

〔日〕佐藤一郎 著

集成运算放大器 电路设计实用手册

学 术 期 刊 出 版 社

73.769
299

集成运算放大器电路 设计实用手册

〔日〕佐藤一郎 著
韩健青 译
张志强 校

学术 期刊 出版社

内 容 简 介

本书是作者的经验总结。它以基本电路为例，详细介绍了集成运算放大器电路的设计与组装技术及电路参数，讨论了电路的各种特性及测试数据，指出设计相应电路时的注意事项，给出了一些基于经验的独有技术。书中很多数据是很难从一般集成运算放大器特性表中查到的。本书适于从事模拟计算技术，测量技术和自动控制的工人、工程技术人员及高等院校有关专业人员参考。

オペアンプIC回路の作り方・使い方

〔日〕佐藤一郎著

集成运算放大器电路

设计实用手册

韩健青 译

张志强 校

学术期刊出版社出版

(北京海淀区学院南路86号)

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1989年2月第1版 开本：850×1168毫米1/32

1989年2月第1次印刷 印张：6.75 插页：2

印数：0001—5,550 字数：150千字

ISBN 7-80045-261-1/TN·5

定价：4.70元

译 者 的 话

近年来,集成运算放大器的发展十分迅速,新品种、新型号不断涌现,应用的范围也越来越广泛。例如:采用集成运算放大器可以组装成信号变换电路、运放的测量电路、RC有源滤波器、非线性波形变换电路、比较器电路、数字运算电路、稳压电路、放大电路、信号发生电路等。为了使广大的读者掌握集成运算放大器的应用技巧,灵活运用这类器件,正确设计有关电路,我们翻译了《集成运算放大器电路设计实用手册》这本书。只要读者正确地理解和掌握书中所介绍的运算放大器应用技巧,就会设计出多种实用电路,扩大运算放大器的应用领域。

该书是作者经验的总结。它以基本电路为例,详细地介绍了集成运算放大器电路的设计与组装技术以及电路参数,讨论了电路的各种特性及测试数据,指出应用电路时的注意事项,给出了一些基于经验的独有技术。书中很多数据是很难从一般集成运算放大器特性表中查得到的。

该书重点突出,概念清楚,阐述明了,而且附有实例,图文并茂,是有关从事模拟计算技术、测量技术和自动控制等方面的工人、工程技术人员和高等院校有关专业师生进行集成运算放大器电路设计和应用的参考书。

在成书过程中,承中国科学院计算技术研究所王兴元同志审阅。

由于译者水平有限,缺点错误在所难免,敬请广大读者批评指正。

译 者

一九八九年一月

前 言

集成运算放大器和数字集成电路一样，目前已得到广泛应用。

运算放大器是一种能模拟数字运算的放大器。但只有具备“理想”特性的放大器才具有运算能力。所以，集成运算放大器电路特性，大多受构成该电路的电子器件性能的影响。

可是，在实际应用中，作为“理想”的运算放大器，要充分地发挥其作用，使用者还必须具备足够的知识和经验。有关运算放大器的知识，读者可以从已经出版的很多专著中去获得。但是，经验只能在实际应用和组装电路、测试性能以及分析结果中获得。只有积累这些宝贵的经验并加以灵活应用，才能设计出充分发挥运算放大器效能的电路。

本书是著者的经验总结。它以基本电路为例，详细地介绍了电路的设计、组装技术以及电路性能的测试，并给出电路参数及测试数据；指出了集成运算放大器应用时必须考虑和注意的问题；介绍了组装电路的技术秘诀等。其中，很多基本数据仅从运算放大器电参数表中是得不到的。

本书第一章，将“理想”的运算放大器特性与实际运算放大器特性进行比较，说明集成运算放大器技术性能和参数。

第二章，介绍直流放大电路的基本特性。

第三章，介绍交流放大电路的基本特性和交流放大电路的输入、输出特性以及关于频率特性对转换速度的影响等基本数据。本章在低功耗放大电路中所用的集成运算放大器不是 $\mu A741C$ ，而是低功耗集成运算放大器 $\mu PC153A$ 。

第四章，介绍检波和检测电路中的线性检波电路、绝对值放大电路及零交叉检测电路。

第五章，介绍滤波电路。运用集成运算放大器构成有源滤波

器的种类很多，本章仅以 RC 网络与同相放大器构成的压控电压源型有源滤波器电路，来说明低通、高通以及带通滤波器特性。尤其对带通滤波器，较为详细地介绍了设计方法，它是低通滤波器和高通滤波器的组合。

第六章，介绍作基准用的稳压电路。

第七章，介绍作基准用的恒流源电路。给出用作这类基准所必须的温度特性、漂移特性、电压变化特性以及负载变化特性等。

第八章，介绍变换电路。变换电路属于上述各电路的应用电路。若充分理解并灵活应用从第一章到第七章所示的各种电路，则能设计出很多本书不曾给出的实用电路。

读者若用本书所示的电路以及电路参数，设计、制作相同电路时，在同样的测试条件下，有可能得到的数据与本书所给出的数据不尽相同。特别是当集成运算放大器的特性应用在接近极限值时，即使使用同一型号，又经过精心挑选的运算放大器，也有可能得到不同的值，但该值决不会过多偏离本书所给出的数据。读者可以利用本书所示的电路以及数据，设计出自己所需要的电路，同时还能够推算出该电路的大致数据。

著 者

1982年12月

目 录

第一章 集成运算放大器技术指标和性能参数	(1)
1.1 集成运算放大器特性	(1)
1.2 运用集成运算放大器注意事项	(9)
第二章 直流放大电路	(11)
2.1 补偿调整电路	(11)
2.2 反相放大电路	(16)
2.3 同相放大电路	(24)
2.4 增益可变反相放大电路	(28)
2.5 增益可变同相放大电路	(33)
2.6 差动放大电路	(35)
2.7 低功耗放大电路	(41)
2.8 单电源放大电路	(50)
2.9 电流扩展电路	(55)
第三章 交流放大电路	(60)
3.1 反相交流放大电路	(62)
3.2 反相增益可变放大电路	(70)
3.3 同相交流放大电路	(73)
3.4 同相增益可变放大电路	(80)
3.5 单电源交流放大电路	(81)
3.6 高输入阻抗交流放大电路	(90)
第四章 检波与检测电路	(96)
4.1 线性检波电路	(96)
4.2 绝对值放大电路	(101)
4.3 零交叉检测电路	(108)
第五章 滤波电路	(111)
5.1 低通滤波器 (LPF)	(113)

5.2	高通滤波器 (HPF)	(126)
5.3	带通滤波器 (BPF)	(132)
第六章	基准用稳压电路	(139)
6.1	稳压电路 (I)	(139)
6.2	稳压电路 (II)	(149)
6.3	稳压电路 (III)	(155)
第七章	基准用恒流源电路	(161)
7.1	恒流源电路 (I)	(161)
7.2	恒流源电路 (II)	(166)
7.3	恒流源电路 (III)	(172)
第八章	变换电路	(178)
8.1	电压—电流变换电路	(178)
8.2	电流—电压变换电路	(181)
8.3	电阻—电压变换电路	(182)
	〔附录一〕集成运算放大器的部颁标准和互换	
	〔附录二〕中国集成运算放大器的电路图及参数规范表	
	〔附录三〕中国集成运算放大器的典型特性曲线	
	〔附录四〕中国和其它国家同类产品型号对照表	
	〔附录五〕国外主要生产厂家的产品型号表	

第一章 集成运算放大器技术指标 和性能参数

虽然集成运算放大器的电路设计已日臻完善，可靠性也比较高，但是，由于每个人的设计思想及假定条件设置的不同，往往容易引起设计上的差错。因此，在介绍使用集成运算放大器设计电路之前，在第一章里首先向读者介绍集成运算放大器技术指标、性能参数以及使用集成运算放大器所必须具备的基本知识和必要的注意事项。

1.1 集成运算放大器特性

集成运算放大器有以下几个主要特性：

- (1) 直流特性；
- (2) 输入输出阻抗；
- (3) 输出电压；
- (4) 频率特性；
- (5) 过渡响应特性。

理想运算放大器的主要条件是：

- (1) 开环电压增益无限大；
- (2) 输入阻抗无限大；
- (3) 输出阻抗等于零；
- (4) 输入输出之间无相移误差；
- (5) 输入失调电压 V_{IO} 及输入失调电流 I_{IO} 等于零，其温度漂移也等于零；
- (6) 没有噪声；
- (7) 输入偏置电流 I_I 等于零；
- (8) 差动输入时的共模抑制比 $CMRR$ 无限大；
- (9) 输入输出的动态范围大；

(10) 输入输出端在突变或短路时应有保护；

(11) 低功耗时，可以在宽范围电源电压情况下工作。

实际上，绝对理想的东西是不存在的。但在具体应用时，在一定运算精度范围内，人为的相对理想化是可行的。这一点对简化问题的分析是很有意义的。

下面较详细地介绍集成运算放大器的技术指标和性能参数。

一、最大额定值

性能参数表上的数据是基本参数的最大额定值。为了保证集成运算放大器的使用寿命和可靠性，在运用时不能超过该集成运算放大器的最大额定值，即使瞬间超过也不允许。不同类型的集成运算放大器，其最大额定值也有所不同。

以下几项最大额定值，是在环境温度为 25°C 时所规定的额定值。

- 电源电压
- 允许损耗
- 输入电压
- 差动输入电压
- 工作温度范围
- 保存温度范围

本书所使用的集成运算放大器最大额定值如表 1-1 所示。多数集成运算放大器是以 $\pm 15\text{V}$ 为标准电源电压的，而 $\pm 18\text{V}$ 为电源电压的最大额定值。也有的以 $\pm 36\text{V}$ 为最大额定值电压。

$\mu\text{A}741\text{C}$ 型集成运算放大器的差动输入电压 V_{IN} 最大值为 30V 。但是，也有电源电压为 $\pm 6\text{V}$ 的集成运算放大器。所以，在运用其它类型的集成运算放大器时，一定要注意其差动电压的数值。

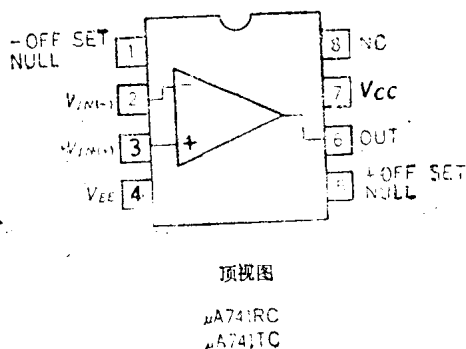
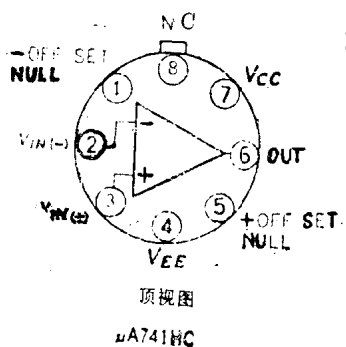
此外，集成运算放大器的工作温度，除了 MIL 规格规定外，一般以 75°C 为工作温度的最大值。超过 75°C 会使组件损坏。所以，在使用集成运算放大器时，必须十分注意工作温度的上升。

表 1-1 绝对最大额定值

项 目	符 号	$\mu A741C$	单 位
电源电压	V_{CC}	+18	V
	V_{EE}	-18	
允许损耗	P_t	500	mW
输入电压	V_{IN}	± 15	V
差动输入电压	$V_{IN} (diff)$	± 30	V
工作温度	T_{OPR}	$-65 \sim +150$	$^{\circ}C$
保存温度	T_{stg}	$0 \sim 70$	$^{\circ}C$

特点

- 内部相位补偿
- 输出短路保护
- 能调整补偿电压
- 电压增益大……106dB (标准)
- 输出振幅大…… $\pm 13V$ (标准) ($R_L \leq 2k\Omega$)
- 不锁定
- 功耗低



二、技术指标

技术指标是表示每一种集成电路性能好坏的重要依据，是在特定条件下测量所得的下限值。进行集成运算放大器电路设计时，要经常用到性能参数表。所以，集成运算放大器的技术指标及性能参数表对电路设计是非常重要的。

表 1-2 所示为 $\mu A741C$ 型集成运算放大器性能参数表。

这些性能参数，除了特殊项目外，都是在集成运算放大器的电源电压 V_{CC} 、 V_{EE} 分别为 $+15V$ 、 $-15V$ 条件下测得的。

在设计电路时，最好先理解参数表中每项的含意及性质，然后再运用。

表 1-2 技术指标和性能参数表
技术性能 I* ($V_{CC} = -V_{EE} = 15V$, $T_a = 25^\circ C$)

项 目	符 号	测定条件	最小 (min)	标准 (typ)	最 大 (max)	单 位
输入失调电压	V_{IO}	$R_S \leq 10k\Omega$	—	2.0	6.0	mV
输入失调电流	I_{IO}		—	20	200	nA
输入偏置电流	I_I		—	80	500	nA
输入电阻	R_{IN}		0.3	2.0	—	M Ω
输入电容	C_{IN}		—	1.4	—	pF
输入失调电压 调整范围	$(\Delta V_{IO}(adj))$		—	± 1.5	—	mV
同相输入电压 范围	V_{CM}	$R_S \leq 10k\Omega$	± 12	± 13	—	V
共模抑制比	$CMRR$	$R_S \leq 10k\Omega$	70	90	—	dB
电源稳定度	$\Delta V_{IO}/\Delta V_{CC}$	$R_S \leq 10k\Omega$	—	30	150	$\mu V/V$
	$\Delta V_{IO}/\Delta V_{EE}$	$R_S \leq 10k\Omega$	—	30	150	$\mu V/V$

(续上表)

项 目	符 号	测定条件	最小 (min)	标准 (typ)	最大 (max)	单位
电压增益	A_{VD}	$R_L \leq 2\text{ k}\Omega$ $V_{out} = \pm 10\text{ V}$	20000	200000	—	
最大输出电压 振幅	V_{OP-P}	$R_L \leq 10\text{ k}\Omega$	± 12	± 14	—	V
		$R_L \leq 2\text{ k}\Omega$	± 10	± 13	—	V
输出电阻	R_{OUT}		—	75	—	Ω
输出短路电流	I_{CS}		—	25	—	mA
电源电流	$I_{CC} = -I_{EE}$		—	1.7	2.8	mA
静态功率	P_T	无负载时	—	50	85	mW
上升时间	t_r	$V_{IN} = 20\text{ mV}$ $R_L = 2\text{ k}\Omega$	—	0.3	—	μs
过冲电压	V_{over}	$C_L = 100\text{ PF}$	—	5.0	—	%
转换速度	S_R	$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	—	0.5	—	V/ μs

技术性能2* ($V_{CC} = -V_{EE} = 15\text{ V}$, $T_a = -20 \sim +75^\circ\text{C}$)

项 目	符 号	测定条件	最 小 (min)	标 准 (typ)	最 大 (max)	单位
输入失调电压	V_{IO}	$R_L \leq 10\text{ k}\Omega$	—	—	7.5	mV
输入失调电流	I_{IO}		—	—	300	nA
输入偏置电流	I_I		—	—	800	nA
电压增益	A_{VD}	$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$, $V_{out} = \pm 10\text{ V}$	15000	—	—	
最大输出电压 振幅	V_{OP-P}	$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	± 10	± 13	—	V

下面, 仅对具有代表性的项目进行说明。

(1) 输入失调电压 V_{IO} 、输入失调电流 I_{IO}

输入失调电压 V_{IO} 和输入失调电流 I_{IO} 是标志集成运算放大器性能的重要参数。

理想的集成运算放大器, 当输入为零时, 输出也是零。但实际上是做不到的, 通常在输入电压为零时, 存在一定的输出电压。为了使输出电压为零, 在反相输入端和同相输入端需外加一个补偿电压 $|V_{IN(-)} - V_{IN(+)}|$, 这个补偿电压便称为集成运算放大器的输入失调电压。输入失调电流是指输入信号为零时, 集成运算放大器两个输入端静态基极电流之差 $|I_{IN(-)} - I_{IN(+)}|$, 用 I_{IO} 表示。

在理想的情况下, 希望 V_{IO} 、 I_{IO} 均等于零。但是, 实际情况不等于零, 而且均是温度的函数。我们把输入失调电压 V_{IO} 随温度和电源电压的变化称为漂移, 用 $\Delta I_{IO}/\Delta V_{CC}$ 、 $\Delta I_{IO}/\Delta V_{EE}$ (电源稳定度)形式表示在性能参数表中。

输入失调电压 V_{IO} , 在信号源内阻 R_s 为 $10k\Omega$ 或 $10k\Omega$ 以下时, 其标准值为 $2mV$, 最大值为 $6mV$ 。如果信号源内阻大于 $10k\Omega$ 以上, 其输入失调电压 V_{IO} 比上面的数据要大。

(2) 输入偏置电流 I_I

输入偏置电流是指输入信号为零时, 两个输入端静态基极电流的平均值, 在理想情况下应该等于零。但是, 由于是双端输入集成运算放大器, 所以输入偏置电流不可能等于零, 一般会产生毫微安级的输入偏置电流。若用场效应晶体管输入型的集成运算放大器, 其输入偏置电流可达到微微安级。但是, 其输入失调电压 V_{IO} 也要变大。

(3) 电源稳定度 $\Delta V_{IO}/\Delta V_{CC}$ 、 $\Delta V_{IO}/\Delta V_{EE}$

信号源内阻 R_s 在 $10k\Omega$ 或 $10k\Omega$ 以下时, 其电源电压向正或负变化时, 输入失调电压 V_{IO} 的变化, 用 $[\mu V/V]$ 表示。

(4) 最大输出电压振幅 V_{OP-P}

输出电压 V_o 的最大振幅, 是指负载电阻 R_L 为 $2k\Omega$ 和 $10k\Omega$ 之

间时所测得的最大输出电压振幅。

在一般情况下，正输出电压振幅要比负输出电压振幅大。另外，负载电阻 R_L 值越小和频率越高，其输出电压 V_o 的振幅将越小。

(5) 电压增益 A_{VD}

电压增益是指未加负反馈时集成运算放大器本身的直流电压增益。单位用 dB (分贝) 或不注明。

(6) 共模抑制比 $CMRR$

共模抑制比是反映集成运算放大器抑制共模信号能力的参数，它定义为差模电压增益 A_d 与共模电压增益 A_c 之比，用 $CMRR$ 表示，其值从几千到上百万之间。也常用对数的形式表示。

当集成运算放大器增益一定时，共模增益越小，共模抑制比则越大，如果 $A_c = 0$ ， $CMRR$ 则为无穷大，这是理想的情况。共模抑制比越大，抑制共模信号的能力则越强。

(7) 静态功耗 P_T

输入信号为零且不加负载时，集成运算放大器本身消耗的正负电源的总功率，叫做集成运算放大器的静态功耗，用 P_T 表示。静态功耗的测量见图 1-1，其值可按下式计算：

$$P_T = V_{CC} \times I_{CC} + V_{EE} \times I_{EE} \quad (1.1)$$

(8) 转换速度 S_R

转换速度是表征集成运算放大器在大信号状态下工作时瞬态特性的一项参数。

若在集成运算放大器输入端加一方波信号，由于各种分布电容的影响和组成运放各级放大器的输出电流是有限的，输出信号要产生一定的失真。

我们称集成运算放大器在大信

号工作状态下，输出电压对时间变化率的最大值为运放的转换速

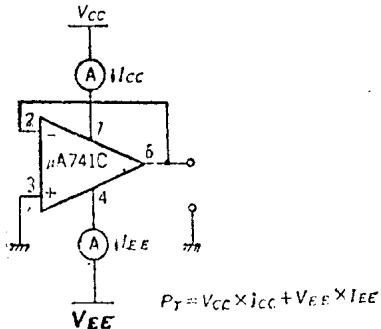


图 1-1 静态功耗的测量

度（或压摆率），用 S_R 表示。单位定伏/微秒（V/ μ s）。

对于 $\mu A741C$ 型集成运算放大器，其负载电阻设为 $2k\Omega$ 时，可用图 1-2 所示电路测量转换速度 S_R 。若集成运算放大器外部有相位补偿端，则外部相位补偿端用的电容量要大。

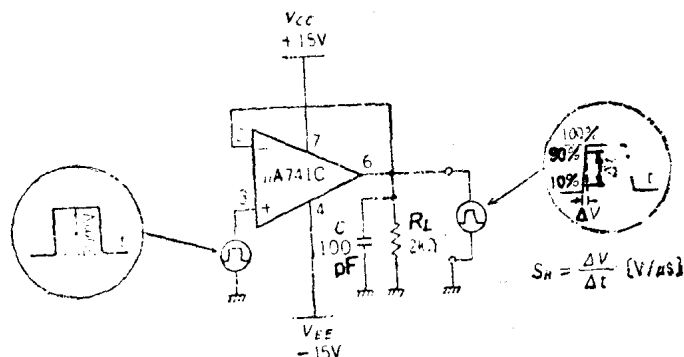


图 1-2 转换速度的测试

根据转换速度的定义，

$$S_R = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \pi f \cdot V_{OP-P}$$

则 $V_{OP-P} = S_R / \pi f$ 。

可见当转换速度一定时，集成运算放大器的最大输出电压幅度与使用频率成反比。低频时，其最大输出电压幅度由于受到输出范围的限制，是一个固定值；当频率较高并继续升高时，由于转换速度的限制，最大不失真输出幅度将随频率反比例下降，使频率特性变坏。

(9) 过冲电压 V_{over}

过冲电压 V_{over} 表示集成运算放大器工作在小信号时的响应特性和稳定性。当 $\mu A741C$ 型集成运算放大器的负载电阻为 $2k\Omega$ 、并联电容为 $100pF$ 和输入电压为 $20mV$ 时，可用图 1-3 所示的电路测试过冲电压 V_{over} 。图 1-3 是表示电压增益为 1 时小信号脉冲的响应时间和过冲电压 V_{over} 。

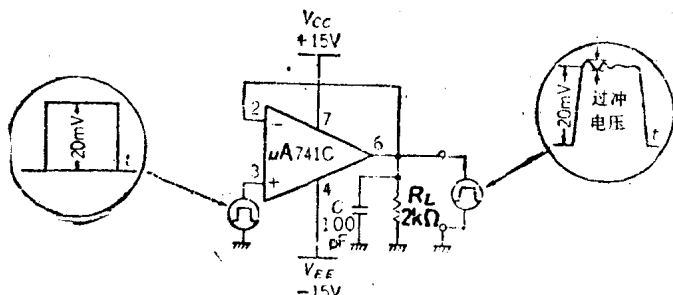


图 1-3 过冲电压的测试

(10) 输入电阻 R_{IN} 、输出电阻 R_{OUT}

理想的集成运算放大器输入电阻无限大，输出电阻等于零。但是，实际的集成运算放大器输入电阻一般为 $100k\Omega \sim 1M\Omega$ ，输出电阻为几十欧姆。若需要特别高的输入电阻时，可采用场效应晶体管作输入级的运算放大器，其输入电阻可达兆欧至千兆欧级。

1.2 运用集成运算放大器注意事项

设计集成运算放大器电路时，一定要按照集成运算放大器性能参数表中各项参数进行设计。首先决定最大额定值，并据以选用集成运算放大器，否则会损坏组件。即使一项参数超过了最大额定值，哪怕只是瞬间，都有可能损坏运算放大器。所以有必要提出运用集成运算放大器有关注意事项。现按顺序进行说明。

首先介绍与补偿有关的参数。

与补偿特性有关的参数有输入失调电压 V_{IO} 、输入失调电流 I_{IO} 以及输入偏置电流 I_I 等。

设计放大器时，这些参数可从集成运算放大器性能参数表中查到。由于放大器需外接电阻。因此它对输入失调电流影响较大。另外，若电路的电压增益大，对输入失调电压 V_{IO} 影响也大。图 1-4 所示的电路，如果反馈电阻 R_f 值大，必须选用输入失调电流 I_{IO} 小的集成运算放大器。