doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.051

基于改进布谷鸟搜索的轴向永磁联轴器模糊优化设计

李 召 王大志 时统宇

(东北大学信息科学与工程学院,沈阳 110819)

摘要:研究了轴向永磁联轴器的结构优化设计。首先根据层模型理论,以轴向永磁联轴器的关键结构参数(气隙 长度、铜盘厚度等)为设计变量,以成本最低、输出转矩最大以及涡流损耗最小3个性能为多优化目标,建立了轴向 永磁联轴器的数学优化模型;其次是将混沌搜索和自校正权重引入到布谷鸟搜索方法中,提出了一种改进的布谷 鸟搜索方法;然后,利用模糊理论将多目标优化问题转换为单目标问题,并运用改进布谷鸟搜索算法优化求解;最 后,对结构参数优化后的轴向永磁联轴器性能进行了 ANSYS 仿真,而且制作样机并进行了试验测试。仿真和试验 结果表明:提出的优化结果优于遗传算法和粒子群优化等方法,与标准模型相比,成本降低了 9%,转矩提高了 15%,涡流损耗减少了 10%。

关键词: 轴向永磁联轴器 布谷鸟搜索算法 混沌搜索 自校正权重 优化设计 中图分类号: TH133.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)12-0378-07

Fuzzy Optimal Design of Axial Permanent Magnet Coupling Based on Improved Cuckoo Search Algorithm

Li Zhao Wang Dazhi Shi Tongyu

(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: The structural optimization design of axial permanent magnet coupling (APMC) was investigated. Firstly, based on the linear layer model, the mathematical optimization model of APMC was established. The key structural parameters (air gap and thickness of copper disc) of the established model were selected as the design variables. And the lowest cost, the maximum output torque and the minimum eddy current loss were chosen as the optimization goals. Secondly, the chaotic search and selftuning weights were introduced into the cuckoo search algorithm, and an improved cuckoo search algorithm was proposed. In addition, multi-objective problem was converted into single one by using fuzzy theory, which was solved by using improved cuckoo search algorithm. Finally, the curve of eddy loss along with rotation speed and the curve of output torque along with slip were drawn by using ANSYS simulation, respectively, and the performances of improved APMC were verified. An experimental platform was built to test the prototype, of which the output torque and efficiency under different working conditions were tested. The results showed that the proposed method was superior to the other methods, making the cost and eddy current loss decrease by 9% and 10%, respectively, and the output torque increase by 15%. The expected results were derived, which indicated that the proposed optimization method had high precision and strong engineering practicability. The method provides a feasible preliminary design for axial permanent magnet coupling, and can be applied to the field of other electromagnetic devices.

Key words: Axial permanent magnet coupling Cuckoo search algorithm Chaotic search Self-tuning weights Optimization design

引言

轴向永磁联轴器(又称永磁驱动器或调速器 等,简称 APMC)是一种利用磁场间的作用力传递转 矩的设备,其突出特点是无机械连接,在农业机械行 业的电动机与压缩机、风机以及泵类等相关传动设 备中有着广阔的应用前景^[1-3]。APMC 主要优点有 不存在机械磨损,可以减小传动部件的损耗;实现电 动机的软启动和过载保护^[4]。目前,国内外学者运 用解析法、数值法以及试验分析等方法研究并验证 了 APMC 结构优化方法的研究,找到其最佳的结构 参数显得很有意义。文献[8]对比了遗传算法、单 纯形法以及两者结合应用于 APMC 结构优化的效 果;文献[9-10]中引入粒子群对 APMC 的偏心磁 极结构进行了优化;文献[11]将粒子群与单纯形法 结合,用于 APMC 成本目标的优化。

本文采用层分析法对 APMC 的主体结构模型 进行线性化处理,得到 APMC 的成本、输出转矩以 及涡流损耗与设计变量之间的近似解析关系,从而 构建 APMC 的数学优化模型;在此基础上,提出一 种改进的布谷鸟搜索优化算法,即混沌自校正布谷 鸟算法;另外,引入模糊理论,将多目标转换为关于 性能满意度的单一目标并进行优化求解,并通过 ANSYS 仿真分析以及试验平台验证。

1 APMC 优化数学模型的建立

1.1 APMC 结构及工作原理

APMC 的双组盘式机械结构如图 1 所示。永磁体沿轴向充磁, 且 N 与 S 极交替安放, 当导体铜盘



图 1 盘式永磁驱动器机械结构示意图 Fig. 1 Mechanical structure of APMC

1. 输入轴 2. 轴套 3、19. 铜盘的支撑钢盘 4、9. 铜盘 5. 永磁体
 6. 铝盘 7. 永磁体的支撑钢盘 8. 挡板 10. 轴承盖
 11. 止推轴承 12. 轴承 13. 轴承密封 14. 联轴器 15. 输出轴
 16. 摆臂 17. 内筒 18. 凸轮滚柱 20. 外筒 21. 轴段 22、24. 空气
 间隙 23. 中心转子 25. 导引销 26. 端板

和永磁体钢盘存在转差时,导体盘表面产生感应电 流(即涡流),进而产生感应磁场,感应磁场与永磁 场的相互作用产生耦合力,从而实现传递转矩的作 用。另外,通过调节气隙也可以改变负载转速。

1.2 APMC 的分层模型

由于 APMC 的轴对称性,为了简化分析,取其 一半,只考虑 APMC 的主体部分,得到如图 2 所示的 层理论模型。其中,区域 1 和 5 为导体盘和永磁体 背后的钢盘;区域 2 为导体盘;区域 3 为空气间隙; 区域 4 为永磁体与铝盘。



根据层模型理论结合麦克斯韦应力张量法^[12], APMC 的转矩为

$$T = \frac{\pi d_r d_m}{2} \sum_{-\infty}^{+\infty} B_2 H_2$$
(1)
$$B_2 = 2H_c \sin \frac{l N_m h}{2d_m} \cdot$$

其中

$$\frac{R_{3}\left(\cosh\frac{lN_{m}h}{d_{m}}-1\right)+\frac{1}{j\mu_{4}}\sin\frac{lN_{m}h}{d_{m}}}{\left(R_{2}R_{4}+\frac{1}{\mu_{4}^{2}}\right)\sinh\frac{lN_{m}h}{d_{m}}+\frac{1}{j\mu_{4}}(R_{2}-R_{4})\cos\frac{lN_{m}h}{d_{m}}}$$
(2)
$$H_{4}=B_{4}R_{4}$$
(3)

式中 d_r-----永磁体径向宽度 N_m-----磁极数

- H2——导体盘与气隙交界处的永磁场强度
- B2——永磁体在导体盘与气隙交界处的磁感 应强度

R_i——定义在 i 层边缘的导纳

H。——永磁体矫顽力 l——调和数,取1

μ₄——永磁体的相对磁导率,取 1.05

h——永磁体轴向长 d_m——永磁体径向长 文献[13]中通过引入分离变量法对麦克斯韦 方程求解,推导了涡流损耗功率为

$$P_{loss} = \sigma_{1}^{-1} \int_{-s_{a}}^{0} dy \int_{-\tau}^{\tau} |J^{2}| dx =$$

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} r N_{n} \tau \sigma_{1} m^{2} v^{2} |C_{1,n}|^{2} \cdot$$

$$\left[\frac{1}{2k_{1}} - \frac{e^{-4k_{1}s_{a}}}{2k_{1}} - \frac{e^{-2k_{1}s_{a}} \sin(2k_{2}s_{a})}{k_{2}}\right] \qquad (4)$$

其中
$$k_1 = [m^4 + (\mu_0 \mu_1 v \sigma_1 m)^2]^{1/4} \cos \varepsilon$$
 (5)
 $k_2 = [m^4 + (\mu_0 \mu_1 v \sigma_1 m)^2]^{1/4} \sin \varepsilon$ (6)
 $\varepsilon = \arctan(m^{-1} \mu_0 \mu_1 v \sigma_1)/2$ (7)

$$m = (2n + 1) \pi / \tau \quad (n = \dots - 1, 0, 1, \dots)$$

式中
$$k_1, k_2, \varepsilon$$
——中间变量

导体盘的等效径向长度

$$\sigma_1$$
——区域2的电导率

-导体转子的切向速度

$$\mu_1$$
——区域 1 相对磁导率

τ----极距

1.3 APMC 优化问题的数学描述

成本是 APMC 设计中考虑的一个重要指标,为 了计算方便,只考虑永磁体和导体铜盘以及钢盘的 体积部分所花费的成本,文中假设前者价格是后者 的10倍关系,建立成本的近似目标函数,即

$$\begin{cases} V = vol_{\text{driver}} + 10vol_{\text{magnet}} = \pi r_{av}^2 W + 10N_m d_m w_m h \\ W = s_a + 2s_b + h \end{cases}$$
(8)

w.,——永磁体周向宽 s,——钢盘的轴向长度 综合式(1)、(4)、(8),建立 APMC 优化问题的

数学模型

$$\begin{cases} \max T = f_1(\mathbf{X}) \\ \min P_{\text{loss}} = f_2(\mathbf{X}) \\ \min V = f_3(\mathbf{X}) \end{cases}$$
(9)

其中

 $X = (x_1, x_2, \cdots, x_n)$

结构约束条件为

$$\begin{cases} 8 \leq x_1 \leq 12 \\ 20 \leq x_2 \leq 40 \\ 10 \leq x_3 \leq 30 \\ 20 \leq x_4 \leq 50 \\ 14 \leq x_5 \leq 22 \\ 8 \leq x_6 \leq 12 \end{cases}$$
(10)
式中 x_1 ——钢盘轴向厚度,mm
 x_2 ——永磁体径向长度,mm
 x_3 ——永磁体轴向厚度,mm
 x_4 ——永磁体围向宽度,mm
 x_4 ——永磁体圈向宽度,mm
 x_5 ——永磁体数量
 x_6 ——导体盘轴向厚度,mm
研究标准模型的主要结构参数如表1所示。

表1 标准模型的结构参数

Tab.1 Structural parameters of standard model

参数	数值	参数	数值
导体材料	黄铜 H62	永磁材料	钕铁硼 N38H
导体环内半径/mm	90	软磁材料	45 号钢
导体环外半径/mm	140	导体环厚度/mm	10
永磁体数量	18	气隙长度/mm	4
永磁体长度/mm	30	永磁体厚度/mm	20
永磁体高度/mm	30	钢盘内径/mm	90
永磁体矫顽力/(A·m ⁻¹)	87 500	钢盘外径/mm	140
钢的相对磁导率	500	铜电阻率/(Ω •m)	7.1 $\times 10^{-8}$
永磁体相对磁导率	1.05	钢盘厚度/mm	10

混沌自校正布谷鸟搜索算法 2

布谷鸟搜索算法(CS)^[14]是英国学者 Yang 和 Deb 于 2009 年提出的一种新的启发式算法,该算法 模拟自然界布谷鸟的寄巢产卵行为,其基本思想是 引入 Lévy 飞行产生候选鸟巢并采用精英保留策略 对其更新,即

$$\begin{cases} x_{k}(t+1) = x_{k}(t) + \alpha \otimes L(\lambda) \\ Lévy \sim u = t^{-\lambda} \\ (1 < \lambda \leq 3) \\ \vdots \\ x_{k}(t+1) \longrightarrow \overline{\Gamma} - 代鸟巢位置 \end{cases}$$
(11)

①——点对点乘法

L——服从 Lévy 分布的随机搜索路径

使若干次更新后鸟巢位置达到全局最优^[12]。CS 算 法的优点是收敛速度快、收敛精度高以及算法简单、 参数设置少、易于实现等,不足之处是后期收敛速度 慢、易早熟等^[15-16]。为了克服 CS 算法的不足,主 要从两方面对其做了改进:①通过对 CS 算法运行 过程中是否陷入早熟收敛状态的判断,引入了混沌 搜索。②在布谷鸟寻巢的路径和位置更新中引入了 自校正权重系数。

2.1 混沌搜索算法的引入

混沌优化算法(COA)是基于混沌的遍历性,通 过混沌映射将混沌状态引入到优化变量中进行寻优 搜索,COA 在小范围可行域空间中的寻优效果最 好。当CS算法运行过程陷入局部早熟时,将COA 引入,使得 COA 在缩小后的空间中寻优,这样不仅 不会影响 CS 搜索机制,而且使其跳出局部早熟,实 现全局寻优,因此提高了 CS 的搜索速度和精度。 采用 Logistic 映射产生混沌序列,即

 $y_k(t+1) = \mu(1 - y_k(t)) \quad (\mu \in [0, 4]) \quad (12)$ 式中 µ——控制参数,当µ=4时,系统完全处于 混沌状态

y_k(t)——混沌变量

混沌搜索的详细步骤参照文献[17]。

在布谷鸟搜索算法早熟收敛判断中,引入群体 适应度方差的策略,定义

$$\sigma^{2} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N} \left(\frac{fit_{k} - fit_{av}}{f} \right)^{2}$$
(13)

$$f = \begin{cases} 1 & (\pounds \mathbb{H}^{\text{HU}}) \\ \max |fit_k - fit_a| & (\max |fit_k - fit_a| > 1) \end{cases}$$
(14)

式中 fit_k——第 k 个鸟巢的适应度

f——定标因子,对 σ^2 起到限制作用

 σ^2 反映的是所有鸟巢的"聚集"程度, σ^2 值越小算法越趋于收敛,若 σ^2 在进化初期或中期变化量较小且小于给定值,表明发生早熟收敛。

2.2 自校正权重的引入

由于标准 CS 算法中 Lévy 飞行机制的引入,使 得布谷鸟寻巢的路径和位置具有随机性。为了提高 布谷鸟搜索性能,文中在式(8)中引入了自校正权 重 $w_k(t)$,即

 $x_{k}(t+1) = w_{k}(t+1)x_{k}(t) + \alpha \otimes L(\lambda)$ (15) $\exists \psi \quad w_{k}(t) \longrightarrow \exists \psi \in \chi \equiv$

根据当前各鸟巢自身信息,使其权重系数能够 自适应调节,增强了 CS 算法在全局搜索和局部搜 索之间的协调性。

通过下面步骤对自校正权重系数进行求取。

(1)将适应度值模糊化。通过选择降半 Γ 分布 隶属度函数,使得各鸟巢的隶属度 $u \in (0,1]$ 。

$$u_{k}(fit) = \begin{cases} 1 & (fit \ge fit') \\ \exp\left(-\frac{fit - fit'}{fit'}\right) & (fit < fit') \end{cases}$$
(16)

式中 fit——鸟巢当前的适应度

fit'——鸟巢历史最优适应度

(2) 定义权重的自校正原则。

当
$$u_k(t) \in [0.4, 0.9]$$
时,更新方式为

$$w_k(t+1) = \frac{1}{2} \exp\left(-\left(\tau_1 \frac{t}{iter_{max}}\right)^2\right) + \frac{1}{2}u_k(t)$$
(17)

式中 iter_{max}——最大迭代次数

τ₁——经验系数,取[20,55]

式(17)前半部分是与迭代次数有关的自适应 权重系数,后半部分是与当前鸟巢位置适应度信息 量相关的模糊权重系数。

其他情况时,权重不变,即

$$w_k(t+1) = w_k(t)$$
 (18)
混沌自校正布谷鸟搜索算法的主要步骤为:

(1)设置算法参数,主要有布谷鸟选择宿主鸟 巢数目 N,发现概率 P_a ,步长因子 α ,搜索精度 ε 或 者最大迭代次数 *iter*_{max},搜索空间维数 m_o

 (2)初始种群的多样性有利于搜索全局最优 解,因此,文中利用佳点集方法^[18]产生初始鸟巢位 置,设 x_k = (x^{iter}_{k1},x^{iter}_{k2},…,x^{iter}_{k3})为第 k 个鸟窝的位置, 当前迭代次数 iter = 1。

(3)评价每个鸟巢当前情况下的适应度,选择 最优的一个鸟巢,记录其位置和对应的最优适应度, 并保留至下一代。

(4)判断 CS 算法是否出现早熟或满足终止条件,若满足终止,则算法结束,输出最优值;若早熟,则转步骤(6);否则,转步骤(5)。

(5)根据式(15)更新鸟巢位置,得到下一代的 鸟巢。

(6)产生随机数 $r \in [0,1] 与 P_a$ 比较,若 $r > P_a$,则在可行域内随机更新这些鸟巢;反之则不变。然后,找出并保留最优鸟巢位置及对应值。

(7)对群体中的最佳鸟巢进行混沌搜索,令 iter = iter + 1,返回步骤(3)。

3 多目标的模糊化求解

前述分析可知式(6)中的3个性能指标函数具 有明显的复杂性和强非线性,为了对其进行优化求 解,引入了模糊理论^[19-20],即通过建立3个目标函 数的隶属度函数,将多目标的优化问题转换为对单 目标数值——满意度的优化求解问题。在永磁驱动 器的多目标优化设计中,由于3个性能指标的优化 目的并不相同,即要求输出转矩尽可能大、成本和涡 流损耗尽可能小,因此对它们采取不同的隶属度函 数。

(1)输出转矩的模糊化

$$s(f_{i}) = \begin{cases} 1 & (f_{i} \ge f_{i\max}) \\ \frac{f_{i} - f_{i}^{*}}{f_{i\max} - f_{i}^{*}} & (f_{i}^{*} < f_{i} < f_{i\max}) \\ 0 & (f_{i} \le f_{i}^{*}) \end{cases}$$
(19)

式中 fi---输出转矩的指标值

f_{imax}—输出转矩作为单优化目标时理想值
 f_i^{*} — 标准模型测得的输出转矩性能指标值
 (2)成本和涡流损耗的模糊化

$$s(f_{i}) = \begin{cases} 1 & (f_{i} \leq f_{i\min}) \\ \frac{f_{i}^{*} - f_{i}}{f_{i}^{*} - f_{i\min}} & (f_{i\min} < f_{i} < f_{i}^{*}) \\ 0 & (f_{i} \geq f_{i}^{*}) \end{cases}$$
(20)

式中 fi---成本和涡流损耗的性能指标

f_{imin}——成本和涡流损耗作为单优化目标时的理想值

f_i^{*} ——标准模型测得的 2 个性能指标

将 3 个性能指标进行模糊化处理并求取其隶属 度函数值,构造用它们表示的满意度函数,即

$$\eta = \min\{s(f_1), s(f_2), s(f_3)\}$$
(21)

则式(16)的多目标优化问题就转换为在满足 所有约束条件下"满意度"最大的问题,建立优化数 学模型:目标函数 maxη;约束条件为

$$\begin{cases} 8 \leq R_{1} \leq 12 \\ 10 \leq R_{2} \leq 30 \\ 25 \leq R_{3} \leq 50 \\ 10 \leq R_{4} \leq 30 \\ 14 \leq R_{5} \leq 24 \end{cases}$$
(22)

并利用前述改进的布谷鸟搜索算法求解。

4 仿真分析与验证

应用前述优化算法对轴向永磁联轴器进行优化 设计,关键参数的选取为 N = 50, $\alpha = 1$, $P_a = 0.25$, *iter*_{max} = 200,为了准确期间,取 50 次最优结果的平 均值。表 2 是利用文献[8 – 10]中方法与本文方法 得到的结果比较。

由表 2 可以看出,同标准模型进行比较,经过几 种优化方法的处理,APMC 的整体性能都有所提高, 这说明对 APMC 结构参数的优化是有意义和必要 的;另外,几种方法中,本文方法的优化效果最好,主 要体现在:对各项性能指标的优化效果较为均衡;迭 代次数较少。为了更直观地比较优化结果,绘制了 如图 3 所示改善率的柱状图,从图 3 中可以得出,经 过本文方法的优化,与标准模型相比,成本大约降低 了 9%,涡流损耗减少了 10%,而转矩却提高了 15%,

表 2 不同方法的优化结果比较 Tab. 2 Optimization results comparison of different methods

	•					
参数	标准	SM ^[8]	GA – SM ^[8]	PSO ^[9]	PSO - SM ^[10]	本文
钢盘轴向厚度/mm	10	10.75	10.56	10.13	9.99	9.97
永磁径向长度/mm	30	23.59	22.13	22.36	23.19	25.50
永磁体轴向厚度/mm	20	22.95	21.17	20.08	20.16	18.19
永磁体周向宽度/mm	30	30.46	34.58	32.56	34.00	31.83
永磁体数量	18	20	18	22	18	18
导体盘轴向厚度/mm	10	9.06	8.25	8.77	8.61	9.38
体积成本	505 万	523 万	478 万	503 万	470 万	461 万
输出转矩/(N·m)	78.25	80.46	84.51	90.23	91.58	90.19
涡流损耗/W	875.147	856.256	818.181	803.198	783.156	789.912
迭代次数		200	148	163	117	89



Fig. 3 Comparison of performance improvement ratios

表明了本文方法的有效性。

为了进一步比较 APMC 在表 2 中几种结构参数 下的性能指标,建立它们的三维有限元仿真模型,然 后用 ANSYS 软件分别计算出输出转矩和涡流损耗。 图 4 表示的是不同模型下转差率与输出转矩的关系 曲线,图 5 则是输出转速与涡流损耗的关系曲线。 从图 4 中可以看出,转差率一定的情况下,优化后 APMC 的输出转矩均有提高,且本文方法效果更 好;从图 5 可以看出,随着输出转速的增加,涡流 损耗也在增加,但是优化后 APMC 的涡流损耗增加的幅度明显降低,且经本文方法优化后的 APMC 模型在同转速下损耗较小,与 PSO - SM 的效果大致相当。





为了验证模拟分析的正确性并测试 APMC 的 实际性能,建立如图 6 所示的永磁驱动器传动性能 试验平台,左上角为 APMC 的局部放大图,该平台 的各构成部件参考图中注释,不再赘述。依照本文







 直流
 交流
 扭矩
 基座
 APMD
 交流

 电动机
 电动机
 电动机
 电动机

 图 6
 永磁联轴器的试验平台
 Fig. 6
 Test bench of PMC

方法优化后的结构参数取整数之后制造单组结构的 APMC 样机。当气隙厚度保持不变,转差率在 3% ~ 9% 之间变化时,测得输出转矩如图 7 所示。由图可 以看出,实际输出转矩与 ANSYS 分析值吻合较好, 事实上误差来源主要有两方面:①物理模型的建立 是近似的。②实际运行过程中有功率损耗。总的来 说,优化结果具有可靠性。

表3给出了永磁驱动器在不同轴心偏移量情况 下的转矩与效率的测试数据,表明少量的轴心偏移



对样机的性能影响不大,也说明了该样机结构的合 理性。

表 3 样机测试数据 Tab. 3 Test data of prototype

偏移量/mm	转矩/(N·m)	效率/%
1	85.1	93.7
2	83.2	92.6
3	82.4	92.3
4	81.7	91.2

5 结论

(1)通过层分析模型,得到了轴向永磁联轴器 近似的输出转矩、涡流损耗以及体积成本等3个目 标函数,建立了其显式的数学优化模型。

(2)提出了一种改进的布谷鸟全局搜索优化方 法并结合目标函数的模糊化处理,将它们用于盘式 永磁驱动器结构参数的优化,最终可以获得比其他 文献所列方法较好的优化效果,与标准模型相比,使 得盘式永磁驱动器在较少材料消耗的情况下,具有 高输出转矩和低损耗的性能。因此,为永磁联轴器 的初步设计提供了一种可行的方法。

参考文献

- 1 Wang Anna, Wang Jinbo, Shi Chenglong, et al. Study on nonlinear regression modeling methods of the permanent magnet drive [C] // International Conference on Electronics and Optoelectronics, 2011,2:87-90.
- 2 王道明,孟庆睿,侯友夫,等. 传动装置磁流变液瞬态温度场研究[J]. 农业机械学报,2013,44(4):287-292.
- Wang Daoming, Meng Qingrui, Hou Youfu, et al. Transient temperature field of magneto-rheological fluid in transmission device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4):287-292. (in Chinese)
- 3 Tsai Mi-Ching, Chiou Kwei-Yuan, Wang Shenghe, et al. Characteristics measurement of electric motors by contactless eddycurrent magnetic coupler[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(11):1-4.
- 4 Hyeon S, Jang C, Seok J, et al. Design and analysis of axial permanent magnet coupling based on 3D FEM [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013, 49(7): 3985 3988.
- 5 Jian Wang, Lin H, Fang S, et al. A general analytical model of permanent magnet eddy current couplings [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(1):1-9.
- 6 Mohammadi S, Mirsalim M, Vaea-Zadeh S, et al. Analytical modeling and analysis of axial-flux interior permanent-magnet couplers[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 51(11):5940 - 5947.
- 7 Jacob A Krizan, Scott D Sudhoff. A design model for salient permanent-magnet machines with investigation of saliency and

wide-speed-range performance [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013, 28(1):95-105.

- 8 Mohammadi S, Vaea-Zadeh S. Nonlinear modeling of eddy-current coupler[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(1):224-231.
- 9 Smith A C, EI-Wakell A S, Wallace A. Formal design optimization of PM drive couplings [C] // IEEE Conference of the Industry Applications, 37th IAS Annual Meeting, 2002:205-211.
- 10 石松宁,王大志,时统宇. 永磁驱动器偏心磁极的优化设计[J]. 东北大学学报:自然科学版,2014,35(8):1078-1082. Shi Songning, Wang Dazhi, Shi Tongyu. Optimal design of eccentric magnetic pole for permanent magnet drive[J]. Journal of Northeastern University:Natural Science,2014,35(8):1078-1082. (in Chinese)
- 11 Ei-Wakeel A S. Design optimization of PM couplings using hybrid particle swarm optimization-simplex method (PSO SM) algorithm[J]. Electric Power Systems Research, 2014, 116:29 35.
- 12 Wallace A, Van JouaMe A, Ramme A. A permanent-magnet coupling with rapid disconnect capability [J]. International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, 2002:286 291.
- 13 王旭. 永磁调速器磁路设计与建模分析技术的研究[D]. 沈阳:东北大学,2012.
- 14 Yang Xinshe, Deb S. Cuckoo search via Lévy flights [C] // IEEE World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing, 2009:210-214.
- 15 Ganomt A, Yang X, Alavi A. Cuckoo search algorithm: a meta-heuristic approach to solve structural optimization problems [J]. Engineering with Computer, 2013, 45(12):1562 - 1574.
- 16 Yang Xinshe, Suash Deb. Multiobjective cuckoo search for design optimization [J]. Computer & Operation Research, 2013, 40(6):1616-1624.
- 17 李俐,王萩,王鹏新,等.基于色彩运算和混沌粒子群滤波的土壤粗糙度测算[J].农业机械学报,2015,46(3):158-165. Li Li, Wang Di, Wang Pengxin, et al. Soil surface roughness measurement based on color operation and chaotic particle swarm filtering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(3):158-165. (in Chinese)
- 18 龙文,梁昔明,徐松金,等. 聚类佳点集交叉的约束优化混合进化算法[J]. 计算机研究与发展,2012,49(8):1753 1761. Long Wen, Liang Ximing, Xu Songjin, et al. A hybrid evolutionary algorithm based on clustering good-point set crossover for constrained optimization[J]. The Chinese Journal of Computer Research and Development, 2012, 49(8):1753 - 1761. (in Chinese)
- 19 刘文颖,文晶,谢昶,等.基于源荷互动的含风电场电力系统多目标模糊优化调度方法[J].电力自动化设备,2014, 34(10):56-68.

Liu Wenying, Wen Jing, Xie Chang, et al. Multi-objective fuzzy optimal dispatch based on source-load interaction for power system with wind farm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(10):56-68. (in Chinese)

20 刘静,张小栓,肖新清,等.基于多目标决策模糊物元法的冷藏车传感器布点优化[J]. 农业机械学报,2014,45(10):214-219.

Liu Jing, Zhang Xiaoshuan, Xiao Xinqing, et al. Optimal sensor layout in refrigerator car based on multi-objective fuzzy matter element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10):214-219. (in Chinese)

(上接第 345 页)

- 16 邓嘉鸣,余同柱,沈惠平,等. 基于方位特征的六自由度并联机构型综合[J]. 中国机械工程,2012,23(21):2525-2640. Deng Jiaming, Yu Tongzhu, Shen Huiping, et al. Type synthesis for 6-DOF novel parallel mechanisms based on POC set method [J]. China Mechanical Engineering, 2012,23(21):2525-2640. (in Chinese)
- 17 高峰,杨加伦,葛巧德. 并联机器人型综合的 G_F 集理论[M]. 北京:科学出版社,2011.
- 18 尹洪波,沈惠平,马小蒙,等. 基于 BKC 的并联机构拓扑结构分析及其型综合方法[J]. 机械设计,2015,32(6):11-17. Yin Hongbo, Shen Huiping, Ma Xiaomeng, et al. Topological structure analysis and type synthesis method of parallel mechanisms based on BKC[J]. Journal of Machine Design, 2015,32(6):11-17. (in Chiense)
- 19 杨廷力.机械系统基本理论一结构学、运动学、动力学[M].北京:机械工业出版社,1996.
- 20 沈惠平,尹洪波,王振,等.基于拓扑结构分析的求解 6-SPS 并联机构位置正解的研究[J].机械工程学报,2013,49(21): 70-80.

Shen Huiping, Ying Hongbo, Wang Zhen, et al. Research on forward position solutions for 6 – SPS parallel mechanisms based on topology structure analysis [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013,49(21):70 – 80. (in Chinese)