



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200510040720.1

[45] 授权公告日 2007 年 7 月 11 日

[11] 授权公告号 CN 1326318C

[22] 申请日 2005.6.23

[21] 申请号 200510040720.1

[73] 专利权人 南京航空航天大学

地址 210016 江苏省南京市御道街 29 号

[72] 发明人 张乐 周波

[56] 参考文献

CN 1631772A 2004.9.22

US 6137655A 2000.10.24

US 6909257B2 2005.6.21

CN 1146098A 1997.3.26

CN 1274481A 2000.11.22

CN 1334642A 2002.2.6

CN 1286525A 2001.3.7

审查员 贾允

[74] 专利代理机构 南京众联专利代理有限公司

代理人 谢振龙

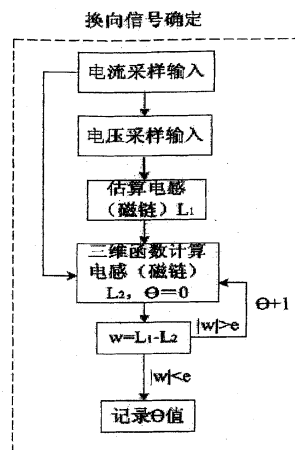
权利要求书 1 页 说明书 6 页 附图 7 页

[54] 发明名称

双凸极电机无位置传感器控制方法

[57] 摘要

一种双凸极电机无位置传感器控制方法，属特种电机数字控制方法。本方法是直接利用电机的电枢电流和电压信息间接地确定电机转子位置，实现电机无位置传感器的可靠运行。不需要人为地注入低幅高频的模拟测试信号，也不存在相位补偿及电流转速匹配问题，而是直接以电机运行时的电流电压信息，根据电机的三维电感曲线反演求出转子位置信息，利用数字信号处理器或单片机芯片实现间接位置检测，使双凸极电机系统更简单、体积更小、结构更坚固、运行更可靠、效率更高等优点。此方法对无位置传感器双凸极电机的应用有较大的实用价值。



1、一种双凸极电机无位置传感器控制方法，其特征在于，直接利用电机的电枢电流和电压信息间接确定电机转子位置，实现双凸极电机无位置传感器运行，具体方法包括：

- (1) 通过实测电机的电枢电流和电压，求得在不同电流下随电机转子位置变化的电感值；
- (2) 将同一电枢电流下电机转子位置角作为自变量，电感值作为因变量，通过 MATLAB 软件进行曲线拟合，绘制出同一电流下电感值随电机转子位置角度变化的曲线；
- (3) 利用 MATLAB 软件中 POLYFIT 函数实现电感曲线的多项式拟合，以得到电感值随电机转子位置角度变化的多项式函数表达式：

$$L_p(\theta) = a_0 * \theta^5 + a_1 * \theta^4 + a_2 * \theta^3 + a_3 * \theta^2 + a_4 * \theta + a_5;$$

- (4) 拟合出不同电枢电流下电感值随电机转子位置角度变化的曲线族；
- (5) 利用电感曲线最小值在不同电枢电流下几乎不变的特点，用电枢电流为 0 时的电感拟合多项式减去电感的最小值后乘以与电流有关的比值函数  $f(i)$ ，该比值函数  $f(i)$  是选择电流为 0 时的电感最大值减去电感最小值后的值作为基准，用除电流为 0 以外的其它电流情况下，电感曲线最大值减去最小值后的值与之比较，得到一系列的比值，该比值  $p_n$  的计算公式为  $p_n = (L_{n\max} - L_{\min}) / (L_{0\max} - L_{\min})$ ，这一系列比值拟合成一条曲线，由 MATLAB 软件中 POLYFIT 函数得到曲线表达式： $f(i_n) = -0.0035i_n + 1.0005$ ，再加上这个电感最小值，构造出电感值随电枢电流和电机转子位置角度变化的三维函数：

$$L_p(\theta, i) = (L_p(\theta) - L_{\min})f(i) + L_{\min}$$

- (6) 利用数字信号处理器 (DSP) 或单片机芯片将采样到的电流电压信息进行处理得到参考电感值的大小，再把所得参考电感值与第 5 条所述的三维函数值作比较，确定不同时刻的转子位置信息；
- (7) 根据双凸极电机的运行机理，不同的转子位置信息对应于不同的电感区间，在电感上升区间电枢绕组通入正电流，在电感下降区间电枢绕组通入负电流，实现双凸极电机的无位置传感器运行；

上述 4 个公式中标量名称： $\theta$  为转子位置角度； $a_0, \dots, a_5$  为拟合多项式的系数； $P_n$  为不同电枢电流下电感最大值减去电感最小值后的比值； $L_{n\max}$  为不同电枢电流下电感最大值； $L_{\min}$  为电感最小值； $L_{0\max}$  为电枢电流为 0 时电感的最大值， $n$  为自然数 1,2,3...； $i$  为电枢电流。

## 双凸极电机无位置传感器控制方法

### 技术领域

双凸极电机无位置传感器控制方法，属特种电机数字控制方法。

### 背景技术

对于双凸极电机驱动系统(DSM)而言,实时而准确的转子位置信息是其可靠运行的必要前提。目前双凸极电机系统中,一般采用轴位置传感器(见图1)或者其它类型的探测式位置检测器来获得位置信息(见图2),这不仅会增大体积,提高系统成本和复杂程度,更重要的是会降低DSM系统结构的坚固性,并且维修困难,影响整个系统的可靠运行,尤其限制了其在环境较恶劣场合的应用。因此如何让它去掉位置检测器,直接利用电机的电压和电流信息间接确定转子位置,从而使系统结构更加坚固,运行更加可靠、高效,成本更加低廉,无疑是一个很有潜力的研究方向。

迄今为止,国内外对这一领域的研究尚属起步阶段,研究对象多集中于电机结构相类似的开关磁阻电机无位置传感器。其研究的思路有两种:(1)脉冲注入定位法:利用空闲相,人为地注入低幅高频的模拟测试信号从而产生需要的电流等信息以得到位置信息。脉冲注入法的算法尽管相对比较简单,但基于高频脉冲的输入使其不免有着内在固有的速度限制,而且测试电流可能带来负转矩,其对整个系统出力和效率的影响也是很大的不足;(2)反电势法:通过检测端电压的过零点,得到电机的位置信号。但是这种方法需要辅助起动设施,需要进行相位补偿,还存在计数值转速电流限幅的匹配问题。因为这些缺点的存在,最后以上的方法都没有能够很好地实现。

如何实时精确获得转子位置角度信息一直是双凸极无位置传感器技术的难题。国内外尚没有有效的双凸极电机无位置传感器技术。

### 发明内容

本发明的目的是提供一种直接利用电机的电枢电流和电压信息间接地确定电机转子位置,实现电机无位置传感器(见图3),达到电机系统结构简单、运行可靠、体积小、坚固、效率高、成本低的新型双凸极电机无位置传感器的控制方法。

本发明的双凸极电机无位置传感器控制方法,直接利用电机的电枢电流和电压信息间接确定电机转子位置,实现双凸极电机无位置传感器的运行。具体方法包括:

1. 通过实测电机的电枢电流和电压,求得在不同电流下随电机转子位置变化的电感值;
2. 将同一电流下电机转子位置角作为自变量,电感值作为因变量,通过 MATLAB 软件进行曲线拟合,绘制出同一电流下电感值随电机转子位置角度变化的曲线;
3. 利用 MATLAB 软件中的 polyfit 函数实现电感曲线的多项式拟合,以得到电感值随电机转子位置角度变化的多项式函数表达式:

$$L_p(\theta) = a_0 * \theta^5 + a_1 * \theta^4 + a_2 * \theta^3 + a_3 * \theta^2 + a_4 * \theta + a_5 \quad ;$$

4. 拟合出不同电流下电感值随电机转子位置角度变化的曲线族；
5. 利用电感曲线最小值在不同电流下几乎不变的特点，用电流为 0 时的电感拟合多项式减去电感的最小值后乘以与电流有关的比值函数  $f(i)$ ，再加上这个电感最小值，构造电感值随电流和电机转子位置角度变化的三维函数：

$$L_p(\theta, i) = (a_0 * \theta^5 + a_1 * \theta^4 + a_2 * \theta^3 + a_3 * \theta^2 + a_4 * \theta + a_5 - L_{0min}) * f(i) + L_{0min} \quad ;$$

6. 利用数字信号处理器 (DSP) 或单片机芯片将采样到的电流电压信息进行处理得到参考电感值的大小，再把所得参考电感值与第 5 条所述的函数值作比较，确定不同时刻的转子位置信息；
7. 根据双凸极电机的运行机理，不同的电机转子位置信息对应于不同的电感区间，在电感上升区相绕组通入正电流，在电感下降区相绕组通入负电流，实现双凸极电机的无位置传感器的运行。

本发明的双凸极电机无位置传感器控制方法，不需要人为地注入低幅高频的模拟测试信号，也不存在相位补偿，以及电流转速匹配的问题，而是直接以电机运行时的电流电压信息为基础，根据电机的三维电感曲线反演求出位置信息，利用 DSP 或单片机芯片实现间接位置检测，可使双凸极电机系统更加简单体积小结构更坚固运行可靠效率高等优点，此方法对无位置传感器双凸极电机的应用有较大的实用价值。

## 附图说明

- 图 1 是采用轴位置传感器的双凸极电机截面图。
- 图 2 是采用轴位置传感器获得的三相位置信号示意图。
- 图 3 是本发明的无位置传感器双凸极电机的结构示意图。
- 图 4 是计算机采样电流电压示意图。图 4 中符号名称：  
U——电压， i——电流， T——周期， k——周期数
- 图 5 是电感曲线族（电流范围  $\pm 50A$ ）。
- 图 6 是多个电感周期下电感曲线族。
- 图 7 是近似电感曲线族。
- 图 8 是电感最大值比拟合曲线。
- 图 9 是相绕组自感的三维曲面图。
- 图 10 是电感曲面中取出的电感曲线的误差示意图。
- 图 11 是电流范围为  $\pm 200A$  时由构造的三维函数得到的电感曲面图。
- 图 12 是电机转子位置获取的计算机流程图。
- 图 13 是电励磁双凸极电机无位置传感器运行机理图。

## 具体实施方式

## 1 实际电感值估算

### 1.1 磁链估算

以一台 12/8 极电磁式双凸极电机为例，本专利技术首先利用电机运行时实测电压和电流来估算磁链值。

双凸极电机一相电压方程为

$$u = ir + \frac{d\psi}{dt} \quad (1)$$

由式 (1) 解出一相绕组磁链表达式

$$\psi = \int_0^t (u - ir) dt + \psi(0) \quad (2)$$

如果已知从时刻 0 到时刻 t 间每一时刻的电压和电流值 i 以及时刻 0 时的初始磁链  $\psi(0)$ ，就可以积分计算出绕组当前时刻的实际磁链。对 (2) 式进行离散得到

$$\begin{aligned} \psi_j &= \psi(0) + \sum_{k=0}^N [u(k) - i_j(k)r(k)] \cdot T \\ \Rightarrow \psi_j(N) &= \psi_j(N-1) + [u(N) - i_j(N)r(N)] \cdot T \end{aligned} \quad (3)$$

式中，T 为离散积分磁链的计算周期， $u(k)$ 、 $i(k)$ 、 $r(k)$  均为第 k 个离散周期内绕组的电压、电流和电阻值。由式 (3) 可知 1 个周期 T 中磁链的变化量  $\Delta\psi$  为

$$\Delta\psi = [u(N) - i(N)r(N)]T \quad (4)$$

对电流采用 PWM 控制，且 PWM 斩波周期采样周期和磁链估算的离散周期 T 相同且保持同步，因而电源电压和绕组电流在第 k 个周期内的离散值就是该采用周期内的采样值  $U_d(k)$ 、 $i(k)$ 。若当前斩波周期的占空比为  $\alpha$ ，则如图 4 所示在第 k 个周期 T 里绕组电流不变为  $i(k)$ ，绕组电压在开通时段  $\alpha T$  内为电压  $U_d(k)$ ，在零电压续流斩波时段  $(1-\alpha)T$  内绕组电压为零，假设绕组电阻为常数 r，且不随时间变化，则在第 k 个周期内的磁链增量为

$$\begin{aligned} \Delta\psi(k) &= [U_d(k) - i(k)r]\alpha(k)T + [0 - i(k)r][1 - \alpha(k)]T \\ &= [U_d(k)\alpha(k) - i(k)r]T \end{aligned} \quad (5)$$

令  $\Delta\psi_1(k) = U_d(k)\alpha(k)T$ ， $\Delta\psi_2(k) = i(k)rT$  得

$$\Delta\psi(k) = \Delta\psi_1(k) - \Delta\psi_2(k) \quad (6)$$

分别算出  $\Delta\psi_1(k)$  和  $\Delta\psi_2(k)$  两项，再代入式 (6) 得到第 k 个离散周期 T 内的磁链增量，最后得到  $t=kT$  时电机当前导通相的磁链估算值，如式 (7) 所示

$$\psi(k) = \psi(k-1) + \Delta\psi(k) \quad (7)$$

当到达最后一个采样周期 ( $k=N$ ), 可利用单片机或 DSP 记录下磁链随角度变化的离散数据值。不断提高测试电压, 得到不断提高的稳态测试电流, 进而可以得到磁链  $\psi$  随角度  $\theta$  和电流  $i$  变化而变化的离散数据值。

## 1.2 电感估算

由磁链—电感公式

$$\psi = Li \quad (8)$$

变形可得

$$L = \psi / i \quad (9)$$

因此, 在获得磁链的离散数据值之后, 由 (9) 可以得到电感随位置角度和电流变化的离散数据值表。

## 2 单条非线性电感曲线拟合的实现方法

由估算出的电感值数据表, 选择样条插值的方法对电感数据进行处理。先将同一电流下转子位置角作为自变量, 电感值作为应变量, 经过曲线拟合得到同一电流下电感值随转子位置角度变化的曲线。利用样条插值的方法得到不同电流值下电感值的拟合曲线族 (电流分别取 -50、-40、-30、-20、-10、0、10、20、30、40、50A), 见图 5 所示。最后在样条插值的基础上, 利用 MATLAB 软件的 polyfit 函数可以实现电感曲线的多项式拟合。选择 5 次拟合后的结果:

$$L_p(\theta) = a_0 * \theta^5 + a_1 * \theta^4 + a_2 * \theta^3 + a_3 * \theta^2 + a_4 * \theta + a_5 \quad (10)$$

其中,  $L_p(\theta)$  表示相绕组自感,  $\theta$  表示转子位置,  $a_0, \dots, a_5$  为拟合多项式的系数。(10) 式即为电感随转子位置角度变化的函数。

## 3 构造函数原理介绍

本专利在对电感拟合曲线进行研究的基础上, 利用电感曲线最小值几乎不变的特点, 把电流与位置角度以及电感的关系用数学的方法联系起来, 构造出电感随角度位置以及电流变化的高次函数。

由式 (10) 可以得到电感随角度变化的函数关系式, 同时得到电感曲线 (电流从 -50A 到 +50A), 从时间轴上选取多个电感值周期, 见图 6。这一系列的电感曲线可以近似抽象地看做是若干个等腰梯形连接而成的, 见图 7 (d)。选取图 7 (d) 曲线族中任意一条曲线 (如图 7 (a) 所示), 把它向下平移, 使曲线的最小值与 X 轴重合, 可以得到如图 7 (b) 所示的曲线。这条曲线的表达式乘以一系列的常数就可以得到形如图 7 (c) 所示的曲线族。图 7 (c) 再向上平移就可以得到形如图 7 (d) 的曲线族。

因此只要知道电感曲线族中任意一条曲线的函数表达式, 把它减去电感最小值, 再

乘以一系列系数，最后在加上电感最小值就可以近似得到形如图 6 的曲线族。并且由图 7 (c) 可以看出当电流均匀变化时，每条电感曲线之间近似存在一定的比值关系，且这个比值关系主要由电感的最大值决定。这就是利用图形特点构造三维函数的原理基础。

#### 4 电感最大值比曲线拟合

由于双凸极电机相绕组通入正电流和负电流对电感的影响不一样，一个起增磁作用，另一个起去磁作用，因此正负电流对于电感的影响应该分别考虑。本文选择电流为 0 时的电感最大值减去电感最小值后的值作为基准，用其它电流情况下电感曲线的最大值减去最小值后的值与之比较，得到一系列的比值  $p_n$ ，见式 (11)

$$p_n = (L_{n\max} - L_{\min}) / (L_{0\max} - L_{\min}) \quad (11)$$

其中， $p_n$  表示不同电流下电感最大值减去电感最小值后的比值， $L_{n\max}$  表示不同电流下电感的最大值， $L_{\min}$  表示电感最小值（电感最小值在不同电流下几乎不变）， $L_{0\max}$  表示电流为 0 时电感的最大值， $n=1,2,3,\dots$ 。这一系列比值可以拟合成一条曲线（见图 8），这条连续的曲线反应了不同电流下电感曲线之间近似的比值变化关系。由 MATLAB 的曲线拟合函数可以得到上图中曲线的表达式

$$f(i) = -0.0035i + 1.0005 \quad (12)$$

#### 5. 构造三维电感函数

用电流为 0 时的电感拟合多项式 (10) 减去电感的最小值后乘以式 (12)，再加上这个电流最小值，可以近似构造出的电感随电流和位置角度变化的连续函数：

$$L_p(\theta, i) = (a_0 * \theta^5 + a_1 * \theta^4 + a_2 * \theta^3 + a_3 * \theta^2 + a_4 * \theta + a_5 - L_{0\min}) * f(i) + L_{0\min} \quad (13)$$

其中， $L_{0\min}$  为电枢电流为 0 时的电感曲线最小值。由式 (13) 可以得到电感随电流和角度变化的三维曲面，如图 9 所示（电流范围 -50A ~ 50A）。

把估算电感值与构造的三维函数所得电感曲线进行比较，见图 10。平滑曲线表示的是由构造的函数所得的电感曲线族（电流范围  $\pm 50A$ ），“\*”表示的是估算电感值。由图 10 可以看出构造函数法所得电感值与实际估算电感值非常接近，曲线甚至几乎重合，误差与实际估算值相比很小，说明该模型有较高的精确性，能够较好地反映实际电感的变化。本专利技术方案中构造的三维函数在电感最大值与电感最小值附近的精度最高，并且结构简单（只包含加法和乘法运算），编程简单，因此非常合适用来确定转子位置角度，实现无位置检测。当电流范围再扩大，如扩大到  $\pm 200A$ ，构造函数得到的电感三维曲面图见图 11。

#### 6 转子位置角度估算

利用 DSP 或单片机将采样到的电流电压信息进行处理得到参考电感大小，再把所得参考电感值与之前构造的三维函数值作比较，当两者差的绝对值在一定的误差范围之内，记录下此时的转子位置位置  $\theta$ ，就可以确定不同时刻转子的位置角度。位置角度求

取的流程框图见图 12。其中  $\theta$  表示转子位置角度（本例子中  $\theta$  范围  $0 \sim 45^\circ$ ）， $L_1$  表示由实测电压和电流估算出的电感参考值， $L_2$  表示由三维函数计算的电感值， $W$  表示  $L_1$  与  $L_2$  之差， $\epsilon$  表示一无穷小量。

## 7 无位置传感器的实现

由双凸极电机运行机理，不同的转子位置  $\theta$  分别对应于电感曲线的上升区（图13中 I 区域）和下降区（图13中 III 区域），电机的运行需要在电感上升区相绕组通入正电流，在电感下降区相绕组通入负电流。本专利技术实现对位置信息的获取后，对软件记录下的  $\theta$  值进行分类，不同的  $\theta$  值分别对应于不同的电感上升区和电感下降区，如图13所示，在  $\theta_1 \sim \theta_2$  时绕组通入正电流  $i_a$ ，在  $\theta_3 \sim \theta_4$  时相绕组通入负电流  $-i_a$ （由于电感的阻碍作用，提前换向可以增加电流的出力，即可以在  $\theta_2 \sim \theta_4$  时相绕组通入负电流），从而实现双凸极电机无位置传感器运行。此无位置传感器方案不需要人为地注入低幅高频的模拟测试信号，而是直接以电机运行时的电流电压信息为基础，根据电机的三维电感曲线反演求出位置信息，利用 DSP 或单片机芯片可以实现间接位置检测。此方案对无位置传感器双凸极电机的应用具有较大的实用价值。



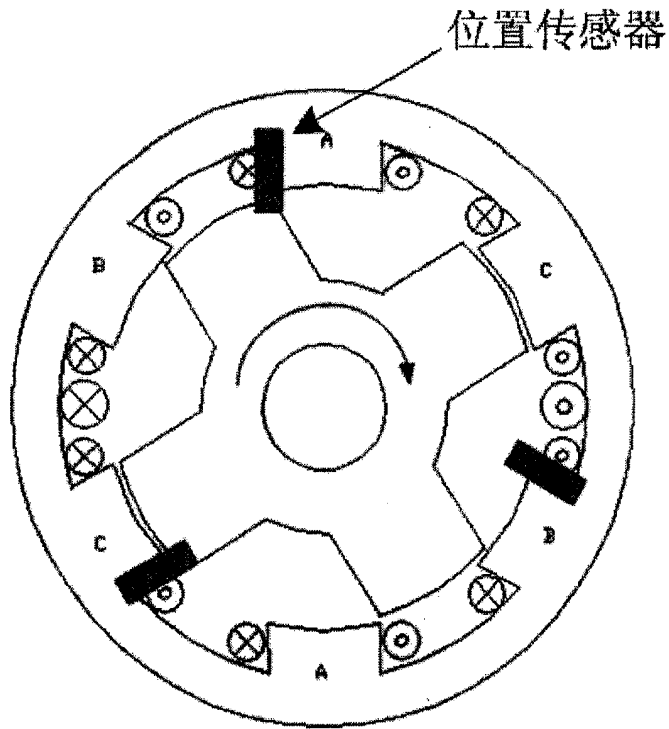


图 1

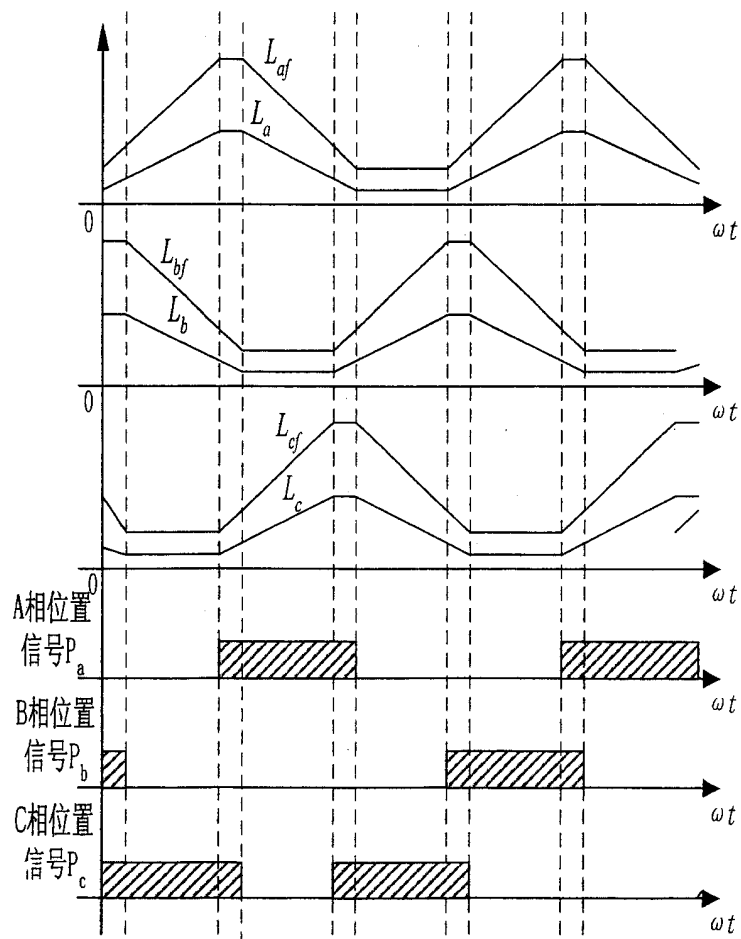


图 2

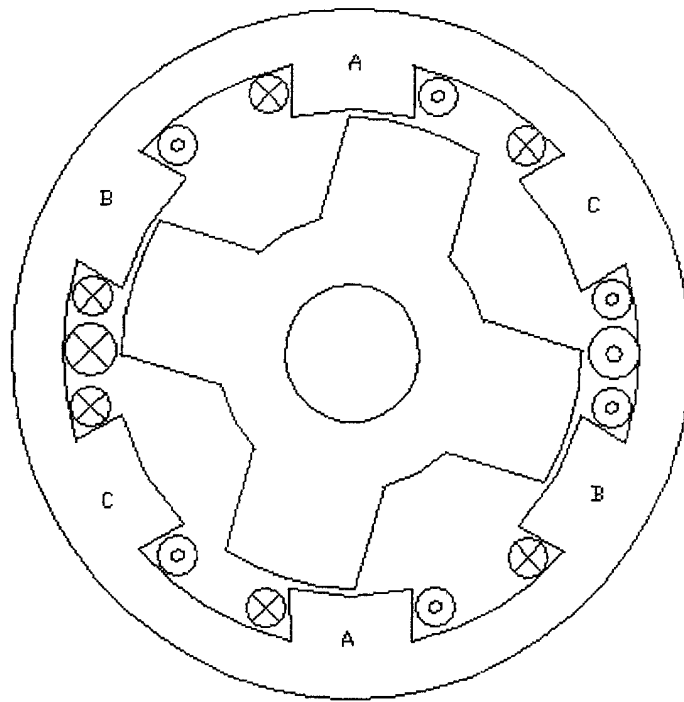


图 3

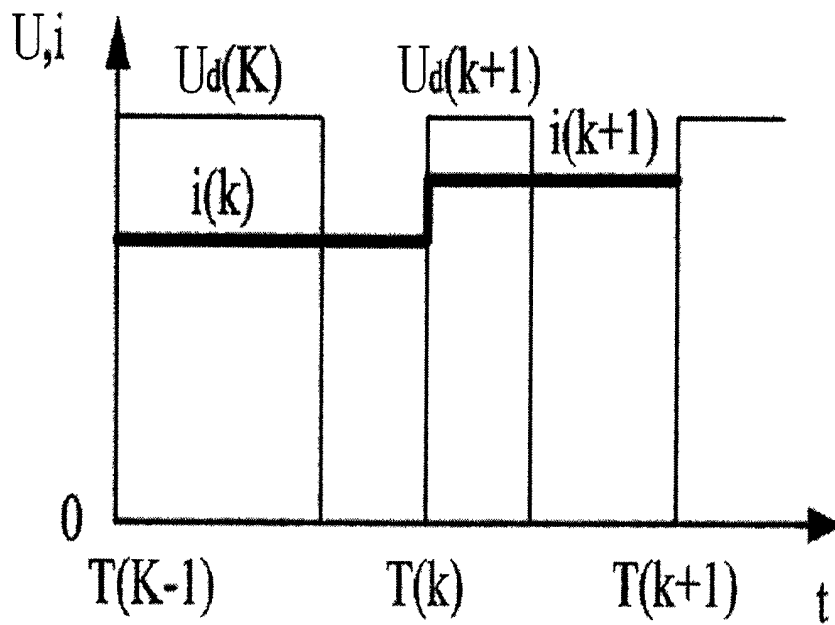


图 4

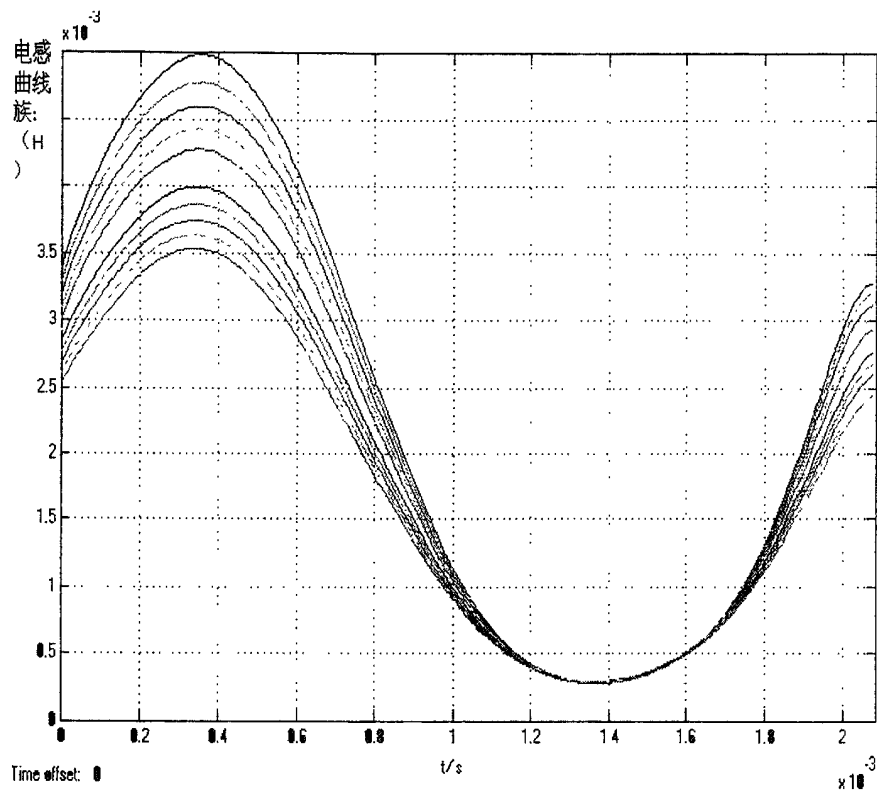


图 5

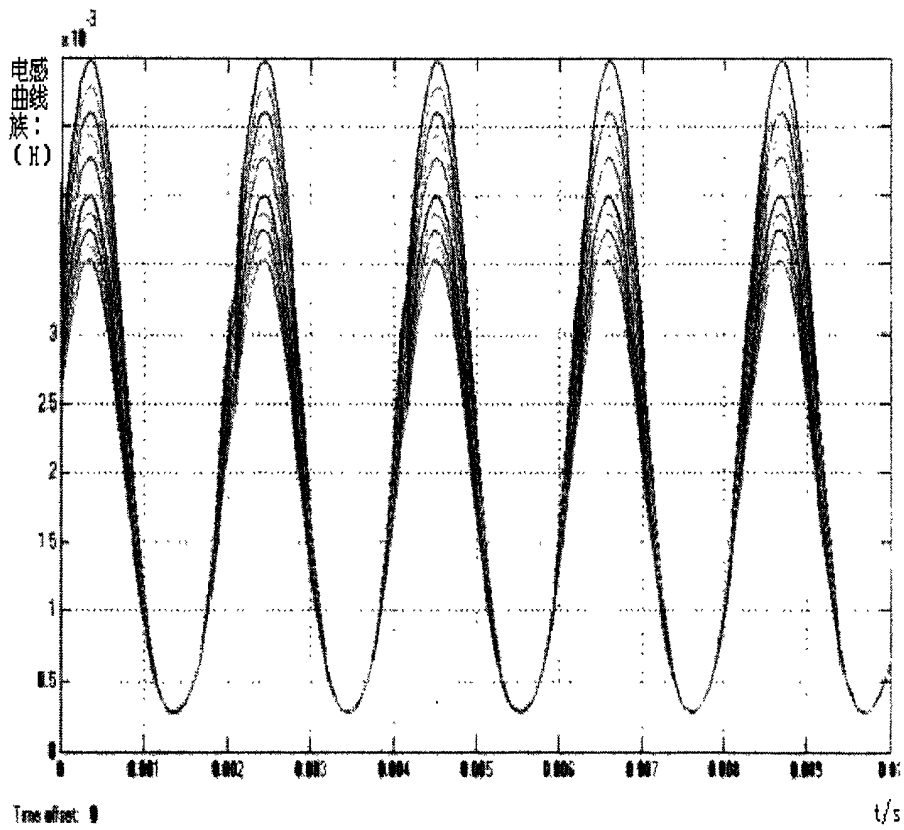
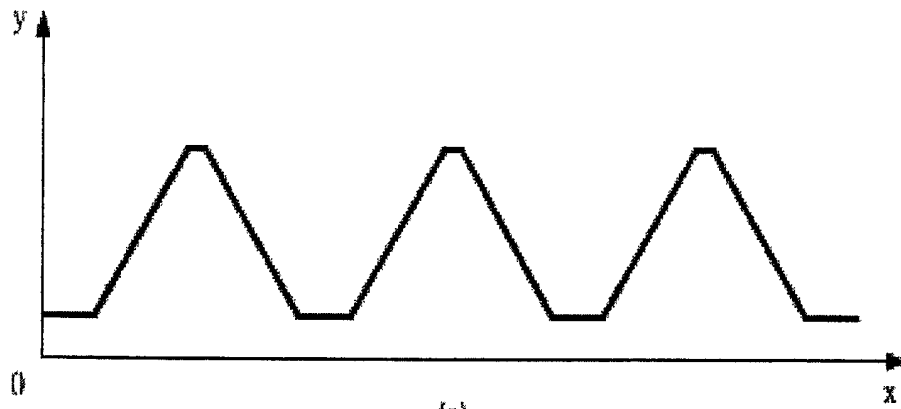
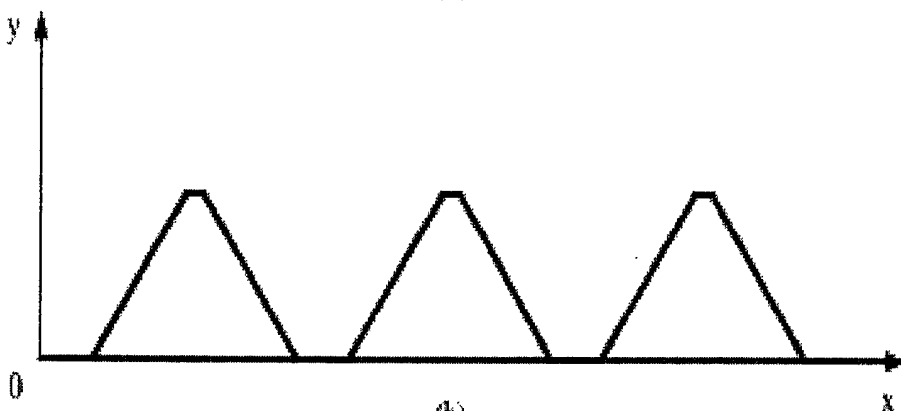


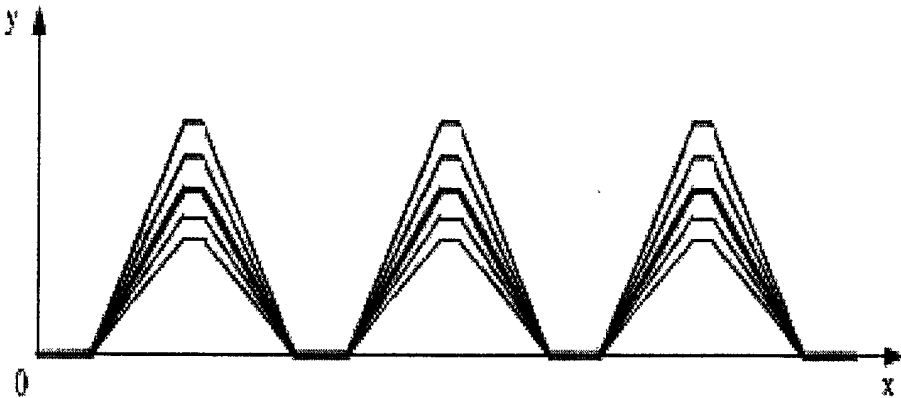
图 6



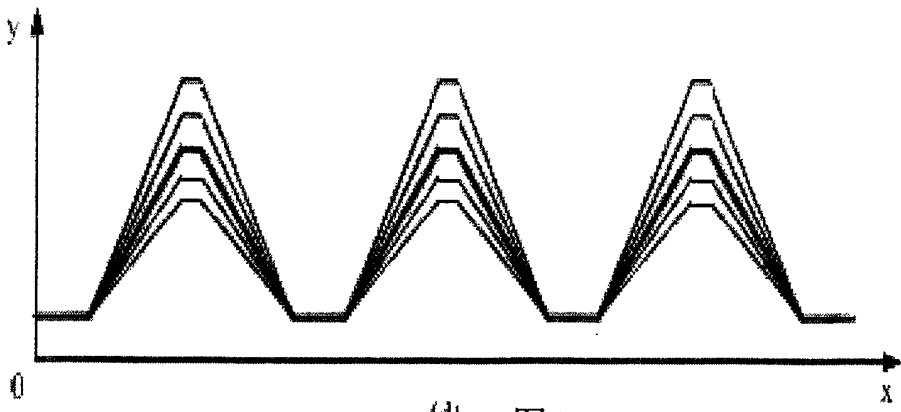
(a)



(b)



(c)



(d) 图 7

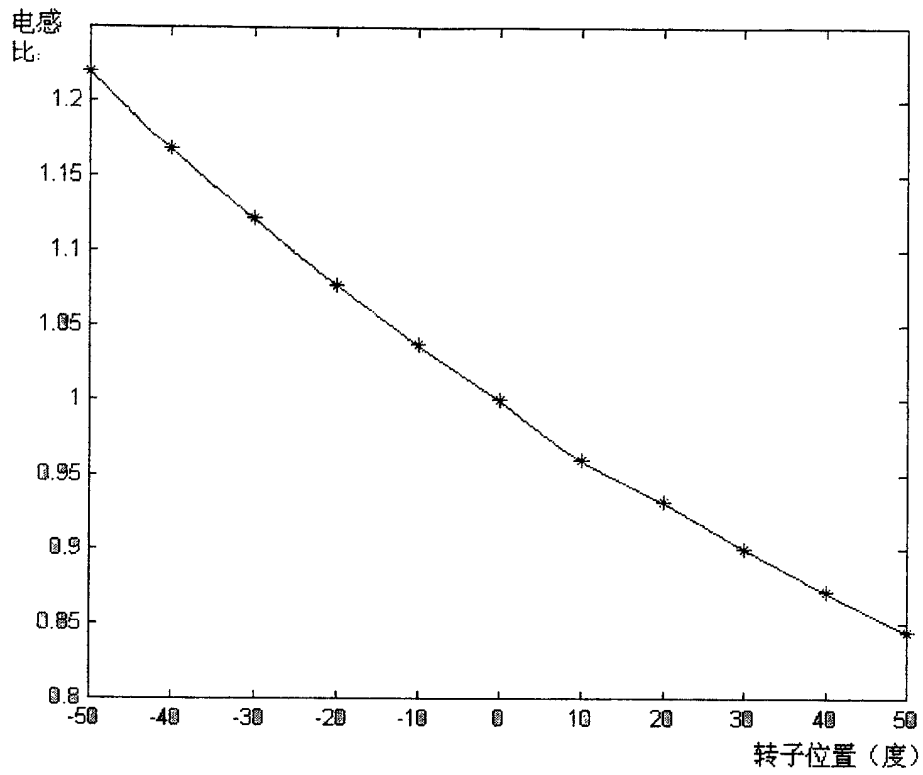


图 8

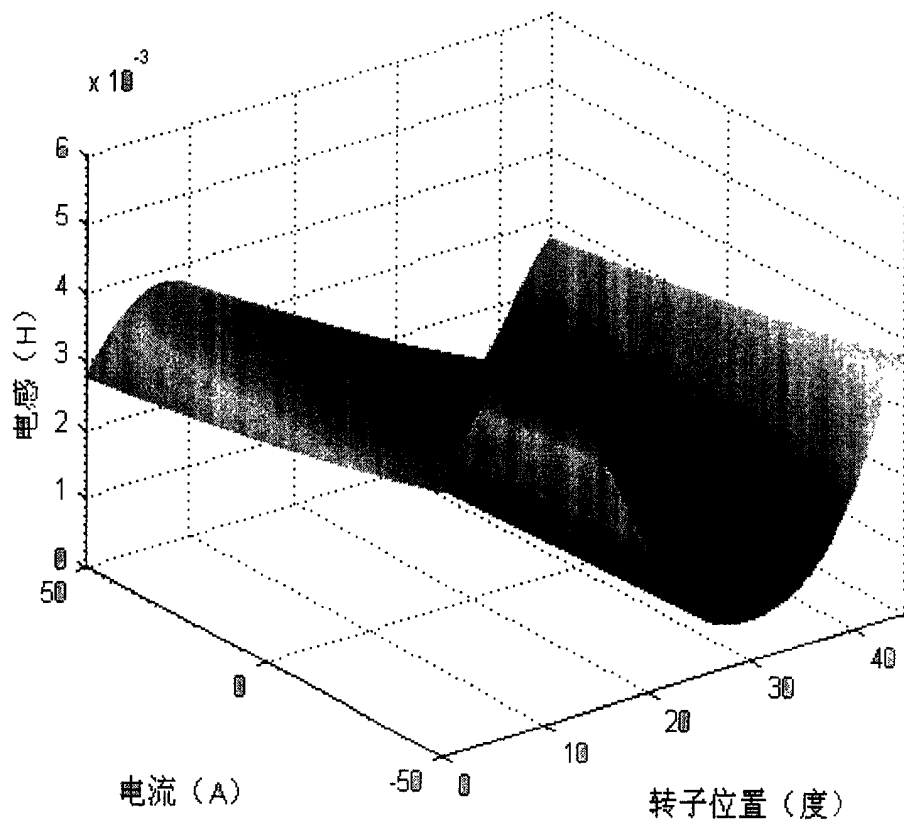


图 9

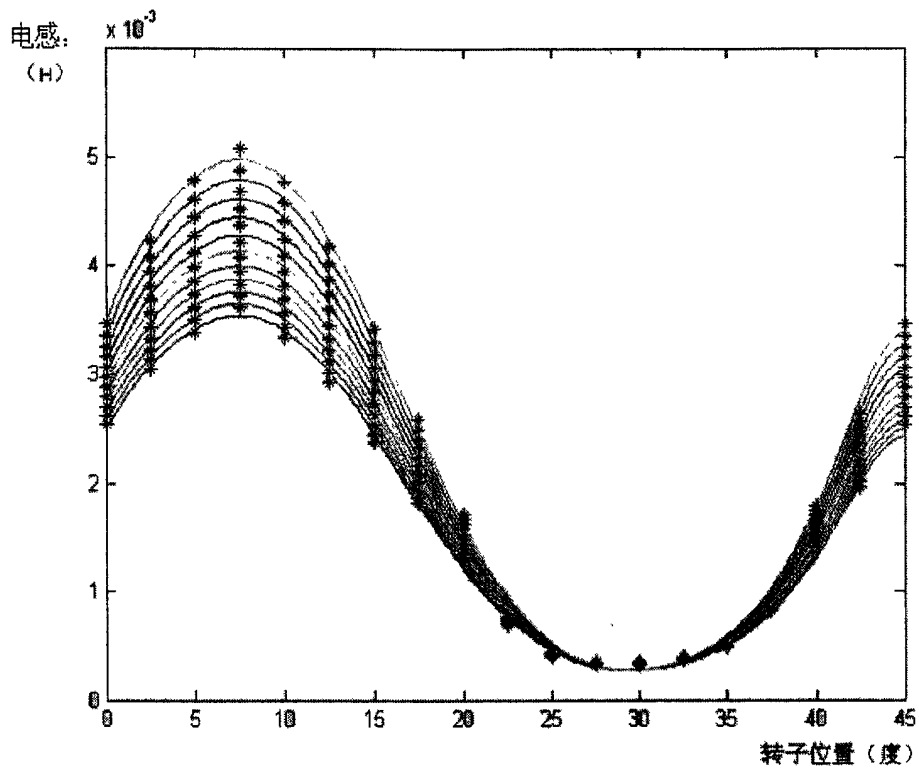


图 10

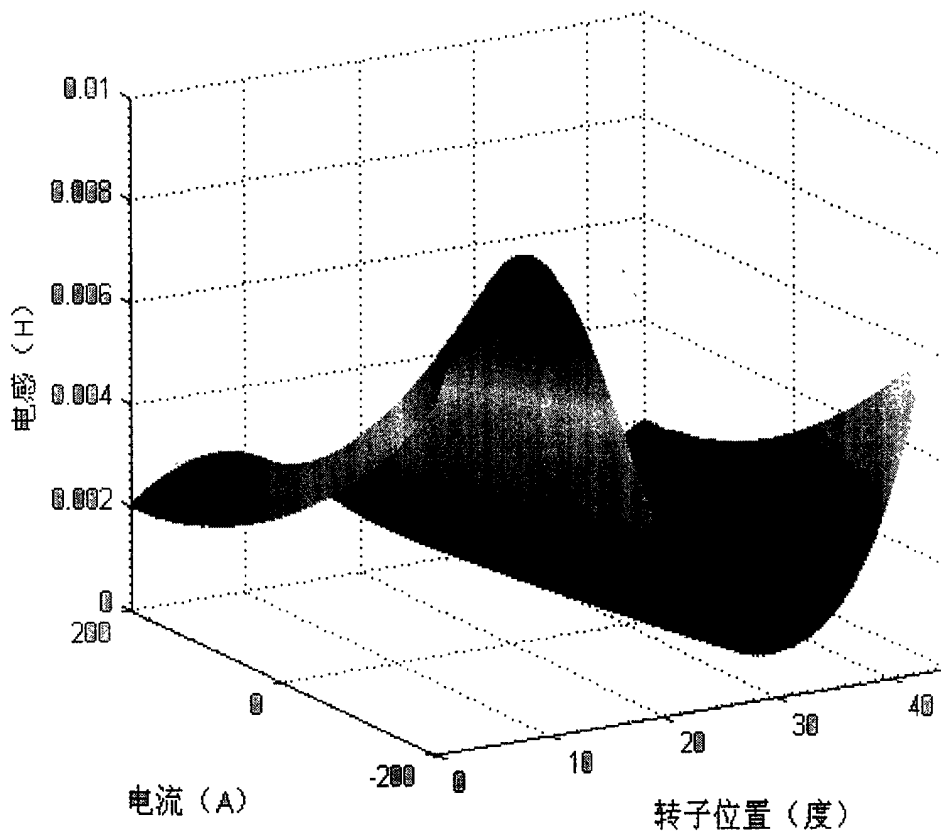


图 11

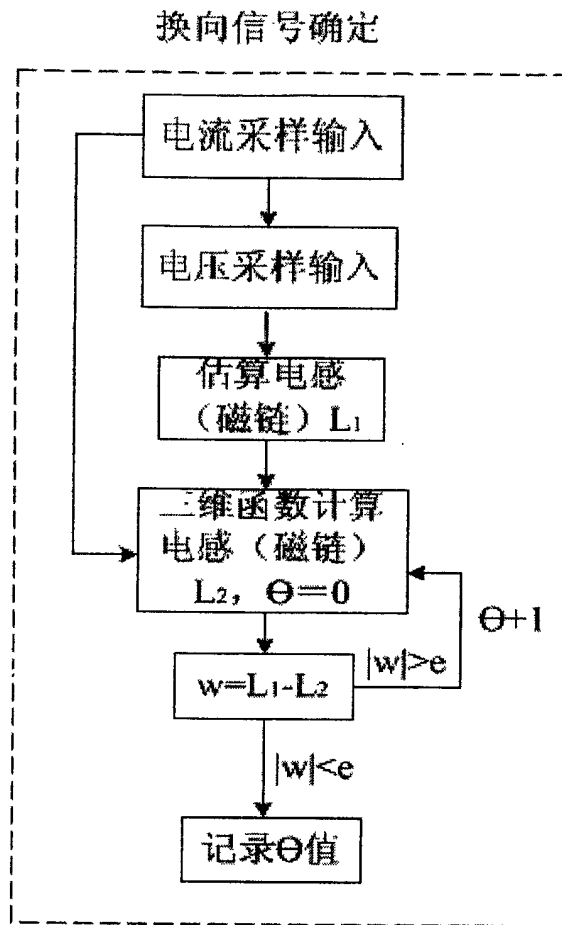


图 12

