

## 第五章 机械的调速与平衡



### 5.1 机器速度波动的调节

### 5.2 机械的平衡

### 5.1 机器速度波动的调节



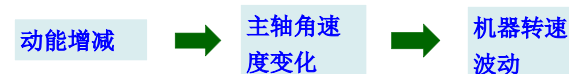
#### 一、调节机器速度波动的目的和方法

- 运动分析时，都假定原动件作匀速运动。
- 机器受到的力（矩）：驱动力（矩 $M_{ed}$ ）、阻力（矩 $M_{er}$ ）。
- 力（矩）所做的功：驱动功（ $W_{ed}$ ）、阻抗功（ $W_{er}$ ）。

驱动功=阻抗功 → 机器匀速运转。

驱动功>阻抗功 → 出现盈功，机器增速运转。

驱动功<阻抗功 → 出现亏功，机器减速运转。



#### ➤ 速度波动产生的不良后果：

- ① 在运动副中引起附加动压力，加剧磨损，降低工作可靠性。
- ② 引起振动，消耗能量，降低机械效率。
- ③ 影响机器的工艺过程，降低产品质量。

➤ 速度波动调节的目的：为了减小这些不良影响，必须对机器速度波动进行调节，使机器的转速在允许范围内波动，而保证正常工作。

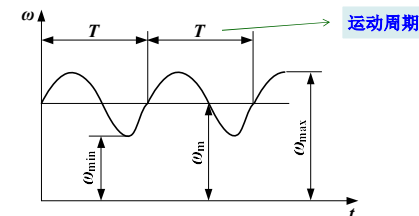
#### ➤ 速度波动的类型：

- ① 周期性速度波动
- ② 非周期性速度波动

#### 二、周期性速度波动及其调节



**周期性速度波动：**当机器动能增减呈周期性变化，其主轴角速度随之做周期性波动。



在一个周期内，驱动功=阻抗功  
在周期内瞬时，驱动功≠阻抗功

**运动循环：**将主轴的位置、转速和加速度从某一数值变回到初始值的变化过程。

## 1、周期性速度波动调节的指标

——机器运转的平均角速度和不均匀系数。

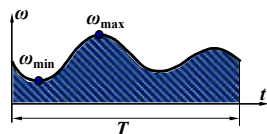
已知主轴角速度： $\omega = \omega(t)$

实际平均角速度： $\omega_m = \frac{1}{T} \int_0^T \omega dt$

算术平均角速度： $\omega_m = (\omega_{\max} + \omega_{\min})/2$

定义： $\delta = (\omega_{\max} - \omega_{\min}) / \omega_m$  为机器运转的**速度不均匀系数**，表示机器速度波动的程度。

→  $\omega_m$ 一定时， $\delta$ 愈小， $\omega_{\max} - \omega_{\min}$ 也愈小，机器的运转愈平稳。



设计机器时应满足：

$$\delta \leq [\delta]$$

常用机械运转的许用不均匀系数 $[\delta]$

机械名称	$[\delta]$	机械名称	$[\delta]$	机械名称	$[\delta]$
破碎机	1/5~1/20	切削机床	1/20~1/50	压缩机	1/50~1/100
冲、剪、锻床	1/7~1/10	汽车拖拉机	1/20~1/60	内燃机	1/80~1/150
农业机器	1/10~1/50	船用发动机	1/20~1/150	发电机	1/100~1/300

## 2、周期性速度波动的调节方法

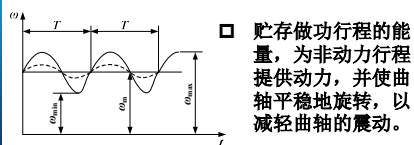
**思考：**如何调节机器周期性速度波动？



**调节方法：**在机器的转动构件上加转动惯量大的圆盘——飞轮。

驱动功 > 阻抗功 → 飞轮将多余能量储存起来，速度略增。

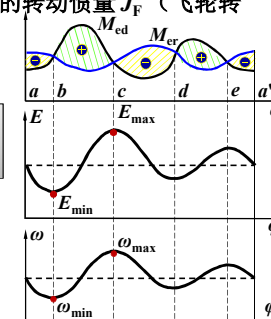
驱动功 < 阻抗功 → 飞轮将储存能量释放出来，速度略减。



## 3、飞轮设计的基本原理

**飞轮设计的基本问题：**根据机器主轴的平均角速度 $\omega_m$ 和许用不均匀系数 $[\delta]$ ，按功能原理确定飞轮的转动惯量 $J_F$ （飞轮转动惯量 $J_F \approx$ 机器转动惯量 $J$ ）。

**动能定理：**所有力（矩）所作的功等于动能的变化量。



盈亏功：

$$A = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} M_{cd}(\varphi) d\varphi - \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} M_{cr}(\varphi) d\varphi = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} [M_{cd}(\varphi) - M_{cr}(\varphi)] d\varphi = \Delta E$$

$b$ 处, 动能和角速度为:  $E_{\min}$ 、 $\omega_{\min}$ 。  
 $c$ 处, 动能和角速度为:  $E_{\max}$ 、 $\omega_{\max}$ 。  
 在一个周期内的 **$b$ - $c$** 区间处, 盈亏功和动能增量达到最大值:

$$A_{\max} = \Delta E_{\max} = E_{\max} - E_{\min} = J_F(\omega_{\max}^2 - \omega_{\min}^2)/2$$

$$\omega_m = \frac{\omega_{\max} + \omega_{\min}}{2} \quad \omega_{\max} = \omega_m(1 + \delta/2)$$

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_m} \quad \omega_{\min} = \omega_m(1 - \delta/2)$$

$$\omega_{\max}^2 - \omega_{\min}^2 = 2\delta\omega_m^2$$

$$A_{\max} = J_F\omega_m^2\delta$$

称 $A_{\max}$ 为**最大盈亏功**。

$A_{\max} = J_F\omega_m^2\delta \rightarrow J_F = A_{\max}/(\omega_m^2\delta)$

**分析:**

- 1) 当 $A_{\max}$ 与 $\omega_m$ 一定时,  $J_F$ - $\delta$ 为双曲线。  
 当 $\delta$ 很小时,  $\delta \downarrow \rightarrow J_F \uparrow \uparrow \rightarrow$  飞轮过于笨重。
- 2) 当 $J_F$ 与 $\omega_m$ 一定时,  $A_{\max}$ - $\delta$ 成正比。即 $A_{\max}$ 越大, 机器运转速度越不均匀。
- 3)  $J_F \neq \infty$ ,  $A_{\max}$ 和 $\omega_m$ 为有限值  $\rightarrow \delta$ 不可能为0  $\rightarrow$  即使安装飞轮, 机器总是有波动。
- 4)  $J_F$ 与 $\omega_m$ 的平方成反比  $\rightarrow$  平均转速越高, 所需飞轮的转动惯量越小  $\rightarrow$  最好将飞轮安装在高速轴上。
- 5)  $\delta \leq [\delta] \rightarrow J_F \geq A_{\max}/(\omega_m^2[\delta]) = 900A_{\max}/(\pi^2 n_m^2 [\delta])$

**$A_{\max}$ 的确定方法:**

$$A_{\max} = E_{\max} - E_{\min}$$

能量指示图法: 任意绘制一水平线, 并分割成对应的区间, 在一个运动循环内从左至右依次向下画线段表示亏功, 向上画线段表示盈功, **有向线段的长度与相应区间内驱动力矩 $M_{ed}$ 和阻力矩 $M_{er}$ 之间所包围的阴影面积相等**。

$A_{\max}$ 等于指示图中最低点到最高点之间的高度值。

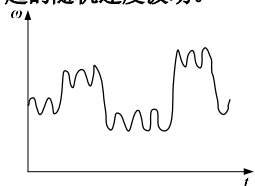
在柴油发电机组中, 设以柴油机曲轴为等效构件, 其等效驱动力矩 $M_{ed}$ 和等效阻力矩 $M_{er}$ 曲线如图所示。两曲线所围各面积代表的盈、亏功为:  $A_1 = -50\text{N}\cdot\text{m}$ 、 $A_2 = +550\text{N}\cdot\text{m}$ 、 $A_3 = -100\text{N}\cdot\text{m}$ 、 $A_4 = +125\text{N}\cdot\text{m}$ 、 $A_5 = -500\text{N}\cdot\text{m}$ 、 $A_6 = +25\text{N}\cdot\text{m}$ 、 $A_7 = -50\text{N}\cdot\text{m}$ ; 曲轴的转速为600r/min; 许用不均匀系数 $[\delta] = 1/300$ 。若飞轮装在曲轴上, 试确定飞轮的转动惯量 $J_F$ 。

$A_{\max} = (+550 - 100 + 125) \text{N}\cdot\text{m} = 575 \text{N}\cdot\text{m}$

$$J_F \geq \frac{900A_{\max}}{\pi^2 n^2 [\delta]} = \frac{900 \times 575}{\pi^2 \times 600^2 \times \frac{1}{300}} \text{kg}\cdot\text{m}^2 = 43.69 \text{kg}\cdot\text{m}^2$$

## 2、非周期性速度波动

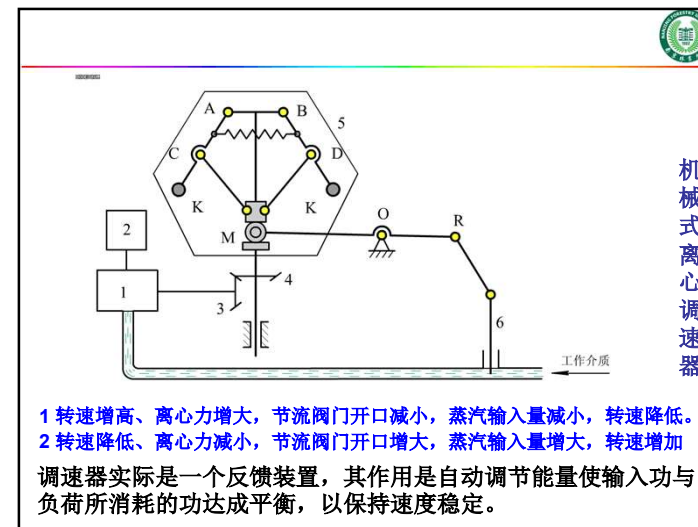
由于机器驱动力（矩）或者阻力（矩）突然发生不规则的较大变化而引起的随机速度波动。



**特点:** 盈亏功变化无规律，速度波动无规律，一段时间内可能总出现盈功或亏功。

**调节方法:** 调速器。

不能通过安装飞轮达到调节的目的：因为飞轮的作用只是吸收和释放能量，不能创造和消灭能量。



## 5.2 机械的平衡

### 一、机械平衡的目的和方法

- 机械在运转时，做**变速运动**的构件将产生**惯性力**；
- 即使是绕固定轴线做等速转动的构件，如果结构形状不对称、质量分布不均匀，使其**重心与回转中心不重合**，也将产生**惯性力**。

- ➡
- (1) 在运动副中产生附加动压力，增加运动副中的磨损。
  - (2) 产生有害的振动，影响工作质量，引起材料疲劳破坏。
  - (3) 降低机械效率。

□ 机械平衡的目的：研究**惯性力**分布及其变化规律，并采取相应的措施对惯性力进行平衡，从而全部或部分地消除不平衡惯性力的不良影响。

➤ 机械的平衡可分为：回转构件的平衡和非回转构件的平衡。

#### (1) 回转构件的平衡

刚性回转构件：回转构件转动时本身变形很小，可以忽略。

挠性回转构件：本身变形不可忽略。

**平衡方法：**将其质量的大小分布重新调整，使惯性力形成一平衡力系。

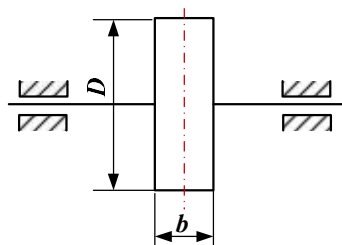
#### (2) 非回转构件的平衡

机械中包含有作往复运动或做平面运动构件，不能采用各个构件分别进行平衡的方法来解决。

➤ 仅研究**刚性回转构件**的平衡。

## 二、刚性回转构件的平衡设计

分类 { 静平衡 (宽径比  $b/D \leq 1/5$  的回转构件)  
动平衡 (宽径比  $b/D > 1/5$  的回转构件)



## 1. 静平衡

假定所有质量分布在中心平面内, 存在偏心质量  $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$ , 若: 各质量所产生的离心惯性力为:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 \neq 0$$

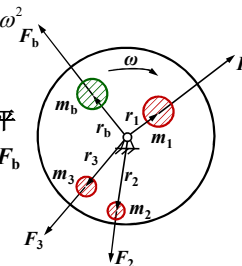
其中,  $F_1 = m_1 r_1 \omega^2$ ,  $F_2 = m_2 r_2 \omega^2$ ,  $F_3 = m_3 r_3 \omega^2$

——表明此回转构件为不平衡体。

为使其平衡, 需在此平面内增加一个平衡质量  $m_b$ , 该质量产生的离心惯性力为  $F_b$  满足:

$$\vec{F}_b + \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = 0$$

——回转构件达到静平衡 (单面平衡)。

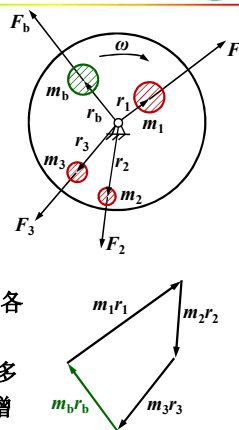


$$\begin{aligned} \vec{F}_b + \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 &= 0 \\ m_b \vec{r}_b \omega^2 + m_1 \vec{r}_1 \omega^2 + m_2 \vec{r}_2 \omega^2 + m_3 \vec{r}_3 \omega^2 &= 0 \\ m_b \vec{r}_b + m_1 \vec{r}_1 + m_2 \vec{r}_2 + m_3 \vec{r}_3 &= 0 \\ \text{质径积} \quad m_b \vec{r}_b &= ? \end{aligned}$$

可用图解法求解此矢量方程  
(选定比例  $\mu_w$ )

结论:

- ① 回转构件的静平衡条件: 回转构件上各个偏心质量的质径积的矢量和为零。
- ② 对于静不平衡的回转构件, 无论它有多少个偏心质量, 都只需要在同一平衡面内增加或除去一个平衡质量来获得平衡。



## □ 静平衡试验

理论上能做到完全平衡, 但实际上由于制造、装配误差、材料不均匀等, 无法完全平衡, 需辅以静平衡试验。

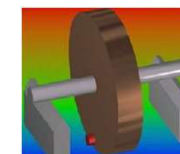
试验方法:

回转件架在导轨上自由滚动

质心处于最低位置

在质心相反方向加平衡质量  
直至回转件随遇平衡

获得质径积



导轨式平衡架



滚子式平衡架

## 2、动平衡（不同平面内质量的平衡问题）

当轴的偏心质量不在同一回转平面内，但质心在回转轴上，在任意静止位置，都处于平衡状态。

运动时有：

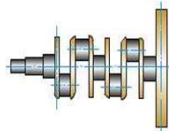
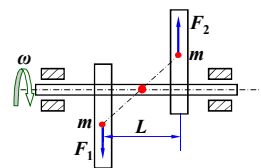
$$\text{惯性力: } \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = 0$$

$$\text{惯性力偶矩: } M = F_1 L = F_2 L \neq 0$$

◆ 轴向尺寸较大( $b/D > 1/5$ )的转子

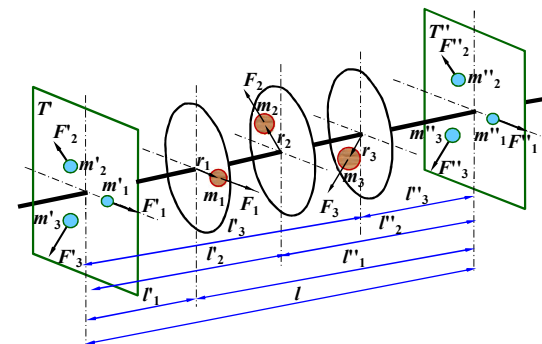
这种在静止状态下处于平衡，而运动状态下呈现不平衡，称为**动不平衡**。对此类转子的平衡，称为**动平衡**。

$$\text{动平衡条件: } \begin{cases} \sum \vec{F}_i = 0 \\ \sum \vec{M}_i = 0 \end{cases}$$

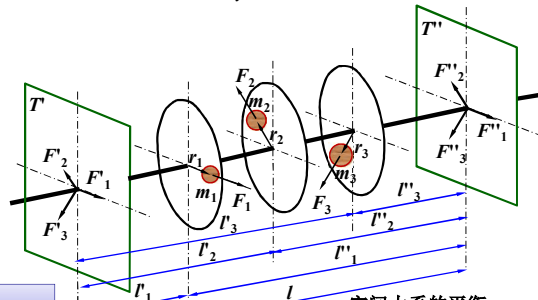


## ◆ 动平衡方法：

- (1) 在回转构件上选定两个回转平面  $T$  和  $T'$  作为平衡基面，该平面用来加装或去掉平衡质量。
- (2) 将不同回转面内的不平衡质量往平面  $T$  和  $T'$  上分解。



$$\begin{cases} F'_1 + F''_1 = F_1 \\ F'_1 l'_1 - F''_1 l''_1 = 0 \\ l'_1 + l''_1 = l_1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} F'_1 = \frac{l''_1}{l_1} F_1 \\ F''_1 = \frac{l'_1}{l_1} F_1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} m'_1 = \frac{l''_1}{l_1} m_1 \\ m''_1 = \frac{l'_1}{l_1} m_1 \end{cases}$$

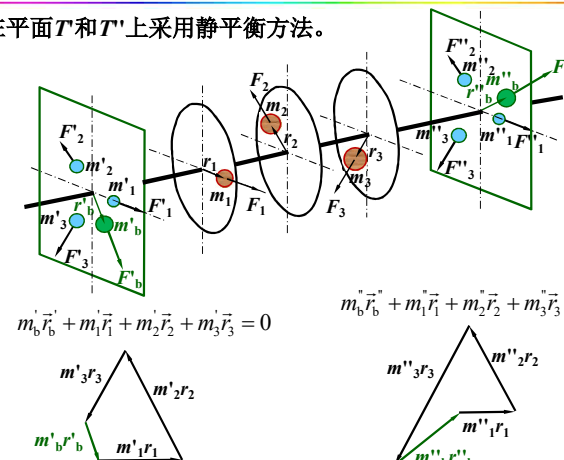


同理可分解  $m_2, m_3$

空间力系的平衡

⇒ 两个平面汇交力系的平衡问题

在平面  $T$  和  $T'$  上采用静平衡方法。



**总结：**

- ① **动平衡的实质**：不仅要求回转构件在运动时各偏心质量所产生的惯性力之和为零，而且还要求这些惯性力所形成的惯性力矩之和也等于零。
- ② 对于动不平衡的回转构件，不论它有多少个偏心质量，以及分布在多少个回转平面内，都只需在选定的两个平衡基面内增加或除去一个适当的平衡质量，就可以使构件获得动平衡——**双面平衡**。
- ③ 动平衡同时满足静平衡的条件：经过动平衡的回转构件一定满足静平衡；反之，经过静平衡的回转构件不一定满足动平衡。



**作业：**