

# 动作控制

# 伺服驱动基础课程

2007年11月

安川电机（上海）有限公司

# 1 伺服要点的复习

**目标:** 在学习  $\Sigma$ -II 相关知识前, 首先复习伺服的基础知识。

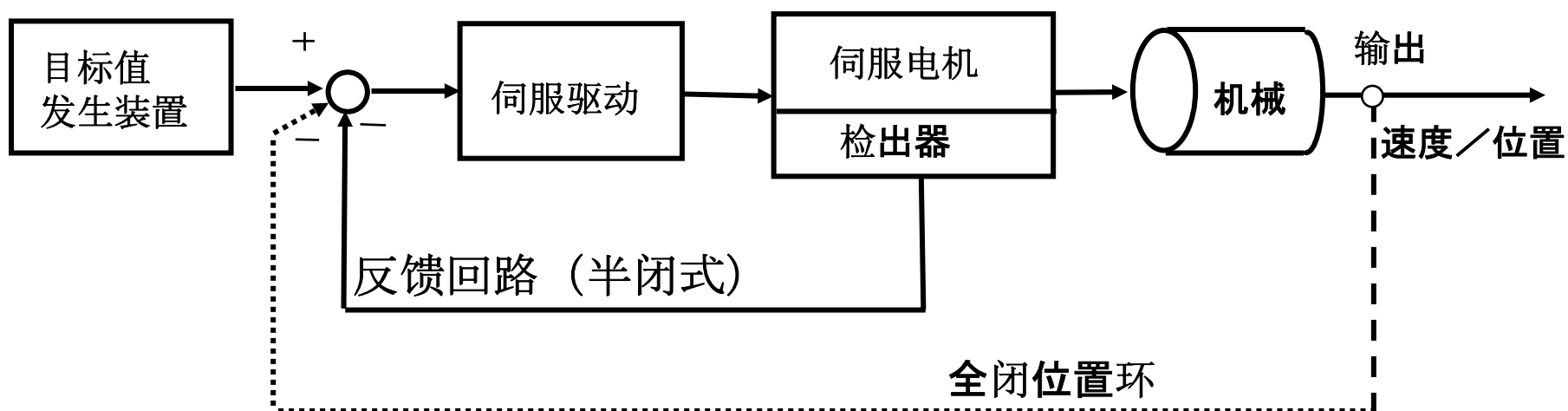
- 1.1 伺服的定义和构成要素
- 1.2 伺服驱动的构成
- 1.3 伺服的性能评价

# 1.1 伺服的定义和构成要素

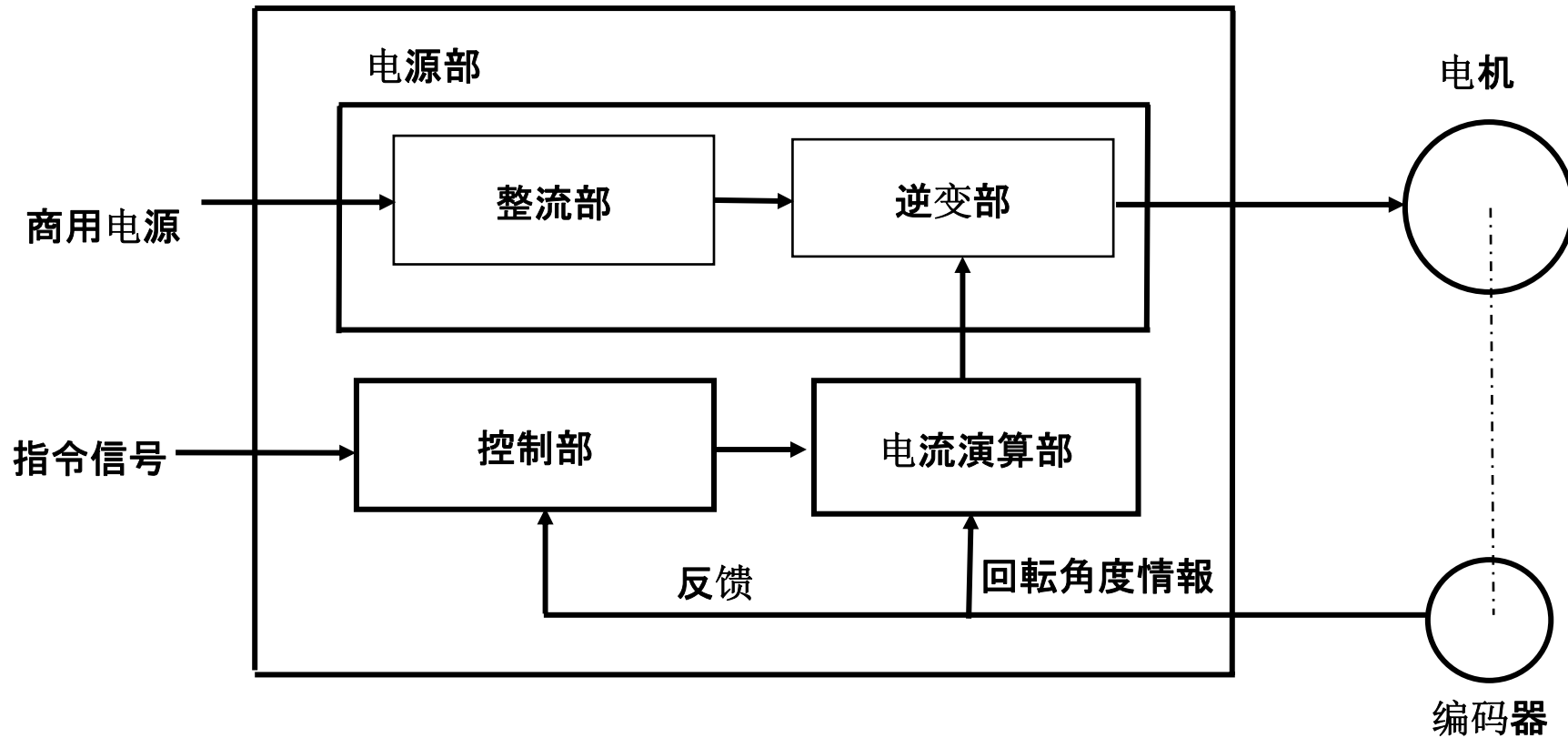
## 伺服的定义

正确的伺服构成以及伺服机械原理都是优良自动控制的一部分。  
目标值的任意变化构成了控制系统。

## 伺服的构成要素



## 1.2 伺服的构成



### 编码器的作用

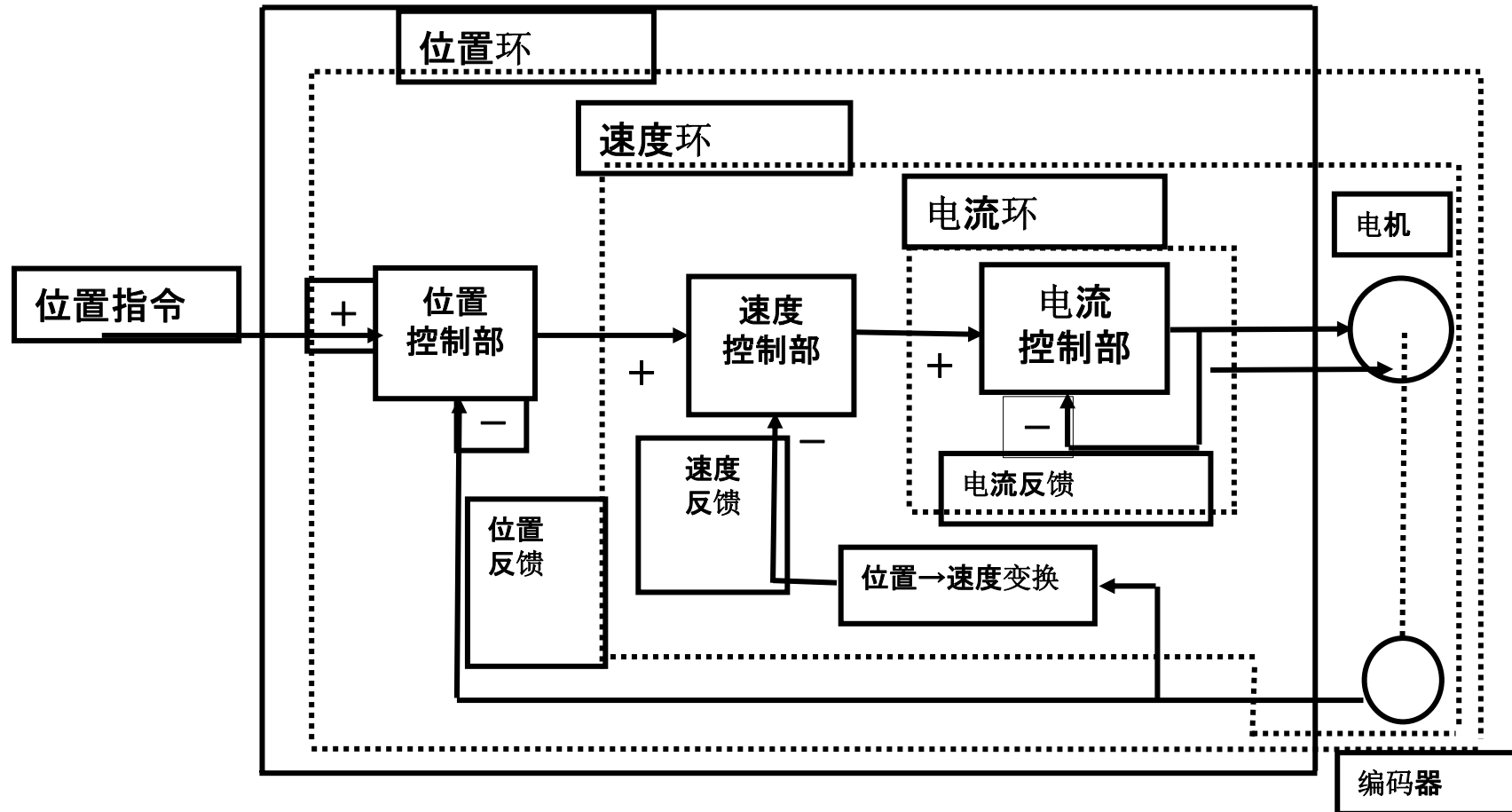
#### ①检测电气角度(或磁极)

→为了使电机均匀地连续旋转,需要检测转子的电气转动角度,通入该位置所需的电流,其作用是检测该位置。

#### ②检测负载位置和速度

→作用是检测反馈控制(伺服本质)必不可少的位置、速度。

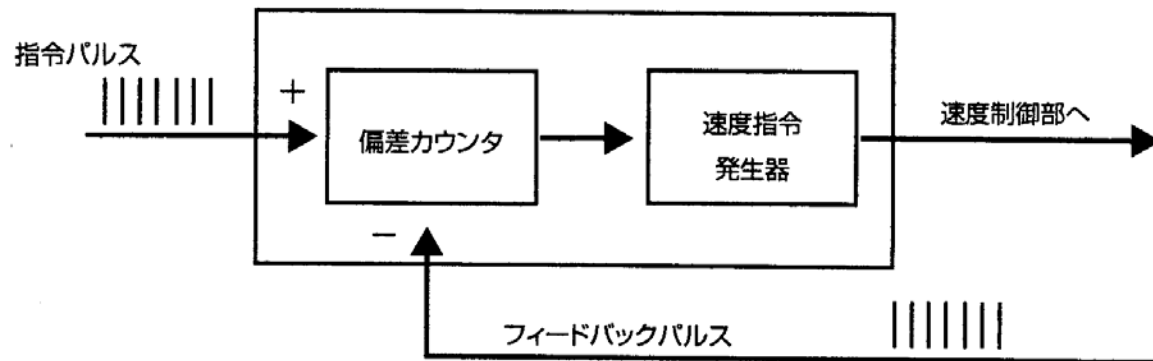
## 1.2.1 控制部的构成



环路是由位置控制部、速度控制部、电流控制部发出的指令→控制部→输出→指令反馈所形成的闭合回路。电流回路在伺服器内闭合，位置回路、速度回路向伺服驱动外输出。

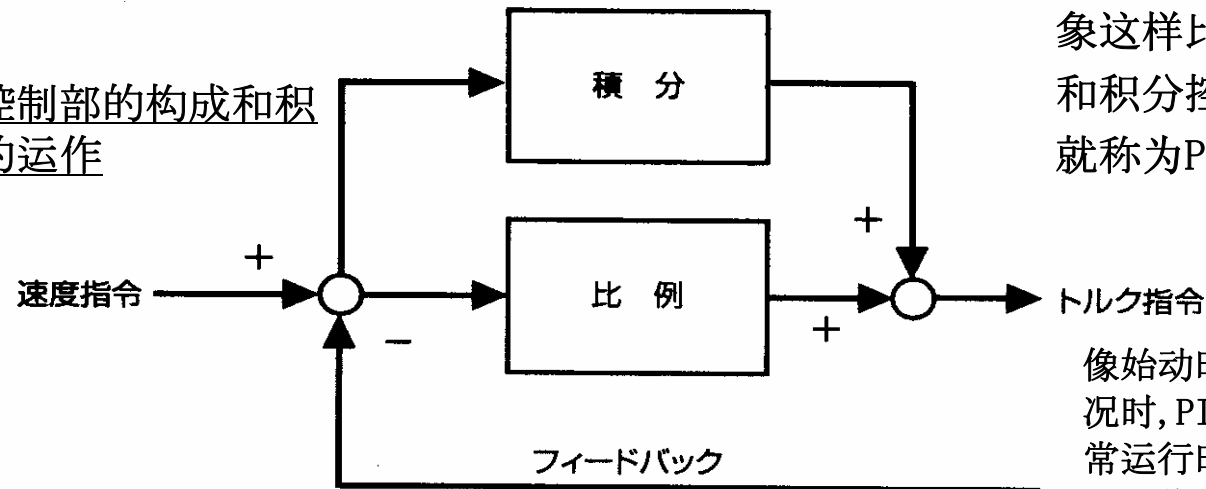
## 1.2.2 位置控制部的构成

- 数字伺服的位置决定指令输入信号是脉冲列。  
位置决定量是脉冲数，位置决定速度是单位时间(秒)的脉冲量。  
(PPS:Pulse/Second)
- 输入的脉冲量与反馈的脉冲数量相一致时，这才完成了位置决定这一构成。
- 在位置控制部中，因为有输入脉冲的加算、反馈脉冲的减算，所以有一个计数器。  
(也称偏差计数器)



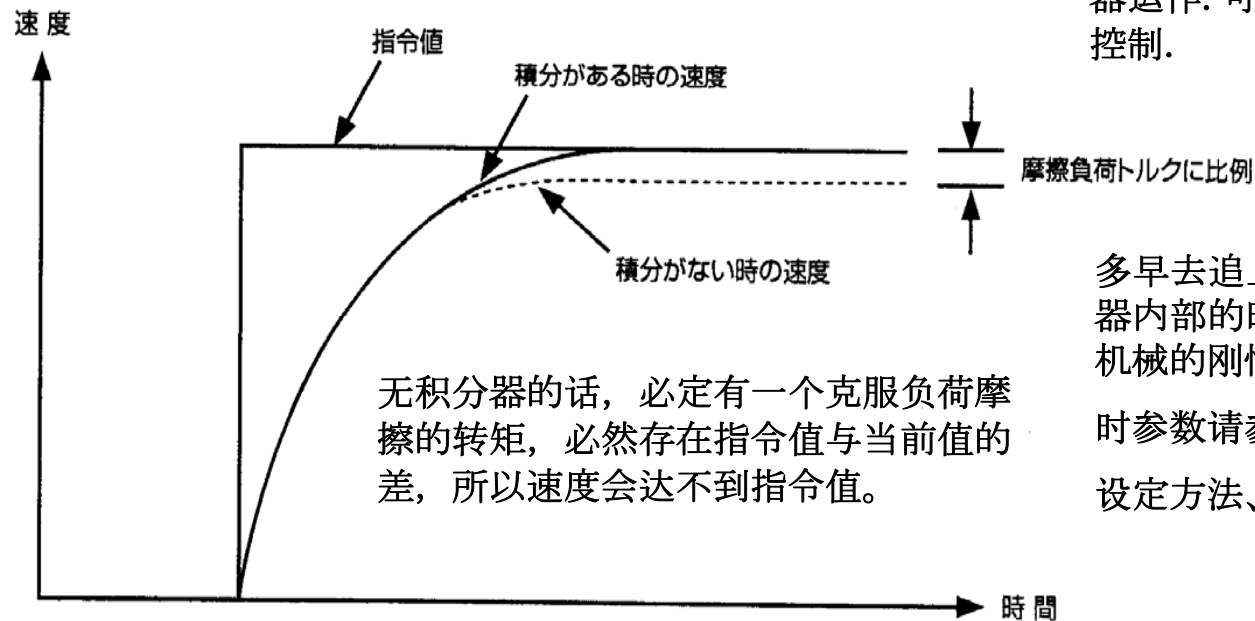
## 1.2.3 速度控制部的构成

### 速度控制部的构成和积分器的运作



象这样比例控制 (Proportional) 和积分控制 (Integral) 的组合就称为PI控制。

像始动时那样, 尽可能使应答迟缓减小的情况时, PI-I单纯作为比例增幅器运作。在正常运行时, 由于外乱转矩等, PI-I作为积分器运作. 可对速度偏差进行积分, 实行修正控制。

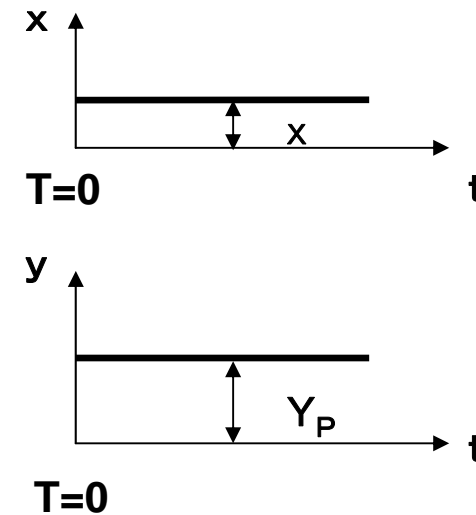
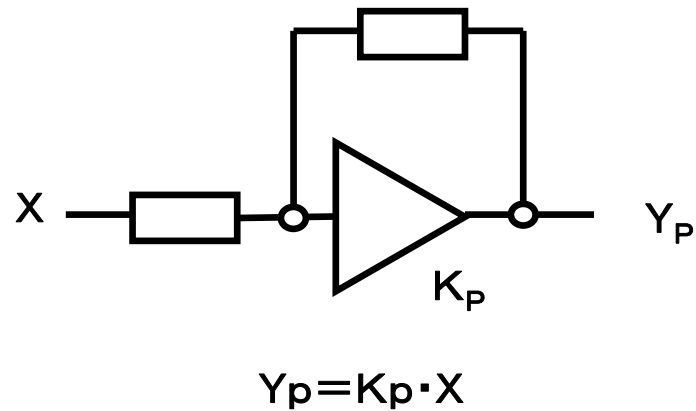


多早去追上指令, 这个时间可通过伺服器内部的时参数来设定, 这个值依存于机械的刚性。

时参数请参照后页

设定方法、刚性等后述

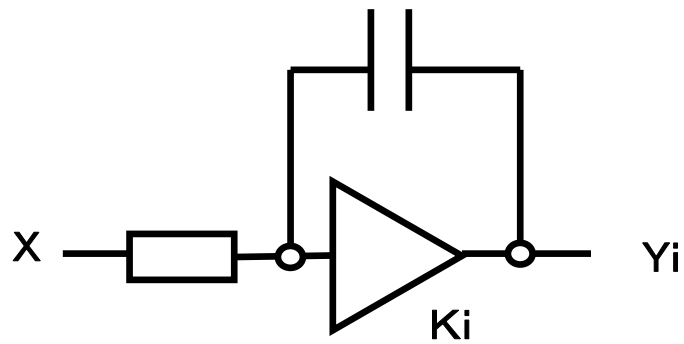
## 1.2.4 比例動作 (P動作)



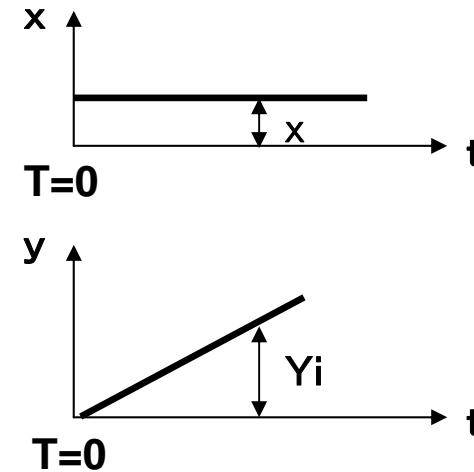
- 将增益调整到一个相当的量时，比例动作增强，应答速度变慢。
- 输入偏差为0时，有连续的运动。



## 1.2.5 積分動作 (I動作)

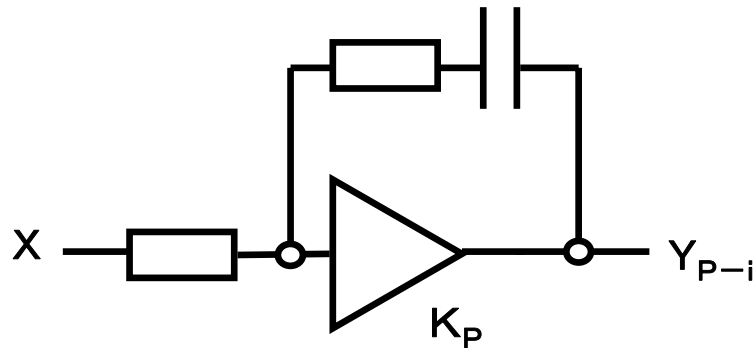


$$Y_i = K_i \cdot \int X dt$$



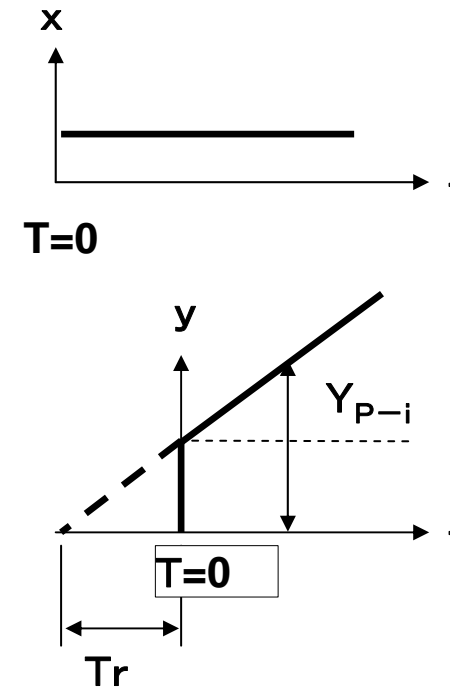
- 偏差变小、负荷动作越困难  
偏差微量存在，这个量就称为残留偏差（偏移）。
- 即使是小偏差，也可以积累成大的操作量。直到偏差成为0，负荷才可以运作。

## 1.2.6 比例積分動作 (P-I動作)



$$Y_{P-I} = K_p \cdot (X + 1/T_r \cdot \int X dt)$$

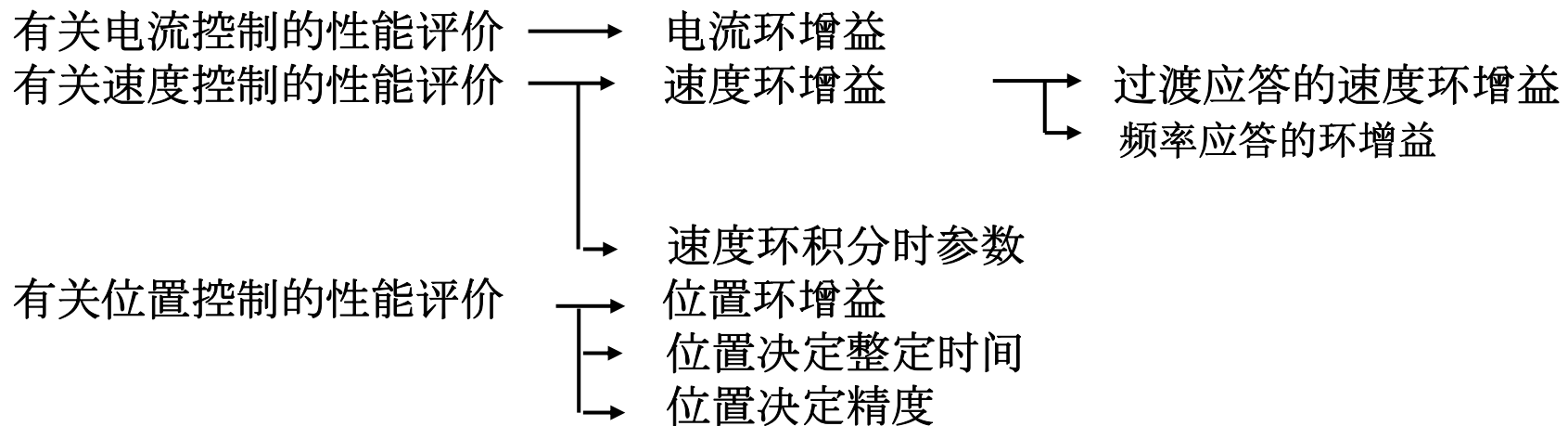
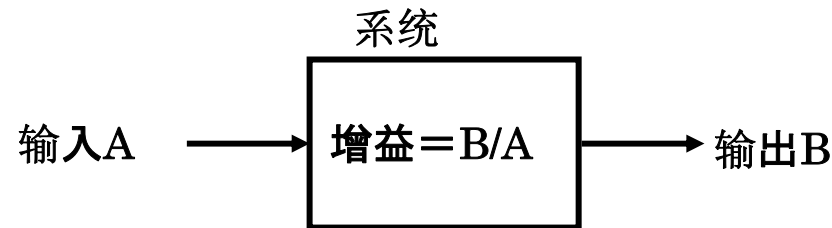
$T_r$ : 积分时间



- P动作与I动作并用。
- $T_r$  越短，动作表现越强。

## 1.3 伺服的性能评价

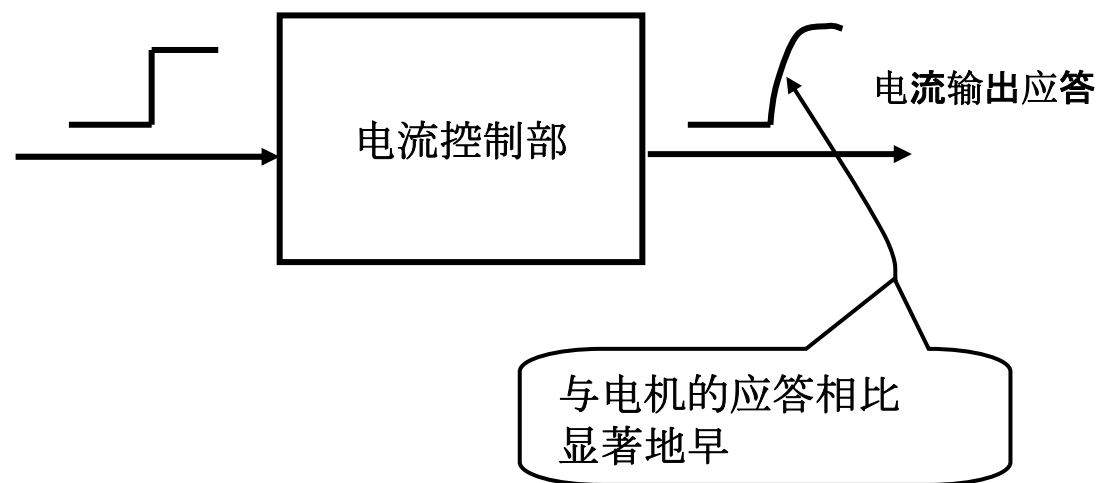
评价伺服的应答性（指令输入后输出的情况（电机如何转动），使用回路增益这个用语。ゲイン就是GAIN，获得和利益的意思。是输入和输出之比所解释的技术术语，现在直接使用增益来表示。



## 1.3.1 有关电流控制的性能评价

所谓电流控制的回路增益，就是由电流控制部输入电流指令，  
电流是  
怎样流动的应答性。

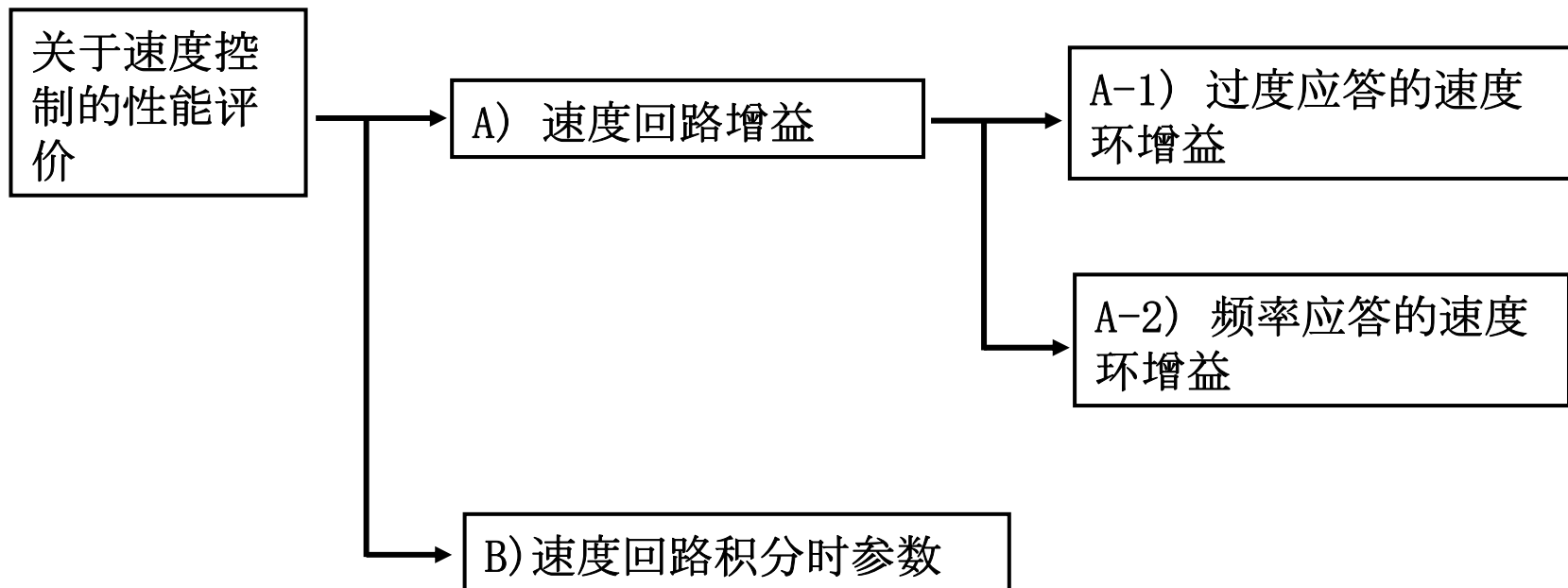
但是，这个应答性是不依存机械而存在的，回路在伺服内部，并且，  
这个应答性可以充分地高，因此不能与机械相调整。



## 1.3.2 有关速度控制的性能评价

速度环增益和速度环积分时参数影响速度控制的性能。

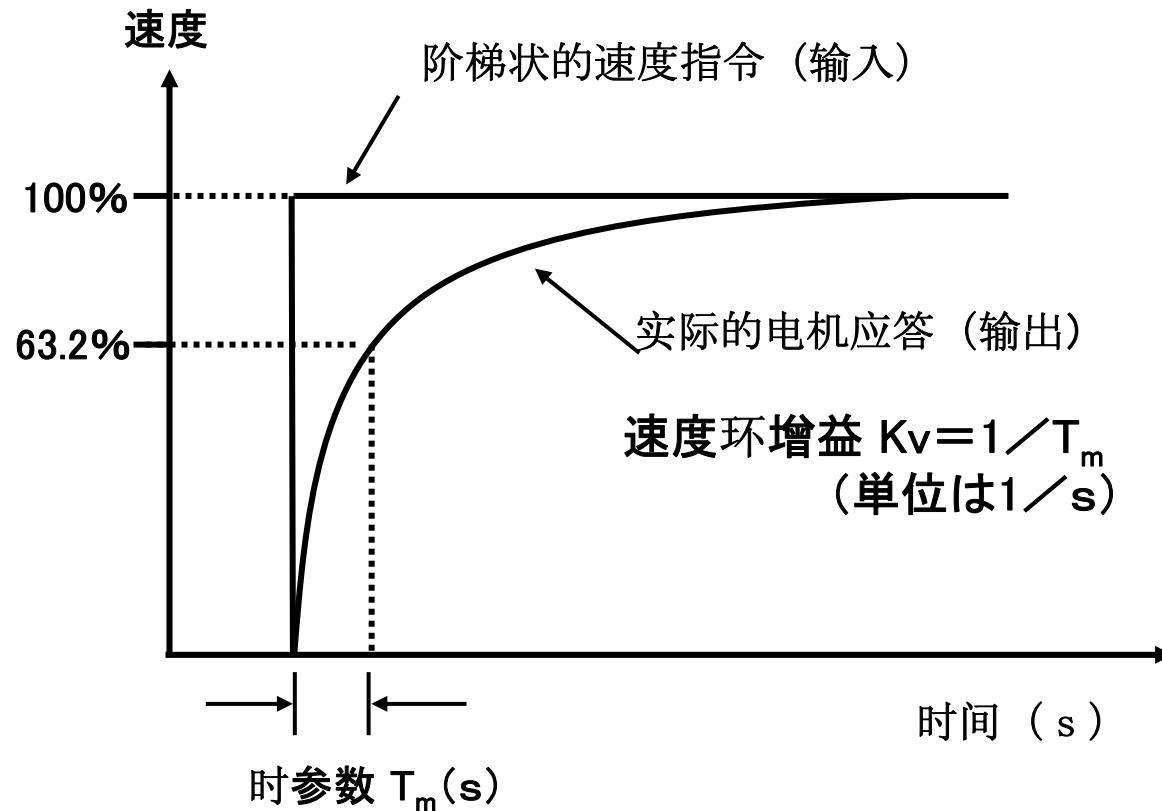
速度环增益中又包括过度应答的速度环增益和频率应答的速度环增益。



## 1.3.2- A) 速度环增益

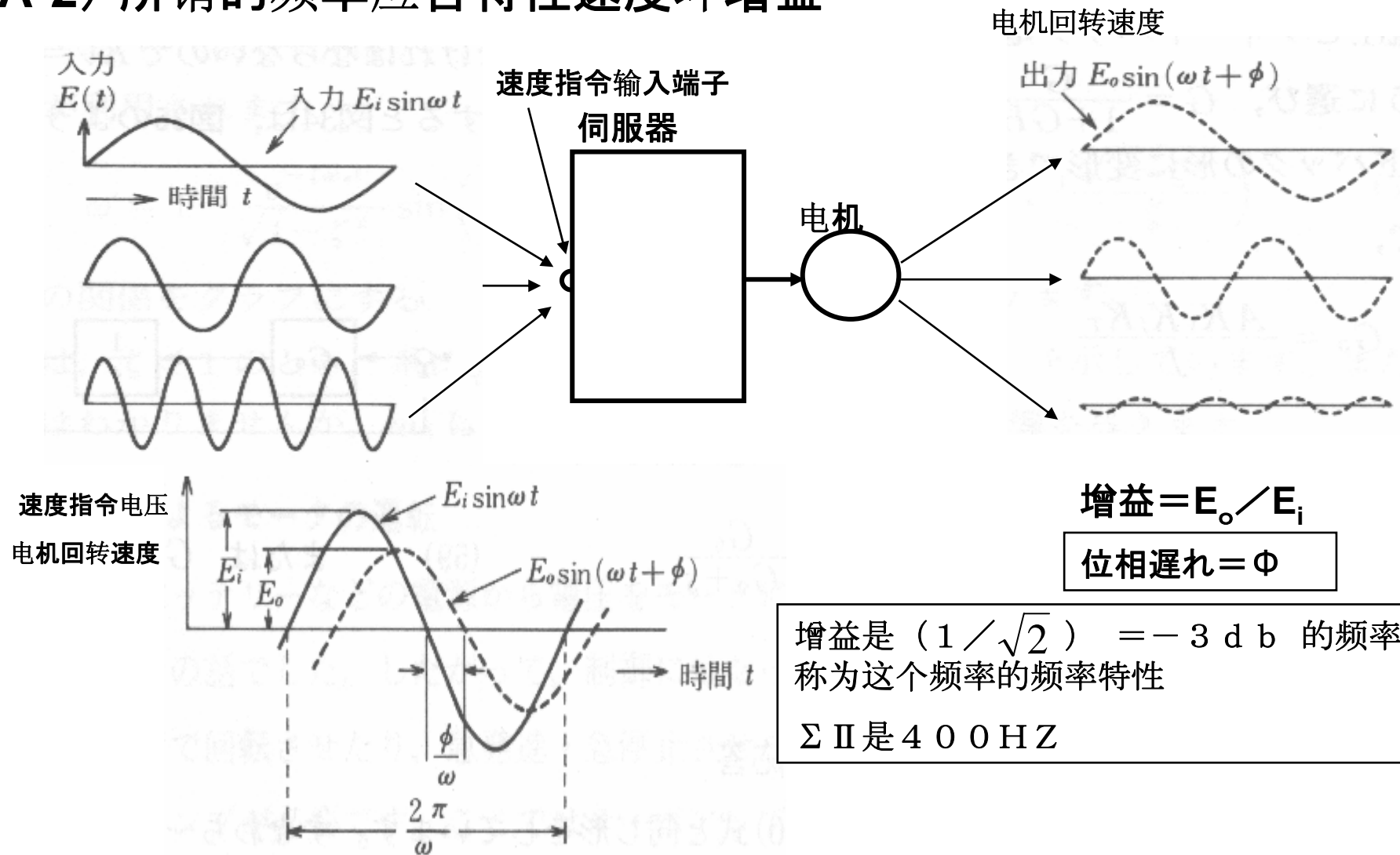
### ② 过度应答速度环增益

输入阶梯状的信号之后到输出指令值到达63.2%的这一段时间称为时参数，这个倒数称为速度环增益。



# 1.3.2- A) 速度环增益

## A-2) 所谓的频率应答特性速度环增益



## 1.3.2- A) 速度环增益

\* 过度应答性的速度环增益 $K_v$ 和频率应答性的速度环增益 $K_v'$  的关系

$$K_v = 2\pi K_v'$$

デシベル (db) は入力を $E_i$ 、出力を $E_o$ とした時以下のように定義されます。

$$db = 20 \log_{10} \frac{E_o}{E_i}$$

入力=出力即ち、その比が1の場合、 $\log_{10} 1$ は0ですのでdbも0です。

周波数-3dbは上の定義により出力と入力の比が0.7097の時ということになります。

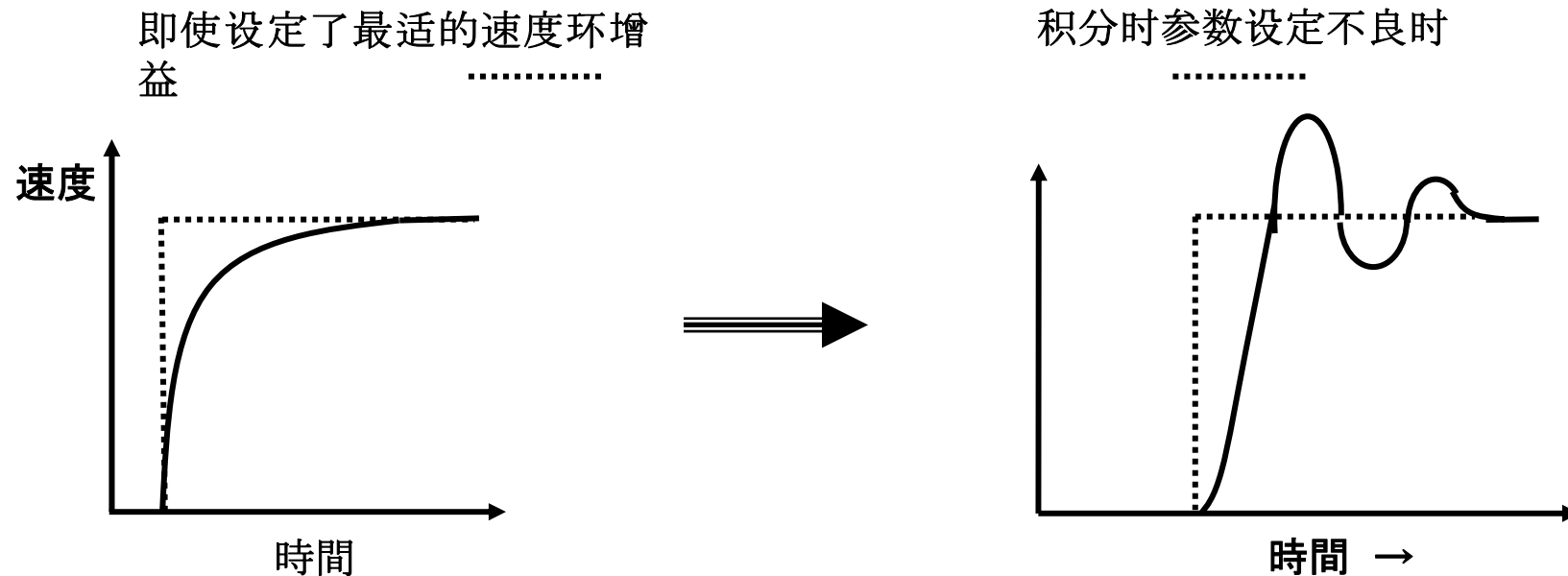


## 1.3.2-B) 速度环积分时参数

时参数能对应机械刚性进行设定。

时参数缩短，指令也一致缩短时间，如果不缩短，机械会发生振动。

有必要设定适合的机械刚性。

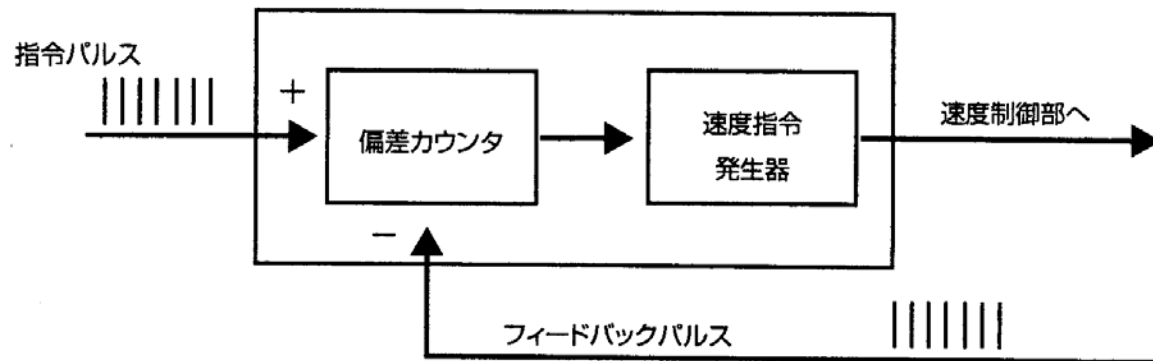


速度环增益和积分时参数之间有一定的关系。

## 1.3.3 位置环增益

### \* 位置环增益

- 位置环增益就是进行位置决定的时候速度的应答性。
- 在数字伺服中，位置决定指令是以脉冲信号输入的。  
位置决定量就是脉冲量。位置决定速度就是单位时间（S）内通过的脉冲数（PPS:Pulse/Second）。
- 输入的脉冲数和反馈的脉冲数一致时，才完成了位置决定过程。
- 在位置控制部，输入脉冲的加算，反馈脉冲的减算，设置计数器（也称偏差计数器）。



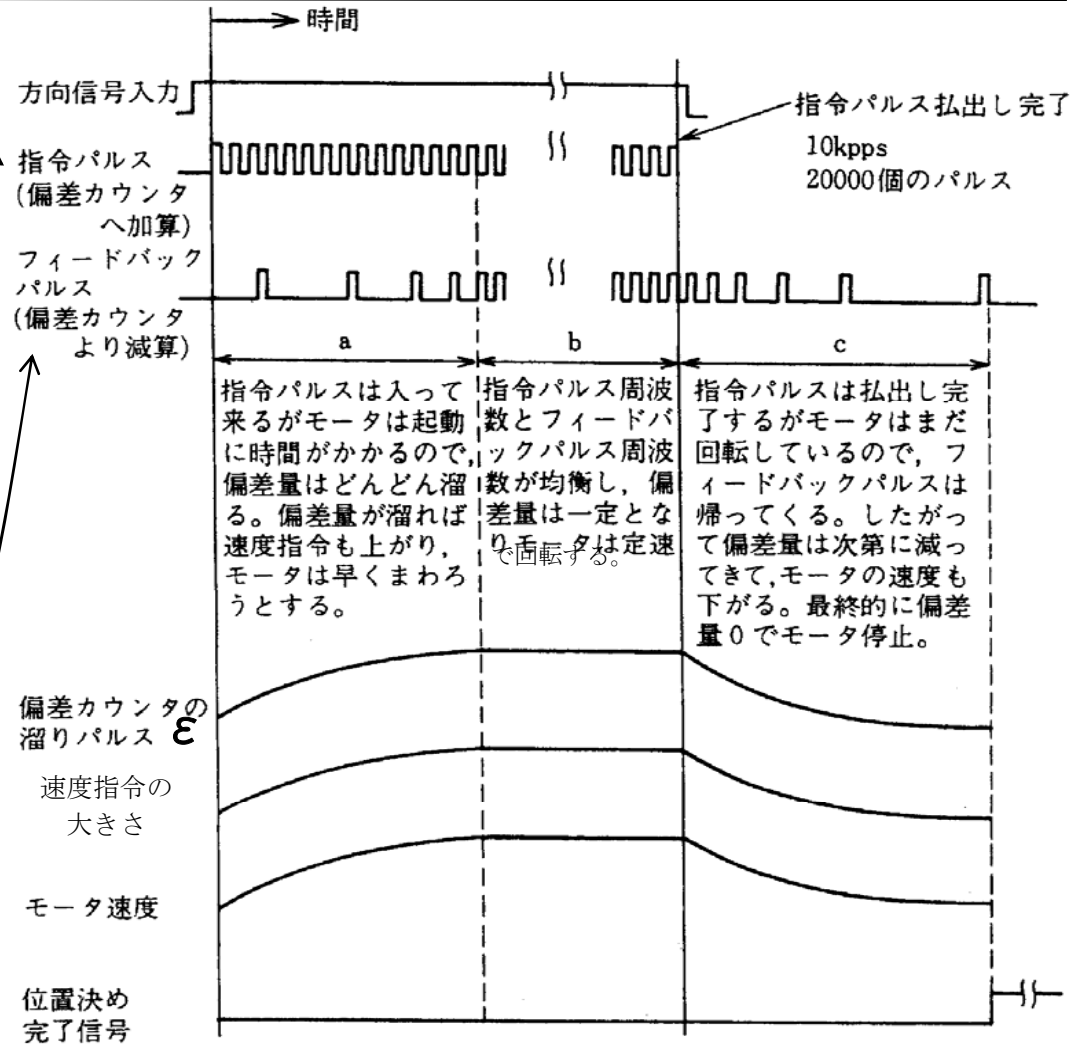
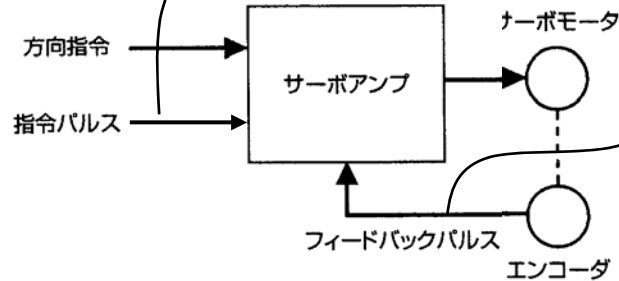
# 1.3.3 位置环增益(続き)

## 位置決定動作の实例

指令単位0.001mm在20的距离中以10mm/s进行位置決定。

位置決定脉冲数: 20,000

位置決定速度: 10,000PPS



aの時間に溜った偏差量がcの時間に減算されて0になったとき位置決め完了となる。  
すなわち、指令パルス数=フィードバックパルス数となった時点で位置決め完了する。

## 2 用户参数



目标:在学习伺服系统在机械电机方面的安装时,要学习用户参数。

它是位置控制与电气之间的一个界面,它包含了电机与编码器的工作。其他的自动控制机器的连续性和互锁性。

2.1 用户参数的定义和安装

2.2 用户参数实例

## 2.1 用户参数的定义和安装

用户参数有两个类型。

选择型

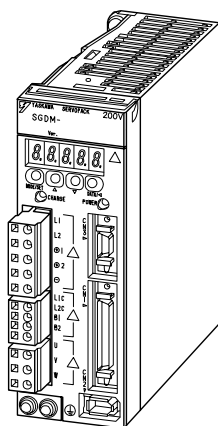
\* 由16个环节4行组成。

\* 根据各行的设定，选择机能。

调整型

设定数值。

用户参数可通过  $\Sigma$ WIN+软件，数字操作器，面板操作器设定。



## 2.2 用户参数概要



以下是SGDM(SGDH)伺服用的  
二个类型的参数。

### 选择型 (Pn-000 ~ 003等)

- 控制模式选择  
(位置, 速度, 转矩控制)
- 机能使用、不使用设定
- 报警时的伺服运作选择
- 电机回转方向的设定
- I/O信号的开断  
(使用) / 不使用 (常時ON、OFF) )

### 调整型 (Pn100等)

- 各种增益
- 位置决定单位、速度、及转矩指令  
信号
- 点动速度
- 有关转矩速度的参数
- 连续参数

## 2.2.1 选择型用户参数的代表例

	分 類	設 定 值	說 明
<b>Pn000</b>	电机 电机回转方向设定	<b>Pn000的0桁 0以及1</b>	0:正转 (从负载侧看 逆时针旋转) 1:逆转
	控制模式选择	<b>Pn000的1桁 0~B</b>	0:速度控制 1:位置控制 2:转矩控制 3:内部设定速度选择 等
<b>Pn001</b>	伺服OFF时及报 警发生时的停止 法	<b>Pn001的0桁 0、1以及2</b>	0:以动态制动 (DB) 停止 1:以DB停止、在这之后DB解除 2:自由运行状态停止
	超程时停止选择	<b>Pn001的1桁 0、1以及2</b>	0:自由运行停止 1 : 减速停止后伺服振动 2:减速停止后自由运行状态
	AC/DC电源输入 选择	<b>Pn001的2桁 0以及1</b>	0: AC电源输入 1: DC电源输入
	警报代码输出	<b>Pn001的3桁 0以及1</b>	0:只在端子AOL1, AOL2, AOL3输出警告代码 1:故障代码、警告代码两方面输出

## 2.2.2 用户参数(调整型)代表例

分 類	参数	名 称	单位	出厂设定
增益关系	Pn100	速度环增益	HZ	40
	Pn101	速度环积分时参数	0.01ms	2000
	Pn102	位置环参数	1/s	40
	Pn103	惯性力矩比	%	0
	Pn104	第2速度环增益	HZ	40
	Pn105	第2速度环积分时参数	0.01ms	2000
	Pn106	第2速度环增益	1/s	40



# 3 伺服增益的调整

---

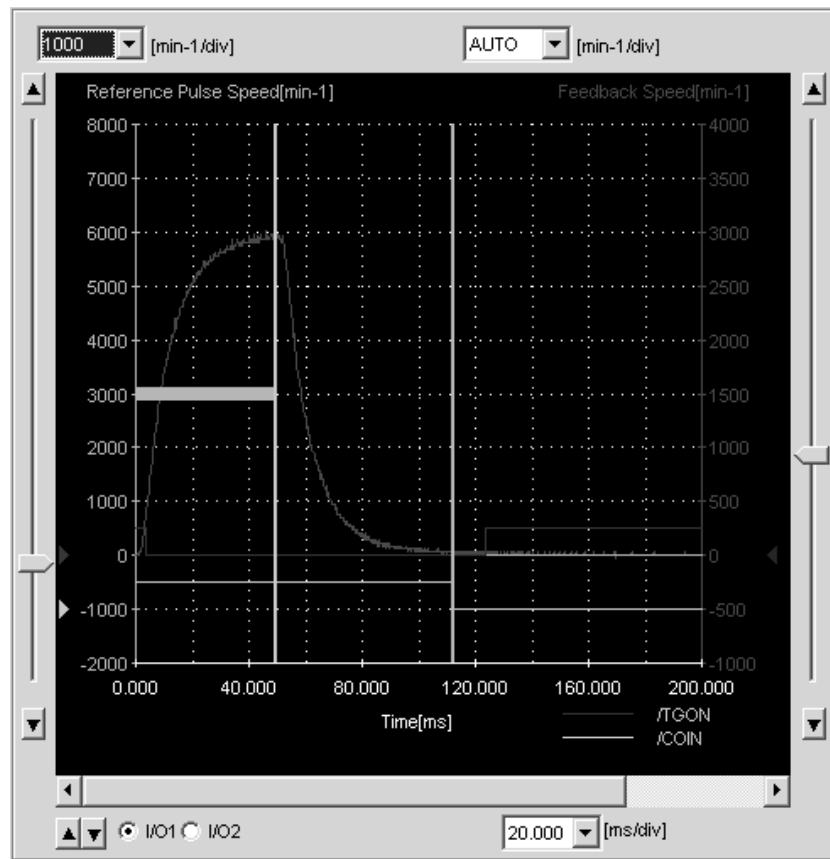
目标:伺服增益特性的增益。

- 3.1 增益的特性确认
- 3.2 在线自动运行
- 3.3 手动运行

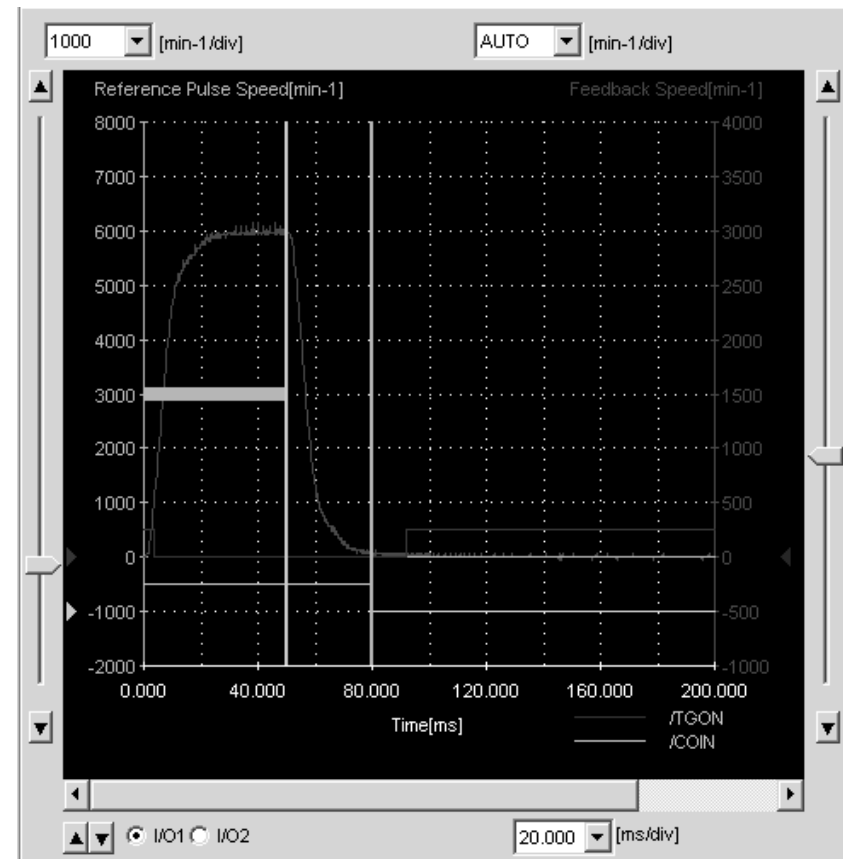
# 3.1 增益特性确认1

位置环增益的变更→整定时间变化

COIN信号使用



**$K_v=120, K_p=80$**

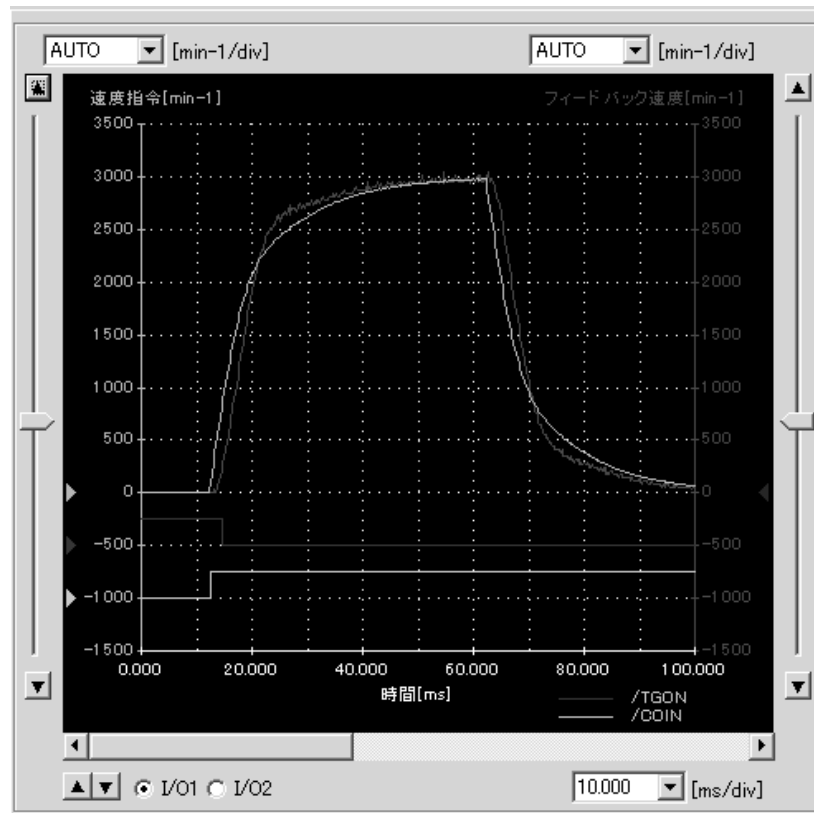


**$K_v=120, K_p=120$**

# 3.1 增益特性确认 2

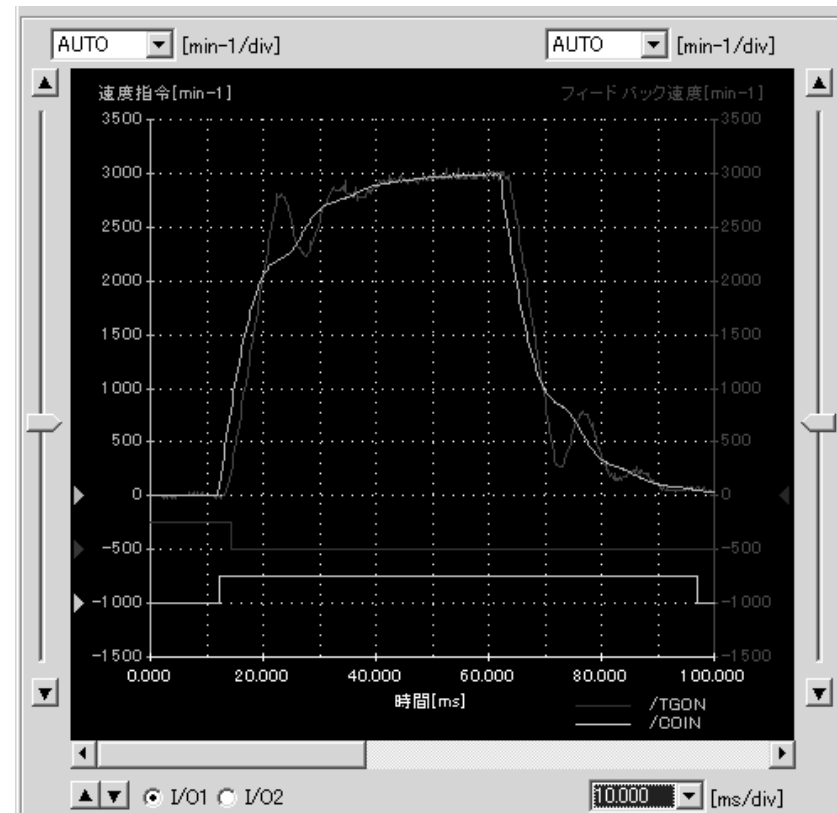
## 速度环积分时参数超程的影响

超程小、位置决定迟缓



$K_v=120\text{Hz}, T_i=8.0\text{ms}$

超程大、位置决定快速



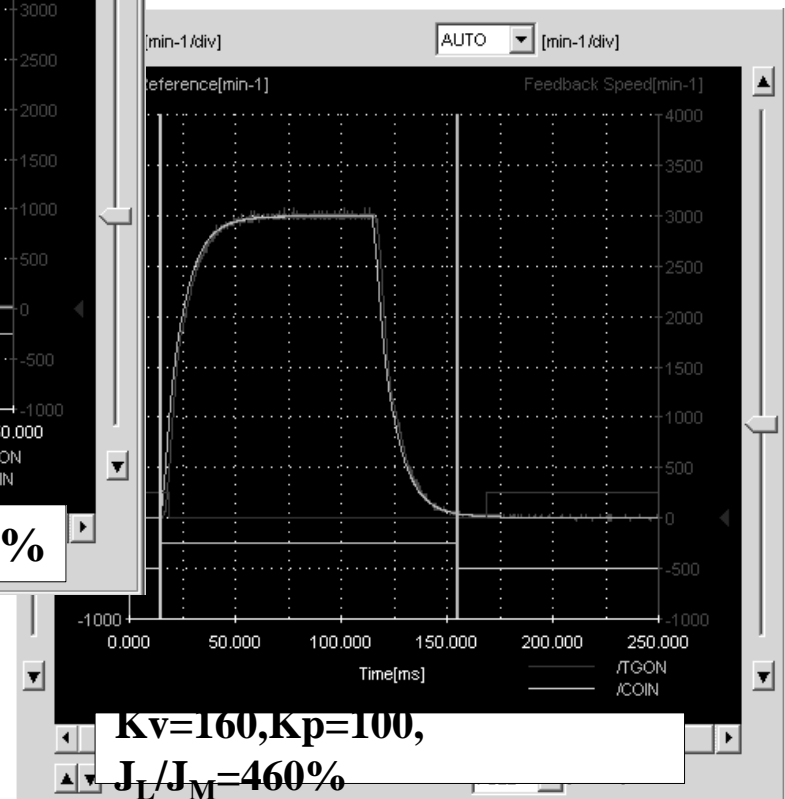
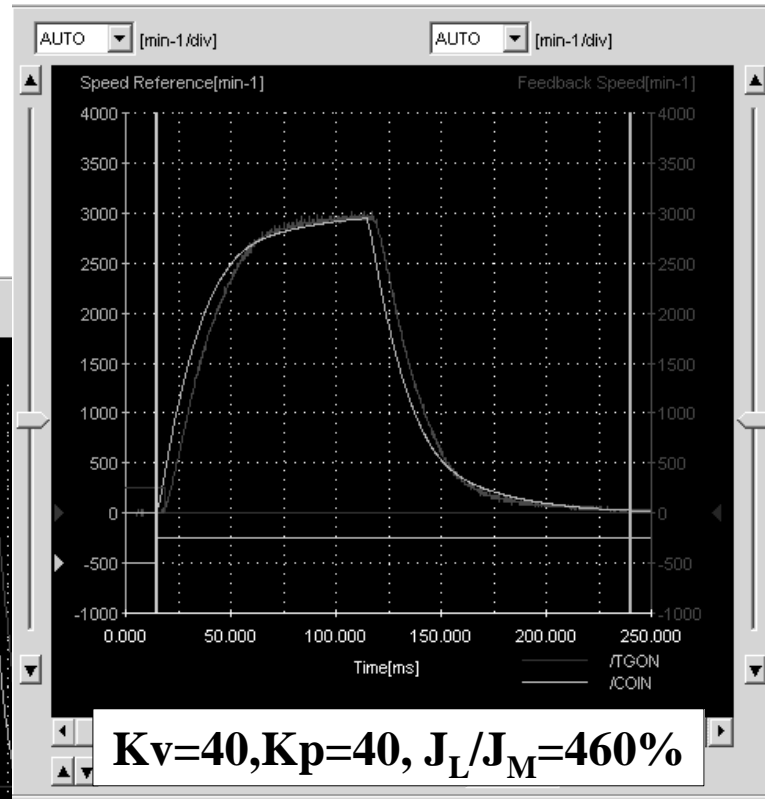
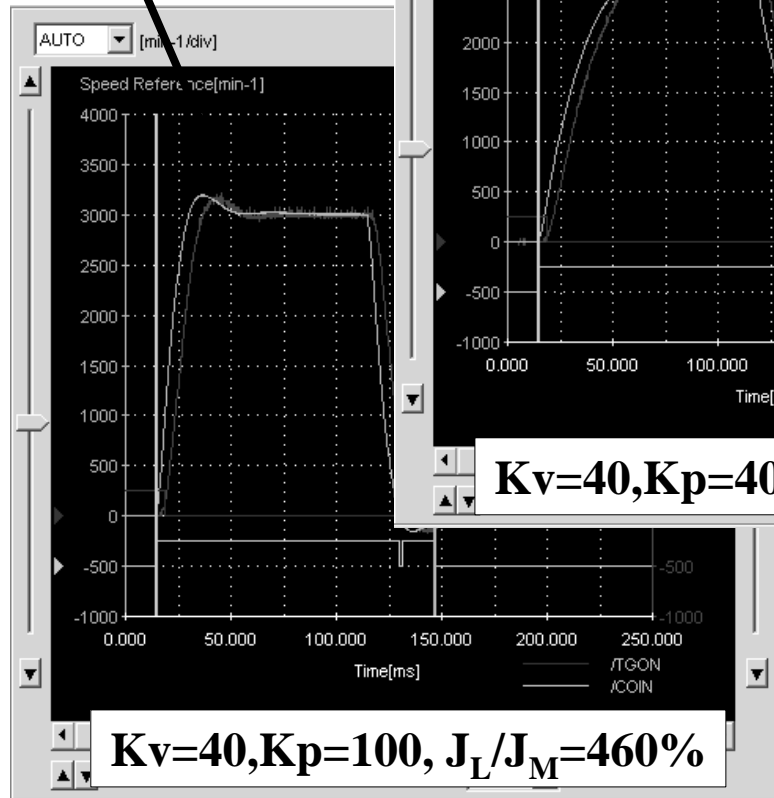
$K_v=120\text{Hz}, T_i=2.0\text{ms}$

# 3.1 增益特性确认 3

## Kv和Kp的平衡

只上升Kp, 应答变快,  
观察速度带来的振动。

位置决定量: 10转  
位置决定速度: 3000 min<sup>-1</sup>



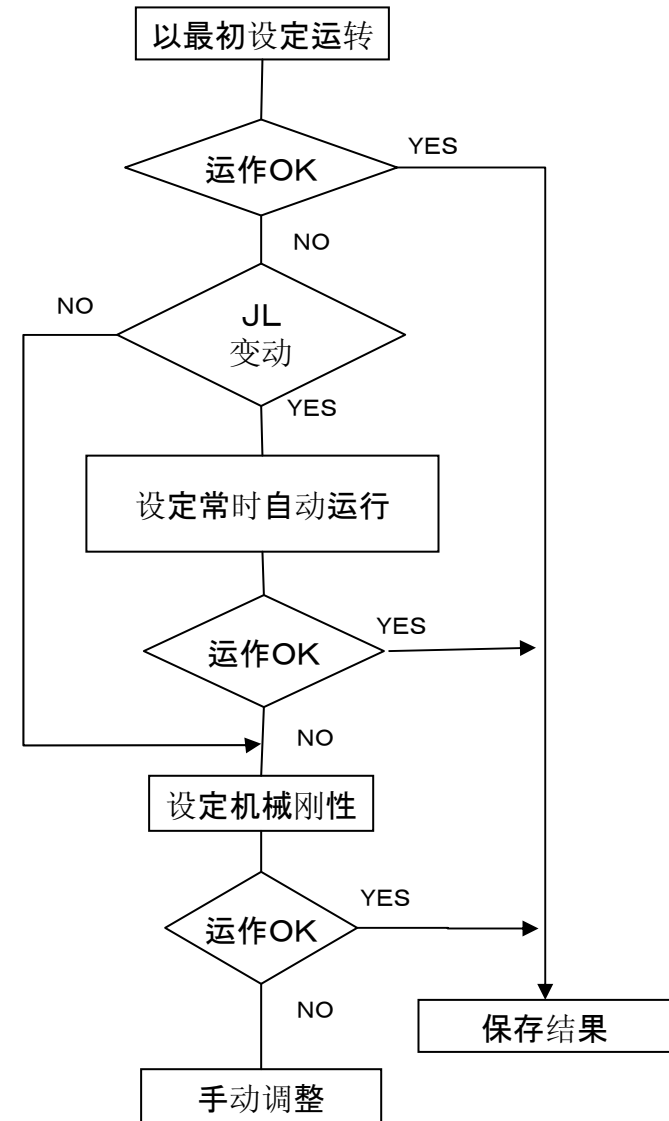
## 3.2 在线自动运行

### 1) 在线自动运行

在伺服的运行中测定负荷惯性的最大值，  
一定地保持以速度环增益  
或位置环增益为目标的机能。

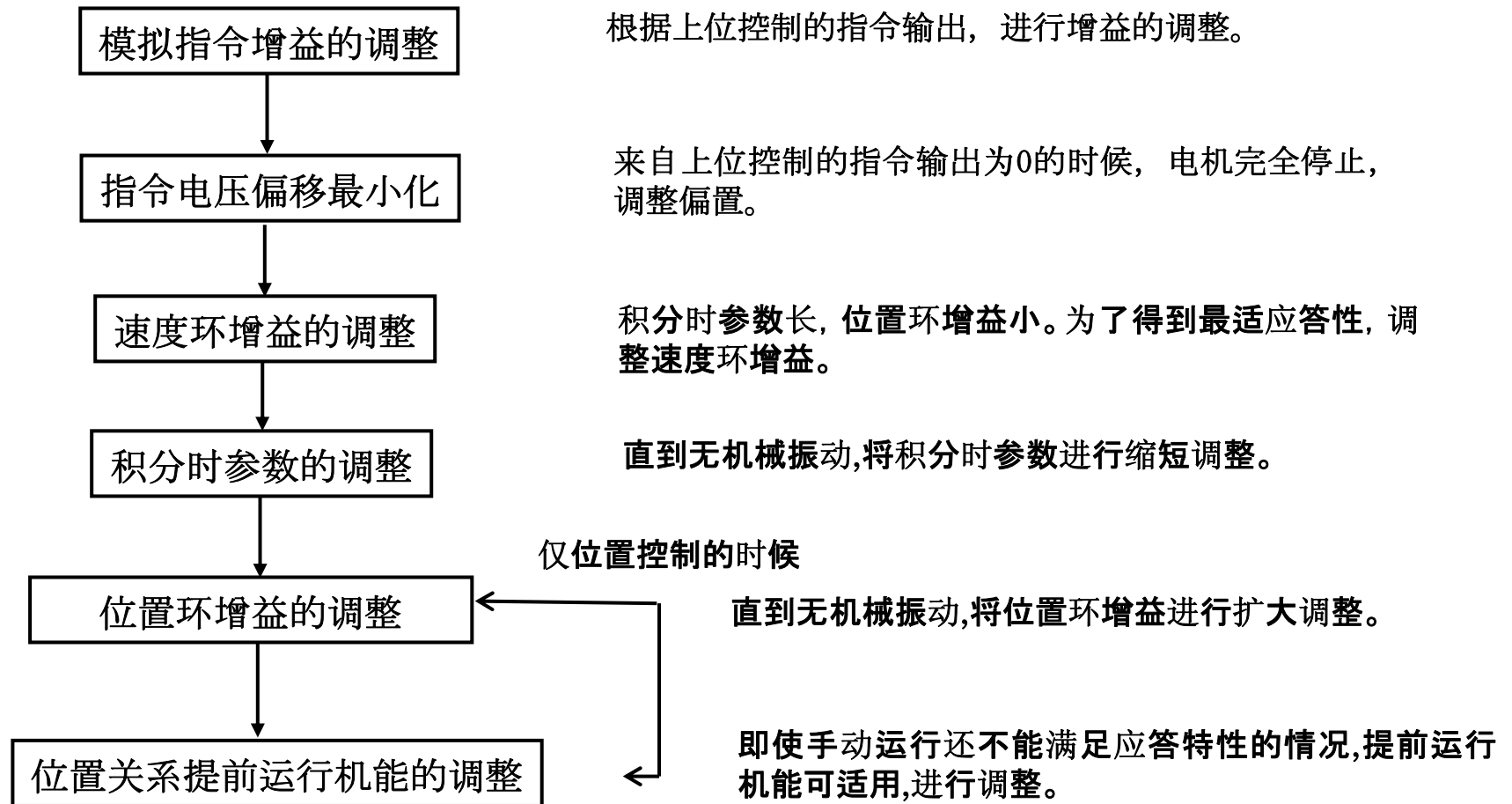
### 2) 自动运行下的自动设定增益

- ① 速度环增益  $K_v$  (Pn100)
- ② 速度环积分时参数  $T_i$  (Pn101)
- ③ 位置环增益  $K_p$  (Pn102)
- ④ 转矩指令滤波器时参数 (Pn401)



## 3.3 手动运行

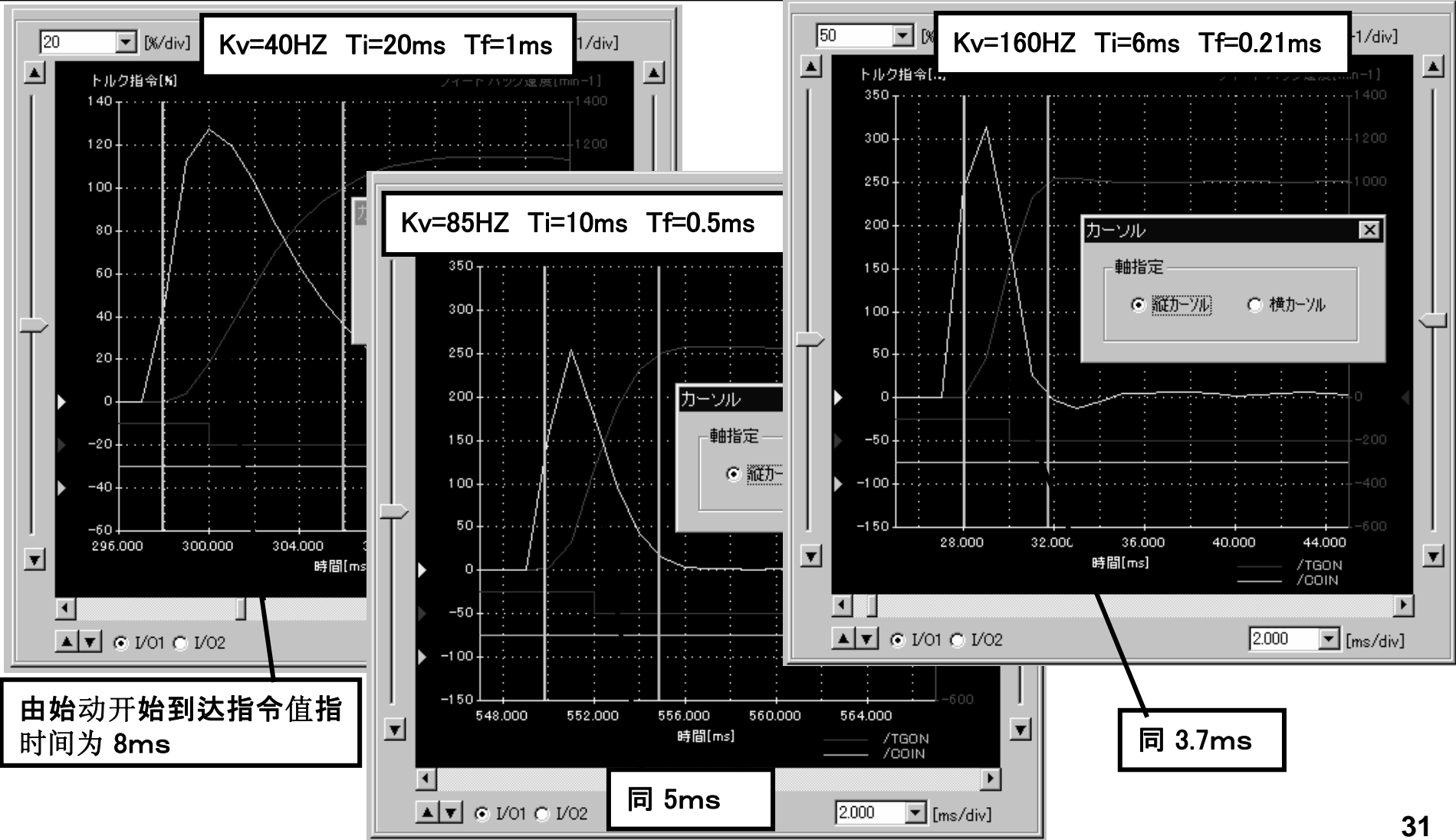
在手动运行不能满足应答特性的情况、还可通过提前运行、分别地对增益一个一个地进行运行。



# 3.3 手动运行



根据不同的增益, 学习如何改变应答特性。



## 4 电机的机种和容量的选定



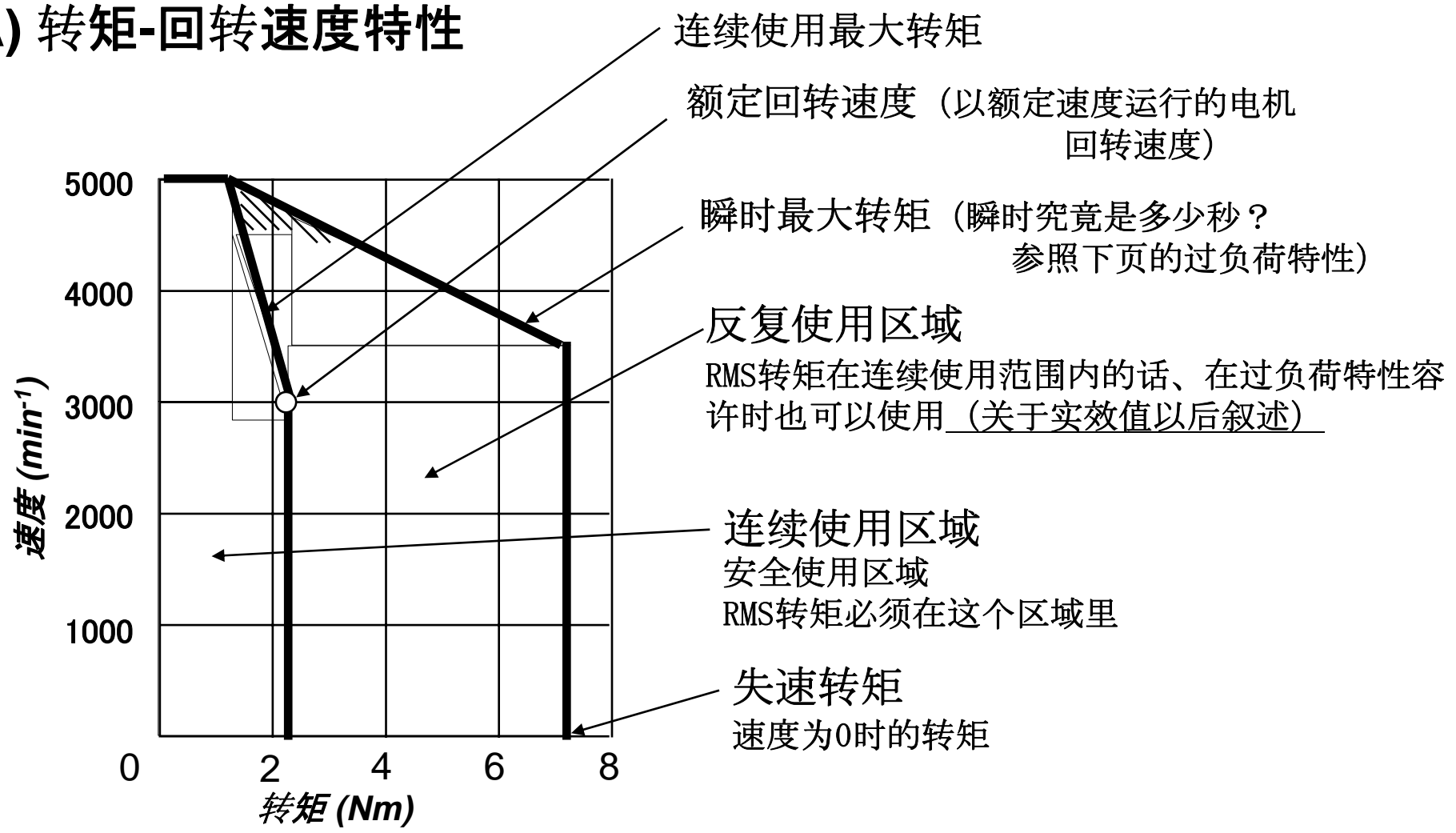
**目标：**学习伺服电机(机种和容量)选型公式的要点。  
并且根据向本社用户提供的电机选型软件, 进行  
选型讲习和再生讨论.

- 4.1 样本读取的方法
- 4.2 选定公式的导入
- 4.3 为选定而讨论的项目
- 4.4 选定讲习
- 4.5 再生讨论



# 4.1 样本的读取 1

## A) 转矩-回转速度特性



**SGMAH-08A**

## 4.1 样本的读取 2

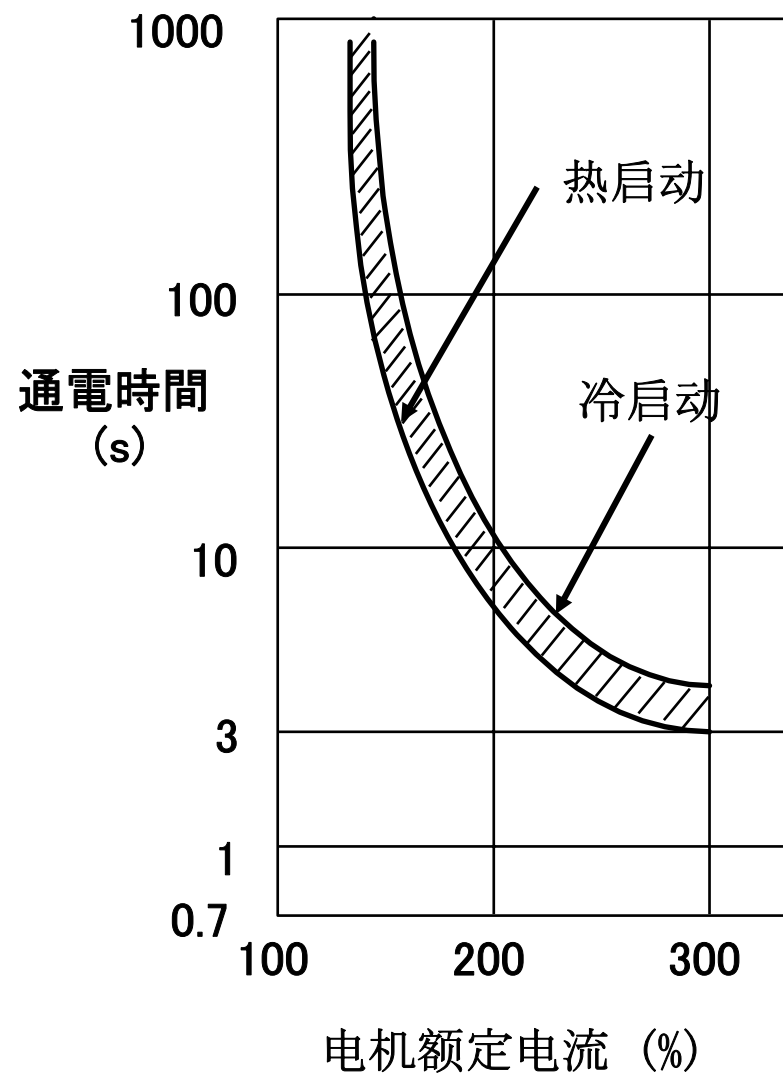
### B) 过负荷特性

额定的多少倍 (%) 的电流、  
经过几秒流过。

冷启动：  
电机在充分冷却时运作的情况

热启动：  
电机在热饱和状态使用的情况

见右图、冷启动、  
2倍的额定电流在 10 秒中流过  
读取情况还是相当良好。



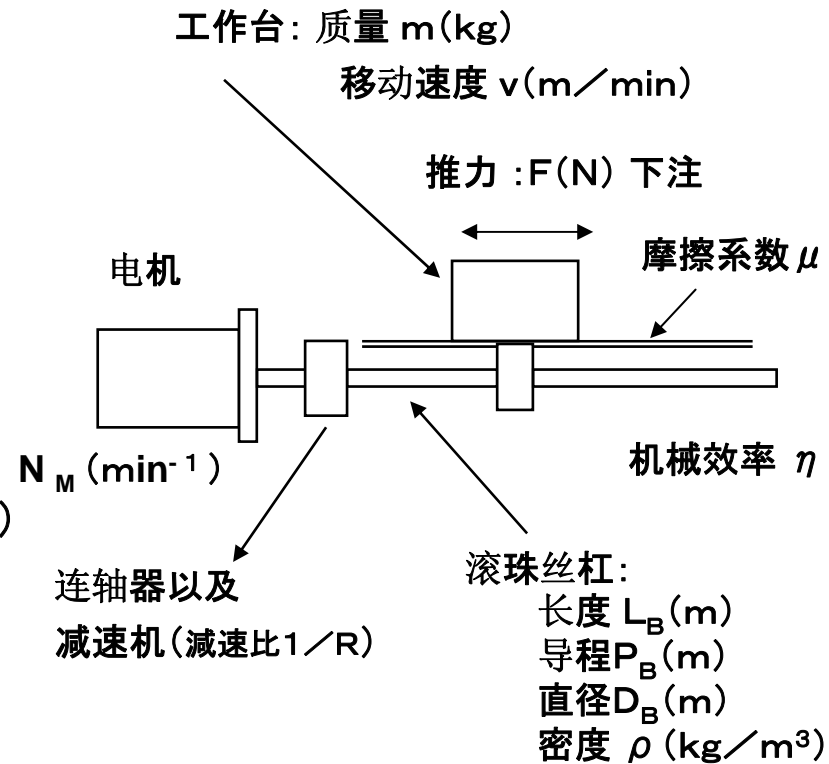
## 4.2 选型公式的导入1

### 根据 $P_B$ 和 $v$ 的关系

由  $N_L = \frac{v}{P_B}$

得

$$N_M = R \cdot N_L = \frac{R \cdot v}{P_B} \quad (4-1)$$



## 4.2 选型公式的导入 2

\* 电机（回转速度： $N_M$  ( $\text{min}^{-1}$ )）输出的  
 $\eta$  倍就成为工作台运行的动力。

这个时候电机转矩 $T_L$   $T \omega = F v$

$$\text{由 } T_L \frac{2\pi}{60} N_M \eta = (9.8 m \mu + F) \frac{v}{60}$$

得

$$\underline{\underline{T_L = (9.8 m \mu + F) \frac{v}{2\pi N_M \eta} \quad (4-2)}}$$

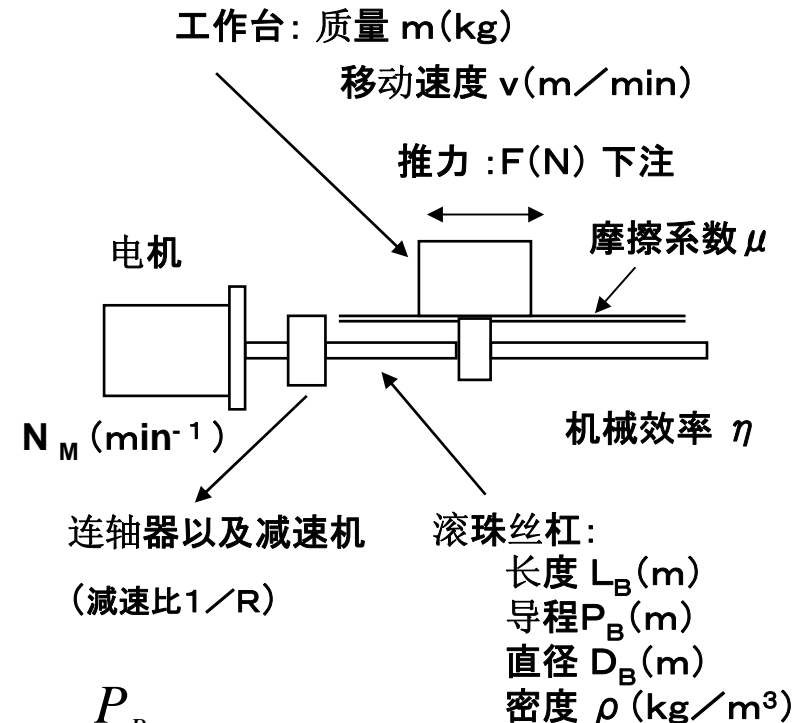
\* 另

$$\text{如果有 } N_M = R \cdot N_L = \frac{R \cdot v}{P_B}$$

$$\frac{v}{N_M} = \frac{P_B}{R}$$

那么下式也成立。

$$\underline{\underline{T_L = (9.8 m \mu + F) \frac{P_B}{2\pi R \eta} \quad (4-3)}}$$



注：所谓推力，就是金属加工时与切削力反作用的力，它是外力施与工作台的一个很重要的力。只是工作台移动的情况时 $F=0$ 。

## 4.2 选定公式导入 3

\* 电机(回转速度: $N_M(\text{min}^{-1})$ )考虑到回转运动能可换算改变成直线运动能、电机轴换算工作台惯性力矩 $J_{L1}(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$ 可由下式导出。

$$\text{由 } \frac{1}{2} J_{L1} \left( \frac{2\pi}{60} N_M \right)^2 = \frac{1}{2} m \left( \frac{v}{60} \right)^2$$

得

$$\underline{\underline{J_{L1} = m \left( \frac{v}{2\pi N_M} \right)^2}} \quad \text{以及} \quad \underline{\underline{J_{L1} = m \left( \frac{P_B}{2\pi R} \right)^2}}$$

(4-4)

(4-5)

## 4.2 选型公式导入 4

(a) 滚轴丝杠的惯性力矩 $J_B$ 与质量 $M_B$ 知晓的话，就导出下式。

$$J_B = \frac{1}{2} M_B \left( \frac{1}{2} D_B \right)^2 = \frac{1}{8} M_B D_B^2 \quad (4-6)$$

(b) 质量 $M_B$ 不知晓的话，明白材质的密度就可导出下式。

$$J_B = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{2} D_B \right)^2 \underbrace{\left( \pi \left( \frac{1}{2} D_B \right)^2 \right) L_B \rho}_{\substack{\uparrow \\ \text{体积}}} = \frac{1}{32} \pi \rho L_B D_B^4 \quad (4-7)$$

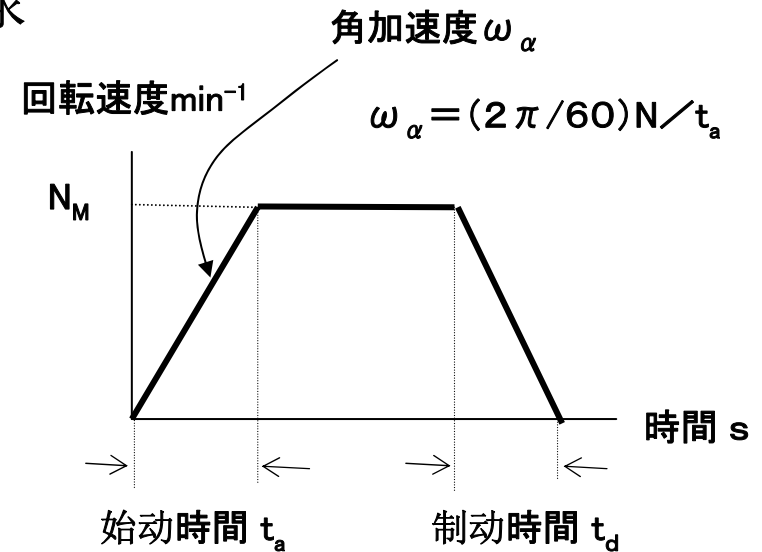


## 4.2 选型公式的导入 6

\* 给与机械所要求的始动时间、制动时间，但究竟要给多少的始动转矩、制动转矩，由下式可以求得。

### ① 始動トルク( $T_p$ (N·m))

\* 根据回转运动的基本公式  $T = J \omega_\alpha$ 、电机的惯性力矩  $J_M$ 、电机轴换算的全负荷惯性力矩  $J_L$ 、所要始动转矩  $T_p$ 、电机轴换算负荷转矩  $T_L$  ( $T_p - T_L$ ) 是对加速有益的转矩下式成立。



$$\text{由 } T_p - T_L = \left(\frac{2\pi}{60}\right) \frac{N_M (J_M + J_L)}{t_a} \quad \text{得}$$

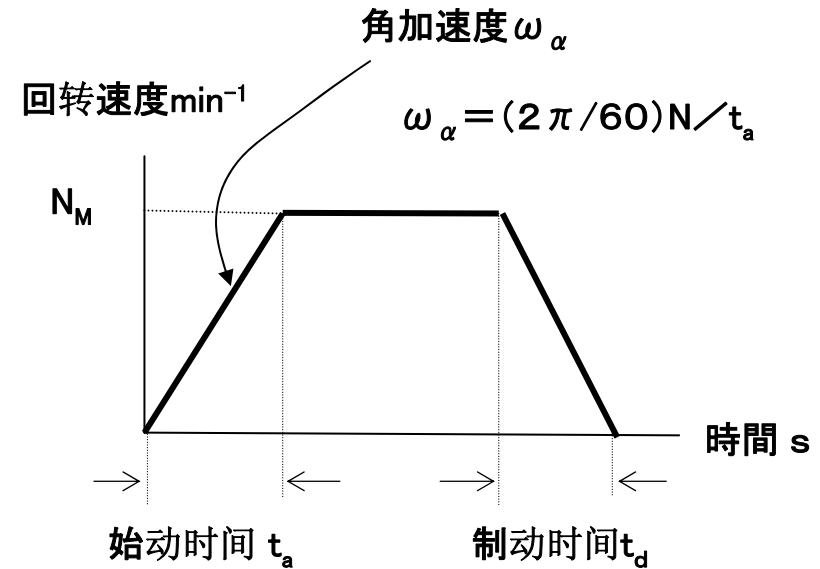
$$T_p = \left(\frac{2\pi}{60}\right) \frac{N_M (J_M + J_L)}{t_a} + T_L \quad (4-8)$$



## 4.2 选定公式导入 7

### ② 制动转矩 ( $T_s$ (N·m))

\* 制动时, 负荷转矩有下式的关系成立。



$$\text{由 } T_S + T_L = \left(\frac{2\pi}{60}\right) \frac{N_M (J_M + J_L)}{t_d} \quad \text{得} \quad T_S = \left(\frac{2\pi}{60}\right) \frac{N_M (J_M + J_L)}{t_d} - T_L \quad (4-9)$$

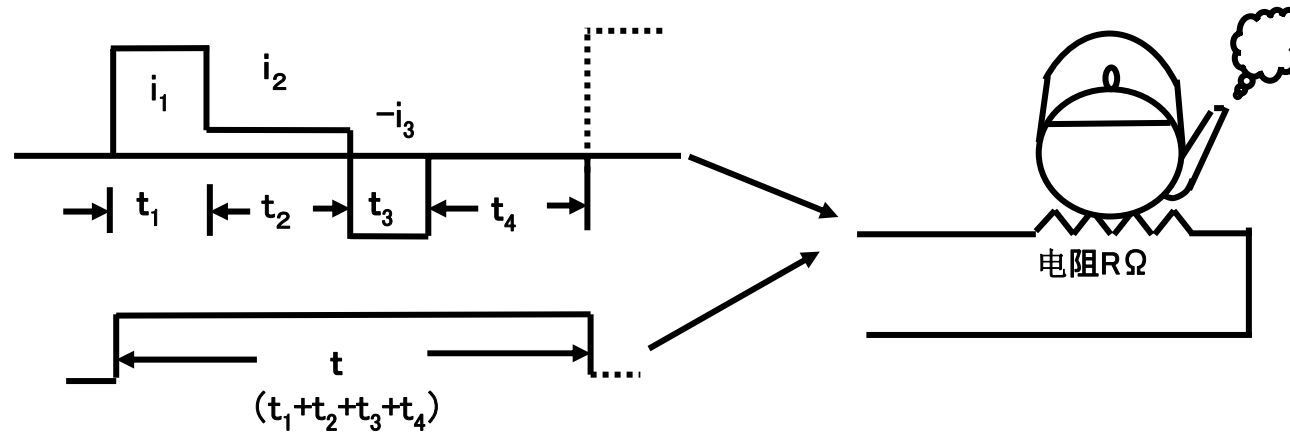
注：这个式子的成立条件, 电机产生的转矩(电流)饱和并且电机回转速度接近额定速度。

回转速度低的时候的始动时间随着应答性是由增益决定的。

## 4.3 为选定所讨论的项目

### 实效值

电阻R的电流器如下图与电流流过时的发热量相同,直流电I与发热量Q的关系:



$$Q = i_1^2 R t_1 + i_2^2 R t_2 + (-i_3)^2 R t_3 = I^2 R t$$

$$I = \sqrt{\frac{i_1^2 t_1 + i_2^2 t_2 + i_3^2 t_3}{t}}$$

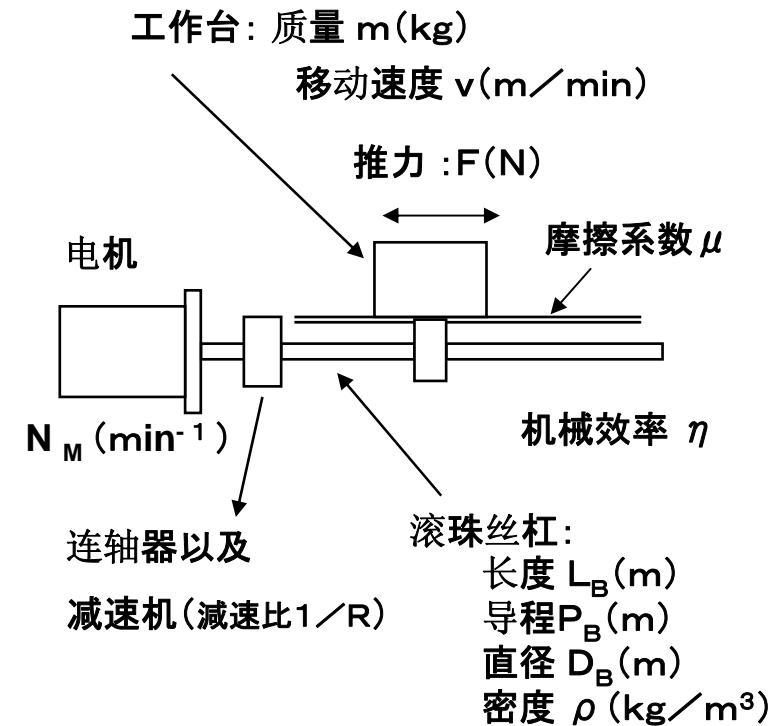
这个电流  $I$  称为 电流  $i_1(t_1)i_2(t_2)i_3(t_3)$  的实效值。

在伺服器的情况下, 转矩与电流成正比关系, 转矩的实效值与电流实效值计算方法相同, 这个值在额定转矩以下的话, 电机就会产生热量。

## 4.4 选定讲习

根据左图的机械例, 想定具体的值, 进行电机选定的讲习。

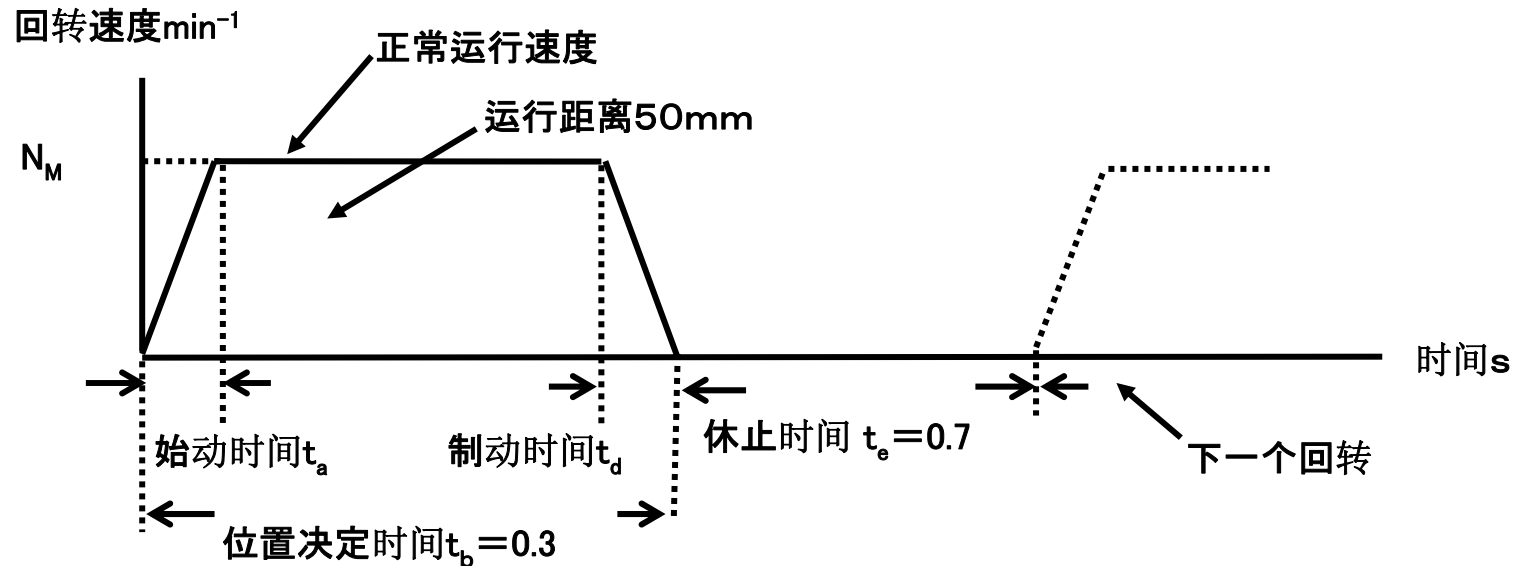
- 工作台质量  $m : 50 \text{ (kg)}$
- 工作台移动所要求的推力  $F : 2 \text{ (N)}$
- 工作台台面的摩擦系数  $\mu : 0.2$
- 机械效率  $\eta : 0.9$
- 工作台移动速度  $v : 12 \text{ (m/min)}$
- 滚轴丝杠导程  $P_B : 6 \text{ (mm)}$
- 滚轴丝杠长度  $L_B : 1 \text{ (m)}$
- 滚轴丝杠直径  $D_B : 25 \text{ (mm)}$
- 滚轴丝杠材质密度  $\rho : 7.87 \text{ (kg/m}^3\text{)}$
- 减速比  $1/R : 1/2$   
(滚轴丝杠回转速度/电机回转速度)
- 联轴器以及  
减速机惯性力矩  $J_{L2} : 0.45 \text{ (kg}\cdot\text{cm}^2\text{)}$
- 1转所行走的距离  $L : 50 \text{ (mm)}$
- 1转所需要的时间  $t : 1.0 \text{ (s)}$
- 5 mm位置决定时间  $t_m : 0.3 \text{ (s)}$
- 停止时间  $t_e : 0.7 \text{ (s)}$



## 4.4 选定讲习 1

### (a) 速度线图

机械性能如下图速度曲线所示。



### (b) 电机所要的回转速度 $N_M$ ( $\text{min}^{-1}$ )

根据(4-1)式

$$N_M = \frac{12 \times 2}{0.006} = 4000 \text{ min}^{-1}$$

电机的回转速度在  $4,000 \text{ min}^{-1}$ 、就应该选择最高回转速度在  $4,000 \text{ min}^{-1}$  以上的机种。

这里选择的是 S GMAH 系列。

或者使用超过额定速度、连续转矩比额定转矩小的电机。

## 4.4 选型讲习 2

### (c) 正常运行转矩 $T_L$ (N·m)

利用工作台的电机轴换算负荷转矩  $T_L$  は (4-2) 式求得。

$$T_L = \frac{(9.8 \times \mu m + F)v}{2\pi N_M \eta} = \frac{(9.8 \times 0.2 \times 50 + 2) \times 12}{2 \times 3.14 \times 4000 \times 0.9} = 0.053 (N \cdot m)$$

即使是使用 (4-3) 式, 结果相同。

$$T_L = \frac{(9.8 \times \mu W + F)p}{2\pi R \eta} = \frac{(9.8 \times 0.2 \times 50 + 2) \times 0.006}{2 \times 3.14 \times 2 \times 0.9} = 0.053 (N \cdot m)$$

## 4.4 选型讲习 3

(d) 电机轴换算全负荷惯性力矩  $J_L$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )

(d-1) 工作台的电机轴换算惯性力矩  $J_{L1}$

工作台的电机轴换算惯性力矩  $J_{L1}$  (4-4) 以及 (4-5) 式求得。

$$J_{L1} = M \left( \frac{P_B}{2\pi R} \right)^2 = 50 \left( \frac{0.006}{2 \times 3.14 \times 2} \right)^2 = 0.114 \times 10^{-4} (\text{Kg} \cdot \text{m}^2)$$

(d-2) 滚轴丝杠的电机轴换算惯性力矩  $J_{L3}$

就此例,滚珠丝杠的电机轴换算惯性力矩  $J_{L3}$  由 (4-6)、(4-7) 式求得。

$$\begin{aligned} J_{L3} &= \left( \frac{1}{R} \right)^2 \frac{1}{32} \pi \rho L_B D_B^4 = \left( \frac{1}{2} \right)^2 \times \frac{1}{32} \times 3.14 \times 7.87 \times 10^3 \times 1 \times (0.025)^4 \\ &= 0.754 \times 10^{-4} (\text{kg} \cdot \text{m}^2) \end{aligned}$$

(d-3) 电机轴换算全负荷惯性力矩  $J_L$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )

$$\begin{aligned} J_L &= J_{L1} + J_{L2} + J_{L3} = (0.114 + 0.45 + 0.754) \times 10^{-4} (\text{kg} \cdot \text{m}^2) \\ &= 1.32 \times 10^{-4} (\text{kg} \cdot \text{m}^2) \end{aligned}$$

由此值,为了使惯性力矩比不超过30倍,假设选定为200W。

## 4.4 选型讲习 4

(e) 始动时间 $t_a$  (s)、制动时间 $t_d$  (s) (由图  $t_a=t_d$ )

在0.3秒进行5mm的位置决定, 制动时间 $t_a$ 、  
正常运作时间 $t_c$ , 成立以下式。

$$(t_a + t_c + t_a) = 0.3 \quad \Rightarrow \quad (2t_a + t_c) = 0.3$$

$$\frac{12000}{60} \left( \frac{1}{2}t_a + t_c + \frac{1}{2}t_a \right) = 50 \quad \Rightarrow \quad (t_a + t_c) = 0.25$$

由此二式求得 $t_a$ 、 $t_c$ 。

$$t_c = 0.2 \quad t_a = 0.05$$

## 4.4 选型讲习 5

(f) 始动转矩 $T_p$  (N·m) 、制动转矩 $T_s$ 时间 $t_d$  ( N·m)

始动转矩  $T_p$ 、制动转矩  $T_s$  由 (4-8) 式 (4-9) 式求得。

$$\begin{aligned}
 T_p &= (J_M + J_L) \frac{(2\pi)}{60} N_M \frac{1}{t_a} + T_L \\
 &= (0.106 + 1.32) \times 10^{-4} \frac{6.28}{60} 4000 \frac{1}{0.05} + 0.0531 = 1.246 \text{ (N} \cdot \text{m)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T_s &= (J_M + J_L) \frac{(2\pi)}{60} N_M \frac{1}{t_a} - T_L \\
 &= (0.106 + 1.32) \times 10^{-4} \frac{6.28}{60} 4000 \frac{1}{0.05} - 0.0531 = 1.140 \text{ (N} \cdot \text{m)}
 \end{aligned}$$



## 4.4 选型讲习 6

### (g) 实效转矩 $T_{rms}$ (N·m)

由转矩线图求得实效转矩 $T_{rms}$ ,如下式。

$$T_{rms} = \sqrt{\frac{T_p^2 \cdot t_a + T_L^2 \cdot t_c + T_s^2 \cdot t_d}{t_a + t_c + t_d + t_e}}$$

$$= \sqrt{\frac{1.246^2 \times 0.05 + 0.0531^2 \times 0.2 + 1.140^2 \times 0.05}{0.05 + 0.2 + 0.05 + 0.7}} = 0.378 (N \cdot m)$$

这个值在选定电机的额定转矩 0.637(N·m) 以下(负荷率59%),因此可以使用。

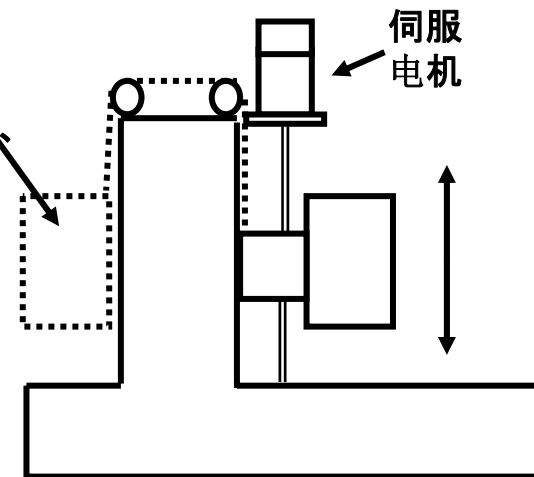
## 4.5 再生讨论 1

如果可以选定电机、适用的伺服器也应该选定、再生处理能力有必要进行讨论。

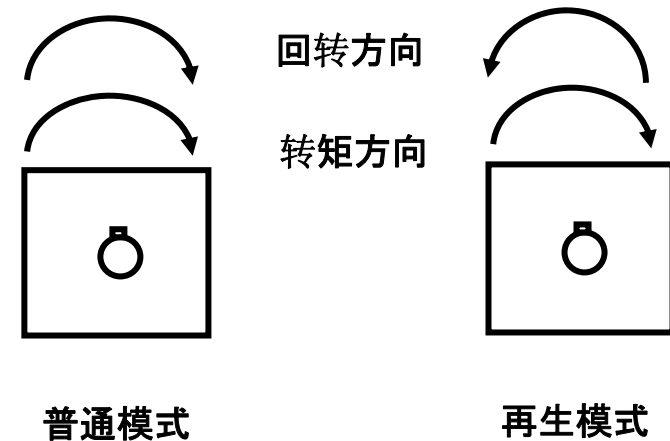
电机被负荷转动的情况时被称为负负荷或者垂直负荷。

比如：如果如右图的计数砝码（或者平衡负荷），作上下运动的机械在下降时会成为垂直的负荷。

平衡砝码  
 (计数砝码) 没有的话,  
 下降时就成了负负荷  
 (垂直负荷)



即使是水平运动的情况，制动时电机会变成转矩方向和回转方向相反的发电机，这种状态就成为再生模式。



## 4.5 回生検討 2

在伺服器中、之前所述的发电电力（再生能量）可由内置电阻器消耗、惯性力矩大的时候再生能量也大, 内置电阻会有不足消费的情况。

如此使用, 就会成为烧坏内置电阻器的故障原因。

因此再此有必要讨论再生能量是否能在内置电阻中消耗。

