绪　　论

一、自动控制设备的作用

自动控制是目前火电厂生产过程中不可缺少的技术手段。随着科学技术的发展和大容量、高参数机组的出现，自动控制技术更加广泛地应用于电力工业生产的全过程，并起着越来越重要的作用。

在电厂的热力生产过程中，自动控制的任务是，当生产过程受到内、外干扰（在允许范围内），机组运行参数偏离给定值时，控制设备自动进行操作，消除干扰影响，使机组自动恢复到正常运行状态或按照预定的规律运行。电厂中的热工自动控制系统，一般都为负反馈系统，其典型的系统组成方框图如图 0-1所示。系统由调节对象和自动控制设备组成。这里所说的自动控制设备，是指从被调量到调节机构输出之间的全套自动化仪表的总称。

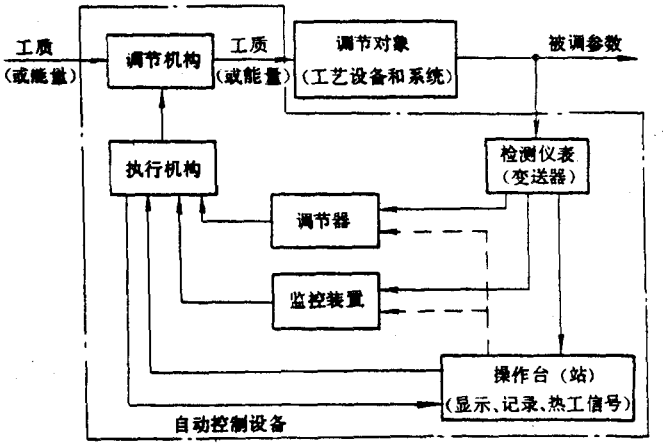


图 0-1　自动控制系统组成方框图

其中，变送器对过程参数进行测量和信号转换；调节器和监控装置等发出调节指令，使调节机构动作，最终使生产过程自动地按照预定的规律运行。一个自动控制系统的控制品质好坏，除取决于控制系统的设计是否合理外，还取决于控制对象和控制仪表的工作特性和使用方法。因此，作为自动化技术工作者，既要熟悉控制对象的特性，还要掌握各种自动控制仪表的工作原理、工作特性和使用方法，以便正确选择和使用各种控制仪表。

二、自动控制设备的概况

由于工业生产过程多种多样，其复杂程度也各异，因而相应的自动化程度亦各不相同，所采用的自动控制设备也多种多样。这些自动控制设备（或仪表）按其所用能源形式的不同，可分为四大类：

（1）气动控制仪表　气动控制仪表以压缩空气为能源。它具有结构简单、直观，易

需要全本请访问 www.ertongbook.com

于掌握，性能稳定，可靠性高，天然防爆及使用范围广等特点，特别适用于石油、化工等有易燃易爆危险的生产现场。气动控制仪表已有几十年的历史，在60年代以前，它是工业自动化系统的主要控制设备之一。目前气动控制仪表仍广泛应用于石油、化工、轻工等部门，在电力部门中，气动基地式调节仪表和气动执行器也被广泛地采用。近年来，气动控制仪表在发展速度和生产应用方面仅次于电动控制仪表。

（2）液动控制仪表　液动控制仪表以高压油或水为能源。它也是发展得比较早的一类自动控制仪表，具有结构简单、工作可靠的特点，多用于功率较大的场合。例如，目前电厂中的汽轮机调速系统和水电站中的水轮机调速系统，还较多地采用液动控制仪表。

气动和液动控制仪表的主要缺点是信息传递速度较慢，不适于快速调节、远距离控制和集中控制。

（3）电动控制仪表　电动控制仪表以电能作为能源。它是在本世纪中期才迅速发展起来的一种控制设备。由于它具有信息传递速度快、能实现快速和远距离控制，易于实现复杂的控制规律，易于集中显示和操作，并能与巡回检测装置、数据处理装置、电子计算机等联用，方便地组成各种复杂的控制系统，实现生产过程的综合自动化，因此，引起了世界各国的广泛重视，得到了迅速发展。目前电动控制仪表已成为工业自动化的主要技术工具，广泛地应用于石油、化工、电力、冶金、轻工、交通等工业部门。

（4）混合式控制仪表　混合式控制仪表同时使用上述两种或两种以上的能源进行工作。它既具有电动仪表能快速和远传信号等特点，又具有气动或液动控制仪表的特点。如火电厂中的某些汽轮机采用的电液复合调节器，即为混合式控制仪表。

自动控制仪表按结构、功能的不同，又可分为以下四类：

（1）基地式控制仪表　基地式控制仪表的特点是，其测量、显示、调节等部件组合成一个整体，安装在一个表壳里。这种控制仪表的系统成套性很强，一台基地式控制仪表就能解决一个简单自动控制系统的测量、指示、记录、调节等全部任务，具有结构简单、使用方便、可靠和经济等优点。但这种控制仪表的整定参数范围较窄，使用的局限性较大，一般不能互换使用。因此，它多适用于单参数、单回路的简单控制系统。

（2）单元组合式控制仪表　单元组合式控制仪表的特点是，整套仪表划分为若干个能独立实现一定功能的单元，各单元之间采用统一的标准信号互相联系，按照生产工艺的需要，少量单元进行不同的组合，便可构成多种复杂程度不同的自动检测和控制系统。这种控制仪表具有组成与改组系统方便，灵活，通用性强等特点，适合于大、中规模生产自动化的要求。

我国于50年代后期就设计和制造了气动单元组合仪表（QDZ型）和电动单元组合仪表（DDZ-I型）两大系列自动化仪表。随着电子技术的发展，半导体器件品种的增加和性能的改善，我国在60年代研制出了以晶体管和小型电子器件为基本元件的DDZ-Ⅱ型电动单元组合仪表；在70年代研制出了以集成运算放大器为基本元件的DDZ-Ⅲ型电动单元组合仪表；在90年代开发研制出以微机芯片为基本器件的DDZ-S型第四代电动单元组合仪表。

（3）组装式综合控制装置（或仪表）组装式综合控制装置（简称组装式仪表）的

特点是，具有非线性控制、逻辑控制功能，运用了数字技术和断续调节技术，可实现局部过程的综合协调控制。此外，它能够与控制计算机、程序控制装置、图像显示装置等配合使用，实现监控和自动保护，整套仪表的控制性能较高。

在我国，目前生产和使用的组装式仪表有自行研制的TF-900型和MZ-Ⅲ型，以及引进生产的ISPEC-200型仪表等。

（4）集中分散型综合控制装置　集中分散型综合控制装置是一种以微处理器和微型计算机为核心，对生产过程进行分散控制和集中监视、操作的直接数字控制装置。它以微处理器和微型计算机作为过程控制工具，完成目前模拟仪表和程控装置的功能；以小型计算机作为上位机，实现数据处理、监督控制；以图像显示为中心的人-机联系装置,实现集中显示、操作；用通信接口将装置的各部分同上位计算机联接，实现工业生产的综合控制。所以，该控制装置同时兼容了控制(Control)、计算(Computer)、通信(Communication)、图像显示(CRT)等"4C"技术，它将是今后相当长一段时期内适合于大型综合自动化的自动控制装置。

三、自动控制设备的发展方向

自动化技术是为生产服务的，它伴随着生产的发展而发展。自动化程度和对象不同，所采用的自动控制仪表也不相同。生产的发展对自动控制仪表不断提出新的要求；同时，新技术、新工艺以及新材料和新器件的不断出现，又为自动控制仪表的发展创造了条件。自动控制仪表就是这样随着生产发展和科学技术进步而迅速向前发展的。

随着工业生产中各种大容量、高参数、高效率的新型生产设备和生产过程的不断出现，检测和控制参数激增，控制回路增多，系统趋于复杂，系统安全性要求高，从而对自动控制仪表提出了许多新的要求。如要求控制功能更加完善；解决模拟仪表与计算机兼容问题；便于人-机联系和简化操作；简化现场安装、调试和投运工作；提高仪表及系统的安全性、可靠性等。

为了适应上述要求，需要将自动化仪表各个领域的最新技术，如数字控制技术、程序控制技术、数字逻辑技术、字符图像显示技术及数据通信技术等综合利用起来，开发出兼取模拟控制和计算机（数字）控制的优点，弥补它们之间缺点的新型控制装置。

近年来，由于微处理器迅速发展并成功地应用于自动控制仪表中，控制仪表具有记忆、判断、处理等多种功能，有的实现了数字化和智能化。在未来的自动化仪表中，常规的硬件功能式仪表在很多方面将被智能化仪表所取代，这是仪表发展的一种趋势。

在智能化控制仪表中，特别是近几年来得到迅速发展和广泛应用的单回路数字调节器和可编程序调节器，它们以微处理器为核心实现直接数字控制，可以完成模拟控制仪表的各种运算功能及PID调节规律，并配备了同上位计算机的通信接口。在仪表外观、输入输出信号和操作方式上，保留了模拟调节器的特点，可与模拟调节器混合使用，构成各种复杂的控制系统，也可以应用于集中分散型综合控制系统中面向生产过程的"前沿级"。这种数字调节器已在工业生产过程自动化中越来越被广泛地使用。

四、课程内容

"热工自动控制设备"是"电厂热力过程自动化"专业的主要专业课之一。针对我国

目前电厂热工过程所用自动控制仪表的现状，本书着重介绍1151系列电容式变送器、 I系列温度变送器、组装式电子综合控制装置、 DKJ型电动执行器、TKZ-2系列调速控制组合装置、气动基地式调节仪表、气动执行器和KMM可编程序调节器等。

“热工自动控制设备”课程的内容庞杂，发展更新很快， 控制仪表的品种繁多，各有不同的用途和特点。每一种控制设备都是一个独立而完整的仪表或装置，它们一般都有比较复杂的结构形式或电气线路，其工作原理也有所不同。但是，只要我们对各类模拟量控制仪表进行仔细研究和分析，就不难发现，这些不同的模拟量控制仪表有其共同点，它们一般都是按负反馈平衡原理构成的，其组成原理如图0-2所示。由图可知，按负反馈原理构成的各种模拟量控制仪表或装置在结构上主要由输入转换部分、比较部分，放大部分和反馈部分组成，各部分之间的信息传递与作用方向如图中箭头所示。输入转换部分是一个线

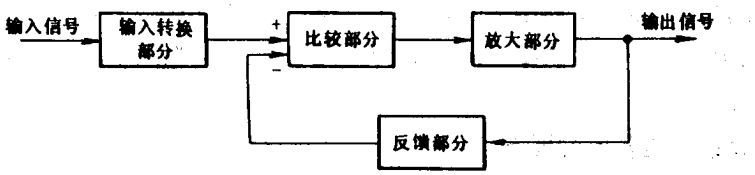


图 0-2 模拟控制仪表的组成原理方框图

性环节，一般由高稳定性和高准确度的元、部件组成；比较部分由线性元、部件组成，用以保证各综合信号在该部分进行线性叠加（或称线性综合）；放大部分是一个高增益的放大器（气动放大器、机械放大器或电子放大器等），用以保证负反馈平衡的准确度；反馈部分是由高准确度和高稳定度的元、部件所组成的各种运算电路。当放大部分的增益足够大时，仪表的传递特性基本上由反馈回路传递函数的倒数与输入转换部分传递函数的乘积决定。特性参数的调整环节一般都附设在输入转换部分和反馈部分。

在分析每一个仪表时，主要从使用角度出发（检修、调试），对它们的功能（或用途）、结构组成、工作原理、工作特性、调整环节和使用方法等进行较全面的介绍。

在教学过程中，应始终按唯物辨证法的认识论去系统分析每一个仪表的基本内容，培养学生既要善于分析，又要善于综合。在分析每一个具体仪表时，应注意以下两点：

1）将整体仪表分解为简单的基本部件或环节（以上述的结构框图为基础），弄清它们的工作原理和传递特性，以及保证这些特性的技术条件和调校方法；

2）掌握由基本部件或环节组成仪表的基本方法和对整机特性的测试、调校方法。

在讲授每一个仪表时，应从它们的结构联系、连接，运动以及运动的产生（即动作原理）和消失（即动态或静态平衡）方面去分析，并将整机内容划分为如下六个部分，即仪表的基本用途、结构组成、工作原理、工作特性、调整环节、使用维修，依次逐步深化，使学生较全面地掌握基本知识、基本理论和基本技能。

第一篇　模拟式自动控制设备

第一章　1151系列电容式变送器

电容式变送器是70年代出现的一种新型变送器。它具有准确度高、稳定性好、结构简单、测量范围宽、使用方便等显著特点，因此，最近十几年来得到了显著发展。在目前的新型变送器中，电容式变送器是发展最快、使用最多的变送器之一。它已广泛地应用于石油、化工、电站、冶金、轻工、食品、医药等部门。

在热工测量及自动调节系统中，电容式变送器为检测、变送环节，它可连续地把生产过程中的液体、气体、蒸汽等介质的压力、压差、液位、流量等热工参数的变化转换成4～20mA，DC 统一信号，送至调节、显示等有关单元进行显示或控制。

本章讲授西安仪表厂从美国罗斯蒙特（Rosemount）公司引进制造技术生产的1151系列电容式变送器。

1151系列电容式变送器主要由测量部分和转换电路两大部分组成，其组成原理如图1-1所示。

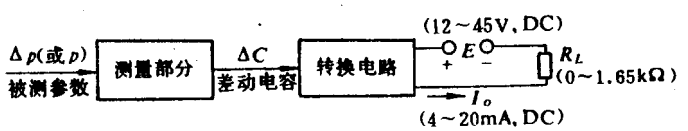


图 1-1　电容式变送器的组成原理图

第一节　测　量　部分

一、基本结构及工作原理

测量部分的作用是将被测参数（如压差、压力、液位、流量等）转换成相应的差动电容值的变化。

图1-2所示为测量部分的结构示意图。它主要由隔离膜片 1和 2、测量膜片 3、电容固定极板 4 和5、刚性绝缘体 6、引出电极 7等组成。隔离膜片与被测介质接触，膜片 1与 3之间为一室，膜片 2 与 3之间为另一室，两室各自封闭，内充硅油（或氟油），组成两室结构的单元。测量膜片是一片弹性系数温度稳定性好的平板金属膜片，作为差动可变电容的活动极板。在测量膜片两侧，有两个在玻璃凹形球面上用真空蒸发有金属层的固定极板。

被测压力 p_H和 p_L 分别作用于高、低压侧的隔离膜片 1、2上，灌充液将压力传送到测量膜片 3上。当两侧压力不相等时，测量膜片向一侧位移，如图1-2(b) 中的虚线所示。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

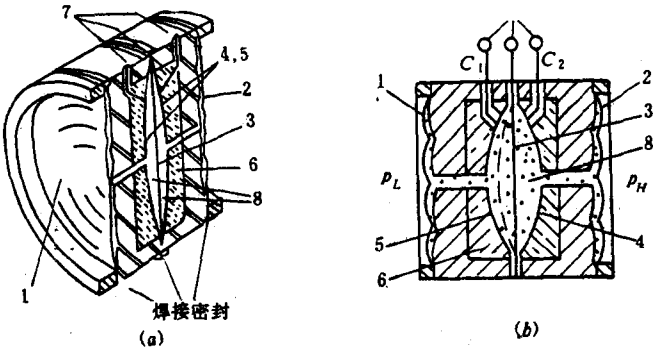


图 1-2　测量部分结构示意图

(*a*) 结构图；(*b*) 结构示意图

1，2—隔离膜片；3—测量膜片；4、5—电容固定极板；6—刚性绝缘体；7—引出电极；8—灌充液

此时，测量膜片 3 与两侧固定极板间的距离一侧增大，另一侧减小，因此两个固定极板与活动极板之间的电容量一个增大，另一个减小。引出电极 7 将这两个电容的变化信号输至转换电路。这样，测量部分就把被测参数（压力、压差、液位等）的变化转换成差动电容量的变化。

这种结构对测量膜片具有较好的过载保护能力。当被测压差过大时，测量膜片贴紧一侧的凹形球面上，不会因产生过大位移而损坏膜片。过载消除后，测量膜片恢复到正常位置。灌充液（硅油或氟油）除用作传递压力外，它的粘度特性对冲击力具有一定缓冲作用（阻尼作用），可消除被测介质的高频脉动压差对变送器输出准确度的影响。

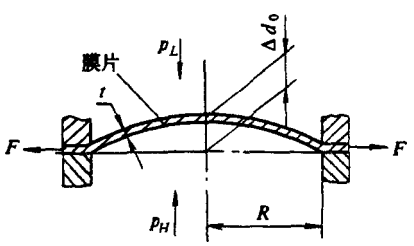


图 1-3　测量膜片工作原理图

二、转换特性分析

测量部分将被测压差(或压力,下同)信号转换为差动电容变化信号是经过两个转换过程来实现的。下面分析这两个转换过程的转换特性。

1. 压差－位移转换特性

1151 系列电容式变送器的压差－位移转换原理如图 1-3所示。

当被测压差为均匀分布时，膜片中心处的位移Δd_0与被测压差Δp之间有如下关系：

$$\frac{\Delta pR^4}{Et^4}=\frac{16}{3(1-\mu^2)}\frac{\Delta d_0}{t}+\frac{2}{21}\frac{23-9\mu}{1-\mu}\left(\frac{\Delta d_0}{t}\right)^3 \qquad (1\text{-}1)$$

式中　Δp——被测压差；

E——膜片材料的弹性模量；

R——膜片周边半径；

μ——膜片材料的泊松比；

t——膜片厚度。

式（1-1)所示压差－位移转换特性是一非线性特性。但是，若$\Delta d_0 \ll t$时，可忽略该

式中的高次项。此时，位移Δd_0与差压Δp之间的关系为

$$\Delta d_0 = \frac{3(1-\mu^2)}{16}\frac{R^4}{Et^3}\Delta p = K_1 \Delta p \qquad (1-2)$$

式中 K_1——膜片的结构系数，$K_1 = \frac{3(1-\mu^2)}{16}\frac{R^4}{Et^3}$。

显然，K_1只与变送器测量部分的具体结构（测量膜片的材料及尺寸）有关，一定结构的变送器，其K_1值近似为一常数。

由式(1-2)看出位移与压差成线性关系。为了保证压差-位移为线性转换关系，要求膜片的位移仅为0.1mm左右。当测量较高压差时，采用较厚的膜片，容易满足$\Delta d_0 \ll t$条件，式（1-2）所示关系成立；但在测量较低压差时，不易满足$\Delta d_0 \ll t$条件，此时需采用具有初始预紧应力的平膜片，这样不仅可提高压差-位移转换关系的线性度，同时还可减小滞后效应。

厚度很小、初始张力很大的膜片，其弯曲刚度可以忽略，此时膜片中心处的位移可用下式计算：

$$\Delta d_0 = \frac{R^2}{4\sigma_0 t}\Delta p = K_1' \Delta p \qquad (1-3)$$

式中 σ_0——膜片受初始张力F时对应的预紧应力；

K_1'——膜片的结构系数，$K_1' = R^2/(4\sigma_0 t)$。

式(1-3)中的K_1'为常数，因此压差-位移转换特性也是线性的。

由式（1-2）和式(1-3)可知：

1）当结构一定时，$\Delta d_0 = f(\Delta p)$为比例转换特性；

2）当测量膜片的周边半径R一定时，改变膜片厚度t，可以实现不同压差值的测量（高压差和高压力用厚膜片，低压差和低压力用张紧的薄膜片），即可生产多种测量范围的变送器，故1151系列电容式变送器的测量部分具有统一的外形结构。

2.位移-电容转换特性

为分析简便，利用等效原理，将图1-2所示差动球面-平面型（固定极板为球面，活动极板为平面）电容简化成图1-4所示平板型差动电容。活动极板移动的方向和距离受被测压差的方向和大小控制。当被测压差变化使活动极板产生位移时，活动极板与两固定极板之间的电容量即发生变化。若活动极板移动Δd_0距离，则它与固定极板之间的距离，一侧变为$d_0 + \Delta d_0$，而另一侧变为$d_0 - \Delta d_0$，如图1-4中所示。

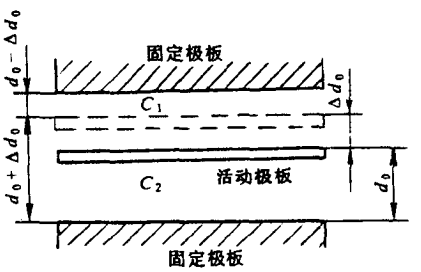


图 1-4 差动平行板电容器结构示意图

由图示可得差动平行板电容器的电容量计算公式为

$$C_1 = K\frac{\varepsilon A}{d_0 - \Delta d_0} \qquad (1-4)$$

$$C_2 = K\frac{\varepsilon A}{d_0 + \Delta d_0} \qquad (1-5)$$

式中 C_1——活动极板与上固定极板间的电容量；

C_2——活动极板与下固定极板间的电容量；

K——量纲系数；

A——电容极板的有效面积；

ε——极板间介质的介电常数；

d_0——被测压差为零时，活动极板（测量膜片）与两固定极板之间的初始距离；

Δd_0——活动极板在被测压差作用下所产生的位移。

如果采用差动平行板电容器的差动电容值$\Delta C = C_1 - C_2$作为输出量，则

$$\Delta C = C_1 - C_2 = K\frac{\varepsilon A}{d_0 - \Delta d_0} - K\frac{\varepsilon A}{d_0 + \Delta d_0}$$

$$= K\varepsilon A\frac{2\Delta d_0}{d_0^2 - \Delta d_0^2} = K'\frac{2\Delta d_0}{d_0^2 - \Delta d_0^2} \tag{1-6}$$

式中 K'——常数，$K' = K\varepsilon A$。

由式(1-6)可以看出，差动电容ΔC与活动极板的位移Δd_0之间呈非线性关系。为得到线性转换关系，可取两电容之差与两电容之和的比值作为输出量，即

$$\frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} = \frac{K\frac{\varepsilon A}{d_0 - \Delta d_0} - K\frac{\varepsilon A}{d_0 + \Delta d_0}}{K\frac{\varepsilon A}{d_0 - \Delta d_0} + K\frac{\varepsilon A}{d_0 + \Delta d_0}} = \frac{\Delta d_0}{d_0} = K_2\Delta d_0 \tag{1-7}$$

式中 K_2——系数，$K_2 = 1/d_0$。

将式（1-2)代入式（1-7),得

$$\frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} = K_1 K_2 \Delta p \tag{1-8}$$

式（1-8)即为电容式变送器测量部分的输入量与输出量之间的线性特性表达式。由此式可得出如下结论：

1）当K_1、K_2为常数时，$(C_1 - C_2)/(C_1 + C_2)$之比值与被测压差成线性关系。

2)$(C_1 - C_2)/(C_1 + C_2)$之比值与介电常数ε无关，即从设计原理上消除了介电常数随温度变化给测量带来的误差。

3）若设计一种转换电路，使其输出电流$I_s = K_3(C_1 - C_2)/(C_1 + C_2)$，$I_s$就与被测压差成正比关系。

4）如果电容极板的结构完全对称，则可以得到良好的稳定性。

5）在上述分析中，没有考虑分布电容的影响。若考虑分布电容C_s的存在,则测量部分的电容比值为

$$\frac{(C_1 + C_s) - (C_2 + C_s)}{(C_1 + C_s) + (C_2 + C_s)} = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2 + 2C_s} \tag{1-9}$$

比较式（1-9）和式(1-8）后可知，分布电容的影响将造成非线性误差。为了使变送器最终获得高于0.25级的准确度级，需在转换电路中设置线性调整环节。

实测和计算均表明球面-平面型电容器有类似或接近平行板电容器的特性。测量部分大约有150 pF 的电容量输出。

第二节　转　　换　　电路

转换电路的作用是将测量部分的线性化输出信号转换成4 ～20mA，DC 统一信号，并送至负载。此外，它还实现整机的零点调整、量程调整、正负迁移、线性调整及阻尼调整等功能。

1151系列电容式变送器的转换电路共有三种类型，即 E型（普通型）、J 型（用于流量测量）、F型（用于微压差测量）。本节只介绍 E型转换电路。

E型转换电路如图1-5所示。它主要由解调器、振荡器、振荡控制放大器、调零电路、

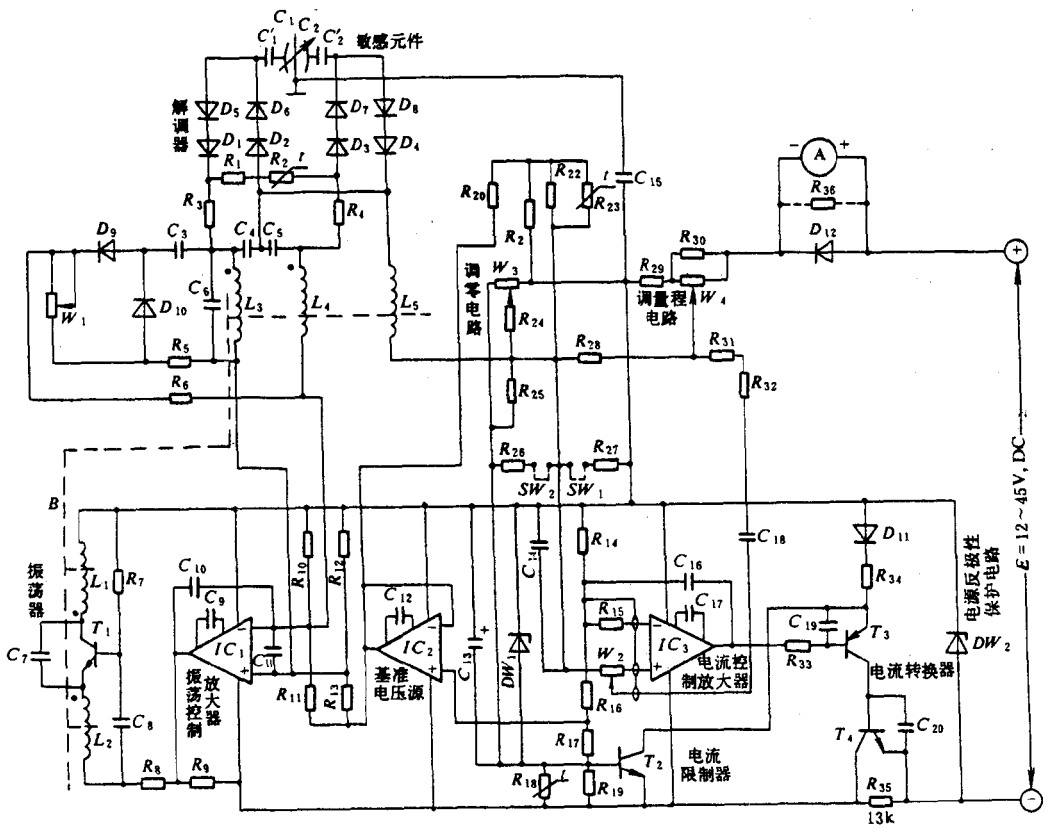


图 1-5　E 型转换电路

调量程电路、电流控制放大器、电流转换器、电流限制器、电源反向极性保护电路和基准电压源等组成，其组成原理如图1-6所示。下面按该电路的转换特性分两大部分进行介绍。

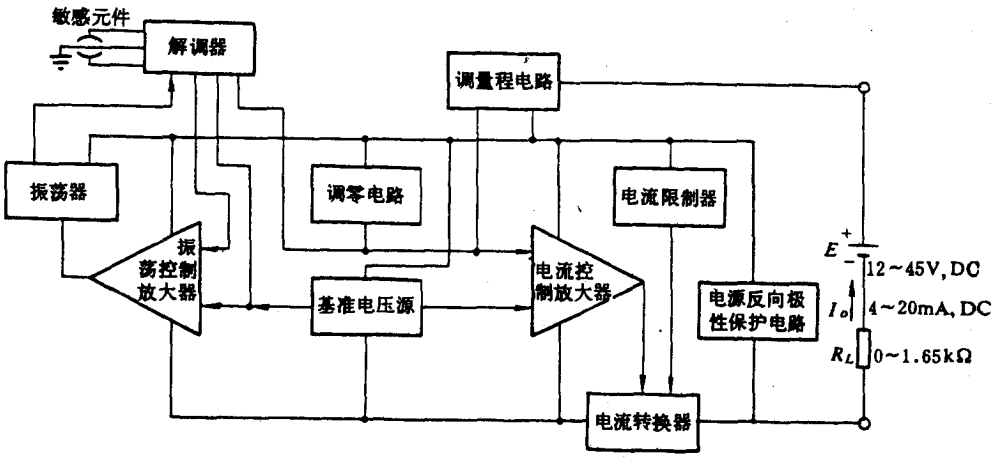


图 1-6　E 型转换电路组成原理框图

一、电容-电流转换电路

该部分的作用是将（C_1-C_2）/（C_1+C_2）的变化量线性地转换为测量电流I_s（或电压U_s），其电路主要由振荡器、解调器和振荡控制放大器组成。

1.振荡器

振荡器的作用是产生交流激励电压e，供给解调器。电路由晶体三极管T_1、电容C_7和C_8、电阻R_7、R_8及变压器B组成。它属于变压器耦合式振荡器，振荡频率由测量部分的电容和变压器电感决定，约为32kHz；振荡幅值大小由振荡控制放大器IC_1控制，其振幅（峰-峰值）V_{PP}约为25～35V。

2.解调器

解调器是转换电路的核心电路之一，其作用有两个：一是将（C_1-C_2）/（C_1+C_2）的变化量转换成相应的测量电流I_s（或U_s）送至电流控制放大器；二是把通过绕组L_3、L_4的直流电流相叠加后送至振荡控制放大器。

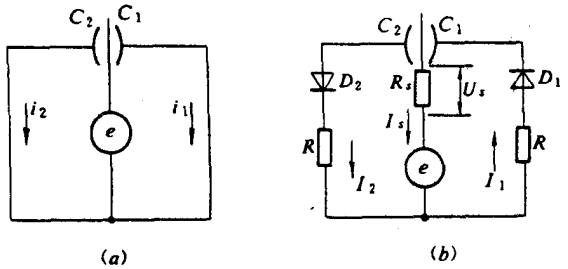


图 1-7　电容-电流转换原理图

（a）电容-电流转换；（b）交流-直流转换

为便于理解，先简要说明一下电容-电流的转换原理。图1-7所示为电容-电流的转换原理图。图中e为振荡器输出的交流激励电压；i_1和i_2分别为e作用下流过C_1和C_2的交流电流。由图示可得

$$\left.\begin{aligned} i_1 &= \omega e C_1 \\ i_2 &= \omega e C_2 \end{aligned}\right\} \qquad (1\text{-}10)$$

式中　ω——交流电压e的角频率。

在设计电路时，若使i_1与i_2之和等于常数，而i_1与i_2之差作为输出信号，则有

$$i_1+i_2=\omega e\,(C_1+C_2)=i_n=K_3'(\text{常数})$$

则

$$i_1 - i_2 = \omega e\ (C_1 - C_2) = K_3' \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} \tag{1-11}$$

将式（1-8）代入式（1-11），得

$$i_1 - i_2 = K_3' K_2 K_1 \Delta p \tag{1-12}$$

由上式可知，该电路的电流差（$i_1 - i_2$）与输入差压Δp成比例关系。用图1-7（b）所示解调器将i_1和i_2解调成相应的直流电流I_1和I_2，即可在电阻R_s上得到相应的差动电流I_s（$I_s = I_1 - I_2$）或电压U_s（经R_s转换），此信号将输至电流控制放大器。

E型转换电路中的解调器由二极管$D_1 \sim D_8$、电阻R_1、R_3、R_4及热敏电阻R_2、电容C_1'、C_2'组成。电容C_1'、C_2'与测量部分的电容C_1和C_2连接。振荡器产生的激励电压通过变压器B的副边绕组L_3、L_4、L_5及整流二极管加到电容C_1、C_2上。其工作原理电路如图1-8所示。

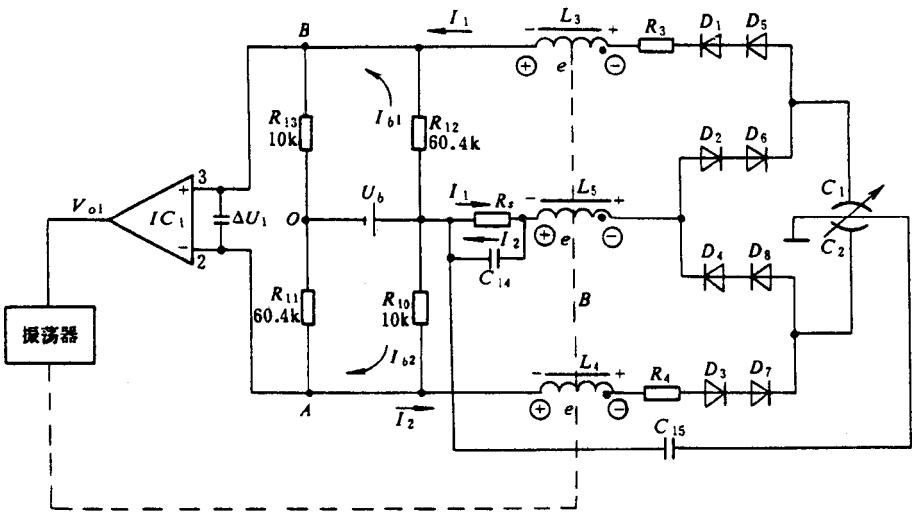


图 1-8　解调器及振荡控制放大器的原理电路

下面先简要说明解调器的解调过程。设振荡器输出的激励电压为e，并令电容C_1、C_2的容抗大于回路其他阻值，则通过C_1、C_2的电流分别为

$$\left.\begin{aligned} i_1 &= \omega e C_1 \\ i_2 &= \omega e C_2 \end{aligned}\right\} \tag{1-13}$$

由图1-8所示，当e为正半周（如图中“+”、“-”极性）时，二极管D_2、D_6及D_3、D_7导通，D_1、D_5及D_4、D_8截止，在L_5上电压e的作用下，产生一电流I_1，其流通回路为，从L_5的“+”端→D_2、D_6→C_1→C_{15}→R_s→L_5的“-”端。与此同时，在L_4上电压e的作用下，产生一电流I_2，其流通回路为，从L_4的“+”端→R_4→D_3、D_7→C_2→C_{15}→R_{AO}（$R_{10} // R_{11}$）→L_4的“-”端。

同理，当e为负半周（如图中所示⊕、⊖极性）时，二极管D_1、D_5及D_4、D_8导通，D_2、D_6及D_3、D_7截止，在L_5上电压e的作用下产生一电流I_2，其流通回路为，从L_5的⊕端→R_s→C_{15}→C_2→D_8、D_4→L_5的⊖端。与此同时，在L_3上电压e的作用下，产生一

需要全本请访问 www.ertongbook.com

电流I_1，其流通回路为，从L_3的⊕端→$R_{BO}(R_{13}//R_{12})$→C_{15}→C_1→D_5、D_1→R_3→L_3的⊖端。

由上述可知，流经R_s中的I_1、I_2为经过半波整流后的平均电流。如果回路的时间常数τ($\tau=RC$）很小，那么电容器C_1、C_2两端电压的变化应等于激励电压的峰-峰值V_{PP}。流过电容器C_1、C_2的电流经半波整流后的平均值为

$$I_1=V_{PP}C_1f \tag{1-14}$$

$$I_2=V_{PP}C_2f \tag{1-15}$$

则

$$I_s=I_1-I_2=V_{PP}f(C_1-C_2) \tag{1-16}$$

$$V_s=I_sR_s=R_sV_{PP}f(C_1-C_2) \tag{1-17}$$

由上式可知，I_1、I_2电流不受电压波形和电阻大小的影响。

3.振荡控制放大器

振荡控制放大器由高灵敏度的线性集成运算放大器IC_1和基准电压源U_b及电阻R_{10}～R_{13}等组成。基准电压源由稳压管DW_1、电容器C_{13}、电压跟随器IC_2及电阻R_{14}、R_{16}和R_{17}组成。基准电压U_b约为3.2V左右。解调器及振荡控制放大器相连接构成具有深度负反馈的控制电路，其原理电路如图1-8所示。图中的R_s为电容器C_{14}两端之间的等效电阻。

由图1-8所示及上述分析可知，振荡控制放大器中的IC_1的输入端接收了两个电压信号：由基准电压U_b所产生的定值电压信号U_{AB1}；通过C_1、C_2的交流电流经二极管D_1、D_5和D_3、D_7整流后的直流电流I_1和I_2在R_{BO}和R_{AO}上所产生的测量电压信号U_{BA2}。U_{AB1}和U_{AB2}之值分别为

$$U_{AB1}=I_{b2}R_{11}-I_{b1}R_{13}=\frac{U_b}{R_{11}+R_{10}}R_{11}-\frac{U_b}{R_{13}+R_{12}}R_{13}$$

因$R_{13}=R_{10}$，$R_{11}=R_{12}$，故$I_{b1}=I_{b2}=\dfrac{U_b}{R_{11}+R_{10}}=k_b$，所以

$$U_{AB1}=k_b(R_{11}-R_{13}) \tag{1-18}$$

$$U_{AB2}=I_1R_{BO}+I_2R_{AO}=I_1(R_{12}//R_{13})+I_2(R_{10}//R_{11})$$

因$R_{10}=R_{13}$，$R_{11}=R_{12}$，故$R_{AO}=R_{BO}=k_i$，所以

$$U_{AB2}=k_i(I_1+I_2) \tag{1-19}$$

视IC_1为理想运算放大器，则当电路处于稳定工作状态时，IC_1的两输入电压信号应相平衡，即

$$U_{AB1}=U_{AB2}$$

或

$$k_b(R_{11}-R_{13})=k_i(I_1+I_2)$$

所以

$$I_1+I_2=\frac{k_b}{k_i}(R_{11}-R_{13})=\frac{U_b}{R_{11}R_{10}}(R_{11}-R_{13})$$

$$=K_3\ (\text{常数}) \tag{1-20}$$

振荡控制放大器与振荡器和解调器构成具有深度负反馈的定值调节系统，如图1-9所示。此系统确保了振荡器输出电压幅值的稳定，即保证了I_1+I_2之和为一常数。该电路的

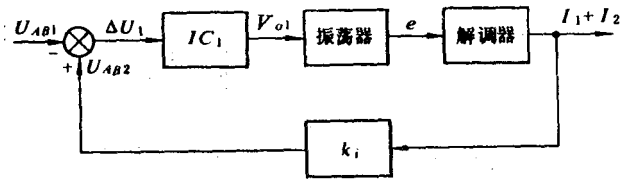


图 1-9　振荡控制原理方框图

稳幅过程如下：

当电路受到干扰，激励电压 $e\uparrow$ →解调器的输出（I_1+I_2）↑→$U_{AB2}\uparrow$ →IC_1输出 $V_{o1}\uparrow$ → 振荡器的电源电压 ↓ →T_1 管的$U_{ce}\downarrow$ →激励电压$e_i\downarrow$ →$(I_1+I_2)\downarrow$。这一负反馈的平衡过程，可确保$I_1+I_2=K_3=$常数。

根据上述分析，将式（1-14）和式(1-15）代入式（1-20），得

$$V_{PP}(C_1+C_2)f=K_3$$

或

$$V_{PP}=K_3\frac{1}{(C_1+C_2)f} \tag{1-21}$$

在R_s上流过的两个单向电流I_1和I_2之差I_s为

$$I_s=I_1-I_2=V_{PP}(C_1-C_2)f \tag{1-22}$$

将式（1-21）代入式（1-22），得

$$I_s=I_1-I_2=K_3\frac{C_1-C_2}{C_1+C_2} \tag{1-23}$$

由R_s两端输出的差动电压U_s为

$$U_s=I_sR_s=R_sK_3\frac{C_1-C_2}{C_1+C_2} \tag{1-24}$$

由上述分析可知，电容-电流转换电路实现了电容-电流的线性转换。从式（1-24）可知，为了保证转换准确度，K_3应为常数，即应使影响K_3的有关参数（如基准电压U_b、电阻$R_{10}\sim R_{13}$、线性运算放大器IC_1等）均应有良好的稳定性。为此，对这些元件应有严格要求。

二、电流放大与控制电路

电流放大与控制电路的作用是将解调器的输出电压U_s放大并转换成4～20mA，DC统一信号输出。其电路主要由电流控制放大器、电流转换器、电流限制器、调零电路、调量程电路等组成，原理电路如图1-10所示。

电流控制放大器由线性集成运算放大器IC_3及外接电阻和基准电压组成。电流转换器由T_3及T_4组成。电流控制作用是通过IC_3的输出去控制流过T_3、T_4的电流，从而改变输出电流I_o，同时改变反馈到IC_3输入端的电压U_5来实现的，其控制原理如图1-11所示。图中：αR_f为反馈回路的有效电阻值。由图示可知，这是一个负反馈的闭环系统，它能保证输出电流I_o与测量电压U_s成线性关系。

在图1-10中，因$R_{15}=W_2$，故IC_3两输入端的电位V_A和V_B可直接进行比较。

V_A为恒定电压E_1通过电阻R_{14}与$R_{16}+R_{17}$分压后给IC_3反相输入端提供的偏置电压。

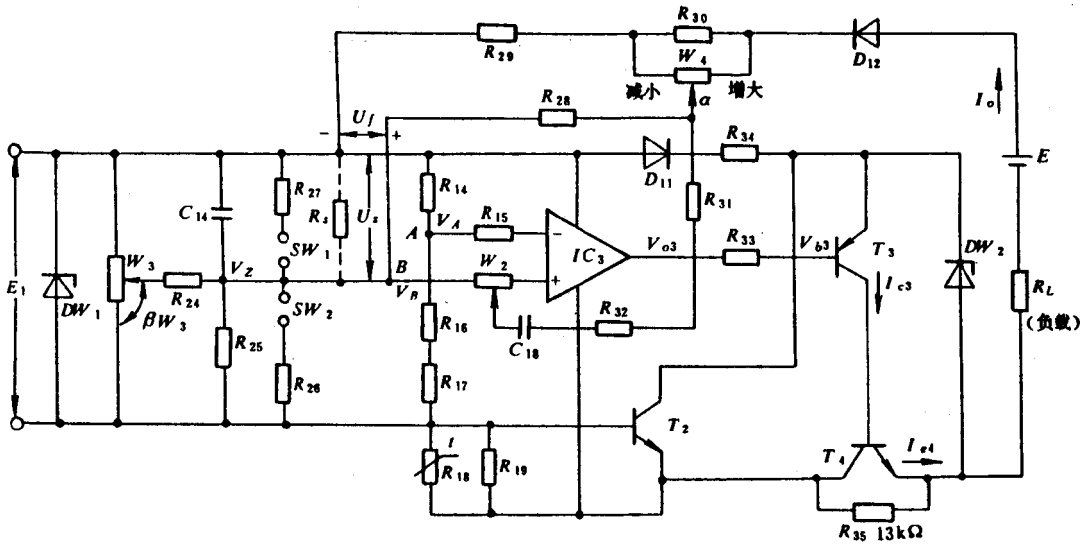


图 1-10　电流控制放大器原理电路

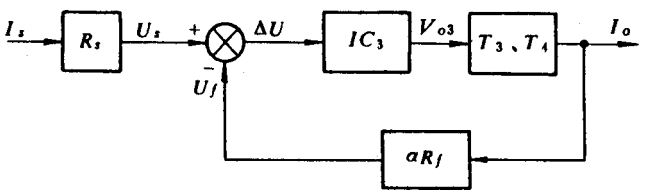


图 1-11　电流原理控制框图

在IC_3的同相输入端输入了三个信号（忽略阻尼信号）：解调器输出的测量电流在R_s上产生的电压U_s；调零电位V_Z；反馈电压$U_f(U_f=\alpha I_o R_f)$。V_B为

$$V_B = U_s + V_Z - U_f$$

若视IC_3为理想运算放大器，则该电路处于稳定状态时，A、B两点电位相等，即

$$V_B = V_A = U_s + V_Z - \alpha I_o R_f$$

所以

$$I_o = \frac{U_s}{\alpha R_f} + \frac{1}{\alpha R_f}(V_Z - V_A) \tag{1-25}$$

式中　α——反馈系数，其值可由电位器W_4进行调整；

R_f——等值反馈电阻。

考虑到式（1-25）中的$(V_Z - V_A)/(\alpha R_f)$为常数项，取输入输出的变化量，并将式（1-24）及式(1-8)代入此式，即得

$$\Delta I_o = \frac{R_s}{\alpha R_f} K_3 K_2 K_1 \Delta p = K_4 K_3 K_2 K_1 \Delta p$$

$$= K \Delta p \tag{1-26}$$

式中　K_4——电流控制放大器的传递系数，$K_4 = \dfrac{R_s}{\alpha R_f}$；

K——变送器的总传递系数，$K = K_4 K_3 K_2 K_1$。

由式（1-25）及式（1-26）可以看出：

1）只要保证系数K_1、K_2、K_3、K_4为常数，则ΔI_o与Δp之间呈线性关系，在实际工作中，K_1、K_2、K_3、K_4均能保证恒定，所以该变送器具有良好的线性转换准确度。

2）调零位（调整W_3），即改变V_Z，对量程没有影响；调量程（调整W_4），即改变α，会影响零位变化。

3）起始电流I_o（4 mA）由V_Z确定，即通过调整W_3确定。

三、调整环节及保护电路

为了确保变送器的使用准确度及安全运行，在电路中设置了多种调整环节，以满足调试及运行、维修的需要。

1.零位调整电路

该电路用来校正变送器的工作零位，即在输入差压$\Delta p = 0$时，调整调零电位器，使输出$I_o = 4$ mA，DC。

零位调整电路由电位器W_3、R_{24}、R_{25}组成，如图1-10所示。调零电压V_Z由W_3的动触点取出再经电阻R_{24}和R_{25}分压后输至IC_3的同相输入端。改变V_Z，即可改变输出电流I_o的大小。其调整过程如下：

当$I_o > 4$ mA时，反时针调整电位器W_3（即图中动触点向上调）$\rightarrow V_Z\uparrow \rightarrow V_{o3}\uparrow \rightarrow V_{b3}\uparrow \rightarrow I_{b3}\downarrow \rightarrow I_{c3}\downarrow \rightarrow I_{e4}\downarrow \rightarrow I_o\downarrow$。这样，通过恰当调整即可使$I_o$恰等于 4 mA。

当$I_o < 4$ mA时，顺时针调整电位器W_3（图中动触点向下调）$\rightarrow V_Z\downarrow \rightarrow V_{o3}\downarrow \rightarrow V_{b3}\downarrow \rightarrow I_{b3}\uparrow \rightarrow I_{c3}\uparrow \rightarrow I_{e4}\uparrow \rightarrow I_o\uparrow$。这样，通过恰当调整可使$I_o$为 4 mA。

2.正、负迁移调整电路

为了满足测量某些工艺流程被测参数的需要，需扩大变送器的使用范围，提高变送器的测量范围和调节系统的灵敏度，即需要将变送器的测量范围起始点进行正向或负向迁移，这称为“零点迁移”。

所谓“零点迁移”，就是将变送器某一测量范围的起始点由零迁移至某一个数值（正值或负值）。如果把测量范围起始点（即下限）由零迁移至某一正值，就称此为正向迁移；反之，就称为负向迁移。变送器进行零点迁移后，其输出特性的斜率和量程并不改变，只是测量范围平移了，如图1-12所示。

在变送器的使用过程中，正确地采用正、负迁移，不仅可以扩大变送器的使用范围，若同时恰当地选择量程，还可提高变送器的使用准确度和灵敏度。

该变送器的零点迁移是通过短接图1-10中的SW_1或SW_2插孔来实现迁移的粗调，用调零电位器W_3实现迁移的细调的，其调整原理如下：

图1-10中所示SW_1和SW_2迁移插孔均处于断开状态，即无迁移状态。

正迁移：短接SW_1插孔，正电位经电阻R_{27}引至B点，$V_B\uparrow \rightarrow V_{o3}\uparrow \rightarrow V_{b3}\uparrow \rightarrow I_{b3}\downarrow \rightarrow I_{c3}\downarrow \rightarrow I_{e4}\downarrow \rightarrow I_o\downarrow \rightarrow$ 实现零点压缩，达到变送器被测压差起始点正向迁移的目的。

负迁移：短接SW_2插孔，负电位通过电阻R_{26}引至B点，$V_B\downarrow \rightarrow V_{o3}\downarrow \rightarrow V_{b3}\downarrow \rightarrow I_{b3}\uparrow \rightarrow I_{c3}\uparrow \rightarrow I_{e4}\uparrow \rightarrow I_o\uparrow \rightarrow$ 零位升高，达到被测压差起始点负向迁移的目的。

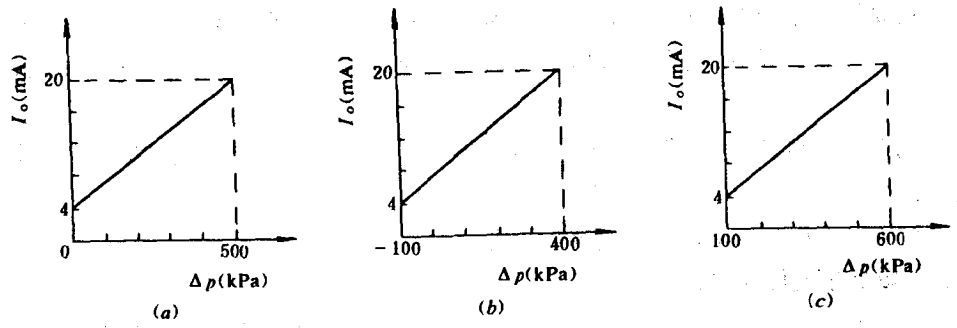


图 1-12　零点迁移前后的静态曲线

（a）迁移前；（b）负迁移；（c）正迁移

小范围迁移量可直接用调零电位器进行调整。

3.量程调整电路

量程调整电路的作用是扩大变送器的测量范围，实现一表多用。量程调整电路主要由电位器W_4、电阻R_{30}、R_{29}、R_{28}组成，其电路如图1-10中所示。它是采用改变反馈系数a的方法来改变电流控制放大器的闭环增益而达到调整量程之目的的。反馈系数a与电位器W_4、电阻R_{30}、R_{29}、R_{28}有关。调整W_4，可改变a之值。顺时针调整W_4（即图中触点左移）时，a减小，负反馈减弱，电流控制放大器的闭环增益增大，量程范围减小；反之，量程范围增大。量程调整比为1∶6。

4.线性调整电路

为了使变送器最终获得高于0.25级的准确度，在转换电路中设置了线性调整电路。它由电位器W_1、电阻R_5、R_6、电容C_3、二极管D_9、D_{10}组成，并接在变压器B的次级绕组L_3两端（如图1-5中所示），取其分流所产生的电压加到IC_1的输入端，提高振荡器输出的V_{PP}，以调整测量部分产生的微小非线性误差。在变送器出厂校验时线性调整已调好，用户在使用过程中一般不再调整。

5.阻尼调整电路

该变送器采用电气阻尼调节方式来改变变送器的响应时间常数。调整电路由电位器W_2、电阻R_{31}、R_{32}和电容C_{18}组成，如图1-10中所示。调整电位器W_2，可连续改变动态反馈量的大小，实现阻尼时间常数的调整，调整范围为0.2～1.67s。

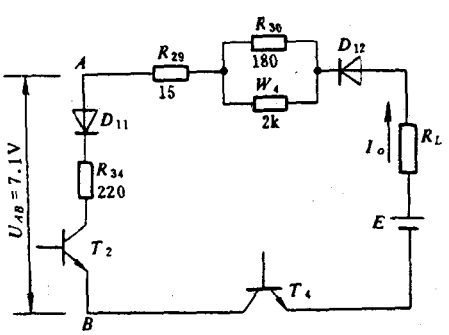


图 1-13　电流限制电路

6.电流限制电路

该电路的作用是限制变送器过载时的输出电流不大于30mA，以保护电路中各元件不受损坏。电流限制电路由电阻R_{34}、晶体三极管T_2和二极管D_{11}组成，如图1-13所示。

当变送器正向压力过载或其他原因造成输出电流过大时，电阻R_{34}上的压降增大，因U_{AB}为

固定电压7.1V，迫使T_3管的U_{ce2}下降，使其工作在饱和区。这样，即限制了输出电流的幅值，使输出电流I_o不大于30mA。

7.反向极性保护电路

反向极性保护电路由稳压二极管DW_2组成，其作用是当变送器的电源极性接反时，DW_2正向导通，从而使电路中的其他元、器件不被过高的反向电压损坏。

8.温度补偿电路

图1-5中的电阻$R_{20}\sim R_{23}$用于变送器零点温度补偿；R_1和R_2用来进行量程温度补偿，其补偿程度由R_3和R_4控制。

9.基准电压电路

此电路主要由稳压管DW_1、电阻R_{18}、R_{19}、集成运算放大器IC_2等组成。DW_1、R_{18}、R_{19}组成的稳压电路，用来提供6.4V的恒定电压，作为基准电压E_1。电压跟随器IC_2输出的3.2V恒定电压，作为振荡控制放大器输入回路的基准电压（定值电压）U_b.

第三节　整　机　综述

1151系列电容式变送器用于工业生产过程中的压差Δp（或压力p）→I_o（4～20mA）转换，其结构由测量部分和转换电路两大部分串接组成，采用开环方式工作。其工作过程如下：

假定被测压差Δp（或压力p）↑（增加）→测量膜片位移$\Delta d_0 = K_1 \Delta p$（或$K_1'\Delta p$）↑→

$$\left\{\begin{array}{l}\text{负压室电容 } C_1 = K\dfrac{\varepsilon A}{d_0 - \Delta d_0}\uparrow \\ \text{正压室电容 } C_2 = K\dfrac{\varepsilon A}{d_0 + \Delta d_0}\downarrow\end{array}\right\} \rightarrow \text{电容比}\frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2}\uparrow \rightarrow \text{解调器输出 } I_s = I_1 - I_2\uparrow$$

→电流放大与控制电路的输出ΔI_o↑，即实现$\Delta I_o = f(\Delta p)$的线性转换。

整机的信息传递与转换原理及过程如图1-14所示。

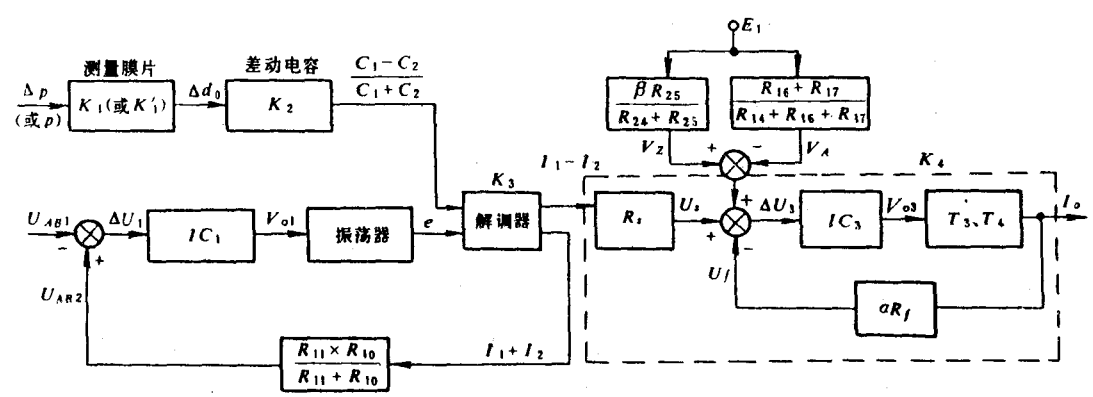


图1-14　整机信息传递与转换方框图

需要全本请访问 www.ertongbook.com