

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.12.025

大容量外转子永磁风力发电机组 转子结构的轻量化设计*

张 坤¹, 于慎波^{1*}, 翟凤晨¹, 卢华兴², 刘 伟²

(1. 沈阳工业大学 机械工程学院, 辽宁 沈阳 110870; 2. 国家电投集团 科学技术研究院有限公司, 北京 100029)

摘要: 3 MW 永磁风力发电机组外转子结构重量较大, 增加了机组负荷且影响机组的安全性, 针对这一问题, 对风力发电机组外转子结构的载荷特性和应力变形进行了研究。提出了拓扑优化、多目标灵敏度分析、响应面优化相结合的转子轻量化方法, 通过变密度法建立了变形能最小化的转子优化模型, 对转子模型进行了初步的拓扑优化设计; 对转子模型进行了参数化建模, 通过灵敏度分析确定了对转子结构影响较大的结构尺寸参数; 结合响应面优化方法筛选出了最优目标参数, 实现了转子最优结构设计目标。研究表明: 在保证结构强度和变形满足要求的条件下, 经轻量化设计后结构整体减重 4 799 kg, 占总重量的 26.5%。

关键词: 风力发电机; 拓扑优化; 灵敏度分析; 响应面优化; 轻量化设计

中图分类号: TH122; TM351

文献标识码: B

文章编号: 1001-4551(2020)12-1547-06

Lightweight design of rotor structure of large capacity outer rotor permanent magnet wind generator

ZHANG Kun¹, YU Shen-bo¹, ZHAI Feng-chen¹, LU Hua-xing², LIU Wei²

(1. College of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. Research Institute of Science and Technology Co., Ltd., State Power Investment Group, Beijing, 100029, China)

Abstract: Aiming at the problems that the weight of the outer rotor structure of 3 MW permanent magnet wind generator was large, which increased the load of the unit and affected the safety of the unit, the load characteristics and stress deformation of the outer rotor structure of the wind generator unit were studied. The rotor lightweight method combined with topology optimization, multi-objective sensitivity analysis and response surface optimization was proposed. By using the method of variable density, the optimization model of rotor with minimum deformation energy was established, and the preliminary topology optimization design of the rotor model was carried out. The parametric modeling of the rotor model was carried out, and the structural size parameters which had great influence on the rotor structure were determined by sensitivity analysis. Combining with the response surface optimization method, the optimal parameters were selected to achieve the optimal structural design goal of the rotor. The results indicate that under the condition that the structural strength and deformation meet the requirements, the overall weight loss of the structure is 4 799 kg, which accounts for 26.5% of the total weight.

Key words: wind turbines; topology optimization; sensitivity analysis; response surface optimization; lightweight design

收稿日期: 2019-11-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175350)

作者简介: 张坤(1993-), 男, 河北唐山人, 硕士研究生, 主要从事永磁同步电机振动噪声抑制方面的研究。E-mail: k_personally@163.com

通信联系人: 于慎波, 男, 教授, 博士生导师。E-mail: yushenbo@126.com

0 引 言

随着风力发电机组装机容量的急剧增加,发电机组的体积和质量也随之上升,带来发电机组在制造、加工、运输、安装上的困难,电机的轻量化设计成为有待解决的难题。

针对电机轻量化问题,国内外研究人员进行了大量探索。文献[1,2]通过对电机轭部磁路分析,优化了轭部设计,提高了电机的转矩密度,达到了电机减重目的。文献[3,4]电机设计采用超导技术,转子磁极使用超导磁体,定子线圈采用 MgB_2 超导绕组,采用超导技术可实现无轭部定子设计,提高了电机功率密度,减少了电枢损耗,减轻了电机重量。

以上电机减重方法之出发点为优化电机电磁性能,通过较少绕组来减小磁极重量,并未从机械角度去考虑电机减重。文献[5,6]利用激光增材先进制造技术,将粉末粘结剂喷射在由晶格结构设计的兆瓦级发电机表面,以减轻重量且能保证强度;晶格结构能大大减轻结构重量,但激光增材会增加转子制造难度,提高转子的制造成本。文献[7]为 7 MW 风力发电机定子设计了一种新型的抗定子变形结构,提高了机座在径向方向上的抗拉强度,减小了机座在径向方向上的变形。

在满足大容量外转子永磁发电机转子设计要求基础上^[8],笔者综合考虑风力发电机工况特性以及电磁力情况,使用拓扑优化、多目标灵敏度分析、响应面优化相结合的方法,探索风力发电机转子的快速轻量化设计。

1 发电机设计参数

风力发电机组设计参数如表 1 所示。

表 1 风力发电机组设计参数

参数	数值	参数	数值
槽数	288	极数	176
定子外径/mm	4 800	转子外径/mm	4 952
定子内径/mm	4 428	转子内径/mm	4 852
轭部厚度/mm	70	额定转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	14.5
永磁体厚度/mm	20	气隙长度/mm	6

2 外转子结构有限元分析

风力发电机转子运行中除受自身重力外,还承受叶片通过轮毂传递的力、转矩、风力发电机内部电磁力(计算得出径向电磁力幅值 $161\,226\text{ N/m}^2$)。叶片通过轮毂作用到转子的力,沿定子轴传递到塔架,对转子作用较小,故设计中只考虑轮毂传递转矩对转子的作用。风力发电机外转子主要依靠轴承支承,转子约束面为内侧法兰盘面。

笔者对转子结构进行有限元分析,得到了转子的

变形、应力图,如图 1 所示。

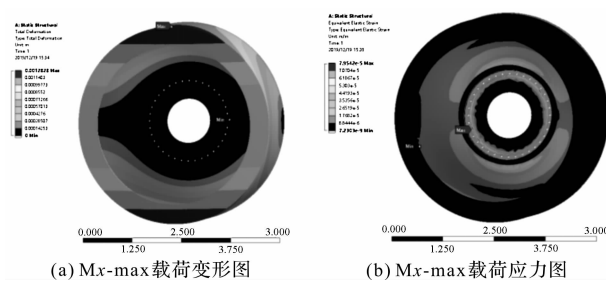


图 1 变形、应力图

不同载荷分析汇总如表 2 所示。

表 2 不同载荷分析汇总

转矩载荷		变形/mm	应力/MPa
M_x	Max	1.282 8	37.053
	Min	1.287 9	20.948
M_y	Max	1.284 6	16.741
	Min	1.266 7	7.53
M_z	Max	1.284 5	13.741
	Min	1.281 0	14.351

由图 1 可得:(1)转子最大变形为转子最顶端位置,变形方向为 Z 轴负半轴,主要因为自身重力和电磁力同向作用;(2)极限载荷最大变形量为 $1.287\,9\text{ mm}$,占气隙长度的 21.5%。

因此,转子结构必须进行优化设计。转子前端盖与外圈变形较小,笔者设定二者为优化区域。

3 拓扑优化

结构的拓扑优化技术可以在给定载荷及约束条件下,寻找到使结构设计目标最优化的材料密度分布,使所设计结构利用材料率更高、受力分布更合理^[9]。

拓扑优化最终决定了每个设计单元中材料的存在,以设计变量的二进制(0-1 或空隙-实体)形式呈现。大规模离散问题不允许使用数值方法求解,因此通过引入插值方案,将离散问题简化为连续问题^[10]。

笔者以风力发电机转子结构为优化对象,采用变密度法,以变形能最小化为目标,限制体积分数为约束条件进行拓扑优化,即:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{minimize: } \int_{\Omega} b \cdot u d\Omega + \int_{\Gamma} t \cdot u d\Gamma \\ \text{subject to: } \int_{\Omega} \sigma(u) : d(\delta_u) d\Omega = \\ \int_{\Omega} b \cdot \delta_u d\Omega + \int_{\Gamma} t \cdot \delta_u d\Gamma, \delta_u \in u_0 \\ \int_{\Omega} \rho d\Omega \leq \bar{V} \\ 0 \leq \rho_{\min} \leq \rho \leq 1 \end{array} \right. \quad (1)$$

式中: u —位移矢量; b —体力; t —力矢量; $\sigma(u)$ —依据位移矢量的应力矢量; δ_u —虚拟位移矢量; u_0 —允许动力学运动空间; ρ —常规密度场, 作为设计变量; $\rho_{\min}$ —密度下限。

使用变密度法 (SIMP) 模型的插值方案, 避免离散求解问题。SIMP 法以幂指数形式表达方程:

$$E_m = x_n^p E_0 \quad (2)$$

式中: E_m —第 m 个单元弹性模量; E_0 —实体单元弹性模量; p —惩罚因子; x_n —相对密度。

当 $x_n = 1$, 即当前单元相对密度为 1, 表示该单元被填满材料, 可承受载荷; $x_n = 0$ 表示单元相对密度为 0, 该单元无材料填充, 无法承受载荷。SIMP 法模型中加入的惩罚系数 p , 可以对介于中间密度的材料进行惩罚。能够使材料单元密度值更加快速地向“0”或“1”聚集^[11,12], 使计算模型更好地趋近离散变量的拓扑优化模型。

为方便载荷的施加, 拓扑优化中使用 Rbe3 单元, 约束为转子法兰盘的 6 个自由度, 得到最佳拓扑优化方案, 优化中添加拔模约束、棋盘格参数、周向循环对称约束; 体积分数为分析约束条件。

前端盖经过 36 次拓扑优化迭代计算, 转子筒经过 37 拓扑优化迭代计算, 得到拓扑优化计算结果, 如图 2 所示。

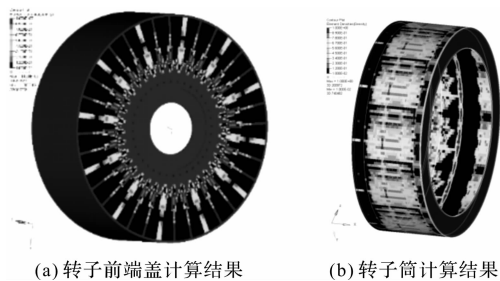


图 2 拓扑优化结果

图 2 中, 深色单元表示单元密度较高, 承受载荷, 需要保留材料; 亮色单元表示单元密度较低, 可以减少或去除材料^[13]。

取体积分数 0.3 的优化结果, 得到的材料分布图如图 3 所示。

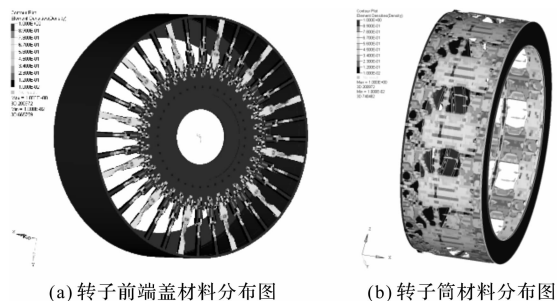


图 3 体积分数 0.3 材料分布图

通过拓扑优化, 能清楚地了解结构中的优化区域, 更有目的性地进行多目标灵敏度、以及尺寸优化分析^[14,15]; 根据材料分布, 确定转子优化区域, 明确优化方案。

4 发电机转子结构优化

4.1 尺寸参数确定

根据拓扑优化结果, 又由于发电机运行在海上, 笔者采用密闭设计, 且不能完全按照拓扑优化结果将材料全部去除。参考材料分布图, 前端盖圆盘优化方案为减少原始设计厚度, 内侧添加加强筋。在分析模型中笔者保持原端盖厚度, 采用切除材料方案, 能更好地对端盖结构进行优化, 端盖内侧未去除材料即为加强筋; 转子外筒重新设计永磁体内嵌式结构。

参数化建模如图 4 所示。

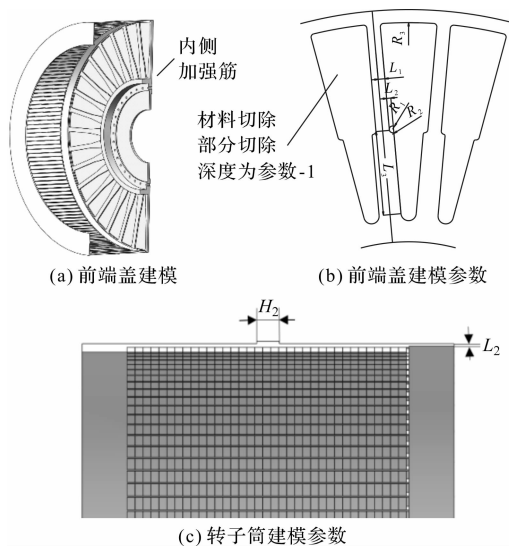


图 4 参数化建模

4.2 灵敏度分析

灵敏度分析是通过数学的方法对输入及输出参数的关系进行分析, 然后依据计算得到的各个参数之间的变化规律, 确定对结构影响较大的参数为优化参数^[16]。笔者使用有限差分法获得灵敏度参数。中心差分公式为:

$$\frac{\partial y}{\partial x_j} \approx \frac{y(x^{j+}) - y(x^{j-})}{2\Delta x_j} \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

式中: $x^{j+} = (x_1, x_2, \dots, x_{j-1}, x_j + \Delta x_j, x_{j+1}, \dots, x_m)$; $x^{j-} = (x_1, x_2, \dots, x_{j-1}, x_j - \Delta x_j, x_{j+1}, \dots, x_m)$; Δx_j —设计变量的微小摄动量; y —目标响应。

笔者将尺寸参数输入, 通过计算得到输入参数对变形、应力、质量的灵敏度, 如图 5 所示。

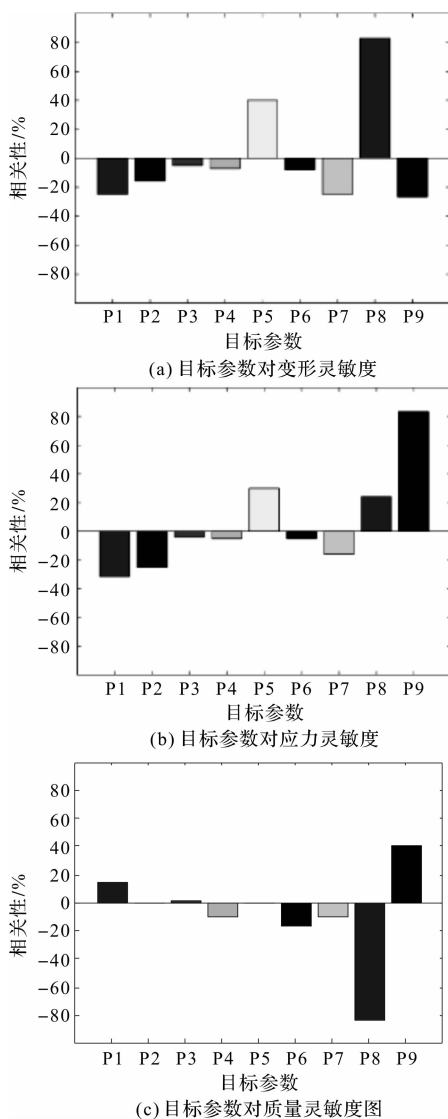


图 5 灵敏度图

由图 5 可知,目标参数对风力发电机转子结构影响存在差别,其中, P_1 、 P_2 、 P_5 、 P_8 、 P_9 对形变影响较大, P_8 影响最大,即转子外端盖切除材料越多,变形越大;对应力影响程度较大的参数为 P_1 、 P_2 、 P_5 、 P_8 、 P_9 ,对质量影响最大的参数为 P_8 ,即 H_1 参数越大转子质量越小,符合实际情况。

根据输入参数对目标参数的灵敏度值的大小,笔者筛选出对目标参数影响大的参数 P_1 、 P_2 、 P_6 、 P_8 、 P_9 ,对参数建模中标注的 L_1 、 L_2 、 R_3 、 H_1 、 H_2 尺寸进行响应面尺寸优化。

4.3 响应面模型建立

在多目标优化中,目标之间相互冲突,很难找到所有目标均为最优的最优解,而是存在一系列有效解。响应面法是结合数学计算与统计算法^[17],生成不用实验参数组合构成响应面模型,最后通过优化算法得出全局最优解。响应面优化方法采用拉丁超立方试验方法,

才提高分析效率^[18]。

响应面优化通常采用二阶数学模型,对于 e 个变量,二次多项式响应模型为:

$$f(x) = a_0 + \sum_{i=1}^e a_i x_i + \sum_{i=1}^e a_{ii} x_i^2 + \sum_{L=i+1}^e a_{ij} x_i x_{ij} \quad (4)$$

式中: x —设计变量, $x = (x_1, x_2, \dots, x_e)$; a_0, a_i, a_{ii}, a_{ij} —待定系数。

$$\begin{cases} a = (X^T X)^{-1} X^T Y \\ G = (g^{(1)} \dots g^{(k)} \dots g^{(n)})^T \end{cases} \quad (5)$$

式中: X —基函数矩阵; G — e 个点得出的响应。

笔者通过拉丁超立方方法得出 5 个参数的 100 组试验点,通过标准二次回归方程拟合参数与优化目标之间的关系,构建出响应面模型。

输入参数对变形、质量的响应面图如图 6 所示。

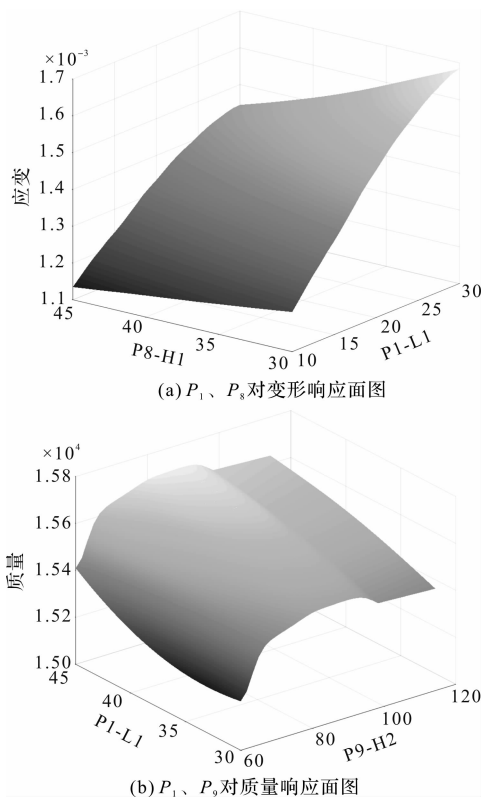


图 6 输入参数对变形、质量的响应面图

4.4 优化结果

笔者将变形、应力、质量作为目标参数,变形、应力约束限制为最小,质量约束限制为小于等于 12 000 kg,并根据灵敏度分析得出目标参数设定取值范围,如表 3 所示。

表 3 设计参数取值范围

参数	P_1	P_2	P_6	P_8	P_9
上限值/mm	45	30	2 450	30	140
初始值/mm	40	25	2 400	20	100
下限值/mm	30	20	2 300	10	60

笔者将转子质量作为第一参考量,变形作为第二参考量。经响应面优化算法对输入参数、目标参数分析,得到 3 组最优解,优化方案结果如表 4 所示。

表 4 优化方案结果

参数	方案		
	1	2	3
P_1/mm	43.343	44.393	42.293
P_2/mm	26.206	29.917	28.003
P_6/mm	2 398.6	2 427.3	2 306.3
P_8/mm	27.68	27.36	28.768
P_9/mm	80	100	115
质量 M/kg	11 303	11 327	11 375
变形 δ/mm	0.968	0.972	0.983
应力 σ/MPa	13.3	13.9	13.2

表 4 中 3 组方案对比,方案 1 质量最小,变形也最小。故笔者选择第 1 方案为优化设计方案。

笔者提取方案 1 的优化参数,将优化参数进行修正,得到最终设计尺寸,优化参数修正前后对比如表 5 所示。

表 5 优化参数修正前后对比

参数	优化后尺寸	修正后尺寸
P_1/mm	43.343	44
P_2/mm	26.206	26
P_6/mm	2 398.6	2 398
P_8/mm	27.68	28
P_9/mm	80	80

表 5 中的修正参数作为最终设计尺寸。

笔者选择变形最大组极限载荷进行有限元分析,得到新设计结构计算结果,与初始设计结构计算结果进行对比,转子优化前后参数对比如表 6 所示。

表 6 转子优化前后参数对比

参数	原模型	优化模型	差值	百分比
质量 M/kg	18 068	13 269	4 799	26.5%
变形 δ/mm	1.287 9	0.940 5	0.347 4	26.9%
应力 σ/MPa	20.948	13.533	7.415	35.4%

由表 6 可知,转子优化前后,质量减小 4 799 kg,减少 26.5%;变形减少 0.347 4 mm,减少 26.9%;且应力集中减弱,符合风力发电机轻量化设计要求。

5 结束语

针对大容量永磁风力发电机组外转子结构重量较大、增加机组负荷、影响机组安全性的问题,笔者进行了转子轻量化设计,得到结论如下:

(1) 永磁体嵌入转子内壁凹槽内,永磁体对转子起到支撑作用,不但可使转子壁变薄,而且变形量减少,其重量减轻了 2 065 kg;

(2) 转子前端盖变薄,转子内侧增加了加强筋,保证了转子结构刚度,该项措施使重量减少了 2 734 kg。加强筋可起到风扇的作用,有助于端部绕组均热。

参考文献 (References):

[1] 王奇维. 轴向磁通永磁同步电机轻量化设计及其相关技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院,2017.

[2] 丁佐蓬. 电动汽车用高扭矩密度永磁电机的设计与分析[D]. 南京:南京理工大学电子工程与光电技术学院,2018.

[3] MANOLOPOULOS, CHARALAMPOS D, et al. Design of superconducting AC propulsion motors for hybrid electric aerospace[J]. **Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS)**, 2018(7):1-9.

[4] TERAOKA, YUTAKA, et al. Electromagnetic design of superconducting synchronous motors for electric aircraft propulsion [J]. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, 2018,28(4):1-5.

[5] HAUES, L. SETHURAMAN, K. DYKES, J. FINGERSH. Structural optimization of a direct-drive wind turbine generator in spired by additive manufacturing[J]. **Proc. Manuf.**, 2018(6):740-752.

[6] SETHURAMAN, LATHA, et al. Structural mass saving potential of a 5-MW direct-drive generator designed for additive manufacturing [J]. **National Renewable Energy**, 2017(8):24-26.

[7] 吴震宇,赵大兴,袁 康,等. 永磁直驱风力发电机的定子支撑轻量化设计[J]. **机械设计与研究**, 2016,32(6):174-177.

[8] 张 玥,于慎波,翟凤晨,等. 大容量永磁同步发电机转子动力特性研究[J]. **机电工程技术**, 2020(8):20-22.

[9] 尹艳山. 基于变密度法的连续体结构拓扑优化[D]. 沈阳:东北大学机械工程与自动化学院,2014.

[10] CHAO L, KIM I Y. Multi-material topology optimization for automotive design problems[J]. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering**, 2018,232(14):1950-1969.

[11] BENDSOE M P, SIGMUND O. Material interpolations Schemes in Topology Optimization[J]. **Archiv of Applied Mechanics**, 1999,69(10):635-654.

[12] 王 军,马若丁,王继新,等. 矿用自卸车车架强度有限元分析[J]. **工程机械**, 2008,39(11):29-32.

[13] 熊长丽. 碳纤维复合材料汽车 B 柱加强板的轻量化设计研究[D]. 吉林:吉林大学汽车工程学院,2018.

[14] CHAN I P. Multi-objective optimization of the tooth surface helical gears using design of experiment and the response surface method[J]. **Journal of mechanical science and**

technology, 2010, 24(3): 823-829.

- [15] 赵丽梅, 陈伦军, 何 锋, 等. 基于响应面法的反击式破碎机板锤多目标优化[J]. 煤炭学报, 2013, 38(1): 243-248.
- [16] 叶红玲, 文 聘, 张颜明, 等. 基于多层可行方向法液体静压转台优化设计[J]. 工程力学, 2014, 31(2): 249-256.

- [17] 张 勇, 刘 伟, 蒋明虎, 等. 基于响应面法的同向出流旋流器结构参数优化研究[J]. 流体机械, 2019, 47(6): 26-30, 37.
- [18] IBRAHIM, PILLAY P. Core loss prediction in electrical machine laminations considering skin effect and minor hysteresis loops [J]. **IEEE Trans. Magn**, 2013, 49(5): 2061-2068.

[编辑: 冯黎雅]

本文引用格式:

张 坤, 于慎波, 翟凤晨, 等. 大容量外转子永磁风力发电机组转子结构的轻量化设计[J]. 机电工程, 2020, 37(12): 1547-1552.

ZHANG Kun, YU Shen-bo, ZHAI Feng-chen, et al. Lightweight design of rotor structure of large capacity outer rotor permanent magnet wind generator[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020, 37(12): 1547-1552.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 1524 页)

参考文献 (References):

- [1] ZHOU Ji, LI Pei-gen, ZHOU Yan-hong, et al. Toward new-generation intelligent manufacturing [J]. **Engineering**, 2018, 4(1): 11-20.
- [2] 张 浩. 面向板式产品定制生产的组批与排样协同优化方法[D]. 广州: 广东工业大学机电工程学院, 2019.
- [3] 胡东方, 郑亚飞, 雷若楠. 基于 QFD 和 AIS 的复杂产品定制设计[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(9): 2053-2062.
- [4] 潘瑞林, 王学敏, 暴 伟, 等. 基于模糊聚类的冷轧合同组批优化方法[J]. 控制与决策, 2017, 32(1): 141-148.
- [5] 赵桂芝, 刘雅荣. 农机转向器制造车间的动态调度算法研究[J]. 机电工程, 2019, 36(9): 980-984.
- [6] 汤洪涛, 王大国, 支文全. 物联网环境下混流生产车间两级动态调度研究[J]. 机电工程, 2018, 35(11): 1166-1171.

- [7] 解潇晗, 朱晓春, 周 琦, 等. 低能耗柔性作业车间调度研究[J]. 机电工程, 2020, 37(2): 132-137.
- [8] 鲁宏浩, 鲁玉军. 基于分布估计—蚁群混合算法的柔性作业车间调度方法研究[J]. 机电工程, 2019, 36(6): 568-573.
- [9] 张 源, 陶翼飞, 王加冕. 改进差分进化算法求解混合流水车间调度问题[EB/OL]. [2020-05-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1294.TH.20200522.1016.002.html>
- [10] CHAUDHRY I A, KHAN A A. A research survey: review of flexible job shop scheduling techniques [J]. **International Transactions in Operational Research**, 2016, 23(3): 551-591.
- [11] 黄学文, 陈绍芬, 周闾玉, 等. 求解柔性作业车间调度的遗传算法综述[EB/OL]. [2020-07-02]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20200702.1105.002.html>.

[编辑: 李 辉]