

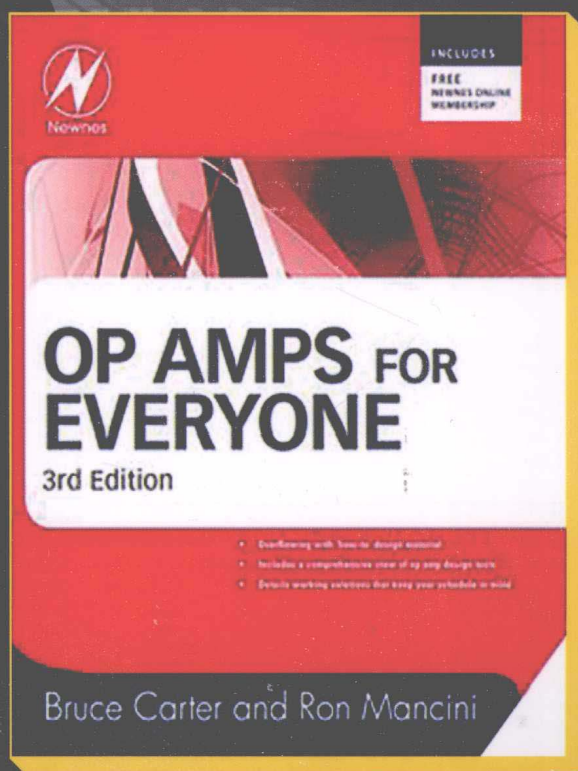
运算放大器权威指南

Op Amps For Everyone

(第3版)

Third Edition

[美] Bruce Carter 主编
Ron Mancini
姚剑清 译



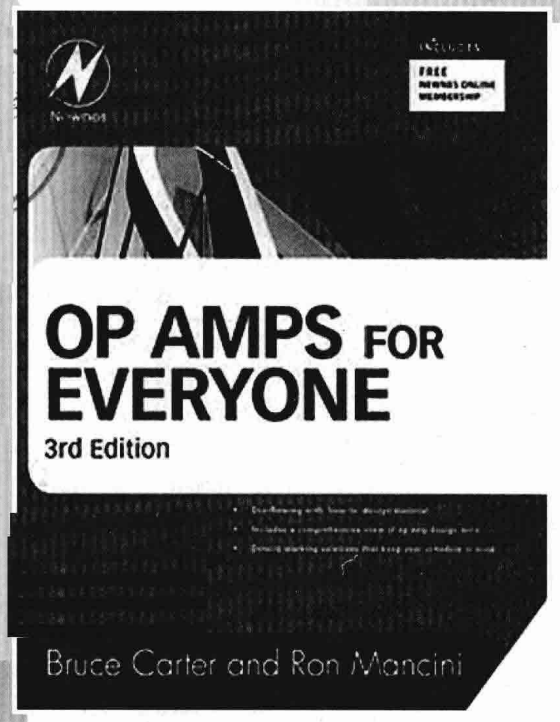
TURING

图灵电子与电气工程丛书

运算放大器权威指南

Op Amps For Everyone
Third Edition

(第3版)



人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (CIP) 数据

运算放大器权威指南: 第3版 / (美) 科特尔
(Carter, B.), (美) 曼西尼 (Mancini, R.) 主编; 姚剑
清译. —北京: 人民邮电出版社, 2010.10
(图灵电子与电气工程丛书)
书名原文: Op Amps for Everyone
ISBN 978-7-115-23423-0

I. ①运… II. ①科… ②曼… ③姚… III. ①运算放
大器—指南 IV. ①TN722.7-62

中国版本图书馆CIP数据核字 (2010) 第 134610 号

内 容 提 要

本书是全球领先的半导体企业TI公司的工程师多年经验结晶, 从运算放大器的历史入手, 重点介绍运算放大器近些年的研发成果、新出现的设计工具和技术, 旨在帮助设计者快速掌握好的设计方法, 为具体的工作选择最佳的放大器。

本书适合从事电路设计的工程技术人员, 也可供高校相关专业师生参考。

图灵电子与电气工程丛书

运算放大器权威指南 (第3版)

-
- ◆ 主编 [美] Bruce Carter Ron Mancini
译 姚剑清
责任编辑 朱巍
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京艺辉印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 28.5
字数: 673千字 2010年10月第1版
印数: 1-3000册 2010年10月北京第1次印刷
著作权合同登记号 图字: 01-2009-6905号

ISBN 978-7-115-23423-0

定价: 79.00元

读者服务热线: (010) 51095186 印装质量热线: (010) 67129223

反盗版热线: (010) 67171154

版 权 声 明

OP Amps for Everyone, 3E by Bruce Carter and Ron Mancini, ISBN: 978-1-85617-505-0.

Copyright © 2009 by Elsevier Inc. All rights reserved.

Authorized Simplified Chinese translation edition published by the Proprietor.

ISBN: 978-981-272-111-2.

Copyright © 2010 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd. All rights reserved.

Elsevier (Singapore) Pte Ltd.

3 Killiney Road

#08-01 Winsland House I

Singapore 239519

Tel: (65)6349-0200

Fax: (65)6733-1817

First Published 2010

2010年初版

Printed in China by POSTS & TELECOM PRESS under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由人民邮电出版社与 Elsevier (Singapore) Pte Ltd.合作出版。本版仅限在中华人民共和国（不包括香港特别行政区和台湾地区）出版及标价销售。未经许可之出口，视为违反著作权法，将受法律之制裁。

谨以此书献给 Erin Sanders，感谢她在电视剧中塑造了少年科学家 Quinn Pinsky 的形象，这一形象鼓励着年轻女士不放弃科学研究，勇攀科学高峰。

第 1 版序言

每一个对模拟电子技术感兴趣的人都应该在本书中找到一些有价值的内容，而且我们努力把书写得让新手也容易理解，同时又不使模拟电路工程师感到太平淡。我们已经尽力保证书中的每一章对具有适当背景的读者是自成系统的。这当然会引起一些重复，或许某些读者会感到乏味，但只要总体上能使各种背景的读者都满意，这种代价也是值得的。

第 1 章介绍了运算放大器（下文简称“运放”）的历史和演变。这一章不是每人必读的，它讲述了运放在模拟电子世界中的地位。建议初学者从第 1 章开始，一直读到第 11 章结束。在读完了第 11 章之后，读者应该具备了必要的基础知识，可以跳到此后任意一章。经验比较丰富的读者，比如电子技术员、数字电路工程师和非电子类的工程师，可以从第 3 章开始一直读到第 11 章结束。高级电子技术员、电子工程师和初学的模拟工程师可以从他们觉得合适的任意章节开始，一直读到第 13 章结束。有经验的模拟工程师可以直接阅读任何自己需要的部分。

本书第 1 版致谢

- 感谢编辑 James Karki 所做的贡献。
- 感谢市场部经理 Ted Thomas 对本书的大力支持和鼓励。
- 非常感谢 Alun Roberts 为本书付出的努力。
- 感谢应用部经理 Thomas Kugelstadt 的支持和帮助。
- 还要感谢许多参编本书的作者：James Karki、Richard Palmer、Thomas Kugelstadt、Perry Miller、Bruce Carter 和 Richard Cesari，他们为本书贡献了宝贵的时光。

Ron Mancini
第 1 版主编

第 3 版序言

在第 1 版出现之后的这些年里，人们在运放及相关的设计技术方面取得了许多进展。本书就是在原书的基础上增加了这些新的研发成果，并重点介绍了那些激动人心的新的设计工具和技术。

运放的速度已经有了极大的提高，而且已经进入到了 RF 设计领域。新一代运放已经有了全差分的结构，这不仅是对运放的一次回归，而且开启了在差分信号链接口中的新应用领域。现在的运放设计工具不仅包括了新一代的滤波器设计和仿真软件，而且还包括了增益与偏移电压的设计软件，因而使信号链的设计任务变得异常容易。今天的难题也许在于怎样为具体的工作选择最佳的放大器，而不再像以前那样为考虑信号电平之间的连接与移位而陷入传递方程和结构选择的困境之中。我们希望重视理论的工程师会觉得这是一本有用的设计参考书，但本书主要还是面向那些工作节奏很快的信号链工程师，他们需要为项目找到一个最小计算量的好方法。本书中包括了大量“如何做”的设计内容，可以使设计者很快找出非常好的设计方法，电路中的元件也都是容易找到的。

我想感谢 John Bishop 和 Thomas Kugelstadt 参与第 3 版的编写。我要特别感谢我的良师益友 Ron Mancini，他主编的内容依然是本书的一个非常重要的部分。离开了他的灵感，就不会有本书的第 1 版，又从何去谈第 2 版和第 3 版呢？

Bruce Carter
第 3 版主编

目 录

第 1 章 运放在电子技术中的位置	1	5.1 应用的延伸	43
1.1 问题的提出	1	5.2 零偏移的同相衰减器	43
1.2 解决的办法	1	5.3 正偏移的同相衰减器	44
1.3 运放的诞生	2	5.4 负偏移的同相衰减器	44
1.4 真空管时代	2	5.5 零偏移的反相衰减器	44
1.5 晶体管时代	3	5.6 正偏移的反相衰减器	45
1.6 IC 时代	3	5.7 负偏移的反相衰减器	45
参考文献	4	5.8 小结	45
第 2 章 电路理论回顾	5	第 6 章 反馈与稳定性理论	46
2.1 引言	5	6.1 为什么要研究反馈理论	46
2.2 物理定理	5	6.2 框图数学与操作	46
2.3 分压器规则	6	6.3 反馈方程与稳定性	50
2.4 分流器规则	7	6.4 反馈电路的伯德分析法	51
2.5 戴维宁定理	8	6.5 环路增益曲线是理解稳定性的关键	56
2.6 叠加定理	10	6.6 二次方程和振铃与过冲的预测	58
2.7 饱和晶体管电路的计算	11	参考文献	59
2.8 晶体管放大器	12	第 7 章 非理想运放方程的导出	60
第 3 章 理想运放方程的导出	14	7.1 引言	60
3.1 理想运放的假设	14	7.2 典范方程的回顾	61
3.2 同相运放	15	7.3 同相运放	63
3.3 反相运放	16	7.4 反相运放	64
3.4 加法器	17	7.5 差分运放	65
3.5 差分放大器	17	第 8 章 电压反馈运放的补偿	67
3.6 复杂反馈网络	19	8.1 引言	67
3.7 视频放大器	20	8.2 内部补偿	68
3.8 电容	21	8.3 外部补偿、稳定性与电路性能	72
3.9 为什么理想运放会摧毁已知宇宙	22	8.4 主极点补偿	73
3.10 小结	23	8.5 增益补偿	75
第 4 章 单电源运放设计技术	24	8.6 超前补偿	76
4.1 单电源与双电源	24	8.7 把补偿衰减器用于运放	79
4.2 电路分析	26	8.8 超前滞后补偿	81
4.3 联立方程组	30	8.9 各种补偿方法的比较	83
4.3.1 范例 1: $V_{\text{OUT}} = mV_{\text{IN}} + b$	31	8.10 小结	84
4.3.2 范例 2: $V_{\text{OUT}} = +mV_{\text{IN}} - b$	34	第 9 章 电流反馈运放的分析	85
4.3.3 范例 3: $V_{\text{OUT}} = -mV_{\text{IN}} + b$	36	9.1 引言	85
4.3.4 范例 4: $V_{\text{OUT}} = -mV_{\text{IN}} - b$	39	9.2 CFA 模型	85
4.4 小结	41	9.3 稳定性方程的导出	86
第 5 章 四个范例以外的电路	43	9.4 同相 CFA	87

9.5	反相 CFA	88	12.4	噪声的颜色	123
9.6	稳定性分析	89	12.4.1	白噪声	123
9.7	反馈电阻的选择	91	12.4.2	粉噪声	124
9.8	稳定性与输入电容	93	12.4.3	红棕噪声	124
9.9	稳定性与反馈电容	94	12.5	运放的噪声	125
9.10	C_F 与 C_G 的补偿	95	12.5.1	噪声的转角频率和总噪声	125
9.11	小结	96	12.5.2	转角频率	125
第 10 章	电压与电流反馈运放的比较	97	12.5.3	运放电路的噪声模型	126
10.1	引言	97	12.5.4	反相运放电路的噪声	127
10.2	精度	97	12.5.5	同相运放电路的噪声	128
10.3	带宽	98	12.5.6	差分运放电路的噪声模型	129
10.4	稳定性	101	12.5.7	小结	129
10.5	阻抗	102	12.6	把所有因素加在一起	129
10.6	方程的比较	103	参考文献	133	
第 11 章	全差分运放	105	第 13 章	运放参数	134
11.1	引言	105	13.1	引言	134
11.2	全差分是什么意思	105	13.2	输入失调电流的温度系数 αI_{IO}	136
11.3	单端运放的环路闭合	105	13.3	输入失调电压的温度系数 αV_{IO} 或 αv_{IO}	136
11.4	全差分放大级	106	13.4	差分增益误差 A_D	136
11.5	单端到差分的转换	107	13.5	增益裕度参数 A_m	136
11.6	输入信号的端接	108	13.6	开环电压增益参数 A_{OL}	137
11.7	一个新功能	109	13.7	大信号电压放大倍数条件 A_V	137
11.8	V_{OCM} 输入是什么意思	109	13.8	差分大信号电压放大参数 A_{VD}	137
11.9	测量	111	13.9	单位增益带宽参数 B_1	138
11.10	滤波器电路	111	13.10	最大输出摆幅带宽参数 B_{OM}	138
11.10.1	单极点滤波器	112	13.11	带宽参数 BW	138
11.10.2	双极点滤波器	113	13.12	输入电容参数 C_I	138
11.10.3	多路反馈滤波器	113	13.13	共模输入电容参数 C_{ic} 或 $C_{i(c)}$	139
11.10.4	双二阶滤波器	115	13.14	差分输入电容参数 C_{id}	139
第 12 章	运放的噪声理论与应用	116	13.15	负载电容条件 C_L	139
12.1	引言	116	13.16	电源电压灵敏度 $\Delta V_{DD\pm}$ (或 $CC\pm$) / ΔV_{IO} 或 k_{SVS}	139
12.2	特征化	116	13.17	共模抑制比参数 $CMRR$ 或 k_{CMR}	140
12.2.1	均方根与峰到峰噪声	116	13.18	频率条件 f	140
12.2.2	本底噪声	116	13.19	运放的增益带宽积参数 GBW	140
12.2.3	信号噪声比	117	13.20	电源电流 (关断) 参数 $I_{CC-(SHDN)}$ 或 $I_{DD-(SHDN)}$	141
12.2.4	多个噪声源	117	13.21	电源电流参数 I_{CC} 或 I_{DD}	141
12.2.5	噪声的单位	118	13.22	输入电流范围参数 I_I	141
12.3	噪声的类型	118	13.23	输入偏置电流参数 I_{IB}	141
12.3.1	散弹噪声	119	13.24	输入失调电流参数 I_{IO}	142
12.3.2	热噪声	120	13.25	输入噪声电流参数 I_n	142
12.3.3	闪变噪声	122			
12.3.4	突发噪声	122			
12.3.5	雪崩噪声	122			

13.26	输出电流参数 I_O	142
13.27	低电平输出电流条件 I_{OL}	142
13.28	短路输出电流参数 I_{OS} 或 I_{SC}	142
13.29	电源抑制比参数 k_{SVR}	143
13.30	功耗参数 P_D	143
13.31	电源抑制比参数 PSRR	143
13.32	结至周围环境的热阻参数 θ_{JA}	143
13.33	结至外壳的热阻参数 θ_{JC}	145
13.34	输入电阻参数 r_i	145
13.35	差分输入电阻参数 r_{id} 或 $r_{i(d)}$	146
13.36	负载电阻条件 R_L	146
13.37	调零电阻条件 R_{null}	146
13.38	输出电阻参数 r_o	146
13.39	信号源条件 R_S	146
13.40	开环跨阻参数 R_t	146
13.41	运放的摆速参数 SR	147
13.42	自由空气工作温度条件 T_A	147
13.43	关断时间(关断)参数 t_{DIS} 或 $t_{(off)}$	148
13.44	接通时间(关断)参数 t_{EN}	148
13.45	下降时间参数 t_f	148
13.46	总谐波失真参数 THD	149
13.47	总谐波失真与噪声参数 THD +N	149
13.48	最高结温参数 T_j	151
13.49	上升时间参数 t_r	151
13.50	稳定时间参数 t_s	151
13.51	存储温度参数 T_S 或 T_{stg}	152
13.52	电源电压条件 V_{CC} 或 V_{DD}	152
13.53	输入电压范围条件或参数 V_I	152
13.54	共模输入电压条件 V_{IC}	152
13.55	共模输入电压范围参数 V_{ICR}	152
13.56	差分输入电压参数 V_{ID}	153
13.57	差分输入电压范围参数 V_{DIR}	153
13.58	接通电压(关断)参数 $V_{IH-SHDN}$ 或 $V_{(ON)}$	153
13.59	关断电压(关断)参数 $V_{IL-SHDN}$ 或 $V_{(OFF)}$	153
13.60	输入电压条件 V_{IN}	153
13.61	输入失调电压参数 V_{IO} 或 V_{OS}	154
13.62	等效输入噪声电压参数 V_n	155
13.63	宽带噪声参数 $V_{N(PP)}$	155
13.64	高电平输出电压条件或参数 V_{OH}	155
13.65	低电平输出电压条件或参数 V_{OL} ..	156
13.66	最大峰到峰输出电压摆幅参数 $V_{OM\pm}$	156
13.67	峰到峰输出电压摆幅条件或参数 $V_{O(PP)}$	157
13.68	阶跃电压峰到峰条件 $V_{(STEP)PP}$	157
13.69	串扰参数 X_T	157
13.70	输出阻抗参数 Z_o	157
13.71	开环跨阻阻抗参数 Z_i	158
13.72	差分相位误差参数 ϕ_D	158
13.73	相位裕度参数 ϕ_m	158
13.74	0.1 dB 平坦度带宽	158
13.75	60s 壳温	159
13.76	连续总功耗参数	159
13.77	短路电流持续时间参数	159
13.78	输入失调电压长期漂移参数	159
13.79	10s 或 60s 引脚温度	159
第 14 章 测量: 传感器与模数转换器的 连接		160
14.1	引言	160
14.2	传感器类型	164
14.3	设计方法	167
14.4	系统指标的审阅	168
14.5	基准电压的特征化	169
14.6	传感器的特征化	169
14.7	ADC 的特征化	171
14.8	运放的选择	171
14.9	放大器电路的设计	172
14.10	测试	178
14.11	小结	178
参考文献		178
第 15 章 运放与模数转换器的连接		179
15.1	引言	179
15.2	系统信息	179
15.3	电源信息	180
15.4	输入信号的特性	180
15.5	模数转换器的特性	181
15.6	运算放大器的特性	182
15.7	结构的确定	183
第 16 章 无线通信: IF 采样信号的 调整		187
16.1	引言	187
16.2	无线系统	187

16.3	ADC 与 DAC 的选择	191	18.4.4	RF 应用中的误差预算	226
16.4	影响运放选择的因素	194	18.5	DAC 的误差与参数	227
16.5	抗混叠滤波器	195	18.5.1	DC 误差与参数	227
16.6	通信 DAC 的重构滤波器	196	18.5.2	AC 误差与参数	230
16.7	用于 ADC 和 DAC 的外部 V_{REF} 电路	198	18.6	DAC 电容的补偿	232
16.8	高速模拟输入驱动电路	201	18.7	增加运放缓冲放大器的电流和电压	233
	参考文献	204	18.7.1	电流提升器	234
第 17 章	运放用于 RF 设计	205	18.7.2	电压提升器	234
17.1	引言	205	18.7.3	功率提升器	236
17.2	优点	205	18.7.4	单电源操作与 DC 失调	236
17.3	缺点	205	第 19 章	正弦波振荡器	238
17.4	电压反馈还是电流反馈	206	19.1	什么是正弦波振荡器	238
17.5	传统 RF 放大器的回顾	206	19.2	振荡的条件	238
17.6	放大器增益的回顾	209	19.3	振荡器中的相移	239
17.7	散射参数	210	19.4	振荡器的增益	240
17.7.1	输入和输出 VSWR S_{11} 和 S_{22}	210	19.5	有源元件 (运放) 对振荡器的影响	241
17.7.2	反射损耗	211	19.6	振荡器工作 (电路) 的分析	243
17.7.3	正向传输 S_{21}	212	19.7	正弦波振荡器电路	244
17.7.4	反向传输 S_{12}	213	19.7.1	文氏电桥振荡器	244
17.8	相位线性度	214	19.7.2	相移振荡器 (单级放大器)	249
17.9	频率响应的峰值调节	214	19.7.3	相移振荡器 (带缓冲的)	250
17.10	-1 dB 压缩点	215	19.7.4	布巴振荡器	251
17.11	双音与三次交调相交点	216	19.7.5	正交振荡器	253
17.12	噪声指数	217	19.8	小结	254
17.13	小结	218		参考文献	254
第 18 章	DAC 与负载的连接	219	第 20 章	有源滤波器设计技术	256
18.1	引言	219	20.1	引言	256
18.2	负载特性	219	20.2	低通滤波器基础	257
18.2.1	DC 负载	219	20.2.1	巴特沃斯低通滤波器	260
18.2.2	AC 负载	219	20.2.2	切比雪夫低通滤波器	260
18.3	理解 DAC 与它的指标	219	20.2.3	贝塞尔低通滤波器	261
18.3.1	DAC 的类型及其结构特点	220	20.2.4	品质因子 Q	263
18.3.2	电阻阶梯 DAC	220	20.2.5	小结	264
18.3.3	权电阻 DAC	220	20.3	低通滤波器的设计	264
18.3.4	$R/2R$ DAC	221	20.3.1	一阶低通滤波器	264
18.3.5	Σ - Δ DAC	223	20.3.2	二阶低通滤波器	266
18.4	DAC 的误差预算	224	20.3.3	更高阶的低通滤波器	270
18.4.1	精度与分辨率	224	20.4	高通滤波器的设计	272
18.4.2	DC 应用的误差预算	224	20.4.1	一阶高通滤波器	273
18.4.3	AC 应用的误差预算	225	20.4.2	二阶高通滤波器	275

20.4.3	更高阶的高通滤波器	277	22.5.3	1 MHz 的结果	327
20.5	带通滤波器的设计	277	22.5.4	100 kHz 的结果	328
20.5.1	二阶带通滤波器	278	22.5.5	10 kHz 的结果	329
20.5.2	四阶带通滤波器 (参差 调谐)	281	22.6	小结	331
20.6	带阻滤波器的设计	285	第 23 章 电路板布图技术		332
20.6.1	有源双 T 滤波器	286	23.1	一般考虑	332
20.6.2	有源 Wien-Robinson 滤波器	287	23.1.1	PCB 是运放设计中的一个 元件	332
20.7	全通滤波器的设计	289	23.1.2	初样、初样、初样	332
20.7.1	一阶全通滤波器	290	23.1.3	噪声源	333
20.7.2	二阶全通滤波器	291	23.2	PCB 的机械构造	333
20.7.3	更高阶的全通滤波器	292	23.2.1	材料: 为应用选择正确的 材料	333
20.8	实际的设计提示	293	23.2.2	多少层最好	334
20.8.1	滤波器电路的偏置	293	23.2.3	印制板的层序: 铜箔层的 次序	336
20.8.2	电容的选择	296	23.3	接地	336
20.8.3	元件值	298	23.3.1	最重要的规则: 地线分离	336
20.8.4	运放的选择	298	23.3.2	其他接地规则	337
20.9	滤波器系数表	299	23.3.3	一个好的布图举例	339
参考文献		306	23.3.4	一个明显的例外	339
第 21 章 初学者实用滤波器的快速 设计		307	23.4	无源元件的频率特性	340
21.1	引言	307	23.4.1	电阻	340
21.2	选取响应曲线	307	23.4.2	电容	340
21.3	低通滤波器	309	23.4.3	电感	341
21.4	高通滤波器	310	23.4.4	未曾想到的 PCB 无源 元件	342
21.5	窄 (单频) 带通滤波器	310	23.5	去耦	347
21.6	宽带通滤波器	313	23.5.1	数字电路: 模拟电路的 一大问题	347
21.7	点阻 (单频抑制) 滤波器	313	23.5.2	选择正确的电容	348
21.8	带阻滤波器	315	23.5.3	IC 的去耦	349
21.9	滤波器特性小结	316	23.5.4	电路板的去耦	350
第 22 章 高速滤波器设计		317	23.6	输入端和输出端的隔离	350
22.1	引言	317	23.7	封装	350
22.2	高速低通滤波器	317	23.7.1	插孔的考虑	352
22.3	高速高通滤波器	317	23.7.2	表面贴装	353
22.4	高速带通滤波器	317	23.7.3	未用部分的连接	353
22.4.1	Deliyannis 结构的改进	318	23.8	小结	353
22.4.2	改进型 Deliyannis 与 MFB 的比较	320	23.8.1	一般的要点	354
22.4.3	实验室结果	322	23.8.2	电路板结构	354
22.5	高速点阻滤波器	324	23.8.3	元件	354
22.5.1	仿真	324	23.8.4	布线	354
22.5.2	实验室结果	327			

23.8.5 旁路	354	A.8 带有机械复位的反相积分器	392
参考文献	355	A.9 带有电子复位的反相积分器	393
第 24 章 低压运放电路的设计	356	A.10 带有电阻复位的反相积分器	394
24.1 引言	356	A.11 带有反相缓冲器的同相积分器	395
24.2 动态范围	357	A.12 同相积分器的近似电路	395
24.3 信噪比	359	A.13 双积分器	396
24.4 输入共模范围	360	A.14 差值积分器	396
24.5 输出电压摆幅	364	A.15 AC 积分器	397
24.6 断电和低电流吸取	365	A.16 增强型积分器	397
24.7 单电源电路设计	366	A.17 反相微分器	398
24.8 传感器与 ADC 之间的模拟接口	366	A.18 带有噪声滤波器的反相微分器	398
24.9 DAC 与执行器之间的模拟接口	368	A.19 增强型微分器	399
24.10 运放的比较	372	A.20 基本文氏电桥振荡器	399
24.11 小结	373	A.21 带有非线性反馈的文氏电桥振 荡器	400
第 25 章 常见的使用错误	375	A.22 带有 AGC 的文氏电桥振荡器	401
25.1 引言	375	A.23 正交振荡器	402
25.2 工作在单位(或规定)增益以下 的运放	375	A.24 经典相移振荡器	402
25.3 运放用做比较器	376	A.25 带缓冲的相移振荡器	403
25.3.1 比较器	378	A.26 布巴振荡器	404
25.3.2 运放	378	A.27 三角波振荡器	405
25.4 未用运放的不恰当端接	379	A.28 衰减器	405
25.5 DC 增益	380	A.29 仿真电感	407
25.6 电流源	381	A.30 双 T 单运放带通和点阻滤波器	408
25.7 电流反馈放大器: 反馈电阻的 短接	381	A.31 恒电流发生器	410
25.8 电流反馈放大器: 反馈环路中的 电容	382	A.32 反相电压基准源	411
25.9 全差分放大器: 不正确的单端 端接	383	A.33 功率提升器	411
25.10 全差分放大器: 不正确的 DC 工 作点	384	A.34 绝对值电路	412
25.11 全差分放大器: 不正确的共模 范围	385	A.35 峰值跟随器	413
25.12 头号设计错误	386	A.36 精密整流器	413
附录 A 单电源电路集	388	A.37 AC 至 DC 变换器	413
A.1 引言	388	A.38 全波整流器	414
A.2 测量放大器	388	A.39 音调控制	415
A.3 简化的测量放大器	389	A.40 曲线拟合滤波器	415
A.4 T 型网络用于反馈环路	390	参考文献	418
A.5 反相积分器	390	附录 B 差分放大器的端接	419
A.6 带有输入电流补偿的反相积分器	391	B.1 引言	419
A.7 带有漂移补偿的反相积分器	392	B.2 差分放大器的端接	420
		B.3 反相端的计算	422
		B.4 同相端的计算	422
		B.5 差分输出	424
		B.6 对结果进行测试	424
		索引	427

第 1 章 运放在电子技术中的位置

Ron Mancini

1.1 问题的提出

1934 年，哈瑞·布莱克 (Harry Black)^[1]总是从纽约市的家中出发，搭乘火车和轮渡，赶往新泽西的贝尔实验室上班。乘坐轮渡使哈瑞感到很放松，让他可以想一些概念方面的事情。那时，哈瑞需要解决一个难题：当电话线延伸很长距离后就需要放大器，而不可靠的放大器限制了电话的使用。首先，增益的初始容差很差，但这个问题只要调节一下就很快解决了。其次，即使放大器在工厂里调整好之后，它的增益在现场使用中仍然会有非常大的漂移，或者使音量太低，或者使语音失真。

他们已经试过了许多次，希望能做出一个稳定的放大器，但电话线路经受的温度变化和极端的电源电压，产生了无法控制的增益漂移。无源元件的漂移要比有源元件好很多，因此，放大器的增益若能取决于无源元件，这个问题就可以解决。有一次坐轮渡时，哈瑞富有创造力地想到了一个解决放大器问题的崭新办法，他在轮渡上还对这个想法做了论证。

1.2 解决的办法

解决方法的第一步是做出这样一个放大器，它的增益要大于实际使用时所需的增益。然后，把放大器输出信号中的一部分反馈到输入端，而反馈的方式应该使电路（这里的电路包括放大器和反馈元件）的增益取决于反馈电路，而不取决于放大器的增益。这样，电路的增益就取决于无源的反馈元件，而与有源的放大器无关。这种被叫做负反馈的操作，是所有现代运放的基本工作原理。哈瑞是在轮渡上论证了这第一个有意研发的反馈电路。我可以肯定地说，在那之前也曾经有人在不经意间做过反馈电路，但那些设计者都没有在意负反馈的作用！

1

我似乎听到了那个时代的管理者和放大器设计者的大声抱怨。我想象他们会这样说，“达到 30kHz 的增益带宽 (GBW) 已经够难的了，可是那个傻瓜却要我设计一个 3MHz GBW 的放大器。他最后得到的仍然只能是一个 30kHz GBW 的电路。”是的，时间已经证明哈瑞是对的，不过，有一个小问题哈瑞还没有详细讨论，即振荡的问题。设计成具有很大开环增益的电路，在环路闭合时有时会振荡。许多人对这个不稳定现象进行过研究，而且在 20 世纪 40 年代已经对这个现象有了相当好的了解，但对稳定性问题的求解则依然是一个漫长的、枯燥的和精细的计算过程。几年过去后，仍然没有人能使这个方法变得简单一些，或者变得容易理解一些。

1945 年，H. W. 伯德 (Bode) 提出了一个用图示法进行反馈系统稳定性分析的方法。在那以前，反馈分析都是用乘法和除法进行的，所以传递函数的计算是一项费时费力的任务。我们应该知道，工程师们只是到了 20 世纪 70 年代才开始用上电子计算器和计算机的。伯德提出的是一种对数技术，它把计算反馈系统稳定性的繁复的数学过程，变成了一个简单的和容易理解

的图示分析法。虽然这样做之后的反馈系统的设计仍很复杂，但已经不再是一种被少数电气工程师所占有而藏到小黑屋里的艺术了。任何一名电气工程师都可以使用伯德的方法找出反馈电路的稳定性，于是，把反馈用于机器的时代从此开始。至于对电子系统反馈设计的要求，那是在进入计算机和传感器时代以后的事情了。

1.3 运放的诞生

第一台实时计算机是模拟计算机！这种计算机依靠了事先编排好的程序和输入数据计算出控制行为。编程是用硬连（hardwired）的方法实现的，它把一连串的电连接起来，然后对数据进行数学计算。由于这种硬连方法的限制，最终导致了模拟计算机地位的日趋衰落。模拟计算机的核心是一种叫做运算放大器的设备，它可以通过改变连线而对输入信号进行许多数学运算，包括加、减、乘、除、积分和微分。它的名字后来被简称为大家所熟悉的运放，我们都知道而且喜欢这个名字。运放中使用了一个有很大开环增益的放大器，当环路闭合时，放大器就开始执行由外部无源元件所确定的数学运算。这种放大器的体积很大，因为是用真空管制作的，而且还需要高压电源。但由于它是模拟计算机的核心部件，所以为了完成工作，人们还是接受了它的大体积和大功率的要求。早期的运放是为模拟计算机而设计的，但人们很快发现，运放还可以有其他的用途，于是它就成为了物理实验室中的常用工具。

2

这个时候，通用模拟计算机已经进入到大学和大型公司的实验室，这些计算机对于完成研究工作是必不可少的。当时的实验室工作还同时提出了对传感器进行信号调整的要求，运放也就此进入到了信号调整的应用领域。随着信号调整应用领域的扩展，对运放的需求开始超过了模拟计算机的需求。后来模拟计算机让位给了数字计算机，但运放由于在一般模拟应用中的重要性而生存了下来。最终，数字计算机取代了模拟计算机（对实时测量是个悲哀），但运放的需求却随着测量应用的增长而得以继续增长。

1.4 真空管时代

第一个用于信号调整的运放是在晶体管引入之前用真空管构造的，所以这些运放又大又笨重。到了20世纪50年代，人们利用较低电源电压工作的小型真空管制造出了小体积的运放，它的体积缩小到了像建房时使用的砖头那样的大小，所以运放模块又被别称为砖头。随着真空管体积和元件体积的不断缩小，运放最后缩小到了一个八脚真空管那样的大小。

K2-W型运放是第一批商品化的运放，是由George A. Philbrick研究所销售的。这种运放由两个真空管组成，依靠 $\pm 300\text{V}$ 的电源工作！如果这还不足以使今天的模拟设计者感到退缩的话，那么它的全差分特性就一定会。与我们较为熟悉的单端运放不同，一个全差分运放有两个输出，一个为同相输出，另一个为反相输出。设计者需要闭合的不是一条通路，而是两条反馈通路。先别害怕，这两个反馈通路只需要两套完全一样的元件，所以还不是一种全新的设计方法。今天的全差分运放如日中天，因为它们是驱动全差分模数转换器（ADC）输入电路的理想元件。今天的全差分运放还被用来驱动差分信号，比如DSL和平衡的 600Ω 音频电路。我们完全可以说，运放从诞生之初到现在已经走过了整整一周^①。

3

^① 指从“全差分”到“单边”，最近又走入了“全差分”结构。——译者注

1.5 晶体管时代

晶体管是在 20 世纪 60 年代进入商业性开发的，这使运放的体积进一步缩小到了只有几立方英寸，但砖头的别名依然被沿用。不过，今天的砖头是指那些采用封装化合物（potting compound）或非集成电路（non-IC）封装方法的电子模块。早期的大多数运放是为专门应用制造的，因而就没有必要做成通用的，各个制造商都有不同的规范和封装。所以，初期的运放几乎都没有第二供货商。

1.6 IC 时代

IC（集成电路）是在 20 世纪 50 年代末和 60 年代初开始发展起来的，但一直到 20 世纪 60 年代中期仙童公司发布了 $\mu\text{A}709$ 之后才开始投入使用。这是第一个商业上成功的 IC 运放，是由 Robert J. Widler 设计的。 $\mu\text{A}709$ 有它自己的一些问题，但任何称职的模拟工程师都能够使用，而且被用于许多模拟应用。 $\mu\text{A}709$ 的主要缺点是稳定性问题，它需要外部补偿，因而需要有能力的模拟工程师来使用。此外， $\mu\text{A}709$ 也过于敏感，在任何不利条件下，它都有自毁的习惯。自毁的现象非常普遍，当时的一家主要军品设备制造商曾特地为此发表过一篇文章，它的题目好像是“ $\mu\text{A}709$ 的 12 个珍珠港条件”。

$\mu\text{A}709$ 的遗产延续到了今天，但这是一份负面的遗产。如果使用得不正确， $\mu\text{A}709$ 就不工作，这主要是因为它的外部补偿。今天的工程师甚至不知道这个器件，但对不稳定性的记忆依然遗留到了今天：由于错误使用所引起的问题，未补偿的放大器现在几乎卖不出去。稳定性依然是今天运放设计中理解得最少的一个问题，也是运放最容易出错的地方。即使那些有多年模拟设计经验的工程师们，对此的看法也不统一。但是，聪明的工程师会仔细阅读运放的数据手册，使运放工作在不低于规范中指定的增益值。这一点似乎与直觉相反，但是，运放在规定的最低增益下是最不稳定的。后面的章节将对这一现象进行深入讨论。

$\mu\text{A}741$ 是在 $\mu\text{A}709$ 之后出现的，这是一个有内部补偿的运放，如果工作在数据手册指定的条件下，就不需要外部补偿，而且要比 $\mu\text{A}709$ 好用得多。

$\mu\text{A}741$ 的遗产要比 $\mu\text{A}709$ 正面得多。事实上，741 这个元件编号已经刻在了每一位电子工程师的记忆里，这就像 2N2222 的晶体管和 1N4148 的二极管。这通常也是工程师们考虑运放时第一个想到的元件编号。与 $\mu\text{A}709$ 不同的是，只要不出大错， $\mu\text{A}741$ 总是会工作的，这就是几代工程师喜爱它的原因。它需要 $\pm 15\text{V}$ 的电源，因此就出现了数百种能产生这些电压的电源器件，这个情况就像是由 TTL 逻辑提出 $+5\text{V}$ 的要求以及由 RS232 串行口提出 $\pm 12\text{V}$ 的要求那样。在过去许多年里，投放市场的每一个运放都使用了与 $\mu\text{A}741$ 相同的 $\pm 15\text{V}$ 电源。即使到了今天，当要求很宽的动态范围和很好耐用性的时候， $\mu\text{A}741$ 依然是一个极佳的选择。

自从 $\mu\text{A}741$ 问世以来，每年都有新的运放推出，延续着一个永无止境的运放系列，而性能和可靠性的不断改进已使今天的运放可以被任何人使用于模拟电路。

IC 运放已经矗立在那里了，最新一代的运放覆盖了从极低功耗器件的 5kHz GBW 到超过 3GHz GBW 的频率范围。电源的范围从确保工作的 0.9V 到绝对最大额定电压的 1000V 。输入

电流和输入失调电压已经下降到非常小，因而使客户在进行进货检验时难以测试。运放已经变成了真正通用的模拟 IC，它可以完成所有的模拟任务。它可以用做线路驱动器、放大器、电平移位器、振荡器、滤波器、信号调整器、执行器的驱动器、电流源、电压源，而且还有其他许多应用。今天的设计者所面临的问题是，如何快速正确地选择电路与运放的组合，以及如何计算出无源元件的数值，以使设计的电路实现所需的传递函数。

应该说明的是，没有任何一种运放是万能的。一个可以理想地用做传感器接口的运放，当用于 RF 时根本就不工作。一个有优良 RF 性能的运放，也许有非常糟糕的 DC 指标。由各制造商提供的所有数百种型号的运放，都是以略微不同的方式进行优化的，所以，设计者的任务是

5 在这数百种器件中找出少数几个适合具体应用的运放。本书叙述了一种完成这一选择的设计方法，至少可以用于信号链应用中的运放选择。

本书是讲运放电路的，所以不会讨论运放的内部结构。本书将叙述电路级的计算，但不会涉及过于繁复的计算。读者可以从适合自己的内容开始，然后很快进入高级论题。如果想寻找有关运放内部结构的资料，那就选错了书。在本书中，运放是作为一个整体元件而讨论的。

运放将继续成为模拟设计中一个不可或缺的元件，因为它是一个非常基本的元件。每一代电子设备都会把更多的功能集成到硅片上，同时也把更多的模拟电路做入 IC 中。我们不必担心，随着数字电路应用的增加，模拟电路的应用也会增加，因为主要的数据来源和接口应用都在现实世界，而现实世界是一个模拟的世界。因此，每一代新的电子设备都会对模拟电路提出新的需求，因而也就需要新一代的运放来满足这些需求。模拟设计和运放设计是一种将延续到遥远未来的基本技能。

参考文献

1. Black, H. S. (1934). "Stabilized Feedback Amplifiers," *BST Journal* 13 (January).