



美国第二届增量运动控制系统和器件年会

四机部一四二一所

编 译 说 明

增量运动控制系统是一种以不连续的阶跃、快速起停、又能准确地重复该运动来改变负载位置的控制系统。这种系统是应数字技术、计算技术和自控技术的需要而逐步形成的新学科。增量运动控制系统所需的元器件主要是各种步进电动机、伺服电动机、直流电动机、离合器和制动器等。对于增量运动控制系统及其元器件，不断扩大其品种，不断提高其性能，是七十年代以来引起国外学者和工程技术人员普遍关心的问题。自一九七二年以来，在美国由依利诺斯州大学主持连年举行“增量运动控制系统和器件讨论会”，美英日荷法西德瑞士苏等国的有关人士纷纷与会围绕元器件及控制系统的设计、性能、工艺、选用等进行广泛的专题讨论和交流，会议报告收入《文集》公开发表，每次约三十余篇，不少内容涉及新原理、新结构，以及微特电机发展的动向，具有一定的参考价值，值得国内微电机行业广大科研人员和工人引起注意。

《美国第二届增量运动控制系统和器件年会译文集》是我所根据一九七三年第二届年会文集并结合我国微特电机专业的需要而组织编译的，所内外许多同志都热诚地参加了译校工作。我们谨向所有参加译校工作的同志表示谢忱。我们打算以誉印形式在近年内先完成历届年会文集的编译，以后逐年跟上当届年会的编译。

由于译校工作量很大，人力有限，外文和专业基础知识不够，特别是对一些新技术不熟悉，加之目前参加译校工作的同志科研工作甚为繁重，有时只能以业余时间为主参加译校；因此，《译文集》中译校不当之处一定很多，敬希识者及时指正，并欢迎广大读者对如何做好编译工作提出宝贵意见。

一九七八年五月

目 录

1.	步进电动机的控制问题	1-39
2.	增量编码器——光电子变换器	2-39
3.	单段永磁式和反应式步进电动机 磁路和静转矩公式	3-27
4.	有阻尼的步进电动机模型的最佳处理	4-15
5.	对步进电动机惯量阻尼器应用的研究	5-58
6.	步进电动机的阻尼方法	6-27
7.	永磁步进电动机数字模拟的作用	7-14
8.	变阻式步进电动机数学模型及动态性能模拟	8-36
9.	齿槽中的导磁率模型和磁阻力问题	9-18
10.	用于步进电动机的数字速度反馈器	10-22
11.	通用步进电动机的驱动与测量误差	11-13
12.	一种全电气化大功率步进电动机	12-6
13.	低惯量电动机及其在增量运动系统中的作用	13-32
14.	增量运动伺服系统的最佳设计	14-20
15.	选动圈式电动机还是步进电动机 的设计方案比较	15-21
16.	步进电动机混合计算机控制和数据处理	16-14
17.	直线步进电动机	17-13
18.	索氏原理直线电动机	18-15
19.	直线运动步进电动机的控制	19-16
20.	运动控制器件的自动测试	20-11
21.	选用离合器、制动器和步进电动机的新方法	21-16

步进电动机的控制问题

一、引言

步进电动机的一个基本特征是通电时就能转动，然后停留到一个确定的稳定位置上。增量旋转运动可以通过依次对步进电动机的各相通电和断电来获得。步进电动机另一个明显的特征是控制的多样性。步进电机根据应用的要求可以用许多方式来控制。例如，为了实现单步运行，可用许多种方式阻尼掉步进运动末尾的振荡。对于驱使步进电机作连续旋转运行的控制，可分为开环和闭环两种。而在这两个类型中又有许多不同的控制方案。一般地说，对于一个给定的步进马达，人们能够获得不同的工作性能，这取决于人们对马达控制的技巧和复杂性。

虽然本文所讨论的控制方案和驱动线路是为可变磁阻型（反应式）步进电机而设计的，但其控制原理可应用于任何用电驱动的步进电机。

二 步进电机驱动线路

图1的方框图表示步进电机控制系统的基本单元。它由时序逻辑电路，功率开关电路，电源，电流或电压限制电路组成，必要时还可能有反馈编码器。开环控制和闭环控制之间的根本差别是后者具有传感马达位置和（或）速度的编码器及反馈连接线路。

图1中功率驱动器的功能是接收低电平的数字脉冲序列形式的输入逻辑信号，并把高电流的时序脉冲分配到步进电机的各相，以产生不连续的角运动。时序逻辑部分一方面接收输入脉冲，同时还接收方

B.C.kuo and R.A.Yackel (Department of Electrical Engineering University of Illinois, Urbana, Illinois): CONTROL ASPECTS OF STEP MOTORS, B.

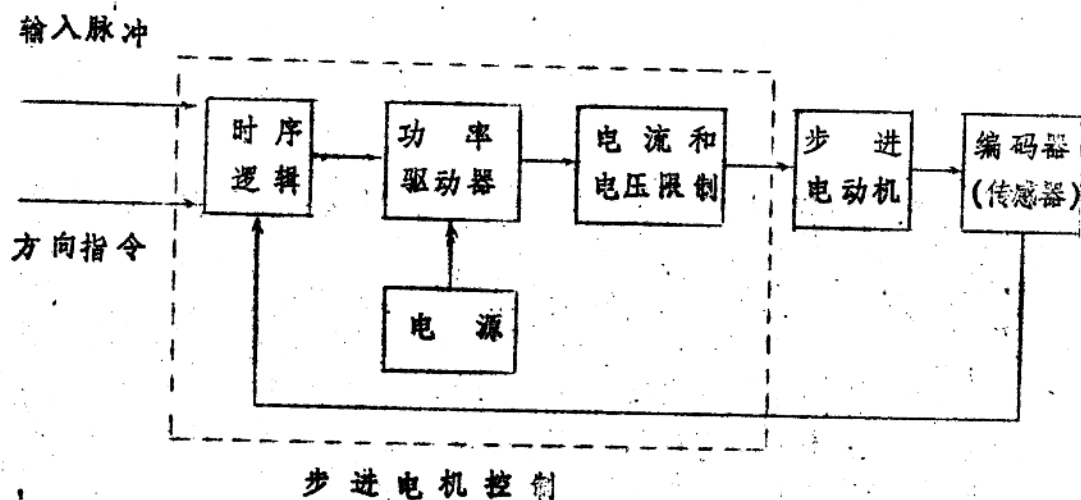


图1 典型的步进电机控制方框图

向指令，并向各个功率开关电路供给低电平信号。逻辑部分包含有一个 n 级的环形计数器，其级数 n 等于步进电机的相数。由于方向控制的作用，到环形计数器的输入脉冲使环形计数器产生向右或向左的移位，从而产生电机各相的顺时针或反时针方向的时序脉冲电压。环形计数器开始可这样来调整，使马达的一相或几个相始终是在给定的时间上进行转换。例如，按单相转换的有特定的旋转方向的一个四相步进电动机具有的开关时序为：A—B—C—D—A—B……，图2，表示了这两种时序的时间图。根据所使用的步进电动机的不同类型，可以把时序逻辑排列成多种不同的方式去转换电机的各相绕组。

控制三相步进电动机用的典型的功率放大级表示在图3上，电压抑制电路也表示在图3上面。当来自时序逻辑部分（通常是环形计数器）的低电压信号接通推动管 Q_1 时，功率管 Q_2 也随之接通，于是电源电压 V 就经过 R 和晶体管 Q_2 将A相绕组接通，在该闭合回路中立即建立起电流。

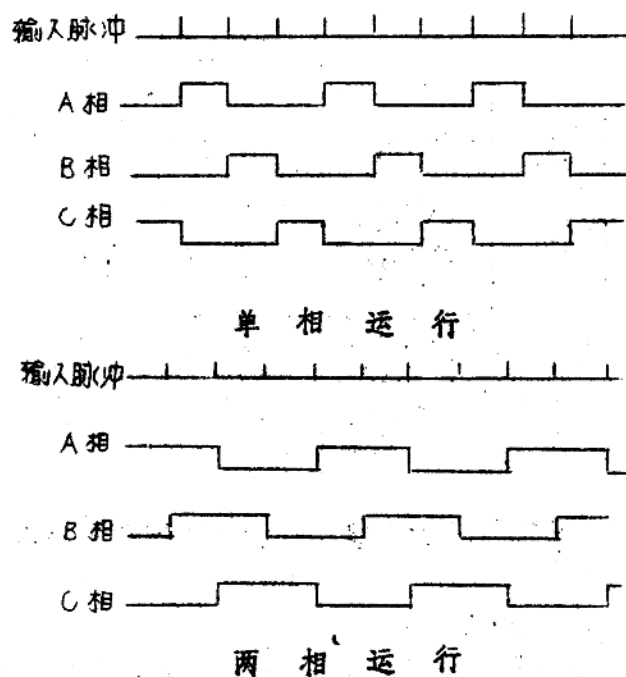


图2 可变磁阻型步进电动机相序时间图

抑制电路

当电机的一相准备要断开时，就有一个低电平电压信号施加到图3。中晶体管 Q_1 的基极，导致 Q_1 和 Q_2 断开，于是电机绕组中的电流经回扫二极管和放电电阻 R_S 衰减。抑制电路的主要用途是加速电机的断开相绕组中电流的衰减率，图3中的二极管——电阻装置称作二极管抑制电路，在实践中经常被利用。

实际上，并非在所有场合都要求步进电机的相电流能迅速衰减，因为发现在单叠式步进电机中，各相绕组的上升电流和衰减电流之间的相互作用常常会增强电机的阻尼。

其它的抑制电路，诸如齐纳二极管抑制电路，通过二次击穿晶体管的电流抑制电路和电容抑制电路等已在文献〔1〕中叙述。

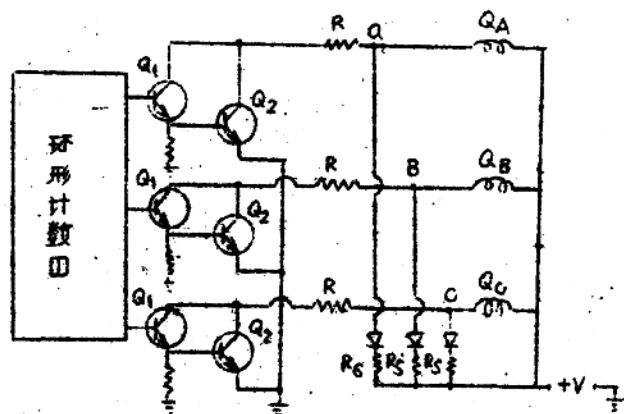


图3 控制三相步进电机用的典型的功率放大级

3. 步进电机的开环控制

开环控制是步进电机最简单的运行方式，在开环控制中，步进电机的运行依赖于脉冲的时序，如步进电机始终保持与它的输入脉冲列同步，则电机的速度取决于相邻脉冲之间的时间间隔。由于开环控制的简单性（它不需要反馈编码器），且系统始终是稳定的，所以在许多情况下，对于增量运动的控制，步进电机比起直流或交流马达来更为吸引人。

所谓步进电机的开环控制，简单地说就是指输入脉冲列或者是预先确定的，或者是其调节方法不依赖于电机的位置。事实上，根据电机运行时的输入脉冲的速率和负载情况的不同，可有几种开环运行的类型。如果步进电机所施加的脉冲速率足够慢，以致于在每步的结束时电机就停下来，这称之为分步运行方式。就其本质来说，电机经历着启动—停止的运动顺序。在响应时间不是紧要的应用场合，这种运行方式是最简便的。对于这种类型的运行，典型的脉冲速率或步速小于每秒100个脉冲或每秒100步。要求作这种简单的启动—停止运动的典型应用可在低成本印刷机的纸张推进机构中见到。有时步进

电机和阻尼器组合起来能得到平滑的启动—停止运动。

如果增加电机的输入脉冲速率，电机的角运动便会从分步运行变到连续的向前运动，通常称作为“旋转”。在旋转—连续运行方式中，电机在两步之间没有停止现象。由于当电机的速度还是正的或负的时候，后续的开关脉冲就已到达，所以电机的性能可能是难以预言的。这就定性地说明了步进电机为何在某个开环速度上发生共振，以及大多数步进电机的最大开环速度是相当低的。

4. 步进电机的闭环控制

尽管实施步进电机的开环控制是简单的，但电机的最大速度受到限制，而且对于轻负载，其速度会有大范围的起伏。为了决定相对于转子位置的恰当的相的转换，可利用位置反馈把一个新的参量加到步进电机的控制中。用闭环控制后，不仅能使速度提得更高，更平滑，而且还能完成对步进电机的许多其它方面的控制。然而，闭环控制带来的一个不利是，步进电机的准确速度取决于驱动电压负载大小以及从轴的编码器反馈回来的脉冲的超前角。这使正确地调准所要求的电机速度比开环情况下更困难（开环的速度由输入脉冲的速率决定）。

图1中的方框图说明了闭环步进电机控制方案的基本单元。在这种情况下，编码器可以是一个光电装置，或磁性传感器。电机每走一步，它们就会给出一个脉冲（或若干个脉冲）。图4所示的是一个反馈编码装置，它使用一个固定在电机轴上的开有槽孔的圆盘和两组光敏传感器。

编码器圆盘开有间隔均匀的槽孔，槽孔的总数等于电机每旋转一周的步数。每一个光电传感器部件由一个光源和一个光电池构成。光电传感器的工作很简单，从光源来的一束光每次通过一个槽孔时，光电池就产生一个脉冲，并送到控制器中去。步进马达最初由一个来自输入端的指令脉冲启动，随后的脉冲由编码器产生。

每一个传感元件的位置可以调整到相对于电机的平衡位置（或扣住位置）成一个固定的角度，通常称之为“超前角”。对于每步 15° 的步进电机，其超前角和平衡位置之间的关系在图5中作了说明。设 θ_1 表示一组光电传感器的超前角，这里 $0^\circ \leq \theta_1 \leq 15^\circ$ 。在图5中平衡

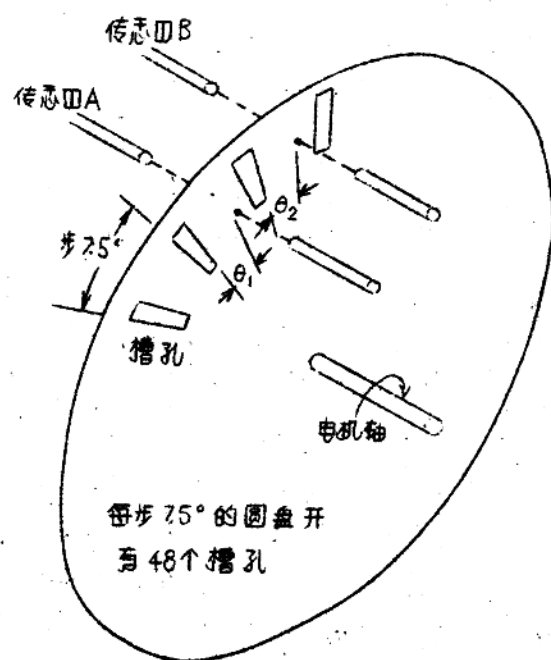


图4 由一个开有槽孔的圆盘和二个光电传感器构成的反馈编码器

位置（或扣住位置）用 $E_0, E_1, E_2, \dots$ 表示，当电机在平衡位置 E_0 时施加第一个脉冲，由于光电传感器的位置相对于平衡位置的角度是 θ_1 度，因此由光电传感器产生的后续脉冲相对于每一个后面的平衡位置的角度也是 θ_1 度。

对于步进电机的闭环控制超前角的定义在工业中还没有标准化。例如，由于起始脉冲和光电传感器产生的第一个脉冲而引起的最终平衡位置是 E_2 ，因此象图 5 中所表示的那样，真实的超前角（按其名称的意思）应该定义为 $30^\circ - \theta_1$ ，但是，在实际上，简单地把 θ_1 的值作为基标是更为方便的。

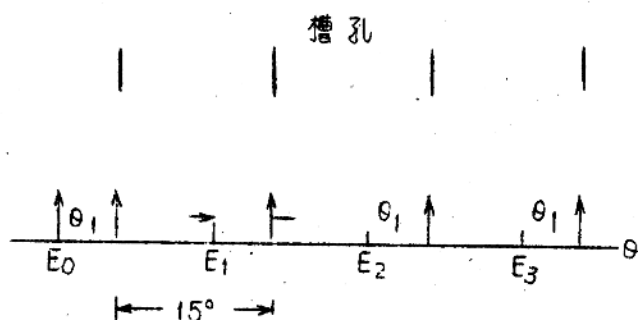


图5 闭环步进电机控制的超前角或转换角的确定

超前角的变化对于加速度和减速度特别是对步进电机最终的稳定速度有着重要的影响。图6说明了典型的闭环控制的步进电机的稳定速度与其超前角的函数关系。

尽管光电传感器的安装对于一个给定步进电机的超前角的实际可调范围造成了物理上的限制，但是通过把附加脉冲注入到控制器的输入脉冲列中，就可以获得超前角 θ_1 的负值和比电机一步的角度更大的值。

附加脉冲的注入和负的超前角的现象将在本文的后面部分讨论。

第二组反馈传感器的用途是进行方向检测，或当为了实现电机的加速和减速而需要不同的角度时，也得用第二组反馈传感器。作为方向检测用时，两个反馈传感器应这样调整，使得它们各自的输出脉冲交叠起来，如图7所示，这交叠脉冲送到图8的方向检测电路。该电路保证步进电机每前进一步所产生的两个反馈脉冲只能引起一个脉冲，并保证电机在一个合适的方向上旋转。

方向检测电路基本上把交迭的脉冲划分为如图9所示的三个区域。只要时序1, 2, 3或时序3, 2, 1发生，脉冲便分别被送到CW或CCW输出端。对于一个不完全的或杂乱的时序，则或者不产生任何输出脉冲，或者只在CW和CCW输出端中的一个产生输出脉冲，

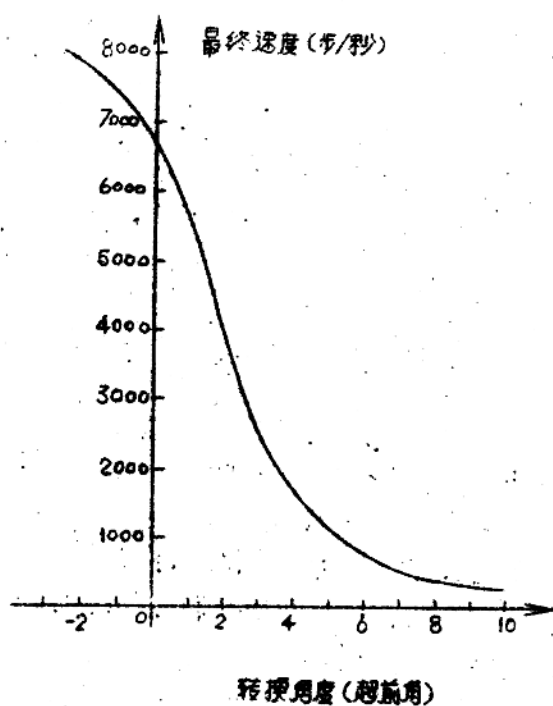


图 6 随步进电机的转换角而变的稳态速度

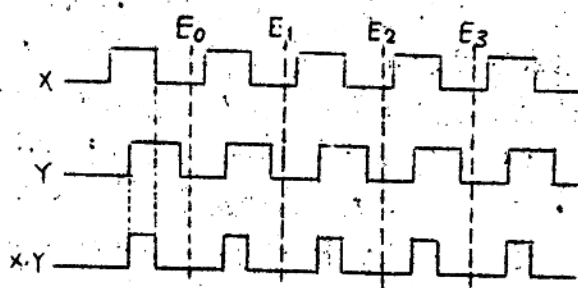


图 7 作为方向检测的反馈脉冲的交迭

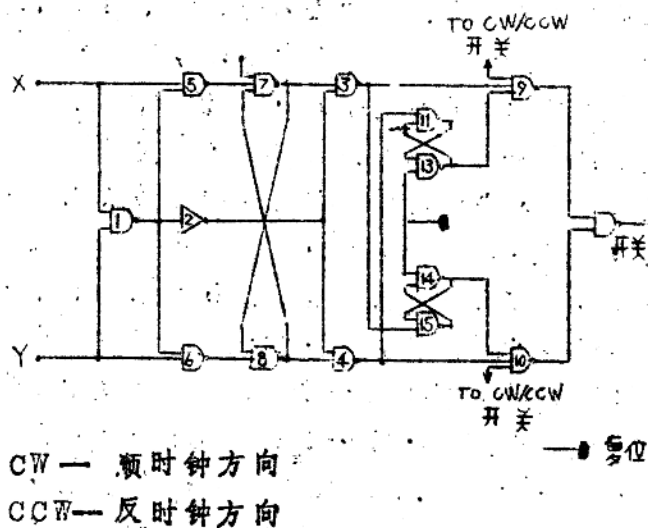
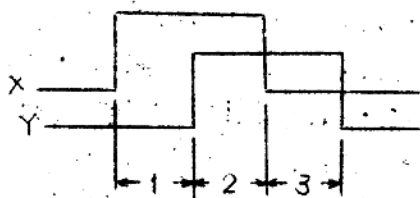
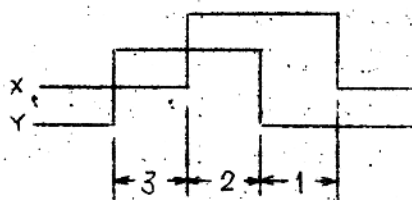


图8 方向检测电路



顺时针方向转动



反时针方向转动

图9 反馈脉冲的交迭情况

这取决于电机的振荡情况。

步进电机的静态转矩曲线对于弄清在闭环控制方式下怎样工作是有利的。在图10上表示的曲线是每步 7.5° 的三相步进电机的理想化了的静态转矩曲线（近似正弦曲线）。

为了保持正的或负的转矩，步进电机将在某个角度上从一个转矩曲线转换到下一个转矩曲线上运行（或说从一相跳到另一相运行），这个转换角的近似值可利用图10的曲线来确定。假设要保持最大的正转矩，又设在转换的瞬间，断电相中的电流能瞬息衰减掉，而在新激励的相中的电流能瞬时建立起来，那末过各个平衡位置 5.625° 的转换角将给出最大的转矩，因为这是转矩曲线的交迭点。例如，设电机在 0° 时因C相中有一个稳态电流而处于稳定状态。第一个顺时针脉冲在 0° 时加上，下一个脉冲在 5.625° 加上，再下一个在 13.125° ，即在 5.625° 以后 7.5° 处加上，其后的所有脉冲都间隔 7.5° 。但实际上，电流不是瞬间建立起来或瞬间衰减掉的，这样一来，转换过程就取决于电流的上升时间和衰减时间以及转换的位置。这两个过程的时间常数取决于控制电路和电机的电阻，绕组的自感和互感以及电机的反电动势。同时，绕组的电感又是转子位置和电机中电流的函数，因为电机的磁性材料易受饱和。因此，由于磁路的非线性，要精确地解出最优的转换角在分析上是有困难的。但是已从实验的结果发现，在典型的步进电机中，从一个转矩曲线到下一个转矩曲线的转换过程需要 $1\sim 2$ 毫秒的时间。为了能在维持最大的正转矩方式下转换，必须在 5.625° 位置前 $1\sim 2$ 毫秒时刻施加脉冲。在低速时，这个超前时间要求转换发生在 5.625° 以前不到 1° 的点上。在高速时，这超前时间就要求转换发生在 5.625° 角以前大于 7.5° 的点上。（可能是 1.5° 度，译者），因此为了最优地控制步进电机，控制器必须同时使用位置反馈和速度反馈。

如果象在大多数的实际应用中那样仅仅使用位置反馈，则电机从一个转矩曲线转换到另一个转矩曲线的转换角必须这样来选定，即要使电机保持高的平均转矩，并能从稳定位置启动。很明显，对于此处所述的电机，转换角必须小于 5.625° ，因为任何大于该值的转换角，

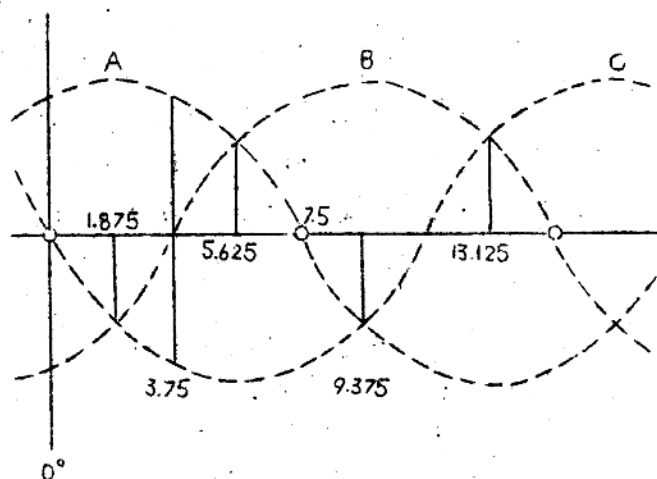
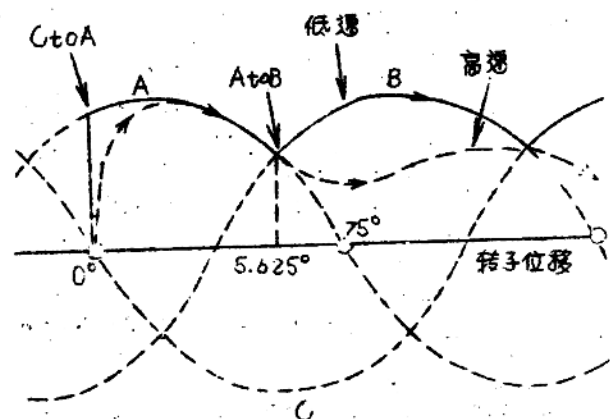


图 1.0 每步 7.5° 的三相步进电机的静态转矩曲线

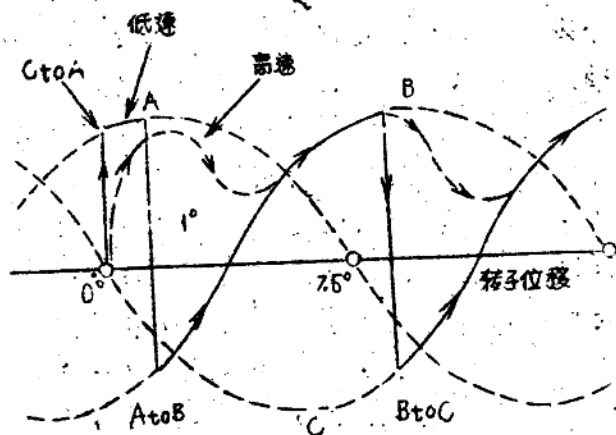
给出的平均转矩都比较低。还发现，如果步进电机从平衡点开始启动，则超前角小于 1° 时会引起电机反方向转动，并在 -7.5° 平衡位置附近来回摆动。从图 1.0 的静态转矩曲线可以看出，在平衡点以后的第一个反馈脉冲将使电源电压从 A 相转换到 B 相，在这种情况下，在电机轴经过 3.75° 这点以前 B 相对电机产生的转矩始终是负的。如果这负的转矩施加的时间足够长，以致于能倒转运动的方向，则电机将会反时针方向运动到 B 相的平衡位置 -7.5° 。因此，当只有位置反馈时，转换角必须取在 1° 和 5.625° 之间，图 1.1 表示了这两种极端的情况。在低速时，超前角是小的，接近于 5.625° 的角给出一个最大的平均转矩。而在高速时，超前角是比较大的（因为超前时间不变），转矩将减小，如虚线所示。另一方面，对于接近 1° 的角在低速时给出的转矩是小的，如实线所示，而在高速时由于超前时间的关系给出的转矩大得多。如虚线所示。

对于经常运用的最大负转矩的转换角也存在着类似的限制情况。图 1.2 表示的是这种转换角的两种极限情况。在速度非常低以至于电

流的时间常数可忽略不计时，最大的负转矩出现在转换角是 9.375° 的情况下。当速度逐渐增高时，有效的转换角增大，因此导致了转矩的减小，如虚线所示。任何大于 9.375° 的转换角，显然对于所有的速度都将给出较小的转矩。在图 12 的第二组曲线中显示的转换角为 3.75° ，由于超前时间的效应，其在高速时能提供的平均转矩比转换角为 9.375° 时高。但是当速度接近零时， 3.75° 的转换角将给



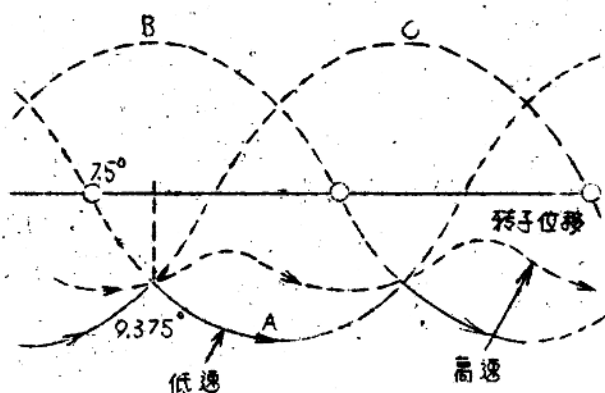
转换角 = 5.625°



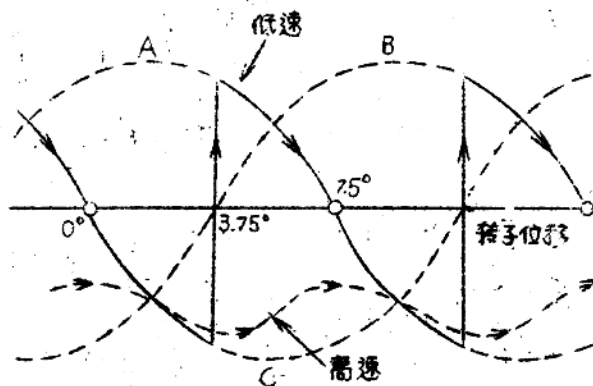
转换角 = 1°

图 11 低速和高速时加速期间转换角对转矩曲线的影响

出较小的转矩。注意，如果转换角比 3.75° 任意的小，且电机运行在足够低的速度上，则会出现正的平均转矩。因此，对于减速的用途，转换角必须取在 3.75° 和 9.375° 之间，在这个范围内较小的转换角在高速时可提供最大的减速度，而较大的转换角在低速时能提供最大的减速度。



转换角 = 9.375°



转换角 = 3.75°

图 12 低速和高速时，加速期间转换角对转矩曲线的影响

在控制方案中，在某个点上电机必须从加速状态转换到减速状态。如果加速状态的转换角 θ_1 小于减速状态的转换角 θ_2 （通常是这样的情况），则为了使电机进入减速状态，就必须在 θ_1 时给出两个顺时针（CW）方向脉冲，或者必须在 θ_1 时给出一个反时针方向（CCW）脉冲。如图13所示，图中 $\theta_1 = 2^\circ$ ， $\theta_2 = 5^\circ$ 。上面所述的一个极限情况是加速和减速的转换角相等（ $\theta_1 = \theta_2$ ）。当电机改变状态时，在 θ_1 处不是出现两个顺时针方向脉冲就是出现一个反时针方向脉冲，并在 θ_2 （新的转换角）处出现一个顺时针方向脉冲。这样当 θ_1 接近 θ_2 时，在 θ_1 处就能出现三个顺时针方向脉冲，或者在 θ_1 处能出现一个反时针方向脉冲和一个顺时针方向脉冲。两种情况都相当于在 θ_1 处全然不转换，这个特殊情况表示在图14上。

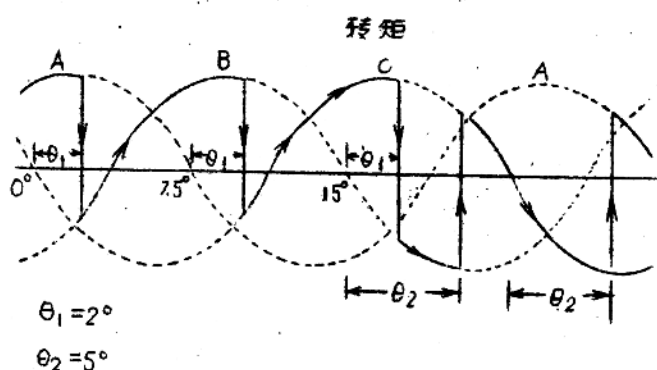


图13 电机从加速转换到减速的转矩曲线

图6表示出小的超前角会导致一个高的电机稳态速度。遗憾的是超前角 θ 不能调到小于 1° 的值，因为这个特殊的角值不能产生足够大的正的启运转矩。然而，若把一个附加脉冲注入到进入控制器的反馈脉冲列中去就可以实现在小于 1° 的角值上运行。事实上附加脉冲的注入把相当于一步大小的一个负的角度加到了起始转换角 θ 。图15描绘了一个每步 10° 的三相步进电机的静态转矩曲线。曲线A表示转换角为 9° 时电机所遵循的典型的低速转矩曲线。曲线B（图15b）表示在点1处注入一个附加脉冲以后的低速转矩曲线。请注