

[19]中华人民共和国国家知识产权局

[51]Int. Cl⁶

H02P 8/00

H02P 8/22

[12] 发明专利说明书

[21] ZL 专利号 96118695.X

[45]授权公告日 1999年8月11日

[11]授权公告号 CN 1044655C

[22]申请日 96.6.6 [24]颁证日 99.7.2

[21]申请号 96118695.X

[73]专利权人 中国人民解放军第二炮兵工程学院

地址 710025 陕西省西安市第二炮兵工程学院

[72]发明人 黄先祥 钟仁人 刘春桐

郭晓松 张志利

[56]参考文献

CN1073059A 1993. 6. 9 H02P8/00

US5,032,779 1991. 7.16 H02P8/00

审查员 张东亮

[74]专利代理机构 西北地区军队院校专利事务所

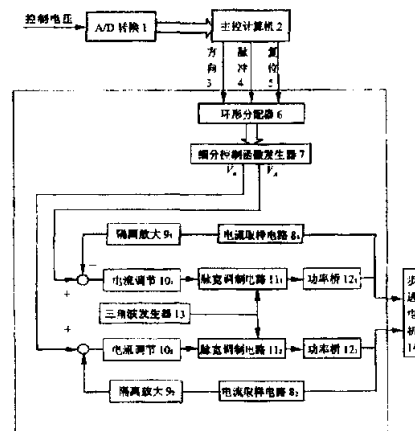
代理人 孙枫

权利要求书 3 页 说明书 8 页 附图页数 3 页

[54]发明名称 步进电动机高精度细分方法及其控制系统

[57]摘要

本发明涉及一种步进电动机高精度细分方法及其控制系统;建立了:“电流矢量 恒幅均匀旋转”的数字模型和相应的技术解决方案;控制系统具有细分控制电路和细分控制函数修正电路及其计算机自动修正程序;本发明可将步进电机细分水平从目前国际上的最高记录 25.5"提高到 1.5"以上,不仅大大增加了步进电机的分辨率,而且改善了其动态运转时的特性。本发明将会在众多的高新技术领域中得到广泛的应用。



ISSN 1008-4274

权 利 要 求 书

1 一种步进电机高精度细分方法，其特征在于：

步骤一：建立一种可消除滞后角变化影响的步进电机细分控制函数数学模型：

$$\begin{cases} i_A = i_M \cdot \text{Cos}x \\ i_B = i_M \cdot \text{Sin}x \end{cases}$$

式中： i_A — A相绕组电流

i_B — B相绕组电流

x — 控制参数

i_M — 电流幅值

$\text{Cos}x$ — 控制参数余弦值

$\text{Sin}x$ — 控制参数正弦值

步骤二：对运行于交流同步电机状态的步进电机所受控的交流模拟信号在一个周期内进行细分，每个细分点对应一个交流值；

步骤三：按照细分控制函数数学模型对A、B两相绕组电流通过步距角细分控制电路实施控制，控制过程为：

由控制台送来的控制电压信号，经A/D转换器转换为数字量信号，主控计算机根据信号大小，计算出步进电机应旋转的方向、步数及频率；

上述信号输入到环形分配器中计数与分配，再送入细分控制函数发生器中，产生大小正比于控制函数 x 的正、余弦函数的两路电压 V_A 、 V_B 作为电机A、B两相绕组电流的控制电压；

控制电压经电流调节器放大，与三角波发生器的输出电压比较，差值电压由脉宽调制电路整形为方波，用于控制功率桥中VMOS管的开通与关断，电机绕组 W_A 、 W_B 分别接到功率桥的对角线上，取得正、余弦电流 $i_M \cdot \text{Sin}x$ 与 $i_M \cdot \text{Cos}x$ ，这样每输入一个脉冲，电机转子就步进一个微步距角 θ_f ；

步骤四：对影响细分控制精度的非线性及磁饱和因素，通过

细分控制函数修正电路及相应计算机修正程序对细分函数实施修正，其控制函数电路修正过程如下：

由主控机的数字量输出口向细分控制电路发出方向信号及控制脉冲，使步进电机在每发出一个脉冲时就转动一个微步距角；

控制多路模拟开关将正、余弦旋转变压器输出的电压信号转换为数字量角度值，作为粗机测量值送入主控机记录；

控制多路模拟开关将圆感应同步器输出的电压信号转换为数字量角度值，作为精机测量值送入主控机记录；

主控机根据测量结果，利用二次牛顿插值法对固化在 EPROM 中的细分控制函数进行修正，修正好的结果重新固化在步距角细分电路的 EPROM 中；

其计算机修正程序如下：

由主控机数据采集板的数字量输出口向细分控制电路发出方向信号及控制脉冲，同时对多路模拟开关实施控制；

主控机测量并记录由正、余弦旋转变压器和圆感应同步器输出的微步距角值；

判断脉冲是否够 4096 次；

根据记录结果，利用二次牛顿插值法对固化在 EPROM 中的细分控制函数进行修正并记录；

步骤五：对由于负载不均匀带来的误差而影响细分精度的因素通过采用高精度径向止推传动机构的方法解决。

2 根据权利要求 1 所述的一种步进电机高精度细分方法，其特征在于：步骤一中所述的细分控制函数是指 $\text{Cos}x$ 、 $\text{Sin}x$ ，当 A、B 两相电流值按照控制参数 x 的函数 $\text{Cos}x$ 、 $\text{Sin}x$ 变化时，电流矢量的幅值 i_H 将保持不变，即当

$$\begin{cases} i_A = i_M \cdot \text{Cos}x \\ i_B = i_M \cdot \text{Sin}x \end{cases}$$

时， $i_H = i_M$ 。

3 根据权利要求 1 所述的一种步进电机高精度细分方法，其



特征在于：步骤二中所述的步进电机所受控的交流模拟信号在一个周期内细分的条件是：

电流合成矢量旋转时每次变化的角度要均匀；电流合成矢量的大小或幅值要保持恒定不变。

4 一种根据权利要求 1 所述的步进电机高精度细分方法而设计的细分控制系统，具有主控计算机及 A/D 转换器，其特征在于：该细分控制系统还具有细分控制电路、细分控制函数修正电路；细分控制电路中，主控机(2)的三路脉冲(3)、(4)、(5)信号接于环形分配器(6)，细分控制函数发生器(7)接收环形分配器(6)的信号后，产生 V_A 、 V_B 两路电压信号分别送到由电流调节器(10)₁和(10)₂、脉宽调制器(11)₁和(11)₂、功率桥(12)₁和(12)₂、电流取样电路(8)₁和(8)₂、隔离放大器(9)₁和(9)₂构成的电路回路上；三角波发生器(13)同时接于脉宽调制电路(11)₁和(11)₂；功率桥(12)₁和(12)₂的输出信号送到步进电机；细分控制函数修正电路中，正、余弦旋转变压器(15)同时与步进电机(14)、圆感应同步器(16)、多路模拟开关(17)相接；多路模拟开关(17)受主控机(2)控制，并接旋转变压器——数字转换器(18)；正余弦旋转变压器(15)与圆感应同步器(16)同轴。

5 根据权利要求 4 所述的步进电机细分控制系统，其特征在于：细分控制电路中具有由电流取样电路(8)₁和(8)₂、隔离放大器(9)₁和(9)₂构成的一对深度负反馈电路，且其中分别具有霍尔效应电流传感器及霍尔元件。

说明书

步进电动机高精度细分方法及其控制系统

本发明属于步进电动机技术领域。涉及一种步进电动机高精度细分方法及其控制系统。

由于工业技术的不断进步，在自动化控制、精密机械加工、航空航天技术以及所有要求高精度定位、自动记录、自动瞄准、数模转换等高新技术领域内，对步进电动机的细分技术提出了越来越高的要求。步进电动机的细分角越小，越有利于提高步进电动机的角位、点位及连续轨迹控制方面的定位精度，越有利于与计算机联机，实现全自动化控制。同时，还可大大提高步进电动机的分辨率，大大改善步进电动机在动态运转时的特性。因此，多年来，国内外的同行都在努力寻求步进电动机细分技术的最佳方案及最高细分精度。目前国内外的现有技术状况可以从国际联机检索得到的国内外 19 个数据库中的与本课题有关的文献报导中得到反映（见附件《国际联机检索报告》）：即目前国内外的步进电动机细分技术的最高微步距角细分水平为 $25.5''$ （美国帕克公司产品说明附件）。而随着科学和工业技术发展，这一细分水平对于目前很多要求 $5''$ 以上的微步距角来说，仍远远不能满足要求。为什么长期以来步进电动机的细分技术停留在 $25.5''$ 的水平上而不能再细分？对这一问题的研究结果表明：现有技术首次获得较高分辨率的细分方法采用的是一种称为半拍步进的方法，即在对步进电动机的步距角进行细分时，将步进电动机的控制位置数（以四相混合式步进电动机为例）的四拍通电逻辑顺序变为八拍通电逻辑顺序，从而将步距角降为原来的一半。以后在这种方法的基础上继续改进为电流合成矢量 i_H 不是一下变动 45° 个电角度，而是一次变化一个较小的角度 θ_f ，这样就将步距角由原来的 45° 变为后来较小的微步距角 θ_f 。当通电时，



电流合成矢量在 $0\sim 45^\circ$ 范围内，仅让一相绕组的电流在变化，即只有 i_A 在变化， i_B 不变；在 $45^\circ\sim 90^\circ$ 范围内，仅让 i_B 一相绕组的电流变化， i_A 不变。这种细分驱动方法的优点是只需改变某一相绕组的电流值，因此在硬件电路的设计上就比较容易实现。但是这种方法却带来了一个不可克服的缺陷，即电流合成矢量 i_H 在旋转过程中的幅值是处在不断变化的状态中（见图 1、图 2），从而引起滞后角的不断变化。当细分数很大、微步距角非常小时，滞后角变化的差值 $\Delta\theta$ 已大于所要求细分的微步距角，使得微步距角的继续细分实际上失去了意义（见图 3）。这就是现有细分技术方案不能达到超高分辨率的根本原因。为解决这个问题，很多资料都曾经提出对细分电流进行修正的方法，但一直未见一个实用、统一的数学模型及可行的细分方法问世。

针对上述现有技术状况，本发明的目的在于：

1. 从理论和实践的角度，建立一种新的步进电动机高精度细分方法和数学模型，以消除现有技术中不可克服的滞后角变化的 $\Delta\theta$ 值所引起的问题，使细分技术提到更高的水平；
2. 提供一套新原理方法指导下的硬件控制电路；
3. 提供一种对细分控制函数进行修正的电路及其相应的计算机自动修正程序；

现将本发明的构思及技术解决方案叙述如下：

从以上的分析可知，步进电动机的细分驱动都是通过电流合成矢量的旋转来实现的，要消除现有技术中由于滞后角的变化引起的 $\Delta\theta$ 值大于微步距角而导致不可继续细分的问题，只有使电流合成矢量 i_H 形成新的矩角特性曲线，为达到这一点，必须满足以下两个条件：

- 一. 电流合成矢量旋转时每次变化的角度要均匀；
- 二. 电流合成矢量的大小或幅值要保持恒定不变。

基于这两个条件，即可建立“电流矢量恒幅均匀旋转”细分驱动方法。本发明的细分方法其特征在于：

步骤一：建立一种可消除滞后角变化影响的步进电机细分控制函数



数学模型:

$$\begin{cases} i_A = i_M \cdot \cos x \\ i_B = i_M \cdot \sin x \end{cases}$$

式中: i_A — A相绕组电流
 i_B — B相绕组电流
 x — 控制参数
 i_M — 电流幅值
 $\cos x$ — 控制参数余弦值
 $\sin x$ — 控制参数正弦值

步骤二: 对运行于交流同步电机状态的步进电机所受控的交流模拟信号在一个周期内进行细分, 每个细分点对应一个交流值;

步骤三: 按照细分控制函数数学模型对 A、B 两相绕组电流通过步距角细分控制电路实施控制, 控制过程为:

由控制台送来的控制电压信号, 经 A/D 转换器转换为数字量信号。主控计算机根据信号大小, 计算出步进电机应旋转的方向、步数及频率;

上述信号输入到环形分配器中计数与分配, 再送入细分控制函数发生器中, 产生大小正比于控制函数 x 的正、余弦函数的两路电压 V_A 、 V_B 作为电机 A、B 两相绕组电流的控制电压;

控制电压经电流调节器放大, 与三角波发生器的输出电压比较, 差值电压由脉宽调制电路整形为方波, 用于控制功率桥中 VMOS 管的开通与关断, 电机绕组 W_A 、 W_B 分别接到功率桥的对角线上, 取得正、余弦电流 $i_M \cdot \sin x$ 与 $i_M \cdot \cos x$, 这样每输入一个脉冲, 电机转子就步进一个微步距角 θ_f 。

步骤四: 对影响细分控制精度的非线性及磁饱和因素, 通过细分控制函数修正电路及相应计算机修正程序对细分函数实施修正, 其控制函数电路修正过程如下:

由主控机的数字量输出口向细分控制电路发出方向信号及控制脉



冲，使步进电机在每发出一个脉冲时就转动一个微步距角；

控制多路模拟开关将正、余弦旋转变压器输出的电压信号转换为数字量角度值，作为粗机测量值送入主控机记录；

控制多路模拟开关将圆感应同步器输出的电压信号转换为数字量角度值，作为精机测量值送入主控机记录；

主控机根据测量结果，利用二次牛顿插值法对固化在 EPROM 中的细分控制函数进行修正，修正好的结果重新固化在步距角细分电路的 EPROM 中。

其计算机修正程序如下：

由主控机数据采集板的数字量输出口向细分控制电路发出方向信号及控制脉冲，同时对多路模拟开关实施控制；

主控机测量并记录由正、余弦旋转变压器和圆感应同步器输出的微步距角值；

判断脉冲是否够 4096 次；

根据记录结果，利用二次牛顿插值法对固化在 EPROM 中的细分控制函数进行修正并记录。

步骤五：对由于负载不均匀带来的误差而影响细分精度的因素通过采用高精度径向止推传动机构的方法解决。

根据上述步进电动机高精度细分方法，本发明所设计的控制系统，具有主控计算机及 A/D 转换器，其特征在于：该细分控制系统还具有细分控制电路、细分控制函数修正电路；细分控制电路中，主控机(2)的三路脉冲(3)、(4)、(5)信号接于环形分配器(6)，细分控制函数发生器(7)接收环形分配器(6)的信号后，产生 V_A 、 V_B 两路电压信号分别送到由电流调节器(10)₁和(10)₂、脉宽调制器(11)₁和(11)₂、功率桥(12)₁和(12)₂、电流取样电路(8)₁和(8)₂、隔离放大器(9)₁和(9)₂构成的电路回路上；三角波发生器(13)同时接于脉宽调制电路(11)₁和(11)₂；功率桥(12)₁和(12)₂的输出信号送到步进电机；细分控制函数修正电路中，正、余弦旋转变压器(15)同时与步进电机(14)、圆感应同步器(16)、



多路模拟开关(17)相接；多路模拟开关(17)受主控机(2)控制，并接旋转变压器——数字转换器(18)；正余弦旋转变压器(15)与圆感应同步器(16)同轴。细分控制电路中具有由电流取样电路(8)₁和(8)₂、隔离放大器(9)₁和(9)₂构成的一对深度负反馈电路，且其中分别具有霍尔效应电流传感器及霍尔元件。

现结合附图将本发明提供的细分控制电路、细分控制函数修正电路及细分控制函数修正计算机控制程序的实施例具体叙述如下：

图4是步距角细分控制电路原理框图，具有A/D转换电路(1)、主控计算机(工业PC机)(2)，其特征在于还具有环形分配器(6)，细分控制函数发生器(7)、三角波发生器(13)、电流调节器PID(10)₁、₂、隔离放大器(9)₁、₂、电流取样电路(8)₁、₂、脉宽调制电路PWM(11)₁、₂、功率桥(12)₁、₂。步距角细分控制电路的工作过程是这样的：当控制台送来控制电压信号后，经A/D转换器转换为数字量信号后，再由主控机(2)根据信号变化的大小，计算出步进电动机应旋转的方向、步数及频率，通过方向和脉冲信号线(3)、(4)输入到步距角细分电路的环形分配器(6)中计数与分配，再送到细分控制函数发生器(7)中，产生大小正比于控制参数 x ($x = \theta_{\Sigma} = n\theta_f = n \times \frac{90^\circ}{2048}$ ，单位为电角度)的正、

余弦函数的两路电压 V_A 、 V_B ，作为电机A、B两相绕组电流的控制电压，经PID(比例、积分、微分)电流调节器(10)₁、₂放大，再与三角波发生器(13)的输出电压比较，差值电压由脉宽调制(PWM)电路(11)整形为方波(其脉宽正比于控制电压)，用以控制功率桥(12)中VMOS管的开通与关断。电机绕组 W_A 、 W_B 分别接于两个功率桥(12)的对角线上，取得正、余弦电流 $i_M \cdot \text{Sin}x$ 与 $i_M \cdot \text{Cos}x$ ，这样，每当输入一个脉冲，电机转子就步进一个微步距角 θ_f 。

在步距角细分控制电路中，为保持电机绕组中电流的稳定性，由电流取样电路(8)和隔离放大器(9)构成了一对电流深度负反馈电路，两个电流取样电路(8)分别具有霍尔效应电流传感器H及霍尔元件，绕组电

流作为霍尔元件的输入信号，由霍尔元件通过霍尔效应将其转换为电压信号，此电压信号经隔离放大器(9)放大后作为电流调节器(10)的反馈信号，从而构成电流深度负反馈。

图 5 是细分控制函数修正电路原理框图。由于步进电动机的非线性和磁路饱和等因素的影响，当 A 、 B 两相绕组按照正余弦规律通电时，实测的步进电动机转子的角位移与理想值有一个偏差，因此，本发明设计了对绕组电流值进行优化的细分控制函数修正电路。该电路具有正余弦旋转变压器(15)、圆感应同步器(16)、多路模拟开关(17)、旋转变压器—数字转换器(18)。正余弦旋转变压器(15)、圆感应同步器(16)与步进电动机(14)同轴，且正余弦旋转变压器(15)和圆感应同步器(16)的输出端均与多路模拟开关(17)的输入端相接。修正的关键是如何精确地对微步距角进行自动测量。修正的过程是这样的：首先由主控机(工业 PC 机)的数字量输出口向细分控制电路(19)发出方向信号及控制脉冲，每发出一个脉冲，步进电动机将转动一个微步距角。步进电动机(14)、正余弦旋转变压器(15)和圆感应同步器(16)是同轴的，圆感应同步器可将周角分为 720 个周期，每个周期的测量范围是 0.5° ，测量精度为 $0.5''$ 。由正余弦旋转变压器(15)确定周期数 n 值，由圆感应同步器(16)确定精确读数和误差范围，然后将测量结果通过多路模拟开关(17)送入旋转变压器—数字转换器(18)中，多路模拟开关(17)同时由主控机(2)内 PCL-818L 上的数字量输出口进行控制，当发出一个控制脉冲、步进电动机转动一个微步距角后，控制多路模拟开关(17)使正余弦旋转变压器(15)输出的正余弦电压信号输入到旋转变压器—数字转换器(18)，转换为 16 位数字量的角度值，作为粗机测量值送入主控机(2)并记录后，再控制多路模拟开关(17)使圆感应同步器(16)输出的正余弦电压信号输入到旋转变压器—数字转换器(18)，转换为 16 为数字量的角度值，作为精机测量值送入到主控机(2)并记录。当转够 4096 个脉冲后，由主控机(2)根据测量结果，利用二次牛顿插值法对固化在 EPROM 中的细分控制函数进行修正，最后将修正结果重新固化在步距角

细分电路中的 *EPROM* 中。

图 6 是与上述步距角细分控制函数修正电路相应的计算机测量修正程序的流程图。该程序的流程如下：

(20) 程序开始

(21) 由主控机(2)的数据采集板 *PCL-818L* 上的数字量输出口向细分控制电路发出方向信号及控制脉冲；

(22) *PCL-818L* 的数字量输出口同时对多路模拟开关(13)实施控制；

(23) 主控机测量并记录分别由正余弦旋转变压器(15)和圆感应同步器(16)输入的微步距角值(16位数字量)；

(24) 判断脉冲数是否转够 4096 次；

(25) 根据测量结果，利用二次牛顿插值法对固化在 *EPROM* 中的细分控制函数进行修正并记录；

(26) 程序结束。

由于步进电动机的细分精度除了受到上述因素的影响以外，负载的变化也将直接影响到滞后角的变化，而且是随着负载的增大而增大的，如果滞后角的变化是随机的，且超过了允许的范围，同样也会使步距角的细分失去意义。因此，本发明为提高步进电动机所带负载的均匀性，在步进电动机的传动机构中，采用了高精度 *D* 级推力球轴承。

现将附图说明如下：

图 1：采用现有技术细分方法时的电流矢量旋转示意图。

图 2：采用现有技术细分方法时的绕组电流波形示意图。

图 3：现有技术的矩角特性曲线中反映的滞后角 $\Delta\theta$ 对细分的影响。

图 4：本发明步距角细分控制电路原理框图。

图 5：细分控制函数修正电路原理框图。

图 6：细分控制函数修正计算机程序框图。

其中：

图 1 中的 $|\vec{i}_A$ 、 $|\vec{i}_B$ 、 $|\vec{i}_H$ 、 $|\vec{i}_{AB}$ 等分别表示 A、B 两相电流矢量及两相电流合成矢量。

图 3 中的纵轴 T 表示转矩，横轴 θ_e 表示转子的位置转角。

本发明同现有技术相比，具有以下突出特点：

1. 在步进电动机细分技术上，设计了“电流矢量恒幅均匀旋转”方法，从原理上解决了实现高精度细分的技术难题，达到了微步距角 1.58”的国际领先水平。

2. 设计了细分控制函数修正电路及计算机自动修正程序，克服了步进电动机的非线性和磁路饱和的影响，保证了细分角的均匀性。

3. 在细分控制电路中，采用了霍尔效应电流深度负反馈隔离放大技术，确保了高精度细分的实现。

本发明的实施，使步进电动机的细分技术提高到了超高精度细分的水平，为自动化控制、精雕机床机械加工、高精度定位、自动测量、自动瞄准、数模转换等众多的高新技术领域提供了一流水平的技术和产品。

说 明 书 附 图

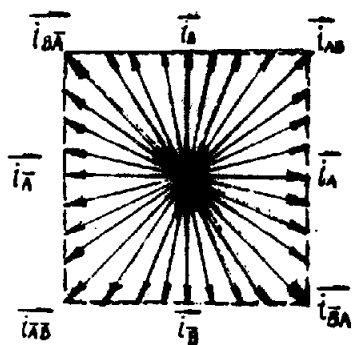


图 1

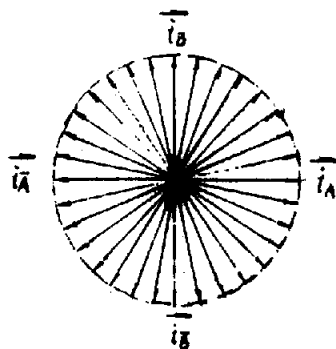


图 2

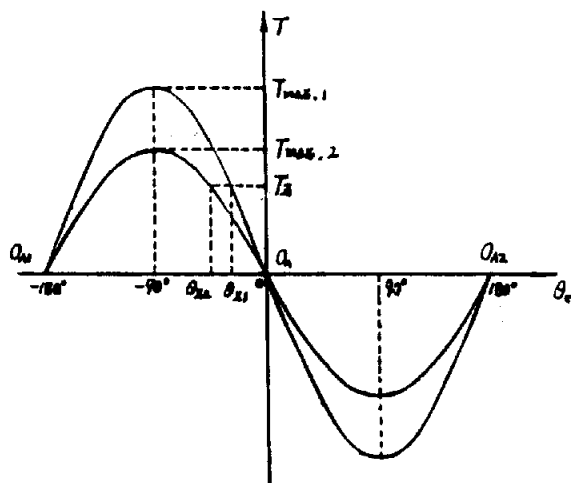


图 3

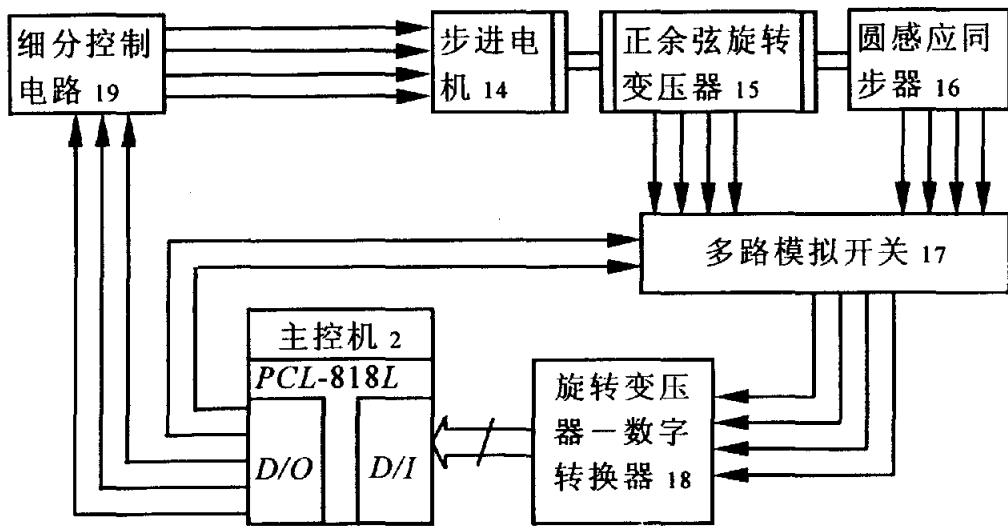


图 5

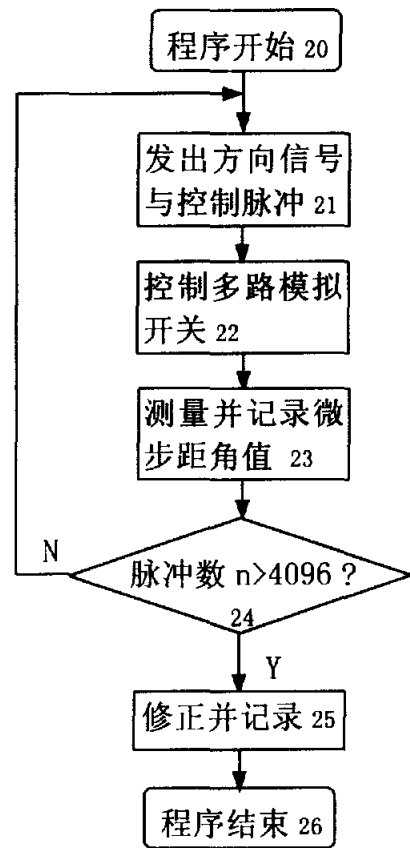


图 6