



电磁测量与仪表丛书

运算放大器在 电测技术中的应用

闻伍椿 编著

机械工业出版社

电 磁 测 量 与 仪 表 丛 书

运 算 放 大 器 在电测技术中的应用

闻伍椿 编著



机 械 工 业 出 版 社

本书对运算放大器的理论及其在电测技术中的应用,进行了系统和全面的论述。

全书共分八章,主要介绍:运算放大器的电路特性及完整的关系式;运算放大器的频率特性、瞬态特性及稳定性;运算放大器电路应注意问题;选频式运算放大器、组合运算放大器以及增量反馈和伴测电路原理;运算放大器在电磁测量中的应用;阻抗模拟器、变换器及有源阻抗标准;有源电桥及阻抗的数字化快速测量;运算放大器在电流互感器及模拟电表中的应用。书中对CAZ运算放大器、数据放大器、积分器、电桥放大器、电荷放大器、乘法器、相敏检波器、有源短接器、有源扼流圈、有源电压互感器、直流大电阻模拟器、振荡器、移相器以及有关相位标准和稳定电源的种种电路都有论述。

本书内容丰富、实用,其中有相当部分是作者本人的研究成果。

本书主要供从事电测工作的技术人员阅读,也可供大专院校有关专业师生参考。

运算放大器在电测技术中的应用

闻伍椿 编著

★

责任编辑:秦起佑 版式设计:胡金瑛

责任印制:王国光 责任校对:熊天荣

★

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

★

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ · 印张 $11 \frac{1}{8}$ · 字数 289 千字

1989年12月北京第一版·1989年12月北京第一次印刷

印数 0,001—2,185 · 定价:10.30元

★

ISBN 7-111-00782-4/TM · 109

编辑说明

电磁测量技术的应用非常广泛，在工农业生产及科学实验中起着极为重要的作用。用于电磁测量的仪表种类繁多，发展迅速。建国以来，我国各有关部门从事电磁测量和仪表方面工作的科技人员迅速增加。为了总结电磁测量及仪表方面的经验，普及有关电磁测量及仪表知识，中国计量测试学会电磁专业委员会和中国仪器仪表学会电磁测量信息处理仪器学会联合成立了《电磁测量与仪表丛书》编委会，组织编写了这套丛书。编委会成员是：

主 编：唐统一

副主编：郭志坚 丁银云 张钊华

编委（以姓氏笔划为序）：

尤德斐	王 镒	叶妙元	陈印琪	何振瀛
李显扬	庞仲予	沈平子	杨华山	余鹤栋
张叔涵	张润康	张德实	林瑞昌	费正生
赵修民	赵新民	秦起佑	翁瑞琪	梅文余
袁 楠	彭时雄	程世镐	雷枫桐	

本丛书各分册为：《电磁量的单位制和单位的复现与传递》、《误差理论在电磁测量中的应用》、《电磁测量线路与仪器的屏蔽防护》、《感应分压器与电流比较仪》、《交流电桥》、《测量用互感器》、《大电流测量》、《微处理器在电测技术中的应用》、《运算放大器在电测技术中的应用》、《数字电压表的电气性能测试》、《电磁测量数字化及其应用》、《磁测量基础》、《磁场的产生》、《磁场的测量》、《动态磁性测量》、《硅钢磁性测量》等。将陆续出版。

本丛书为实用科技读物，其内容主要介绍电磁测量与仪表的基本原理，但更侧重介绍实际应用方面的知识，例如实验技术、仪表的设计计算、仪表的使用及有关的数据、资料等。对国内外

最新成就及发展方向也有一定的反映。

本丛书力求深入浅出，通俗易懂。希望能为读者在电磁测量与仪表方面提供有益的知识。但由于水平所限，书中一定存在不少缺点，甚至错误，欢迎读者批评指正。

《电磁测量与仪表丛书》编委会

1982年北京

前 言

随着我国国民经济及科技事业的发展，电磁测量技术及电测仪器在工业和科研部门的应用日益广泛，并对运算放大器电路的品种、数量、性能和质量提出越来越高的要求。但是，到目前为止，仍缺少密切结合电测技术并以测量电路、测量元件和测量方法为中心的综合介绍运算放大器应用的书籍。针对这一情况，为了满足从事电测工作的广大读者的需要，特编写了此书。

本书对运算放大器理论和应用进行比较系统而全面的论述，其中有相当部分是作者本人的研究成果。例如，伴测电路技术、增量反馈方法以及有源三端阻抗标准的概念等都由作者首次提出，并加以实践的。

在本书的编写过程中，曾得到杨华山、钱熙光，陆培新、须文波、吴慎德、闻乐等同志的热情帮助。在此，向他们致以深切谢意。

由于水平所限，书中一定会有不妥之处，甚至错误，望读者给予指正。

目 录

编辑说明

前言

绪论	1
第一章 运算放大器	5
一、运算放大器的功能和结构特点	5
二、运算放大器电路近似关系式	7
1. 倒相器	9
2. 电流电压变换器	10
3. 加法器	16
4. 差动放大器和减法器	11
5. 同相运算放大器	11
6. RC 微分运算放大器	12
7. RL 微分运算放大器	13
8. 积分运算放大器	14
9. 电流变换器	14
10. 电压电流变换器	15
11. 绝对值变换放大器	16
12. 运算放大器的综合电路	17
三、运算放大器电路的严密关系式	19
四、运算放大器的闭环增益和运算误差	24
五、开环输出阻抗对闭环中开环增益的影响以及环路增益极值	28
1. 开环输出阻抗对闭环中开环增益的影响	28
2. 环路增益极值	30
六、闭环中两种情况的对比及输出端干扰的折合	32
1. 放大器闭环电路中两种情况的对比分析	32
2. 输出端干扰折合为输入端干扰的方法	35

3. 在有输入信号时对输出端干扰影响的估计	36
七、输入端失调电流和失调电压的影响	38
八、共模抑制比和共模误差	39
九、几种误差源同时存在的运算放大器综合电路关系式	41
十、积分器误差分析	44
1. 运算误差	44
2. 虚地节点对地分布参数的影响	45
3. 积分元件的分布参数影响(电阻时间常数和 电容并联损耗的影响)	47
4. 积分电容串联损耗的影响	48
5. 失调电压和失调电流的影响	49
十一、输出阻抗和输入阻抗	49
十二、斩波稳零放大器	56
十三、轮换自动校零运算放大器	58
十四、几种特殊用途的差动运算放大器及数据放大器	59
第二章 运算放大器的频率特性、瞬态特性及稳定性	66
一、运算放大器的幅频特性和相频特性	66
二、运算放大器的稳定性判定和稳定性储备	73
1. 奈魁斯特稳定性判据	74
2. 稳定储备	78
三、二阶系统闭环增益的时间域特性	79
四、二阶系统闭环增益的频率域特性	82
五、相位裕度与阻尼比及过冲量的关系	85
六、用跨接对地电容的方法检验运算放大器的稳定性储备	87
七、相位补偿	90
1. 滞后补偿	91
2. 改良的滞后补偿	93
3. 超前补偿	95
4. 局部反馈方法	100
5. 前馈方法	107
八、建立时间	112
九、转换速率及全功率带宽	115

第三章 运算放大器电路的若干问题	119
一、对直流电源的要求	119
二、退耦	123
三、消除引线间的电感性耦合	125
四、屏蔽及电容性耦合的消除	128
五、放大级间及印制电路板插脚间的电导电容性屏蔽和隔离	131
六、噪声和信噪比	132
七、关于减小噪声影响的问题	137
八、输出电压和输出电流的扩大	140
第四章 选频式运算放大器、组合运算放大器以及 增量反馈和伴测电路原理	142
一、概述	142
二、对运算放大器工作频率以外的考虑	143
三、选频式运算放大器	147
1. 外接双T网络负反馈运算放大器	148
2. 局部双T网络负反馈	150
3. 串联双T网络负反馈	151
4. 其他类型选频式运算放大器	154
四、发挥交流运算放大器开环增益潜力的方法	155
1. 电路及其调节	156
2. 电路分析	157
3. 稳定性讨论	160
五、组合运算放大器	160
1. 局部正反馈增益自举式组合运算放大器	161
2. 误差补偿式组合运算放大器之一	162
3. 误差补偿式组合运算放大器之二	164
4. 误差补偿式组合运算放大器之三	165
5. 输入端误差电压补偿式运算放大器组合电路	166
六、伴测电路原理及其应用	167
1. 伴测电路原理	168
2. 伴测电路的效用	170
3. 应用示例	173

七、用伴测电路消除电子开关导通电阻的影响	173
1. 工作原理	174
2. 应用方法	175
八、用增量反馈提高运算放大器的稳定性和准确度	176
1. 用增量反馈提高闭环系统准确度的理论依据	176
2. 增量反馈的调节及对各种类型运算放大器的校验	180
3. ZPP 电压传输环节	183
4. 用增量反馈提高闭环稳定性	184
5. 实验和小结	187
第五章 电磁测量变换中运算放大器的各种应用	188
一、负载电流的有源补偿	189
二、引线的有源补偿	192
三、有源短接线和有源扼流圈	197
四、有源等电位屏蔽	199
五、运算放大器在电压互感器中的应用	205
六、 90° 相位标准	207
七、振荡器、移相器和稳定电源	209
八、低阻抗测量中被测压降和标准压降的分别引出方法	215
九、相位测量及正交分解的一种方法	217
十、乘法器相敏检波器	219
十一、电荷放大器和高压测量	222
1. 电荷放大器	222
2. 高压测量	224
十二、正弦波信号的交直流转换	225
第六章 阻抗模拟器、变换器及有源阻抗标准	226
一、一端接地的大电容模拟器	226
二、一端接地的小电感模拟器	231
三、一端接地的可变小电感、小电阻模拟器	235
四、单端等效浮动模拟阻抗	236
五、双端等效浮动模拟阻抗	241
六、直流大电阻模拟器	244
七、电感电容变换器	245

X

八、有源三端高阻抗标准	248
1. 问题的提出	248
2. 有源三端高阻抗标准的一般电路形式	248
3. 正交分量可调问题的讨论	251
九、有源大电感标准	253
1. 工作原理	253
2. 使用方法	254
3. 将有源大电感标准改作有源高阻标准	255
4. 主要技术指标	255
5. 试验结果	257
第七章 有源电桥及阻抗的数字化快速测量	258
一、运算放大器构成的比例臂与变压器比例臂的比较	259
二、不同性质阻抗比较的有源方法	260
三、中阻抗和高阻抗电桥原理结构的简化	261
四、多用途精密交流电桥	263
五、有源低阻抗电桥	269
六、应用有源标准的高阻抗电桥	273
1. 串联损耗式大电感电桥	274
2. 并联损耗式大电感电桥	274
3. 高阻和时间常数测量电桥(被测电阻时间常数为正)	274
4. 高阻和时间常数测量电桥(被测电阻时间常数为负)	275
5. 电容和损耗角测量电桥(被测损耗角为正)	275
6. 电容和损耗角测量电桥(被测损耗角为负)	275
七、应用运算放大器的直角电桥	276
八、有源高压电容电桥	279
九、电桥放大器和微差电桥	280
1. 倒相输入电桥放大器	281
2. 差动输入电桥放大器	282
3. 宽偏差电桥放大器	284
4. 伪桥(Pseudo Bridge)	284
5. 微差电桥	286
十、电容分选仪	287

十一、阻抗的数字化快速测量	289
十二、充放电法测电容	291
十三、谐振法测电容	294
十四、自动平衡电桥	295
十五、0.05%数字式 LCR 测量仪	299
十六、阻抗的数字化自动测量技术的发展	305
第八章 运算放大器在电流互感器及模拟电表等方面的应用	312
一、运算放大器在电流互感器中的应用	312
1. 单磁芯电流互感器	313
2. 双磁芯电流互感器	316
3. 负阻抗补偿式及负反馈式四绕组电流互感器	320
4. 小结	322
二、运算放大器在模拟电表中的应用	323
1. 电压表	323
2. 电流表	325
3. 电阻表	326
三、运算放大器在电路板在线测量中的应用	327
1. 在线电流测量	328
2. 在线阻抗测量	329
附录	332
附录 I 关于运算放大器电路的完整的基本关系式	332
附录 II 相位补偿的网络分析	337
参考文献	342

绪 论

在 60 年代后期和 70 年代初期，晶体管对电子管的大量代替以及 70 年代后期和 80 年代初期，集成电路对分立元件电路的大量替代，标志着我国电子技术发展的两个重要阶段。而最明显地反映电子技术发展面貌的要算运算放大器了。在晶体管化以前，不仅电磁测量中所采用的音频电源、指示器及前置放大器都是电子管式的，而且运算放大器也只能是电子管式的。由于其体积大、成本高，电子管式运算放大器仅在模拟计算机中应用较多。随着半导体生产技术的发展，就出现了各种晶体管式仪表，出现了分立元件构成的运算放大器。它不仅用于设计数字电压表和有源滤波器，而且也开始在阻抗测量电路中应用。然而，只有在集成电路对分立元件电路的大量代替和高质量的廉价的线性集成运算放大器大量生产以后，才使运算放大器的应用范围迅速扩大。

运算放大器与数字计算机有着密切的联系。以运算放大器为核心部分的模数转换器和数模转换器常常是数字机系统的必要配件，因此就有带模数和数模转换功能的微处理机。一个计算机控制的测试系统，其技术指标是多方面的，如准确度、线性度、分辨力、测量范围、输入阻抗、输出阻抗、输出功率、测试速度和稳定性等，而这些指标主要决定于模拟测量部件，所以运算放大器电路构成的模拟部分是关系到微处理机测试系统性能指标的一个关键部件。在数据采集和处理系统中不仅需要计算机，而且一般需要数据放大器构成前置部分。配用微处理机的阻抗测量仪器的产生和发展正是运算放大器电路技术和数字电路技术以及计算机技术相结合的结果。可以说运算放大器几乎是一切电子设备不可缺少的部件。

目前，各类运算放大器如潮涌般地进入各个应用领域，已被作

为一种新型器件单元来使用。

在阻抗测量技术中，它不仅用于指零仪和前置放大器，而且从改善电桥屏蔽防护和测量线路性能，提高测量准确度和测量速度方面出发，向有源电桥和数字化快速测量仪器方面发展。在有源电桥线路中，运算放大器已直接用于测量桥臂，降低仪器中对屏蔽的要求，提高测量准确度并简化电桥结构。有源电桥作为一种新颖的电桥获得广泛使用。

运算放大器具有许多优点，例如有很高的输入阻抗和很低的闭环输出阻抗。倒相器中虚地特性能提供复数的电压比、电流比以及准确的 90° 相移。同相运算放大器可以作成电压跟随器，用于阻抗变换和隔离。

在电测领域中，除了有源电桥以外，还有各种有源器件都是运算放大器应用的场合，如有源电流互感器、有源短接线、有源扼流圈、阻抗模拟器、变换器和有源阻抗标准等。而带有缓冲放大器的标准电池也是标准有源化的一个实例。

有源化的好处是极其明显的，它可以缩小体积，增加功能，提高质量，扩大量值界限。电测技术中有源化的结果必将大幅度地提高测量准确度和测量速度。

由于一些精密电测和计量系统对测量指标有较高的要求，因此，在电测技术中应用的运算放大器电路的特点是保证在必要的稳定性储备条件下有高的运算指标。

早在 70 年代初期试制成功的 QS17 电桥，是我国最早的准确度最高的多用途有源电桥。它用运算放大器实现阻抗基本量的运算，并采用附加文氏桥的方法，解决了稳定性和运算指标间的矛盾，达到了十万分之二的运算指标。

关于运算放大器在阻抗的数字化自动测量方面，由于交流运算放大器在 QS17 桥上应用成功，可以考虑把交流运算放大器应用到多用途和快速的数字阻抗测量方面去。在那时，对阻抗元件的自动测量，并没有跳出模仿手动电桥的平衡原理。受到有源电桥上应用交流运算放大器的启发，就产生了抛弃自动平衡的

老框框，采用相敏交直流转换的设想。经过几年的努力，设想变成了现实。此种原理性的成果曾以 PL1 型数字阻抗仪的产品形式得到了应用，此后又试制了电桥和 PL1 数字阻抗仪相结合的微差电桥。

1979 年开始并在两年后完成的 0.05% 数字式 LCR 测量仪是一台高精度的多用途的快速元件测量仪。它根据不同的被测对象，选择适当的量程，仪器的显示部分能分别给出被测的基本量和正交分量的读数。基本量的指标是：在 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 的环境温度下，中间量程内，测量误差不大于 $0.05\% \pm 2$ 字。该仪器应用运算放大器的电路原理，先将被测量转换成交流电压，再经相敏的滤波式运算放大器变为直流电压，然后由双积分模数转换器给出数字读数。

阻抗数字化自动测量方面，下一个目标应该是扩大测量的频率范围。这就给交流运算放大器和相敏交直流转换技术提出了更高的要求。

在交流相敏测量中，需要有高精度的相敏检波交直流转换器和锁相放大器。一种带有自动校零的相敏检波交直流转换运算放大器，其线性度和对正交分量的分辨能力已经达到 0.03%。这表明，对实数部分与虚数部分比值接近于 1 的复数信号，能准确地分离出其中一个分量，误差不大于 0.03%。

在阻抗测量技术发展的同时，阻抗的有源标准的研制工作也取得了成绩。80 年代初，由运算放大器电路构成的有源大电感和大电阻标准已经问世。但是运算放大器在模拟阻抗（包括直流大电阻）方面的广泛应用还是以后的事。

从前述运算放大器在阻抗测量技术方面应用的实例中，可以看到，电测技术在近代的迅速发展是与运算放大器电路的应用分不开的。毫无疑问，随着时间的推移，运算放大器的重要作用将更加明显。

目前存在着的主要问题：首先是运算放大器电路理论需要充实和统一；其次是运算放大器电路的稳定性和相位补偿后有

效开环增益不足的问题；电子开关导通电阻和电桥引线电阻过大也是一个需要解决的问题；其他还有电路的噪声和干扰以及 90° 移相等方面的问题。

上述存在问题中，最突出的是运算放大器在稳定条件下的有效开环增益不足的问题。

为解决这些问题，应从两方面着手，即元件方面和电路原理方面。本书对运算放大器的电路原理进行了综合的阐述。对电路的稳定性及高频条件下的有效开环增益不足等问题，提供了根本性的解决方法。尤其是书中介绍的增量反馈和伴测电路原理等方面的内容，对于精密电磁测量领域，具有较大的实用意义。

第一章 运 算 放 大 器

一、运算放大器的功能和结构特点

运算放大器与一般放大器的差别在于它具有对模拟量进行加减乘除、微分、积分等数学运算的功能和一些特殊的用途(譬如,用作比较器或构成波形发生器)。它多数是直接耦合差分放大器。这类放大器有较高的差分放大倍数和较高的输入阻抗。通常,它有正负两个对称的输入端,供双端输入或单端输入之用。正负两端的输入信号,可以相互折合。当两端输入相同的信号时,它不起放大作用或仅有很小的放大作用,这是差分放大的特点。

不同型号的集成运算放大器,其管脚编号也常有不同,但目前正趋于统一。图 1-1 a) 示出了趋于统一的集成运算放大器管脚编号(如 LF356 LF357 SF356 SF357 等)。一个集成运算放大器至少有七根管脚引出。一般,2 脚为负输入端(即反相端),3 脚为正输入端(即同相端),6 脚为输出端,4 脚为负直流电源端,7 脚为正直流电源端。正负直流电源一般在 $\pm 15\text{V}$ 左右(也有单电源供电的)。其余管脚供输入调零或相位补偿之用。图 1-1 b) 为 NE5534 A 低噪声运算放大器管脚示图。几个运算放大器装在一个集成块内的,有双运算放大器,四运算放大器等。LF347 四运算放大器的管脚编号如图 1-1 c) 所示。

运算放大器的功能是放大作用和负反馈作用相结合的情况下产生的。两种作用同时存在的系统称为闭环系统。图 1-2 为有负反馈的运算放大器电路原理图。图中 u_i (或 i_i) 为输入信号。 a_i 为输入传递系数(简称输入系数)。 Σ 为输入相加节点。 e_x 为在节点 Σ 叠加后的净输入微差信号。 A 为开环差动增益(简称开环增益)。 a_f 为输出至相加节点的反馈传递系数(简称反馈系数)。 u_f (或 i_f) 为输出信号。 a_f 至 Σ 的箭头旁的负号表明其负反馈性