

仪表元件丛书

自动平衡仪表放大器



仪表元件丛书

自动平衡仪表放大器

朱长龄 编



机械工业出版社

本书论述了自动平衡仪表放大器的基本原理和特点、放大器的噪声和干扰来源及其抑制的方法，还对这类放大器的各种电路进行详细分析，并对高灵敏度、高性能的放大器作了重点介绍。

本书可供从事仪器仪表工作的工程技术人员和工人阅读，也可供有关大专院校师生作参考。

仪表元件丛书
自动平衡仪表放大器
朱长龄 编

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可出字第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 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $6 \frac{1}{2}$ · 字数 142 千字

1982年6月北京第一版·1982年6月北京第一次印刷

印数 0,001—8,000 · 定价 0.62 元

*

统一书号：15033·5278

出版者的话

仪器仪表是实现四个现代化必不可少的技术装备，而仪器仪表元件（简称仪表元件）是仪器仪表中具有独立功能的最基本的单元，它是仪器仪表的基础，能完成信号的检测、传递、转换、放大、贮存、运算、控制和显示等功能。仪表元件的品种和质量直接影响着仪器仪表的性能。

目前，仪器仪表已广泛应用于国民经济各部门。为了适应仪器仪表工业发展的需要，进一步做好仪表元件基础知识的普及工作，在国家仪器仪表工业总局的直接关怀下，我们编辑出版了这套《仪表元件丛书》。

本丛书预定为十一分册，分别为《热敏电阻器》、《集成电路在仪器仪表中的应用》、《半导体光电器件》、《宝石支承》、《仪表齿轮》、《金刚石压头》、《数据采集系统中的放大器》、《磁电转换元件》、《自动平衡仪表放大器》、《自动平衡仪表电机》、《集成运算放大器》等，将陆续出版。

本丛书以介绍各类仪表元件的结构原理、特性、设计计算为主，对制造工艺、性能测试和应用知识也作了简单的阐述。在写法上，力求通俗易懂，深入浅出，从基础概念出发，对仪表元件的有关问题进行论述。

值此《仪表元件丛书》出版之际，我们向为丛书的编写做了大量组织、指导工作的沈阳仪器仪表工艺研究所的领导及从事具体工作的王崇光、董世章等同志表示深切的谢意，并向大力支持丛书编写的各有关单位领导及编者，表示衷心的感谢。

目 录

第一章 放大器在自动平衡仪表中的功能及其特点	1
第一节 自动平衡仪表的工作原理简介	1
一、原理框图	1
二、自动平衡仪表的系统分析	2
第二节 放大器的性能及其特点	6
一、放大器的放大系数	6
二、放大器的抗干扰性能	8
三、放大器的零点移动和零点漂移	8
四、放大器的放大系数稳定性及输出波形	10
五、放大器的动态性能	11
六、放大器的相位移	12
七、放大器的输入电阻及输出电阻	12
第三节 放大器的类型	16
一、用于交流伺服电机的放大器	16
二、用于直流伺服电机的放大器	17
三、用于交流伺服电机的高频调制型放大器	18
第二章 放大器的噪声及干扰	21
第一节 噪声的分类及由来	21
一、热噪声	21
二、低频噪声	22
三、散粒噪声	23
第二节 晶体三极管的噪声及其参数选择	24
一、噪声源图	24
二、晶体三极管的总噪声	25
三、噪声系数与参数选择	27
第三节 场效应晶体管的噪声及其参数的选择	30

一、场效应晶体管的噪声等效图	30
二、噪声系数与参数选择	31
第四节 电阻器的噪声	34
一、电阻器的噪声来源	34
二、电阻器的噪声指数	35
三、常用的电阻器噪声指数	36
第五节 干扰的来源及其消除措施	38
一、外来的干扰及其消除	38
二、放大器内部的干扰及其消除	47
第三章 放大器的输入装置	54
第一节 机械式振动变流器的输入装置	54
一、机械式振动变流器的工作原理	54
二、振动变流器与输入变压器组成的输入装置	57
三、输入变压器	64
四、输入装置的输入阻抗	67
第二节 晶体二极管或三极管作斩波器的输入装置	70
一、晶体二极管作斩波器的输入装置	70
二、晶体三极管作斩波器的输入装置	72
第三节 场效应晶体管作斩波器的输入装置	74
一、场效应晶体管的工作原理	74
二、场效应管斩波器的线路分析	80
三、消除尖峰噪声的方法	96
第四节 光敏电阻作斩波器的输入装置	99
一、工作原理	99
二、光敏电阻斩波器的特性	100
第四章 直流伺服电机用的放大器	102
第一节 高频调制型放大器	102
一、概述	102
二、交流放大	107

三、相敏解调器	126
四、直流放大及功率放大	134
五、振荡源	138
第二节 光敏元件调制的放大器	146
一、光电斩波器及平衡线路	146
二、差动放大部分	147
三、电压放大部分	151
四、功率放大-解调器	152
五、氖泡驱动器	154
第三节 直流无调制的放大器	154
一、放大器的组成	155
二、放大器的特点	157
三、放大器的原理图	160
第五章 交流伺服电机用的放大器	162
第一节 JF-12型放大器	162
一、交流放大部分的特点及元件的作用	162
二、相敏功率放大部分	169
三、抗干扰措施及放大器的主要性能	176
第二节 交流伺服电机用的高频调制型放大器	180
一、概述	180
二、工频调制-功率放大	188
三、速度反馈线路	192
四、放大器的供电电源及其屏蔽结构	199
参考文献	202

第一章 放大器在自动平衡仪表中的功能及其特点

第一节 自动平衡仪表的工作原理简介

一、原理框图

在研究放大器之前，先来了解一下自动平衡仪表的工作原理，其原理框图见图 1-1。

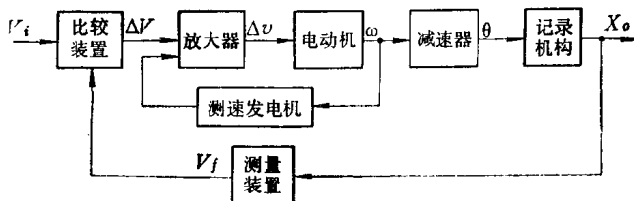


图1-1 自动平衡仪表的原理框图

被测输入信号 V_i 是一个电量或是由非电量转换器来的电量，加到比较装置上。将 V_i 的电压值与测量装置的输出电压 V_f 比较后，在比较装置的输出端产生一个差值信号 ΔV （测量装置通常是一个桥接测量电路或为一个电位计式的测量电路，用一个直流或者交流电源供电，还包含有平衡元件）。将 ΔV 加到放大器上，经放大后的信号 Δv 加到电动机上，使电动机的转动通过减速器后带动仪表的记录机构，并带动测量装置里的平衡元件，以改变其位置，使测量装置的输出电压 V_f 与被测的输入信号 V_i 相等（或接近相等）。当比较装置的输出差值信号为零（或为很小值）时，电机停

止转动，测量装置达到了平衡。记录机构所移动的距离 x ，与被测的输入量 V_i 成比例，从而实现了对被测输入量 V_i 的记录或指示。当被测输入量为一动态过程，则测量装置里的平衡元件将跟踪被测输入量的变化，这就实现了对动态输入量的记录或指示。因此，自动平衡仪表是一个随动系统，也可称为伺服系统。放大器在此系统中的作用是把比较装置的输出差值信号放大到足够的功率，以使电动机带动仪表的记录机构，并使测量装置达到平衡。这种系统里的放大器可称为伺服放大器。

此外，为保证整个系统的稳定性以及改善系统的动态性能，往往在系统中引入电机的转速反馈或者是差值信号变化速度反馈。前者为图 1-1 中的测速发电机，后者常由无源超前网络所组成。

这类仪表的输入信号有的是直流变化信号，也有的是以某一载频的交流变化信号。相应地，测量装置里的测量电路有的用直流电源供电，有的就以载频的交流电源供电。本书所讨论的放大器只限于输入信号为直流变化的那类平衡仪表。

二、自动平衡仪表的系统分析

如上所述，自动平衡仪表是一个随动系统。为了进一步了解放大器的特点，这里对系统作一简单的分析。把系统的每一环节列出其传递函数，图 1-2 为用传递函数表示的系统框图，为分析方便，框图中略去了测速发电机的反馈。

图 1-2 中：

$W_1(s)$ 为放大器的传递函数。由于放大器不可避免地有输入滤波器，或者放大器级间有耦合变压器组成的调谐放大，或者电机控制绕组两端并有谐振电容以滤去高次谐波，因此，

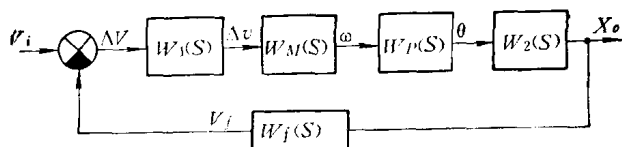


图1-2 系统的框图

放大器实际上是一个惯性环节。

$$W_1(S) = \frac{K_1}{T_1 S + 1} \quad (1-1)$$

式中 K_1 ——放大器的放大系数；

T_1 ——放大器的时间常数。

$W_M(S)$ 为电动机带负载时的传递函数，系一惯性环节。

$$W_M(S) = \frac{K_M}{T_M S + 1} \quad (\text{弧度/秒/伏}) \quad (1-2)$$

式中 K_M ——电动机带负载时的速度系数；

T_M ——电动机带负载时的时间常数。

$W_P(S)$ 为减速齿轮的传递函数，系一积分环节。

$$W_P(S) = \frac{K_P}{S} \quad (1-3)$$

式中 K_P ——减速系数。

$W_2(S)$ 为记录机构的传递函数。

$$W_2(S) = K_2 \quad (\text{毫米/弧度}) \quad (1-4)$$

$W_f(S)$ 为测量装置的传递函数。

$$W_f(S) = K_f \quad (\text{伏/毫米}) \quad (1-5)$$

系统的开环传递函数：

$$\begin{aligned}
 W(S) &= W_1(S) \times W_n(S) \times W_p(S) \times W_2(S) \times W_f(S) \\
 &= \frac{K_1 K_m K_p K_2 K_f}{(T_1 S + 1)(T_n S + 1)S} \\
 &= \frac{K}{S(T_1 S + 1)(T_n S + 1)} \quad (1-6)
 \end{aligned}$$

由式 (1-6) 可知, 这个系统的开环传递函数是一个三阶系统。这里所讲的系统开环是指在比较环节处将反馈断开, 所以, 开环传递函数就是反馈电压与输入电压之间的关系式。因此, 最方便的方法是采用系统的开环对数幅频特性以及系统的开环相频特性来分析这个系统的性能。

图 1-3 为系统的开环对数幅频特性 $LA(\omega)$ 和系统的开环相频特性 $\varphi(\omega)$ 示意图。

图中, 当放大器具有较大的时间常数 T'_1 时, 对数幅频特性和相频特性用实线表示。可以看出, 由于放大器的时间常数 T'_1 与电机的时间常数 T_n 为同一数量级, 因此, 对数幅频特性以 -60 分贝/10 倍频的斜率穿过零分贝线, 与零分贝这点相对应的附加相位滞后是大于 180° , 说明此系统闭环后将由负反馈变成为正反馈, 系统必然是不稳定的。要使系统稳定并达到较佳的动态性能, 就需要加几个校正网络。当放大器具有一个小的时间常数 T''_1 时, 对数幅频特性和相频特性用虚线来表示。图中所示的 T''_1 要比 T'_1 小一个数量级, 对数幅频特性是以 -40 分贝/10 倍频的斜率穿过零分贝线, 与零分贝这点相对应的附加相位滞后小于 180° , 说明此系统在闭环后仍为负反馈, 所以系统是稳定的。只要加一简单的校正网络就可使系统达到较佳的动态性能。此外, 当放大器的时间常数为 T''_1 , 而放大器的放大系数 K_1 增大时, 则整个系统的传递系数 K 就增大, 对数幅频特性的形状不变而只是向上

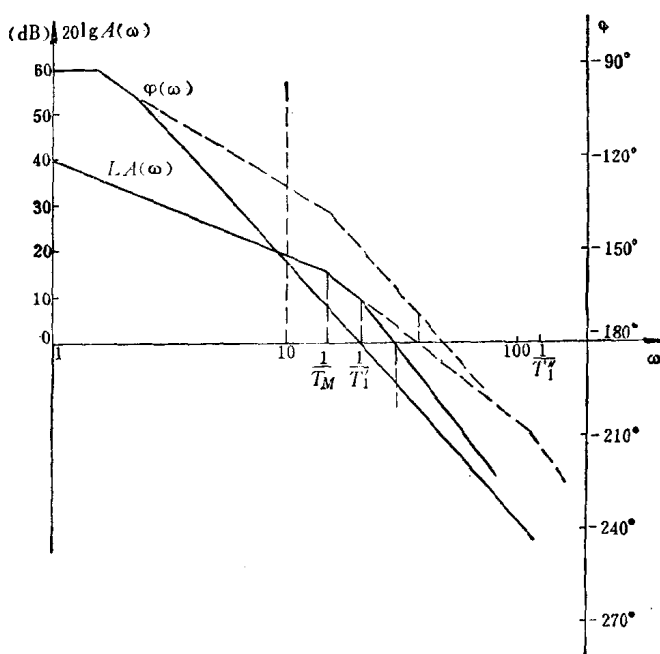


图1-3 系统的频率特性

移动，相频特性的形状及位置仍保持不变。因此，对数幅频特性与零分贝线的交点就向右移动，相应的附加相位滞后就会大于 180° ，使系统成为不稳定。所以放大器的放大系数增大对系统的稳定性是不利的。同样，如果放大器的放大系数减小，则整个系统的传递系数 K 就减小，对数幅频特性向下移，与零分贝线的交点就向左移动，相应的附加相位滞后将比 180° 小很多，系统是稳定的，而且在不加任何校正的情况下可以得到较佳的动态性能。

以上对系统的简单分析，说明了自动平衡仪表放大器的

放大系数以及时间常数对整个系统的影响。在设计这类放大器时，除了考虑其放大系数以外，还必须考虑它的动态性能，即放大器的时间常数。此外，往往要引入电机的转速反馈或差值信号变化速度反馈来对系统的特性进行校正，以达到系统的稳定及最佳的动态性能。

第二节 放大器的性能及其特点

自动平衡仪表的优点在于被测信号 V_i 在比较装置中自动地达到平衡以便进行指示或记录。因此，仪表具有精确度高、灵敏度高即仪表的全量程电压小等特点。此外，仪表还应具有好的动态性能，即仪表的快速性和好的过渡过程的形状等。而仪表这些静态性能及动态性能在很大程度上取决于放大器的性能。

一、放大器的放大系数

1. 放大器的放大系数与仪表的静态性能

要使仪表达到一定的静态性能，即一定的精确度和灵敏度，放大器就必须具有足够高的放大系数，也就是要有足够小的灵敏阈。放大器的灵敏阈是使放大器的输出端产生区分于噪声和干扰、使电机克服机械传动部分的摩擦力而动作的最小输入电压值。仪表的精确度，即仪表的相对误差是由系统中的很多因素决定的。如果认为系统中测量装置里的平衡元件（常用的是测量电位器）是理想线性的话，则仪表的精确度主要取决于仪表的不灵敏区。所谓仪表的不灵敏区是指当仪表的输入电压 V_i 在不大的范围内变化时，比较装置的输出差值信号不足以使放大器驱动电机转动，这个输入的电压 V_i 变化的范围称为仪表的不灵敏区。

以 V_r 表示放大器的灵敏阈，则仪表的不灵敏区最大值

V_e 可用 V_r 来表示:

$$V_e = \frac{2V_r(R_B + R_{in})}{R_{in}} \quad (1-7)$$

式中 R_B ——测量装置的内阻 (包括信号源内阻);

R_{in} ——放大器的输入电阻。

V_r 可由下式表示:

$$V_r = \frac{M_r}{K_{MG}K_l} \quad (1-8)$$

式中 M_r ——电机带负载时的起动力矩 (克·厘米);

K_{MG} ——电机的力矩系数 (克·厘米/伏);

K_l ——放大器的放大系数。

因此, 仪表的精确度, 即相对误差为:

$$\frac{V_e}{V_m} = \frac{2M_r(R_B + R_{in})}{K_{MG}K_lV_mR_{in}} \quad (1-9)$$

式中 V_m ——仪表的全量程电压值。

当 $R_{in} \gg R_B$ 时, 则

$$\frac{V_e}{V_m} = \frac{2M_r}{K_{MG}K_lV_m} \quad (1-10)$$

由式 (1-10) 可知, 仪表的全量程电压值一定时, 相对误差随着放大器的放大系数增大而减小; 同时, 在仪表的全量程电压值减小时, 要达到一定的相对误差, 就必须提高放大器的放大系数。

2. 放大系数的确定

实际上仪表的相对误差还受到系统中其它非线性的影响, 因此, 放大系数不是完全由式 (1-10) 来确定。但是, 放大器的放大系数也不是愈大愈好。从上节对系统的分析可知, 过大的放大系数对系统的稳定性是不利的, 要根据仪表

的相对误差来确定适当的放大系数。因此，对相对误差为 $\pm 0.5\%$ 的仪表，放大器的灵敏阈一般规定为仪表全量程电压值的 $\pm 0.1\%$ 。如全量程电压值为20毫伏，则放大器的灵敏阈 V_r 为 ± 20 微伏。有的仪表全量程电压值只有几毫伏，甚至小于1毫伏，那末就要求放大器的灵敏阈只有几微伏，甚至小于1微伏。放大器所驱动的电机起动电压在零点几到几伏的范围内，由电机本身的性能以及仪表记录机构的摩擦力矩大小、减速比的大小而定。因此，从放大器的通用性来考虑，就要求放大器的放大系数在 $10^5 \sim 10^6$ 。而且要有足够的余量，以便调节放大系数来配合系统中其它各元件的参数，获得良好的性能。

二、放大器的抗干扰性能

放大器的放大系数很高，在输入信号为微伏级时就会使仪表的记录机构动作。但仪表所处的周围环境不可避免地存在着各种干扰信号，如工频的电磁耦合，静电耦合所引入的干扰信号，检测传感元件对地的漏电或者地电阻所引入的所谓共模干扰，以及周围电器用具的火花干扰等。同时，仪表内部也存在着工频的电磁、静电耦合的干扰信号和放大器内部的噪声及其它形式的干扰等。这一系列的干扰对放大器来说都是无用的信号，但是它的幅值往往比放大器的灵敏阈大许多倍，如进入放大器将破坏放大器的正常工作，使仪表产生很大的附加误差。严重时，干扰信号将会完全淹没有用信号，使放大器被干扰信号所饱和，致使仪表完全失灵。因此，要求放大器必须具有很强的抗干扰能力及很低的内部噪声。

三、放大器的零点移动和零点漂移

1. 零点移动和零点漂移

在自动平衡仪表中，放大器通常是采用直流调制型放大

器，因为输入的是直流信号，如采用一般的直流放大器，这样高的放大系数，放大器的零点移动及零点漂移将是很严重的。采用了直流调制型放大器后虽然可使放大器的零点移动和零点漂移减小到最低程度，但是，仍然不可避免地存在着零点移动及零点漂移。

所谓零点移动，是指放大器在输入电压为零时，输出端有一恒定的输出电压使电机带动负载而转动。如在放大器的输入端上加一电压就能补偿这一输出电压（使输出电压最小）而使电机停转。我们把为补偿这种恒定输出电压而加到输入端的电压称为零点移动电压，也称为放大器的不平衡电压。零点移动反映在仪表上是指针或记录笔移动一段距离，造成了仪表的零点偏移。但是，这种恒定的偏移是能够补偿的。

所谓零点漂移，是指放大器在输入电压为零时，输出端有一幅度缓慢变化的输出电压使电机带动负载而转动。我们把为补偿这种输出电压（使输出电压最小）而加到输入端上的电压称为零点漂移电压。所以零点漂移电压是变化的，也可称为放大器零点移动电压的变化量。零点漂移反映在仪表上是指针或记录笔单调地往一边移动或者是具有在某一平均值附近的随机特性，因此，是不能加以补偿的。

2. 零点漂移对仪表精确度的影响

如在所观察（或记录）的时间内，零点漂移的最大值为 V_d ，则将引起附加误差 V_d/V_m 。如果用 δ 表示仪表相对误差的最大允许量，则

$$\frac{V_e}{V_m} + \frac{V_d}{V_m} = \frac{2V_r(R_{in} + R_s)}{V_m R_{in}} + \frac{V_d}{V_m} < \delta \quad (1-11)$$

由式(1-11)看出，在仪表的全量程电压给定时，放大器的零点漂移和灵敏阈决定着仪表可达到的相对误差值。而在

给定的相对误差情况下，则将决定着仪表的最小全量程值。将式(1-8)的 V_r 代入式(1-11)便可获得选择最小全量程值 V_m 的条件：

$$(V_m)_{\min} > \frac{V_d}{\delta} + \frac{2M_r(R_{in} + R_s)}{K_{MG}K_1R_{in}\delta} \quad (1-12)$$

因此，在给定的相对误差情况下，仪表的最小全量程值在很大程度上将取决于放大器的参数。

所以，在设计平衡仪表放大器时，除了考虑放大器的零点移动外，还应考虑放大器的零点漂移。放大器的零点移动及零点漂移主要取决于放大器输入装置的性能，如输入装置内的接触热电势、电磁、静电耦合，电容器的电荷积累等内部噪声，以及输入装置的抗干扰性能等。

四、放大器的放大系数稳定性及输出波形

由于仪表是一个闭环系统，放大器对差值信号进行放大，并起着置零机构的作用。所以，对放大系数的稳定性没有较严格的要求，而只要求放大器的灵敏阈在所需的范围内。对这类放大器，主要考虑的是灵敏阈及最大输出电压。仪表的静态精确度取决于放大器的灵敏阈，而仪表的快速作用将取决于放大器的最大饱和输出电压。至于从起动电压到最大输出电压之间的放大器特性并不要求是线性的，这点与一般的电测放大器是有区别的。

对放大器的输出波形没有严格的要求，因为波形有点失真对负载没有什么影响。放大器的负载是伺服电机。对于交流伺服电机，电机的一个绕组是控制绕组，接在放大器的输出端上。电机的另一个绕组是励磁绕组，通过一移相电容接到电网电压上，如图 1-4a) 所示。电容器 C 的选择使控制绕组的电流 i_y 与励磁绕组的电流 i_s 之间的相位移为 90° ，如图