

文章编号: 2095-2163(2020)08-0067-04

中图分类号: TN431.1

文献标志码: A

# 精密集成运算放大器综述

孙婧雯<sup>1</sup>, 马奎<sup>1,2</sup>, 杨发顺<sup>1,2</sup>

(1 贵州大学 大数据与信息工程学院, 贵阳 550025; 2 贵州省微纳电子与软件技术重点实验室, 贵阳 550025)

**摘要:** 集成电路是二十世纪人类最伟大的科技发明之一, 而其中运算放大器作为集成电路中品种、数量最多的一类成为了电子系统中必不可少的一部分, 随着市场对于运算放大器的精度需求日渐增长, 作为集成运放专业化标志的高精度集成运放应运而生, 从首代高精度低失调运算放大器  $\mu\text{A}725$  到今天较为先进的第四代 OPA4191, 分别从输入失调电压、输入失调电压漂移、共模抑制比、开环电压增益、电源抑制比、输入电压噪声和输入电流噪声等几个方面对放大器性能进行了优化。另外从工艺上可将放大器分为 BJT、CMOS、BiCMOS、SOI 和 GaAs 与 GaN, 每种工艺各具优势, 可按需选择。从目前来看, 国内高精度集成运算放大器相比国外同类产品性能差距较大, 且国产化芯片替代需求迫切。精密集成运放在将来发展中会在医疗、工业、仪器仪表乃至军事国防方面实现更广泛的应用。对于下一代精密运算放大器的设计展望, 主要聚焦于创造更优秀的噪声、失调、温度系数和更为合理的价格。

**关键词:** 集成电路; 高精度; 精密运算放大器; 低失调; 噪声

## Overview of precision integrated operational amplifier

SUN Jingwen<sup>1</sup>, MA Kui<sup>1,2</sup>, YANG Fashun<sup>1,2</sup>

(1 School of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2 Key Laboratory of Micro-Nano-Electronics of Guizhou Province, Guiyang 550025, China)

**[Abstract]** Integrated circuit is one of the greatest technological inventions of mankind in the twentieth century. Its appearance has greatly promoted the development of electronic information science and technology, and has accelerated human society into the information age. Among them, operational amplifiers, as the most diverse and numerous types of integrated circuits, have become an indispensable part of electronic systems. With the development of product demand, the market's demand for the accuracy of operational amplifiers is increasing. The high-precision integrated op amp, which is the professional mark of integrated op amps, comes into being. From the first generation of high-precision low-offset operational amplifier  $\mu\text{A}725$  in the early stage to the more advanced fourth-generation OPA4191 today, the input offset voltage, input offset voltage drift, common-mode rejection ratio, open-loop voltage gain, power supply rejection ratio, input voltage noise, and input current noise are optimized for amplifier performance. In addition, the amplifier can be divided into BJT, CMOS, BiCMOS, SOI, GaAs, and GaN by the process. Each process has its own advantages and can be selected according to needs. From the current point of view, the domestic high-precision integrated operational amplifier has a large performance gap compared with similar foreign products, and the domestic chip replacement demand is urgent. In the coming decades, high-precision op amps will play an increasingly important role in different fields such as industrial automation, medical equipment, measuring instruments, automotive electronics, and even military defense. Lower noise, smaller offset, smaller temperature coefficient and higher cost performance will be the focus of next-generation precision amplifier design.

**[Key words]** integrated circuits; high precision; precision operational amplifiers; low offset; noise

## 0 引言

集成电路一般来讲指半导体集成电路, 通常由硅(Si)或者化合物半导体, 如砷化镓(GaAs)等制成<sup>[1]</sup>。是一种用半导体晶体材料作为基片, 将有源器件、元件及互连线通过加工集成在基片的表面、内部或者基片上, 可以执行某种电子功能的微型化电路(微型化电路包括集成电路、厚膜电路、薄膜电路、混合微型电路等各种形式, 简称微电路)。

集成电路的出现创造了电子器件的新时代, 即可以将有源器件和某些元件集成在一起的创造性改变, 这导致了传统电子器件概念的质变。这件集成度更高且功耗更低的创新性的封装产品, 可以实现独立的功能也可以实现系统功能。

运算放大器是线性集成电路里种类最广泛、数量最多的器件。高度集成化、低成本以及高可靠性是集成运算放大器的特点。半导体技术日新月异的

**作者简介:** 孙婧雯(1996-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 功率器件、模拟集成电路设计; 马奎(1985-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 半导体集成技术、集成电路可靠性、功率器件和功率集成; 杨发顺(1976-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 半导体功率器件与功率集成技术研究、半导体集成电路设计。

**通讯作者:** 杨发顺 Email: fashun@126.com

**收稿日期:** 2020-06-10

发展使得集成运算放大器跃升为电子电路的核心并被广泛运用在电子行业中。

在当下,从仪器仪表、工业、医疗、通信、数据中心、汽车、消费、能源、安全到物联网等等各个领域,世界几乎在每个细分市场中经历着前所未有的变化,随着传感技术的发展,这些领域对精密度的要求愈发增强。更为关键的是越来越多的用户将目光投向了单电源、使用难易度、性能等方面的精密技术。正是这些性能,保证了客户的上市时间,同时解决了完整精密信号链的挑战,从而在最大程度保证了成功率。普通的运算放大器具有失调电压高、增益低、失调电流高等缺点,这使得普通的运算放大器不能应用在工业中,进行信号检测、采集和信号测量中对于微弱信号进行精确仿真和精确计算的需求。因此,高精度低失调的集成运算放大器应运而生。

## 1 精密集成运算放大器特性

精密集成运算放大器主要是指具有非常低的漂移和噪声以及高增益和高共模抑制比的集成运算放大器<sup>[2]</sup>。它们有时也被称为低漂移集成运算放大器或低噪声集成运算放大器。低漂移是指运放的输入失调电压和失调电流随时间、电源电压以及温度的改变发生较小的漂移<sup>[3]</sup>。当今市场上可选择的精密运算放大器众多,由于这些放大器应用到了单电源电压供电,其对于信号摆幅、电压输入和输出的限制减少,使得设计过程变得更加复杂。目前来看输入信号中的失调电压和噪声更加不容忽视。

集成运算放大器的运算精度指标主要取决于其直流或低频参数,即输入失调电压 VOS 及其温漂 aVOS、输入失调电流 IOS、开环电压增益 Avd、共模抑制比 KCMR、电源电压抑制比 KSVR、噪声电压 en 或噪声电流 in<sup>[4]</sup>。通常把  $VOS \leq 50 \sim 300 \mu\text{V}$  (可调整到  $VOS \leq 10 \mu\text{V}$ )、 $2VOS \leq (0.3 \sim 2) \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 、 $IOS \leq (10 \sim 15) \text{nA}$ 、 $Avd = (110 \sim 120) \text{dB}$ 、 $KCMR = (110 \sim 120) \text{dB}$ 、 $KSVR = (110 \sim 120) \text{dB}$  和在  $(0.1 \sim 10 \text{ Hz})$  内  $en_{p-p} \leq (0.5 \sim 2.0) \mu\text{V}_{p-p}$  ( $0.1 \sim 10 \text{ Hz}$  内) 的运放称为精密集成运算放大器。对于直流输入信号,要求 VOS 及其温漂足够小即可,而对于交流输入信号而言,在许多应用场合下,还必须考虑到运放的输入电压噪声和输入电流噪声的重要性。当今市场上的精密运算放大器开环增益已经大于 100 万,同时共模抑制比和电源抑制比也达到了同样数量级。ADI 公司推出的双电源运算放大器 OP-177 是目前市场上精度性能最高的运算放大器之一,其失调电压低于  $25 \mu\text{V}$ ,失调漂移低于  $0.1 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 。相比之下双极型

的单电源精密运算放大器在很多情况下还达不到同样的性能水平。这也是在低功耗和低电压应用时所做的必要权衡考量。另一方面,现代斩波稳定(即自稳零)运算放大器的失调和失调电压漂移与噪声无法区分,这些器件通常采用单电源供电,可以提供轨到轨的输入以及输出。

◆ Input Offset Voltage	<100 $\mu\text{m}$
◆ Input Offset Voltage Drift	<1 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
◆ Input Bias Current	<2 nA
◆ Input Offset Current	<2 nA
◆ DC Open Loop Gain	>1 000 000
◆ Unity Gain Bandwidth Product, $f_u$	500 kHz-5 MHz
◆ Anyway Check Open Loop Gain at Signal Frequency!	
◆ $1/f(0.1 \text{ Hz to } 10 \text{ Hz})$ Noise	<1 $\mu\text{V p-p}$
◆ Wideband Noise	<10 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
◆ CMR, PSR	>100 dB
◆ Tradeoffs:	
● Single supply operation	
● Low supply currents	

图1 精密运算放大器特性

Fig. 1 Precision operational amplifier characteristics

直流开环增益、失调电压、电源抑制(PSR)和共模抑制(CMR)这些参数并不是选择精密运算放大器时的全部考虑因素。运放的交流参数也同样不容忽视,即使在“低”频条件下也是如此。因为开环增益、PSR 和 CMR 都具有相对较低的转折频率,设计过程中的“低”频在实际应用上可能大于转折频率,因而造成的误差会超出只依靠直流参数计算预测出的值。

## 2 精密集成运算放大器的发展简史

将物理信号放大的器件被称为放大器,若放大器的增益极高,则被称作运算放大器(即运放)。根据应用场合的不同其增益一般分布在  $10 \sim 1\,000\,000$  ( $20 \text{ dB} \sim 120 \text{ dB}$ ) 之间。尽管时至今日运放的作用不仅限于数学计算,但是它仍然保留了运算放大器的名字。

最早的运算放大器可以追溯到 20 世纪 30 年代,由真空管制成,其功能非常有限,只能执行简单的加法和减法。1960 年代中期 Widlar 在 Fairchild 公司创造出了集成电路产业中首款 BJT 工艺商用运放  $\mu\text{A}709$ ,之后推出的升级款产品  $\mu\text{A}741$  获得了市场更大的认可,乃至这款产品在相关电路设计的参考教科书依然被当成经典案例。随着 CMOS 工艺出现,以其尺寸小,集成度高,工艺简单等优点蓬勃发展,在数字集成电路中发挥地更加明显。因此,各大公司也相继推出了 CMOS 工艺的放大器<sup>[5]</sup>。如今已发展到第四代斩波稳零式运算放大器产品。虽然在具体使用上各代产品没有很大的差别,但它们的

工作原理却不同。如今零漂移放大器作为校正失调电压和漂移的有效方式被广泛应用, 斩波器作为一种常见的零漂移放大器, 使用内部动态校准的方式最大限度的降低失调电压。

第一代运算放大器产品都是由 BJT 制造, 属于起步阶段, 其性能非常简单, 其中典型产品是 Fairchild 公司的  $\mu A709$ , 它的外部电路相比晶体管放大电路简单许多, 同时体积、重量也小很多, 这也是它的技术特点。

第二代集成运算放大器的重要标志是有源负载代替集电极电阻, 从而极大地提高开环增益。第二代运放避免使用过多的 PNP 管, PNP 管仅用于输入级的共射-共基差分放大电路的共基极差分放大电路部分, 在电路结构上采用输入级、中间放大级、输出级三级放大模式, 且输出级使用准互补发射极跟随电路的形式, 电路结构、工艺以及各项指标均得到改善但内部等效电路相对较复杂。典型产品有仙童公司的  $\mu A741$  和 LM324 等等。1967 年美国国家半导体公司推出了 LM301 以及相应的军用型号 LM101 且目前仍然在使用。

为了省去频率补偿设计的麻烦以实现简化电路设计的目的, 仙童公司于 1968 年推出了  $\mu A741$ , 内部增加频率补偿电容, 目的是克服运放单位负反馈下进入不稳定的自激振荡状态的问题。 $\mu A741$  典型参数为开环增益最小 20 000 倍, 输入失调电压典型值为 6 mV, 输入失调电流典型值 200 nA, 输入偏置电流最大值 500 nA, 输入电阻典型值 0.3 M $\Omega$ , 单位增益带宽低于 0.5 MHz, 压摆率 0.5 V/ $\mu s$ 。出色的性能使得  $\mu A741$  成为了有史以来最成功的运算放大器, 属于极少数最长寿命集成电路型号之一, 如今仍然在生产使用。

第三代集成运算放大器的输入级使用电流放大系数特别大的超  $\beta$  管, 可以提高电流和电压放大倍数的同时, 将输入偏置电流有效减小, 在精密度方面, 也重点提升了失调等等性能, 这一代典型产品有 ADI 公司的 AD508、AD517 等等, 其输入偏置电流分别低于 5 nA、1 nA。第三代产品使用铬-硅电阻和激光微调技术, 在版图设计过程中在输入级采用了热对称设计, 使失调电压低于 25  $\mu V$ , 失调电压温漂低于 0.5  $\mu V/^{\circ}C$ 。在产品设计中加入了内补偿和输入保护电路设计。

第四代集成运算放大器采用了目前相对先进的结构, 如斩波稳零技术, 它使得各个指标更加接近理想值水平, 并且其制造工艺达到大规模集成电路的水平。模拟电路的发展水平也随着更新迭代的工艺

得到了进一步的提高, 如 CMOS、BiCMOS、和 GaAs 等等。典型产品 HA2900 采用了调制和解调的结构: 斩波自动校零, 在输入级使用场效应晶体管, 输入电阻高达 100 M $\Omega$  以上, 其失调电压低于 20  $\mu V$ , 温漂小于 0.3  $\mu V/^{\circ}C$ , 其相关的每个指标都更接近了理想值, 一般来讲不需要调零就可以使用。

### 3 精密集成运算放大器工艺

工艺不仅推动着运放的发展, 也推动着整个半导体工业的发展。在早期, 运放的设计人员试图通过各种努力将运算放大器的各项指标接近理想值, 研发出相对理想的放大器, 即极高的增益, 极高的输入电阻, 极高的带宽以及极低的输出电阻等等。但研究人员在研发过程中逐渐认识到参数之间的相互制约, 使得理想运放不能实现。在保证整体的性能维持在一定范围内的前提下, 各类运放据其应用场合各不相同, 可能需要降低其它性能来满足器件的需要。因此, 各种专用放大器就应运而生。伴随着新工艺不断涌现, 可以根据运算放大器的制作工艺的不同, 将其分为 BJT (Bipolar Junction Transistor)、CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 和 BiCMOS (Bipolar Junction Transistor and Complementary Metal Oxide Semiconductor Transistor) 运算放大器。各种工艺的优缺点如下:

(1) BJT: 高速度, 但是集成度较低, 功耗较大, 成本较高。

(2) CMOS: 体积小, 集成度高, 成本和功耗较低, 易于按比例缩小。

(3) BiCMOS: 结合 BJT 和 CMOS 的优点, 可以在同一衬底上集成两种器件, 灵活度更高。

(4) SOI: 寄生效应极小, 抗干扰和抗辐射能力很强, 高速度和低功耗, 主要用于航空航天和射频领域<sup>[5]</sup>。

(5) GaAs 与 GaN: 高速, 高功率, 成本较高, 主要用于功率电子和光通信领域<sup>[5]</sup>。

虽然 CMOS 和 JFET 的最新设计已经取得了长足的进步。其中 JFET 一个较好的例子是——OPA140。它在扩展的工业温度范围内提供 120  $\mu V$  的最大失调电压和仅 1  $\mu V/^{\circ}C$  的失调漂移。从发展史角度来看, 双极型输入设备一直保持着领先的地位, 甚至目前依然有人认为它们是最好的(在许多方面)。双极型工艺在匹配性和噪声性能上有着 CMOS 工艺无法睥睨的优点, 而且双极型工艺的跨导相较 CMOS 也更大, 所以在高精度、高增益的运算放大器设计过程中应用情况更多。但是双极型工艺在集成度方面相比 CMOS 工艺较低, 成本也相对较高, 按照等比例缩小

的 CMOS 工艺在提高集成度的同时也可以减小电路功耗,由于其特征尺寸减小,造成的寄生效应和量子效应对电路性能的影响也更加严重。相对先进的 BiCMOS 工艺是综合 BJT 工艺和 CMOS 工艺的优点,虽然成本有所上升,但也同时在电路设计方面提高了灵活度和综合性能。如今工艺技术的不断突破给运算放大器的设计提供了新的前景,例如 SOI (Silicon On Insulator) 技术提供的更小的寄生参数使其在高精度运算放大器的设计方面有更大的优势。

#### 4 国内外研究现状分析

截止 2019 年,ADI 公司推出了 ADA4625,这款产品是基于单电源、轨到轨输出(RRO)精密结型场效应晶体管(JFET)输入运算放大器,将该产品类型的速度和低噪声性能提高到前所未有的水平。与此同时,TI 公司也已经推出 OP207,作为 OP-07、OP-77 以及 OP-177 的升级换代设计。即将推出的 OPA202 可完全取代 OP-07 和 OP-27。对比之下,TI 公司的高精度运放更多采用 JFET 加 CrSi 技术来做差分放大器,产品参数比 ADI 公司还有一定差距。

目前国内出现的产品有 FC72、FC74、F725、F032、F033、F034、F314 等等。其中 FC72 的各项技术指标为:输入失调电压为 1 mV,失调电流为 10.0 nA,输入偏置电流为 30 nA,差模开环增益为 120 dB,共模抑制比为 120 dB,静态功耗为 120 mW<sup>[3]</sup>。F714 是我国高精度低失调设计领域较为优秀的产品,使用多种技术最小化失调电压和失调电流,增益也较高,输入失调电压为 10  $\mu$ V,失调电流为 2.0 nA,差模开环增益为 5 $\times$ 10<sup>5</sup> V/mV,已经接近国际水平。但是国内大部分产品使用 BJT 工艺,从而相比于其它工艺器件尺寸更大,较难满足商业电路的集成,同时很多精密运放产品无法批量型生产,依然停留在实验室阶段。所以按照国内外研究水平的横向比较,国内精密低失调运算放大器的发展水平还处于较低的阶段。

#### 5 未来发展趋势

高精度集成运放由于对于信号精准度要求极高,如果将此类运放整合到后端芯片形成 SoC,其它电路的噪声将严重干扰此类运放的正常运作。因此,就现阶段的技术来看,此类运放将是最不容易被整合的组件<sup>[6]</sup>。另外随着现今产品移动性需求增强,普遍采用电池供电,所以需要追求更低的功耗。传统高精度运算放大器需要负电源供电,故不能应用在很多器件的系统设计中,而且其本身的功耗和轨对轨输出特性显然与市场需求不符。目前市场需要的是在功耗、噪声、带宽、轨对轨输出特性均表现

优秀的高精度运算放大器。

随着各种新型传感器的推出,人们对电子设备性能要求越来越高,大量自动化设备投入使用,低失调、低噪声的高精密放大器将会在医疗电子、测量仪表、汽车电子、工业自动化设备等领域大显身手。高精密运算放大器的性能指标将与时俱进,向着更低电压电流噪声更低的失调电压、更低的失调电压温漂、更大带宽、更小功耗、更高电压方向不断创新,产品不断推陈出新,满足客户不断提高的设计需求。

在未来集成电路的几十年发展中,由于汽车、智能系统、生产线上的性能监视子系统的应用更加广泛,高精度运算放大器其低失调、低噪声的特性迎合了市场的这一需求。市场的潜力促进了精密运放的进一步发展的同时,也为芯片的生产厂商和模拟电路设计师提出了新的挑战。更低的噪声、更小的失调,更小的温度系数和更高的性价比,将成为下一代精密放大器设计的焦点,电路构架、制造工艺和封装技术的不断发展和微调技术的不断创新,将为下一代精密运放的发展提供可靠的支撑,高精度运放将在工业自动化、医疗器材、量测仪器、汽车电子、甚至军事国防等不同领域扮演日趋重要的角色<sup>[7]</sup>。

#### 6 结束语

随着工艺节点的发展,先进技术的涌现使得集成电路的价格不断走低,在仪器仪表、传感器、光电探测等高精度测量领域,面对经常需要处理  $\mu$ V、nA 等微弱信号,普通的运算放大器已经无法胜任,特殊的高精密、低失调运算放大器是越来越多的系统工程师处理微弱信号的必然选择。目前可以利用激光调整(即晶圆级调整)、e-TrimTM(即封装级调整)和斩波器来提高设计精度的关键参数。本文回顾了一些高精度集成运算放大器开创性的贡献、发明和发现,这对高精度集成运算放大器的发展至关重要。

#### 参考文献

- [1] 楼佳. 毫米波 CMOS 传输线设计及建模技术研究[D]. 杭州电子科技大学,2012.
- [2] 陈炳魁. 基于 SGM8922 精密运算放大器的应用[J]. 科技信息, 2009(20): 628-629.
- [3] 张雷. 一种低压高精度 CMOS 运算放大器设计[D]. 江苏大学, 2010.
- [4] 任永春. 基于双极型工艺的低噪声运算放大器的设计[D]. 电子科技大学,2015.
- [5] 范国亮. 一种高精度低噪声运算放大器的设计[D]. 电子科技大学,2016.
- [6] 何红松. CMOS 高性能运算放大器研究与设计[D]. 复旦大学, 2009.
- [7] 张涛,陈连康. 精密放大器和低噪声失调电路技术[J]. 现代电子技术,2008(9): 153-155.