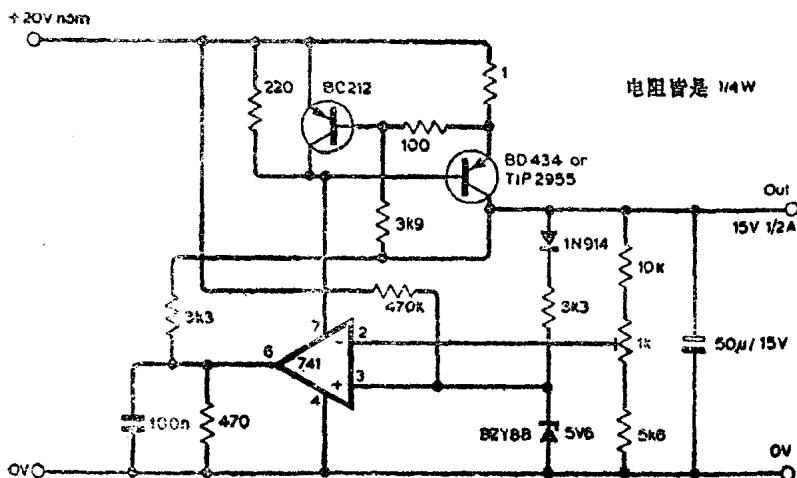
$I_L (mA)$	R 实 际 值 (Ω)		$R_L (\Omega)$
0.1	R_9	50k	0~150k
0.5	R_{10}	10k	0~30k
1	R_{11}	5k	0~15k
5	R_{12}	1k	0~3k
10	R_{13}	500	0~1.5k
50	R_{14}	100	0~300
100	R_{15}	50	0~150



恒流源电路: R_{15} 为 1W, 其余均为 0.5W

1.5 15V, 0.5A 的稳压电源

本电路具有良好的负载调整率和温度稳定性, 尽管使用的都是便宜、通用的元件。输出电阻在低频时为 $20\mu\Omega$, 与一般的稳压器不同, 其功率晶体管是连接到运放的输出端, 只需要几百毫伏的电压加在串联的调整晶体管上, 保持调整率不变。当 741 运



放加负电源时, NPN用晶体管, 这个电路就可做为负的稳压器。此电路包含有折回型电流限制保护电路, 最大功耗限制在 4 W。当没有电流输出时, $3.3\text{k}\Omega$ 的电阻使得 741 的输出级截止, 功率晶体管导通时 220Ω 的电阻为 741 提供静态电流。二极管和 $470\text{k}\Omega$ 电阻做为起动, $0.1\mu\text{F}$ 电容改善了输出电流突然变化的响应。

1.6 具有正交特性的稳压稳流装置

本装置的线路示于图 1, 其特性曲线近似呈正交, 即向一个已知的负载提供稳压和稳流。

在稳压范围内, IC_1 将输出电压和参考电压 U_{bez} 作比较, 如有差值则控制晶体管 $T_1 \sim T_3$, 直至差值为 0。输出电压 U_{aus} 由 P_2 和 P_3 调节。 U_{bez} 由图 2 中的电路产生。

在稳流范围内, IC_2 通过 R_7 的压降将输出电流 I_{aus} 与参考电压 (由 R_2 、 R_5 和 P_4 调节) 作比较, 如果 R_7 的压降大于参考电压, 则调整 T_4 使 U_{aus} 变小, 直至参考电压和 R_7 的电压相等, 即 I_{aus} 保持稳定。

I_q (最小 1mA) 应大于 $T_1 \sim T_3$ 的漏电流, 此外, 高阻负载时的输出电压不能调零:

$$I_q = \frac{U_{\text{bez}}}{P_1 + R_1}$$

在本装置的设计中, U_{ref} 约为 100mV :

$$U_{\text{ref}} = U_{\text{bez}} \frac{R_2}{P_4 + R_2 + R_5}$$

流经分压器的电流约 0.1mA , 足以供 741 运算放大器。

$$I_{\text{aus}} \text{ 由 } R_7 \text{ 决定: } I_{\text{aus}} \approx \frac{U_{\text{ref}}}{R_7}$$