

低速永磁风力发电机的参数分析及优化设计

摘要: 文章讨论了低速永磁同步风力发电机的设计特点, 为了有效地减少阻力矩, 采用分数槽绕组, 为减少漏磁通, 采用瓦片型和放射状的永磁体安装结构, 并重点对结构参数与运行性能之间的内在关系进行了参数分析, 为风力发电机本体的优化设计打下基础。在一定安装尺寸的限制下, 以电机效率作为优化目标, 采用基于混沌理论的最优化算法获取风力发电机的最大输出效率。

0引言

风力资源是一种清洁、安全和可再生的绿色能源。与传统的同步发电机相比, 永磁同步发电机有许多突出的运行性能。它们结构简单、体积小、损耗低、效率高, 同时外形和尺寸是可变的等。低速永磁同步发电机是风力资源开发中的重大进步。风力发电机的转速可以通过调整叶片的角度而得到控制。研究表明, 永磁电机的电磁性能与每极每相槽数、磁极形状、定子槽数和槽的开口等有直接关系。转矩脉动可以通过多种方法降低, 如采用分数槽绕组, 本文中所采用的低速永磁同步发电机是分数槽绕组的一个典型应用。

本文先用传统的设计方法计算了一个可行的电磁方案, 同时得到了一些性能曲线, 并对低速永磁同步发电机的设计参数进行了讨论, 通过参数分析得到了一些相应变参数下电机的性能曲线。参数分析是为了推演结构参数和运行性能之间的内在联系, 这是参数优化的基础。用混沌优化算法对电机的结构参数进行了优化设计。

1永磁发电机的基本电磁设计

低速永磁发电机的基本电磁设计包括: 定子铁心设计、定子绕组设计及转子永磁体设计、转子设计等。为了有效地减少阻力矩, 采用了分数槽绕组。为了减少漏磁通, 对由稀土永磁体组成的磁极采用了瓦片型和放射状的安装结构。

低速永磁发电机的定子结构和传统电励磁电机的相似。根据电励磁电机的理论, 采用定子斜槽、转子斜极和分数槽降低由齿槽效应引起的阻力矩。实践证明, 采用斜槽是减小阻力矩最有效的方法。每极每相槽数为:

$$q = Z_s / (2mp) = a + c/d \quad (1)$$

其中, Z_s 为定子槽数; m 为绕组相数; p 为极对数; a 为整数; c/d 为不可约分数。

低速永磁发电机的转子结构不同于传统的电励磁同步发电机, 不能简单地将电励磁电机的绕组换成永磁体, 还应考虑磁路的合理配置。由稀土永磁体组成的10个瓦片状的磁极在转子表面构成放射状的结构安排被证明是最佳的。

永磁体体积的确定对永磁电机的经济技术指标具有重要意义。额定功率和永磁体体积之间的关系为:

$$V_m = 51 \times \frac{P_N \sigma K_{ad} K_{Fd}}{f K_L K_\phi C (BH)_{\max}} \times 10^6 \quad (2)$$

其中, P_N 为发电机的额定功率; R 为漏磁系数; K_{ad} 为d轴电枢磁势折算系数; K_{Fd} 为转子磁位相对于d轴电枢磁势的比值; f 为频率; K_L 为电压系数; K_ϕ 为波形系数; C 为永磁体的利用率; $(BH)_{\max}$ 为最大磁能积。

用传统的方法设计可行的电磁设计方案, 给出低速永磁同步发电机的主要参数。磁极数为10; 转子位置为内转子; 同步转速为100r/min; 控制类型为AC; 额定输出功率为0.6kW; 额定电压为380V。基本电磁性能如图1和图2所示。

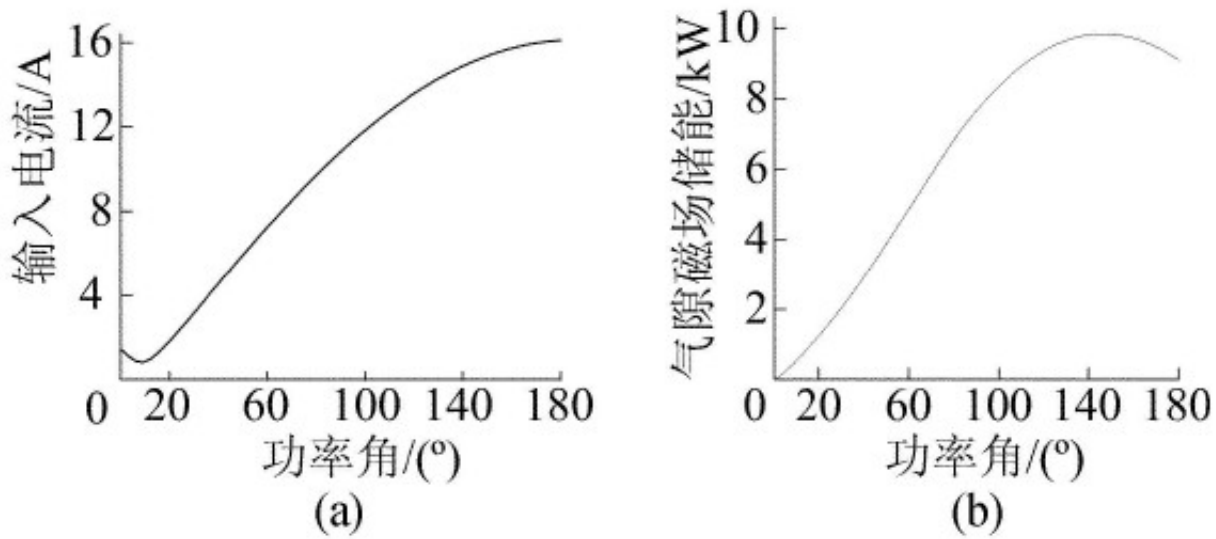


图 1 输入电流和磁场储能随功率角的变化

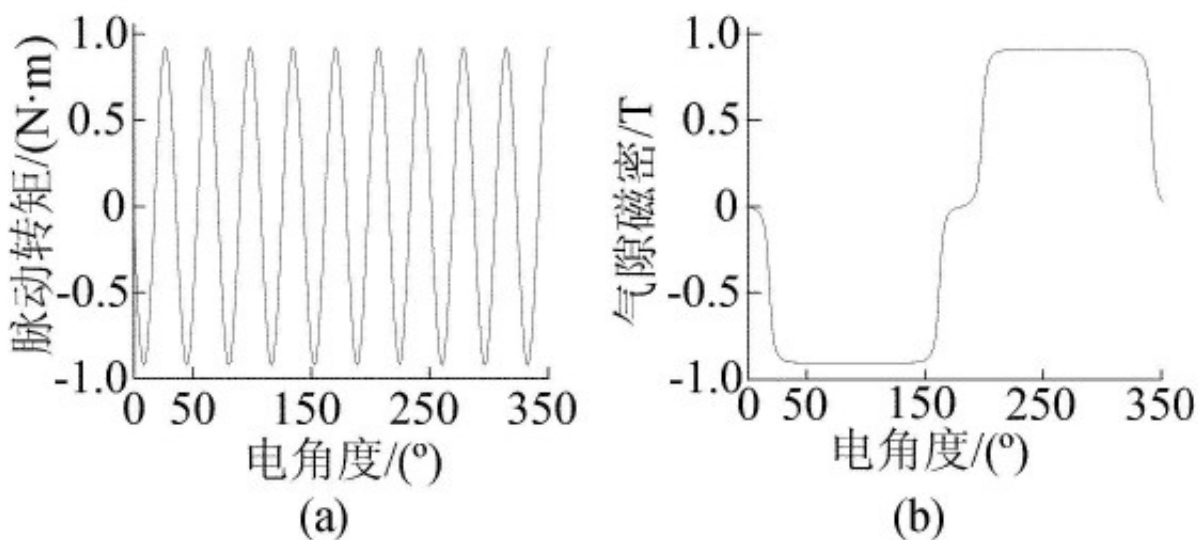


图 2 脉动转矩和气隙磁密随电角度的变化

2 低速永磁同步发电机的参数分析

以发电效率作为电机设计性能考核的主要目标之一。当一些主要的结构参数线性变化时，电机的效率也相应的变化，从而得到了参数分析的结果。

2.1 参数分析主要结构参数的选择

通常，电机常数 C_A 可表示为：

$$C_A = \frac{D^2 l_{ef}}{P' / n} = \frac{6}{\alpha_p'} \frac{1}{K_{Nm} K_{dp}} \frac{1}{AB \delta} \quad (3)$$

其中， D 为电枢直径； l_{ef} 为电枢计算长度； P_c 为计算功率； n 为转速； A_{pc} 为计算极弧系数； K_{Nm} 为气隙磁场波形系数； K_{dp} 为电枢绕组系数； A 为线负荷； B_D 为气隙磁通密度。显然电机的主要结构参数取决于 A 和 B_D ，则 $D2l_{ef}$ 可由(3)式计算出。在选定了比率 l_{ef}/D 后，就可以计算出永磁体的长度和直径，同时可以得到相应的效率，所以选择转子的长度 l_{ef} 和转子的直径 D 作为主要的分析参数。

计算极弧系数 A_{pc} 的定义式为 b_i/S ，其中 b_i 为极弧长度； S 为极距。 A_{pc} 影响电枢反应的程度，所以 A_{pc} 也可被选为一个主要的分析参数。

永磁体的厚度 h_M 和宽度 b_M 的计算式为：

$$b_M = D \sin(1 - \alpha'_p) \pi / 2 \quad (4)$$

$$h_M = (0.35 \sim 0.60) b_M \quad (5)$$

气隙磁通由(4)式和(5)式决定，所以 h_M 和 b_M 也可被选为主要的分析参数。

综上， l_{ef} 、 D 、 A_{pc} 、 h_M 、 b_M 可被选为主要分析参数，其变化范围和步长见表1所列。

表 1 所选参数变化范围和步长

参 数	变化范围	步 长
l_{ef}/mm	135~ 145	1
D/mm	217.5~ 218.5	0.1
α'_p	0.75~ 0.85	0.01
b_M/mm	10~ 20	1

2.2 主要参数的单因子及多因子分析

主要参数小幅度变化时，输出性能也随着变化，输出效率曲线如图3所示。

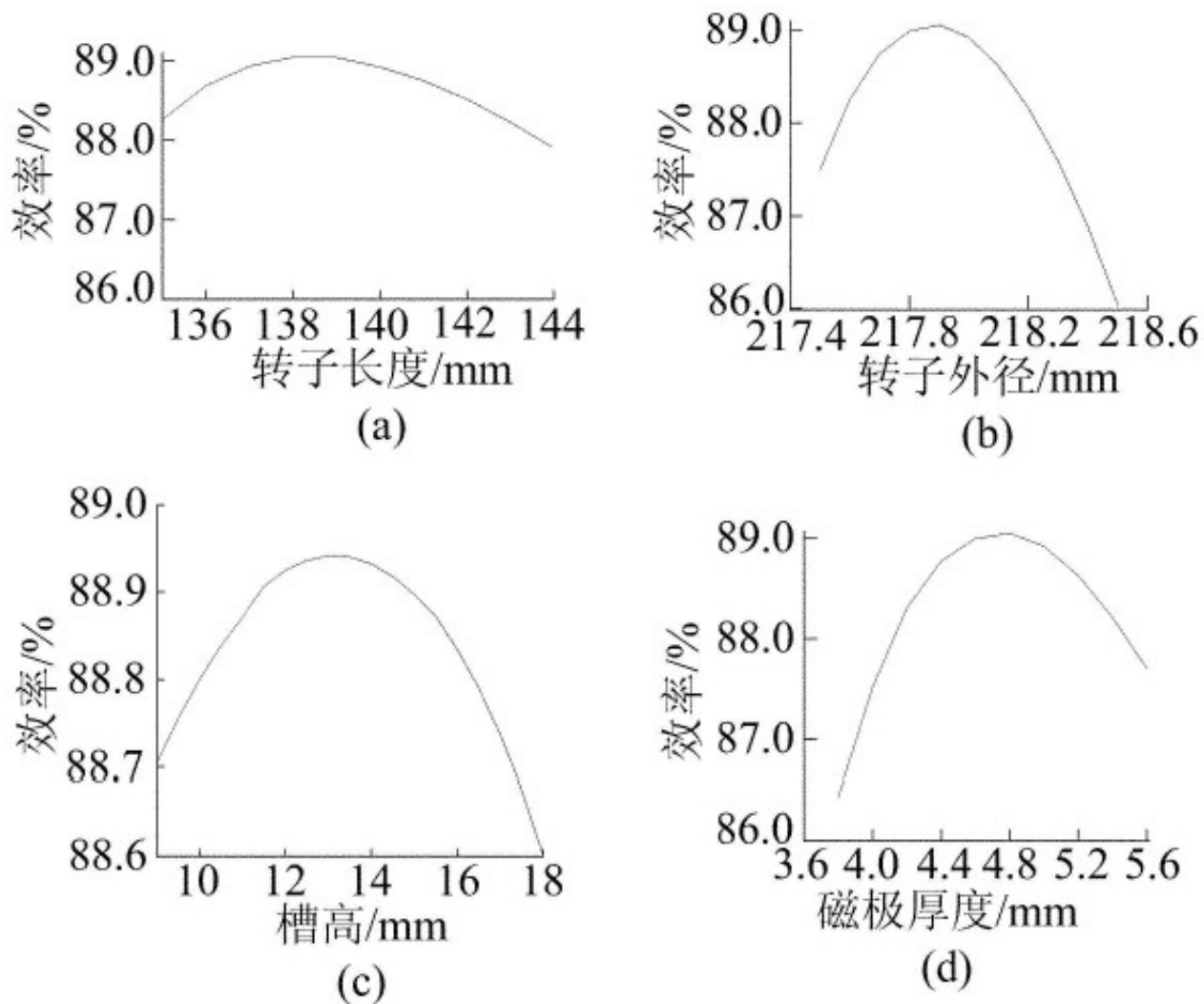


图 3 效率随着参数的变化

有许多输出性能随着主要结构参数变化而变化的曲线, 本文选用了4条曲线。根据这些数据可以得到随着单变量的效率变化特性, 这是参数优化的基础。

电机设计中经常需要处理各种矛盾, 这主要是指在统一性能指标中, 各参数变化导致的性能变化趋势不同, 最终的选择是一个折中的结果。多因子分析结果如图4所示, 主要是两因子分析。从以上单因子分析和多因子分析结果可以看出, 结构参数对电机效率的影响是高度非线性的, 从多参数、非线性的计算模型获取理想的设计结果需要高效的智能优化算法。

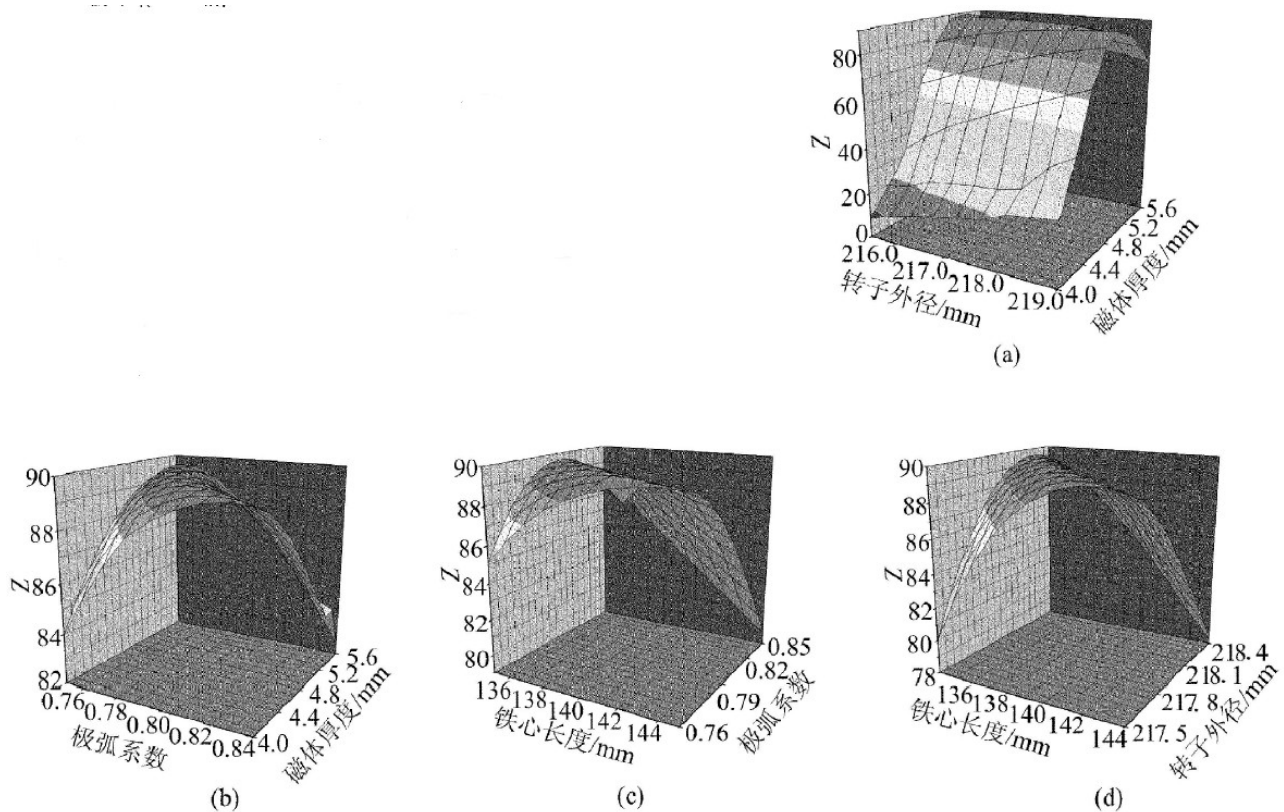


图4 效率随多因子参数的变化

3基于混沌优化算法的优化设计

混沌优化算法是一种新的随机搜寻算法，用混沌优化算法对电机的结构参数进行优化设计。基本电磁设计可由一个简单的函数关系式表示，即

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (6)$$

其中， y 为输出性能参数； x_i 为输入结构参数。

为了对永磁发电机进行优化设计，将永磁电机的输出效率作为最优化目标，而主要的结构参数选为独立的输入变量，如转子长度 l_r ，转子直径 D ，气隙长度 D ，计算极弧系数 α_p ，永磁体的厚度 h_M 和永磁体的宽度 b_M 。永磁发电机的优化设计模型可表示为：

$$\max y = f(l_r, D, \alpha_p', h_M, b_M) \quad (7)$$

搜寻空间的选择基于基本电磁设计的结果。通过对参数空间的整体和局部搜寻，得到最优化参数结果。基于混沌的优化流程如图5所示。

由混沌最优搜寻算法得出的结果见表2所列。最终结果倾向于最佳优化目标，且考虑了实际的制造能力。表中， W 为全局搜索； L 为局部搜索； R 为最后的圆整结果。

根据表2可以得出，最佳优化结果是一致的，同时也证明了最佳优化结果的有效性。

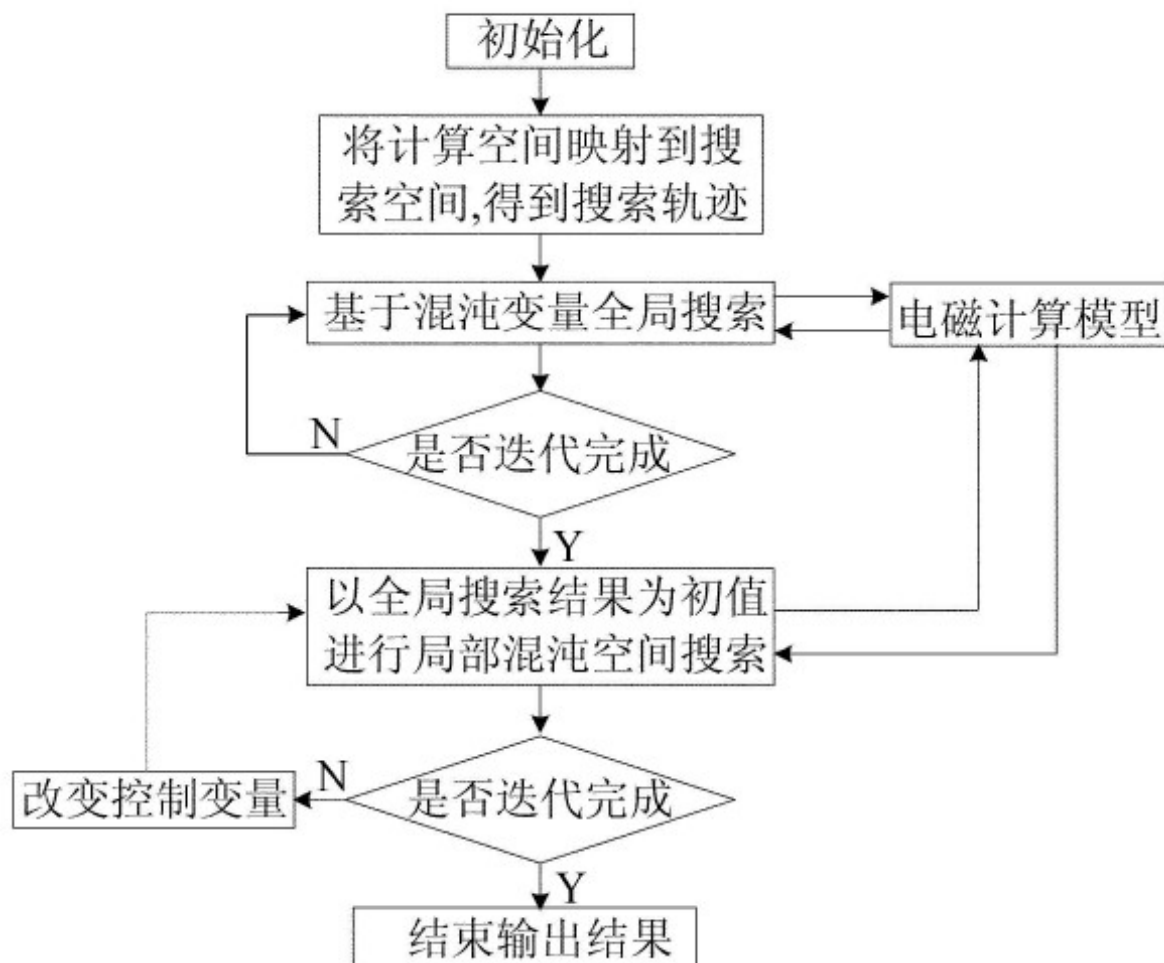


图 5 基于混沌的优化流程图

表 2 优化结果

对象	l_{ef}	D	α_p'
W	140.335 6	218 103 7	0 799 389
L	140.336 5	218 102 1	0 799 391
R	140	218	0 8
对象	h_M	b_M	$\eta/\%$
W	5 002	14 124 3	89 10
L	5 013	14 237 6	89 76
R	5	14	89 50

4结束语

本文对户用型永磁同步低速风力发电机的主要结构参数选择、参数分析及优化设计进行了阐述，并得出了最优化的设计结果，同时以下方面还需要做进一步研究：¹ 影响电机经济技术的指标除了结构参数外，还有电机外加激励及整个辅助控制系统，所以完整的优化设计应该是系统的优化技术，这有待于与控制技术一起进行；² 优化的好坏取决于电磁计算的准确程度，所以优秀的计算模型是电机优化设计的基础。借助于大量实验数据，获得准确计算模型是优化设计具有实用价值的前提，也是后续研究的方向之一。(何庆领，王群京合肥工业大学电气与自动化工程学院，安徽合肥230009)

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/58651.html>