

BDHDE

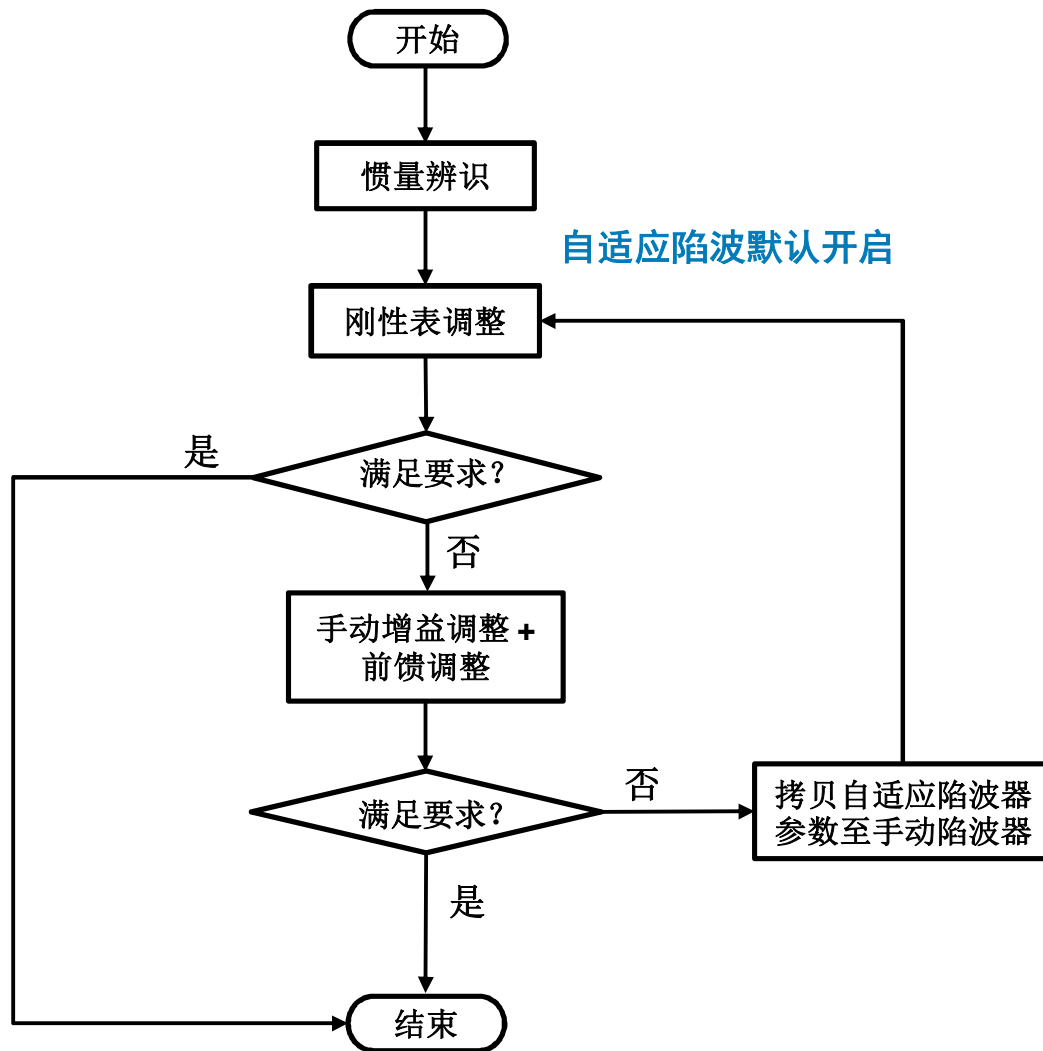
基本调试流程

V1.1
2020.8.12

目录

- 基本调试步骤
- 惯量辨识
- 刚性设定
- 控制环路架构
- 环路参数
- 机械共振抑制
- 观测器及扰动抑制

1. 基本调试步骤



2. 惯量辨识 — 为什么需要惯量辨识

设定正确的惯量比，使**速度环开环截止频率 = 速度环带宽**，容易推测整体的增益设定。

$$\text{负载惯量比} = \frac{\text{电机轴换算惯量}}{\text{电机转子惯量}}$$

正确设定惯量比之后，根据与机器相应的速度环带宽设定，可以计算出以下参数的数值：

- ◆ 位置环增益
- ◆ 速度环增益
- ◆ 速度环积分时间常数
- ◆ 转矩滤波器

机台对电机负载惯性比的影响：

负载惯性比大	负载惯性比小
电流容易饱和	电流不易饱和
速度响应频率较低	速度响应频率较高
容易产生共振	不易产生共振
电机容易产生过载	电机不易产生过载
容易产生再生制动过载	不易产生再生制动过载

2. 惯量辨识 — ServoStudio2

- ◆ UI界面：Wizards -> Autotuning -> Start Load Estimation
- ◆ VarCom指令：LOADESTEN = 1

The screenshot displays the ServoStudio2 software interface. The top bar shows the status as 'Online' and includes a 'STOP' button. The left sidebar contains a 'Wizards' menu with 'Autotuning' selected. The main panel shows the 'Autotuning' wizard with a progress bar indicating the current step. The 'Start Load Estimation' button is highlighted in green. The input fields are as follows:

Parameter	Value	Unit
Distance	2,000	rev
Max Speed	800,000	rpm
Motion Mode	0 -Positive-Negative	

The status bar at the bottom shows: Serial Position, Current 0.000 A, Velocity 0.000 rpm, Position 84742 count.

3. 刚性设定

机械刚性越高，刚性设定参数越大，反之，设定参数越小。
如果惯量较大，刚性设定参数要相对减小。

1、高刚性机械

滚珠丝杠直接连接的机械等

例：贴片机、耦合器、机床，进行高精度加工的工作机械等。

2、中刚性机械

通过减速机控制的滚珠丝杠驱动的机械、由滚珠丝杠直接连结的的长尺寸机械等

例：一般工作机、直角形机器人、搬运机械

3、低刚性机械

同步皮带驱动的机械、链式驱动的机械、带波动齿轮减速机的机械等。

例：搬运机、多关节机器人等。

4. BDHDE刚性等级

刚性设定从低往高调

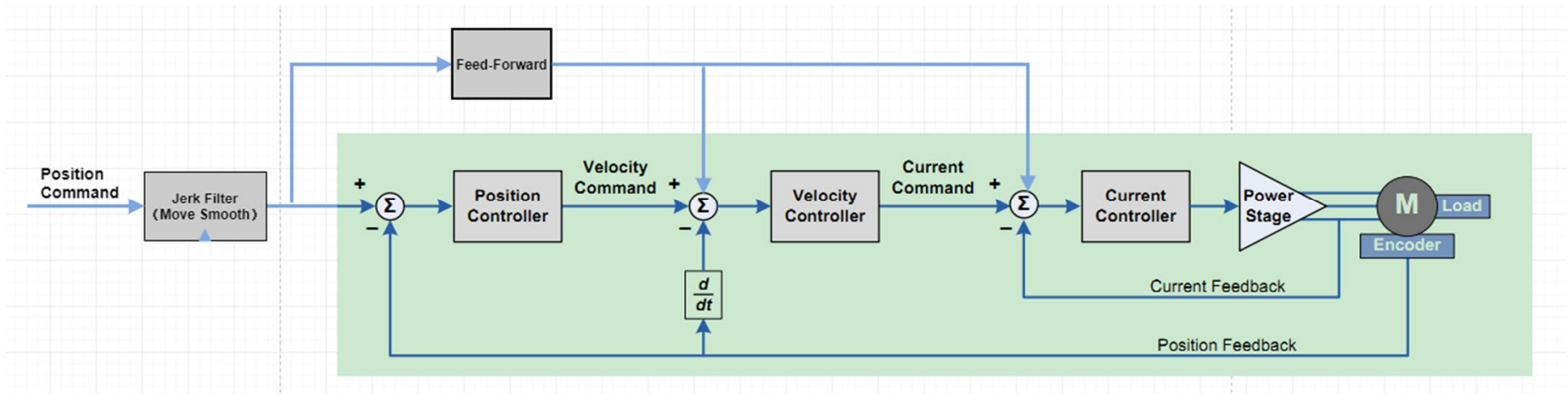
满足要求的情况下，刚性设定取中间值
太低，抗干扰不好，适应性不高
太高，容易起振，对机械要求更高

通过设置刚性等级一键联动环路参数：

- RIGID: 刚性等级
- ◆ KPP: 位置环增益
- ◆ KVBW: 速度环带宽
- ◆ KVP: 速度环比例增益
- ◆ KVI: 速度环积分增益
- ◆ ICMDLPF: 速度环转矩输出滤波

刚性表级数	位置环增益 (1/s)	速度环带宽 (Hz)	速度环积分时间(ms)	转矩滤波时间 (ms)
0	2	1.5	370	15
1	2.5	2	280	11
2	3	2.5	220	9
3	4	3	190	8
4	4.5	3.5	160	6
5	5.5	4.5	120	5
6	7.5	6	90	4
7	9.5	7.5	70	3
8	11.5	9	60	3
9	14	11	50	2
10	17.5	14	40	2
11	32	18	31	1.26
12	39	22	25	1.03
13	48	27	21	0.84
14	63	35	16	0.65
15	72	40	14	0.57
16	90	50	12	0.45
17	108	60	11	0.38
18	135	75	9	0.3
19	162	90	8	0.25
20	206	115	7	0.2
21	251	140	6	0.16
22	305	170	5	0.13
23	377	210	4	0.11
24	449	250	4	0.09
25	500	280	3.5	0.08
26	560	310	3	0.07
27	610	340	3	0.07
28	660	370	2.5	0.06
29	720	400	2.5	0.06
30	810	450	2	0.05
31	900	500	2	0.05

5. 控制环路架构



串级控制结构

$$\varepsilon(t) = \text{CMD} - \text{FBK}$$

$$\text{PID: } m(t) = K_p \left[\varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau + T_d \frac{d\varepsilon}{dt} \right]$$

6. 环路参数 — 位置环KPP

位置环采用比例控制

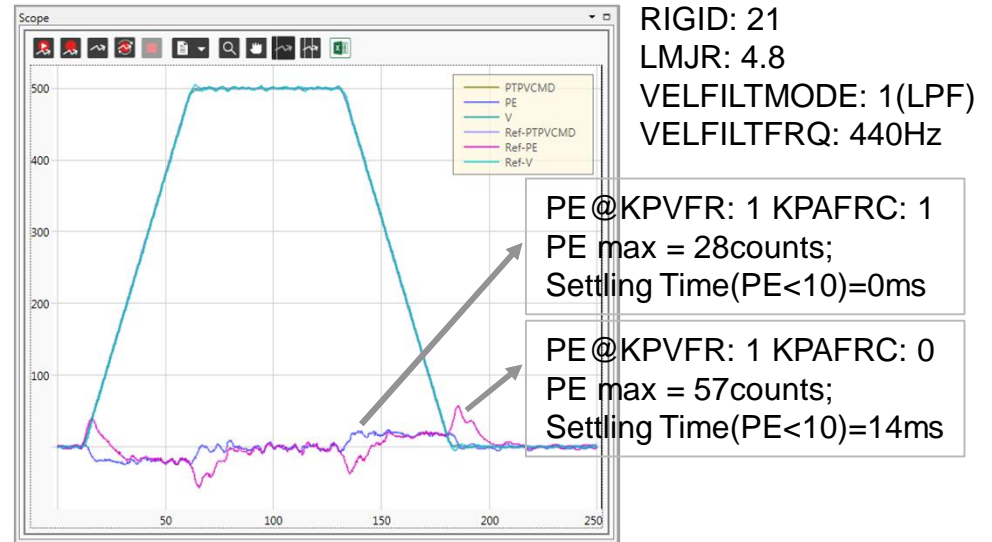
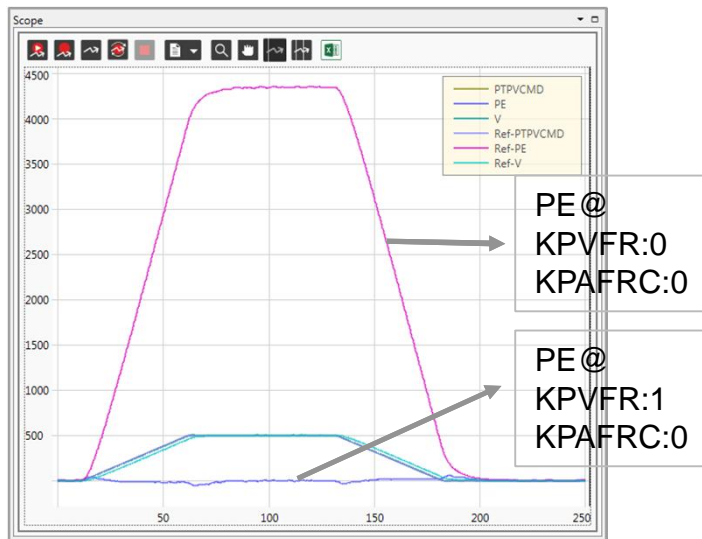
- ◆ 位置环增益（KPP），本参数决定位置环路的响应性；
- ◆ 位置控制增益的值设定越大对于位置命令的追随性越好，位置误差量越小，定位整定时间越短，但是过大的设定会造成机台产生抖动或定位会有过冲（overshoot）的现象；
- ◆ 位置环增益偏小，定位较慢。

$$\text{位置环带宽}(Hz) = \frac{KPP}{2\pi}$$

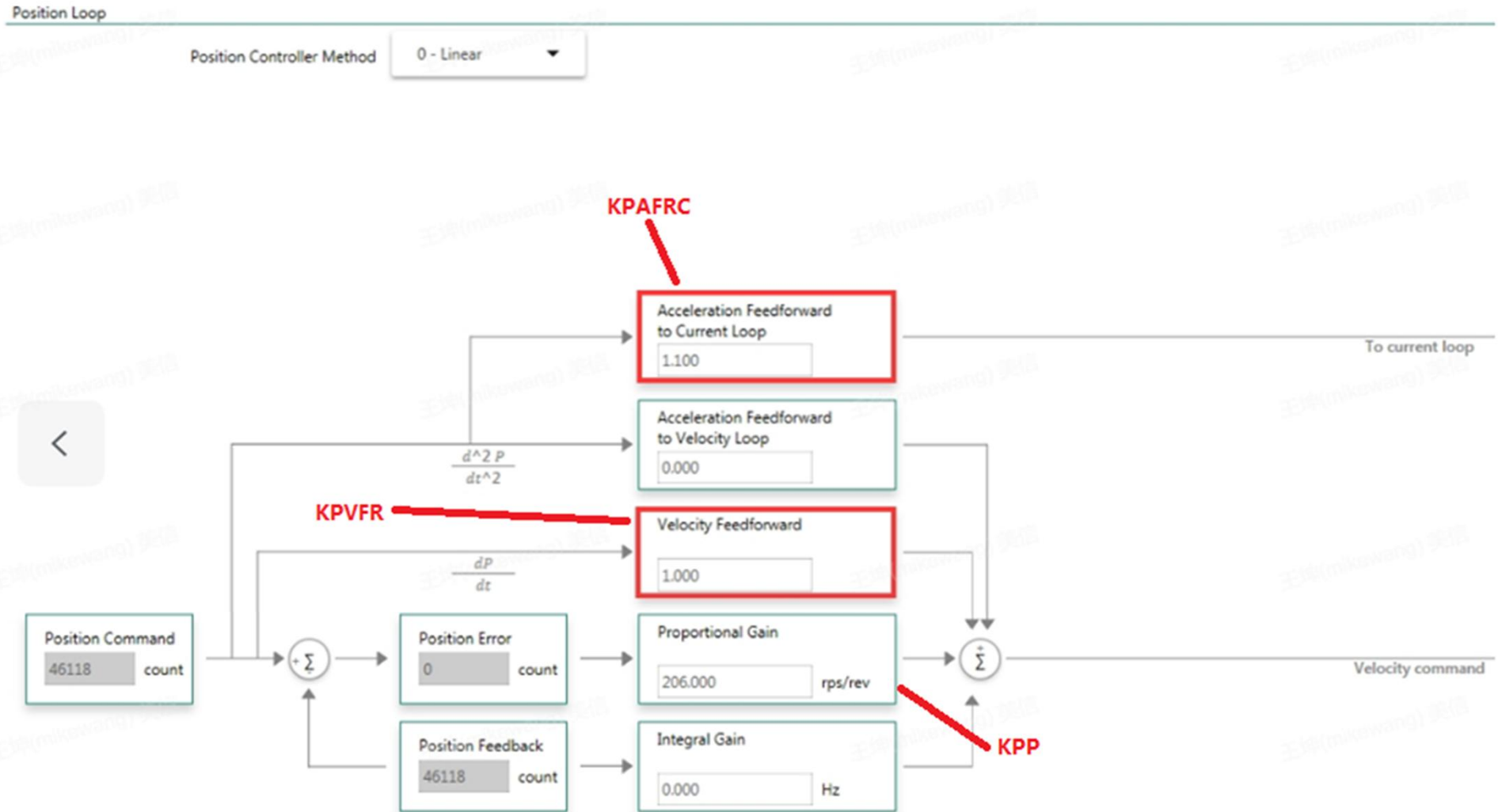
6. 环路参数 — 速度前馈KPVFR、转矩前馈KPAFRC

适当的前馈可以提高系统的快速响应性并减小跟随误差。

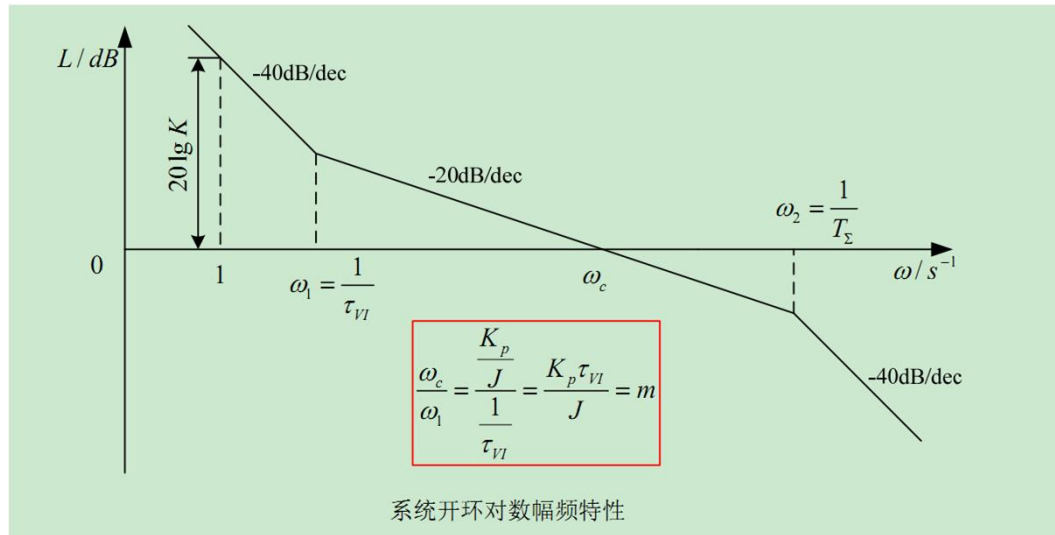
- ◆ 运行过程中匀速段PE误差较大，可通过调整速度前馈系数（KPVFR）来改善；
- ◆ 定位完成时间太长或者启动、定位过程的PE太大，可通过调整转矩前馈系数（KPAFRC）来改善；
- ◆ 若增加前馈设置后有高频噪音，可通过降低速度前馈滤波器截止频率（KPVFRLPF）、转矩前馈滤波截止频率（KPAFRCLPF）设定来改善。



6. 环路参数 — 位置环控制框图



6. 环路参数 — 速度环KVP



$$\omega_c = \omega_2 / 2$$
$$h = \omega_2 - \omega_1 = (7 \sim 12)\omega_2$$

- ◆ 速度环采用PDFF结构，**速度环增益（KVP）** 决定速度控制环路的响应性能；
- ◆ KVP设越大对于速度命令的追随性越佳，但是过大的设定容易引发机械共振。速度环路的频率必须比位置环路的频率高4~6倍，当位置响应频率比速度响应频率高时，机台会产生**抖动或定位会有过冲(overshoot)**的现象；
- ◆ 速度环增益太大时，电机停止时容易振荡，进而定位完成较慢。

$$KVP = \text{速度环带宽KVBW(Hz)} * \text{转子转动惯量MJ} * (1 + \text{负载惯量比LMJR})$$

6. 环路参数 — 速度环KVI

$$\text{速度环积分增益KVI} = \text{KVP} * \frac{\text{速度环路执行时间T}}{\text{积分时间常数Ti}}$$

Ti 越小对**固定偏差**的消除能力越佳，但过小的设定容易引发机台的抖动，如果转矩有细微变动，有可能会产生**高频异响**。

$$\text{速度环路执行时间T} = 125\mu\text{s}$$

$$\text{积分时间常数Ti (ms)} = \frac{160 \sim 637}{\text{速度环带宽 (Hz)}}$$

6. 环路参数 — 转矩滤波截止频率ICMDLPF

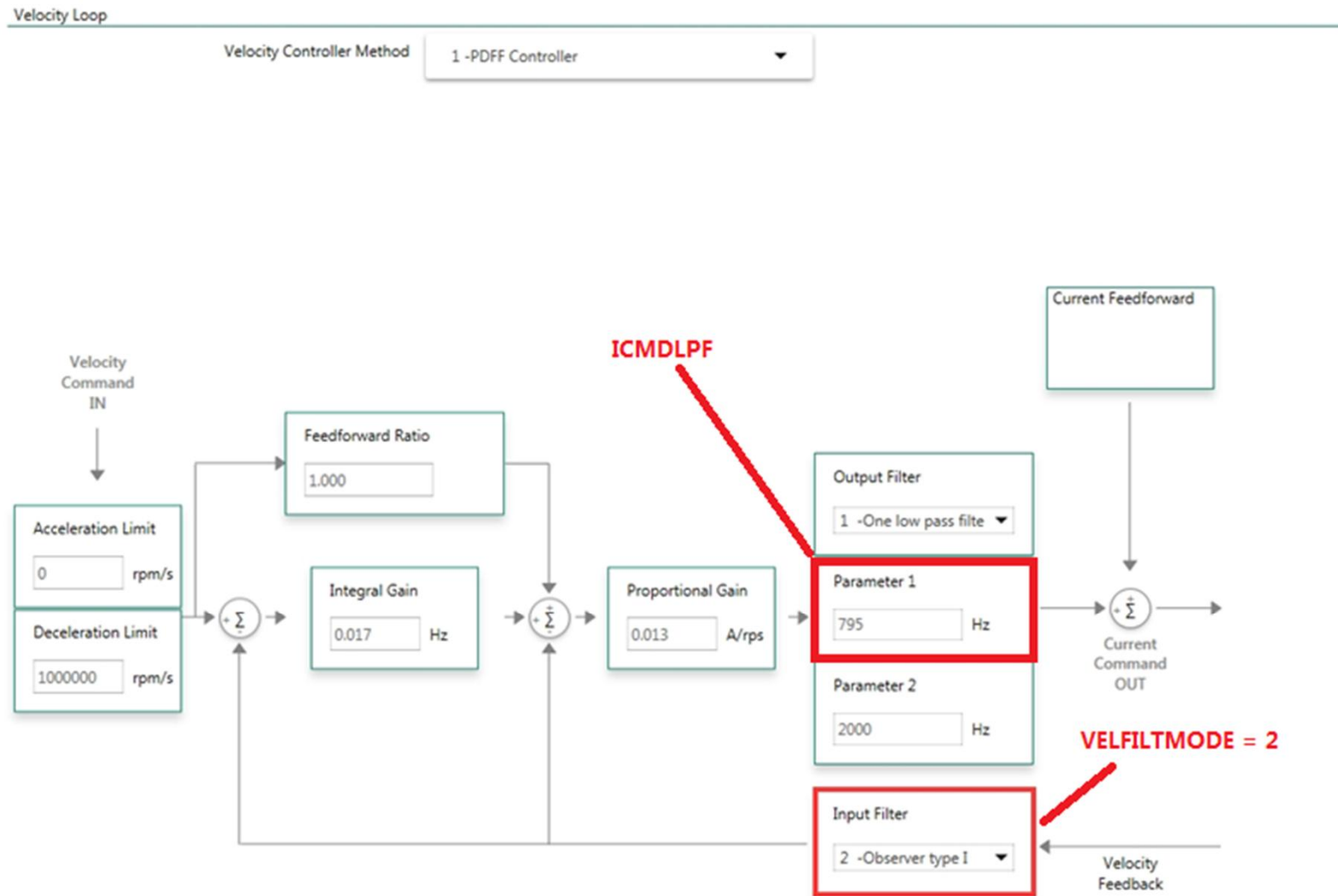
速度环转矩滤波（ICMDLPF）：可用于降低由于速度环增益设定太高时引起的机械或电磁噪声，截止频率通常设置为速度响应频率的4~10倍。

- ◆ 提高转矩滤波器的截止频率设定值，当设定为**10倍**以上时，定位动作将提早完成，但转矩指令如有细微变动时有可能产生异响。
- ◆ 降低转矩滤波器的截止频率设定值，当设定为**4倍**以下时，频率响应降低，有可能发生过冲现象或增大超调量。

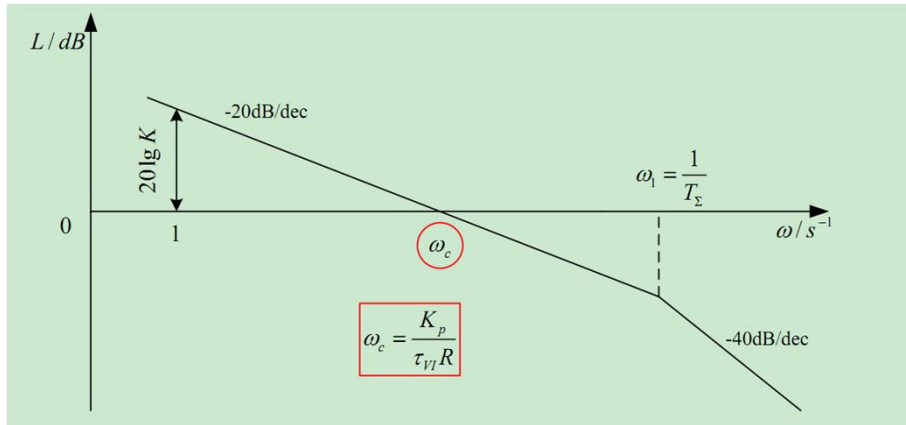
$$\text{转矩滤波器时间 (ms)} = \frac{15 \sim 40}{\text{速度响应频率 (Hz)}}$$

$$\text{滤波截止频率ICMDLPF (Hz)} = \frac{1}{\text{滤波时间常数} * 2 * \pi}$$

6. 环路参数 — 速度环控制框图



6. 环路参数 — 电流环KCP、KCI



电流环参数与电机本体的**电磁参数**直接关联，BDHDE根据电子铭牌数据自动设定电流环参数，电流环的带宽决定了速度环乃至位置环的带宽上限。

电流环比例增益KCP = 电流环带宽KCBW(Hz)*电感ML

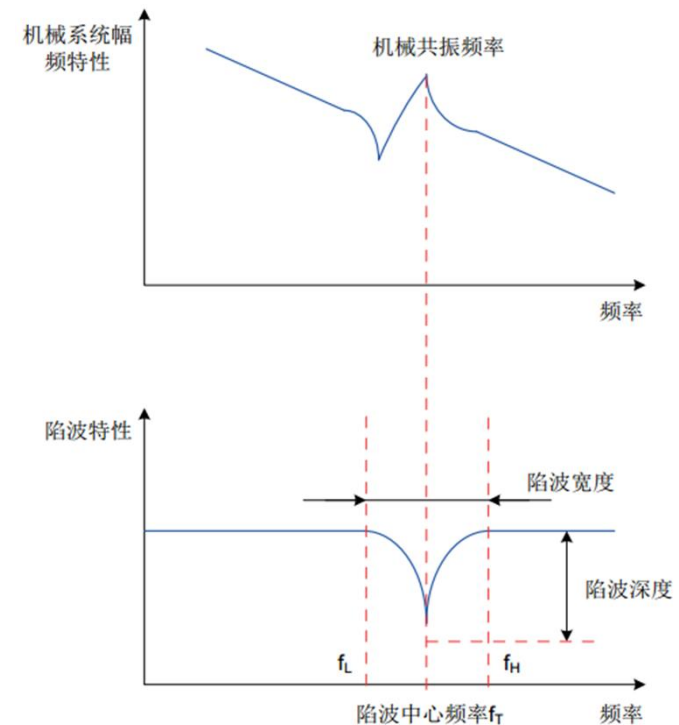
电流环积分增益KCI = KCP * $\frac{\text{电流环执行时间T}}{\text{电流环积分时间常数Ti}}$

电流环积分时间常数Ti = $\frac{ML}{MR}$ 电流环路执行时间T = 62.5us

7. 机械共振抑制 — 陷波滤波器

陷波器中心频率 $\geq 4 \times$ 速度响应频率

- ◆ 系统**机械刚性越高，共振频率越高**；
- ◆ 调试过程中刚性等级由低至高逐渐提升，如有机械共振发生，可通过陷波滤波器对共振频率点的振动进行抑制，如果响应性能仍然不够，则继续提高刚性等级；
- ◆ BDHDE默认开启共振频率自动扫描及频谱分析，检测到较高的共振频率后会自动设定陷波器的相关参数，并自适应跟随共振频率的变化；
- ◆ BDHDE可通过命令**一键复制 (NOTCHDUMP)** 自适应滤波器参数组至手动陷波滤波器参数组，然后自适应陷波滤波器可以继续自动检测新的共振点，从而提高使用的便捷性。



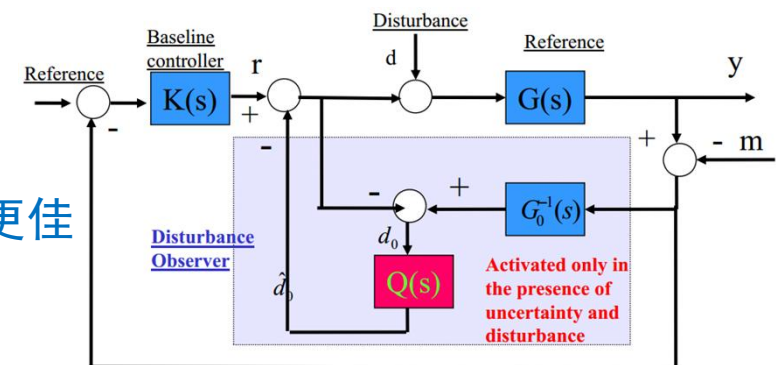
8. 观测器 — 速度观测器、扰动抑制

速度观测器 (VELFILTMODE = 2)

- ◆ 对于动态性能要求非常高的场合 (RIGID设定等级高于25时)，当使用默认速度反馈滤波 (LPF) 无法保证系统的稳定性时，可以选择使用速度观测器输出作为速度反馈，进而提高系统的稳定性裕度，并且能够继续提升系统的动态响应性能；

扰动抑制 (SOBTGAIN)

- ◆ 当负载设备机械刚性太低导致增益设定整体较低、或者系统有较大的静摩擦力、或者运行中有随机发生的低频负载扰动时，可以通过扰动抑制功能进行补偿以及抑制；
- ◆ 通过设置扰动抑制增益参数SOBTGAIN进行补偿；
- ◆ 扰动补偿功能在负载惯量比准确的情况下效果更佳



9.新功能 — 在线负载辨识、低频振动抑制、自整定

1. 在线负载辨识

目标：通过刚性设定后，负载变动时，驱动器自动辨识负载的真实数据，环路控制PI参数跟随辨识结果自动更新，以达到运动控制指标保持一致；

辨识条件：加减速度 $\geq 3000\text{rpm/s}$

辨识精度： $\leq \pm 10\%$ 实际负载

V1.0预计发布时间：8月底

2. 低频振动抑制

目标：解决柔性负载、悬臂结构负载下停止时低频晃动的问题；

V1.0预计发布时间：8月底

3. 一键自整定

目标：内部自行规划加减速运动曲线，将前述手动整定过程自动化，算法判定整定目标满足后自动停止并保存各相关增益参数；

设计开发中，暂未确定发布时间

END