

内 容 简 介

本书是全面论述运算放大器和运算电路的专著，全书可分两大部分，共十四章。前五章为第一部分，介绍了运算放大器及其技术用语、特性、参数测量和设计；第二部分，主要内容有：理想和实际运算电路的分析、频域和时域中的静态和动态误差、输入和输出阻抗、失调、噪声和稳定性。

本书理论联系实际，介绍了较多的实际应用知识，对运算放大器参数和运算电路特性的测量也给予了足够的重视。

本书可供从事设计、生产和应用运算放大器的工程技术人员和大专院校师生参考。

Operational Amplifiers

[捷] JIRI DOSTAL 著

Elsevier Scientific Publishing
Company 1981

运 算 放 大 器

[捷] 依日·多斯达尔 著

卢 淦 阎景春 译
孙 续 赵荣黎

蒋焕文 校

责任编辑 刘宝兰

—*

中国计量出版社出版

(北京和平里11区7号)

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

—*

开本 850×1168 1/32 印张 16

字数 428 千字 印数 1—8 000

1987年1月第一版 1987年1月第一次印刷

统一书号 15210·10

定价 3.80元

中译本序

目前，集成电路运算放大器已成为电子模拟计算技术、测量技术和自动控制等各个领域中所不可缺少的电子器件，是当前应用最为普遍的电子器件之一。电子模拟计算机作为一种现代的模拟计算工具，被广泛地用于空间技术、原子能、运输、化工、水电、机器制造和医学等国民经济各个部门，而运算放大器是电子模拟计算机中的基本部件。即使在各种数字电子设备中，运算放大器也是一种重要器件，用它来完成弱信号的放大、模数和数模变换等功能。

当前，数字电子计算机虽然已渗透到各个技术领域，并正在飞速发展。但是，以运算放大器为主体的模拟电路和数字电路仍将作为相辅相成的两种电路技术，得到同步发展。

JIRI COSTAL (捷) 所著《运算放大器》一书是一本富有特色的阐述模拟电路技术的专著。由于作者具有丰富的实际工作经验，所以本书能较好地理论联系实际，既有一定的理论基础，又有实际应用的宽广知识。

本书具有两个突出的特点：对运算电路的分析具有一定的深度，其中第八章频域静态及动态误差，第九章时域动态误差，第十一章失调以及第十三章稳定性，都作了深入的分析 and 精辟的论述；第二，测量技术贯穿全书，结合理论分析，对运算放大器基本参数和运算电路特性的测量都提供了测试电路和方法，简明而实用。总之，本书是一本内容丰富、新颖而全面的有关运算放大器和运算电路的专著，对从事运算放大器设计、生产和应用的工程技术人员，以及大专院校师生，都是一本有价值的参考书，他们都能从这本书中找到自己所需的理论和实践知识。

参加本书翻译的有：卢淦、阎景春、孙续、蒋焕文和赵荣黎

同志。全书由蒋焕文校订，潘行谦同志在抄写和译文润色上作了很多工作。

本书是由捷克文翻译成英文的，我们从英文版译成中文，所以在翻译中遇到一些困难，尽管我们做了一定努力，但限于水平，谬误之处难免，诚恳地希望读者批评指正。

蒋 焕 文

1985年于北方交通大学

序 言

本书向读者介绍迄今所能制造的功能最多的放大器——运算放大器。本书希望不忽视与运算放大器在工业或实验室方面的应用有关的任何实际问题，并向读者提供解决这些问题的答案。在有利于理解物理概念的基础上，本书也不忽视数学推导，并附有关于数学推导的说明和实用介绍。这样做，将使本书适用于范围广大的读者。

本书介绍的题目是按实用标准进行选择的。全书包括两部分、共分十四章。前五章以适合从事本专业读者的水平，介绍了运算放大器及其技术术语、特性、测试和设计。在第二部分中，主要内容是把实际运算电路与理想运算电路相对比，每章集中讲述实际运算电路的一个特性，而把其他特性理想化；讲述了频域和时域中的静态和动态误差，输入输出阻抗，失调、噪声和稳定性。在最后一章中，复习了一些有用的实验室实践知识。

目 录

第一部分 运算放大器

第一章 基本概念	(3)
1.1 运算放大器	(3)
1.2 运算电路	(5)
1.3 理想运算放大器和理想运算电路	(7)
小 结	(8)
第二章 运算放大器的参数	(9)
2.1 线性参数和线性模型	(9)
2.1.1 输入误差源	(11)
2.1.2 输入失调和漂移	(12)
2.1.3 输入噪声	(16)
2.1.4 开环增益、差模输入电阻和输出电阻	(18)
2.1.5 共模抑制比、共模输入阻抗	(23)
2.2 非线性参数	(26)
2.3 稳定时间和过载恢复时间	(28)
小 结	(30)
第三章 运算放大器的特性	(31)
3.1 双极型输入级	(31)
3.1.1 输入失调电压	(34)
3.1.2 输入失调电压的温度漂移	(36)
3.1.3 其它增益级的影响	(41)
3.1.4 输入偏置和失调电流	(42)
3.1.5 输入噪声	(43)
3.1.6 差分输入电阻	(50)
3.1.7 共模抑制比、共模输入电阻	(50)

3.2 场效应管输入级	(53)
3.2.1 输入失调电压	(60)
3.2.2 输入失调电压的温度漂移	(61)
3.2.3 二次效应	(65)
3.2.4 共模抑制比	(66)
3.2.5 输入偏流	(68)
3.2.6 输入噪声	(69)
3.3 输入级设计举例	(71)
3.3.1 有源集电极负载	(71)
3.3.2 组合差分级	(73)
3.3.3 自举差分级	(74)
3.3.4 输入失调电压外调零	(77)
3.3.5 内部输入偏流的抵消	(77)
3.3.6 输入过压保护	(78)
3.4 输出级	(80)
3.4.1 基本电路	(80)
3.4.2 改进电路	(82)
3.4.3 短路保护	(83)
3.5 频率补偿	(86)
3.5.1 两级运算放大器的动态特性	(87)
3.5.2 设计举例	(91)
小 结	(94)
第四章 运算放大器的类型	(97)
4.1 运算放大器的分类	(97)
4.1.1 按制造工艺分类	(97)
4.1.2 按电路设计分类	(99)
4.1.3 按信号输入方式分类	(100)
4.1.4 按程控性分类	(100)
4.1.5 按输出功率分类	(101)
4.1.6 按预期应用分类	(101)
4.2 设计举例	(107)
4.2.1 通用双极型运算放大器	(107)

4.2.2	通用场效应管输入运算放大器	(109)
4.2.3	仪表运算放大器	(109)
4.2.4	静电计运算放大器	(110)
4.2.5	仪表场效应管输入运算放大器	(112)
4.2.6	宽带运算放大器	(112)
4.2.7	快速稳定场效应管输入运算放大器	(113)
4.2.8	可控式微功率运算放大器	(115)
4.2.9	功率运算放大器	(116)
4.2.10	反相斩波稳定运算放大器	(116)
4.2.11	同相斩波放大器	(118)
4.2.12	变容管桥式运算放大器	(121)
小 结	(122)
第五章	运算放大器的测量	(123)
5.1	失调和噪声	(125)
5.1.1	输入失调电压 E_0	(126)
5.1.2	输入失调电压漂移	(126)
5.1.3	输入偏置电流 I_b^- 、 I_b^+ 和输入失调电流 I_{0a}	(128)
5.1.4	输入偏置和失调电流漂移	(130)
5.1.5	输入噪声电压 E_n	(130)
5.1.6	输入噪声电流 I_n^- 、 I_n^+	(134)
5.1.7	猝发噪声	(139)
5.2	开环增益、输入和输出阻抗	(139)
5.2.1	直流开环增益 A_0	(139)
5.2.2	单位增益频率 f_t	(141)
5.2.3	输出阻抗 R_0	(142)
5.2.4	有载直流开环增益 A_{0L}	(144)
5.2.5	差分输入阻抗 R_d	(145)
5.2.6	差分输入电容 C_d	(146)
5.3	共模抑制比、共模输入阻抗	(146)
5.3.1	直流共模抑制比 X_0	(146)
5.3.2	共模输入阻抗 R_{cm}^- 、 R_{cm}^+	(147)
5.3.3	共模输入电容 C_{cm}^+	(148)

5.4 运算放大器直流测试仪	(149)
5.5 静态非线性	(152)
5.5.1 额定输出电压 V_o 和额定输出电流 I_o	(152)
5.5.2 额定共模输入电压 V_{cm}	(154)
5.6 动态非线性	(155)
5.6.1 最大输出转换速率 S	(155)
5.6.2 最大满功率频率 f_p	(156)
5.7 工作参数	(157)
5.7.1 静态供电电流 I_s	(157)
5.7.2 输出短路电流 I_{sc}	(157)
5.7.3 失调调零	(158)
5.8 稳定时间	(158)
小 结	(158)

第二部分 运 算 电 路

第六章 理想运算电路	(163)
6.1 运算电路的类型	(163)
6.1.1 反馈类型	(163)
6.1.2 线性度	(165)
6.1.3 工作频率的范围	(166)
6.1.4 应用	(166)
6.2 并联运算电路	(167)
6.2.1 电流-电压变换器	(167)
6.2.2 电流放大器	(169)
6.2.3 电压反相器	(170)
6.2.4 求和放大器	(171)
6.2.5 通用反相器	(172)
6.2.6 电阻性 T 型网络	(173)
6.2.7 对数放大器	(174)
6.2.8 二极管限幅器	(175)
6.2.9 模拟开关	(176)
6.2.10 积分器	(176)

6.3 串联运算电路	(177)
6.3.1 电压放大器	(177)
6.3.2 电压跟随器	(178)
6.3.3 电压-电流变换器.....	(179)
6.4 组合运算电路	(179)
6.4.1 双输入端的信号激励	(180)
6.4.2 多重反馈、有源滤波器	(183)
6.4.3 正负混合反馈	(183)
6.4.4 多运放运算电路	(187)
6.4.5 非常规运算电路	(189)
小 结	(189)
第七章 实际运算电路的分析	(190)
7.1 反馈系数	(192)
7.1.1 反馈系数的定义	(193)
7.1.2 反馈系数的计算举例	(196)
7.2 运算方程	(200)
7.2.1 运算方程的标准形式	(200)
7.2.2 分析上的障碍	(203)
7.3 闭环增益	(205)
7.3.1 闭环增益的基本形式	(205)
7.3.2 闭环增益和反馈系数	(207)
7.3.3 闭环增益的频响	(208)
7.3.4 闭环增益计算举例	(210)
7.4 几种运算电路的动态特性.....	(216)
7.4.1 同相放大器	(216)
7.4.2 电压反相器	(219)
7.4.3 积分器	(220)
7.4.4 可控电流源	(224)
7.4.5 前馈传输的影响	(226)
小 结	(231)
第八章 频域静态及动态误差	(233)
8.1 矢量、振幅及相位误差.....	(234)

8.1.1	误差的定义	(234)
8.1.2	单极点滞后网络的动态误差	(237)
8.1.3	静态误差的影响	(239)
8.1.4	二阶滤波器	(240)
8.2	静态误差	(241)
8.2.1	由有限直流开环增益 A_0 引起的误差	(241)
8.2.2	由有限直流共模抑制比 X_0 引起的误差	(242)
8.2.3	由有限共模输入电阻 R_{om} 引起的误差	(243)
8.2.4	反馈网络引起的误差	(244)
8.2.5	静态误差补偿	(247)
8.3	动态误差	(248)
8.3.1	由有限环路增益 BA 引起的误差	(248)
8.3.2	由前馈传输引起的误差	(253)
8.3.3	由共模输入电容 C_{om} 引起的误差	(256)
8.3.4	动态误差的补偿	(256)
8.4	误差的测量	(262)
8.4.1	静态误差的测量	(262)
8.4.2	动态误差的测量	(262)
	小结	(264)
第九章 时域动态误差		(267)
9.1	运算电路的稳定时间	(267)
9.1.1	指数阶跃响应	(268)
9.1.2	最大转换速率 S 的影响	(270)
9.1.3	闭环增益 G_I 的影响	(273)
9.2	频率偶极子	(274)
9.2.1	长尾的定性解释	(275)
9.2.2	线性分析	(280)
9.2.3	频率偶极子的最佳位置	(284)
9.3	结点总电容	(287)
9.3.1	电压反相器的稳定建立	(288)
9.3.2	输入电容的补偿	(290)
9.4	速率误差	(293)

9.4.1	同相放大器的速率误差	293
9.4.2	积分器的速率误差	295
9.5	稳定时间的测量	296
小 结		303
第十章	输入和输出阻抗	305
10.1	运算电路的输入阻抗	305
10.1.1	布莱克曼 (Blackman) 阻抗关系	305
10.1.2	输入阻抗的电流型定义和电压型定义	308
10.1.3	输入阻抗计算举例	309
10.2	运算电路的输出阻抗	314
10.2.1	输出阻抗的电流型和电压型定义	314
10.2.2	输出阻抗计算举例	315
小 结		317
第十一章	失调	318
11.1	基本关系	318
11.1.1	运算电路的输入和输出误差	318
11.1.2	噪声增益	320
11.1.3	输出和输入误差的简化计算	321
11.1.4	运算电路的失调	324
11.2	简单运算电路的失调	325
11.2.1	电压反相器	325
11.2.2	运算电路的电阻平衡	329
11.2.3	闭环增益与失调之间的相互作用	332
11.2.4	加法放大器	335
11.2.5	I/V 转换器	336
11.2.6	电阻 T 型网络	338
11.2.7	电压跟随器	340
11.2.8	同相放大器	341
11.2.9	电流放大器	343
11.2.10	微分器	344
11.2.11	取样/保持放大器	346
11.2.12	积分器	347

11.2.13	差动放大器	(350)
11.2.14	仪表用放大器	(351)
11.2.15	对数放大器	(352)
11.3	反馈网络产生的失调	(355)
11.3.1	热电压	(355)
11.3.2	电压降	(359)
11.3.3	漏电流	(360)
11.4	运算电路失调调零	(363)
11.4.1	电压分量的失调调零	(365)
11.4.2	电流分量的失调调零	(366)
	小 结	(367)
第十二章	噪声	(369)
12.1	噪声滤波	(369)
12.1.1	噪声带宽	(370)
12.1.2	单极点RC低通滤波器	(372)
12.1.3	m 阶多节低通滤波器	(374)
12.1.4	m 阶巴特沃思 (Butterworth) 低通滤波器	(375)
12.1.5	简单带通滤波器	(375)
12.1.6	有色噪声滤波	(377)
12.2	运算电路的低频噪声	(379)
12.2.1	电压跟随器的噪声	(381)
12.2.2	共模输入电容 C_{in}^+ 的影响	(385)
12.2.3	测量噪声电流在理论上的限制	(386)
12.2.4	I/V 变换器的噪声	(387)
12.2.5	运算电路电容的影响	(391)
12.3	运算电路的宽带噪声	(393)
12.3.1	电压反相器的噪声	(393)
12.3.2	噪声的谐振增长	(394)
12.4	干扰噪声	(396)
	小 结	(399)
第十三章	稳定性	(401)
13.1	反馈稳定性	(401)

13.1.1	绝对稳定性, 尼奎斯特 (Nyquist) 稳定性准则	(402)
13.1.2	相对稳定性, 相位和增益裕量	(405)
13.1.3	相对稳定性的导出指标, 谐振峰和相对过冲	(408)
13.1.4	n 阶运算电路	(412)
13.1.5	二阶运算电路	(417)
13.1.6	输出容性负载	(424)
13.2	运算电路的频率补偿	(432)
13.2.1	微分器的补偿	(432)
13.2.2	电容负载的隔离	(436)
13.2.3	输入电容的补偿	(441)
13.2.4	具有放大器的运算电路	(444)
13.2.5	运算放大器的补偿	(445)
13.2.6	电源的旁路	(454)
13.2.7	运算电路的实际稳定性	(455)
	小 结	(456)
第十四章	良好的实验室实践技能	(459)
	小 结	(465)
总表		(466)
参考文献		(489)

第一部分 运算放大器

第一章 基本概念

1.1 运算放大器

运算放大器是一种多功能的通用放大器件，最初是用于进行线性数学运算的模拟计算机中。

二十几年来，其内部电路设计的进展，在很大程度上反映了电子器件从电子管到单片集成电路的发展。最近，由于运算放大器性能的不断改善，使它的应用着重于研究单位和工业领域。由于运算放大器性能良好，用途多，成本低，在模拟电子系统方面占有支配地位。

现在，我们把运算放大器定义为高增益、低噪声、能在闭环反馈环中稳定工作的直接耦合放大器。这些特性的确切含义我们将在第二章和第十三章里加以叙述。这里需要指出的是，直接耦合并不强调放大器的频响上限，而是强调其运用范围能达到零频，即达到无限长的周期。

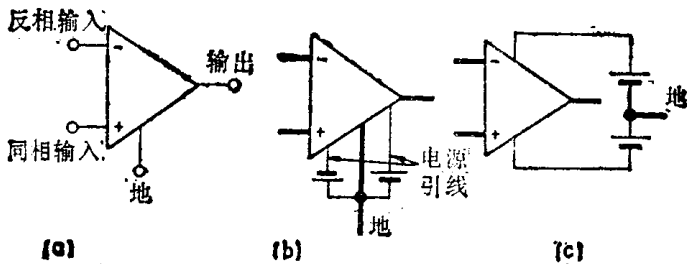


图 1.1 运算放大器的符号图 (a) 带有信号端
(b)(c) 带有实际连接的地端

在运算放大器中，信号从输入到输出的流通方向由三角形的符号图（图1.1a）表示。图中有四个信号端子，其中三个代表实

实际运算放大器的三个简化端子，它们是反相输入端、同相输入端和输出端；第四个信号端子是地，它可能是实际的（图1.1b），也可能是虚拟的电源公共端（图1.1c）。无论在何种情况下，地是用符号表示一组端子，而至少是两个供电端子。

除上面谈到的信号端子外，实际的运算放大器根据需要还可再装配频率补偿、零点补偿及电流调整等多个端子。

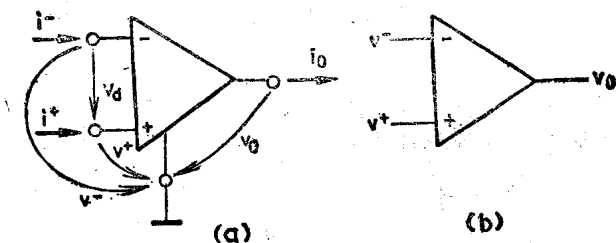


图 1.2 输入输出电压和电流的分配及惯用符号 (a)，省去地端的简化图 (b)

地信号端子对其他三个端子提供一个参考点。图1.2 (a) 中示出了惯用符号：输入电压 v^- 、 v^+ ，输出电压 v_0 ，输入电流 i^- 、 i^+ ，输出电流 i_0 。在不会造成概念混淆的情况下，放大器符号中的地端子通常可以省略，端电压可只用一个字母表示(图1.2b)。

信号电压 v^- 、 v^+ 、 v_0 的绝对值由供电电压 V^+ 和 V^- 所限制。除特殊情况外， V^+ 和 V^- 的标称值分别为 $+15\text{V}$ 和 -15V 。相应的两个输入电压和输出电压的信号摆动也是正负对称的，一般为 $\pm 10\text{V}$ 。输出电流应与负载相适应，负载可以是无源的，也可以是有源的，其允许工作点 v_0 、 i_0 ，可以在四个象限的任意一个中。

运算放大器对输入电压间的差值具有高度灵敏性，而对于输入电压的绝对值却不灵敏，这是运算放大器典型的传输特性，由这一特性可以引出两个概念：一是共模输入电压 v_{cm} ，它是输入