

## 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

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



## 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

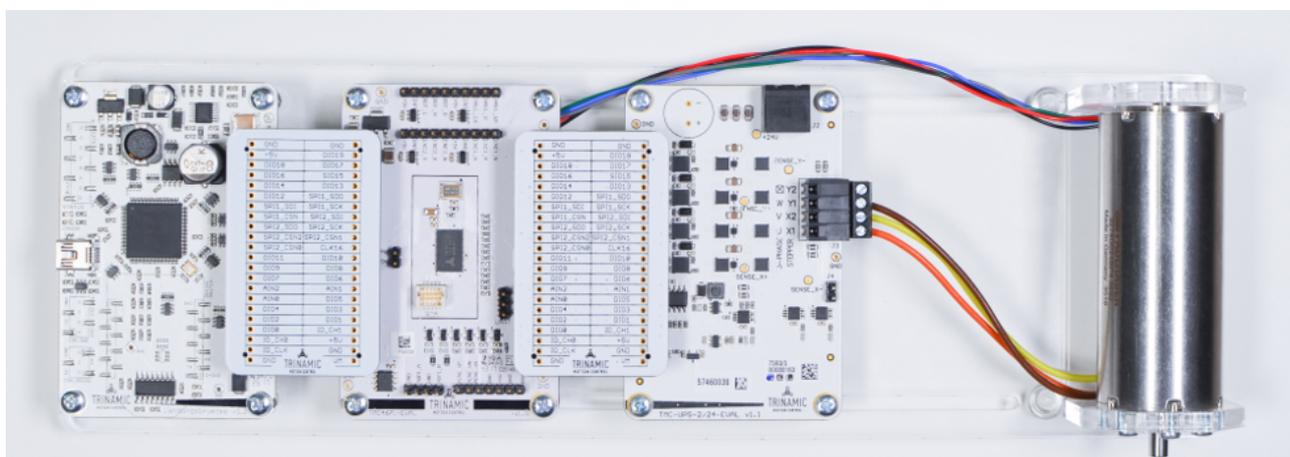


Figure 1: TMC4671-EVAL套件和BLDC机

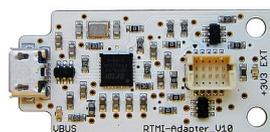


Figure 2: USB-2-RTMI

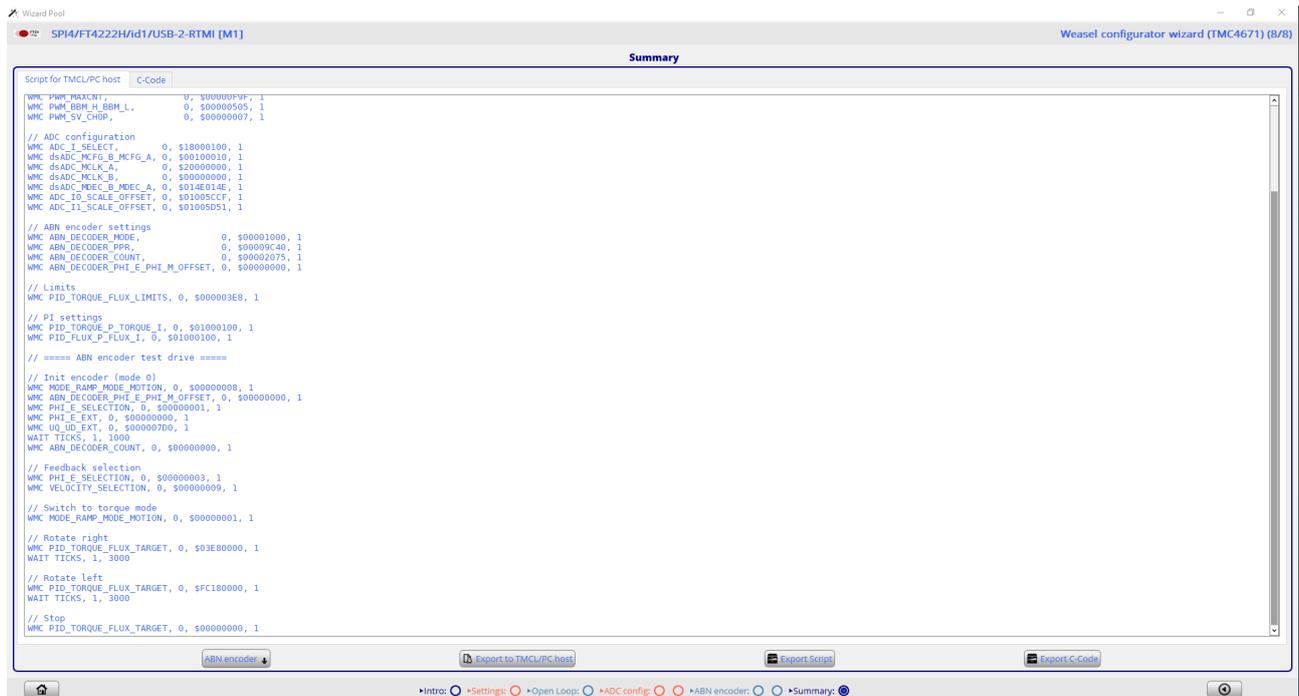


## 2 USB-2-RTMI Driver Installation

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*）。



```

Script for TMC4671 PC host | C-Code
-----
WMC PWM_MAXCHN, 0, $000000FF, 1
WMC PWM_BBM_H_BBM_L, 0, $00000505, 1
WMC PWM_SV_CHOP, 0, $00000007, 1

// ADC configuration
WMC ADC_I_SELECT, 0, $18000100, 1
WMC dsADC_MCFG_B_MCFG_A, 0, $00100010, 1
WMC dsADC_MCLK_A, 0, $20000000, 1
WMC dsADC_MCLK_B, 0, $00000000, 1
WMC dsADC_MDEC_B_MDEC_A, 0, $014E014E, 1
WMC ADC_ID_SCALE_OFFSET, 0, $01005CFF, 1
WMC ADC_ID_SCALE_OFFSET, 0, $01005D51, 1

// ABN encoder settings
WMC ABN_DECODER_MODE, 0, $00001000, 1
WMC ABN_DECODER_PPR, 0, $00009C40, 1
WMC ABN_DECODER_COUNT, 0, $00002075, 1
WMC ABN_DECODER_PHI_E_PHI_M_OFFSET, 0, $00000000, 1

// Limits
WMC PID_TORQUE_FLUX_LIMITS, 0, $000003E8, 1

// PI settings
WMC PID_TORQUE_P_TORQUE_I, 0, $01000100, 1
WMC PID_FLUX_P_FLUX_I, 0, $01000100, 1

// ===== ABN encoder test drive =====
// Init encoder (mode 0)
WMC MODE_RAMP_MODE_MOTION, 0, $00000000, 1
WMC ABN_DECODER_PHI_E_PHI_M_OFFSET, 0, $00000000, 1
WMC PHI_E_SELECTION, 0, $00000001, 1
WMC PHI_EXT, 0, $00000000, 1
WMC UQ_UD_EXT, 0, $00000700, 1
WAIT TICKS, 1, 1000
WMC ABN_DECODER_COUNT, 0, $00000000, 1

// Feedback selection
WMC PHI_E_SELECTION, 0, $00000003, 1
WMC VELOCITY_SELECTION, 0, $00000009, 1

// Switch to torque mode
WMC MODE_RAMP_MODE_MOTION, 0, $00000001, 1

// Rotate right
WMC PID_TORQUE_FLUX_TARGET, 0, $03E80000, 1
WAIT TICKS, 1, 3000

// Rotate left
WMC PID_TORQUE_FLUX_TARGET, 0, $FC180000, 1
WAIT TICKS, 1, 3000

// Stop
WMC PID_TORQUE_FLUX_TARGET, 0, $00000000, 1
  
```

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：



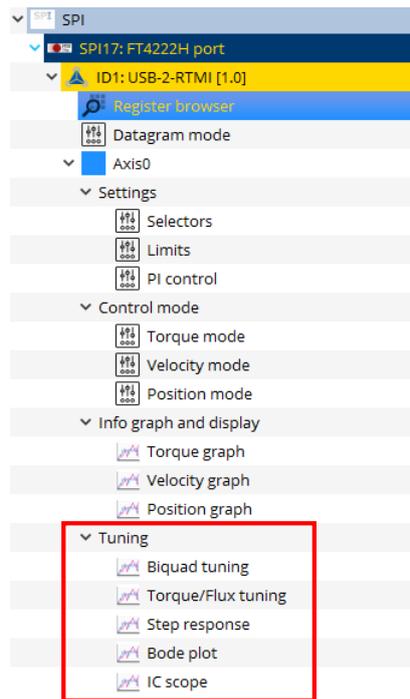


Figure 5: PI tuning tools

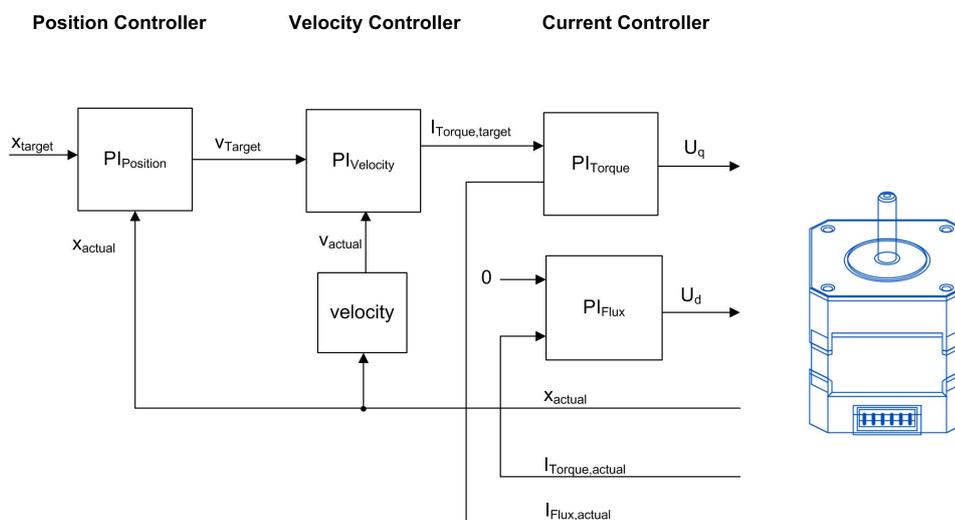


Figure 4: TMC4671 control loops

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

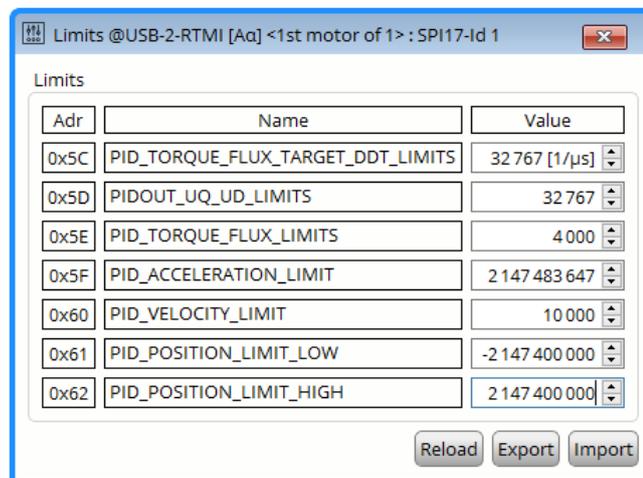


Figure 6: TMCL-IDE: TMC4671 限制

## 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



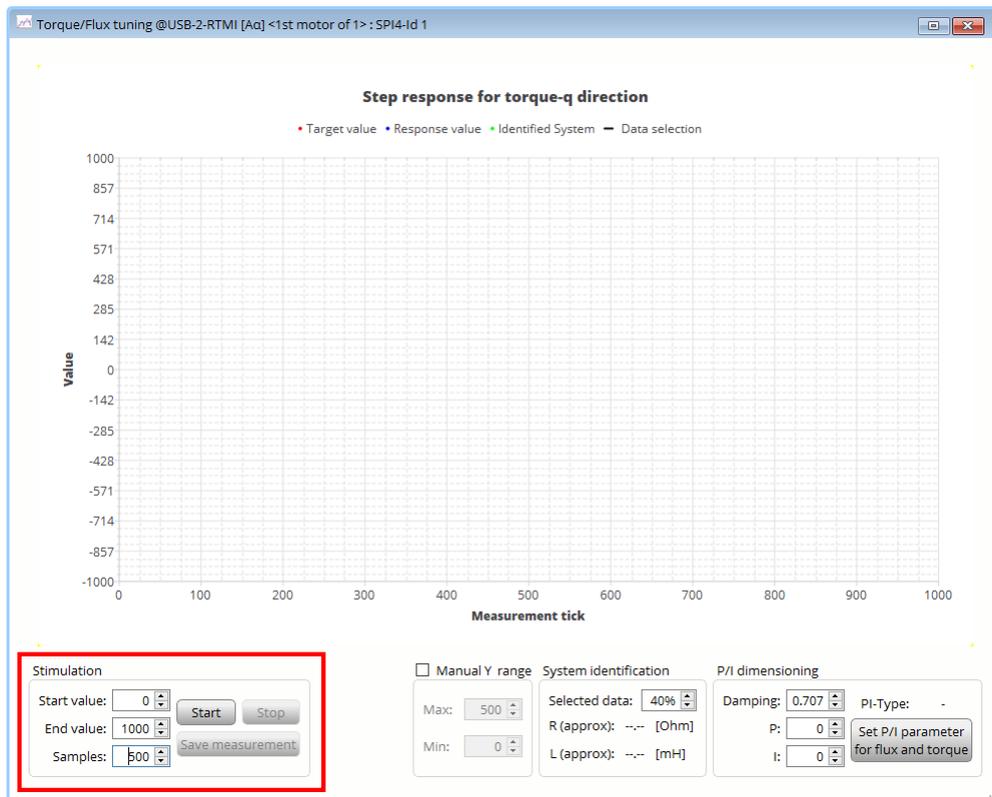


Figure 7: 配置和开始阶跃响应



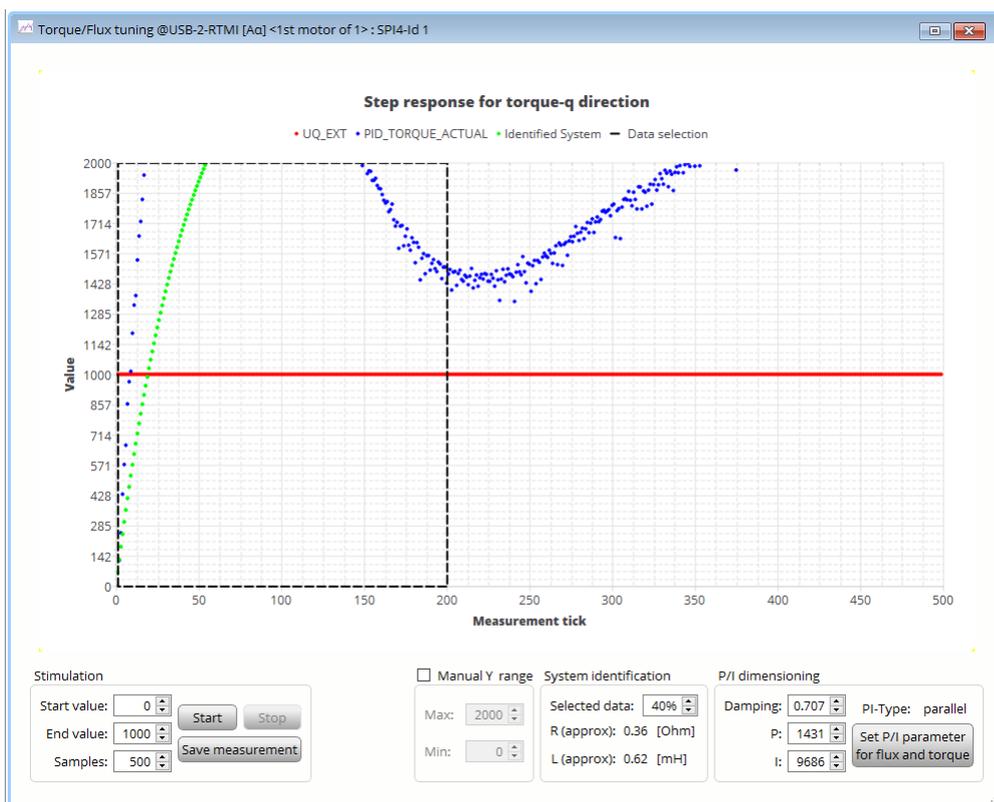


Figure 8: 第一步反应

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



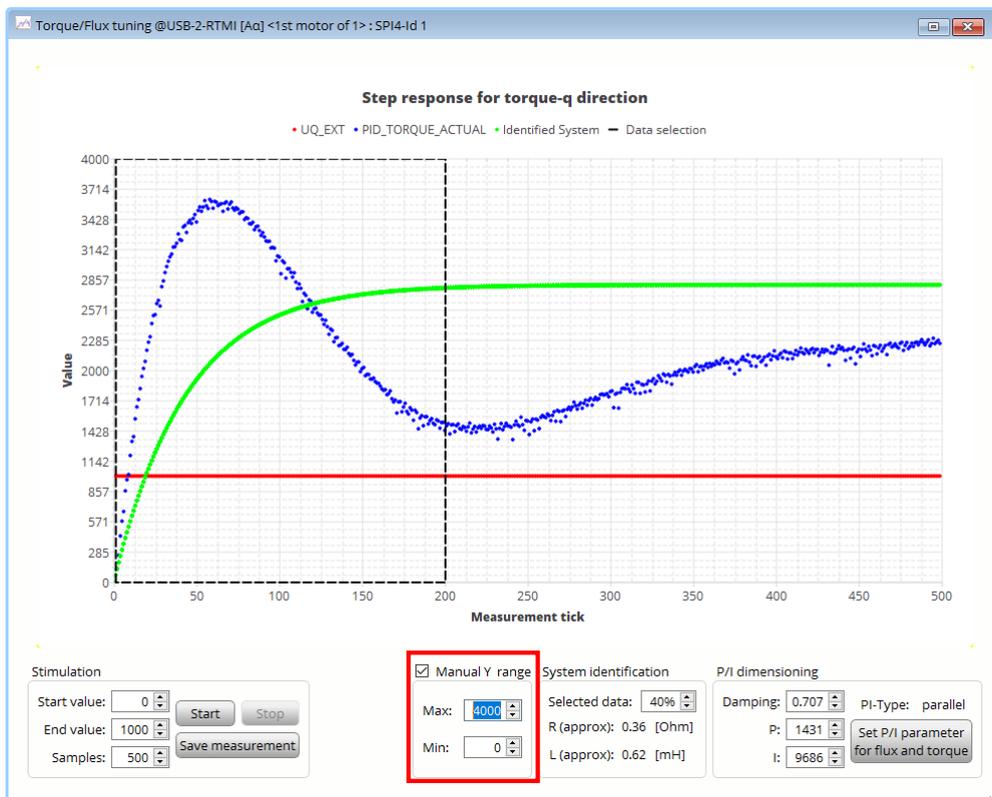


Figure 9: 调整 Y 范围



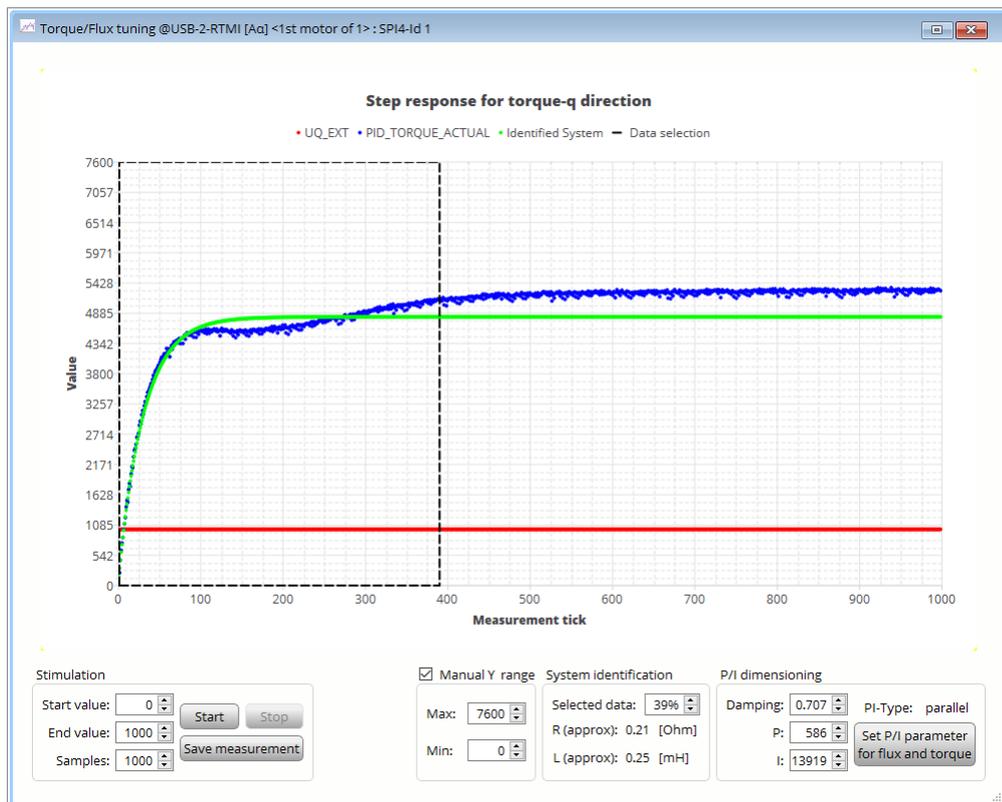


Figure 10: 阶跃响应: 识别区域好

- 在图 11 阶跃响应没有完全涵盖. 识别区域太小。



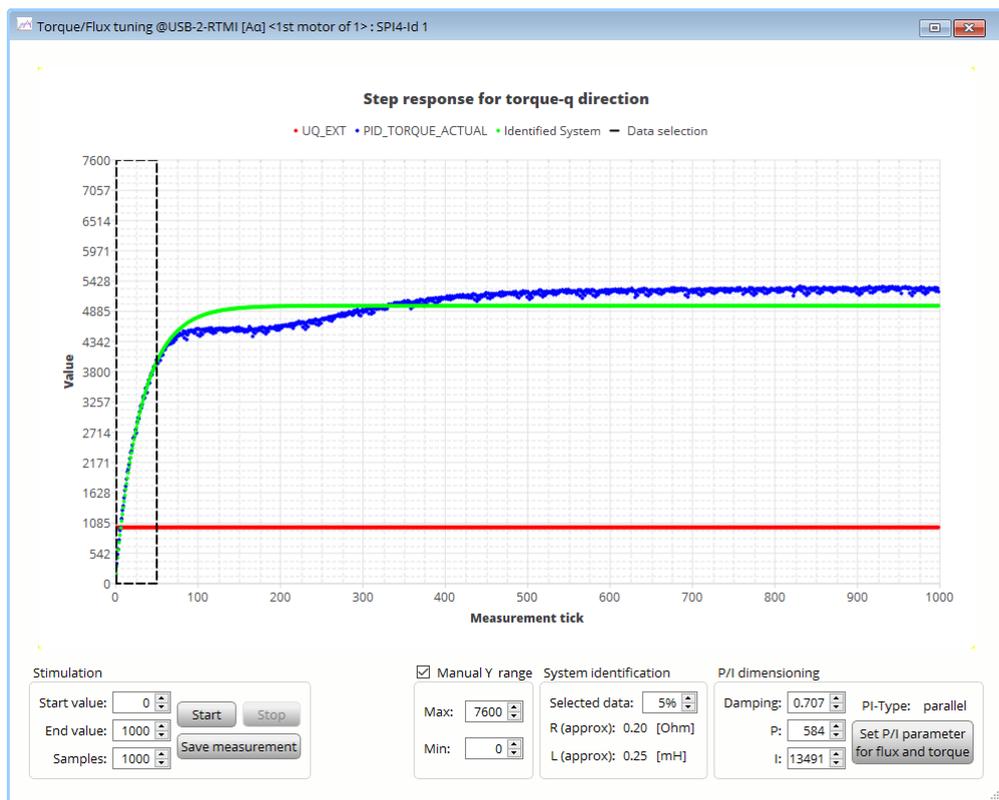


Figure 11: 阶跃响应:标识区域太小

- 在图 12 中，标识区域太大



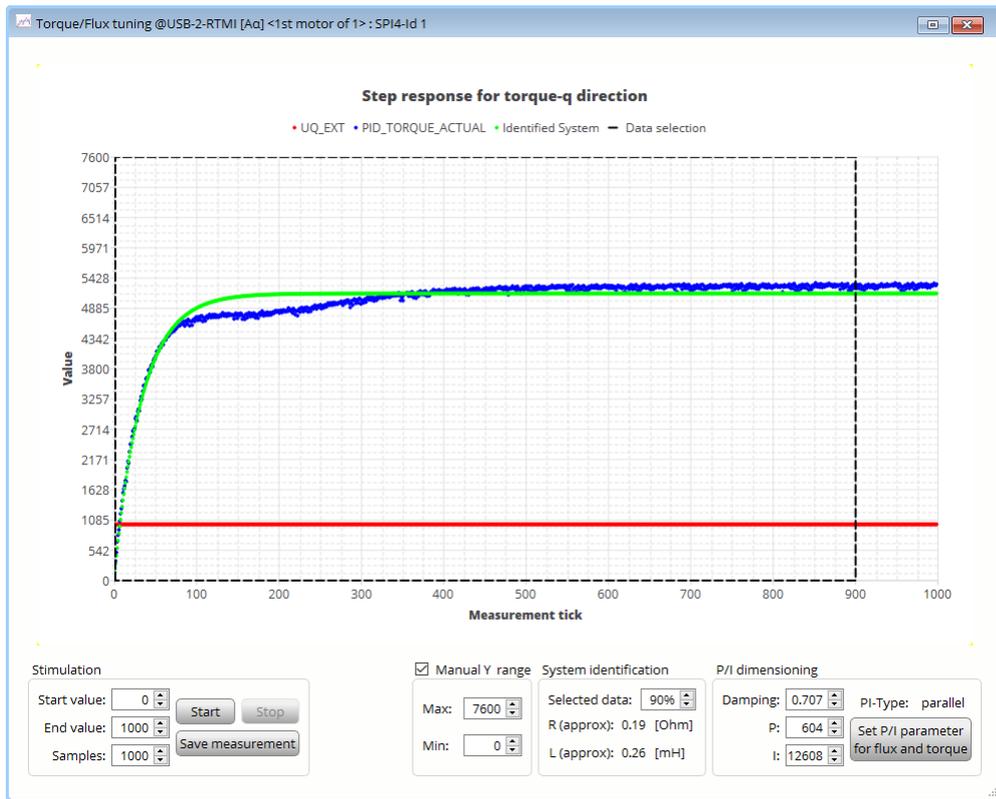
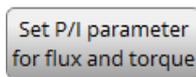


Figure 12: 阶跃响应：识别区域太大

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



- 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。



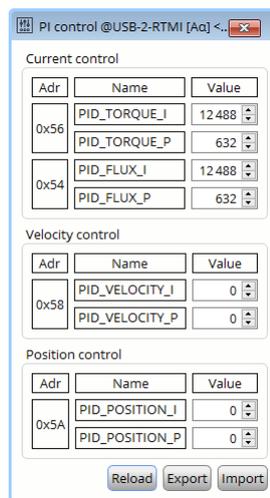


Figure 13: PI Parameter



## 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

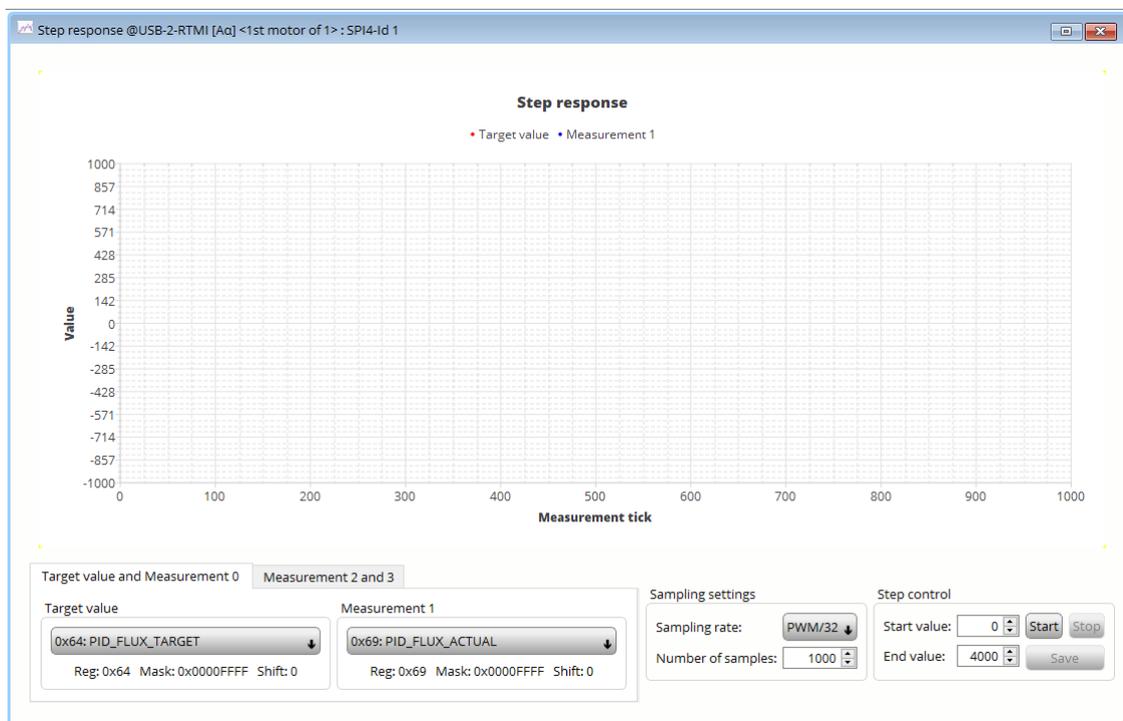


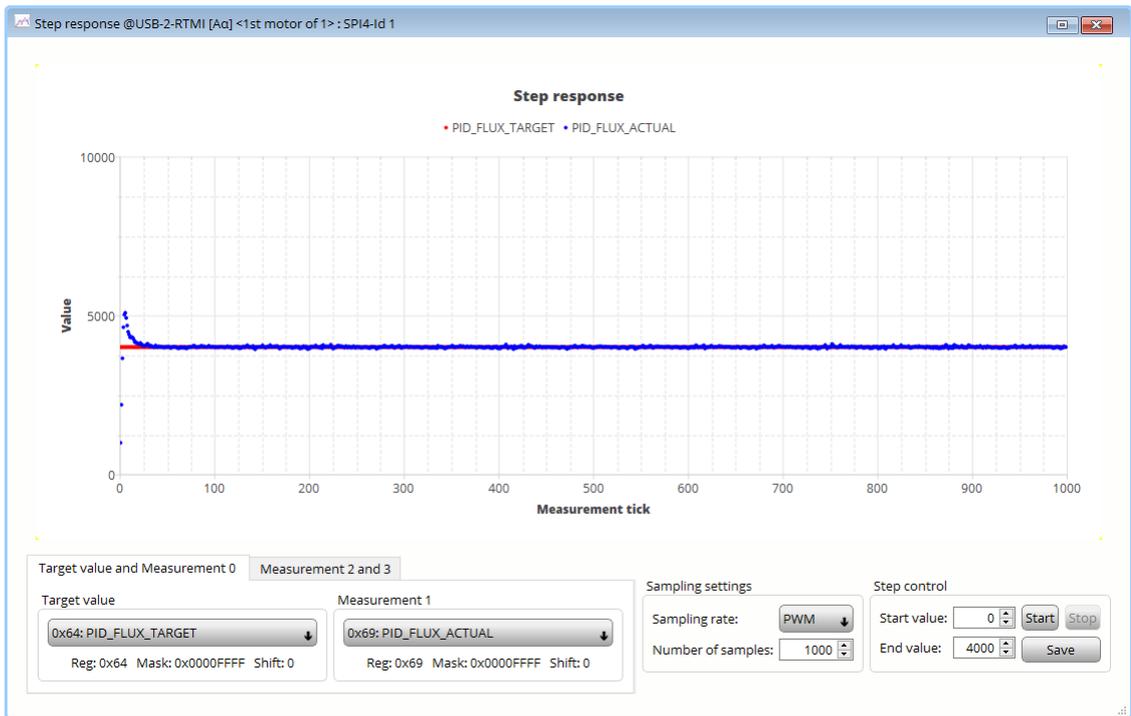
Figure 14: step response toolbox

### 2. 配置电流控制的磁通电流设置

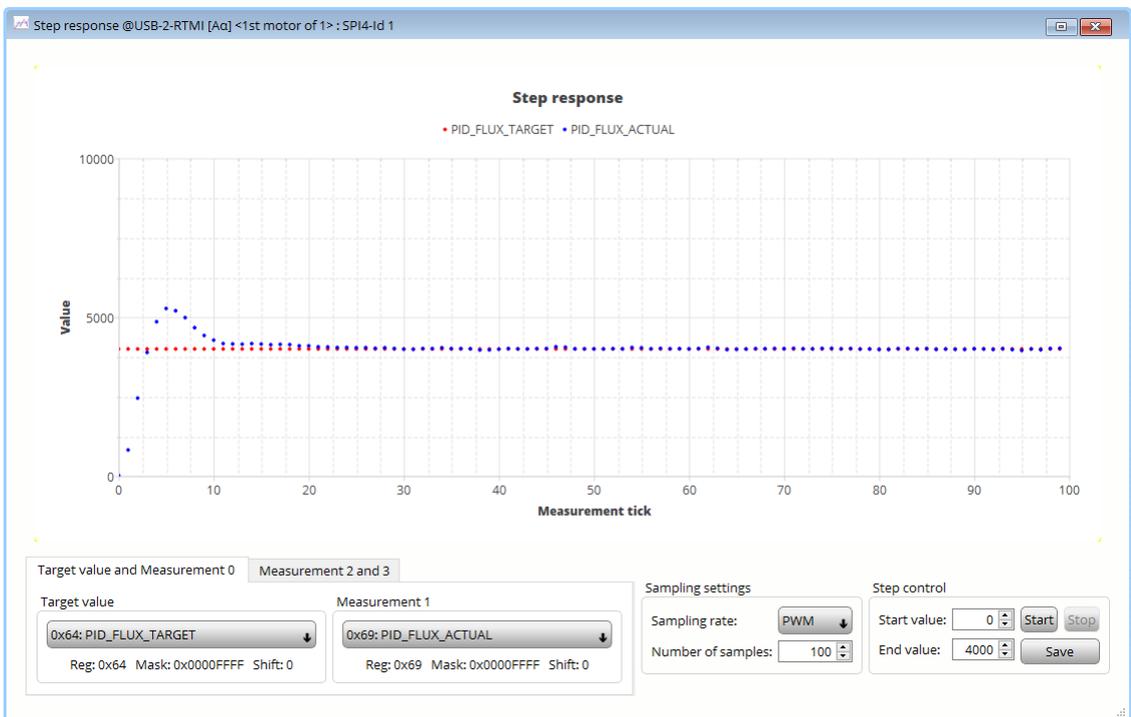
- 目标值/Target value: 0x64 PID\_FLUX\_TARGET
- 测量值/Measurement 1: 0x69 PID\_FLUX\_ACTUAL
- 采样频率/Sampling rate: PWM
- 下一步骤
  - 设置 *Start value* = 0
  - 确定最终的磁通量 flux target current 目标值(这里数值4000)
- 使用 **Start** 按钮启动阶跃响应step response

### 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



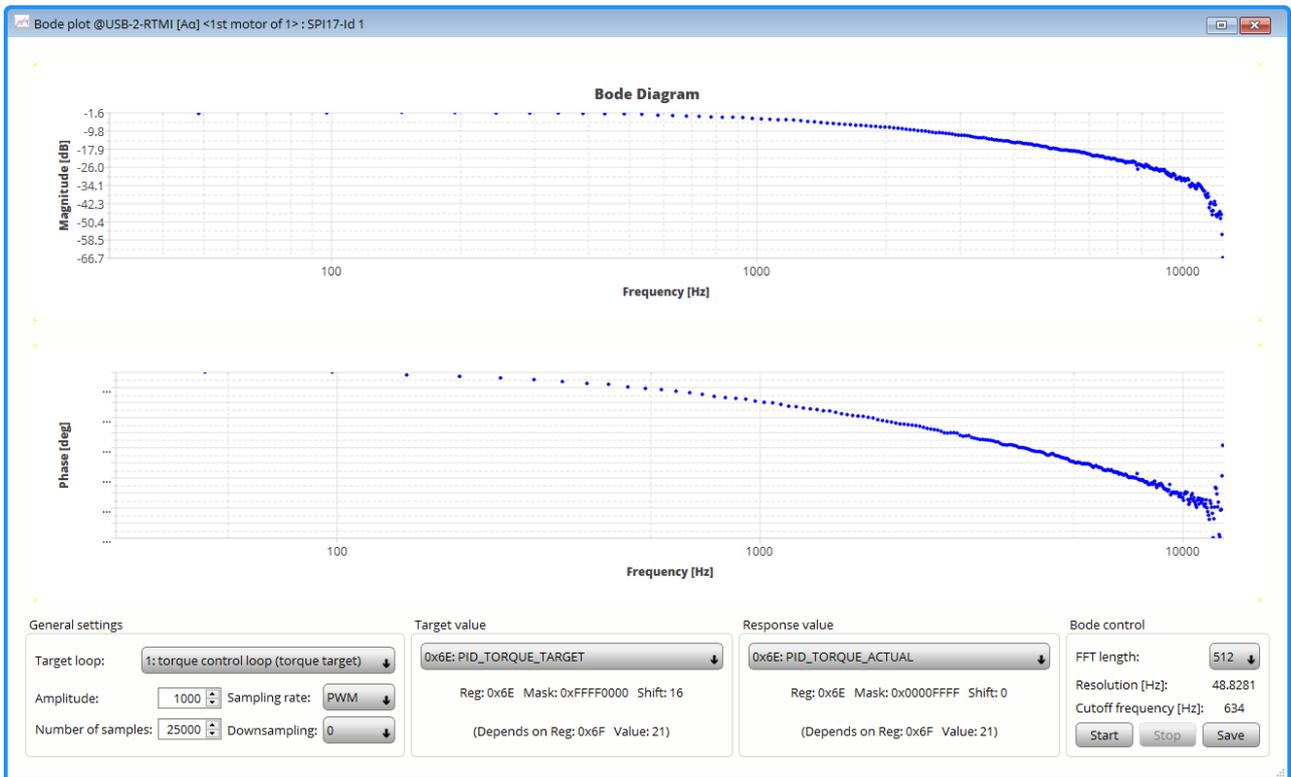


Figure 16: 默认 PI 的波特图

## 6. 调整 PI 参数

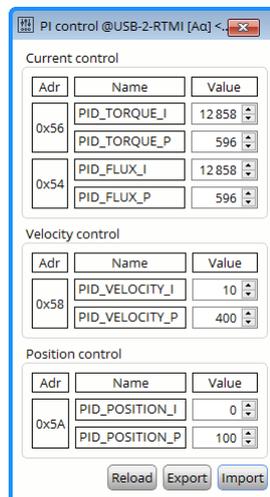


Figure 17: PI 参数



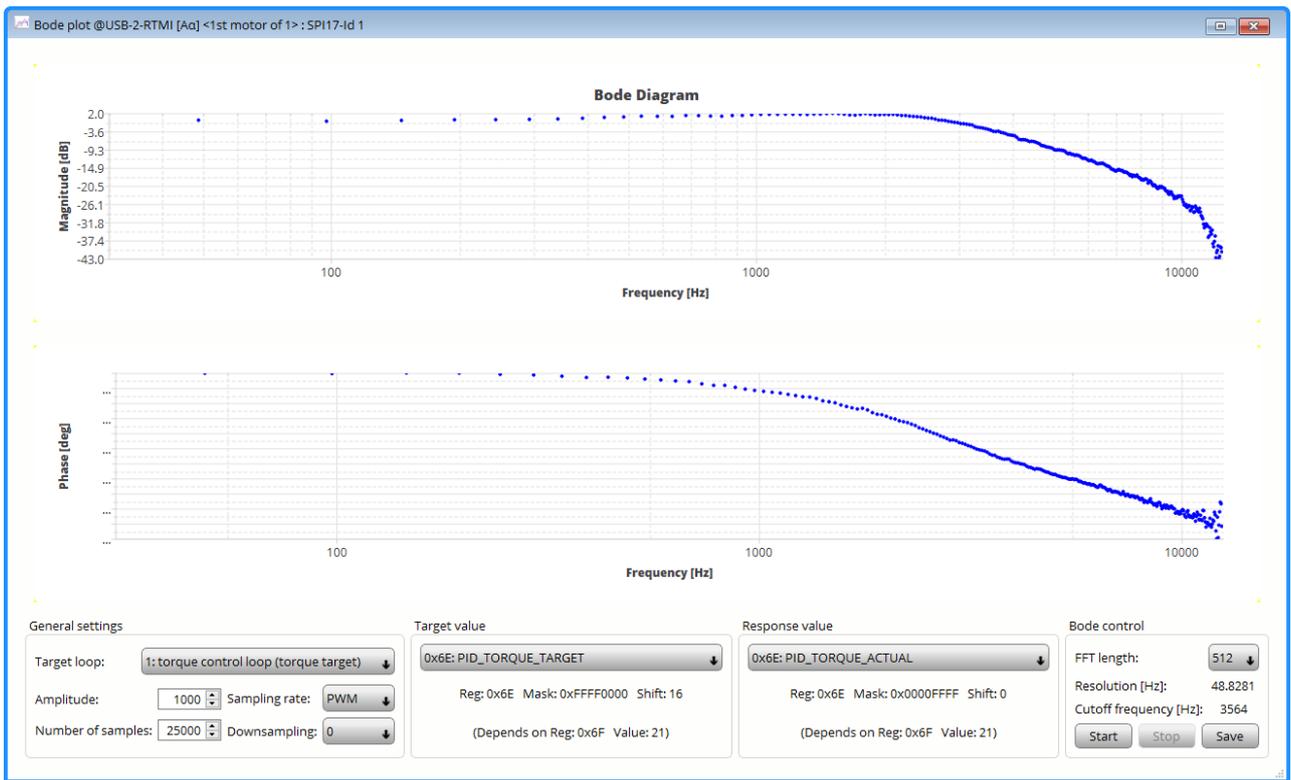


Figure 18: 调整过PI之后的波特图

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



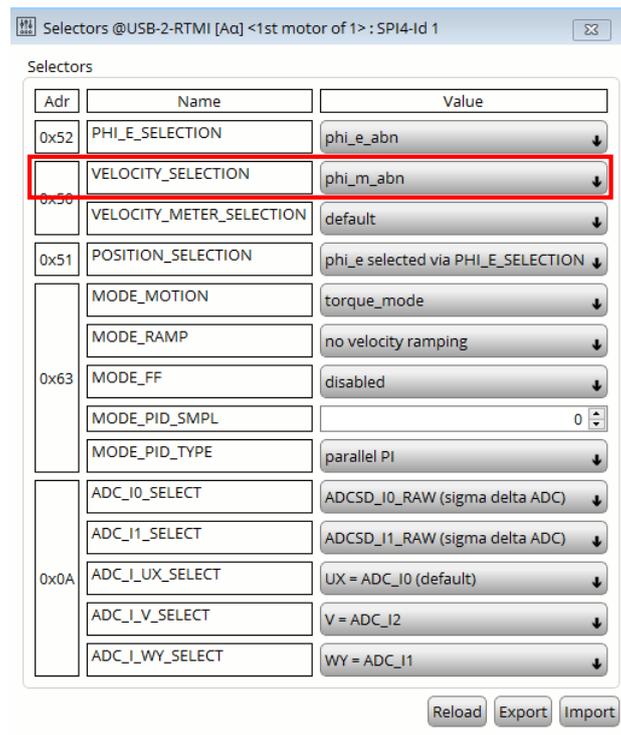


Figure 19: Selectors: Velocity Unit 选择 - 速度单位

## 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



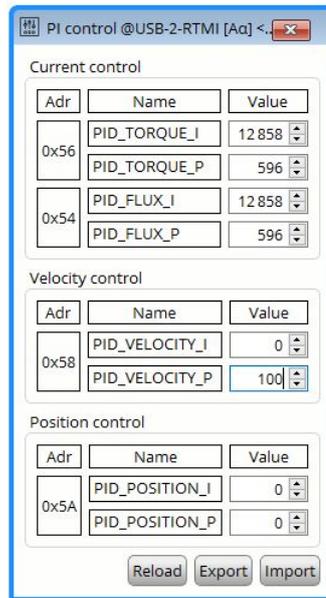


Figure 20: PI 数值

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）



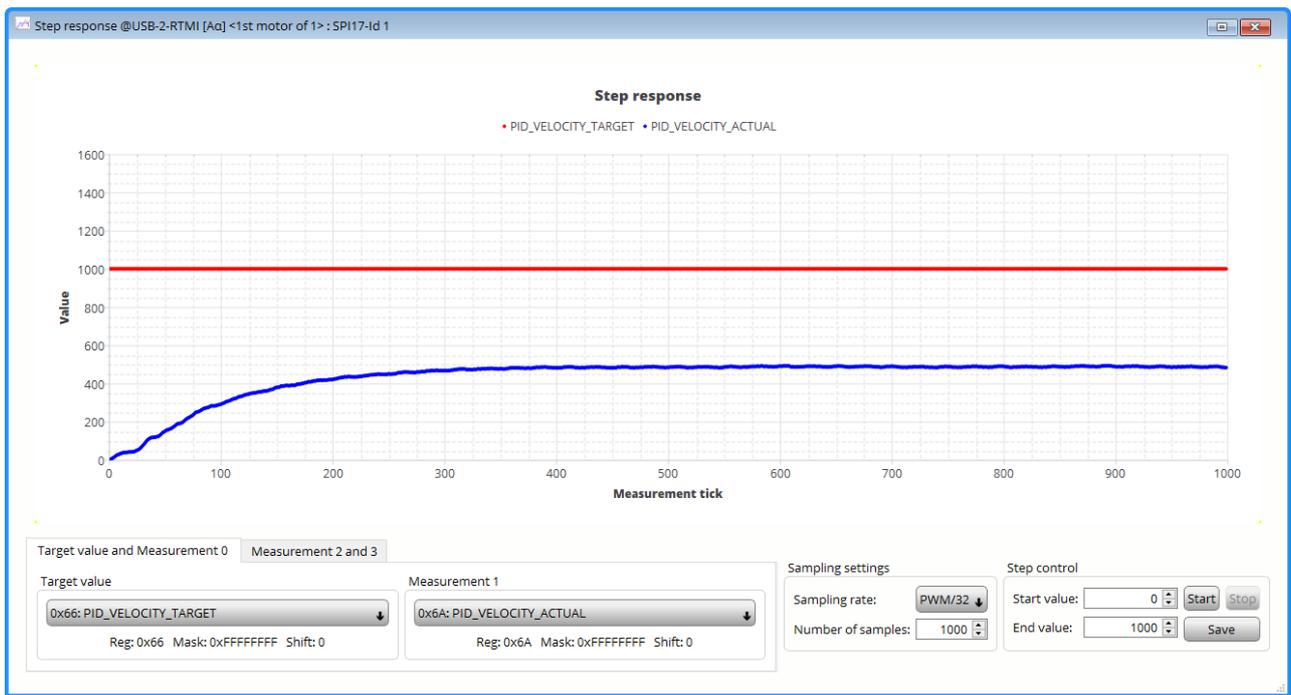


Figure 22: PID\_VELOCITY\_P = 300

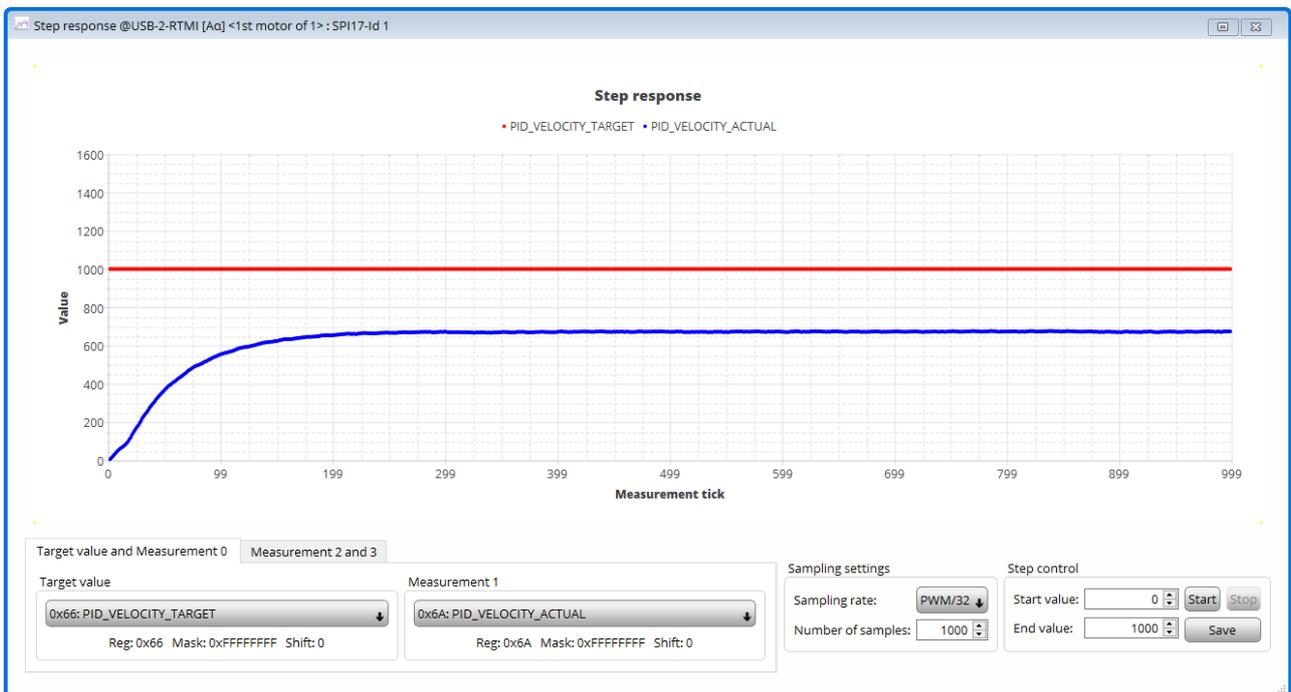


Figure 23: PID\_VELOCITY\_P = 500

7. 增加PID\_VELOCIT\_I 数值直到实际速度达到目标速度



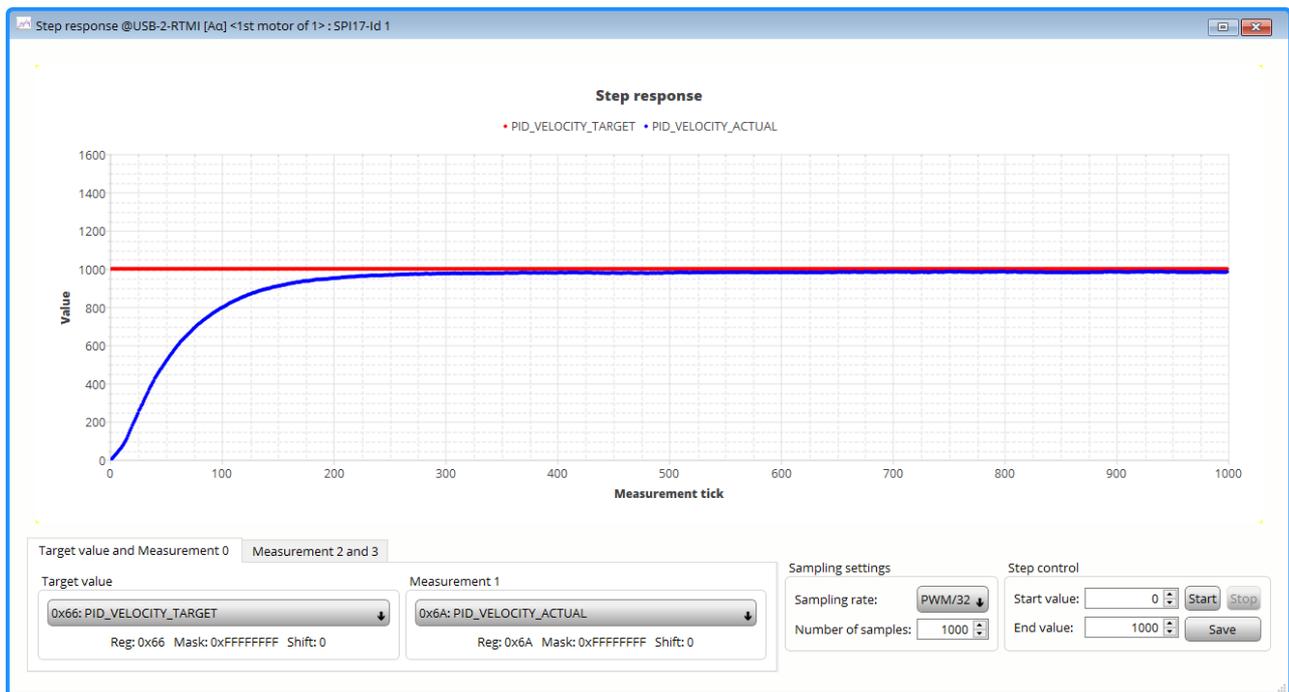


Figure 24:  $PID\_VELOCITY\_I = 10$



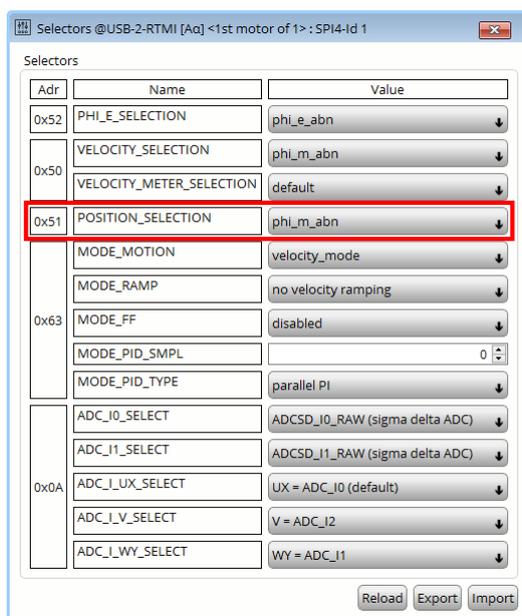


Figure 25: Selectors: Position unit

## 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



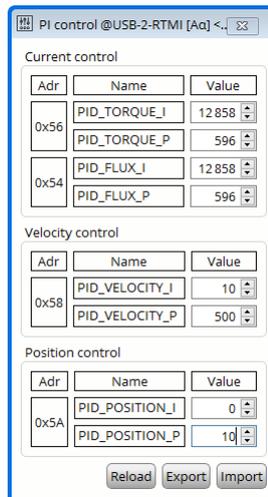


Figure 26: PI parameter

- 3. 打开 *step response tool*
- 4. 单击 *Start* 按钮开始阶跃响应。电机会以 *end value* 值来回运动. 这里是 1 转
- 5. PID\_POSITION\_P = 10 时电机不运动。

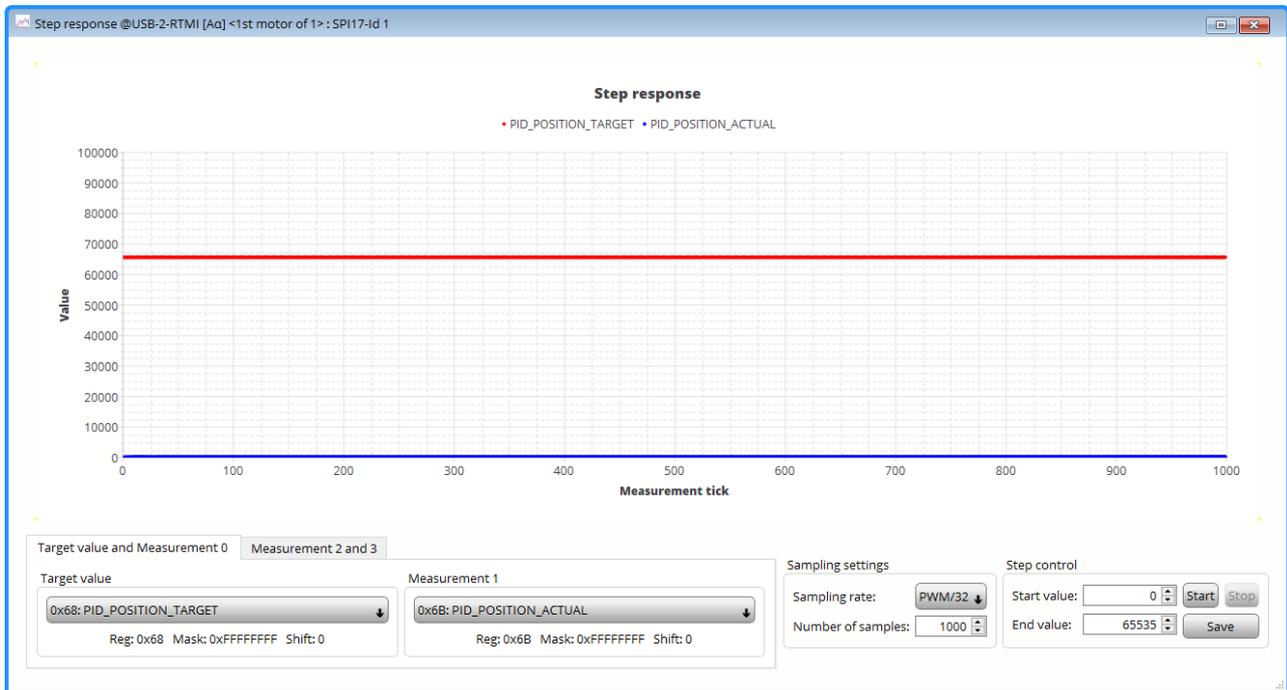


Figure 27: PID\_POSITION\_P = 10

- 6. 增加比例数值P: PID\_POSITION\_P = 50



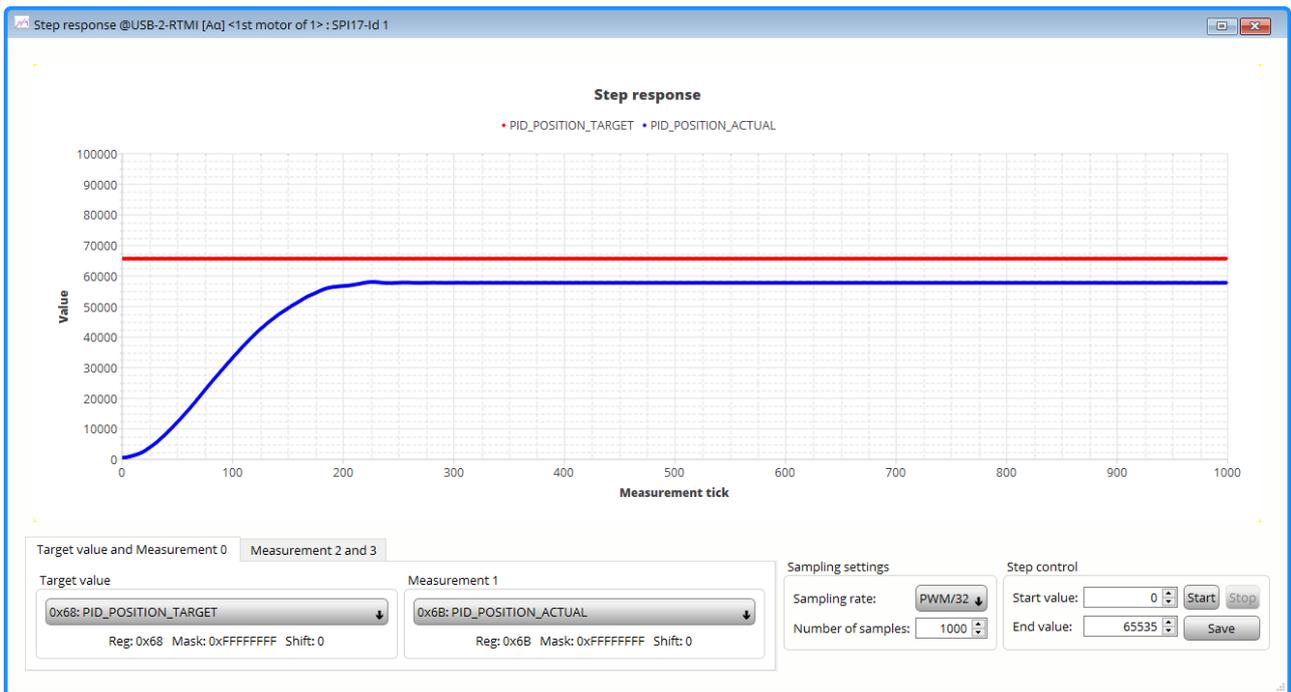


Figure 28: PID\_POSITION\_P = 50

### 7. 增大比例参数 P 值: PID\_POSITION\_P = 100

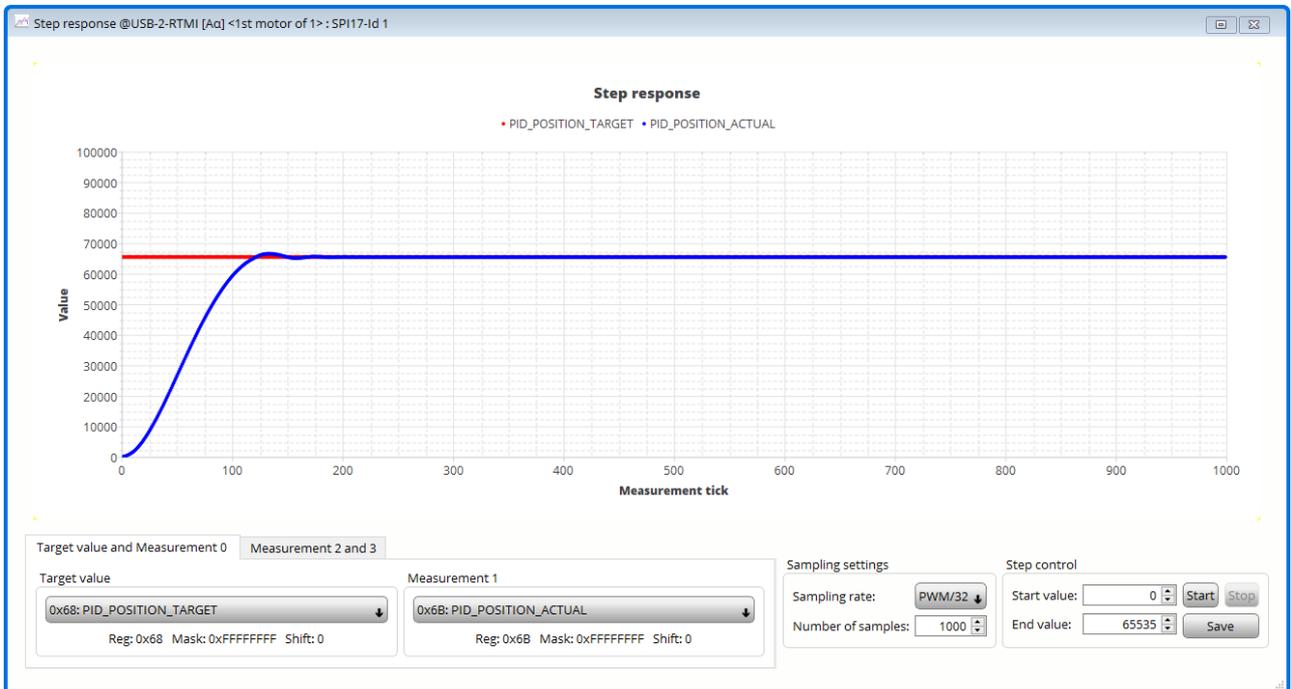


Figure 29: PID\_POSITION\_P = 100

### 8. 调整后的 PI 配置。



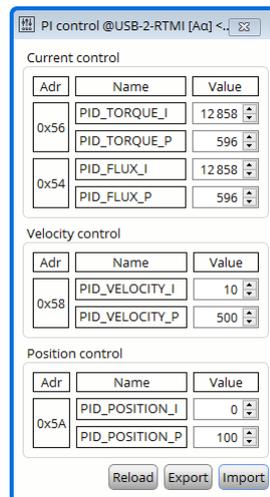
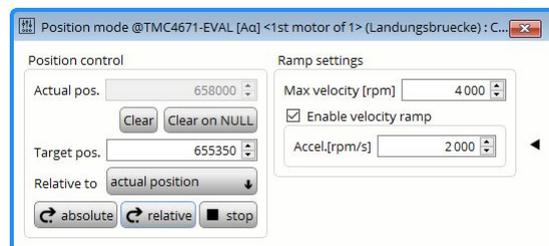


Figure 30: PI parameter

## 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. 在位置控制工具箱 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



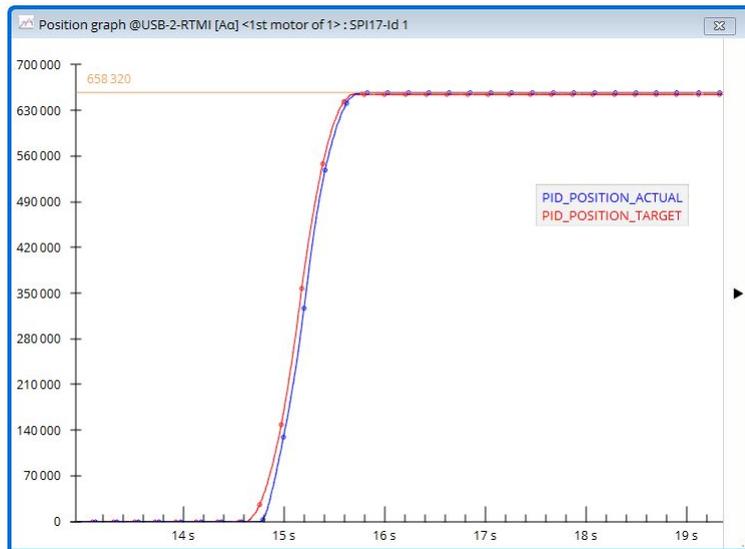


Figure 31: Movement with ramp

### 6. 增大减速度

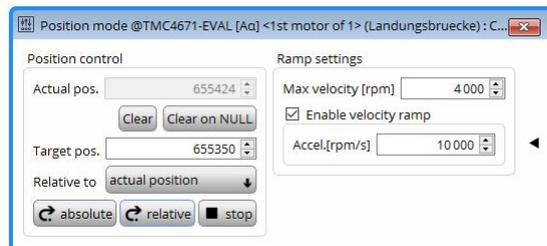
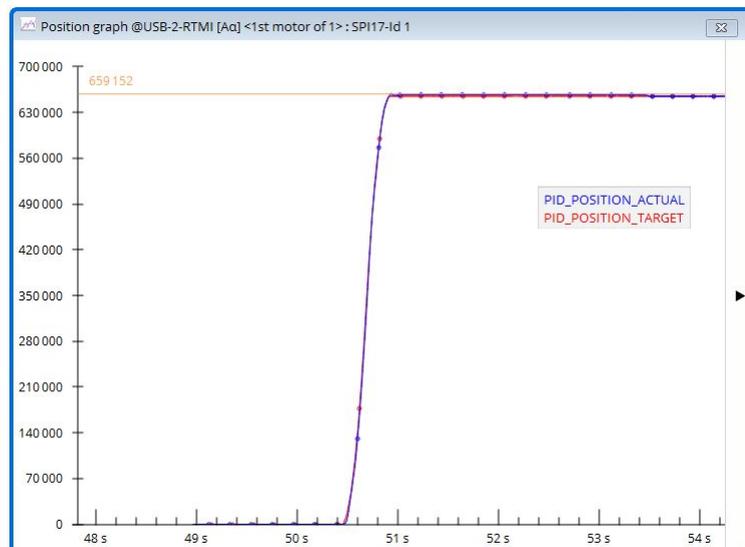


Figure 32: Movement with ramp

### 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

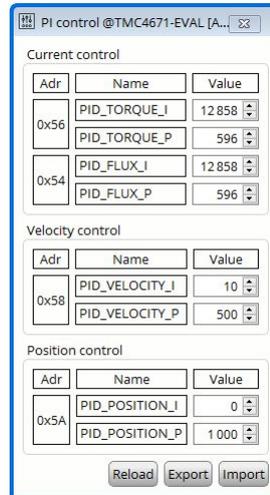


Figure 33: PI parameter

## 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



©2020 TRINAMIC Motion Control GmbH & Co. KG, Hamburg, Germany  
Terms of delivery and rights to technical change reserved.  
Download newest version at [www.trinamic.com](http://www.trinamic.com)

