SLO Training 总结 和 经验整理

刘柏严 202307

SLO Training 总结 和 经验整理

- 驱动Firmware新增功能ZV滤波
- 负载和电机连接的类型
- Bode图原理及实现
- 共振频率及反共振频率，相角穿越频率关系及举例
- SLO的使用及注意
- 其他增强控制器性能的方法

 ©B&R. All rights reserved

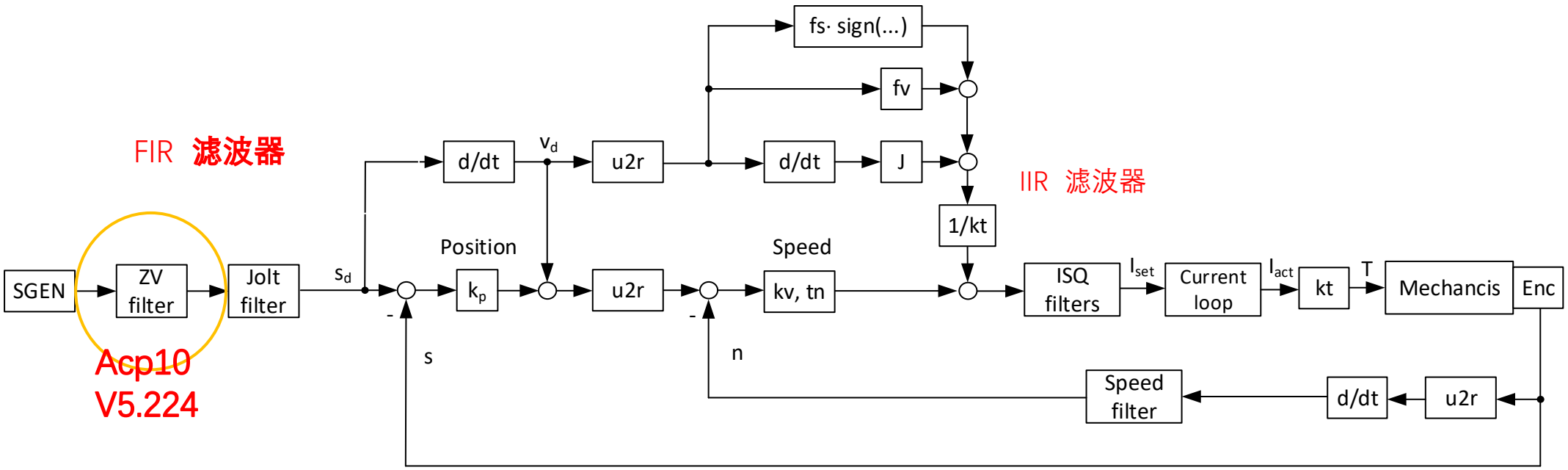
伺服项目

目的:

- 快速平稳运行
- Legerror满足项目要求
- 批量出机时鲁棒性尽量强（外部惯量改变或刚性改变或负载改变）

 ©B&R. All rights reserved

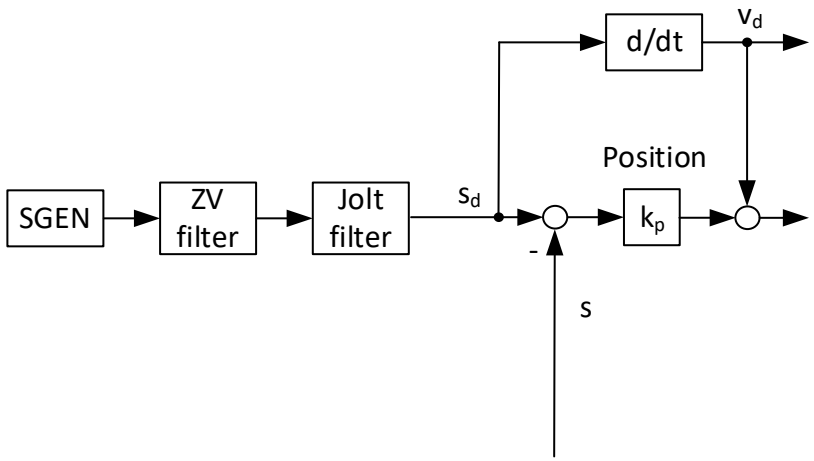
伺服控制框图



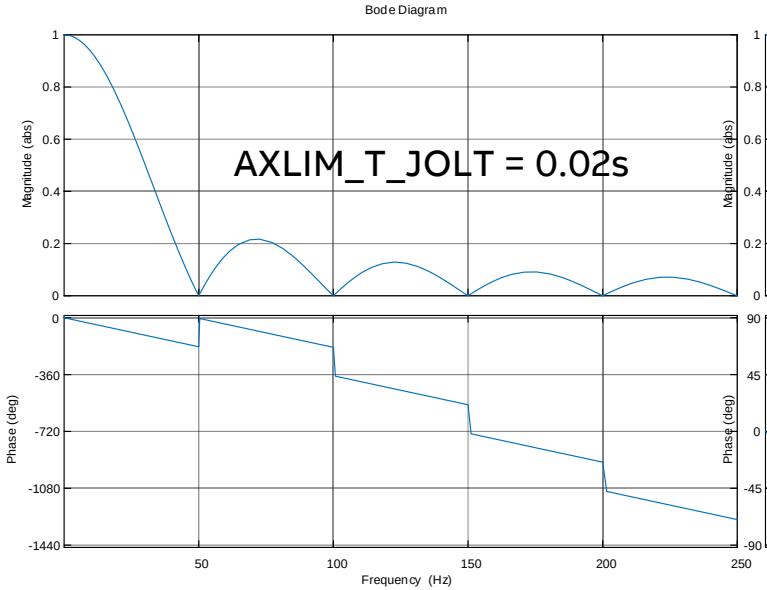
$$F = ma_d + f_v v_d + f_s sign(v_d) + k_v k_p (s_d - s) + k_v (v_d - v)$$

©B&R. All rights reserved

ZV滤波 & 均值滤波



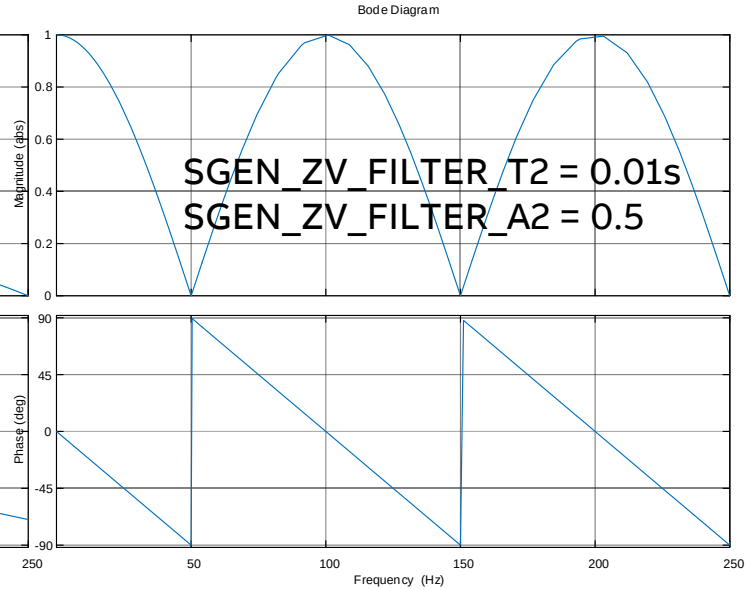
均值滤波



参数设定：

AXLIM_T_JOLT (oscillation time)

ZV滤波



参数设定

SGEN_ZV_FILTER_T2 (half oscillation time)

SGEN_ZV_FILTER_A2 (damping)

ZV filter（Zero vibration） V5.224

非设定频率滤波少，倍频会滤。

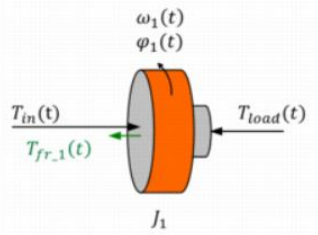
2Paras，一个是滤波周期的一半时间，另一个是阻尼系数。

©B&R. All rights reserved

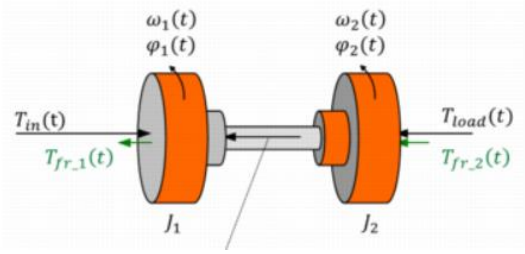
电机带负载的结构

Different mechanics are possible

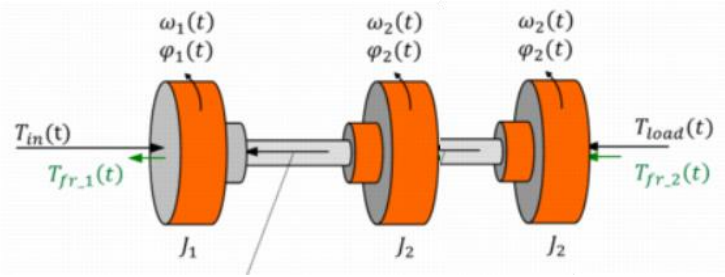
- 1-mass system



- 2-mass system



- Multi mass system



 ©B&R. All rights reserved

电机带负载的连接分类

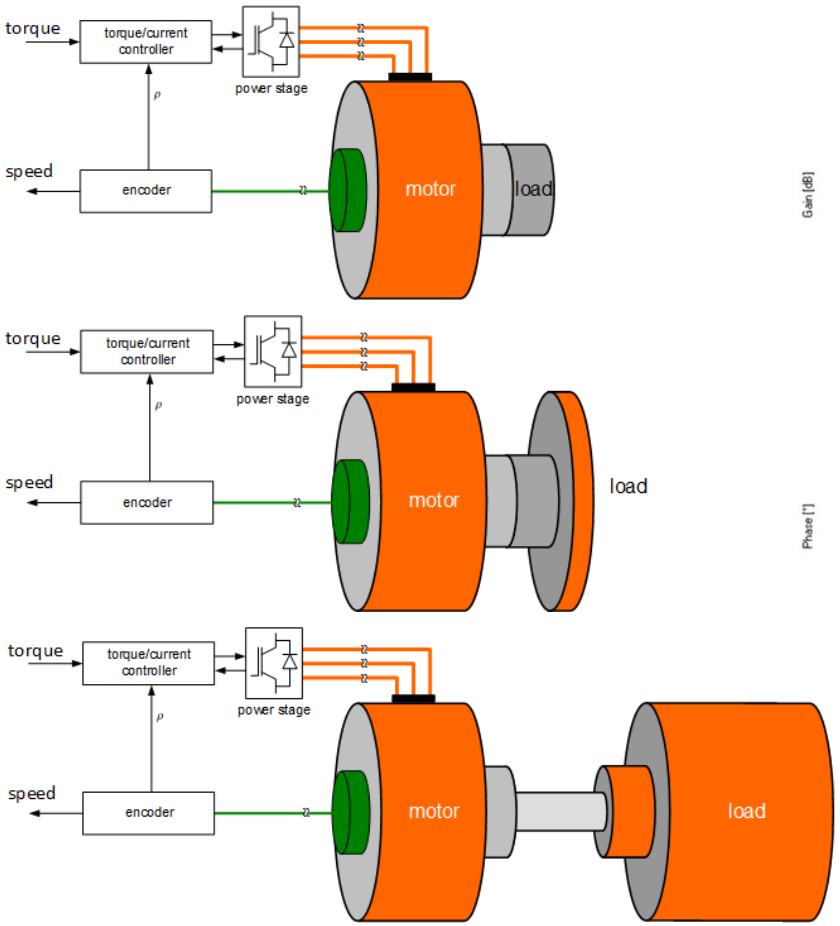
We divide into 3 types dependent on phase crossover frequency

- Rigid: $f_{res} \gg f_{180}$
- Stiff: $f_{res} \approx f_{180}$
- Flexible: $f_{res} \ll f_{180}$

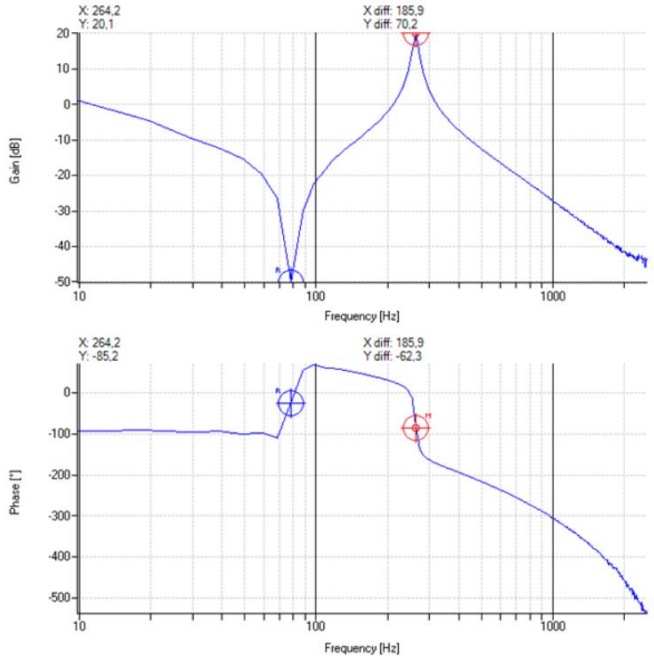
See help:

→ GUID d40cae6b-8a77-4cb9-b860-319044ceffa0

→ GUID e7574c7e-bf53-49c9-8e28-a6922594fccb



Frequency response of a 2-mass system



Resonance (f_{res}), Anti-resonance (f_{ares})

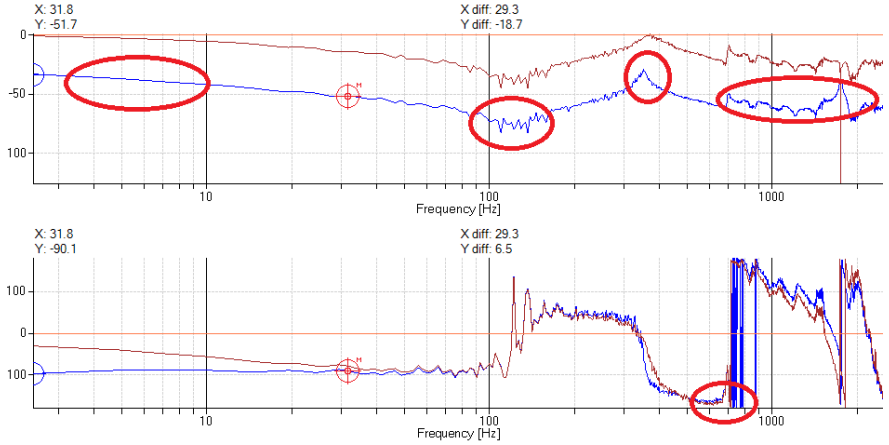
Phase crossover frequency (f_{180})

 ©B&R. All rights reserved

SLO Bode 图

频率响应分析包含了系统很多特征和信息

- 惯量
- 共振频率
- 反共振频率
- 穿越频率
- 摩擦力
- 刚性
- 编码器
- ……



 ©B&R. All rights reserved

SLO Bode 图原理
当前使用的输入和输出

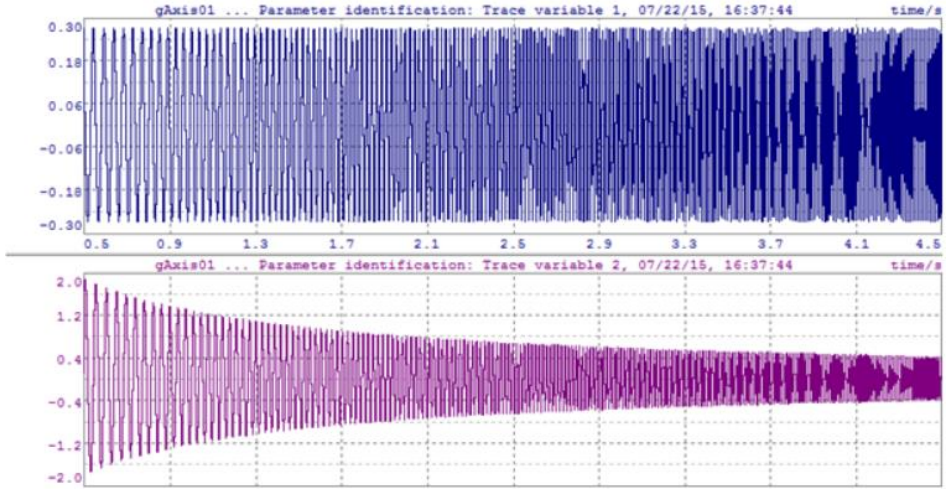
输入：电机电流 I

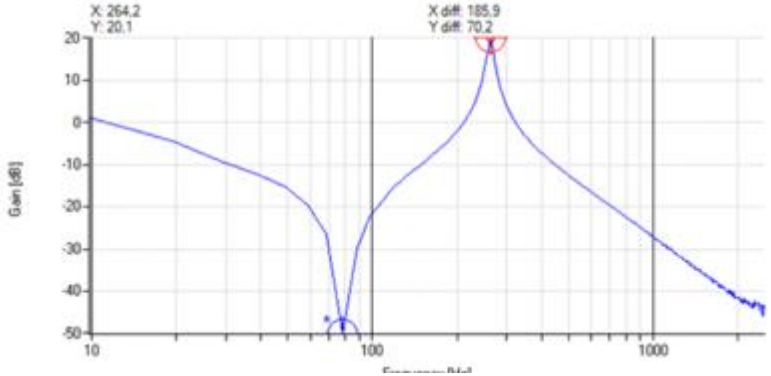
输出：电机速度 v

通常分析的都是这两个量，因为负载侧通常没有编码器。

Y=G(s)*X

开环Bode图中幅值计算 20log(FFT(v)/FFT(I))

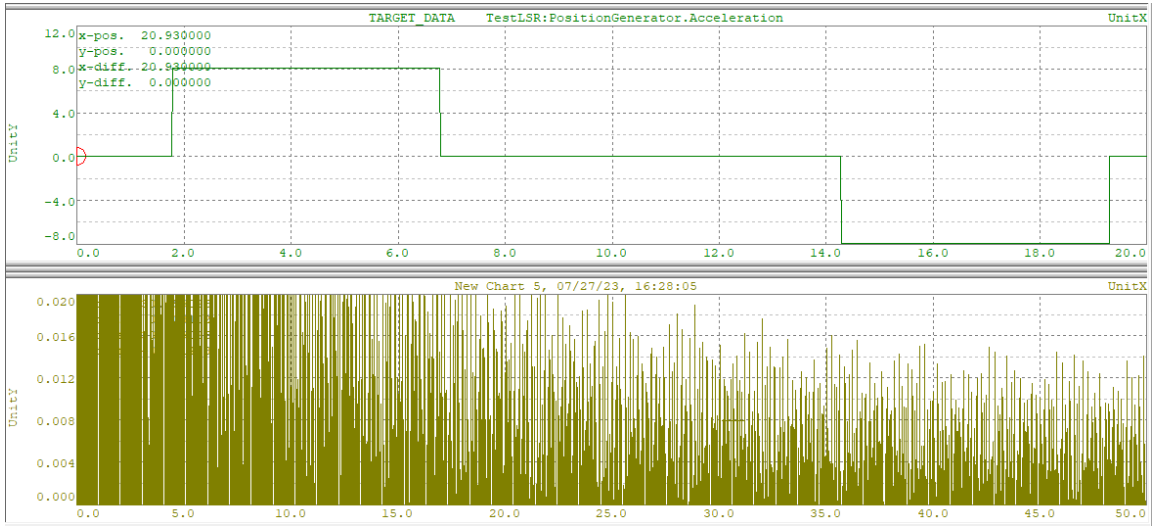


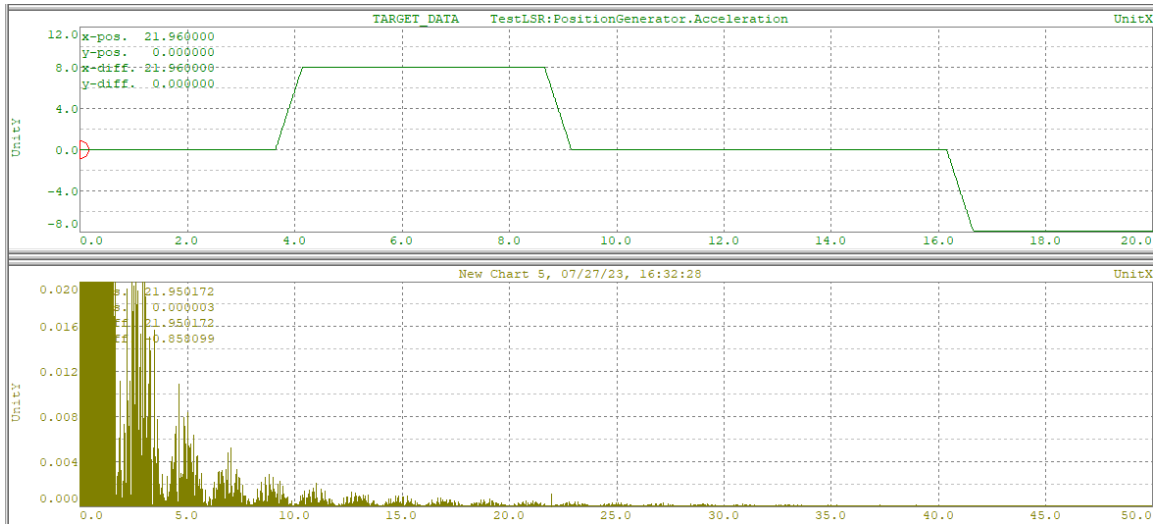


- SLO Tuning 使用PRBS信号时，会让驱动产生覆盖全频率的电流噪声，然后采集反馈速度。 使用这两个数值相除取log得到bode图中的幅值图。

©B&R. All rights reserved

信号FFT举例





上部分是信号

下部分是FFT结果

©B&R. All rights reserved

SLO Bode 原理
明确输入和输出

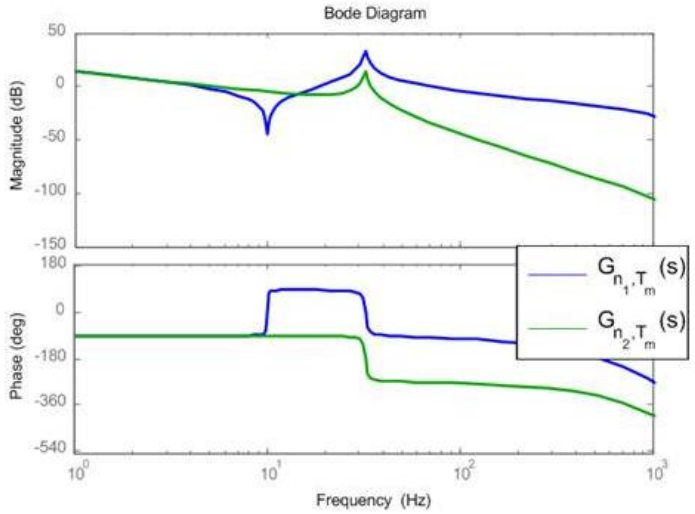
从电机转矩到电机角速度和从电机转矩到负载角速度之间的传递函数分别为：

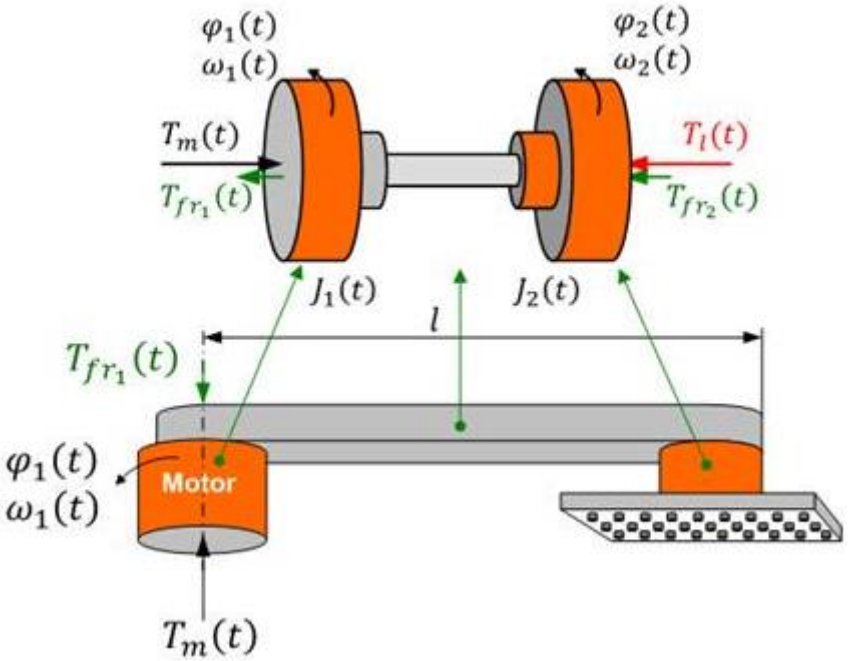
Transfer behavior: $T_m \rightarrow \omega_1$ **vs.** $T_m \rightarrow \omega_2$

$$G_{\omega_1,T_m}(s) = \frac{1}{J_1 + J_2} \cdot \frac{J_2 \cdot s^2 + d_{damp} \cdot s + c_{stiff}}{s \cdot \left(\frac{J_2 \cdot J_1}{J_2 + J_1} \cdot s^2 + d_{damp} \cdot s + c_{stiff}\right)}$$

$$G_{\omega_2,T_m}(s) = \frac{1}{J_1 + J_2} \cdot \frac{d_{damp} \cdot s + c_{stiff}}{s \cdot \left(\frac{J_2 \cdot J_1}{J_2 + J_1} \cdot s^2 + d_{damp} \cdot s + c_{stiff}\right)}$$

开环





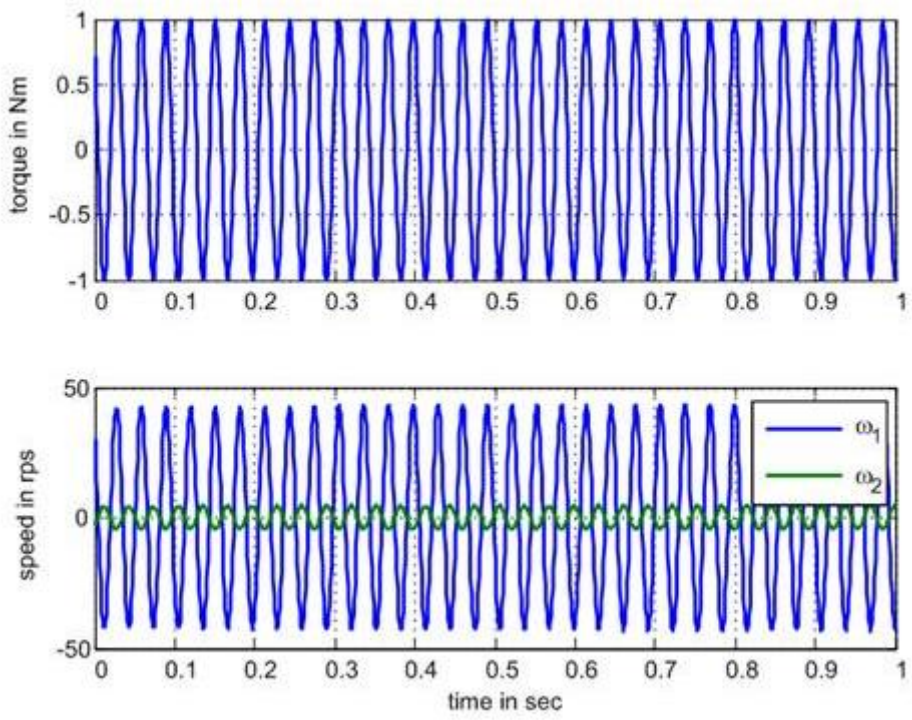
 ©B&R. All rights reserved

SLO Bode 图原理
共振频率的理解

假设电机转矩的输入为幅值为1，频率为共振频率的正弦信号输入，在电机端的角速度W1 = 40,负载端的角速度响应为W2=1.2.

则此频率下幅值为 20log(40/1) = 32db

- 此频率下电机电流被放大，容易产生噪声。
- 在Test中我们看到的电流震荡很多不是这个共振频率，是由于闭环造成的振动。



$$f_{res} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{c_{stiff}}{J_r}}, \quad J_r = \frac{J_1 \cdot J_2}{J_1 + J_2}$$

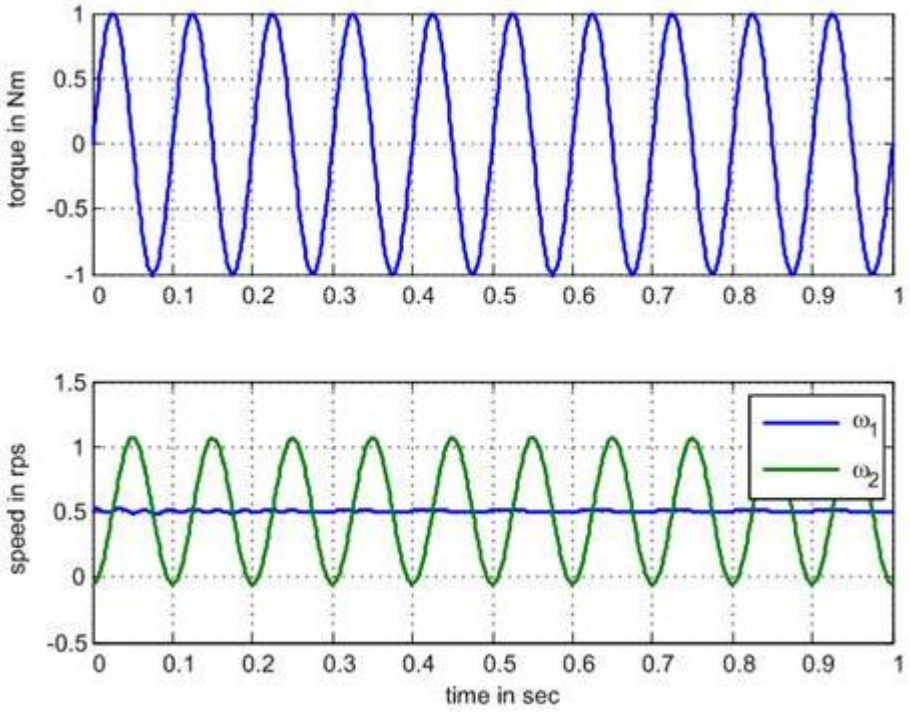
 ©B&R. All rights reserved

反共振频率的理解

此频率下电机的速度幅值减少

此频率和负载惯量有关，和连接刚性有关，与电机惯量无关。

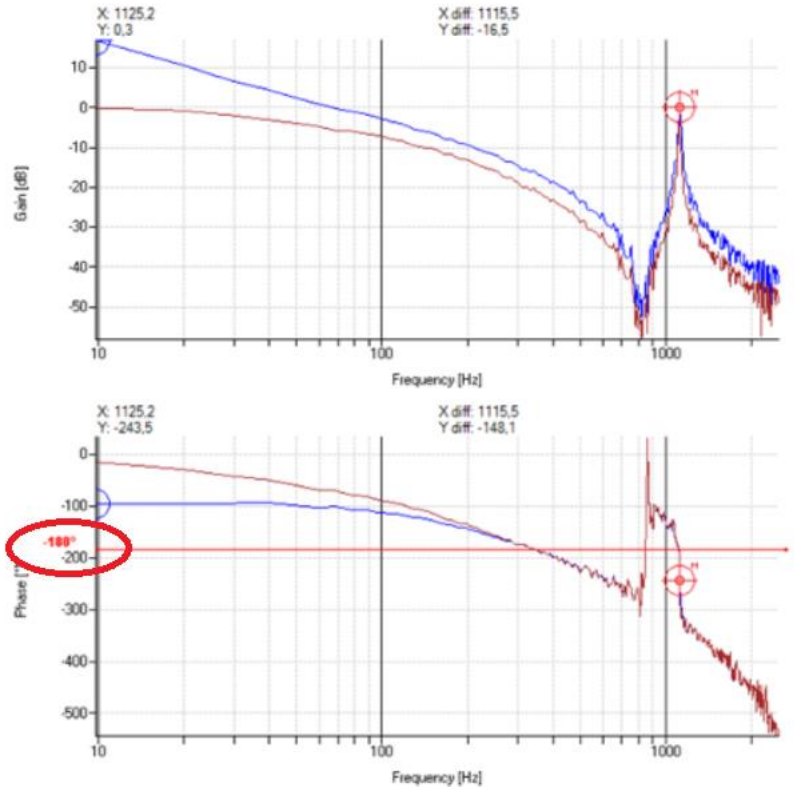
没有太好的手段处理

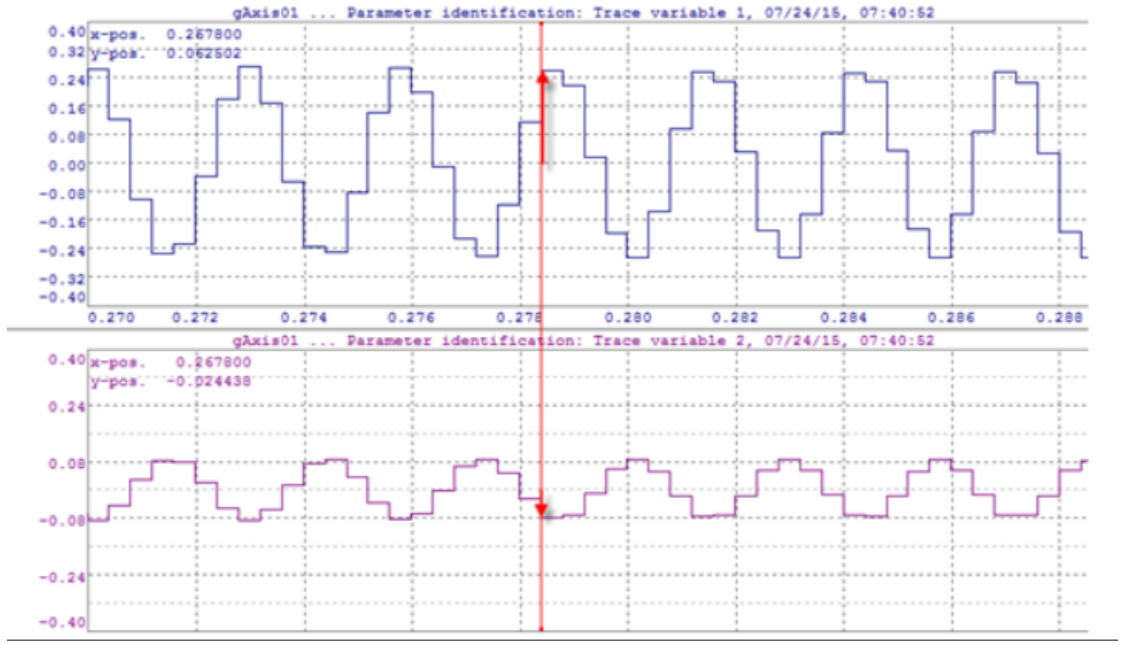


$$f_{antires} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{c_{stiff}}{J_2}}$$

 ©B&R. All rights reserved

相角穿越频率

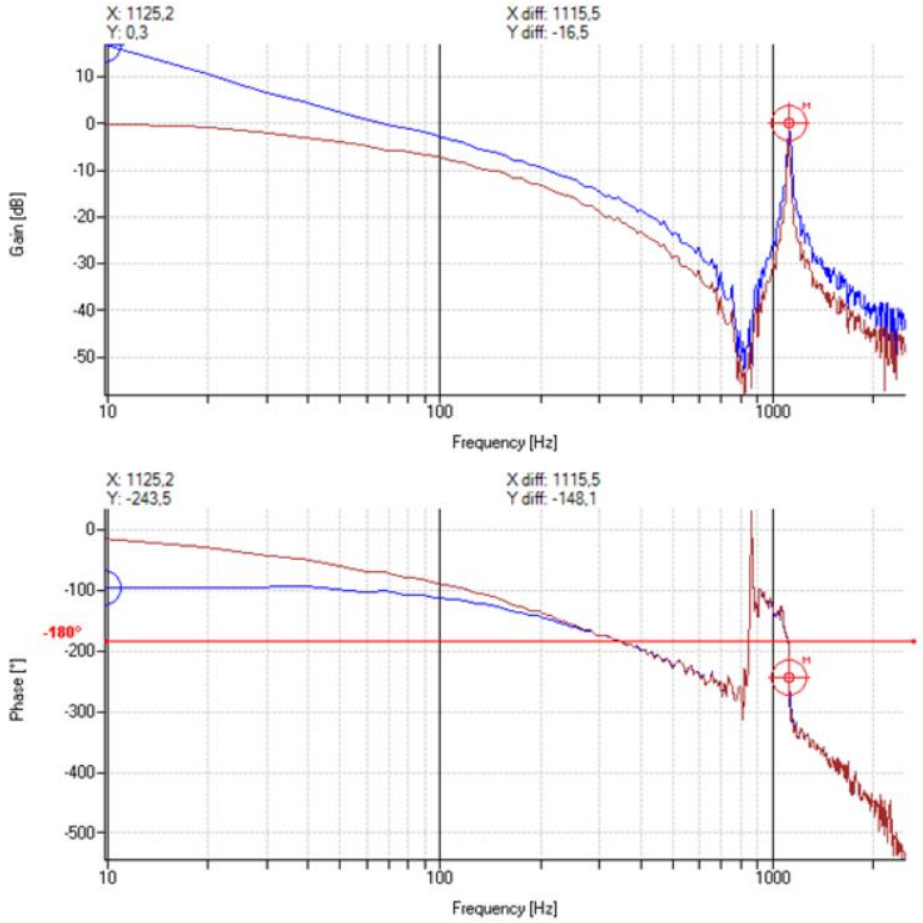




©B&R. All rights reserved

极限例子1：共振和反共振频率 大于 相角穿越频率

- 共振在这种情况下是一个问题，因为它对可实现的增益具有限制作用。
- 原因在于180°相角穿越频率的闭环振幅响应值为0 dB。在这种情况下，反共振是不重要的，因为它阻挡的频率不会显著降低控制行为。共振频率可能会导致Bode图过0，产生振动问题。

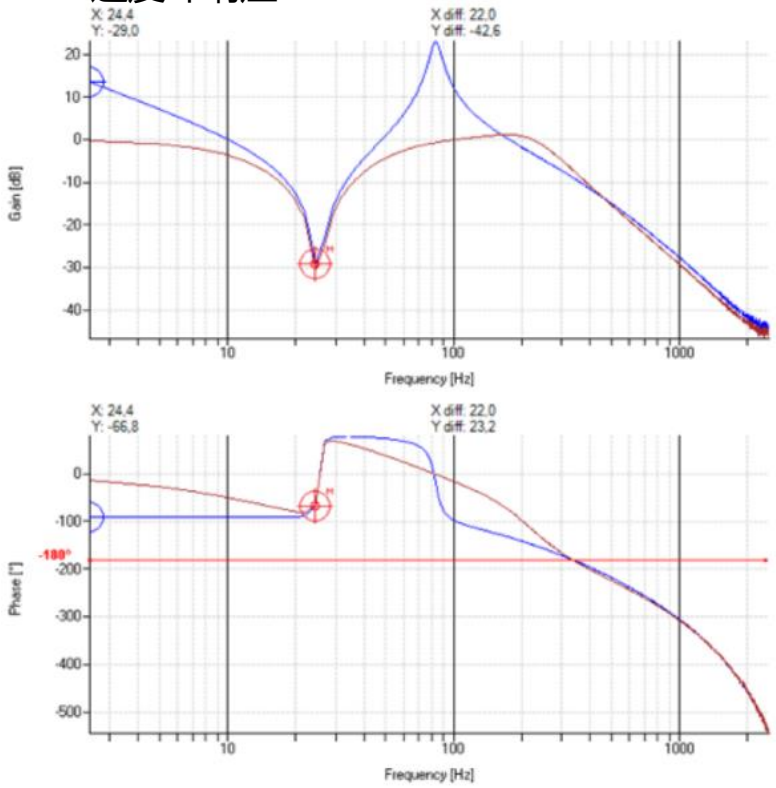


 ©B&R. All rights reserved

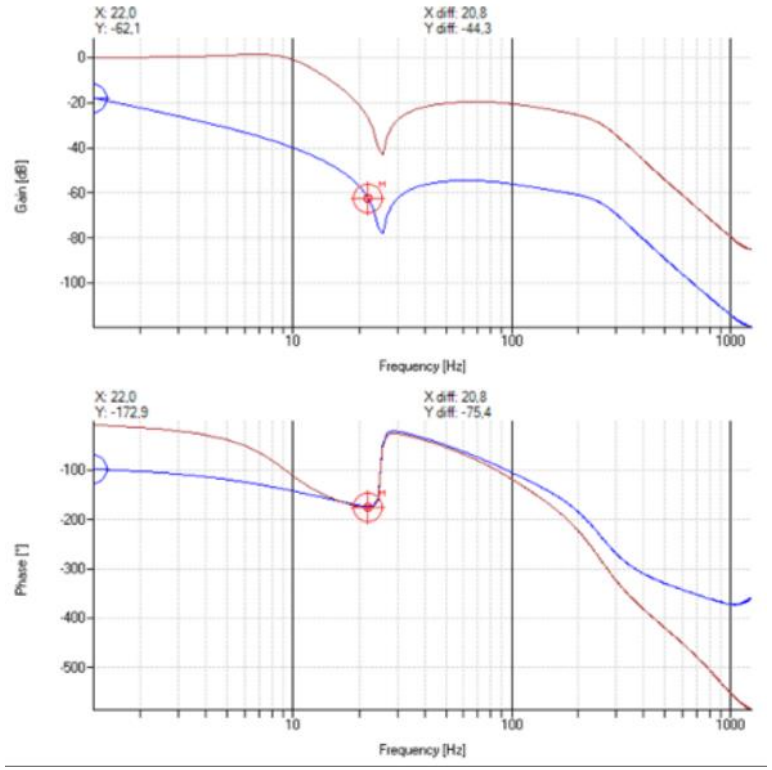
极限例子2 共振和反共振频率 小于 相角穿越频率

此时反共振频率影响系统速度环响应的相位
造成位置环没有足够相位裕度

速度环响应



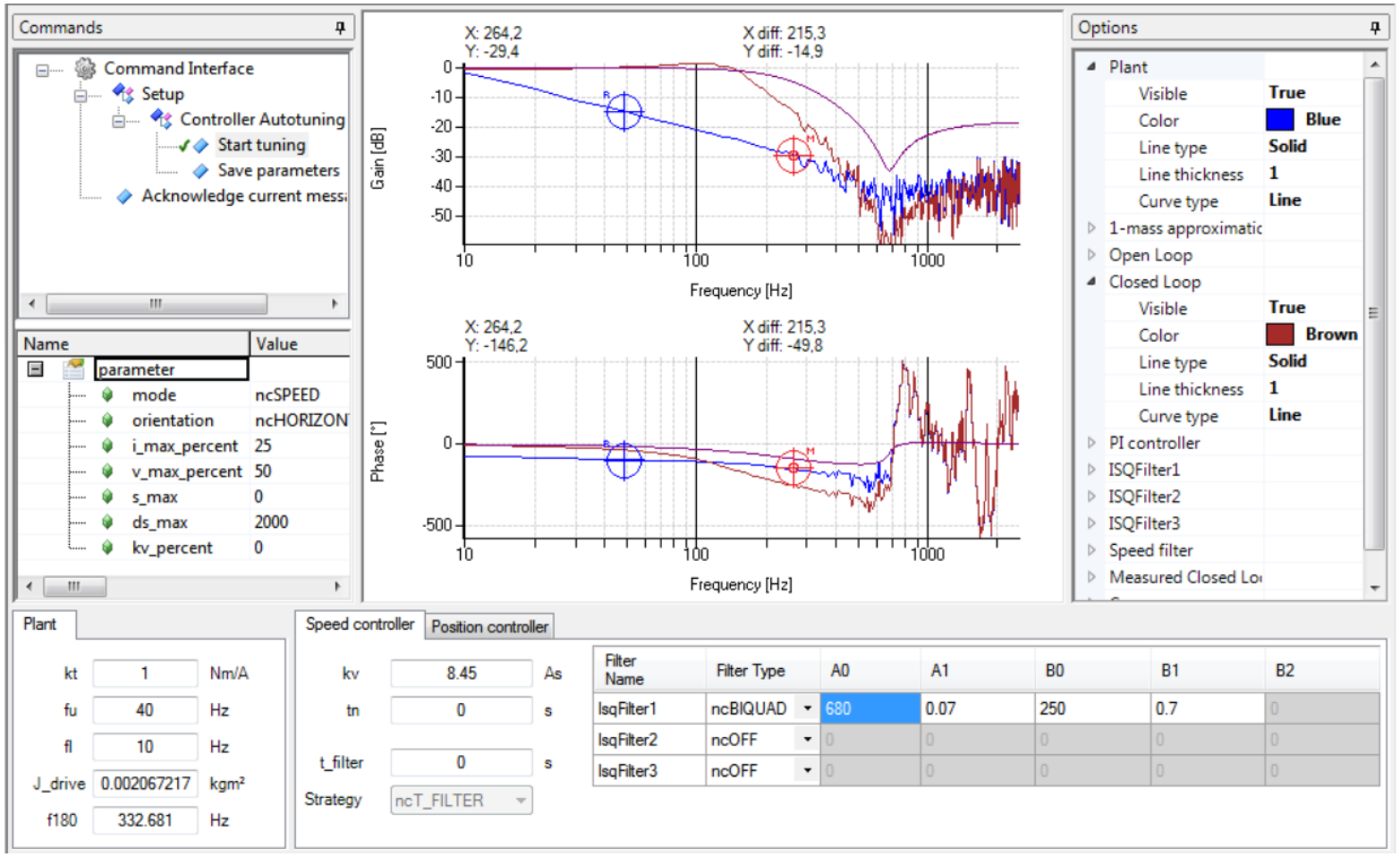
位置环响应



- 如相角穿越频率在 共振和反共振频率 附近或中间，要根据情况分析

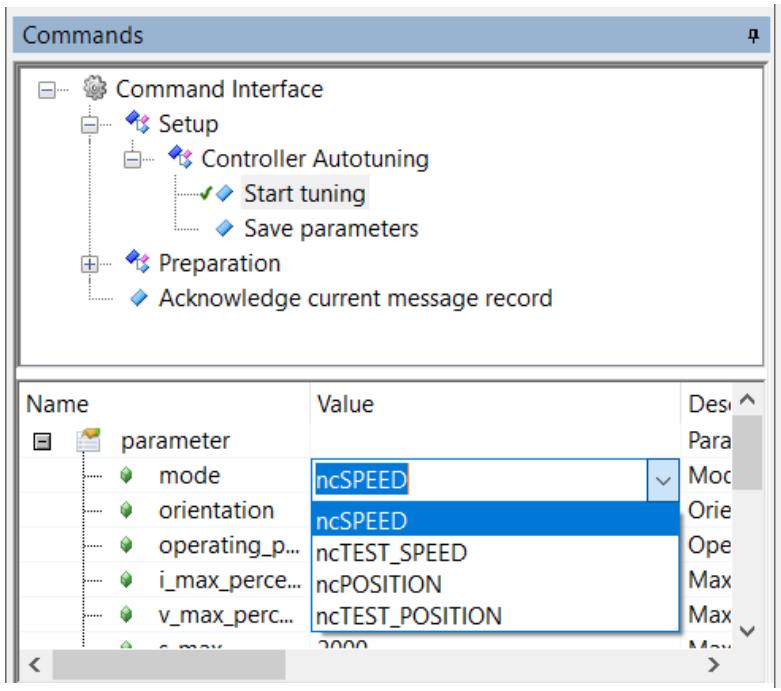
©B&R. All rights reserved

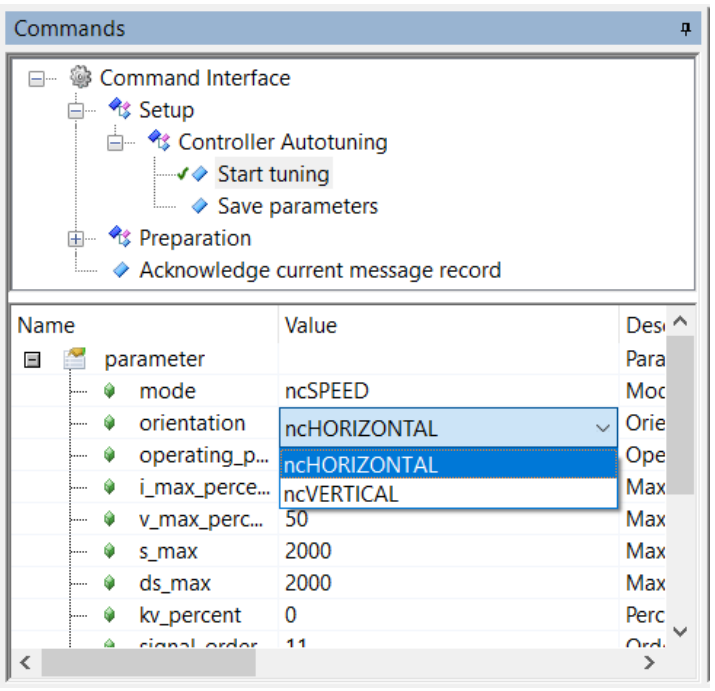
Servo loop optimizer
AS中界面

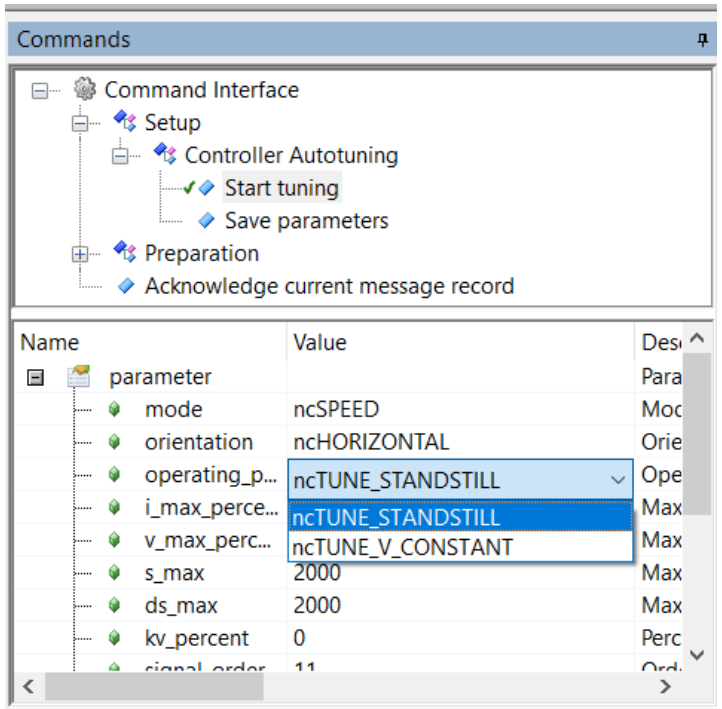


 ©B&R. All rights reserved

Servo loop optimizer
参数解释-1







SLO 模式只有四种可以选择，都是常用的

主要是为了看bode图

Test 中可以选择更多

选择ncHORIZONTAL

（除非垂直负载较大）

选择ncTUNE_STANDSTILL

(另一种没没尝试过)

 ©B&R. All rights reserved

Servo loop optimizer
参数解释-2

i_max_perce...	25	Ma

由小到大进行逐步测试。表示电机额定电流的 xx%。

通常从25开始，如果负载较大;刚性较弱；连接有间隙等情况，为了激励负载得到bode图准确，加强这个参数看bode图是否变化。

signal_order	11	Order of excitation sigr

默认0，内部使用9阶信号。

建议这里填写11，可以分析到更低频率。

s_max	2000	Maximum move distanc
ds_max	2000	Maximum lag error

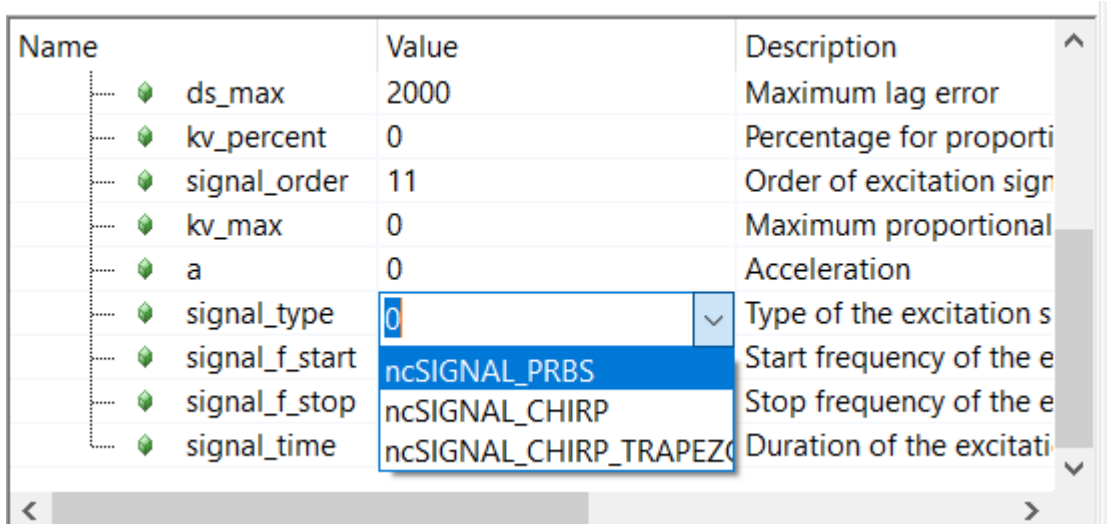
镇定过程会振动，如果这两个不设定可能报警

©B&R. All rights reserved

Servo loop optimizer
参数解释-3

- 多数情况都选则ncSIGNAL_PRBS
  - 选择此模式不需要输入f_start f_stop time 参数
  - 此模式电机输出电流为全频谱信号

- 选择ncSIGNAL_CHIRP是为了细致的看某一段频率bode图。
  - 最好是执行过ncSIGNAL_PRBS，知道共振频率及反共振频率，适当放大输入到f_start,f_stop。 Time通常为1-2秒。
  - 此模式下电流从低频到高频逐步增加。
  - 此模式可能会在低频抖动变大造成镇定失败。
  - 此模式激励电流需要降低。例如从20%开始。
  - 如果摩擦力较大也可以使用此模式，因为PRBS信号可能激励不足



 ©B&R. All rights reserved

Servo loop optimizer
系统惯量评估

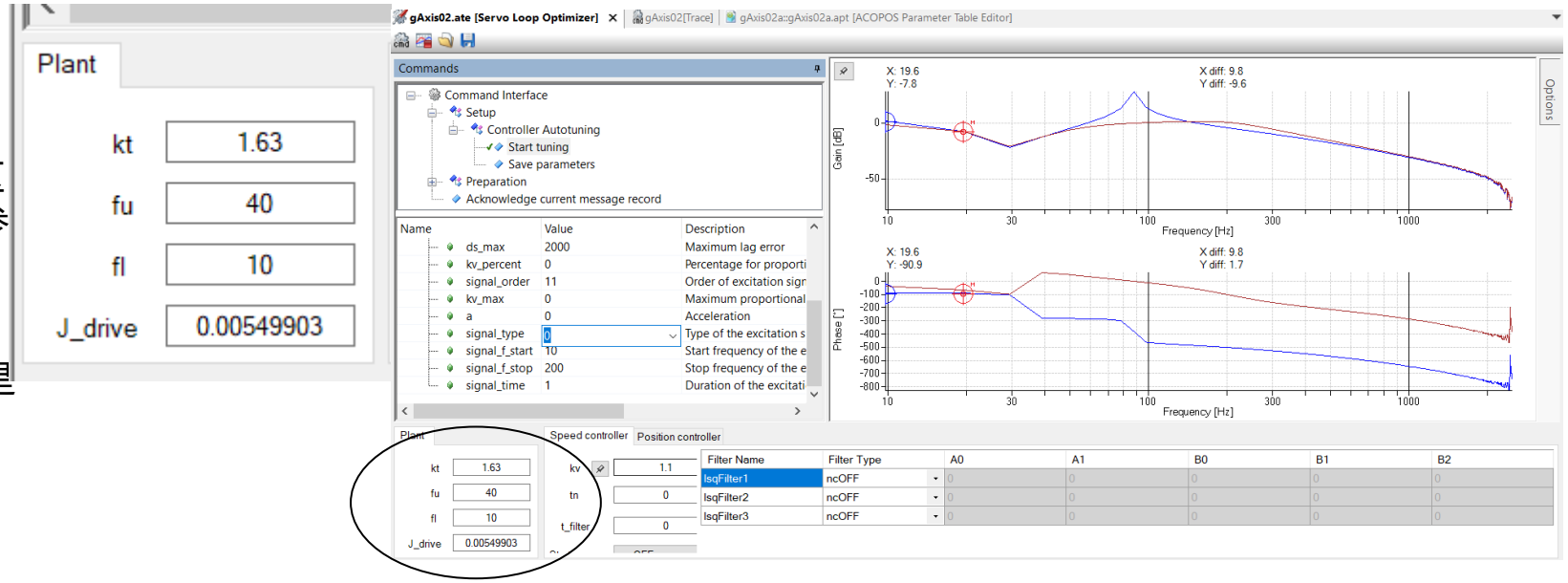
使用Bode图评估惯量

- 在低频段按照单质量体进行评估
  - 需要输入评估的频率上下限fu,fl
  - 评估结果是总惯量

此评估方法与test中ncFF不同，结果也会有些区别。个人感觉ncFF中评估会好一些，这里仅供参考。

摩擦力的大小可以通过开环Bode图低频段斜率是否是-20db进行判断。

也可以通过闭环低频是否在0db进行判断。



刚性 – 影响共振和反共振 频率

阻尼 – 影响共振和反共振 峰值

编码器 – 看高频段噪声

©B&R. All rights reserved

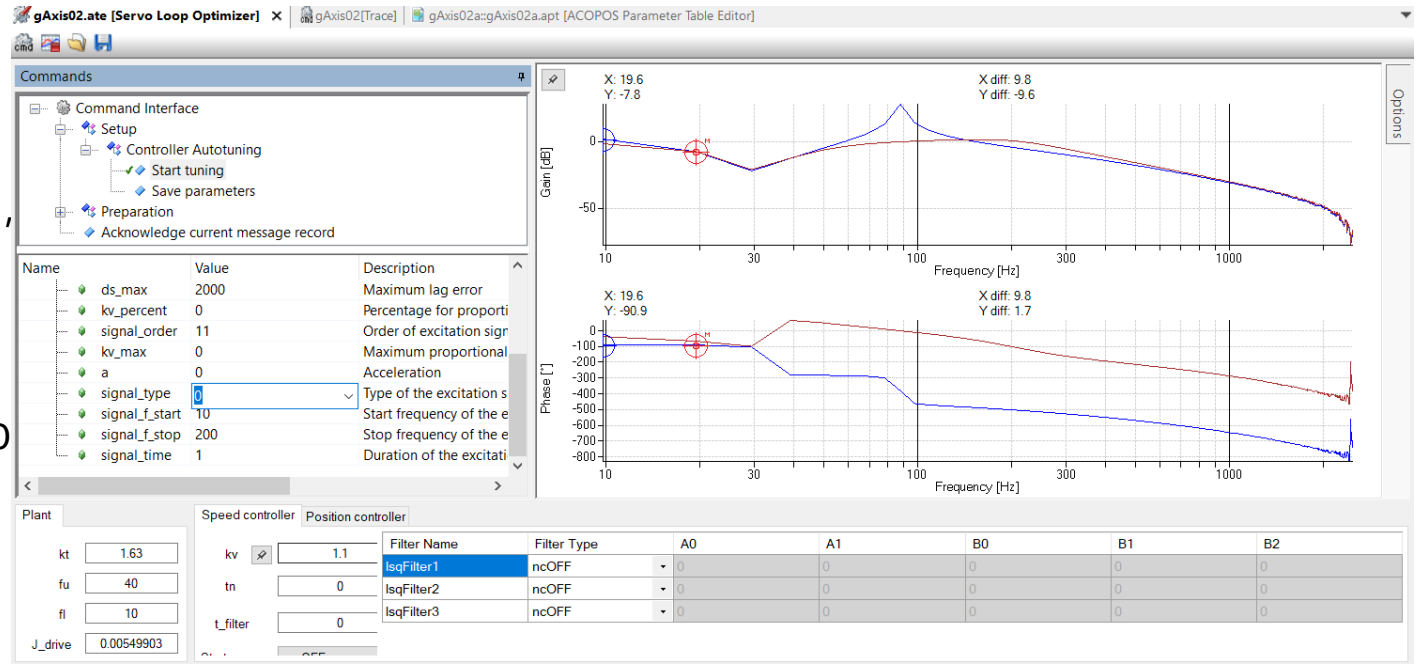
Servo loop optimizer
控制目标

三环调整

- 保证稳定的情况下，尽量大。
- 在速度环上使用积分，来保证控制性能。
- 位置积分可以考虑只是用来将legerror稳态在0，便于观测，不需要很强。

Bode图中

- 让闭环曲线尽量靠近0，超过0会导致legerror振动，小于0表示控制效果变差。
- 闭环低频如果不到0，需要增加速度环积分



 ©B&R. All rights reserved

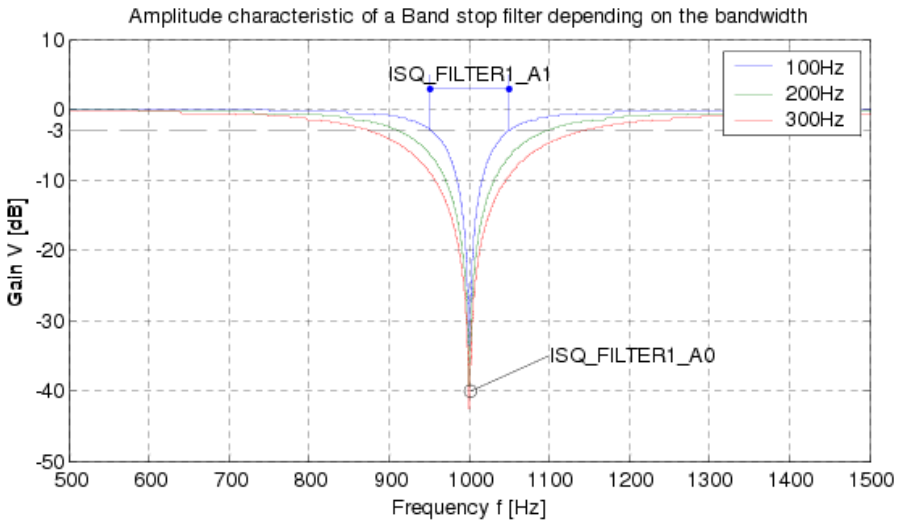
Servo loop optimizer

Notch

两个参数： 中心频率，带宽

A0 中心频率 被滤波最多

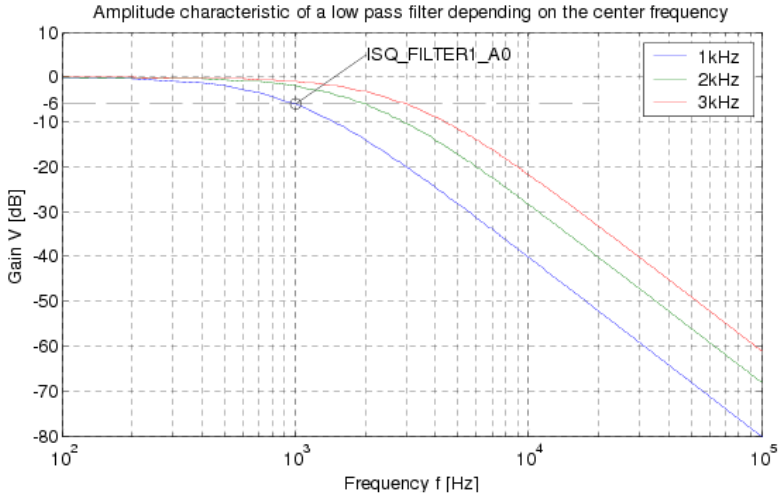
A1 在中心频率+-1/2 A0 滤波幅值 -3db



-3dB 相当于幅值比为
1:1.4125=0.707

1个参数： 截止频率

A0 此频率幅值 -6db

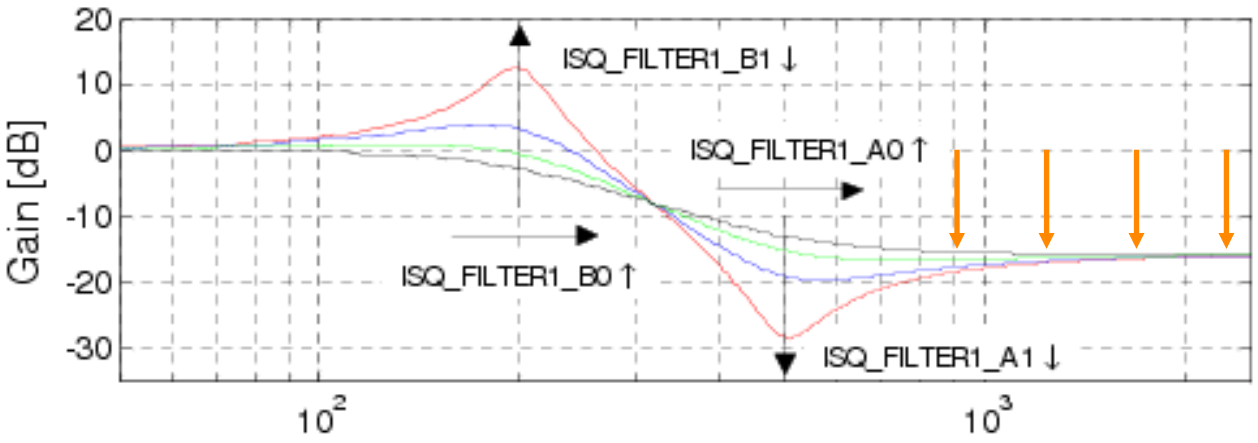


-6dB 相当于幅值比为
1:2 = 0.5

©B&R. All rights reserved

Servo loop optimizer

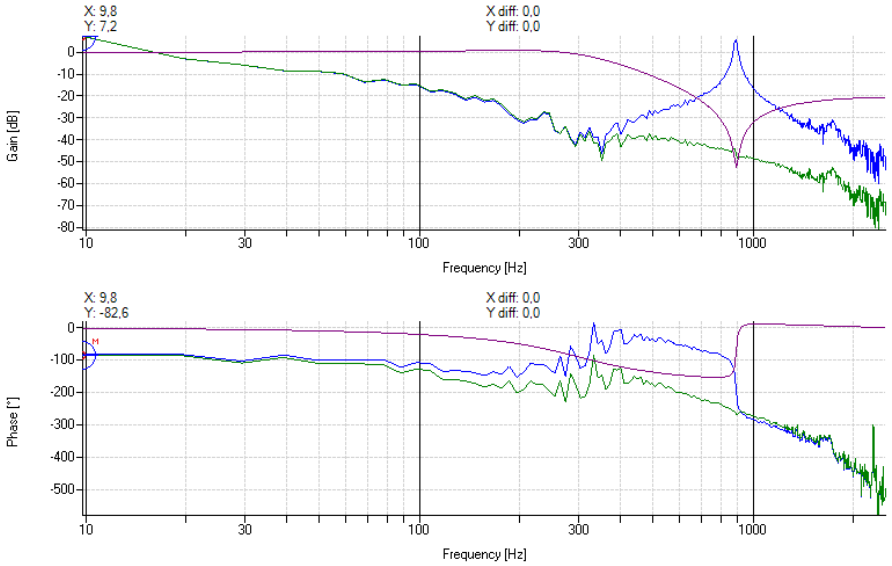
BQ filter



4个参数：

- A0 = Resonance frequency
- B0 = Antiresonance frequency
- Select A1 so that resonance in the open loop is eliminated
- Select B1 not lower than 0.5

- 优点：可以调整几个参数达到滤波共振频率，同时对共振频率以上的频率进行部分抑制。

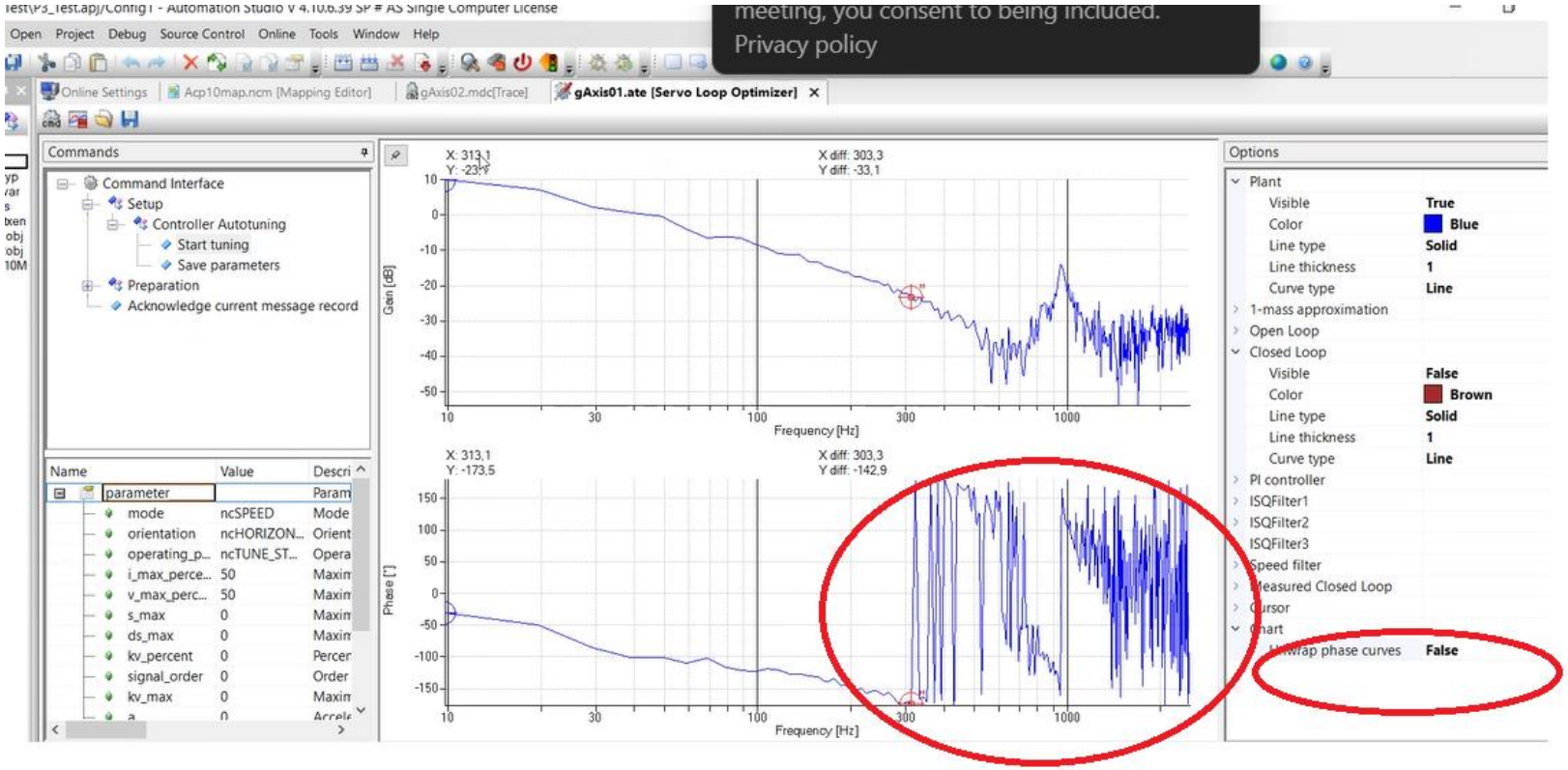


 ©B&R. All rights reserved

Servo loop optimizer
Test模式

- SLO中TestSpeed，TestPosition模式很有用,可以看到测量的闭环，这是可以和计算的闭环比较可靠

- 查看相位曲线最好关掉相位包络线，这样曲线会限定在最低-180度，看的更清楚一些。



 ©B&R. All rights reserved

现场情况

现场情况往往更加复杂，以上是辅助理解及分析可能方向。
给实际现场参数调试提供更多思路。
多数现场由于鲁棒性的原因设定参数需要更加保守一些。

如果对于必须加notch滤波的现场，要增加Autotune功能。
Bode图辅助功能

 ©B&R. All rights reserved

其他增强控制性能的方法-修改电流环参数

- 修改ID1161 ICTRL_AUTO_CONFIG 可以设定为5（加强电流环后，速度环参数可能适当降低。设置前后需要仔细检查电流环参数）
- 设置后可以通过SLO进行测试看三环是否能被加强，截止频率是否提高。修改后仔细检查。

例：

ID1166 P3=2

ID223 IctrlKv= 32 ID225 IctrlTi = 0.00225

推荐使用5 – 电流环计算更aggressive

ID1166 P3=5

ID223 IctrlKv= 65 ID225 0.0031

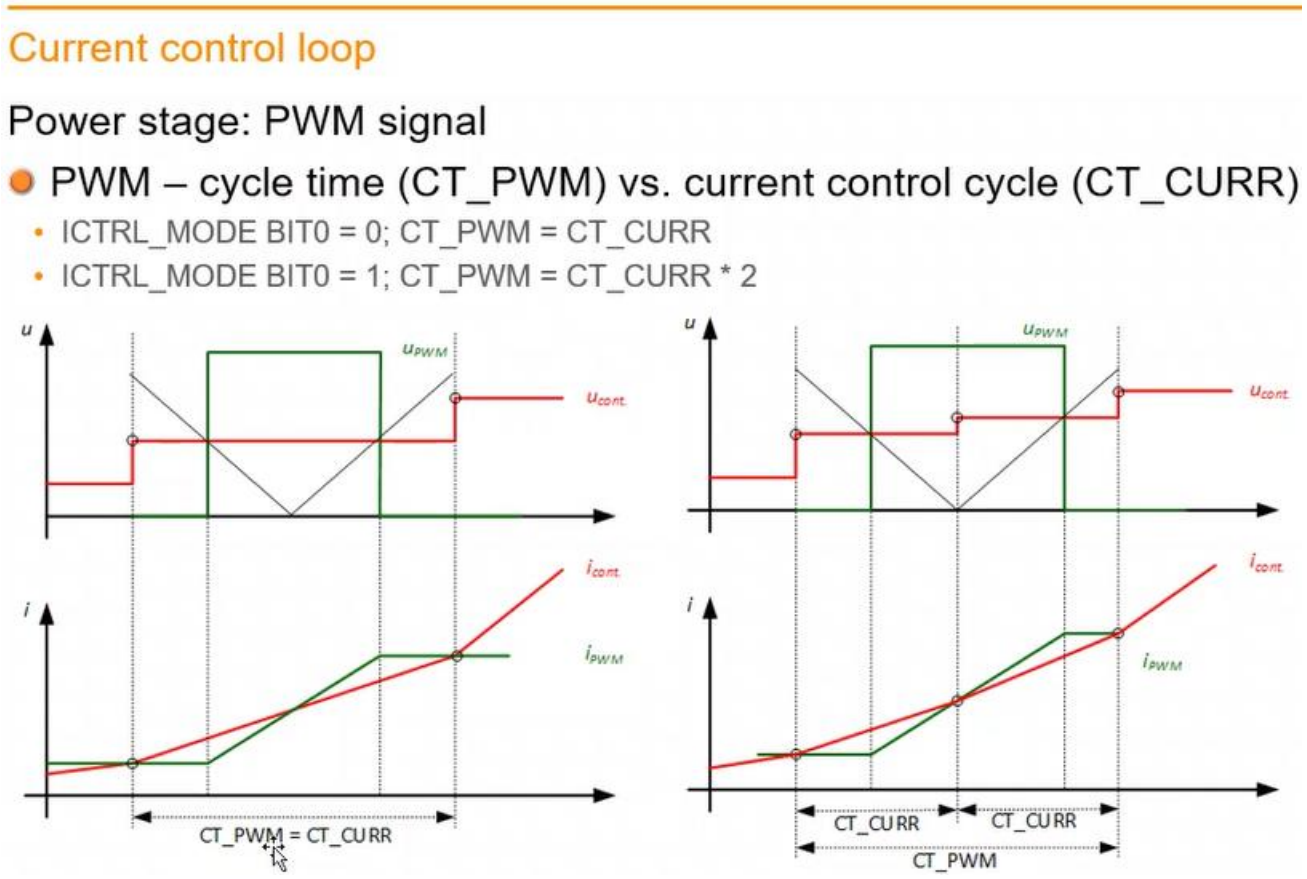
```
ictrl_auto_config = 2
ictrl_kv = 32.262299
ictrl_ti = 0.0024527584
f_-3db = 264Hz


ictrl_auto_config = 5
ictrl_kv = 65.867188
ictrl_ti = 0.003154713
f_-3db = 684Hz
```

 ©B&R. All rights reserved

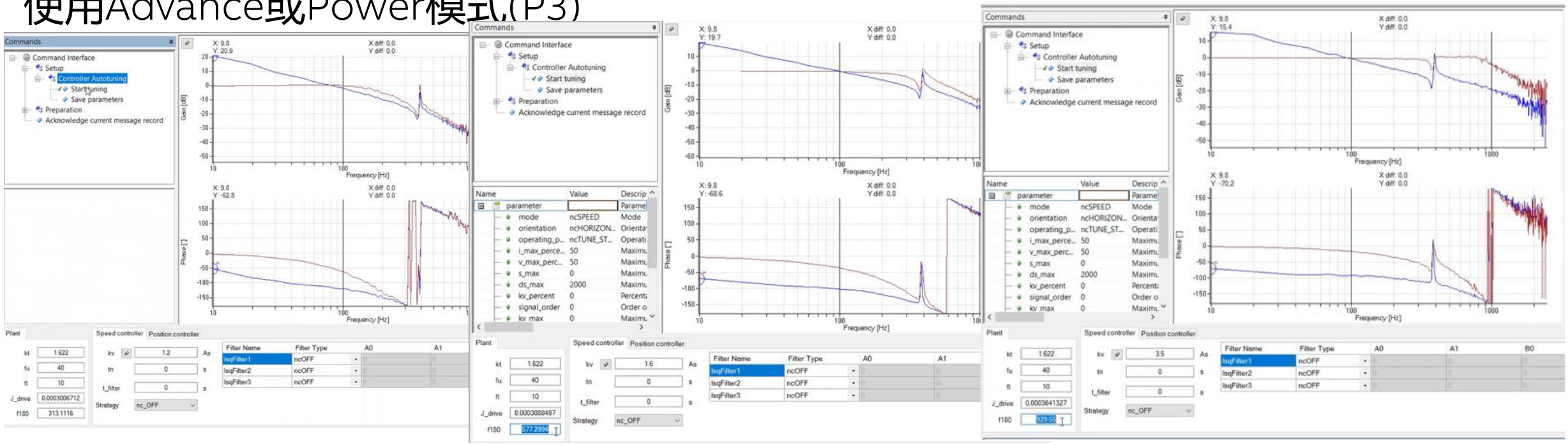
其他增强控制性能的方法-修改电流环周期

- 修改 ID869 ICTRL_MODE = 0,1 电流环控制周期减半。
- 此参数默认为0,设置为1后电流环周期减半。
- 调整此参数后需要SLO测试，并比较实际控制效果，仔细检查。部分项目不一定可以达到理想效果。



 ©B&R. All rights reserved

使用Advance或Power模式(P3)



- Standard mode f180 = 313Hz Kv=1.2
- Advance mode f180 = 577Hz Kv=1.6
- Power mode f180 = 929Hz Kv=3.5

- 需要注意改变此模式对刚性强的系统效果比较明显。（例如直连或直线电机）

©B&R. All rights reserved

刚性弱的系统

- 刚性弱的系统可以尝试基于模型的前馈控制或基于模型的反馈控制。（下一期weTalk）

 ©B&R. All rights reserved

B&R

A member of the ABB Group