

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.08.007

基于LabWindows/CVI的柔性驱动器软件系统实现*

魏敦文,葛文杰*,赵东来,张文磊,刘 博
(西北工业大学 机电学院, 陕西 西安 710072)

摘要:为实时监测和控制柔性驱动器物理试验装置,利用LabWindows/CVI作为软件平台开发设计了集系统参数配置、控制模式选择、指令控制、实时监控、数据显示和保存于一体的上位机柔性驱动器控制系统软件。采用循环冗余校验算法,设计了与下位机DSP的命令和数据双向传输通信协议以提高系统的可靠性;利用动态数据交换(DDE)技术,实现了采集数据的实时随机存储和指令控制。研究表明,数据溢出丢失时,系统利用循环冗余校验算法检测报错,提高了数据和命令双向传输的可靠性;软件系统实现了不同采样频率下的数据动态显示和存储,满足了研究不同控制算法动态性能和系统响应分析的需要,实现了直观有效地监测柔性驱动器工作状态,为柔性驱动器的性能分析和控制算法研究提供了方便、良好的人机交互环境。

关键词: LabWindows/CVI; 柔性驱动器; 循环冗余校验; 动态数据交换; 数据采集

中图分类号: TH39; TP311.1 文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2014)08-0991-06

Implementation of compliant actuator software system based on LabWindows/CVI

WEI Dun-wen, GE Wen-jie, ZHAO Dong-lai, ZHANG Wen-lei, LIU Bo
(School of Mechatronics Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Aiming at real-time monitoring and controlling of the compliant actuator physical test device, a compliant actuator control system software that integrates system configuration, option of controller model, command control, real-time monitor, data display and saving were proposed and designed based on LabWindows/CVI software platform. By using cyclic redundancy check (CRC), the bidirectional communication protocol with DSP controller was designed to improve the system reliability. Meanwhile, the random save of the acquisition data and control command were implemented by the Dynamic Data Exchange (DDE) technology. The results indicate that the system error is detected by using CRC if the data overflow, which improves the reliability of data and command communication. The software achieves the data dynamic display and storage under different sampling frequency, meets the analysis need of dynamic performance and system response of different controlling algorithms, and monitors the performance of the compliant actuator intuitively and effectively, which provides convenient and good human-machine interaction environment for the performance analysis and control algorithm research of the compliant actuator.

Key words: LabWindows/CVI; compliant actuator; cyclic redundancy check(CRC); dynamic data exchange(DDE); data acquisition

0 引 言

柔性驱动器是近年国内外机器人领域研究热点^[1-3],机器人与周围环境发生接触碰撞,会造成较大

的瞬时冲击载荷,过高的冲击载荷对刚性机器人系统关节结构和传统直流电机驱动器造成破坏,而柔性驱动器依靠柔性元件储能,实时监测外界载荷力矩,实现过载自保护功能,达到缓解冲击和提高能量利用效

收稿日期: 2014-03-17

基金项目: 国家高技术研究发展计划("863"计划)资助项目(2007AA04Z207);国家自然科学基金资助项目(50975230);教育部博士点基金资助项目(20136102130001);西北工业大学创业种子基金资助项目(Z2012057)

作者简介: 魏敦文(1986-),男,湖北孝感人,博士生,主要从事仿生机器人控制方面的研究. E-mail:dunwenwei@hotmail.com

通信联系人: 葛文杰,男,教授,博士生导师. E-mail:gwj@nwpu.edu.cn

率的目的^[4-5]。而目前国外许多学者的研究重点大多集中在从机构和能量学^[6]的角度设计各种依靠机构方式实现变刚度的柔性驱动器,实际应用中,任何驱动模式性能的体现,不仅与柔性驱动器本身的性能有关,而且与在柔性驱动器基础上建立起来的控制测试系统有关。当前柔性驱动器控制测试系统通常针对于单一柔性驱动器、单一控制算法模式单独研究^[7-8],由此造成两方面的问题:①缺乏通用性。当柔性驱动器中电机和编码器部分发生变化时,需要对控制器重新编程进行系统参数配置,不符合实际应用的需求;②缺乏对照性。在不同控制模式,例如常用的位置、速度、指令、自适应控制算法对柔性驱动器性能进行分析时,缺少对不同控制模式和控制参数的数据结果进行显示、比较和保存。

针对目前缺乏通用的柔性驱动器软、硬件结合平台对柔性驱动器进行性能分析测试和控制算法实验验证的现状,同时为配合西北工业大学自主开发研制的柔性驱动器试验装置,本研究利用LabWindows/CVI开发设计一种上位机柔性驱动控制软件,实时获取柔性驱动器控制器的数据,间断发送控制指令调整柔性驱动器控制参数和控制算法模式,将柔性驱动器装置和上位机控制系统软件结合起来,实现软、硬件一体化。其具有以下特征:①功能强大,可实现不同柔性驱动器系统参数配置、多种控制模式的在线调节和比较;②监控方便,操作灵活,可实现采集数据的可视化显示,同时能将可用数据段进行保存,方便实验分析;③有效追踪驱动器控制算法的特性。

1 柔性驱动器系统

柔性驱动器系统实验组成示意图如图 1 所示。柔性驱动器系统包含柔性驱动器、驱动控制器、上位机柔性驱动器控制系统软件 3 部分。其中,柔性驱动器

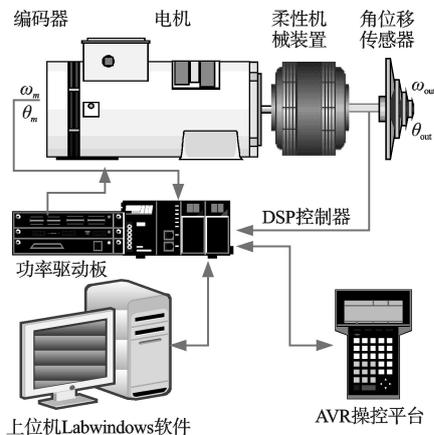


图 1 柔性驱动器系统实验组成示意图

部分由带编码器电机、柔性机械装置、输出端角位移传感器组成。驱动控制部分包括电机功率驱动板和 TMS320F2812 DSP 控制器。DSP 控制器根据算法输出 PWM 信号给功率驱动板对电机进行位置、速度及输出力矩的实时控制。TMS320F2812 芯片 SCIA 串口外接 AVR 单片机进行通信,AVR 单片机面板连接控制旋钮和液晶显示。柔性驱动器性能的提高,需要从柔性驱动器性能和控制系统两个方面提升。本研究介绍的柔性驱动系统具有以下特征:

(1) 依据变形量测力矩。系统利用编码器测量电机的转速和输出旋转角度,在柔性机械装置输出端通过传感器测量输出的速度和旋转角度,柔性机械装置左、右两端旋转角度差值即为柔性机械装置变形量,根据变形量及柔性机械装置的内部刚度参数可求得柔性驱动器输出力矩,与传统使用力矩传感器测量输出力矩的方法相比,该方法成本低、简单且容易实现。

(2) 工作在大扭矩、高速和碰撞环境。柔性驱动器性能测试一般在具有碰撞、高速或者大扭矩输出的环境下开展,要实现柔性驱动器参数评估以及控制策略研究,不仅需要采集编码器信号、角位移传感器信号测量位置速度,同时需要对功率驱动板的电压、电流、温度信息进行监测,若出现电流过大、温度过高现象,实现保护功能。

为方便实验研究,本研究利用 TMS320F2812 芯片 SCIB 串口实现与上位机 LabWindows/CVI 柔性驱动器控制系统软件的通信。柔性驱动器控制系统软件采用多层架构设计,主要功能包括:系统参数配置、控制参数设置、控制模式选择、指令控制模式、实时监测显示、数据显示与保存。其主要功能是负责人-机交互界面、运行状态和参数的监测、故障报警指示以及控制算法模式选择和调整等。该软件将柔性驱动器装置、控制算法配置、监控保护系统、数据分析和实验人员有机地连接在一起,软件系统基本结构如图 2 所示。

2 软件系统功能

柔性驱动器软件系统是在满足柔性驱动器实验系统的需求条件下,基于 LabWindows/CVI 平台开发的一种上位机控制软件系统。LabWindows/CVI 是 NI 公司推出的以 ANSI C 语言为核心的交互式开发环境,用于数据采集处理、自动化仪器仪表控制、过程检测监控等应用软件^[9]。其集成化的开发环境、交互式的编程方法简化了开发难度,基于事件的函数面板和专业的面板控件方便了功能实现。LabWindows/CVI 提供了丰富的库函数可供调用^[10-11]。该系统用到的库函数包括信号分析

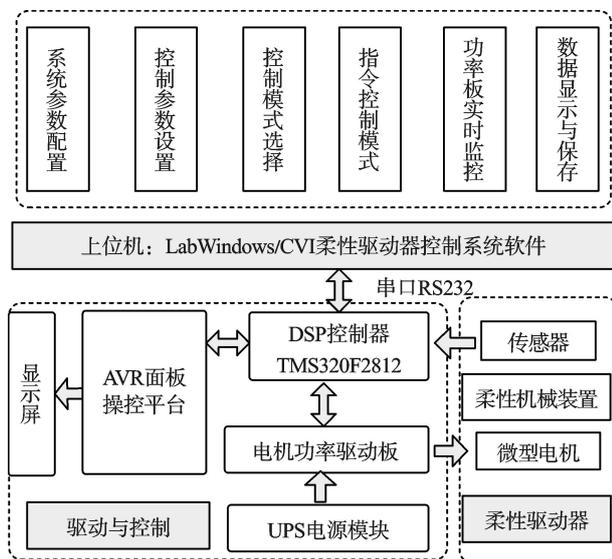


图2 系统硬件组成和软件结构

处理库函数(Advanced Analysis Library)、串口通信库函数(RS-232Library)和动态数据交换库函数(DDE Support Library)^[12]。该系统软件利用LabWindows/CVI的方便、灵活特性实现了该软件的以下功能。

2.1 系统参数配置

系统参数配置包含串口通信参数设置和驱动器参数的设置。在该系统软件启动时,该软件利用枚举法进行可用串口检测(见3.1节)。启动软件前,须先连接串口通信数据线,选择正确通信端口号,匹配正确通信协议参数进行串口配置。驱动器参数配置主要包含编码器线数、齿轮箱减数比、电机最大额定转速和最大加速度,用于检测电机的运行状态以及控制指令的合法性,电机进行自我保护控制。编码器线数用于实时地检测电机输出轴转速和位置。该功能主要用于满足不同柔性驱动器电机编码器的参数设定。

2.2 电机控制参数

在进行位置控制和速度闭环控制时,必须先设定控制参数才生效,控制参数包含比例参数 K_p 、微分参数 K_i 和积分参数 K_d 。本研究通过调整控制参数和控制算法,可以实现多种控制结果数据的实时监测显示和分析比较,有效追踪驱动器控制参数和算法的特性,方便分析。

2.3 控制模式选择

该软件设置有7种控制模式供选择:默认模式控制、简单速度控制、简单位置控制、指令速度控制、指令位置控制、旋钮控制、自适应调节环控制。默认模式下,由DSP内部程序自带控制算法程序进行控制,简单速度和位置控制采用PID算法分析实现速度和位置控制。指令速度和指令位置利用状态空间法分别实现指定速度和位置的快速跟踪。自适应算法采用

非线性算法模式,主要解决接触碰撞问题的控制。

2.4 指令控制模式

指令控制模式有两种,包括指令速度控制和指令位置控制。可直接输入指令数据,或采用动态数据交换技术(DDE)建立软件系统和Excel指令数据库之间的通话,调用指令数据库中控制指令。指令控制模式主要利用系统状态空间控制算法准确跟踪指定速度和位置曲线。

位置控制模式下,为保证位置跟踪的连续性,本研究采用PloyFit函数对控制指令进行位置曲线拟合,函数格式为: $PloyFit(cmd_t, cmd_p, num, n, ft, a, \&mse)$;其中: cmd_t —时间序列; cmd_p —位置序列; num —指令个数; n —多项式的阶数; ft —拟合位置; a — n 次拟合多项式系数; mse —平均方差。通过采用数学公式可得到位置、速度和加速度公式分别为:

$$\begin{aligned} p(t) &= \sum_{k=0}^n a(k) \cdot t^k \\ v(t) &= \sum_{k=1}^n k \cdot a(k) \cdot t^{k-1} \\ a(t) &= \sum_{k=2}^n (k^2 - k) \cdot a(k) \cdot t^{k-1} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $a(k)$ — n 次多项式 k 阶系数; $p(t)$, $v(t)$, $a(t)$ — t 时刻的位置、速度和加速度。在任意时刻,实现位置跟踪的最大速度和最大加速度不能大于电机最大速度和加速度许可值。若 $|v(t)| > v_{max}$ 、 $|a(t)| > a_{max}$,出现指令错误提示。在速度控制模式下,相邻速度指令实现的加速度也应小于最大加速度,即满足:

$$|a(k)| = \left| \frac{v(k) - v(k-1)}{t(k) - t(k-1)} \right| < a_{max} \quad (2)$$

2.5 系统监控

系统监控包括对整个系统的软硬件运行进行检测报错,例如过温、过压、过流故障,转速过大保护,短路保护,串口故障,软件错误,指令错误,开/关机错误。TMS320F2812数字处理芯片拥有16路12位带流水线模式的模/数转换器(ADC)模块,16路通道采集端口在级联模式下构成一个16通道模块,ADC转换器实现0~3V单极模拟电压信号的采集。本研究利用F2812的12位A/D转换器,实现角位移传感器、电压信号、电机电流以及功率驱动板温度信号的四通道采集。采集过程中,本研究将上述角位移、电压、电流和温度传感器的原始信号转化为F2812可接收的0~3V的电压信号进行标定,并采用六次均值滤波法进行数据处理,对于重要的功率板温度、电机电压、电机电流参数利用传感器进行检测的同时,将检测结果进行可视化显示。当连接AVR操控平台时,液晶显示器显示

电机的实时参数,有错误时实现报警。

2.6 数据显示和保存

数据显示可根据需要将位置、速度、电机电流或者力矩数据波形图显示出来。当数据保存处于打开状态时,角位移传感器和电机编码器采集的数据将通过动态数据交换技术保存在 Excel 结果数据库中,同时可实现保存结果的重新播放。

3 软件系统功能的实现

该系统软件为实现上述功能,采用了串口检测的通信方法、DDE 动态数据交换技术,并且自定义命令数据传输通信协议。

3.1 串口检测与通信协议

柔性驱动器控制器通过串口数据线与电脑连接,启动该软件后,该软件利用对象创建函数 CreatFile 创建串口号,利用枚举法检测可用串口,所有可用串口号将显示在通信端口号的显示框中。若没有发现可用通信端口,系统自动弹出报错框。在软件运行过程中,为了防止控制过程意外中断,不进行新通信端口的检测。

上位机系统软件与下位机通信要实现以上多种命令和数据的双向传输,需要定义数据传输协议,为了程序易于编写,上位机和下位机采用相同的数据传输协议,命令格式:起始命令字(1字节)+命令代码(1字节)+数据包内容(2字节,低字节在前,高字节在后)+校验(1字节)。1个字节命令代码最多可以实现 512 个不同命令发送,数据包采用 2 字节数据,因此浮点数、整数、指数数据转化成 16 位存储一次性发送,或者通过命令字分配实现 32 位数据的传输。该数据传输协议方便软件后续命令功能的扩展。程序中分别定义如下接收和发送数据的结构体和联合体:

```

////////////////////////////////////
struct RXTX_MODE //接收发送结构体
{
    unsigned char soi;//起始命令字
    unsigned char command;//命令代码
    unsigned char l8;//数据低 8 位
    unsigned char h8;//数据高 8 位
    unsigned char chksum;//校验位
};
union RX_UNION //接收数据联合体
{ unsigned char rx_tmp[5];
  struct RXTX_MODE rxdat;
}rx_buf;
union TX_UNION //发送数据联合体
{
    unsigned char tx_tmp[5];

```

```

struct RX TX_MODE txdat;
} tx_buf;
////////////////////////////////////

```

程序进行数据接收过程包含数据校验和数据提取两个过程。数据命令的发送过程包含产生校验字(编码)和发送数据流,流程图如图 3 所示。采用循环冗余校验 CRC-8-Dallas/Maxim 标准产生校验字,并进行数据校验。根据 CRC 循环冗余校验的代数公式^[13]:

$$M(x) \cdot x^n + R(x) = Q(x) \cdot G(x) \quad (3)$$

式中: $M(x)$ —原始信息多项式,由于采用 4 字节数据, $M(x)$ 最高次幂为 31,循环校验次数为 32 次; $G(x)$ —生成(或钥匙)多项式。

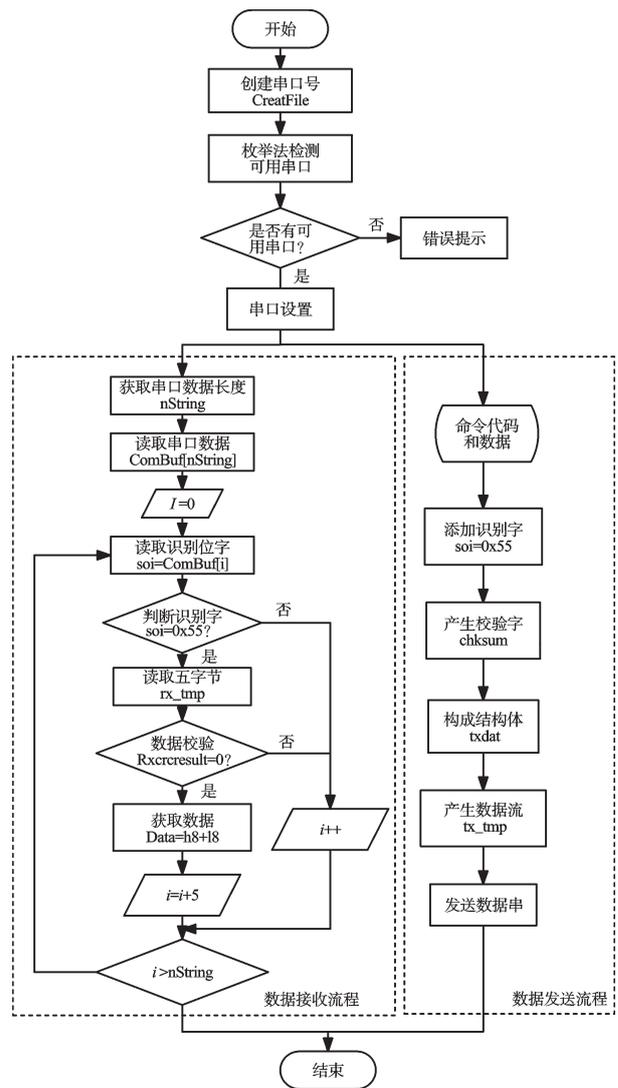


图 3 接收发送数据流程图

Dallas/Maxim 标准的去高位正序表示为 0x31,因此生成多项式:

$$G(x) = x^8 + x^5 + x^4 + 1 \quad (4)$$

式中: $R(x)$ —CRC 校验多项式。

具体 Dallas/Maxim 正序校验算法软件的实现是通

过对32位信息数据分4个字节,每字节数据进行8次右移位与0x31异或得到校验字。

上位机到下位机部分命令代码中包含信息命令字如表1所示,下位机控制器到本程序平台的命令代码中包含的信息命令字如表2所示。为解决数据“快进慢出”问题,笔者将流程图中接收数据采用双缓冲技术,分配了300 Bytes。

表1 上位机到下位机部分命令代码

起始命令	命令代码	数据包内容 低8位+高8位		命令含义
0x55	0x00	0x00	0x00	电机停止
0x55	0x00	0x01	0x00	电机运行
0x55	0x01	0x00	0x00	默认控制模式
0x55	0x01	0x01	0x00	简单速度控制
0x55	0x01	0x02	0x00	简单位置控制
0x55	0x01	0x03	0x00	指令速度控制
0x55	0x01	0x04	0x00	指令位置控制
0x55	0x01	0x05	0x00	旋钮控制模式
0x55	0x01	0x06	0x00	自适应调节环

表2 下位机DSP到上位机部分命令代码

起始命令	命令代码	数据包内容 低8位+高8位		命令含义
0x55	0x01	0x00	0x00	状态 stop
0x55	0x01	0x01	0x00	状态 run
0x55	0x01	0x00	0x00	状态 alarm
0x55	0x02	0x00	0x00	无故障
0x55	0x02	0x02	0x00	过温故障
0x55	0x02	0x04	0x00	过压故障
0x55	0x02	0x08	0x00	过流故障

3.2 DDE 动态数据交换

动态数据交换(Dynamic Data Exchange, DDE)是Windows支持的一种IPC(进程间通信)形式。该技术通过动态数据交换协议,协调Windows应用程序间各种类型的数据交换,实现程序间操作命令的调用。两个不同的Windows应用程序通过相互之间传递的DDE消息进行DDE会话,从而完成数据的请求、应答和传输。尽管目前有更加安全的对象链接和嵌入(OLE)技术可以实现程序间的数据交换,但LabWindows/CVI自带支持Windows应用程序间DDE技术的函数库,而本研究开发设计的柔性驱动器系统软件不存在数据安全保密问题,因此采用动态数据交换是合理而且简便的实现方案。以下介绍该系统DDE实现方法。

实现LabWindows/CVI柔性驱动器系统软件和Excel程序间DDE会话的原理图如图4所示。Excel提供数据并且执行来自系统的命令,称为DDE服务器;而

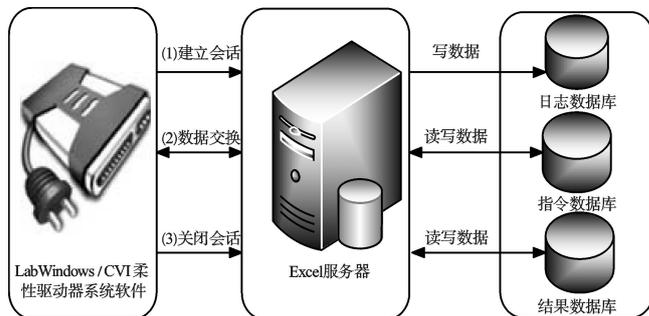


图4 动态数据交换实现原理图

柔性驱动器系统软件获取数据并发送命令,称为DDE客户机。Excel数据库分3个部分:日志数据库,指令数据库和结果数据库。日志数据库记录系统运行状况(例如报警、错误信息);指令数据库存储有指令控制模式下所需要的指令数据;而结果数据库保存系统测试中的结果数据。

建立完整的DDE对话包含以下步骤:①建立DDE连接:利用ConnectToDDEServer函数建立客户端柔性驱动器系统软件程序和DDE Excel服务器的连接,打开Excel服务器程序后,用SetUpDDEHotLink函数建立热连接。由于DDE协议采用服务、主题和项目三级层次命名方式对所交换的数据单元进行指定。在利用上述两个库函数进行数据交换时,服务名Server_Name设置为excel;主题名Topic_Name设置为excel数据表格路径;项目名ItemName设置为工作表格。②动态数据交换:利用ClientDDERead函数从Excel中获取指令控制模式下指令数据;利用ClientDDEWrite函数将系统运行状况数据写入日志数据库中,在数据保存开启的情况下,将数据结果保存到结果数据库中;利用ClientDDEExecute启动命令执行服务,对数据库进行保存、关闭等简单操作。③断开DDE连接:点击数据保存功能按钮后,程序保存交换后的数据结果,利用DisconnectFromDDEServer函数关闭系统软件和Excel服务的连接。

4 柔性驱动器控制系统实验测试

根据上述设计思路,本研究完成柔性驱动器控制系统软件平台的设计,并通过调试实验测试了系统的功能。

4.1 数据通信稳定性测试

当系统软件向下位机控制器发送命令和数据时,下位机软件能及时响应中断。当上位机软件向DSP连续发送大量数据命令时,由于TMS320F2812串口缓冲区为16 Bytes,部分数据丢失造成指令数据丢失,通过CRC校验错误,指令错误反馈到系统软件并报错,

提高了系统监测的可靠性。为解决这一问题,当出现需要发送多组命令数据时,循环方式3次连续发送指令数据,重新测试发现没有出现指令报错,证明上位机到下位机数据通信正常。

4.2 数据采集保存分析测试

系统软件数据采集测试如图5所示。本研究利用该系统软件进行数据采集测试。该系统软件可选择DSP控制器数据采集频率,当采样频率设为10 Hz时,数据显示框完全能够正常显示动态数据结果;当采样频率设置为1 000 Hz时,1 s数据保存量达到412 KB;当采样频率设置为10 000 Hz时,1 s采样数据保存量达到2 MB左右,当执行其他操作命令时,会造成CPU中断而导致串口数据溢出报错。因此,笔者建议在使用此系统软件平台进行高频数据采集分析研究(例如在驱动器进行接触碰撞控制研究)时,应选择性地保存可用数据,以节省CPU处理时间,同时减少数据保存量。

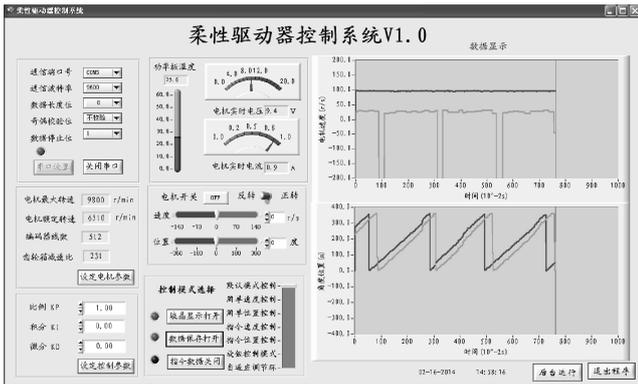


图5 系统软件数据采集测试

5 结束语

本研究针对柔性驱动器测试装置特点的需求,设计了集串口通信、算法控制、系统监测和数据动态交换分析为一体的柔性驱动器控制系统软件,该系统为当前柔性驱动器性能分析和控制算法研究提供了方便的平台。系统实际操作简单方便,人机交互界面友好,通过简单操作就可以直观观测动态测试过程和测试结果;根据不同数据类型选择16位和32位数据传输,可提高系统的测量准确度和精度;同时系统具有结构灵活、功能全面、扩展性和可维护性强等特点。系统软件对测试结果进行保存、重放、删除等处理,并且能支持用户选择不同的控制模式,大大节省了测试

时间,提高了测试效率。

为了进一步提高测试结果的可靠性和精度,应该注意并解决的是高频率数据采集模式下缓冲区数据溢出而导致的数据丢失问题。

参考文献(References):

- [1] ZINN M, ROTH B, KHATIB O, et al. A new actuation approach for human friendly robot design[J]. **The International Journal of Robotics research**, 2004, 23(4-5): 379-398.
- [2] HAM R V, SUGAR T G, VANDERBORGHT B, et al. Compliant actuator designs[J]. **IEEE Robotics & Automation Magazine**, 2009, 16(3): 81-94.
- [3] VANDERBORGHT B, ALBU-SCHAEFFER A, BICCHI A, et al. Variable impedance actuators: A review[J]. **Robotics and Autonomous Systems**, 2013, 61(12): 1601-1614.
- [4] LUCA A D, FLACCO F, BICCHI A, et al. Nonlinear Decoupled Motion Stiffness Control and Collision Detection/reaction for the Vsa-ii Variable Stiffness Device [C]//Proceeding of the 2009 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems. St. Louis, MO: (IEEE), 2009: 5487-5494.
- [5] JAFARI A, TSAGARAKIS N G, CALDWELL D G. A novel intrinsically energy efficient actuator with adjustable stiffness (AwAS) [J]. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, 2013, 18(1): 355-365.
- [6] VISSER L C, CARLONI R, STRAMIGIOLI S. Energy-efficient variable stiffness actuators [J]. **Robotics, IEEE Transactions on**, 2011, 27(5): 865-875.
- [7] TONIETTI G, SCHIAVI R, BICCHI A. Optimal mechanical/control design for safe and fast robotics[M]. Berlin: Springer, 2006.
- [8] SARDELLITTI I, PALLI G, TSAGARAKIS N G, et al. Antagonistically Actuated Compliant Joint: Torque and Stiffness Control [C]//Proceeding of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Taipei: (IEEE), 2010: 1909-1914.
- [9] National Instruments. LabWindows/CVI user manual [M]. Texas: National Instruments, 2003.
- [10] 段 红. 基于LabWindows/CVI的网络化虚拟仪器设计[J]. **机电工程**, 2003, 20(5): 41-43.
- [11] 周云水, 丁 霄. 基于LabWindows/CVI的多路伺服电机控制盒在线检测系统[J]. **机电工程**, 2010, 27(8): 84-87.
- [12] National Instruments. LabWindows/CVI standard libraries reference manual [M]. Texas: National Instruments, 1998.
- [13] 彭 伟. 嵌入式系统CRC循环冗余校验算法设计研究[J]. **南京信息工程大学学报:自然科学版**, 2012, 4(3): 258-265.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

魏敦文,葛文杰,赵东来,等. 基于LabWindows/CVI的柔性驱动器软件系统实现[J]. **机电工程**, 2014, 31(8): 991-996.

WEI Dun-wen, GE Wen-jie, ZHAO Dong-lai, et al. Implementation of compliant actuator software system based on LabWindows/CVI[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2014, 31(8): 991-996.
《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>