

# 粒子群优化算法及其在发电机组调速系统 参数辨识中的应用

李阳海, 王 坤, 黄树红, 高 伟

( 华中科技大学 能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘 要:** 准确可靠的发电机组调速系统模型参数对于电力系统稳定性分析非常重要, 由于利用常规辨识方法( 如最小二乘法) 进行模型参数辨识时对试验条件要求较为苛刻, 且很难对调速系统中大量存在的非线性环节参数进行辨识。本研究将目前正处于研究热点的粒子群算法引入发电机组调速系统模型参数的辨识过程研究, 结果表明, 利用粒子群理论进行模型参数辨识时, 计算速度快、辨识结果准确可靠, 而且能很好地解决调速系统中非线性环节参数辨识的技术难题。同时, 该算法通用性好, 通过对模型进行自定义, 还可将其应用于任何灰箱模型参数的辨识中。

**关 键 词:** 发电机组; 调速系统; 参数辨识; Matlab; 粒子群算法

**中图分类号:** TP273. 5; TM31      **文献标识码:** A

## 引 言

调速系统作为发电机组进行控制的主要系统之一, 其调节品质及动态特性不仅影响到机组自身的经济性和安全性, 也对电网安全稳定运行、保证电网频率质量起着至关重要的作用。因此, 要进行准确的电力系统稳定性分析, 模拟事故现象对整个电力系统影响, 准确可靠的发电机组调速系统模型参数是必需的, 有必要进行相关试验以及模型参数辨识的研究工作。

从 2003 年开始, 国内多所高校及科研院所均开展了有关发电机组调速系统建模的相关试验研究。然而, 在实际研究过程中发现, 常规的时域、频率域参数辨识方法, 对于试验扰动信号的要求均较苛刻, 如需要阶跃信号、脉冲信号或者伪随机信号等, 这在正常情况下是很难达到的; 同时, 在辨识调速系统中大量存在的非线性环节参数( 限幅、限速、死区等) 时, 常规辨识方法也显得无能为力。

粒子群算法( PSO ), 作为一种新出现的通用优化算法, 在各个领域均得到了广泛的应用, 且成为了近一段时间的研究热点。本研究尝试性地将 PSO

算法应用于调速系统模型参数辨识, 并利用 Matlab 予以实现。通过对多台机组模型参数进行辨识情况来看, 其计算收敛速度快, 辨识结果准确、可靠, 能够很好地满足调速系统模型参数辨识的需要。

## 1 粒子群算法基本原理

PSO 算法是美国心理学家 James Kennedy 与电气工程师 Russell Eberhart 在 1995 年共同提出来的, PSO 算法也采用“群体”与“进化”概念, 并依据个体( 粒子) 的适应函数值的大小进行操作。但 PSO 算法不像其它进化算法那样对个体使用进化算子, 而是将每个个体当作搜索空间中的一个粒子, 并在搜索空间中以一定的速度飞行, 该飞行速度由每个粒子自身的飞行经验以及整个群体的飞行经验进行动态调整。在 PSO 算法中, 将待优化的问题解组成搜索空间的一个“粒子”。根据待优化问题解所含未知变量的个数来确定每个粒子维数, 每个粒子均有一个被优化的目标函数所决定的适应函数值, 并且通过一个速度值来控制它每一次的飞行方向和距离, 然后所有粒子将追随当前最优粒子在解空间进行搜索。在算法开始时, PSO 算法将根据待优化问题的潜在解的特点随机初始化一群粒子及每个粒子对应的速度, 计算出每个粒子的适应度函数值, 然后通过迭代找到最优解。在每次迭代过程中, 每个粒子知道它自身当前所经历过的最好位置, 即个体最优位置( Pbest ), 这是该粒子自身的飞行经验; 除此之外, 每个粒子也知道群体中所有粒子当前所经历过的最好位置, 即全局最优位置 Pbest, 它代表该粒子同伴的飞行经验。每个粒子将根据自身当前速度、自身当前的最好位置和当前全局最好位置来更新自己的速度, 再利用自身当前位置与更新后的速度来更新自己的位置。整个粒子群中的粒子都将向问题的最优解所在位置不断靠近。

收稿日期: 2010 - 09 - 13; 修订日期: 2010 - 12 - 03

作者简介: 李阳海( 1980 - ), 男, 湖北武汉人, 华中科技大学博士研究生。

## 2 PSO 标准算法

设  $m$  维搜索空间中有  $n$  个代表潜在解的粒子  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , 向量  $x_i(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})$  记录了第  $i$  个粒子的位置,  $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ 。向量  $v_i(v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{im})$  用来表示第  $i$  个粒子的速度, 根据实际问题设定目标函数和适应度函数, 第  $i$  个粒子当前所经历过的最优位置记为  $p_i(p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{im})$ , 整个粒子群曾经经历过的最好位置记为  $p_g(p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gm})$ 。在最小值问题中, 粒子的目标函数值越小, 则其对应的适应值越好。设  $f(X)$  为最小值问题的目标函数, 则每个粒子自身的当前最优位置由下式决定:

$$p_i(t+1) = \begin{cases} p_i(t) & f(x_i(t+1)) \geq f(p_i(t)) \\ x_i(t+1) & f(x_i(t+1)) < f(p_i(t)) \end{cases} \quad (1)$$

群体当前所经历的最优位置由下式决定, 即:

$$p_g(t) \in \{p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t)\} | f(p_g(t)) = \min\{f(p_1(t)), f(p_2(t)), \dots, f(p_n(t))\} \quad (2)$$

基于以上定义, 通过以下公式将每个粒子的速度和位置从第  $t$  代迭代更新到第  $t+1$  代:

$$v_{id}^{t+1} = w \times v_{id}^t + c1 \times rand1 \times (p_{id} - x_{id}^t) + c2 \times rand2 \times (p_{gd} - x_{id}^t) \quad (3)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \quad (4)$$

式中:  $i = 1, 2, \dots, m; d = 1, 2, \dots, n; w$ —惯性权重系数, 用来平衡 PSO 算法全局和局部搜索能力;  $c1, c2$ —加速常数,  $c1$ —用来调节粒子飞向自身最优位置方向的步长,  $c2$ —用来调节粒子向全局最优位置方向飞行的步长, 它们通常在  $0 \sim 2$  之间取值;  $rand1, rand2$  为  $[0, 1]$  之间相互独立的随机数; 为控制进化过程中粒子留在搜索空间之中, 一般需要指定  $v_{max}$  和  $x_{max}$  来限制粒子的速度和位置。在随机初始化粒子群以后, 就可以根据式 (3) 和式 (4) 进行迭代计算, 直到满足算法停止条件为止。

上述算法一般被称为标准 PSO 算法。

## 3 PSO 算法优化

上述标准 PSO 算法虽然具有很多的优点, 但也存在前期收敛速度快, 后期容易陷入局部最优而导致算法收敛缓慢的缺点。为提高 PSO 算法收敛性能, 实际使用时采取了以下方法对其进行优化:

### 3.1 惯性权重的优化

惯性权重用来平衡粒子的局部收敛能力与全局收敛能力。惯性权重越小, 粒子的局部收敛能力强; 惯性权重越大, 粒子群的全局收敛能力越强。本研究采用惯性权重线性递减策略来设置惯性权重的大

小, 即为:

$$w(t) = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{t_{max}} \times t \quad (5)$$

式中:  $w_{max}, w_{min}$ —预先设置的最大惯性权重和最小惯性权重;  $t$ —当前迭代次数,  $t_{max}$ —最大迭代次数。

从公式可以看出, 随着迭代次数的增加, 惯性权重逐渐从最大权值线性递减到最小权值, 这样保证了算法开始阶段有较强的全局收敛能力, 在算法后期则有较强的局部收敛能力, 从而提高了算法的性能。

### 3.2 增添收敛因子 $\alpha$

有学者提出收敛因子  $\alpha$  的概念, 以确保算法收敛。在引入收敛因子  $\alpha$  后, 将式 (5) 变为:

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + \alpha \times v_{id}^{t+1} \quad (6)$$

收敛因子  $\alpha$  值可以根据经验选取, 也可以按照如下公式计算:

$$\alpha = \frac{2}{|2 - c1 - c2 - \sqrt{(c1 + c2)^2 - 4(c1 + c2)}|} \quad (7)$$

式中:  $i, d, t, c1, c2$  的意义与式 (3) 相同。

### 3.3 加入模拟退火算法

从式 (3) 可以看出, 当某粒子在某时刻处于全局最优位置时, 则:

$$v_{id}^{t+1} = w \times v_{id}^t \quad (8)$$

对于式 (8) 式, 由于仅有一项, 即原有速度的调整, 从而微粒  $i$  将一直沿着该方向搜索, 直到发现更好的解或者到达边界。但是, 对于整个区域而言, 沿直线进行搜索, 其发现更好解的概率几乎为零, 因而其效率极低。此外, 如果  $w < 1$ , 则有  $v_{id}^{t+1} < v_{id}^t$ , 则存在某一固定的数  $N$ , 使得当  $t > N$  时, 若群体的当前最优解没发生变化, 则微粒  $i$  的速度各分量  $v_{id}^{t+1} < \varepsilon$  ( $\varepsilon$  为一给定的误差), 从而使得该微粒停止进化。这样, 即使该方向上存在更好解, 也可能在搜索到该解之前停止进化, 从而导致过早收敛。

为解决这一问题, 本研究采用模拟退火以及粒子变异相结合的方法, 对处于全局最优位置的粒子进行扰动, 增强粒子的搜索能力, 其具体过程为: 当某个粒子处于全局最优时, 将该粒子的位置按下式进行变异:

$$x'_i(t+1) = x_i(t) + \beta \times rand \quad (9)$$

式中:  $\beta$ —粒子位置的变异幅值;  $rand$  为  $[0, 1]$  间的随机数。

计算  $x'_i(t+1)$  的适应度函数值  $f[x'_i(t+1)]$ , 在该粒子按照式 (3) 和式 (4) 更新到  $x_i(t+1)$  后计算其适应度函数值  $f[x_i(t+1)]$ , 比较这两个适应度函数值并按照式 (11) 进行粒子位置更新:

$$\Delta f = f[x'_i(t+1)] - f[x_i(t+1)] \quad (10)$$

$$x_i(t+1) = \begin{cases} x'_i(t+1) & \min(1, e^{-\Delta f/T}) \geq \text{rand}(1, 1) \\ x_i(t+1) & \min(1, e^{-\Delta f/T}) < \text{rand}(1, 1) \end{cases} \quad (11)$$

其中,  $T$  为退火温度, 其值由式 (12) 决定:

$$T = T_0 / (1 + t) \quad (12)$$

式中:  $T_0$ —初始温度, 一般  $T_0$  越大, 模拟退火算法的收敛精度越高;  $t$ —当前迭代次数。

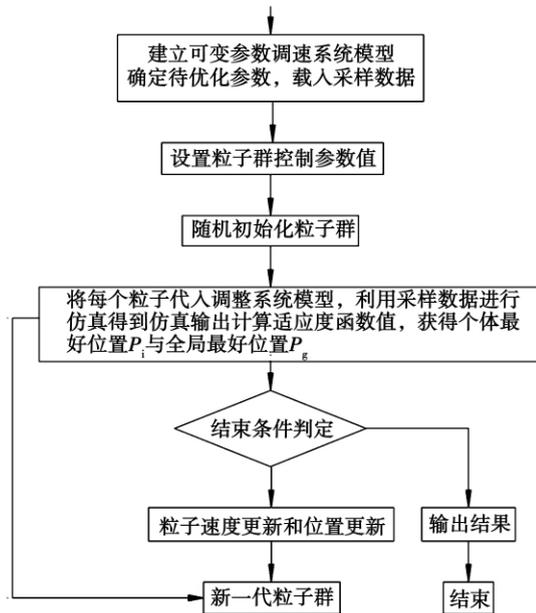


图 1 发电机组调速系统模型参数 PSO 辨识流程图

Fig. 1 Flow chart showing the PSO-based identification of the model parameters of a generator unit speed regulation system

#### 4 基于 PSO 优化算法的调速系统参数辨识

利用上述 PSO 优化算法并结合 Matlab 进行汽轮发电机组调速系统参数辨识, 主要步骤如下:

- (1) 利用 Matlab 建立包含未知参数的调速系统仿真模型并确定未知参数范围;
- (2) 设定粒子群的群体规模、最大迭代次数、惯性权重等控制参数值;
- (3) 对粒子群进行初始化并得到一组未知参数的随机值;
- (4) 将获得的随机值带入仿真模型, 并利用 Matlab 进行仿真;
- (5) 将仿真输出与相同输入条件下的实际输出值进行比较并构造一个误差函数;
- (6) 利用 PSO 优化算法, 不断优化未知参数

值, 直到误差函数值最小或满意为止, 这时粒子群的全局最优位置值就可以认为是待辨识模型的未知参数值。

实际计算时基本流程如图 1 所示。

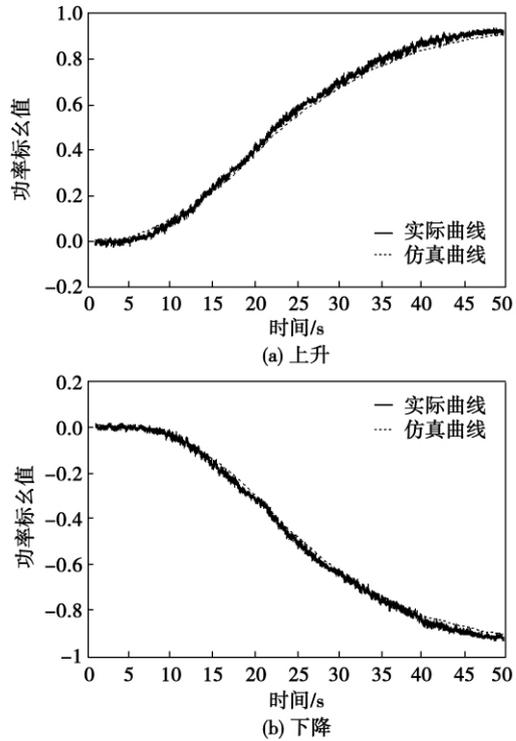


图 2 某 300 MW 机组闭环负荷扰动试验发电机功率(上升、下降)

Fig. 2 Power of the generator of a 300 MW unit used in a closed-cycle load disturbance test

在对某 300 MW 火力发电机组进行调速系统模型参数辨识过程中, 利用 PSO 优化算法进行了计算, 部分结果如表 1 所示。

表 1 PSO 参数及计算辨识结果  
Tab. 1 PSO-based identification control parameters and calculation results

	数值
蒸汽容积 $T_{ch}/s$	0.58
再热器容积 $T_{rh}/s$	10.86
交叉管 $T_{co}/s$	1.087

将辨识结果进行仿真验证, 获得了很好的仿真效果, 数据拟合程度较高, 相关曲线如图 2 所示。

在对发电机组调速系统模型参数进行辨识的过程中, 实际采用了最小二乘法、遗传算法、神经网络以及 PSO 等多种辨识方法, 并对各种辨识方法的使

用情况进行了对比,对比结果如表 2 所示。

由于调速系统模型中存在大量的非线性环节参数,实际使用最多的是遗传算法(GA)和 PSO 优化算法。与遗传算法相比,PSO 优化算法有以下特点:

(1) PSO 算法有记忆性,每个粒子都能保存自身和群体好的解的知识,而 GA 中以前的知识随着种群的变化被改变;

(2) PSO 中的粒子仅仅通过当前搜索到最优点进行共享信息,所以很大程度上这是一种单共享项

信息机制,在 GA 中,染色体之间相互共享信息,使得整个种群都向最优区域移动;

(3) GA 的编码技术和遗传操作比较简单,而 PSO 相对于 GA,没有交叉和变异操作,粒子只是通过内部速度进行更新,因此原理更简单、参数更少、实现更容易;

(4) 与遗传算法一样,作为一种随机搜索算法,PSO 算法最后得到的解也带有一定的随机性,其结果不一定比遗传算法更精确。

表 2 各种模型参数辨识方法比较

Tab.2 Comparison of various methods for identification of parameters of a model controlling a speed regulation system

参数辨识方法	适用范围	测点要求	鲁棒性	辨识速度	辨识结果形式	辨识结果的唯一性
基本最小二乘法	线性系统	高	弱	快	传递函数	唯一
辅助变量法	线性系统	高	较强	快	传递函数	唯一
神经网络	线性系统	高	弱	快	传递函数	唯一
遗传算法	线性系统或含非线性环节系统	不高	强	需要一定时间	对应参数值	随机性
粒子群算法	线性系统或含非线性环节系统	不高	强	需要一定时间	对应参数值	随机性

## 5 结 论

对粒子群优化算法进行了研究,并将其应用于发电机组调速系统模型参数辨识。与其它参数辨识方法相比,基于 PSO 优化的参数辨识方法具有较强的鲁棒性,对试验扰动信号的要求不高,对问题的连续性条件也没有要求,因此是一种既可以辨识线性环节模型参数,又可以辨识非线性环节模型参数的辨识方法,十分适合进行发电机组调速系统模型参数的辨识。从实际参数辨识及仿真校核的情况来看,该方法对试验条件的适应性好,对模型参数的辨识结果也达到了较高的精度,在目前广泛开展的调速系统参数测试工作中发挥了很好的作用。同时,由于采用信息共享机制,这种方法有可能比遗传算法更快地收敛到问题的最优解,从而节省求解时间。从原理上讲,通过对模型的自定义,还可以将该方法应用于任何灰箱模型参数的辨识,因此具有十分广阔的应用前景。

### 参考文献:

[1] 王春月,徐基豫. 200 MW 汽轮机 DEH 控制系统结构功能及甩负荷仿真分析[J]. 汽轮机技术,1997,39(3): 161-165.  
WANG Chun-yue, XU Ji-yu. Simulation analysis of the structural functions and load ejection of a 200 MW steam turbine DEH control system [J]. Steam Turbine Technology, 1997, 39(3): 161-165.

[2] 唐胜利,朱慕铨,何祖威. 200 MW 汽轮机调速系统试验及仿真分析[J]. 汽轮机技术,1998,40(3): 170-175.  
TANG Sheng-li, ZHU Mu-quan, HE Zu-wei. Experiment and simulation analysis of a 200 MW steam turbine speed regulation system [J]. Steam Turbine Technology, 1998, 40(3): 170-175.

[3] ELPINIKI I PAPAGEORGIOU, KONSTANTINOS E PARSOPOULOS. Fuzzy Cognitive Maps Learning Using Particle Swarm Optimization [J]. Journal of Intelligent Information Systems, 2005, 25 (1): 95 - 121.

[4] 张洪涛,胡红丽,王 斌. 一种改进粒子群算法及其在 PID 参数整定中的应用[J]. 控制理论与应用, 2008, 27(12): 14-16.  
ZHANG Hong-tao, HU Hong-li, WANG Bin. An improved particle colony algorithm and its application in setting PID parameters [J]. Control Theory and Application, 2008, 27(12): 14-16.

[5] 周 驰,高海兵,高 亮,等. 粒子群优化算法[J]. 计算机应用研究, 2003, 20(12): 7-11.  
ZHOU Chi, GAO Hai-bing, GAO Liang, et al. Partical colony optimization algorithm [J]. Study of Computer Applications, 2003, 12: 7-11.

[6] 任子晖,王 坚. 一种动态改变惯性权重的自适应粒子群算法[J]. 计算机科学, 2009, 36(2): 227-229.  
REN Zi-hui, WANG Jian. Inertia-weighting-dynamically-varied self-adaptive partical colony algorithm [J]. Computer Science, 2009, 36(2): 227-229.

[7] 易云飞,陈国鸿. 一种基于收缩因子的改进粒子群算法[J]. 软件导刊, 2009, 8(9): 59-60.  
YI Yun-fei, CHEN Guo-hong. A shrinkage factor-based improved particle colony algorithm [J]. Software Guide, 2009, 8(9): 59-60.

[8] 刘凌子,周永权. 基于模拟退火和文化粒子群的优化算法[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(32): 31-34.  
LIU Ling-zi, ZHOU Yong-quan. Simulation-annealing-and-cultural-particle-colony-based optimization algorithm [J]. Computer Engineering and Application, 2009, 45(32): 32-34.

[9] 高 伟,李阳海. 遗传算法在汽轮机调速系统参数辨识中的应用[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2006, 34(10): 80-82.  
GAO Wei, LI Yang-hai. Application of the genetic algorithm in the identification of the parameters of a steam turbine speed regulation system [J]. Journal of Central China University of Science and Technology, natural science edition, 2006, 34(10): 80-82.

(陈 滨 编辑)

other algorithms, the method under discussion takes a short time for testing and needs only 0.022 seconds, thus more suitable for on-line diagnosis. **Key words:** centrifugal pump, fault diagnosis, lifting wavelet package, relevant vector machine

Einstein 循环制冷机导流式气泡泵的性能研究 = **Study of the Performance of a Flow Guided Bubble Pump Destined for Einstein Cycle Refrigerators** [刊,汉] PING Ya-qin, LIU Dao-ping, CHEN Sheng-xiang, et al( Refrigeration Technology Research Institute, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(6) . - 743 ~ 746

In the light of such demerits of a bubble pump as low in efficiency and incapable of effectively utilizing low quality unsteady heat source etc. , presented was a flow guided bubble pump with its lifting performance being experimentally studied. Under a given operation condition, the influence of various heating powers and immersion ratios on the liquid lifting quantity was also investigated. The test curves were given and compared with those of the traditional bubble pumps. The test results show that when the diameter of the lifting tube is 16 mm and the immersion ratio is 0.4, the startup power of the flow guided bubble pump can decrease by 100 W and the lifting efficiency can increase by 13% , proving that flow guided bubble pumps are characterized by such remarkable features as a low startup power, high efficiency and energy-saving etc. The analytic results are of major significance for enhancing the efficiency of a bubble pump and the performance of an Einstein cycle refrigerator. **Key words:** flow guided bubble pump, low quality heat source, liquid lifting quantity

粒子群优化算法及其在发电机组调速系统参数辨识中的应用 = **Particle Colony Algorithm and Its Application in Discriminating Parameters of a Speed Regulation System of a Generator Unit** [刊,汉] LI Yang-hai, WANG Kun, HUANG Shu-hong, et al( College of Energy Source and Power Engineering, Central China University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(6) . - 747 ~ 750

Accurate and reliable model parameters of a speed regulation system of a generator unit are most important for analyzing the stability of its electric power system. As the requirements for test conditions are relatively rigorous when the conventional discrimination methods ( such as least square method) are used to discriminate the parameters of a model, so it is very difficult to identify the parameters existing in a large quantity of a nonlinear link of a speed regulation system. The authors introduced a particle colony algorithm, which is now the hot research point, into the identification process of model parameters of the speed regulation system of a power generator unit. The research results show that when using the particle colony theory to discriminate model parameters, it can achieve a quick calculation speed and an accurate and reliable discrimination result and solve very well the intractable technical problems in identifying parameters of a nonlinear link of a speed regulation system. In the meantime, the algorithm enjoys a good universality and through a user definition of the model, it can be used for discriminating the parameters of a grey box model, **Key words:** generator unit, speed regulation system, parameter discrimination, Matlab, par-

title colony algorithm

双室热保护法测真空绝热板导热系数的装置及实验研究 = **Device for Measuring the Heat Conduction Coefficient of a Vacuum Insulation Plate By Using a Dual-chamber Heat Protection Method and Its Experimental Study** [刊,汉] KAN An-kang, HAN Hou-de ( College of Merchant Ships, Shanghai Maritime University, Shanghai, China, Post Code: 201306) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(6) . - 751 ~ 755

The traditional plate heat protection method for testing the heat conduction coefficient of a vacuum insulation plate (VIP) is limited by the dimensions of a VIP and affected by the heat bridge effect, thus, there exist certain demerits. The authors introduced a principle for determining the heat conduction coefficient of a VIP by using a dual-chamber heat protection method and designed a testing device. With the outer chamber serving as a heat protection device and the inner chamber serving as a testing and heating device, the heat conduction coefficient of the VIP was tested under a steady state. The device is not limited by the dimensions of the VIP with the heat bridge effect being reduced. The authors also analyzed the factors influencing the test results and the theoretical error. The test result was relatively precise when compared with the calibrated value. The device under discussion can be used for testing the heat conduction coefficient of a VIP before it leaves the works and inspecting the aging degree of any used VIP.

**Key words:** vacuum insulation plate (VIP), dual-chamber heat protection method, heat conduction coefficient, testing technique

基于 TMS320C31 + FPGA 数字控制器的主被动磁悬浮飞轮一体化控制 = **Integrated Control of a Driving and Driven Magnetically Levitated Flywheel Based on a TMS320C31 + FPGA (Field-programmable Gate Array) Digital Controller** [刊,汉] ZHANG Fu-xin, LI Guang-jun, LIU Gang, et al ( College of Instrumentation Science and Optoelectronic Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, China, Post Code: 100191) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(6) . - 756 ~ 759

In the light of the demands for a low power consumption, high reliable and integrated driving and driven magnetically levitated flywheel with a driven control in three degrees of freedom along the axial direction and a driving control in two degrees of freedom along the radial direction, integrated and designed was its controller. Firstly, a mathematical model was established for the driving magnetic bearing with proper control tactics being chosen. On this basis, an integrated digital control system with DSP + FPGA serving as the core, including a signal modulation, outer storage, driving and power amplification module, was presented and experimentally verified. The test results show that when the flywheel is levitated in a static state, the radial runout of the rotor is around 70 mV, about 8.7% of the protection clearance (the peak-peak value is about 8 V). When the flywheel is accelerated to its rated speed, the radial runout of the rotor is around 1.2 V, around 15% of the protection clearance. When operating at the rated speed, the power consumption of the magnetic bearing system of the magnetically levitated flywheel is only 5.5 W, thus meeting the requirements for the performance of the flywheel. **Key words:** driving and driven magnetic levita-