



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103222166 B

(45) 授权公告日 2016.01.20

(21) 申请号 201180053003.6

(22) 申请日 2011.03.09

(85) PCT国际申请进入国家阶段日
2013.05.08

(86) PCT国际申请的申请数据
PCT/CN2011/071620 2011.03.09

(87) PCT国际申请的公布数据
W02012/119307 ZH 2012.09.13

(73) 专利权人 浙江博望科技发展有限公司
地址 310006 浙江省杭州市环城西路8号4楼

(72) 发明人 杜坤梅 曹立明

(74) 专利代理机构 深圳市瑞方达知识产权事务所(普通合伙) 44314
代理人 张约宗 张秋红

(51) Int. Cl.
H02K 29/06(2006.01)
H02K 1/27(2006.01)
H02K 1/16(2006.01)

(56) 对比文件
JP 特开平 11-234990 A, 1999.08.27, 全文.

CN 2389440 Y, 2000.07.26, 全文.

US 2002/0175587 A1, 2002.11.28, 全文.

CN 2726200 Y, 2005.09.14, 全文.

CN 201975969 U, 2011.09.14, 权利要求1-9.

CN 101371425 A, 2009.02.18, 全文.

Jerome Cros. et al.. Synthesis of High Performance PM Motors with Concentrated Windings. 《IEEE Transactions on energy conversion》. 2002, 248-253.

徐飞鹏等. 不规则齿永磁同步电动机改型设计. 《微电机》. 2009, 第42卷(第4期), 14-16.

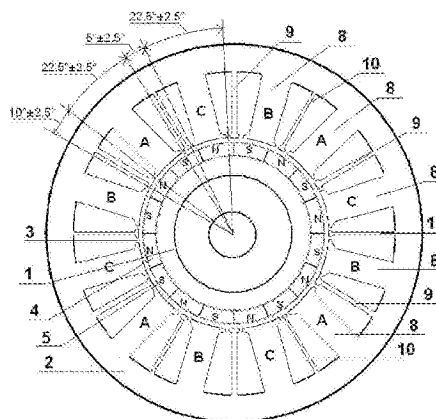
审查员 田晓云

权利要求书2页 说明书5页 附图3页

(54) 发明名称
一种三相永磁伺服电动机

(57) 摘要

一种三相永磁伺服电动机,其转子(1)磁极数2P为16,定子(2)齿数Z为24,该齿包括十二个大齿(8)、六个小齿(9)和六个微齿(10),十二个集中绕组分别装在十二个大齿上,绕组按照以下顺序循环排布:小齿—装绕组的大齿—微齿—装绕组的大齿。每个大齿、小齿和微齿的机械角度分别是 $22.5^\circ \pm 2.5^\circ$ 、 $10^\circ \pm 2.5^\circ$ 、 $5^\circ \pm 2.5^\circ$ 。该电动机可减少齿槽矩。



1. 一种三相永磁伺服电动机,所述电动机的转子铁芯(1)上装有多对永磁体(4),定子(2)的齿槽中装有三相绕组,其特征在于,所述转子铁芯上的磁极数 $2P = 16$,转子铁芯上的永磁体的极距 $\pi D/8$ 的物理尺寸是 $50 \sim 200\text{mm}$,其中 D 是转子外径;所述定子铁芯的槽数 $Z = 24$,相应应有二十四个齿,所述槽的槽口(3)宽度为 $0.1 \sim 3.0\text{mm}$;所述二十四个齿中包括十二个大齿(8)、六个小齿(9)、以及的六个更小的微齿(10);所述三相绕组为十二个集中绕组,分别装于所述十二个大齿上,所述绕组和齿的排列次序:小齿→装A相绕组的大齿→微齿→装C相绕组的大齿→小齿→装B相绕组的大齿→微齿→装A相绕组的大齿→小齿→装C相绕组的大齿→微齿→装B相绕组的大齿→小齿→装A相绕组的大齿→微齿→装C相绕组的大齿→小齿→装B相绕组的大齿→微齿→装A相绕组的大齿→小齿→装C相绕组的大齿→微齿→装B相绕组的大齿;所述定子铁芯上的每个大齿占圆周 $22.5^\circ \pm 2.5^\circ$ 机械角度,即 $180^\circ \pm 20^\circ$ 电角度;每个小齿占圆周 $10^\circ \pm 2.5^\circ$ 机械角度,即 $80^\circ \pm 20^\circ$ 电角度;每个微齿占圆周 $5^\circ \pm 2.5^\circ$ 机械角度,即 $40^\circ \pm 20^\circ$ 电角度;其中每个齿所占圆周机械角度包含一个所述槽口(3)的宽度,且其中四个大齿、两个小齿、再加上两个微齿的机械角度之和等于 120° 。

2. 根据权利要求1所述的三相永磁伺服电动机,其特征在于,所述转子铁芯上各个永磁体的N、S磁极相间排列,所述永磁体是径向充磁的瓦形磁钢、或者是平行充磁的瓦形磁钢。

3. 根据权利要求2所述三相永磁伺服电动机,其特征在于,所述瓦形磁钢的外圆两侧设有角度不大于 7.5° 、长度不大于磁钢的外圆弧长 $1/4$ 的削角。

4. 根据权利要求3所述的三相永磁伺服电动机,其特征在于,所述定子与转子之间的物理气隙为 $0.5 \sim 4\text{mm}$ 。

5. 根据权利要求1-4中任一项所述的三相永磁伺服电动机,其特征在于,所述定子铁芯由十三部分组成,包括含有六个小齿和六个微齿的由多层硅钢片自铆迭压而成的一体式环形铁芯(11),由多层硅钢片自铆迭压而成的十二个独立的大齿铁芯(8);所述环形铁芯的轭部和大齿铁芯上分别设有凹槽/凸台,并互相咬合形成完整的定子铁芯。

6. 根据权利要求5所述的三相永磁伺服电动机,其特征在于,其中先在四个大齿铁芯上绕四个串联的A相绕组,在另四个大齿铁芯上绕四个串联的B相绕组,在另四个大齿铁芯上绕四个串联的C相绕组,然后将所述十二个装有绕组的大齿铁芯分别嵌入所述环形铁芯(11)中,构成装有A、B、C三相绕组的定子铁芯组件。

7. 根据权利要求1-4中任一项所述的三相永磁伺服电动机,其特征在于,所述定子铁芯由十三部分组成,包括含有十二个大齿的由多层硅钢片自铆迭压而成的一体式环形铁芯(12),由多层硅钢片自铆迭压而成的六个独立的小齿铁芯、以及由多层硅钢片自铆迭压而成的六个独立的微齿铁芯;所述环形铁芯的轭部和小齿、微齿铁芯上分别设有凹槽/凸台,并互相咬合形成完整的定子铁芯。

8. 根据权利要求7所述的三相永磁伺服电动机,其特征在于,其中先在所述环形铁芯上对十二个大齿实施绝缘处理,然后分别绕制A、B、C三相绕组,再将六个小齿铁芯和六个微齿铁芯嵌入所述环形铁芯(12)的轭部,构成装有A、B、C三相绕组的定子铁芯组件。

9. 据权利要求1-4中任一项所述的三相永磁伺服电动机,其特征在于,所述定子铁芯由二十四部分组成,即包括由多层硅钢片自铆迭压而成的十二个独立大齿、六个独立小齿、

以及六个独立微齿 ;每个齿的轭部两侧设有凹槽 / 凸台 ,相邻齿的轭部互相咬合形成完整的定子铁芯。

一种三相永磁伺服电动机

技术领域

[0001] 本发明涉及永磁电动机,更具体地说,涉及一种三相永磁伺服电动机,该电动机适用于直接驱动和位置、速率伺服控制应用。

背景技术

[0002] 本发明所涉及的永磁直流电动机,主要是指能够有效地产生具有低扭矩波动的伺服电动机。其中,扭矩波动主要包括:较低的齿槽效应扭矩分量(定位力矩)、较低的电流与电势谐波扭矩分量。目前,此类伺服电动机设计的主要目标是:力矩波动小、输出功率大(转速和力矩的乘积大)、过载能力大、体积小、价格低等等。

[0003] 产生力矩波动的主要原因包括:(1) 定子电流谐波与反电势谐波乘积呈现的力矩波动;(2) 定子电流为零时转子转动,由于齿槽效应产生磁导变化呈现的定位力矩波动。

[0004] 抑制力矩波动的主要方法包括:(1) 传统的分数槽绕组设计;(2) 优化齿槽与磁极配合的集中绕组设计,例如名为“高效永磁无刷电动机”,公开号 CN1856921A 的中国发明专利申请。其中,传统的分数槽绕组设计的电机制造工艺复杂、生产成本很高。优化齿槽与磁极配合的集中绕组设计具有性价比高的特点,但其只适应于磁极数大于 20 的低速伺服电机。

[0005] 在公开号为 CN101371425A 的中国发明专利申请中,公开了一种磁极数 $2P = 16$, 齿槽数 $Z = 24$, 采用大、中、小齿结构的方波三相无刷永磁直流电动机。该电机具备优异的性能,具有很高的性价比,但仍有欠缺。由于它装有绕组的两个齿的大小不同,给制造带来许多不便,例如,齿的加工模具、工装、工艺均不能一致,绕组的加工模具、工装、工艺也不能一致;更严重的是:由于槽的空间尺寸不同,必然导致每相的两个绕组的匝数、线径不能一致,从而对电机性能造成不良影响,例如导致两个绕组的电流产生的力矩在空间不对称。此外该电机的大、中、小齿结构,对于定位力矩的抑制作用不够强。该电机的每相两个齿的电角度为: $200^\circ \pm 20^\circ$ 和 $160^\circ \pm 20^\circ$, 其相反电势波形具有 120° 以上的平顶区,可以实现方波永磁伺服电机。然而为了获得最高的绕组利用率和最宽的平顶区,理想电角度应为 180° , 该电机偏离理想电角度 $\pm 20^\circ$, 必然导致其绕组利用率下降为 $\sin(140^\circ / 180^\circ \times 90^\circ) = 0.940$, 且该电机的相反电势平顶区也因此并非最佳。

发明内容

[0006] 本发明要解决现有正弦波永磁伺服电动机和方波永磁伺服电动机所存在的问题,提出一种新原理、新结构、高性能、高性价比的三相永磁伺服电动机。

[0007] 为解决上述技术问题,本发明提供一种三相永磁伺服电动机,所述电动机的转子铁芯上装有多对永磁体,定子的齿槽中装有三相绕组,其中,所述转子铁芯上的磁极数 $2P = 16$; 所述定子铁芯的槽数 $Z = 24$, 相应应有二十四个齿,所述槽的槽口宽度为 $0.1 \sim 3.0\text{mm}$; 所述二十四个齿中包括十二个大齿、六个小齿、以及六个更小的微齿; 所述三相绕组为十二个集中绕组,分别装于所述十二个大齿上,所述绕组和齿的排列次序:小齿→装 A 相绕组

的大齿→微齿→装 C 相绕组的大齿→小齿→装 B 相绕组的大齿→微齿→装 A 相绕组的大齿→小齿→装 C 相绕组的大齿→微齿→装 B 相绕组的大齿→小齿→装 A 相绕组的大齿→微齿→装 C 相绕组的大齿→小齿→装 B 相绕组的大齿→微齿→装 A 相绕组的大齿→小齿→装 C 相绕组的大齿→微齿→装 B 相绕组的大齿 ; 所述定子铁芯上的每个大齿占圆周 $22.5^{\circ} \pm 2.5^{\circ}$ 机械角度, 即 $180^{\circ} \pm 20^{\circ}$ 电角度 ; 每个小齿占圆周 $10^{\circ} \pm 2.5^{\circ}$ 机械角度, 即 $80^{\circ} \pm 20^{\circ}$ 电角度 ; 每个微齿占圆周 $5^{\circ} \pm 2.5^{\circ}$ 机械角度, 即 $40^{\circ} \pm 20^{\circ}$ 电角度 ; 其中每个齿所占圆周机械角度包含一个所述槽口的宽度, 且其中四个大齿、两个小齿、再加上两个微齿的机械角度之和等于 120° 。

[0008] 本发明中, 所述转子铁芯上各个永磁体的 N、S 磁极相间排列, 所述永磁体可以是径向充磁的瓦形磁钢、或者是平行充磁的瓦形磁钢。所述瓦形磁钢的外圆两侧最好设有角度不大于 7.5° 、长度不大于磁钢的外圆弧长 $1/4$ 的削角。所述定子与转子之间的物理气隙可为 $0.5 \sim 4\text{mm}$ 。

[0009] 本发明的一个优选方案中, 所述定子铁芯由十三部分组成, 包括含有六个小齿和六个微齿的由多层硅钢片自铆迭压而成的一体式环形铁芯, 由多层硅钢片自铆迭压而成的十二个独立的大齿铁芯 ; 所述环形铁芯的轭部和大齿铁芯上分别设有凹槽 / 凸台, 并互相咬合形成完整的定子铁芯。

[0010] 本发明的另一个优选方案中, 所述定子铁芯也由十三部分组成, 包括含有十二个大齿的由多层硅钢片自铆迭压而成的一体式环形铁芯, 由多层硅钢片自铆迭压而成的六个独立的小齿铁芯、以及由多层硅钢片自铆迭压而成的六个独立的微齿铁芯 ; 所述环形铁芯的轭部和小齿、微齿铁芯上分别设有凹槽 / 凸台, 并互相咬合形成完整的定子铁芯。

[0011] 本发明的另一个优选方案中, 所述定子铁芯由二十四部分组成, 即包括由多层硅钢片自铆迭压而成的十二个独立大齿、六个独立小齿、以及六个独立微齿 ; 每个齿的轭部两侧设有凹槽 / 凸台, 相邻齿的轭部互相咬合形成完整的定子铁芯。

[0012] 由上述技术方案可知, 本发明的三相永磁伺服电动机的磁极数为 $2P = 16$, 装有绕组的大齿占 180° 电角度, 使其相反电势波形具有近 135° 电角度的平顶区, 而且大齿宽不容易受电枢反应影响, 使电机具有更强的过载能力 ; 两种非均匀小齿专用于抑制定位力矩, 使定位力矩减小至万分之一水平。该电动机每相只有两个集中绕组, 且两个集中绕组结构和匝数完全相同, 制造简单、工艺一致, 生产成本很低。该电动机的出力比传统正弦波永磁伺服电机大 30%, 绕组端部比传统正弦波永磁伺服电机小 3 倍以上, 所以铜耗大幅度减少。该三相永磁伺服电动机采用三相方波电流驱动时, 能产生平稳的力矩, 其力矩波动指标与正弦波永磁伺服电机相当。该三相永磁伺服电动机具有绕组端部小、用铜少、损耗小、气隙小磁负荷高、定位力矩小和过载能力强等一系列优点。

附图说明

[0013] 图 1 是本发明一个优选实施例中电动机的定、转子结构示意图 ;

[0014] 图 2 是本发明一个优选实施例中电动机总装结构示意图 ;

[0015] 图 3 是图 1 所示实施例中的定子齿槽角度分布示意图 ;

[0016] 图 4 是镶嵌大齿构成定子冲片的结构示意图 ;

[0017] 图 5 是镶嵌小齿和微齿构成定子冲片的结构示意图 ;

[0018] 图 6 是二十四齿分别独立并互相咬合的结构示意图；

[0019] 图 7 是正弦波磁场电机的转子结构示意图。

具体实施方式

[0020] 本发明的一个优选实施例如图 1 和图 2 所示。从图 2 中可以看出这种三相永磁伺服电动机的大致结构,其主要部件包括转子 1、定子 2、转轴 30 等,转子 1 与定子 2 之间的物理气隙 5 为 $0.5 \sim 4\text{mm}$ 。转子位置传感器 6,可以是光电编码器、旋转变压器、磁编码器中任何一种。

[0021] 从图 1 中可以看出,在转子铁芯上装有八对极的永磁体 4,这些永磁体 N、S 相间排列,转子的磁极数 $2P = 16$ 。具体实施时,永磁体 4 可以是径向充磁的瓦形磁钢、或者是平行充磁的瓦形磁钢。转子铁芯上的永磁体的极距 $\pi D/8$ 的物理尺寸是 $50 \sim 200\text{mm}$,其中 D 是转子外径。这种结构可以获得趋于 135° 方波的相反电势波形,与方波定子电流配合可实现力矩波动很小的方波永磁伺服电机运行。由于两相反电势方波中的 3、6 次谐波相位相同,相减为零,因此这种结构的线反电势波形仍趋于正弦波,采用正弦波电流驱动时三相正弦波定子电流与三相相反电势方波中的 3、6 次谐波的乘积不呈现力矩波动,而且电机的输出功率获得约 30% 的提升。

[0022] 从图 1 中可以看出,定子齿槽的数目 $Z = 24$,即对应应有二十四齿和十二个槽;定子槽的槽口 3 的宽度为 $0.1 \sim 3\text{mm}$;二十四齿中包括十二个装绕组的大齿 8、不装绕组的六个小齿 9、以及不装绕组的六个微齿 10,并在圆周内按小齿→大齿→微齿→大齿→小齿→大齿→微齿→大齿→小齿→大齿→微齿→大齿这样的次序排布,也即形成十二个槽。其中,仅在十二个大齿 8 上安装三相绕组,每个大齿上的绕组有两个绕组边、并分别占有其两侧的一个槽。

[0023] 如图 3 所示,定子铁芯上的每个大齿占圆周 22.5° 机械角度,即 180° 电角度;每个小齿占圆周 10° 机械角度,即 80° 电角度;每个微齿占圆周 5° 机械角度,即 40° 电角度;为了获得三相对称绕组,四个大齿、两个小齿、再加上两个微齿的机械角度之和 $4 \times 22.5^\circ + 2 \times 10^\circ + 2 \times 5^\circ = 120^\circ$ 。其中每个齿所占圆周机械角度包含一个槽口 3 的宽度,例如图 3 所示的小齿所占圆周机械角度 10° 就是一个小齿的宽度再加左右各半个槽口的宽度所占的圆周机械角度,本实施例中的槽口 (3) 的宽度均为 1.0mm 。

[0024] 该电机具有最理想的大齿齿宽,电角度为 $P \times 22.5^\circ = 4 \times 22.5^\circ = 180^\circ$,因此该电机的绕组利用率最大化为 $\sin(180^\circ / 180^\circ \times 90^\circ) = 1.0$,该实施例的相反电势平顶区相应达到最佳。这种不均匀的齿槽结构,既确保了三相对称,又抑制了定位力矩。

[0025] 本实施例中,十二个三相绕组为集中绕组,分别将定子绕组用绕线机或手工直接绕在经表面绝缘处理的大齿上,绕组和齿的排列次序是:→小齿→装 A 相绕组的大齿→微齿→装 C 相绕组的大齿→小齿→装 B 相绕组的大齿→微齿→装 A 相绕组的大齿→小齿→装 C 相绕组的大齿→微齿→装 B 相绕组的大齿→小齿→装 A 相绕组的大齿→微齿→装 C 相绕组的大齿→小齿→装 B 相绕组的大齿→微齿→装 A 相绕组的大齿→小齿→装 C 相绕组的大齿→微齿→装 B 相绕组的大齿;具体如图 1 所示。

[0026] 如此绕制后,每相两个集中绕组之间是串联的,减少了接线,简化了工艺。可见,该电动机每相仅有两个集中绕组,三相电动机仅有十二个集中绕组,电动机的绕组总数非常

少,大大简化了电动机结构,降低了成本,同时绕组端部减少到传统电动机的 $1/3 \sim 1/6$ 甚至更多,达到了最小化,于是铜耗大幅下降。

[0027] 如图 4 所示,本发明一个实施例中,定子铁芯由十三部分互相咬合和拼接所组成,包括含有六个小齿 9 和六个微齿 10 的由多层硅钢片自铆迭压而成的一体式环形铁芯 11,由多层硅钢片自铆迭压而成的十二个独立的大齿铁芯 8;环形铁芯 11 的轭部和大齿铁芯 8 上分别设有凹槽/凸台,并互相咬合形成完整的定子铁芯。

[0028] 针对这种结构,可先在 A 相的四个大齿铁芯上绕好四个串联的 A 相绕组,在 B 相的四个大齿铁芯上绕好四个串联的 B 相绕组,在 C 相的四个大齿铁芯上绕好四个串联的 C 相绕组,然后将十二个装有 A、B、C 三相绕组的大齿铁芯嵌入到环形铁芯 11 上,即构成装有 A、B、C 三相绕组的定子铁芯组件。该实施例中,可以很方便地对独立的大齿铁芯进行绝缘处理,然后用自动或半自动绕线机对大齿铁芯实施绕线。它的绕组制造工艺性很好;同时,采用整体结构环形铁芯 11 可充分保证定子铁芯组件的几何精度。

[0029] 本实施例中的电机具有理想的齿宽设计,分别为大齿 23° 、小齿 9° 、微齿 5° , $2 \times (2 \times 23^\circ + 9^\circ + 5^\circ) = 120^\circ$,可构成 A、B、C 三相对称绕组,且定位力矩抑制的很好。该电动机可采用三相方波电流或三相正弦波电流驱动,都能产生平稳的力矩,并具有绕组端部小、用铜少、损耗小、气隙小、定位力矩小和过载能力强等一系列优点。

[0030] 如图 5 所示,本发明的另一实施例中,与图 4 所示实施例相反,其一体式环形铁芯 12 上包含十二个大齿,而六个小齿 9 和六个微齿 10 是独立的,同样是互相咬合形成完整的定子铁芯。

[0031] 具体装配时,先对十二个大齿实施绝缘处理;由于此时未装小齿和微齿,环形铁芯 12 的开口很大,完全可以使用自动绕线机在大齿 8 上绕制各相绕组。例如先在 A 相的四个大齿上分别绕好四个串联的 A 相绕组,再在 B 相的四个大齿上分别绕好四个串联的 B 相绕组,再在 C 相的四个大齿铁芯上分别绕好四个串联的 C 相绕组,然后将实施绝缘处理后的六个小齿铁芯和六个微齿铁芯嵌入环形铁芯 12 的轭部,构成装有 A、B、C 三相绕组的定子铁芯组件。

[0032] 该电动机可采用三相方波电流或三相正弦波电流驱动,都能产生平稳的力矩,并具有绕组端部小、用铜少、损耗小、气隙小、定位力矩小和过载能力强等一系列优点。

[0033] 如图 6 所示,本发明另一实施例中,有十二个独立的齿,即包括由多层硅钢片自铆迭压而成的十二个独立大齿、六个独立小齿、以及六个独立微齿;每个齿的轭部两侧设有凹槽/凸台,相邻齿的轭部互相咬合形成完整的定子铁芯。其中,每个大齿占圆周 22.5° 机械角度,即 180° 电角度;每个小齿占圆周 10° 机械角度,即 80° 电角度;每个微齿占圆周 5° 机械角度,即 40° 电角度。

[0034] 本实施例中,可将定子绕组用自动、半自动绕线机、或手工方式先绕制在经表面绝缘处理的独立大齿上,然后利用定位工装,将六个有绕组的大齿、三个无绕组的小齿、以及三个无绕组的微齿按次序互相咬合拼装成定子组件。如此绕制后,每相两个集中绕组之间是串联的,减少了接线,简化了工艺。

[0035] 该电动机可采用三相方波电流或三相正弦波电流驱动,都能产生平稳的力矩,并具有绕组端部小、用铜少、损耗小、气隙小、定位力矩小和过载能力强等一系列优点。

[0036] 如图 7 所示,本发明的又一实施例中,为了获得趋于正弦波的气隙磁场或正弦波

的相反电势波形,采用了瓦形磁钢,磁钢的外圆两侧设有角度不大于 7.5° 、长度不大于磁钢的外圆弧长 $1/4$ 的削角。该三相永磁伺服电动机定子与转子之间的物理气隙为 2.0mm 。如此设计后可以获得趋于正弦波的气隙磁场或正弦波的相反电势波形。于是三相定子电流中即使存在非正弦,也不至于产生过大的力矩波动。该电动机采用三相正弦波电流驱动,能产生平稳的力矩,并具有绕组端部小、用铜少、损耗小、气隙小、定位力矩小和过载能力强等一系列优点。

[0037] 本发明并不限于上述具体实施例,其中,定子铁芯上的每个大齿所占圆周机械角度可为 $22.5^{\circ} \pm 2.5^{\circ}$,即 $180^{\circ} \pm 20^{\circ}$ 电角度;每个小齿占圆周机械角度可为 $10^{\circ} \pm 2.5^{\circ}$,即 $80^{\circ} \pm 20^{\circ}$ 电角度;每个微齿占圆周机械角度可为 $5^{\circ} \pm 2.5^{\circ}$,即 $40^{\circ} \pm 20^{\circ}$ 电角度;同样,这里所讲的每个齿所占圆周机械角度包含槽口 3 的宽度,同时需保证每四个大齿、两个小齿、再加上两个微齿的机械角度之和等于 120° ;例如大齿 22° 、小齿 9.5° 、微齿 6.5° , $2 \times (2 \times 22^{\circ} + 9.5^{\circ} + 6.5^{\circ}) = 120^{\circ}$,又例如大齿 23° 、小齿 10° 、微齿 4° , $2 \times (2 \times 23^{\circ} + 10^{\circ} + 4^{\circ}) = 120^{\circ}$,等等。

[0038] 本发明的电机具有最接近理想的大齿齿宽,其电角度为 $180^{\circ} \pm 20^{\circ}$,因此其绕组利用率大于 $0.985(\sin(200^{\circ}/180^{\circ} \times 90^{\circ}) = 0.985)$,该电机的相反电势平顶区相应达到最佳化。

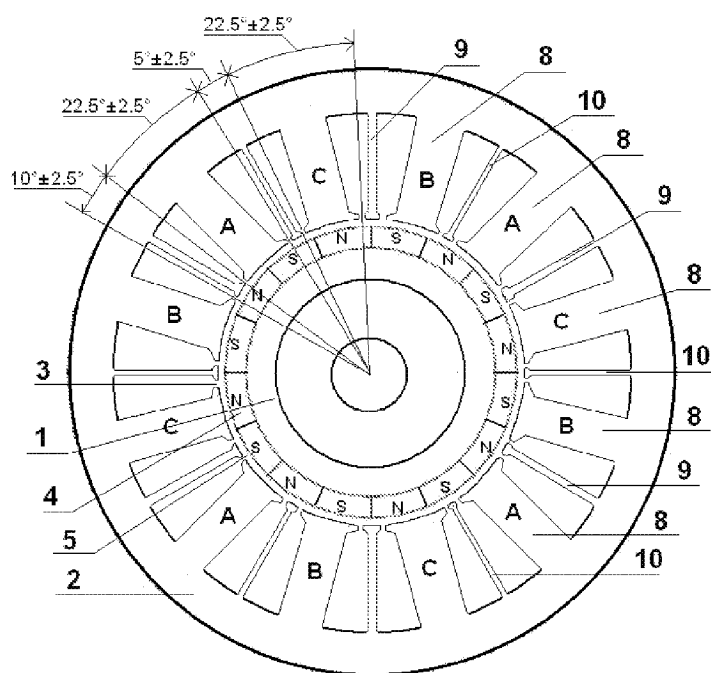


图 1

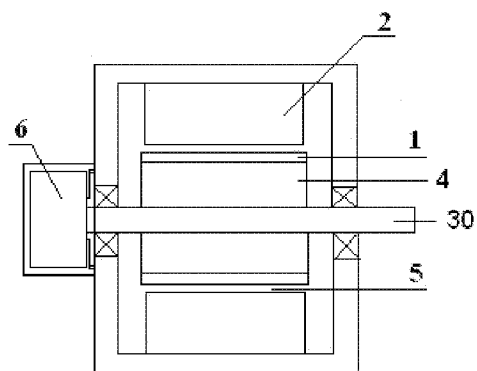


图 2

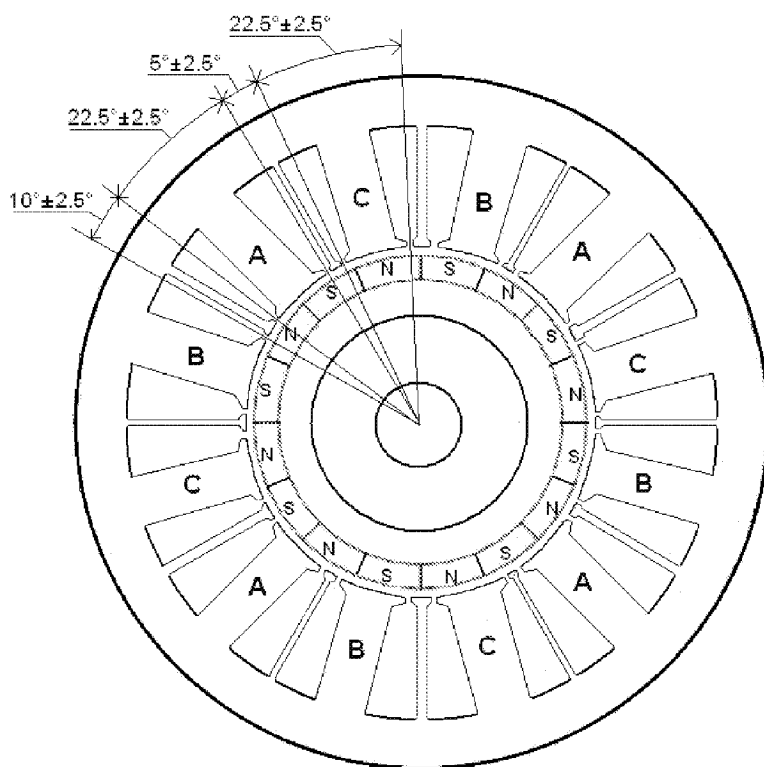


图 3

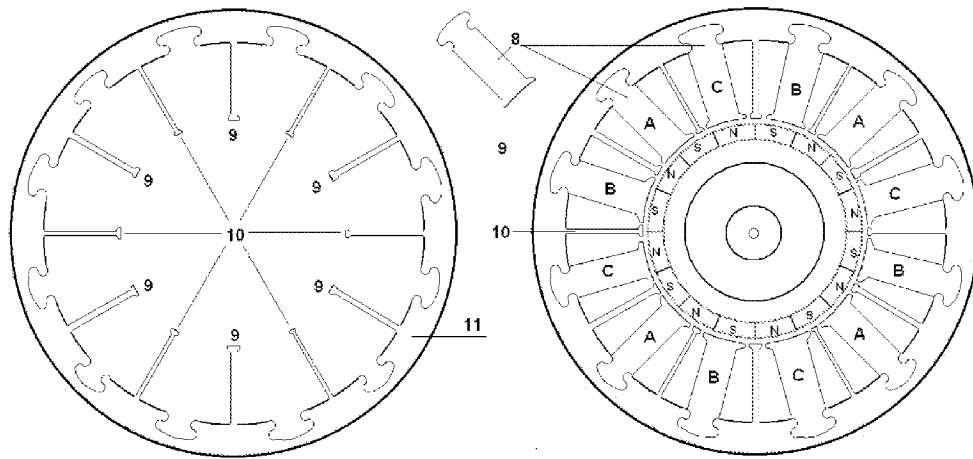


图 4

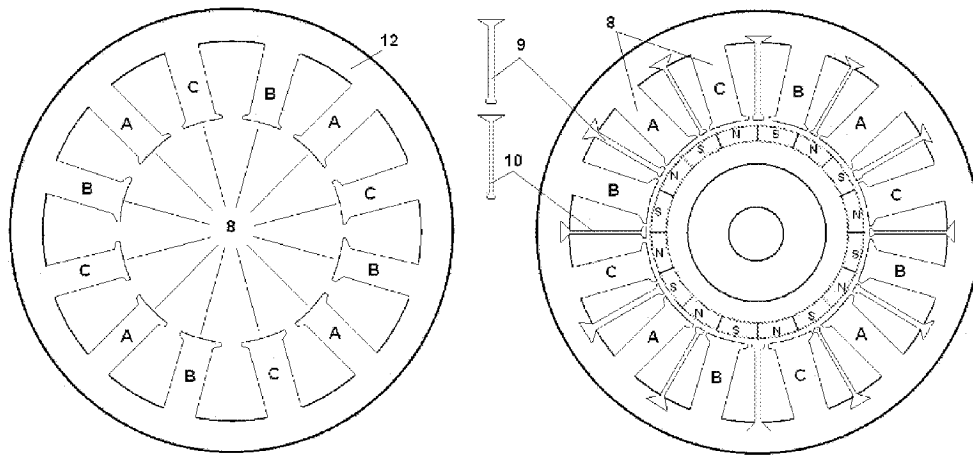


图 5

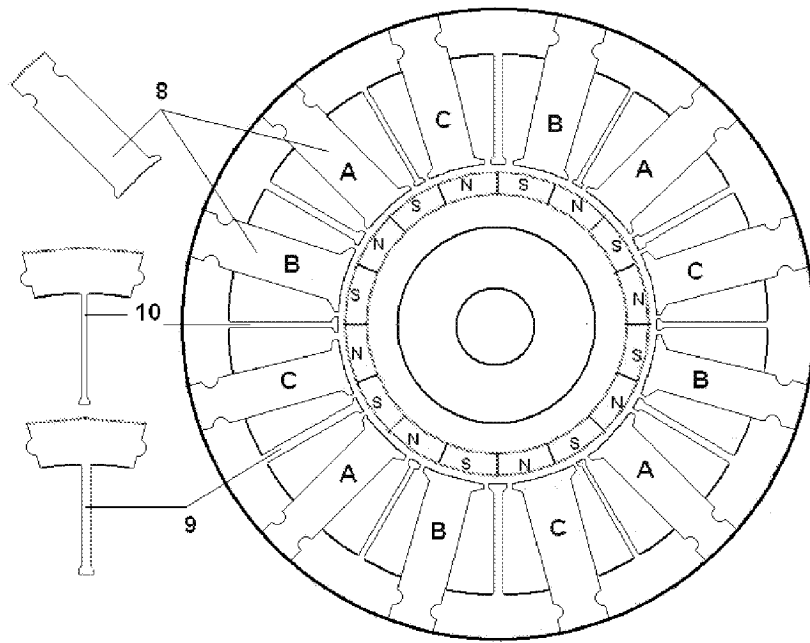


图 6

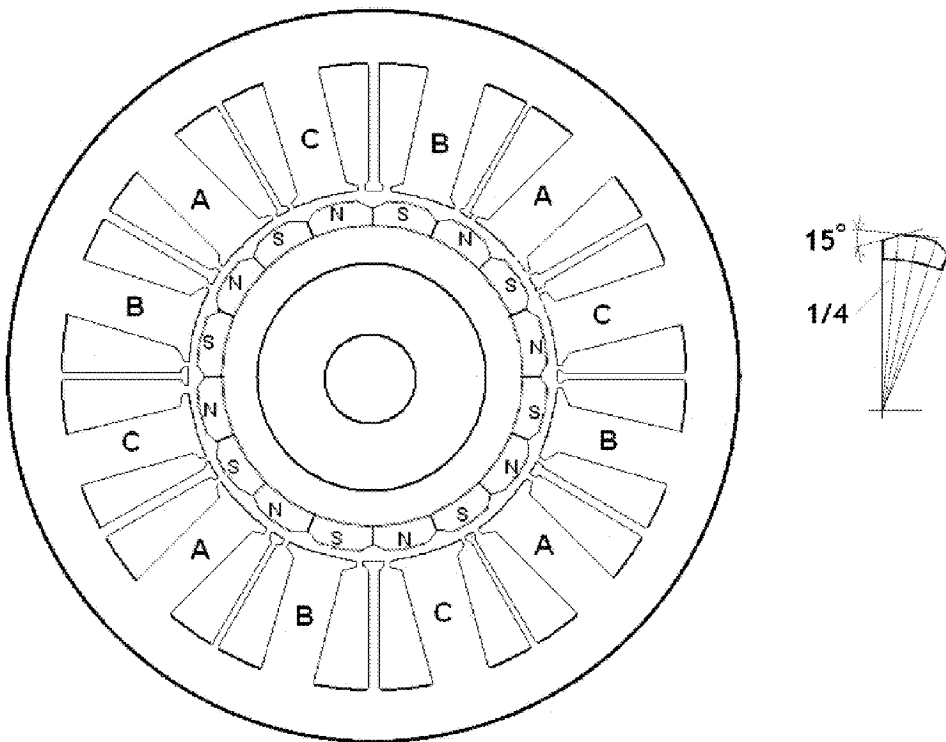


图 7