

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2012.05.010

# 模糊自适应PID控制在开关磁阻 风力发电系统中的应用研究

江 伟, 王建波

(福慧网络科技(上海)有限公司 上海 201203)

**摘要:** 针对风速的突变性和不确定性, 以及开关磁阻发电机的非线性和强耦合性的特点, 提出了基于模糊自适应PID闭环控制优化输出电压的方法。介绍了开关磁阻发电机系统的运行原理和模糊自适应PID控制原理, 并利用Matlab/Simulink工具分别对常规PID控制和模糊自适应PID控制下开关磁阻发电系统的输出电压进行仿真及对比分析。实验结果表明: 模糊自适应PID闭环控制输出电压控制精度更高, 动态性能更好, 抗干扰能力和鲁棒性较强。

**关键词:** 开关磁阻发电系统; 模糊自适应PID控制; 闭环控制

**中图分类号:** TM315

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2012)05-0041-05

## Application and Research of Fuzzy Adaptive PID Control in the SRG Wind Power System

Jiang Wei, Wang Jianbo

(Fuhui Internet Technology (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 201203, China)

**Abstract:** According to the mutability and uncertainty of the wind speed and the nonlinearity and strong coupling characteristics of switched reluctance generators, proposes a method based on fuzzy adaptive PID closed-loop controller to optimize the output voltage. Describes the operating principle of the switched reluctance generator system and fuzzy adaptive PID control principle, and by using Matlab/Simulink tools makes simulation and comparative analysis on the output voltage of switched reluctance generators under the control of conventional PID and fuzzy adaptive PID. The experimental results show that the fuzzy adaptive PID closed-loop control has higher output voltage control accuracy, better dynamic performance as well as strong anti-interference ability and robustness.

**Keywords:** SRG wind power system; fuzzy adaptive PID control; closed-loop control

### 0 引言

随着能源危机日益加剧, 风能作为一种绿色、清洁且可再生的新能源已经受到广泛关注。开关磁阻发电机 (switched reluctance generator, SRG) 具有结构简单、转矩密度高、容错能力强、变速运行范

围宽、低速运行性能好、控制灵活多样等优点, 在低风速小型风力发电领域有明显优势, 因此, 其具有广泛的工程应用前景<sup>[1]</sup>。

开关磁阻发电机的结构具有双凸凹特点, 磁路具有较严重的非线性, 这使得SRG发电系统成为一个多变量强耦合, 非线性较严重的系统<sup>[2]</sup>。在实际风场中

收稿日期: 2012-07-12

作者简介: 江 伟 (1976-), 男, 江西南昌人, 福慧网络科技(上海)有限公司工程师, 主要研究方向为自动化智能控制系统, E-mail: 956345713@qq.com

风速的强突变性和不确定性等, 这些都导致 SRG 发电系统的输出电压出现非线性, 含有大量脉动的现象。因此, 大部分的线性控制方法如常规 PID (proportion-integral-differential) 控制方法已达不到理想控制效果, 而模糊自适应 PID 控制具有模糊控制和 PID 控制的共同优点, 很适合于非线性多变量的控制系统。因此, 本文提出将模糊自适应 PID 控制方法对 SRG 系统的输出电压进行反馈调节控制, 并利用 Matlab/Simulink 工具分别对常规 PID 控制和模糊自适应 PID 控制下 SRG 系统的输出电压进行仿真及对比分析, 以证明模糊自适应 PID 控制具有更好的鲁棒性、更高的控制精度。

### 1 SRG 系统结构及运行原理

开关磁阻风力发电系统结构见图 1。该风力发电系统主要包括风轮机、SRG 主体、功率变换器、SRG 控制系统以及电源 5 个部分。

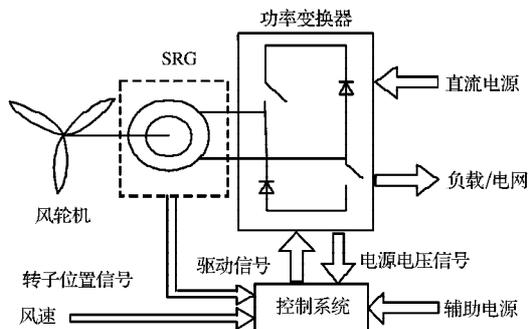


图 1 开关磁阻风电系统结构

Fig. 1 Structure of the switched reluctance wind power system

SRG 运行原理比较简单, 如图 2 所示。以 A 相为例, 励磁阶段是, 当励磁电源  $u_s$  对定子 A-A' 供电, 闭合开关  $S_1$  和  $S_2$ , 关断二极管  $VD_1$  和  $VD_2$ , 磁力线会先后通过定子极 A → 气隙 → 转子极 1' → 铁心 → 转子极 3' → 定子极 A', 形成一个闭合回路, 如图 1 中虚线所示,  $u_s$  对 A 相绕组充电, 绕组吸收机械能转化为磁场能; 发电阶段是, 当开关  $S_1$  和  $S_2$  断开, 绕组电流经过续流二极管  $VD_1$  和  $VD_2$  形成闭合回路, 磁场能转化成电能从定子绕组回馈至电池、储能电容或负载。以上为 SRG 简易的励磁阶段与发电阶段, 这 2 个阶段以磁场为媒介, 实现机械能与电能的相互转换<sup>[3-4]</sup>。

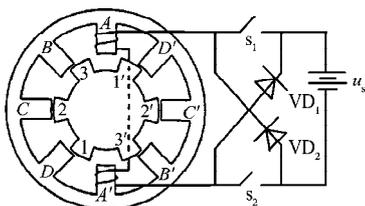


图 2 开关磁阻发电机结构简图

Fig. 2 Structure of switched reluctance generator

### 2 SRG 闭环控制原理

在实际发电现场, SRG 风力发电系统的输出电压越接近直流, 整个系统的输出电能品质就越理想。SRG 系统控制方式多样, 目的就是获得最理想的输出电压。常采用的是电压反馈控制方法, 在闭环系统中利用调节器进行反馈稳压调节, 闭环控制器是电压反馈调节控制的核心部件。常用的闭环调节器有常规 PID 控制型与模糊控制型, 以及兼具两者优点的模糊自适应 PID 控制型等。本文将模糊自适应 PID 控制应用到 SRG 控制系统中。

#### 2.1 常规 PID 电压闭环控制器原理

常规 PID 型调节器是一种线性控制器, 其原理见图 3。在系统中输入一个给定值  $f(t)$ , 比较给定值  $f(t)$  与实际输出值  $y(t)$  的偏差  $e(t)$ , 将偏差的比例、积分和微分通过线性组合构成控制量, 控制被控对象, 将实际控制输出反馈到输入端与给定值  $f(t)$  再进行比较, 周而复始, 不断循环, 直至达到稳定。

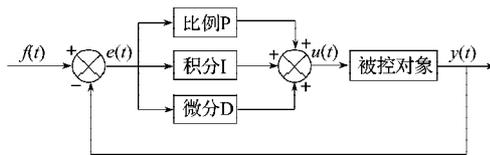


图 3 常规 PID 控制系统原理图

Fig. 3 Schematic of the conventional PID control system

常规 PID 控制系统传递函数表示为

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + \frac{T_d}{dt} \frac{de(t)}{dt} \right], \quad (1)$$

式中,  $K_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$  分别为比例系数、积分常数、微分时间常数。

采用相对比较好的实时性增量式 PID 控制系统离散化算法, 通过控制偏差量  $e(t)$  的增量  $\Delta e(t)$  控制被控对象, 增量式 PID 控制系统输出函数为

$$\Delta u(k) = K_p \Delta e(k) + K_i e(k) + K_d [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)], \quad (2)$$

式中,  $K_i$ ,  $K_d$  分别为积分系数和微分系数, 可以通过式 (3) 得到  $K_i$ ,  $K_d$ , 即

$$\begin{cases} K_i = K_p T / T_i, \\ K_d = K_p T_d / T. \end{cases} \quad (3)$$

#### 2.2 模糊 PID 电压闭环控制器原理

模糊自适应 PID 控制与常规 PID 控制结构较为类似, 其原理见图 4。该控制系统增加了模糊推理单元, 即给定信号  $f(t)$  与实际输出信号  $y(t)$  的误差  $E$ , 误差变化率  $EC$ , 将这 2 个量作为模糊推理单元的输入量。在 SRG 闭环系统中, 模糊推理单元的 2 个输入端信号分别为发电机转速偏差信号  $E$  和转速偏差变化率  $EC$ ,

这2个信号的变化由PID的比例系数 $K_p$ 、积分系数 $K_i$ 、微分系数 $K_d$ 进行自动修正,参数值修正后再送入PID控制器,PID控制器完成对系统的控制,使SRG的输出电压稳定于给定值。

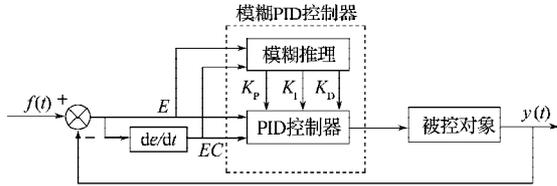


图4 模糊自适应PID控制系统原理图

Fig. 4 Schematic of the fuzzy adaptive PID control system

模糊自适应PID控制器是2个输入端、3个输出端的结构,模糊子集均为7档,即{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB},论域均为{-7, -6, ..., -1, 0, 1, ..., 6, 7}。PID控制器的比例系数 $K_p$ 、积分系数 $K_i$ 与微分系数 $K_d$ 的模糊控制规则分别见表1~3。

表1  $K_p$ 控制规则表

Table 1  $K_p$  control rules

E	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表2  $K_i$ 控制规则表

Table 1  $K_i$  control rules

E	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表3  $K_d$ 控制规则表

Table 1  $K_d$  control rules

E	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO						
PM	PB	PS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

### 3 2种控制算法的仿真实现与分析

#### 3.1 2种控制算法的仿真实现

参照实际PID调节器的工程应用设计方法,获得一组最佳参数值:比例系数 $K_p=1$ ,积分系数 $K_i=80$ ,微分系数 $K_d=30$ 。在Matlab平台上建立基于常规PID控制的SRG闭环系统的仿真模型,如图5所示。给定参考电压 $u_c$ 为150V,其作为系统的输入信号,另外2个输入端分别为驱动转矩和初速度,在不同的工作环境下,这2个输入端可以分别进行特定的赋值。

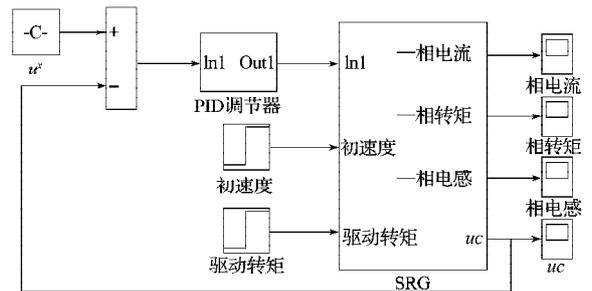


图5 基于PID控制的SRG闭环系统仿真模型

Fig. 5 SRG closed-loop system simulation model based on PID control

基于模糊PID控制的SRG闭环系统仿真模型见图6。与图5的仿真模型较相似,也是给定输出电压 $u_c$ 为150V,其作为系统的输入信号,另外2个输入端分别为驱动转矩和初速度。PID参数的取值范围为:比例系数 $K_p \in [1,4]$ ,积分系数 $K_i \in [80,100]$ ,微分系数 $K_d \in [30,60]$ 。

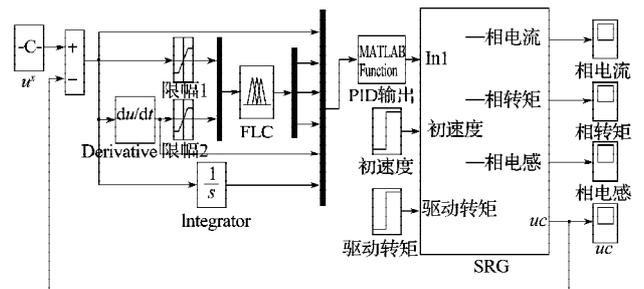


图6 基于模糊自适应PID控制的SRG闭环系统仿真模型

Fig. 6 SRG closed-loop system simulation model based on the fuzzy adaptive PID control

#### 3.2 仿真分析

为突出模糊自适应PID控制的优点,便于模糊自适应PID与传统PID控制效果的直观对比,本文从2个方面:恒定风力驱动和风力驱动增加,分析2种控制算法。

1) 当恒定风力驱动为 $1.8 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,分别对传统PID控制与模糊PID控制下的SRG输出电压进行频谱分析,常规PID控制下的SRG输出电压及相应频谱分析见图7a和b,模糊PID自适应控制下的SRG输出

电压及相应频谱分析见图 7c 和 d。

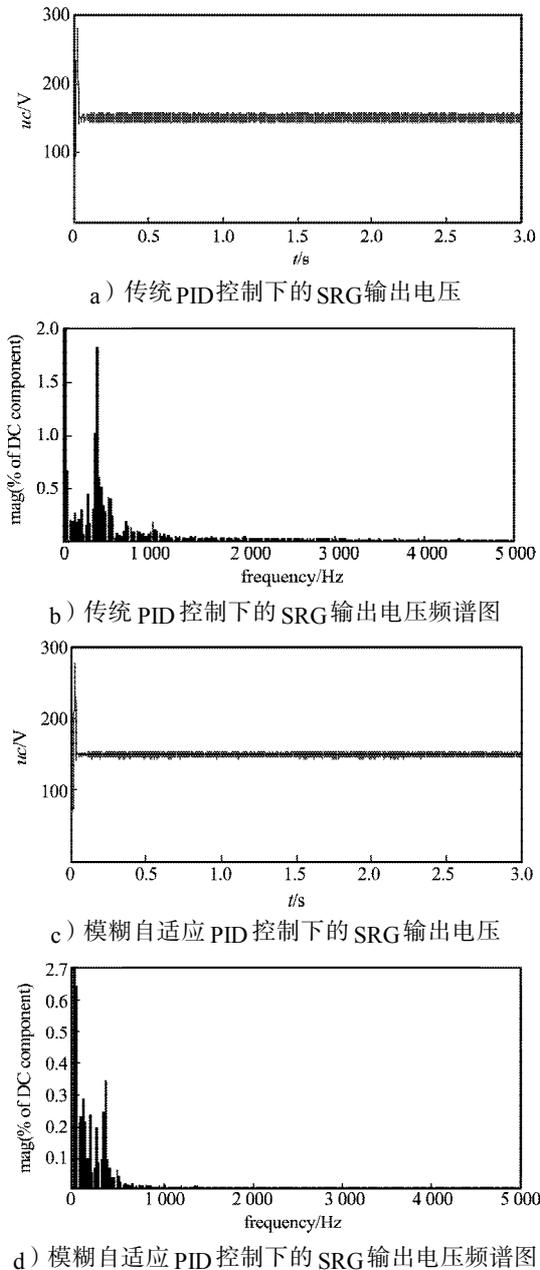


图7 风力驱动为  $1.8 \text{ N} \cdot \text{m}$  时  $u_c$  对比结果图

Fig. 7  $u_c$  results at the wind-driven of  $1.8 \text{ N} \cdot \text{m}$

由图 7 可知, 恒定风力驱动为  $1.8 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 2 种控制方式的输出电压都能较平稳地保持在  $150 \text{ V}$ , 但模糊自适应 PID 控制的 SRG 输出电压波动明显更小, 且超调量也明显减小; 模糊自适应 PID 控制的输出电压谐波畸变率为  $0.52\%$ , 而传统 PID 控制的谐波畸变率增加了  $1.49\%$ 。实验对比结果表明: 在风速恒定的情况下, 模糊自适应 PID 电压闭环控制的 SRG 风力发电系统输出电压获得的控制精度更高、电压脉动幅度更小且鲁棒性能更好。

2) 比较 2 种闭环控制器的动态响应特性。在第  $1.5 \text{ s}$  时, 将风力驱动由  $1.8 \text{ N} \cdot \text{m}$  突升至  $4 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 基

于常规 PID 控制与模糊 PID 控制的 SRG 闭环系统输出电压波形见图 8。

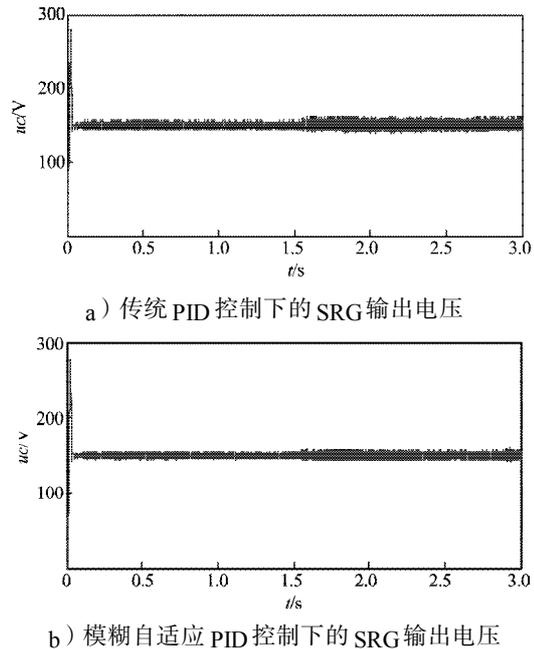


图8 风力驱动为  $1.8 \text{ N} \cdot \text{m}$  突升至  $4 \text{ N} \cdot \text{m}$  时 SRG 的输出电压

Fig. 8 The SRG output voltage when the wind-driven  $1.8 \text{ N} \cdot \text{m}$  jumped to  $4 \text{ N} \cdot \text{m}$

由图 8 可知, 风速突变瞬间, 模糊自适应 PID 控制的 SRG 输出电压脉动比传统 PID 控制的小, 证明了模糊自适应 PID 控制能在风速突变时对 SRG 系统输出电压的自整定能力更好、动态响应更强, 在突变强风速下能优化 SRG 发电系统的发电质量。

## 4 结语

本文提出了模糊自适应 PID 控制在开关磁阻风力发电系统中的应用, 将其与常规 PID 控制方法进行对比分析。实验结果表明: 将模糊自适应 PID 控制器应用于非线性、多变量控制的 SRG 风力发电系统中, 其控制精度更高, 动态性能更好, 抗干扰能力和鲁棒性较强, 且能较好地解决实际风场中由于风速的不确定与突变性而影响发电质量的问题。该方法在工程实践中具有一定的指导意义。

## 参考文献:

- [1] 邝美琴, 余世杰, 苏建薇, 等. 开关磁阻发电机用于直接驱动、变速运行风力发电系统的评估[J]. 太阳能学报, 2005, 26(3): 386-390.  
Mao Meiqin, Yu Shijie, Su Jianhui, et al. The Evaluation of Switched Reluctance Generators for Direct-Drive Variable-

- Speed Wind Energy System[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2005, 26(3): 386-390.
- [2] 吴建华. 开关磁阻电机设计与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 1-17.  
Wu Jianhua. Switched Reluctance Motor Design and Application[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2000: 1-17.
- [3] 范子荣, 张友鹏. 基于 Matlab 的自适应模糊 PID 控制器的设计[J]. 电气传动自动化, 2006, 28(3): 11-13.  
Fan Zhirong, Zhang Youpeng. Design of a Self-Adaptive Fuzzy PID Controller with Matlab[J]. Electric Drive Automation, 2006, 28(3): 11-13.
- [4] Liu K, Stiebler M. Voltage Control of a Switched Reluctance Generator by Means of Fuzzy Logic Approach[J]. Proceeding of the 6th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipments, 1998: 443-446.
- [5] 田传帮. 基于开关磁阻电机的风力发电系统的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2009.
- Tian Chuanbang. Research of Wind Power System Based on Switched Reluctance Motor[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2009.
- [6] 易灵芝, 戴彪, 易芳, 等. 开关磁阻风力发电系统输出电压脉动抑制研究[J]. 湘潭大学: 自然科学学报, 2011, 33(2): 83-89.  
Yi Lingzhi, Dai Biao, Yi Fang, et al. Research of Inhibition for Output Voltage Ripple in SRG Wind Power Generation System[J]. Natural Science Journal of Xiangtan University, 2011, 33(2): 83-89.
- [7] 曾武, 易灵芝, 禹云辉, 等. 低速直驱开关磁阻风力发电系统模拟装置研究与实现[J]. 计算技术与自动化, 2012, 31(1): 64-69.  
Zeng Wu, Yi Lingzhi, Yu Yunhui, et al. Research and Implementation of Simulator for Low-Speed Directly Driven SRG Wind Power System[J]. Computing Technology and Automation, 2012, 31(1): 64-69.

(责任编辑: 邓彬)

(上接第32页)

## 参考文献:

- [1] Hepbasli A, Akdemir O, Hancioglu E. Experimental Study of a Closed Loop Vertical Ground Source Heat Pump System [J]. Energy Conversion and Management, 2003, 44(4): 527-548.
- [2] Hang Yujin, Lee Jaekeun, Jeong Youngman, et al. Cooling Performance of a Vertical Ground-Coupled Heat Pump System Installed in a School Building[J]. Renewable Energy, 2009(34): 578-582.
- [3] Lund J W, Freeston D K, Boyd T L. Direct Application of Geothermal Energy 2005 Worldwide Review[J]. Geothermics, 2005, 34(6): 691-727.
- [4] Blum Philipp, Campillo Gisela, Munch Wolfram, et al. CO<sub>2</sub> Savings of Ground Source Heat Pump Systems-A Regional Analysis[J]. Renewable Energy, 2010, 35(1): 122-127.
- [5] Ozyurt Omer, Ekinci Dundar Arif. Experimental Study of Vertical Ground-Source Heat Pump Performance Evaluation for Cold Climate in Turkey[J]. Applied Energy, 2011, 88(4): 1257-1265.
- [6] Hepbasli Arif, Akdemir Ozay, Hancioglu Ebru. Experimental Study of a Closed Loop Vertical Ground Source Heat Pump System[J]. Energy Conversion and Management, 2003, 44(4): 527-548.
- [7] Bi Yuehong, Guo Tingwei, Zhang Liang, et al. Solar Ground Source Heat Pump System[J]. Applied Energy, 2004, 78(2): 231-245.
- [8] Bi Yuehong, Chen Lingen, Wu Chih. Ground Heat Exchanger Temperature Distribution Analysis and Experimental Verification[J]. Applied Thermal Engineering, 2002, 22(2): 183-189.
- [9] 郑红旗, 张建忠, 陈九法. 地理管换热器形式、管径及岩土温度对其换热性能的影响[J]. 暖通空调, 2012, 42(5): 90-95.  
Zheng Hongqi, Zhang Jianzhong, Chen Jiufa. Influence of Loop Type, Pipe Diameter and Soil Temperature on Performance of Ground Heat Exchangers[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2012, 42(5): 90-95.

(责任编辑: 邓光辉)