

Technology
实用技术

活学活用
电子技术

OP放大电路 活用技巧

〔日〕川田章弘 著
崔东印 译



科学出版社

活学活用电子技术

OP 放大电路活用技巧

〔日〕 川田章弘 著

崔东印 译

科学出版社

北 京

图字：01-2012-1763 号

内 容 简 介

本书从实际应用出发,在介绍 OP 放大器技术原理的同时,重点讲解了 OP 放大器应用中出现的失调、噪声、振荡、失真等问题的产生原因及抑制防止技术。这些技术对于 OP 放大器的成功应用是至关重要的。

本书既可以供初学者学习参考,更是实际从事放大电路设计、制作及系统调试技术人员的工作指南。

图书在版编目(CIP)数据

OP 放大电路活用技巧/(日)川田章弘著;崔东印译. —北京:科学出版社, 2012

(活学活用电子技术)

ISBN 978-7-03-034714-5

I. O… II. ①川… ②崔… III. 运算放大器-电路 IV. TN722.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 121897 号

责任编辑:张莉莉 杨 凯 / 责任制作:董立颖 魏 谨

责任印制:赵德静 / 封面设计:卢雪娇

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京佳艺恒彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 8 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2012 年 8 月第一次印刷 印张: 20 3/4

印数: 1—4 000 字数: 390 000

定 价: 39.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

OP Amplifier Katsuyou Seikou no Kagi

By Akihiro Kawata

Copyright © 2009 by Akihiro Kawata All rights reserved.

Originally published in Japan by CQ Publishing Co., Ltd., Japan.

Chinese(in simplified character only)translation rights arranged with

CQ Publishing Co., Ltd., Japan.

OPアンプ活用成功のかぎ

川田章弘 CQ出版株式会社 2009

著 者 簡 介

川田章弘

1975 年 生于广岛县,在宫城县长至小学入学

1990 年 冈山县笠冈市,开设业余无线电台 JI4XJI

1995 年 取得 1 级陆上无线电技士资格

1996 年 诹间电波工业高等专科学校电子工程专业毕业

1998 年 长冈技术科学大学工学部生物机能工程专业毕业

2000 年 长冈技术科学大学研究生院工学研究科生物机能工程专业硕士课程修完,取得高等专科学校教师证(工业)

2000 年 进入先进测试公司(株),在群马 R&D 中心从事面向半导体测试装置(ATE)的模拟技术应用的研究开发

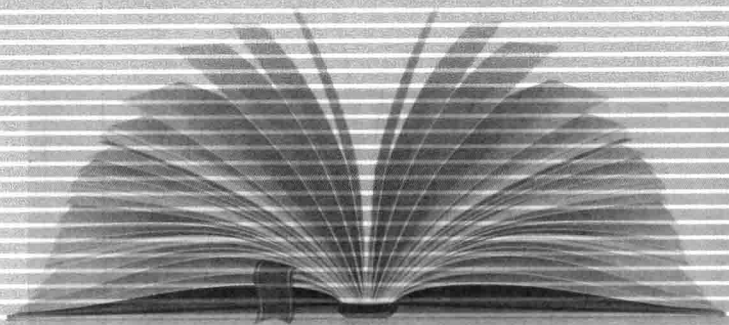
2004 年 进入日本德州仪器(株),以现场应用工程师(FAE)身份提供 OP 放大器及 A/D 和 D/A 转换器的技术支持

2008 年 在日本德州仪器(株)厚木技术中心从事公司内实习生技能培训

2009 年 进入 Yamaha(株),在 AV 机器事业部工作

电子情报通信学会、日本人类工程学学会会员。

美国电工电子学会(IEEE)会员



译者序

OP 放大器技术作为一种通用技术广泛应用于各种电子设备中。

众所周知,它主要用来接收、放大各种传感器的输出信号。电子设备的性能与质量在很大程度上取决于此模拟放大电路的信号处理质量。

利用 OP 放大器技术设计制作各种应用电路时,仅靠教科书上介绍的原理是远远不够的。电路的质量更取决于实际的制作与调试。就像作者在书中所描述的,原打算设计振荡电路,实际制作后却变成了不振荡的稳定的放大器,而原打算设计稳定的放大器,实际制成后却变成了振荡电路。要解决这些问题,实现设计意图,实践就显得更加重要。

本书从实际应用出发,在介绍 OP 放大器技术原理的同时,重点讲解了 OP 放大器应用中出现的失调、噪声、振荡、失真等问题的产生原因及抑制防止技术。这些技术对于 OP 放大器的成功应用是至关重要的。

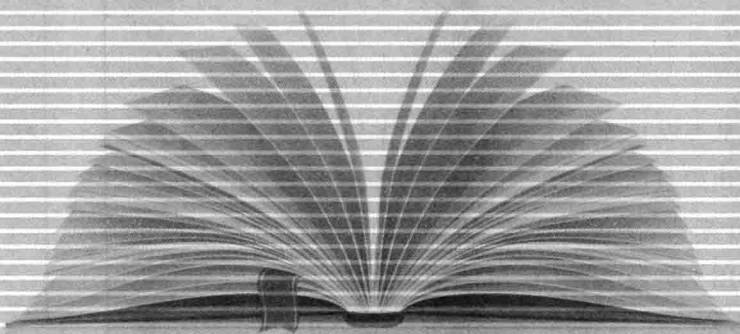
作者在其丰富实践经验的基础上,以诸如将电路的振荡比喻为元件间拔河竞赛的生动、易懂的讲述方式,详尽说明了电路中每一接线、每一元件的作用,以及元件参数取值的根据,所讲述的内容极具可操作性。

本书既可以供初学者学习参考,更是实际从事放大电路设计、制作及系统调试技术人员的工作指南。读者在电路设计制作过程中,若能抽空翻阅一下本书,很有可能会让你少走一些弯路。

特别感谢浙江越秀外国语学院丰富的藏书为译者工作所提供的方便。

崔东印于浙江越秀外国语学院

2012.4



前言

OP 放大器作为一种模拟 IC,是现代模拟电路使用的基本器件。这种 IC 的使用方法一经掌握,即能制作各种模拟电路。本书的目的在于为使用此 OP 放大器进行放大电路设计时,提供从基础到较高程度的知识。一般可供从仅能使用微机的初学者到希望从基础来学习或复习 OP 放大器的现场技术人员参考。

如果只是在设计放大电路的同时掌握 OP 放大器的使用方法,这已经足可以来设计工作及兴趣活动所需要的大部分的运算放大电路。放大电路其实是运算放大电路中的基本电路。就像要顺利滑雪的人反过来练习制动回转一样,掌握好基础技术今后会大有裨益。本书若能成为诸位读者学习掌握运算放大电路基础知识的垫脚石,则作者幸甚。

已故川上正光先生著成『電子回路Ⅰ～Ⅴ』(共立全书)之时,即电子电路技术处于黎明时期的基本器件还是真空电子管。初期的 OP 放大器即是用真空电子管制作的。

1947 年美国贝尔研究所发现半导体管效应以来,模拟电路的基本器件则向着晶体管转变。这种趋势即使现在也未改变,系统级的模拟电路的样子已经今非昔比了。这就是现在的电子设备中分立晶体管元件的使用已经只剩下极少一部分的原因。几乎所有的人不再选择设计困难的晶体管电路,而是转而成为方便简单的 OP 放大电路及面向特殊用途 IC(ASIC)的外围电路的设计者。

如年表所示,使用分立晶体管元件的组件型 OP 放大器产生于 20 世纪 60 年代初期。而现在那种平面工艺的单片 OP 放大器的使用则出现于 1963 年。初期的真空电子管 OP 放大器是作为炮弹制导用模拟计算机上的应用电路而研发的。所谓 OP 放大器(Operational Amplifier)的名称则来源于此种放大器,当时是被用作模拟计算机内部的运算电路。

现在的 OP 放大器的原型制作于 20 世纪 60 年代后半期,其后直到 1980 年,



在多位技术人员的努力下,其基本设计才臻于完善。20 世纪 80 年代后半期以后,倒是半导体工艺技术的进步比电路技术本身更使得 OP 放大器得以高性能化。

对于 OP 放大电路的设计来讲,了解并掌握 OP 放大器的选用方法也是非常必要的,所以,有关评价选用 OP 放大器 IC 可能需要的技术知识,本书也将予以介绍。OP 放大器有着种种特性参数,究竟哪些属于重要的性能项目,则因应用电路的不同而异。完全万能的 OP 放大器是不存在的。实际选用 OP 放大器时,应在接近自己使用的电路条件下,使用测试仪器实测得到参数数据,以确认其性能能否得以充分发挥。有关 IC 特性测定的第 8~12 章,亦望能对各位的电路设计发挥作用。

OP 放大器的历史年表

年 份	事 件
1928 年	Western Electric 公司的 Harold Black 发明负反馈放大器
1932 年	Bell 研究所的 Harry Nyquist 给出奈奎斯特稳定判断法
1937 年	Bell 研究所的 Hendrick Bode 给出 Bode 线图
1940 年	炮弹制导用模拟计算机(M9 火器管制系统)研究
1947 年	John Ragazzini 命名 Operational Amplifier。Bell 研究所发现晶体管效应
1949 年	RCA 公司的 Edwin Goldberg 和 Jules Lehmann 发明斩波稳定化 OP 放大器
1952 年	George A. Philbrick 研究所(GAP/R)研发 K2-W OP 放大器(电子管电路组件)
1954 年	Texas Instruments 公司的 Gordon Teal 研发生长接合型硅晶体管
1958 年	Texas Instruments 公司的 Jack Kilby 发明(使用线连接的)IC
1959 年	Fail Child 公司的 Jean Hoerni 发明平面工艺。Fail Child 公司的 Robert Noyce 发明(使用平面工艺的)IC
1963 年	Fail Child 公司的 Bob Widlar 研发单片 OP 放大器 μ A702
1965 年	Fail Child 公司的 Bob Widlar 研发 μ A709(最初普及的 OP 放大器)
1967 年	进入 National Semiconductor 公司的 Bob Widlar 研发 LM101(LM301)
1968 年	Fail Child 公司的 Dave Fullagar 研发 μ A714(最初内置相位补偿型 OP 放大器)
1970 年前后	Raytheon 公司的 Hary Gill 研发 RC4558(最普及的通用 OP 放大器)
1974 年	National Semiconductor 公司的 Ronald Russel 等发表使用离子注入法的 JFET 制造技术
1975 年	RCA 公司发布 CMOS OP 放大器 CA3130
1975 年	Precision Monolithics 公司的 Gorge Erdi 研发 OP07(最初普及的高精度 OP 放大器)
1976 年	National Semiconductor 公司发布 LF356(最初普及的 JFET OP 放大器)
1978 年	Texas Instruments 公司发布 TL06x/TL07x/TL08x 系列 JFET OP 放大器(采用塑料封装的低价格 JFET OP 放大器)
1984 年	Burr Brown 公司的 Steve Millaway 研发使用电介质分离工艺的 OPA111(高精度/低偏置电流 JFET OP 放大器)
1985 年以后	LM6361(National Semiconductor 公司)及 AD847(Analog Devices 公司)等高速 OP 放大器的研发与普及不断推进



● 谢 辞

首先感谢(株)Advantest 的各位。对于作为生物电子学电子电路技术人员而踏着蹊径的我,该公司提供了从低频、高频电路直至 PLL 电路及高速时钟电路技术(信号·集成)的广阔范围内的实际模拟电路技术的研究场所。在该公司花费于种种大大小小的失败及其问题解决上的时日,为我成为一名技术人员打下了基础。

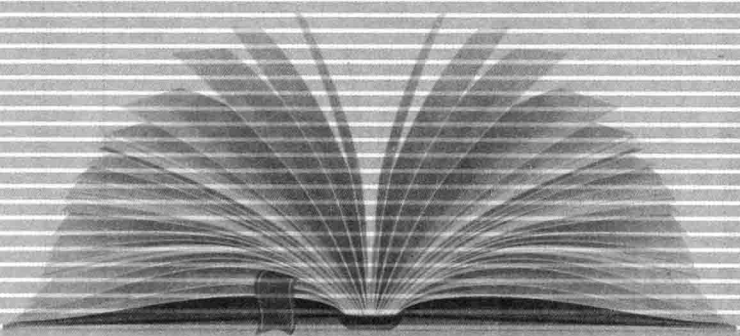
还要感谢日本 Texas Instruments(株)的各位。第 5 章附录中的 OPA365 相关的特性数据,即是 Texas Instruments-US 的 Miro Oljaca 给我提供的。非常感谢 Miro 爽快地许可本书使用相关数据并送来了补充数据。正当要决定将低噪声 OP 放大器 OPA211 及 OPA827 的产品规格及其典型应用登载于本书的时候, Frank Haupt 认真地倾听了来自日本的我的反馈意见。

还要感谢将我的难懂的原稿改编为初学者也能读懂的 CQ 出版社的寺前裕司先生、日常给予关照帮助的《晶体管技术》编辑部的诸位,以及将我介绍给该编辑部的马场清太郎先生。读完本书的诸位,请一定要读读列在参考文献中的马场先生的著作。

最后,对于未能看到本书完成的 5 年前去世的我的母亲,我想传递一声“谢谢”。如果没有母亲 33 年前带我到这个世界上来,也就绝无这本书的问世。

著 者

2009 年 4 月



目 录

第 1 章 与纤细的模拟 IC——OP 放大器的连接方法	1
1.1 模拟与数字二位一体	1
1.1.1 敏感而微弱的模拟与迟钝而强实的数字	1
1.1.2 缺少模拟电路或缺少数字电路都得不到优良的产品	2
1.2 OP 放大器的基本功能“信号放大”的益处	4
1.2.1 放大增强抗噪能力	4
1.2.2 A/D 转换后信息损失少	6
1.2.3 理想放大器的输出波形和输入波形相似	7
1.3 OP 放大器的分类	8
1.3.1 根据用途的分类	8
1.3.2 根据电源电压的分类	8
1.3.3 根据输入、输出电压范围的分类	12
1.4 充分认识 OP 放大器的不足	13
1.4.1 在性能指标数据表中,一些关键的事项并未列出	13
1.4.2 IC 缺点的实验发现	16
1.4.3 要相信的不是性能指标数据表,而是实测数据	17
第 2 章 掌握放大技术的基础	19
2.1 相位虽然反转但精度高的反相放大电路	19
2.1.1 输入信号和输出信号的关系	19
2.1.2 两个外接电阻的阻值比决定增益	20
2.1.3 安装方法	22
2.1.4 典型应用电路	23



2.2 相位不反、使用方便但精度稍显不足的同相放大电路	24
2.2.1 不反相而放大	24
2.2.2 使用方便但增益误差大	27
2.2.3 安装方法	28
2.3 将能量加于微弱信号上以增强负载驱动能力的电压跟随器	28
2.3.1 输入阻抗大、输出阻抗小,增益 1 倍	28
2.3.2 应用举例	30
2.3.3 易发振荡是此种高性能电路的白玉之瑕	31
第 3 章 OP 放大器周围外接元件的作用及取值理由	33
3.1 反馈部分	34
3.1.1 决定增益的反馈电阻 R_{11} 和 R_{10}	34
3.1.2 抑制直流分量放大的电容 C_9	37
3.2 偏压部分	40
3.2.1 对电源分压获得基准电位的 R_3 和 R_5	40
3.2.2 连接分压电路和 OP 放大器的 R_7	43
3.2.3 抑制偏压变动的 C_2	45
3.3 输入部分	47
3.3.1 抑制电路与外部设备连接时突跳的 R_8	47
3.3.2 不同基准电位下工作的电路之间的桥梁 C_8	48
3.4 输入部分的详细设计	50
3.4.1 阅读电路时省去影响小的元件	50
3.4.2 输入阻抗的频率特性	53
3.5 输出部分	56
3.5.1 实现与下一级稳定连接的 R_{12}	56
3.5.2 与不同基准电位下工作的下一级放大电路之间的 桥梁 C_{10}	58
3.6 用实验来校核设计	58
3.6.1 正向幅度受到限制	58
3.6.2 如果调整偏压,负侧又会遭到限幅	60



3.6.3 输出端加接电阻后,失真减轻,输出电压范围扩大	60
------------------------------	----

第4章 掌握直流放大技术	67
4.1 直流放大器的必要性	67
4.1.1 直流放大器设计失败例	67
4.1.2 取出长周期信号也要用直流放大器	68
4.1.3 直流失调电压和温度漂移为零的放大器是理想的	69
4.2 双电源下放大器的性能易于获得	69
4.2.1 单电源工作的交流放大器的缺点	69
4.2.2 双电源型的优缺点	73
4.3 直流放大器电路	74
4.3.1 单电源工作的直流放大器	74
4.3.2 双电源工作的直流放大器	75
4.4 直流放大器的弱点——失调电压	76
4.4.1 直流放大器很难只放大直流信号	76
4.4.2 失调电压的危害	77
4.5 失调电压产生的原因	78
4.5.1 输出失调电压产生的原因	78
4.5.2 输入失调电压产生的原因	79
4.5.3 输入偏置电流产生的根据	80
4.6 输出失调电压产生的主要原因	80
4.6.1 输入偏置电流与输出失调电压的关系	81
4.6.2 输入失调电压与输出失调电压的关系	82
4.7 减小输出失调电压的方法	85
4.7.1 减小输入失调电压	85
4.7.2 减小输入端的输入偏置电流的影响	86
4.7.3 输出失调电压修正方法	88
4.8 不做直流放大时直接做成交流放大器	92
4.8.1 典型的交流放大器	92
4.8.2 无需耦合电容的交流放大器	93
4.8.3 方波信号放大时应注意下倾与稳定	95





第5章 掌握低噪声放大技术	99
5.1 微小信号的放大	99
5.1.1 需要不使 SN 比恶化的放大器	99
5.1.2 确保动态范围也很重要	100
5.2 噪声的频率分布可按三个频带分类	100
5.2.1 噪声的频率分布	100
5.2.2 低频区起支配作用的 $1/f$ 噪声	102
5.2.3 大小随设计变化的白噪声	102
5.2.4 高频下会成为问题的分配噪声	103
5.3 噪声的种类及其对策	103
5.3.1 除更换元件及 IC 外别无对策的噪声	103
5.3.2 大小随电阻值变化的热噪声的对策	104
5.3.3 雪崩噪声的应对	105
5.4 来自 OP 放大器自身的噪声	107
5.4.1 电压性噪声和电流性噪声	107
5.4.2 输入换算噪声电压	107
5.4.3 输入换算噪声电流	108
5.5 OP 放大器电路的噪声电压的计算方法	108
5.5.1 噪声的定量化	108
5.5.2 OP 放大器产生的噪声电压的计算	109
5.6 低噪声放大器的设计例	111
5.6.1 步骤 1——确立设计目标	111
5.6.2 步骤 2——选择低噪声 OP 放大器	112
5.6.3 步骤 3——进行基本设计	112
5.6.4 步骤 4——低噪声化	113
5.6.5 步骤 5——预测最终电路的噪声特性	115
5.6.6 步骤 6——试制并确认实际特性	116
附录 A 从微小信号到大信号输入幅度大范围变化的应对 ——动态范围的扩展技术	120
附录 B 噪声水平的计算技术——正态分布噪声的分布情况及	



合成方法	132
第 6 章 频率特性的控制	141
6.1 扩大带宽的方法	141
6.1.1 决定增益频率上限的增益带宽和反馈量 β	141
6.1.2 选用 GBW 大的 OP 放大器	141
6.1.3 增大反馈量	144
6.1.4 实际 OP 放大器的 GBW 并非是不随频率变化的定值	145
6.2 用噪声增益分别控制上限频率和增益	146
6.2.1 用噪声增益控制噪声及频率特性	146
6.2.2 下降增益抑制上限频率的上升	149
6.3 抑制上限频率上升的方法	150
6.3.1 用反馈电路控制频率特性	150
6.3.2 GBW 不能用于频率特性的设计	151
6.4 大振幅时转换速率会支配上限频率	152
6.4.1 输出振幅的最大倾斜度受转换速率限制	152
6.4.2 GBW 大而转换速率小的 OP 放大器	153
6.4.3 如果需要高转换速率应使用电流反馈型	154
6.4.4 转换速率与上限频率的关系	154
附 录 OP 放大器输出电流的增强方法	156
 第 7 章 振荡对策与周围元件的选择方法	 163
7.1 难以发现的放大器的致命伤——振荡	163
7.1.1 振荡是致命的缺陷	163
7.1.2 振荡电路与放大器仅毫厘之差	163
7.1.3 认真检查有无振荡	164
7.1.4 放大器的周围存在很多引发振荡的因素	164
7.2 振荡的症状	164
7.2.1 脉冲响应波形混乱或有高频信号叠加	164
7.2.2 直流输出电压变动大至预计以上	165



7.2.3 OP 放大器外壳烫得手不能触摸	166
7.2.4 放大器的线性坏到预计以上	166
7.3 稳定性设计	167
7.3.1 考察输入→放大→输出→反馈→输入一圈信号的变化	167
7.3.2 关注相位的移动与变化	167
7.3.3 根据 $A_o(j\omega)\beta(j\omega)$ 可知发生振荡的余裕度	168
7.4 提高稳定性, 实现不易振荡的放大器	170
7.4.1 输出端接电容也不振荡的做法	170
7.4.2 输入端接电容也不振荡的做法	173
7.4.3 抗寄生 L 及 C 引发的高频振荡的做法	175
7.5 旁路电容的配置与选择方法	178
7.5.1 无旁路电容时的振荡的症状与对策	178
7.5.2 无旁路电容时的振荡机理	180
7.5.3 旁路电容的施加方法	181
7.5.4 接入电路模块的大容量电容器电容值的确定方法	183
7.6 振荡的检查方法	183
7.6.1 使用示波器的简易方法	183
7.6.2 使用谱分析仪严格检查	185
7.6.3 使用网络分析仪定量测量振荡余裕	185
7.6.4 冷却时易发生振荡	186
附录 A 环路增益的测量方法	187
附录 B OP 放大器低温下也能不发生振荡	190

第 8 章 低失调 OP 放大器的使用方法及评价法

193

8.1 低失调 OP 放大器	193
8.1.1 在直流精度很必要之处发挥威力	193
8.1.2 实际器件	193
8.2 使用基础	195
8.2.1 增加失调调整用电阻的副作用	195
8.2.2 输入增加 LPF 去除 OP 放大器跟不上的信号	195



8.2.3	使用精度高于 $\pm 1\%$ 的高精度电阻	197
8.2.4	OP 放大器输入端周围的布线应尽可能短	197
8.3	在去除失调的同时放大的斩波稳定型	198
8.3.1	低失调中典型的“斩波稳定型”	198
8.3.2	增加输出滤波器去除特有的噪声	199
8.3.3	增加 LPF 后稳定建立时间的确认	199
8.4	重要的性能及其评价方法	199
8.4.1	确认测试系统的噪声水平	200
8.4.2	输入失调电压及其温度漂移特性	201
8.4.3	输入换算噪声电压	202
8.4.4	输入偏置电流	208
8.4.5	振荡余裕	210
第 9 章	低噪声 OP 放大器的使用方法及评价法	213
9.1	各种低噪声 OP 放大器	213
9.2	基本使用方法	215
9.2.1	用于反相放大器的场合	215
9.2.2	用于同相放大器的场合	217
9.2.3	用于差动放大器的场合	217
9.3	能正确测量低频噪声的锁定放大器	217
9.4	输入换算噪声电压密度的评价与分析	220
9.4.1	评价电路	220
9.4.2	测量结果与分析	221
9.5	输入换算噪声电流密度的评价与分析	223
9.5.1	评价电路	223
9.5.2	测量结果与分析	224
第 10 章	差动放大器的使用方法及评价法	227
10.1	差动放大器的功能与特性	228
10.1.1	关键是“能只抑制共模信号吗”	228
10.2	仪器放大器抗共模噪声强	231



10.2.1	所有的电子电路都工作在噪声的海洋上	231
10.2.2	共模噪声因引线阻抗的少许不平衡而突然变为 恶性噪声	232
10.2.3	仪器放大器	233
10.3	高频区改善 $CMRR$ 的方法	234
10.3.1	$CMRR$ 在高频区的劣化	234
10.3.2	增加共模去除滤波器	235
10.3.3	输入线缆的电容使 $CMRR$ 恶化	236
10.3.4	使用浮动电源后 $CMRR$ 立即上升	238
10.4	实际的差动放大器和仪器放大器	238
10.5	应评价的特性及评价结果分析	246
10.5.1	差动增益的频率特性	246
10.5.2	输出换算 $CMRR$	248
10.5.3	输出换算 $PSRR$	250
第 11 章	隔离器件的使用方法及评价法	255
11.1	任何两点间都要能安全测量	255
11.1.1	测试仪器坏了? 触电了?	255
11.1.2	用隔离器件绝缘	256
11.2	隔离放大器的使用方法及评价法	256
11.2.1	使用方法	258
11.2.2	简单模块型	260
11.2.3	低噪声、宽带宽型	262
11.2.4	应评价的特性及结果分析	265
11.3	数字隔离器的使用方法及评价法	270
11.3.1	数字地与模拟地在哪里连接才好	270
11.3.2	使数字和模拟电流流动顺畅	272
11.3.3	实际数字隔离器及其使用方法	272
11.3.4	应评价的特性及结果分析	273



第 12 章 高速 OP 放大器的使用方法及评价法	279
12.1 电流反馈型 OP 放大器攻略	279
12.1.1 放大高速信号应选用电流反馈型	279
12.1.2 电压反馈型提高增益时带宽会变窄	280
12.1.3 电流反馈型增益即使提高带宽也不变	281
12.1.4 对大敌“振荡”的对策	283
12.1.5 无旁路电容时高次谐波失真即会增大	284
12.2 OP 放大器输入部分存在的寄生电容的补偿	285
12.2.1 寄生电容的真面目	285
12.2.2 两个对策	286
12.2.3 电压跟随器的补偿方法	287
12.3 负载电容引发振荡的对策	288
12.3.1 接输出电阻	288
12.3.2 用增益 1 倍下不能使用的 OP 放大器制作稳定工作 的电压跟随器的方法	291
12.4 增益和相位的频率特性的测试方法	292
12.4.1 评价方法	292
12.4.2 结果与分析	292
12.5 失真的评价	297
12.5.1 非高次谐波失真而是用交叉调制失真评价	297
12.5.2 交叉调制失真评价法及分析	301
参考文献	307