

基于 SVM-DTC 的测试分拣机下压机构电机力矩控制

芦俊¹, 蒋碧超², 周芸¹, 郑霞杰¹

(1. 江苏信息职业技术学院 机电工程学院, 江苏 无锡 214000;

2. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要:针对国内传统旋转式集成电路分拣机下压机构在运行测试时, 集成电路与测试簧片不能保持稳定接触力的问题, 采用直接转矩控制对下压机构进行控制。设计了基于电压空间矢量调制策略的永磁同步电动机直接转矩控制方案, 用 PI 调节器以及电压空间矢量策略代替传统直接转矩控制系统中的滞环控制器和开关表。通过仿真验证表明, 相比于传统的直接转矩控制, 采用空间矢量调制策略的直接转矩控制, 磁链波形得到改善, 同时减小了脉动, 使系统具有良好的动、静态性能, 且集成电路芯片与测试簧片接触力满足测试要求。

关键词:分拣机; 接触力; 直接转矩控制; 空间矢量调制; 脉动

中图分类号: TM383 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8829(2018)01-0073-05

Motor Torque Control of Tester Handler Downward Mechanism Based on SVM-DTC

LU Jun¹, JIANG Bi-chao², ZHOU Yun¹, ZHENG Xia-jie¹

(1. School of Electromechanical Engineering, Jiangsu Vocational College of Information Technology, Wuxi 214000, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to eliminate the phenomenon that the IC and reed can not maintain the stable contact force when the press agency of conventional turret test handler is operating at high speed, the direct torque control is adopted to control the press agency. A novel direct torque control based on the space vector modulation(SVM) strategy for permanent magnet synchronous motor(PMSM) was proposed. The proportional plus integral control and SVM were used to replace hysteresis controller and switching table in conventional direct torque control (DTC) system. Simulation results show that compared with traditional DTC, the torque ripple is greatly reduced, the static and dynamic performances of the system and the waveform of flux are also improved when using the DTC-SVM scheme. The contact force between the IC and the reed meets the test requirements.

Key words: test handler; contact force; direct torque control(DTC); space vector modulation(SVM); ripple

集成电路的最终测试是保证产品质量的重要步骤, 是在完成集成电路产品封装之后, 保证产品合格并投放市场的重要手段^[1]。作为集成电路测试分拣机的新品种, 旋转式集成电路高速分拣机(以下简称分拣机)尤其适用于小型集成电路的打标、测试、外观检测、分选和包装等工序的一体化, 是一种主转盘在中心, 各个功能工位按照顺序均布在主电机周围的测试

分拣机。集成电路随着主转盘的旋转被送到各个工位进行处理。此种测试分拣机具有占地面积小、速度高、多功能集成等特点。其中测试工位的独立下压机构是分拣机中进行集成电路测试的关键机构。

分拣机测试工位的独立下压机构如图 1 所示, 电机采用永磁同步电机, 圆柱凸轮使电机的旋转运动转化为上下动作杆的向下直线运动, 动作杆的向上复位是压缩弹簧驱动, 动作杆上的吸笔带动电路做相应的上下运动。当电路下压碰到测试簧片时, 两者的接触力应该满足测试规范的要求, 并且保持稳定。因此为了使分拣机能够准确地测试集成电路, 在凸轮下压时, 就需要电机的输出转矩满足要求且保持稳定, 这对电机的控制提出了较高的要求。

收稿日期: 2017-07-21

基金项目: 江苏省高等学校自然科学研究项目资助(17KJB510019)

作者简介: 芦俊(1974—), 男, 湖北荆门人, 博士, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为机电一体化、检测与自动化装备。

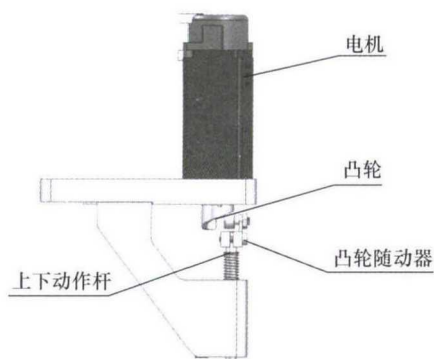


图 1 分拣机下压机构

针对分拣机独立下压电机的控制难点,本文采用基于电压空间矢量调制(SVM, space vector modulation)的直接转矩控制(DTC, direct torque control)策略(简称 SVM-DTC)来控制分拣机中下压电机的运行,使下压机构电机输出转矩满足运行要求。

1 独立下压机构的数学模型

由图 1 可知,分拣机独立下压机构的数学模型可以分为两大部分,第一部分是永磁同步电机,第二部分为独立下压机构的负载模型。

1.1 永磁同步电机的数学模型

分拣机中独立下压机构采用的永磁同步电机在 $d-q$ 坐标系下的数学模型^[2]:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} U_d = p\psi_d - \psi_q \omega_r + r I_d \\ U_q = p\psi_q + \psi_d \omega_r + r I_q \end{cases} \quad (2)$$

$$T = \frac{3n_p |\psi_s|}{4L_d L_q} [2\psi_f L_q \sin\delta - |\psi_s| (L_q - L_d) \sin 2\delta] \quad (3)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{3n_p \psi_s}{4L_d L_q} [2\psi_f L_q \cos\delta - 2\psi_s (L_q - L_d) \cos 2\delta] \frac{d\delta}{dt} \quad (4)$$

式中, ψ_s 、 ψ_f 、 δ 分别为定、转子磁链及其夹角; ψ_d 、 ψ_q 分别为定子磁链矢量在 d 轴、 q 轴上的分量; U_d 、 U_q 、 I_d 、 I_q 分别为定子电压、电流在 d 轴、 q 轴上的分量; L_d 、 L_q 为 d 轴、 q 轴上的电感; n_p 为转子极对数; p 为微分算子。

对于具有面装式转子结构的永磁同步电机, $L_d = L_q = L_s$, L_s 为等效同步电感,电磁转矩 T 可以表示为

$$T = \frac{3n_p |\psi_s|}{2L_s} \psi_f \sin\delta \quad (5)$$

对 T 求导可得

$$\frac{dT}{dt} = \frac{3n_p |\psi_s|}{2L_s} \psi_f \cos\delta \quad (6)$$

从式(5)、式(6)可知,在定子磁链为一恒定值时,电机的转矩将随转矩角度的改变而改变。因此,永磁同步电机直接转矩控制的策略就是保持磁链大小不

变,通过调节转子、定子磁链间的角度,达到对电机转矩的控制。

1.2 独立下压机构的负载模型

独立下压机构中,集成电路接触到测试簧片之后下压运行的位移为^[3]

$$l = k_1 \cdot \Delta\theta \quad (7)$$

式中, k_1 为凸轮的切面系数; $\Delta\theta$ 为集成电路接触到簧片之后下压电机旋转的角度。

此时集成电路和簧片之间的接触力为

$$f = k_2 \cdot l \quad (8)$$

式中, k_2 为簧片的弹性系数。

此时,电机上增加的负载转矩为

$$\Delta T_L = \mu \cdot r \cdot f \quad (9)$$

式中, μ 为凸轮摩擦系数; r 为凸轮半径。

结合式(7)~式(9)可得

$$\Delta T_L = k_1 \cdot k_2 \cdot \mu \cdot r \cdot \Delta\theta = K \cdot \Delta\theta \quad (10)$$

式中, K 为负载转矩与电机旋转角度的转换系数。

2 基于空间矢量的直接转矩控制

传统永磁同步电机直接转矩控制采用了砰-砰控制,与矢量控制相比,虽然满足了电机转矩动态响应快的要求,但是转矩与磁链的脉动较大,并且由于转矩和磁链都采用了滞环比较器,逆变器的开关频率随转速、负载转矩、磁链和负载滞环控制器滞环宽度的变化而改变^[4]。为了降低转矩与磁链的脉动,减少独立下压电机因转矩脉动过大而产生的抖动,可以利用 PI 调节器来取代滞环比较器,通过双闭环控制来实现对转矩和磁链的控制。这是因为 PI 调节器可以达到无静差的稳态,并解决由于使用滞环比较器作为控制器时带来的转矩和磁链脉动过大的问题^[5]。

对于传统的 DTC 方案,由于在某个开关周期内仅存在一个电压矢量发挥作用,这样无法在这个周期内准确地补偿转矩误差及磁链误差。如果采用 SVM 技术,则可以在每一个周期中都能够准确补偿转矩误差和磁链误差^[6-8]。SVM-DTC 控制原理如图 2 所示。

2.1 电压空间矢量调制原理

根据逆变器的 8 种开关状态,可以得到圆形磁链直接转矩控制的 8 种电压空间矢量,把磁链轨迹分成 6 个扇区,在每个扇区,都有相邻的两个电压空间矢量和零电压矢量交替工作。基于电压空间矢量调制的直接转矩控制,就是通过相邻电压空间矢量和零电压矢量来合成任意方向和大小的电压空间矢量,以此来准确、完整地补偿转矩误差及磁链误差^[9-10]。图 3 为第一扇区的目标电压空间矢量合成示意图。

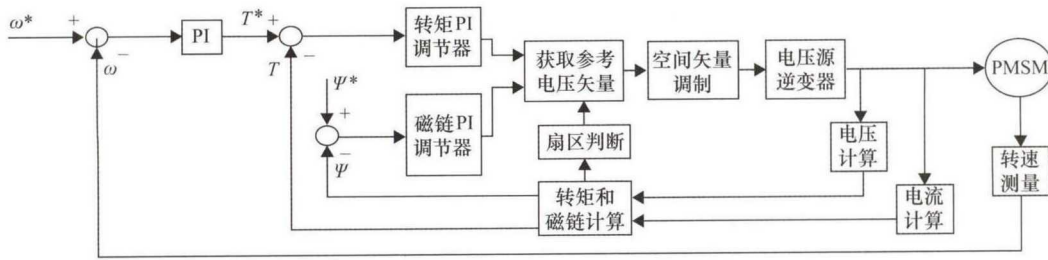


图2 SVM-DTC 系统原理框图

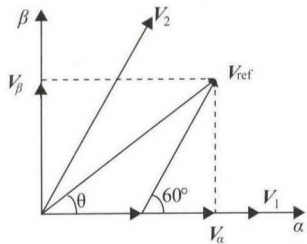


图3 目标电压空间矢量的合成

图3中, V_{ref} 为期望的电压矢量, V_1 和 V_2 为相邻矢量, T_1 和 T_2 分别为在一个采样周期 T_s 中 V_1 、 V_2 的作用时间, 零矢量作用的时间为 T_0 。则时间表示关系为

$$T_s = T_1 + T_2 + T_0 \quad (11)$$

根据伏秒平衡原理可得:

$$V_{ref} = \frac{T_1}{T_s} V_1 + \frac{T_2}{T_s} V_2 \quad (12)$$

将 V_{ref} 投影到 α - β 坐标可得:

$$\begin{cases} V_\alpha = \frac{T_1}{T_s} |V_1| + \frac{T_2}{T_s} |V_2| \cos 60^\circ \\ V_\beta = \frac{T_2}{T_s} |V_2| \sin 60^\circ \end{cases} \quad (13)$$

基本电压矢量幅值均为 $\frac{2}{3} V_{dc}$, 则

$$\begin{cases} T_1 = \frac{3T_s}{2V_{dc}} (V_\alpha - V_\beta/\sqrt{3}) \\ T_2 = \frac{\sqrt{3}T_s}{V_{dc}} V_\beta \\ T_0 = T_s - T_1 - T_2 \end{cases} \quad (14)$$

以此类推, 可导出其余扇区与之邻近的两电压空间矢量和零电压矢量的工作时间。通过对所在扇区的判断, 就可找到需要工作的两相邻电压空间矢量, 然后利用式(14)导出对应的工作时间, 就可得到补偿当前转矩及磁链误差的电压空间矢量。

2.2 空间矢量调制(SVPWM) 模块

SVM-DTC 控制策略的关键是在不同的扇区控制相邻的电压空间矢量工作的时间。因此要实现电压空间矢量的准确切换, 就需要通过 SVPWM 模块确定参考扇区及其相邻电压空间矢量的工作时间。

为了确定当前电压矢量所在的扇区, 对 V_α 、 V_β 做

如下变换:

$$\begin{cases} V_a = V_\beta \\ V_b = (\sqrt{3}V_\alpha - V_\beta)/2 \\ V_c = (-\sqrt{3}V_\alpha - V_\beta)/2 \end{cases} \quad (15)$$

定义: 若 $V_a > 0$, 则 $A = 1$, 否则 $A = 0$; 若 $V_b > 0$, 则 $B = 1$, 否则 $B = 0$; 若 $V_c > 0$, 则 $C = 1$, 否则 $C = 0$; 并令 $N = A + 2B + 4C$ 。 N 值与扇区的关系如表1所示。

表1 电压空间矢量的确定

扇区号	1	2	3	4	5	6
N	3	1	5	4	6	2

由于矢量电压位置不同, 则 T_1 、 T_2 计算方程不同。定义如下3个变量:

$$\begin{cases} X = \frac{\sqrt{3}T_s}{V_{dc}} V_\beta \\ Y = \frac{3T_s}{2V_{dc}} (V_\alpha + V_\beta/\sqrt{3}) \\ Z = \frac{3T_s}{2V_{dc}} (-V_\alpha + V_\beta/\sqrt{3}) \end{cases} \quad (16)$$

对于不同扇区下的 V_{ref} , 其相邻两个电压空间矢量的工作时间占 T_s 的时间比 T_1 、 T_2 参见表2所示。

表2 不同扇区的电压空间矢量对应的工作时间表

扇区号	T_1	T_2	扇区号	T_1	T_2
1	$-Z$	X	4	Z	$-X$
2	Y	Z	5	$-Y$	$-Z$
3	X	$-Y$	6	$-X$	Y

总结以上对 SVM 控制原理和算法的描述, 就是在 SVM-DTC 控制系统中, 转矩和磁链误差通过 PI 调节器后得到补偿当前误差的电压空间矢量, 然后通过 SVPWM 模块, 把电压空间矢量及其工作时间以开关信号的形式输送给逆变器, 以此产生驱动电机的脉冲。这种控制策略也解决了滞环比较器调节时磁链和转矩过大的缺点。

3 控制仿真实验验证

3.1 两种控制方案仿真对比

为了验证传统 DTC 和 SVM-DTC 控制系统的效果, 使用 Matlab/Simulink 的开发环境, 建立永磁同步

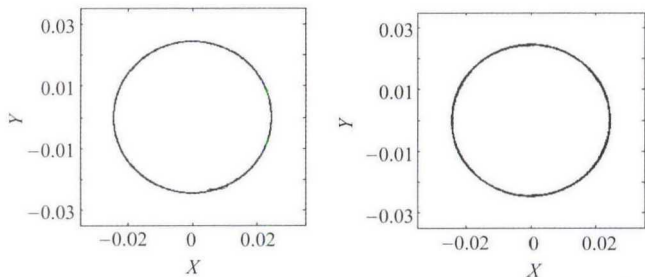
电机的直接转矩控制系统的仿真模型,分别对传统 DTC 和 SVM-DTC 两种控制系统进行仿真研究。

仿真系统中永磁同步电动机的参数参见表 3。仿真过程描述:起始时设定电机转速为 800 r/min,参考转矩为 0.1 N·m。在此过程中磁链的给定值始终为 0.0244 Wb。

表 3 仿真系统中永磁同步电动机的参数

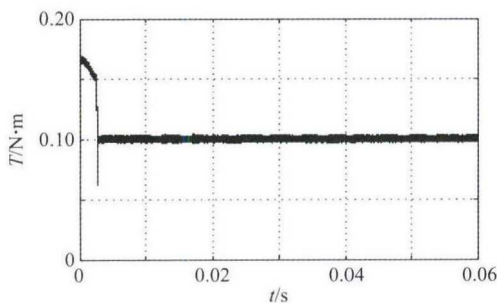
参数	数值	单位	参数	数值	单位
R_s	12.4	Ω	ψ_s	0.0244	Wb
L_d	9.1	mH	J	3.1×10^{-6}	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
L_q	9.1	mH	B	0	
L_s	9.1	mH	n_p	3	

表 3 中, R_s 为定子电阻; L_d 、 L_q 、 L_s 为交轴、直轴的等效电感; ψ_s 为定子磁链; J 为转动惯量; B 为黏滞系数; n_p 为极对数。传统 DTC 方案与 SVM-DTC 方案的稳态特性对比如图 4 和图 5 所示。

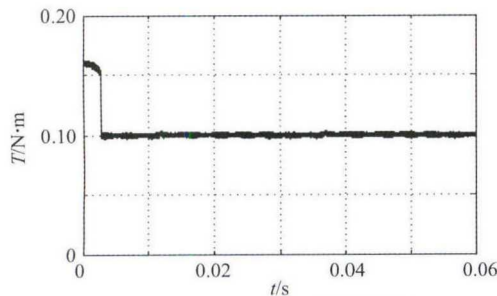


(a) 传统DTC方案下磁链波形 (b) SVM-DTC方案下磁链波形

图 4 定子磁链轨迹仿真波形



(a) 传统DTC方案下转矩波形



(b) SVM-DTC方案下转矩波形

图 5 电磁转矩仿真波形

与图 4(a) 相比,在 SVM-DTC 方案所对应的图 4(b) 中,由于采用空间矢量调制技术产生了可以补偿

磁链误差的电压空间矢量,以及采用 PI 比例积分调节器实现了对磁链的无静差稳态的控制,电机定子的磁链脉动明显比传统 DTC 方案要小,磁链轨迹也更平滑,这说明基于电压空间矢量调制的直接转矩控制方案比较好地抑制了磁链的脉动。

在图 5(a) 和图 5(b) 中,传统 DTC 方案转矩脉动是 0.005 N·m,为参考转矩的 5%,SVM-DTC 方案的转矩脉动是 0.003 N·m,为参考转矩的 3%,相比于传统 DTC 方案,转矩脉动相对参考转矩降低了 2%。由图 4 和图 5 的对比可以发现,采用 SVM-DTC 方案可以较好地解决传统 DTC 方案中转矩与磁链脉动较大的问题。

3.2 基于 SVM-DTC 方案的分拣机下压机构模拟仿真

针对分拣机下压机构在工作时需要控制输出力矩的问题,采用 SVM-DTC 来控制分拣机中下压电机的运行。假设集成电路在下压运动 0.2 s 时接触到测试簧片,之后电路继续下压直到达到测试所要求的规定接触力。根据前述下压机构的数学模型,将集成电路和簧片之间的规定接触力换算成增加的负载转矩,此刻的负载转矩即为控制电机输出转矩。设定压缩弹簧此刻的负载转矩为 0.1 N·m,电路与簧片接触后增加的负载转矩为 0.03 N·m。基于 SVM-DTC 的控制方案通过 Matlab/Simulink 对整个下压机构模型进行控制仿真。总的负载转矩如图 6 所示。

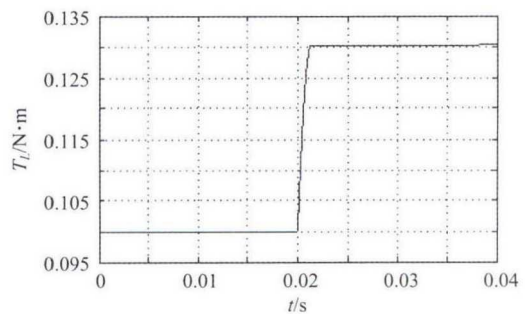


图 6 负载转矩模型

下压电机输出转矩和转速如图 7、图 8 所示。从图中可以看出,当集成电路在 0.02 s 遇到簧片时,电机立刻减速,此时电机转矩下降;约 2 ms 后电机将要停止转动时,电机输出转矩上升,迅速达到与负载转矩相同的 0.13 N·m,此时电机转速为零,集成电路与簧片间的接触保持稳定,且达到了所要求的测试接触力。此时集成电路测试系统开始测试电路。

4 结束语

针对分拣机独立下压机构工作时需要控制输出转矩的问题,提出一种基于 SVM-DTC 的控制策略。该方案不同于传统的 DTC 方案,而是采用 SVM 技术产生任意参考电压空间矢量来补偿磁链误差,以减小转

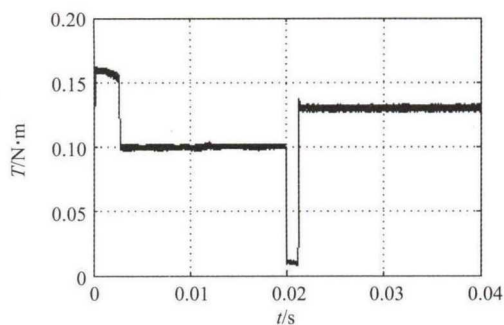


图7 下压电机输出转矩

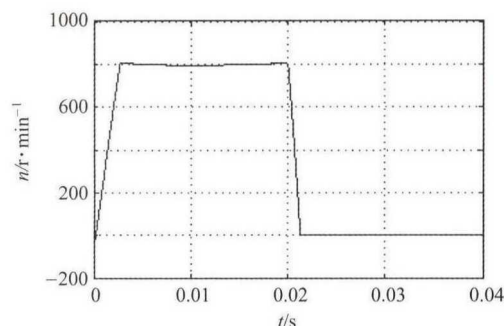


图8 下压电机转速

矩和磁链脉动。通过仿真验证结果表明,SVM-DTC 控制的转矩脉动相对值相比于传统 DTC 控制减小了 2%,转矩和磁链脉动得到进一步抑制,电机的动静态性能得到提高。并且在下压电机带载工作状态仿真时,电机减速时间不到 2 ms,电机输出转矩误差不超过 3%,输出转矩与负载转矩之间基本达到平衡,满足了分拣机测试时电路与簧片间保持规定接触力的要求。所述方案在转盘式分拣机独立下压电机上的应

用,能帮助解决目前国内分拣机测试时没有力矩控制这一关键问题,为分拣机整机的研发和应用奠定了基础。

参考文献:

- [1] Lee S C, Demidenk S, Lee K H. IC handler throughput evaluation for test process optimization [C]//IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. 2007:1-6.
- [2] 刘军,楚小刚,白华煜. 基于参考磁链电压空间矢量调制策略的永磁同步电机直接转矩控制研究[J]. 电工技术学报,2005,20(6):11-15
- [3] 徐海林,惠晶. 永磁同步电机直接转矩控制模型[J]. 江南大学学报(自然科学版),2015,14(1):22-27.
- [4] 芦俊,张佳佳,李丹,等. 基于 ADAMS 的端面凸轮下压机构仿真分析[J]. 机电工程技术,2015,44(4):33-35
- [5] 周腊吾,石书琪. 一种新型的 PMSM 直接转矩控制[J]. 湖南大学学报(自科版),2011,38(8):40-44.
- [6] 张华强,王新生,魏鹏飞,等. 基于空间矢量调制的直接转矩控制算法研究[J]. 电机与控制学报,2012,16(6):13-18.
- [7] 张瑞,高赞. 异步电机空间矢量直接转矩控制的仿真研究[J]. 大电机技术,2013(2):23-26.
- [8] 徐艳平,钟彦儒. 基于空间矢量 PWM 的新型直接转矩控制系统仿真[J]. 系统仿真学报,2007,19(2):344-347.
- [9] 高键,姜星星. 基于 SVM 的永磁同步电机直接转矩控制的仿真研究[J]. 科学技术与工程,2013,13(1):63-69.
- [10] 王斌,王跃,王兆安. 空间矢量调制的永磁同步电机直接转矩控制[J]. 电机与控制学报,2010,14(6):45-50.
- [11] 吴桂贤. 基于 SVPWM 的异步电机直接转矩控制研究[D]. 武汉:华中科技大学,2009:18-19.

□

(上接第 72 页)

值,但是到下个时间段后又不是上个时间段的 P、I、D 值了,要经常调整 P、I、D 参数,不仅增大了工作量,而且效果十分不理想。而本文对 ET200S 进行硬件组态和配置,通过水压传感器和电动球阀组成一个闭环控制,并且通过 840DSL 数控系统编写自适应算法对球阀进行控制,每次调节一个固定的角度,可以达到一个稳定的水压,而且不管外界环境怎么变化,都不用去更改程序。并且满足在线测量的条件,从而可以高精度地测出薄壁件的厚度,使对薄壁件厚度的在线测量成为了可能。

参考文献:

- [1] 王巍,俞鸿均,安宏喜,等. 大型飞机数字化装配在线测量技术研究[J]. 航空制造技术,2015(7):48-52.
- [2] 钟柳春,毕庆贞,张凯,等. 一种基于超声波测厚的薄壁件

自动补偿加工方法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016(10):148-150.

- [3] 田欣华. 在线测量技术在航空制造领域的应用[J]. 科技创新导报,2013(12):26.
- [4] 尹凯. 基于 PLC 的节水灌溉系统的研究[D]. 武汉:武汉工程大学,2015:35-38.
- [5] 钟丽娟. PLC 实现恒压变频供水系统的设计[D]. 呼和浩特:内蒙古大学,2015:42-45.
- [6] 齐继阳,孟洋,李金燕,等. 模糊 PID 在恒压供水控制系统中的应用[J]. 自动化与仪表,2015,30(3):44-47.
- [7] 周晓娟,刚铁金,贾继源. 基于 PLC 的 PID 恒压供水控制系统研究[J]. 数字技术与应用,2016(1):3-5.
- [8] 宋欣颖,金凤鸣. 数控车床全闭环控制系统的研究与分析[J]. 机电一体化,2014,20(11):40-42.
- [9] 李丽. 闭环控制在数控机床中的应用[J]. 科学中国人, 2016(12):27.

□