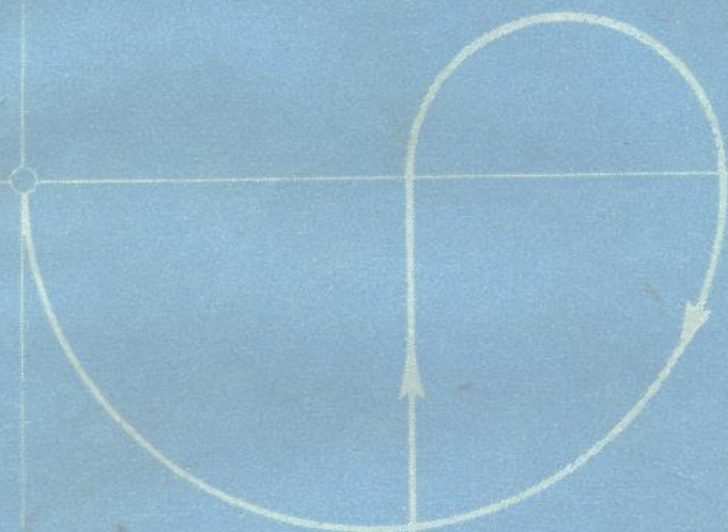


自动化丛书



步进电动机

[苏联] B. A. 拉特米洛夫 B. A. 伊沃包欽科著

上海科学技术出版社

73.25
327

自动化丛书

51

步进电动机

〔苏联〕B. A. 拉特米洛夫, B. A. 伊沃包欽科 著
郭鍾番 張鸞立 譯

zk612/104

上海科学技术出版社



內 容 提 要

本书是“自动化丛书”之一。丛书内容包括自动学及远动学的理論,自动装置、元件和仪器的結構及应用等。丛书选题主要取自苏联及其他国家的有关資料,也包括国内編写的专题論著。本丛书由“自动化丛书編輯委员会”主編。

本书討論現代化自动装置中应用步进电动机的各項問題,包括步进电动机的控制綫路和結構、各种新型步进电动机、印刷繞組轉子結構等。并詳述步进电动机的各种工业实样和控制綫路以及对步进电动机的型式选择。

本书可供自动化的工程技術人員参考。

ШАГОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

В. А. Ратмиров, В. А. Извоботенко

Госэнергониздат • 1962

自动化丛书(51)

步 进 电 动 机

郭鍾璠 張鷟立 譯

自动化丛书編輯委员会主編

上海科学技术出版社出版 (上海瑞金二路450号)

上海市书刊出版业营业許可証出 093 号

中华书局上海印刷厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本 787×1092 1/32 印張 4 26/32 排版字數 105,000

1965 年 7 月第 1 版 1965 年 7 月第 1 次印刷

印數 1—5,000

統一書号 15119·1827 定价(科六) 0.55 元

前 言

由于生产过程自动化,以及航空设备、火箭技术和宇宙飞行事业的不断发展,愈来愈有必要創制出快速拖动装置。这类拖动装置的执行指令时间,按规定是由百分之几秒到千分之几秒,而调速范围已大大地扩大。由于机构中单独受控机件数量的不断增加,电动机的数量也必然会增多。同时,对拖动装置控制系統的要求是:外形尺寸最小,結構最简单而可靠。近几年来,在各技术部門中广泛采用步进(脉冲)电动机,主要是用来发送数字形式或脉冲形式的指令。

电磁式步进电动机,是十九世紀最初出現的电机之一^[1-3]。后来,仅在同步傳动装置中采用过这种步进电动机,因为它的繞組和換向器相接,換向器一轉动,就能远距离傳送机械軸的同步回轉^[4,5]。但在这类装置中,步进电动机曾受到自整角机的排挤。随着电子技术和半导体器件的发展,已經可以采用有电子轉換器的各种很有成效的綫路来控制步进电动机。于是,在断續作用的自动拖动装置中,曾首先采用过步进电动机;当时,在傳送指令的动作速度、准确度和可靠性等方面,对步进电动机的要求均很高。由于新的磁性材料和絕緣材料的不断出現、粉末冶金的应用以及印刷电路工艺的不断革新,步进电动机的結構就有可能滿足工业方面愈来愈高的要求。

步进电动机的結構型式很多,但可按其共同特征加以分类,再按类别討論特性。在多数場合下,电子轉換器可以确定步进电动机的各种参数和拖动装置的各种指标。因此,本书最后一章專門討論步进电动机的控制綫路。

目 录

前 言

第1章 步进电动机的若干理論問題	1
1. 采用步进电动机的自动控制系統的应用范围	1
2. 步进电动机的基本关系	11
3. 各种步进电动机的数据	26
第2章 单控制繞組步进电动机	36
4. 步进电动机的結構型式和計算公式	36
5. 钟表微电机	48
6. 单相步进电动机的結構实例	50
第3章 双繞組步进电动机	62
7. 不可逆双繞組步进电动机	64
8. 可逆双繞組步进电动机	71
9. 有效式二相步进电动机的計算	78
第4章 三繞組和多繞組步进电动机	100
10. 动力式步进电动机	103
11. 小功率步进电动机	115
第5章 步进电动机的控制綫路	125
12. 脉冲(单通道的和双通道的)控制系統	125
13. 相位(多通道的)控制系統	135
14. 采用步进电动机的机床程序控制系統	137
参考文献	142

第 1 章

步进电动机的若干理論問題

1. 采用步进电动机的自动控制系统的应用范围

近几年来,有許多新型的断續式数字程序控制装置均已采用步进(脉冲)电动机。这种电动机能将控制脉冲变换成轉軸的定量角位移;或在无反饋变送器的条件下,能将控制脉冲变换成定量的綫位移。在后一种情况下,因为电子元件数量的减少,机构的控制系统也就非常简单,而且可靠性也很高。

此外,如在輸带机构、各种閘門和計数器等装置中,由于工艺上的各种特点,导致机构位移和控制指令均含有断續特性,因而采用脉冲电动机非常合适。

由于数字程序控制系统和遙測系统的不断发展,步进电动机的应用范围也愈广,用这种电动机能将单一的电碼(脉冲序列)按一定比例变换成机构的位移。

采用步进电动机的自动控制系统可分成两类:

第一类:在这类系统中,步进电动机可将单一的电碼变换成相位經過調制的訊号或其他形式的訊息。

在这类系统的各种装置中,步进电动机可以拖动自整角发送机、回轉變压器或差接变压器,或可用作高諧波滤波器^[10]等。

第二类：这类系统中的步进电动机能直接或通过转矩放大器来拖动伺服机构。

属于这类系统的装置是：机床进给拖动装置^[8,9]，止-动式输带机构的拖动装置、计数器的标号装置、阀门和闸门的控制装置以及可按程序调节传动比的转轴旋转整步装置^[17]等。

步进电动机在火箭技术中也曾得到应用^[12]，还能调节核动力反应堆^[11]。

通常，步进电动机和可控电子转换器联合运用，可以构成同步电动机的变频调速系统，而这个系统能使转子的转角位置固定——可使频率变成零值（相当于直流）。

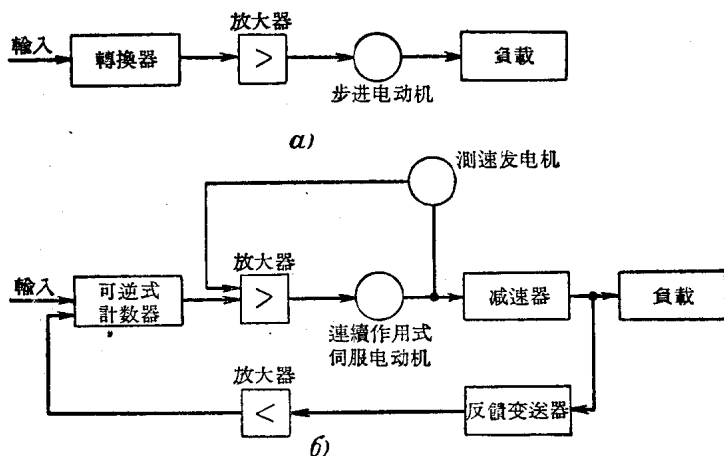


图1 方框图

a—采用步进电动机的开环系统；b—随动系统

从图1中直接可以看出，和作用相同的随动系统比较，采用步进电动机的拖动装置的优点如下：

(1) 由于系统中的元件数量减少了，因此提高了装置的可靠性，减少的元件有：反馈变送器，变送器的放大器，指示失

調的电子部件(可逆式計数器)和測速发电机;

(2) 元件数量少, 装置造价低;

(3) 各部件之間的联系少, 自动控制系統的綜合簡便;

(4) 停車时步进电动机的轉子能够定位, 断續位移的准确度較高。

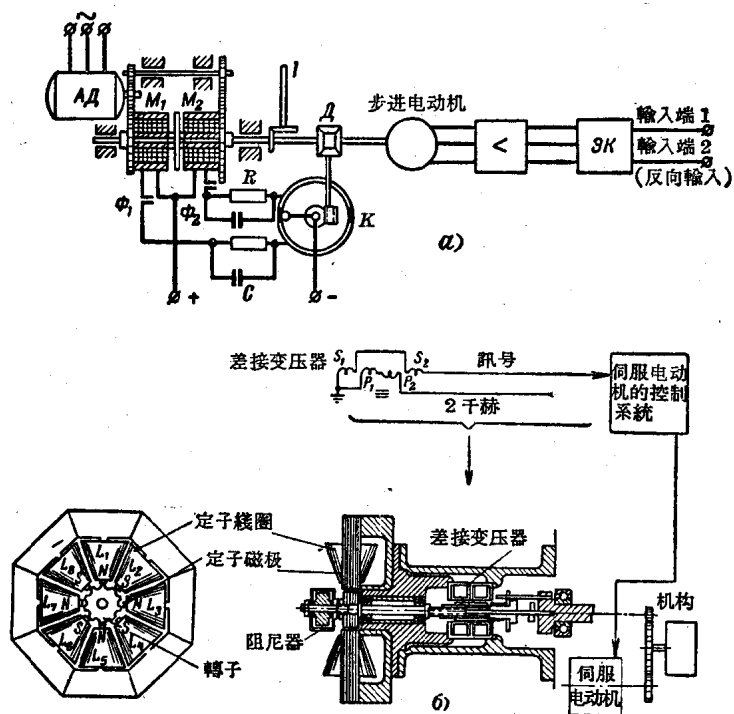


图 2 控制系統

a—采用电磁离合器的控制系統; b—采用差接变压器的控制系統

現在以步进电动机控制的电磁离合器(图 2a) 断續作用系統为例来进行討論。当指令傳送到电子轉換器 (3K) 的輸入端时, 步进电动机可使分隔环 K 轉动。这时, 离合器 M_1 或

M_2 接通 (这要取决于步进电动机轉軸的旋轉方向)。离合器接通后,拖动裝置的輸出軸 I 在异步电动机 (AM) 的拖动下开始轉动。同时,随着差速器 L 的轉动,分隔环 K 开始逆轉。在指令傳輸完毕后,离合器的电路断开。这类系統的动作速度受离合器的限制。为了提高离合器的动作速度,可在离合器的繞組上串接一个由电容器 C 分路的加速电阻。

在有触点的半环系統中,如在接通离合器 M_1 时切断离合器 M_2 的电路(或相反),則“死区”就会縮小。这种連鎖作用,是由步进电动机轉軸上的摩擦轉換开关自动进行的。按照步进电动机的旋轉方向,轉換开关能使触点 Φ_1 或 Φ_2 閉合。这时,如果步距值为 25 微米,則速度能达 250 毫米/分,处理程序的准确度是令人满意的 (6M11HP 型銑床)。如果采用粉末式快速离合器,位移速度可能更快。

为了指示失調現象,可用自整角发送机,感应式变送器,或电位計式变送器来代替有触点装置;其中电位計式变送器接有由离合器控制的继电器。利用直流伺服电动机和电机放大机,也能构成类似的自动控制系统。这种系統中的步进电动机就是一个变换器,它可将断續电碼变换成参量(如振幅)或控制电压相位。

在图 26 所示的控制系统中,步进电动机可使差接变压器的鉄心移动(图中未繪出步进电动机的控制綫路)。当失調訊号送入伺服电动机的控制系统时,这个伺服电动机会使机构移动。这时,装置中的傳动联接会使差接变压器的鉄心返回原位,于是失調訊号等于零值。用步进电动机控制的这类装置,可看成是电力轉矩放大器。

除上述系統外,在金属切削机床中經常使用有步进电动机和液压轉矩放大器的系統^[8, 9]。由于旋轉式电动机最大的

单位切綫力会受到磁路饱和的限制，而液动机的切綫力与系統中相当大的油压成比例，因此，液动机的有效材料利用率要比电动机高得多。

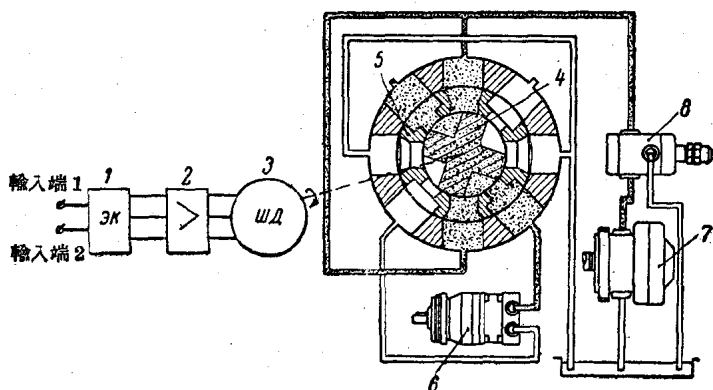


图 3a MT-18-14 型液压轉矩放大器

1—电子轉換器；2—步进电动机控制繞組的电源放大器；3—步进电动机；4—分配器；5—套筒；6—液动机；7—油泵；8—閥門

图 3a 是苏联金属切削机床实验科学研究所 (ЭНИМС) 制造的液压轉矩放大器的方框图^[110]。这种放大器是由液动机 6 和随动油閥分配器 4 組成的。油閥分配器 4 由步进电动机 3 带动。当閥門 8 开启时，从油泵 7 通向液动机的进油管路敞开。油閥上的回轉套筒 5 与液动机的輸出轉軸成剛性联接。当液动机旋轉时，套筒能将通向液动机的进油管路封閉。苏联金属切削机床实验科学研究所制造的液动机，是由小功率步进电动机控制的。这个液动机輸出轉軸的轉矩，尺寸最小的为 0.8 公斤·米，尺寸最大的可达 6.7 公斤·米。

如果頻率瞬时升高，則液压放大器会使油閥轉軸和輸出轉軸失調。当轉矩为 3 公斤·米，2MT18-14M 型液动机的最高轉速为 1000 轉/分。而相似的控制訊号的頻率为

$$f = \frac{6n}{\alpha} = \frac{6 \times 1000}{3} = 2000 \text{ 脉冲/秒}$$

式中 α ——电动机的步距角,度;
 n ——液压放大器的转速,转/分。

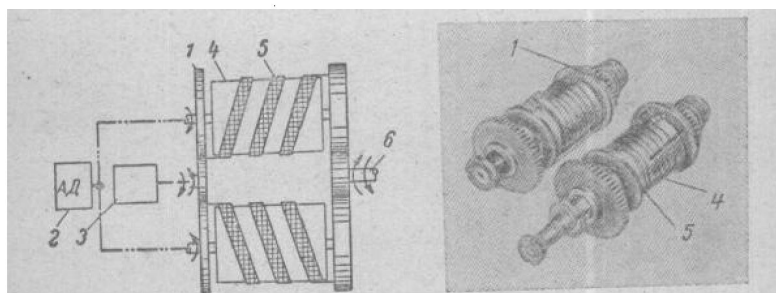


图 36 机械转矩放大器

1—控制齿轮；2—拖动用的异步电动机；3—步进伺服电动机；4—滚筒；5—钢带；6—输出转轴

在可调拖动装置中,也曾用过机械转矩放大器^[14]。这种放大器的构成方案之一示于图 36,放大器是由两个摩擦离合器组成的。两个离合器的滚筒上均绕有钢带。摩擦离合器均有输出转轴位置的硬性负反馈。这种放大器是用步进电动机控制的,当步进电动机的转轴回转时,能将一个滚筒上的钢带拉紧,并将另一滚筒上的钢带放松。这时,液压机的转矩就被传送到装置的输出转轴上。由于液压机不停地回转,所以系统的动作速度主要取决于伺服电动机。这种放大器的缺点是摩擦损耗非常大,而且可能产生振荡。苏联科学院机械制造研究所已经制成一种效率较高的机械减速放大器。

利用有“电子挂轮架”的同步脉动轴和步进式伺服电动机,来代替调整挂轮架的换速齿轮或变速齿轮。这样,结构和自动控制设备就简单得多,而且机器的重调更加迅速^[15]。

在主动軸上,安装一台能在每一轉内产生 m 个断續訊号的变送器(图 4a),变送器所产生的脉冲通入电子分配器。在主动軸旋轉一周之中,分配器輸出端产生的脉冲数量取决于分配器的級数。装在从动軸上的步进电动机由电子轉換器的輸出脉冲来控制,而該脉冲則取自分配器。如果分配器是二进制的,則主动軸和从动軸(由步进电动机帶动的)的傳动比

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\alpha m}{2\pi \sum_0^{k_1} 2^k \sum_0^c 2^o}$$

式中 α ——电动机的步距角,弧度;

k_1 ——分配器的級数;

c ——均值器的級数。

一根主动軸实际所能控制的从动軸数(各从动軸的傳动比均不相同)不受限制。在同一个分配器内,对各种不同的傳动比需用各种不同的輸出寄存器。在当地进行控制时,可用轉換开关构成輸出寄存器;在远程控制或自动控制时,則需用继电器构成輸出寄存器。

两軸間的电力差速器也可以按照与上述相类似的系統来构成。这两个軸的轉速代数和,能控制其他各軸的运动。因此,需將取自各主动軸变送器中的脉冲相加或相减。

如按穿孔帶中的程序来調节主动軸和从动軸的傳动比,再利用傳动比可調的非圓形輪,就能模拟出机械傳动。若采用电子“挂輪架”,則傳动机构就简单得多。

步进式伺服电动机的控制系統示于图 46。

在这种系統中,步进电动机被装在控制台的滑板拖动裝置上,利用这个控制台能描繪出机构按程序运动的軌迹。这套裝置可用来監視計算的准确性,还能檢驗所記錄的程序。

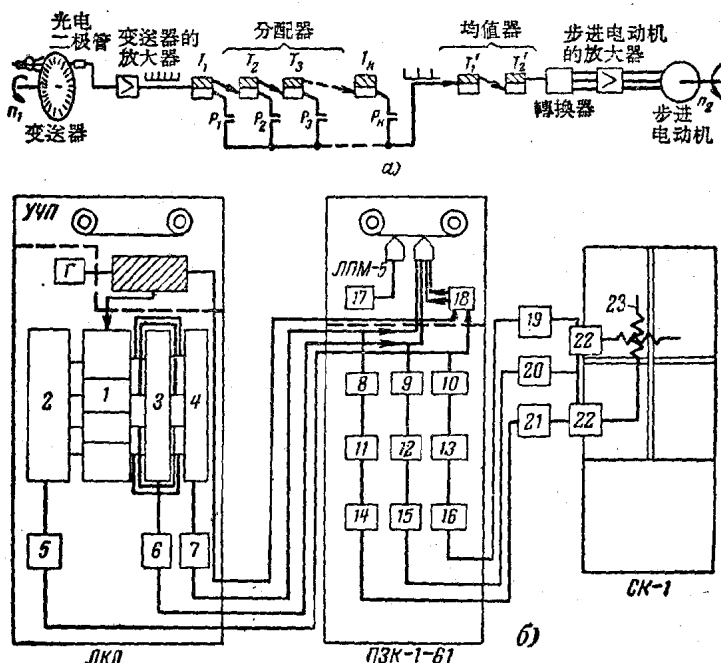


图4 方框图

a—采用电子式调整“挂轮架”的同步脉动轴；6—记录程序和绘制轴侧运动轨迹的装置

1—主控振荡器；2、3、4—坐标寄存器；5、6、7—输出放大器；8、9、10—成形装置；11、12、13—分配线路；14、15、16—功率放大器；17—擦拭振荡器；18—坐标转换部件；19、20、21—步进电动机；22—差速器；23—滑板传动装置

在这套装置中有一个 JKП-2-60 型线性电码变换器，一台 ПЗК-1-61 型记录检测台及一台 СК-1 型控制台。程序是按二十进制电码编排在穿孔带上。JKП 变换器有一个止-动式输带机构的读出装置，它能将讯息传送到坐标寄存器中。

寄存器的输出量，经过放大器后施加于 X、Y、Z 坐标的三台步进电动机的控制线路上。当步进电动机的控制部件取

得訊息时,就有一个訊号送至写入磁头上,这个磁头装在ИЗК型記錄-檢測台的輸带机构中。

描繪裝置的滑板由步进电动机带动,并且能在台面上移动。当檢測三个坐标位移时,可按軸綫測定法,利用 $X-Z$ 軸綫和 $Y-Z$ 軸綫上的两种运动求出代数和,将运动軌迹描繪出来。求代数和是用差速器进行的。由于选用的描繪方式不同(如两侧投影法,等积投影法等),由軸綫送入步进电动机中的各脉冲数值的比值也不相同。

步进电动机已应用在打印装置輸带机构中,并按止-动方式傳輸磁带和穿孔带,效果很好。

在英国 Redifon 股份有限公司所制造的輸带机构中,已經采用步进电动机,它能带动記錄数碼式数据的、35毫米寬的穿孔磁带^[10]。穿孔磁带是由两对齿輪直接带动的,这些齿輪通过减速器和两台步进电动机相联接(图5)。一种齿輪牵动录入磁头上的磁带;另一种齿輪牵动讀出磁头上的磁带。磁带可动可停。每当步进电动机回轉一个步距角时,在磁带以等速运动的区間内,就能記錄或讀出一段情况。脉冲可以通过电碼变换器送入录入磁头。当訊息送入变换器輸入端时,步进电动机得到一个脉冲,磁带就能够移动一个步距值。

如果两种齿輪能按同一速度牵动磁带,則在两种齿輪之間磁带的长度就相等,而在录入和讀出之間的时延为恒值。如果两种齿輪的轉速不同,两种齿輪所牵动的磁带的长度就有长有短。这时,录入和讀出之間的时延也不相同。磁带是用滾柱拉紧的,滾柱装在被彈簧拉紧的滑板上。

要使两种齿輪产生不同的轉速,必須用两台步进电动机。每当一个控制脉冲送入第一台步进电动机时,第二台步进电动机尚未得到脉冲,这时,时延就会延长;反之,如有一个多余

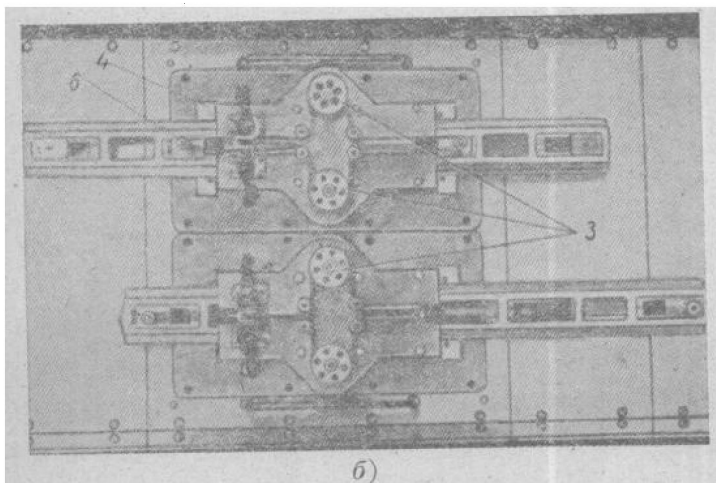
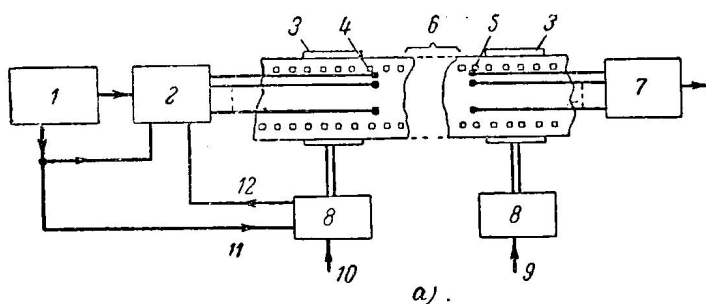


图5 采用步进电动机的输带机构

a—方框图；b—外形图

1—数字计算机；2—十二进制电码变换器；3—主动轴；4—写入磁头；5—读出磁头；6—磁带卷；7—数字模拟变换器；8—步进电动机；9—脉冲发生器；10—可控式脉冲发生器；11—控制磁带运动的脉冲；12—调“0”

的脉冲送入第二台步进电动机，则时延就会缩短。在连续记录信号时，最大时延仅受滑板机构外形尺寸的限制；最小时延（0.5 秒）则受录入磁头和读出磁头间距的限制。

诚然，上述系统并未包括采用步进电动机的许多控制系

統,上述两种情况只能作为应用的实例。

2. 步进电动机的基本关系

在探討各种步进电动机的結構型式之前,先給出下列定义和討論这些电机的基本特性和工作特点。这可作为今后評述各类步进电动机特性的依据,特别是对于設計师們,可作为在选取能满足原定技术要求的最简单結構时的一种依据。

步距值 步距值是步进电动机的主要指标之一,单位为角度或弧度,通常等于

$$\alpha = \frac{360^\circ}{2pm} = \frac{\pi}{pm} \quad (1)$$

式中 α ——电动机的步距角;

p ——极对数;

m ——空間上相互錯开的控制繞組数。

如果定子和轉子的极数不同,則在式(1)中应从两种极数中选出极数較多的代入。控制繞組通常設置在定子上(这可避免滑动接触),而轉子取以較多的极数。控制繞組装在轉子上的步进电动机称为变态式的。为了明确起見,今后討論时,定子上只用控制繞組数(或相数),轉子上用极数。

反应式步进电动机(轉子无激磁的)极数 $2p$ 和轉子齿数 z_r 相等。这时,电动机的步距角

$$\alpha = \frac{360^\circ}{z_r m} = \frac{2\pi}{z_r m} \quad (2)$$

根据式(1)和式(2)可知:步进电动机的极数和控制繞組数增多,步距角就会縮小。

在工艺設計上,有效式步进电动机(轉子上有激磁繞組或有永久磁鉄)的极数不可取得过多;在控制繞組数有限时,步

距角也不可取得过小。

齿距在 2 毫米以下的反应式步进电动机不难制造,同时,直径较小的转子也能铣出足够多的齿。因此,这种电动机的步距角可以小到几度或十分之几度。

静整步转矩 静整步转矩是分析步进电动机工作情况时不可缺少的特性;在控制绕组电流稳定时该转矩由转子和定子合成磁势轴线失调角的函数来确定。静整步转矩是利用系统的磁场能量对转子回转角导数算出的,即

$$M = \frac{d}{d\theta} W_m \quad (3)$$

根据式(3)计算转矩时,应考虑到当转子作虚位移时才可进行微分。即在磁场各种能量强度不变的条件下微分。

磁场能量是转子的电失调角的周期函数,即

$$W_m = W_m(\theta_e)$$

失调角的单位为电弧度,它和空间失调角有关,且可用关系式联系起来,即

$$\theta_e = p\theta = \frac{z_r}{2}\theta \quad (4)$$

按式(4),可将整步转矩写成下式

$$M = \frac{dW_m(\theta_e)}{d\theta_e} \frac{d\theta_e}{d\theta} = p \frac{dW_m(\theta_e)}{d\theta_e} = \frac{z_r}{2} \frac{dW_m(\theta_e)}{d\theta_e} \quad (5)$$

根据式(5)可得如下结果:由于转子极数增加,静转矩就会增大。但在极数很多时,这条规律就会失效,因在漏磁影响下,气隙中的纵轴磁场分量与横轴磁场分量之差值(按此差值可以确定导数 $\frac{dW_m(\theta_e)}{d\theta_e}$ 的数值)就会减小;而在极限情况下,当极数无限多时,该差值会等于零。

当考虑到几何上的特点和磁路饱和程度时,在外形尺寸