

基于双PWM变换器的永磁直驱风电系统 控制策略研究

池 伟¹, 石庆均², 陈宏伟², 马智泉¹

(1. 浙江省电力试验研究院, 浙江 杭州 310014; 2. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 针对基于双PWM变换器的永磁直驱风电系统的控制问题, 对该风电系统电机侧变换器、电网侧变换器的控制策略进行了详细的分析, 提出了一种桨距角控制策略, 并基于Matlab/Simulink对永磁直驱风电系统进行了仿真。仿真结果表明, 永磁直驱风电系统能够在不同风速下稳定运行, 在额定风速以下可实现风能的最大功率跟踪, 在额定风速以上通过桨距角控制能将风机系统的功率输出限制在额定值附近。研究结果验证了所提出的桨距控制策略的可行性。

关键词: 双PWM变换器; 永磁同步发电机; 永磁直驱风电系统; 桨距角控制; 仿真

中图分类号: TM315; TH39

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)04-0434-05

Control strategy study of direct-driven wind-power system with PMSG based on back-to-back PWM converter

CHI Wei¹, SHI Qing-jun², CHEN Hong-wei², MA Zhi-quan¹

(1. Zhejiang Electric Power Test and Research Institute, Hangzhou 310014, China;

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the control of direct-driven wind-power system with permanent magnet synchronous generators (PMSG) based on back-to-back PWM converter, the control strategies of generator-side converter and grid-side converter were analyzed in detail, and a control strategy of pitch angle was presented. A simulation for direct-driven wind-power system with PMSG using Matlab/Simulink was implemented. The simulation results show that direct-driven wind-power system with PMSG can operate stably under different wind speed, while it can achieve maximum power point tracking for wind energy under rated wind speed and limit the output power of wind-power system to rating power by pitch angle control. The results prove that the proposed control strategy of pitch angle is correct and viable.

Key words: back-to-back PWM converter; permanent magnet synchronous generators (PMSG); direct-driven wind-power system with PMSG; pitch angle control; simulation

0 引 言

相对于恒速恒频风电机组, 变速恒频风力发电机组的特点是通过先进的变速和变桨技术, 在风速变化时根据风力机的输出特性调节发电机转速处于相应的最佳值, 从而最大限度地捕获风能, 提高了风力发电的效率, 且低风速情况下风机转速下降, 从而大大降低了

系统的机械应力和装置成本。目前, 并网风力发电机组主要是变速恒频(VSCF)风力发电类型, 主要有使用双馈感应发电机(DFIG)的双馈风电系统和使用永磁同步发电机(PMSG)的永磁直驱风电系统两种, 其中又以双馈风力发电机的市场份额最大^[1-2], 但由于双馈风机需要高造价的齿轮箱, 加上滑环和电刷大量的后期维护, 不仅增加了装置成本, 而且降低了系统的发电效

收稿日期: 2011-09-13

作者简介: 池 伟(1965-), 男, 浙江杭州人, 高级工程师, 主要从事电力系统分析、继电保护及自动化方面的研究。E-mail: chiwei_zjdl@163.com

率和可靠性。而永磁直驱风力发电机组省去了齿轮箱,具有较高的可靠性,机械损耗小、效率高,便于维护,且低电压穿越能力更强,并网功率控制灵活,成为了风力发电技术领域的重要方向。

永磁直驱风电机组可以通过多种变换器拓扑实现并网,其中双PWM变换器结构以其灵活的控制方法及可实现对电机调速和输送到电网电能的优良控制,成为目前永磁直驱风电系统中较常见的一种拓扑。

在风速较大时,风力发电机的桨距角控制对于限制其输出功率和维持系统平稳运行尤为重要。

本研究在对电机侧变换器及电网侧变换器的控制策略进行详细分析的基础上,提出一种桨距角控制策略,并使用Matlab/Simulink对基于双PWM变换器的永磁直驱风电系统进行仿真,最后给出仿真结果。

1 电机侧变换器的控制策略

基于双PWM变换器的永磁直驱风电系统结构如图1所示。

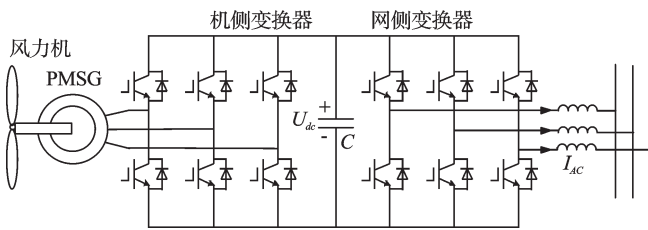


图1 基于双PWM变换器的永磁直驱风电系统结构

在风速低于额定风速时,通过对电机侧变换器的控制来调节电机转速,使其达到对应风速下的最佳转速,以维持最佳叶尖速比,实现风能的最大功率点跟踪控制^[3-6]。

最大功率点跟踪原理是:当桨距角和风速一定时,风力机输出功率大小是随着转速的变化而变化的,当转速达到某一对应值时输出功率才达到最大值;当桨距角一定时,对应一个风速 V 都有一个最优转速 w_m ,使风力机捕获的功率最大,且风速 V 与最优转速 w_m^* 之间的关系为:

$$w_m^* = \frac{\gamma_{opt} V}{R} \quad (1)$$

式中: γ_{opt} —风力机的最佳叶尖速比。

欲实现风能的最大功率跟踪,需根据风速大小实时调节发电机转速大小,从而维持最佳叶尖速比。

电机侧变换器一般采用基于转子磁场定向的矢量控制技术。将 d 轴定向于转子磁场方向, q 轴超前 d 轴 90° ,得同步旋转的 dq 坐标系下的永磁同步电机的定子电压方程为^[7-9]:

$$\begin{cases} \frac{di_{sd}}{dt} = \frac{1}{L_d}[-R_s i_{sd} + w_r L_q i_{sq} + u_d] \\ \frac{di_{sq}}{dt} = \frac{1}{L_q}[-R_s i_{sq} - w_r(L_d i_{sd} + \psi_0) + u_q] \end{cases} \quad (2)$$

式中: R_s —定子电阻; L_d, L_q — d, q 轴定子电感; u_d, u_q, i_{sd}, i_{sq} —定子端电压、电流的 d, q 轴分量; w_r —电机同步电角速度; ψ_0 —转子永磁磁链。

本研究采用 $i_{sd} = 0$ 的控制方式,永磁同步发电机的电磁转矩为:

$$T_e = \frac{3}{2} n_p [\psi_0 i_{sq} + (L_d - L_q) i_{sd} i_{sq}] = \frac{3}{2} n_p \psi_0 i_{sq} \quad (3)$$

式中: n_p —电机极对数。

直驱式永磁风力发电机组轴系没有齿轮箱,风轮机转轴直接与发电机转子相连,因此发电机转子转速与风轮叶片转子角速度相等,则永磁同步发电机的转子运行方程为:

$$\frac{dw_m}{dt} = \frac{1}{J} (T_e - T_w - F w_m) \quad (4)$$

式中: w_m —转子机械角速度,其与电机同步电角速度 w_r 的关系为 $w_r = n_p w_m$; J —转子转动惯量; F —阻尼系数; T_w —风力机提供的拖动转矩。

T_w 与风机半径 R 、空气密度 ρ 、风速 V 、风机非线性转矩系数 C_q 的关系为:

$$T_w = \frac{1}{2} C_q \pi R^3 \rho V^2 \quad (5)$$

由式(3)可知,通过控制 q 轴电流分量 i_{sq} ,就能控制电机的电磁转矩 T_e 。由式(4)可知,通过控制 T_e ,便可进一步控制电机转速 w_m ,以维持最佳的叶尖速比,从而实现系统的最大风功率跟踪控制。

由式(2)可知, i_{sd} 的变化量受 i_{sq} 影响, i_{sq} 的变化量也受 i_{sd} 影响,它们之间是相互耦合的,可以通过电压前馈补偿的方法来消除二者之间的耦合,实现精确的线性化控制。两个新的输入量定义为:

$$\begin{cases} u_d^* = w_r L_q i_{sq} + u_d \\ u_q^* = -w_r(L_d i_{sd} + \psi_0) + u_q \end{cases} \quad (6)$$

本研究将上式代入式(2),并经拉斯变换后可得 d 轴和 q 轴上两个对立的一阶模型:

$$\begin{cases} i_{sd} = u_d^* / (L_s + R_s) \\ i_{sq} = u_q^* / (L_s + R_s) \end{cases} \quad (7)$$

式中: s —拉氏算子。

式(7)表明: i_{sd} 与 u_d^* 、 i_{sq} 与 u_q^* 成完全线性关系,且 i_{sd} 与 i_{sq} 相互独立。因此,只要将 $w_r L_q i_{sq} - w_r(L_d i_{sd} + \psi_0)$ 作为补偿量进行补偿,就可使 i_{sd}, i_{sq} 具有式(7)的线性

关系,且相互独立,由此可提高控制性能。

本研究由此设计的电机侧PWM变换器的控制框图如图2所示。

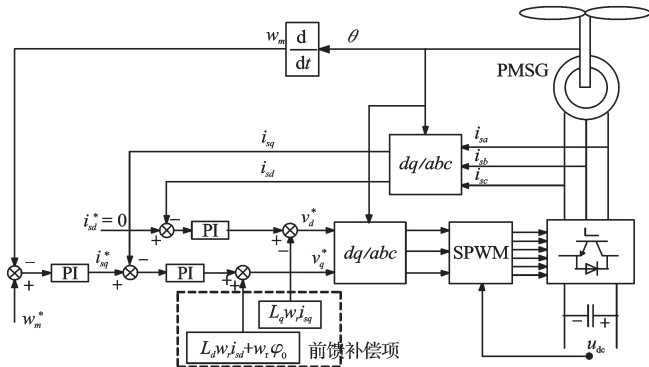


图2 电机侧变换器控制框图

2 电网侧变换器的控制策略

对于网侧变换器,本研究采用基于电网电压定向矢量控制技术,其控制任务有两个:①保证直流母线电压的稳定,这是使电机侧变换器和电网侧变换器正常工作的前提;②实现输出有功无功的解耦控制,使风机功率平稳传输到电网上。

本研究选取电网侧电压矢量方向为d轴,沿电压矢量旋转方向超前90°为q轴,可得同步旋转的dq坐标系下的电网侧变换器电压方程为^[10]:

$$\begin{cases} v_d = Ri_d + L_g \frac{di_d}{dt} - wL_g i_q + u_{gd} \\ v_q = Ri_q + L_g \frac{di_q}{dt} + wL_g i_d + u_{gq} \end{cases} \quad (8)$$

式中: R, L_g — 电网侧线路等效电阻、网侧变换器进线电抗器电感; v_d, v_q — 网侧变换器控制电压的d、q轴分量; i_d, i_q — 网侧电流的d、q轴分量; u_{gd}, u_{gq} — 电网电压矢量 u_g 的d、q轴分量; w — 同步转速。

在选取d轴电网电压定向时, $u_{gq} = 0, u_{gd} = |u_g|$, 则输送到电网的有功无功分别表示为:

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2}(u_{gd} i_d + u_{gq} i_q) = \frac{3}{2}u_{gd} i_d \\ Q_s = \frac{3}{2}(u_{gq} i_d - u_{gd} i_q) = -\frac{3}{2}u_{gd} i_q \end{cases} \quad (9)$$

如不计变换器的功率损耗,双PWM变换器的中间直流电容端电压可表示为:

$$CV_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = P_{gen} - P_s \quad (10)$$

式中: C — 电容值, V_{dc} — 电容端电压, P_{gen} — 电机侧变换器输出的有功功率。

由式(9)和式(10)可知,本研究通过控制电流的d轴分量 i_d 即可控制输出的有功功率,进一步控制了直

流电压,最终实现中间直流电容端电压的稳定。通过控制电流的q轴分量 i_q 即可控制系统输出的无功功率,一般控制 $i_q = 0$,即可实现单位功率因数控制。

由式(8)可知, i_d, i_q 相互耦合,为此通过前馈补偿的方式去耦合,以实现 i_d, i_q 的解耦控制^[11-12]。

整个网侧变换器的控制框图如图3所示。

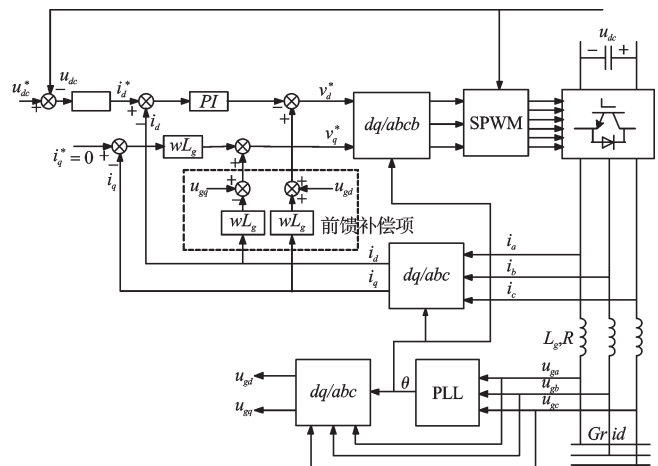


图3 电网侧变换器控制框图

3 桨距控制策略

在风速低于额定风速时,本研究通过控制电机侧PWM变换器以实现最大风能追踪,但当风速大于额定风速时,受限于电机转子机械应力承受能力与定子电气的承受能力,本研究将启动风力机的桨距角控制系统,调节风力机叶片的攻角,使风力机叶片向迎风面积减小的方向转动一个角度,以减小风能捕获系数,限制风电系统的功率输出,使其保持在额定功率附近,从而保证风电系统的安全稳定运行。

本研究提出的一种桨距角控制策略,如图4所示。其中,风电系统的实际功率输出 P 与额定值 P_N 之间的偏差经过区间 $[0, \infty]$ 的限制后输入到PID调节器,这样确保在风机功率超过额定功率时启动桨距角控制系统,增大桨距角,以限制系统功率输出,通过PID调节可实现输出功率的无偏差控制,并能提高桨距角控制系统的动态响应速度,使风电系统输出功率限制在额定功率附近。

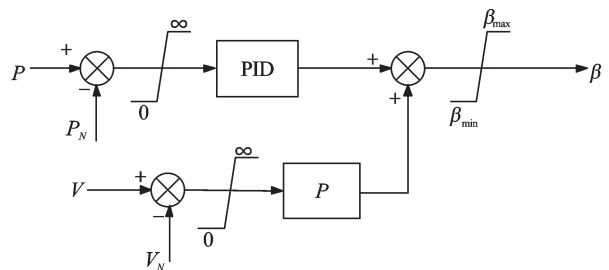


图4 桨距角控制框图

当风速大于额定风速时,风速 V 与风机的额定风速 V_N 之间的偏差输入到 P (比例)调节器,两调节器输出之和再经最大最小桨距角限制得到桨距角的控制信号。

4 系统仿真

4.1 仿真模型

为了验证控制系统的作用,在上述对基于双PWM变换器的永磁直驱风力发电系统控制方法分析的基础上,本研究利用 Matlab/Simulink 建立了完整的系统仿真模型,如图5所示。

仿真时所用参数如表1所示,仿真中设定风速的变化情况如图6所示。

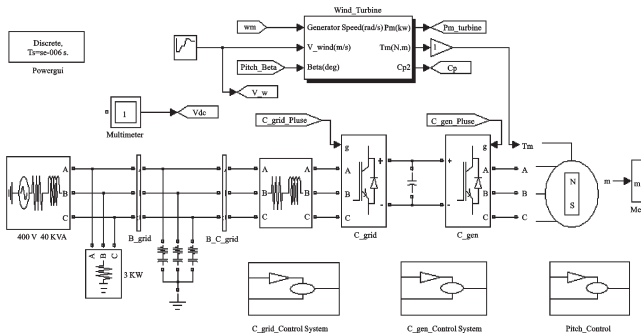


图5 基于Matlab/Simulink的系统仿真模型

表1 仿真参数

物理量	参数值	物理量	参数值
额定风速/ ($m \cdot s^{-1}$)	11	摩擦系数/ ($N \cdot m \cdot s$)	0.006
额定转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	240	极对数	13
额定功率/ kW	5	直流电压/ V	860
定子电阻/ Ω	0.01	直流电容/ μF	2 000
直轴电感/ mH	10	载波频率/ kHz	12
交轴电感/ mH	10	网侧电阻/ Ω	0.014 4
磁通/ Wb	0.98	网侧电感/ mH	4.6
转动惯量/ ($kg \cdot m^2$)	0.45	风轮直径/ m	2.8

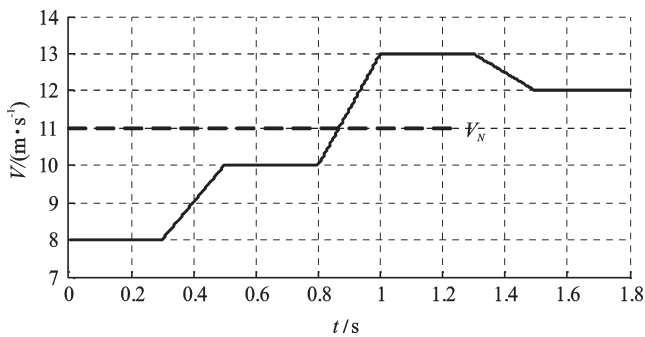


图6 风速变化曲线

4.2 仿真结果

永磁同步电机的转速、风电系统输出功率、桨距角、风能利用系数曲线如图7~10所示。

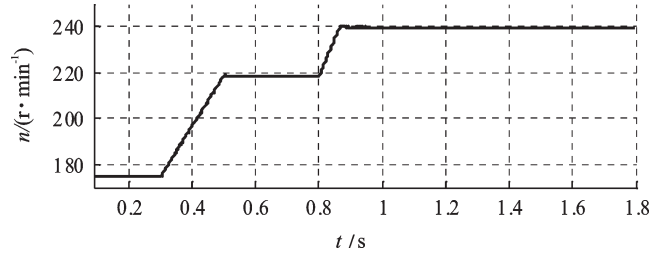


图7 电机转速变化曲线

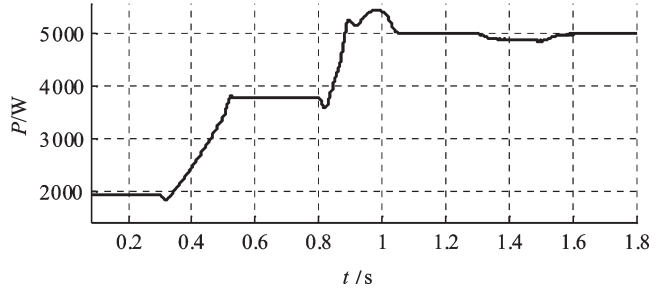


图8 风电系统输出功率

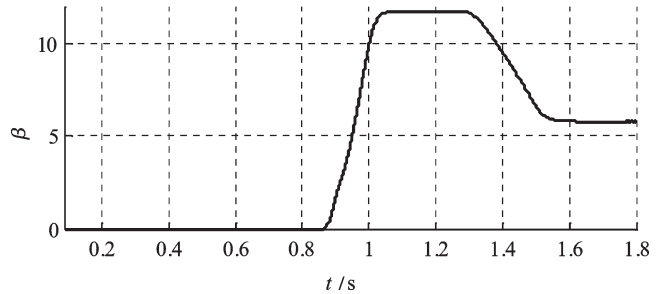


图9 桨距角变化曲线

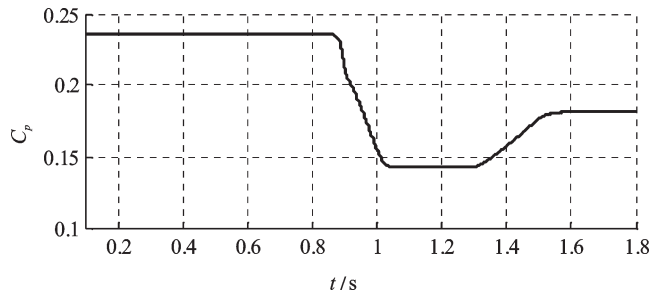


图10 风能利用系数曲线

在0.83 s以前,风速低于额定风速,通过电机侧变换器的控制使电机转速随风速变化而变化,以维持最佳的叶尖速比,实现了风能的最大功率跟踪。由图10可见,该段时间内的风能利用系数始终保持最大值;在0.83 s以后,风速始终在额定风速以上,此段时间内启动了桨距角控制系统,通过调节风力机的桨距角来限制系统的输出,维持系统稳定,该段时间内电机转速维持在额定转速240 r/min,不再随风速变化而变化,风机系统的风能利用系数也低于最大值,在风机系统稳定后都按额定功率5 000 W输出。

风机系统输出到电网的A相电压及电流如图11所示,可见A相电网电压及输出电流同相位,实现了单位功率因数控制。

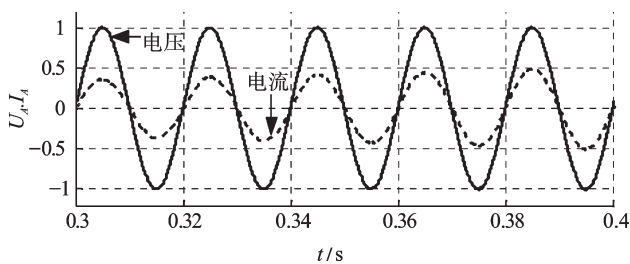


图11 风机系统输出到电网的A相电压及电流(标么值)

5 结束语

风力发电系统的优良控制对其安全平稳运行具有重要意义,本研究提出了一种桨距控制策略,利用Matlab/Simulink对基于双PWM变换器的永磁直驱风电系统进行了建模仿真。仿真结果表明,永磁直驱风电系统能够在不同风速下稳定运行,在额定风速以下可实现风能的最大功率跟踪,在额定风速以上通过桨距角控制能将风机系统的功率输出限制在额定值附近,验证了所提出的桨距角控制策略的可行性,为系统实现提供了良好的理论基础,具有重要的实际意义。

参考文献(References):

- [1] 胡非凡,胡幸江,陈国定. 变速恒频双馈风力发电机矢量控制研究[J]. 机电工程,2009,26(11):27-30.
- [2] 胡书举,李建林,许洪华. 永磁直驱风电系统变流器拓扑分析[J]. 电力自动化设备,2008,28(4):77-81.

- [3] 王志华,李亚西,赵栋利,等. 变速恒频风力发电机最大功率跟踪控制策略的研究[J]. 可再生能源,2005(2):15-19.
- [4] 尹潮鸿,谢桦,童亦斌,等. 直驱风力发电机的功率控制[J]. 机械与电子,2009(7):37-39.
- [5] 熊亮,邹轩. 直驱式风力发电系统的控制方法研究[J]. 电测与仪表,2010,47(2):31-34.
- [6] 赵仁德,王永军,张加胜. 直驱式永磁同步风力发电系统最大功率跟踪控制[J]. 中国电机工程学报,2009,29(27):106-111.
- [7] YIN Ming, LI Geng-yin, ZHOU Ming, et al. Modeling of the Wind Turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator for Integration[C]//Power Engineering Society General Meeting, 2007. PES 07. IEEE, 2007:1-6.
- [8] 何继爱,王惠琴. 永磁同步电机空间矢量控制系统的仿真[J]. 电力系统及其自动化学报,2005,17(6):14-16.
- [9] 耿华,许德伟,吴斌,等. 永磁直驱变速风电系统的控制及稳定性分析[J]. 中国电机工程学报,2009,29(33):68-75.
- [10] 翟兴鸿,廖勇,姚骏,等. 永磁同步直驱风力发电系统并网变流器设计[J]. 电力电子技术,2008,42(3):22-24.
- [11] 姚骏,廖勇,庄凯. 永磁直驱风电机组的双PWM变流器协调控制策略[J]. 电力系统自动化,2008,32(20):88-92.
- [12] 张崇巍,张兴. PWM整流器及其控制[M]. 北京:机械工业出版社,2005.

[编辑:张翔]

(上接第396页)

致 谢

感谢谭立、陈松以前的工作为本论文的工作打下基础;也感谢洪健、徐国昌、张美华等人完成本系统的机械结构设计和制作。

参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国信息产业部. YD/T 1198-2002 光纤活动连接器插针体技术要求[S]. 北京:人民邮电出版社,2002.
- [2] NIKO H, MARKO S, FRANCE LJ T, et al. A machine-vision system for automated quality control of welded rings [J]. **Machine Vision and Application**, 2011, 22(6):967-981.
- [3] 杨立娜,单越康. 基于机器视觉的陶瓷基板检测系统[J]. 机电工程,2009,26(3):50-52.
- [4] 任济钢,宾鸿赞. 薄片零件尺寸机器视觉检测系统中的线扫描步长自适应优化研究[J]. 机械,2010,37(1):71-74.
- [5] 杜俊斌,黄泽文,黄云,等. 机器视觉半导体分选系统的研制[J]. 机电工程技术,2011,40(8):64-65.

- [6] 王红军,陈临强,王磊. 机器视觉中矩形几何提取和校正[J]. 机电工程,2010,27(4):95-96.
- [7] JIN Yan, ZHOU Yong-liang, CHEN Biao. A practical method for circular hole measurement based on machine vision [J]. **Advanced Materials Research**, 2011(317-319):837-842.
- [8] 段瑞玲,李庆祥,李玉和. 图像边缘检测方法研究综述[J]. 光学技术,2005,31(3):415-417.
- [9] 夏平,李小玲,罗晓曙. 基于多尺度小波算子的图像边缘检测[J]. 广西大学学报:自然科学版,2002,27(3):264-267.
- [10] 任济钢,宾鸿赞. 薄片零件尺寸机器视觉检测系统中边缘检测技术的对比研究[J]. 机电工程技术,2010,39(2):26-28.
- [11] 孙根云,柳钦火,刘强,等. 图像的模糊边缘检测算法[J]. 光电工程,2007,34(7):141-144.
- [12] 霍宏涛. 数字图像处理[M]. 北京:北京理工大学出版社,2002.
- [13] HART P E. How the Hough transform was invented [J]. **IEEE Signal Processing Magazine**, 2009, 26(6):18-22.

[编辑:李辉]