

# 基于 NI 实时控制器的六自由度平台 测控系统设计与实现

王效亮, 张芳, 曾宪科, 栾婷, 陈成峰

(北京精密机电控制设备研究所, 北京 100081)

**摘要:** 六自由度平台测控系统是六自由度平台的电气控制部分, 它通过对六路液压缸的实时闭环控制, 实现对平台位姿的控制; 该测控系统采用 NI 的计算机, 配置多种类型的 PXI 板卡, 实现了对平台的电压、电流、数字 IO、CAN 总线等多种接口类型的测量和控制, 满足了可靠性需求; 采用了典型的上下位机控制, 分别进行实时计算与任务管理, 解决了实时性的控制需求; 采用 NI 的虚拟仪器 Labview 开发测控软件, 完成实时计算平台的正解与反解模块, 作动器闭环控制等功能, 增强系统的功能和灵活性; 目前六自由度平台测控系统的硬件部分和软件部分都已经通过了调试, 对系统进行了正弦运动和暂态特性测试, 实验结果表明, 运行速度快, 满足了平台的控制要求。

**关键词:** 六自由度平台; 软件; SIT 仿真模型

## Design and Implementation of a Six-degree Platform Control System Based on NI Real Time Controller

Wang Xiaoliang, Zhang Fang, Zeng Xianke, Luan Ting, Chen Chengfeng

(Beijing Research Institute of Precise Mechatronics Controls, Beijing 100076, China)

**Abstract:** The six-degree platform control system is the electrical control part of the six-degree platform. It realizes the position and attitude control of the platform through the real-time closed-loop control of the six-way hydraulic cylinder. The control system uses NI computer and configures various types of PXI board, realizes the control of voltage, current, digital IO, CAN bus and other interface types of the platform, meets the reliability requirements. Typical upper and lower computer control is adopted to carry out real-time calculation and task management respectively, which solves the real-time requirements. Labview is used to develop the measurement and control software, which completes the forward and reverse module of the real-time computing platform and the closed-loop control of the actuator, so as to enhance the function and flexibility of the system. At present, the hardware and software of the six-degree platform measurement and control system have passed the debugging. The sinusoidal motion and transient characteristics of the system have been tested. The experimental results show that the system runs fast and meets the control requirements of the platform.

**Keywords:** six-degree platform; software; SIT simulation model

### 0 引言

六自由度平台是一种模拟航天器空间运动姿态的模拟器, 在其行程范围内可以模拟任意空间运动。六自由度是平台具有六个自由运动的维度, 即纵向、升降、横向、俯仰、横滚、偏航<sup>[1]</sup>。通过对 6 个液压作动器的精确控制和解耦算法, 实现对平台的 6 个自由度的位姿控制。其系统示意图如图 1 所示。

六自由度运动平台可以实现对既定的轨迹的跟踪, 作为运动仿真平台有着广泛的应用:

- 1) 可以作为航空飞行模拟器;
- 2) 可以作为机器人的模拟运动机构;
- 3) 在娱乐界可以作为体感模拟娱乐机;
- 4) 用作飞机、船舶、潜艇、航天器等运动载体中相关

收稿日期: 2018-09-16; 修回日期: 2018-10-30。

**作者简介:** 王效亮(1983-), 男, 山东省寿光市人, 高级工程师, 主要从事航天飞行器的伺服系统电气集成和软件设计方向的研究。

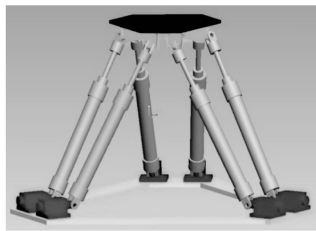


图 1 六自由度平台示意图

仪器设备的试验。

本文主要依托 NI 的虚拟仪器研究了六自由度运动平台的控制策略, 解决了高可靠、高实时的控制需求<sup>[2]</sup>。随着计算机技术的发展, 计算机和仪器的密切结合成了目前测控发展的一个重要方向, 这种结合有两种方式: 一种是只智能化仪器, 将计算机装入仪器; 另一种是虚拟仪器, 将仪器装入计算机, 以通用的计算机硬件和操作系统为依托, 实现各种仪器功能。

本测控系统选择虚拟仪器, 以通用计算机为核心的硬件平台上, 由用户设计定义、具有仿真面板、由测试软件实现测试功能的一种计算机仪器系统, 这增强系统的功能和灵活性。使用该控制策略的主要优势体现在以下方面:

1) 使用了基于 NI 的虚拟仪器, 可以灵活配置各类板卡, 增加了硬件的灵活性

2) 选择 LabView 开发软件, 简化软件研制方式。LabVIEW 是一种图形化编程工具, 使用“所见即所得”的可视化技术建立人机界面, 可提供大量的仪器面板中的控制对象, 如表头、旋钮、图表等。它有着专用的各种函数库及数据处理与控制的开发工具。LabVIEW 已经成为测试与测量领域和图形化编程语言方面事实上的工业标准<sup>[3]</sup>。

3) 使用 SIT 混合编程解决了开发周期短和运算过程复杂的矛盾。LabVIEW 可以通过仿真接口工具包实现对 MATLAB 搭建的复杂控制模型的直接调用<sup>[4]</sup>。MATLAB 具有强大的数值分析、计算和绘图功能, 拥有强大的控制算法工具箱, 可以完成复杂控制系统的设计、计算、分析和仿真, 已经广泛应用于控制系统的建模和仿真中。

## 1 系统结构与原理

六自由度平台测控系统是六自由度平台的硬件与软件集成的电气设备, 测控系统的控制如图 2 所示, 其中虚线框内表示系统的被控对象。图中反解模块完成平台六个自由度到六路液压作动器长度的转换<sup>[5]</sup>; 正解模块完成从六路液压作动器长度到平台六个自由度的转化; 位置调节器采用了复杂的控制策略, 能使系统具有较高的动态性能和稳态精度。

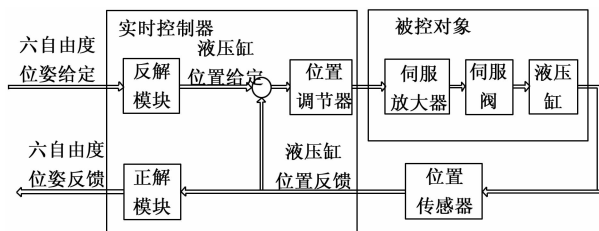


图 2 系统控制框图

六自由度平台测控系统复杂, 需要测量和控制的信号多, 实时性和可靠性要求高, 计算过程复杂。因此, 测控系统采用了上下位机分开的方式进行控制, 整个测控系统可以分为上位机和实时控制部分四个部分, 上位机主要完成对用户指令的处理, 显示整个系统运行的情况, 与实时控制器通信, 与能源系统通过 RS485 通信等功能; 实时控制部分主要完成对整个系统平台的实时控制, 包括对六路液压作动器的位置控制, 实时计算正解模块与反解模块, 与上位机的通信等功能。

## 2 硬件设计

测控系统硬件选择 NI 的 PXI 总线控制器作为控制核心, 配套高速隔离 80 通道数据采集卡、8 通道 16 位 D/A 卡、24 通道隔离 I/O 卡及 2 通道高速 CAN 卡, 完成运动学

的实时解算和各伺服作动器回路的实时控制任务, 硬件系统框图如图 3 所示。测控系统完成六路液压作动器位置闭环控制, 每个液压作动器通过一路伺服阀信号, 一路锁紧阀来控制缸的伸缩运动情况。为匹配板卡与阀的硬件驱动特性, 硬件设计中加入电压到电流的线性转换电路, 以匹配实时控制器发出的模拟信号到伺服阀的驱动, 加入电磁继电器来提高板卡发出的 I/O 信号的驱动能力, 以此来控制缸的运动情况。

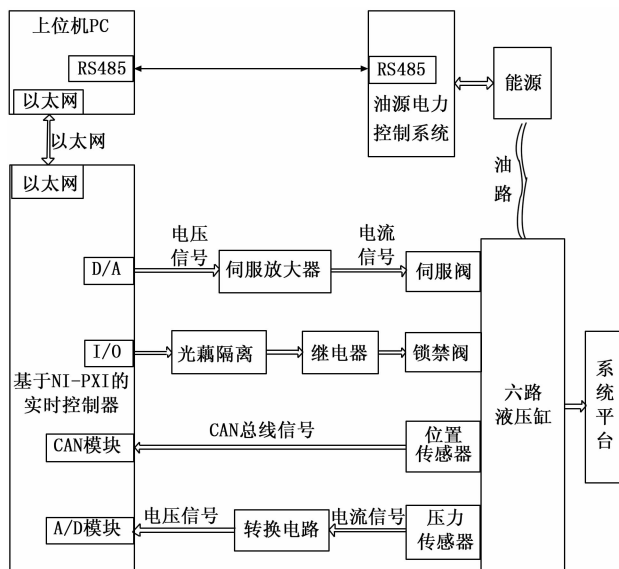


图 3 测控系统硬件设计框图

## 3 软件设计

### 3.1 需求分析

分析六自由度平台的需求, 测控系统需软件要具有以下特点:

- 1) 实时性高, 对液压作动器的闭环控制周期要求为 1~2 ms, 使用 Windows 系统无法满足实时性要求。
- 2) 可靠性高, 该系统是较大型的测控系统, 如果测控系统故障, 系统失控, 可能会对平台结构造成不可恢复的损伤;
- 3) 计算量复杂, 需要计算位姿变换的正解、反解模块, 以及对 6 路作动器的闭环运算;
- 4) 测量与控制信号多, 测控系统需要实现对 6 路液压作动器的闭环控制;
- 5) 测量精度要求高。对于液压作动器上下腔之间压力差的模拟信号采集要求较高, 采集的精度会直接影响整个控制系统的性能指标。

六自由度平台软件属于实时控制类嵌入式软件, 随着嵌入式系统复杂度的逐渐上升, 现在传统工具很难降低编程工作的复杂度, 因此嵌入式领域需要一种新的方法来应对这些挑战。基于文本编程的嵌入式应用开发在将来不可能解决这些问题, 这已经是许多业内专家的共识。为了解决嵌入式系统面临的挑战, LabVIEW 的实时控制模块 RT

应运而生<sup>[6]</sup>。它从基于文本的工具向图形化工具的转移来直观地表达系统,解决嵌入式系统的挑战。LabVIEW 通过简化嵌入式编程的复杂性,降低了对软件人员在嵌入式设计流程中各个步骤的要求,同时提供了从设计到部署的一条捷径,使得工程师和科学家们可以更快速地进行重复设计。

六自由度平台软件选择 LabVIEW 作为主要的开发工具,采用上下位机的架构,把所有用户交互功能放置到上位机,把复杂的控制算法和实时控制功能下位机实时控制器,解决了友好的用户界面与实时运算之间的矛盾。

### 3.2 用户层设计

六自由度平台测控系统应用软件采用 NI 公司的 LabVIEW 软件作为开发工具。用户应用软件需要完成友好的用户操作界面、控制指令动作和采集显示六自由度的状态信息,该部分设计的 20 ms 定时中断对定时精度要求不高。用户应用软件界面设计如图 4 所示。

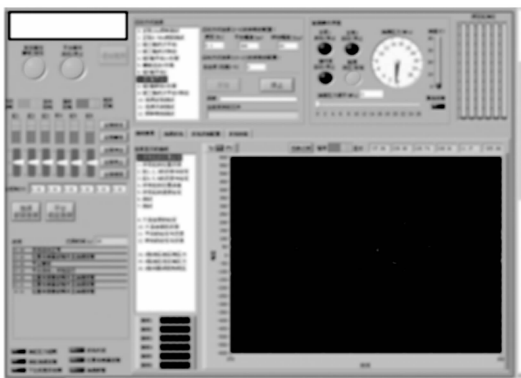


图 4 伺服控制系统主控界面

### 3.3 核心层设计

六自由度平台的闭环控制需要高实时、高可靠的实时控制软件完成,实现精确定时和高可靠性。LabVIEW 提供了在 NI 嵌入式硬件设备上运行的实时操作系统<sup>[7]</sup>(RTOS)。NI 的大多数板卡都有配备实时操作系统下的驱动,因此该设计可以调用板卡的实时 API 函数(如 DAQmx)来实现可靠的数据采集。实时控制软件的流程图如图 5 所示。

#### 3.3.1 Real-Time 模块设计

NI LabVIEW RTOS 系统是一类通过图形化编程方法来创建可靠独立的高实时嵌入式系统的完整解决方案,这些实时程序可下载至嵌入式硬件设备并在该类设备上执行,实现精确定时和高可靠性<sup>[8]</sup>。

#### 3.3.2 正解与反解模块设计

该测控系统计算正解与反解算法应用 LabVIEW 提供的 SIT 工具包与 MATLAB 进行接口,实现对编译后的算法直接调用。首先借助编译器 Visual C++ 将 Simulink 框图编译为动态链接库文件<sup>[9]</sup>,当运行 LabVIEW 用户端控制面板时直接调用动态链接库文件实现由 Simulink 实现的各种功能,同时在运行过程中可以实时的改变系统中的参数。该

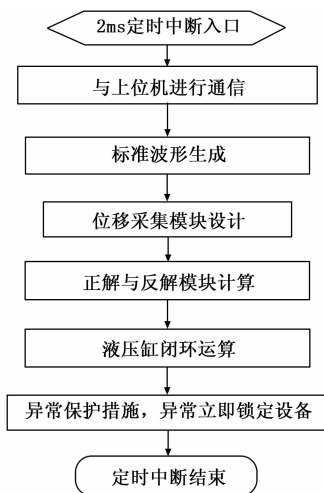


图 5 实时控制软件初始化和定时中断流程图

方法可以自动生成控制代码,是一种从仿真到实时控制快速实现方法。

该设计方法可以快速高效的实现测控系统软件的生成,同时能够实现控制参数的快速修改、代码重生以及代码下载工作,使整个系统开发时间大大缩短。

#### 3.3.3 CAN 总线位移采集模块设计

软件需要开发 CAN 总线通信功能,接收作动器的位移信号。该作动器的位移传感器采用了可靠的 CAN 总线技术,每个作动器配置一路 CAN 总线位移传感器,固定周期的发出 CAN 总线消息,来输出作动器的精确的位移测量结果。为降低总线负载率,控制器端配置了两路相互独立的双通道 CAN 模块,每个 CAN 模块采集 3 路 CAN 总线的位移数据,实现 6 路作动器位移的实时采集。

软件中可以设置 CAN 消息的 ID 过滤方式和数据转换方式,在接收到消息后可以直接将消息解析为最新的位移结果。软件直接从模块中读取位移结果即可,编程简单,可靠性高。

#### 3.3.4 闭环运算设计

实时控制软件需要开发闭环控制策略,实现对 6 路液压作动器的精确闭环,使 6 路作动器的位移按照指令给定的方式运动。LabVIEW 使用数据流的方式实现对数据的处理。而 C 语言作为最通用的计算机软件标准语言,LabVIEW 中允许用户内嵌标准的 C 语言,以实现某固定算法的调用。在软件设计上该部分内置了标准 C 代码,用来方便的实现闭环算法。另外闭环部分的 C 语言代码已经经过了试验的验证,可靠性已经得到保证。液压缸闭环控制原理图如图 6 所示。

其中,由于系统采用对称阀控单出杆非对称缸系统,系统正反向运动时,速度增益不同,为达到作动器伸、缩过程中特性的一致,采用变增益的比例控制器,从而达到正反向特性基本一致。另外,为抑止伺服零偏以及非线性引起的误差,采用带积分门限和积分饱和的积分器,一方面有效提高稳态精度,同时有效减小系统超调。

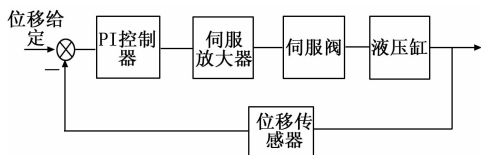


图 6 液压缸闭环控制原理图

### 3.4 共享变量应用设计

六自由度平台使用共享变量作为用户应用软件和实时控制软件之间进行各种指令和采集信号的传输<sup>[10]</sup>。

为保证传输数据的完整性和正确性,就需要使能网络型共享变量缓冲区。通过设缓冲区,可以解决对于一个变量读/写速度的不匹配问题。同时可以在共享变量属性对话框中的变量页设定缓冲区大小,这样就可以确定在旧数据被覆盖之前,应用中可以保存多少更新数据。

对于大功率液压控制系统,系统的可靠性设计是六自由度并联运动模拟平台研制过程中的一个重要问题之一,在设计过程中我们着重从液压系统及控制系统的几个方面考虑设置保护措施,确保系统工作可靠设计。

### 3.5 安全性设计

#### 3.5.1 平台执行机构安全性设计

1) 液压锁紧功能:在作动器与伺服阀之间的液压回路上设置液控单向阀,通过电磁换向阀控制液控单向阀的工作状态,可以实现液压锁紧功能。

2) 断电保护:系统出现断电故障时,作动器处于液压锁紧状态,保证平台在断电故障时,安全地停在某个空间位置。

#### 3.5.2 控制系统的保护

用户应用软件人机界面的安全性设计。

1) 对于重要的输入,应该有确认信息。确认之后,输入成为有效。

2) 对于不可操作的按钮或菜单应明确指示,如按钮颜色变灰。

3) 简化用户的输入,避免用户因为重复枯燥的输入而造成的错误。主要措施有图形化输入与显示,完整功能的信号发生器,配制成数据文件的信号输入。

在软件核心层设计了系统逻辑与程序控制的保护。系统的某些操作和系统状态是相互关联的,互为条件。控制软件能够防止用户的误操作而引起逻辑的混乱,避免造成对人员、试件和设备的损坏。主要措施:通过逻辑互锁保证控制的安全性。系统根据故障的严重程度,将故障处理分为三个级别:

1) 报警:报警并不认为是故障,只是对操作人员的一种提示,表明当前系统处于不良的运动状态,继续操作时要注意。

2) 待机:控制模拟器回到工作零位,这是较低级别的故障处理。当系统出现非致命故障时,采用此处理方式。处理的方法是:出现这种级别的故障后,监控机发出系统待机命令,运动控制计算机接到此命令后,控制作动

器以一定的速度伸出或缩回,使平台 20 秒后恢复到工作零位。

3) 急停:这是最高级别的故障处理,当系统或试件出现严重故障时,如控制系统失灵,采用此处理方式。操作人员按急停按钮,锁住作动器,关闭液压泵,同时液压源快速降压。

按以上定义系统故障分类,如表 1 所示。

表 1 故障分类汇总表

错误级别	故障模式	处理方法	动作情况
报警	油源过滤器阻塞等;油温度达到设定值。	信息窗口警告;突出显示;控制面板指示灯等	无动作;操作者手动调节。
待机	传感器插接不严,失效;伺服阀插接不严,失效;压力传感器,失效	作动器卸荷,以一定速度(可调节)回到零位(或中位)。	控制程序自动触发电磁溢流阀完成作动器自动回零位;(控制器实现)
急停	平台失控;能源压力过高;管路漏油;系统断电保护。	手动急停;锁紧作动器,同时能源快速卸荷(供,回油接通),主泵停机。	软件实现自动动作或手动拍急停按钮。通过能源压力继电器等信号触发电磁换向阀锁紧作动器及电磁溢流阀使能源卸荷

## 4 试验结果与分析

六自由度平台测控系统是针对于六自由度平台设计的测试和控制系统,经过系统的设计和调试,该系统已经成功地完成了对平台的控制,并且性能较好。该部分展示平台静态测试和暂态特性的试验结果。

### 4.1 试验方法

参照国内外多家机构的主要技术参数,对广泛用于动感娱乐领域及火控系统模拟的平台性能进行综合,课题组确定自己平台主要参数指标,主要包括:行程、速度特性等;并进行相应平台性能指标的计算。其主要技术指标如 2 所示。

表 2 技术指标汇总表

指标	要求
运动形式	正弦运动和暂态运动
工作范围	正弦运动平动大于±240m,转动大于 13°
正弦运动控制精度	平动输出精度优于 0.3mm,转动优于 0.5°
暂态运行控制精度	平动输出稳态精度优于 0.05mm,转动输出稳态优于 0.005°
暂态运行最大速度	平动最大速度 0.5m/s

针对六自由度平台的指标,设计了试验项目,分别进行了正弦运动和暂态运动,对每个运动分别测试。

1) 正弦运动—平动试验: 依次 X 轴、Y 轴、Z 轴 3 个自由度进行平动测试, 对运动的自由度给定激励为 0.02 Hz, 250 mm 的正弦信号, 其它自由度信号为 0。

2) 正弦运动—转动试验: 依次 X 轴、Y 轴、Z 轴 3 个自由度进行转动测试, 对运动的自由度给定激励为 0.02 Hz, 15°的正弦信号, 其它自由度信号为 0。

3) 暂态运动—平动试验: 依次 X 轴、Y 轴、Z 轴 3 个自由度进行平动测试, 对运动的自由度给定激励为 ±100 mm 的恒值, 其它自由度为 0。

4) 暂态运动—转动试验: 依次 X 轴、Y 轴、Z 轴 3 个自由度进行平动测试, 对运动的自由度给定激励为 °的恒值, 其它自由度为 0。

对以上 4 种试验, 在实验过程中记录测试过程中的作动器位移、平台位姿, 最后通过数据处理软件处理实验数据, 得出试验结果。

### 4.2 试验结果

#### 4.2.1 正弦运动试验结果

为考核系统稳态误差及速度特性, 分别进行了各自由度方向的正弦运动测试。该论文选择 Z 向平动和 Y 向转动为例进行分析, 试验数据如图 7、图 8 所示。

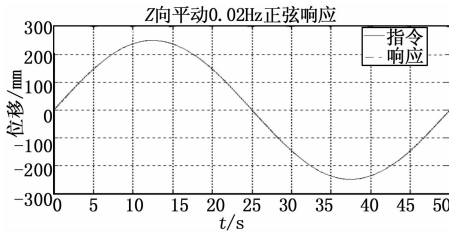


图 7 Z 向平动正弦运动

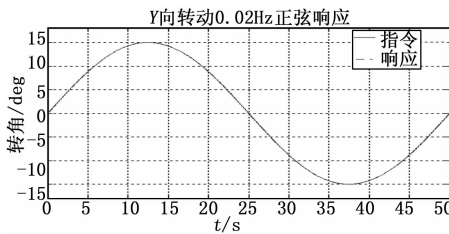


图 8 Y 向转动正弦运动

进一步分析数据得到各自由度跟踪特性如表 2 所示。

表 2 技术指标汇总表

自由度	幅度	平动误差	转角误差
Z 向平动	250mm	0.23mm	0.025°
Y 向转动	15°	0.25mm	0.027°

#### 4.2.2 暂态运动试验结果

通过暂态特性分析系统的最大速度和稳态误差。本次试验对 6 个自由度均进行了试验, 本论文选取 Z 向平动和 Y 向转动两项实验数据, 试验结果如图 9、图 10 所示。

各自由度最大运动速度如表 3 所示。

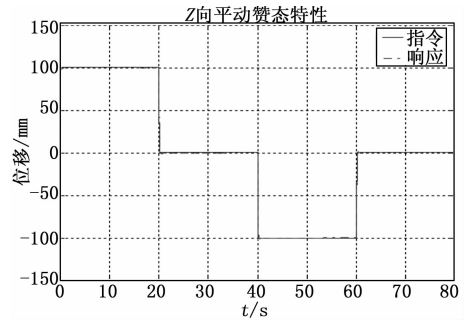


图 9 Z 向平动暂态特性

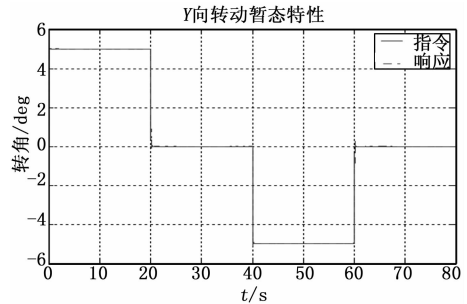


图 10 Y 向转动暂态特性

表 2 技术指标汇总表

自由度	幅度	平动误差	转角误差
Z 向平动	250mm	0.23mm	0.025°
Y 向转动	15°	0.25mm	0.027°

表 3 暂态运动各自由度稳态误差

自由度	幅度	最大速度	平动稳态误差	转角稳态误差
Z 向平动	100mm	0.7m/s	0.04mm	0.004°
Y 向转动	5°	50°/s	0.025mm	0.004°

### 4.3 结果分析

通过时域曲线和数据处理结果, 可以看出六自由度平台各个自由度的工作范围、平动输出精度、转动输出精度、最大速度等各项指标均能满足指标。测控系统工作稳定, 能够满足六自由度的控制精度和可靠性要求。

## 5 结论

本设计硬件上选择 NI 实时控制器作为整个控制系统的核心, 同时搭建一些硬件接口电路, 完成对六自由度平台的实时控制。选择的控制核心 NI 实时控制器具有硬件外设多, 接口方便灵活, 硬件驱动简单, 系统运行可靠, 软件开发周期短等诸多优点, 是一款高端的数字控制器。软件上采用 LabView 作为开发环境, 结合 NI 的 RT 模块和 SIT 模块对系统的软件进行了快速开发<sup>[1]</sup>。RT 模块实时性高, 满足了系统对液压缸实时控制的要求; SIT 模块结合 Simulink 模块实现了控制软件对复杂算法的直接调用, 缩短了软件开发周期。