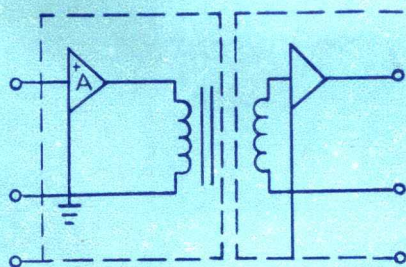


数据放大器

《数据放大器》编译组



天津电气传动设计研究所

毛主席语录

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

对于外国文化，排外主义的方针是错误的，应当尽量吸收进步的外国文化，以为发展中国新文化的借镜；盲目搬用的方针也是错误的，应当以中国人民的实际需要为基础，批判地吸收外国文化。

学习有两种态度。一种是教条主义的态度，不管我国情况，适用的和不适用的，一起搬来。这种态度不好。另一种态度，学习的时候用脑筋想一下，学那些和我国情况相适合的东西，即吸取对我们有益的经验，我们需要的是这样一种态度。

owlife

编 译 说 明

无产阶级文化大革命的伟大胜利，有力地推动了我国社会主义建设事业的飞跃发展，一个工农业生产的新高潮正在蓬勃兴起。随着我国科学技术和工业自动化的迅猛发展，电子计算机的研制和应用的单位愈来愈多。作为控制计算机的外围设备之一的数据放大器，其研制和生产的单位也日益增加。

为了配合这一工作，我们收集了资本主义国家中几种数据放大器的技术资料，作为从事控制计算机外围设备研制和生产的工人和革命技术人员参考。对于这些资本主义国家的技术资料，用毛泽东思想武装起来的我国人民，遵照毛主席“一切外国的东西，如同我们对于食物一样，必须经过自己的口腔咀嚼和胃肠运动，送进唾液胃液肠液，把它分解为精华和糟粕两部分，然后排泄其糟粕，吸收其精华，才能对我们的身体有益，决不能生吞活剥地毫无批判地吸收。”的伟大教导，完全能够批判地吸收其中有益的东西，破除迷信，解放思想，勇于创新，走自己工业发展的道路，在高精度直流放大器方面作出自己的贡献。

由于我们学习毛泽东思想不够，并缺少实际经验，资料收集不齐全，在编写过程中，虽作了必要的删节，仍难免有缺点、错误，不当之处，请读者批评、指正。

编者

1971.5

目 录

1. 数据放大器概述	(1)
2. 835型宽带差分放大器.....	(21)
3. TOA—112 型直流放大器	(45)
4. EM—A11和EM—A12 型直流放大器	(62)
5. 371系列差分式数据放大器.....	(86)
6. A 20 B型直流放大器	(99)
7. A 15型直流放大器	(110)

一、数据放大器概述

近年来,随着技术的不断发展,对于测量仪器的要求有所提高。在模拟测量方面的基本部件如直流放大器,除了稳定性和噪音外,对准确度也提出严格要求,因此过去的直流放大器已无法满足要求。比如作为驱动记录仪或电磁示波器采用的放大器,不仅限于功率放大,在准确度和稳定性方面也有严格的要求。因此它不单能作为测量用的记录仪,还能作为模拟用的记录仪,以及数据处理等场合使用。这样高准确度的处理数据用的放大器,称为数据放大器。

1. 数据放大器的分类

组成数据放大器的直流放大器虽各有不同,但目前常用的有以下三种:

振动换流式放大器;

振动换流稳定式放大器;

包括共模放大装置的直接耦合式放大器。

这三种放大器各有利弊,应按照使用要求进行选择。现将这三种放大器的特性按照漂移、频率特性、相位选择系数、输入阻抗、共模容许电压和电路构造等方面分别介绍如下:

(1) 振动换流式放大器

采用机械式振动换流器,稳定性高,漂移易于做到1微伏以下。其频率特性受振动换流器的驱动频率的限制。在用机械式振动换流器的情况下,如振动换流器为400周时,放大

器的频率为100周；前者为100周时，放大器的频率为10~15周。用半导体振动换流器时，放大器的频率可提高至1000周。在线路结构方面，有单拍或不接地的推挽输入。用不接地式线路在相位选择系数方面有以下缺点：当信号阻抗增大时，相位选择系数下降；而当共模信号频率增加时，选择系数比直流要减低，而且对元件规格有特殊要求。输入阻抗由于采用负反馈，有效输入阻抗可达1兆欧以上，但因线路结构上的关系，随着输入信号频率的增加，负反馈相应减少，因此输入阻抗值变小。关于共模容许电压方面，不接地输入的放大器其共模容许电压由变压器的耐压程度决定，能保持较高的数值如100~1000伏。在电路构造方面：这种放大器不算复杂，调节也方便，为了改善所使用的振动式换流器而进行选择时，对其他有源元件的规格要求亦不太严格，因此价格方面比较便宜。

（2）振动换流稳定式放大器

与振动换流式放大器一样，漂移受振动换流器的限制，稳定性高。频率特性方面，和直流放大器一样，可达数十千周。但频带越宽输出噪音越大，故放大器的频带太宽时反而不便使用。在线路结构上，和振动换流式一样，有单拍和不接地推挽两种输入方式。但是不接地推挽式电路非常复杂，虽然能以负反馈电路组成推挽输入，输入阻抗一般将降低到数十千欧。这时相位选择系数可以调节到150分贝（直流）及100分贝（交流50周）。在调节负反馈时，输入阻抗不会因输入信号频率而改变。因此可以改变增益来调节输入阻抗，当增益提高时，输入阻抗减低，增益降低时，输入阻抗增加。共模容许电压若不是采用非接地输入方式时可能很

低。电路构造方面因由直流放大和振动换流放大两部分组成，故其结构比振动换流式放大器复杂，而且调节也不容易，因此价格方面较振动换流式放大器为贵。

(3) 包括共模放大装置的直接耦合放大器

漂移是这种放大器最大的缺点。虽在元件的选用和电路方面力求改善，但漂移仍比用振动换流器时大10倍左右。在频率特性方面，因采用直接耦合放大器，和振动稳定式放大器一样，为宽频带放大器。这种放大器的最大优点为相位选择系数大，而信号阻抗和频率对相位选择系数的影响比不接地输入的线路为小。输入阻抗方面因前级有源元件（半导体或场效应晶体管）的输入大部分直接连到输入电路，故前级电路的输入阻抗也就是放大器的输入阻抗。在输入端由于场效应晶体管源极负反馈，放大器的输入有效阻抗可达数兆欧。共模容许电压通过共模部分的放大器，可以达到十~数十伏。然而所加的共模部分电压不能超过规定，否则放大器将损坏。在电路构造方面，这种放大器虽不如振动换流器那样需要特殊的部件，但对于有源元件和电路常数的选择较严，须用高准确度的元件，在直流放大器上并须附加各种电路，因此在价格方面比振动换流稳定式放大器为贵。

2. 数据放大器的基本要求

数据放大器的基本要求有以下几点：

(1) 增益准确度

增益的变换一般用 $\frac{1}{2}$ 或 $\frac{1}{9}$ 各档转换，变换的增益倍数在面板上表明。放大器的实际增益误差对应面板上的表示值的百分比称为增益准确度，一般在1%以下。特别精确的放大器，其准确度可达0.1%。

(2) 线性度

理想的输出电压最好是随着输入电压作线性变化，但实际上多少含有非线性畸变而产生误差。误差与放大器输出满刻度的百分比称为线性度。数据放大器因大量使用负反馈，其线性度极为良好，易于做到 0.5% 以下的线性度，有的能达到 0.1% 或 0.01%。

(3) 增益稳定度

单位时间内增益变化的百分比称为增益稳定度。通常放大器不能作长时间测量，但一般设计得使增益稳定度比增益准确度小得很多。

(4) 增益的温度系数

增益的温度系数即增益随着周围温度变化而变化的比例。此值与上述的增益稳定度一样，都是经过精心设计，使之在放大器的使用温度范围内，充分地将增益保持在规定值以内。

(5) 输入阻抗

在 1% 准确度范围内测量时，放大器的输入阻抗应为信号源阻抗的 100 倍以上。

(6) 频率特性

放大器的频带宽度理论上越宽越好，但需适当；若使用频带过宽的放大器，结果将使噪音增加，反而不好。

(7) 相位选择系数

相位选择系数越高，则感应噪音越低，因此是非常重要的指标之一，特别是最近，对于该项指标有更高的要求。在任何情况下，都希望噪音小。在 0~数周~数十周左右的频带范围内，噪音多以峰-峰值表示。在此值以上的频带范围，则

以有效值表示。在这种情况下，有效值的6~7倍即可视为其峰-峰值。但无论在任何情况下，其所表示的数值均以增益（普通指放大器的最高增益）除以放大器的输出噪音电压，将其再换算成放大器的输出值。因为噪音电压的大小由输入电路和前级电路来决定，设计这部分电路时必须特别注意降低噪音。

（9）振动换流的相互调制

若用振动换流式放大器或振动换流稳定式放大器，则由于换流相互调制而产生噪音和畸变，这是无法避免的。一般情况下，上述的噪音指标也包括相互调制所产生的噪音在内。若放大器有非线性部分存在，当加以二种频率以上的信号时，就会产生相互调制畸变。这种畸变对于数据放大器非常有害，特别在宽频带放大器设计时，必须加以注意。

（10）零点漂移

零点漂移可以分为时间的零点漂移和温度的零点漂移。两者均以放大器的增益（一般指最高增益）除漂移电压，再以输出端所折算的电压值表示。如测量所需时间较长，或在温度变化大的场合下测量时，对上述指标尚须进一步研究，以确定其能否满足测量所需的精度。

（11）输出电压及电流

放大器的负载范围决定于输出电压和电流的规格，因此在测量系统和放大器的负载确定以后，需要有足够的输出电压和电流。

（12）输出阻抗

不论放大器所连接的负载如何，其输出阻抗必须设计得相当低。对于数据放大器而言，因其全部电路均有电压负反

馈，输出阻抗相当低，在1欧以下。

(13) 稳定性裕度

数据放大器因包括大量的负反馈，有时会因为输出端负载的影响而使负反馈环节引起振荡。不发生振荡的负载条件称为稳定性裕度。设计时只要使负反馈有充分的增益裕度和相角裕度即可。

(14) 输出电压的过渡过程

输入端加上阶跃信号后，放大器的输出端的输出电压过渡过程受放大器频率特性的控制。如图1—1所示，希望 $(t_2 - t)$ 和 $(t_3 - t_2)$ 的时间尽可能短，而 $u_L - L_L$ 的幅度尽可能小。

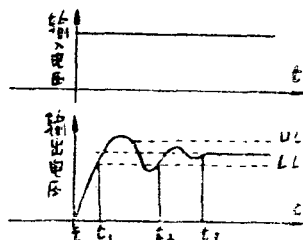


图1—1 放大器的过渡过程

(15) 输出保护

在放大器输出端发生短路或过载时，若不加以保护，则将烧毁放大器，因此在输出端应加适当保护，至少在短时间短路时不致烧毁。

(16) 输入过电压保护

输入过电压保护和输出保护一样，为使放大器避免烧毁。输入电压可以分为差分输入和共模输入两种。共模输入方面有相位选择系数，在容许的共模电压范围内并不会烧毁放大器。若为差分输入信号，必须加以考虑，但这一点在技术上并无困难，目前的数据放大器大都不加保护。

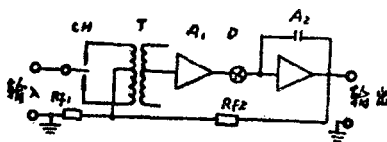
(17) 过载恢复时间

若在输入端加上使输出饱和和以上的电压，而在输出完全

饱和以后，将输入电压急速撤除，则输出电压要经过一段时间后，才能回复到零电位。这段时间称为过载恢复时间，要求越短越好。

3. 振动换流式放大器

振动换流式放大器具有高稳定性和高灵敏度的特点。为了实现高稳定性，使用了机械式振动换流元件。机械式振动换流器虽然可靠性方面较半导体式振动换流器为差，若使用适当，差不多有近于真空管的寿命，因此不算是致命弱点。而且在漂移方面具有独特的优点，非其他形式所能及，故不论半导体如何进步，目前仍被广泛采用。



CH: 400赫机械式振动换流器

D: 解调器

T: 输入变压器

A₂: 直接耦合放大器

A₁: 交流放大器

R_{F1}, R_{F2}: 负反馈电阻

图1-2 振动换流式放大器方框图

图1-2为振动换流式放大器的方框图。输入信号经CH机械式振动换流器调制成400赫交流信号，该信号经过输入变压器T，送到交流放大器A₁进行放大，然后经调解恢复为原来的直流信号，再由放大器A₂进行直流放大。A₂的输出信号通过R_{F1}、R_{F2}向输入端负反馈。这样构成的回路增益仅由R_{F1}、R_{F2}来决定，而不受其他有源元件工作时各种变化的影响，因此增益稳定性和增益准确度也就大为提高。

(1) 闭环增益

图1—2的方框图可简化成图1—3的电路。由此图可得下列各式:

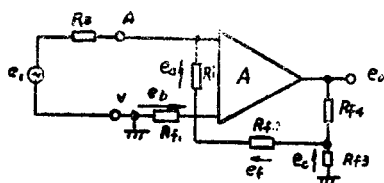


图 1—3

A 放大器的开环增益,
 e_i 输入信号,
 e_o 输出信号,
 R_s 信号源电阻,
 R_i 放大器的输入阻抗
 $R_{F1}, R_{F2}, R_{F3}, R_{F4}$ 反馈电阻
 e_a, e_b, e_c, e_f 各个箭头方向的电势

$$e_i = e_a + e_b + e_c, \quad (1)$$

$$e_o = e_a A, \quad (2)$$

$$\frac{e_b}{R_{F1}} - \frac{e_a}{R_i} + \frac{e_b - e_f}{R_{F2}} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{e_f - e_b}{R_{F2}} + \frac{e_f}{R_{F3}} + \frac{e_f - e_o}{R_{F4}} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{e_c}{R_s} = \frac{e_a}{R_i}, \quad (5)$$

由 (4) 式

$$e_f = \frac{R_{F3} R_{F4} e_i + R_{F3} \left[R_{F2} - R_{F4} \left(1 + \frac{R_s}{R_i} \right) \frac{1}{A} \right] e_o}{R_{F2} R_{F3} + R_{F3} R_{F4} + R_{F2} + R_{F4}}, \quad (6)$$

由 (3) 式

$$\frac{R_{F1} + R_{F2}}{R_{F1}} e_i - \left\{ \frac{R_{F2}}{R_i} + \frac{R_{F1} + R_{F2}}{R_{F1}} \left(1 + \frac{R_s}{R_i} \right) \right\} \frac{1}{A} e_o - e_i = 0, \quad (7)$$

由 (6) (7) 式可得

$$\frac{e_o}{e_i} = \frac{A_o}{1 + \frac{1}{A} \left[A_o + \frac{1}{R_i} (R_s A_o + R_{F2} + R_{F4} + \frac{R_{F2} R_{F4}}{R_{F3}}) \right]}, \quad (8)$$

$$\text{此时 } A_o = \frac{(R_{F1} + R_{F2})(R_{F3} + R_{F4}) + R_{F3} R_{F4}}{R_{F1} R_{F3}},$$

$$\text{若 } \frac{1}{A} \left[A_o + \frac{1}{R_i} (R_s A_o + R_{F2} + R_{F4} + \frac{R_{F2} R_{F4}}{R_{F3}}) \right] \ll 1,$$

则由 (8) 式可得闭环增益为

$$\frac{e_o}{e_i} \div A_o = \frac{(R_{F1} + R_{F2})(R_{F3} + R_{F4}) + R_{F3} R_{F4}}{R_{F1} R_{F3}} = A_F, \quad (9)$$

当 $R_{F3} = \infty$, $R_{F4} = 0$ 时, 则

$$\frac{e_o}{e_i} = \frac{R_{F1} + R_{F2}}{R_{F1}} \quad (10)$$

$$\frac{1}{1 + \frac{1}{A} \left[\frac{R_{F1} + R_{F2}}{R_{F1}} + \frac{R_s}{R_i} \left(\frac{R_{F1} + R_{F2}}{R_{F1}} + \frac{R_{F2}}{R_s} \right) \right]},$$

$$\text{当 } 1 + \frac{1}{A} \left[\frac{R_{F1} + R_{F2}}{R_{F1}} + \left(\frac{R_{F1} + R_{F2}}{R_{F1}} + \frac{R_{F2}}{R_s} \right) \right] \gg 1, \quad (11)$$

$$\text{则 } \frac{e_o}{e_i} \div \frac{R_{F1} + R_{F2}}{R_{F1}}, \quad (12)$$

即闭环增益主要由 R_{F1} 及 R_{F2} 决定。

(2) 增益准确度

在上述(11)式中,当开环增益 A 为无穷大时,则该左项亦为无穷大,(12)式成为非近似式。但因 A 一般均为有限值,(12)式成为近似式而有误差,这一误差由(8)式可以求出。即

$$A_F = \frac{e_o}{e_i} = A_o \frac{1}{1 + \frac{1}{A}(X)}, \quad (13)$$

当 $\frac{1}{A} < 1$ 时,则

$$A_F = A_o \left[1 - X \left\{ \left(\frac{1}{A} \right) + \left(\frac{1}{A} \right)^2 - \left(\frac{1}{A} \right)^3 + \dots \right\} \right], \quad (14)$$

$$X = A_o + \frac{1}{R_i} \left(R_s A_o + R_{F2} + R_{F4} + \frac{R_{F2} R_{F4}}{R_{F3}} \right),$$

此处 A_F 表示闭环增益的准确数值。

(3) 增益的稳定性

通常开环增益 A 随着电路部件的特性和不正常排列受温度影响而发生变化,这时 A_F 的影响可由(13)式求出。即

$$A_F \doteq A_o \frac{1}{1 + \frac{1}{A}} = A_o \frac{A}{A+1},$$

$$\frac{\delta A_F}{\delta A} = A_o \frac{(A+1) - A}{(A+1)^2} = \frac{A_o}{(A+1)^2},$$

$$\frac{A_F}{A_o A} = \frac{1}{A+1},$$

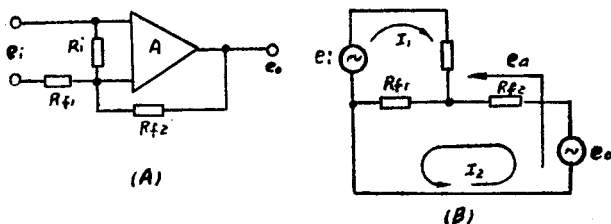
$$\frac{\delta A_F}{\delta A} = \frac{A_O}{A+1} \left(\frac{A_F}{A_O A} \right),$$

$$\frac{\delta A_F}{A_F} = \frac{\delta A}{A+1} \left(\frac{1}{A} \right) = \frac{\delta A}{A} \left(\frac{1}{A+1} \right),$$

故 A_F 的变化量不过是 A 变化量的 $\frac{1}{A}$ 。

(4) 输入阻抗

如用上述的负反馈方式，其输入阻抗有效值相当高，推算如下：



(A) 放大器的负反馈线路

(B) (A) 的等值电路

图 1-4

Z_{in} : 输入阻抗有效值。

$$\begin{cases} e_o = A e_a = A R_i I_1, & (16) \end{cases}$$

$$\begin{cases} (R_i + R_{F1}) I_1 + R_{F1} I_2 = e_i & (17) \end{cases}$$

$$\begin{cases} R_{F1} I_1 + (R_{F1} + R_{F2}) I_2 = e_o = A R_i I_1 & (18) \end{cases}$$

$$\text{由前式, } I_2 = \frac{A R_i + R_{F1}}{R_{F1} + R_{F2}} I_1 \quad (19)$$

由 (18) (19) 式

$$\frac{e_i}{I_1} = R_i + R_{F1} \frac{R_{F1} (A R_i - R_{F1})}{R_{F1} + R_{F2}} = Z_{in} \quad (20)$$

$$= R_i + R_{F1} + \frac{AR_i - R_{F1}}{A_o},$$

此处 $A_o = \frac{R_{F1} + R_{F2}}{R_{F1}}$

若 $AR_i \gg R_{F1}$, 则 $Z_{in} = \left(1 + \frac{A}{A_o}\right) R_i + R_{F1}$. (21)

(21) 式表示在直流范围内的输入阻抗。若扩大到交流范围, 并且当 A 具有 $\frac{A_L}{1+Sf_o}$ 的频率特性时, 则 $Z_{in}(f)$

$$= \left(1 + \frac{1 + \frac{A_L}{1+Sf_o}}{A_o}\right) R_i + R_{F1}, \quad (22)$$

由此可见, 输入阻抗等于放大器阻抗乘 A/A_o 即乘负反馈量。A 的频率特性如图1—5所示。

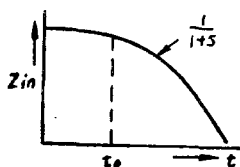


图1—5 输入阻抗频率特性

(5) 输出阻抗

放大器的输出阻抗等值电路见图1—6, 其中输出阻抗随着电压负反馈的程度按比例变小。令 Z_{out} 表示有效输出阻抗:

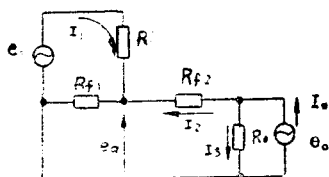


图 1—6 放大器输出阻抗的等值电路

$$e_o = A e_i = A R_i I_1,$$

$$(R_i + R_{F1}) I_1 + R_{F1} I_2 = e_i, \quad (23)$$

$$R_{F1} I_1 + (R_{F1} + R_{F2}) I_2 + R_o I_3 = e_o = A R_i I_1, \quad (24)$$

$$R_o (I_3 - I_2) = e_o = A R_i I_1, \quad (25)$$

由(25)式得 $I_1 = \frac{R_o}{AR_i} (I_3 - I_2)$, (26)

由(26)(24)式得

$$I_2 = \frac{\frac{R_i + R_{F1}}{AR_i}}{\frac{R_{F1}}{AR_i} + R_{F1} + R_{F2} + R_o} I_3, \quad (27)$$

由(27)(23)式得

$$\frac{e_o}{I_3} = \frac{1}{A} R_o \left[\frac{AR_{F1} - R_o - \frac{R_{F1}R_o}{R_i}}{1 - \frac{R_{F1} + R_{F2} + R_o}{AR_i}} + 1 + \frac{R_{F1}}{R_i} \right], \quad (28)$$

$$\frac{e_o}{e_i} = A \div \frac{R_{F1} + R_{F2}}{R_{F1}}, \quad (29)$$

由(28)(29)两式可得

$$\frac{e_o}{I_3} = Z_{out} = \frac{A_o}{A} R_o \left[\frac{AR_{F1} - R_o - \frac{R_{F1}R_o}{R_i}}{1 - \frac{R_{F1} + R_{F2} + R_o}{AR_i}} + 1 + \frac{R_{F1}}{R_i} \right], \quad (30)$$

若令 $A \gg 1$, 则

$$Z_{out} \div \frac{A_o}{A} R_o \left[1 + \frac{R_{F1}}{R_i} - \frac{R_{F1}}{R_i \left(1 + \frac{R_{F2} + R_o}{R_{F1}} \right)} \right]. \quad (31)$$

因此, Z_{out} 等于闭环输出阻抗的 $\frac{A_o}{A}$ 倍, 即负反馈所减少的量。