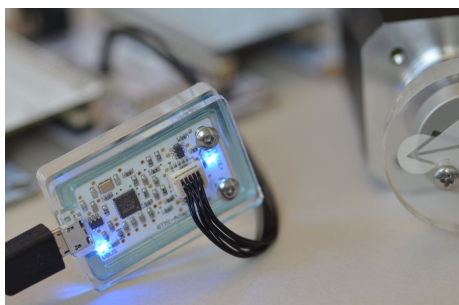




AN53: TMC4671 PI Tuning

Document Revision V1.2.2 • 2020-Feb-05

本文 逐步介绍如何使用 **USB-2-RTMI** (RTMI) 一步一步调试 **TMC4671**。通讯转换器是采用基于 **FTD FT4222H** 高速 **USB** 转 **SPI** 桥路。采用 **USB** 供电带有一个小巧的 **10** 引脚接头和 **TMC4671-EVAL** 的 **RTMI** 接口引脚相同，且具有相同的引脚分配可以在 **TMC4671** 估板上找到。**TMCL-IDE**提供软件工具用于调试不同控制环路。因此，**RTMI** 是调试，监控和系统配置的最简便的方式。

Contents

1 Items used	2
2 USB-2-RTMI Driver Installation	3
3 Basic Configuration	3
4 Tuning	3
4.1 Overview	3
4.2 Limits	5
5 Tuning of the current loop	5
5.1 Torque/Flux Tuning Tool (Open Loop)	5
5.2 Step Response Toolbox (Closed Loop)	13
5.3 Bode Plot	15
6 Tuning of the velocity loop	18
7 Tuning of the position loop	22
7.1 Step Response Tool	22
7.2 Motion Controller	25
8 Summary	27
9 Revision History	28



1 Items used

- 直流无刷伺服电机, (e.g. [QBL4208-61-04-013-1024-AT](#))
- [TMC4671-EVAL-Kit](#)
- [USB-2-RTMI](#)
- [TMCL-IDE \(3.0.24\)](#)
- 电源(24V)
- Micro-USB通讯线缆
- Mini-USB通讯线缆

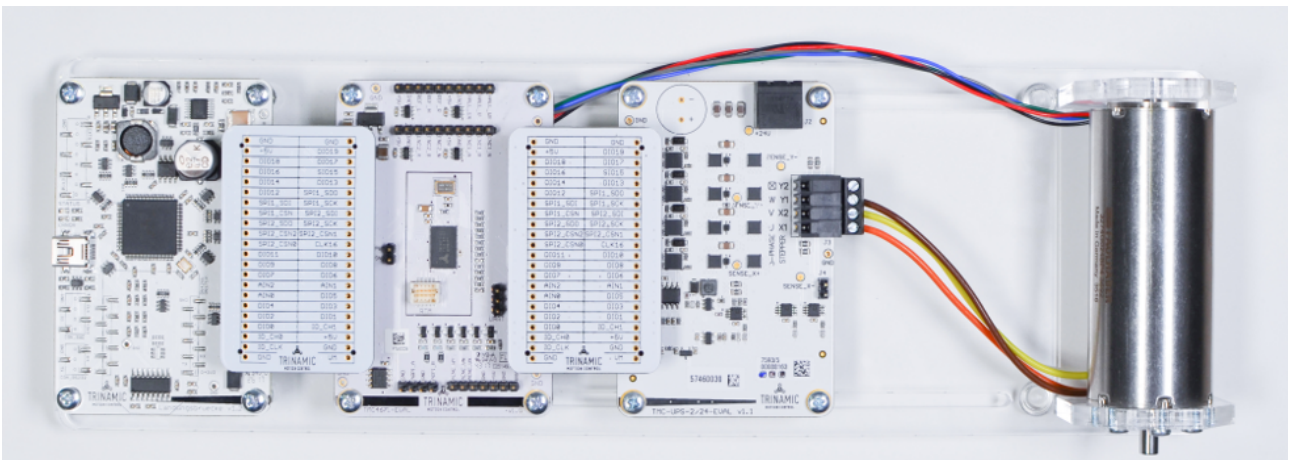


Figure 1: TMC4671-EVAL套件和BLDC机

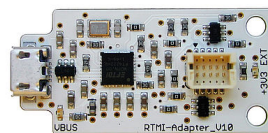


Figure 2: USB-2-RTMI



2 USB-2-RTMI Driver Installation

参考 [USB-2-RTMI指南](#) 完成驱动安装。

3 Basic Configuration

在使用调试工具之前，必须先配置 TMC4671（例如，使用 *TMC4671 Wizard*）。

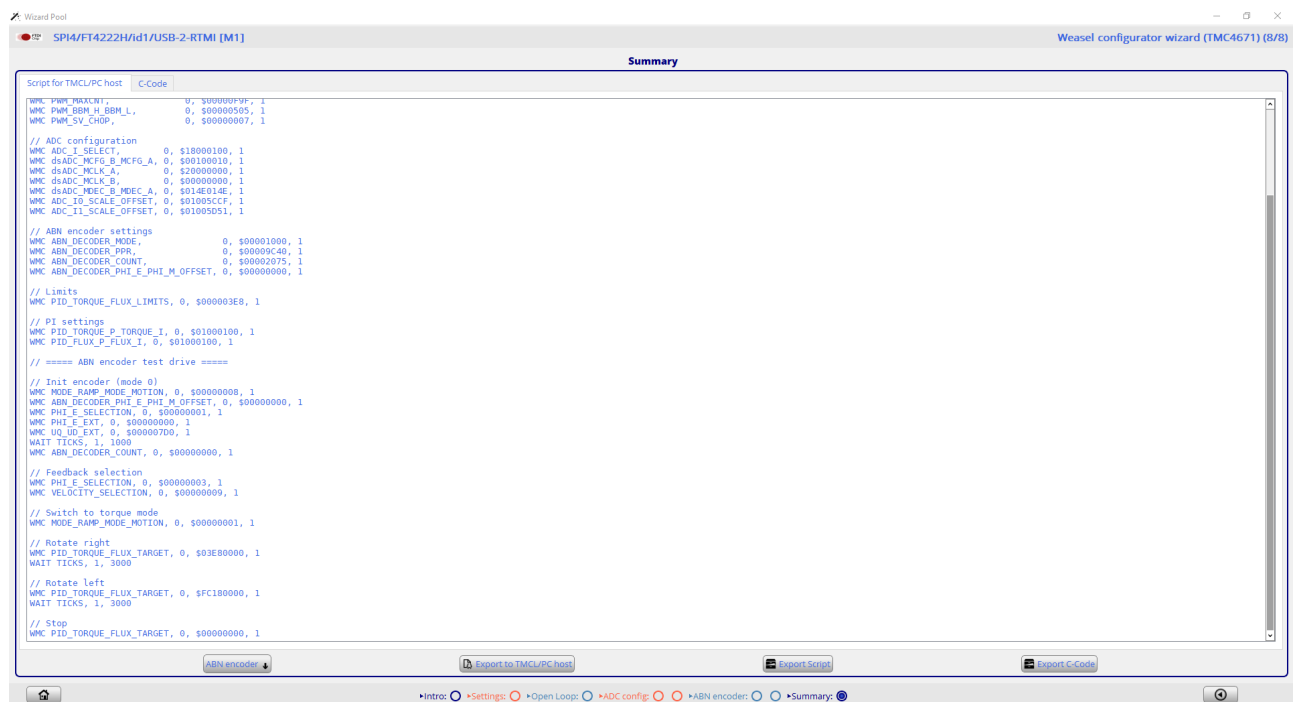


Figure 3: TMCL-IDE: TMC4671 Wizard - 配置代码

在完成基本的参数配置之后，可以保存为C代码或.tpc脚本

- 在摘要中（Summary）选择ABN编码器
- 使用 *Export Script* 导出脚本

4 Tuning

4.1 Overview

TMC4671支持三种主要的操作模式，它们需要进行PI配置：

- current/torque mode - 电流/力矩模式
- velocity mode - 速度模式
- position mode - 位置模式

每个模式都可以通过PI对每个环路进行调试。如下图概述：



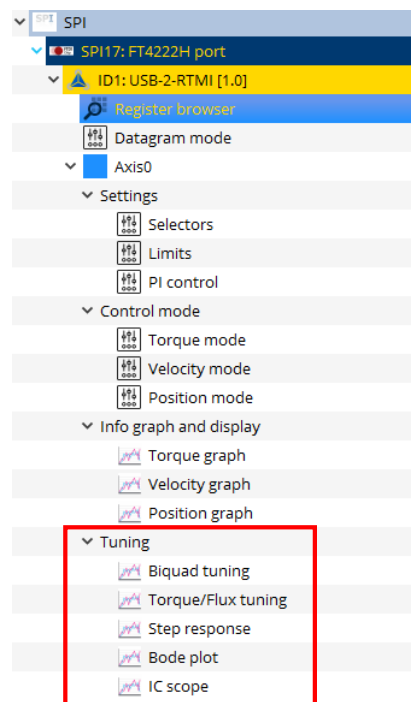


Figure 5: PI tuning tools

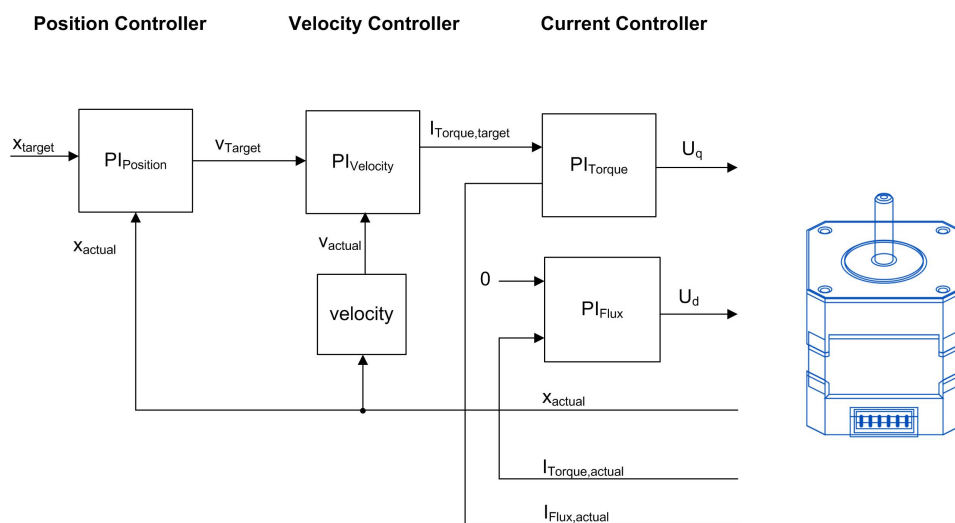


Figure 4: TMC4671 control loops

这是一个串联的环路，因此外环依赖内环的调优。例如，在使用速度环之前必须先配置电流环。为每个PI控制器的调整提供了软件工具。在TMCL-IDE中，可以通过 Tuning Group 访问这些调试工具 调整工具包括：

- Biquad tuning: 用于过率每个循环的目标值
- Torque/Flux tuning: 通过开环阶跃响应识别PI参数
- Step response: 适应所有控制回路的闭环阶跃响应



- Bode plot: 所有环路的波特图
- IC scope: 监控，读出寄存器值与PWM频率

4.2 Limits

- 在使用调试工具之前，建议将输出电压设置为最大（设置 PIDOUT_UQ_UD_LIMITS = 32767 置）。对于步进来说默认值就可以了。
- 将 PID_TORQUE_FLUX_LIMITS 设置为应用中所允许的最大电流数值。
- 设置 PID_POSITION_LIMIT_HIGH = 2 147400 000
- 设置 PID_POSITION_LIMIT_LOW = -2 147400 000

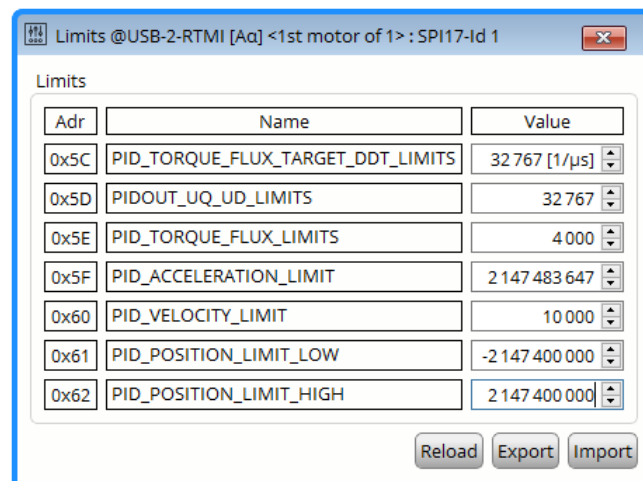


Figure 6: TMCL-IDE: TMC4671 限制

5 Tuning of the current loop

电流环由两个控制环路组成：一用于扭矩（电流），另一用于磁通（电流）。都可以使用RTMI工具在 *Torque Flux / Tuning* 工具和 *Step response* 工具调整。Torque转矩/Flux磁通工具在开环模式下确定PI参数。

5.1 Torque/Flux Tuning Tool (Open Loop)

Torque Flux调试工具会通过识别电机参数自动确定PI参数的起始值。在此过程中，设置电压阶跃并评估电流阶跃响应。只有磁通量电流被激发到最小/在这个调整阶段没有运动。建议使用25kHz的PWM频率以获得最好的识别结果。

1. TMC4671-EVAL连接到RTMI和PC。
2. 打开“Torque/Flux Tuning Tool”。
3. 单击“Start”按钮开始整定
4. 给出了电流对电压阶跃的响应，以及系统的辨识结果



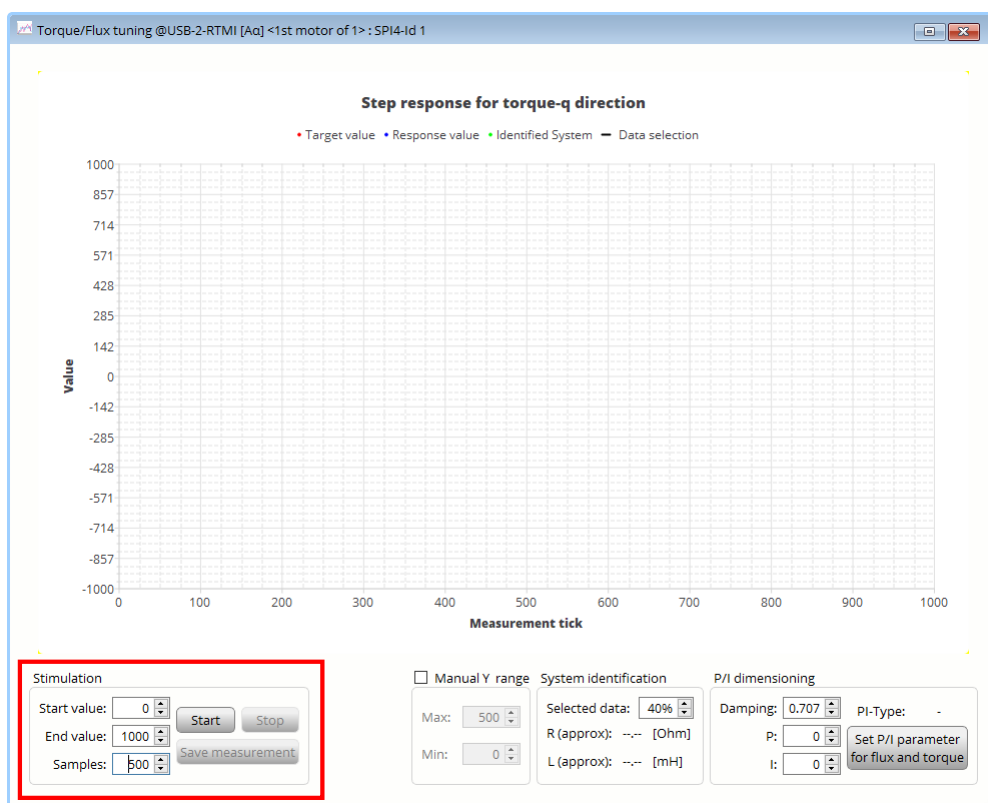


Figure 7: 配置和开始阶跃响应



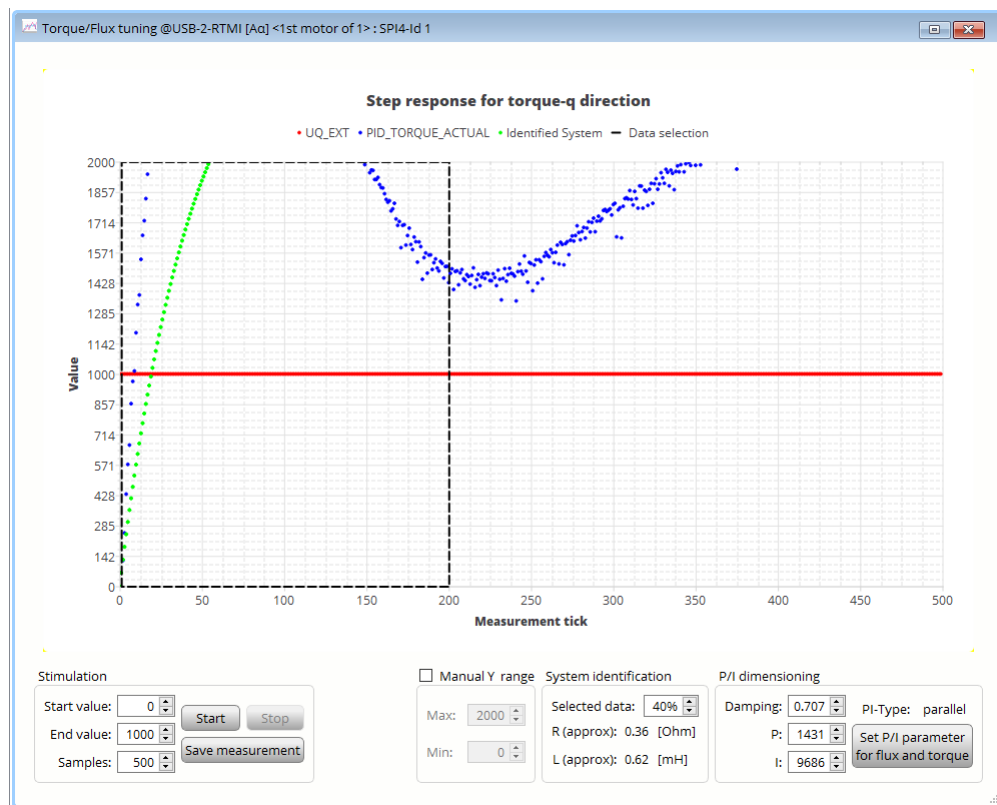


Figure 8: 第一步反应

5. 检查和手动调整Y范围，以获得更好的视图
6. 单击“Start”按钮重新识别系统，如果电机匹配一致，将会给出更好的识别结果
7. 如果需要，调整所需要的电脑显示窗口。在大多数情况下，默认设置将提供良好的结果。- 动态阶跃响应被涵盖在识别区（虚线框内）
 - 动态阶跃响应应覆盖在识别区域（虚线框）中



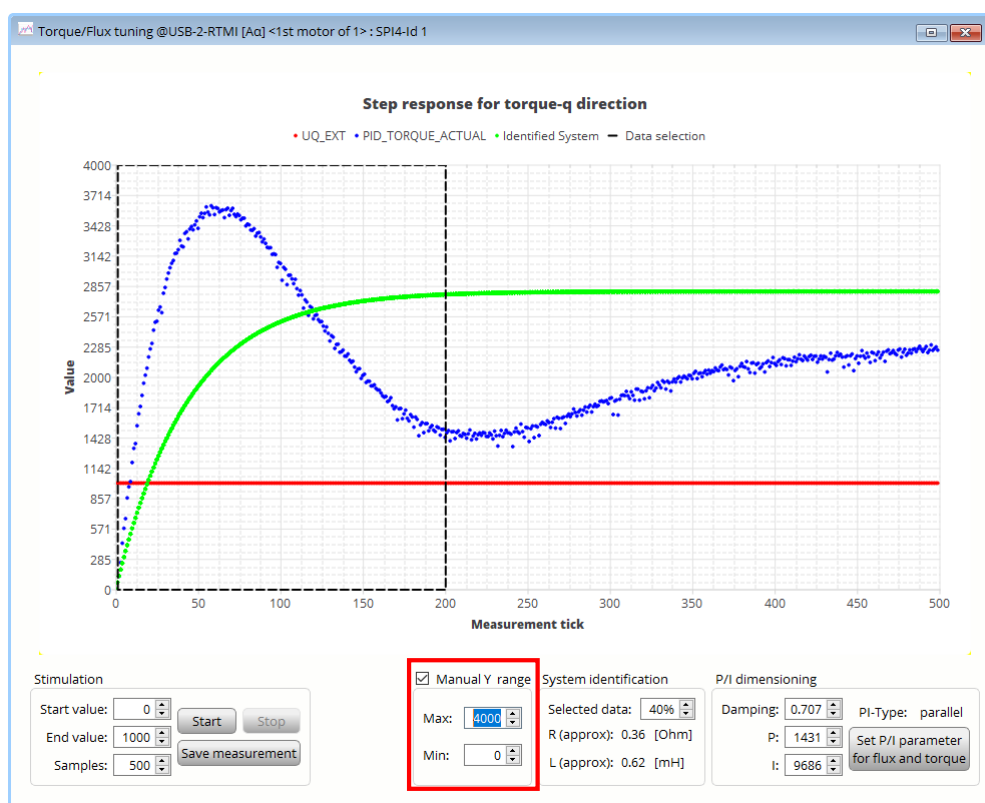


Figure 9: 调整 Y 范围



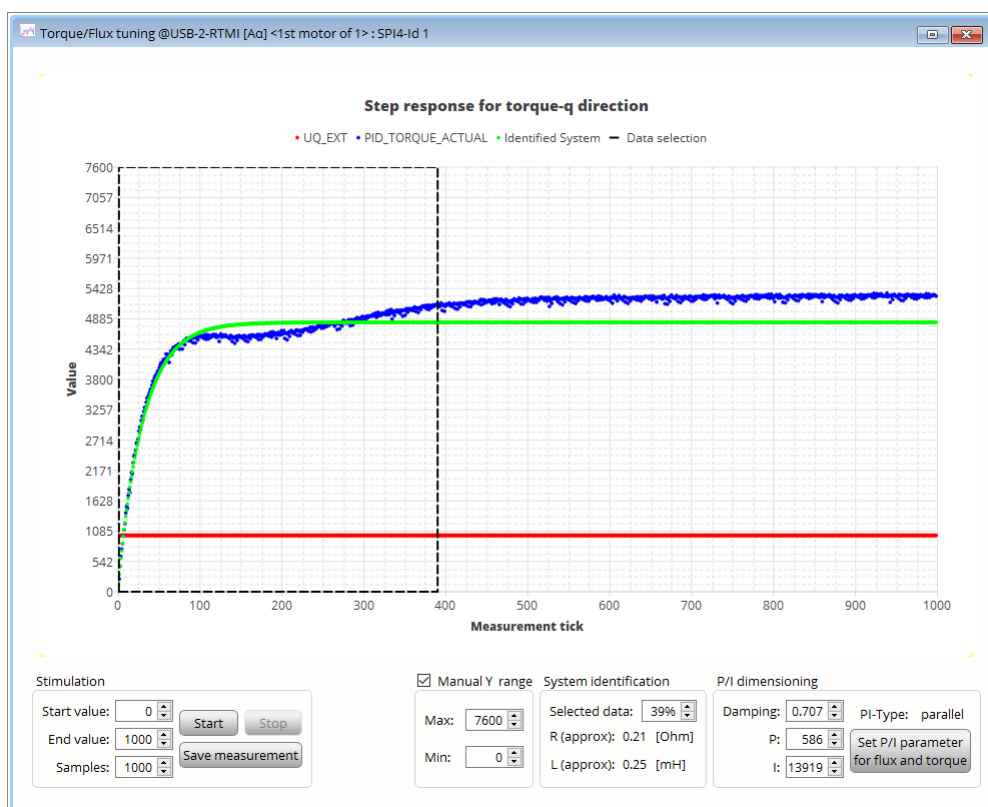


Figure 10: 阶跃响应：识别区域好

- 在图 11 阶跃响应没有完全涵盖.识别区域太小。



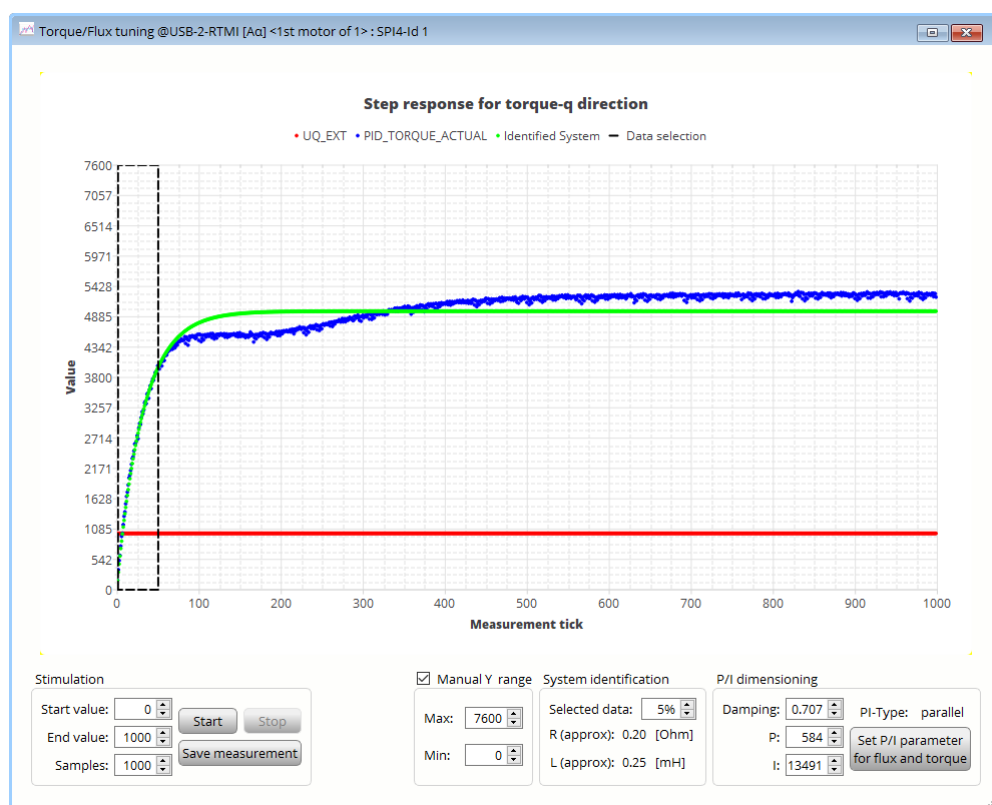


Figure 11: 阶跃响应:标识区域太小

- 在图 12 中，标识区域太大



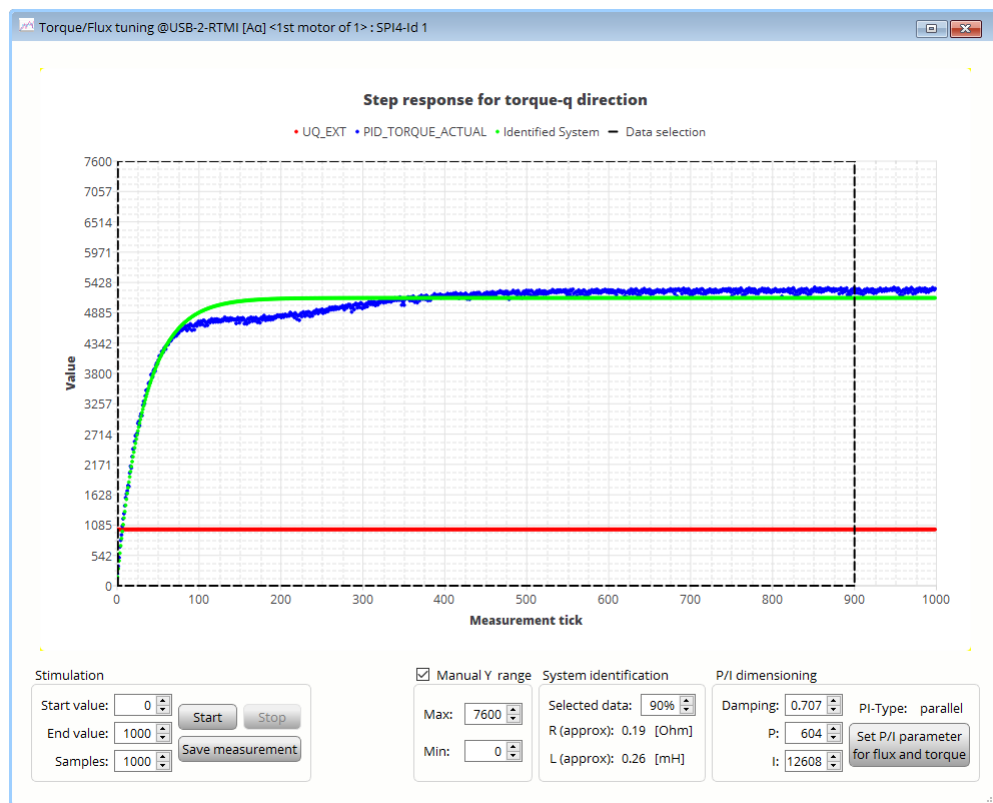


Figure 12: 阶跃响应：识别区域太大

8. 将识别出的PI值写入当前控制器

- 使用以下按钮将 PI 值更新到电流控制器

Set P/I parameter
for flux and torque

- 注意:对于非常高的值标识 I-parameter显示为0. 在这种情况下, 需要手动设置I参数 (如.设置 18000)。
- 用PI控制框确认新的 PI 值.必须使用 Reload 按钮更新值。



The screenshot shows a software window titled "PI control @USB-2-RTMI [Aq]". It contains three sections for configuring PID parameters:

- Current control:** A table with 4 rows. The first two rows are grouped under address 0x56, and the next two under 0x54. The parameters are PID_TORQUE_I (12488), PID_TORQUE_P (632), PID_FLUX_I (12488), and PID_FLUX_P (632).
- Velocity control:** A table with 2 rows grouped under address 0x58. The parameters are PID_VELOCITY_I (0) and PID_VELOCITY_P (0).
- Position control:** A table with 2 rows grouped under address 0x5A. The parameters are PID_POSITION_I (0) and PID_POSITION_P (0).

At the bottom of the window are three buttons: "Reload", "Export", and "Import".

Adr	Name	Value
0x56	PID_TORQUE_I	12488
	PID_TORQUE_P	632
0x54	PID_FLUX_I	12488
	PID_FLUX_P	632

Adr	Name	Value
0x58	PID_VELOCITY_I	0
	PID_VELOCITY_P	0

Adr	Name	Value
0x5A	PID_POSITION_I	0
	PID_POSITION_P	0

Figure 13: PI Parameter



5.2 Step Response Toolbox (Closed Loop)

在前一步中，力矩/磁通电流环的PI参数是在开环模式下被识别到的。现在，阶跃响应工具将用于分析闭环行为。

1. 打开 Step response toolbox

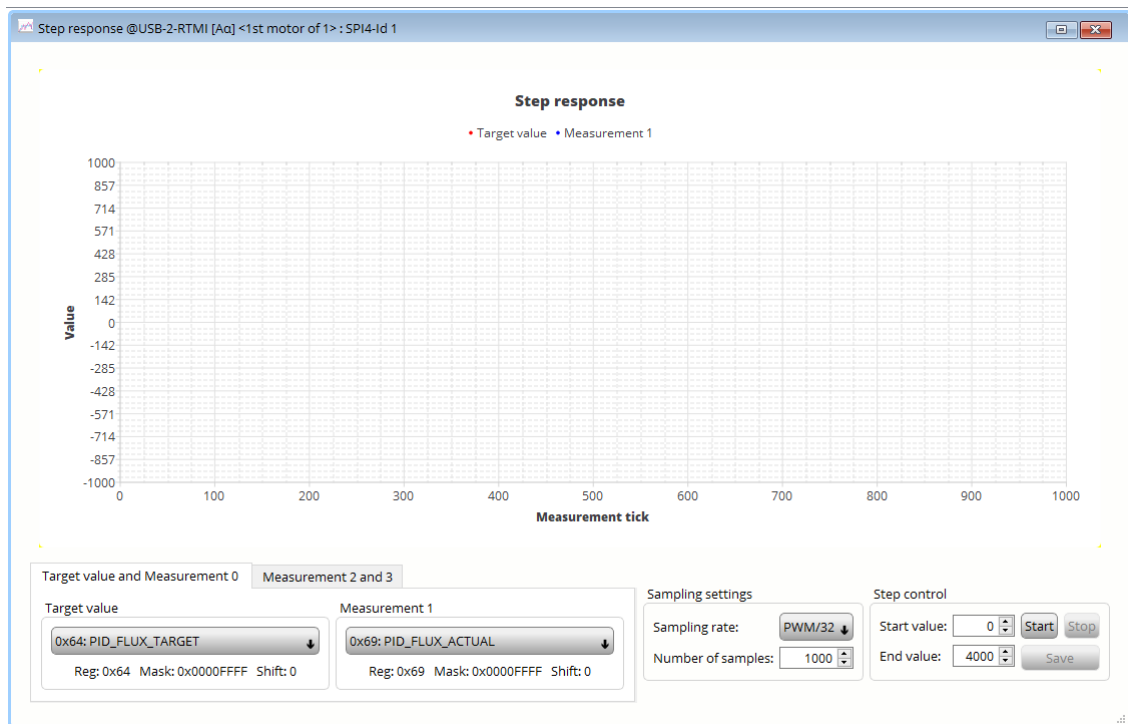


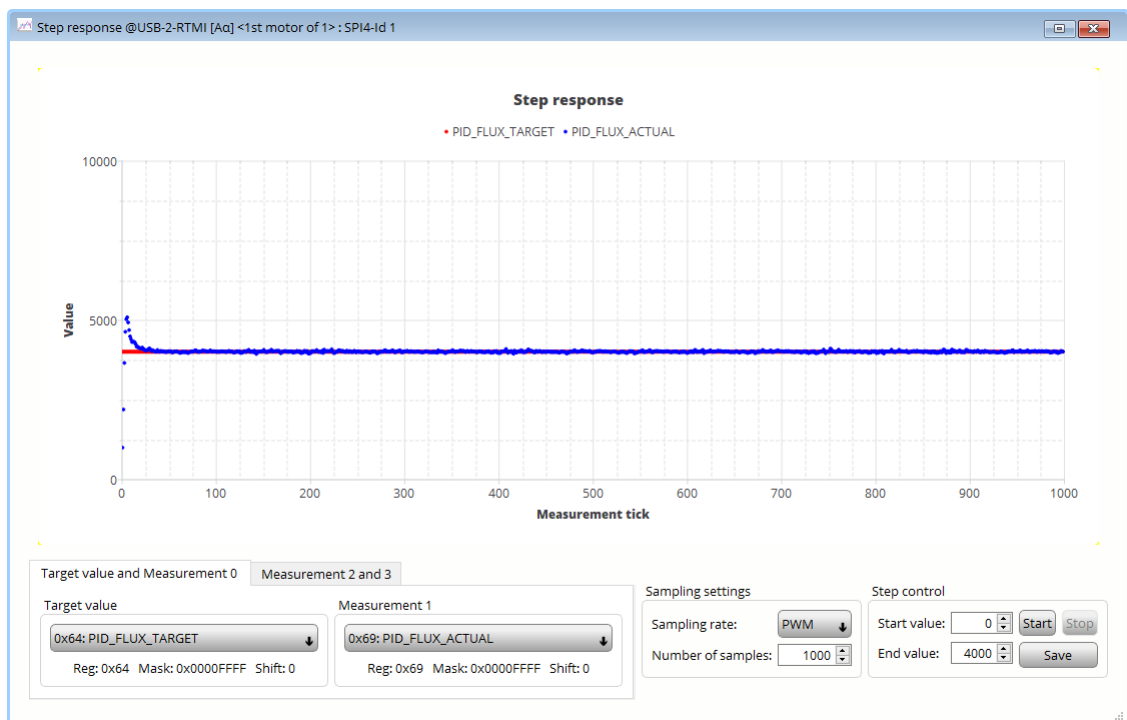
Figure 14: step response toolbox

2. 配置电流控制的磁通电流设置

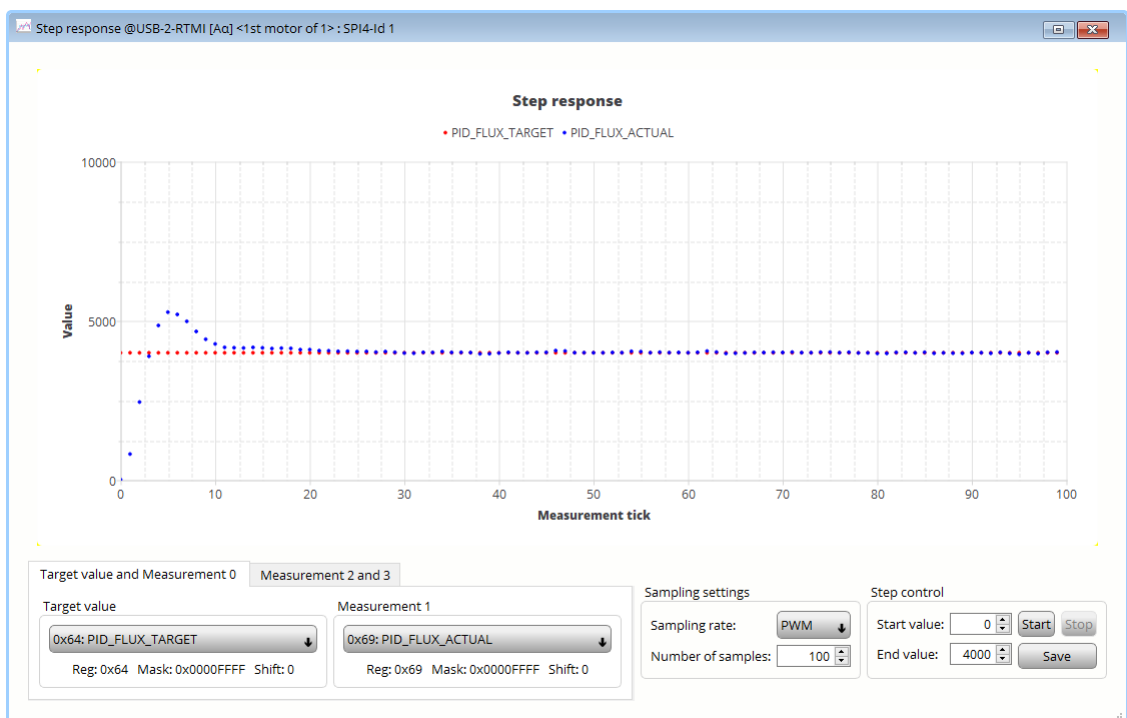
- 目标值/Target value: 0x64 PID_FLUX_TARGET
- 测量值/Measurement 1: 0x69 PID_FLUX_ACTUAL
- 采样频率/Sampling rate: PWM
- 下一步骤
 - 设置 *Start value* = 0
 - 确定最终的磁通量 flux target current 目标值(这里数值4000)
- 使用 **Start** 按钮启动阶跃响应step response

3. 实际电流和目标电流显示出来





4. 降低采样率以获得更好的效果



5. 通过修改不同的 P 和 I 优化性能

6. 从步骤 2 开始重复，修改 PID_TORQUE_TARGET, PID_TORQUE_ACTUAL。



5.3 Bode Plot

波特图工具用于确认电流环动态性能。

1. 打开 *Bode Plot*
2. 选择 *1: torque control loop*
3. 开始 measurement 通过单击 *Start* 按钮 (其他设置保持默认值)
4. 对比的例子: 下面 2 个测量显示调节和没有调节使用默认 PI 参数下的波特图.
5. 默认 PI 数

Current control		
Adr	Name	Value
0x56	PID_TORQUE_I	256
	PID_TORQUE_P	256
0x54	PID_FLUX_I	256
	PID_FLUX_P	256

Velocity control		
Adr	Name	Value
0x58	PID_VELOCITY_I	10
	PID_VELOCITY_P	400

Position control		
Adr	Name	Value
0x5A	PID_POSITION_I	0
	PID_POSITION_P	100

Reload Export Import

Figure 15: PI 参数



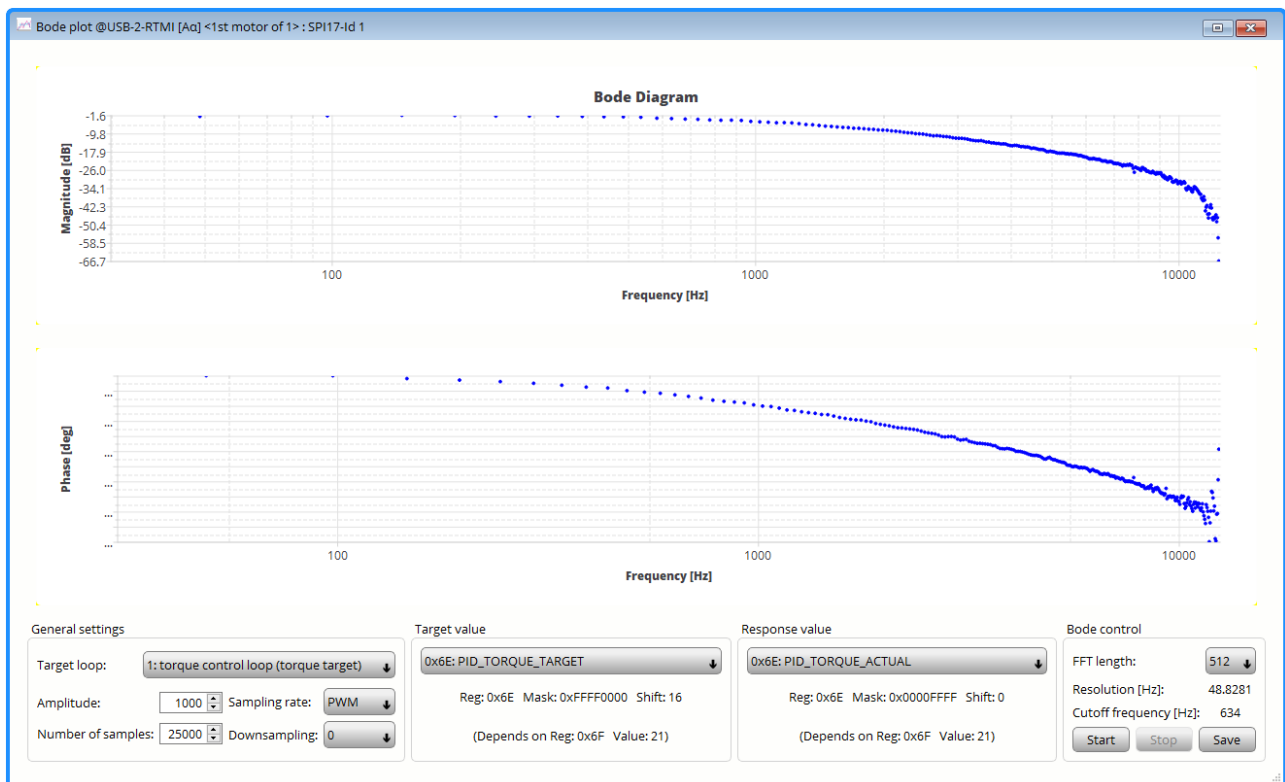


Figure 16: 默认 PI 的波特图

6. 调整 PI 参数

The figure shows a window for configuring PI control parameters. It is divided into three sections: Current control, Velocity control, and Position control. Each section contains a table of parameters with their addresses, names, and values.

Adr	Name	Value
0x56	PID_TORQUE_I	12858
	PID_TORQUE_P	596
0x54	PID_FLUX_I	12858
	PID_FLUX_P	596
0x58	PID_VELOCITY_I	10
	PID_VELOCITY_P	400
0x5A	PID_POSITION_I	0
	PID_POSITION_P	100

Buttons: Reload, Export, Import

Figure 17: PI 参数



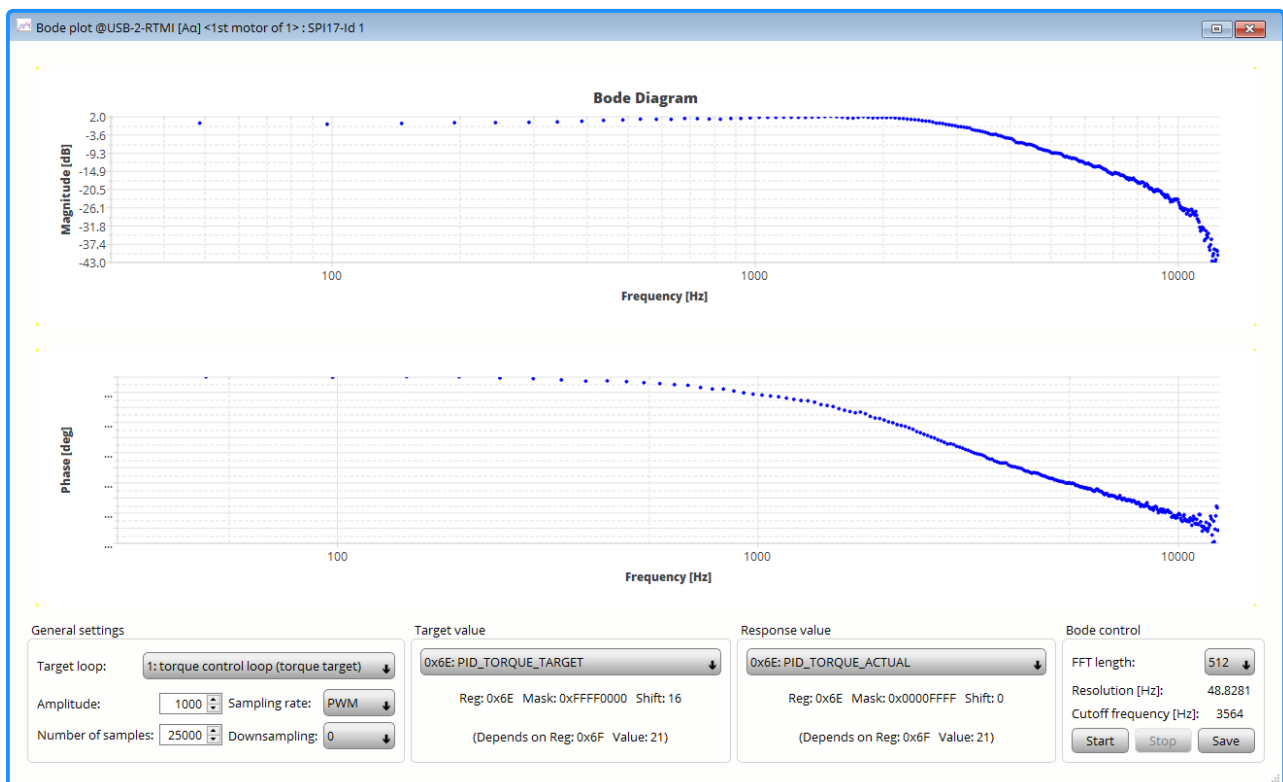


Figure 18: 调整过PI之后的波特图

7. 调谐PI后的控制系统具有较高的截止频率，因此具有较高的动态性能



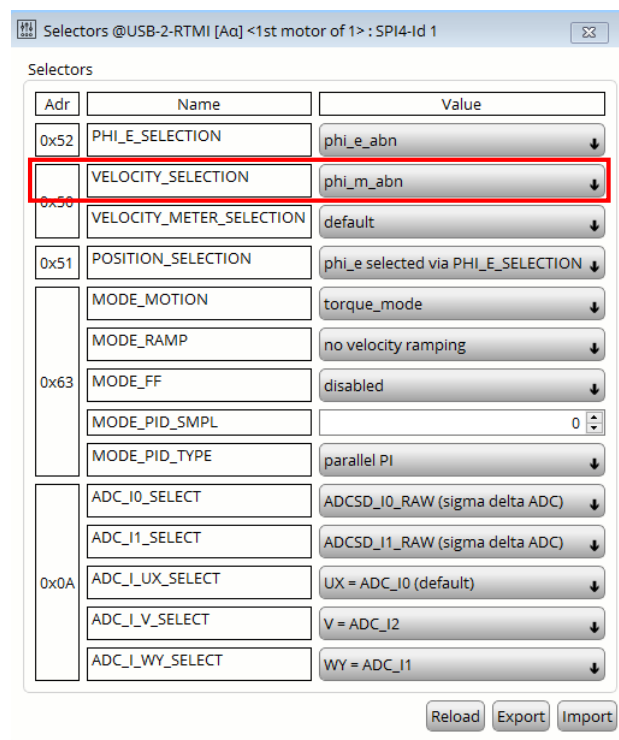


Figure 19: Selectors: Velocity Unit 选择 - 速度单位

6 Tuning of the velocity loop

这个章节介绍速度环调节, 前提条件是电流环已经被调节完成。为了调整速度环 PI 参数, 请使用 step response tool (closed loop) 闭环阶跃响应工具

1. 为了方便速度单位确认, 在 *Selectors* toolbox 里的 VELOCITY_SELECTION (0x52) 需要从 phi_e_selection 设置为 phi_m_abn。

- phi_m: 机械速度显示和计算的单位是RPM (每分钟转数)
- phi_e: 电气速度显示和计算的单位是电周期

2. 设置速度环的 PI 参数

开始时设置一个比较低的 P数值; set I = 0

- 0x58: PID_VELOCITY_I = 0
- 0x58: PID_VELOCITY_P = 100



PI control @USB-2-RTMI [Aq]

Current control

Adr	Name	Value
0x56	PID_TORQUE_I	12 858
	PID_TORQUE_P	596
0x54	PID_FLUX_I	12 858
	PID_FLUX_P	596

Velocity control

Adr	Name	Value
0x58	PID_VELOCITY_I	0
	PID_VELOCITY_P	100

Position control

Adr	Name	Value
0x5A	PID_POSITION_I	0
	PID_POSITION_P	0

Reload Export Import

Figure 20: PI 数值

3. 打开 *Step Response tool box*
4. 使用阶跃响应的实例配置
5. 单击 **Start** 按钮开始阶跃响应

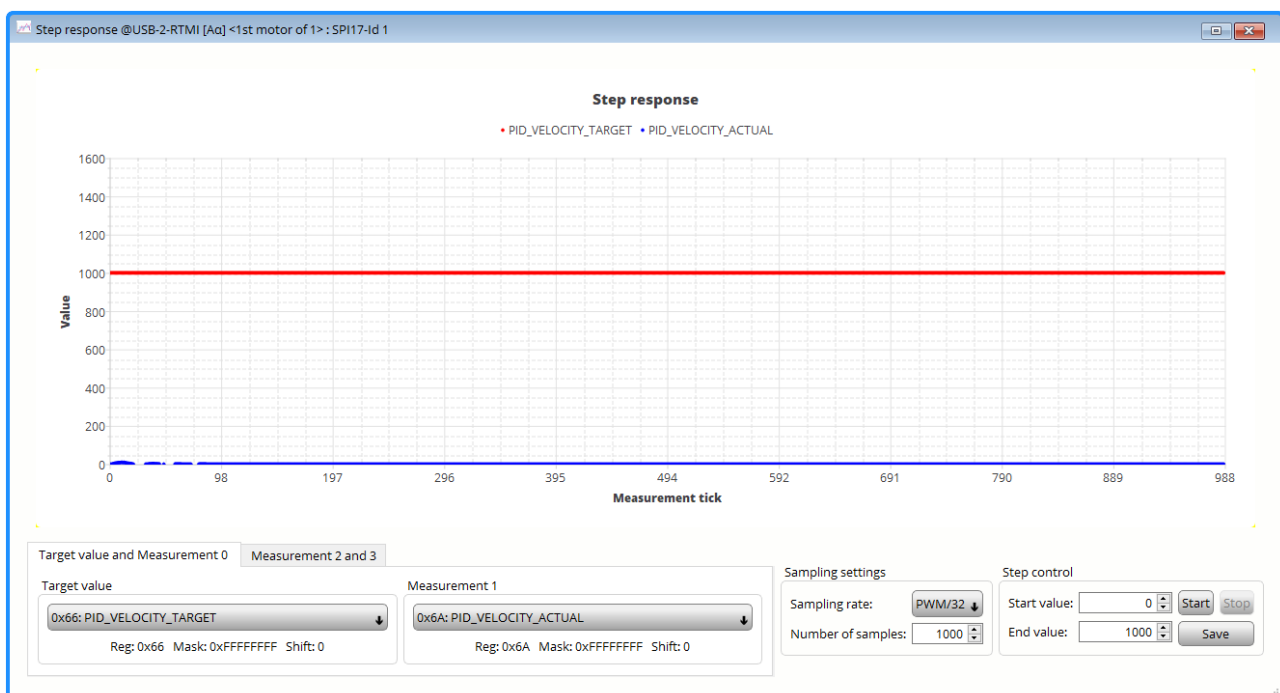


Figure 21: PID_VELOCITY_P = 100

6. 逐渐增加 PID_VELOCITY_P，直到实际速度（PID_VELOCITY_ACTUAL）达到 50-75% 目标速度（PID_VELOCITY_TARGET）



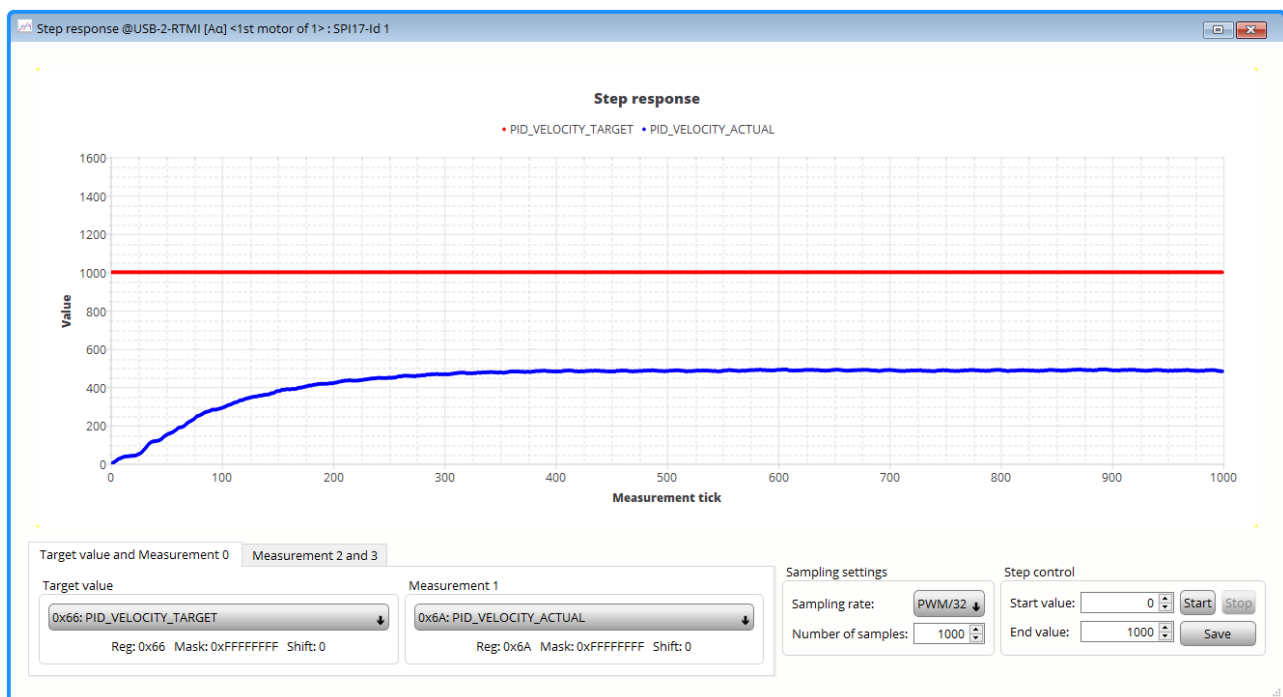


Figure 22: PID_VELOCITY_P = 300

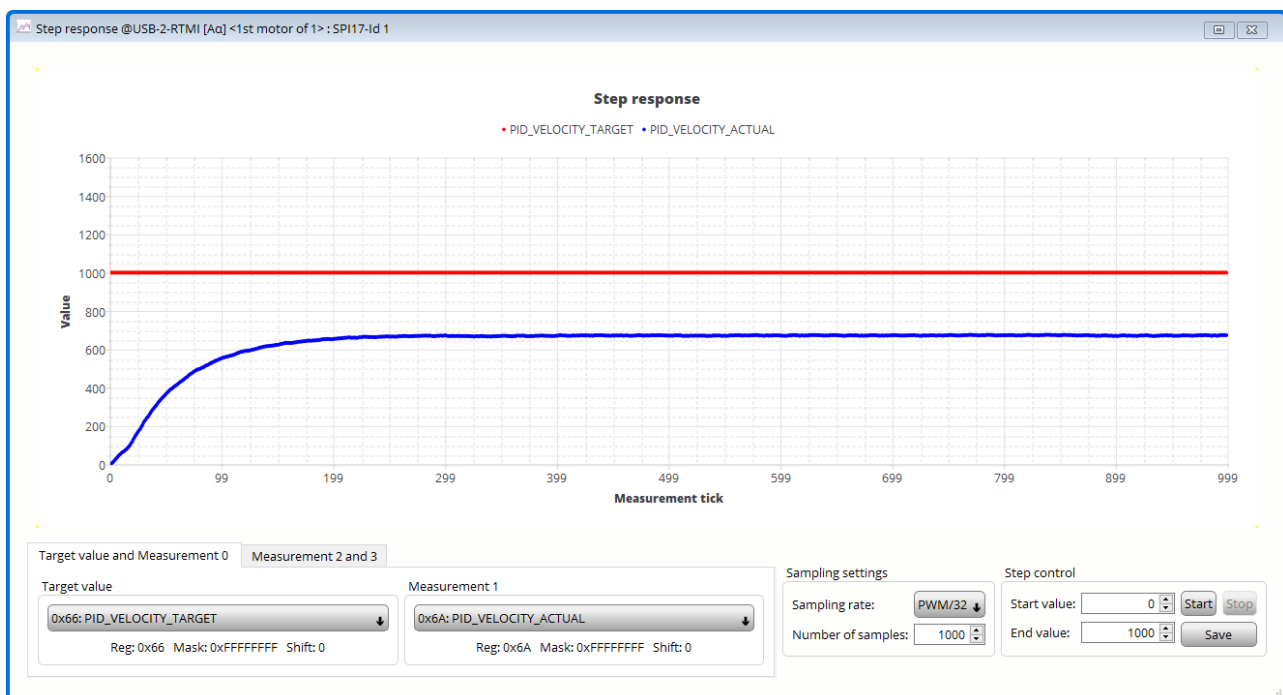
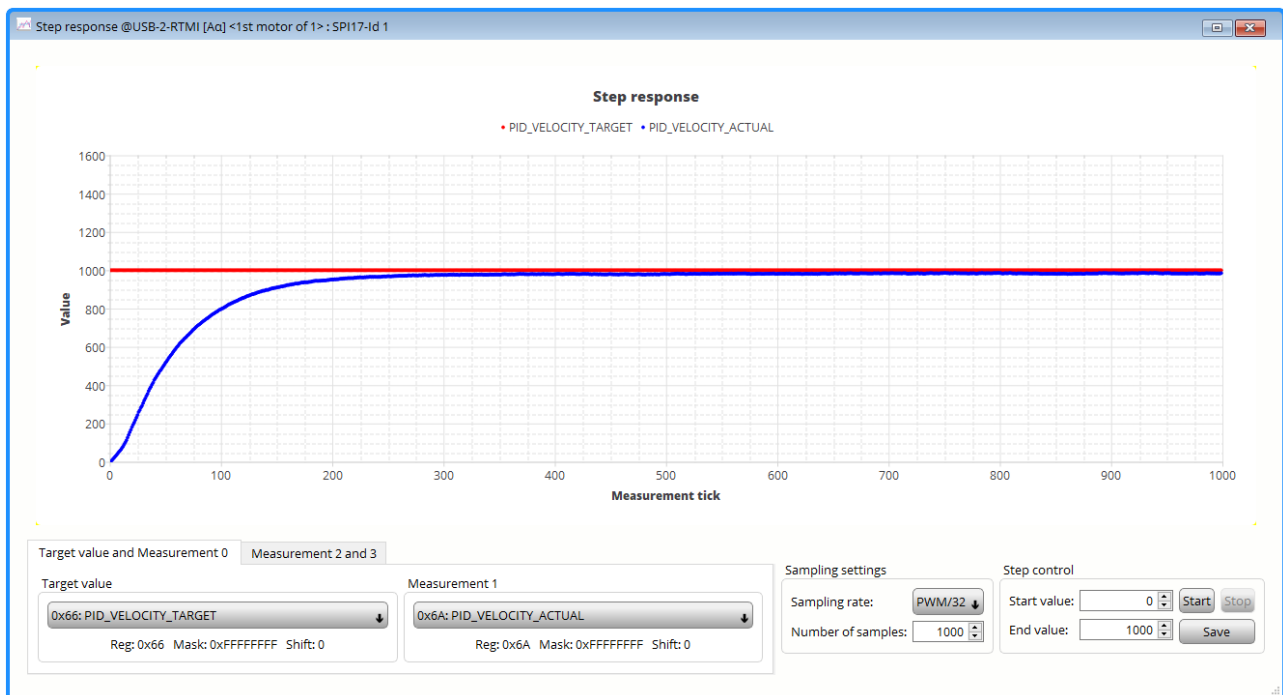


Figure 23: PID_VELOCITY_P = 500

7. 增加PID_VELOCIT_I 数值直到实际速度达到目标速度



*Figure 24: PID_VELOCITY_I = 10*

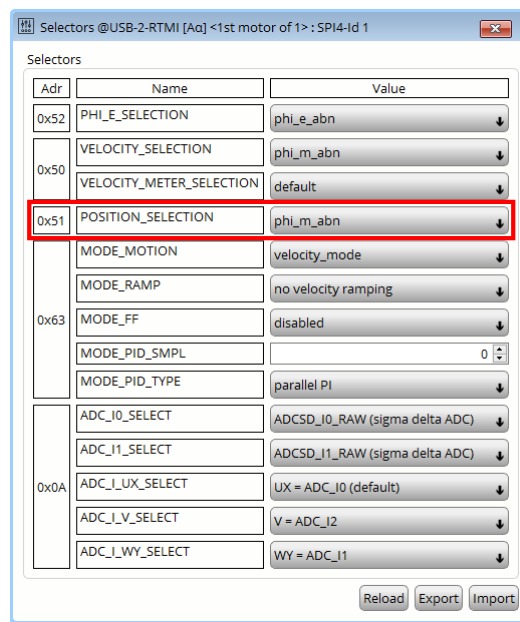


Figure 25: Selectors: Position unit

7 Tuning of the position loop

本章节介绍位置环调试，在使用位置环之前 电流环和速度环需要先被配置好，使用阶跃响应工具来调试，然后使用开发板套件的MCU板 Landungsbruecke 用于提升动态性能和精度。

7.1 Step Response Tool

1. 将 POSITION_SELECTION 设置为 *phi_m_abn*
因此电机的一圈脉冲数为 65535 counts
2. 设置 PI 位置控制器的初始值
 - PID_POSITION_I = 0 (对于大多数设置，建议将此设置为0)
 - PID_POSITION_P = 10



Adr	Name	Value
0x56	PID_TORQUE_I	12 858
	PID_TORQUE_P	596
0x54	PID_FLUX_I	12 858
	PID_FLUX_P	596

Adr	Name	Value
0x58	PID_VELOCITY_I	10
	PID_VELOCITY_P	500

Adr	Name	Value
0x5A	PID_POSITION_I	0
	PID_POSITION_P	10

Reload Export Import

Figure 26: PI parameter

3. 打开 *step response tool*

4. 单击 **Start** 按钮开始阶跃响应。电机将以 *end value* 值来回运动。这里是 1 转

5. PID_POSITION_P = 10 时电机不运动。

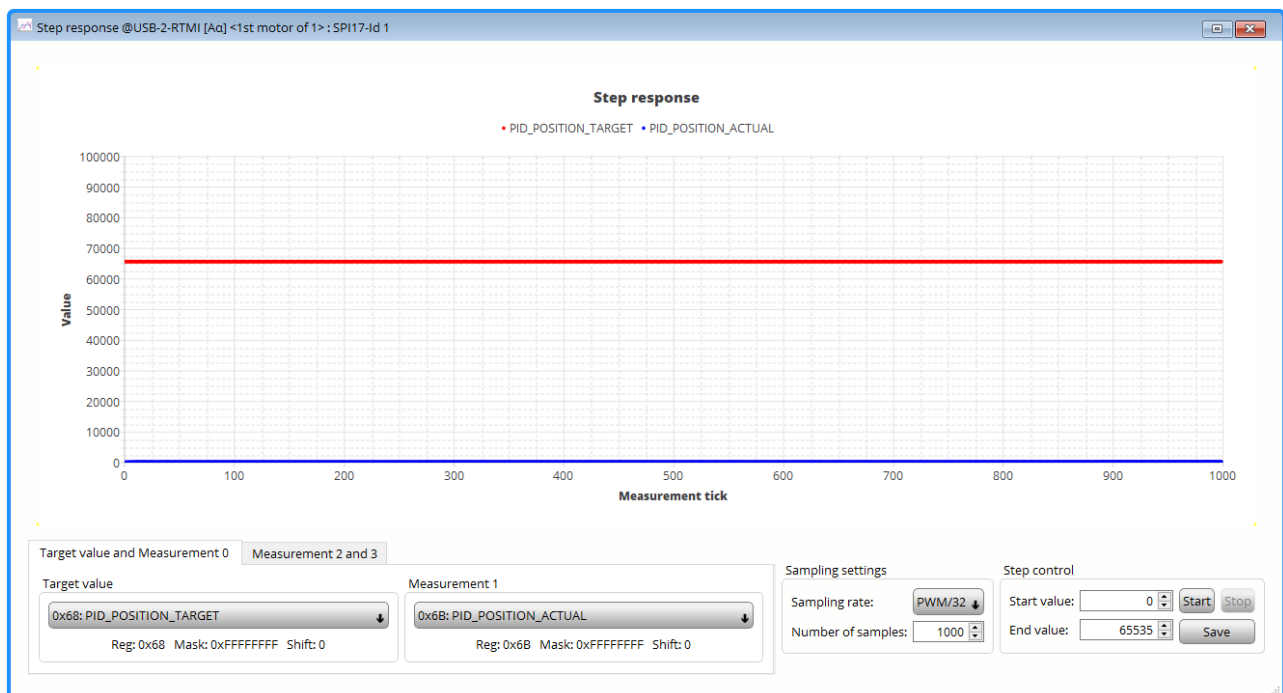
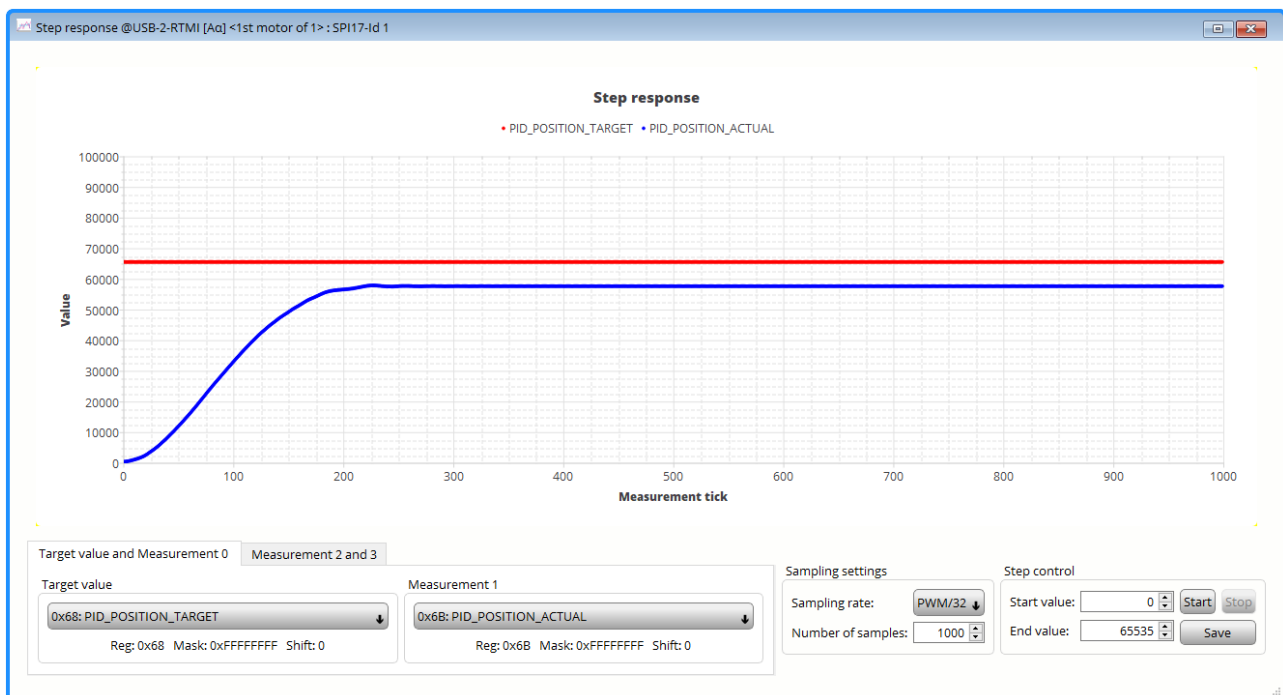


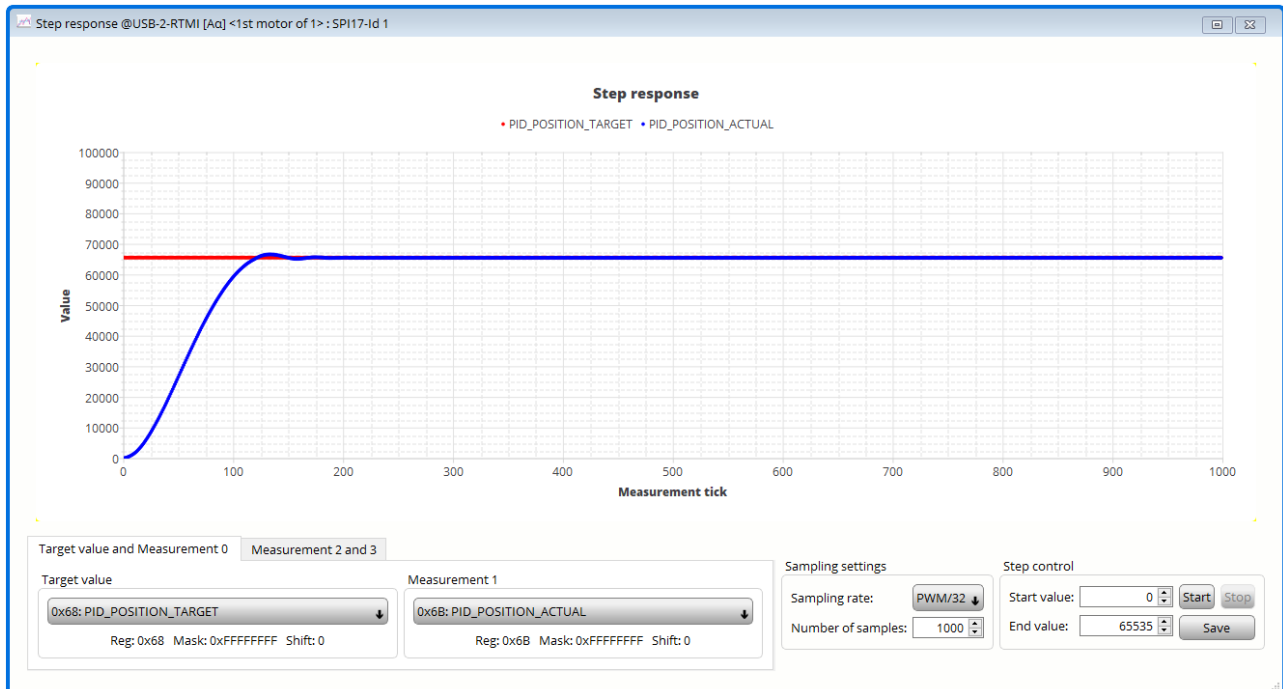
Figure 27: PID_POSITION_P = 10

6. 增加比例数值P: PID_POSITION_P = 50



Figure 28: $PID_POSITION_P = 50$

7. 增大比例参数 P 值: $PID_POSITION_P = 100$

Figure 29: $PID_POSITION_P = 100$

8. 调整后的 PI 配置。



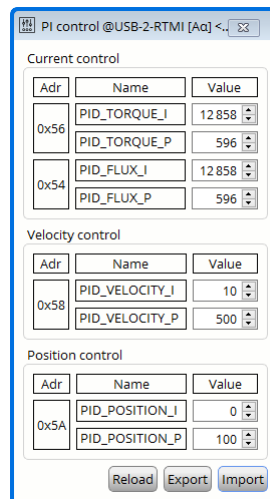
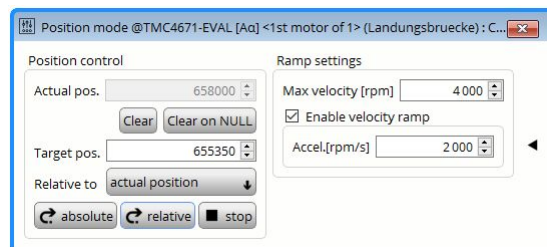


Figure 30: PI parameter

7.2 Motion Controller

开发板套装上的MUC板Landungsbrücke带有梯形坡型发生器可以和TMC4671-EVAL一起使用。TMC4671芯片并不集成运动控制功能。

1. 通过 Mini USB 将MUC板 Landungsbruecke 连接到电脑
2. 在 Landungsbruecke 对话框（USB-2-RTMI不可用) 中打开位置模式工具b箱
3. 使能速度控制曲线和加速度限制



4. 在位置控制工具框 position mode toolbox 控制电机转 10 圈
 - 清零位置数值 *Clear the position*
 - 设置目标位置 *Target pos.* = 655350
 - 单击 *absolute* 按钮开始电机运动



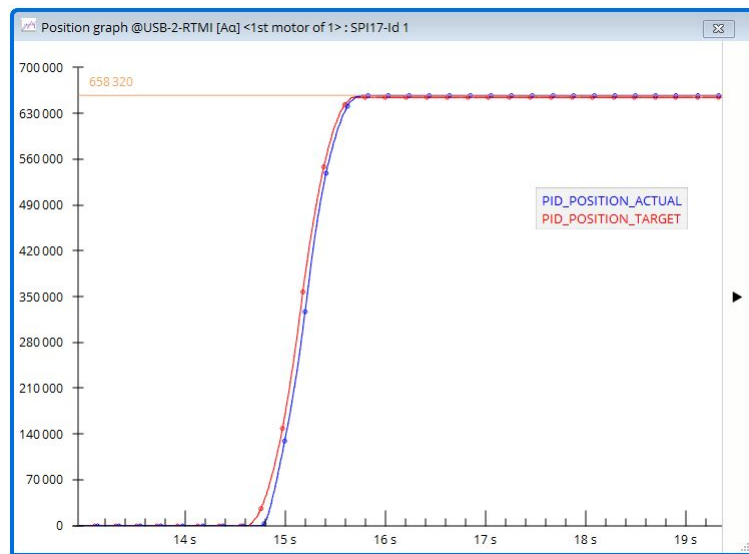


Figure 31: Movement with ramp

6. 增大减速度

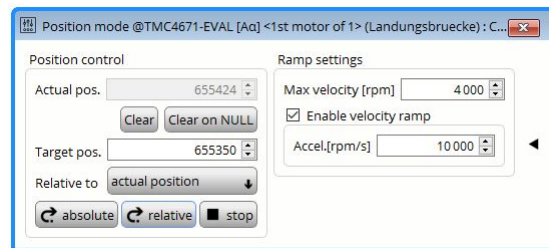
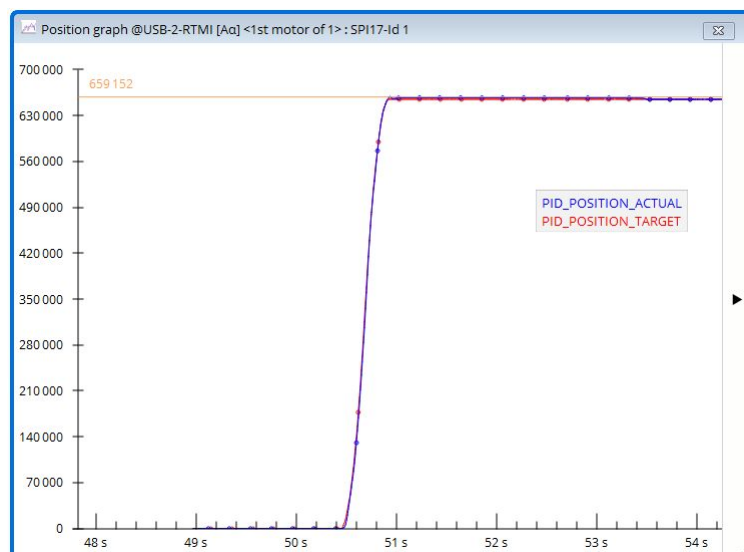
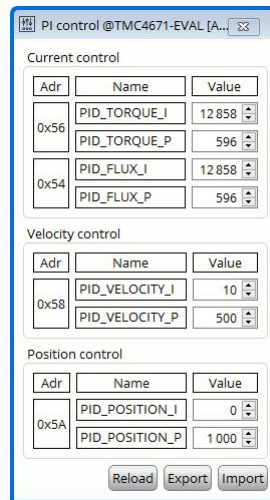


Figure 32: Movement with ramp

7. 用运动控制重复 10 圈 同时增大减速度参数, 也可以同时调整PI参数:



8. 在增加运动控制功能之后调整 PI 配置



Current control		
Adr	Name	Value
0x56	PID_TORQUE_I	12 858
	PID_TORQUE_P	596
0x54	PID_FLUX_I	12 858
	PID_FLUX_P	596

Velocity control		
Adr	Name	Value
0x58	PID_VELOCITY_I	10
	PID_VELOCITY_P	500

Position control		
Adr	Name	Value
0x5A	PID_POSITION_I	0
	PID_POSITION_P	1 000

Reload Export Import

Figure 33: PI parameter

9. 通过Export option 选型保存PI配置

8 Summary

RTMI 通讯接口为 TMC4671 芯片提供了一个强大的选项来调试芯片.快速实时接入芯片,可以用来调试和监控每个环路。TMCL-IDE为系统开发提供了现成的软件工具。关于更多 TMC4671 和如何使用的问题, 请参考 [TMC4671数据表](#)。



9 Revision History

Version	Date	Author	Description
V1.0	25.04.2019	JPX	Initial version
v1.1	03.05.2019	ED, JPX	refinement
v1.2	24.06.2019	JPX	changed header, changed PID_POSITION_LIMIT_X values
v1.2.1	14.01.2020	JPX	CN version
v1.2.2	05.02.2020	GW, JPX	rework translation

Table 1: Document Revision

