

一种新型绝对式多磁极磁电编码器^{*}

陈文镭¹, 冯 同¹, 孙佳男¹, 孔得琳¹, 邱津集¹, 刘露迪¹, 王 磊²,
刘 威³, 李荣宁⁴, 郝双晖¹

- (1. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 哈尔滨理工大学 机械动力工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080;
3. 北方导航控制技术股份有限公司, 北京 100176;
4. 北京电子工程总体研究所, 北京 100176)

摘 要: 提出了一种绝对式多磁极磁电编码器的实现方案, 采用线性霍尔和开关霍尔组合使用的方式去测量 2 组极对数互质的多磁极永磁体之间的位置关系和绝对角度。结合现有的磁电编码器成果, 确定了磁电编码器的绝对角度计算方案。通过理论分析、作图分析以及理论推导结合的方式确定了永磁体磁极的数量关系、霍尔元件的布置方式以及具体的磁极识别过程。并利用 MATLAB 软件模拟磁电编码器的工作过程, 证明了绝对角度计算方案的可行性。

关键词: 磁电编码器; 磁极数量; 绝对角度; 磁极识别

中图分类号: TH 712 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)08-0104-07

doi: 10.12177/emca.2020.079

A Novel Absolute Multi-Pole Magneto-Electric Encoder^{*}

CHEN Wenlu¹, FENG Tong¹, SUN Jianan¹, KONG Delin¹, QIU Jinji¹, LIU Ludi¹,
WANG Lei², LIU Wei³, LI Rongning⁴, HAO Shuanghui¹

- (1. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. School of Mechanical and Power Engineering, Harbin University of Science and Technology,
Harbin 150080, China;
3. North Navigation and Control Technology Co., Ltd., Beijing 100176, China;
4. Beijing Institute of Electronic System Engineering, Beijing 100176, China)

Abstract: A scheme of absolute multi-pole magneto-electric encoder is proposed. The linear Hall and switch Hall sensors are used to measure the position relationship and absolute angle between the two groups of multi-pole permanent magnets with coprime number of pole-pairs. The absolute angle calculation scheme of the magneto-electric encoder is determined based on the existing achievements of the magneto-electric encoder. Then through the combination of theoretical analysis, drawing analysis and theoretical derivation, the number relationship of permanent magnet poles, the layout of Hall elements and the specific pole recognition process are determined. The MATLAB software is used to simulate the working process of the magneto-electric encoder, which proves the feasibility of the absolute angle calculation scheme.

Key words: magneto-electric encoder; number of poles; absolute angle; pole recognition

收稿日期: 2020-04-15; 收到修改稿日期: 2020-06-14

^{*} 基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFB1311100, 2017YFB1301005)

作者简介: 陈文镭(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为磁电编码器、电机控制。

郝双晖(1963—), 男, 博士, 教授, 研究方向为交流伺服系统、控制理论、信号处理、电机技术等。(通信作者)

0 引言

随着技术的进步和发展,人们对伺服控制技术提出了更高的要求^[1]。角位置传感器作为伺服控制系统的重要环节,对系统调节的准确性影响较大,其中多磁极式的磁电编码器凭借精度高、结构简单、耐高温、抗油污、抗冲击、体积小、成本低等优点,在伺服控制系统中的应用不断增加^[2]。对于多磁极式的磁电编码器而言,识别多磁极磁体的各个磁极是编码器实现绝对角度计算的一个重要环节^[3]。

目前,针对多磁极式的磁电编码器的磁极识别方式主要有组合式和游标卡尺式2种。组合式通过设置一个单磁极磁体和一组多磁极磁体,根据2组磁体的位置关系来进行识别^[4]。游标卡尺式通过设置2组磁极对数相差为1的多磁极磁体,应用游标卡尺的原理来实现磁极识别^[5-6]。其中,组合式在电机轴向尺寸较小,径向尺寸较大的情况下,单磁极磁体的磁场特性较差并且容易损坏。游标卡尺式需要在磁体安装的过程中提前调整好磁钢的位置,并且对磁体和霍尔传感器的精度要求较高。

本文在现有组合式多磁极磁电编码器信号发生原理的基础上,提出了一种基于互质磁极对数磁体的磁极识别方法。使得多磁极式编码器能够在电机轴向尺寸较小,径向尺寸较大的情况下实现绝对角度的测量,拓展了磁电编码器的应用范围。

1 磁电编码器的工作原理

本文所研究的磁电编码器的工作原理如图1所示。磁电编码器内包含2组磁极对数互质的多磁极磁体,2组磁体同轴心的安装在电机转轴上^[7]。2组磁体间采用适当的隔离手段进行隔离,防止产生磁场耦合。2组磁体周围的磁场在圆周方向上呈现为正弦分布。在2组磁体中将磁极对数多的磁体作为测量磁体,将磁极对数少的磁体作为参考磁体。并在测量磁体的周围根据 $90^\circ/p$ 的夹角布置线性霍尔(p 为测量磁极的极对数)。在测量磁体和参考磁体的周围按一定的规律设置开关霍尔。

在角度测量的过程中,2组多磁极磁体随着

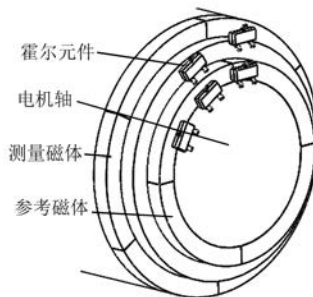


图1 编码器的工作原理图

转轴进行转动,开关霍尔元件和线性霍尔元件保持静止,用于接收磁极在旋转过程中产生的变化的磁场信号。其中,线性霍尔的感应信号通过文献[8]提出的反正切查表算法处理,可以对测量磁体的单个磁极周期的角度值进行测量计算。开关霍尔元件可以根据变化的磁场,产生与各磁极对相关的编码值,并以此对线性霍尔检测的信号所处的磁极对进行识别。在确定了单周期的角度值及该角度值所处的磁极周期后,编码器检测的绝对角度值通过式(1)可得:

$$\theta = (N - 1) \times 360^\circ / m + \theta_i / m \quad (1)$$

式中: θ 为输出的绝对角度值; N 为 θ_i 对应的磁极周期; m 为测量磁体的磁极对总数; θ_i 为线性霍尔测得的单周期角度值。

2 编码器的磁极周期识别

本文提出的编码器磁极对的识别方法,根据2组磁体之间的相对位置关系来实现。如果在测量磁体上的每一对磁极所在的角度范围内,参考磁体上均有特定的并且位置关系不重复的磁极部分与之对应,此时可以根据这一特征来对测量磁体上的磁极进行识别。

图2所示为当测量磁体的磁极对数为3,参考磁体的磁极对数为2时的情况,黑色部分代表N极,白色部分代表S极。测量磁体的各个对极均有与之对应的位置关系不重复的参考磁极部分,因此可以用于识别磁极的极对。

2.1 磁体磁极对数的关系

在编码器进行磁极识别之前,首先需要确定磁极对数的规律,即2组磁体的磁极对数满足何种条件时,能够使得测量磁体上的每一对磁极均有位置关系不同的参考磁极部分与之对应。

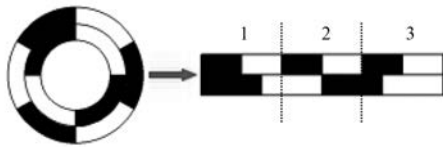


图2 3对极与2对极之间的位置关系

假设 m, n 为编码器的 2 个磁钢磁极对数, m 为测量磁体的磁极对数, n 为参考磁体的磁极对数, 故 $m > n$ 。 m, n 之间的最大公约数为 a , 则 m 与 n 之间有下列关系:

$$\frac{n}{m} = \frac{n_1 \times a}{m_1 \times a} = \frac{n_1}{m_1} \quad (2)$$

式中: m_1 为 m 与 a 之间的比值, m_1 为整数; n_1 为 n 与 a 之间的比值, n_1 为整数。

对于一组磁体而言, 其整周角度为 360° , 则参考磁极和测量磁极每一对极的角度为

$$\theta_m = \frac{360^\circ}{m} \quad (3)$$

$$\theta_n = \frac{360^\circ}{n} \quad (4)$$

式中: θ_m 为测量磁体一对磁极的角度; θ_n 为参考磁体一对磁极的角度。

由于 $m > n$, 则 $\theta_n > \theta_m$, 此时以测量磁体的一对磁极的 N 极远端为起始点 O , 逆时针方向为正, 则参考磁极上每一个 N 极远端均会与 O 点存在一个角度上的差值, 取这些差值中符号为正且数值最小的值, 并将其定义为测量磁极这一对极下的偏差。图 3 所示为测量磁体的磁极对数为 5, 参考磁极的磁极对数为 3 时出现的偏差情况。图 5 中, 序号 1、2、3、4、5 表示磁极对的编号, O_1, O_2, O_3, O_4, O_5 为测量磁极下磁极对 1、2、3、4、5 的 N 极远端点, $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4, \Delta_5$ 分别为测量磁极下磁极对 1、2、3、4、5 的偏差值。

任意指定测量磁极上的某一对极为第一对极, 后续的极对数编号按照顺时针或者逆时针排序, 则测量磁极上的第一对极的偏差 $\Delta_1 = \theta_x$ 。对测量磁极上的第 x 极而言, 偏差为

$$\Delta_x = \theta_x + (x-1) \cdot (\theta_n - \theta_m) - k\theta_n \quad (5)$$

式中: θ_x 为测量磁体与参考磁体的安装位置偏差; x 为偏差所属磁极对序号, $x \in (0, m]$ 且 x 为整数; $(x-1) \cdot (\theta_n - \theta_m)$ 为测量磁极的第 x 对极的 N 极远端点与参考磁极第 x 对极的 N 极远端点之间的角

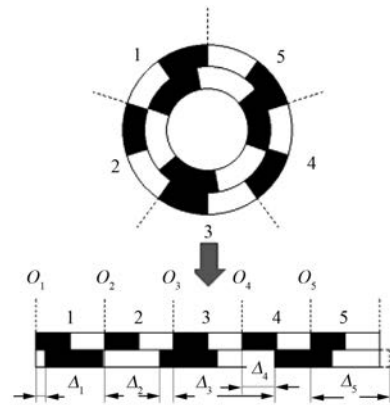


图3 5对极与3对极之间的位置偏差

度差(当 $x > n$ 时, 由于磁钢是圆周布置的, 可用参考磁极的第一对极来表示第 $n+1$ 对极, 以此类推)。

根据上文的定义可知, 这一角度差并不一定是偏差值 Δ_x , 此时, 若 $(x-1) \cdot (\theta_n - \theta_m)$ 减去一对参考磁极的角度值 θ_n , 即可得到测量磁极的第 x 对极的 N 极远端点与参考磁极第 $x-1$ 对极的 N 极远端点之间的角度差, 因此若减去 $k\theta_n$, 即可得到测量磁极的第 x 对极的 N 极远端点与参考磁极第 $x-k$ 对极的 N 极远端点之间的角度差。

因此, 在式(5)中引入了变量 k , k 为正整数且 $k \in [0, m-n-1]$ 。为了满足偏差值的定义, 变量 k 还需要满足:

$$0 < (x-1) \cdot (\theta_n - \theta_m) - k\theta_n < \theta_n \quad (6)$$

在式(6)这一条件的限定下, 即可得到测量磁极上第 x 对极的偏差值。根据式(6)可知, 变量 k 的取值范围为

$$(x-1) \left(1 - \frac{n}{m} \right) - 1 < k < (x-1) \left(1 - \frac{n}{m} \right) \quad (7)$$

如果测量磁体之间的位置特征存在重复, 则会出现测量磁极上的 2 个磁极对存在相同偏差值的情况, 即 $\exists$ 正整数 $x_i, x_j (x_i > x_j)$, 使式(8)成立:

$$\Delta_{x_i} = \Delta_{x_j} \quad (8)$$

(1) 若 $x = x_i$ 与 $x = x_j$ 时, $k = k_i$ 。则由式(5)可得:

$$\Delta_{x_i} - \Delta_{x_j} = (x_i - x_j) (\theta_n - \theta_m) > 0 \quad (9)$$

此时, 式(8)不成立。

(2) 若 $x = x_i$ 时, $k = k_i$; $x = x_j$ 时, $k = k_j$ 。若式(8)成立, 则推导式(5)可得:

$$x_i - x_j = \frac{(k_i - k_j)m}{m - n} \quad (10)$$

当 $a \neq 1$ 时, 如果存在 k_i, k_j 满足 $k_i - k_j = a_i(m_1 - n_1)$, 式(10)可以转化为

$$x_i - x_j = \frac{a_i}{a}m \quad (11)$$

由前文可知, a 为 m, n 之间的最大公约数, 则 m 与 a 之间的比值必为整数, 根据变量 k 的取值条件可知, 变量 a_i 满足 $0 < a_i < a$ 。如果 a_i 为正整数, 那么 x_i 与 x_j 之间存在正整数的差值, 即存在 x_i 与 x_j 使式(8)成立。

当 $a = 1$ 时, 仅当 $k_i - k_j = m - n$ 时, 等式成立, 此时 $k_i \notin [0, m - n - 1]$, 即变量 k 的取值已经超出了定义的范围, 在这种情况下, 式(10)在各变量取值范围内不成立的。因此, 式(8)不成立。

综上所述, 只有在测量磁体和参考磁体的磁极对数 m, n 的最大公约数为 1, 即互质的情况下, 才能使得测量磁体的每一对极均有与之对应的不重复的参考磁极部分。

2.2 位置特征的量化方法

确定了 2 组磁体的磁极对数关系之后, 需要对每一对测量磁体上与之对应的参考磁体部分进行识别与量化, 然后根据量化的结果来对测量磁体上磁极对进行识别。本文采用单极性开关霍尔来对磁极位置进行量化。

分布在磁体周围的单极性开关霍尔在工作过程中有如下工作特性^[9-10]:

(1) 当开关霍尔处于 N 极磁场时输出高电平 1, 当开关霍尔处于 S 极磁场时输出低电平 0。

(2) 当多个开关霍尔分布在一对磁极周围时, 由于安装位置的不同, 各个开关霍尔的输出信号会产生相位差, 且相位差的大小与开关霍尔之间的位置角相关。

如果将这些开关霍尔的信号进行组合, 则可形成一系列的二进制编码(简称编码), 不同的编码对应不同的角度区域。此时, 相当于将一对磁极分成了多个能用编码表示的小磁极。由图 4 可以看出, 在一个单对极的磁体周围, 按 90° 的间隔布置了 2 个开关霍尔, 单对极磁体按图中所示的方向旋转时, 可以得到编码值和对应的角度区间, 如表 1 所示。

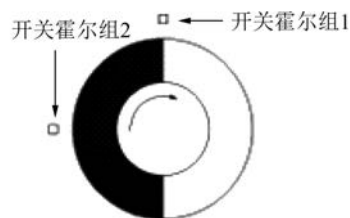


图 4 开关霍尔布置在单对极周围

表 1 单对极角度与编码对应关系

角度区间/ $^\circ$	编码值
0~90	11
90~180	10
180~270	00
270~360	01

但同时, 对多磁极的磁体而言, 无论一组磁体周围的开关霍尔如何布置, 只能对这组磁体中每对磁极进行细分, 不能实现磁极的识别。即相当于把磁体的每一对极划分成了若干个小磁极, 并且每个磁极内的划分情况相同。

考虑到测量磁体的每一对极均有不同的参考磁体的部分磁极与之对应, 可以将 2 组磁体的二进制编码组合的方式来对磁极进行识别, 将测量磁极上小磁极的编码作为主编码, 将该小磁极对应角度下的参考磁极上的编码作为参考编码。当小磁极的区间划分的足够小时, 将 2 种编码组合, 测量磁体上的各个小磁极均会有其独特的编码, 根据这些编码可以识别各个磁极。

此时相当于在编码与磁极周期之间建立了如下映射关系:

$$N = f(R) \quad (12)$$

式中: N 为磁极周期; R 为编码值。

2.3 开关霍尔的布置方式

为了使测量磁体上的编码值不出现重复, 可以按如下方法布置开关霍尔:

(1) 在磁极对数为 m 的测量磁体的一个磁极角度内, 等分的布置 n 个开关霍尔;

(2) 在磁极对数为 n 的参考磁体的一个磁极角度周围, 等分的布置 m 个开关霍尔;

(3) 2 组开关霍尔的第一个霍尔位置相同, 并且后续的霍尔布置的方向相同。

按上述方法布置开关霍尔后, 测量磁体上的

每个磁极被等分成了 n 个小磁极。参考磁体上的每个磁极被等分成了 m 个小磁极。则测量磁体上的每个小磁极的角度 θ_{mn} 与参考磁体上每个小磁极的角度 θ_m 的关系为

$$\theta_{mn} = \theta_m = \frac{360^\circ}{2mn} \quad (13)$$

因此,划分后测量磁体和参考磁体上的小磁极角度相同。图 5、图 6 所示为磁钢极对数为 3 和 2 时的霍尔布置与磁极划分情况。

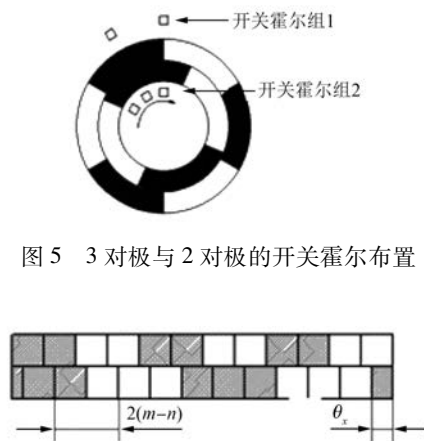


图 5 3 对极与 2 对极的开关霍尔布置

图 6 小磁极划分情况

根据第 2.2 节中的分析可知,图 5 中,测量磁极的每一对极被划分为了 4 个等分的小磁极,在同一对极内,这些小磁极的编码均不相同,但在 2 个磁极对之间,小磁极的编码和顺序是相同的。同样的,参考磁极上的每一对极被等分成了 6 个小磁极。

如果测量磁体上的小磁极出现重复的编码,则主编码相同的小磁极对应了参考编码相同的小磁极。

根据式(3)、式(4)、式(13)可知:

$$\theta_n - \theta_m = 2(m-n)\theta_{mn} \quad (14)$$

根据式(14)可知,参考磁极每一对极比测量磁极的每一对极多出了 $2(m-n)$ 个小磁极的角度。因此,2 对相邻的测量磁极之间,具有相同主编码的小磁极所对应的参考磁极上的小磁极之间间隔了 $2(m-n)$ 个小磁极的角度。图 6 中,参考磁极上的小磁极间隔了 2 个小磁极的角度。

根据归纳推理易知,第 i 对磁极和第 j 对磁极之间主编码相同的小磁极对应的参考磁极会间隔 $2(m-n)(j-i)$ 个小磁极的角度($i < j$)。

此时,如果出现了重复的编码,那么只可能由图 7 中的 3 种情况造成。图 7 中带有剖面线的小磁极代表测量磁极上 i 对磁极和第 j 对磁极某个主编码相同的小磁极。带有相同数字的小磁极表示参考磁极上参考编码相同的小磁极。

图 7(a)表示测量磁极的 2 个小磁极对应了完全相同的 2 个参考磁极的小磁极。图 7(b)和图 7(c)表示测量磁极的 2 个小磁极对应了部分相同的 2 个参考磁极的小磁极。

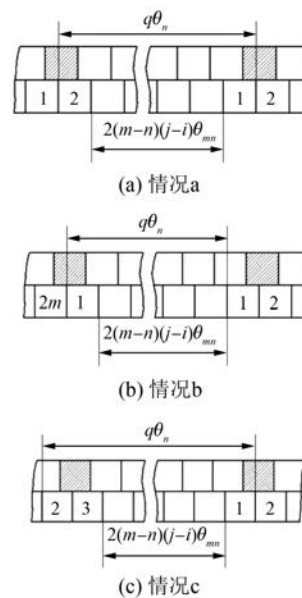


图 7 重复编码的 3 种情况

根据图 7 可得,下列条件成立时,会出现重复的编码: $\exists$ 正整数 $q \in (0, n]$, 使式(15)、式(16)中任意一个成立:

$$2(j-i)n\theta_{mn} = 2qm\theta_{mn} \quad (15)$$

$$2(j-i)(m-n)\theta_{mn} = (2qm - 2 \pm 1)\theta_{mn} \quad (16)$$

由式(15)可得:

$$2(j-i) = \frac{2qm}{n} \quad (17)$$

由于 m, n 互质,当 $q \in (0, n]$ 时,等式左侧为整数,右侧为非整数,因此等式不成立。

对于式(16),等式左侧 θ_m 的系数为偶数,等式右侧 θ_m 的系数为奇数,因此等式不成立。

综上所述,按本节中的方法进行开关霍尔的布置,能防止重复编码的出现。

当开关霍尔如图 6 布置,磁体间安装位置如

图 5 时,可得磁极与编码对应关系如下表 2 所示。

表 2 磁极周期与编码对应关系		
$N=1$	$N=2$	$N=3$
11111	11001	11100
11110	11011	11000
10110	10011	10000
10100	10111	10001
00100	00111	00001
00000	00110	00011
01000	01110	01011
01001	01100	01111

3 编码器的仿真验证

利用 MATLAB 对提出的编码器磁极识别方法进行仿真验证。仿真模型如图 8 所示。外环测量磁极为 3 对极,内环参考磁极为 2 对极, $\theta_x = 45^\circ$,开关霍尔 H1、H2、H3、H4、H5 和线性霍尔 HA1、HA2 的布置方式如图 9 所示。磁体的旋转方向为顺时针。根据上文的推论可以得到磁极周期与编码的对应关系如表 3 所示。

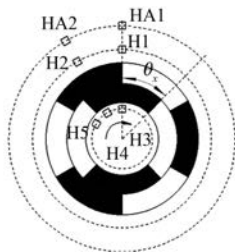


图 8 仿真模型

表 3 仿真试验磁极周期与编码对应关系		
$N=1$	$N=2$	$N=3$
11110	11011	11000
11100	11111	11001
10100	10111	10001
10100	10110	10011
00000	00110	00011
00001	00100	00111
01001	01100	01111
01011	01000	01110

永磁体旋转一周,当用一定的采样频率对磁场信号进行采样,随后根据文献[8]的方法进行

单周期角度解算,可得单周期角度值如图 9 所示。

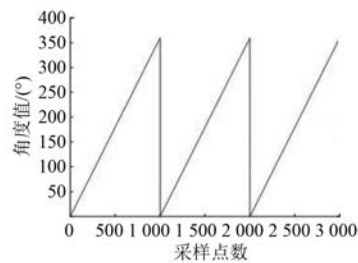


图 9 单周期角度值

同样,各个开关霍尔元件输出的电平信号如图 10 所示。

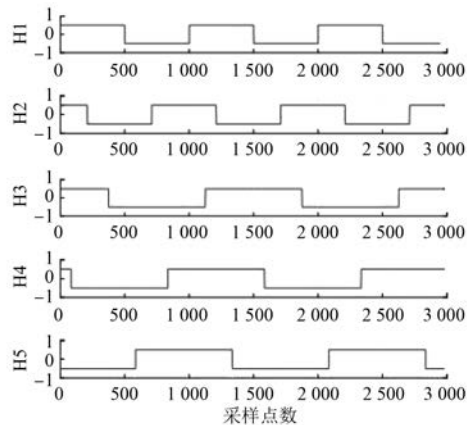


图 10 理想状态下的开关霍尔输出

根据图 10 的结果,查找表 3 中磁极与编码的对应关系,随后根据式(1)计算编码器的绝对输出角度,如图 11 所示。

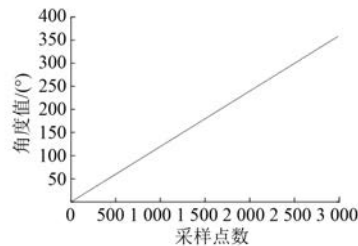


图 11 理想状态下的绝对角度

通过上述仿真可以发现,用所提磁极周期识别的方案,可以实现磁极周期的识别,并且可以通过识别的结果将单周期角度转化为绝对角度。

4 结 语

本文提出了一种新型绝对式多对极磁电编码

器的方案。首先通过对编码器磁体极对数的研究,确定了编码器中的2组磁体极对数需要满足互质的条件。随后对磁钢的位置特征量化表示方法进行了研究,提出了用2组开关霍尔量化位置特征的方法,并提出了一种可行的开关霍尔布置方案。通过MATLAB对编码器实际工作的情况进行了仿真,分析了编码器绝对角度的计算情况。最终仿真的结果与理论分析一致,证明了所提编码器方案的可行性。

【参考文献】

- [1] TAN K K, ZHOU H X, LEE T H. New interpolation method for quadrature encoder signals [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2002, 51(5): 1073.
- [2] 王磊,任齐民,韩继超,等. 基于基因突变体筛选思想的角度细分方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(11): 103.
- [3] 吴小锋. 基于磁编码器的离轴式绝对角度测量方法[J]. 中国仪器仪表, 2016(11): 23.
- [4] 郝双晖,刘勇,郝明晖. 绝对式多极磁电轴角编码器的设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(4): 863.
- [5] 邹添,倪风雷,李斐然,等. 一种新型大中心孔绝对式磁编码器[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(7): 1532.
- [6] FREITAS P P, COSTA J L, ALMEIDA N, et al. Giant magneto resistive sensors for rotational speed control [J]. Journal of Applied Physics, 1999, 85(8): 5459.
- [7] TREGLAZOV I, LEONOVA L, DOBROVOLSKY Y, et al. Electrocatalytic effects in gas sensors based on low-temperature superprotonics [J]. Sensor and Actuators B: Chemical, 2005, 106(1): 164.
- [8] 郝双晖,刘勇,刘杰,等. 基于查表原理的单对磁极编码器研制[J]. 中国电机工程学报, 2006, 36(19): 165.
- [9] 潘滕志伟. 浅谈霍尔效应及其应用[J]. 企业科技与发展, 2019(3): 177.
- [10] 黄立立,徐奇伟,李蓬威,等. 基于最小二乘法的BLDCM霍尔安装偏差补偿方法[J]. 微特电机, 2019, 47(8): 41.

(上接第92页)

- [5] 余德蓉. 后倾式风扇设计初探[J]. 东方电机, 1995(3): 1.
- [6] 李贤明,刘文超,张永义,等. 高速大功率电机高效率低噪声离心风扇的研究与设计[J]. 大电机技术, 2005(4): 35.
- [7] 李光宇,袁立强,赵争鸣,等. 基于计算流体动力学的高效交流电机风扇优化[J]. 电工电能新技术, 2014, 33(11): 24.
- [8] 冯成戈,关丽喆,刘春亭,等. 离心风机叶轮锥形前盘与弧形前盘流场分析[J]. 通用机械, 2019(9): 63.
- [9] 黄国治,傅丰礼. 中小旋转电机设计手册[M]. 北京:中国电力出版社, 2007.
- [10] 陈世坤. 电机设计[M]. 2版. 北京:机械工业出版社, 2000.
- [11] 张克危. 液体机械原理[M]. 北京:机械工业出版社, 2000.

(上接第103页)

- [11] 侯康鹏,赵富强. 交流牵引电机制造过程中的线圈尺寸调整方法[J]. 内燃机车, 2011(5): 11.
- [12] 解汝滨. 交流牵引电机制造过程中线圈尺寸的调整方法[J]. 科技创新与应用, 2013(28): 108.
- [13] 陆超,龙艳红,陈玮. 数控包带机在双馈风力发电机绝缘包扎中的应用[J]. 电机技术, 2018(1): 50.
- [14] 袁双玲. 翻槽对成型线圈绝缘的影响[J]. 电机技术, 2017(2): 60.
- [15] 袁春龙. 成型绕组无损嵌线工艺在大型永磁直驱风力发电机中的应用[J]. 电机与控制应用, 2011, 38(11): 54.
- [16] 郭凤秋,潘耀香. 发电机定子嵌线新工艺在引子渡水电站的应用[J]. 贵州水力发电, 2003, 17(5): 64.
- [17] 凌翠萍,韦在凤. 定子线圈制作中的绝缘损伤问题解决[J]. 电机与控制应用, 2014, 41(5): 65.
- [18] 湘潭电机厂. 交流电机设计手册[M]. 长沙:湖南人民出版社, 1978: 120-122.
- [19] 陈洪武,陈红生,张亦黄,等. 海洋大气中的风力发电机绝缘系统耐候性试验研究[J]. 绝缘材料, 2012, 45(2): 23.
- [20] 薛长志,陈红生,杨杰,等. TJ13-3 聚酯亚胺无溶剂浸渍漆在风力发电机上的应用[J]. 绝缘材料, 2010, 43(1): 34.