

基于 Delphi 和 PLC 的大型离心机控制系统 设计和实现

陈洪

(中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要:目的 实现大型离心机的自动控制。方法 设计上位机和 PLC 构成的上下位机离心机控制系统,上位机通过以太网及 OPC 与 PLC 通讯,PLC 采用 DeviceNet 总线与数字直流调速器通讯。开发基于 Delphi 编程语言的上位机控制软件和 PLC 程序。结果 软硬件实现了预定功能,系统实现了大型离心机自动运行。结论 该控制系统性能佳,可靠性高,操作方便。

关键词: Delphi; 可编程控制器; 大型离心机; 过程控制的对象链接嵌入; 设备网

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2015.06.020

中图分类号: TJ01; TG172.3 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2015)06-0114-07

Design and Realization of Large Centrifuge Control System Based on Delphi and PLC

CHEN Hong

(Institute of System Engineering, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

ABSTRACT: Objective To automatically control the large centrifuge. **Methods** A centrifuge control system of upper and lower computer was designed composed of the upper computer and the PLC. The upper computer communicated with the PLC by Ethernet and OPC, and the PLC communicated with a digital DC drive by DeviceNet. The PLC program and the control software of the host computer were developed based on Delphi. **Results** Intended functions of the hardware and software were achieved, the system automatically controlled the large centrifuge.

Conclusion The centrifuge control system had good performances and high reliability, and was simply to handle.

KEY WORDS: Delphi; PLC; large centrifuge; OPC; DeviceNet

离心机旋转产生向心加速度以模拟飞行器在飞行环境中的加速度环境,对试件结构强度和刚度或其性能进行考核^[1-3]。加速度的控制通过控制离心机转速来实现。

用于加速度试验的离心机一般是间歇、短时运

行,大型离心机一般由直流电动机或异步电动机经减速器驱动,异步电动机与直流电动机维护费用、故障率差异不大。当驱动功率在 2000 kW 左右时直流电动机具有较高性价比。另外,随着导弹、战斗机机动性能的提高,同时要模拟加速度变化率的离心机需要的

收稿日期: 2015-07-12; 修订日期: 2015-10-10

Received: 2015-07-12; Revised: 2015-10-10

作者简介: 陈洪(1967—),男,工程硕士,主要研究方向为电气工程与自动控制。

Biography: CHEN Hong(1967—),Male,Master of engineering,Reserch focus:electrical engineering and automatic control.

扭矩及功率大幅提高,为提高动态性能一般采用同步电动机直接驱动离心机。直流电机采用四象限数字直流调速器变电压调节转速,离心机停机时直流电机发电通过逆变电路、变压器反馈回电网,实现可控停机。交流电机采用变频器调速,交直流调速性能基本相当。

离心机控制系统除调节离心机转速外,还需要对离心机辅助设备监测控制,无论是直流调速还是交流调速均向智能化和网络化发展。PLC把自动化技术、计算机技术、电器控制技术、通讯技术融为一体,成为一种最重要、最普及、应用场合最多的工业控制装置,被公认为现代工业自动化的三大支柱(PLC、机器人、CAD/CAM)之一^[4-7]。PLC、调速器与上位机联网成为离心机控制系统发展的趋势。

中国工程物理研究院总体工程研究所研制的半径7 m大型离心机,采用900 kW直流电机经过减速器驱动,以数字直流调速装置控制直流电机转速。文中从硬件配置及软件设计两方面介绍该大型离心机控制系统。

1 控制系统设计分析

离心机主要控制参数有加速度、达到给定加速度的时间(上升或下降)、加速度的稳定性等。该离心机最大负载质量为3800 kg,加速度达到100g;负载质量为1000 kg时,最大加速度为200g。要求0.5g~5g加速度稳定度与给定值的偏差小于0.05g,10g~200g加速度稳定精度小于给定值的0.5%。

直流电机经减速比为5.978的两级圆锥-圆柱齿轮硬齿面减速器减速后驱动大型离心机旋转。直流电机额定功率为900 kW,额定电压为660 V,额定电流为1455 A,额定转速为1000 r/min,额定励磁电流为

8.83 A,采用一台15 kW的风机强迫冷却。总长约12 m,总质量约70 t的离心机转臂由上、中、下三个轴承支撑,安装了三个Pt100监测温度。轴承和减速器通过一个油站润滑和冷却,油站压力低时两台油泵同时运行,油源压力达到要求值时,辅助油泵停止运行,主油泵出现故障时,辅助油泵投入运行。

加速度量值(向心加速度与重力加速度($g=9.8 \text{ m/s}^2$)的比值) N_T 为^[8]:

$$N_T = k r n^2 = \frac{k}{5.978^2} r n_b^2 \tag{1}$$

式中: $k=1.118 \times 10^{-3} \text{ min}^2/\text{m}$; r 为试验半径,m; n 离心机转速,r/min; n_b 电机转速,r/min。

这样,加速度量值转变为直流电机的调速控制问题:

$$n_D = \frac{u - iR}{C_e \varphi} \tag{2}$$

式中: u 为电枢电压,V; i 为电枢电流,A; R 为电枢回路总电阻, Ω ; C_e 为电势常数; φ 为励磁磁通,Wb。

大型离心机采用固定励磁,改变电枢电压调节电机转速的技术路线。离心机控制系统应具备的功能主要有:按试件实际安装半径,试验转速变化率,试验要求的加速度量值及持续时间控制离心机运行;直流调速装置控制及状态监测;油站控制及状态监测;系统电路控制及状态监测。

2 系统硬件设计

根据试验要求及离心机控制系统功能需要,选取ABB公司的DCS800-02-1500-06/07数字可逆直流调速器(以下简称DCS800)对直流电机进行调速控制,罗克韦尔SLC500系列PLC对离心机控制系统进行控制和状态检测。上位机和HMI设置试验参数、发出控制指令、监测系统状态,系统总体结构设计如图1所示。

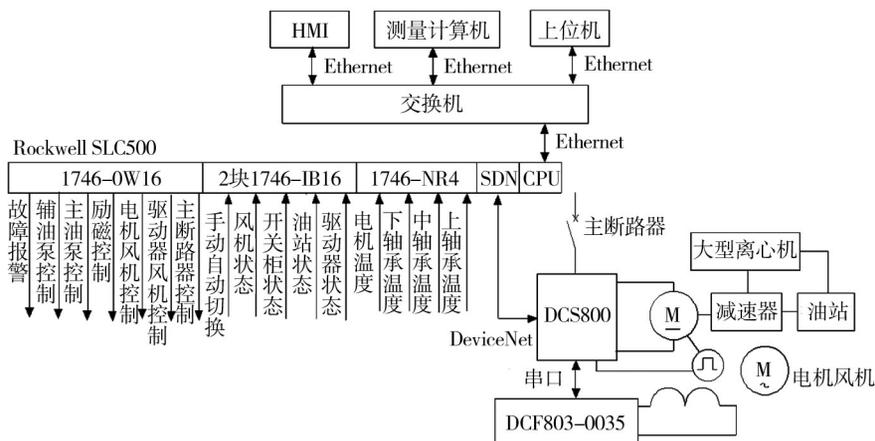


图1 控制系统总体结构

Fig.1 The overall structure of the control system

上位机按设定曲线自动运行离心机,实时保存运行数据和状态。HMI采用Digital2600T触摸屏,同时显示系统运行数据或状态。在离心机运行过程中,当上位机出现故障时,可以切换到HMI手动控制。图1中测量计算机用于试件力学性能的测量,上位机以UDP向网上其他计算机实时发送加速度值。

2.1 直流调速器

DCS800额定电压为690 V,额定电流为1 500 A。DCF803-0035励磁模块额定电流为35A。DCS800采用数字电流内环、转速外环的双环控制结构,电流环自整定确定PID参数,转速环需要通过调试确定,具有电压、电流、转速等测量模块和完善的直流电机保护功能,对应电机额定转速的数字量为20 000。采用2048线差分长线驱动编码器以提高系统的反馈精度。

按照直流电机参数、编码器参数设置DCS800中的相应参数。加速度试验不要求转速快速变化,并且电机经常过流影响使用寿命,将DCS800的最大使用电流设置为直流电机额定电流1 455 A。对于离心机而言,直流电机只运行在正向驱动和正向制动两个界限。正向驱动时,控制触发角调节晶闸管全桥整流电路输出脉动直流电压,以调节电机转速;正向制动时,

电机发出直流电通过晶闸管全桥逆变电路转换成交流电反馈给电网。DCS800无环流控制逻辑器保证任意瞬时只有一个桥路处于工作状态,避免在整流电路和逆变电路之间产生环流。

2.2 PLC

罗克韦尔自动化的SLC500系列PLC,配置灵活,功能强大,支持整型和浮点数运算。为实现SLC500与DCS800之间的通讯,采用DeviceNet总线。DeviceNet由罗克韦尔首次推出,它是基于CAN总线技术的开放型、符合全球工业标准的低成本、高性能现场总线通讯网络,能连接到机器人、PLC等各类工控产品^[9]。SLC500相应的DeviceNet扫描模块为1746-SDN, RDNA-01是DCS800的DeviceNet通讯接口模块。所有模块插入框架导轨中,电源模块安在框架的最左侧,CPU模块紧靠电源模块安装,其他模块位置随意,槽中有电源和通讯线路。利用RSLinx通讯软件,给SLC5/05定义一个IP地址,建立上位机与SLC5/05的以太网通信链接。

开关量输入模块用于检测系统状态,开关量输出模块用于控制继电器的通断,热电阻输入模块用于测量轴承温度。离心机控制系统PLC配置见表1。

表1 PLC配置

Table 1 Configuration of PLC

名称	型号	性能	功能
电源模块	1746-P2	5 V/5 A, 24 V/0.96 A	为CPU和I/O提供电源
CPU模块	SLC5/05	16 kW, 以太网, RS232	运算和逻辑判断
开关量输入模块	1746-IB16	24 V _{dc} 16通道	系统状态输入
开关量输出模块	1746-OW16	5 ~ 265 V _{dc} 16通道	控制中间继电器
热电阻输入模块	1746-NR4	-200 ~ 850 °C四通道,精度为±0.5 °C	测电机和三个轴承温度
DeviceNet模块	1746-SDN		与DCS800通讯

3 系统软件设计

3.1 上位机程序

利用面向对象的可视化语言Delphi 7开发上位机程序。Delphi是Borland公司推出的面向对象的可视化开发工具,具有优秀的可视化开发环境、高效率的编译器、对数据库和网络的灵活支持以及层次清晰和可伸缩的框架^[10]。上位机程序使用微软Access数据库。

上位机控制程序与SLC500采用OPC技术进行数

据通讯,获得离心机状态和运行参数。OPC(OLE for Process Control)是为解决现场管理层和过程管理层之间通信标准而设计的规范,在工业自动化中有广泛应用^[11]。它采用典型的Client/Sever模式,为不同设备驱动程序的开发提供了统一的标准。

SLC500的OPC Sever程序由RSLinx Gateway提供(RSLinx Lite版不提供),Client端程序使用Kassl开发的OPC for Delphi组件中的OPC DA控件。通过OPC DA控件与SLC500建立连接后,建立Group名及更新时间,再点击鼠标右键添加Item,就可以看见SLC500中的数据文件,选择需要读取的数据。选择OPC DA对象浏览器的“Events”选项卡,在

OnDatachange 左边空白处双击,就会出现如图2所示的代码,需要在“begin”和“end;”之间输入从SLC500读取数据赋值给一维数组“readstring”(全局变量)的几行语句。

```

procedure Tmainfrm.formshow(Sender: TObject);
var
  WriteGroup : TdOPCGroup;
begin
  configured:=false;
  acc_h:=0;
  nowstep:=0;
  t:=0;
  centri:=0;
  maxacc:=0;
  maxcurr:=0;
  maxqacc:=0;
  start:=false;
  run:=false;
  fault:=false;
  WriteGroup := ptoplc.OPCGroups.Add('plc'); //连接PLC OPC TOPIC, 即设置
  WriteGroup.OPCItems.AddItem('plc|N7:20'); //加标签, PLC数据文件 控制字
  WriteGroup.OPCItems.AddItem('plc|N7:34'); //加标签, PLC数据文件 加(减)时间
  WriteGroup.OPCItems.AddItem('plc|N7:35'); //加标签, PLC数据文件 给定转速
  WriteGroup.OPCItems.AddItem('plc|N7:43'); //加标签, PLC数据文件 试验半径
end;

```

图2 从PLC读取数据程序
Fig.2 Reading data program from PLC

向PLC写数据,需要先定义数据格式,如图3所示。

```

procedure Tmainfrm.start_btnClick(Sender: TObject); //向PLC发出启动辅助设备指令
begin
  item_name:='|plc|N7:20';
  writestring:='82';
  if not WriteOPCItem(ptoplc,'plc','N7:20',writestring) then
    begin
      statusbar.Panels[4].Text:='不能写标签';
    end
  else
    statusbar.Panels[4].Text:='启动辅助设备';
    start_btn.Enabled:=false;
end;

```

图3 定义向PLC写数据格式
Fig.3 Writing data to PLC definition format

点击图2中的“开设备”按钮,触发图4中的事件,向PLC发出启动辅助设备指令。

```

procedure Tmain.pctoplcDatachange(Sender: TObject;
  ItemList: TdOPCItemList);
var
  i:integer;
begin
  with ptoplc.OPCGroups[0] do //pctoplc是OPC DA的名称
    begin
      for i:=0 to 12 do
        begin
          readstring[i+1]:=OPCItems[i].value;
        end;
      end;
    end;
end;

```

图4 向PLC写入启动辅助设备指令
Fig.4 Writing command to PLC to start the auxiliary equipment

下面简单介绍上位机程序具有的功能:设置试验半径和离心机转速加速(减速)时间;设置试验加载曲线;向PLC发出启动或停止辅助设备指令;向PLC发出加速(减速)时间、给定电动机转速;显示设备状态;从PLC接收并显示电机转速、励磁电流、电枢电压、电枢电流;计算并显示离心机转速、加速度、最大加速

度、切向加速度、最大切向加速度、最大电枢电流;从PLC接收并显示上轴承、中轴承、下轴承和电动机温度;离心机运行中可以随时保持当时加速度;离心机运行中可以随时停机或快速停机;在离心机运行中将电机转速、励磁电流、电枢电压、电枢电流、故障状态和各温度值保存至数据库;根据试件名称或试验时间调出所有数据曲线、故障状态。

大型离心机上位机界面如图5所示。

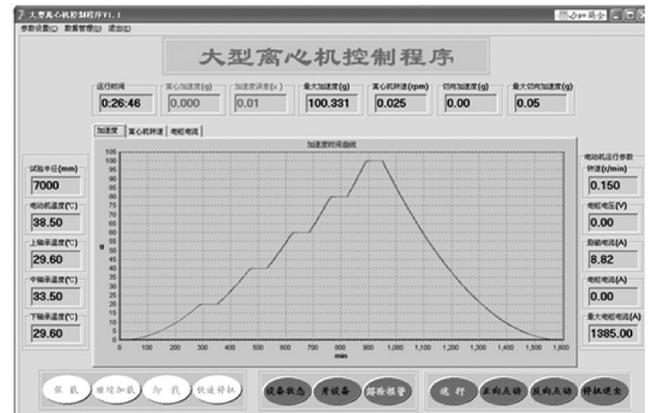


图5 离心机控制程序界面
Fig.5 The centrifuge control program screen

界面分为菜单、离心机运行参数区、电机运行参数区、温度值区、控制按钮区和曲线区。图5中曲线为20g, 40g, 60g, 80g, 100g并分别保持60s和停机的给定曲线和实际运行曲线。加速度量值之间的给定曲线根据“参数设置”菜单中的“转速加速时间”参数计算而来。加速度、离心机转速、电枢电流曲线可以随意切换。

3.2 建立PLC与DCS800之间的数据映射

图5中实际加速度根据式(1)由电机转速计算出来,而电机运行参数和状态均通过PLC取自DCS800,给定加速度和“转速加速时间”等控制参数或指令也是通过PLC发给DCS800。因此,必须建立PLC与DCS800之间的数据联系。

设置DCS800现场总线参数51.01为“DeviceNet”。设置参数组90(数据集接收地址)和参数组92(数据集发送地址)的实际参数。在RSLinx中,添加“1747 SDNPT”链接,运行RSNetWorx for DeviceNet,在设备列表中加入DCS800的EDS(电子数据表),点击“Online”,就会显示挂在DeviceNet网上的1747-SDN和RDNA-01。选择网上的1747-SDN(最大可以挂接63个端口),将PLC的输入、输出与DCS800的相应地址建立映射,见表2。

表2 SLC500与DCS800数据映射关系
Table 2 Data mapping between SLC500 and DCS800

DCS800 参数号	名称	设定参数	功能	PLC输入输出地址
90.01	数据集接收地址	7.01	主控制字	O:7.1
90.02	数据集接收地址	23.01	转速给定	O:7.2
90.03	数据集接收地址	22.01	加速时间	O:7.3
90.04	数据集接收地址	22.02	减速时间	O:7.4
92.01	数据集发送地址	8.01	主状态字	I:7.1
92.02	数据集发送地址	1.01	电机实际转速	I:7.2
92.03	数据集发送地址	1.16	电枢电流	I:7.3
92.04	数据集发送地址	8.02	辅助状态字	I:7.4
92.05	数据集发送地址	1.14	电枢电压	I:7.5
92.06	数据集发送地址	1.30	励磁电流	I:7.6
92.07	数据集发送地址	2.32	转速斜坡输出	I:7.7

表2中加速时间(减速时间)指直流电机从静止到额定转速的时间,对应上位机中的“转速加速时间”;转速斜坡输出表示当时转速外环的转速给定值。离心机运行中,试验出现其他情况需要保持当时的离心机转速,可以将转速斜坡输出发送给DCS800作为转速给定。1747-SDN模块只要没有显示大于63的数字量,则表示PLC与DCS800之间建立了通讯。

3.3 PLC程序

RSLogix500是SLC500梯形图编程语言,能自动识别框架内各槽的模块,RSLogix500将CPU模块定义为0槽。图4中上位机程序向PLC中的整形数据N7:20写入控制字“82”,PLC对写入控制字的响应程序如图6所示。

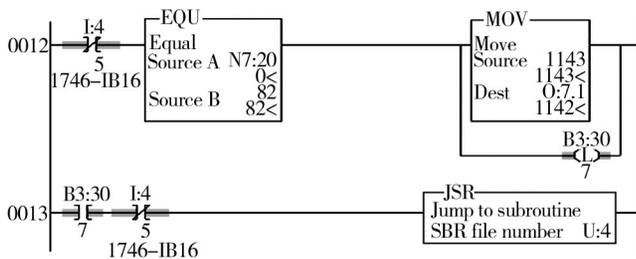


图6 控制辅助设备的PLC程序

Fig.6 PLC program to control the auxiliary equipment

图6中比较N7:20等于“82”后,通过DeviceNet扫描模块(在第7槽)给DCS800的主控制字(见表2)赋值“1143”,启动励磁、驱动器风机,同时进入子程序4-辅助设备控制,启动油泵电机、直流电机风机等。点击图5中“设备状态”按钮出现如图7所示界面。

图7中油压正常,辅油泵停止运行,驱动器运行状

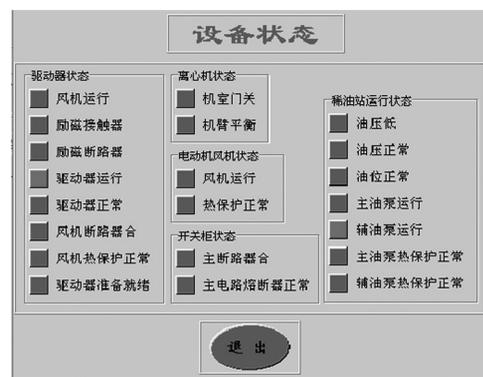


图7 设备状态界面

Fig.7 Device status screen

态显示红色,程序判断此设备状态正常,将图2中“启动”按钮使能。点击该按钮,向DCS800发送驱动器运行指令和第一级转速,离心机就旋转起来。

PLC在离心机控制系统中完成以下功能:接受主控计算机或HMI的指令完成设备的启动、停止;采集设备状态,向主控计算机或HMI发送设备状态;接受主控计算机或HMI的指令,向DCS800发出给定电动机转速、加速(减速)时间;从DCS800获得电机转速、电枢电流、电枢电压和励磁电流;测量上轴承、中轴承、下轴承和电动机温度;在离心机运行状态下,实现主控计算机控制平滑切换到触摸屏控制。

上位机程序和PLC程序结构如图8所示。

4 调试及运行

上位机及PLC软件除电机实际运行参数外,在开发过程中可以通过模拟电路模拟系统状态等手段完

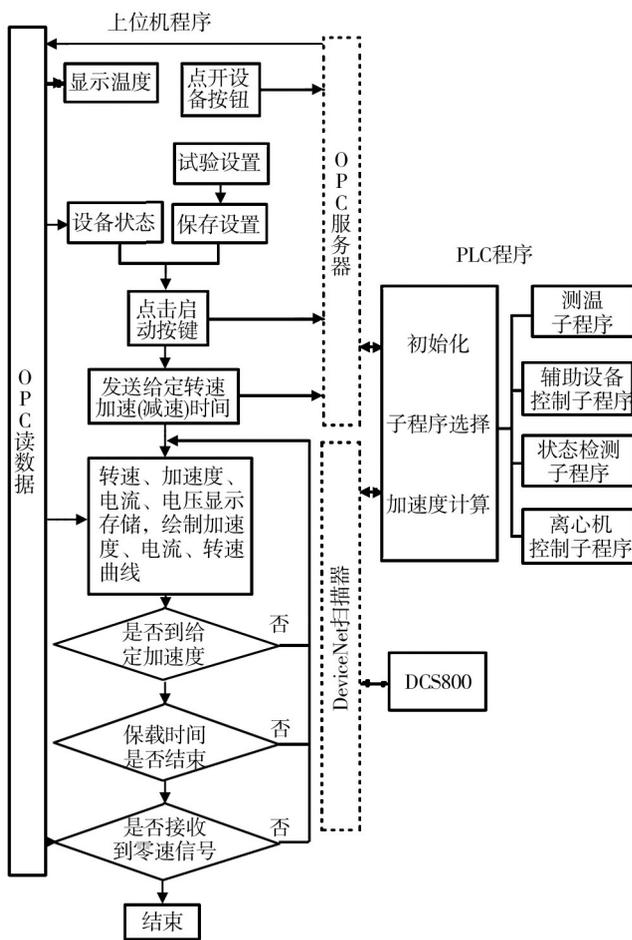


图8 上位机程序和PLC程序结构

Fig.8 Structure of PC program and PLC program

成软件其他功能的开发,功能验证工作。

电机与减速器输入轴之间的联轴器脱开,完成大型离心机硬件安装调试后,开展系统软硬件的联合调试。实现上位机、PLC和DCS800通讯设置及链接,进行辅助设备启动与停止控制和状态检测的调试及验证,上位机发送转速和转速加速时间,通过DCS800控制盒查看表2中的参数应与给定值一致。DCS800控制盒对电流环自整定,设置转速环PI参数,运行电机,上位机和PLC获得的电机转速、电压等运行参数应与DCS800相应参数一致。

将电机与减速器输入轴之间的联轴器联上,开始大型离心机系统的调试。这时,主要对DCS800转速环的PI参数进行精心调试。先从0.5g开始,运行上位机、PLC,通过图2中的离心机转速曲线、电流曲线,首先调节转速环PI参数使转速稳定,然后进一步调节PI参数提高转速动态、静态性能。由于大型离心机转动惯量很大,容易造成转速的超调。为了限制超调,在软件中加入了接近给定转速时逐步增加

转速加速时间的程序,效果很好。图2中,给定100g,实际加速度最大值100.331g。大型离心机在0.5g~5g的加速度稳定稳定度与给定值的偏差小于0.005g,10g~200g加速度稳定精度小于给定值的0.1%,大大优于设计指标。

5 结语

以DCS800为转速控制核心,SLC500系列PLC为逻辑控制主体,上位机为人机界面,利用OPC建立上位机与SLC500的通讯,利用DeviceNet总线实现SLC500与直流调速器的通讯。基于Delphi面向对象的编程语言开发了上位机软件,实现了大型离心机数字化自动控制,控制指标优于设计指标。控制程序界面友好,监控全面,操作简单、方便。大型离心机经运行多年,控制系统稳定、可靠。

参考文献:

- [1] GJB 150.15—86, 军用设备环境试验方法-加速度试验[S]. GJB 150.15—86, Environmental Test Methods for Equipments—Acceleration Test[S].
- [2] GJB 360.22—1987, 电子及电气元件试验方法——加速度试验[S]. GJB 360.22—1987, Test Methods for Electronic and Electrical Component Parts—Acceleration Test[S].
- [3] GJB 150.15A—2009, 军用装备实验室环境试验方法第15部分:加速度试验方法[S]. GJB 150.15A—2009, Laboratory, Environmental Test Methods for Military Materiel—Part 15: Acceleration Test[S].
- [4] 李春华. 可编程控制器及其工程应用[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2012. LI Chun-hua. Programmable Logic Controller and Engineering Applications[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2012.
- [5] 游亚陆,孟焯,孙志军,等. 基于PLC的裤袜自动包装机实时故障检测与处理[J]. 包装工程,2014,35(1):92—95. YOU Ya-lu, MENG Zhuo, SUN Zhi-jun, et al. Real-time Fault Detection and Processing Method Based on PLC for Pantyhose Automatic Packaging Machine[J]. packaging engineering, 2014, 35(1): 92—95.
- [6] 段文军,石卓栋,徐志刚,等. 基于PLC的防爆全自动灌装设备控制系统设计[J]. 包装工程,2014,35(5):58—61. DUAN Wen-jun, SHI Zhuo-dong, XU Zhi-gang, et al. Design of Control System for Explosion-pro of Automatic Filling Equipment Based on PLC[J]. packaging engineering, 2014, 35(5):58—61.

- [7] 陈东青. 基于PLC与触摸屏的码垛工业机器人操作系统设计[J]. 包装工程, 2014, 35(23): 84—88.
CHEN Dong-qing. Design of Stacker Industrial Robot Operating System Based on PLC and Touch Screen[J]. packaging engineering, 2014, 35(23): 84—88.
- [8] 郭丙君. 电力拖动控制系统[M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2012.
GE Bing-jun. Electric Traction Control System[M]. Shanghai: East China University of Science and Technology Press, 2012.
- [9] 李月恒, 刘全东, 孙德辉, 杨扬. 基于DeviceNet的机器人与焊机的通讯模块设计[J]. 制造业自动化, 2012, 34(12): 57—60.
LI Yue-heng, LIU Quan-dong, SUN De-hui, et al. Design of the Communication Module between Robot and Welder Based on DeviceNet[J]. Manufacturing Automation, 2012, 34(12): 57—60.
- [10] 刘宗健. Delphi7 程序设计入门[M]. 天津: 天津电子出版社, 2004.
LIU Zong-jian. Introduction to Delphi7 Programming[M]. Tianjin: Tianjin Electronic Press, 2004.
- [11] 吴鑫, 宫亮, 杨煜普. OPC 跨平台通信的实现方法[J]. 计算机工程, 2009, 35(13): 240—242.
WU Xin, GONG Liang, YANG Yu-pu. Implementation Method of OPC Cross-platform Communication[J]. Computer Engineering, 2009, 35(13): 240—242.



(上接第 108 页)

- [J]. 材料导报, 2013(10): 31—35.
GAO Lu-lu, CUI Zhen-bang, DU Min, et al. Fabrication and Application of Ir/IrO₂ Electrode[J]. Materials Review, 2013(10): 31—35.
- [7] WIPF D O, GE F Y, SPAINE T W, et al. Microscopic Measurement of pH with Iridium Oxide Microelectrodes[J]. Analytical Chemistry, 2000, 72(20): 4921—4927.
- [8] ZHANG W D, XU B. A Solid-state pH Sensor Based on WO₃-modified Vertically Aligned Multiwalled Carbon Nanotubes[J]. Electrochemistry Communications, 2009, 11: 1038—1041.
- [9] WEN Y Z, WANG X P. Characterization and Application of a Metallic Tungsten Electrode for Potentiometric pH Measurements[J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2014, 714—715: 45—50.
- [10] VONAU W, GUTH U. pH Monitoring: a Review[J]. Journal of Solid State Electrochemistry, 2006, 10(9): 746—752.
- [11] PARK S, BOO H, KIM Y, et al. pH-sensitive Solid-state Electrode Based on Electrodeposited Nanoporous Platinum [J]. Analytical Chemistry, 2005, 77(23): 7695—7701.
- [12] HA Y, WANG M. Capillary Melt Method for Micro Antimony Oxide pH Electrode[J]. Electroanalysis, 2006, 18(11): 1121—1125.
- [13] HORTON B E, SCHWEITZER S, DEROUIN A J, et al. A Varactor-based, Inductively Coupled Wireless PH Sensor[J]. Sensors Journal, IEEE, 2011, 11(4): 1061—1066.
- [14] PASTI I A, PASTI T L, MENTUS S V. Switching between Voltammetry and Potentiometry in Order to Determine H⁺ or OH⁻ Ion Concentration over the Entire pH Scale by Means of Tungsten Disk Electrode[J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2012(665): 83—89.
- [15] FENSTER C, SMITH A J, ABTS A, et al. Single Tungsten Nanowires as pH Sensitive Electrodes[J]. Electrochemistry Communications, 2008(10): 1125—1128.
- [16] KALE G M, WANG L, HAYES J E, et al. Solid-state Sensors for In-line Monitoring of NO₂ in Automobile Exhaust Emission [J]. Journal of Materials Science, 2003, 38(21): 4293—4300.
- [17] 尹鹏飞, 马长江, 许立坤. 工程用 Ag/AgCl 参比电极性能对比研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(3): 27—29.
YIN Peng-fei, MA Chang-jiang, XU Li-kun. Comparative Study on Performance of Engineering Ag/AgCl Reference Electrode[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(3): 27—29.
- [18] WANG J. Analytical Electrochemistry[M]. Newyork: John Wiley & Sons, 2006.
- [19] PAVLOV D, BOJIBOV M, LAITINEN T, et al. Electrochemical Behavior of the Antimony Electrode in Sulphuric Acid Solutions— II. Formation and Properties of the Primary Anodic Layer[J]. Electrochimica Acta, 1991, 36(14): 2087—2092.
- [20] PREZ O E L, P é Rez M A, TEIJELO M L. Characterization of the Anodic Growth and Dissolution of Antimony Oxide Films [J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2009, 632(1): 64—71.
- [21] COOPER K R, SMITH M. Electrical Test Methods for On-line Fuel Cell Ohmic Resistance Measurement[J]. Journal of Power Sources, 2006, 160(2): 1088—1095.
- [22] 刘永辉. 电化学测试技术[M]. 北京: 北京航空学院出版社, 1987.
LIU Yong-hui. Electrochemical Testing Technology[M]. Beijing: Beihang University Press, 1987.