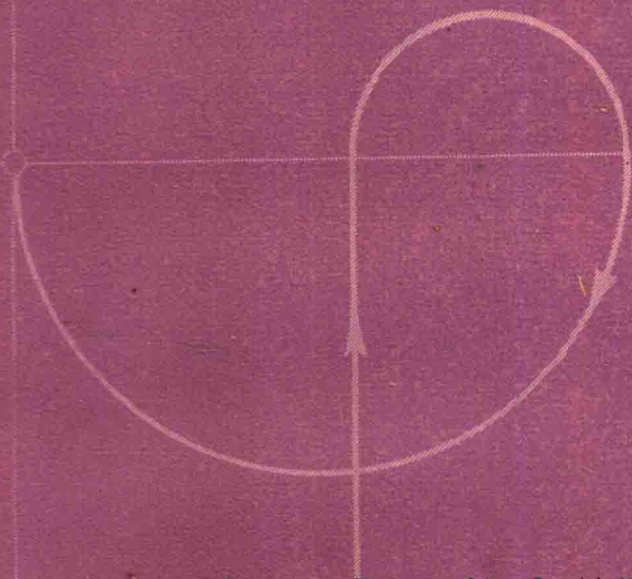


自动化丛书



差动电容式位移变送器

[苏联] B. A. 阿秋科夫斯基著 郑剑英译

41

上海科学技术出版社

自动化丛书編輯委员会

主	編	
趙安泰	虞冠新	
編	委	
王自琦	叶福年	
甘和貴	汪时雍	
吳增謙	吳培根	
徐俊榮	黃淞	
啓紀鴻	麗淡樵	

編 者 的 話

近数十年来,随着世界各国科学技术、工业生产和軍事技术的飞跃发展,已促使“自动学与远动学”逐步成为一門新的学科;同时,由于自动学与远动学的理論与技术日臻完善,也进一步促使科学技术、工业生产和軍事技术的突飞猛晋,如導彈、宇宙飞船、原子能的和平利用以及各类生产过程自动化工厂的出現,莫不与自动化技术的发展密切相关。因此,自动化在国民經济与国防中,已占有极为重要的地位。

在中国共产党的领导下,自动化技术在我国已有很大的进展,但从当前及今后要求来看,还需要繼續推广和普及专业知識,扩大技术队伍和提高理論水平。因此,及时地出版一些自动化技术的图书,供这个专业的技术人員参考,确是十分迫切需要的。

苏联国家动力出版社的“自动化丛书”选材广博,內容較新,也較切合实用,其中大部分作者都是苏联在这方面的专家,各册又具有理論与实际結合、深入浅出的特点,适合我国目前这方面的有关工程技术人員参考。我們現以选譯这套自动化丛书为基础,并适当編写一些专题論著,組成一套以有关工程技术人員及大专学生为讀者对象的“自动化丛书”,內容包括自动学和远动学的理論,自动装置、元件和仪器的設計、制造和应用等等。我們希望这套丛书的出版能对从事自动化方面的有关人員有所裨益。

由于我們的水平有限,在选题和譯校工作中,都可能有不妥之处,希望广大讀者和国内专家們指正。

自动化丛书編輯委员会

原 序

本书研究差动电容式位移变送器的工作原理、基本类型和它的应用范围,这类变送器是高准确度的高频(400 赫)交流随动系统的组成部件。

书中研究随动系统中的电容变送器本身及放大器计算所需的理论部分和公式结论,以及它们的主要误差;同时各个部分中都列举出计算例子,以便于读者和工程技术人员能够将这些资料运用到自己的工作中去。

书中介绍变送器本身,以及具有高放大系数的交流放大器,和交流随动系统的实际结构与调整方法。同时,各个建议不仅可用于具有电容变送器的交流随动系统中,而且也适用于任何随动系统及某些电气装置和无线电装置部件中。

所列举的资料,系经过作者与工程师 Л. М. 维斯伯兰德和电气机械师 В. А. 马克辛莫夫紧密协作下,用实验进行了验证。作者在这里向这两位同志致以深切的谢意。

作 者

目 录

原序

緒論	1
第一章 电容变送器理論中的某些知識	4
第二章 双幅瓣电容变送器	13
1. d 为可变的变送器	13
2. S 为可变的变送器	17
3. 在具有电容变送器的随动系統中的非綫性校正	25
4. 輸送綫对远距离傳輸的精确度的影响	30
第三章 三幅瓣电容变送器	34
5. 描述与計算	34
6. 在具有三幅瓣变送器的随动系統中的非綫性校正	49
7. 輸送綫对远距离傳輸的精确度的影响	55
第四章 电容移相器	60
8. 两相电容移相器	60
9. 三相电容移相器	66
第五章 几点建議	68
10. 关于电容变送器的結構及其联接的建議	68
11. 关于构成用在交流随动系統中的低頻多級放大器的建議	73
12. 关于交流随动系統的构成与調整的建議	86
第六章 构成具有电容差动式变送器的仪器的例子	91
結束語	105
參考文献	105
校后記	107

緒 論

目前,在工业生产中为了各种特殊的目的,广泛地采用各种参数的遙測技术。这些参数中有很多量都要变换为位移,这时,問題就归結为遙測机构(敏感元件)的位移了。这样,譬如为了測量压力,只需測量气压計膜盒的弯曲;若要測定加速度,只需求得固定在彈簧上的滑块的位移。此外,我們有时会对机构个别部件的相对位移(如軸的轉角)直接有兴趣。

为了遙測位移,由适当的变送器組成的随动系統获得广泛的采用。这种变送器的作用,是将敏感元件的位移(距离、轉角)变换为电讯号,而由随动系統所接收^[1~4]。

位移变送器的种类很多。用得最多的是电位器式和电感式变送器,不常用的有电容式、光电式及某些其他的特种变送器,例如具有机械控制的电子管等等。

在許多場合下,对位移变送器的精确度和小机械力矩等方面,都提出很高的要求。这些要求是由于某些仪器需要有很高的工作精确度而提出的。如在加速度計、陀螺式和薄膜式仪器中,以及其他的装置中,采用电位器式、光电式或电感式的变送器,都很难滿足这些要求。然而对电容式变送器的研究,到目前为止仍进行得很少。

但是,在精确度、稳定度、小机械力矩和調整范围等方面要求的不断提高,促使着設計师們重新重視对电容变送器的研究。

不久以前,設計师們对电容变送器怀有成見,认为有电容

变送器的綫路，不可能保證儀器有很高的工作精確度和穩定度。且認為要在電容变送器的輸出端上獲得穩定的訊號，它的供電電源頻率必須很高，要達到幾百千赫，甚至有時達幾十兆赫^[5,18]。然而，這樣高的頻率同樣地會在分布電容和輸送綫等中產生損耗^[1]。為了提高電容变送器的輸出訊號強度及改善指示的穩定度，有些設計者在放大器的第一級中採用靜電計管，這種管子的控制柵極電路中可以接進幾百兆歐的電阻^[21]等等。但是所有這些方法很少能改善具有電容变送器的系統穩定度，而且使儀器的結構會變得很複雜。

目前所進行的工作指明，具有電容变送器的系統工作不穩定性的原因，在於設計師們在設計變送器時所採用的方法不正確。尤其是結構的絕緣部件裝置得不正確，這種絕緣部件的性能不穩定會使系統工作時產生誤差，但這些困難是可以克服的。而且已經製造出具有電容变送器的儀器，這種儀器能在操作條件很不利的情況下，保證有很高的工作精確度和穩定度（參閱第6章）。

現在已經可以肯定，電容式位移變送器與其他的位移變送器相比較，有很多的優點。這些優點是：

- (1) 移動電容變送器的可動部分（轉子）所需的力非常小；
- (2) 能量消耗小；
- (3) 製造簡單；
- (4) 可採用廉價的材料；
- (5) 無触点（在某些個別情況下會有一個由滑環和刷組成的集電環）；
- (6) 帶有電容變送器的系統其工作精確度和穩定度都高；

(7) 帶有某種類型電容變送器的儀器其調整範圍很寬。

電容變送器的缺點在於本身內阻很高，達幾十甚至幾百兆歐，對固著絕緣零件的電阻要求亦高，且必須工作在高频情況下（指與 50 赫相比較）。但是，在很多情況下，可用普通的材料來固著電容變送器，事實亦告訴我們，電容變送器工作在最常用的 400 赫頻率下，結果是良好的。

電容變送器很重要的特點是移動電容變送器轉子所需要的機械力小，隨動系統輸出可以調整以及工作精確度高。這就使得電容變送器成為高準確度儀器中難以得到的部件。這種儀器的容許誤差為幾萬分之一甚至幾十萬分之一。因此必須發展和掌握運用電容式位移變送器。

第 1 章

电容变送器理論中的某些知識

在一般情況下，电容变送器是一个或者几个具有可变参数的电容器。

两个平行薄片間的电容量可以按下式求出

$$C = \frac{k\epsilon S}{d} = \frac{\epsilon S}{0.36\pi d} = 0.885 \frac{\epsilon S}{d} \quad (1)$$

式中 ϵ ——介电常数；

S ——两薄片所盖的面积，平方厘米；

d ——两薄片間的距离，毫米；

C ——电容量，微微法 (10^{-12} 法)；

k ——比例常数。

对于空气來說，可准确地认为 $\epsilon = 1$ 。

在交流电路中电容 C 产生的容抗为

$$x_C = \frac{10^6}{\omega C} = \frac{10^6}{2\pi f C} = \frac{1.59 \times 10^5}{f C} \quad (2)$$

式中 f ——频率，赫；

x_C ——容抗，兆欧。

电容变送器可分为两种基本类型——参数式(非差动式)变送器和差动式变送器。

在参数式变送器的綫路中，輸入的非电量(变送器轉子的

軸轉角)變換為電的輸出量(頻率、電流、電壓),該量為輸入量的函數。

在接入隨動系統內的差動變送器的綫路中,變送器上僅輸出偏差量的訊號,這個訊號在隨動系統處在穩定狀態時等於零。

聯接在電子管振盪器中的可變電容器,可作為參數電容變送器的例子(圖1)^[1,6]。這裡當轉子的軸轉角變化時,變送器的電容量改變,振盪器的頻率也隨之改變,這頻率即為輸出量。

圖2所示為參數變送器應用的另一例子。在這種情況下,隨著電容 C 的變化,就改變通過電容器上的電流,因而,改變系統輸出端上的電壓,這個電壓是負載電阻 R_n 上的電壓降,即為輸出量。

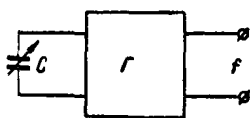


圖1 接在振盪回路內的電容變送器

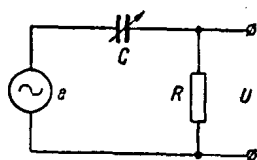


圖2 接在交流電路內的電容變送器

這類系統是開環調節系統。這些綫路的主要缺點是:輸出量的值與變送器供電電源的參數以及放大器和綫路中其他元件的參數有關,甚至還與外界條件有關。事實上,當供給變送器的振盪器的電壓或頻率改變時,從 R_n 上取出的電壓、頻率和相位輸出量也改變。

接在閉環自動調節系統內的差動電容變送器的綫路,就能夠克服這些缺點。在這些綫路中,輸出量是工作電動機的軸

轉角，或者經過減速箱與電動機軸聯接的其他軸的轉角。這種綫路的主要特性之一就是靈敏度，它表示當敏感元件偏差多小時，工作系統就開始動作。外界因素——電源電壓、環境溫度等僅對系統的靈敏度有影響；而系統的精確度，只有在精確度與靈敏度有關時，才會受到影響。

這一點表明，具有電容差動變送器的綫路，以及在橋臂中電阻對頻率和電壓呈綫性的任何橋式指零綫路，對電源穩定度的要求是不很高的。

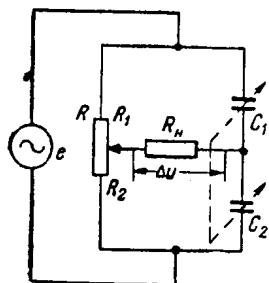


圖 3 具有差動電容變送器的橋式綫路

在最簡單的情況下，差動電容變送器為兩個串聯的電容器，當其中一個增大時另一個則減小。這兩個電容器亦可以接在橋式綫路內（圖3），該橋式綫路的其他兩臂就是電位器。如果，這時從電橋對角綫上取出的電壓作為隨動系統的訊號，該系統將電位

器 R 的滑臂朝失調量減小的方向移動，這樣在隨動系統穩定狀態時，該電壓 $\Delta u = 0$ 。在這種情況下，以下比例式可成立。

$$\frac{U_{R1}}{U_{R2}} = \frac{U_{C1}}{U_{C2}} = \frac{I x_{C1}}{I x_{C2}} = \frac{\frac{1}{\omega C_1}}{\frac{1}{\omega C_2}} = \frac{C_2}{C_1} = \frac{S_2 d_1}{S_1 d_2} \quad (3)$$

由此得出，在以空氣為介質的差動電容變送器的綫路中，工作機構的指示值（例如指示器指針的位置）與氣體的成分和氣體中的潮氣無關，因為對於組成差動變送器的兩個電容器來說， ϵ 變化相同。對於非差動的綫路來說，這種影響或多或少是存在着的，因為對於濕度為 0% 的空氣， $\epsilon = 1.0006$ ；而

湿度为 100% 的空气在 $t = +20^{\circ}\text{C}$ 时, $\varepsilon = 1.0008^{[7]}$ 。在这些线路中, 这一个量相应地产生的误差约为 0.02%, 而此时具有差动电容变送器的某些系统 (如下面所指出的), 却能达到更高的精确度。

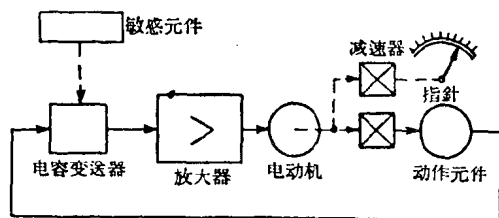


图 4a 具有差动电容变送器的随动系统结构图

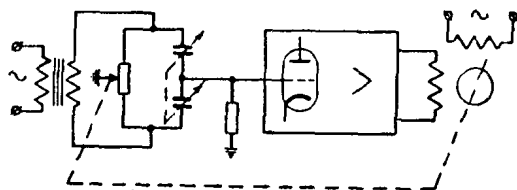


图 4b 具有差动电容变送器的随动系统线路图

当偏离零位不很大, 即失谐量不很大时, 在电桥对角线上所测出的信号功率非常小 (当频率为 400 赫时只达几十分之一毫瓦)。所以, 为了使工作轴动作, 必须用放大器, 再由放大器输出信号到电动机上。最简单的线路见图 4a 和图 4b。

用差动电容变送器的两个电容器和电位器组成的电桥, 是由变压器的单独绕组上的交流电压供电的, 电位器的活动臂接地, 从变送器转子上取出失谐量信号, 加到放大器第一级电子管的栅极上。信号经过放大后, 再接到两相异步电动机的控制绕组上, 电动机的激磁绕组接在供给差动变送器的电桥线路的同一交流电源上。电动机转动时, 移动电位器的臂, 使

电桥恢复平衡,这时讯号等于零,工作即停止。这里的输出量是电位器活动臂的位置、电动机转子的轴转角,或者减速器中某一轴的转角,该减速器将电动机与电位器的活动臂联接起来。

电容变送器是具有高内阻的变送器,所以要适当地采用具有尽可能高的输入电阻的放大器。遗憾的是目前除了电子管外,还没有任何其他具有高输入电阻的可靠元件。因此,对于电容变送器的线路,采用交流电子管放大器是适宜的。驱动电动机的放大器输出级,可根据与所选电动机相应的任何元件,按已知任一种线路来做成。

为了计算具有电容变送器的系统的放大系数,必须知道由电桥对角线上取出的输出讯号的斜率

$$s = \left(\frac{\partial \Delta u}{\partial \delta} \right)_{\Delta u=0} \quad (4)$$

式中 Δu ——由电桥对角线上取出的讯号;

δ ——综合位移(变送器的转角或位移)。

此外,还须知道由电桥对角线上取出的讯号相位。

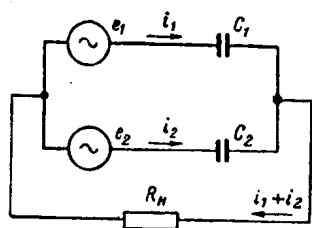


图5 具有差动电容变送器的电桥等效线路图

对于上述接有差动电容变送器的电桥(图3),我们来求它在对角线上输出讯号的斜率和相位。

具有变送器的电桥等效线路见图5(电位器的电阻可认为远小于负载电阻 R_n)。我们列出线路的方程式

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= \frac{1}{C_1 p} i_1 + R(i_1 + i_2) \\ e_2 &= \frac{1}{C_2 p} i_2 + R(i_1 + i_2) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由方程組(5) 求出 $\Delta u = R(i_1 + i_2)$:

$$\Delta u = \frac{e_1 C_1 p - e_2 C_2 p}{1 + R(C_1 + C_2)p} R \quad (6)$$

設: $e_1 = -e_2 = e$; $C_1 = C + \Delta C$; $C_2 = C - \Delta C$;

則有

$$\Delta u = \frac{2e\Delta C R p}{1 + 2RCp} \quad (7)$$

以 $p = j\omega$ 代入, 且进行必要的运算后, 得出

$$\Delta u = \frac{2e\Delta C \omega R}{\sqrt{1 + 4R^2 C^2 \omega^2}} \sin(\omega t - \varphi) \quad (8)$$

式中 $\varphi = \arctg \frac{1}{RC\omega}。$

乘积 $RC\omega \ll 1$, 因而, 当电容变送器的尺寸很小和频率較低 (400 赫) 时, 电容变送器就有很大的相移。比如, 当 $f = 400$ 赫, $C = 50$ 微微法, $R_n = 1.0$ 兆欧时, $\varphi = 83^\circ$ 。

特性的斜率

$$s = \frac{\partial \Delta u}{\partial \delta} = \frac{2e\omega R}{\sqrt{1 + R^2 C^2 \omega^2}} \times \frac{\partial C}{\partial \delta}$$

如果 $d = \text{常数}$, 則

$$s = \frac{1.77e\omega R \varepsilon}{d} \times \frac{\partial S}{\partial \delta} \quad (9)$$

如果 $S = \text{常数}$, 則

$$s = \frac{1.77e\omega R \varepsilon S}{d^2} \quad (10)$$

在帶有电容变送器的系統中, 有时要計算变送器中所产生的机械力。

如果, 电容器充电, 在它的极板間有机械作用力, 使极板靠近。随着变送器的結構不同, 这种机械力的方向或者使可

动极板朝向固定极板靠近 (当 $S = \text{常数}$)，或者使可动极板移开 (当 $d = \text{常数}$)。

电容器充电的能量

$$W = \frac{U^2 C}{2} \quad (11)$$

而当 $U = \text{常数}$ 时，作用力为

$$F = \frac{\partial W}{\partial \delta} = \frac{U^2 \partial C}{2 \partial \delta} \quad (12)$$

式中 δ ——综合位移。

因为 $U = U_m \sin \omega t$ ，则

$$F = \left(\frac{U_{\text{дейт}}^2}{2} + U_{\text{дейт}}^2 \cos 2\omega t \right) \frac{\partial C}{\partial \delta} \quad (13)$$

力的平均值

$$F_{\text{cp}} = \frac{U_{\text{дейт}}^2}{2} \times \frac{\partial C}{\partial \delta} \quad (14)$$

通常在电容变送器中，由于轉子极板有慣性的緣故，偶次諧波的脉动完全不存在，所以只要研究力的平均值。

对于所有的电容变送器來說，力和力矩的公式是

$$F = \frac{U^2 \partial C}{2 \partial \delta}; \quad M = \frac{U^2 \partial C}{2 \partial \alpha}$$

对 $d = \text{常数}$ 的变送器 (S 为可变的变送器) 來說

$$\left. \begin{aligned} F &= \frac{U^2 \varepsilon \partial S}{2 d \partial \delta} = 4.43 \times 10^{-8} \frac{U^2 b}{d} \\ M &= \frac{U^2 \varepsilon \partial S}{2 d \partial \alpha} = 4.43 \times 10^{-8} \frac{U^2 b \rho}{d} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

对 $S = \text{常数}$ 的变送器 (d 为可变的变送器) 來說

$$F = 4.43 \times 10^{-7} \frac{U^2 S}{d^2} \quad (16)$$

式中 S ——极板的面积, 厘米²;
 d ——极板间的距离, 毫米;
 U ——极板上的电压, 伏;
 F ——产生于极板间的力, 克;
 M ——作用在可动极板上的力矩, 克·厘米;
 b ——极板的宽度, 厘米;
 ρ ——极板的平均半径, 厘米(对转动的变送器而言)。

【例】 计算作用在电容器两极板间的力, 如果:

极板间的电压 $U=100$ 伏;

极板的面积 $S=2$ 厘米²;

极板间的距离 $d=1$ 毫米。

按照式(16)进行计算, 则

$$F = 4.43 \times 10^{-1} \times 100^2 \times 2 = 9 \times 10^{-3} \text{ 克} = 9 \text{ 毫克}。$$

【例】 计算产生在具有极板面积 S 为可变的 (d =常数) 变送器中的力矩, 如果:

一个极板上的电压 $u_1=100$ 伏;

极板宽度 $b=1$ 厘米;

变送器的平均半径 $\rho=2$ 厘米;

定子与转子的极板间距离 $d=1$ 毫米。

按照式(15)进行计算, 则

$$\begin{aligned} M &= 4.43 \times 10^{-3} \times 100^2 \times 1 \times 2 \\ &= 9 \times 10^{-4} \text{ 克} \cdot \text{厘米} = 0.9 \text{ 毫克} \cdot \text{厘米}。 \end{aligned}$$

具有一个可动部分(转子)的电容变送器线路, 它作用在另一元件上(电位器上, 自整角机上)。此外, 还有其他的电容变送器的线路, 它是作用在同一变送器的定子上(图 6a、b)。在这些线路中, 可以采用任何的差动变送器。这样的结构对不需要远距离传输的地方是合适的。此时系统工作的精确度增高, 变送器本身的装置误差(转子的轴与定子不同心除外),

在这种情况下不起作用。在这种系统中，輸出軸和輸入軸間呈綫性关系。

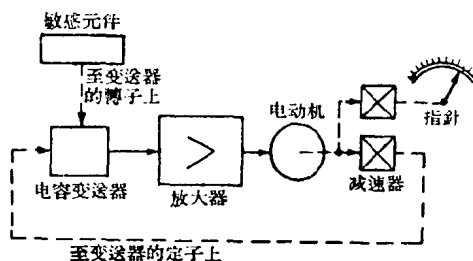


图 6a 动作作用在电容变送器上的随动系統結構图

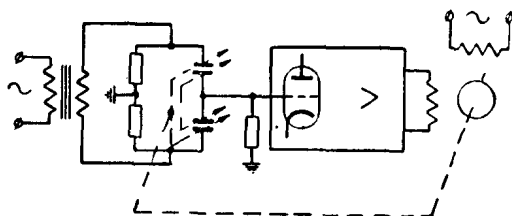


图 6b 动作作用在电容变送器上的随动系統綫路图

另有一种装置，其动作是直接作用在电容变送器的轉子上。例如，当比較两个机械力时，該两力之差作用在电容变送器轉子的彈簧支座上（图 7）。而这些力由偏差訊号来平衡。

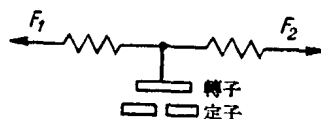


图 7 电容变送器作为零位指示器用

变送器的类型和动作方式的选择，是由設計师根据設計的仪器所提出的具体要求来进行的。