

为人民服务

毛泽东

资料 7

DDZ-1 型

电动单元组合仪表

一机部热工仪表科学研究所

一九六九年十一月

目 录

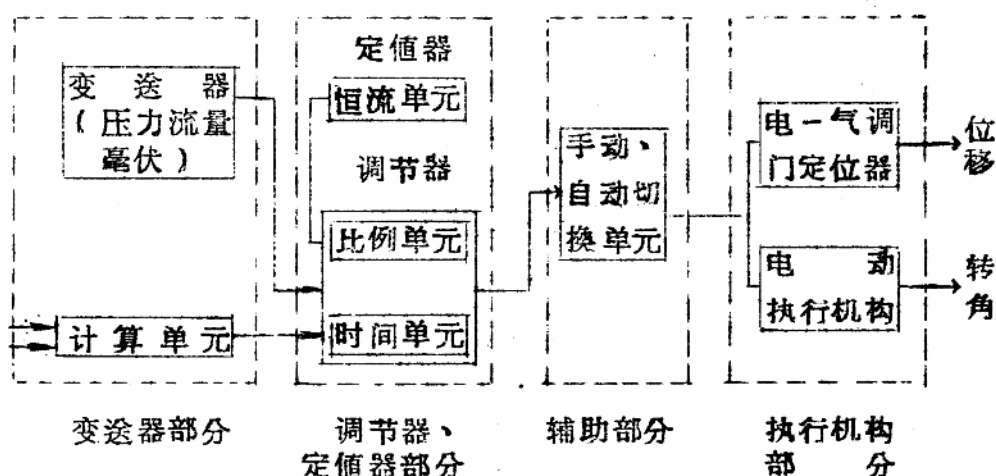
前 言.....	1
直流毫伏变送器.....	5
力平衡式压力、差压变送器.....	36
计算单元.....	60
气-电转换器.....	86
比例单元.....	110
时间单元.....	137
恒流单元.....	152
定值单元.....	163
比例-积分单元.....	169
10公斤-米电动执行机构.....	187
他激式直流测速发电机.....	192
二相电容式鼠笼转子伺服电动机的计算功率与设计.....	198
减速器.....	210
磁性功率放大器.....	219
电动单元组合仪表(DDZ-I型)在电厂中应用.....	228
电动单元组合仪表(DDZ-I型)在合成氨厂中应用.....	234

前 言

震撼世界的无产阶级文化大革命，正在大大推动着我国社会主义建设的飞跃发展。

近年来，国民经济各工业部门对生产过程自动化的要求日益迫切。这套仪表在作用原理方面，既能适应生产过程自动化发展的需要；同时其结构特征，也能符合自动化技术工具必须系列化和标准化的要求。因此自从试制生产成功以来，很受各使用、生产部门以及有关研究院和学校的欢迎和重视。

DDZ—I型电动单元组合式检测、调节仪表按其作用原理可以分为四部分：即变送器部分，定值、调节器部分，辅助部分和执行机构部分。整套仪表的主要单元及其作用原理，如下图所示。变送器部



分的各个单元，是将所测得的各种参量，如压力、差压、毫伏等量值，转变为统一的电信号，送到远处的控制屏或中央控制室，供作进一步处理；定值、调节器部分是整套仪表的核心，它的各个单元，可以根据需要组合成具有比例、比例加积分、比例加微分、比例加积分加微分等规律的调节回路；执行机构部分包括电动、气动和液动系列，用来根据调节器送出的指令或手控信号，操纵各种管道阀门的开度；辅助部分的切换单元，用来保证调节系统自动、手动的平稳转换，

同时供给远方操作执行机构的电源。

这套仪表的结构特征是：使用灵活，可以任意组合构成各种简单的和复杂的系统，因此通用性强；反应迅速，能瞬时地远距离传递信息而不受干扰，可以用来进行有效的集中控制；采用了力平衡和电平衡的结构原理，各单元中不存在触点，可动部分也很少，保证了整套仪表的测量精度和可靠性；将各种物理量都转换成了统一的标准信号，因此可以和数据处理装置、计算机等配合使用，也使指示仪表和记录仪表可以单一化，各单元的结构件很多是可以互换的，所以维修方便，零部件可以预作储备。

标准联络信号是这套单元组合仪表的一个重要特征。各个单元通过标准联络信号，就能有机地组合起来，形成各种调节系统，因此标准信号的形成和强弱的选择，是一个十分重要的问题。世界各国制造电动单元组合式仪表所采用的标准联络信号很不一致，有的是交流电压，有的是直流电压，也有的是直流电流。但其中以采用直流电流制为多数。DDZ—I型仪表在决定标准联络信号的时候，曾作过一番比较，情况是这样的：首先，直流与交流相比较，则直流的优点很多，如在信号传输线路中不受交流感应影响；不受传输线路电感、电容和负荷性质的限制，因而不发生相移问题，使接线简化；容易与数据处理和计算机配合，因为这些技术装置大多为直流信号输入；传递信号的导线有两根即已足够，容易得到基准电压。其次，电流与电压比较起来，则电流的优点较多，如电流与磁场作用，容易变换为机械力；传输导线的电阻在一定范围内变化，不会影响电流值，因而适于远距传递信号；对于电压输入的信号接受仪表和元件亦能适应（在电流回路中串入一电阻，在电阻两端即可得到电压），故使用起来较灵活；容易实现多个调节机构联动控制，因为它送给每个执行装置的信号是大小一律的，并且是同时的。因此就决定采用了直流电流制。虽然直流电流制也有缺点，主要是对设计和工艺的要求较高，因而生产成本也比较贵。但技术性能上的优点很多，所以最后还是决定采用直流电流制。

至于信号电流的强弱和界限问题，世界各国各厂的意见也不一

样。有的主張电流强一点，上限高一点，如西德Askania-Wezke采用120直流毫安；有的主張电流弱一点，上限低一点，如美国Foxboro厂采用2直流毫安；也有的主張电流下限从零开始，如欧洲各资本主义国家；有的主張不从零开始，如日本和美国的有些工厂等。这些厂所以采用这些方案，也都有他們自己的理由。如对于采用力平衡结构（这是目前比较先进的结构，能保证较高的精度）的参量变送器来讲，希望信号电流越大越好，因为这样产生的电磁平衡力大，有利于设计和制造；为了减小信号在傳輸线路中的损失和缩小仪表的体积，同时提高仪表的安全性和防爆性，希望信号电流越小越好；为了便于实施模拟量的加、减、乘、除、开方、乘方等运算和采用通用刻度的二次仪表，希望信号的下限能从零开始；认为下限不应从零开始，这样便于检验信号傳輸线有否断线，并有利于设计变送器放大装置，能简化结构，当上下限电流比为5时，还可与气动单元组合式仪表的 $0.2 \sim 1$ 公斤/厘米²的标准信号相对应，便于电-气转换。这些论点在技术经济上彼此之间是有矛盾的，各有利弊。经研究，最后采取了0~10直流毫安作为整套仪表的标准联络信号。所以这样决定，主要是考虑了四个因素，即：尽量减少信号在傳輸和处理过程中的能量损失；适当照顾变送器的设计要求；便于模拟量的数字运算；采用国产已有的电子管元件。

单元组合式仪表的另一重要问题，是调节迴路的构成形式。调节迴路的构成形式是否先进，直接影响整套仪表的性能和运用范围，这是一个涉及单元划分原则的问题。世界各国目前对于这一问题的看法，也很不一样，归纳起来，大致分两大类。一是多单元结构形式，其调节迴路要形成兼有比例、积分、微分等三项调节作用的线路，需要用多个独立的单元才能实现。欧洲各国厂家多采用这一形式。另一是以二次仪表为核心的结构形式，这种形式的比例、积分、微分三项调节作用基本上是在一个调节单元内产生的，但其结构与二次仪表结成一整体，而以二次仪表为核心。美国、日本各厂家都采用这种形式。

这些结构形式各有优缺点，经比较后，结论是这样：第一，多单元结构组合灵活，非常适合于复杂的综合调节系统，而当用于要求不

高的调节系统时，又可以相应地组合成极简单的系统，而以二次仪表为核心的结构则不够灵活；第二，多单元结构中的各个调节单元只产生单一调节作用，不但维修容易，而且在系统需要改组和扩展时，用不着废置原有基础，而以二次仪表为核心的结构则不同，当改组和扩展超出了它本身能适应的范围时，就只好撤换整个调节器；第三，调节器与二次仪表从结构上分开对使用者说较为方便，这是因为并不是每个调节系统的被调量都需要进行记录，甚至有的地方连指示也不需要，而仅需要有一种越限报警装置就够了。在采用了多点巡回检测装置之后，就更不必要强调调节器一定要与二次仪表结合在一起了；第四，多单元结构在能量转换上免不了有重复和浪费的地方，总的体积也较以二次仪表为核心的结构为大，接线也较复杂，因之成本也高，这是不足之处。

由于DDZ—I型仪表的服务对象，主要是大型的热电厂和冶金厂等企业，因而着眼点应主要放在技术性能上，要求能适应大型机组综合自动化的需要，而在经济方面放低要求。经过权衡，最后决定采用了多单元结构的形式。

直 流 毫 伏 变 送 器

概 述

直流毫伏变送器是DDZ型仪表中的一个电量转换单元，它将来自各种标准刻度之热电偶、热电阻电桥以及其它敏感元件输出的直流毫伏信号转换为DDZ仪表统一规定的电流输出信号，供给指示、记录仪表和调节器等。

直流毫伏变送器除了在DDZ仪表系统中配套使用外，其本身也就是一个独立的测量系统，可用于远距离测量或几个地方同时进行指示，此外，尚可作一般低阻抗低电平直流信号放大器用。

直流毫伏变送器系一恒流输出的单元，仔细分析各种恒流输出的装置，可以看出：它们都是基于如图1所示的电平衡补偿法原理，图中：KG——指零测量机构； R_S ——附加电阻； R_f ——反馈电阻。当有输入信号 $U_{\text{入}}$ 后，借助 R_S 来校准电流 I 使KG指示为零。KG控制 R_S 。在平衡时 I 在 R_f 上的电压降 $IR_f = U_{\text{入}}$ 使 $U_{\text{入}}$ 、KG和 R_f 组成的回路中电流为零，这样就可使 $I \propto U_x$ ，获得极高精度。

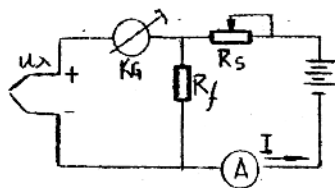


图 1 电平衡补偿法

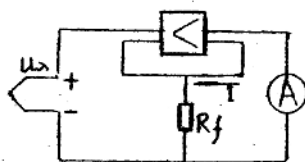


图 2 自动补偿法

图2即毫伏变送器的示意图。这里的平衡补偿过程是自动进行的。显然，这是一有差系统，其差率取决于放大器的放大倍数。

技 术 要 求

对直流毫伏变送器可以从静态性能、动态性能以及环境条件等方

面提出许多不同的要求，但是主要的可以归纳为以下几点：

1 精度：变送器精度直接影响测量性能和DDZ仪表系统的调节精度，因此要求愈高愈好。目前一般水平是当输入刻度为0~2毫伏时精度 $\pm 0.5\%$ ，当输入满刻度减小到0~1毫伏时则精度为 $\pm 1.0\%$ 。在DDZ仪表系统中对直流毫伏变送器要求是当输入满刻度为5毫伏时精度是 $\pm 0.5\%$ ，直流毫伏变送器是一线性的变换装置，因此它的非线性误差是精度的主要部分。误差主要是放大器部分，外来干扰、零点漂移、增益不稳定性以及振幅特性非线性等原因所造成的。加强屏蔽避免外来干扰，提高开环放大倍数和加强负反馈深度都是提高变送器精度的途径。

2 恒流性能：这是DDZ仪表特有的要求。恒流性能是指负载阻抗改变时，变送器输出电流变化的大小。这里对恒流性能的要求是当负载阻抗在2~5千欧姆范围内变化时，输出电流允许变化值 $\leq \pm 0.3\%$ 。

3 灵敏限：灵敏限也是直接影响DDZ仪表系统调节性能的一个重要指标，这里要求 $\leq \pm 0.1\%$ 。

4 输入信号和输出信号：毫伏变送器输入信号都是直流毫伏级的，但是它们在信号源内阻、输入信号引线距离以及其它一些要求上有不同的要求。为了达到以少胜多，一器多用的目的，所以变送器应当满足转换多种信号的要求。这里所述直流毫伏变送器能转换各种不同热电偶信号、各种不同热电阻信号以及其他一般直流毫伏信号。

尽管输入信号的性质和输入满刻度大小的不同，变送器输出信号必须是DDZ仪表统一规定的0~10毫安的直流信号。

5 动态性能：动态性能主要是指变送器频带宽度问题，由于一般热工对象时间常数较大，约几分钟至几十分钟左右，所以对变送器动态响应时间要求为零点几秒至几秒，具体要求是 ≤ 1 秒。

6 环境条件：变送器除能满足以上主要性能指标外，尚须经受住各种环境条件变化的影响。例如，在电源电压变化 $-15\% \sim +10\%$ ；电源频率变化 $\pm 4\%$ ；环境温度 $0 \sim 50^\circ\text{C}$ 和振动频率25赫芝，振幅0.1毫米等等的条件下变送器精度尚在规定值之内。

方 案 分 析 与 选 择

目前的毫伏变送器可大致分为三大类，即检流计式、力平衡式以及电子式。

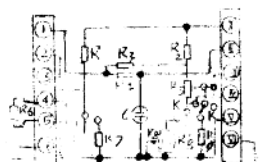
检流计式直流毫伏变送器的核心部件是一个磁电式可旋转的检流计，这种检流计是具有高灵敏度和高准确度的微电量检测仪表，用它作为变送器里的前置放大或者说是指零机构，那是很理想的。其特点是简单、经济，避免了多级电子放大的设计，零点漂移小以及容易获得高的精度。而缺点是怕外界的振动，特别是抗冲击振动性能极差以及机械调整比较麻烦等等。

力平衡式直流毫伏变送器的特点是用一个力平衡机构作为指零机构。它的优点在于用磁性元件和机械杠杆装置代替多级电子放大级，零点漂移小，灵敏度和精度均可做得高。缺点是由于输入的毫伏信号所产生的力甚微，故机械结构十分脆弱，抗振能力差，另外，对加工工艺和磁性材料方面要求较高。

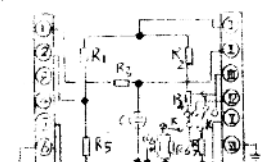
电子式直流毫伏变送器是用一个稳定而增益高的直流放大器作指零机构的。直流放大器的种类很多，如直接耦合放大器，漂移自动校正放大器，调制器稳定直流放大器以及单频调制式放大器。在毫伏变送器中，一般是采用单频调制式放大器。电子式毫伏变送器由于用的全是电子线路，因而在工艺、抗震以及使用元件的适用性等方面都较检流计式和力平衡式为佳。由于采用了调制式放大器，零点漂移也可以得到大大的改善，所以我们目前所作的就是调制式毫伏变送器。

调制式毫伏变送器由于使用调制元件的不同，可以有许多类型。磁调制器优点很多，除了同晶体管调制器一样有可靠、耐振和寿命长等优点外，它的调制系数可以远远大于1，这是其他一些调制器所不及的。至于磁调制器的缺点，是所用的坡莫合金是一种比较稀少的贵重材料，工艺性差以及成品率低。但是，随着我国冶金工业迅速发展和进一步改进磁调制器的制作工艺，这些缺点可以适当得到克服。基于以上情况，我们制作了一种用磁调制器和电子管放大器线路相配合的毫伏变送器，也称无触点毫伏变送器。

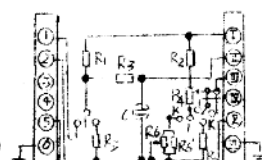
输入回路



输入回路



输入回路



机械振子由于存在运动的电触点，所以寿命短和耐振差，可靠性较低，但根据 DDZ—I 型仪表在某化工厂和某电厂中间试验情况来看，机械振子的寿命和耐振性能不是所想象的那样差。随着振子制造水平的提高，其性能将会进一步得到改善。另外，它的信噪比高、漂移小，使用振子有同电子管一样的方便，以及在市场上可以购到现成的和更换方便等优点。看来机械振子式毫伏变送器在目前情况下是可取的方案之一。所以我们还制作一种机械振子式毫伏变送器，也称有触点毫伏变送器。

设计与计算

有触点和无触点毫伏变送器，它们除了所采用的调制器不同外，其它部分完全一样，所以在下面对变送器的性能进行分析与计算中，除调制器和与调制器有关的部分分开介绍外，其他大部分内容放在一起阐述。

毫伏变送器是由输入回路和直流放大器两个部分构成的，如图 3 和图 4 所示。

输入回路是一个直流电桥电路，用来实现零点压缩和电流负反馈；对于热电偶信号来说，还要实现冷端温度补偿和发生热电偶断线故障信号。输入回路根据输入信号性质的不同，例如热电偶、热电阻以及一般直流毫伏信号，做成三种形式的独立单元，即输入回路 I、II、III，当需要测量哪一种信号时，可以换上相应的输入回路单元。

直流放大器是由调制级、交流放大级、相敏整流级和直流功率放大级组成的。

毫伏变送器的工作过程是：信号从端子 1、2 加入输入回路，与零点压缩所需的不平衡电压和反馈电压进行比较以后，桥路便输出一个误差信号和加到调制级。信号经过调制级被

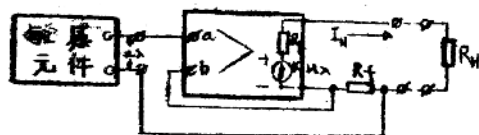


图 5 变送器输出等效电路图

调制成交流信号后经过输入变压器、交流放大级、级间耦合变压器。

相敏级和直流功率放大级，最后，在输出端获得直流的电流输出。

从整个电路上来看，变送器是一个按串联电流负反馈电平衡原理组成的恒流系统，按输出等效电路（图5）来看，输出电流为：

$$I_H = \frac{KU_{\lambda}}{R_i + R_H + (1+K)R_f} \dots\dots\dots (1)$$

式中 K —— ab 端至相敏输出端的放大倍数；

R_i —— 变送器输出级内阻；

R_H —— 负载和传输线的总电阻；

R_f —— 反馈电阻。

无反馈时输出电流，即 $R_f = 0$ 时输出电流为：

$$I_H' = \frac{KU_{\lambda}}{R_i + R_H} \dots\dots\dots (2)$$

令 K_C 为系统之差率，其定义为反馈时输出电流与无反馈时输出电流之比，即

$$\begin{aligned} K_C &= \frac{KU_{\lambda} / (R_i + R_H + (1+K)R_f)}{KU_{\lambda} / (R_i + R_H)} \\ &= \frac{R_i + R_H}{R_i + R_H + (1+K)R_f} \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

从上式变换后得：

$$K = \frac{(1-K_C)(R_i + R_H) - K_C R_f}{K_C R_f} \dots\dots\dots (4)$$

将(4)式代入(1)式可得：

$$\begin{aligned} I_H &= \frac{(R_i + R_H)(1-K_C) - K_C R_f}{(R_i + R_H)R_f} \cdot U_{\lambda} \\ &= \frac{1}{R_f} (1-K_C)U_{\lambda} - \frac{K_C}{R_i + R_H} \cdot U_{\lambda} \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

从式(5)可知，当 K 较大时 $K_C \ll R_H + R_i$ ，而且 $K_C \ll 1$ 则

$$I_H \approx \frac{1}{R_f} (1-K_C)U_{\lambda} \approx \frac{1}{R_f} U_{\lambda} \dots\dots\dots (6)$$

由式(6)可以看到：

1 当 K_c 很小，也即当开环放大倍数很高时， R_f 值误差就决定了输出值误差，所以为了减小误差必须要求 R_f 经过仔细制作和严格处理，使阻值准确而稳定；

2 欲需高的恒流程度和变送器工作稳定性要求放大倍数 K 很高，因为 K 愈大， K_c 本身就愈小，因而当 R_H 和 R_i 变化时引起 K_c 变化而导致变送器误差就愈小。

从以上所述可以知道要提高变送器的性能重要的在于能否得到足够高的开环放大倍数。下面就从对所需的开环放大倍数 K 和如何获得 K 出发对变送器的静态参数进行分析计算。

(一) 开环放大倍数的确定

1 各个环节及整个变送器的传递函数

(1) 输入滤波器

为了滤去从信号线上进来的外来干扰，在输入回路中设置了一个简单的 RC 滤波器，这就构成一阶惯性环节。

$$W_1(P) = \frac{1}{T_1 P + 1}$$

式中 $W_1(P)$ —— 滤波器传递函数；

T_1 —— 时间常数， $T_1 = R_2 C$ 。

(2) 调制器

1) 机械振子(包括输入变压器)

调制器线路如图 6 所示，图中：

TP_1 —— 输入变压器； B —— 机械振子； L_1 、 L_2 —— 分别是输入变压器初级（一半）和次级绕组之电感； R_B —— 信号源内阻和信号线电阻之和； C_1 —— 输入变压器次级谐振电容； $U_{\text{入}}$ —— 输入信号电压； $U_{\text{出1}}$ —— 输入变压器次级输出电压。振子在过接触状态工作，以便减小外来干扰。

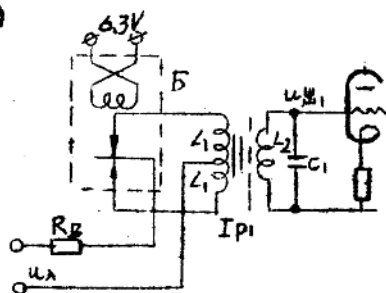


图 6

当输入直流信号为 U_{λ} 的情况下，振子可以看成为一个如图 7 a 所示的振幅为 U_{λ} 的交变矩形脉冲发生器 e_{θ} 。

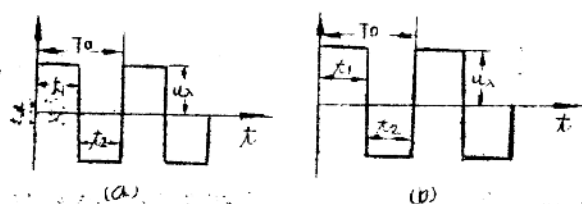


图 7

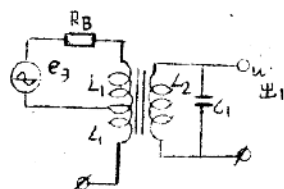


图 8

如果在理想条件下 $t_1 = t_2$ 并 $\Delta t = 0$ ，则交变矩形波如图 7 b 并可用图 8 所示的等效脉冲电路来代替。

由于输入变压器在谐振条件下工作，而我們需要的又是次级输入电压的一次谐波，所以可将 e_{θ} 以傅氏级数展开，并取其中一次谐波有效值来代替 e_{θ} ，即按图 7 b 波形展开。

$$U_{\text{矩}} = \frac{4}{\pi} U_{\lambda} \left[\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots \right]$$

故一次谐波为：

$$e_1 = \frac{\varphi}{\pi} U_{\lambda} \sin \omega t$$

有效值为：

$$e_{1\theta} = \frac{\varphi}{\sqrt{2}\pi} U_{\lambda} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_{\lambda}$$

如果将输入变压器中少量漏感忽略不计，并将次级参数折算到初级则调制级可由图 9 等效电路来表示。图中： $C_1' = n^2 \cdot C_1$ 系折算到原边之电容； R_n ——输入变压器铁损和铜损之等效损耗电阻； $U_{\text{出}1}' = \frac{U_{\text{出}1}}{n}$ 折算到原边之输出电压， n 为次级绕组与初级一半绕组匝数之比。

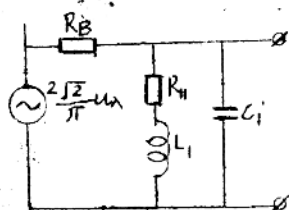


图 9

输入变压器与电容 C_1 组成谐振回路，此时，从初级看来这个谐振回路的等效回路电阻为：

$$R_0 = \frac{L_1}{R_n C_1} \dots\dots\dots (7)$$

在谐振状态下谐振频率：

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \sqrt{1 - \frac{R_n^2 C_1^2}{L_1}}$$

$$\approx \sqrt{\frac{1}{L_1 C_1}} \dots\dots\dots (8)$$

$$\therefore C_1 = \frac{1}{\omega_0^2 L_1} \dots\dots\dots (9)$$

将式(9)代入式(7)得：

$$R_0 = \frac{L_1}{R_n \frac{1}{\omega_0^2 L_1}} = \frac{\omega_0^2 L_1^2}{R_n} \dots\dots\dots (10)$$

则机械振子调制器输入电阻为：

$$R_{BX} \approx R_0 \left(\frac{W_1}{2W_1 + W_2} \right)^2 = R_0 / (2+n)^2$$

$$= \frac{\omega_0^2 L_1^2}{(2+n)^2 R_n} \dots\dots\dots (11)$$

输入变压器次级输出电压一次谐波有效值为：

$$U_{出1\theta} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_{\lambda} \frac{R_{BX} \cdot n}{R_{BX} + R_B} \dots\dots\dots (12)$$

$\therefore$ 调制级传递系数为：

$$K_2 = \frac{U_{出1\theta}}{U_{\lambda}} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{R_{BX} \cdot n}{R_{BX} + R_B}$$

$$= \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{n R_B}{R_0 + R_B (2+n)^2} \dots\dots\dots (13)$$

调制级对载频之包络线来说是一惯性环节，其时间常数为：

$$T_2 = \frac{Q}{\omega_0} = \frac{L}{R} \dots\dots\dots (14)$$

式中 Q —— 输入变压器之品质因素。

所以振子调制级传递函数为：

$$W_2(P) = \frac{nR_B}{[R_0 + R_B(2+n)^2][1+T_2P]} = \frac{K_2}{T_2P+1} \dots\dots\dots (15)$$

2) 磁调制器

(3) 交流放大级之传递函数

交流放大级放大倍数是整个变送器总放大系数中的主要部分，所以从这个观点出发，应采用静态 μ 值高的电压放大电子管。但考虑到整套 D D Z 仪表统一规定使用 6 N I 管子，所以在交流放大级中也采用 6 N I 的双三极管。交流放大由四级组成，前三级用带阴极电阻反馈的阻容耦合放大器，之所以采用阴极反馈的线路，目的在于避免使用易损之电解电容器，为了简单起见，这三级放大级形式和线路参数以及所用元件全部相同。第四级采用阴极输出器线路，这一级与相敏级之间用次级带中点的级间变压器耦合，使相敏级有对称的电压输入。

1) 阻容耦合放大级 (图 10)

在低频情况下可将电容 C_2 和极间电容忽略不计，因为它们的电容量很小，则可得图 11 等效电路图。图中： R_i —— 管子内阻； R_1 —— 板阻； R_2 —— 阴极电阻； R_3 —— 下一级栅极电阻； C_3 —— 耦合电容。

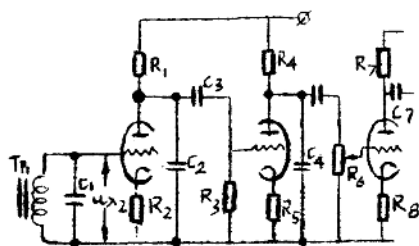


图 10

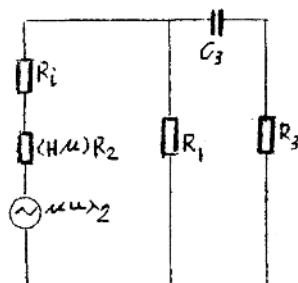


图 11

$$W_{31}(P) = W_{22}(P) = W_{33}(P) \\ = \frac{K_{21} T_3 P}{T_3 P + 1} \dots\dots\dots (16)$$

式中 $W_{31}(P)$ 、 $W_{22}(P)$ 和 $W_{33}(P)$ ——分别是交流放大第一、第二和第三放大级之传递函数；

K_{21} ——交流放大第一、第二和第三级放大系数。

$$K_{21} = K_{22} = K_{23} = \frac{\mu R_L}{R_i + R_L + (1 + \mu) R_2} \dots\dots\dots (17)$$

$$\text{式中 } R_L = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} \dots\dots\dots (18)$$

$$\text{式(16)中 } T_3 = \left[\frac{R_i (1 + \mu) R_2}{R_i (1 + \mu) R_2 + R_1} + R_3 \right] C_3 \dots\dots\dots (19)$$

相应相移角：

$$\phi_3 = \operatorname{tg}^{-1} \frac{1}{\omega T_3} \dots\dots\dots (20)$$

实际上在调制频率为 50 周情况下引起相移很小，亦即这时可以近似地认为这三个交流放大级为纯放大环节，即

$$W_{31}(P) = W_{22}(P) = W_{33}(P) = K_{21} \dots\dots\dots (21)$$

2) 阴极输出级 (包括级间耦合变压器)

线路如图 1 2 所示，其等效电路如图 1 3 所示。级间耦合变压器

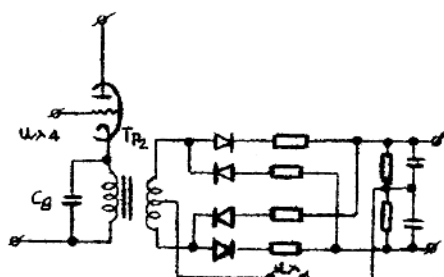


图 1 2

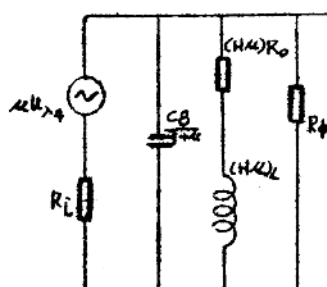


图 1 3