

模糊控制在离网风力发电最大风能捕获中的应用^①

齐保良, 文 鹏, 李成栋

(山东建筑大学 信息与电气工程学院, 济南 250101)

摘 要: 研究了一种模糊PID实现的自调整变步长算法, 解决了爬山算法动态响应速度与稳态精度相矛盾的问题. 分析了离网风力发电系统数学模型, 建立了不测转速的控制结构. 在 Simulink 平台上对一个 5kW 离网风电系统进行了仿真分析. 结果表明, 在平稳风速以及组合风速下, 该算法均能有效提高跟踪速度, 捕获更多功率.

关键词: 离网风力发电; MPPT 控制; 模糊 PID; PMSG

Fuzzy Logic Based MPPT Controller for a Stand-Alone Wind Energy Conversion System

QI Bao-Liang, WEN Peng, LI Cheng-Dong

(School of Information and Electrical Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

Abstract: To solve the problem of the tracking speed versus control efficiency trade off problem of the hill climb search(HCS) method, an adaptive variable step search algorithm realized by fuzzy PID is applied. Based on the equivalent circuit analysis of the wind energy conversion system (WECS), a speed-sensorless control scheme has been developed. A 5kW stand alone WECS was analyzed in the Simulink. The results show that the proposed algorithm has better dynamic performance and capture more power than the conventional HCS under constant wind and variable wind.

Key words: stand-alone wind energy conversion system; MPPT control; fuzzy PID; PMSG

近年来, 风能作为一种清洁可再生能源, 得到较快发展. 离网小型风电性价比高、灵活方便, 在偏远地区、电网未覆盖地区, 有着潜在的发展空间^[1]. 在风力发电系统中, 采用最大风能捕获策略(MPPT), 一方面可以提高变流器利用效率, 另一方面能够进一步降低风电成本. 因此, 研究高效、经济的 MPPT 控制策略对小风电的推广有着积极作用.

MPPT 控制方法主要有: 最优叶尖速比法(TSR)、功率信号反馈法(PSF)以及爬山搜索算法(HCS)^[2-4]. TSR 检测风速、发电机转速, 依据最优叶尖速比值调节风机转速, 使系统捕获最大风能. PSF 检测发电机转速, 查询最优功率转速曲线, 使系统运行在最优状态. HCS 通过比较相邻两次捕获功率, 调节发电机转速变化方向, 使系统向最大功率点移动. 三种方法中, TSR 与 PSF 控制方式较为直接, 动态响应快, 在大型风电中应用较多^[5]. HCS 不测风速, 不需要知道系统最优叶尖速比值、功率特性曲线, 更适合在小型风电中应用.

然而, 爬山算法存在以下问题^[6,7]: 搜索步长是固定的, 在最大功率点处必然存在震荡现象, 1)增大搜索步长, 可以加快搜索速度, 但震荡随之增大, 降低了搜索效率. 2)减小搜索步长, 可以减缓震荡, 但响应速度随之降低.

为解决上述问题, 综合模糊控制动态响应快、适应性强与 PID 控制无静差的优点, 给出了模糊 PID 实现的自调整变步长算法. 该算法自动调节步长大小, 在远离最大功率点时, 采用较大步长, 加快搜索速度; 在靠近最大功率点时, 采用较小步长, 提高稳态精度, 兼顾了系统动、静态性能. 同时, 该算法不依赖机组参数, 可方便的移植到其他离网风电系统.

1 数学模型与控制策略

本文所采用的离网风电系统结构如图 1 所示, 由定桨距风轮、永磁直驱发电机(PMSG)、整流桥、Boost 变换器以及负载组成. 定桨距风轮直接驱动 PMSG, 将

^① 基金项目:国家自然科学基金(61105077)

收稿时间:2013-06-27;收到修改稿时间:2013-07-19

捕获的风能转换为机械能,再由 PMSG 将机械能转换为电能供给负载. 由于风速随机变化, PMSG 输出的变频率、变幅值交流电需进一步处理才能满足用户电能要求. 调节 Boost 变换器占空比,可以间接调节风轮转速,提高风能利用. 负载可以是逆变器或者直流负载.

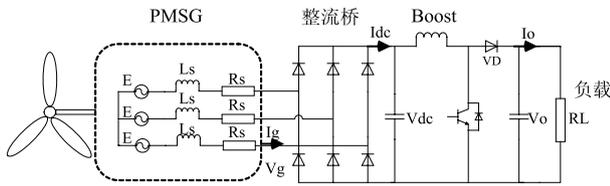


图 1 系统总体框图

1.1 数学模型

PMSG 励磁磁通恒定时,每相反电动势 E 是 ω 转速的线性方程.

$$E = K_e \Phi \omega \quad (1)$$

式中, K_e 为电机常数.

PMSG 终端相电压为:

$$V_g = E - I_g(R_s + j\omega_e L_s) \quad (2)$$

$$\omega_e = p\omega \quad (3)$$

式中, I_g 为相电流, R_s 为定子电阻, ω_e 为电角频率, L_s 为定子电感.

忽略整流桥损耗,由功率平衡可知:

$$3V_g I_g = V_{dc} I_{dc} \quad (4)$$

对于三相二极管整流,直流侧电压 V_{dc} 为:

$$V_{dc} = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} \sqrt{6} V_g \cos \theta d\theta = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V_g \quad (5)$$

由式(4)、式(5)可知:

$$I_{dc} = \frac{\pi}{\sqrt{6}} I_g \quad (6)$$

当 Boost 变换器工作在电流连续模式时有:

$$V_o = \frac{1}{1-d} V_{dc} \quad (7)$$

$$I_o = (1-d) I_{dc} \quad (8)$$

设负载电阻为 $R_l = \frac{V_o}{I_o}$, 发电机输出等效电阻为

$R_g = \frac{V_g}{I_g}$, 综合(5)-(8), 可以推得

$$R_g = \frac{\pi^2}{18} (1-d)^2 R_l \quad (9)$$

因此, 调节 Boost 变换器的占空比, 则等效的改变

发电机每相输出电阻, 进而调节发电机转矩, 实现转速调节目的. 风轮与发电机直接连接, 在某一风速下, 调节变换器占空比, 总能找到最优转速, 使风轮工作在最优叶尖速比状态, 捕获最大风能.

1.2 本文所提控制策略

风力发电是一个复杂非线性系统, 包含多个未知的动态过程, 此外, 随着寿命增加, 机组参数也在变化, 难以建立模型^[8]. 模糊控制容忍不确定输入、对参数变化有较好适应能力, 在风力发电等变工况场合有着良好的性能表现.

在最大功率点处风轮捕获功率与发电机转速有以下关系:

$$\frac{dP}{d\omega} = 0 \quad (10)$$

由链式推导可知:

$$\frac{dP}{d\omega} = \frac{dP}{dV_{dc}} \frac{dV_{dc}}{d\omega} \quad (11)$$

忽略发电机定子电阻以及定子电感:

$$V_g \approx E \quad (12)$$

再由式(1)、(3)可知:

$$V_{dc} \propto \omega \quad (13)$$

所以

$$\frac{dV_{dc}}{d\omega} > 0 \quad (14)$$

由此可得:

$$\frac{dP}{d\omega} = 0 \Rightarrow \frac{dP}{dV_{dc}} = 0 \quad (15)$$

如图 2 所示, 应用上述判据, 则有以下结论: 在最大功率点处有斜率 (dP/dV_{dc}) 为零; 在上山方向有斜率为正, 此时应增加输出电压 V_{dc} ; 在下山方向有斜率为负, 应减少输出电压. 通过测量输出电压来间接反映转速 ω , 省却了转速测量环节, 系统更为简单、可靠.

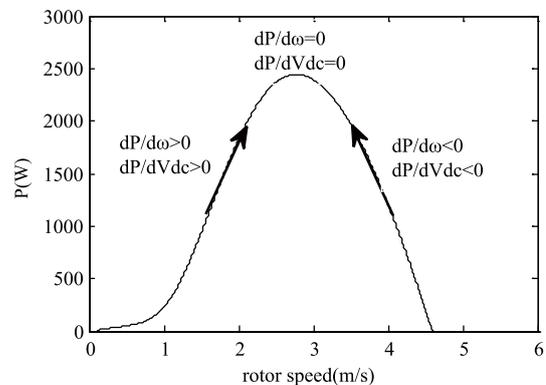


图 2 最大功率与转速关系曲线

1.3 自调整算法实现

控制器实时采集输出功率直流母线电压 $V_{dc}(K)$ ，并计算出斜率 (dP/dV_{dc}) 作为模糊推理的输入变量。模糊推理经过变量模糊化、查询模糊规则表、解模糊三个阶段后，输出 PID 调节器 K_P 、 K_I 、 K_D 最优调整参数。控制器再依据数字 PID 算法，计算出功率变换器的占空比调节量。由分析可知，在最大功率点处有斜率为 0，因此，PID 调节 BOOST 功率变换器占空比，可使系统捕获最大功率。算法具体实施如图 3 所示。

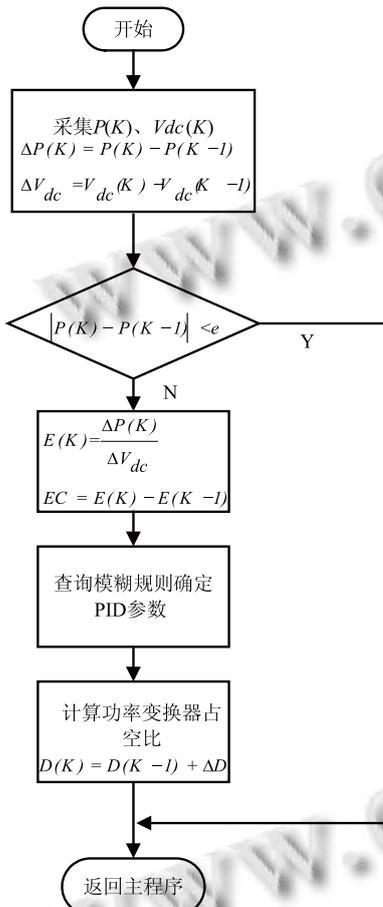


图 3 自调整算法流程图

2 模糊控制器设计

模糊控制器输入为误差 E 以及误差变化率 EC ，输出为 PID 三个参数的调整量 ΔK_p 、 ΔK_I 、 ΔK_D 。

2.1 确定输入量

误差 E 以及误差变化率 EC 由式(16)、(17)给出：

$$E(K) = \frac{P(K) - P(K-1)}{V_{dc}(K) - V_{dc}(K-1)} \quad (16)$$

$$EC(K) = E(K) - E(K-1) \quad (17)$$

E 、 EC 的语言变量为：

{NB,NM,NS,ZO,PS,PM,PB}(见图 4)。

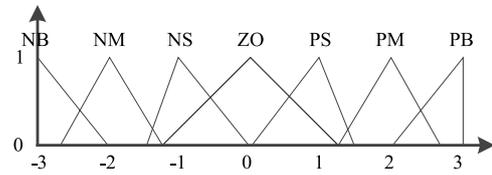


图 4 输入变量隶属度函数

ΔK_p 、 ΔK_I 、 ΔK_D 的语言变量为：

{NB,NM,NS,ZO,PS,PM,PB}(见图 5)

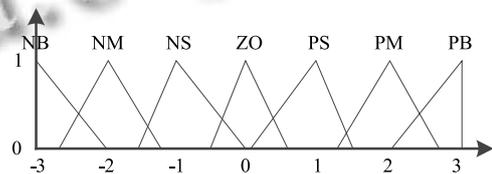


图 5 输出变量隶属度函数

2.2 模糊推理

PID 参数调节时一般考虑以下原则^[9]：

- 1) 误差绝对值较大时，为加快响应速度，同时避免积分饱和，比例系数 K_P 应取大，微分系数 K_D 取适中，积分系数 K_I 取小。
- 2) 误差绝对值以及误差变化率中等时，为尽快消除误差， K_P 、 K_D 应适当取小， K_I 适当增加。
- 3) 误差绝对值较小时，为改善稳态品质， K_I 应取大， K_P 、 K_D 适当取小。

参考上述经验，采用“IF-THEN”形式建立了模糊规则表(表 1)。

模糊推理采用 MAMDANI 极小运算法：

$$\mu_{c_j}(u_j) = \min(\mu_E(E), \mu_{EC}(EC)) \quad (18)$$

2.3 确定输出量

模糊推理得到的语言变量须转换为精确量，才能应用到被控对象中。本文采用加权平均法解模糊。例如， K_P 调整量的输出值为：

$$\Delta K_p = \frac{\sum_{j=1}^{49} \mu_{c_j}(u_j) g u_j}{\sum_{j=1}^{49} \mu_{c_j}(u_j)} \quad (19)$$

式中 u_j 为模糊推理第 j 个输出量， $\mu_{c_j}(u_j)$ 为输出量 u_j 的隶属度值。

PID 调节器输出的占空比调节量为:

$$\Delta D = K_p E + K_I \sum_{J=0}^K E(J)T + K_D \frac{EC}{T} \quad (20)$$

则当前时刻 Boost 变换器占空比给定值为:

$$D(K) = D(K-1) + \Delta D \quad (21)$$

表 1 模糊控制规则表

EC	KP							KI							KD						
	E							E							E						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PM	PS	ZO	NB	NM	NM	NS	NS	ZO	ZO	PS	NB	NB	NS	NB	NB	PS
NM	PB	PB	PB	PB	PM	ZO	ZO	NM	NM	NS	NS	ZO	ZO	ZO	PS	NB	NB	NS	NB	NB	PS
NS	PM	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NS	ZO	ZO	ZO	NS	ZO	NM	NM	NS	NM	NM	ZO
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NS	NS	PS	PS	ZO	ZO	ZO	NS	NS	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	PS	PS	NS	NM	NM	NM	NM	PS	ZO	ZO	ZO	PS	PM	PM	ZO	PM	PS	ZO	PS	PM	ZO
PM	ZO	ZO	NM	NB	NB	NB	NB	ZO	ZO	ZO	PS	PS	PM	PM	PS	PB	PS	PS	PB	PB	PS
PB	ZO	ZO	NM	NB	NB	NB	NB	ZO	ZO	PS	PS	PM	PM	PB	PS	PB	PM	PM	PB	PB	PS

3 仿真结果

在 MATALAB/SIMULINK 平台上, 建立了离网风力发电系统仿真模型, 具体仿真参数如下, 电机参数: 额定功率为 5KW, 内阻为 0.5Ω, d 轴电为 3mh, q 轴电感为 3mh, 磁通链 0.5wb, 极对数 14, 转动惯量 0.1 kgym2, PID 初始参数: KP=1.1, KI=3.0, KD=0.1.

3.1 恒定风速仿真

用于仿真的恒定风速如图 6 所示, 结果如图 7、图 8 所示. 在 0 至 0.6s 时间段, 风速为 7m/s, 由于转动惯量以及粘滞摩擦的影响, 发电机转速逐渐上升, 两种算法在 0.2s 时输出功率达稳定值, 自调整算法捕获功率为 2200W, 爬山算法捕获功率为 1500W. 在 0.6s 至 1.4s 时间段, 给定风速由 7m/s 突变为 9m/s, 自调整算法捕获功率为 4000W, 爬山算法捕获功率为 2500W, 且爬山算法输出功率波动较为明显. 在 1.5s 至 2s 时间段, 自调整算法捕获功率为 1000W, 爬山搜索性能与稳态精度, 在风速突变下, 加大转速调节力

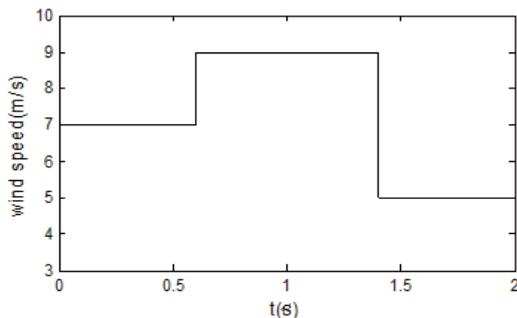


图 6 用于仿真的恒定风速

索捕获 800W. 仿真结果表明, 自调整算法兼顾了动态以加快动态响应速度, 在风速稳定时, 减小转速调节, 减缓震荡.

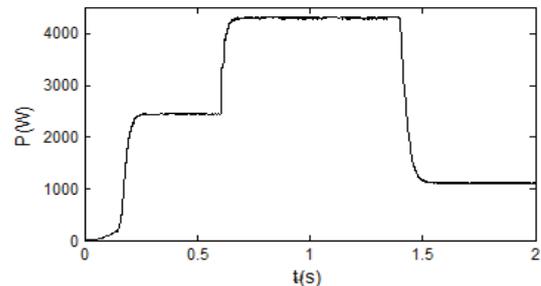


图 7 自调整算法

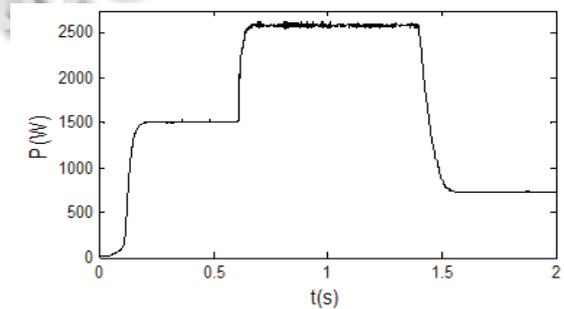


图 8 爬山算法

3.2 组合风速仿真

为验证两种算法在风速波动下的运行情况, 本文利用阵风、渐变风、随机风以及基本风模拟了实际风速. 用于仿真的组合风速如图 9 所示, 仿真结果如图 10、图 11 所示. 组合风速在 0 至 0.5s 时间段主要表现为基本

风、随机风特性. 不难看出, 自调整算法有更快的响应速度, 在 $t=0.3s$ 时捕获功率达 400W, 而爬山算法在 $t=0.7s$ 时开始输出功率, 花费了较多时间. 在 0.5s 至 1s 时间段, 组合风速主要表现为阵风以及随机风特性, 阵风峰值出现在 $t=0.8s$ 时刻. 自调整算法捕获阵风峰值功率为 1300W, 爬山算法捕获阵风峰值功率为 900W, 新算法具有更高的搜索效率.

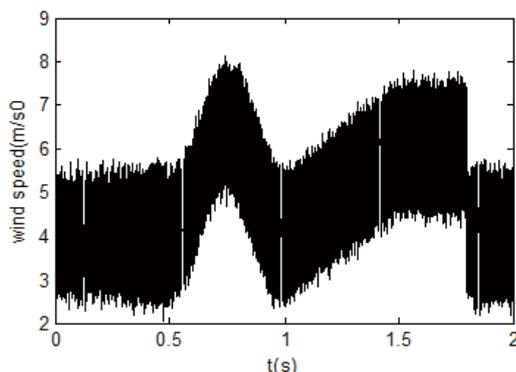


图 9 用于仿真的组合风速

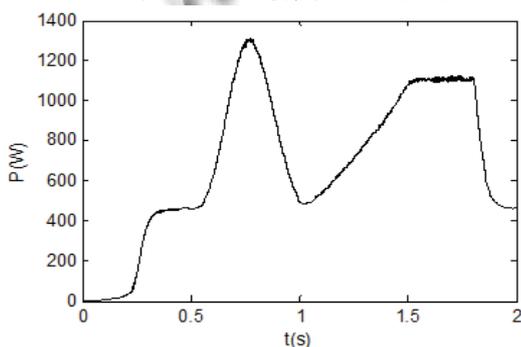


图 10 自调整算法

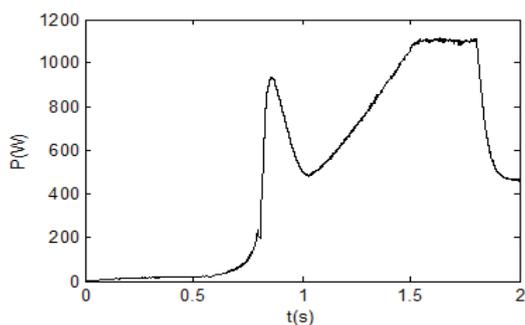


图 11 爬山算法

3.3 结果分析

对比仿真结果以及表 2 可以看出, 自调整变步长算法在恒定风速以及组合风速下, 均能捕获较多风能, 动态响应快、稳定精度高. 其本质原因是, 自调整变步长算法可以实现功率变换器的非线性调节, 间接实现

风机转速的快速调节, 使系统运行在最优叶尖速比状态. 在风速稳定后, 两种算法均建立了捕获功率与输出功率的平衡关系, 由于自调整算法响应迅速, 调节幅度可根据风机状态适时改变, 从而使风机在最优叶尖速比附近建立了功率平衡, 捕获更多风能. 爬山算法搜索步长固定, 调节速度慢, 风机在较低的风能利用下建立了功率平衡.

表 2 结果分析

	恒定风速			组合风速	
	风速 7m/s	风速 9m/s	风速 5m/s	响应 时间	捕获阵风功 率峰值
爬山算法	1500W	2500W	800W	0.7s	900W
自调整算法	2200W	4000W	1000W	0.3s	1300W

4 结语

本文给出了一种模糊 PID 实现的自调整变步长爬山算法. 该算法的主要思想是, 利用模糊逻辑对 PID 参数进行非线性增益调整, 再依据 PID 控制律确定搜索步长, 实现快速、有效的跟踪最大风能. 该算法在远离最大功率点时, 自动采用较大步长, 加快了搜索速度; 在靠近最大功率点时, 采用较小步长, 提高了搜索效率. 在分析离网风电数学模型基础上, 建立了一种无需转速测量的控制结构, 通过检测直流母线电压来间接反映转速大小. 仿真结果表明, 无论在平稳风速还是组合风速下, 该算法均能较快的捕获更多风能, 提高风能利用. 此外, 该算法不依赖系统参数, 可方便的移植到其他离网风电系统.

参考文献

- 1 Pan CT, Juan YL. A Novel Sensorless MPPT Controller for a High-Efficiency Microscale Wind Power Generation System, IEEE Trans. on Energy Conversion, 2010, 25(1): 207-216.
- 2 Musunuri S, Ginn HL. Comprehensive review of wind energy maximum power extraction algorithms. Power and Energy Society General Meeting, 2011. 1-8.
- 3 吴政球, 干磊, 曾议, 冷贵峰, 罗建中. 风力发电最大风能追踪综述. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(4): 88-93.
- 4 Morimoto S, Nakayama H, Sanada M, Takeda Y. Sensorless out-put maximization control for variable-speed wind generation system using IPMSG, IEEE Trans. on Industry

(下转第 139 页)

表 1 SDO_GEOM.RELATE、SDO_RELATE(使用未指明对象类型的空间索引)和 SDO_RELATE(使用指明对象类型的空间索引)的空间分析耗时对比表

操作类型	时间 (以秒为单位)			平均值
A	3262.059	2900.215	3965.124	3375.799
B	109.747	128.077	121.322	119.715
C	77.985	79.717	91.572	83.091
最小值	77.985	79.717	91.572	83.091

注: A: SDO_GEOM.RELATE; B: SDO_RELATE(使用未指明对象类型的空间索引); C: SDO_RELATE(使用指明对象类型的空间索引).

从表 1 可以看出, 使用函数的平均耗时是 3375.799 秒, 使用 SDO_RELATE(使用未指明对象类型的空间索引)的平均耗时是 119.715 秒, 而使用 SDO_RELATE(使用指明对象类型的空间索引)的平均耗时是 83.091 秒, 故可以得出以下结论: a. 完成相对应空间分析操作时, 使用空间算子的耗时比使用空间函数的耗时要少. 本例的空间分析耗时, 从使用函数的平均耗时 3375.799 秒降到使用算子(使用指明对象类型的空间索引)的平均耗时 83.091 秒, 节约了 3292.708 秒, 空间分析效率提高了 97.538%. b. 进行空间分析时, 使用指明对象类型的空间索引可以比使用未指明对象类型的空间索引的操作要耗时少. 本例的空间分析耗时从未指明的 119.715 秒降到指明后的 83.091 秒, 节约了 36.624 秒, 空间分析效率提高了 30.59%.

4 结语

随着地理信息系统的不断发展, 对空间数据库要

求也在不断的提高, 随之而来, Oracle Spatial 也面临新的挑战. 不过随着 Oracle 版本的不断更新, Spatial 的功能也越来越完善. 从注重海量空间数据的存储与管理到对更强大的空间查询分析支持双管齐下的过渡, 这将使得 Oracle Spatial 的功能更加强大, 从而受到越来越多人的青睐.

参考文献

- 1 龚健雅, 杜道生, 李清泉. 当代地理信息技术. 北京: 科学出版社, 2004. 11-41.
- 2 熊雷. 基于 Oracle Spatial 的空间查询技术及其优化. 软件导刊, 2008, 7(8): 7-9.
- 3 魏金占, 邓青. Oracle Spatial 的空间查询分析功能浅析. 信息技术与信息化, 2006, (2): 99-101.
- 4 李天琦, 韦春桃, 李全杰. 基于 Oracle Spatial 空间数据库的索引与查询. 桂林工学院学报, 2008, 28(1): 131-136.
- 5 姚顺彬. 基于 Oracle Spatial 的空间分析性能优化研究. 林业资源管理, 2007, (1): 87-90.
- 6 苏炳均, 诸昌铃, 李林. 基于 Oracle Spatial 的 GIS 数据组织及查询. 计算机应用研究, 2006, (12): 278-281.
- 7 肖飞, 唐媛. Oracle Spatial 空间索引解析. 信息技术与信息化, 2009, (1): 66-67.
- 8 Oracle Spatial User's Guide and Reference Release 9.2. 2002.4.
- 9 王亚文, 容晓峰, 李建元. 基于 Oracle Spatial 10g 的 GIS 数据存储研究. 陕西理工学院学报, 2010, 26(1): 48-53.

(上接第 170 页)

Applications, 2005, 41(1): 1464-1471.

- 5 Dev Shukla R, Tripathi RK. Maximum Power Extraction Schemes & Power Control in Wind Energy Conversion System. International Journal of Scientific & Engineering Research, 2012, 3(6): 1-7.
- 6 Kazmi R, Goto H, Guo HJ, Ichinokura O. A Novel Algorithm for Fast and Efficient Speed-Sensorless Maximum Power Point Tracking in Wind Energy Conversion Systems, IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2011, 1(58): 29-36.
- 7 Haque ME, Negnevitsky M, Member S, Muttaqi KM. A Novel

Control Strategy for a Variable-Speed Wind Turbine With a Permanent-Magnet Synchronous Generator. IEEE Trans. on Industry Applications 2010(46): IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 2008: 1-8.

- 8 Galdi V, Piccolo A, Siano P. Designing an adaptive fuzzy controller for maximum wind energy extraction, IEEE Trans. on Energy Conversion, 2008, (23): 559-569.
- 9 李兴鹏, 石庆均, 江全元. 双模糊控制法在光伏并网发电系统 MPPT 中的应用. 电力自动化设备, 2012, 32(8): 113-117.