



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110492643 A

(43)申请公布日 2019. 11. 22

(21)申请号 201910533003.4

H02J 3/38(2006.01)

(22)申请日 2019.06.19

(71)申请人 长江勘测规划设计研究有限责任公司

地址 430010 湖北省武汉市解放大道1863号

(72)发明人 谢向荣 陈昕 赵鑫 刘海波
张鹏 潘霄 张旭 喻飞 陈卫鹏
苏毅

(74)专利代理机构 武汉开元知识产权代理有限公司 42104

代理人 陈家安

(51) Int. Cl.

H02K 3/18(2006.01)

H02K 1/24(2006.01)

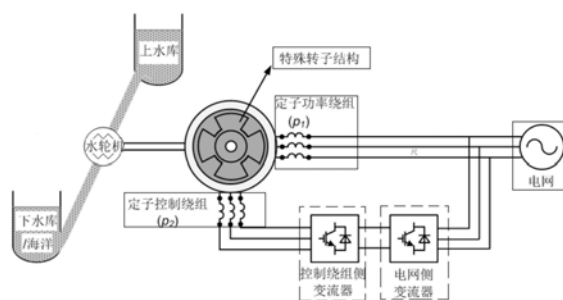
权利要求书1页 说明书7页 附图6页

(54)发明名称

适合海水抽水蓄能电站的发电电动机

(57)摘要

本发明提供了一种适合海水抽水蓄能电站的发电电动机,包括定子和转子,其特征在于发电电动机的定子上有两套独立的绕组,分别为定子功率绕组和定子控制绕组,定子功率绕组作为直接发电的电端口,定子控制绕组作为与变流器连接的电端口;转子同时耦合定子上的定子功率绕组和定子控制绕组的两种磁场。本发明的目的就是针对现有技术的缺陷,提供一种适合海水抽水蓄能电站的发电电动机。



1. 一种适合海水抽水蓄能电站的发电电动机,包括定子和转子,其特征在于发电电动机的定子上有两套独立的绕组,分别为定子功率绕组和定子控制绕组,定子功率绕组作为直接发电的电端口,定子控制绕组作为与变流器连接的电端口;转子同时耦合定子上的定子功率绕组和定子控制绕组的两种磁场。

2. 根据权利要求1所述的海水抽水蓄能电站的发电电动机,其特征在于发电电动机中有两个气隙,在定子功率绕组和定子控制绕组都有功率流动。

3. 根据权利要求2所述的海水抽水蓄能电站的发电电动机,其特征在于当发电电动机在并网运行模式下,定子功率绕组和定子控制绕组产生的气隙基波旋转磁场在旋转转子的作用下相互产生作用,定子功率绕组和定子控制绕组产生的气隙基波旋转磁场在转子中分别产生的感应电流频率相等。

4. 根据权利要求3所述的海水抽水蓄能电站的发电电动机,其特征在于定子功率绕组和定子控制绕组以及转子满足以下公式:

$$\frac{s_2}{s_1} = -\frac{\omega_1}{\omega_2} = -\frac{f_1}{f_2}$$

其中, s_1 和 s_2 分别为定子功率绕组和定子控制绕组的转差率, ω_1 和 ω_2 分别为定子功率绕组旋转磁场的电气角速度和定子控制绕组旋转磁场的电气角速度, f_1 和 f_2 分别为定子功率绕组和定子控制绕组的励磁电流的频率。

5. 根据权利要求4所述的海水抽水蓄能电站的发电电动机,其特征在于发电电动机的转子转速公式:

$$\omega_r = \frac{\omega_1 \pm \omega_2}{p_r}$$

其中, p_r 表示凸极式磁阻转子的凸极个数, ω_r 为转子的旋转角速度。

6. 根据权利要求5所述的海水抽水蓄能电站的发电电动机,其特征在于磁阻式发电电动机中转子凸极个数的约束条件为,

$$p_r = p_1 \pm p_2$$

其中, p_1 为定子功率绕组极对数, p_2 为定子控制绕组极对数;凸极个数的约束条件还包括 $p_r > 0$ 。

7. 根据权利要求6所述的海水抽水蓄能电站的发电电动机,其特征在于发电电动机的转子为不等齿宽的磁阻转子结构,其几何尺寸在气隙圆周上是对称的,假设最大气隙长度和最小气隙长度分别为 d_{\max} 和 d_{\min} ,气隙磁导波可以表示为:

$$g^{-1}(\theta) = \begin{cases} g_{\min}^{-1} = \frac{\mu_o}{d_{\max}}, \left[\frac{\pi}{jp_r}(1-\beta_i) \leq \theta < \frac{\pi}{jp_r}(1+\beta_i) \right] \\ g_{\max}^{-1} = \frac{\mu_o}{d_{\min}}, \left[0 \leq \theta < \frac{\pi}{jp_r}(1-\beta_i), \frac{\pi}{jp_r}(1+\beta_i) \leq \theta < \frac{2\pi}{jp_r} \right] \end{cases} \quad (i=1,2,3\dots)$$

其中, β_i 代表各齿的齿宽比例, $0 \leq \beta_i \leq 1$; j 代表每凸极下的齿个数, j 的选择必选考虑细齿不会影响电机主磁路、细齿有足够的机械强度以及满足电机制造工艺的要求,每凸极下的齿个数一般可以选择2~5个。

适合海水抽水蓄能电站的发电电动机

技术领域

[0001] 本发明涉及海水抽水蓄能电站技术领域,具体涉及一种适合海水抽水蓄能电站的发电电动机。

背景技术

[0002] 随着可再生能源的不断增加,电力系统的稳定性成为了一个重要问题。提高电网稳定性的设备,例如可变速抽水蓄能系统由于具有转速响应快和柔性调节的特点,越来越引起人们的重视。

[0003] 目前有两种关注比较多的可变速抽水蓄能机组,一种是配置全功率变流器SFC的同步发电机组,另一种是仅需配置转差功率变流器但需加电刷和滑环的双馈型机组。然而,上述二者均有明显缺点。

[0004] 配置全功率变流器SFC的同步发电机组原理上与传统的同步发电机组并无区别,仅是为了能够满足变速恒频恒压发电的目的而在定子发电出口处加装全功率的变流器。这种系统中,全功率变流器的容量必须和机组保持一致,这导致全系统的成本成倍增长,这是其最主要的缺点。

[0005] 采用的电刷和滑环式双馈型可变速机组的转子部件制造和维护都较为困难。有电刷和滑环的双馈电机可以在双馈状态下运行,虽然减小变频器的容量,但是电刷的存在使得电机不能运行于条件相对较恶劣的工作环境下,需要经常维护,所以也增加了成本;并且在制造工艺上,较之于可一体成型的结构,绕线式的转子结构所需的人工制造成本和犯错概率也大大增加。

[0006] 同时,海水抽水蓄能电站普遍水头较低,进而水轮机的转速也相应较慢,这种工况适合同步转速转小的发电电动机。对于低同步转速所带来的多极对数要求,势必会造成目前双馈型可变速机组的绕线式结构转子更高的制造成本和工艺要求。

[0007] 针对海水抽水蓄能电站,目前迫切需要一种高可靠性、转子部件免维护,同时还必须具备转速可调、有功/无功能够解耦控制、适合低水头的发电电动机。

发明内容

[0008] 本发明的目的就是针对现有技术的缺陷,提供一种适合海水抽水蓄能电站的发电电动机。

[0009] 本发明提供了一种适合海水抽水蓄能电站的发电电动机,包括定子和转子,其特征在于发电电动机的定子上有两套独立的绕组,分别为定子功率绕组和定子控制绕组,定子功率绕组作为直接发电的电端口,定子控制绕组作为与变流器连接的电端口;转子同时耦合定子上的定子功率绕组和定子控制绕组的两种磁场。

[0010] 上述技术方案中,发电电动机中有两个气隙,在定子功率绕组和定子控制绕组都有功率流动。

[0011] 上述技术方案中,当发电电动机在并网运行模式下,定子功率绕组和定子控制绕

组产生的气隙基波旋转磁场在旋转转子的作用下相互产生作用,定子功率绕组和定子控制绕组产生的气隙基波旋转磁场在转子中分别产生的感应电流频率相等。

[0012] 上述技术方案中,定子功率绕组和定子控制绕组以及转子满足以下公式:

$$[0013] \quad \frac{s_2}{s_1} = -\frac{\omega_1}{\omega_2} = -\frac{f_1}{f_2}$$

[0014] 其中, s_1 和 s_2 分别为定子功率绕组和定子控制绕组的转差率, ω_1 和 ω_2 分别为定子功率绕组旋转磁场的电气角速度和定子控制绕组旋转磁场的电气角速度, f_1 和 f_2 分别为定子功率绕组和定子控制绕组的励磁电流的频率。

[0015] 上述技术方案中,磁阻式发电电动机的转子转速公式:

$$[0016] \quad \omega_r = \frac{\omega_1 \pm \omega_2}{p_r}$$

[0017] 其中, p_r 表示凸极式磁阻转子的凸极个数, ω_r 为转子的旋转角速度

[0018] 上述技术方案中,磁阻式发电电动机中转子凸极个数的约束条件为,

$$[0019] \quad p_r = p_1 \pm p_2$$

[0020] 其中, p_1 为定子功率绕组极对数, p_2 为定子控制绕组极对数;凸极个数的约束条件还包括 $p_r > 0$ 。

[0021] 上述技术方案中,对于不等齿宽的磁阻转子结构,其几何尺寸在气隙圆周上是对称的,假设最大气隙长度和最小气隙长度分别为 d_{\max} 和 d_{\min} ,气隙磁导波可以表示为:

$$[0022] \quad g^{-1}(\theta) = \begin{cases} g_{\min}^{-1} = \frac{\mu_o}{d_{\max}}, \left[\frac{\pi}{jp_r}(1-\beta_i) \leq \theta < \frac{\pi}{jp_r}(1+\beta_i) \right] \\ g_{\max}^{-1} = \frac{\mu_o}{d_{\min}}, \left[0 \leq \theta < \frac{\pi}{jp_r}(1-\beta_i), \frac{\pi}{jp_r}(1+\beta_i) \leq \theta < \frac{2\pi}{jp_r} \right] \end{cases} \quad (i=1,2,3\cdots)$$

[0023] 其中, β_i 代表各齿的齿宽比例, $0 \leq \beta_i \leq 1$; j 代表每凸极下的齿个数, j 的选择必选考虑细齿不会影响电机主磁路、细齿有足够的机械强度以及满足电机制造工艺的要求,每凸极下的齿个数一般可以选择2~5个。

[0024] 本发明的定子功率绕组为直接发电的电端口,定子控制绕组作为与变流器连接的电端口,发电电动机转子的设计,采用了磁场调制式不等齿宽磁阻转子的优化方法,可以使其具有同时高效耦合两种磁场的双耦合工作能力。发电电动机中有两个气隙,在定子功率绕组和控制绕组都有功率流动。无论是发电工况,还是抽水工况,发电电动机都能在超同步转速或者次同步转速运转。本发明所介绍的发电电动机不仅能满足海水抽水蓄能电站对于发电电动机变速恒频恒压发电、多极对数和低同步转速的要求,同时具备有功/无功解耦控制、高可靠性、转子部件免维护、控制系统成本低等特点。

附图说明

[0025] 图1是本发明一种适合海水抽水蓄能电站的发电电动机的系统工作示意图;

[0026] 图2是本发明发电电动机在发电工况下,超同步速运转的能量流动示意图;

[0027] 图3是本发明发电电动机在发电工况下,次同步速运转的能量流动示意图;

[0028] 图4是本发明发电电动机在抽水工况下,超同步速运转的能量流动示意图;

- [0029] 图5是本发明发电电动机在发电工况下,次同步速运转的能量流动示意图;
- [0030] 图6是本发明发电电动机两种磁场的示意图(功率绕组磁极对数为1,控制绕组磁极对数为3);
- [0031] 图7是本发明发电电动机中各旋转磁场的示意图;
- [0032] 图8是普通凸极式磁阻转子的平面展开图和分析模型;
- [0033] 图9是本发明发电电动机不等齿宽磁阻转子的分析模型;
- [0034] 图10是本发明发电电动机的气隙磁密波形图;
- [0035] 图11是本发明发电电动机的气隙磁密谐波分析结果;
- [0036] 图12是本发明发电电动机的不等齿宽磁阻转子的平面图。

具体实施方式

[0037] 下面结合附图和具体实施例对本发明作进一步的详细说明,便于清楚地了解本发明,但它们不对本发明构成限定。

[0038] 如图1-5所示,本发明提供了适合海水抽水蓄能电站的发电电动机,包括定子和转子,其特征在于发电电动机的定子上有两套独立的绕组,分别为定子功率绕组和定子控制绕组,定子功率绕组作为直接发电的电端口,定子控制绕组作为与变流器连接的电端口;转子同时耦合定子上的定子功率绕组和定子控制绕组的两种磁场。发电电动机中有两个气隙,在定子功率绕组和定子控制绕组都有功率流动。

[0039] 这种发电电动机的定子上有两套独立的绕组,它们具有不同的极对数以避免在定子两套绕组之间产生直接的耦合,如图6所示。两套定子绕组中,第一套绕组直接与电网或用电设备连接,它的极对数为 p_1 ;第二套绕组一般与电压和频率可调的变流器连接,它的极对数为 p_2 。同时,发电电动机的转子是经过特殊设计的,用以耦合定子上的两套绕组。

[0040] 这种发电电动机在并网运行模式下,极对数为 p_1 的定子绕组作为功率绕组直接由角频率为 ω_1 的交流电供电,则功率绕组产生的气隙磁场转速为 ω_1/p_1 ;极对数为 p_2 的定子绕组作为控制绕组输入或输出角频率为 ω_2 的交流电,则控制绕组产生的气隙磁场转速为 ω_2/p_2 。两套定子绕组通过转子的间接耦合来实现能量传递,转子起到了类似于定子不同极对数之间转换器的作用。功率绕组和控制绕组磁场磁密可表示为,

$$[0041] \quad b_1(\theta, t) = B_1 \cos[\omega_1 t - p_1 \theta] \quad (\text{式1})$$

$$[0042] \quad b_2(\theta, t) = B_2 \cos[\omega_2 t - p_2 \theta] \quad (\text{式2})$$

[0043] 其中, B_1 和 B_2 是两种磁密的峰值, θ 是气隙圆周上的位置角, ω_1 和 ω_2 分别为功率绕组旋转磁场的电气角速度和控制绕组旋转磁场的电气角速度。

[0044] 将式1和式2定位于转子参考系上,转子的旋转角速度可定义为,

$$[0045] \quad \omega_r = (\theta' - \theta) / t \quad (\text{式3})$$

[0046] 其中, θ' 是转子参考系在气隙圆周上的位置角。在转子参考系上的两种气隙磁场磁密可表示为,

$$[0047] \quad b_1'(\theta', t) = B_1 \cos[(\omega_1 - p_1 \omega_r) t - p_1 \theta'] \quad (\text{式4})$$

$$[0048] \quad b_2'(\theta', t) = B_2 \cos[(\omega_2 - p_2 \omega_r) t - p_2 \theta'] \quad (\text{式5})$$

[0049] 为了使两套定子绕组能通过转子间接耦合,功率绕组和控制绕组产生的气隙基波旋转磁场在旋转转子的作用下相互产生作用,这样才能使两套没有直接耦合的定子绕

组通过转子进行能量传递,便要求功率绕组和控制绕组产生的气隙基波旋转磁场在转子中分别产生的感应电流频率相等,即,

$$[0050] \quad |\omega_{1-p_1} \omega_r| = |\omega_{2-p_2} \omega_r| \quad (\text{式6})$$

[0051] 根据式6,可得转子旋转机械角速度为:

$$[0052] \quad \omega_r = \frac{\omega_1 \pm \omega_2}{p_1 + p_2} \quad (\text{式7})$$

[0053] 两种旋转磁场的角速度可表示为,

$$[0054] \quad \omega_1 = 2\pi f_1 \quad (\text{式8})$$

$$[0055] \quad \omega_2 = 2\pi f_2 \quad (\text{式9})$$

[0056] f_1 和 f_2 分别为定子两套绕组的励磁电流的频率。根据旋转磁场的转速,可知定子上两套绕组的转差率 s_1 和 s_2 分别为,

$$[0057] \quad s_1 * \frac{\omega_1 - p_1 \omega_r}{\omega_1} = \frac{\omega_{r1}}{\omega_1} \quad (\text{式10})$$

$$[0058] \quad s_2 * \frac{\omega_2 - p_2 \omega_r}{\omega_2} = \frac{\omega_{r2}}{\omega_2} \quad (\text{式11})$$

[0059] 将功率绕组和控制绕组的旋转磁场电气角速度折算到转子坐标系下,可得功率绕组磁场在转子参考系上的角速度 ω_{r1} 和控制绕组磁场在转子参考系上的角速度 ω_{r2} 分别为,

$$[0060] \quad \omega_{r1} = \omega_{1-p_1} \omega_r \quad (\text{式12})$$

$$[0061] \quad \omega_{r2} = \omega_{2-p_2} \omega_r \quad (\text{式13})$$

[0062] 当式7中取“+”号时,即 $\omega_{1-p_1} \omega_r = p_2 \omega_r - \omega_2$,得到,

$$[0063] \quad \omega_{r1} = -\omega_{r2} \quad (\text{式14})$$

[0064] 由式10、式11和式14可推得,

$$[0065] \quad \frac{s_2}{s_1} = -\frac{\omega_1}{\omega_2} = -\frac{f_1}{f_2} \quad (\text{式15})$$

[0066] 这种发电电动机同步运行模式时的磁场示意图如图7所示。当定子功率绕组和控制分别被通以三相对称电压时,在这种发电电动机中就同时有两个基波磁场存在,这就需要转子去同时耦合 p_1 和 p_2 这两个不同极对数基波磁场。同时,转子所产生的其他谐波成分需要控制得越小越好。这是因为其他阶次的谐波成分并不能在定子两套绕组中产生感应电势,从这种发电电动机运行的角度而言,这些谐波成分产生的作用被当作谐波电抗。通过不等齿宽磁阻转子设计法能满足以上的需求,下面将逐步进行说明。

[0067] 依上文所述,假定定子两套绕组的三相对称励磁电流的频率分别为 ω_1 和 ω_2 ,则电机气隙中的两种合成磁动势可以表示为,

$$[0068] \quad F_1(\theta) = \frac{3}{2} n_1 I_{s1} \cos(\omega_1 t - p_1 \theta) \quad (\text{式16})$$

$$[0069] \quad F_2(\theta) = \frac{3}{2} n_2 I_{s2} \cos(\omega_2 t - p_2 \theta - \alpha) \quad (\text{式17})$$

[0070] 其中, I_1 和 I_2 分别是定子两套绕组励磁电流的幅值, n_1 和 n_2 分别是定子两套绕组的每极每相匝数, θ 是气隙圆周的机械角度, α 是两种合成磁动势的初始位置差。如果电机气隙的平均长度为 m , 假设最大气隙长度和最小气隙长度分别为 $(m+n)$ 和 $(m-n)$, 气隙中的空气磁导系数为 μ_0 , 则凸极式磁阻转子对气隙改造后的磁导波形可表示为,

$$[0071] \quad g^{-1}(\theta, t) = m + n \cos[p_r(\theta - \omega_r t)] \quad (\text{式18})$$

[0072] 其中, p_r 表示凸极式磁阻转子的凸极个数, ω_r 为转子的旋转角速度。

[0073] 经过凸极转子改造后的磁导波形对两种合成磁动势进行调制, 调制后形成的磁密波可分别表示为,

$$[0074] \quad B_1(\theta, t) = \mu_0 g^{-1}(\theta) F_1(\theta) \quad (\text{式19})$$

$$[0075] \quad B_2(\theta, t) = \mu_0 g^{-1}(\theta) F_2(\theta) \quad (\text{式20})$$

[0076] 将式16和式18代入式19, 可将调制后形成的 p_1 极对数对应的磁密波改写为,

$$[0077] \quad B_1(\theta, t) = \mu_0 * \frac{3}{2} n_1 I_{s1} * m \left[\begin{array}{l} \cos(\omega_1 t - p_1 \theta) + \frac{n}{2m} \cos(\omega_1 t - p_r \omega_r t - (p_1 - p_r) \theta) \\ + \frac{n}{2m} \cos(\omega_1 t + p_r \omega_r t - (p_1 + p_r) \theta) \end{array} \right]$$

(式21)

[0078] 将式17和式18代入式19, 可将调制后形成的 p_2 极对数对应的磁密波改写为,

$$[0079] \quad B_2(\theta, t) = \mu_0 * \frac{3}{2} n_2 I_{s2} * m \left[\begin{array}{l} \cos(\omega_2 t - p_2 \theta - \alpha) + \frac{n}{2m} \cos(\omega_2 t - p_r \omega_r t - (p_2 - p_r) \theta - \alpha) \\ + \frac{n}{2m} \cos(\omega_2 t + p_r \omega_r t - (p_2 + p_r) \theta - \alpha) \end{array} \right]$$

(式22)

[0080] 从式21和式22可以看出, 特殊的磁导波可以将原本正弦分布的空间合成磁动势调制成一种多频率的气隙磁密, 并且调制后的磁密波不仅是关于时间的函数, 还是关于空间位置角的函数。

[0081] 对于调制后得到的两种磁密波, 为了实现发电电动机中两套定子绕组的间接耦合作用, 就要使得式21和式22具有相同频率的时间函数和相同频率的空间函数, 也即,

$$[0082] \quad (\omega_1 - p_r \omega_r) t = \pm \omega_2 t \quad (\text{式23})$$

$$[0083] \quad (p_1 - p_r) \theta = \pm p_2 \theta \quad (\text{式24})$$

[0084] 根据式23得出磁阻式发电电动机的转子转速公式为,

$$[0085] \quad \omega_r = \frac{\omega_1 \pm \omega_2}{p_r} \quad (\text{式25})$$

[0086] 根据式24得出磁阻式发电电动机中转子凸极个数的约束条件为,

$$[0087] \quad p_r = p_1 \pm p_2 \quad (\text{式26})$$

[0088] 当然, 转子凸极个数的约束条件还包括 $p_r > 0$ 。

[0089] 以上是这种磁导波对磁动波的磁场调制原理是普通凸极式磁阻转子发电电动机的基本原理,也是进行不等齿宽磁阻转子分析的基础。为了能够更直观地分析和计算不等齿宽的磁阻转子产生的磁导波,以及这个磁导波调制后的气隙磁密,进而提升发电电动机的性能,这就需要对磁阻和气隙磁导进行函数化的表达,进而通过编制计算程序进行计算机辅助设计。

[0090] 对于等齿宽的磁阻转子结构,其几何尺寸在气隙圆周上是对称的,假设最大气隙长度和最小气隙长度分别为 d_{\max} 和 d_{\min} ,如图8所示,气隙磁导波可以表示为,

$$[0091] \quad g^{-1}(\theta) = \begin{cases} g_{\min}^{-1} = \frac{\mu_o}{d_{\max}}, \left[\frac{\pi}{p_r}(1-\beta) \leq \theta < \frac{\pi}{p_r}(1+\beta) \right] \\ g_{\max}^{-1} = \frac{\mu_o}{d_{\min}}, \left[0 \leq \theta < \frac{\pi}{p_r}(1-\beta), \frac{\pi}{p_r}(1+\beta) \leq \theta < \frac{2\pi}{p_r} \right] \end{cases}$$

(式 23)

[0092] 其中, β 代表齿宽比例, $0 \leq \beta \leq 1$; p_r 为转子磁极个数,。

[0093] 同样地,根据式23可推导出不等齿宽情况时的磁导表达式。对于不等齿宽的磁阻转子结构,其几何尺寸在气隙圆周上是对称的,假设最大气隙长度和最小气隙长度分别为 d_{\max} 和 d_{\min} ,如图9所示,气隙磁导波可以表示为,

$$[0094] \quad g^{-1}(\theta) = \begin{cases} g_{\min}^{-1} = \frac{\mu_o}{d_{\max}}, \left[\frac{\pi}{jp_r}(1-\beta_i) \leq \theta < \frac{\pi}{jp_r}(1+\beta_i) \right] \\ g_{\max}^{-1} = \frac{\mu_o}{d_{\min}}, \left[0 \leq \theta < \frac{\pi}{jp_r}(1-\beta_i), \frac{\pi}{jp_r}(1+\beta_i) \leq \theta < \frac{2\pi}{jp_r} \right] \end{cases} \quad (i=1,2,3\cdots)$$

(式 24)

[0095] 其中, β_i 代表各齿的齿宽比例, $0 \leq \beta_i \leq 1$; j 代表每凸极下的齿个数,当然, j 的选择必选考虑细齿不会影响电机主磁路、细齿有足够的机械强度以及满足电机制造工艺的要求,因此每凸极下的齿个数一般可以选择2~5个。

[0096] 假设这种发电电动机的功率绕组极对数和控制绕组极对数为 $p_1=2$ 和 $p_2=4$,根据式26取正号,也即取二种磁场叠加的效果,可知磁阻转子的凸极个数 $p_r=6$ 。图10给出了一种不等齿宽磁阻转子的平面示意图;其中,普通凸极的齿宽比为0.5,不等齿宽磁阻的每个凸极分为了左右对称的三段,齿宽比分别为0.9和0.3。

[0097] 如果定子两套绕组的三相对称励磁电流幅值的比值为 k ,且两套绕组额匝数相同,即 $n_1=n_2=n$,励磁电流的初始相位角度差为 α ,则电机气隙中的两种合成磁动势可以表示为,

$$[0098] \quad F(\theta) = \frac{3}{2} nI [\cos(p_1\theta) + k \cos(p_2\theta + \alpha)] \quad (\text{式 25})$$

[0099] 电机气隙磁密的函数可表示为,

$$[0100] \quad B(\theta) = \frac{3}{2} nI [\cos(p_1\theta) + k \cos(p_2\theta + \alpha)] * g^{-1}(\theta) \quad (\text{式 26})$$

[0101] 根据式26可知,气隙磁密为关于 θ 的函数,这决定了沿着气隙圆周的磁阻的几何尺寸将影响气隙磁密的谐波含量。当 $k=0.5$, $\alpha=2\pi/3$ 时,图11和图12分别给出了经过不等齿宽磁阻调制后的气隙磁密的波形和气隙磁密的磁场谐波分析结果。可以发现,经过不等齿宽的磁阻调制后,气隙磁密中 $p_1=2$ 和 $p_2=4$ 极对数的工作磁场磁密含量占主要成分,而其他阶次的谐波含量都较小,达到了通过不等齿宽来削弱磁密谐波含量的设计效果。

[0102] 本说明书未作详细描述的内容属于本领域专业技术人员公知的现有技术。

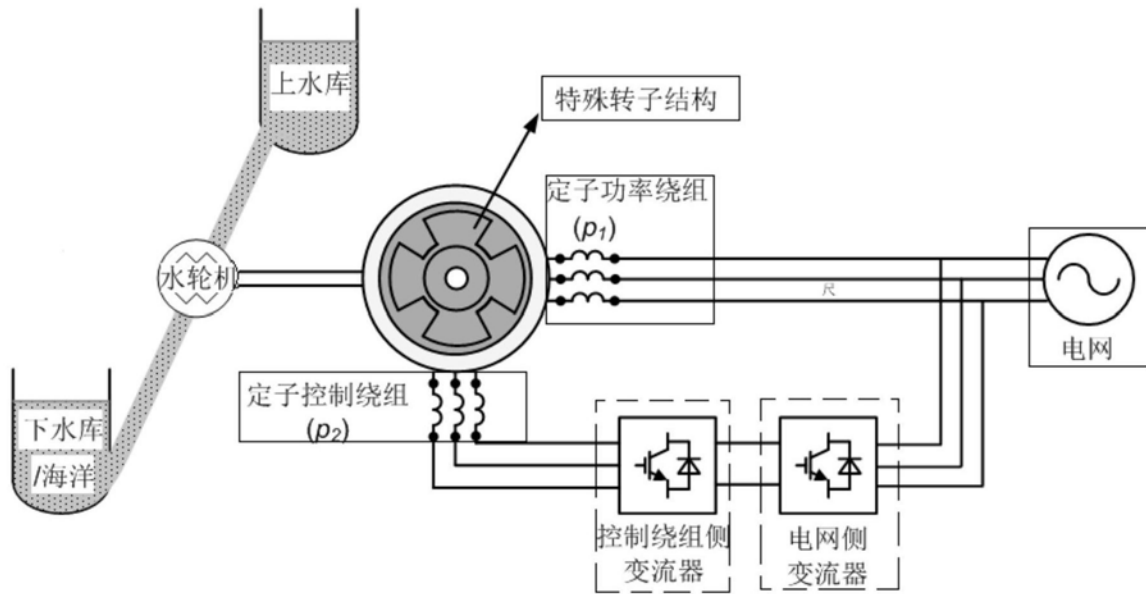


图1

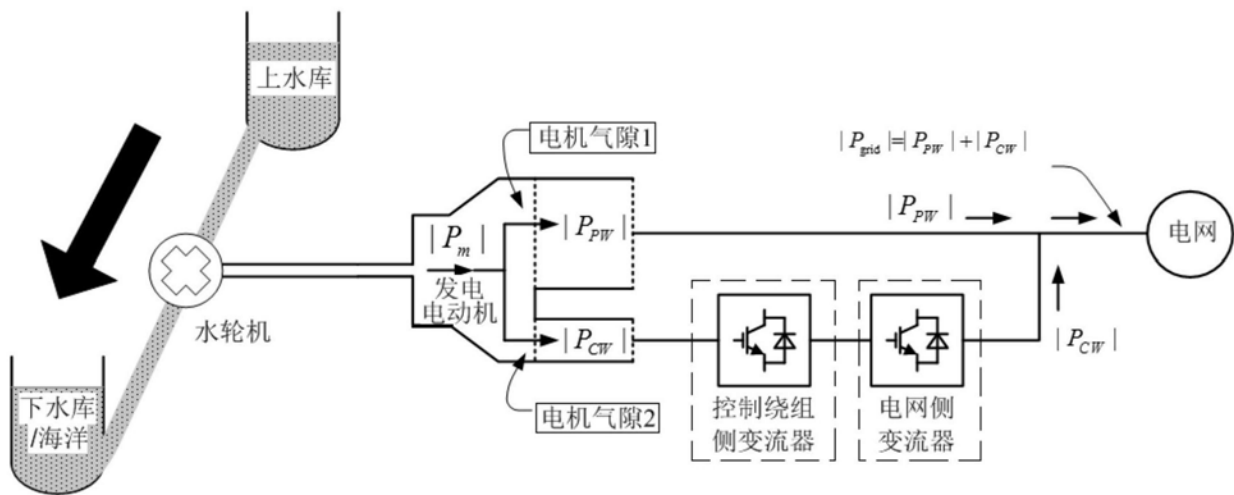


图2

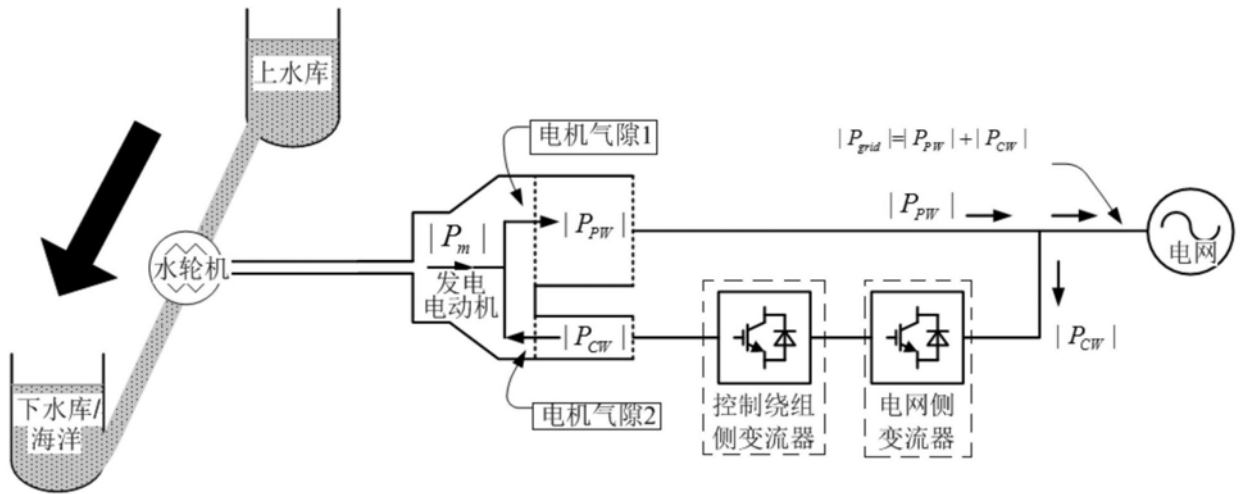


图3

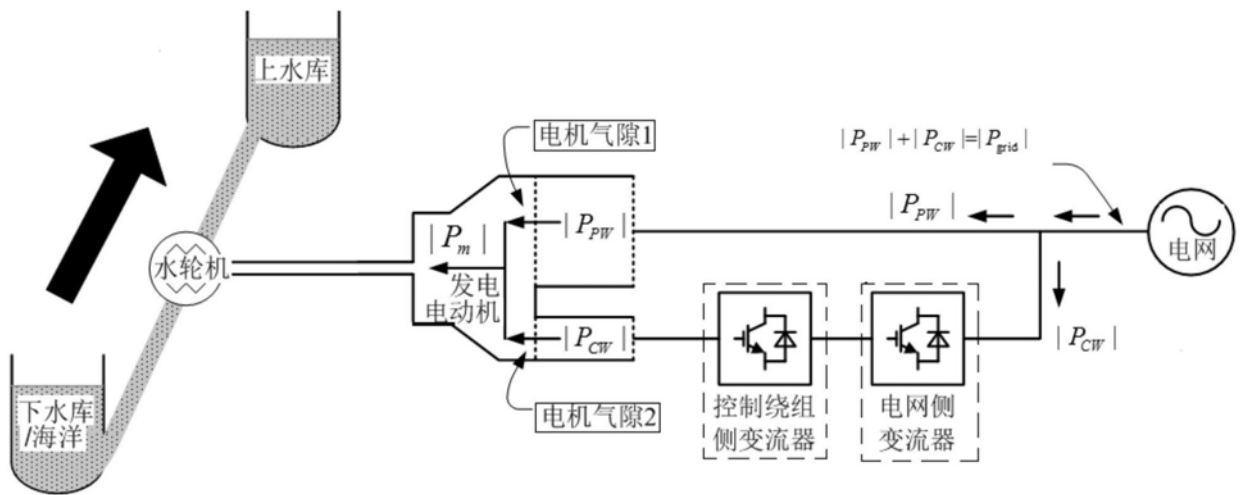


图4

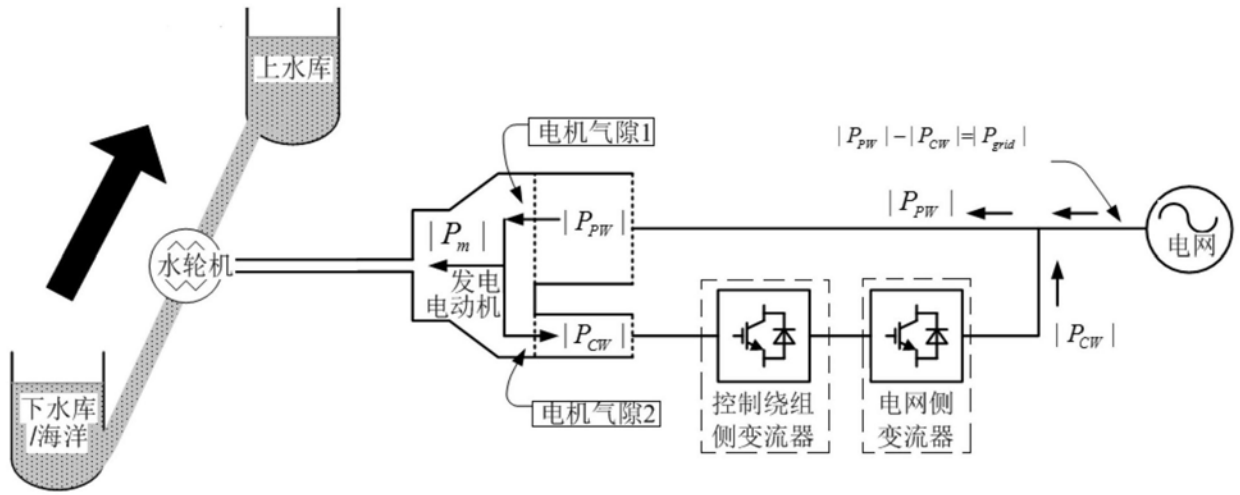


图5

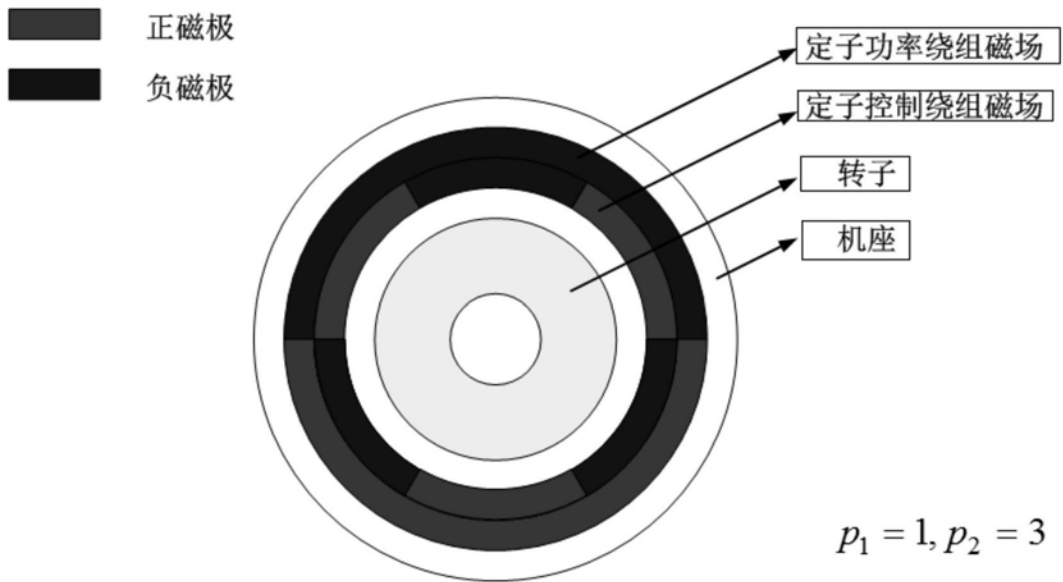


图6

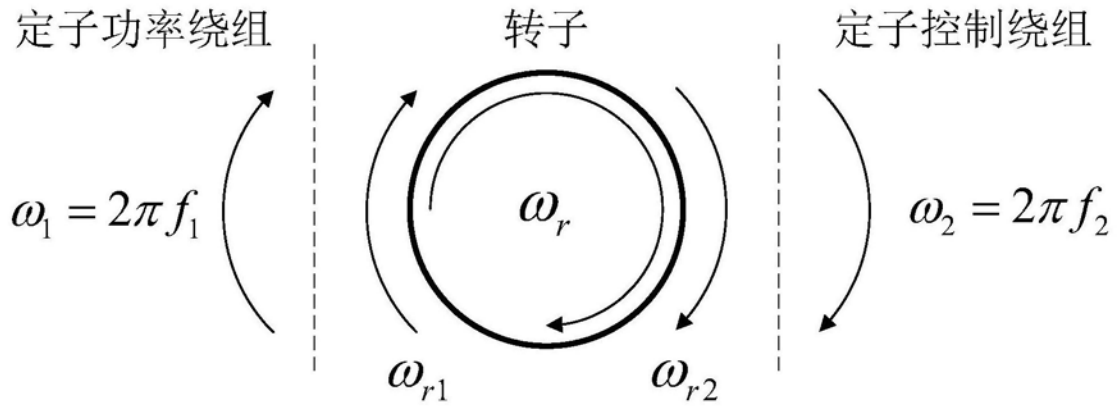


图7

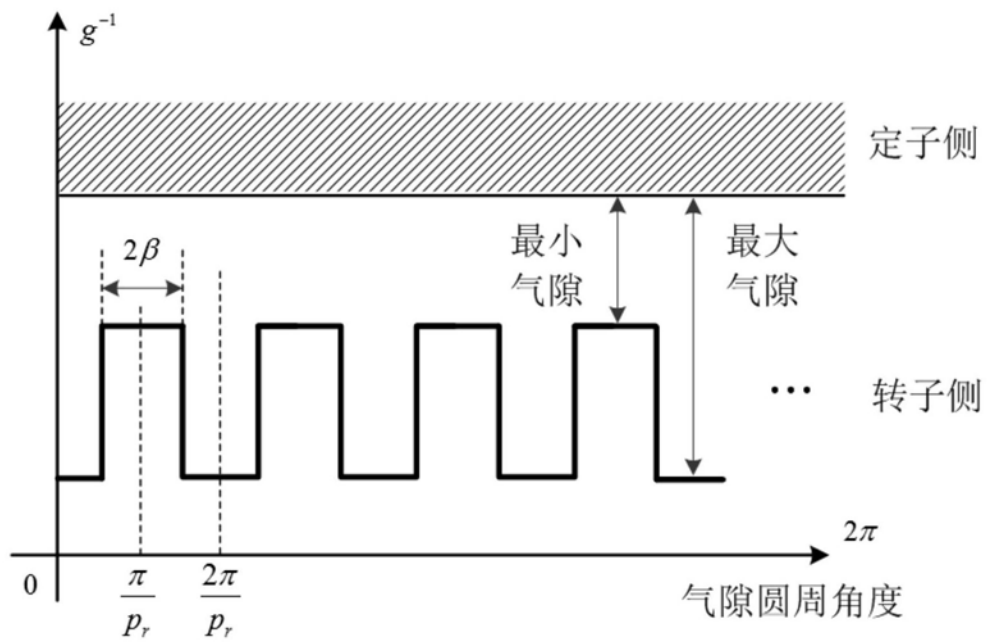


图8

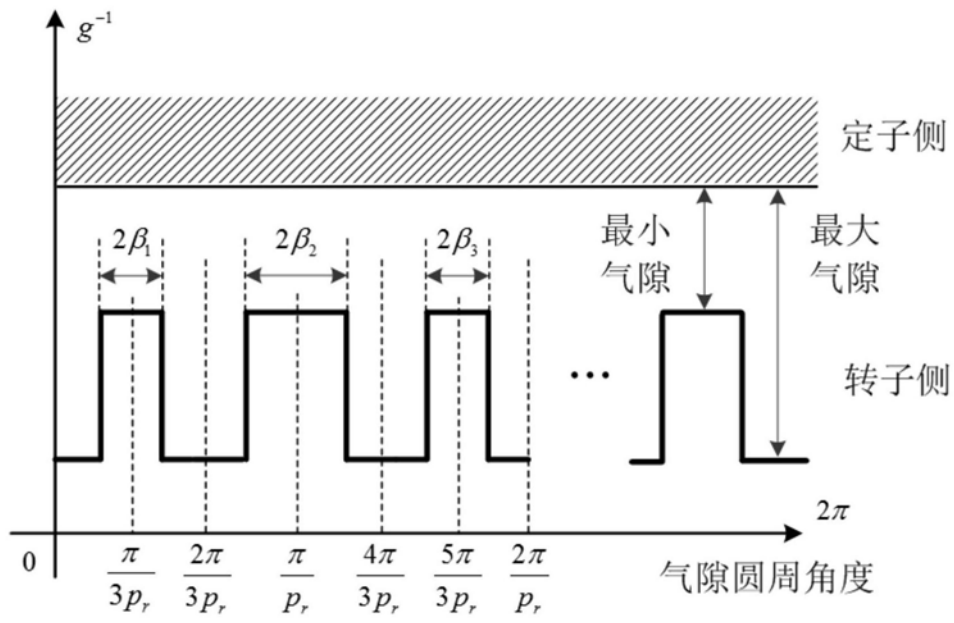


图9

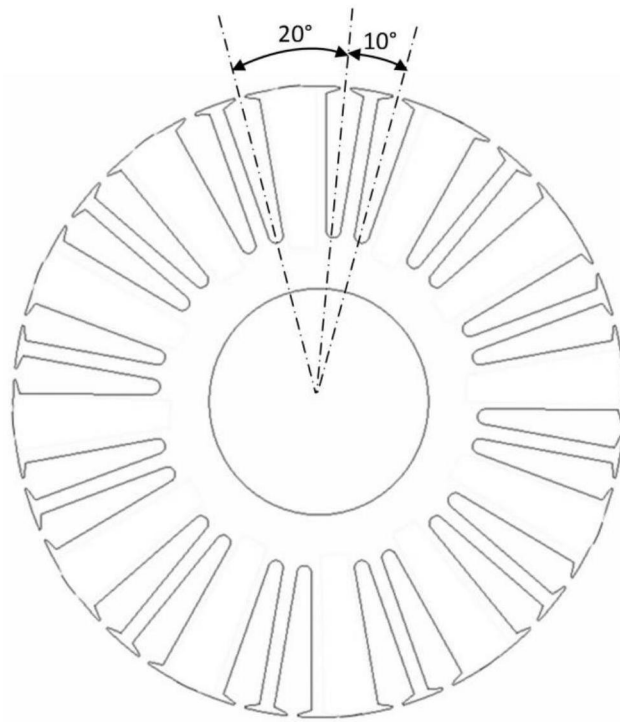


图10

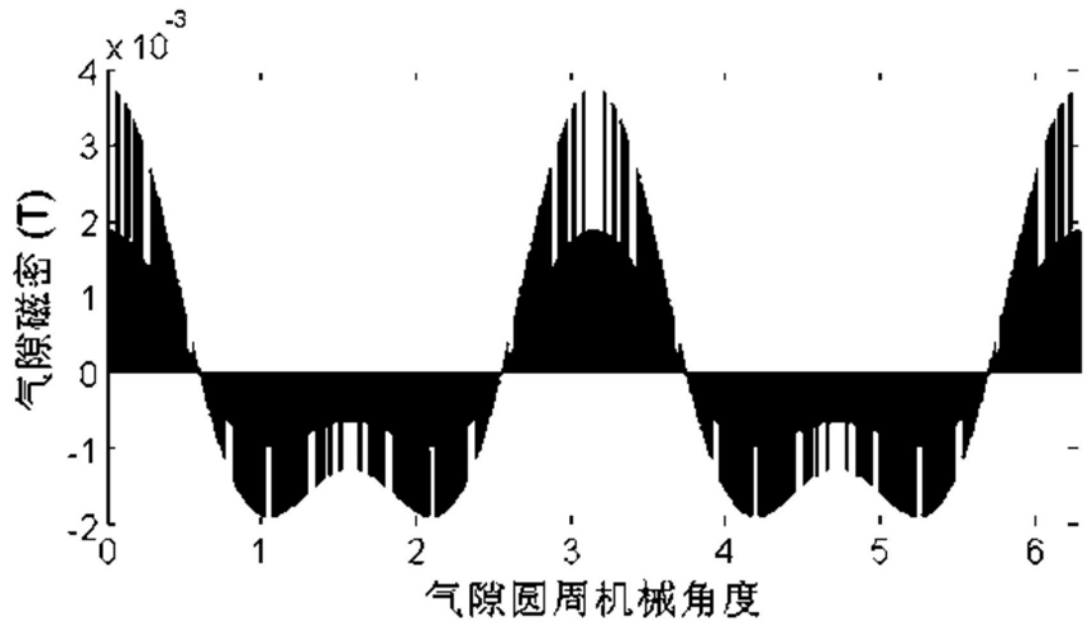


图11

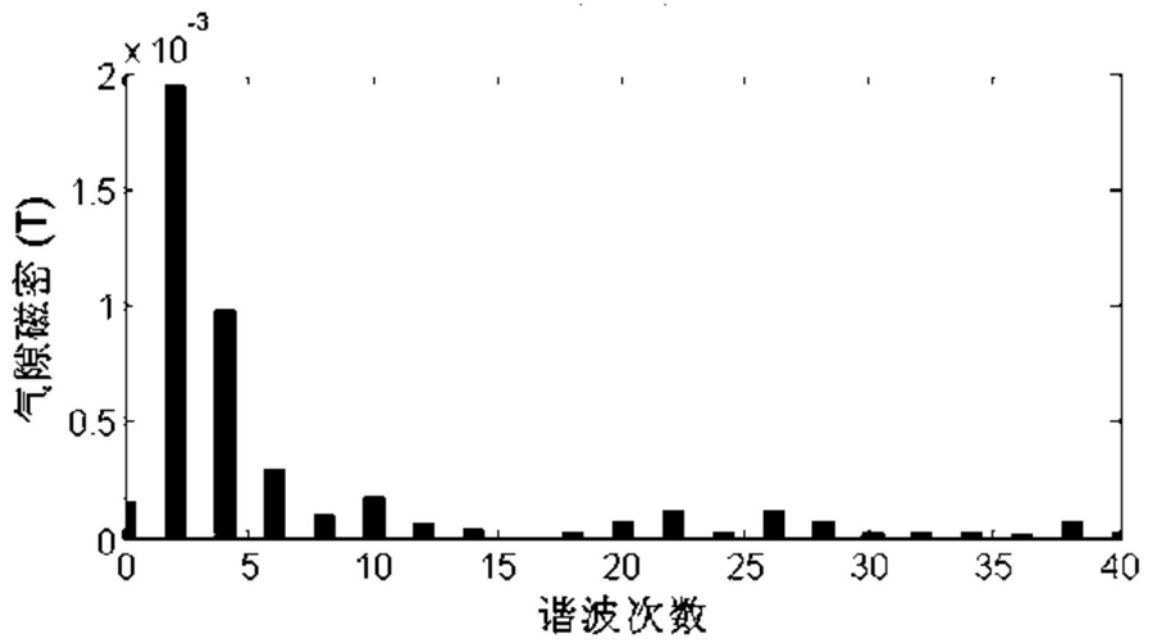


图12