



术语讲解系列

从磁铁开始的电机控制- 伺服驱动器的概念讲解

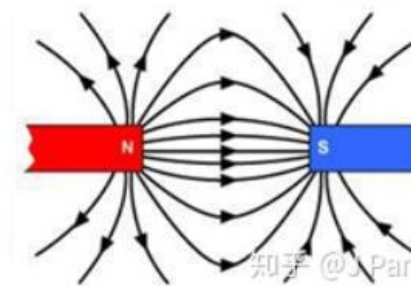
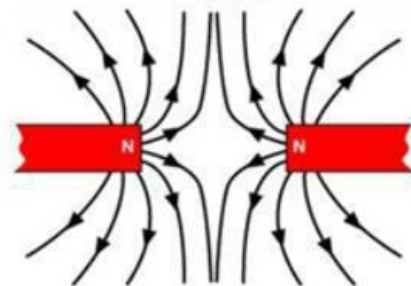
概览

- 伺服电机的控制 – 从磁铁说起
- 三环，三环参数整定
- 前馈控制
- 低通滤波，带通滤波，带阻（陷波）滤波
- 共振
- 振动限幅及Jolt

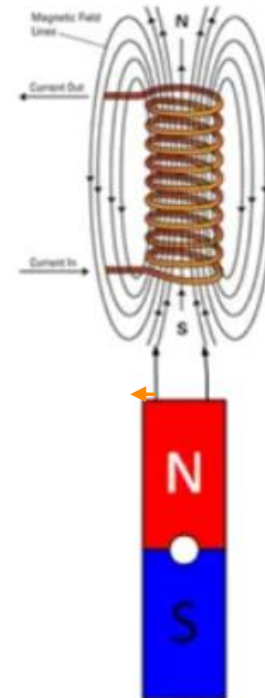
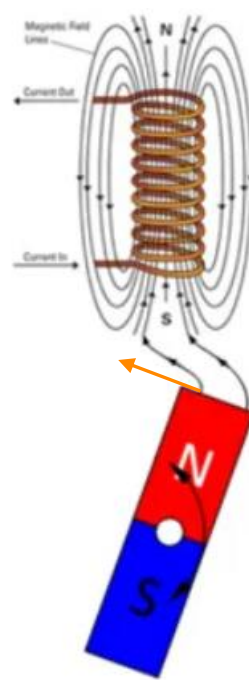
伺服电机的控制

从磁铁说起

- 磁铁：同极相斥，异极相吸



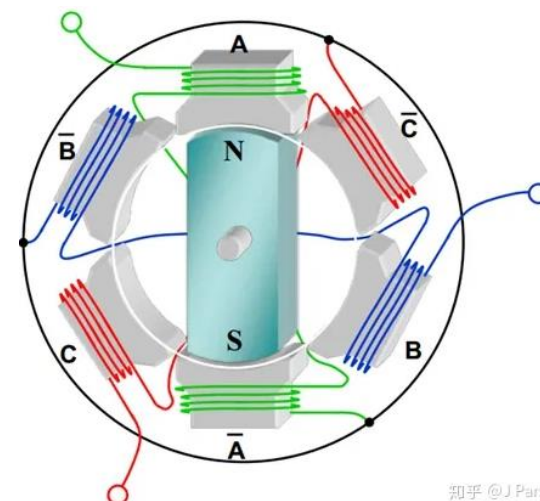
- 电磁铁：电流方向决定磁极方向，电流大小决定吸（斥）力大小



伺服电机的控制

伺服电机 - 永磁同步电机

- 伺服电机（永磁同步电机）： 转子 - 永磁体，定子 - 电磁铁
- 交流电流在定子线圈的流动，产生旋转的磁场 - 旋转的电磁铁 → 吸引永磁体转子旋转
- 电流的大小 → 电磁铁(场)的吸力大小 → 电机输出扭矩的大小
- 电流的频率 → 磁场旋转的快慢 → 电机的转速

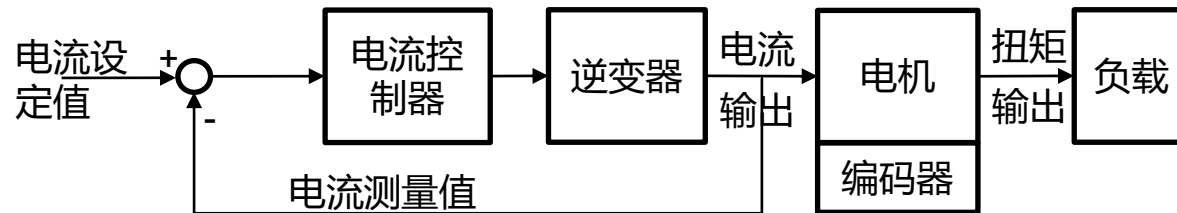


简化的三相永磁同步电机
(单对极转子)

伺服电机的控制

电流环 Current Loop – 电流/扭矩控制

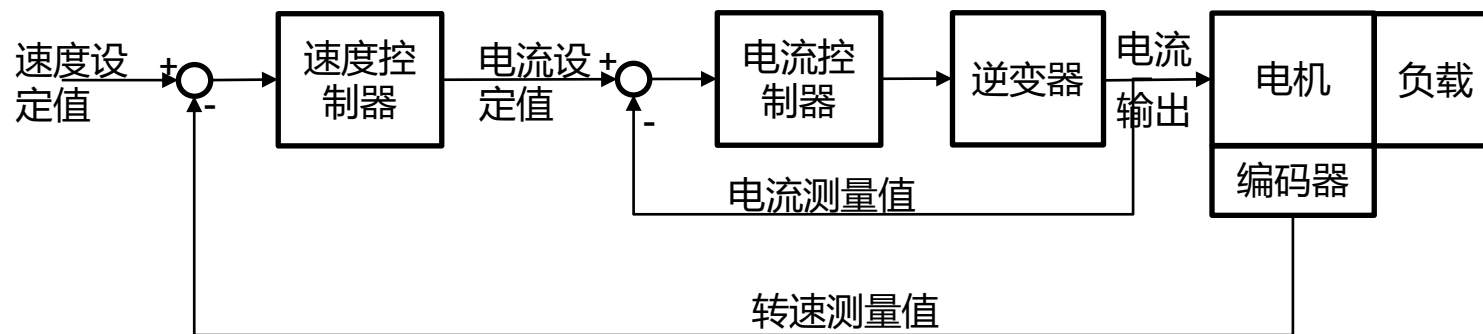
- 电流环 → 电流反馈控制 → 精确控制流过电机的电流大小和频率 → 电流/扭矩控制



伺服电机的控制

速度环Speed Loop – 转速控制

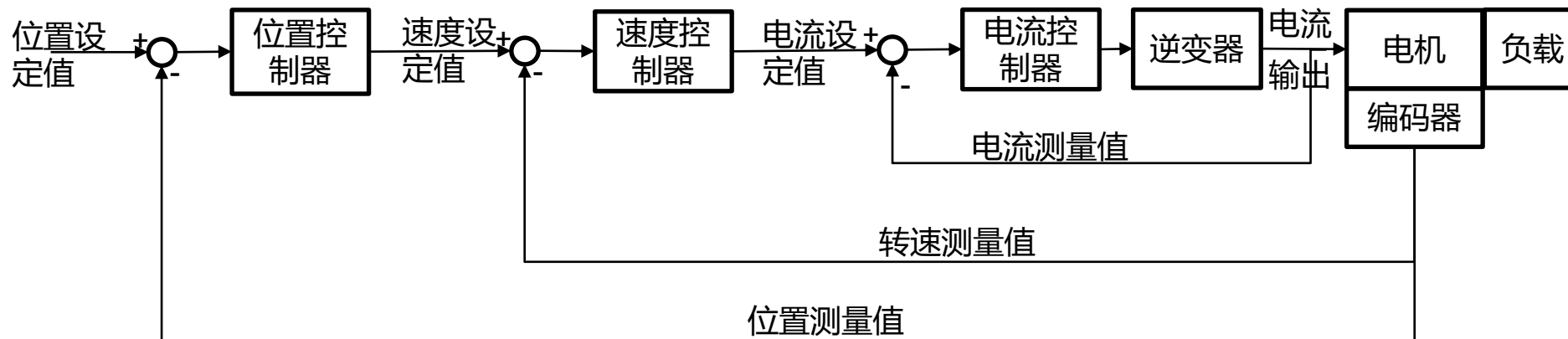
- 增加速度反馈控制，速度控制器的输出作为电流控制的设定值，则可以控制电机的转速



伺服电机的控制

位置环Position Loop – 位置(角度)控制

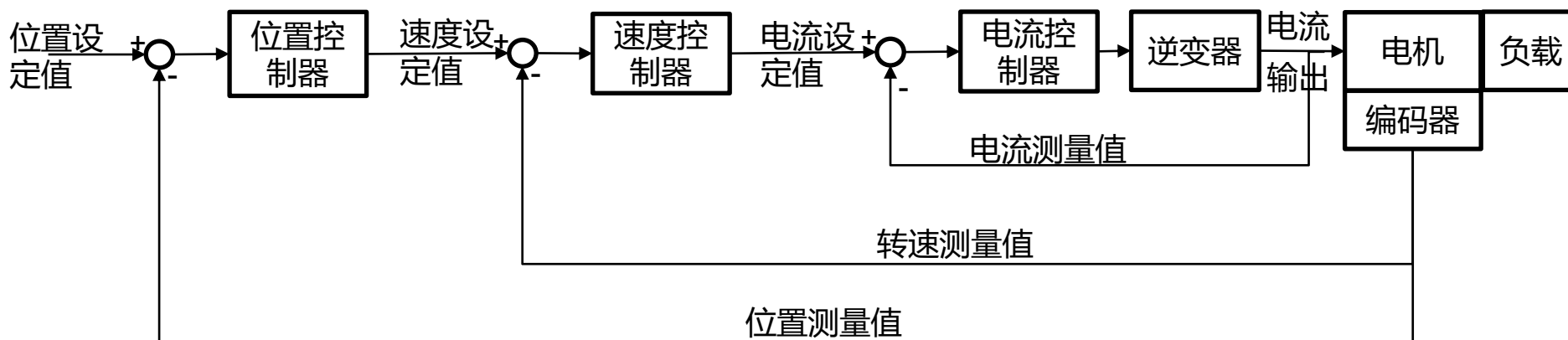
- 增加位置反馈控制，位置控制器的输出作为速度控制器的设定值，则可以控制电机的位置（角度）



伺服电机的控制

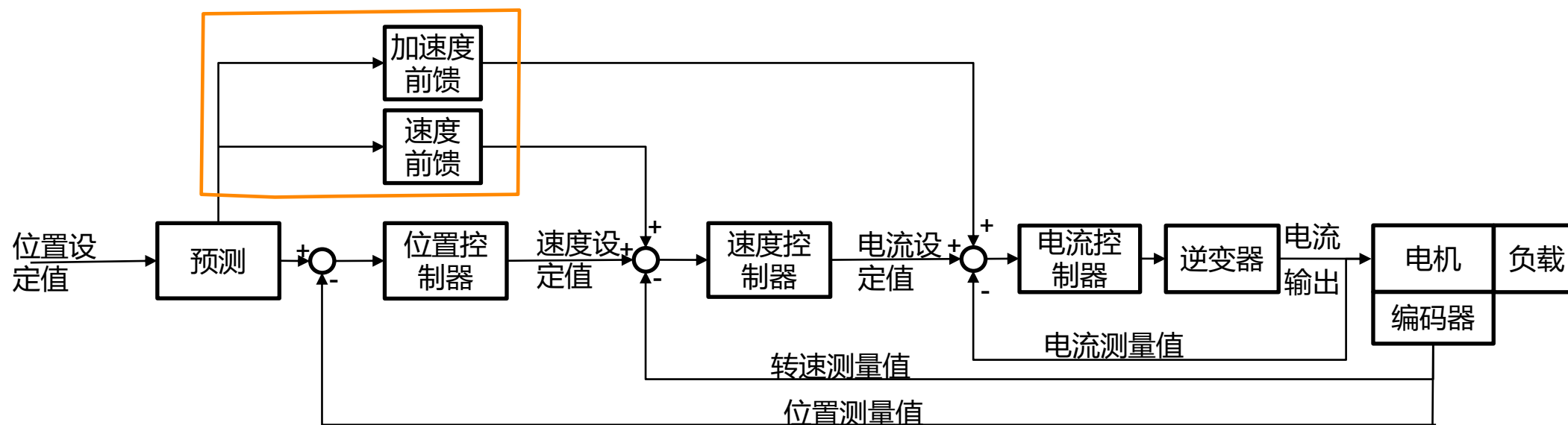
三环参数 – 基本参数整定

- 位置控制器和速度控制器通常为P(比例)控制，或者PI（比例积分）控制，参数： k_v , t_n
 - k_v 越大，系统响应越快(跟踪设定值)，但也越趋向不稳定
 - t_n 用于减少稳态误差，但使系统趋于不稳定
 - 优先采用Autotuning（先速度环，后位置环，加滤波器，加前馈），不满意再用Servo Loop Optimizer协助整定
- 电流控制器的参数直接由电机参数决定，无需整定



前馈控制Feed Forward Control

- 反馈控制：出现误差（设定值和测量值之差）时才能产生控制（矫正）作用
- 前馈控制（feedforward）：改善位置和速度的响应速度和跟踪性能（减小lag error）
- 通常同时使用速度前馈和加速度(扭矩)前馈

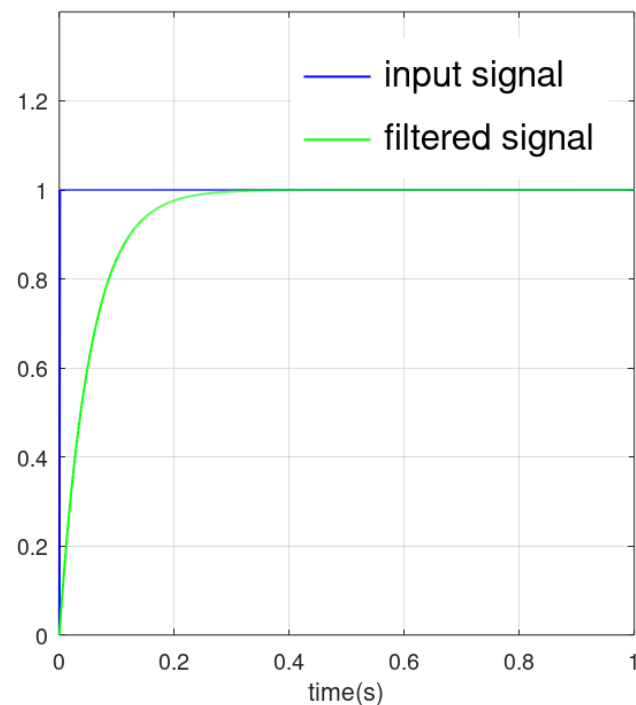
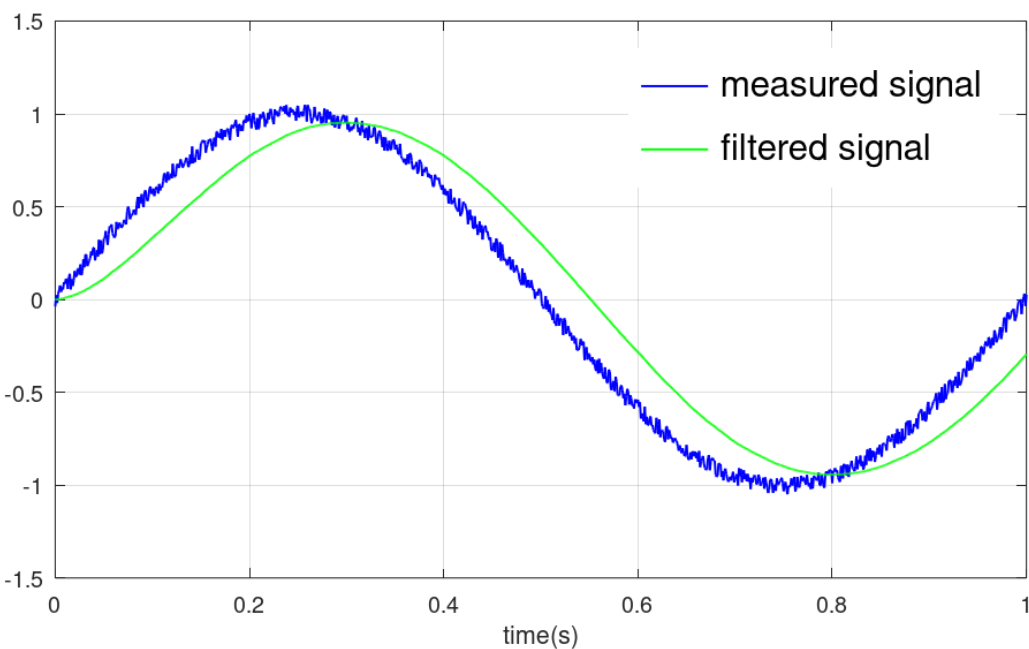
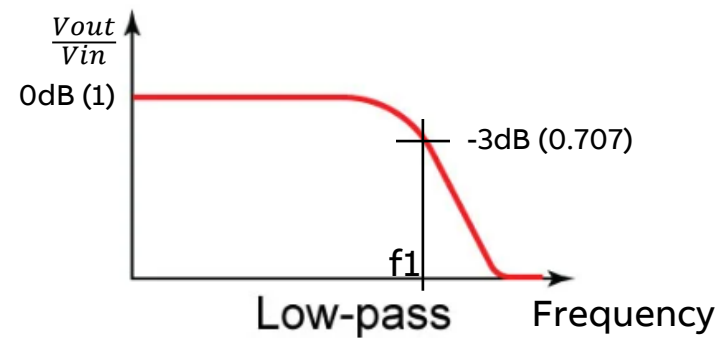


滤波器

低通滤波器

● 低通滤波器 Low Pass Filter:

- 允许小于某个频率 (f_1 , 截止频率) 的信号无衰减通过
- 常用于减小噪声干扰, 平滑信号, 抑制共振等
- 但会增加延迟, 使信号变化减缓, 减小控制回路的稳定裕度

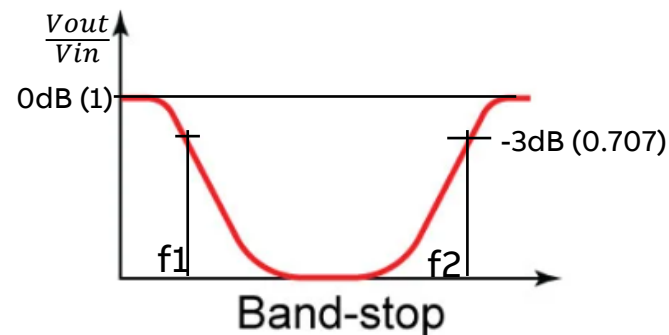
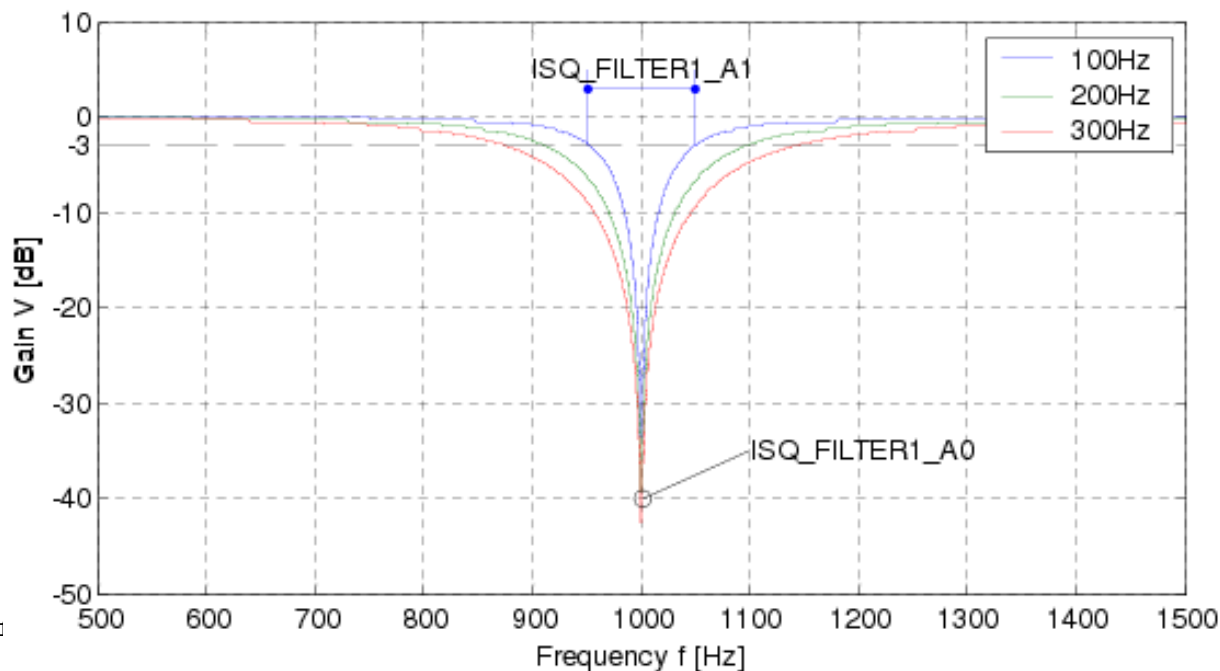


滤波器

带阻滤波器（陷波器）

● 带阻滤波器(陷波器Notch Filter)Band Stop Filter

- 衰减某两个频率(f_1, f_2)之间的信号；两个截止频率的中点为中心频率
- 用于抑制共振，或消除特定频率的噪声（如50Hz工频干扰）
- 噪声频率或共振频率常常变动，陷波器不适用（多次autotuning得到的Resonance frequency接近才适用）

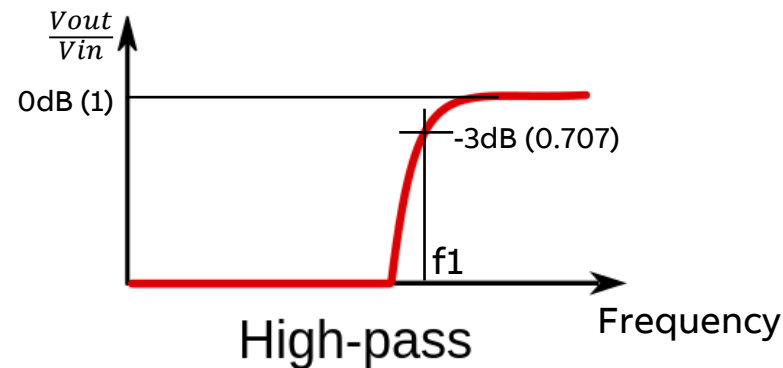


滤波器

高通滤波器和带通滤波器

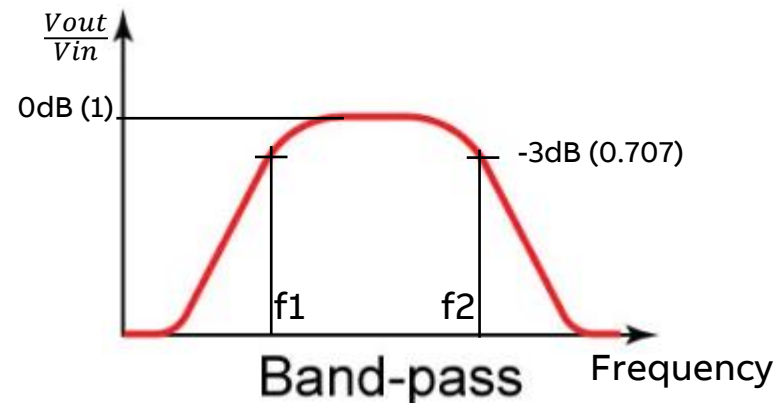
● 高通滤波器 High Pass Filter:

- 允许大于某个频率 (f_1 , 截止频率) 的信号无衰减通过
- 控制系统中很少不使用



● 带通滤波器 Band Pass Filter:

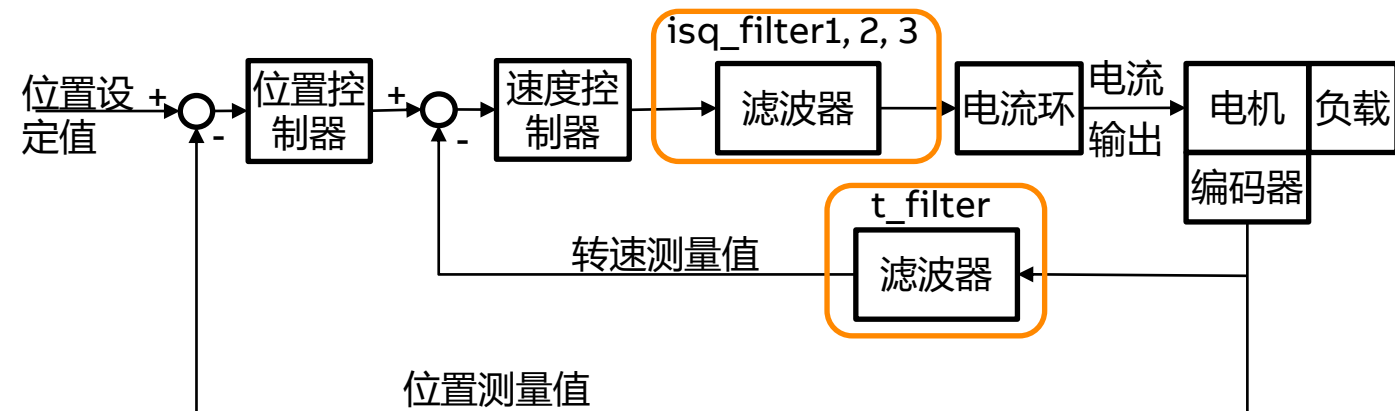
- 允许某两个频率(f_1, f_2 , 截止频率)之间的信号无衰减通过
- 在控制系统中很少使用



滤波器

在ACOPOS的控制器中的位置

- 速度环的三个级联的滤波器，
 - 可设置为：低通滤波器，陷波器，或其他两种滤波器
 - 常用于处理共振
- 转速反馈的滤波：一阶低通滤波
 - 平滑编码器反馈， t_filter 越大越平滑，但系统趋向不稳定(延时越大)

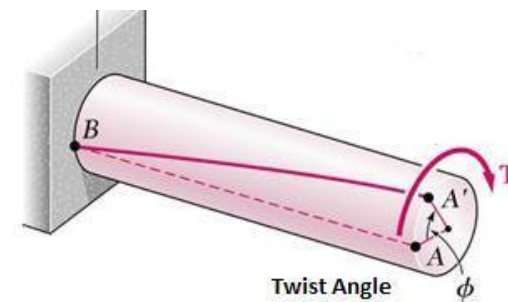


Name	Value	Unit	Description
encoder_if			Encoder Interface
limit			Limit value
controller			Controller
mode	ncPOSITION		Mode
position			Position Controller
speed			Speed Controller
kv	2.0	As	Proportional amplification
tn	0	s	Integral action time
t_filter	0.0	s	Filter time constant
isq_filter1			ISQ Filter1
isq_filter2			ISQ Filter2
isq_filter3			ISQ Filter3

共振/谐振Resonance

概念

- 共振是一个系统在特定频率信号的激发下，比其他频率以更大的振幅振动的情形。
 - 这个特定频率称为共振频率
- 主要由机械传动系统的柔性（弹性形变）导致
 - 如电机与负载的连接（长的传动轴，皮带等）
 - 机构内部的柔性（齿轮或丝杠的背隙）
- 外在表现：机器发出比较大的声音

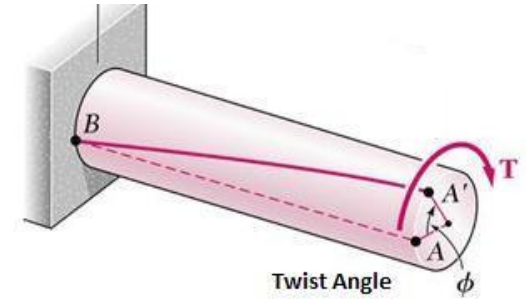
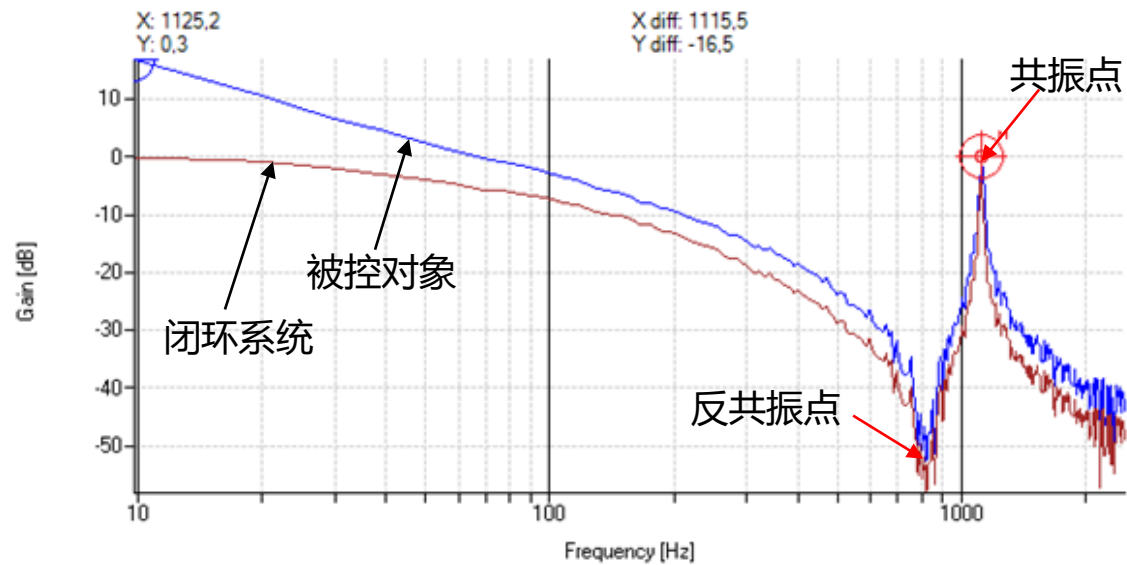


共振/谐振Resonance

波特图上的表现

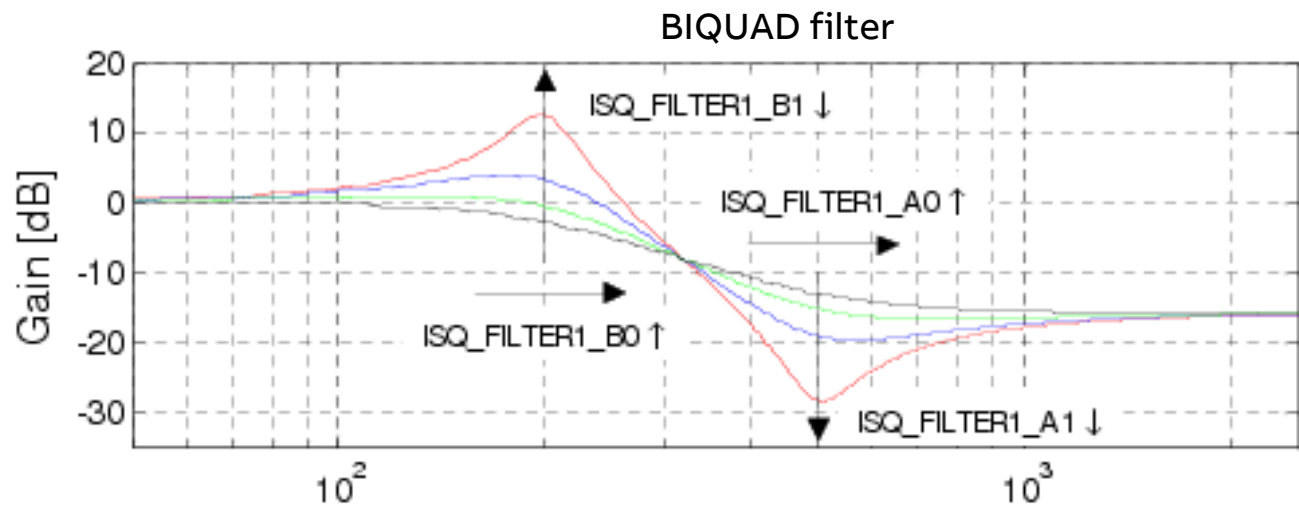
● 共振在系统波特图(被控对象plant或闭环系统)上的表现:

- 向上的尖峰是共振点
- 向下的尖峰是反共振点(antiresonance)



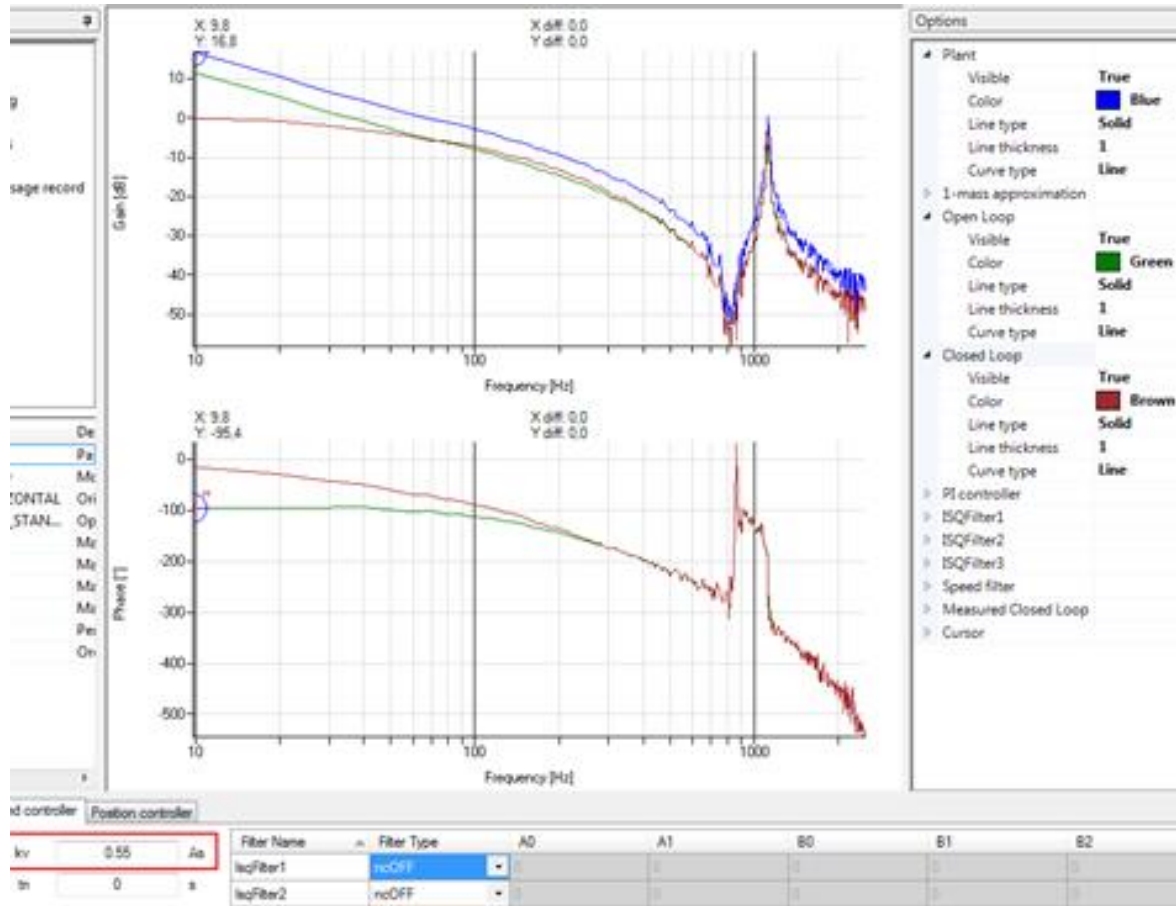
共振/谐振Resonance 解决方法

- 降低负载对电机的惯量比 – 大惯量电机或增加减速比
- 增加传动机构的刚性 – 高强度皮带，短传动轴，粗传动轴或丝杠，低背隙齿轮
- 在电流环前使用滤波器 – 可选的滤波器类型
 - ncLOW_PASS(低通)
 - ncNOTCH (陷波器)
 - ncBIQUAD (双二阶)
 - ncZ_TRANS (Z传递函数)

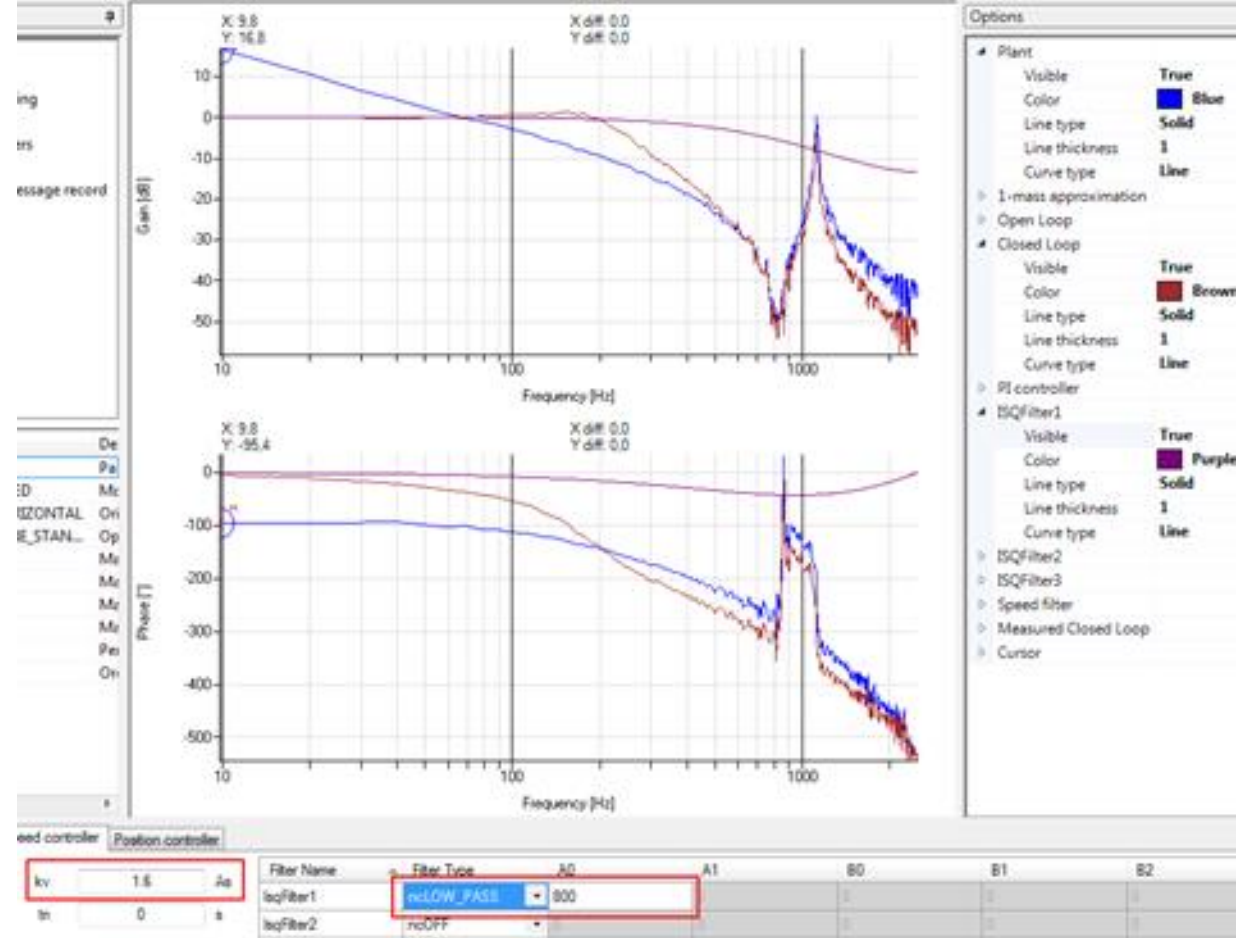


共振/谐振Resonance

解决方法 – 例子



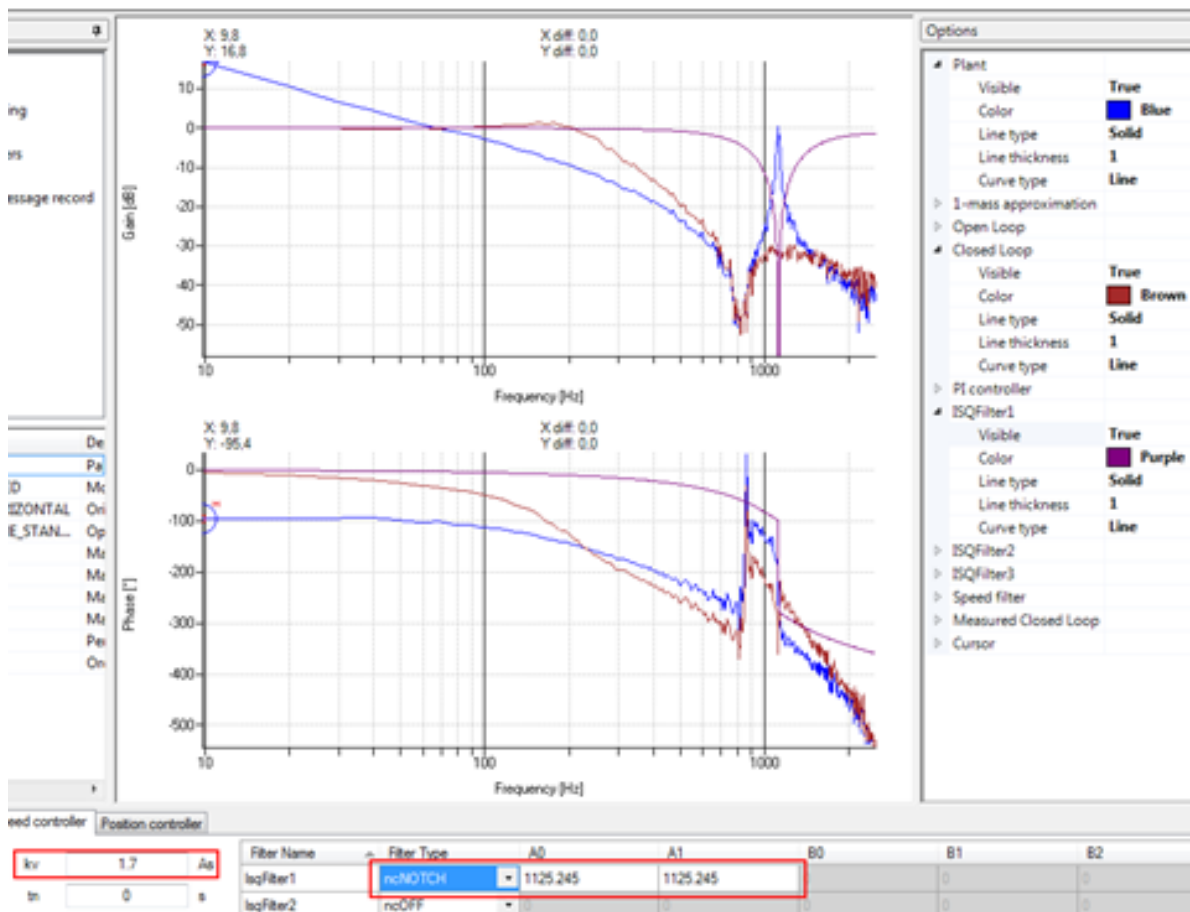
不加滤波器，速度环 $k_v = 0.55$



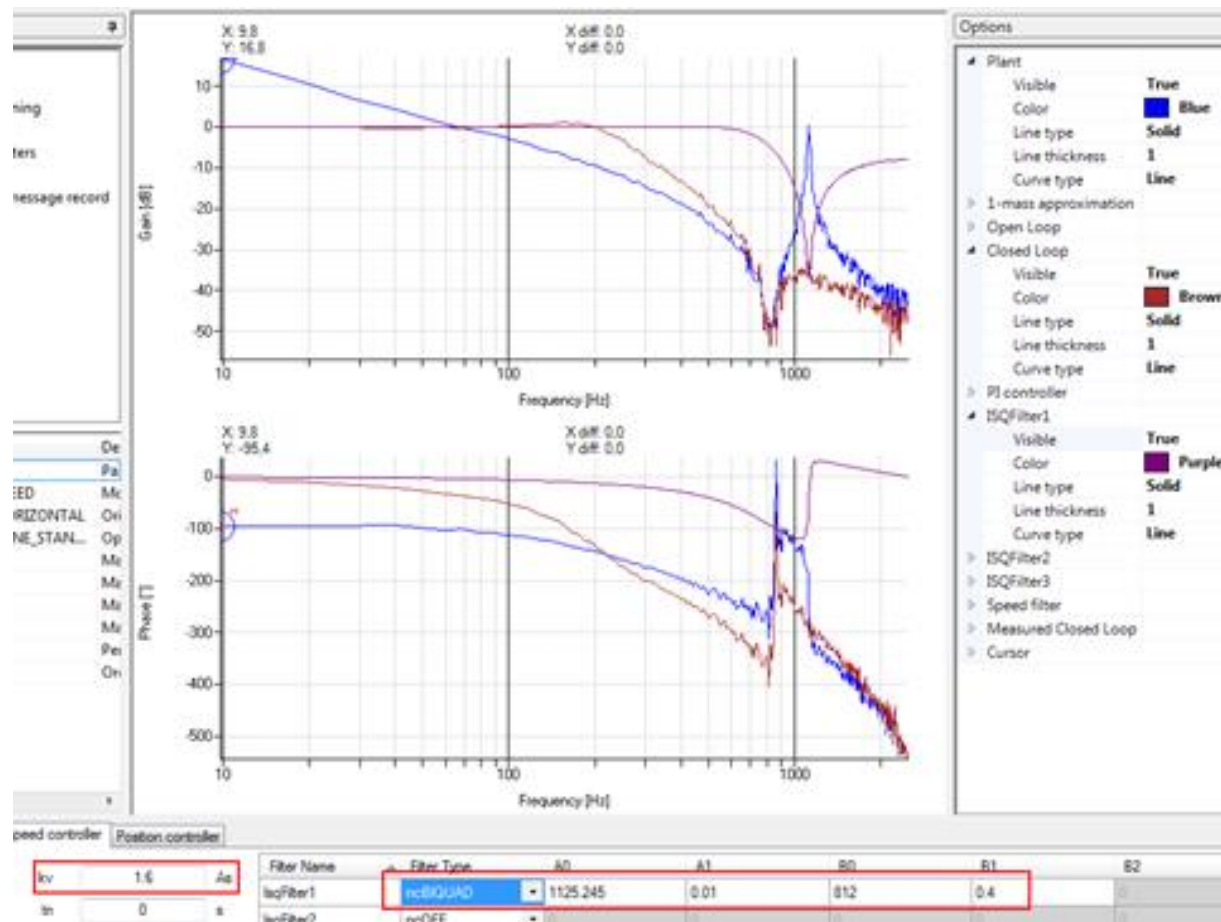
加低通滤波器，速度环 $k_v = 1.6$

共振/谐振Resonance

解决方法 – 例子



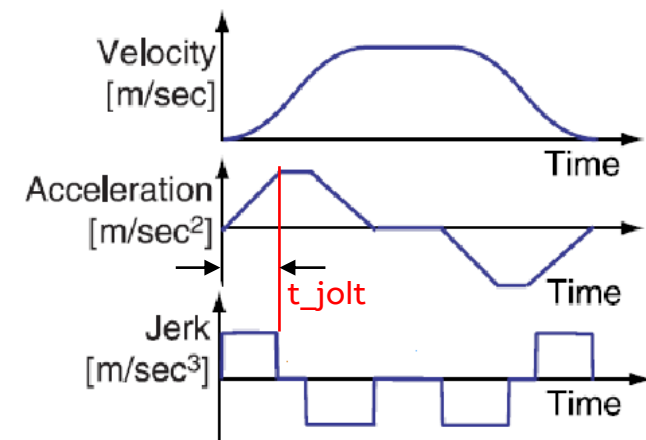
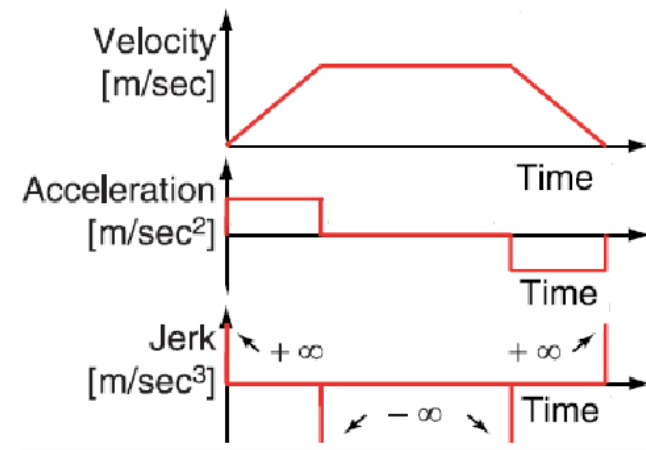
加Notch滤波器，速度环 $k_v = 1.7$



加BIQUAD滤波器，速度环 $k_v = 1.6$

振动限幅及Jolt

- Jolt, 又称jerk, 即加速度的变化率, 加加速度
- 梯形速度曲线
 - 在电机启动和停止的瞬间, 加速度的变化率非常大, 会导致机构的剧烈振动
 - 新手司机的起步和停车
- 设置 t_{jolt} , 可得到S形加速曲线,
 - 加速度线性变化, 极大降低机构的振动
 - 老司机的起步和停车
 - t_{jolt} , 即加速度从零变化到最大加(减)速度的时间



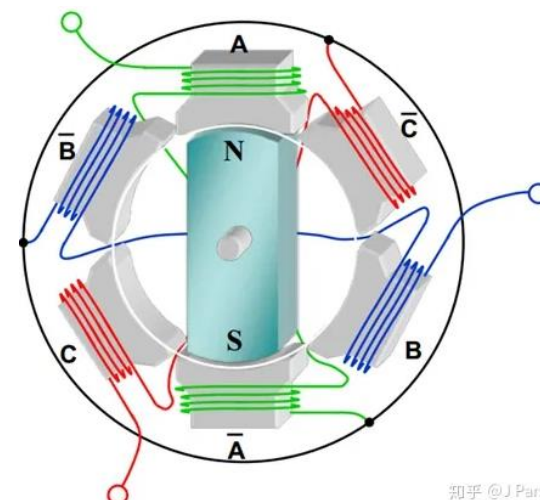
B&R

A thick, solid orange horizontal bar positioned directly beneath the B&R text.

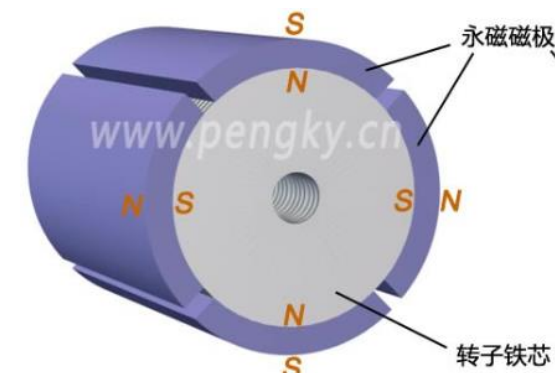
伺服电机的控制

伺服电机 - 永磁同步电机

- 伺服电机（永磁同步电机）： 转子 - 永磁体， 定子 - 电磁铁
- 交流电流在定子线圈的流动， 产生旋转的磁场 - 旋转的电磁铁 → 吸引永磁体转子旋转
- 电流的大小 → 电磁铁(场)的吸力大小 → 电机输出扭矩的大小
- 电流的频率 → 磁场旋转的快慢 → 电机的转速



知乎 @J Pan
简化的三相永磁同步电机
(单对极转子)



一个两对级的永磁
同步电机的转子