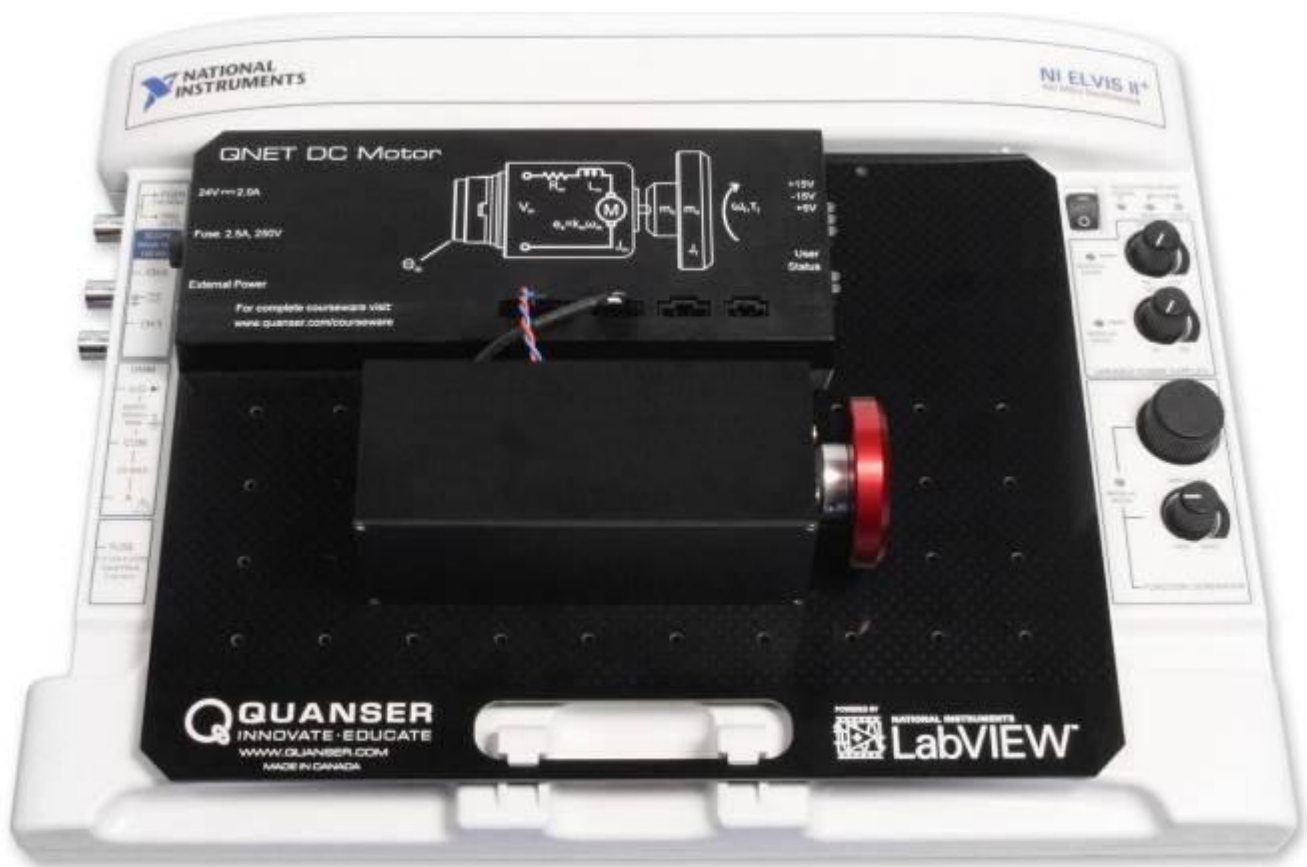




使用手册

用于 NI ELVIS 的 QNET 2.0 直流电机控制板

安装和配置



Captivate. Motivate. Graduate.

© 2014 Quanser Inc., 权利所有。

Quanser Inc.
119 Spy Court
Markham, Ontario
L3R 5H6, Canada
info@quanser.com
电话: 1-905-940-3575
传真: 1-905-940-3576

有关 Quanser Inc.提供的解决方案的更多信息, 请访问网站: <http://www.quanser.com>

本文档及其中描述的软件受制于许可协议。 软件和本文档均不得被使用或复制, 除非符合许可协议的条款规定。 未经 Quanser Inc.事先书面许可, 保留所有权利, 不得将任何部分复制, 存储在检索系统中或以任何形式或通过任何方式, 电子、机械、复印、录制或其他方式传播。

FCC Notice This device complies with Part 15 of the FCC rules. Operation is subject to the following two conditions: (1) this device may not cause harmful interference, and (2) this device must accept any interference received, including interference that may cause undesired operation.

Industry Canada Notice This Class A digital apparatus complies with Canadian ICES-003. Cet appareil numérique de la classe A est conforme à la norme NMB-003 du Canada.

Japan VCCI Notice This is a Class A product based on the standard of the Voluntary Control Council for Interference (VCCI). If this equipment is used in a domestic environment, radio interference may occur, in which case the user may be required to take corrective actions.

この装置は、クラス A 情報技術装置です。この装置を家庭環境で使用する
と電波妨害を引き起こすことがあります。この場合には使用者が適切な対策
を講ずるよう要求されることがあります。 VCCI-A

Korea Communications Commission (KCC) Notice This equipment is Industrial (Class A) electromagnetic wave suitability equipment and seller or user should take notice of it, and this equipment is to be used in the places except for home.

이 기기는 업무용(A 급) 전자파적합기기로서 판
매자 또는 사용자는 이 점을 주의하시기 바라
며, 가정외의 지역에서 사용하는 것을 목적으로
합니다.

Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)



This symbol indicates that waste products must be disposed of separately from municipal household waste, according to Directive 2002/96/EC of the European Parliament and the Council on waste electrical and electronic equipment (WEEE). All products at the end of their life cycle must be sent to a WEEE collection and recycling center. Proper WEEE disposal reduces the environmental impact and the risk to human health due to potentially hazardous substances used in such equipment. Your cooperation in proper WEEE disposal will contribute to the effective usage of natural resources. For information about the available collection and recycling scheme in a particular country, go to ni.com/citizenship/weee.

电子信息产品污染控制管理办法 (中国 RoHS)



中国客户 National Instruments 符合中国电子信息产品中限制使用某些有害物质命令 (RoHS)。
关于National Instruments 中国 RoHS合规性信息, 请登录 ni.com/environment/rohs_china
(For information about China RoHS compliance, go to ni.com/environment/rohs_china)

CE Compliance

This product meets the essential requirements of applicable European Directives as follows:

- 2006/95/EC; Low-Voltage Directive (safety)
- 2004/108/EC; Electromagnetic Compatibility Directive (EMC)

Caution: This is a Class A product. This product may cause radio interference in a domestic environment, in which case the user may be required to take adequate measures.

目录

安全信息	3
1 介绍	5
2 系统硬件	6
2.1 系统原理	6
2.2 硬件组成	6
2.3 环境	8
2.4 系统参数	9
3 QNET DC Motor 和 NI ELVIS II 安装	10
3.1 QNET DC 电机组成	10
3.2 NI ELVIS II ⁽⁺⁾ 组成	11
3.3 NI ELVIS II ⁽⁺⁾ 安装过程	11
4 故障排除	14
4.1 常见软件问题	14
4.2 常见硬件问题	14

安全信息

用户手册中交替使用以下符号和定义：

符号	描述
	注意：有关其他信息，请参阅文档
	直流电
	开 (电源) [在 NI ELVIS II ⁽⁺⁾ 单元]
	关 (电源) [在 NI ELVIS II ⁽⁺⁾ 单元]

表0.1：符号表

1 介绍

用于 NI ELVIS II 的 Quanser QNET 2.0 DC Motor 板，如图 1.1 所示，是一种多用途伺服系统，旨在以多种方式讲授和演示电机伺服控制的基本原理。该系统由安装在固定铝框架中的 18V 直驱有刷直流电机驱动。QNET DC Motor 附带的惯性盘可以通过 QNET DC Motor 上的磁铁连接器方便装卸。单端旋转编码器用于测量直流电机的角位置。

QNET DC Motor 主要特点：

- 用于 NI ELVIS II⁽⁺⁾ 的紧凑、完整的旋转伺服系统。
- 18V 直驱有刷直流电机
- 安装在直流电机上的编码器
- 内置 PWM 放大器
- 内置用于 NI ELVIS II⁽⁺⁾ 的 PCI 接口
- 惯性盘模块



图 1.1: 用于 NI ELVS II 的 Quanser QNET 2.0 直流电机板



本设备旨在用于教育和研究，不适用于一般场合。 用户有责任确保设备仅由有资质人员使用。

2 系统硬件

2.1 系统原理

QNET DC Motor 提供一个集成放大器接口和一个通信接口，作为 NI ELVIS II(+)的放大器命令和编码器接口。QNET DC Motor 上不同系统组件之间的相互作用如图 2.1 所示。NI ELVIS II(+)通过 QNET DC Motor 的 USB 接口连接器连接到 PC 或笔记本电脑。NI ELVIS II(+)模块读取角度编码器输入，并给功率放大器提供指令，以驱动直流电机。

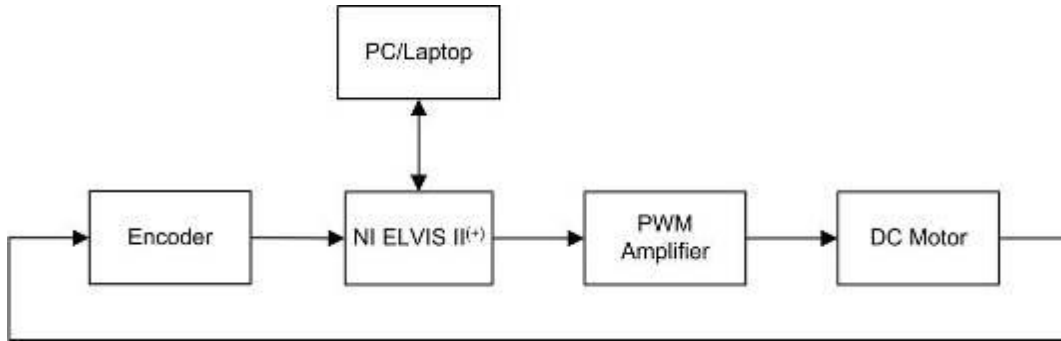


图 2.1: QNET DC Motor 组件间的交互作用

图 2.2 所示原理图说明了 QNET DC Motor 主要组件以及其与 NI ELVIS II(+)的交互方法。

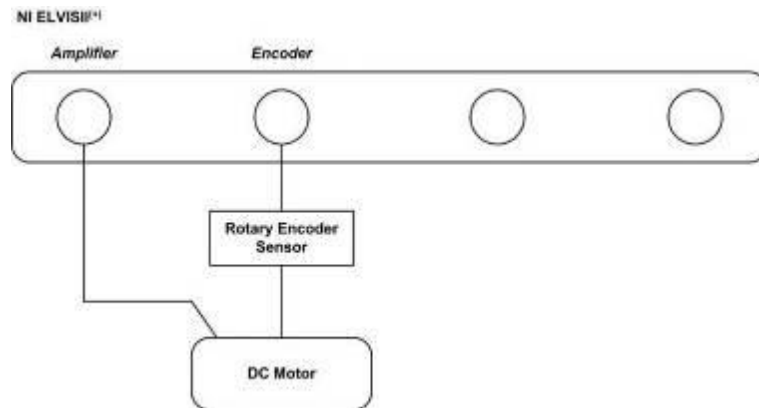


图 2.2: QNET DC Motor 组件间的交互作用

2.2 硬件组成

QNET DC Motor 的主要组成部件如图 2.3 和图 2.4 所示，并列于表 2.1。

2.2.1 直流电机

QNET DC Motor 包括一个固定在铝框架中 18 V 直驱有刷直流电机，电机规格如表 2.3 所示。

QNET DC Motor 采用 Allied Motion CL40 Series 16705 型空心杯直流电机。电机的完整规格表可从该网址获取：alliedmotion.com/Products/Series.aspx?s=29。

ID#	说明	ID#	说明
1	直流电机	7	用户与状态指示灯
2	高分辨率编码器	8	8 脚电机电源连接器
3	电机金属外壳	9	5 脚编码器连接器
4	惯性负载	10	24 V QNET 电源插孔
5	用于与 NI ELVIS II (+) 连接的 PCI 连接器	11	保险丝
6	+5 V, -15 V, +15 V 指示灯	12	外部电源指示灯

表 2.1: QNET DC Motor 组件名

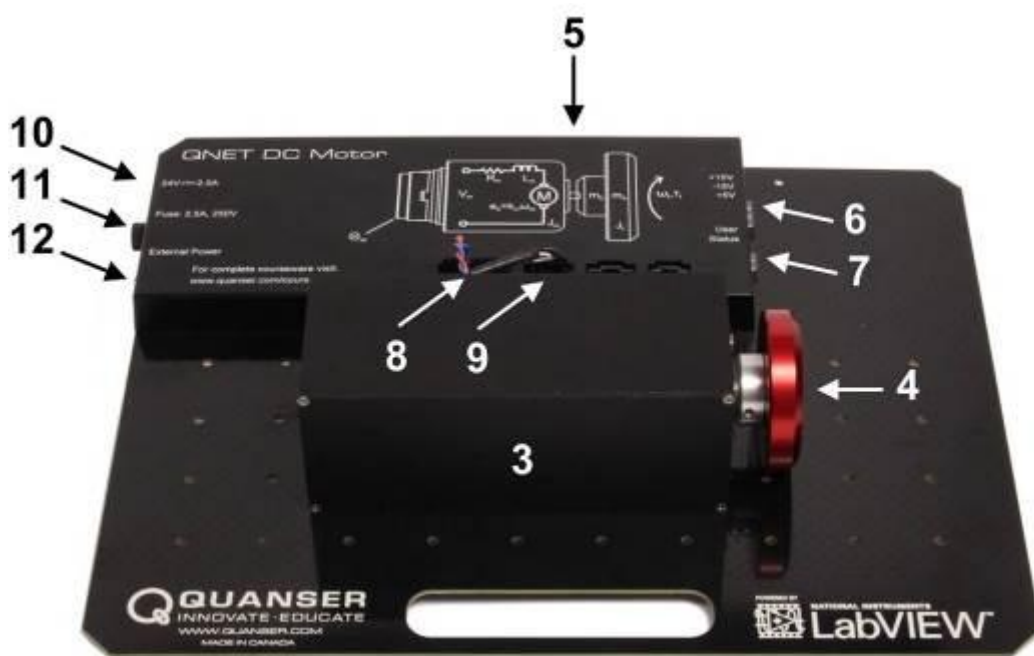


图 2.3: QNET DC Motor 总体布局



注意

运动部件裸露。

2.2.2 编码器

QNET DC Motor 上测量直流电机角位置的编码器是单端光电编码器。它在正交模式下每转输出 2048 个计数（每转 512 线）。

QNET DC Motor 上测量直流电机角位置的编码器是 US Digital E8P-512-118 单端光电编码器，E8P 光电编码器的规格参照 E8P 数据手册。

2.2.3 功率放大器

QNET DC Motor 电路板包括一个 PWM 电压控制功率放大器，能够提供 2A 峰值电流和 0.5 A 持续电流（基于电机的额定电流）。输出电压负载范围为 $\pm 10V$ 。

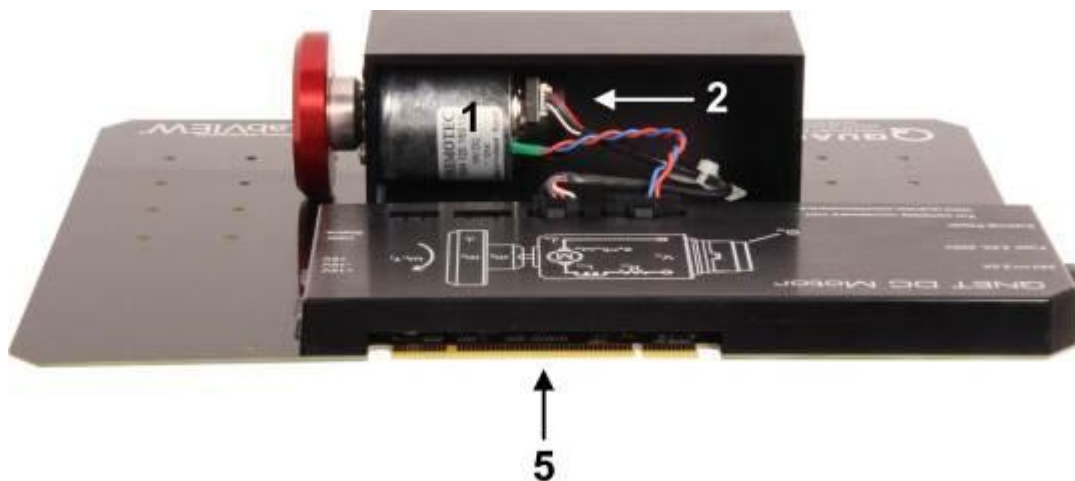


图 2.4: 用于 NI ELVIS II 的 Quanser QNET 2.0 DC Motor Board 组件

2.2.4 状态指示灯

QNET DC Motor 配有各种安全措施，使用状态指示灯 *Status LED* 进行反馈，见图 2.3。特别说明，使用两个数字使能线（一个高，一个低）来确保正确的系统配置。系统状态如表 2.2 所示。这里，*表示任何状态。

External Power (24 V)	Enable+	Enable-	Avg. Applied Voltage	Encoder Stall	Status LED	Amplifier
0	*	*	*	*	Red	Disabled
*	FALSE	*	*	*	Red	Disabled
*	*	TRUE	*	*	Red	Disabled
24 V	TRUE	FALSE	// * // $V \leq 5\text{ V}$	*	Green	Enabled
24 V	TRUE	FALSE	// * // $V \geq 5\text{ V}$	FALSE	Green	Enabled
24 V	TRUE	FALSE	// * // $V > 5\text{ V}$	TRUE, $t \leq 12\text{ s}$	Orange	Enabled
24 V	TRUE	FALSE	// * // $V > 5\text{ V}$	TRUE, $t > 12\text{ s}$	Flashing Red	Disabled

表 2.2: QNET DC Motor 的状态指示灯

2.3 环境

QNET DC Motor 工作在以下环境中：

- 额定功率
- 仅室内使用
- 温度范围 5 °C 到 40 °C
- 海拔高度最大 2000m
- 31°C 时最大相对湿度 80%，并在 40°C 时线性降低至 50%
- 污染等级 2
- 电源电压波动可达额定电压的 $\pm 10\%$
- 最大瞬时电压 2500V
- 防护等级符合 IEC 60529 标准：普通设备（IPX0）

2.4 系统参数

表 2.3 列出了与 QNET DC Motor 相关的主要参数。

符号	说明	值
直流电机		
V_{nom}	标称输入电压	18.0 V
τ_{nom}	额定转矩	22.0 mNm
ω_{nom}	额定速度	3050 RPM
I_{nom}	额定电流	0.540 A
R_m	端口电阻	8.4
k_t	转矩常数	0.042 Nm/A
k_m	电机反电动势常数	0.042 V/(rad/s)
J_m	转动惯量	$4.0 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2$
L_m	转子电感	1.16 mH
m_h	模块连接物轮轴质量	0.016 kg
r_h	模块连接物轮轴半径	0.0111 m
J_h	模块连接物转动惯量	$0.6 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2$
惯性盘模块		
m_d	惯性盘质量	0.053 kg
r_d	惯性盘半径	0.0248 m
电机编码器		
	编码器线数	512 lines/rev
	编码器正交线数	2048 lines/rev
	编码器正交分辨率	0.176 deg/count
放大器		
	放大器类型	PWM
	峰值电压	2.5 A
	恒指电流	0.5 A
	输出电压	$\pm 24 \text{ V}$ 时限占空比 42 % ($\pm 10 \text{ V}$)

表 2.3: QNET DC Motor 系统参数

3 QNET DC Motor 和 NIELVIS II⁽⁺⁾ 安装

本节详细介绍了在 NI ELVIS II(+)上安装 QNET DC Motor 模块的步骤。安装过程中使用的 NI ELVIS II(+)组件参考图 3.1 中位置和 ID 号，并已在表 3.1 中进行了描述。



如果设备未按制造商指定的方式使用，则可能会出现损坏。

3.1 QNET DC Motor 组成

安装 QNET DC Motor 系统，需要以下组件：

1. QNET DC Motor PCB (如图 1.1 所示)
2. 惯性盘模块 (如图 1.1 所示)
3. QNET DC Motor 电源 (TRUMPower FRA072-S24-4, P/N: TRA72-S24-4G-509L, 输出直流 24 V, 3 A)



只能使用 QNET DC Motor 提供的电源。

4. 电缆
5. Schurter 公司 0034.3121, 5 mm × 20 mm, 2.5 A, 250 VAC 型, 自恢复保险丝。

3.2 NI ELVIS II⁽⁺⁾组成



图 3.1: NI ELVIS II⁽⁺⁾组成

ID#	说明
1	NI ELVIS II(+)
2	模型板电源开关
3	电源指示灯
4	就绪指示灯
5	NI ELVIS II(+) 电源线
6	PC 机 和 NI ELVIS II(+) 间的 USB 连接器

表 3.1: NI ELVIS II 组成

3.3 NI ELVIS II⁽⁺⁾安装过程

按照以下步骤在 NI ELVIS II⁽⁺⁾上安装 QNET DC Motor 板:



硬件上电情况下，请勿进行以下连接！



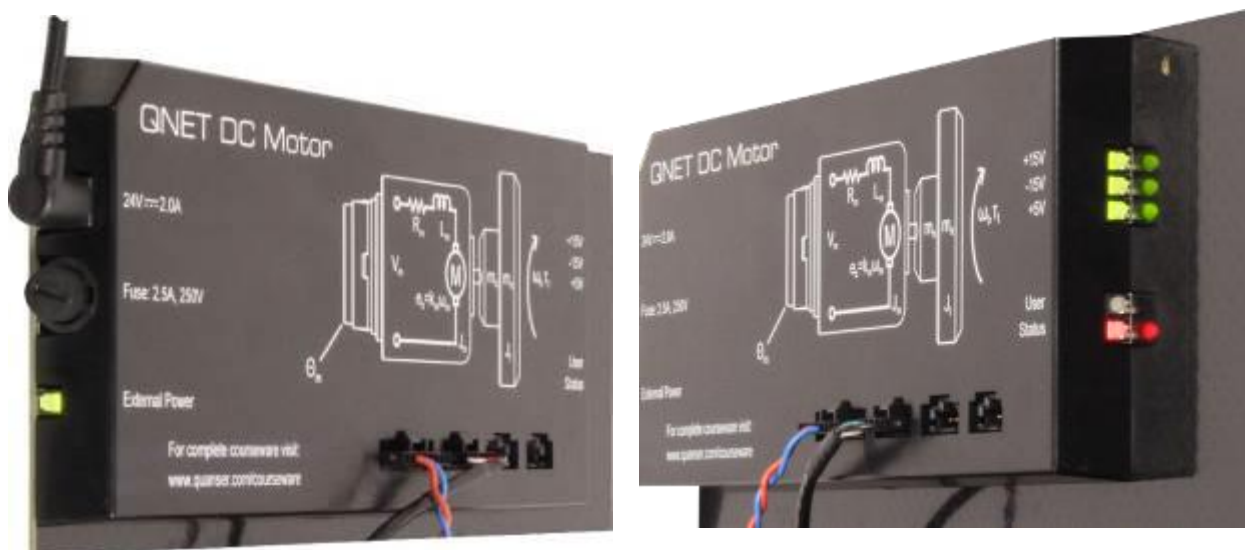
本机配有接地线，只能使用正确接地的插座，这是出于安全考虑，不要禁用它。

1. 将 QNET DC Motor 板前面的小开口放在 NI ELVIS II⁽⁺⁾上的安装支架上
2. 将 QNET DC Motor 模块末端的 PCI 连接器滑入 NI ELVIS II⁽⁺⁾上的母连接器，确保正确连接。
3. 连接 NI ELVIS II⁽⁺⁾ 电源线。
4. 将 NI ELVIS II⁽⁺⁾USB 电缆连接到 PC。
5. 将提供的 QNET 电源连接到 QNET DC Motor 模块上的 QNET DC Motor 电源插孔。
6. 通过打开后面板上的系统电源开关 *System Power Switch* 为 NI ELVIS II⁽⁺⁾供电
7. 打开模型板电源 *Prototyping Board Power* 开关，如图 3.1 ID #2 所示。
8. 设备上的电源 *Power* 和就绪 *Ready* 指示灯应点亮，如图 3.2 所示。



图 3.2: NI ELVIS II⁽⁺⁾上就绪和电源指示灯

9. 检验 QNET DC Motor 上的+15 V, -15 V, + 5 V 和外接电源 *External Power* 指示灯亮起绿色，状态 *Status* 指示灯为红色，如图 3.3 所示。表明该板已正确连接到 NI ELVIS II⁽⁺⁾单元，并且 QNET DC Motor 目前不与 PC 通信。



(a)外电源 LED 应该亮着

(b) 右边的 LED 灯应全是绿色，状态 LED 应为红色

图 3.3: QNET DC Motor 指示灯

4 故障排除

4.1 常见软件问题

Q1 当我尝试打开一个 QNET DC Motor VI, 它说缺少一些 VI, 它们名字中有一个 CD 或 Sim?

LabVIEW™ 控制设计和仿真工具包 *Control Design and Simulation Toolkit* 未安装。

□□□

Q2 当我打开一个 QNET DC Motor VI 时, 消息提示不能找到名称“ELVIS” 的 VI?

QNET DC Motor VI 使用 ELVISmx 驱动程序。在尝试打开任何 QNET DC Motor VI (可从 www.ni.com 下载) 之前, 请确保安装 NI ELVIS II(+)的内容。

4.2 常见硬件问题

Q1 QNET DC Motor 板上的灯都不亮

确保 NI ELVIS II(+) 单元背面的系统电源开关 *System Power* 和位于 NI ELVIS II(+) 右上角的模型板电源 *Prototyping Board Power* 开关均为开。

□□□

Q2 在 QNET DC Motor 板子上, +15 V, -15 V, +5 V 指示灯是亮绿色 但是外部电源 *External Power* 指示灯没亮。

确保 QNET DC Motor 板上的 QNET DC Motor 电源连接器与提供的 QNET DC Motor 电源线连接。如果指示灯仍然没有亮起, 请检查电源连接器旁边的 QNET DC Motor 的 2.5 A 保险丝。如果烧断, 请用相同的保险丝替换 (Schurter 0034.3121, 5 mm × 20 mm, 2.5 A, 250 VAC, 自恢复保险丝)。取下保险丝时, 请逆时针方向推动并转动保险丝座。

Q3 QNET DC Motor 电路板上 +15V, -15V, +5V 和外部电源 *External Power* 指示灯至少有一个不亮。

□□□

- 参考上一条 Q2 检查外部电源 LED 是否亮着。
- 如果+ 15V, -15V 和+ 5V 指示灯中的一个或多个指示灯不亮, 则 NI ELVIS II(+) 保护板 *Protection Board* 上的±15V 或+ 5V 保险丝已被触发。类似地, 如果在连接 QNET DC Motor 电源后外部电源 *External Power* 指示灯仍未亮起, NI ELVIS II(+) 保护板 *Protection Board* 上的可变电源保险丝 *Variable Power Supplies Fuses* 已被触发。请参阅 NI ELVIS II(+) 用户手册中的保护板保险丝 *Protection Board Fuses*。

□□□

Q4 NI ELVIS II(+) 上的就绪 *Ready* 指示灯不亮。

- 再过一遍 QNET DC Motor 安装指南中描述的 NI ELVIS II(+) 设置程序。
- 完成后, 启动 *Measurement & Automation Explorer* 软件。
- 如图 4.1 所示, 展开 驱动界面 *Devices and Interfaces* 和 NI-DAQmx 设备 *NI-DAQmx Devices*, 然后选择 NI ELVIS II(+) 设备。
- 如图 4.1 所示, 点击复位设备 *Reset Device* 按钮。
- 复位成功, 点击自测 *Self-Test* 按钮。
- 如果测试通过, 复位 NI ELVIS II(+) (即关闭模型板 *Prototyping Board* 开关和系统电源 *System Power* 开关, 然后重新打开)。NI ELVIS II(+) 上的就绪 *Ready* 指示灯现在应该点亮。

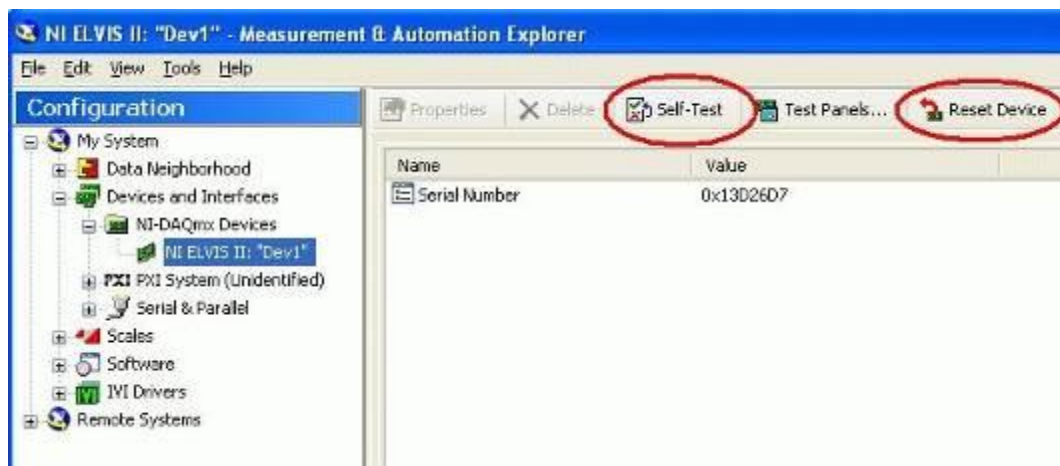


图 4.1: NI ELVIS II(+) 复位和完成自测

使用 NI ELVIS 教授入门控制的六类 QNET 板。

QNET 2.0 直流电机控制板
讲授直流电机控制的基本原理

QNET 2.0 HVAC 电路板
温度过程控制教程

QNET 机电传感器电路板
传感器功能介绍

QNET 2.0 旋转摆电路板
经典摆控制教程

QNET 2.0 垂直升降板
基本飞行动力学和控制介绍

QNET 肌电信号电路板
使用肌电描记法控制原理介绍

用于 NI ELVIS 平台的高性价比 Quanser QNET 附加板，在本科实验中引入控制主题。所有 QNET 都提供了全面的，与 ABET *契合的课件，用以增强学生的学习体验。

要求说明或报价，[请发送电子邮件至 info@ni.com](mailto:info@ni.com)。

*ABET Inc.是公认的大学和大学应用科学，计算机，工程和技术方面的认证机构，为高等教育提供领导和质量保证 75 年以上。
©2014 Quanser Inc.保留所有权利。LabVIEW™是 National Instruments 的商标。



为教学和研究提供解决方案. 加拿大制造.

建模



本手册和设计提供的 VI 用于 NI ELVIS II⁽⁺⁾的第二代黑色 Quanser QNET2.0 DC Motor Board 。可以通过 VI 右上角的小黑色符号来识别第二代 VI。这些 VI 不能用于蓝色的第一代电路板。

内容

- 一阶传递函数
- 使用阶跃响应测试法建立 QNET DC Motor 模型
- 模型验证

必备条件

- 已安装并调试好 QNET DC Motor。具体细节参考 QNET DC Motor 快速启动指南
- 参考 QNET DC Motor 使用手册
- 熟悉 LabVIEW™的基本操作

1 背景

1.1 阶跃响应测试法

阶跃响应测试法是一种基于稳定系统阶跃响应的简单建模方法。给系统输入一个阶跃信号并记录其响应。例如，给出某系统的传递函数如下：

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (1.1)$$

令 $K = 5 \text{ rad/V.s}$ ， $\tau = 0.05 \text{ s}$ 。其阶跃响应如图 1.1 所示。

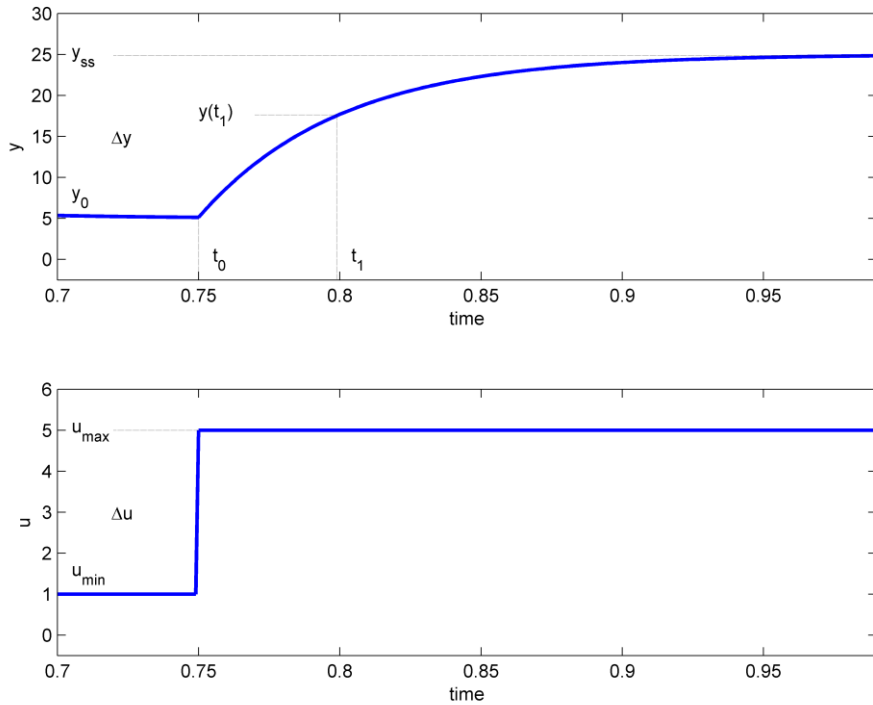


图 1.1：阶跃响应法得到的输入输出曲线

阶跃信号输入的初始时间为 t_0 。其最小值为 u_{min} ，最大值为 u_{max} 。输出信号初值为 y_0 。当输入信号作用时，输出随输入产生响应最终达到稳定状态 y_{ss} 。根据输入-输出信号图，稳态增益 K 可由下式计算得出：

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u}, \quad (1.2)$$

其中 $\Delta y = y_{ss} - y_0$ ， $\Delta u = u_{max} - u_{min}$ 。为了找到模型的时间常数 τ ，可以首先由下式计算在该时间常数下的系统输出：

$$y(t_1) = 0.632(y_{ss} - y_0) + y_0. \quad (1.3)$$

其中 0.632 为惯性环节经历时间 τ 到达稳态的倍数。可以从图 1.1 的响应数据中得到在时间 t_1 对应的 $y(t_1)$ 。从图中

我们可以看出 t_1 时刻等于：

$$t_1 = t_0 + \tau. \quad (1.4)$$

模型时间常数可由下式得出：

$$\tau = t_1 - t_0. \quad (1.5)$$

1.2 模型验证

建模完成后，可以通过运行模型和开环实际系统来验证。也就是说，开环电压同时施加到模型和实际对象两者上，并在同一示波器上观察仿真和实测响应。然后通过微调建模参数来调整模型，以适应实测的电机速度。

更多关于[电动机](#)、[数学模型](#)、[传递函数](#)和[LTI 系统论](#)信息，浏览维基百科获取。

1.3 虚拟仪器建模

在本实验中向 QNET DC Motor 施加电压并考查其角速度。仿真模型与实际系统一起运行，以进行模型参数调整和验证。用于建模的 LabVIEW™ 虚拟仪器如图 1.2 所示。图 1.3 显示了 VI 的图形视图，用于进行测量。

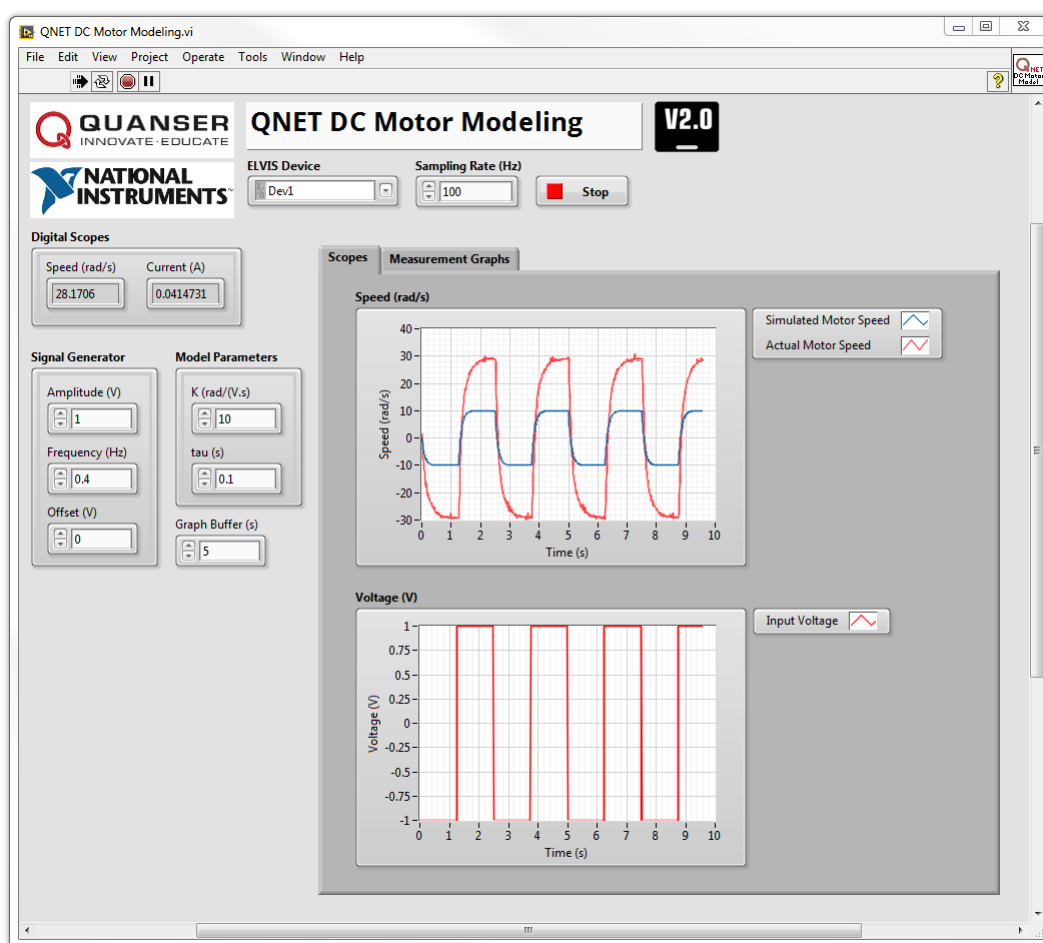


图 1.2: QNET DC Motor 建模所用 LabVIEW™ VI

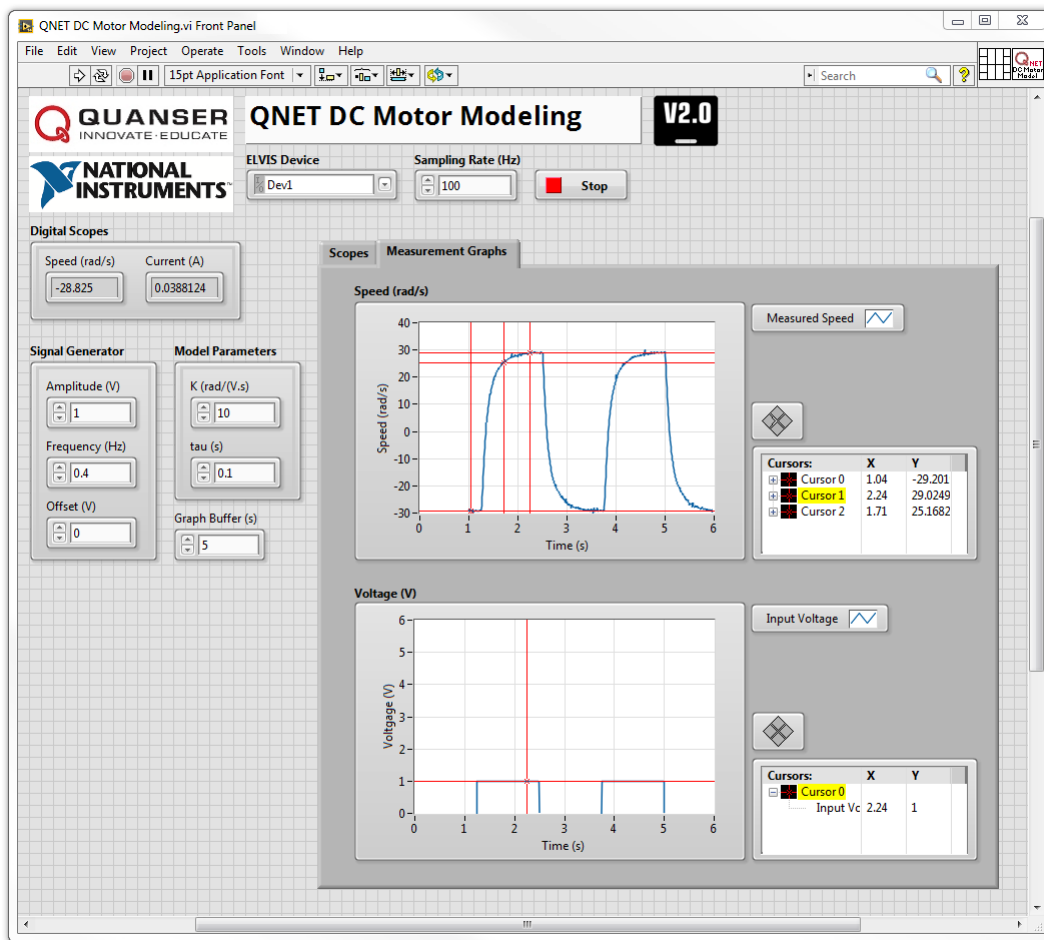


图 1.3: QNET DC Motor VI 模型：测量图形中的响应实例

2 实验练习

2.1 阶跃响应测试

1. 确保 QNET DC Motor Modeling.vi 打开。确保选择了正确的设备 **Device**。
2. 运行 VI。直流电机应开始旋转，VI 上的曲线应类似于图 1.2 所示。
3. 对信号发生器 Signal Generator 部分的设置
 - 振幅 Amplitude (V) = 2.0
 - 频率 Frequency (Hz) = 0.40
 - 偏移量 Offset (V) = 3.0
4. 当获取得到一个完整阶跃响应曲线时，点击停止 Stop 按钮来停止 VI 运行。
5. 粘贴速度 Speed (rad/s)和电压 Voltage (V) 图中的响应。
6. 选择实测图形 Measurement Graphs 选项以查看实际响应，如图 1.3 所示。
7. 使用速度 Speed (rad/s)和电压 Voltage (V)图中的响应曲线计算直流电机的稳态增益。关于如何从阶跃响应中找到稳态增益的详细内容，请参阅本实验的“背景”部分。您可以使用光标工具来测量数据。有关详细信息，请参阅 QNET DC Motor 用户手册或 LabVIEW™帮助。
8. 根据阶跃响应测试方法，找到时间常数。有关如何查找阶跃响应的时间常数的详细内容，请参阅“背景”部分。

2.2 模型验证

1. 打开 QNET DC Motor Modeling.vi。确保选择了正确的设备 **Device**。
2. 运行 VI。可以听到直流电机开始运行，VI 上的示波器显示如图 1.2 所示。
3. 信号发生器 Signal Generator 参数设置：
 - 振幅 Amplitude (V) = 2.0
 - 频率 Frequency (Hz) = 0.40
 - 偏移量 Offset (V) = 3.0
4. 在 VI 的模型参数 Model Parameters 部分中，输入阶跃响应测试实验室中得出的模型参数 K 和 τ 。蓝色的仿真曲线应该与红色的电机实测速度曲线很接近。
5. 从示波器 Scopes 选项上，获取速度 Speed (rad/s) 和电压 Voltage (V) 响应图。
6. 所建模型表达实际系统的效果有怎样？如果它们不匹配，请分析此差异的可能来源。
7. 调整模型参数 Model Parameters 部分中的稳态增益 K 和时间常数 τ ，使仿真曲线更好地匹配实际系统，并记下其值。

定性的比例积分速度控制



本手册和设计提供的 VI 用于 NI ELVIS II(+)的第二代黑色 Quanser QNET2.0 DC Motor Board 。
可以通过 VI 右上角的小黑色符号来识别第二代 VI。这些 VI 不能用于蓝色的第一代电路板。

内容

- QNET DC Motor 速度控制
- 比例积分(PI)补偿器设计

必备条件

- QNET DC Motor 已经安装并测试。详细信息请参考 QNET DC Motor 快速启动指南。
- 已有 QNET DC Motor 用户手册
- 熟悉 LabVIEW™的基本操作

1 背景介绍

使用比例积分控制器实现 QNET DC Motor 的速度控制。其闭环系统框图如图 1.1 所示。

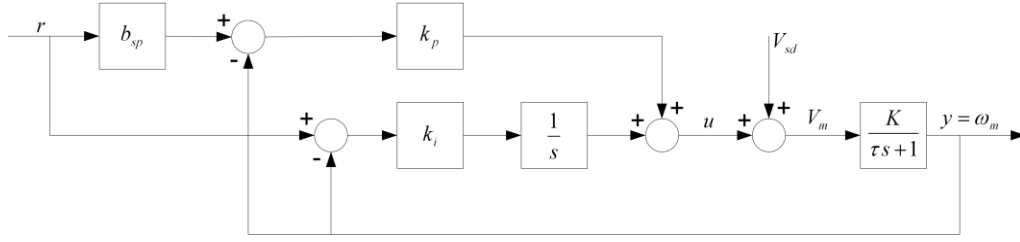


图 1.1: QNET DC Motor PI 闭环框图

稳态增益为 K 和时间常数为 τ 的直流电机速度-电压关系传递函数为:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (1.1)$$

用于设计 PI 控制器。具有加权设定值的 PI 控制器时域输入-输出关系为:

$$u = k_p (b_{sp} r - y) + \frac{k_i (r - y)}{s} \quad (1.2)$$

其中 k_p 是比例增益, k_i 是积分增益, b_{sp} 是设定值加权值。从参考速度 r 到电机角速度 ω_m 输出的闭环传递函数为

$$G_{\omega, r}(s) = \frac{K (k_p b_{sp} s + k_i)}{\tau s^2 + (K k_p + 1) s + K k_i} \quad (1.3)$$

1.1 速度控制 VI

用于速度控制实验的 LabVIEW™ 虚拟仪器如图 1.2 所示。

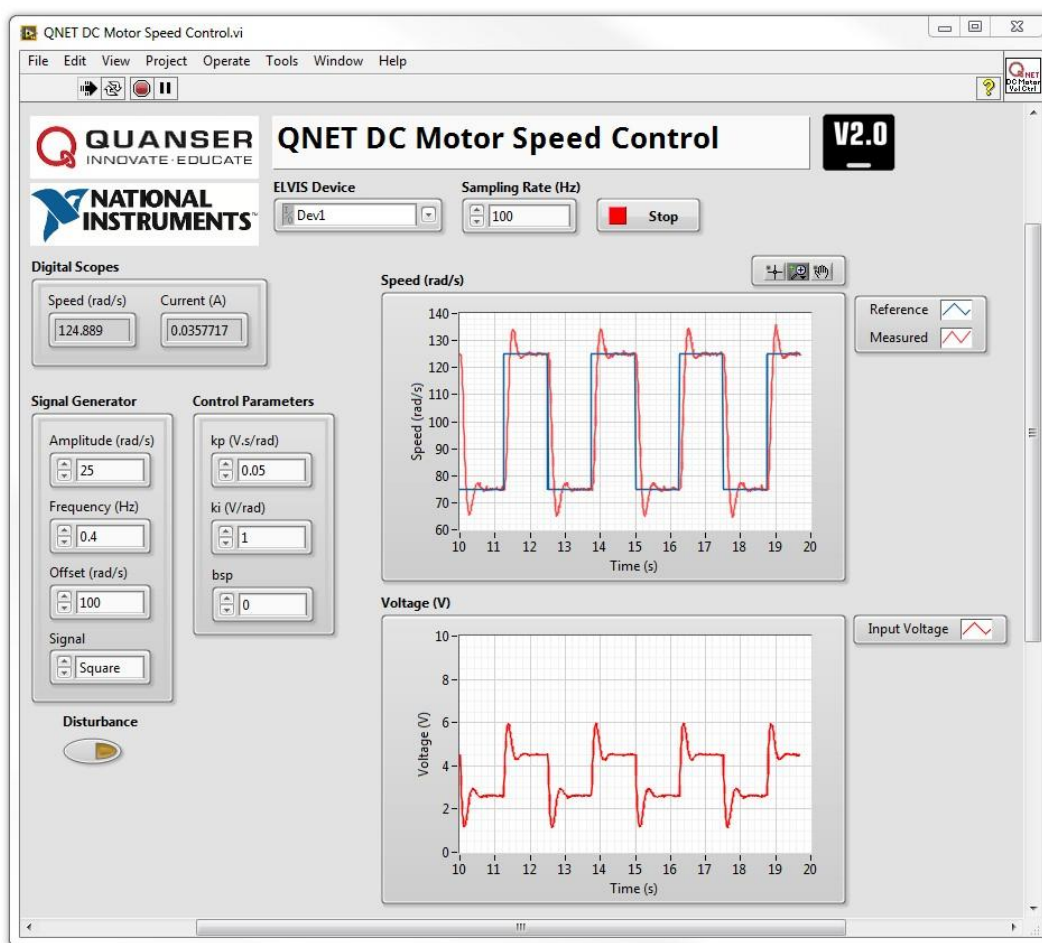


图 1.2: QNET DC Motor 速度控制虚拟仪器

2 实验练习

1. 确保 QNET DC Motor Speed Control.vi 打开。确保选择了正确的设备 Device.
2. 运行 VI。直流电机开始旋转，转速曲线应相似于图 1.2。
3. 信号发生器 Signal Generator 部分设置：
 - 幅值 Amplitude (rad/s) = 25.0
 - 频率 Frequency (Hz) = 0.40
 - 偏移量 Offset (V) = 100.0
 - 信号= ‘方波’ Signal = 'Square'
4. 控制参数 Control Parameters 部分设置：
 - k_p (V.s/rad) = 0.050
 - k_i (V/rad) = 1.00
 - b_{sp} = 0.00
5. 在速度 Speed (rad/s)示波器内, 查看参考速度(蓝色)和实测速度（红色）。解释发生了什么。
6. 以 0.005 V.s/rad 的步长递增或递减 k_p 。
7. 观察实测信号相对于参考信号的变化。解释改变 k_p 变化产生的性能差异。
8. 设置 $k_p = 0$ V.s/rad , $k_i = 0$ V/rad, 电机应该停止旋转。
9. 以 0.05 V/rad 的步长增加积分增益 k_i , 在 0.05 V/rad 和 1.00 V/rad 之间变化积分增益。
10. 在速度 Speed (rad/s)示波器内, 观察实测速度的响应, 比较当 k_i 为低和高时的结果。
11. 点击停止 Stop 按钮停止运行 VI

满足指标的 PD 位置控制



本手册和设计提供的 VI 用于 NI ELVIS II⁽⁺⁾的第二代黑色 Quanser QNET2.0 DC Motor Board。可以通过 VI 右上角的小黑色符号来识别第二代 VI。这些 VI 不能用于蓝色的第一代电路板。

内容

- QNET DC Motor 位置控制。
- 比例微分(PD) 补偿器。
- 根据要求设计控制器。

必备知识

- QNET DC Motor 定性的 PD 位置控制实验。
- 建模和定性的 PI 速度控制。

1 背景

电机位置控制是一种利用微分作用优点的基本方式。在本实验中，根据要求设计了比例-积分-微分控制器。闭环 PID 控制框图如图 1.1 所示。

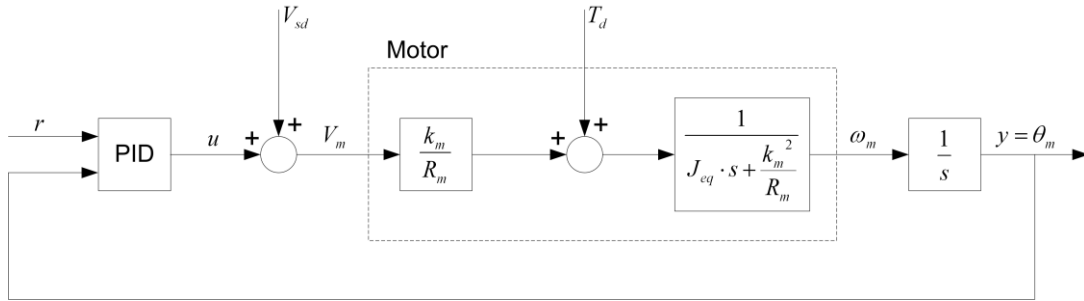


图 1.1: 直流电机闭环 PID 控制框图

图 1.1 中 PID 模块里 PID 传递函数为：

$$u = k_p (b_{sp}r(t) - y(t)) + k_i \int_0^t (r(\tau) - y(\tau))d\tau + k_d (b_{sd}\dot{r}(t) - \dot{y}(t)) \quad (1.1)$$

其中 k_p 是位置比例控制增益， k_d 是微分控制增益， k_i 是积分控制增益， b_{sp} 是参考位置 $r(t)$ 上的设定加权值， b_{sd} 是 $r(t)$ 的速度参考值上的设定加权值。

图 1.1 中标记为 **Motor** 的虚线框是以反电机常数 k_m ，电机电枢电阻 R_m ，和电机轴 J_{eq} 的等效转动惯量等参数建立的电机模型。施加到惯性轮的直接干扰由干扰转矩变量 T_d 表示，模拟的干扰电压由变量 V_{sd} 表示。

1.1 PD 控制设计

首先使用 PD 控制来分析控制电机位置的过程。通过在 PID 控制等式 1.1 中设置 $k_i = 0$ 并进行拉普拉斯变换，PD 传递函数为

$$u = k_p (r - y) + k_d s(b_{sd}r - y) \quad (1.2)$$

结合位置控制采用的对象模型

$$\frac{\Theta_m(s)}{V_m(s)} = \frac{K}{s(\tau s + 1)} \quad (1.3)$$

与 PD 控制公式 1.2 相结合，得到电机位置控制系统的闭环传递函数。

$$G_{\theta,r}(s) = \frac{K(k_p + b_{sd}k_d s)}{\tau^2 s^2 + (1 + Kk_d)s + Kk_p} \quad (1.4)$$

与 PI 速度控制类似，标准二阶系统特征方程 $s^2 + 2s\zeta\omega_n + \omega_n^2$ 可以通过设置如下比例增益和微分增益来实现：

$$k_p = \frac{\omega_0^2 \tau}{K} \quad (1.5)$$

$$k_d = \frac{-1 + 2\zeta\omega_0\tau}{K} \quad (1.6)$$

1.2 峰值时间和超调量

标准二阶传递函数形式如下所示：

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1.7)$$

其中 ω_n 是无阻尼自然振荡频率， ζ 是阻尼比。其响应特性取决于 ω_n 和 ζ 参数。方程 1.7 所示的二阶系统输入如下所示的阶跃信号：

$$R(s) = \frac{R_0}{s} \quad (1.8)$$

其中阶跃幅值 $R_0 = 1.5$ 。该信号下系统的响应如图 1.2, 其中红色轨迹是响应输出 $y(t)$ ，蓝色轨迹为阶跃输入 $r(t)$ 。

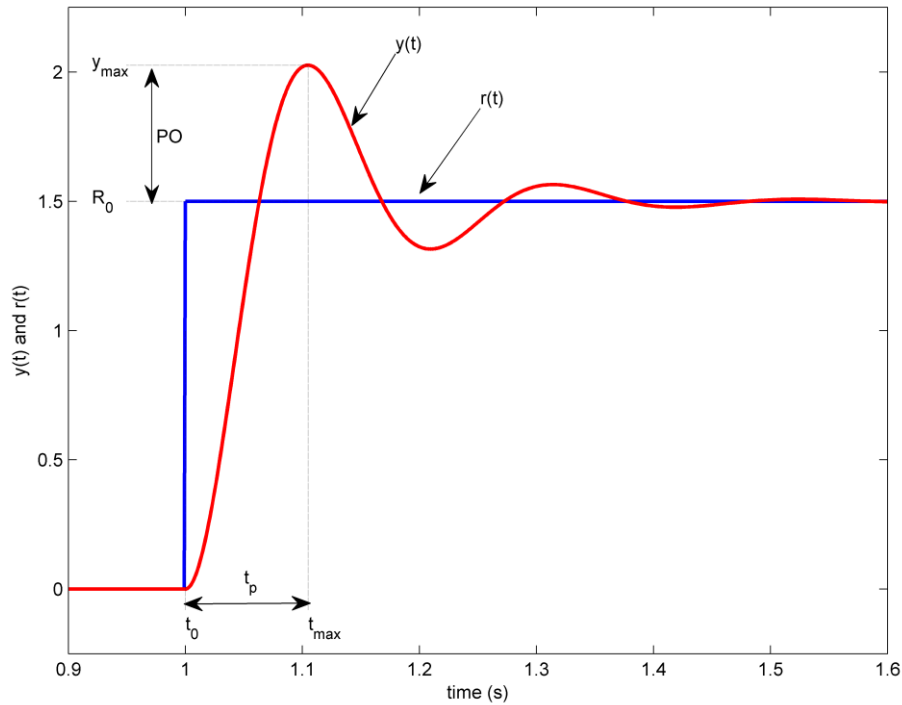


图 1.2: 标准二阶系统阶跃响应

在时刻 t_{max} ，响应的最大值由变量 y_{max} 表示。对于响应与图 1.2 类似的系统，超调量百分比计算式如下：

$$PO = \frac{100(y_{max} - R_0)}{R_0} \quad (1.9)$$

在二阶系统中，超调量的大小仅取决于阻尼比参数，且可以使用下式计算：

$$PO = 100e^{-\pi\zeta / \sqrt{1-\zeta^2}} \quad (1.10)$$

从初始起跳时刻 t_0 开始，响应达到最大值所需的时间为

$$t_p = t_{max} - t_0. \quad (1.11)$$

这称为系统的峰值时间，它取决于系统的阻尼比和固有频率。可由如下解析表达式得到：

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \xi^2}} \quad (1.12)$$

一般来讲，阻尼比影响响应形状而固有频率影响响应速度。

1.3 位置控制虚拟仪器

在本实验中，首先使用 PID 控制跟踪参考位置方波。然后，通过直接手动交互或使用 VI 中的控制开关产生的模拟量研究 PD 和 PID 对干扰的作用。用于位置控制的 LabVIEW™ 虚拟仪器如图 1.3 所示。

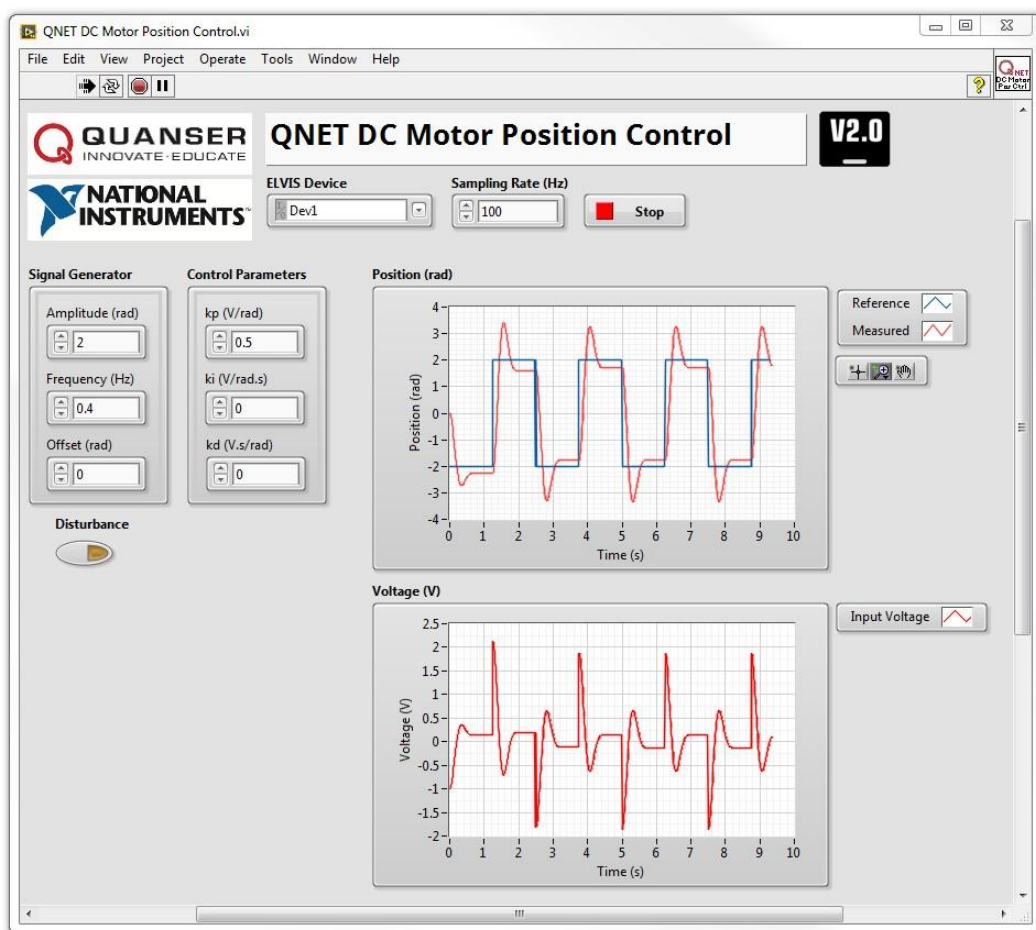


图 1.3: 直流电机位置控制虚拟仪器

有关[运动控制](#)，[控制理论](#)和[PID](#)的更多信息，详见[维基百科](#)。

2 实验练习

1. 由下列参数计算期望峰值时间 t_p 和超调量 PO 百分比

- $\zeta = 0.60$,
- $\omega_0 = 25.0 \text{ rad/s}$.

可选: 您还可以设计一个 VI, 用于仿真 PD 控制直流电机一阶模型, 并用它计算峰值时间和超调量。

2. 假设模型稳态增益 $K = 26 \text{ V/rad}$, 时间常数 $\tau = 0.145 \text{ s}$, 在满足上述指标要求下, 分别计算比例和微分控制增益 k_p 和 k_d 。

3. 打开 QNET DC Motor Position Control.vi. **确保选择正确的设备 Device** 。

4. 运行 VI。可以看到直流电机来回旋转。

5. 信号发生器 *Signal Generator* 部分参数设置:

- 振幅 Amplitude (rad) = 0.50
- 频率 Frequency (Hz) = 0.40
- 偏移量 Offset (rad) = 0.00

6. 在控制参数 Control Parameters 中, 将 PD 增益设置为步骤 2 中得到的值。在 PD 控制器中设置 $b_{sd} = 0$ 。

7. 在位置 Position (rad) 示波器中, 获取位置响应曲线, 在电压 Voltage(V) 示波器中获取控制信号曲线。

8. 测量实际位置响应的峰值时间和超调量。性能是否满足要求?

9. 更改参数 ζ 对测量的位置响应和产生的控制增益有什么影响?

10. 改变参数 ω_0 对测得的位置响应和产生的控制增益有什么影响?

11. 点击停止 Stop 按钮停止 VI。

定性的比例微分（PD）位置控制



本手册和设计提供的 VI 用于 NI ELVIS II(+)的第二代黑色 Quanser QNET2.0 DC Motor Board 。
可以通过 VI 右上角的小黑色符号来识别第二代 VI。这些 VI 不能用于蓝色的第一代电路板。

内容

- QNET DC Motor 位置控制
- 比例微分(PD)补偿器

必备条件

- QNET DC Motor 已经安装并测试。详细信息请参考 QNET DC Motor 快速启动指南。
- 已有 QNET DC Motor 用户手册。
- 熟悉 LabVIEW™的基本操作。

1 背景

电机位置控制是一种利用微分作用优点的常见方法。该实验集中于定性的比例 - 微分位置控制，并使用与图 1.1 类似的控制器的。

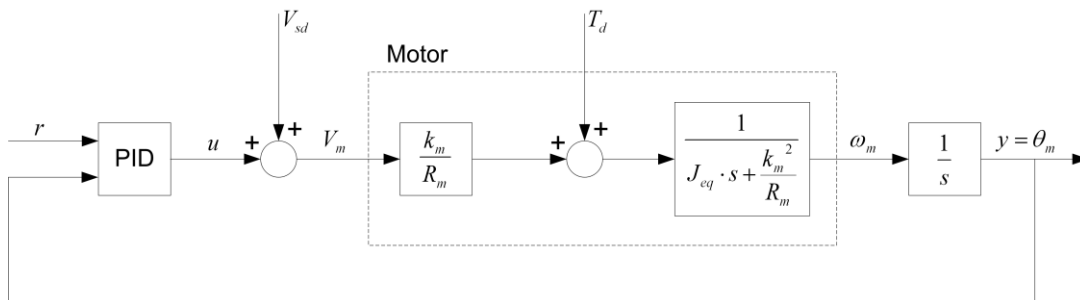


图 1.1: QNET DC Motor PI 闭环框图

图 1.1 所示的 PID 模块内 PID 传递函数为：

$$u = k_p(b_{sp}r(t) - y(t)) + k_i \int_0^t (r(t) - y(t))d\tau + k_d(b_{sd}\dot{r}(t) - \dot{y}(t)) \quad (1.1)$$

其中 k_p 是位置比例控制增益， k_d 是微分控制增益， k_i 是积分控制增益， b_{sp} 是参考位置 $r(t)$ 上的设定值加权， b_{sd} 是 $r(t)$ 的速度参考值上的设定加权值。

图 1.1 中标记 **Motor** 的虚线框是以反电势常数 k_m ，电机电枢电阻 R_m 和电机转子的等效转动惯量 J_{eq} 相关的电机模型。施加到惯性轮的直接干扰用转矩变量 T_d 表示，且模拟干扰电压用变量 V_{sd} 表示。

1.1 PD 控制设计

首先使用 PD 控制来分析控制电机位置的行为。通过在 PID 控制方程 1.1 中设置 $k_i = 0$ 并采用其拉普拉斯变换，PD 传递函数为：

$$u = k_p(r - y) + k_d s(b_{sd}r - y) \quad (1.2)$$

结合被控对象的位置过程模型：

$$\frac{\Theta_m(s)}{V_m(s)} = \frac{K}{s(\tau s + 1)} \quad (1.3)$$

和 PD 控制方程 1.2，给出了电机位置控制系统的闭环传递函数：

$$G(s) = \frac{K(k_p + b_{sd}k_d s)}{\tau s^2 + (1 + Kk_d)s + Kk_p} \quad (1.4)$$

1.2 位置控制虚拟仪器

用于位置控制实验的 LabVIEW™ 虚拟仪器如图 1.2 所示

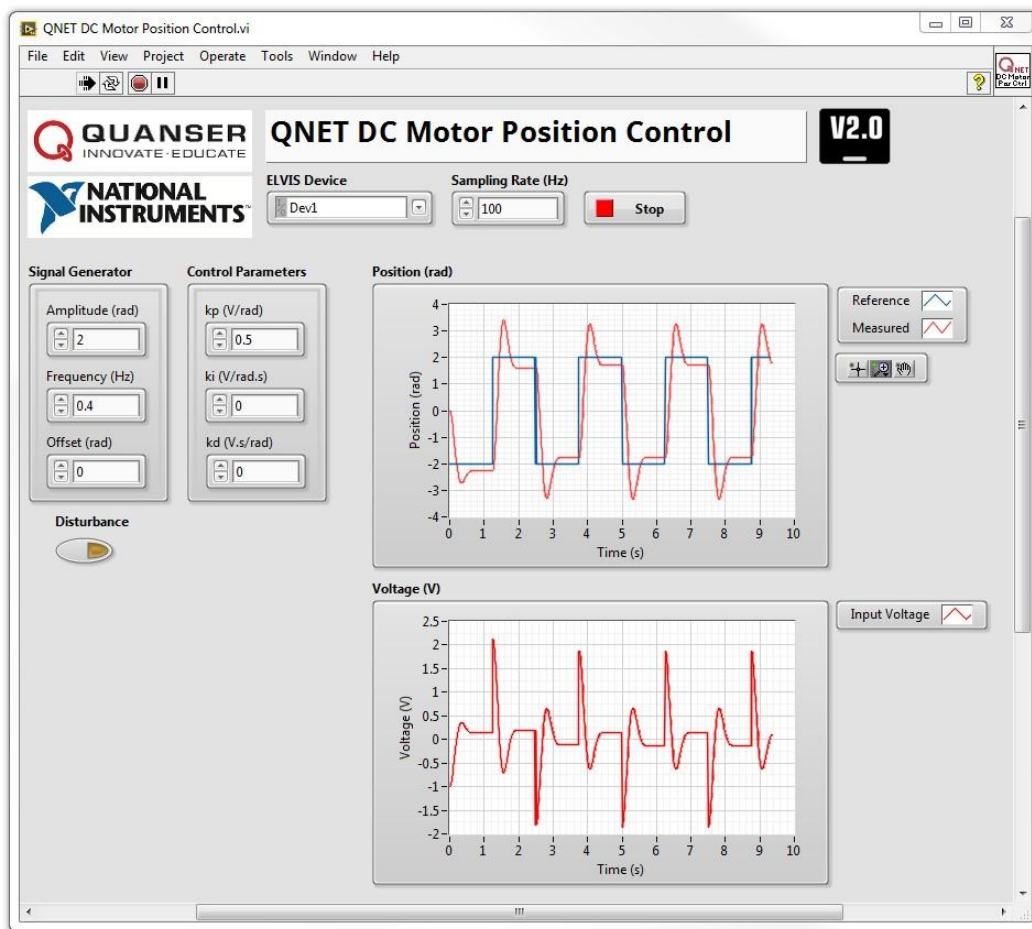


图 1.2: 用于 QNET DC Motor 位置控制虚拟仪器

有关[运动控制](#)，[控制理论](#)和 [PID](#) 的更多信息，请参阅[维基百科](#)。

2 实验练习

1. 打开 QNET DC Motor Position Control.vi. 确保选择了正确的设备 **Device**。
2. 运行 VI. 直流电机应该来回旋转，响应曲线应与图 1.2 相似。
3. 信号发生器 Signal Generator 部分设置：
 - 幅值 Amplitude (rad) = 0.50
 - 频率 Frequency (Hz) = 0.40
 - 偏移量 Offset (rad) = 0.00
4. 控制参数 Control Parameters 部分设置：
 - k_p (V/rad) = 0.50
 - k_i (V/rad.s) = 0.00
 - k_d (V.s/rad) = 0.00
5. 从 $k_p = 0.5$ V/rad 开始，以 0.25 V/rad 的步长改变比例增益 k_p 。
6. 观察位置 Position (rad)示波器内参考位置（蓝线）和实测位置（红线）的状态。解释发生了什么。
7. 设置 k_p 为 1.5 V/rad，仅用比例增益，描述系统对阶跃输入的稳态误差。
8. 以 0.01 V.s/rad 的步长增加微分增益 k_d 。
9. 观察实际位置响应随微分作用的变化。解释发生了什么。
10. 点击停止 Stop 按钮停止 VI 运行。

满足指标的 PI 速度控制



本手册和设计提供的 VI 用于 NI ELVIS II⁽⁺⁾的第二代黑色 Quanser QNET2.0 DC Motor Board 。可以通过 VI 右上角的小黑色符号来识别第二代 VI。这些 VI 不能用于蓝色的第一代电路板。

内容

- QNET DC Motor 速度控制。
- 比例积分 (PI) 补偿器设计。
- 根据性能要求设计控制策略。

必备条件

- QNET DC Motor 定性的比例积分速度控制实验。

1 背景

对于使用比例积分控制器实现直流电机的速度控制，其闭环系统框图如图 1.1 所示。

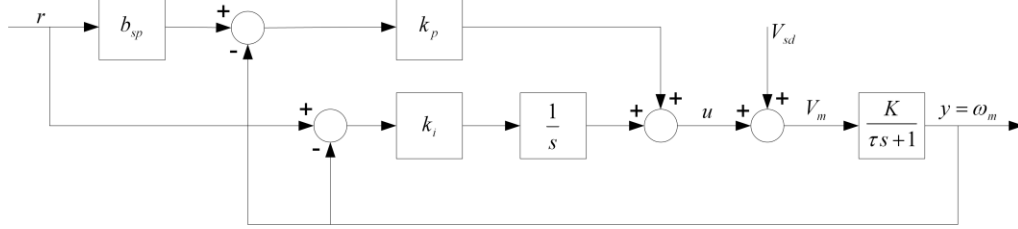


图 1.1: QNET DC Motor 比例积分闭环框图

设稳态增益为 K ，时间常数为 τ ，相应直流电机速度 - 电压关系的传递函数如下式：

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (1.1)$$

基于该传递函数来设计 PI 控制器。具有加权设定值的 PI 控制器的输入-输出关系为：

$$u = k_p (b_{sp} r - y) + \frac{k_i (r - y)}{s}, \quad (1.2)$$

其中 k_p 是比例增益， k_i 是积分增益， b_{sp} 是设定值加权值。从给定速度 r 到电机角速度 ω_m 输出的闭环传递函数为：

$$G_{\omega, r}(s) = \frac{K (k_p b_{sp} s + k_i)}{\tau s^2 + (K k_p + 1)s + K k_i} \quad (1.3)$$

标准期望闭环特征多项式为：

$$s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2, \quad (1.4)$$

其中 ω_0 是无阻尼闭环频率， ζ 是阻尼比。公式 1.3 中传递函数的分母是系统的特征方程，与公式 1.4 中所需的特征方程相比较，具有以下增益：

$$k_p = \frac{-1 + 2\zeta\omega_0\tau}{K} \quad (1.5)$$

和

$$k_i = \frac{\omega_0^2 \tau}{K} \quad (1.6)$$

可知，大的 ω_0 需要大的控制器增益值。阻尼比 ζ 和设定值加权参数 b_{sp} ，可用于调整对参考值的响应速度和超调。

QNET DC Motor 系统上没有用于测量速度的转速传感器。相反，QNET DC Motor 板具有计算编码器信号微分（即数字转速计）的电路。

1.1 峰值时间和超调

标准二阶传递函数形式如下所示：

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1.7)$$

其中 ω_n 是无阻尼自然振荡频率， ζ 是阻尼比。其响应的品质取决于 ω_n 和 ζ 参数的值。考虑等式 1.7 所示的二阶系统输入如下阶跃信号：

$$R(s) = \frac{R_0}{s} \quad (1.8)$$

其中阶跃幅值 $R_0 = 1.5$ 。该信号下系统的响应如图 1.2，其中红色轨迹是输出 $y(t)$ ，蓝色轨迹为阶跃输入 $r(t)$ 。

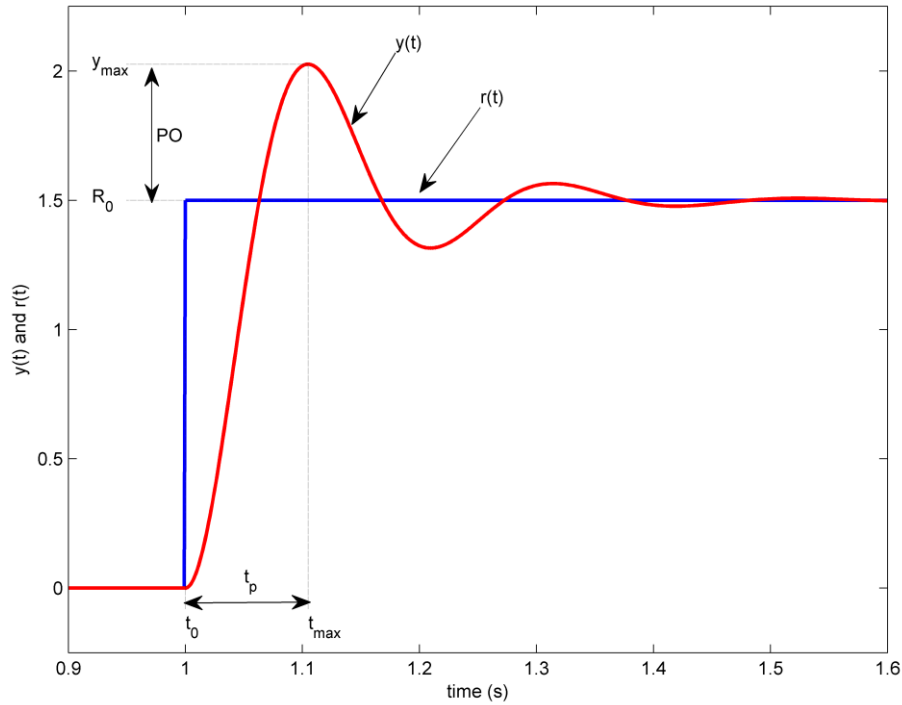


图 1.2：标准二阶系统阶跃响应

响应的最大值用变量 y_{max} 表示，在时间 t_{max} 发生。对于与图 1.2 类似的系统响应，超调量计算式如下：

$$PO = \frac{100(y_{max} - R_0)}{R_0} \quad (1.9)$$

在二阶系统中，超调量的大小仅取决于阻尼比参数，且可以使用下列方程计算：

$$PO = 100e^{-\pi\zeta / \sqrt{1-\zeta^2}} \quad (1.10)$$

从初始起跳时刻 t_0 开始，响应达到最大值所需的时间为：

$$t_p = t_{max} - t_0. \quad (1.11)$$

这称为系统的峰值时间，它取决于系统的阻尼比和固有频率，可由下式得到：

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (1.12)$$

一般来讲，阻尼比影响响应形状，而固有频率影响响应速度。

1.2 速度控制虚拟仪器

在以下实验中，您将在多种 PI 增益下跟踪方波，同时研究设定值权重的影响。用于速度控制的虚拟仪器如图 1.3 所示。

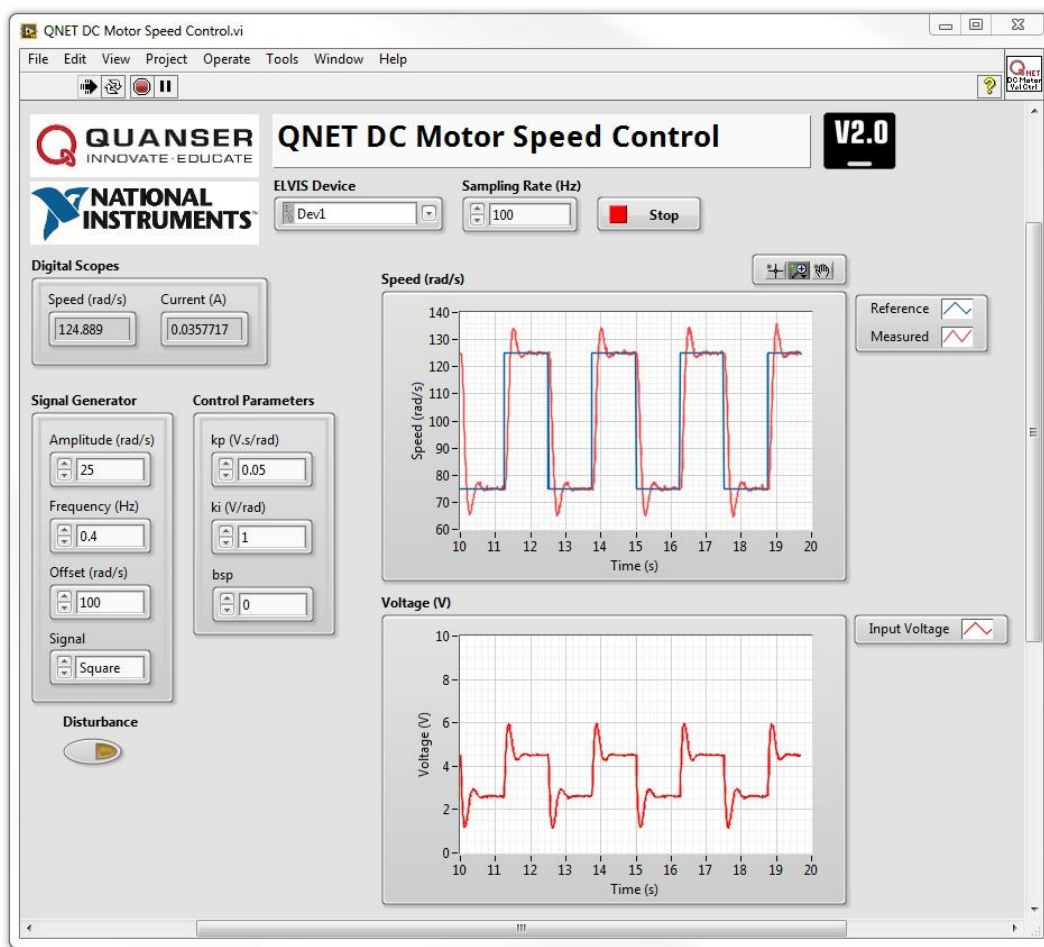


图 1.3: 用于 QNET DC Motor 速度控制虚拟仪器

2 实验练习

2.1 根据性能指标设计 PI 控制

1. 根据下列参数计算期望峰值时间 t_p 和超调量 PO:

- $\zeta = 0.75$,
- $\omega_0 = 16.0 \text{ rad/s}$.

可选: 您还可以设计一个模拟 QNET DC Motor 一阶模型的 VI, 并使用 PI 控制, 用它来计算峰值时间和超调。

2. 根据模型参数 $K = 26.0 \text{ rad/(V.s)}$ 和 $\tau = 0.145 \text{ s}$, 以及性能指标要求, 分别计算比例积分控制增益 k_p 和 k_i 。

3. 确保 QNET DC Motor Speed Control.vi 打开。选择了正确的设备 **Device**。

4. 运行 VI。直流电机开始旋转, 转速曲线应与图 1.3 相似。

5. 信号发生器 Signal Generator 部分参数设置:

- 幅值 Amplitude (rad/s) = 25.0 rad/s
- 频率 Frequency (Hz) = 0.40 Hz
- 偏移量 Offset (V) = 100.0
- 信号= ‘方波’ Signal = 'Square'

6. 在控制参数 Control Parameters 部分中, 输入步骤 2 中得到的 PI 控制增益, 并确保 bsp = 0。

7. 获取两个响应周期信号后, 通过点击停止 Stop 按钮停止 VI。

8. 获得实测速度响应。确保同时包含速度 Speed (rad/s) 和控制电压信号 Voltage (V) 曲线。

9. 测量观察到的响应的峰值时间和超调量百分比。是否满足设计要求? 如果没有, 请调整比例增益 k_p 和积分增益 k_i 以满足要求并抓取系统响应图。你使用的增益值是多少?

10. 增加 ζ 对实测的速度响应有什么影响? 控制增益怎么样?

提示: 首先考查方程 1.10。

11. 增加 ω_0 对于速度响应和已设定的控制增益有什么影响?

12. 点击停止按钮停止 VI。

2.2 设定值加权

1. 确保 QNET DC Motor Speed Control.vi 打开。确保选择了正确的设备 **Device**。

2. 运行 VI。直流电机开始旋转。

3. 信号发生器 Signal Generator 部分设置:

- 幅值 Amplitude (rad/s) = 25.0
- 频率 Frequency (Hz) = 0.40
- 偏移量 Offset (V) = 100.0

• 信号= ‘方波’ Signal = 'Square'

4. 控制参数 Control Parameters 部分设置:

- $k_p \text{ (V.s/rad)} = 0.10$
- $k_i \text{ (V/rad)} = 1.50$
- $b_{sp} = 0.00$

5. 以 0.05 的步长增加设定值加权参数 b_{sp} , 参数变化范围在 0 和 1 之间。

6. 在速度 Speed(rad/s)示波器中, 观察增加 b_{sp} 参数对所测速度信号波形的影响。解释设定值加权值的作用。

7. 点击停止 Stop 按钮停止运行 VI。

跟踪和扰动抑制



本手册和设计提供的 VI 用于 NI ELVIS II(+)的第二代黑色 Quanser QNET2.0 DC Motor Board 。可以通过 VI 右上角的小黑色符号来识别第二代 VI。这些 VI 不能用于蓝色的第一代电路板。

内容

- 速度控制：三角信号跟踪。
- 位置控制：扰动抑制。
- 比例-积分-微分(PID) 控制。

必备条件

- 满足性能指标的 QNET DC Motor PI 速度控制实验。
- 满足性能指标的 QNET DC Motor PD 位置控制实验。

1 背景

1.1 三角信号的跟踪

使用比例-积分控制器实现直流电机的转速控制, 相应闭环系统的框图如图 1.1 所示。

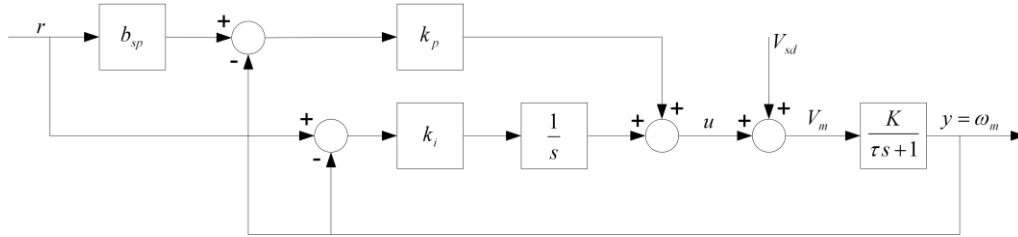


图 1.1: 直流电机 PI 闭环框图

设稳态增益为 K 和时间常数为 τ , 直流电机速度 - 电压传递函数为:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (1.1)$$

该传递函数用于设计 PI 控制器。具有设定值加权的 PI 控制器的输入-输出关系为:

$$u = k_p (b_{sp} r - y) + \frac{k_i (r - y)}{s}, \quad (1.2)$$

其中 k_p 是比例增益, k_i 是积分增益, b_{sp} 是设定值加权值。从参考速度 r 到电机角速度 ω_m 输出的闭环传递函数为:

$$G_{\omega, r}(s) = \frac{K(k_p b_{sp} s + k_i)}{\tau s^2 + (K k_p + 1)s + K k_i} \quad (1.3)$$

标准期望闭环特征多项式为:

$$s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2, \quad (1.4)$$

其中 ω_0 是无阻尼闭环频率, ζ 是阻尼比。方程 1.3 中传递函数的分母为系统的特征方程, 与式 1.4 中所需的特征方程相比较, 得到以下增益:

$$k_p = \frac{-1 + 2\zeta\omega_0\tau}{K} \quad (1.5)$$

$$k_i = \frac{\omega_0^2 \tau}{K} \quad (1.6)$$

可知, 较大的 ω_0 对应较大的控制器增益值。阻尼比 ζ 和设定值加权参数 b_{sp} , 可用于调整响应的速度和超调。

QNET DC Motor 系统上没有用于测量速度的转速计传感器。但是, QNET DC Motor 板具有计算编码器信号微分 (即数字转速计) 的电路。

1.1.1 速度控制虚拟仪器

在本实验中，讨论使用不同 PD 增益跟踪方波，以及设定值权重和积分器的影响。评估由三角参考信号引起的稳态误差。用于速度控制的虚拟仪器如图 1.2 所示。

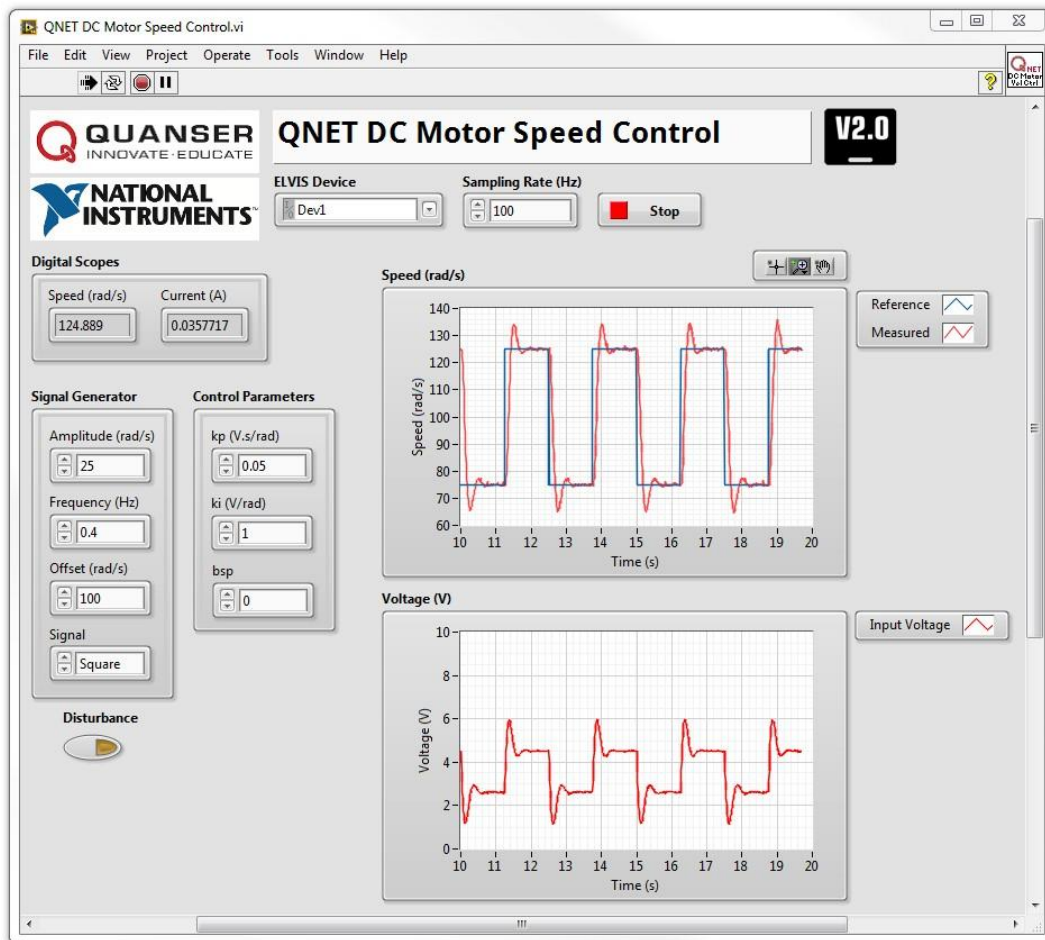


图 1.2: 直流电机速度控制虚拟仪器

1.2 负载扰动响应

图 1.3 所示的框图表示负载扰动对位置响应的影响，相应 PID 传递函数为：

$$PID(s) = k_p + k_d s + k_i \frac{1}{s} \quad (1.7)$$

且参考输入为零。

扰动到位置的闭环传递函数为：

$$G_{\theta,T}(s) = \frac{\tau s}{J_{eq} (\tau s^3 + (1 + Kk_d)s^2 + Kk_p s + Kk_i)} \quad (1.8)$$

设施加一个幅值为 T_{d0} 的阶跃扰动：

$$T_d(s) = \frac{T_{d0}}{s}, \quad (1.9)$$

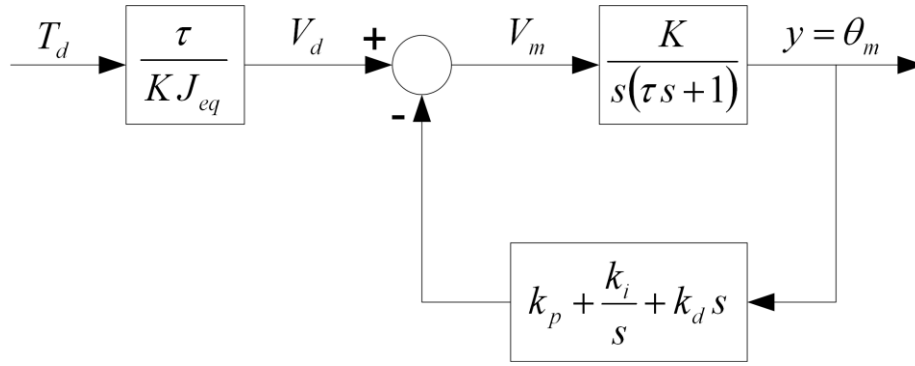


图 1.3: 负载扰动输入下的 PID 闭环框图

闭环系统的稳态误差（即最终转角）可以用终值定理得到：

$$\theta_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{T_{d0}}{s} G_{\theta,T}(s) = \lim_{s \rightarrow 0} (T_{d0} G_{\theta,T}(s)) . \quad (1.10)$$

在方程 1.8 中，当 $k_i = 0$ 时 PD 控制的稳态角为：

$$\theta_{ss_PD} = \frac{\tau T_{d0}}{J_{eq} K k_p} \quad (1.11)$$

含积分作用下的稳态角为：

$$\theta_{ss_PID} = 0 \quad (1.12)$$

因此，当系统受到干扰时，使用 PD 控制系统会观察到恒定的稳态误差。然而，当引入积分控制时，扰动被抑制，并且稳态角最终趋于零。

PID 控制器设计涉及到的三阶系统的标准特征方程为：

$$(s^2 + 2\zeta\omega_0 + \omega_0^2)(s + p_0) = s^3 + (2\zeta\omega_0 + p_0)s^2 + (\omega_0^2 + 2\zeta\omega_0 p_0)s + \omega_0^2 p_0 \quad (1.13)$$

其中 ω_0 是固有频率， ζ 是阻尼比， p_0 是一个零点。闭环 PID 传递函数的特征方程，即传递函数方程式 1.8 的分母是：

$$s^3 + \frac{K k_d + 1}{\tau} s^2 + \frac{K k_p}{\tau} s + \frac{K k_i}{\tau} \quad (1.14)$$

结合方程 1.13，PID 特征方程式 1.14 中的比例增益为：

$$k_p = \frac{\omega_0 \tau (\omega_0 + 2\zeta p_0)}{K} \quad (1.15)$$

微分增益为：

$$k_d = \frac{-1 + 2\zeta\omega_0\tau + p_0\tau}{K} \quad (1.16)$$

积分增益为：

$$k_i = \frac{\omega_0^2 p_0 \tau}{K} \quad (1.17)$$

通过改变零点 p_0 位置，改变闭环响应从扰动中恢复所需的时间。

1.2.1 位置控制虚拟仪器

在本实验中，首先考查使用 PID 控制器跟踪参考位置方波的情形。然后，通过直接手动交互或使用 VI 中的控制开关来模拟，研究分别使用 PD 和 PID 情况下扰动的影响。用于位置控制的 LabVIEW™ 虚拟仪器如图 1.4 所示。

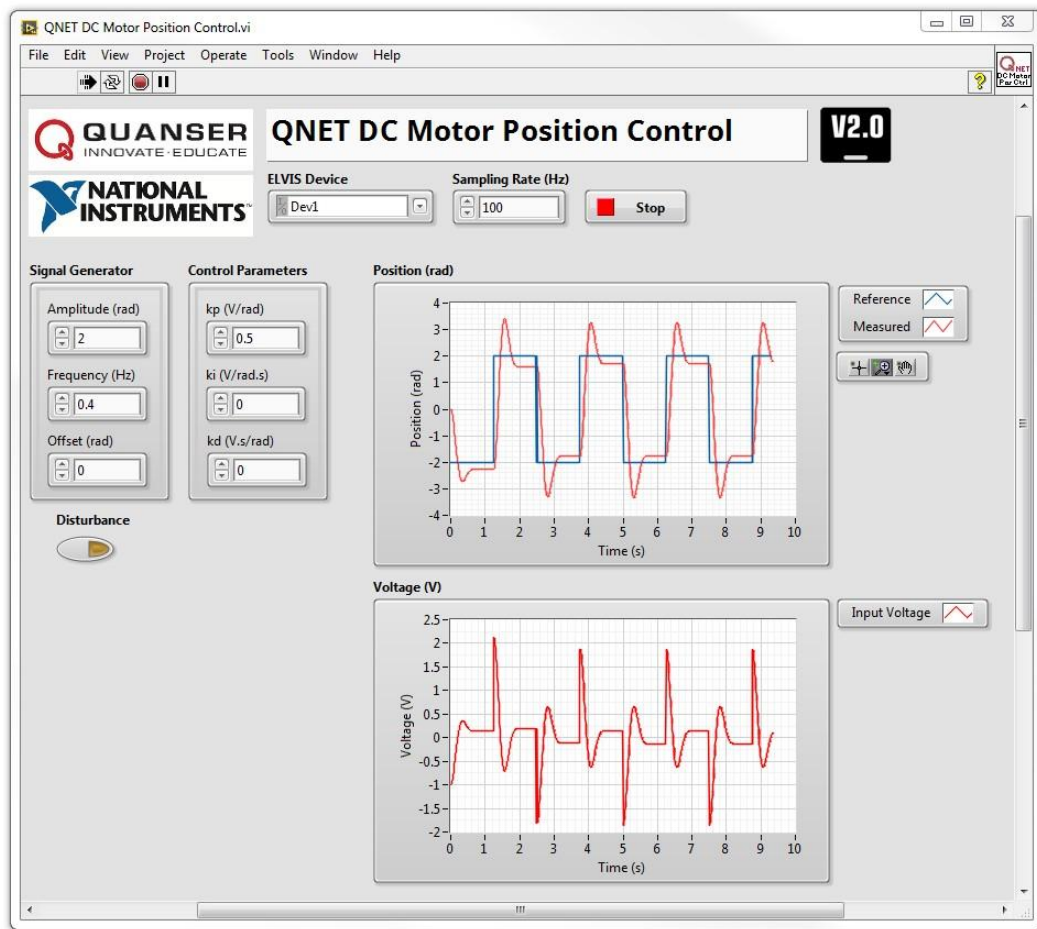


图 1.4: 直流电机位置控制虚拟仪器

有关[运动控制](#)，[控制理论](#)和 [PID](#) 的更多信息，请参阅维基百科。

2 实验练习

2.1 跟踪三角波信号

1. 打开 QNET DC Motor Speed Control.vi。确保选择了正确的设备 **Device** 。
2. 运行 VI。电机应该开始旋转。
3. 信号发生器 Signal Generator 设置：
 - 幅值 Amplitude (rad/s) = 50.0
 - 频率 Frequency (Hz) = 0.40
 - 偏移量 Offset (rad/s) = 100.0
 - 信号 = ‘锯齿波’ Signal = 'Sawtooth'
4. 控制参数 Control Parameters 部分设置：
 - k_p (V.s/rad) = 0.20
 - k_i (V/rad) = 0.00
 - b_{sp} = 1.00
5. 将参考速度和实测速度进行比较。解释一下：为什么会有跟踪误差？
6. 增加 k_i 的值，观察响应。 k_i 在 0.1 V/rad 到 1.0V/rad 间变化。
7. 增加 k_i 对实测信号的跟踪能力有什么影响？根据示波器中观察到的系统行为给出解释。
8. 点击停止 Stop 按钮停止运行 VI。

2.2 对负载扰动的响应

1. 考虑图 1.3 所示的闭环系统。如果没有参考信号，并且扰动是模拟扰动电压 V_{sd} ，给出整个系统的框图。
2. 对应模拟扰动电压，找出描述电机位置的闭环传递函数： $G_{\theta, V_{sd}}(s) = \Theta(s)/V_{sd}(s)$ 。
3. 对幅值为 V_{sd0} 模拟扰动 V_{sd} ，PID 和 PD（即 $k_i = 0$ ）控制器分别作用下，找到稳态电机转角。
4. 为模拟扰动转矩，将 $V_{sd} = V_{sd0}/s$ 和 $V_{sd0} = 3$ V 的阶跃加到电机电压上。当使用 PD 控制器，增益 $k_p = 2$ V/rad， $k_d = 0.1$ V.s/rad 时，计算电机的稳态角。当增益 $k_p = 2$ V/rad， $k_d = 0.1$ V.s/rad， $k_i = 2$ V/rad/s 时，使用 PID 控制，计算稳态角。
可选：您还可以设计一个模拟直流电机一阶模型的 VI，采用 PID 控制和阶跃扰动，并考查从响应曲线获得的稳态角度。
5. 打开 QNET DC Motor Position Control.vi。确保选择了正确的设备 **Device**。
6. 运行 VI。电机应该开始旋转。
7. 信号发生器 Signal Generator 部分设置：
 - 幅值 Amplitude (rad) = 0
 - 频率 Frequency (Hz) = 0.40
 - 偏移量 Offset (rad) = 0
8. 控制参数 Control Parameters 部分设置：
 - k_p (V/rad) = 2.0

- $k_i \text{ (V/rad.s)} = 0.0$
- $k_d \text{ (V.s/rad)} = 0.1$

9. 通过点击位于信号发生器 **Signal Generator** 下方的扰动 **Disturbance** 切换开关来施加扰动。
10. 观察扰动对实测位置的影响。当施加扰动时，粘贴电机位置响应曲线，记录所得稳态角度，并将其与步骤 4 中的计算值进行比较。
11. 关闭扰动 **Disturbance** 开关。
12. 控制参数 **Control Parameters** 部分设置：
 - $k_p \text{ (V/rad)} = 2.0$
 - $k_i \text{ (V/(rad.s)} = 2.0$
 - $k_d \text{ (V.s/rad)} = 0.1$
13. 点击扰动 **Disturbance** 拨动开关施加扰动。
14. 检查扰动对实测位置的影响。解释积分作用下扰动响应差异，并与步骤 4 中获得的结果进行比较。
15. 点击停止 **Stop** 按钮，停止 VI 运行。