步进电机高分辨率细分控制函数发生器的研究*

姜平
四川轻化工学院

摘要：提出了一种新的步进电机细分控制函数的生成算法——插补法，该方法用圆弧插补技术产生高分辨率的细分控制函数，并用笔者提出的加权补偿法对其进行动态修正，解决了不同步进电机的恒力矩均匀细分的难题。该算法简单很有实用价值。

关键词：步进电机　细分控制函数　加权补偿法　插补

Study of High Differentiating Rate Fine Control Function Generator of the Stepping Motor

Jiang Ping

Abstract: A new algorithm, which is called method of interpolation for the fine control function of the stepping motor, has been developed. one control function for high differentiating rate fine of the stepping motor is implemented by the way of circular interpolation, and is modified dynamically by weighting method of compensation presented by author. The problem of the constant moment even fine driving of variant stepping motor, has been solved. This method is valuable and simple.

Keywords: stepping motor　fine control function　weighting method of compensation　interpolation

对细分驱动控制方法的研究，已有很多著述，但是目前其实际应用还远非完善。步进电机细分控制原理实际是按一定函数曲线规律控制 A 相和 B 相两定子绕组中的励磁电流比例，产生由 A 到 B 逐步旋转的磁场矢量，使得转子R分多步均匀的从 A 极转向 B 极运动。目前多用微处理器将数控系统传来的步进脉冲转换为细分控制函数，再用它调制脉宽后直接驱动功率开关管。然而，由于系统状态(步进电机的类型、运行状态、驱动电源等)经常变化，造成电机绕组电流与输出力矩之间、输出力矩与电机转角之间本已经很复杂的非线性关系变化，因而相应的电流曲线也应当随之变化。如何根据具体的应用环境产生并随意调整最佳的细分电流控制函数曲线，成为本文的研究内容。

本文首先介绍了步进电机的细分电流控制策略(实质是细分控制函数发生器)，然后讨论了圆弧插补产生步进电机细分电流的控制方法。最后介绍一个行之有效的优化修正方法——加权补偿法。

1　步进电机细分的控制策略

适当的细分控制函数发生器很难找到一种统一而简便的函数表达式，只能采取近似的方法，在精度要求不太高的情况下，采用已知的函数波形进行近似，有关研究和实验证明，对于两相双极型混合式步进电机，采用正余弦形的驱动电流较为理想，而对于反应式步进电机一般采用谐波较少的阶梯型驱动电流较为理想。也有采用实验逼近法的，通过多次测试，并修正数据，得到细分的阶梯波，但精度与测量手段关系很大而且实施起来复杂，一般精度较低。也有采用函数模型(通过插值法和函数拟合得到)的，先通过试验获得特定系

* 四川省人工智能实验室项目资助(200409)

统的细分波形数据，再通过数学处理找到此系统的细分控制模型函数，通过此函数确定输出的细分电流。

为了使步进电机细分驱动后力矩恒定而微步距均匀，近年来又提出了步进电机的恒力矩均匀细分的相电流控制策略。恒力矩均匀细分控制就是通过合理地控制步进电机的相电流，使电机内部的合成磁场在空间作幅值恒定的均匀旋转运动。

步进电机均匀细分控制时相电流的通用计算公式为

$$I_A=I_m\times\sin\theta/\sin\beta$$
$$I_B=I_m\times(\cos\theta-\cos\beta\times\sin\theta) \qquad (1)$$

式中，I_m为电机的额定电流，θ为A，B两相的合成磁场矢量与A相磁场矢量的夹角，β为相邻两相绕组单独通电时产生的磁场矢量之间的夹角，它一般与步进电机的类型及相数有关。对于三相反应式步进电机有$\beta=2\pi/3$，则式(1)可写为

$$I_A=1.15I_m\sin\theta/\sin\beta$$
$$I_B=I_m(\cos\theta+0.58\sin\theta) \qquad (2)$$

对于两相双极型混合式步进电机有$\beta=\pi/2$，则式(1)可写为

$$I_A=I_m\sin\theta \quad I_B=I_m\cos\theta \qquad (3)$$

虽然式(1)从理论上推导出了步进电机均匀细分时相电流的变化规律，但该公式在推导过程中，假设步进电机中的相电流与磁场幅值之间成线性关系，而实际上是非线性关系的，而且还存在磁滞现象等。因而在使用时必须对其进行修正。下面据此就两相双极型混合式步进电机的恒力矩均匀细分的一种新方法的原理进行阐述。

2 圆弧插补原理及在细分驱动中的应用

由式(3)可得

$$I_A^2+I_B^2=I_m^2(\sin^2\theta+\cos^2\theta)=I_m^2$$

显然这是一个圆的方程，我们可以用圆弧插补技术来把I_A，I_B任意细分，I_A作y轴坐标，I_B作x轴坐标，I_m作半径，则：$x^2+y^2=R^2$。细分电流增或减一步，表示x或y插补每进给(增或减)一步。

2.1 圆弧插补原理

数控系统中，插补运算用来计算刀具运行轨迹，所谓插补(即插值)，其实质是在给定已知点之间按一定曲线进行数据点的密化，这里采用改进的逐点比较法，以增加进给的均匀性。此法根据向x坐标或y坐标方向进给一步产生的偏差和向对角线方向(即x，y同时进给的方向)进给一步产生的偏差，选择偏差最小的那个方向进给。以45°，135°直线$x=\pm y$将象限分成8个45°的卦限，进给方式为：$x>y$时，进给方向为y方向和对角线方向；$x<y$时，进给方向为x方向和对角线方向。

以图1插补第一象限QZ圆弧为例来说明，圆弧中心作为坐标原点，半径为R，方向逆时针由Q至Z。

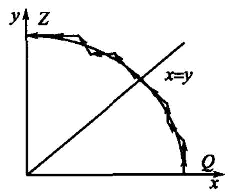

图1 圆弧插补进给方式

2.2 偏差比较函数计算公式及对应的进给方式

设任意时刻$x_n\geqslant y_n$的圆弧上的点$N(x_n,y_n)$，相应的偏差函数为$F_n=F(x_n,y_n)$，则

$$F_n=F(x_n,y_n)=x_n^2+y_n^2-R^2$$
$$F_{n+1}(\Delta y)=x_n^2+(y_n+1)^2-R^2=F_n+2y_n+1$$
$$F_{n+1}(\Delta x,\Delta y)=(x_n-1)^2+(y_n+1)^2-R^2=F_n-2x_n+2y_n+2$$

令 $f_n(x,y)=F_{n+1}(\Delta y)+F_{n+1}(\Delta x,\Delta y)=2F_n-2x_n+4y_n+3$

1)若$f_n\geqslant0$，则进给$-\Delta x$，$+\Delta y$，坐标值的修改为：$x_n-1\rightarrow x$，$y_n+1\rightarrow y$

$$\begin{aligned}f_{n+1}&=2F_{n+1}(-\Delta x,+\Delta y)-2x_{n+1}+4y_{n+1}+3\\&=2(F_n-2x_n+2y_n+2)-2(x_n-1)+4(y_n+1)+3\\&=(2F_n-2x_n+4y_n+3)-4x_n+4y_n+10\\&=f_n-4x_n+4y_n+10\end{aligned}$$

2)若$f_n<0$，则进给$+\Delta y$，坐标值的修改为：$y_n+1\rightarrow y$

$$\begin{aligned}f_{n+1}&=2F_{n+1}(+\Delta y)-2x_{n+1}+4y_{n+1}+3\\&=2(F_n+2y_n+1)-2x_n+4(y_n+1)+3\\&=f_n+4y_n+6\end{aligned}$$

3)初始状态$F_0=0$

$$\begin{aligned}f_0&=2F_n-2x_n+4y_n+3\\&=-2x_n+4y_n+3\end{aligned}$$

2.3 偏差计算公式和进给方式的修改

在圆弧插补过程中，要判断何时过卦限(直线

$x=\pm y$)和过象限(x、y 坐标轴 $x=0$、$y=0$)。此时偏差计算公式及进给方式要改变。就此例而言,当由 $x_n \geqslant y_n$ 变为 $x_n < y_n$ 时过 45°直线,相应的偏差公式由

$$f(x,y)=2F(x,y)-2x+2y+3 \tag{4}$$

变为

$$f(x,y)=2F(x,y)-4x+4y+3 \tag{5}$$

进给方式由:$f_n \geqslant 0$,进给 $-\Delta x$,$+\Delta y$,变为:$-\Delta x$;$f_n<0$,进给 $+\Delta y$,变为:$-\Delta x$,$+\Delta y$。

当 $x=0$ 时,过 90°y 轴,这时 y 坐标反符号,相应偏差式(4)、式(5)内 y 坐标前面将反符号,进给方向由 $+\Delta y$ 变为 $-\Delta y$。过其它卦限或象限同理[1]。

作者创造性地将插补运算用于细分函数,是由于圆弧插补的 x,y 坐标对应细分电流,理论上可以无限细分,每步细分电流非常小,平均起来就是连续函数,运行非常平稳,每步甚至多补插补平均作为一粗步细分都可使步距角非常小而且均匀。然后再用常用函数对其进行加权补偿,对不同的系统进行不同的权值修正,使所得曲线真正反映特定系统的控制规律,使步进电机恒力矩均匀细分。线性数学模型只有在磁路近饱和的情况下具有相对意义,建议加权补偿函数用幂函数。下面将详细说明。

3　幂函数曲线的加权处理与实时调整

对于幂函数直接用汇编语言实现其实时控制很困难。故采用计算和查表相结合的方法,用高级语言离线计算幂函数曲线各点值,也可连同上述插补值一并存入内存,这样就可用单片机进行查表,把在线计算和实时控制结合起来,并随系统状态变化而进行柔性调整。为此,作者提出了一种在细分电流输出过程中实时补偿调整(也可补偿后存储再查表)的方法。

3.1　补偿量及补偿原理

为了能使细分控制电流曲线可调,将最大电流(圆弧半径 R)扣除一部分 ΔR 作为补偿量($\Delta X=\Delta Y=\Delta R=R-r$),将这个量按幂函数曲线规律在圆弧(图 2 中半径 r)上各点重新分配补偿进去,圆弧将失真变形(图 2 中虚弧线),补偿量、及补偿规律不同,其形状也将不同。这样先通过不同程度的圆弧的预失真校正,再通过电机的电流—步距角之间的非线性变换后,直至输出需要的波形为止。为此,可以对补偿量 ΔR 在圆弧 r 上应用加权平均公式进行加权分配,加权补偿法的得名就来源于此。

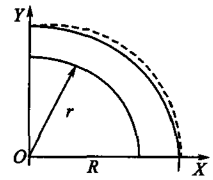

图 2　合成圆弧型细分电流函数及校正

3.2　加权平均与细分输出电流计算机实现的结合

由图 2,两相混合式步进电机细分驱动电源电流按半径 r 圆弧曲线插补输出,$r=m$(m 步细分),同时对应的幂函数曲线也 m 步细分,以 x 轴($x=m$)为例,由加权平均公式可得

$$\frac{\sum_{j=1}^{m}\Delta X\cdot W_{x_j}}{\sum_{j=1}^{m}W_{x_j}}=(\Delta X\cdot W_{x_1}+\Delta X\cdot W_{x_2}+\cdots+\Delta X\cdot W_{x_m})/\sum_{j=1}^{m}W_{x_j} \tag{6}$$

式(6)右端的分子表示每插补中断运行一步,X 坐标的累加器就累加一次 $\Delta X\cdot W_{x_j}$,(其中 W_{x_j} 代表每中断一次时,此处相应幂函数曲线的值,作为圆弧插补此步的权重;ΔX 要求小于细分步数 m,ΔX 与最大权值的乘积小于分母)。分母表示累加器容量,为常数,它是曲线上所有插补点的权的总和,这需要在开发时设定其计算方法。分子分母相除,表示当分子多次 $\Delta X\cdot W_{x_j}$ 累加后,将大于常数分母,累加器会溢出,同时补偿一步 X 坐标,继续累加,会继续溢出,每溢出一次,就补偿一步 X 坐标,当 r 插补完时,分子累加 m 次,则上式为

$$\frac{\Delta X\cdot(W_{x_1}+W_{x_2}+\cdots+W_{x_m})}{\sum_{j=1}^{m}W_{x_j}}=\Delta X$$

表示溢出 ΔX 次,也就是全部 ΔX 补偿完毕,X 坐标准确达到终点 $r+\Delta X=R$。这一技巧既简单又实用,是本文的核心。

X 轴编程要点(Y 轴同理)如图 3 所示。设总权重为 CR,累加器为 AR,补偿累加器 $dx=0$,初始化为 $BR=0-CR$,$AR=BR$。

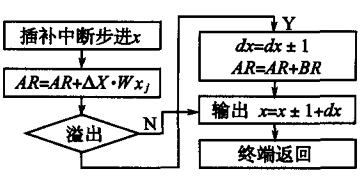

图 3　X 轴编程要点

3.3　权值的计算

根据实践经验选择幂函数作加权函数,为了

说明，设其方程为

$$w(t)=t^a \quad (7)$$

式中，幂 a 在开发系统时，作为参数供不同系统调节线型，将上式中的 t 等间距取 m 个离散点（m 为细分步数），求出相应的函数值作为各点的权值填表。

3.4 权值的修正

由于影响电流—步距角转换关系的因素很多，任意因素变化后，按上述权的取值实际上并不是最佳曲线，因此需要进行权值修正。因为电流起点及终点的坐标是精确的，而权值只是表示中间点补偿的相对分布规律，所以总是能找到一个修正值使其满足最佳曲线的规律。为此，取

$$k|W_{x_j}|\pm M \quad (8)$$

式中，k 为比例系数，M 为修正常数，供不同系统调节，以及递增、递减细分控制电流函数不对称的调节。可以分段取不同的修正参数 k 及 M。

4 仿真运行结果

本算法得到过实证，在 A2060-9212 型两相混合式步进电机的细分驱动电源开发实验中应用效果良好。图4给出了圆弧＋幂函数补偿的仿真图，圆弧半径为500，补偿量分别为50、100步，权值函数取：$w(t)=t^a$，（这里为了显示明显，a 取 0～4，读者需根据具体系统另取），内外两组曲线通过调整补偿量分开，每组内不同曲线通过调整式(7)中的 a，以及式(8)中的 k，M 来得到。以上充分说明圆弧曲线是可以通过简单的办法进行调整的，本算法可针对任何其他函数，都是可行的。

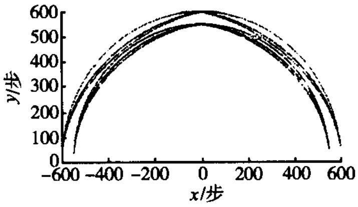

图4 任意可调圆弧

5 结束语

为充分发挥步进电机的固有特性，保证步进电机具有均匀稳定精确的步距角，必须选择好合适的细分电流控制曲线，并根据不同的系统进行不同的修正。本文首次提出了用圆弧插补产生二相混合式步进电机的细分电流控制曲线，创造性地用加权平均的方法，解决了正余弦合成的圆弧曲线任意可调这一难题，实现了不同步进电机的恒力矩均匀细分。在数控系统细分电源的开发中，有很强的实际应用价值。

参考文献

1 李恩林．插补原理．北京：机械工业出版社，1984

2 华蕊．步进电机细分驱动技术综述．佛山科学技术学院学报（自然科学版），1999，(3)：50～54

3 赵世强，齐才．步进电机恒频脉宽细分驱动电路．微电机，1994，27(1)：49～51

收稿日期：2005-03-04
修改稿日期：2005-06-20