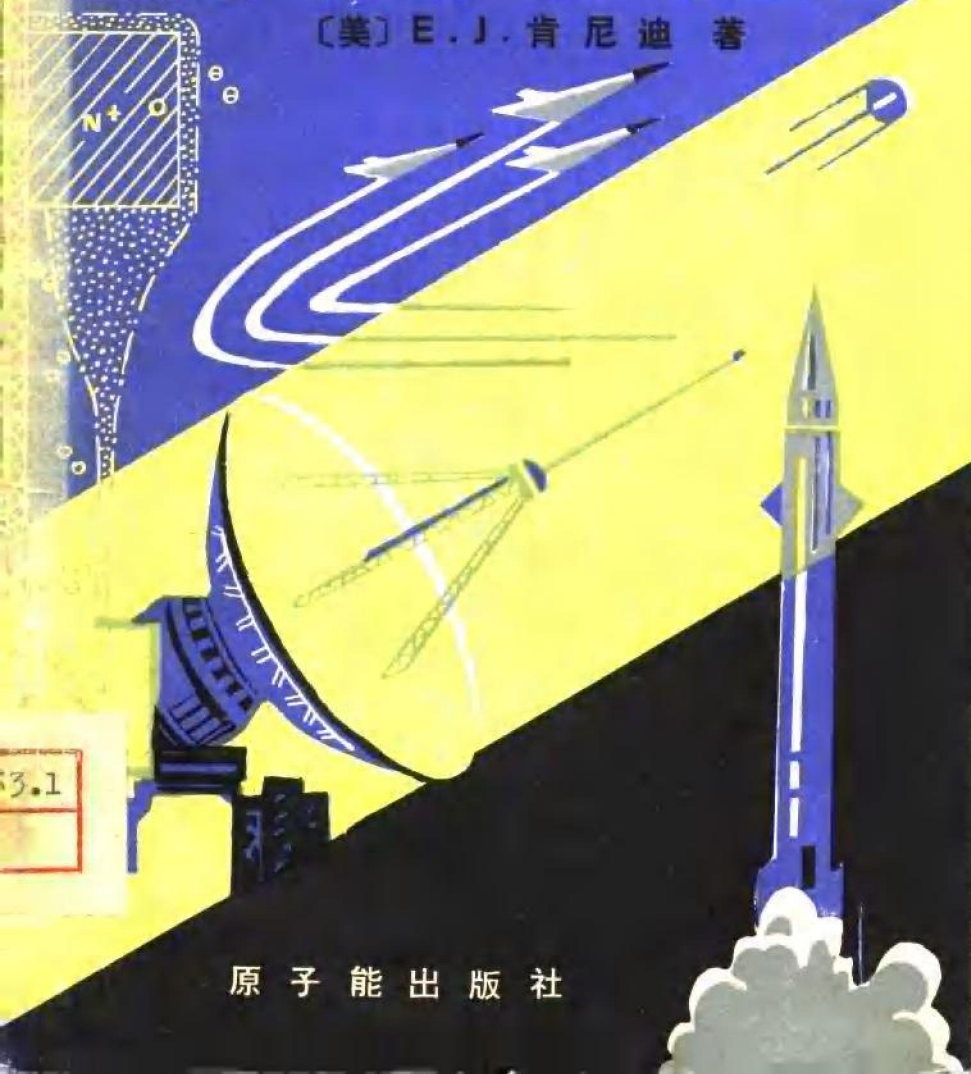


晶体管静电计基础

[美] E. J. 肯尼迪 著



原子能出版社

内 容 简 介

全书共分六章, 主要介绍了双极晶体管静电计、结型场效应晶体管静电计和MOS场效应晶体管静电计。对三种晶体管静电计的输入阻抗、输出阻抗、传递函数、输出失调电压、漂移特性、频率响应和噪声功率谱密度都进行了详细的数学推导, 并将推导出来的理论方程式用实验结果加以证实。书中列举了三台静电计的实例, 同时还提到了使用静电计应注意的问题和进一步研究晶体管静电计的建议。可供研制、生产和使用弱电放大器的科技人员, 高等院校教师以及大学高年级学生参考。

本书承蒙江钧基同志审阅, 特致谢意。

A Study of The Theoretical and Practical Limitations
of Low-Current Amplification by Transistorized
Current-Feedback DC Electrometers

E. J. Kennedy

ORNL-TM-1726, 1967

晶 体 管 静 电 计 基 础

[美] E. J. 肯尼迪 著

刘复水 译

陶国安 校

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

89920部队印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ ·印张 $7 \frac{1}{2}$ ·字数 172 千字

1981年3月第一版·1981年3月第一次印刷

印数 001— ·统一书号: 15175·238

定价: 0.98元

目 录

第一章 引言	(1)
1.1. 文献述评	(1)
1.1.1. 真空管直流静电计	(3)
1.1.2. 固体直流放大器	(6)
1.2. 概述	(8)
第二章 晶体管电流反馈直流静电计理论方程的推导	(9)
2.1. 基本的电流负反馈直流放大器	(9)
2.1.1. 电阻反馈情况下的传递函数 $e_o(s)/I_{\text{输入}}(s)$	(10)
2.1.2. 输入阻抗 $Z_{\text{输入}}(s)$	(14)
2.1.3. 输出阻抗 $Z_{\text{输出}}(s)$	(16)
2.2. 基本电流反馈放大器的改进	(18)
2.2.1. C_f 对电流反馈放大器的影响	(19)
2.2.2. 加快电流反馈放大器响应速度的方法	(22)
2.3. 基本电流反馈直流放大器的输出噪声功率谱密度	(24)
2.3.1. R_G 的输出噪声功率谱密度	(26)
2.3.2. R_f 的输出噪声功率谱密度	(28)
2.3.3. $\overline{e_n^2}$ 的输出噪声功率谱密度	(29)
2.3.4. $\overline{i_n^2}$ 的输出噪声功率谱密度	(31)

2.3.5. 放大器的总输出噪声功率	
谱密度.....	(32)
2.4. 电缆噪声问题.....	(34)
2.5. 晶体管负反馈直流放大器的漂移	
效应.....	(37)
2.5.1. 老化作用.....	(38)
2.5.2. 低频闪变噪声.....	(38)
2.5.3. 电源变化.....	(39)
2.5.4. 温度影响.....	(39)
2.5.5. 基本电流反馈直流放大器中	
漂移效应的理论分析.....	(40)
1. e_D 引起的输出漂移.....	(41)
2. i_D 引起的输出漂移.....	(41)
3. ΔA_v 引起的输出漂移.....	(41)
4. ΔR_f 引起的输出漂移.....	(42)
5. $\Delta V_{\text{电源}}$ 引起的输出漂移.....	(42)
6. 总输出电压漂移.....	(43)

第三章 硅双极晶体管及其在电流反馈直流静

电计中的应用.....	(44)
3.1. 双极晶体管的一般特性.....	(44)
3.1.1. 初步考虑.....	(44)
3.1.2. 小信号等效电路模型.....	(45)
3.1.3. 噪声特性.....	(49)
1. 噪声模型.....	(50)
2. 推导 $\overline{e_n^2}$ 和 $\overline{i_n^2}$	(53)
3.1.4. 温度特性.....	(58)

3.2.	双极晶体管差分放大器.....	(58)
3.2.1.	静电计中应用的改进型双极 晶体管差分放大级.....	(60)
3.2.2.	开环放大器的传递函数.....	(62)
3.2.3.	改进型差分输入级的 $\overline{e_n^2}$ 和 $\overline{i_n^2}$ 的推导.....	(66)
3.2.4.	改进型差分输入级的漂移方 程式.....	(68)
3.3.	电流反馈直流静电计中对输入级双 极晶体管的要求.....	(73)
3.3.1.	最小输入噪声的最佳发射极 电流.....	(75)
3.3.2.	选择发射极电流 I_E 的附加 因素.....	(81)
1.	增益、精度和输入电阻.....	(82)
2.	输出失调电压.....	(84)
3.	开环带宽.....	(84)
4.	允许的输出漂移.....	(85)
5.	小结.....	(89)

第四章 场效应晶体管及其在电流反馈直流静

	电计中的应用.....	(91)
4.1.	引言.....	(91)
4.2.	结型场效应晶体管.....	(97)
4.2.1.	理论方程.....	(97)
4.2.2.	小信号等效电路模型.....	(100)
4.2.3.	栅极漏电电流.....	(101)

4.2.4.	温度特性.....	(104)
4.2.5.	噪声特性.....	(106)
4.3.	金属-氧化物-半导体场效应晶体管.....	(109)
4.3.1.	理论方程式.....	(110)
1.	在恒定体电荷 Q_B 情况下, 漏极电流的方程式.....	(117)
2.	在非恒定体电荷 Q_B 情况下漏极电流方程式.....	(118)
3.	饱和区中实验的漏极电流特性.....	(119)
4.	饱和区外的 MOS 场效应晶体管的特性.....	(120)
4.3.2.	小信号等效电路模型.....	(122)
4.3.3.	栅极漏电电流.....	(123)
4.3.4.	温度特性.....	(127)
4.3.5.	噪声特性.....	(135)
4.3.6.	MOS 场效应晶体管的不稳定性.....	(141)
4.3.7.	改进 MOS 器件的可能性.....	(146)
4.4.	场效应晶体管电流反馈静电计的设计理论.....	(147)
4.4.1.	场效应晶体管差分放大级的等效输入噪声特性.....	(149)
4.4.2.	最小漂移设计.....	(151)
4.4.3.	频率响应考虑.....	(156)
4.4.4.	增益、精度和输入电阻.....	(156)

第五章 实验结果	(159)
5.1. 双极晶体管静电计.....	(159)
5.1.1. 电路设计.....	(159)
5.1.2. 开环频率响应.....	(164)
5.1.3. 输入电阻.....	(165)
5.1.4. 漂移特性.....	(166)
5.1.5. 噪声特性.....	(166)
5.1.6. 最小输入信号电流.....	(175)
5.2. 结型场效应晶体管静电计.....	(176)
5.2.1. 电路设计.....	(176)
5.2.2. 开环频率响应.....	(178)
5.2.3. 漂移特性.....	(179)
5.2.4. 噪声特性.....	(180)
5.2.5. 最小输入信号电流.....	(182)
5.3. MOS 场效应晶体管静电计.....	(186)
5.3.1. 电路设计.....	(186)
5.3.2. 开环频率响应.....	(188)
5.3.3. 漂移特性.....	(190)
5.3.4. 噪声特性.....	(190)
5.3.5. 最小输入信号电流.....	(192)
第六章 结束语	(196)
6.1. 小结.....	(196)
6.2. 进一步研究的几点建议.....	(198)
附录 A 数学推导	(201)
1. 根据 Nutt 模型推导 $\overline{e_n^2}$, $\overline{i_n^2}$ 和 γ	(201)
2. 双极晶体管差分级的 $\overline{e_{\Sigma}^2}$ 和 $\overline{i_{\Sigma}^2}$ 的	

推导.....	(203)
3. 方程式 (305) 和 (307) 的推导.....	(207)
(1) I_1 的估算.....	(208)
(2) I_2 的估算.....	(210)
(3) I_3 的估算.....	(210)
附录 B 测量仪器	(212)
1. 噪声测量系统.....	(212)
2. 双极晶体管 r'_b 的测量.....	(212)
3. 静电计电路使用的电池稳压电源.....	(215)
符号说明	(218)
参考文献	(224)

第一章 引言

1.1. 文献述评

近几年来，在电子学的发展中，一直存在着弱电流（小于 10^{-6} 安）的测量问题。自从发现核电离现象并试图对它进行测量之后，这个问题就更加重要了。其原因是因为探测器产生的总电离量与输出电路中积累的电荷直接有关，并在某一段时间内所要测量的电路中的电流是十分微弱的（通常仅在 10^{-8} — 10^{-14} 安范围内）。此外，在测定细胞膜的电位^[1-7]、测量半导体的反向漏电流、估计空间和高层大气的电离率^[8,9]以及为其他许多科学领域提供资料方面，也都需要精确地测量它们微弱的电流。

普通的直读式微安表和检流计的灵敏度只限于 10^{-7} — 10^{-10} 安^[10]的范围内，因此，需要采用电流放大的方法来提高信号电平，以便使用灵敏度稍差的指示器进行指示。

所有的直流放大器可分为以下两大类：第一类是把输入电流（电荷）转换成已知电阻两端的电压降。第二类是输入电流对放大器中一已知电容充电，然后观察放大器输出的漂移率。后者也可称为放电法^[11]。本书将集中讨论满足第一类要求的晶体管化电流反馈放大器。

各类放大器的简单结构如图1所示。图中：

A——放大器的增益。为了简单起见，设放大器有无限

大的输入电阻和无限宽的带宽;

C——总输入电容;

R——总输入电阻;

S_1, S_2 ——短路开关。

对于上述第一类放大器, 开关 S_1 和 S_2 开始是闭合的, 然后切断 S_1 , 则输入电压将按下式变化:

$$e_i(t) = IR(1 - e^{-t/RC}) \quad (1)$$

输出电压则为

$$e_o(t) = AIR(1 - e^{-t/RC}) \quad (2)$$

当 t 变得比 RC 大时, 则输出电压接近于 AIR 。因此, 这种测量的稳态精度与 A 和 R 有关。

对于上述第二类放大器, 初始条件是 S_2 切断, S_1 闭合。如果切断 S_1 , 输入电压变为

$$e_i(t) = 1/C \int_0^t I dt = It/C \quad (3)$$

输出电压将为

$$e_o(t) = I \left(\frac{At}{C} \right) \quad (4)$$

因此, 采用漂移率方法的电流放大器的测量精度取决于 A 、 C 和测量时间间隔 t 。

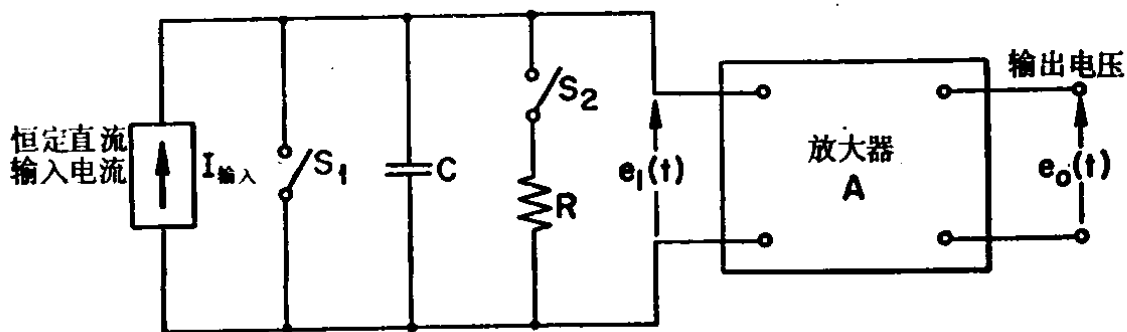


图 1 基本的直流放大器

在某些文献中，微弱电流直流放大器和“静电计”是同一个意思。Fairstein 将“静电计”定义为“它是用来测量十分微弱电流，而且其工作原理依赖于带电粒子与电场的相互作用的仪器”^[11]。在本书中，“微弱电流直流放大器”和“直流静电计”将按同一个意思来使用。

1.1.1. 真空管直流静电计

直到1950年，直流放大器的输入级中还使用着真空管。早期的一种静电计真空管电路如图 2 所示，它有很好的灵敏度。这种电路先由 Dubridge^[12] 研制成功，后在 1933 年由 Hafstad^[13] 作了改进。Hafstad 用一个经过挑选的 FP-54 型静电计管，在几分钟的时间内，能检测出 3×10^{-19} 安的电流（2 电子/秒）。然而，只有在实验室条件下，这电流才是有用的。因为栅极和灯丝电压挑选过于严格，并涉及许多电池，要把这种电路的漂移调到很小是特别困难的。

Wynn-Williams^[14] 研制了一种双管差分电路，这是漂移特性较好的早期电路。

绝大部分的早期电路都使用灵敏的检流计作为输出指示器，这样，从输出信号达到读数前的平衡，只需要几分钟的时间。

近代的一些静电计管电路的测量能力，一般不如 Hafstad 等人的早期电路好。使用现代静电计管的电流反馈放大器，所能得到的典型灵敏度是 10^{-13} — 10^{-14} 安。现代的和早期的电路之间灵敏度的差异，主要是由于静电计管的质量变坏引起的。早期的 FP-54 型静电计管工作在栅极电流低至 10^{-17} 安，并且管子具有良好的低噪声特性。目前所能买到的静电计管（例如 5886 型和 5889 型静电计管）、其典型的

栅极电流为 10^{-14} 安，而且噪声特性比 FP-54 型静电计管差得多。静电计管性能下降的主要原因是：（1）政府军事部门要求大量价廉的管子，促使制造商采取大规模生产技术，因而管子的质量下降；（2）制造高质量真空管工艺有经验人员的失散、转业和裁减，造成了管子性能的普遍下降。

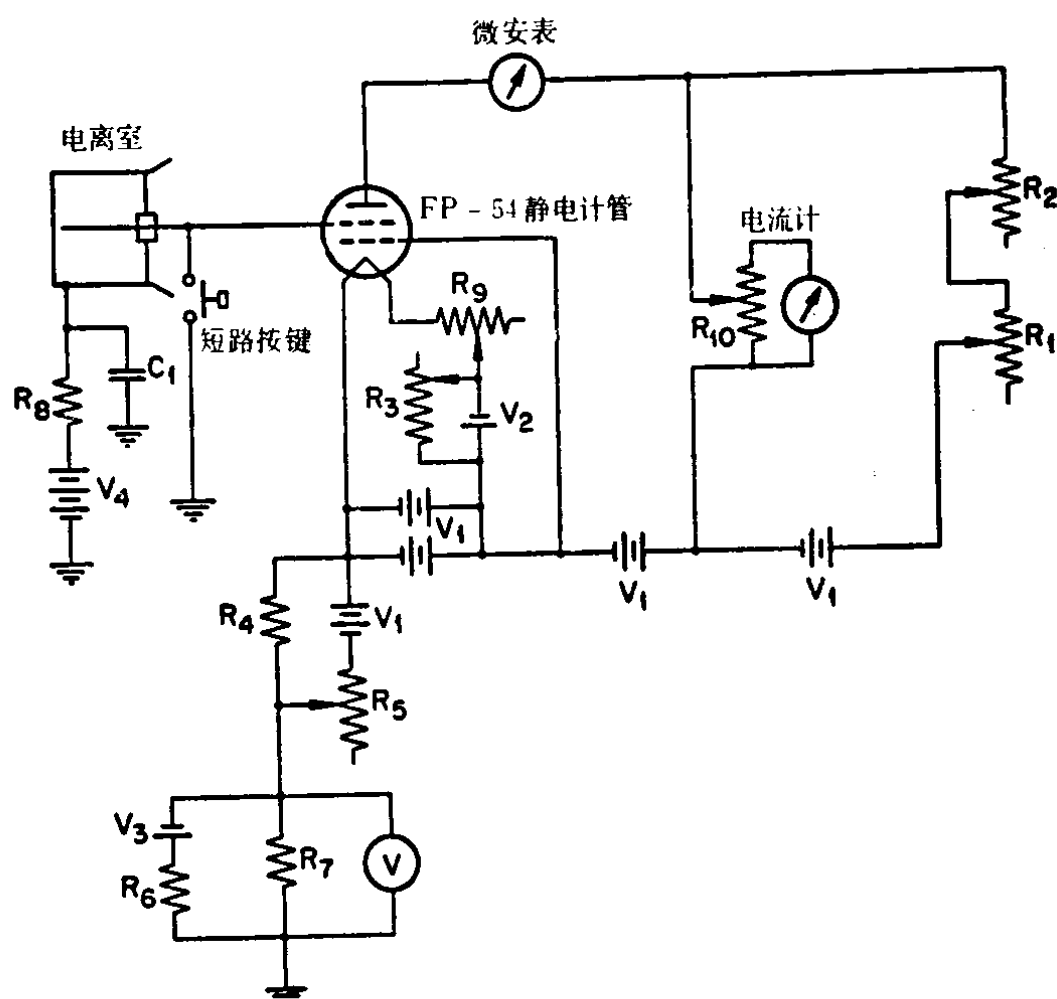


图2 Dubridge 和 Hafstad 使用的静电计真空管电路

绝大部分现代的真​​空管电路都使用负反馈，以稳定增益、改进放大器线性、降低管子内部的老化效应和改善电路的响应速度。在参考文献[10]、[15]、[16]和[17]中，介绍

了几种优良的真空管负反馈静电计电路。在参考文献[11]和[18—25]中，介绍了真空管电流反馈直流静电计电路的主要方程式的一般推导。Eckhardt^[10]、Ustinova^[26]、Böhm^[27]、Kandiah 和 Brown^[28] 以及 Kessler^[29] 的论文对真空管直流放大器作了较好的论述。

比基本的电流反馈直流放大器漂移小得多的另一种真空管电路是振动电容（或称动电容）静电计。该类静电计的基本工作原理，可参见图 3。如果时间常数 $R_1\bar{C}$ 和 R_gC_g 都比 $1/\omega_v$ 大，则交流放大器的噪声和漂移就落在输入通带之外。这是振动电容系统的漂移特性比基本电流反馈直流放大器电路好得多的主要原因。

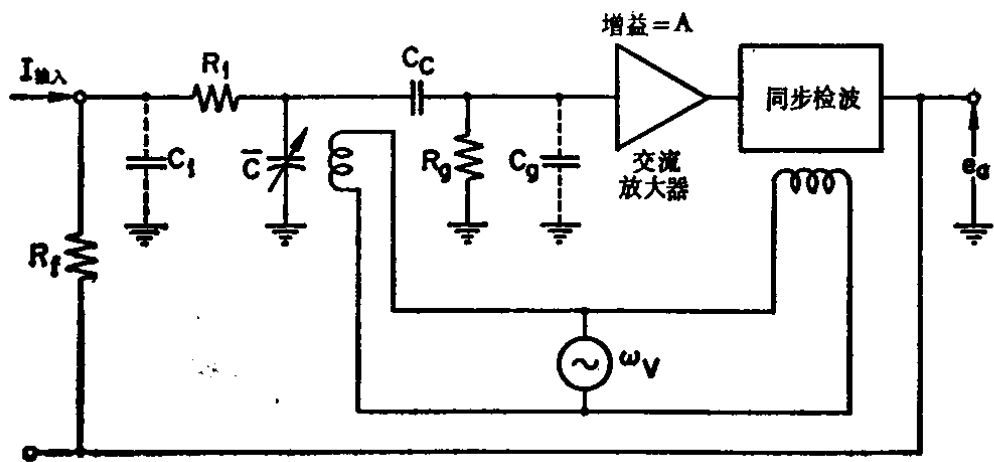


图 3 振动电容静电计原理图

- C_1 ——包括信号源电容和杂散电容在一起的输入电容；
- R_1 ——隔离电阻；
- $\bar{C}$ ——动电容的平均值；
- C_c ——耦合电容；
- R_g ——放大器输入电阻；
- C_g ——放大器输入电容；
- R_f ——反馈电阻；
- A ——放大器的开环电压增益；
- ω_v ——振动电容角频率（弧度/秒）。

图 3 中的电路是调制积累在电容 $\bar{C}$ 上的电荷 进行工作

的，其调制频率为 ω_v 。这样，就产生了频率为 ω_v 的正弦电压。这电压经交流放大器放大，并在输出端上进行同步解调。直流输出电压 e_0 是以这样一种状态反馈到输入端的，即它使加到放大器的输入电压减少。为了得到良好的直流变交流的转换效率，通常要求 $\bar{C} \approx C_c$ ， $R_g \gg R_i$ 以及尽可能小的 C_g 和 C_i 。 C_c 的典型值为 10—50 微微法。

Palevsky 等^[30] 设计和分析了一种能检测 10^{-15} 安电流和输出漂移为 0.1 毫伏/天的振动电容静电计。类似于这种类型的其它静电计可参见参考文献 [31—36]。Ritsma^[37] 研制了一台静电计，他使用振动相位相反的两个振动电容来消除转换的低频栅极噪声。作者用这台仪器在测量时间间隔为 13 秒时，可检测到 125 个电子的电荷。

振动电容静电计虽然比基本的电流反馈直流放大器的灵敏度高得多，但在现场实际应用时，它有两个严重的缺点：(1) 加工动电容的费用高，使得仪器的成本比简单的真空管直流放大器高几倍；(2) 由于电容器极片的振动频率限制在低频，又加上要求 $R_g C_g$ 和 $R_i \bar{C} \gg 1/\omega_v$ ，所以系统的响应速度比电流反馈真空管直流放大器慢得多。

1.1.2. 固体直流放大器

从 1949 年出现晶体管以来，设计人员就在直流放大器中使用了这些器件，而且获得了不同程度的成功。与真空管相比，晶体管放大器具有不少固有的优点。晶体管比较坚固，不需要灯丝电流，适用于小的封装体积，耗电低，而且不像真空管那样，它对微音效应不敏感。

在一些文献中，已发表了一些固体弱电流直流放大器。有些较好的放大器使用了硅二极管，并接成电桥形式。直流

输入信号加在电桥的两个端子上，交流振荡器的电压加在电桥的另外两个端子上。当加入直流输入信号时，便改变了反向偏置硅二极管的耗尽层的电容。从而，在电桥输出端上产生一个正比于直流输入信号的交流不平衡电压。Keonjian 和 Schmidt^[38] 用这种类型的装置测出了 10^{-10} 安的直流电流。其他作者^[39-43] 曾研制出了类似的调制电路。Hutchins 和 Delord^[44] 使用了试验性金属-氧化物-半导体二极管，研制出了可检测 10^{-15} 安的二极管调制电路。

Chaplin 和 Owens^[45] 在 1957 年发表了第一台晶体管化斩波调制的直流放大器。这种放大器利用晶体管来脉冲调制低频输入信号。这种电路具有 10^{-9} 安的短期测量能力。May 和 Dandl^[46] 在某些 2N338 型硅晶体管中，发现了不寻常的弱电流放大现象，并利用这种效应设计了可放大输入电流为 10^{-11} 安的晶体管直流静电计。

近来，直流静电计电路已采用场效应晶体管作为输入器件。Fein^[3] 在电路上使用了一个处于研制阶段的 RCA TA2330 型绝缘栅场效应晶体管，结果可检测 10^{-12} 安的电流。Kopp 和 Nutt^[47] 设计了一台能测量 10^{-11} 安的静电计，在这个电路的输入级中，使用了一个 FSP-401 型结型场效应晶体管，并把管子的漏极电流偏置在输出电流随温度的变化等于零的地方。Kopp 和 Nutt 还确定了一些对放大器有意义的时间常数。McCaslin^[48] 发现使用场效应晶体管静电计能获得最佳灵敏度。他在简单放大电路中采用了低泄漏绝缘栅场效应晶体管，使这个电路能够测量 10^{-15} 安的核电离电流。

上述文献介绍了大部分的实验结果。目前，有关晶体管直流静电计测量极限的设计理论尚无大的发展。

1.2. 概 述

本书的目的:

(1) 提出晶体管化电流反馈静电计的理论方程, 以便确定基本的灵敏度极限。

(2) 用提出的理论方程, 来发展双极晶体管和场效应晶体管静电计的设计理论, 并确定每种静电计的最小可放大输入直流电流。

本书其余部分分成五章阐述。

第二章从理论上分析了电流反馈直流静电计的基本灵敏度极限。其中主要考虑漂移、噪声、增益、输入阻抗、输出阻抗、频率带宽和电缆起伏。

在第三章中, 为了研究静电计在输入级中使用双极晶体管的设计要求, 利用了第二章中提出的方程式, 并提出了在低发射极电流下工作的双极晶体管的特性曲线。

第四章论述了结型和金属-氧化物-半导体场效应晶体管的详细理论和实验分析。金属-氧化物-半导体器件的理论被扩展到栅极漏泄电流和温度特性方面。本章提供了输入级采用场效应晶体管的静电计的一般设计理论。

第五章把前几章的理论分析与实验联系起来, 给出了三种电流反馈直流静电计的实际电路, 并得到了理论上和实验上的最小输入信号电流。

第六章是本书的总结, 并提出了在晶体管化弱电流直流放大器领域内进一步研究的建议。

书后附录包括详细的数学推导和实验测量用的主要仪器。

第二章 晶体管电流反馈直流静电计理论方程的推导

在这一章里，分析了晶体管弱电流直流放大器的基本灵敏度极限。着重考虑了增益、噪声、频率响应、漂移和输入电缆起伏的影响。

这里，仅限于推导一般电流反馈直流静电计的方程式。在第三和第四章中，这些方程式要进一步扩展到估算在电流反馈放大器中用作输入级的双极晶体管与结型和绝缘栅型（金属-氧化物-半导体）场效应晶体管的静电计性能。

2.1. 基本的电流负反馈直流放大器

基本的电流负反馈直流放大器的一般原理如图 4 所示。假定放大器在未施加负反馈时，在频率 $\omega = \omega_0$ 处有一个起主要作用的时间常数（即在左半边复平面上有一个极点）。如果不是这种情况，则由于外加输入时间常数 $R_i C_i$ 的影响，放大器在加上反馈后很易起振。

图 4 所示放大器的复数频率平面的电路矩阵可写为

$$\begin{pmatrix} I_{\text{输入}}(s) \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{R_g} + \frac{1}{Z_f} + \frac{1}{R_i} + sC_i & -\frac{1}{Z_f} \\ -\left(\frac{1}{Z_f} - \frac{A_v}{r_o}\right) & \frac{1}{R_L} + \frac{1}{Z_f} + \frac{1}{r_o} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_1 \\ e_o \end{pmatrix} \quad (5)$$