

多功能调试台控制系统设计与实现

刘姗姗, 高晶, 文帅, 杨薇, 张伟

(首都航天机械有限公司, 北京 100076)

摘要: 多功能调试台为被试系统的试验提供稳定支撑平台, 能够实现升降和两维旋转功能, 可用于大型无人作战机器人的各种组装和调试; 针对大型无人作战机器人装配、调试和性能测试需求, 设计了一套基于 PLC、触摸屏和伺服电机的控制系统, 完成了控制系统的总体方案设计、硬件设计和软件设计, 能够实现手动操控以及自动控制的要求; 在驱动方案上采用基于交流伺服电机的全电动方案, 设计了一种新的框架式大负载旋转机构的驱动装置, 相比传统轴驱动系统来说, 大大减小了对电机驱动力矩的要求, 减小了电机体积和重量, 增加了设备运行的安全性与可靠性; 完成了 PLC 控制程序和触摸屏控制程序的编写和改进, 经系统整体性能调试与试验, 验证了控制系统的可靠性和可行性。

关键词: 多功能调试台; 控制系统; PLC; 交流伺服电机; 驱动装置

Control System Design and Implementation for Multifunctional Testing Platform

Liu Shanshan, Gao Jing, Wen Shuai, Yang Wei, Zhang Wei

(Capital Aerospace Machinery Company Limited, Beijing 100076, China)

Abstract: Providing a stable support platform for test system, multifunctional testing platform can realize lifting and two-dimensional rotation function. It may be used for a variety of assembly and commissioning of large unmanned combat robots. Multifunctional testing platform control system for large unmanned combat robots is designed based on PLC, touch-screen and servo motor. The overall scheme, the hardware part and the software part of the control system are designed and implemented, which can meet the requirement of both manual control and automatic control. Driving scheme adopts the electric scheme based on AC servo motor. A new framework-style drive equipment is designed for rotating mechanism with heavy load. Compared with shaft drive, it can reduce the driving torque requirements of the motor greatly, thus reducing the motor volume and weight, which increases the safety and reliability of equipment operation. The PLC control program and touch screen control program have been written and improved. The hardware installation and system debugging experiments are implemented as well, which verifies the reliability and feasibility of the control system.

Keywords: multifunctional testing platform; control system; PLC; AC servo motor; drive equipment

0 引言

无人作战机器人是随着科学技术的进步产生的, 可以进入难以涉足的恶劣环境中执行各项军事任务, 大大降低人员伤亡, 对增强军事作战能力有着举足轻重的意义, 现各国均已投入大力研究^[1-3]。一般无人作战机器人体积大、重量大、需要进行装配和调试, 这就要求相应的调试台体积大、承载能力大、可靠性高。调试台是一种复杂的机电耦合设备, 它可以实现精确姿态定位功能, 为被试系统的试验提供稳定支撑平台^[4-5]。调试台的性能直接影响到被试系统试验的可靠性和置信度, 所以研究高精度调试台具有重大的现实意义。常见的调试台多为升降台或转台。但升降台功能单一, 仅能实现升降不能实现旋转功能; 小型转台精度高但仅适用于小型设备; 大型转台体积大、重量大,

适于大型设备但成本很高。针对大型无人作战机器人装配、调试和性能测试需求, 进行多功能调试台控制系统的设计与实现意义重大, 调试台实现升降和两维旋转功能, 可用于大型无人作战机器人的各种组装和调试, 包括机器人作战平台空载测试时的履带悬空姿态, 极限位置时机器人状态反馈等等, 有助于及时发现及解决被试系统存在的问题, 不断改进被试系统, 进而增强军事作战能力, 推动国防工业的发展。

1 多功能调试台控制系统总体方案设计

1.1 多功能调试台的功能需求分析

多功能调试台主要用于无人作战机器人的各种组装和调试, 主要由机械台体和控制系统两部分组成。其中机械台体用于承载无人作战机器人, 并使其能进行垂直升降和两维旋转。而控制系统则通过执行机构使无人作战机器人能按操作者的指令进行运动, 达到预定的高度与位置。另外控制系统还具有负责设备安全运行与故障检测与隔离的功能。具体的功能要求主要有:

1) 连续升降功能: 调试台台体采用框架式电动升降结

收稿日期: 2018-05-09; 修回日期: 2018-05-30。

作者简介: 刘姗姗(1989-), 女, 河北保定人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事自动控制技术、精密测控技术及仪器智能化方向的研究。

构实现调试台的升降进而调整调试台的高度，以便于在不同高度下进行无人作战机器人的装配与不同功能测试。

2) 两轴旋转功能：无人作战机器人安装在两轴转动框架上，并能产生俯仰、滚动方向的两自由度倾斜功能。

3) 多功能调试台位置和姿态的手动/自动混合控制与实时显示功能。

4) 内框架角度、中框架角度、高度数据的实时输出功能。

5) 系统故障检测与隔离保护功能。

1.2 多功能调试台控制系统的总体设计

控制系统的总体设计原则为模块化设计，采用成熟的控制技术，优化设计，保证系统的高可靠性、易操作性、安全性、易维护性，也使得安装拆卸方便。

在实际的工程项目中，通常采用的控制方式有：基于可编程逻辑控制器（PLC）的控制、基于单片机的控制和基于控制板卡与工业控制机的控制。综合考虑控制要求、使用环境、经济成本等，多功能调试台控制系统中确定采用基于 PLC 的控制方式。

多功能调试台控制系统主要包括控制模块、通讯模块、输出模块和检测模块。系统框图如图 1 所示。

口电路和 RS-232 实现与触摸屏、PC 之间的数据交换。

3) 输出模块：包括伺服驱动电路、伺服电机、编码器、框架系统和故障报警电路。PLC 通过输出接口向伺服驱动电路发送电机转动的脉冲控制量，控制伺服电机转动的速度和方向，伺服电机通过自身编码器向伺服驱动电路反馈信息进行闭环控制，同时带动框架系统完成相应的动作，实现框架高度和水平姿态的高精度调整。当系统出现故障时，PLC 向故障报警电路输出报警信号。

4) 检测模块：包括位移传感器、倾角传感器等。PLC 通过模拟量输入模块接口接收倾角传感器信号和位移传感器信号，作为位置闭环控制的参考量。

2 驱动方案设计与关键参数计算

为了保证旋转机构的可靠工作和防止过载，从受力方面考虑，旋转机构必须克服如下力矩：偏心力矩、惯性力矩、干扰力矩。考虑实际应用条件和工程设计的要求，需要选择直径、动负荷、静负荷、导程均满足要求得丝杠。过大的力矩直接由电机产生的话，会有电机体积、重量大、功率大的问题，为此本文在电机和丝杠之间增加适当传动比为 20 的减速器，并设计了一种新的框架式大负载旋转机构的驱动装置如图 2 所示。

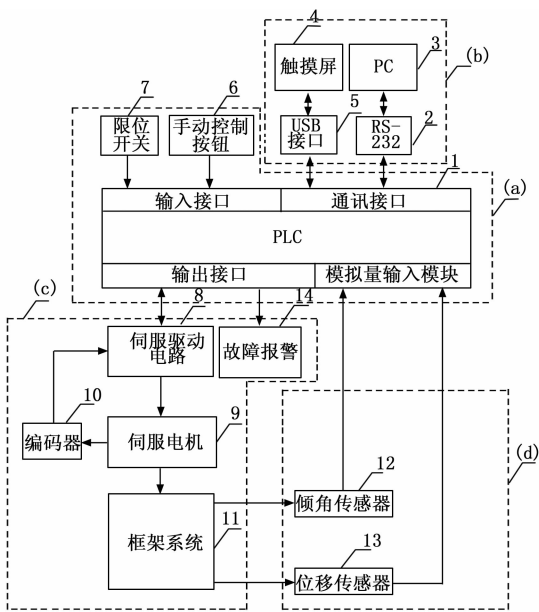


图 1 多功能调试台控制系统框图

1) 控制模块：包括限位开关、手动输入按钮、控制主机 PLC。控制主机 PLC 与触摸屏通过 USB 接口电路连接，交换控制过程中的数据参量，与 PC 通过 RS-232 通讯扩充卡连接，将控制算法程序从 PC 下载到 PLC，将输出数据串行发送到 PC 并保存。PLC 接收外部限位开关量、手动控制量并做出相应动作。PLC 接收检测模块位移传感器和框架倾角传感器的值，同时向伺服驱动器发送电机转动的脉冲控制量。

2) 通讯模块：包括 USB 接口、RS-232 通讯扩充卡、触摸屏、PC。PLC 通讯接口通过双向工作的总线、USB 接

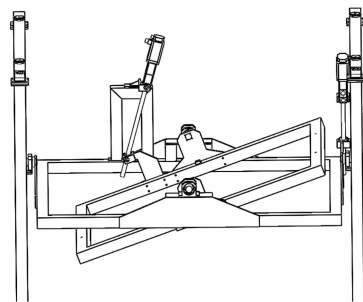


图 2 框架式大负载旋转机构的驱动装置

这种框架式大负载旋转机构的驱动装置，主要包括驱动电机、连接件、丝杠座、丝杠、高架、可回转装置组件、过渡件、旋转轴、旋转轴座支架、固定板、内框、外框。丝杠通过连接件与电机轴固连。丝杠座通过高架固定在外框上方。丝杠螺母与丝杠螺母座装配成可回转装置组件。丝杠与内框通过过渡件连接。过渡件一端固定在内框上，另一端通过可回转装置组件与丝杠连接。旋转轴承载载体、内框和相应附属结构的重量。旋转轴一端通过旋转轴座支架固定于外框上方，另一端通过固定板固连在内框上方。驱动电机带动丝杠旋转，通过可回转装置组件和过渡件带动内框连同负载绕旋转轴产生相对于外框的旋转。选择驱动电机时，进行如下量化计算。

1) 偏心力矩的计算。

如图 3 所示，根据力矩平衡，当所需提升力最大时，有：

$$F a \sin \alpha \cdot l_1 = M g \sin \beta \cdot l_2 + M g \cos \beta \cdot l_3 \quad (1)$$

经测量得 $l_1 = 634 \text{ mm}$, $l_2 = 500 \text{ mm}$, $l_3 = 500 \text{ mm}$, 表示

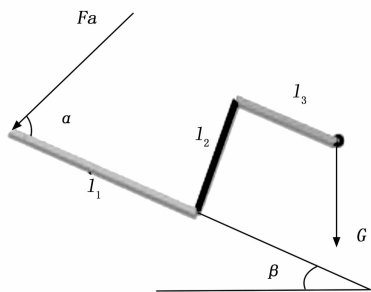


图 3 力矩计算示意图

无人作战机器人重心偏离转轴 500 mm, 取 $M=1\ 000\text{ kg}$, α 取运动中的最小值 45° , 当 β 取最大值 35° 时, 可得最大的提升力 $F_a=15\ 222.6\text{ N}$ 。

可知选择动负荷大于 15 300 N 的丝杠即满足要求, 考虑实际应用条件和工程设计要求, 选择直径为 40 mm, 动载荷为 21 100 N, 静负荷为 77 700 N 的丝杠, 此丝杠导程为 5 mm。

由丝杠力矩与力的转换公式为:

$$T_a = (F_a * I) / (2 * \pi * n_1) \quad (2)$$

式中, T_a 为驱动扭矩; F_a 为轴向负载; I 为丝杠导程; n_1 为进给丝杠的正效率。

此时电机的输出力矩将大大减小:

$$T_1 = T_{a1} / n \quad (3)$$

丝杠导程为 5 mm, 取 $n_1=0.94$, $F_a I=15\ 222.6\text{ N}$, 由公式 (2) 得出力矩大于 $T_{a1}=12.9\text{ Nm}$ 即可产生最大力。如此大的力矩直接由电机产生的话会有电机体积大、重量大和功率很大的问题, 为此在电机与丝杠间增加了传动比 $n=20$ 的减速器, 这样电机输出力矩大于 $T_1=12.9/20=0.645\text{ Nm}$ 。

2) 惯性力矩的计算。

设电机的最大转速 r , 减速器的减速比为 n , 丝杠导程为 I (单位: mm) 则电机最大转速时, 电机转动使丝杠产生的提升速度为:

$$V = \frac{rI}{n} \quad (4)$$

设电机最大转速为 3 000 r/min, 则电机最大转速时, 电机转动使丝杠产生的提升速度为:

$$V = \frac{rI}{n} = \frac{3000}{20 \times 60} \times 5 \times 10^{-3} = 1.25 \times 10^{-2} \text{ m/s}$$

当电机从启动开始加速到最大转速时, 假定加速时间为 $t=0.5\text{ s}$, 且为均加速, 则由 $V=at$, 知丝杠螺母的线加速度为 $a=v/t=2.5 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$ 。

丝杠螺母带动内框架产生旋转运动, 即在丝杠线加速度牵引下, 内框架会产生角加速度。丝杠线加速度和内框架角加速度的关系:

$$\bar{\omega} = \frac{a}{R} \quad (5)$$

式中, R 为可旋转装置到旋转轴之间的距离, 当 $R=500\text{ mm}$ 时, 则有:

$$\bar{\omega} = \frac{a}{R} = \frac{2.5 \times 10^{-2}}{0.5} = 5 \times 10^{-2} \text{ rad/s}^2$$

载荷内框架转轴转动的转动惯量为 J , 则惯性力矩:

$$M = J\bar{\omega} \quad (6)$$

载荷绕框架转轴转动的转动惯量 $J=250\ 6\text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 则惯性力矩 $M=J\bar{\omega}=250 \times 5 \times 10^{-2}=12.5\text{ Nm}$ 。

由内框架、载荷的惯性力矩对丝杠产生的拉力为:

$$F_1 = M/R \quad (7)$$

由公式 (7) 得出 $F_1=12.5/0.5=25\text{ N}$ 。

由公式 (2) 计算得 $T_{a2}=(25 \times 0.005)/(2 \times 3.14 \times 0.94)=0.02\text{ Nm}$, 丝杠上惯性力矩附加力矩转换到电机的损耗力矩为:

$$T_2 = T_{a2}/n \quad (8)$$

减速比 $n=20$, 则转换到电机的损耗力矩为 $T_2=0.02/20=0.001\text{ Nm}$ 。

3) 干扰力矩的计算。

考虑到运行过程中, 框架可能受到的外界力、力矩的干扰, 分析计算外界干扰产生地附加力矩。计算中假设内框架边缘受到 $G=100\text{ kg}$ 的外界力干扰, 干扰力到旋转轴的距离为 $l=1\text{ m}$, 则此干扰引起丝杠附加拉力为:

$$F_2 = \frac{Gl}{R} \quad (9)$$

由公式 (9) 得 $F_2 = \frac{Gl}{R} = \frac{100 \times 1 \times 9.8}{0.5} = 1\ 960\text{ N}$ 。

由公式 (2) 计算的 $T_{a3}=(1\ 960 \times 0.005)/(2 \times 3.14 \times 0.94)=1.66\text{ Nm}$, 丝杠转矩转换到电机上得力矩为:

$$T_3 = T_{a3}/n \quad (10)$$

减速比 $n=20$, 则转换到电机的干扰力矩为 $T_3=1.66/20=0.083\text{ Nm}$ 。

综上所述, 考虑到偏心力、惯性力、和外界干扰, 电机需克服的力矩综合为:

$$T = T_1 + T_2 + T_3 = \frac{T_{a1} + T_{a2} + T_{a3}}{n} \quad (11)$$

由 (11) 式可见, $T=0.645\text{ Nm}+0.001\text{ Nm}+0.083\text{ Nm}=0.729\text{ Nm}$ 。这种驱动方式比直驱方式对电机的驱动力矩要求大大减小。

从工程应用角度综合考虑, 本控制系统选择额定输出扭矩为 4.782 Nm 的交流伺服电机 TSB13102B, 额定转速为 2 000 r/min, 额定输出为 1 000 W, 并选择与电机配套使用的 TSTE30 伺服驱动器。电机通过减速器传到丝杠的力矩可达到 $20 \times 4.782=95.64\text{ Nm}$, 能够保证驱动系统有较高的冗余度。

3 控制系统软件设计与实现

多功能调试台控制系统的软件设计主要包括基于 PLC 的手动/自动控制调试台升降或旋转程序的设计编写、触摸屏人机交互界面的设计开发和上位机角度数据实时监控软件的设计开发等。总体控制流程图如图 4 所示。

3.1 PLC 控制程序的设计编写

根据调试台的主要功能要求对 PLC 输入输出地址进行分

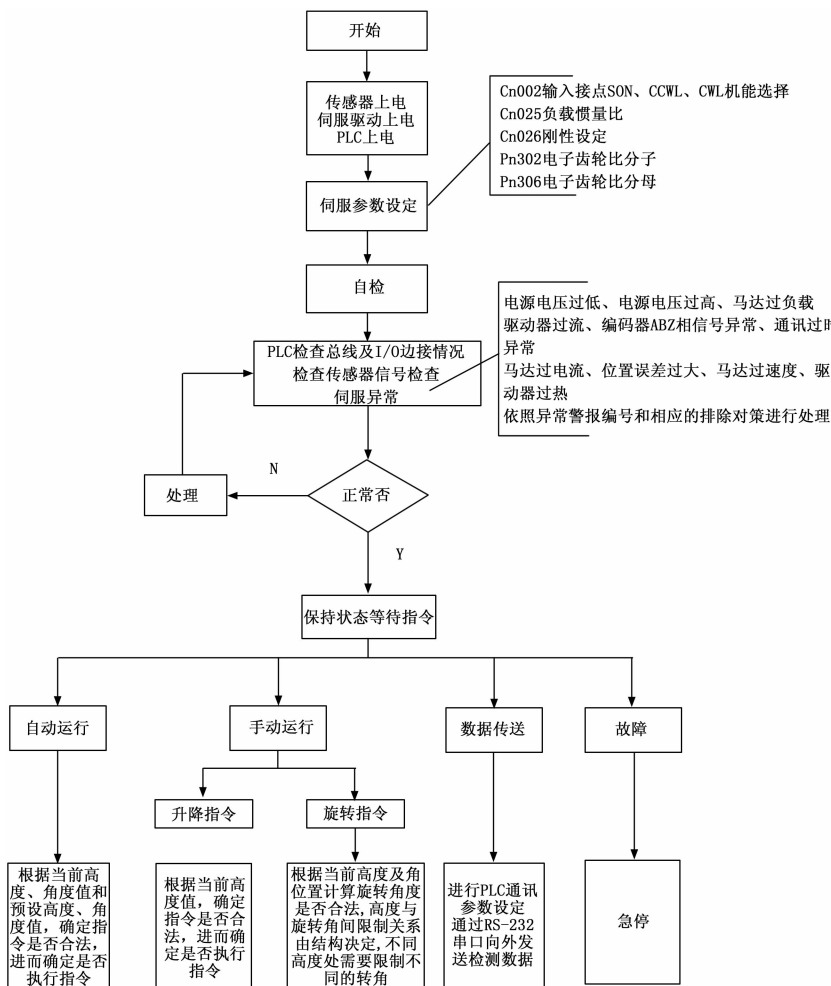


图 4 总体控制流程图

配, 详见表 1。同时, 根据多功能调试台的功能需求, 分析确定 PLC 要实现的控制功能。

表 1 PLC 的 I/O 地址分配表

输入地址	实现功能	输出地址	驱动功能
X0	外框上限位	Y0	中框脉冲方向
X1	外框下限位	Y1	内框脉冲方向
X2	中框上限位	Y2	中伺服脉冲
X3	中框下限位	Y3	内伺服脉冲
X4	内框上限位	Y4	外框上升
X5	内框下限位	Y5	外框下降
X6	中框伺服报警	Y6	中框刹车
X7	内框伺服报警	Y7	内框刹车
X10	中框正转	Y10	内框正转灯
X11	中框反转	Y11	内框反转灯
X12	内框正转	Y12	中框正转灯
X13	内框反转	Y13	中框反转灯
X14	PLC 急停	Y14	复位到位灯
X15	手动/自动切换	Y15	/
X16	一键复位	Y16	/

具体而言, PLC 要实现的控制功能主要有:

1) 实现与高度、倾角传感器之间的数据通讯, 高度尺、倾角传感器用于检测多功能调试台的位置和姿态, 并将检测到的信息反馈给 PLC 控制器参与闭环控制。

2) 实现手动调整多功能调试台的高度和两轴角度。利用控制柜前面的操作面板上的功能按钮实现对调试台的升降和旋转控制。

3) 实现多功能调试台自动定位功能。通过对高度和角度当前值和预设值之差的大小和符号进行判断, PLC 程序自动调节对相应伺服电机发出的脉冲信号以控制电机的转向和转速, 从而实现升降或旋转。

4) 实现多功能调试台高度对角度的限制功能。为了保证设备安全可靠的运行, 在人为设定的低位和高位时禁止调试台进行大角度旋转, 避免调试台内框架触地或者负载触碰外框架。

5) 实现一键复位功能。为了对多功能调试台的常用位置和姿态进行方便、快捷定位, 设置一键复位功能, 可减少操作时间提高工作效率。

6) 实现急停、报警等功能。当伺服电机出现故障时, 控制面板和触摸屏上的报警灯亮起以提醒操作人员; 出现紧急情况时, 能够通过急停按钮瞬间停止调试台的运转。

自动运行程序是整个多功能调试台控制系统的关键。在进行以上整体功能分析之后, 设计自动运行的控制流程 (如图 5 所示), 并利用 PLC 编程软件 Ladder Master 编写自动控制程序和其他不同功能模块的控制程序。

3.2 触摸屏显示监控软件设计

触摸屏作为多功能调试台控制系统的人机交互界面, 相对于传统控制面板, 可节省 PLC 的 I/O 模组、按钮开关、数字设定、指示灯等, 且能随时显示重要信息, 以利于操作人员正确掌握机器状况和避免错误, 利于维修。

结合多功能调试台控制系统的功能需求, 设计触摸屏要实现的功能如下:

1) 预设值的输入。要求能在触摸屏上输入预设的调试台高度值、两轴角度值以及预设的运转速度值。

2) 实时显示位移传感器的读数, 即调试台的高度值。

3) 实时显示多功能调试台内框架和中框架的两轴角度值。

4) 报警功能。当伺服系统出现故障时或者电机旋转到极限位置时, 触摸屏应该能给出报警信号以提醒工作人员。

5) 复位设置。要求通过触摸屏能对复位位置值进行相关的设定从而实现一键复位功能。

6) 运行到位指示功能。要求多功能调试台自动运行到位后, 相应到位指示灯亮。

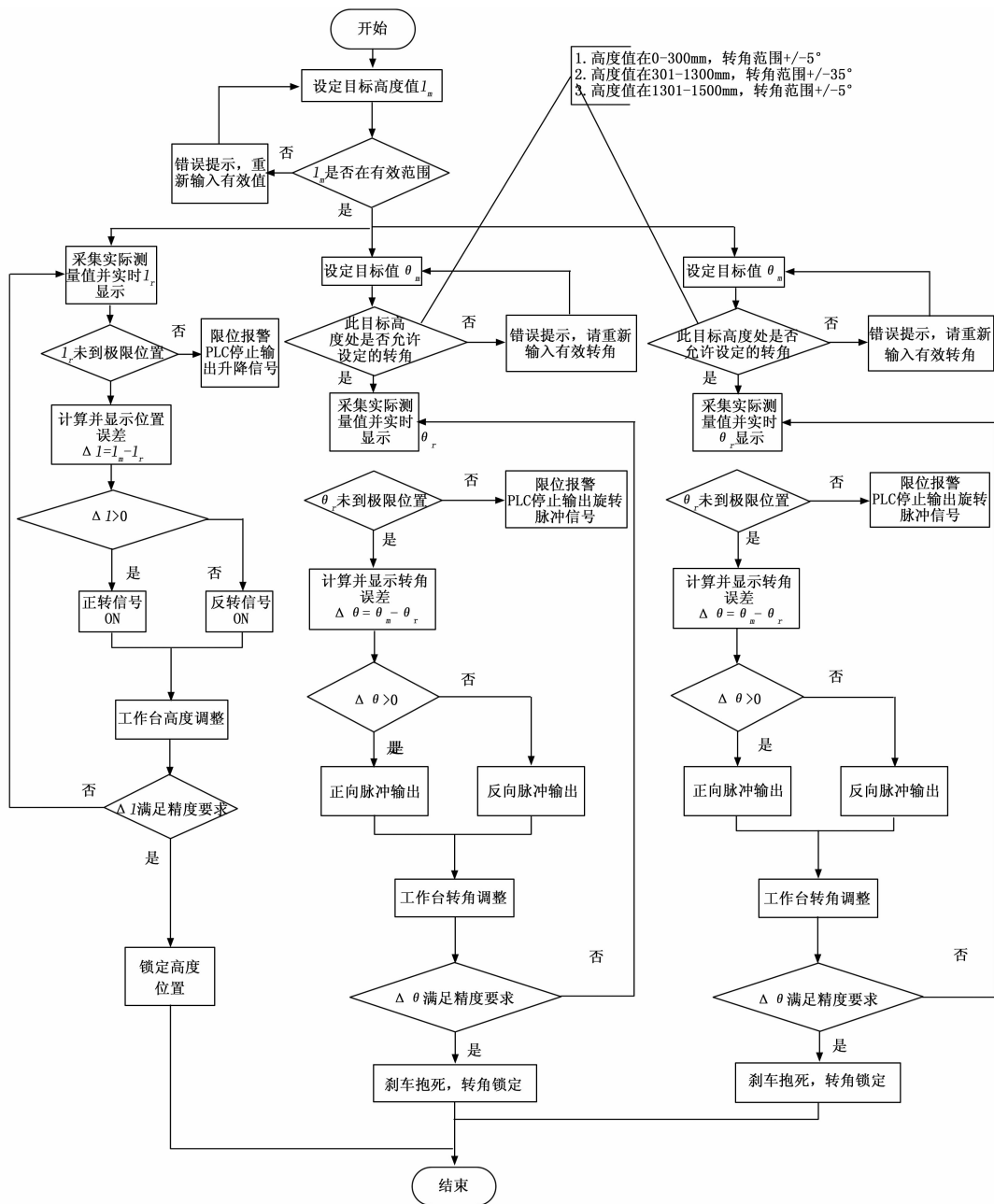


图 5 PLC 自动运行程序流程图

综合以上功能, 利用软件 ix Developer 2.0 设计可视化
的界面, 触摸屏显示界面设计如图 6 所示。



图 6 触摸屏主菜单界面

4 系统调试与试验

为了验证多功能调试台控制系统的可行性、可靠性和稳定性, 在完成以上一系列的软硬件分析和设计之后, 需要进行多功能调试台控制系统的调试和试验。多功能调试台系统主要由电控柜和机械台体两部分构成, 是一套复杂的机电耦合系统, 在进行两部分联机调试时, 很有可能会出现一些问题。为了保证整个系统能可靠地运行, 应先进行实验室室内的组装实验, 完成系统软硬件的调试和模拟试验, 然后进行多功能调试台控制系统的现场安装与调试, 并进行空载和加载性能测试。

1) PLC 控制程序的调试与试验。在进行多功能调试台

控制系统的 PLC 程序设计时, 将整个程序按照功能划分成了数据解析及通讯、手动控制、自动控制等不同的子程序模块, 因此, 在进行 PLC 控制程序的调试时, 可先对各个子模块进行调试, 然后再调试整个 PLC 程序, 具体包括 PLC 基本逻辑的调试、传感器数据解析及通讯程序的调试和电机控制的调试等。

同时, PLC 编程软件 Ladder Master 提供联机监看和强制功能, 所以进行联机之后就可以对整个程序进行监看, PLC 在线监看界面如图 7 所示。通过强制功能, 可以改变 PLC 输入接点、辅助继电器的状态或者内部寄存器中的数值, 为 PLC 程序的调试提供了很多便利。



图 7 PLC 联机监看

2) 触摸屏的调试与试验。将触摸屏与 PLC 控制器联接, 结合多功能调试台控制系统的真实运行情况, 对已编写的触摸屏程序进行在线修改和调试。在线调试之前, 首先利用网线连接计算机与触摸屏, 将已编写的触摸屏项目从计算机下载到触摸屏中, 通过编辑、连接、确认目标, 下载触摸屏项目数据; 数据下载成功之后, 再利用通讯电缆联接触摸屏与 PLC 控制器, 触摸屏自动重启, 启动之后, 通过触摸屏界面上的各个功能按钮控制 PLC 程序的运行。

3) 电机控制调试与试验。对电机进行基本的控制调试, 主要包括启动和停止、正转和反转、旋转速度的设定、互锁功能等。通过控制柜前面板的手动/自动切换按钮选择手动模式, 测试电机的启停和正反转逻辑; 然后更改为自动运行模式, 通过在线监看程序控制电机的运转; 接下来通过触摸屏的操作界面设置脉冲频率, 观察电机的运转速率

是否与设定的速度变化一致; 最后进行互锁功能验证, 手动模式下同时按下正转和反转按钮, 观察电机是否停止运转。

4) 整体控制调试。结合多功能调试台控制系统的具体功能, 对手/自动调整多功能调试台位置和姿态的控制调试, 观察调试台是否能够按照手动程序、自动程序执行动作, 实现升降和两维旋转。

5) 空载调试与加载调试。在承载大型无人作战机器人进行装配、调试试验之前, 先在使用现场进行多功能调试台控制系统的空载调试。主要包括检查硬件连线、标定倾角传感器的信号、故障和信号响应试验等。在空载调试之后, 利用辅助安装移动平台将无人作战机器人安装到调试台内框架上并固定, 即可进行加载调试和试验。

经过以上调试、试验和试运行, 该调试台控制系统能够实现全部预定功能且运行稳定。

5 结束语

以用于大型无人作战机器人的多功能调试台为控制对象, 设计了满足调试台各项功能的一套基于 PLC、触摸屏和伺服电机的控制系统, 完成了控制系统的总体方案设计、硬件设计和软件设计, 并进行了硬件安装与系统调试, 试验结果验证了系统的可靠性和可行性。驱动方案上采用基于交流伺服电机的全电动方案, 设计了一种新的框架式大负载旋转机构的驱动装置, 相比传统轴驱动系统来说, 大大减小了对电机驱动力矩的要求, 减小了电机体积和重量, 增加了设备运行的安全性与可靠性。

参考文献:

[1] 王晓东. 地面无人作战平台指挥控制系统关键技术的研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
 [2] 仲崇慧, 贾喜花. 国外地面无人作战平台军用机器人发展概况综述 [J]. 机器人技术与应用, 2005 (4): 15-24.
 [3] 陈旭武. 国外地面军用机器人的研究现状 [J]. 黄石理工学院学报, 2006 (5): 80-82.
 [4] 王芳菲. 两自由度稳定平台的控制策略分析 [D]. 大连: 大连海事大学, 2009.
 [5] 孙 健. 高精度综合标定调试台电控系统研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2008.

(上接第 11 页)

[10] 胡正高, 赵国荣, 李 飞, 等. 基于自适应未知输入观测器的非线性动态系统故障诊断 [J]. 控制与决策, 2016, 31 (5): 901-906.
 [11] 马立玲, 杨英华, 王福利. 一类基于神经网络非线性观测器的鲁棒故障检测和诊断 [J]. 控制与决策, 2003, 18 (3): 309-316.
 [12] 姜寅令, 李艳辉, 王海星. 改进的神经网络观测器在非线性系统中的应用 [J]. 吉林大学学报 (信息科学版), 2015, 33 (4): 3471-475.
 [13] Talebi H A, Khorasani K. A neural network-based multiplicative actuator fault detection and isolation of nonlinear systems

[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21 (3): 842-851.
 [14] Shen Q K, Jiang B, Shi P. Novel neural networks-based fault tolerant control scheme with fault alarm [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2014, 44 (11): 2190-2201.
 [15] Li Q G, Feng Y Z, Tong S C, et al. Fault detection and fault tolerant control of nonlinear systems using neural networks [J]. Information and Control, 1998, 27 (6): 440-445.
 [16] Wang R X, Cheng Y, Xu M Q. Analytical redundancy based fault diagnosis scheme for satellite attitude control systems [J]. Journal of the Franklin Institute, 2015, 352 (5): 1906-1931.