

# 低速大转矩永磁同步电动机转矩特性研究

低速大转矩永磁同步电动机具有低速运行，输出转矩大的特点，能使电动机与负载直接相连，省去了中间过渡环节，有效地提升了系统效率。针对所设计电动机输出转矩不够大，效率低的问题，首先推导了输出转矩的公式，研究了影响电动机输出转矩大小的因素。其次，研究了影响电动机转矩脉动大小的参数。借助有限元仿真软件，分析了不同极槽配合时电动机的输出转矩大小和效率的变化情况，同时对不同极槽配合时电动机的转矩脉动变化情况进行了研究，综合分析各项性能，得出最优极槽配合。最后研究了不同定子裂比时电动机的输出转矩和效率的变化情况，得出最优定子裂比方案。有限元分析结果验证了理论分析的合理性。

杨江飞/安徽皖南电机股份有限公司

## 0 引言

近年来，随着工业水平的不断提高，对电动机驱动系统的要求也越来越高，包括减少能源消耗，提高电动机的可靠性，减少系统的维护费用等要求。低速大转矩永磁同步电动机能够在输出较大转矩的同时保持低速运行，在很多应用场合，包括矿山采矿，电梯，油田开采等场合，能够使电动机与负载直接相连，省去了中间的减速器，液力耦合器等机械装置，减少了设备的制造成本及维护费用，避免了中间环节的效率损耗。并且永磁同步电动机具有高效率，高功率因数的特点，功率密度也比较高，能进一步减小设备的总体积。低速大转矩永磁同步电动机在生产生活中得到越来越多的应用，受到广泛关注。

国内外许多专家学者已经对低速大转矩永磁电动机进行了研究，其中沈阳工业大学对油田用低速大转矩永磁电动

机进行了大量研究<sup>[1-4]</sup>。综合以上研究来看，要提升电动机的输出转矩可以从提高电动机的散热能力，增大电负荷与磁负荷等方面入手。此外，低速大转矩电动机输出转矩的脉动问题也需要得到解决，使电动机能够在转矩脉动足够小的情况下输出足够大的转矩。

本文首先推导了电动机输出转矩的公式，得出影响输出转矩大小的结构参数，并研究了影响转矩脉动的因素。针对低速大转矩永磁同步电动机过载能力不足，转矩脉动较大等问题，通过改变电动机极槽配合，调整电动机的定子裂比等方式优化电动机，并对比了电动机效率的变化情况。

## 1 输出转矩的影响因素分析

电动机输出转矩的好坏直接决定电动机性能的优劣，在很多应用场合不仅要求电动机输出转矩脉动足够小，以使电动机能够准确输出，而且要求电动机的最大输出转矩足够大，从而使电动机有足够大的过载能力。电动机是将电能转化成机械能的装置，本文所研究的低速大转矩永磁同步电动机的示意图如图1所示，图1中 $\delta$ 表示气隙长度， $h$ 表示永磁体厚度。在能量转化过程中，能量是通

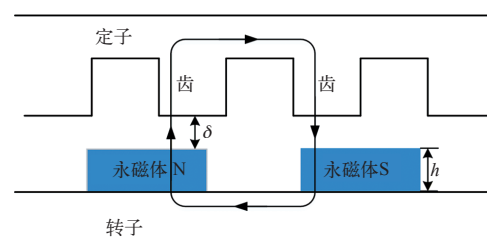


图1 永磁同步电动机结构示意图



杨江飞/工程师

### 关键词/Keywords

低速大转矩 ·  
电动机 ·  
输出转矩 ·  
效率 ·

过电磁能的形式在电动机定子、转子之间的气隙中进行传递的,图1中带箭头方框即为能量传递方向,由永磁体产生励磁磁场。从图1中可以看出电动机各部分的结构参数势必会对电动机的性能产生很大影响。

### 1.1 影响输出转矩大小的因素分析

对于三相永磁同步电动机,其输出转矩 $T$ 可由式(1)表示

$$T = \frac{60P}{2\pi n} = \frac{60 \times 3EI}{2\pi n} = \frac{90EI}{\pi n} \quad (1)$$

式中, $E$ 为电动机的相反电动势; $I$ 为电动机的相电流; $n$ 为电动机的转速<sup>[5]</sup>。

相反电动势可由下式计算得出

$$E = 4K_{Nm}K_{dp}fN\Phi \quad (2)$$

式中, $K_{Nm}$ , $K_{dp}$ 分别为气隙磁场的波形系数与电动机的绕组系数; $f$ 为电流频率, $f=pn/60$ ; $p$ 为电动机极对数; $N$ 为电动机的每相串联绕组匝数; $\Phi$ 为每极磁通。

电动机定子、转子的磁压降很小,在理论分析时可忽略不计,在永磁电动机中气隙中磁压降是由永磁体产生的,则气隙磁压降就与永磁体产生的磁压降相等,结合图1,可由式(3)表示

$$H_{\delta}\delta + H_m h = 0 \quad (3)$$

式中, $H_{\delta}$ 为气隙磁场强度; $H_m$ 为永磁体磁场强度。

当永磁体的退磁曲线是直线时,永磁体的工作磁通密度 $B_m$ 可表示为

$$B_m = B_r + \mu_0\mu_{rm}H_m \quad (4)$$

式中, $B_r$ 为永磁体的剩磁; $\mu_0$ 为真空磁导率; $\mu_{rm}$ 为永磁体的相对磁导率。

联立式(3)、式(4),并且忽略漏磁时,气隙磁通密度 $B_{\delta}$ 与 $B_m$ 相等,可得下式

$$B_m = B_r - \mu_0\mu_{rm}\frac{H_{\delta}\delta}{h} = B_r - \mu_{rm}\frac{\delta}{h}B_{\delta} = B_{\delta} \quad (5)$$

当 $\mu_{rm}=1$ 时,可由式(5)计算出电动机的气隙磁通密度为

$$B_{\delta} = \frac{hB_r}{h+\delta} \quad (6)$$

电动机每极磁通为

$$\Phi = B_{\delta}\alpha_p\tau l_{ef} = \frac{hB_r}{h+\delta}\alpha_p\tau l_{ef} \quad (7)$$

式中, $\alpha_p$ 为极弧系数; $\tau$ 为极距,并且 $\tau=\pi D_{il}/2p$ ; $D_{il}$ 为定子内径; $l_{ef}$ 为铁心长度。

三相电动机相电流与线负荷 $A$ 存在以下关系

$$I = \frac{\pi D_{il}A}{6N} \quad (8)$$

联立式(1)、式(2)、式(7)和式(8)可得

$$T = \frac{\pi}{2}K_{Nm}K_{dp}\alpha_pA\frac{hB_r}{h+\delta}D_{il}^2l_{ef} \quad (9)$$

从式(9)可以看出,电动机各部分结构均会对电动机的输出转矩产生影响,包括电动机的绕组分布,铁心长度,永磁体尺寸,永磁体材料等。当电动机外径固定时,定子裂比也会对电动机输出转矩产生较大影响,此外定子裂比变化时,电动机的线负荷,磁负荷等均可进行调整,进而影响电动机的输出转矩。

### 1.2 影响转矩脉动的因素分析

对于电动机的输出转矩,不仅要求其值足够大,还要求其脉动足够小。特别是对于本文研究的低速大转矩电动机,由于电动机本身的转矩足够大,即使脉动所占比例很小,但实际数值的波动范围却很大,因此对于此类电动机需要采取措施将转矩脉动减小到一定范围内。

对于永磁电动机,转矩脉动包括由谐波引起的纹波转矩和由永磁体与定子齿相互作用引起的齿槽转矩。对于纹波转矩可通过调节绕组分布,优化控制方式等方法减小反电动势、定子电流中的谐波含量,进而达到减小纹波转矩的目的。齿槽转矩大小与电动机各部分结构密切相关,文献[9]经过推导后得出式(10)所示的齿槽转矩表达式。

$$T_{cog}(\theta) = \frac{\pi N_L L_{ef}}{4\mu_0}(R_2^2 - R_1^2) \sum_{n=1}^{\infty} n\lambda_{nN_L} B_{rnN_L} \sin(nN_L\theta) \quad (10)$$

式中, $N_L$ 为定子齿数与极数的最小公倍数; $R_1$ 和 $R_2$ 分别为转子外径与定子内径; $\lambda_{nN_L}$ 为与气隙磁导相关的量; $B_{rnN_L}$ 为无槽时气隙磁通密度; $\theta$ 为圆周方向的角度。

从式(10)可以看出能够通过调节电动机的极槽配合、定子裂比和铁心长度等方式减小电动机的齿槽转矩。

## 2 电动机结构对输出转矩的影响分析

### 2.1 电动机模型

本文所研究内容是针对一台37 kW-36极电动机进行的,其额定转速为23 r/min,额定转矩为15 363 N·m。以这台电动机为基础,通过改变电动机极槽配合,定子裂比等结构参数研究电动机输出转矩大小与脉动的变化情况,电动机基本参数见表1。图2为所研究电动机的初步仿真模型,所选用的槽配合为108槽-36极。

表1 低速大转矩电动机基本参数

| 参 数        | 数 值    |
|------------|--------|
| 额定功率/kW    | 37     |
| 额定电压/V     | 380    |
| 额定频率/Hz    | 6.9    |
| 额定转矩/(N·m) | 15 363 |
| 定子外径/mm    | 790    |
| 极数         | 36     |
| 气隙长度/mm    | 1.2    |

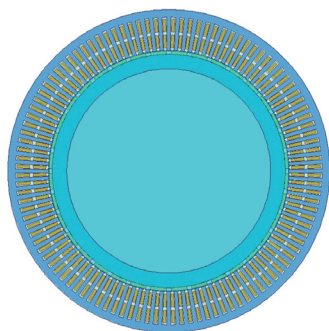


图2 有限元仿真模型

### 2.2 极槽配合对输出转矩的影响

电动机极槽配合变化时,电动机的绕组分布也会随之变化,因此电动机的绕组系数 $K_{Nm}$ 会有所变化。此外,当电动机尺寸不变,槽数变化时绕组匝数也会随之变化,此时电动机的线负荷 $A$ 会发生变化,从式(9)可以看出线负荷与绕组系数均会对电动机的输出转矩的大小产生影响。从式(10)可以看出,极槽配合变化会使电动机的

齿槽转矩发生变化,同时绕组分布会影响电动机的谐波分布,这又使得电动机的纹波转矩发生变化,因此不同极槽配合的电动机的转矩脉动会有较大差别。

本文选取54槽-36极,108槽-36极和135槽-36极三种极槽配合进行研究,其他尺寸不变,只对绕组进行调整。定子槽数变化时首先会使绕组系数 $K_{dp}$ 发生变化,绕组匝数变化后电动机线负荷也会变化。对于低速大转矩电动机,铜耗是电动机的主要损耗,对电动机效率会产生极大影响,调整绕组匝数时必须使电动机的槽满率满足基本要求,因此还要对导线线径进行调整,这会使电动机的铜耗发生变化,从而对电动机效率产生较大影响,在考虑使电动机输出转矩足够大时还要考虑到电动机的效率问题。因此,有必要对电动机的铜耗进行分析。

表2为电动机额定运行时不同极槽配合情况下某些参数的变化情况,可以看出54槽时电动机的绕组系数与108槽时绕组系数相等,54槽时线负荷最小,108槽时线负荷居中,135槽时电动机的线负荷最大。135槽时由于绕组跨距较其他两种槽配合大,端部用铜量更多,这会使铜耗增加,因此,此时电动机的铜耗最大,占额定功率的13.77%,显然这一值过大,54槽和108槽时铜耗相差不大,约占额定功率的10%。图3为不同极槽配合时电动机的最大输出转矩与效率对比,从图3中可以看出108槽时电动机的最大输出转矩最大,其次为135槽,54槽时电动机输出的最大转矩最小,但从效率分布来看,135槽电动机效率最低,为84.88%,54槽时和108槽时电动机的效率相差不多。

表2 不同极槽配合时参数变化

| 极槽配合     | 绕组系数 $K_{dp}$ | 线负荷 $A$ /(A/mm) | 铜耗 $p_{Cu}$ /W |
|----------|---------------|-----------------|----------------|
| 54槽-36极  | 0.866         | 40.68           | 3 881.03       |
| 108槽-36极 | 0.866         | 42.946          | 3 644.67       |
| 135槽-36极 | 0.910         | 46.1162         | 5 095.54       |

图4为不同极槽配合时电动机的齿槽转矩,从图4中可以看出,整数槽配合即108槽-36极时电动机的齿槽转矩最大,其值已超过额定转矩的

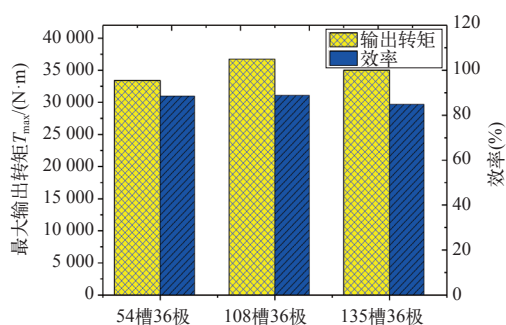


图3 不同极槽配合时电动机的最大输出转矩与效率

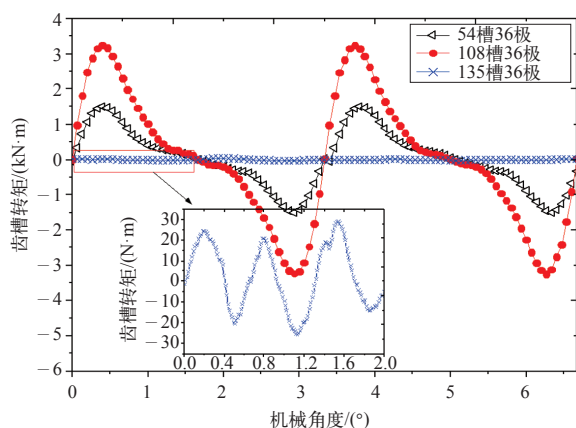
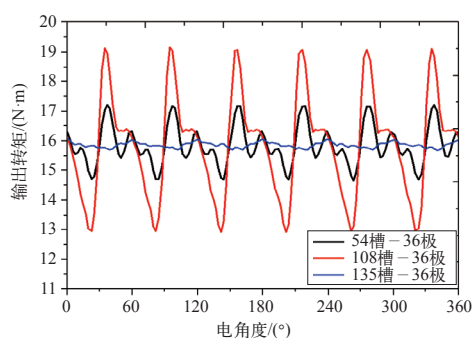


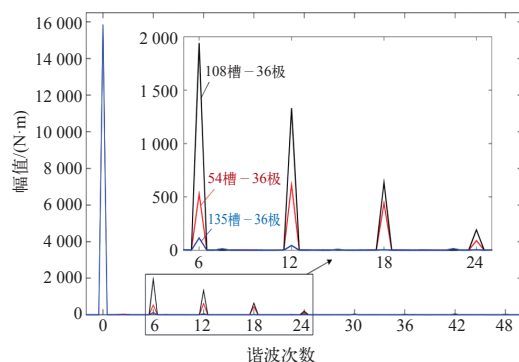
图4 不同极槽配合时电动机的齿槽转矩

20%。其次为54槽36极电动机，135槽时电动机的齿槽转矩最小，此时齿槽转矩已减少至接近于0，这与理论分析相符合。图5为电动机加额定负载时的输出转矩，输出转矩的波动是由齿槽转矩与纹波转矩共同作用引起的，输出转矩脉动的大小分布与齿槽转矩大小分布相同。对输出转矩进行傅里叶分解后，可得图5b所示转矩谐波分布图，由于所设置负载相同，因此转矩基波大小几乎相同，谐波成分均为6的倍数次谐波，特别是6次，12次，18次和24次谐波转矩较大。其中6次，12次谐波转矩主要由5次，7次和11次，13次气隙磁通密度谐波产生。

从以上分析可以看出，虽然54槽-36极电动机输出最大转矩与其余两种槽配合相比要小一些，但其转矩脉动在这三种槽配合中居中，此外，电动机的效率也足够高。108槽方案转矩脉动太大，会影响电动机的正常运行，135槽时电动机效率太低，不能使电动机经济运行，因此本文最终选取54槽-36极方案做作为研究对象。



(a) 额定负载时输出转矩波形



(b) 转矩谐波分布

图5 不同极槽配合时电动机的输出转矩

## 2.3 定子裂比对输出转矩的影响

定子裂比为定子铁心内、外径之比，这一参数变化会使电动机结构发生较大改变，进而影响电动机的性能，特别是对电动机的输出转矩会产生较大影响。本文所研究低速大转矩电动机外径不变，改变定子裂比只通过改变定子内径实现。当定子裂比减小时，定子内径减小，此时定子槽面积增大，可考虑通过增加绕组匝数增加线负荷，进而提升电动机输出转矩。当定子裂比增大时，定子外径增大，并且保持气隙长度不变，此时转子外径随之增大，可考虑增加磁钢用量，达到增大气隙磁通密度的目的，从而增大电动机磁负荷达到提升电动机输出转矩的目的。

图6为不同定子裂比与不同极弧系数时电动机的最大输出转矩变化情况，从图中可以看出电动机最大输出转矩随定子裂比变大呈增大趋势，当定子裂比为0.75时，输出转矩可达最大值。极弧系数变大时电动机的气隙磁通密度会随之增大，这能够增加电动机的输出转矩，但磁通密度需在饱和范围之内，从图6中可以看出当极弧系数为0.75

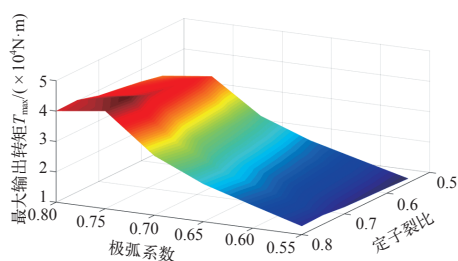


图6 不同极弧系数与不同定子裂比时电动机输出转矩

左右时电动机输出转矩最大。

定子裂比改变时会使电动机的齿槽结构以及磁场分布产生较大变化，因此需要对不同定子裂比时电动机的转矩脉动情况进行分析。图7为不同定子裂比时，电动机的齿槽转矩和额定状态下输出转矩波动的峰-峰值。从图7中可以看出，虽然定子裂比为0.65时电动机的齿槽转矩最小，但此时的转矩脉动却不是最小的，这是由于电动机此时的谐波含量较大导致的纹波转矩增大。定子裂比为0.7时，电动机的纹波转矩最小。

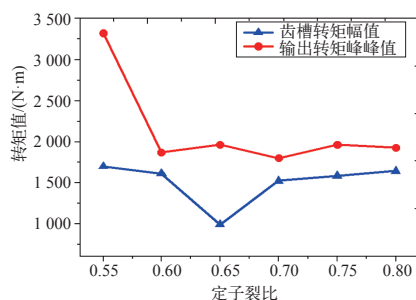


图7 不同定子裂比时电动机的转矩脉动

定子裂比变化时，能够通过调整电动机的磁负荷与电负荷提升电动机的输出转矩，绕组匝数，线径等会随之变化。在保持槽满率，永磁体极弧系数不变时，可得出如图8所示的不同定子裂比时电动机的铜耗和效率的变化曲线，可以看出随着定子裂比增大电动机的铜耗一直减小，电动机效率随之上升，但当定子裂比大于0.75时铜耗上升，电动机效率也下降。电动机铜耗与定子电流大小及电阻相关，定子裂比变化时这两个数值都发生变化，因此铜耗会有所变化。从仿真结果可以看出，电动机定子裂比为0.75时，电动机效率可达到最高。

从以上分析可以看出，当定子裂比为0.75，永磁体极弧系数也为0.75时电动机的最大输出转矩，

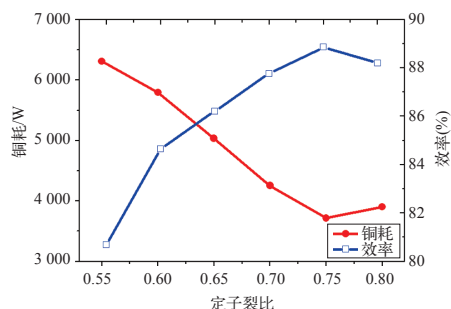


图8 不同定子裂比时电动机的铜耗与效率

转矩脉动，效率等性能最优。

### 3 结束语

本文研究了电动机结构变化对低速大转矩永磁同步电动机输出转矩的影响。首先推导了电动机输出转矩幅值大小和脉动大小的表达式，得出能够通过调整电动机结构，增加电动机的磁负荷和电负荷提升电动机的输出转矩，并且这些结构变化会对转矩脉动产生影响。以一台37kW-36极的低速大转矩永磁同步电动机为例，利用有限元软件分析了极槽配合与定子裂比对电动机输出转矩的影响，得出极槽配合为54槽-36极，定子裂比为0.75时电动机输出的转矩足够大，转矩脉动较小，同时电动机的效率也较高，为最优方案。

### 参考文献

- [1] 王帅. 有杆采油泵低速大转矩永磁电动机直驱技术研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2016.
- [2] 刘忠奇. 潜油泵直驱单元组合超细长永磁电机研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2015.
- [3] 杨帅. 组合式潜油螺杆泵永磁电机的结构设计和温度场分析 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2014.
- [4] 陈睿. 游梁式抽油机低转速大转矩稀土永磁电机的电磁设计分析 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2012.
- [5] 陈世坤. 电机设计上 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [6] Li Zhu, S Z Jiang, Z Q Zhu, et al, Analytical Methods for Minimizing Cogging Torque in Permanent-Magnet Machines [J]. IEEE Trans Magn, 2009, 45 (4): 2023-2031.

(收稿日期: 2018-02-10) **EA**