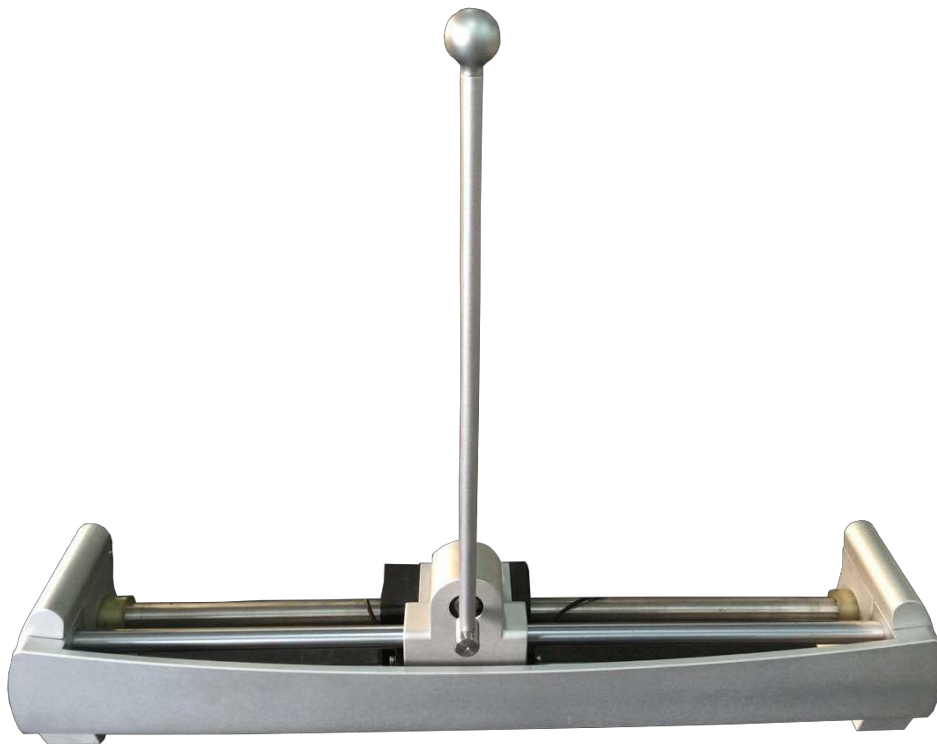


直线电机一级倒立摆 (实验教程及使用说明书)

GLIP3001-LM-01/03 型

V1.00



务必将此说明书交给客户

- 非常感谢您选购派动智能 GLIP 系列倒立摆产品。
- 在您使用之前,请仔细阅读此说明书,确保正确使用。
- 如果您在使用中遇到技术故障, 欢迎随时来电来函咨询。
- 并请将此书妥善保存, 以备随时查阅。

2016.12

© 2016Paradox Technology. All rights reserved

版权声明

东莞派动智能科技有限公司保留所有版权。派动智能科技有限公司（简称派动智能）保留所有版权以及相关的知识产权。在版权法保护下,在没有派动智能的书面许可下,任何人都不能直接的或是间接的复制、生产、加工本产品以及附属产品。

GLIP3001-LM-01/03 直线一级倒立摆系统包含《直线一级倒立摆系统 GLIP3001-LM-01/03 系列安装与使用手册》和《直线一级倒立摆系统 GLIP3001-LM-01/03 系列实验指导书》。

声明

派动智能保留在没有预先通知的情况下修改产品或其特性的权利。派动智能并不承担由于使用产品不当而产生的直接或是间接的伤害或损坏的责任。

商标

[Windows](#) 和 [Microsoft](#) 为 Microsoft 公司注册商标。

[MATLAB](#) 为 Mathworks 公司注册商标

联系我们

东莞派动智能科技有限公司

地址：广东省东莞市松山湖高新区工业东路 36 号，固高科技园内

电话：(86) 769 3880 9218

传真：(86) 769 3880 9219

Email: edusupport@googoltech.com

固高科技(香港)有限公司

地址：香港九龙观塘伟业街 108 号丝宝国际大厦产学研 10 楼 1008-09 室

电话：(852) 2358 1033, (852) 2719 8310

传真：(852) 2719 8399

网址：<http://www.googoltech.com>

固高科技(深圳)有限公司

地址：深圳市南山区高新科技园基地西二楼

电话：(86) 755 2697 0817; (86) 755 2697 0835



传真：(86) 755 2697 0846

网址：<http://www.googoltech.com.cn>



注意事项

直线一级倒立摆实验装置主要用于教学和科研。在安装，使用和维护之前，请仔细阅读本装置附带手册。请将本手册妥善保存，以备需要时随时查阅。使用（安装、运转、保养、检修）前，请务必熟悉并全部掌握本手册和其它相关资料，在熟知全部机器知识、安全知识、以及注意事项后再使用设备。

对错误使用本产品而可能带来的危害和损害的程度加以区分和说明。

	危险	指出存在一个潜在的 danger，如不可避免，可能会导致生命危险或严重伤害
	注意	指出存在一个潜在的 danger，如不可避免，可能会导致轻度或中度伤害

对应遵守的事项用以下的图形标记进行说明。

	禁止	该图形标记表示不可实施的操作
	强制	该图形标记表示必须实施的操作

另外，即使“注意”所记载的内容，也可能因为不同的情况产生严重后果， 因此任何一条注意事项都很重要，在设备使用过程中请严格遵守。

虽然不符合“危险”“注意”的内容，但是用户在使用过程中必须严格遵守的事项，在相关地方予以标识。

版本更新记录

V1.00	2016.12

目 录

版权声明	I
注意事项	III
前言	7
第 1 章 倒立摆实验装置使用前注意	8
1.1 安全事项	8
1.2 开箱检查	9
第 2 章 倒立摆系统介绍	11
2.1 实验系统的组成	11
2.1.1 系统组成	11
2.1.2 系统本体的结构组成	11
2.1.3 系统运动控制平台的组成	12
2.1.4 系统电控箱的部件	12
2.2 实验系统的安装与调试	12
2.2.1 系统硬件的安装	12
2.2.2 系统软件安装	15
3 章 维护及常见故障处理	23
3.1 直线一级倒立摆日常维护	23
3.2 直线一级倒立摆常见故障处理	23
3.3 售后服务（修理）	27
第 4 章 实验项目指导	28
4.1 实验一 倒立摆硬件测试	28

4.1.1 实验目的	28
4.1.2 实验设备	28
4.1.3 实验要求	28
4.1.4 实验原理	28
4.1.5 实验步骤	29
4.2 实验二 系统建模及稳定性分析	31
4.2.1 实验目的	31
4.2.2 实验设备	31
4.2.3 实验要求	31
4.2.4 实验原理	31
4.3 实验三 LQR 控制	36
4.3.1 实验目的	36
4.3.2 实验要求	36
4.3.3 实验设备	36
4.3.4 实验原理	36
4.3.5 实验步骤	39
4.3.6 实验记录	39
4.3.7 实验分析	40
附录	41
附录一 系统实时控制环境设置	41

前言


在实际生产生活中倒立摆系统也有广泛的应用，从机器人、杂技顶杆表演，海上钻井平台系统到空间飞行器和各种伺服云台的稳定，都和倒立摆的控制有很大的相似性，在自动化领域中具有重要的价值。同时其动态过程与人类的行走姿态类似，其平衡与火箭的发射姿态调整类似，因此倒立摆在研究双足机器人直立行走、火箭发射的姿态调整和直升飞机控制领域中也有重要的现实意义，其控制方法和思路对这类系统以及处理一般工业过程亦有广泛的用途。

GLIP 系列倒立摆系统是固高科技有限公司为全方位满足各类电机拖动和自动控制课程的教学需要而研制、开发的实验教学平台。实验项目覆盖广，适合于自动控制及相关专业本科、研究生等学习经典控制理论和现代控制理论之用。学生通过选择不同方法，确定不同参数，观察不同的实验效果，可以深入理解控制方法之间的差异以及参数对控制系统性能指标的影响。


直线一级倒立摆是单入双出系统，输入量为小车的加速度，输出量为摆杆角度和小车位移。在电机类专业中，当考虑电机的电压为输入量、转速和扭矩为输出量时，电机也是一个单入双出系统，其多环反馈的控制思想类似于直线一级倒立摆按扰动补偿的复合校正的思想。作为典型的控制理论实验平台，基于单入双出模型的复合校正实验项目，亦可以作为电机类相关专业电机控制算法的研究平台。控制理论博大精深，本实验教程仅仅使用了部分分析设计方法，难免有错误和不足之处，恳请广大师生批评指正。

第 1 章 倒立摆实验装置使用前注意

1.1 安全事项




危险

	<ul style="list-style-type: none">在操作直线一级倒立摆系列产品前，按下电源开关，并确认电源是否被切断，电源切断后，电源指示灯熄灭。
	<ul style="list-style-type: none">在倒立摆运行出现异常情况下，若不能及时关断电源，则可能造成人身伤害或设备损坏。 纽扣型电源开关：
	<ul style="list-style-type: none">在紧急停止后，请排除故障后再打开电源。
	<ul style="list-style-type: none">由于误操作可能导致倒立摆错误的运动，引发安全事故。
	<ul style="list-style-type: none">开始运行前，倒立摆必须置于初始状态。
	<ul style="list-style-type: none">非实验人员请勿操作倒立摆，否则有可能引发人身伤害或设备损坏。
	<ul style="list-style-type: none">在进行倒立摆实验时，请遵守以下事项。<ul style="list-style-type: none">保持从倒立摆年正面观看或操作。遵守操作顺序。考虑倒立摆失控等突变状况的应急方案。确保设置躲避场所，以防万一。 由于误操作可能造成倒立摆运动，引发人身伤害事故。
	<ul style="list-style-type: none">在实验过程中，遇以下的情况，请确认倒立摆危险范围内无人，并且实验人员处于安全操作位置。<ul style="list-style-type: none">电源接通时操作倒立摆时自动运行时不慎进入倒立摆运动范围内或与机器接触，都可能引发人身安全事故，当出现异常时，请立即关断电源。



注意

	<ul style="list-style-type: none">● 本手册记述了安全上一般应该注意的事项，在实际实验环境下用于实验研究人员的安全措施不可能完全记载，敬请原谅。
	<ul style="list-style-type: none">● 为了安全的使用倒立摆控制系统，用户必须按照本说明书的要求对设备操作及维护人员进行安全教育，直接操作人员必须认真阅读倒立摆系统所有说明书。
	<ul style="list-style-type: none">● 本手册中的图片及相片，为代表性实例，和实际产品可能有所不同
	<ul style="list-style-type: none">● 由于破损或丢失说明书需要定购说明书，请与我公司销售部门联系
	<ul style="list-style-type: none">● 客户自行进行产品改造产生的不良后果，不在本公司保修范围之内，本公司概不负责。
	<ul style="list-style-type: none">● 进行倒立摆控制实验前，请检查以下事项，有异常则及时修理或采取其它必要措施。<ul style="list-style-type: none">➢ 倒立摆动作有无异常。➢ 电源接线和信号线有无破损。➢ 电源接线和信号线接头是否接触良好。
	<ul style="list-style-type: none">● 实验完毕后，请将倒立摆置于初始状态。
	<ul style="list-style-type: none">● 在理解本手册“注意”的基础上，才能使用倒立摆装置进行实验。

1.2 开箱检查

- 打开包装以后，请确认产品型号是您所订购的产品
 - 检查产品在运输中是否造成损坏，如倒立摆本体上的倒立摆摆杆等
 - 请根据装箱清单检查产品的部件（包括连接电缆）是否缺少
 - 如果产品内容不符合，有短缺或损坏，请与本公司或经销处联系
- 如下所示开箱产品内容:



电控箱



电源、信号线、PC 机连接线缆



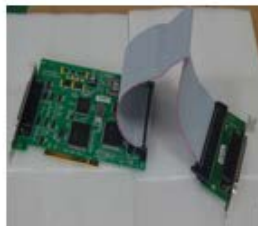
设备清单



系统光盘



拆卸工具



运动控制卡

第 2 章 倒立摆系统介绍

2.1 实验系统的组成

2.1.1 系统组成

直线一级倒立摆实验系统是研究倒立摆控制技术的平台,它主要由直线电机、角度编码器、数字控制器和控制对象小车、倒立摆等元件组成。它是一个典型的倒立摆系统。此系统可以分为直线一级倒立摆实验本体、电控箱及由运动控制卡和普通 PC 机组成的控制平台等三大部分。系统控制框图见图 2-1 所示:

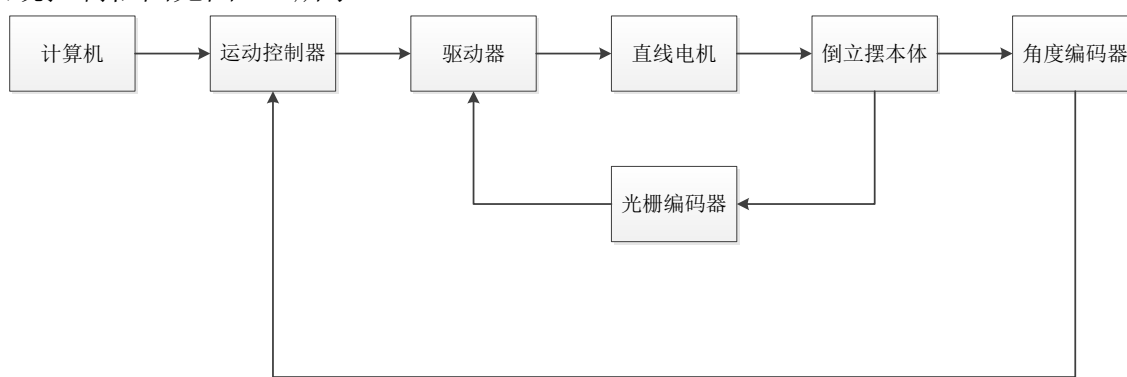


图 2.1 系统控制框图

2.1.2 系统本体的结构组成

系统本体主要有以下几个部分组成:

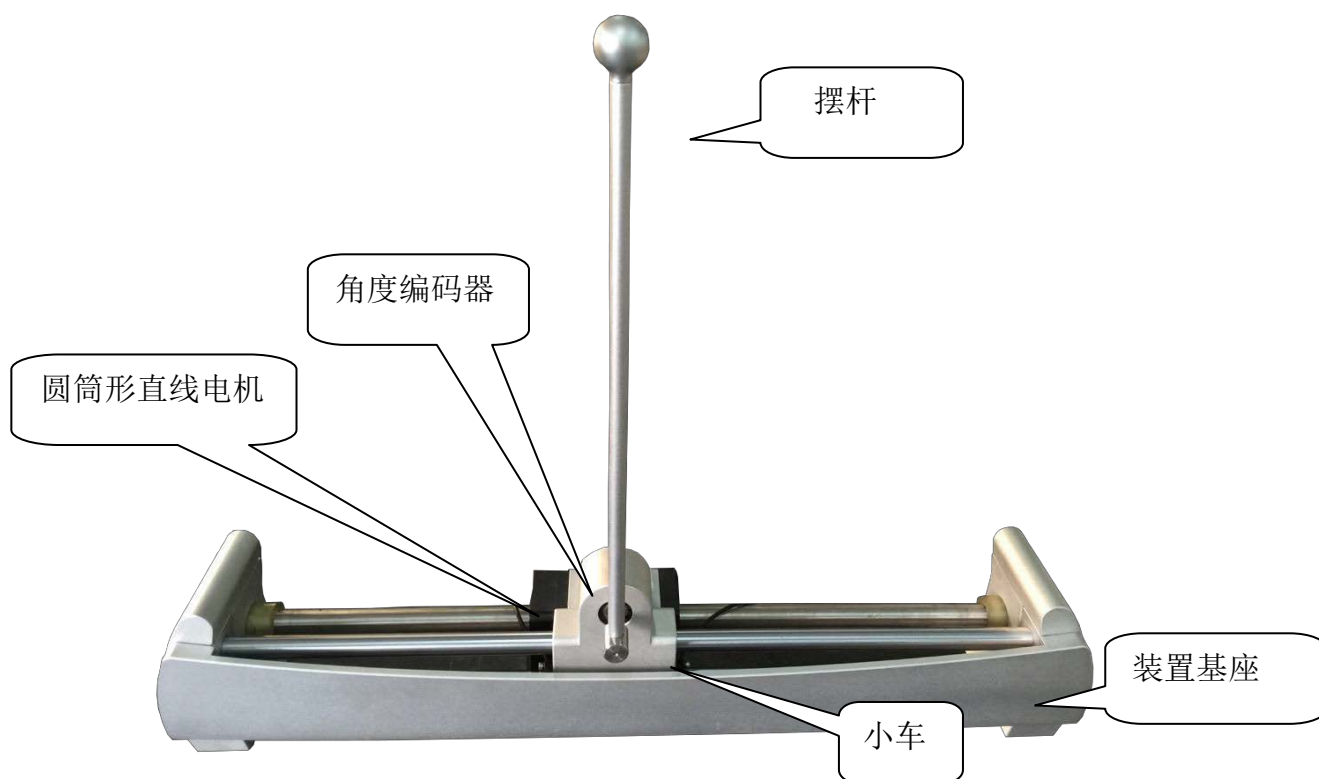


图 2.2 直线电机一级倒立摆本体

2.1.3 系统运动控制平台的组成

带 PCI 总线插槽

GT400-SV-PCI 运动控制卡

GT400-SV-PCI 运动控制卡用户接口软件

演示实验软件 MTLAB

2.1.4 系统电控箱的部件

系统电控箱内安装的主要部件如下：

I/O 接口板

交流伺服驱动器

开关电源

开关、指示灯等电气元件

2.2 实验系统的安装与调试

2.2.1 系统硬件的安装

1、运动控制卡的安装



将运动控制卡从防静电袋取出之前，请将手与有效接地的导体接触，去除静电。不要用手接触卡上的芯片，以免损坏运动控制卡

- 运动控制卡外观是否有损坏。运动控制卡出厂前均通过反复检查和测试，保证其质量可靠。但是，不排除运输等意外损坏的存在。如果运动控制卡表面有损坏，请不要使用，立即与我们联系。
- 运动控制卡在出厂时，已经按照一般的通用要求设置成缺省状态。通常用户不需要更改他们。
- 关闭计算机电源，打开机箱。
- 将运动控制卡插入主机中空闲的 **PCI** 插槽中。
- 用螺钉锁紧运动控制卡和转接头。
- 合上机箱
- 检查连线无误后开机。

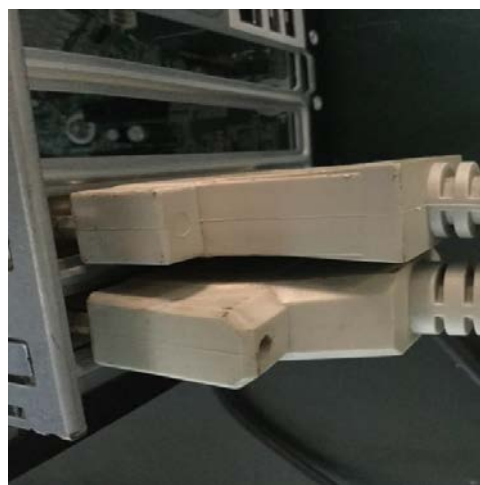


图 2.3 机箱中运动控制卡安装

2、线缆连接

图 2.3 为固高控制器(PCI 插槽), 用配有的线缆将图 2.3 的控制器接头另一端与图 2.4 的黄色圈内两接口相连。

按如下图线号标注将线缆接头与接口连接。

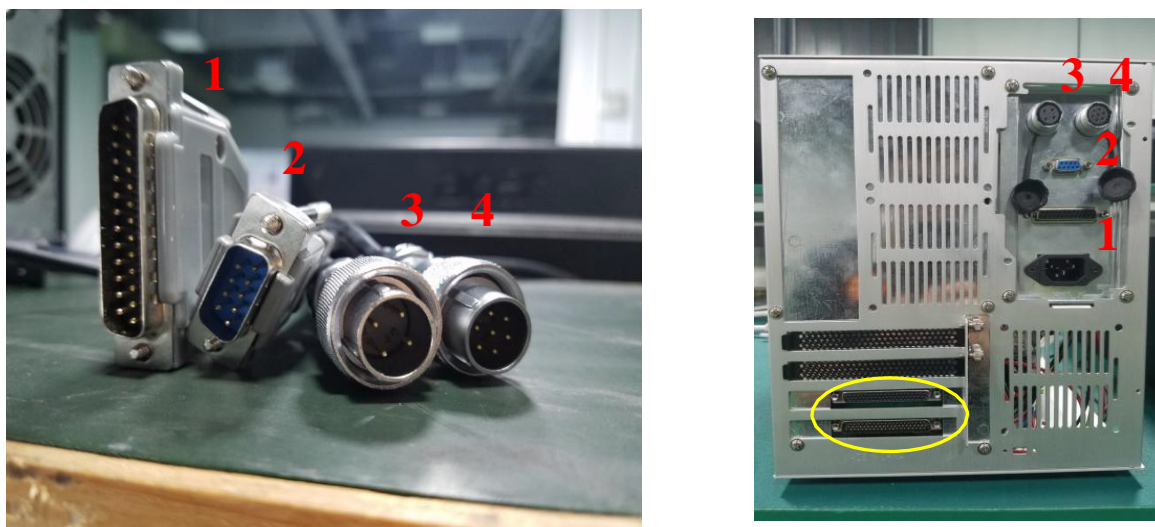
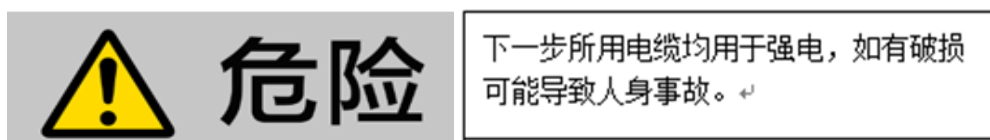


图 2.4 电控箱的连接插头与插口

将电源线一端插入电控箱插座，另一端接入 220V AC 电源。



图 2.5 电源连接线



3、倒立摆本体安装

按如下图示中，将倒立摆摆杆螺丝拧紧即可。



图 2.5 电源连接线

2.2.2 系统软件安装

系统所附带的实验软件运行于 Windows 操作系统，需要 Matlab2014b 版软件及相关工具的支持。



注意

- ◆ 本手册所有操作均基于上述平台，对于不同版本的 Matlab，具体指令或操作可能有所不同，请根据需要查阅 Matlab 帮助文档。
- ◆ 对于 Windows 7（及更高版本 Windows）系统，请以管理员身份运行 Matlab。
- ◆ 在不同的平台运行相同程序，数值结果可能会存在一些差异。

系统实验软件安装

基于 Windows7 操作系统的 Matlab/Simulink 实验、控制软件和接口软件

该实验控制软件工作 Windows7 操作系统环境下。系统运行时需要 MATLAB 2014 b 以及 SIMULINK 4.1 支持。



注意

- ◆ 在进行系统连线、拆卸与安装前，必须关闭系统所有电源。
- ◆ 使用前请仔细检查各个部分连线，是否有松动或断线处。
- ◆ 检查导轨与电机之间是否有障碍物。

为了对我司产品进行控制，需要在 Matlab 中安装工具包。步骤：

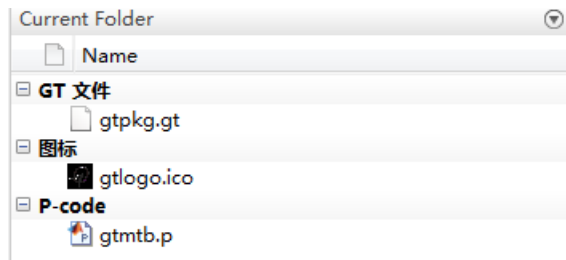
1、安装



注意

- ◆ 安装 gtmtdb 工具包前，需要确保 MATLAB 已经安装好
- ◆ 实时控制工具箱同时已经安装好相关编译器
- ◆ 安装 gtmtdb 工具包时，需要以管理员身份运行

从 MATLAB 找到安装文件路径



在命令行中输入 `gtmtdb -setup`

```
Command Window
>> gtmtdb -setup

<!>Thank you for using products from Googoltech.<!>

Googoltech matlab toolbox requires administrator-level permission for processing.
The toolbox requires the following package for executing:
1. "Real-Time Windows Target" toolbox, and
2. "mex" functionality
Please check your matlab installation for the details.

Attention: No Googoltech matlab toolbox was installed currently.
fx Still continue to install the Googoltech matlab toolbox (ver 1.32.1.20160707)? [yes] :
```

输入 `yes` 后按回车或直接按回车进行安装，并等待完成安装

```
Command Window
>> gtmtdb -setup

<!>Thank you for using products from Googoltech.<!>

Googoltech matlab toolbox requires administrator-level permission for processing.
The toolbox requires the following package for executing:
1. "Real-Time Windows Target" toolbox, and
2. "mex" functionality
Please check your matlab installation for the details.

Attention: No Googoltech matlab toolbox was installed currently.
Still continue to install the Googoltech matlab toolbox (ver 1.32.1.20160707)? [yes] :
-gt>>installing Googoltech matlab toolbox ver 1.32.1.20160707, please wait...
-gt>>installing, please wait...
-gt>>product was installed in "C:\Users\googol\Documents\MATLAB\ulm1sip"
-gt>>product was installed in "C:\Users\googol\Documents\MATLAB\ulm2ods"
-gt>>done...
fx >> |
```

仿真程序安装在用户文档文件夹中的 **MATLAB** 位置内（如上图红框所示位置）。安装完成后，**MATLAB** 当前目录将跳转到倒立摆程序文件目录。

2、编译

在命令行输入 `gtmtdb -mex`

```

Command Window

>> gtmdb -mex

Attention:
Still continue to mex the Googoltech matlab toolbox? [yes] :

```

输入 yes 后按回车或直接按回车进行文件编译，并等待完成安装

```

Command Window

>> gtmdb -mex

Attention:
Still continue to mex the Googoltech matlab toolbox? [yes] :
-gt>>mexing 1.32.1.20160707...
-gt>>mexing done...
fx >> |

```



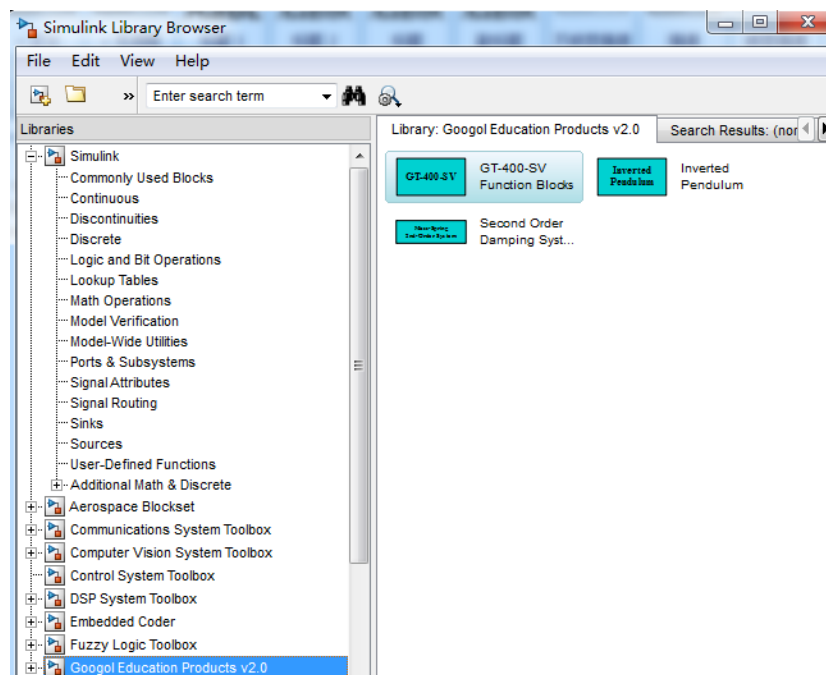
注意

◆安装、编译完成后，需要重启 MATLAB

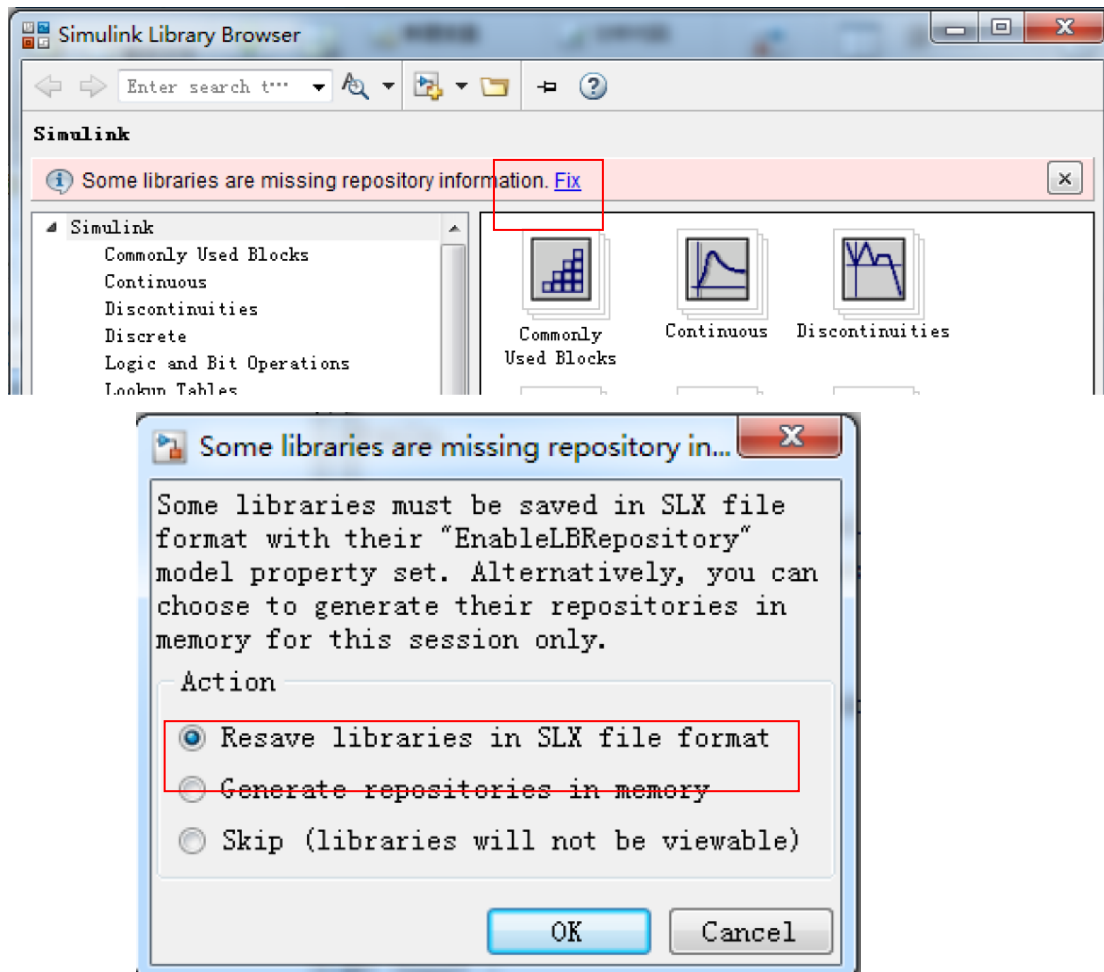
3、使用

方法一：

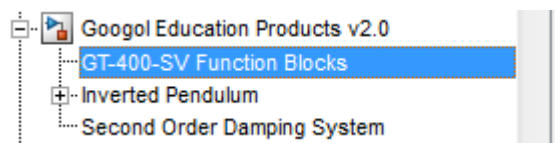
打开 simulink，展开到 Googol Education Products v2.0



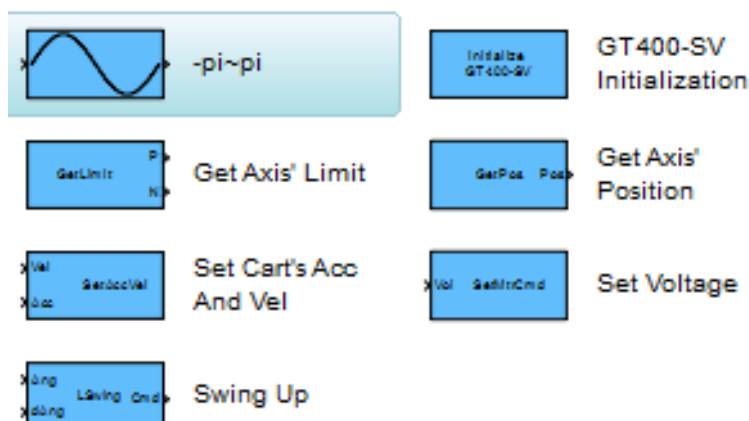
如果在此步骤中出现下图提示，则点击 Fix，然后在弹出的对话框中选取“Resave libraries in SLX file format”



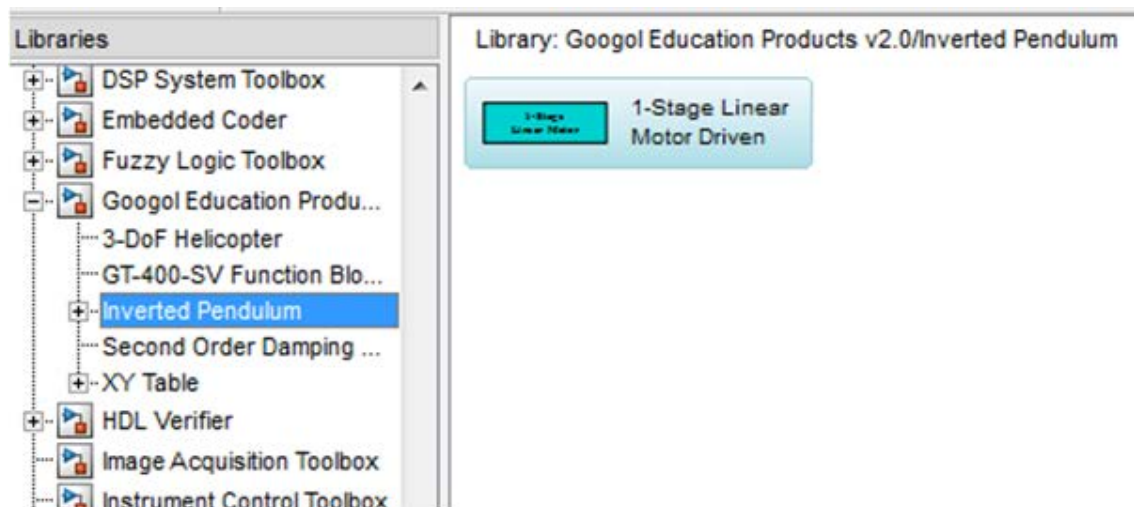
工具箱包括:



GT 卡 MATLAB 函数库



该函数库可以直接拖拽到用户新建 simulink 文件编译使用。点击倒立摆模块



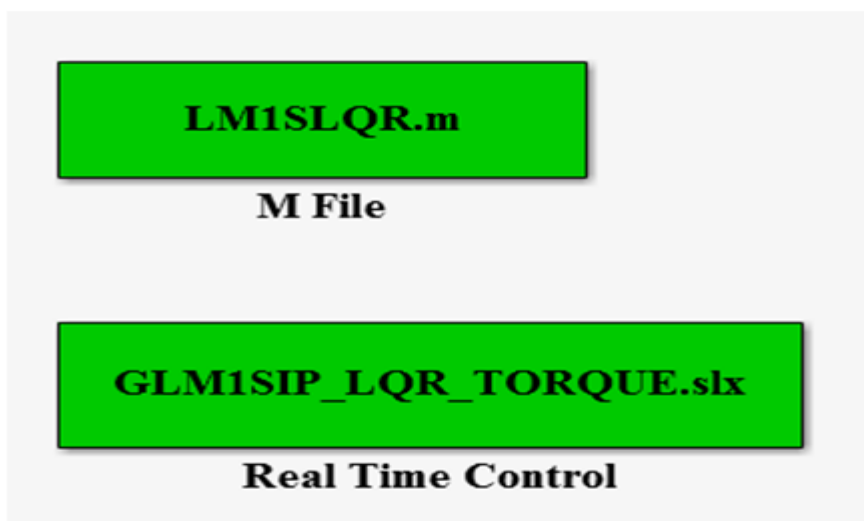
选择 C-Typed Linear Motor



双击 LQR Control

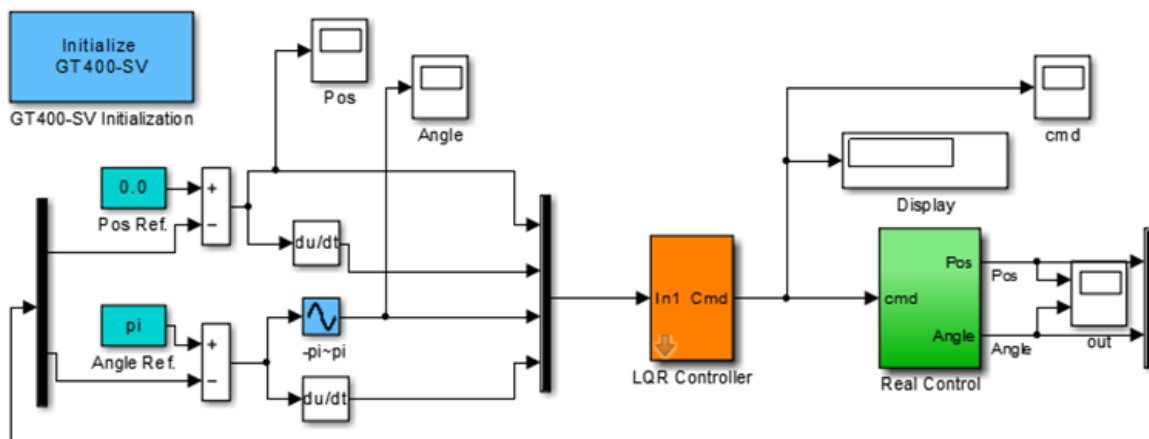


选择 Real Time Control



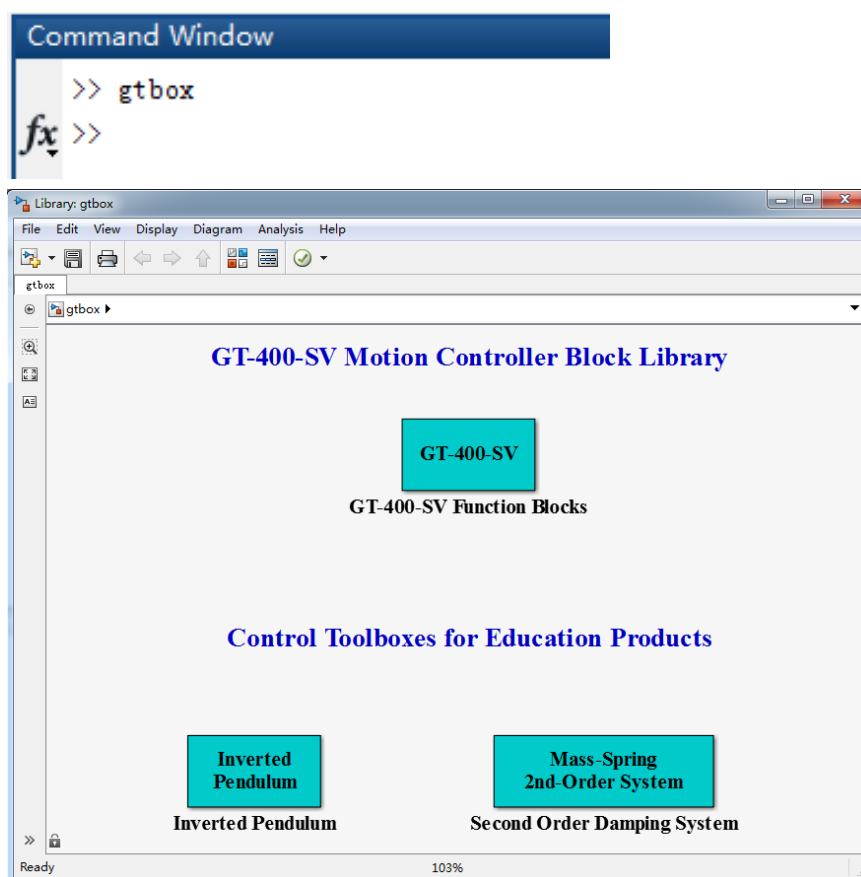
即可进入控制程序

Googol Linear Motor 1-Stage Inverted Pendulum Force Input --LQR Control



方法二：

直接在命令窗口输入 `gtbox`，可直接打开 `gtmb` 工具箱主页面：



双击模块进入即可。



注意

注意

◆用户也可以直接到安装时提示的安装位置打开实验程序

4、卸载工具箱

在命令行输入 `gtmtb -uninstall`，然后按 `yes` 并回车

```

Command Window

>> gtmtb -uninstall

<!!>Thank you for using products from Googoltech.<!!>

Attention: gtmtb (ver 1.32.1.20160707) is running
Still continue to uninstall the Googoltech matlab toolbox (ver 1.32.1.20160707)? [no] : yes
-gt>>uninstalling Googoltech matlab toolbox ver 1.32.1.20160707, please wait...
-gt>>uninstalling, please wait...
-gt>>a backup of old user data was stored in "C:\Users\googol\Documents\MATLAB\backup\10072016-020632"
-gt>>done...
fx >>

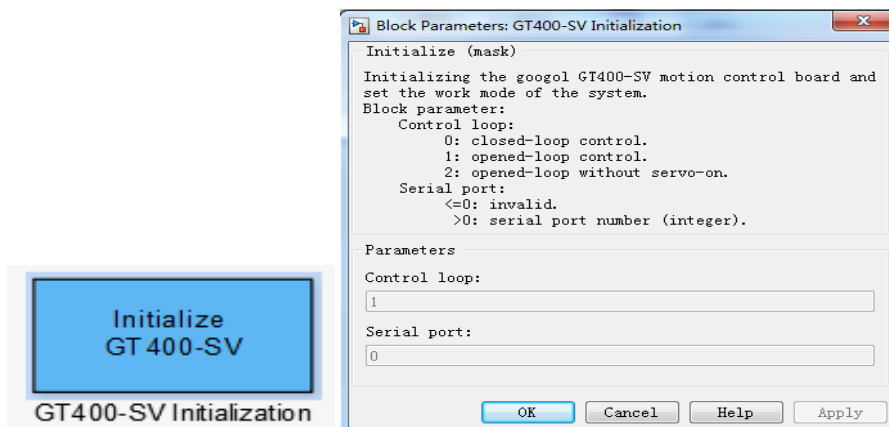
```

已安装的实验程序将备份到指定文件夹。

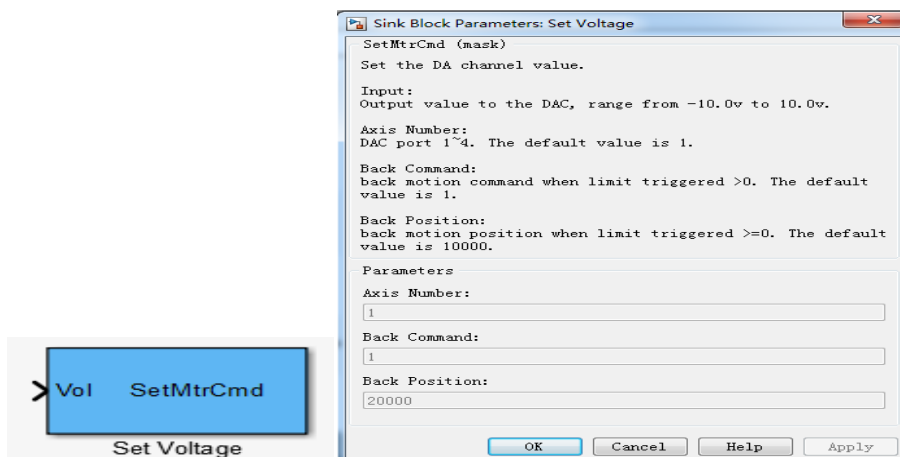
5、工具箱模块介绍

我司产品在 Matlab 中调用的实时控制模块包括：

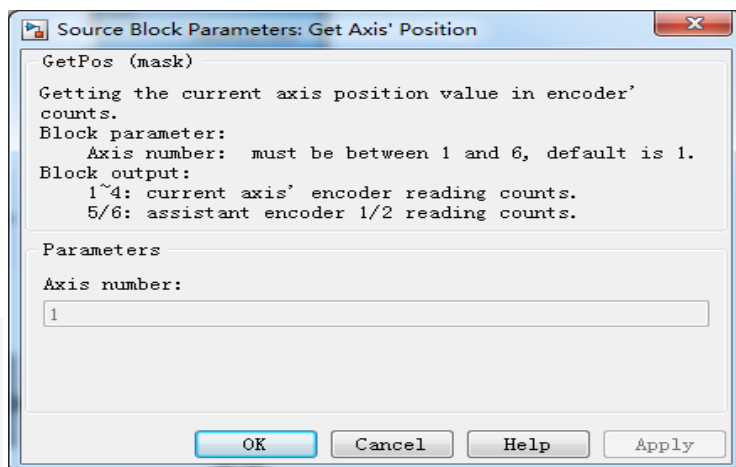
(1) 控制卡初始化模块：在该型号倒立摆中，Control loop 为 opened-loop 模式；Serial port 则为无效



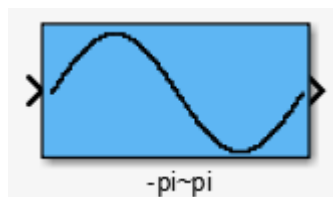
(2) 模拟量输出模块：在该型号倒立摆中，Axis Number 为 1；Back Command 为 1；Back Position 为 20000



（3）获取编码器位置模块（脉冲数）：在该型号倒立摆中，小车位置 轴 Axis Number 为 1，摆杆角度轴 Axis number 为 2



（4）角度转换模块（弧度）：用于将角度转换到 $-\pi$ 到 π 之间的数值



3 章 维护及常见故障处理

3.1 直线一级倒立摆日常维护

- 1、定期地给导轨上机油，保证导轨不会生锈和小车在导轨上运动的摩擦阻力不会太大。
- 2、在实验完成时，请务必关上电控箱的电源。
- 3、定期地对倒立摆系统硬件检查，保证其有良好的性能。
- 4、定期检查拔插线插针针脚是否变歪，否则会造成通讯不上及其他的故障。
- 5、随着时间的长久，如果同步带过松或过紧，可将定位轮的紧固螺钉拧松，将同步带松劲程度调到合适再重新固定。

3.2 直线一级倒立摆常见故障处理

表 3.1 倒立摆故障处理方法

序号	故障	原因	处理方法
1	测试运动控制器异常	运动控制卡或驱动没有正确安装或版本不对	重新安装运动控制卡
		运动控制卡损坏	更换运动控制卡
		运动控制卡和 PCI 插槽接触不好	重新插 PCI 插槽或更换计算机
2	测试限位开关异常	运动控制器异常	见故障 1 处理方法
		限位开关接线有断点	参照电气连线图，检查限位开关接线
		限位开关损坏	更换限位开关
		电控箱电源 OFF	电控箱电源 ON
		电缆接触不良	重新拔插
		电机驱动器报警	1. 重新启动电控箱 2. 检查电机编码器连接线
3	测试摆杆	角度编码器接线有断点	参照附录的电器接线图，检查编码器的接线

	编码器异常	运动控制器异常	见故障 1 处理方法
		编码器损坏	更换编码器
		电缆接触不良	重新拔插
4	测试电机编码器异常	运动控制器异常	见故障 1 处理方法
		电缆接触不良	重新拔插
		电控箱电源 OFF	电控箱电源 ON
		驱动器报警	见驱动器报警处理方法
5	测试电机异常：伺服电机上不了电	运动控制器异常	见故障 1 处理方法
		电机动力线 UVW 三相反接	参考电器接线图检查电机动力线
		电机编码器异常	见故障 4 处理方法
		驱动器报警	见驱动器报警处理方法

表 3-2 运动控制器故障分析

1	安装好控制卡后主机不能启动或主机中其他硬件设备工作不正常	运动卡没有安装好	重新安装好控制卡
		PCI 总线接口损坏	换其他 PCI 插槽重试
2	主机与运控卡通信出错	见故障 1	处理方法同上
		运动控制器芯片损坏	更换运控卡
		运动控制器软硬件不配套	更换运控卡或更换配套软件
3	SV 运控卡复位后, DAC 输出不为零	由于具体工作环境和系统造成初始输出偏差	调整驱动器漂零参数或调用 GT SetMtrBias () 命令补偿该偏差

4	不能正常读取编码器信号	编码器接线错误	检查编码器接线
		电器噪声	采用带屏蔽的编码器连线、采用差动输入方式，减小编码器连线长度
		编码器信号频率太高	运控卡编码器输入信号最高频率大于 8MHZ，选择其他编码器降低分辨率
		编码器不能工作	检查编码器信号
		控制器错误	更换运控卡
5	电机飞车（SV）	编码器 A，B 相接反	调用 GT FncSns（）命令将 A，B 反相
6	电机震动（SV）	PID 参数设置不正常	调整 PID 参数
7	电机不能控制	运动控制器读到正负限位开关触发，即限位开关有效电平设置不对	重新设定限位开关有效电平
		驱动未使能	调用 GT AxisOn（），驱动使能
		控制模式设置不匹配	检查驱动器的控制模式，确保与运动控制器设置模式匹配
		电机驱动器报警	检查电机的驱动器报警原因，复位电机驱动器。如驱动器无报警输出信号，将 CN5 的 1、2 脚短接
		运动控制器有工作异常的状态	检查状态，并加以更正
		电机连线不正确	按说明书检查接线
		接地不正确	按说明书检查接地

8	电 机 位 置 漂 移 (SV 卡)	电机力矩输出太小	检查电机驱动器
		运动控制器处于开环状态	设置闭环状态
9	电 机 驱动器（没有伺服打 开信号）带 电 的 情 况 下，给主机 上电时，电 机突然动	PID 参数设置不正 确，通常 P 参数过小	调整 PID 参数，尤其加 大 P 参数
10	运 控 器 输 入 / 输 出 信 号 不 正 常	在运动控制器上电 和断电时刻处于不定状 态，而电机处于工作状 态	再给主机上电之前，确 保电机驱动器已经断电（即 先上弱电，再上强电）
		接线错误	检查接线
		没有提供外部接口 电源	检查外部电源供电
		接地错误	重新连接地线
		运控卡输入/输出 接口损坏	更换运控卡
		5V 或 24 V 保险电 阻烧坏	更换保险电阻

表 3.3 驱动器报警故障处理

1	主电源线电压太低，发生 瞬间停电，电源容量太小，主 电源切断或者主电源没有接入	纠正主电源的相（L1、L2、 L3）连接。如果主电源单相 100V，用 L1 和 L3
2	电机接线 U.V.W 短路	检查 U、V、W 接线是否在 连接处短路，必要时把他们重新 接一次

	电机接线 U.V.W 与地短接	测量 U、V、W 与地线之间的绝缘电阻，如阻值不正确，换新的电机
--	-----------------	----------------------------------

3.3 售后服务（修理）

修理

关于产品修理等方面的问题请向销售商提出，若为机械方面损坏更换等问题请先向生产商提出。

闻讯处

PARADOX 派动智能科技有限公司
地址:广东省东莞市松山湖高新区工业东路 36 号，固高科技园内。
邮编：523808
电话: (86) 769 3880 9218
传真: (86) 769 3880 9219

售后服务登记卡(为了今后咨询、修理时的需要,请填写登记卡)于包装箱内,请勿丢失,以便后期售后处理使用。

第 4 章 实验项目指导

4.1 实验一 倒立摆硬件测试

4.1.1 实验目的

- 1、了解一级倒立摆软硬件安装。
- 2、会用示波器图形来判断硬件是否正常运行。

4.1.2 实验设备

- 1、直线倒立摆一台；
- 2、计算机 MATLAB 平台。

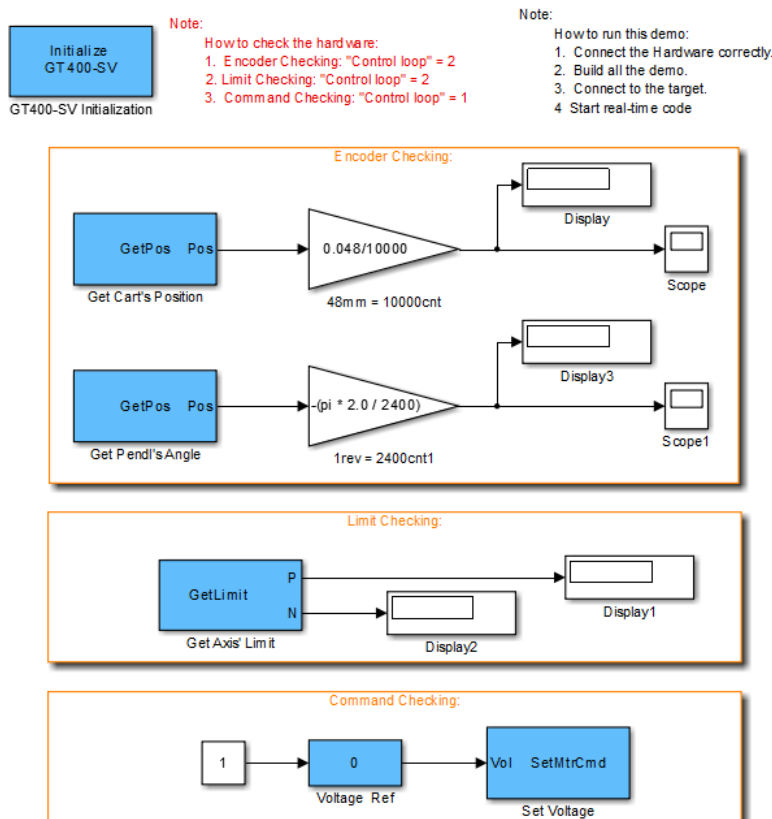
4.1.3 实验要求

通过查看示波器图形来判断硬件是否正常运行；

4.1.4 实验原理

在按上述前言完成软硬件及软件安装后，对硬件进行测试，如图打 开“Hardware Testing”。


Googol Linear Motor 1-Stage Inverted Pendulum Hardware Test Control Demo





在□型号倒立□中，直□□机的位移当量□ 48 毫米/10000 脉冲，角 度□□器的当量□ 2400 脉冲/圈。

4.1.5 实验步骤

1、编码器检查：

(1) 将初始化模块中Control loop设为 2，Serial port设为 0 2. 点击  编译模型

(2) 点击  连接物理本体，此时直线电机可能会有轻微移动以寻找相位


(3) 点击  运行实时控制

(4) 手动推动小车，观察 Display 数值，面向倒立摆时，右边为负， 左边为正；当推至尽头限位时，Display1或Display2会有相应 的0、1跳变

(5) 手动旋转摆杆，观察Display3数值，面向倒立摆时，顺时针为 正，逆时针为负

(6) 点击  停止实时控制

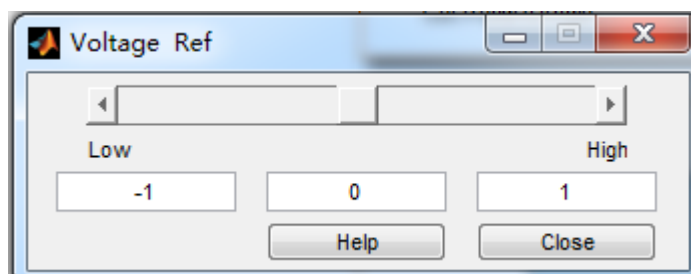
2、参考指令检查：

(1) 将初始化模块中Control loop设为 1，Serial port设为 0 2. 点击  编译模型

(2) 点击  连接物理本体,此时直线电机可能会有轻微移动以寻找相 位

(3) 点击  运行实时控制

(4) 拉动VoltageRef，面向倒立摆时，若为正值，电机往左运动，若 为负值，电机往右运动（若碰至限位，则电机往相反方向移动后下使能）



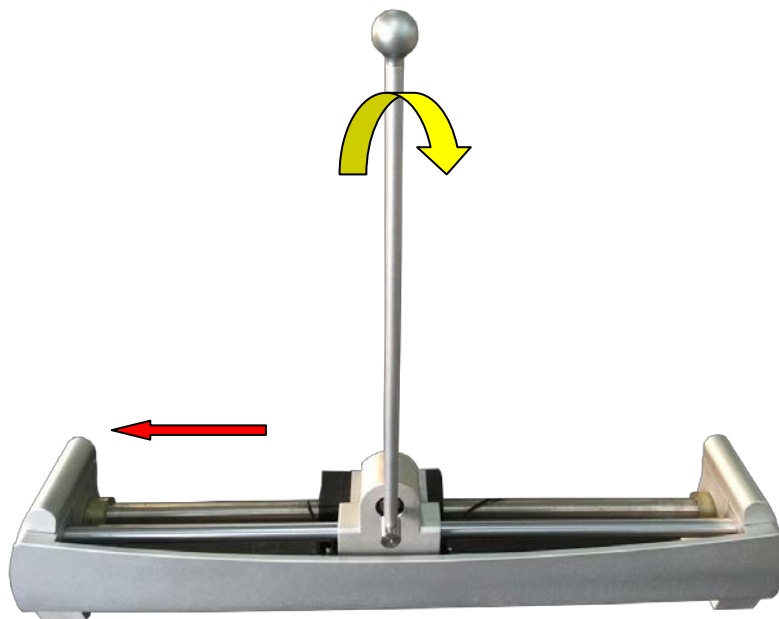


图 4.1.1 系统本体硬件测试正方向图示

(5) 点击  停止实时控制

4.2 实验二 系统建模及稳定性分析

4.2.1 实验目的

- 1、了解机理法建模的基本步骤；
- 2、会用机理法建立直线一级倒立摆的数学模型；
- 3、掌握控制系统稳定性分析的基本方法；

4.2.2 实验设备

- 1、直线一级倒立摆；
- 2、计算机 MATLAB 平台；

4.2.3 实验要求

- 1、采用机理法建立直线一级倒立摆的数学模型；
- 2、分析直线一级倒立摆的稳定性，并在 MATLAB 中仿真验证；

4.2.4 实验原理

系统建模可以分为两种：机理建模和实验建模。机理建模是在了解研究对象的运动规律基础上，通过物理、化学的知识和数学手段建立起系统内部的输入—输出状态关系。实验建模是通过在研究对象上加上一系列的研究者事先确定的输入信号，激励研究对象并通过传感器检测其可观测的输出，应用数学手段建立起系统的输入—输出关系。这里面包括输入信号的设计选取、输出信号的精确检测、数学算法的研究等等内容。

对于倒立摆系统，经过小心的假设忽略掉一些次要的因素后，它就是一个典型的运动的刚体系统，可以在惯性坐标系内应用经典力学理论建立系统的动力学方程。下面采用其中的牛顿—欧拉方法建立直线一级倒立摆系统的数学模型。

1、受力分析

在忽略了空气阻力、各种摩擦之后，可将直线一级倒立摆系统抽象成小车和匀质杆组成的系统，如图 5.1.1 所示

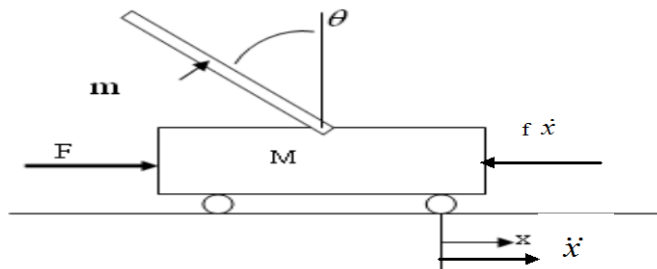


图 4. 1. 1 直线一级倒立摆系统

本文中倒立摆系统描述中涉及的符号、物理意义及相关数值如表 4.2.1 所示。

表 4. 2. 1 直线一级倒立摆系统参数

符号	意义	数值
M	小车质量	1.42 kg
m	摆杆质量	0.12 kg
b1	摆杆摩擦系数	
b2	小车摩擦系数	
l	摆杆转动轴心到质心的距离	0.188 m
I	摆杆惯量	0.0014kg*m*m
F	加在小车上的力	
x	小车位置	
Φ	摆杆与垂直向上方向的夹角	
θ	摆杆与垂直向下方向的夹角	
	小车平动编码器	48mm/10000pulse
	摆杆角度编码器	2400pulse/rev
	控制卡模拟量输出	-10V——+10V

图 5.1.2 是系统中小车的受力分析图。其中，N 和 P 为小车与摆杆相互作用力的水平和垂直分量。

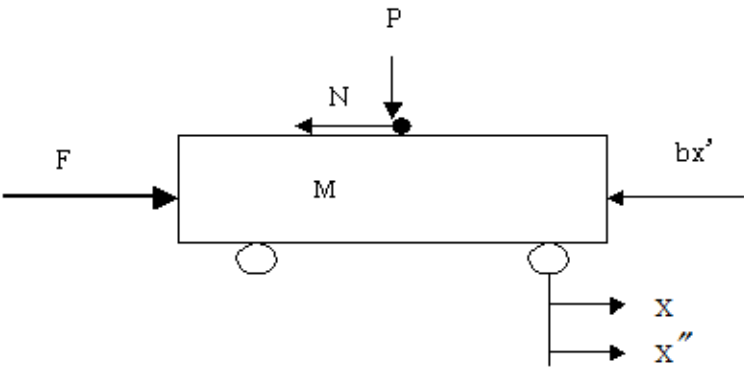


图 5. 1. 2 小车受力分析

图 5.1.3 是系统中摆杆的受力分析图。 F_s 是摆杆受到的水平方向的干扰力， F_h 是摆杆受到

的垂直方向的干扰力，合力是垂直方向夹角为 α 的干扰力 F_g 。

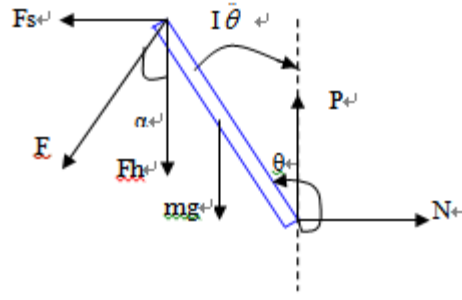


图 5.1.3 摆杆的受力分析

注意：在实际倒立摆系统中检测装置和执行装置的正负方向已确定，因而矢量方向定义如图所示，图示方向为矢量正方向。

1、数学模型

分析小车水平方向所受的合力，可以得到以下方程：

$$M\ddot{x} = F - b_2\dot{x} - N \quad (4.2.1)$$

对摆杆水平方向的受力进行分析可以得到下面等式：

$$N = m \frac{d^2}{dt^2} (x + l \sin \theta) \quad (4.2.2)$$

$$\text{即： } N = m\ddot{x} + ml\ddot{\theta} \cos \theta - ml\dot{\theta}^2 \sin \theta \quad (4.2.3)$$

把式（4.2.3）代入（4.2.2）中，就得到系统的第一个运动方程：

$$(M + m)\ddot{x} + b_2\dot{x} + ml\ddot{\theta} \cos \theta - ml\dot{\theta}^2 \sin \theta = F \quad (4.2.4)$$

分析摆杆垂直方向所受的合力，可以得到以下方程：

$$P - mg = m \frac{d^2}{dx^2} (l \cos \theta)$$

$$\text{即： } P - mg = -ml\ddot{\theta} \sin \theta - ml\dot{\theta} \cos \theta \quad (4.2.5)$$

力矩方程式如下所示：

$$-Pl \sin \theta - Nl \cos \theta - b_1\dot{\theta} = I\ddot{\theta} \quad (4.2.6)$$

注意：此方程中力矩的方向，由于 $\theta = \pi + \phi$, $\cos \phi = -\cos \theta$, $\sin \phi = -\sin \theta$ ，故等式前面有负号。

合并这两个方程，约去 P 和 N，得到第二个运动方程：

$$(I + ml^2)\ddot{\theta} + b_1\dot{\theta} + mg \cos \theta + ml\ddot{x} \cos \theta = 0 \quad (4.2.7)$$

设 $\theta = \pi + \phi$, (ϕ 是摆杆与垂直方向的之间的夹角), 假设 ϕ 与 1 (单位弧度) 相比很小, 即 $\phi \ll 1$, 则可以进行近似处理: $\cos \theta = -1, \sin \theta = -\phi, (\frac{d\theta}{dt})^2 = 0$ 。线性化后两个运动方程如下:

$$\begin{cases} (I + ml^2)\ddot{\phi} + b_1\dot{\phi} - mgl\phi = ml\ddot{x} \\ (M + m)\ddot{x} + b_2\dot{x} - ml\ddot{\phi} = F \end{cases} \quad (4.2.8)$$

3、状态空间方程

系统状态空间方程为:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + BF \\ y &= Cx + DF \end{aligned}$$

方程组 (4.2.8) 对 \ddot{x} , $\ddot{\phi}$ 解代数方程, 得到如下解:

$$\begin{cases} \dot{x} = \dot{x} \\ \ddot{x} = \frac{-(I + ml^2)b}{I(M + m) + Mml^2} \dot{x} + \frac{m^2 gl^2}{I(M + m) + Mml^2} \phi + \frac{mlb_2}{I(M + m) + Mml^2} \dot{\phi} + \frac{(I + ml^2)}{I(M + m) + Mml^2} F \\ \ddot{\phi} = \frac{-mlb}{I(M + m) + Mml^2} \dot{x} + \frac{mgl(M + m)}{I(M + m) + Mml^2} \phi + \frac{(M + m)b_2}{I(M + m) + Mml^2} \dot{\phi} + \frac{ml}{I(M + m) + Mml^2} F \end{cases}$$

整理后得到的系统状态空间方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{\phi} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-(I + ml^2)b}{I(M + m) + Mml^2} & \frac{m^2 gl^2}{I(M + m) + Mml^2} & \frac{mlb_2}{I(M + m) + Mml^2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{-mlb}{I(M + m) + Mml^2} & \frac{mgl(M + m)}{I(M + m) + Mml^2} & \frac{(M + m)b_2}{I(M + m) + Mml^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \phi \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{(I + ml^2)}{I(M + m) + Mml^2} \\ 0 \\ \frac{ml}{I(M + m) + Mml^2} \end{bmatrix} F$$

$$y = \begin{bmatrix} x \\ \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{\phi} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} F$$

将各数值及 $F = u \cdot k_1 \cdot k_2$ 带入后, 得系统状态方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{\phi} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.6087 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 41.05506 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{\phi} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 3.5172 \\ 0 \\ 14.0315 \end{bmatrix} u$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{\phi} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

运算程序见：LM1SIP.m

4.3 实验三 LQR 控制

4.3.1 实验目的

- 1、掌握 LQR 的设计方法；
- 2、会根据系统需求设计 LQR 调节器；

4.3.2 实验要求

- 1、设计直线一级倒立摆 LQR 调节器；
- 2、测试系统性能指标；

4.3.3 实验设备

- 1、直线一级倒立摆；
- 2、计算机 MATLAB 平台；

4.3.4 实验原理

1、线性二次型最优调节器

线性二次型（LQ——Linear Quadratic）是指系统的状态方程是线性的，指标函数是状态变量和控制变量的二次型。线性二次型控制理论已成为反馈系统设计的一种重要工具，广泛适用于 MIMO 系统。其特点是为多变量反馈系统的设计提供了一种有效的分析方法，可适用于时变系统，可处理扰动信号和测量噪声问题，可处理有限和无限的时间区间，设计的闭环系统具有良好的稳定裕度。

A、LQR（线性二次型最优调节器）的原理

考虑系统的状态方程如式(5.9.3)所示，找一状态反馈控制量：

$u = -Kx$ ，使得如下性能指标最小化：

$$J = \frac{1}{2} \int_0^T [x^T Q x + u^T R u] dt + \frac{1}{2} x^T(t_f) M x(t_f)$$

其中 Q 、 M 是半正定矩阵， R 是正定矩阵， Q 、 M 分别是对状态变量和输入向量的加权矩阵， x 是 n 维状态变量， u 是 m 维输入变量，终端时间 t_f 固定，终端状态 $x(t_f)$ 自由。

要使性能函数 J 最小，则可首先构造一个 Hamilton 函数：

$$H = -\frac{1}{2} [x^T Q x + u^T R u] + \lambda^T [Ax + Bu]$$

当输入信号不受约束时，则可对 Hamilton 函数进行求导并令其值为 0，求出最小值，从而得到最优控制信号：

$$\frac{\partial H}{\partial u} = -Ru + B^T \lambda = 0$$

$$u^* = R^{-1} B^T \lambda$$

λ 可由下式求出

$$\lambda = -Px$$

P 可由 Riccati 方程求出

$$P = -PA - A^T P + PBR^{-1}B^T P - Q$$

当 $t_f \rightarrow \infty$ 时， P 趋近于一个常值矩阵，且 $\dot{P} = 0$ ，因此，上式给出的 Riccati 方程就简化为

$$-PA - A^T P + PBR^{-1}B^T P - Q = 0$$

LQR 问题的解是一个全状态反馈调节器，有非常好的鲁棒性能。它可以通过适当选取权矩阵 Q 和 R ，在控制信号能量和输出性能之间进行调节。

利用 MATLAB 的 LQR 函数可以很方便、准确地求出 LQR 的解—— K

阵。

B、LQR（线性二次型最优调节器）的实现

LQR 线性二次型最优调节器通过选取权矩阵 Q 和 R 使求解的全状态反馈阵 K 与系统的性能指标联系起来，其实质是设计最优的全状态反馈阵，比全状态反馈调节器更易设计出鲁棒性更强的控制系统。

为了控制全部状态，系统状态已通过实验二所述得到系统的状态方程：

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{\phi} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.6087 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 41.05506 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{\phi} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 3.5172 \\ 0 \\ 14.0315 \end{bmatrix} u$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{\phi} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

假设全状态反馈可以实现，找出确定反馈控制规律的向量 K 。用 Matlab

中的 `lqr` 函数，可以得到最有控制器对应的 K 。`Lqr` 函数允许你选择两个参数—— R 和 Q ，这两个参数用来平衡输入量和状态量的权重。最简单的情况是 假设 $R=1$ ， $Q=C'*C$ 。当然，也可可以通过改变去矩阵中的非零元素来调节 控制器以得到期望的相应。采用：

$$Q = \begin{bmatrix} 2000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 200 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} R = 5, \text{ 则根据上述方法求得 LQR 的解为:}$$

$$K = [-20.0000 \ -13.6349 \ 38.7336 \ 6.1233]$$

运算程序见：LM1SLQR.m

4.3.5 实验步骤

1. 打开倒立摆电控箱上的电源按钮，然后将倒立摆小车扶至导轨中间位置。

2. 在 MATLAB/Current Folder 中打开文件“LQR_Control.mdl”，会弹出如图 4.3.2 所示的实时控制界面。（系统实时控制模块搭建的环境设置步骤于附录一所示）

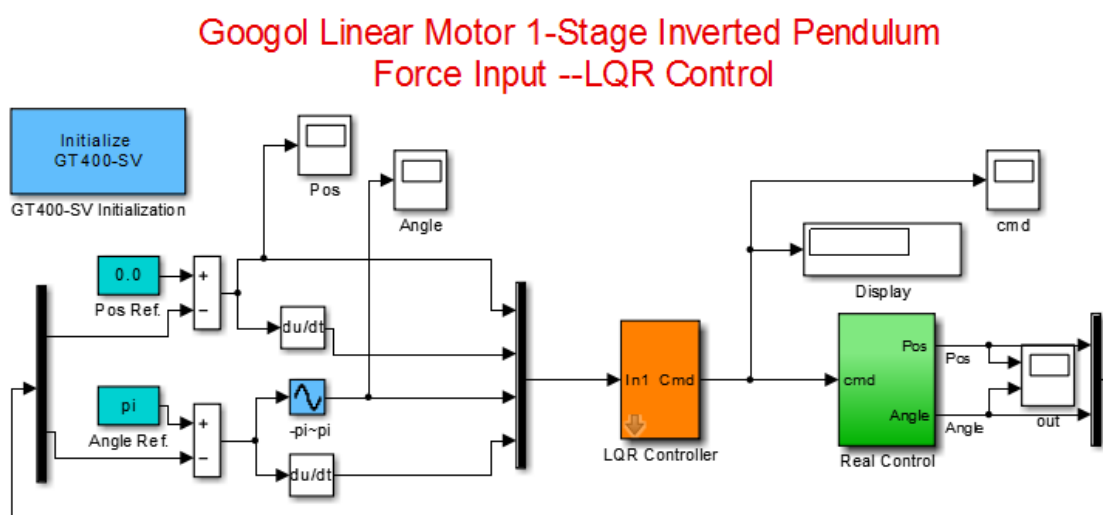





图 4.3.2 实时控制图

3. 点击“”连接，电机伺服使能，可听到直线电机上伺服后自动寻相位发出的吱吱声。然后点击“”连接迅速提起摆杆到竖直向上的位置，程序进入自动控制后松开摆杆。

4. 双击“Manual Switch”将输入信号打到 0.1m/s^2 端，观察摆杆的运动现象。

5. 点击停止程序，打开示波器“Pos”和“Angle”，观察系统输出的响应。

4.3.6 实验记录

实验数据填入下表

内容	数据
控制器形式 及参数	$K = [-20.0000 \ -13.6349 \ 38.7336 \ 6.1233]$
输入信号	$0.1m/s^2$
输出信号	系统稳定


4.3.7 实验分析

思考题：如何设计鲁棒性更强的系统？

附录

附录一 系统实时控制环境设置

根据实验需要，实时控制模块搭建的环境设置步骤如下图所示：

（1）打开 MATLAB，点击  新建，新建一个 Simulink Model，如下图所示 0.1 所示：

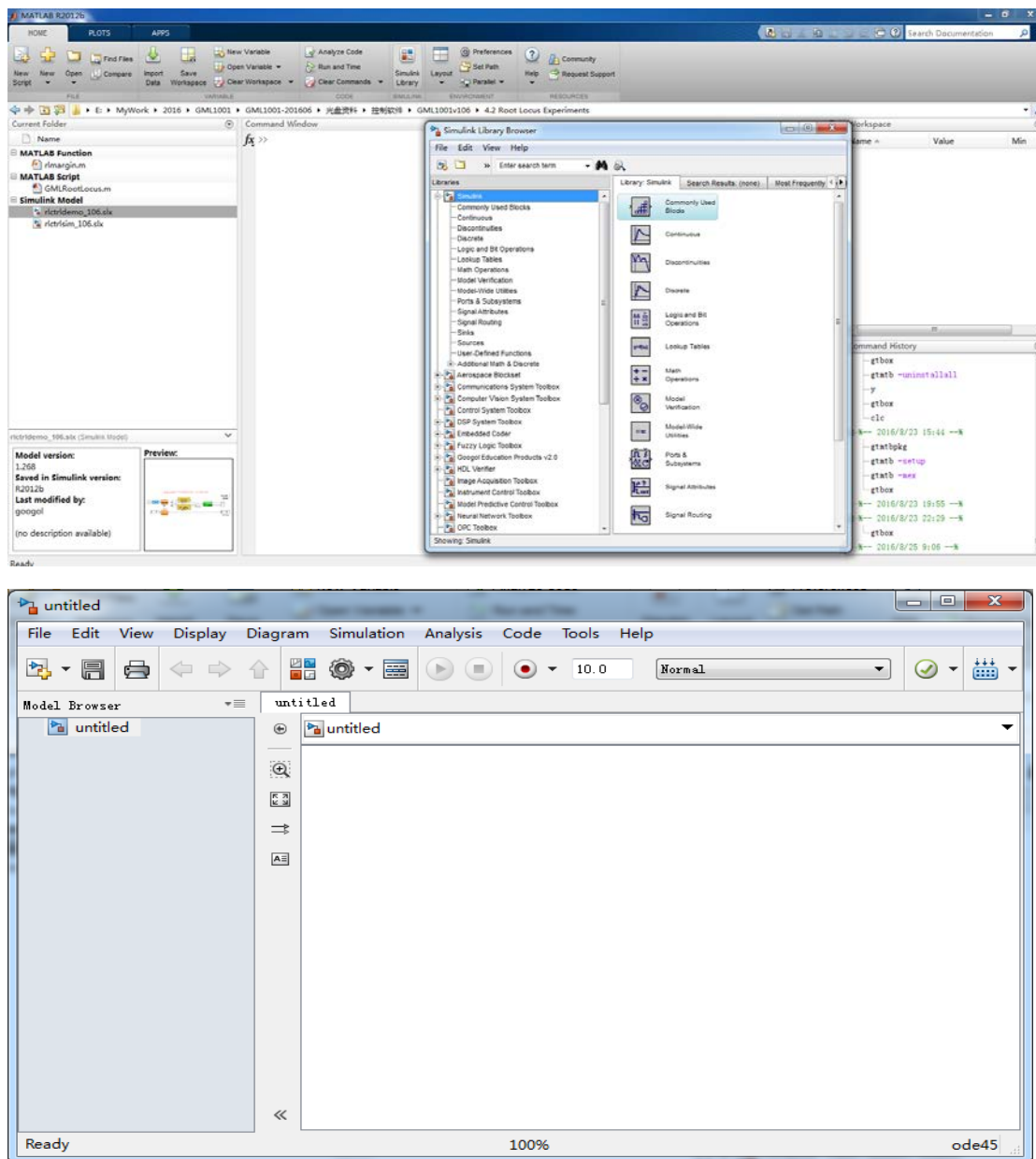


图 0.1 新建一个 Simulink Model

（2）仿真的模式选择，点击仿真 Simulation 模式 Mode，选择外部模式 External 如下图所示：

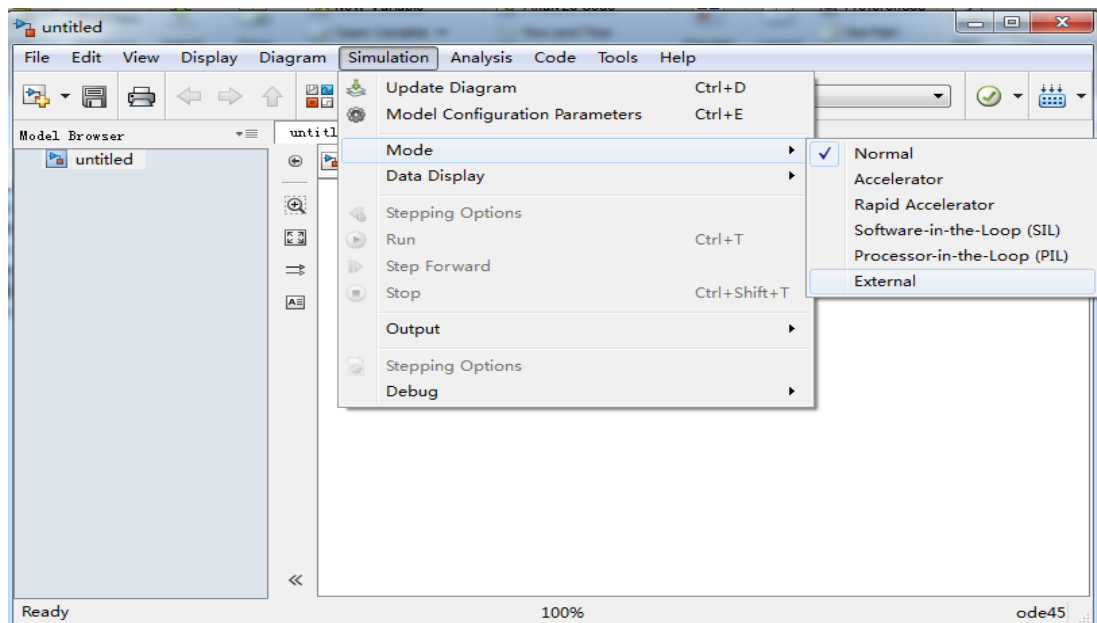
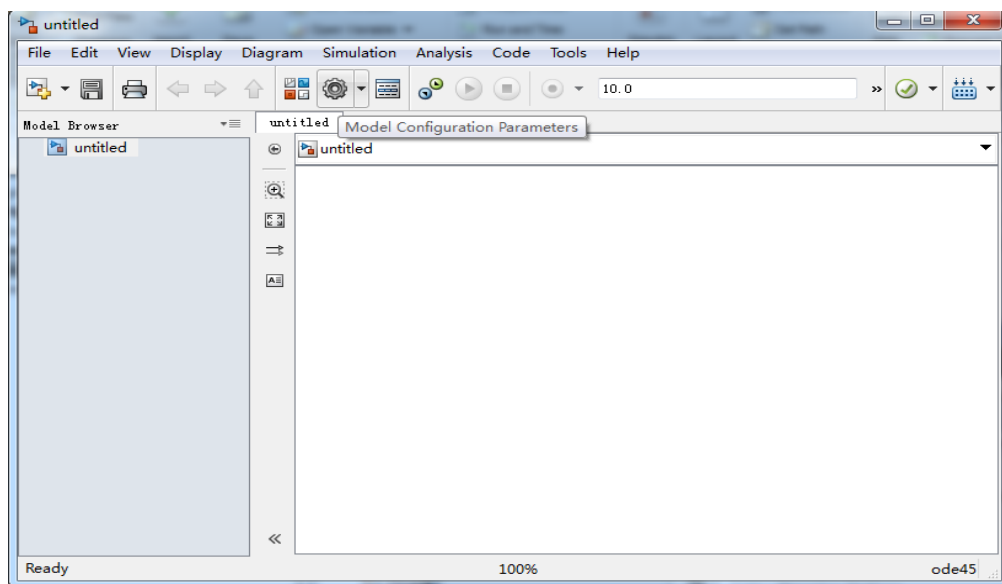


图 0.2 仿真的模式选择

（3）配置结构参数

配置结构参数点击设置，出现以下框图设置仿真 Stop time 为 inf, Type 选为 Fixed-step, Fixed-step size 设置为 0.003.如下图所示：



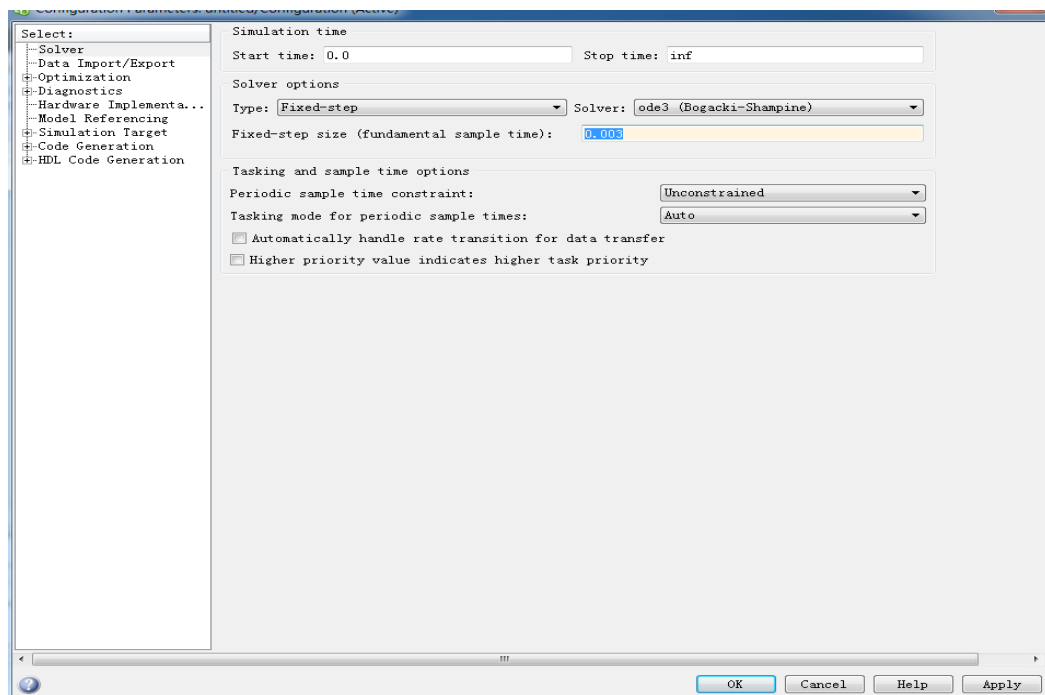
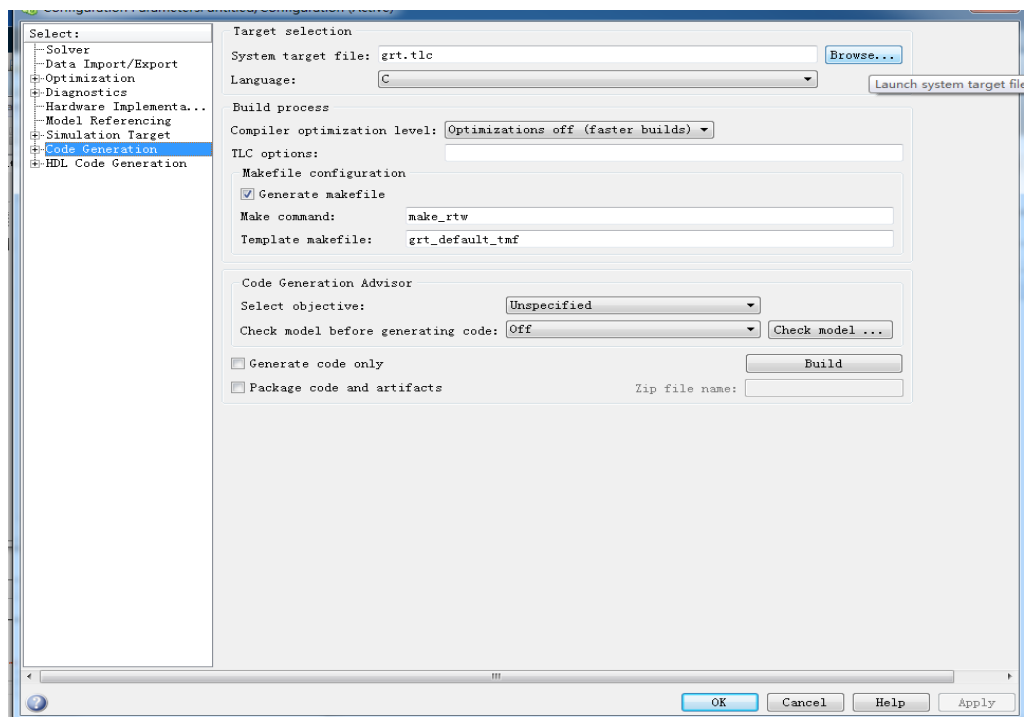


图 0.3 配置结构参数

（4）在图 0.3 对话框左侧点击代码生成 Code Generation，选择 rtwin，tlc 选项。



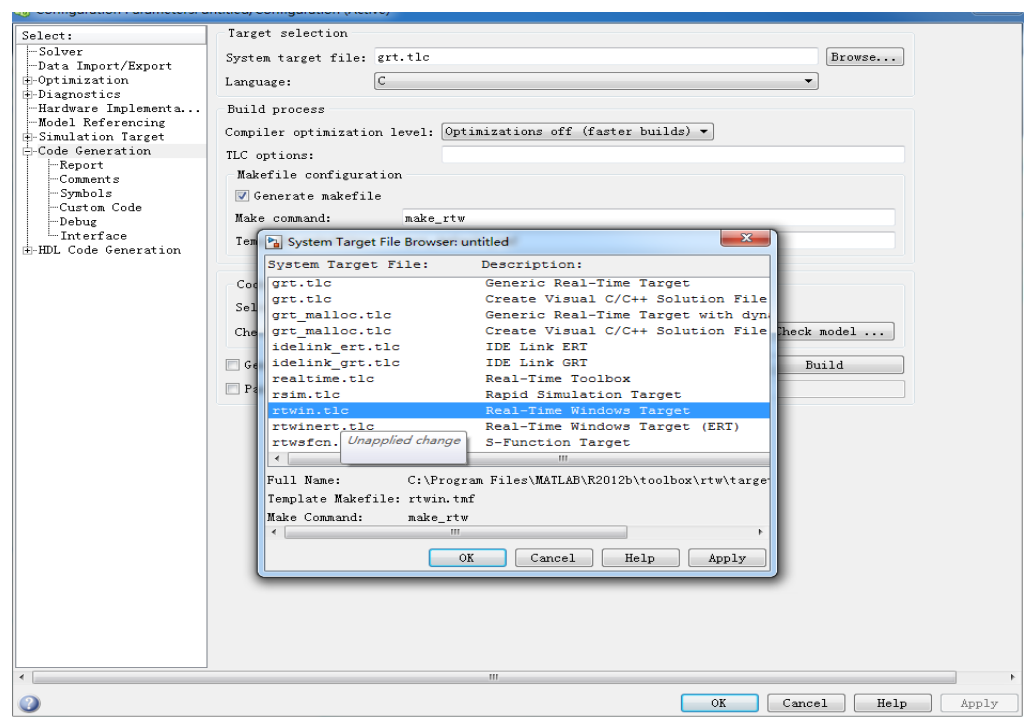


图 0.4 代码生成

点击应用，OK 即可完成上述实时控制环境设置。