

基于改进 DE 算法的兆瓦级风机独立变桨控制

刘 杨,王维庆,王海云,韩 璐

(新疆大学教育部可再生能源发电与并网控制工程技术研究中心,新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要:针对兆瓦级风电机组在额定风速以上的气流扰动时出现的载荷不平衡现象,提出了基于改进 DE 算法的独立变桨距控制策略。利用 DE 算法能够较快进行全局寻优的特点,缩小 PID 参数的搜索范围,提高动态响应能力。通过改进 DE 算法以改善其局部搜索能力,使调节过程具有较强的自适应性,从而得到最优的桨距角控制结果。最后,采用 Matlab 和 Fast 软件作为测试平台,对 2 MW 的独立变桨机组进行了仿真。结果表明,所提独立变桨控制策略能够有效降低机组在扰动情况下的载荷,缓解机组疲劳程度、延长机组寿命,有利于稳定输出功率,从而提高运行效率。

关键词:兆瓦级风电机组;独立变桨控制;改进 DE 算法;风机载荷

Abstract: Aiming at the load imbalance occurred in the air flow disturbance of megawatt wind turbine generator system at the rated wind speed, an individual pitch control strategy based on the improved differential evolution (DE) algorithm is proposed. It uses the optimization of DE algorithm to narrow the search range of PID parameters and improve dynamic response capability. Through the improved DE algorithm, the local search ability is improved to make the adjustment process have a strong adaptability, thus the optimal control of pitch angle is obtained. Finally, Matlab and Fast software are adopted as the testing platform, and the simulation for 2 MW unit with individual pitch is carried out. The results show that the proposed individual pitch control strategy can effectively reduce the load of the unit under disturbance, relieve the fatigue degree of the unit and extend its life, which is good for maintaining the output power so as to improve the running efficiency.

Key words: megawatt wind turbine generator system; individual pitch control; improved DE algorithm; load of wind turbine

中图分类号: TM614 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2017)03-0031-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.03.007

0 引言

随着全球能源危机的逐步加重,风电作为可再生清洁能源开发的重点对象,其单机发电容量不断提升,整机高度及叶片直径也在不断增加,使得桨叶在工作过程中受到湍流扰动、塔影效应以及风剪切作用的影响也愈加显著,波动性明显增强,增大了叶片的挥舞弯矩,使风轮的不平衡载荷进一步加重^[1]。对于兆瓦级风机而言,采用恰当的控制策略以减小疲劳载荷有助于降低机组的运维费用、延长机组使用寿命。目前,变速变桨技术是兆瓦级风电机组的主要控制方式^[2],通过改变桨距角,使叶片绕其轴心旋转,从而使气流对叶片的攻角发生变化,实现风轮转速的恒定,达到提高风电机组对风能的捕获能力、改善风机气动特性和保证机组输出功率稳定的目的。因此,对兆瓦级风电机组变桨控制的

进一步探索成为当前的研究重点。

目前,国内外专家学者根据变桨方式的不同将控制策略分为统一变桨(collective pitch control, CPC)和独立变桨(individual pitch control, IPC)两种。文献[3]采用统一变桨控制,根据风速来流的变化统一调节所有叶片的攻角大小,使气流对叶片产生的气动转矩维持在一个恰当的范围之内,从而保证了风轮转速的可控性。然而,文献[4]研究表明,对于大尺寸风电机组而言,同一个风机的各桨叶处的气流分布情况各异,造成了风机的不平衡载荷,对于兆瓦级大型风机来说统一变桨已不是最佳的控制方式。文献[5]通过利用独立变桨各叶片的独立执行机构分别对桨叶进行调节,能够克服统一变桨在兆瓦级风机扫风平面气流分布不均时出现的风机功率下降现象。文献[6]提出了将载荷和方位角联合进行反馈的独立变桨策略,以缓解气流对桨叶的拍打和振动,有效降低机组的疲劳载荷。文献[7]提出了利用 Clark 变换与比例谐振控制器相结合的

基金项目:自治区重点实验室项目(2016D03021);国家 863 计划项目(2013AA050604);教育部创新团队项目(IRT1285)

独立变桨控制策略,但该方案增加了系统参数的动态时变性。

鉴于传统的PID独立变桨应对气流突变的动态响应效果不够理想,其疲劳载荷与功率输出的稳定性还有待于进一步优化,提出将微分进化算法(differential evolution, DE)加以改进,从而增强其局部搜索能力,并与其出色的全局寻优能力相结合后用于调节控制器参数,并设计了仿真实验进行对比研究,最后结果验证了所提独立变桨控制策略能够缓解机组的疲劳载荷,有利于稳定输出功率,延长机组寿命并提高运行效率。

1 风机气动载荷的计算与分析

1.1 气动载荷的计算

风电机组的气动载荷主要是根据动量-叶素理论进行计算的,若设风机的摆动载荷为 M_x ,挥舞载荷为 M_y ,轴向力为 F_x ,切向力为 F_y ,则计算公式如式(1)所示:

$$\begin{cases} M_x = \frac{1}{2} \int_r^R \rho V_w^2 l C_t r dr \\ M_y = \frac{1}{2} \int_r^R \rho V_w^2 l C_n r dr \\ F_x = \frac{1}{2} \int_r^R \rho V_w^2 l C_n dr \\ F_y = \frac{1}{2} \int_r^R \rho V_w^2 l C_t dr \end{cases} \quad (1)$$

式中: ρ 为气流密度; V_w 为来流风速的相对值; l 为翼型弦长; C_t 为切向力系数; C_n 为法向力系数。

1.2 影响气动载荷的因素

影响气动载荷的因素主要有湍流效应、塔影效应和风剪效应。由于地形地貌多样,风场气流会与其发生摩擦或垂直方向的变化,当气流移动到风机桨叶旋转平面上时,能在短时间内发生较强波动,形成湍流现象,会增加风机桨叶的不平衡载荷,不利于输出功率的稳定。

塔影效应是指塔架在风场中会阻碍通过的气流,使风速大小和方向发生改变,将对下风向风力机组产生不利影响。一般按照潜流理论模型对受到塔影效应影响的风速进行计算,设轮毂中心到塔架中心的距离为 d ,塔架直径修正因子为 D_t ,则风速的值如式(2)所示:

$$v(r, \theta) = v_h \left[1 + \frac{D_t^2 (H_h + r \sin \theta)^2 (r^2 \cos^2 \theta - d^2)}{(r^2 \cos^2 \theta + d^2)^2} \right]^n \quad (2)$$

在大气的边界层中,风速会随着高度的变化而变化;而兆瓦级风机一般属于大尺寸机组,因此,旋转至顶部的桨叶比处于底部的桨叶所受风速更大,距地面高 h 处的风速 v_h 与距地面高 H 处的风速 v_H 间的关系可用式(3)表示:

$$\frac{v_h}{v_H} = \left(\frac{h}{H} \right)^\lambda \quad (3)$$

式中 λ 为风剪系数。

因为轮毂所在位置低于叶片处于扫风的上半平面位置,所以按此处的平均风速计算风机的气动载荷要比叶轮实际所承载荷小,降低了分析风机不平衡载荷的准确度。为此,通过增加风剪切效应对风速扰动的方式来解决该问题,用 θ 表示桨叶的方位角, $W_s(r, \theta)$ 表示扰动的变化量,则有关系式(4):

$$W_s(r, \theta) \approx \lambda \left(\frac{r}{H} \right) \cos \theta + \frac{\lambda(\lambda-1)}{2} \left(\frac{r}{H} \right)^2 \cos^2 \theta + \frac{\lambda(\lambda-1)(\lambda-2)}{6} \left(\frac{r}{H} \right)^3 \cos^3 \theta \quad (4)$$

1.3 风机载荷的坐标变换

风机载荷主要包含静态载荷和动态载荷两个方面,这里主要研究塔影、湍流效应以及阵风、风切变对风机叶片的气动载荷,属于动态载荷研究。当桨叶处于1P频率的转速时,根据频谱分析知其功率幅值最高^[8],因此,以该频率时风机叶根的载荷为考察对象,将各桨叶的根部载荷利用Park变换转换为 d 、 q 载荷以及相应的反变换,控制框图及公式分别如图1和式(5)、式(6)所示:

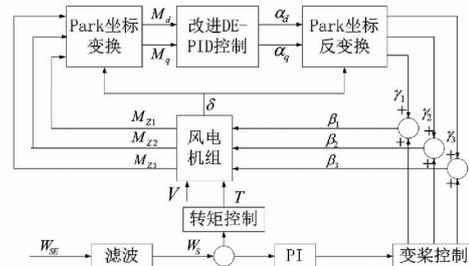


图1 改进DE算法的独立变桨控制

$$\begin{pmatrix} M_d \\ M_q \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{4\pi}{3}) \\ \sin \theta & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{z1} \\ M_{z2} \\ M_{z3} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{pmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{4\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_d \\ \alpha_q \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: M_{z1} 、 M_{z2} 、 M_{z3} 分别为坐标变换前各叶根载荷; γ_1 、 γ_2 、 γ_3 分别为反变换后各桨叶的附加桨距角; M_d 、 M_q 分别为转换后 d 、 q 坐标载荷; α_d 、 α_q 分别为反变换前 d 、 q 坐标的桨距角; θ 为参考桨叶的方位角。

2 改进 DE 算法的独立变桨控制

2.1 DE 算法原理

微分进化算法^[9](DE)是Price和Storn于1995年提出的搜索算法,主要是通过进化过程中的变异、交叉和选择产生新生代群体。如果存在如式(7)的待优化问题:

$$\min f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad a_i \leq x_i \leq b_i \quad i=1, 2, \dots, n \quad (7)$$

式中: x_1, x_2, \dots, x_n 为 n 个待优化参数; a_i, b_i 为其取值的上、下限。则 DE 算法的寻优空间为 $S_0 = \{(a_i, b_i)\}$ 。

DE 算法中的种群规模 N_p 是指进化过程中每一代的个体数量,若设进化代数 k ,第 k 代种群为 $X^k = [x_1^k, x_2^k, \dots, x_{N_p}^k]$ 则第 k 代中个体 i 可表示为 $x_i^k = [x_{i,1}^k, x_{i,2}^k, \dots, x_{i,n}^k]$,该算法主要通过变异、交叉和选择来达到优化计算的目的,具体如下:

1) 变异操作。设变异的的比例因子为 F ,在第 k 代种群的 N_p 个个体中随机选择 3 个各异的个体 r_1 、 r_2 和 r_3 ,且这些个体与当前个体 x_i^k 也不相同,则第 $k+1$ 代的变异个体 v_i^{k+1} 可按式(8)生成:

$$v_i^{k+1} = x_{r_3}^k + F(x_{r_1}^k - x_{r_2}^k) \quad (8)$$

2) 交叉操作。第 $k+1$ 代的交叉个体 u_i^{k+1} 是通过将当前个体 x_i^k 与变异个体 v_i^{k+1} 进行如式(9)所示的二项分布的交叉操作而生成的,通过该操作可以保持或增强种群个体的多样性。

$$u_{i,j}^{k+1} = \begin{cases} v_{i,j}^{k+1} & \text{rand}(j) \leq C_R \\ x_{i,j}^k & \text{else} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\text{rand}(j)$ 为 $0 \sim 1$ 内服从均匀分布的随机数; C_R 为在 $0 \sim 1$ 内取值的交叉因子。

3) 选择操作。根据 2) 中所得的第 $k+1$ 代交叉个体 u_i^{k+1} 求取目标函数值,并进行评价,再按式(10)判断是否选用该交叉个体。

$$x_i^{k+1} = \begin{cases} u_i^{k+1} & f(u_i^{k+1}) < f(x_i^k) \\ x_i^k & \text{else} \end{cases} \quad (10)$$

2.2 改进 DE 算法的独立变桨控制

风电机组在工作过程中不仅受到风速随机变化的影响,还受到机组自身转动惯量以及系统非线性耦合的影响,这些因素对叶片载荷的动态性能提出了很高的要求。传统的独立变桨技术往往采用 PID 控制,该方法简单、有效,但对于兆瓦级风电机组动态载荷控制来说,其响应速度和精度还有待于进一步提高。采用智能控制的方式是独立变桨控制技术的发展方向。采用智能算法对传统 PID 控制进行改良,有利于提高系统的自适应能力,并优化控制系统的参数整定速度和精度。采用改进的 DE 算法与传统 PID 控制进行融合,有利于对独立变桨系统中复杂的非线性状态进行控制。

DE 算法具有较强的鲁棒性和较少的控制参数,但局部搜索能力较弱,为此,对原算法中的变异比例因子 F 和交叉因子 C_R 采用适应度方差进行优选,提高其局部搜索速度和准确度。适应度方差如式(11)所示:

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^{N_p} \left(\frac{f_i - f_a}{f_b} \right)^2 \quad (11)$$

式中: f_a 为适应度均值; f_b 为群体最优适应度; f_i 为个体 i 的适应度; N_p 为种群数量。

变异比例因子 F 和交叉因子 C_R 分别按式(12)、式(13)进行第 k 代更新:

$$F_k = F_{\min} + (F_{\max} - F_{\min}) \left(1 - \frac{\sigma_k^2}{N_p} \right) \quad (12)$$

$$C_R^k = C_{R\min} + (C_{R\max} - C_{R\min}) \left(1 - \frac{\sigma_k^2}{N_p} \right) \quad (13)$$

式中: F_{\min} 、 F_{\max} 和 $C_{R\min}$ 、 $C_{R\max}$ 分别为比例因子 F 和交叉因子 C_R 的上、下限。

采用改进 DE 算法对兆瓦级风机独立变桨控制的 PID 参数进行调节,参照图 1,以不平衡载荷为控制对象,设控制量为 $u(k)$,则控制结构如图 2 所示,其中: $r(t)$ 为 M_d 、 M_q ; $y(t)$ 为 α_d 、 α_q ; $e(k)$ 为偏差值。

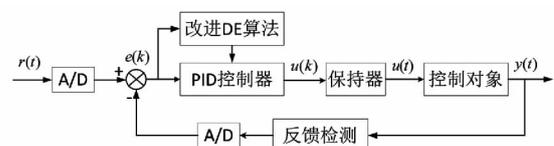


图 2 改进 DE-PID 控制

设该控制系统的性能指标为偏差 $e(k)$ 的二阶矩积分,如式(14)所示:

$$M = \int_0^{\infty} t^2 |e(t)| dt \quad (14)$$

具体的实现步骤如下:

1) 利用传统 PID 参数整定方法,计算 PID 的初始参数 K_{p0} 、 T_{i0} 和 T_{d0} ,进而确定种群的初始规模;

2) 设定初始参数,种群规模 $N_p = 50$,比例因子 $F_{max} = 0.85$, $F_{min} = 0.3$,交叉因子 $C_{Rmin} = 0.4$, $C_{Rmax} = 0.9$;

3) 起始代 $k = 1$,终止代 $k = 400$,循环终结条件 $f_a < 10^{-4}$,并按式(14)评估系统初始性能;

4) 开始进化,不断变异和交叉,并计算种群中个体适应度值、当前种群最优解、适应度最佳值和均值,得到适应度方差,按式(12)、式(13)更新 F 和 C_R 的第 k 代值;

5) 判断当前进化代数或适应度均值是否满足结束迭代条件,若均不满足,则转入步骤4)继续进化,否则,终止迭代,转入步骤6);

6) 输出最终优化结果。

3 仿真分析

采用 Matlab 和 Fast 软件作为测试平台,以额定功率 2 MW、额定转速 15 r/min、额定风速 11.4 m/s、切入风速 4 m/s、切出风速 25 m/s、风轮半径 46.5 m 的风机作为研究对象,实验环境的湍流风速设定为 16 m/s,如图3所示。

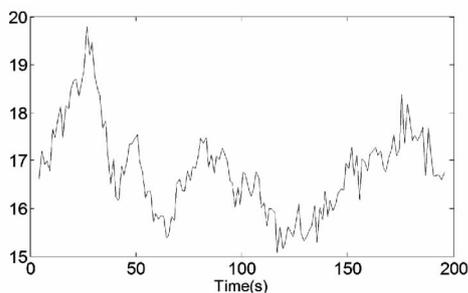


图3 湍流风速变化

对传统独立变桨(IPC)、改进 DE 算法的独立变桨(DE - IPC) 以及统一变桨距(CPC) 控制策略在上述环境下进行对比实验,如图4~图7所示。由图4可知,相较于统一变桨和传统独立变桨策略,采用所提独立变桨策略的叶片挥舞弯矩分别减小 32.71% 和 11.97%,如表1所示。

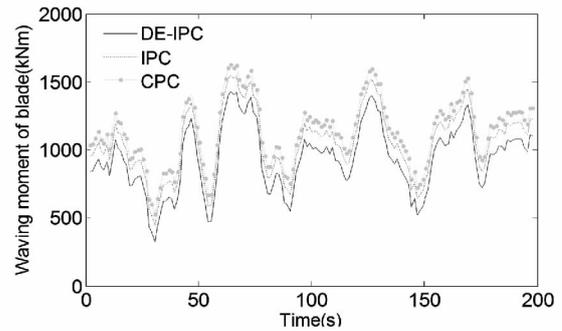


图4 叶片挥舞弯矩

表1 叶片挥舞弯矩对比

挥舞弯矩	变桨策略		
	统一变桨	传统独立变桨	改进 DE 算法的独立变桨
平均值/(kN · m)	1 180	902	794
标准差/(kN · m)	2 347	1 993	1 781

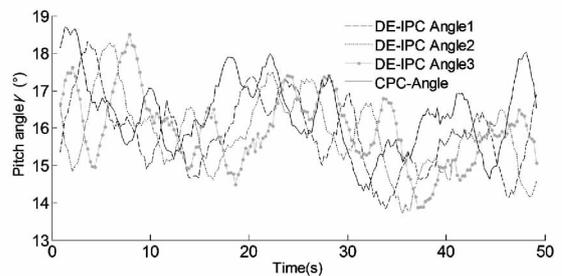


图5 DE - IPC 与 CPC 的桨距角对比

图5为所提变桨策略与统一变桨策略情况下各桨叶桨距角的变化曲线,相对于统一变桨策略,独立变桨的各桨叶桨距角各不相同,其波动幅度更低。

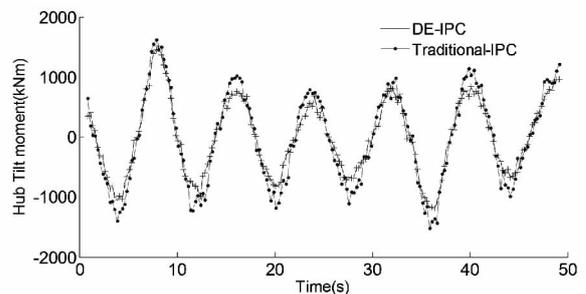


图6 DE - IPC 与传统 IPC 的俯仰弯矩对比

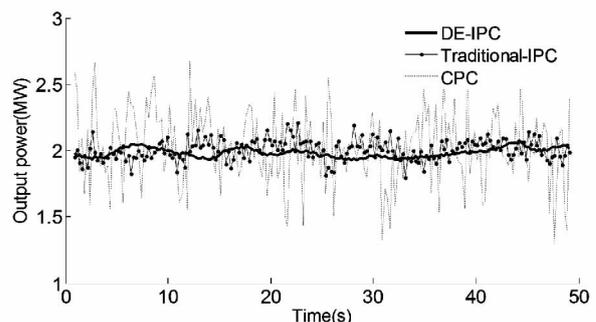


图7 输出功率曲线

(下转第60页)

Power Electronics Conference and Exposition 2009: 1564 - 1569.

- [8] Halimi ,b. P A , Dahono. A Current Control Method for Phase - controlled Rectifier That Has An LCL Filter [C]. 2001 4th IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems 2001: 20 - 25.
- [9] 戴训江,晁勤. 基于 LCL 滤波的光伏并网逆变器电流滞环控制[J]. 电力电子技术 2009 43(71) : 33 - 35.
- [10] 屈克庆,叶天凯,赵晋斌,等. 基于前馈补偿的 LCL 型并网逆变器解耦控制策略研究[J]. 电气传动 2015 , 45(11) : 26 - 30.
- [11] 鲍陈磊,阮新波,王学华,等. 基于 PI 调节器和电容电

流反馈有源阻尼的 LCL 型并网逆变器闭环参数设计 [J]. 中国电机工程学报 2012 32(25) : 133 - 142.

- [12] 戴先中. 多变量非线性系统的神经网络逆系统控制方法[M]. 北京: 科学出版社 2005.
- [13] 高为炳. 变结构控制的理论及设计方法[M]. 北京: 科学出版社 ,1996.

作者简介:

李 鹏(1992) 硕士研究生,研究方向为微电网与新能源发电技术、滑模变结构控制;

王 奔(1960) 教授、博士,研究方向为研究方向为电力系统非线性和变结构控制。

(收稿日期: 2017 - 01 - 27)

=====
(上接第 34 页)

由图 6 可知,所提策略比传统独立变桨策略对塔基的俯仰弯矩更小,从而减小了对风电机组基础结构的作用力,因而有助于缓解兆瓦级风电机组的疲劳程度。

由图 7 可知,采用独立变桨控制策略的输出功率比统一变桨更稳定,而改进 DE 算法的独立变桨控制策略能够进一步减小传统独立变桨输出功率的波动,具有稳定性更佳功率输出能力。

4 结 论

针对兆瓦级风电机组工作于额定风速以上时易受气流扰动,形成疲劳载荷,进而降低风机运行性能,且传统 PID 独立变桨控制策略动态响应能力差的情况,提出了基于改进 DE 算法的独立变桨控制策略,并以 Matlab 和 Fast 软件作为平台对 2 MW 风电机组进行了仿真。结果表明,所提策略能够有效降低机组在扰动情况下的载荷,缓解机组疲劳程度,并减少机组转速变动幅度,提高输出功率的稳定性。

参考文献

- [1] 李春兰,曹成帅,汪泽,等. 减小风剪、塔影和湍流效应的独立变桨控制研究[J]. 科学技术与工程, 2016 , 16(16) : 64 - 69.
- [2] 姚兴佳,张雅楠,郭庆鼎,等. 大型风电机组三维模糊

控制器设计与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2009 29 (26) : 112 - 117.

- [3] 何玉林,黄帅,苏东旭,等. 双馈式变速变桨风电机组的桨距控制[J]. 中国电力, 2011 , 44(3) : 90 - 95.
- [4] 金鑫,李浪,何玉林,等. 兆瓦级风力发电机独立变桨控制策略分析[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2015 , 38(1) : 61 - 67.
- [5] 崔双喜,王维庆,张强. 风力发电机组独立变桨鲁棒自适应桨距角跟踪控制[J]. 电力系统保护与控制, 2015 , 43(6) : 52 - 57.
- [6] 刘皓明,唐俏俏,张占奎,等. 基于方位角和载荷联合反馈的独立变桨距控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2016 , 36(14) : 3798 - 3805.
- [7] Zhang Y , Chen Z , Cheng M. Proportional Resonant Individual Pitch Control for Mitigation of Wind Turbines Loads [J]. Iet Renewable Power Generation , 2013 , 7 (7) : 191 - 200.
- [8] Hooft E L , Schaak P , Engelen T G. Wind Turbine Control Algorithms(ECN - C - 03 - 111) [R]. Petten , Netherlands ,Energy Research Centre of the Netherlands 2003.
- [9] 苏海军,杨煜普,王宇嘉,等. 微分进化算法的研究综述[J]. 系统工程与电子技术, 2008 , 30(9) : 1793 - 1797.

作者简介:

刘 杨(1987) 硕士研究生,研究方向为电力系统及其自动化。

(收稿日期: 2017 - 03 - 21)