

哈爾濱工業大學



Harbin Institute of Technology

# 第十一章 机械的平衡

**徐鹏**

**哈尔滨工业大学（深圳）**

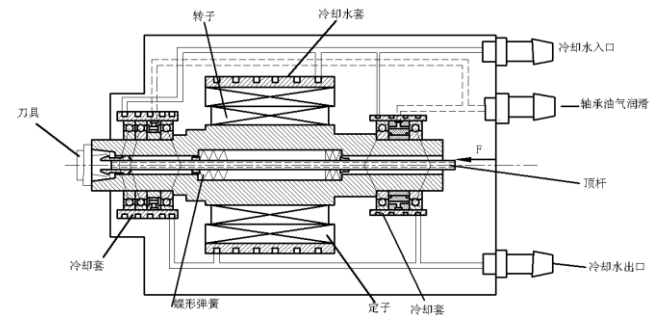
# 本章主要内容

1. 刚性转子的静平衡（掌握）
2. 刚性转子的动平衡（**熟练掌握**）
3. 机构的平衡（了解）

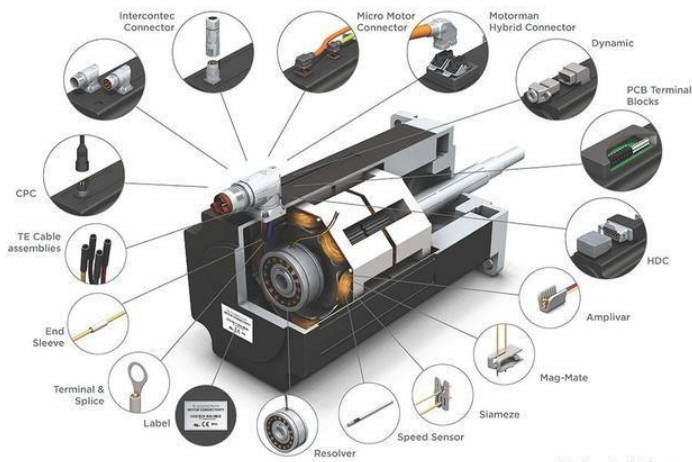
# 工业上常见的需要做动平衡的部件



轮胎的动平衡

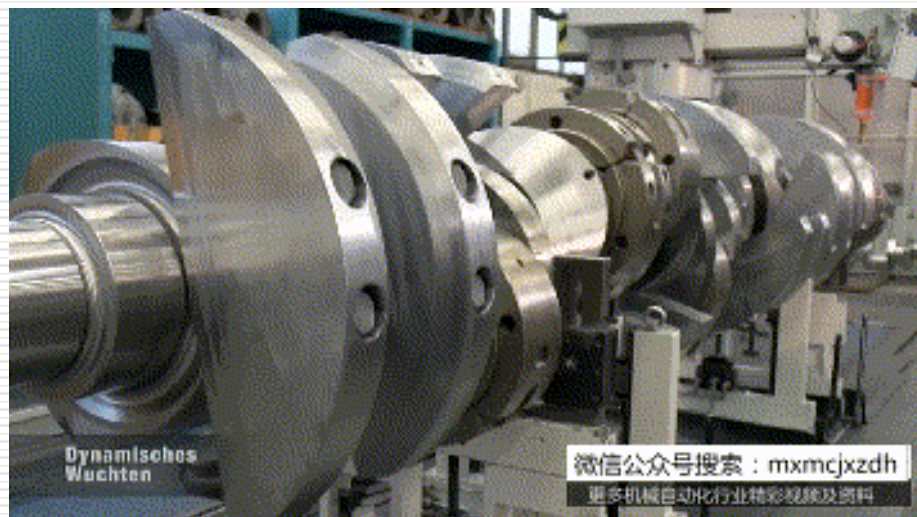


主轴



电机

## 船用曲轴的动平衡



平衡机的屏幕上显示所需平衡孔的角度位置、直径和深度。平衡孔可直接在平衡设备上制作。



汽车用曲轴

## 知识回顾:

质量中心（质心）公式:

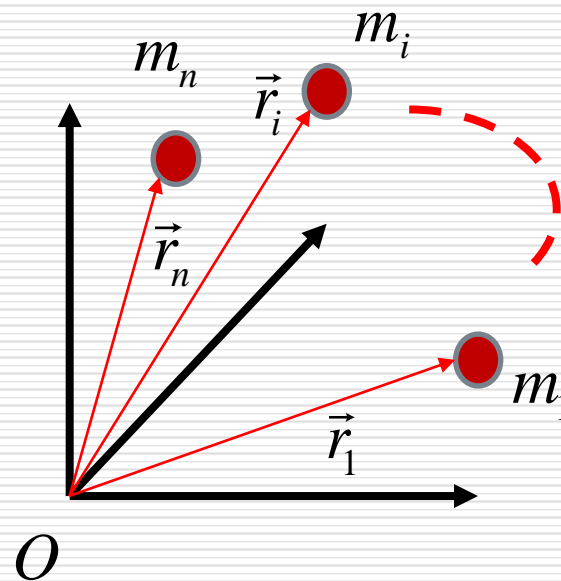
设质点系由 $n$ 个质点组成，则有

$$\vec{r}_c = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \vec{r}_i}{M}$$

式中

$$M = \sum_{i=1}^n m_i$$

$m_i \vec{r}_i$  —— 质量矢量积。

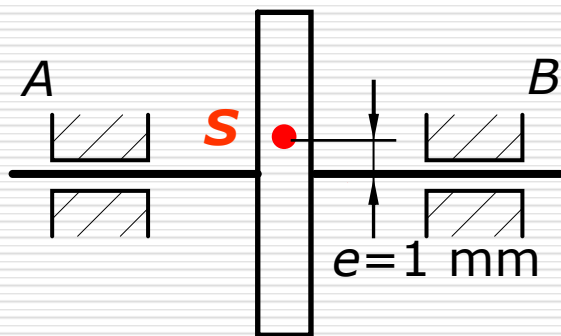


# 11-1 概述

## 一、机械平衡的目的

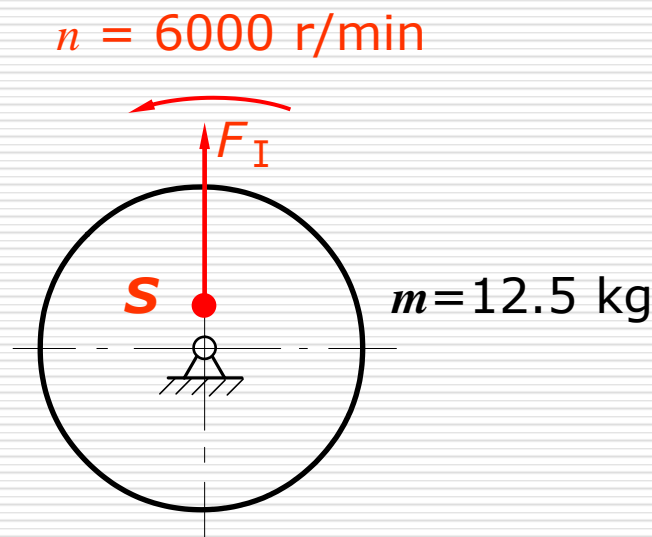
机械在运转时，构件所生产的不平衡惯性力将在运动副中引起附加的动压力。

例 磨削工件的砂轮



$$F_I = me\omega^2 = 5000 \text{ N}$$

$F_I$ 在转动副中引起的附加动压力是砂轮自重的40倍。



其方向作周期性变化

## 不平衡的危害

机械在运转过程中，构件上的**大小方向始终变化的不平衡惯性力**将对机构中的运动副产生附加动压力，其不良后果：

- 增加运动副的摩擦和磨损，降低机械的使用寿命
- 产生有害的振动，使机械的工作性能恶化
- 降低机械效率

**平衡问题在高速、重型及精密机械中尤为突出**

## 二、平衡内容及分类

### 1. 转子的平衡 (回转体)

刚性转子的平衡  
( $n < 0.7 n_c$ )

静平衡(static balance of rotor)

动平衡(dynamic balance of rotor)

(惯性力作用产生的变形可忽略)

挠性转子(flexible rotor)的平衡

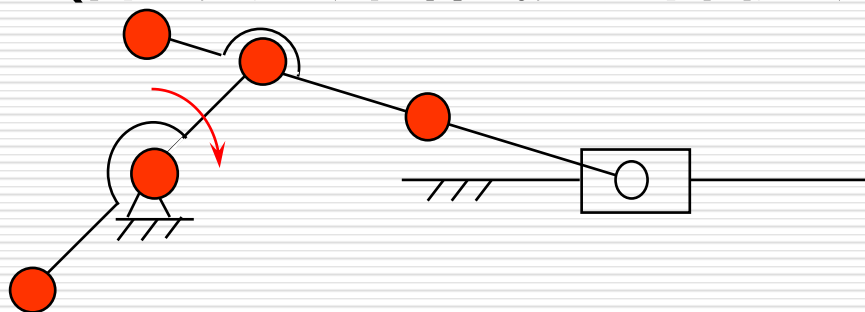
( $n > 0.7 n_c$ )

(惯性力作用会产生明显的变形)

### 2. 机构的平衡(balance of mechanism)

—— 临界转速

(含往复运动构件或复杂平面运动构件)



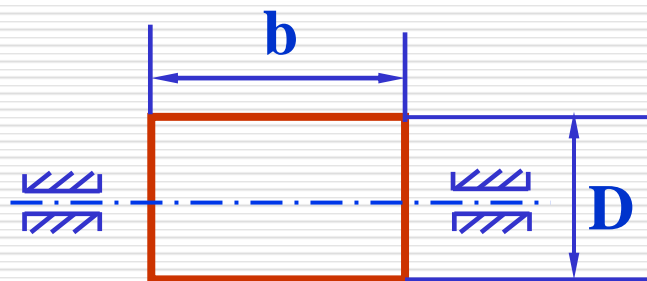
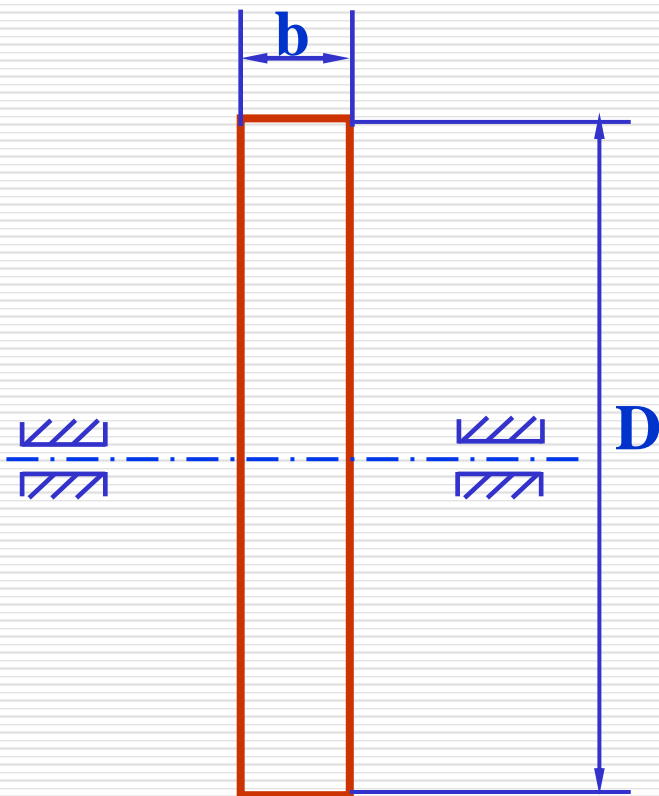
机座上的平衡



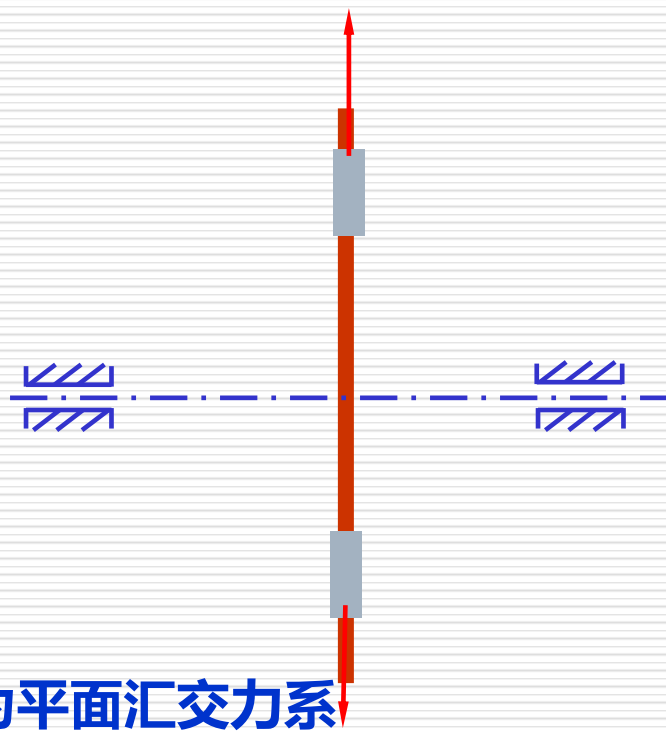
## 11-2 刚性转子的静平衡及动平衡

刚性转子的平衡

- 静平衡 (单面平衡)  $\frac{b}{D} < 0.2$
- 动平衡 (双面平衡)  $\frac{b}{D} \geq 0.2$

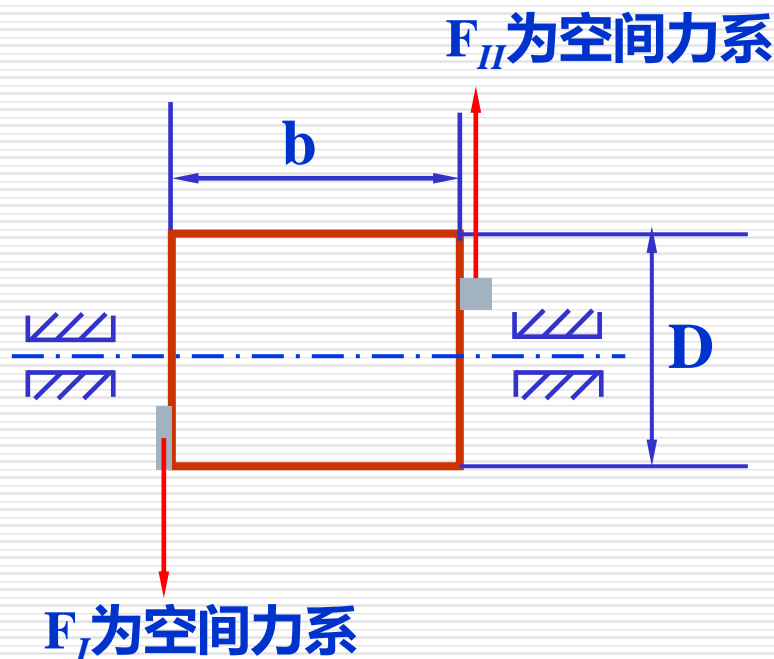


典型零件：齿轮、盘形凸轮等。



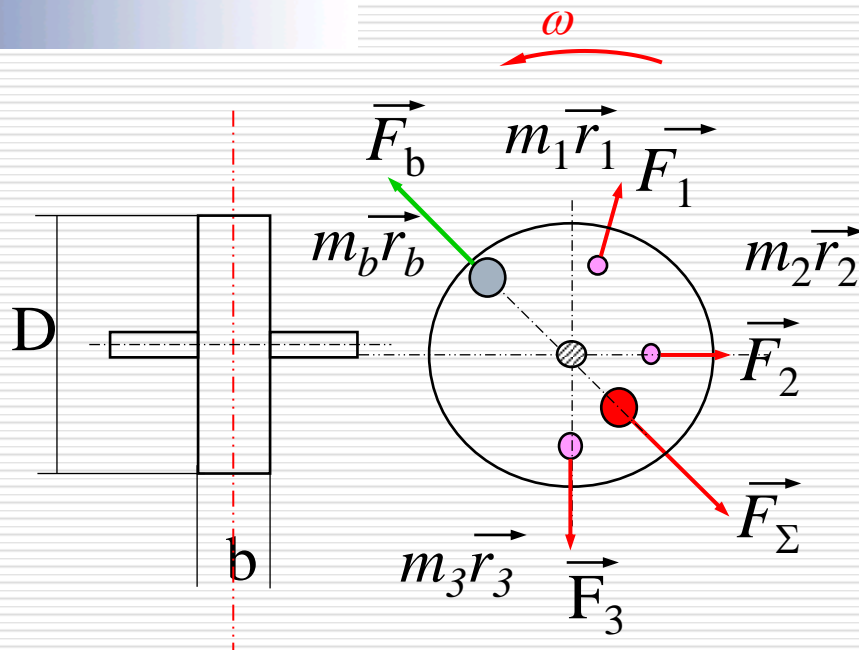
平衡措施：使总惯性力为零

典型零件：内燃机曲轴、电机转子、机床主轴和航空发动机转子等。



平衡措施：使总惯性力和总惯性力矩为零

### 静平衡原理



$$\vec{\Sigma F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = m_1 \omega^2 \vec{r}_1 + m_2 \omega^2 \vec{r}_2 + m_3 \omega^2 \vec{r}_3$$

加入  $m_b \vec{r}_b$  , 使  $\vec{\Sigma F} + \vec{F}_b = 0$

$$\text{即: } m_1 \omega^2 \vec{r}_1 + m_2 \omega^2 \vec{r}_2 + m_3 \omega^2 \vec{r}_3 + m_b \omega^2 \vec{r}_b = 0$$

$$\text{或: } m_1 \vec{r}_1 + m_2 \vec{r}_2 + m_3 \vec{r}_3 + m_b \vec{r}_b = 0$$

## 图解法

按:  $m_1 \vec{r}_1 + m_2 \vec{r}_2 + m_3 \vec{r}_3 + m_b \vec{r}_b = 0$

方向	√	√	√	?
大小	√	√	√	?

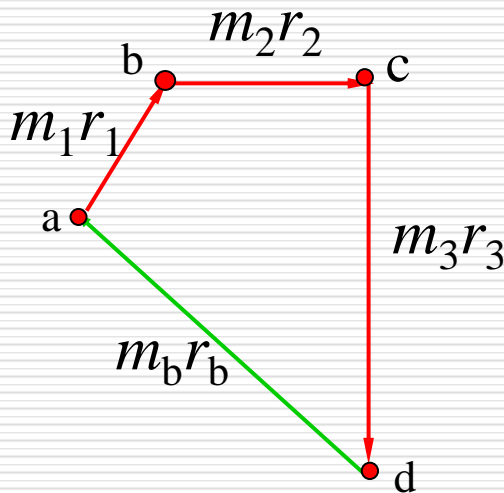
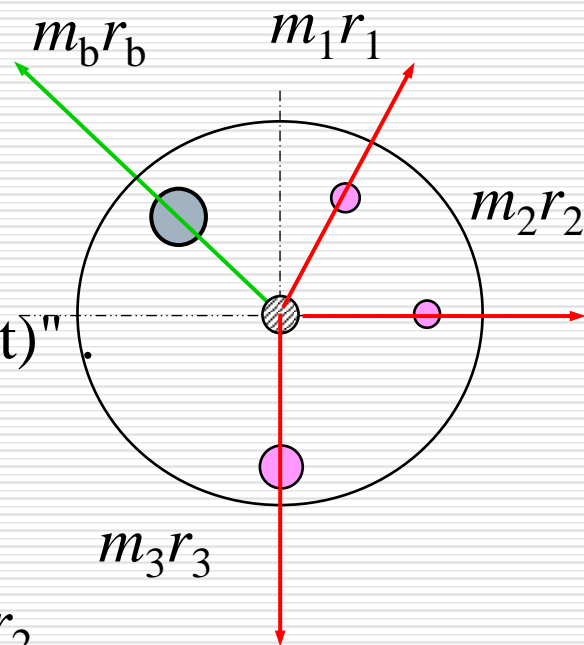
$\vec{m r} = W$  称“质径积 (mass-radius product)”.

以  $\mu_W = \dots \frac{\text{kgmm}}{\text{mm}}$

作质径积矢量多边形.

得:  $m_b r_b = \mu_W \overline{da} = \dots$

$m_b = ?$  ,  $r_b = ?$



## 解析法

$$\begin{aligned} m_b \vec{r}_b &= -(m_1 \vec{r}_1 + m_2 \vec{r}_2 + m_3 \vec{r}_3) \\ &= -\sum m_i \vec{r}_i \end{aligned}$$

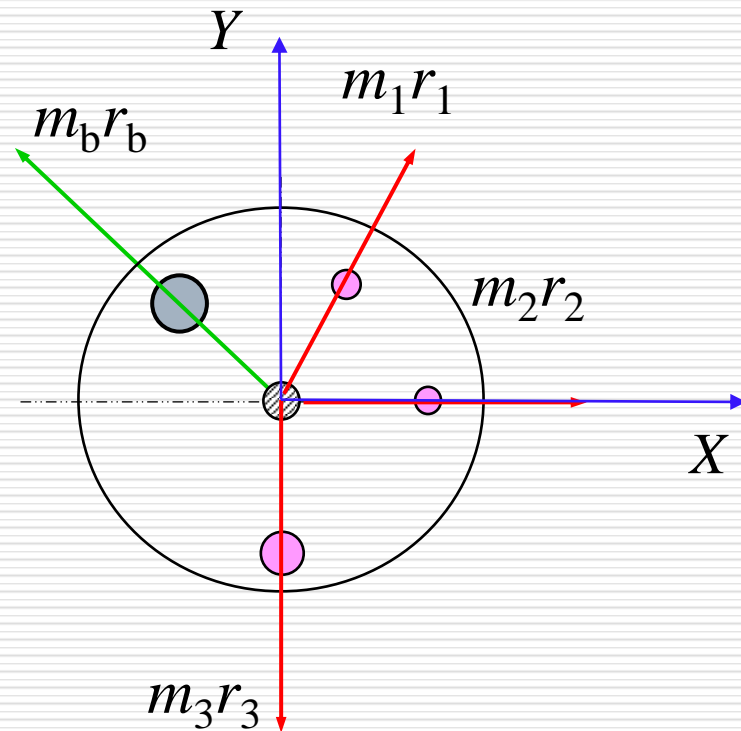
分别在X, Y轴投影

$$m_b r_b \cos \alpha_b = -\sum m_i r_i \cos \alpha_i = A$$

$$m_b r_b \sin \alpha_b = -\sum m_i r_i \sin \alpha_i = B$$

则

$$\begin{aligned} m_b r_b &= \sqrt{A^2 + B^2} \\ \alpha_b &= \text{atan}(B, A) \end{aligned}$$



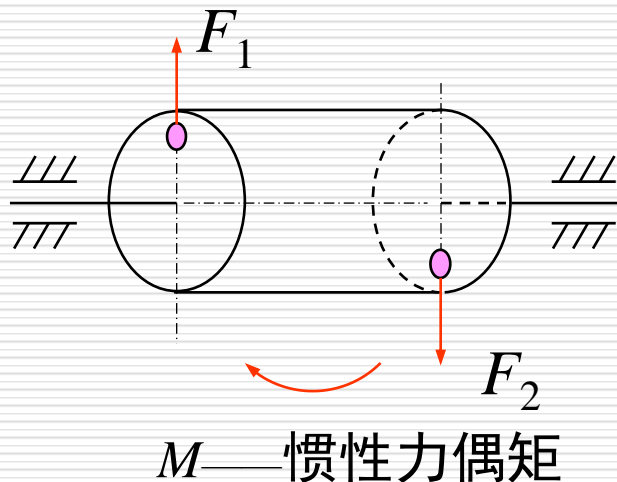
增重还是  
减重？

# 刚性转子动平衡

## 一. 动不平衡

$$\frac{b}{D} > 0.2$$

质量分布于多个平面内，除受离心惯性力的影响外，尚受离心惯性力偶矩（颠覆力矩）的影响。



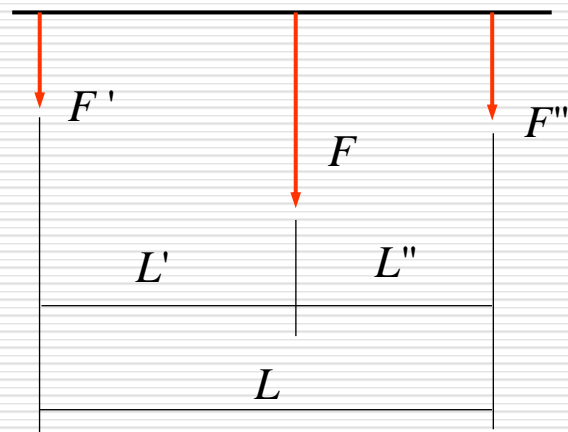
## 二. 动平衡原理

### 1. 力的等效原理 (力的分解原理)

$$F' + F'' = F$$

$$F' = F \frac{L''}{L}$$

$$F'' = F \frac{L'}{L}$$



作用于构件上某点的力  $F$ ，可向构件上任意另两点分解。

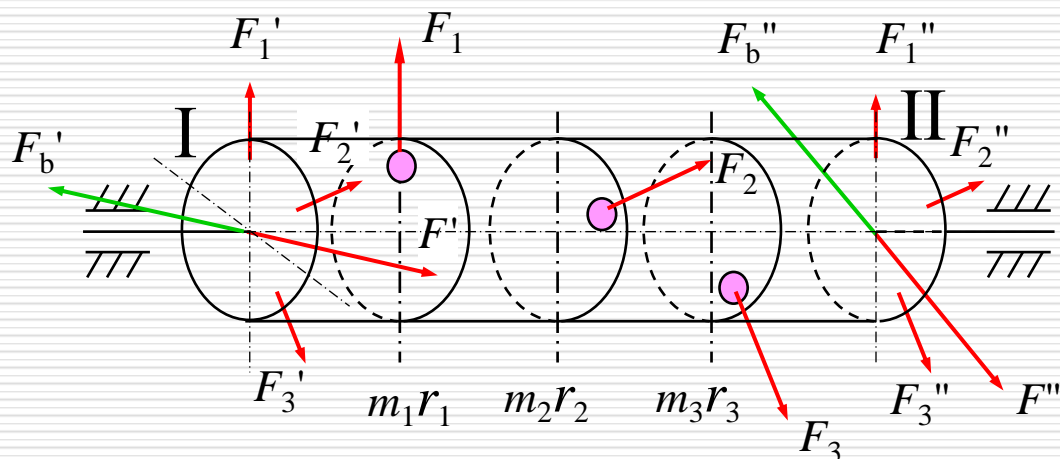
## 动平衡原理

$$F' = m' r'$$

$$F'' = m'' r''$$

$$F_b' = m_b' r_b'$$

$$F_b'' = m_b'' r_b''$$



不论转子有多少个截面，有多少个不平衡质量的作用。可以选定两个平衡基面 I 和 II 作为安装平衡质量的平面。

将各离心惯性力分解到两个平面，空间力系平衡问题转化为两个平面上汇交力系平衡问题。在两平面内适当地各加一个平衡质量，两平面内的惯性力之和均为零，转子完全平衡。

动平衡需要两个平衡面。

动平衡的转子,必定是静平衡的。但其逆未必真。

静平衡条件:  $\sum \vec{F} = 0$

动平衡条件:  $\sum \vec{F} = 0$   
 $\sum \vec{M} = 0$

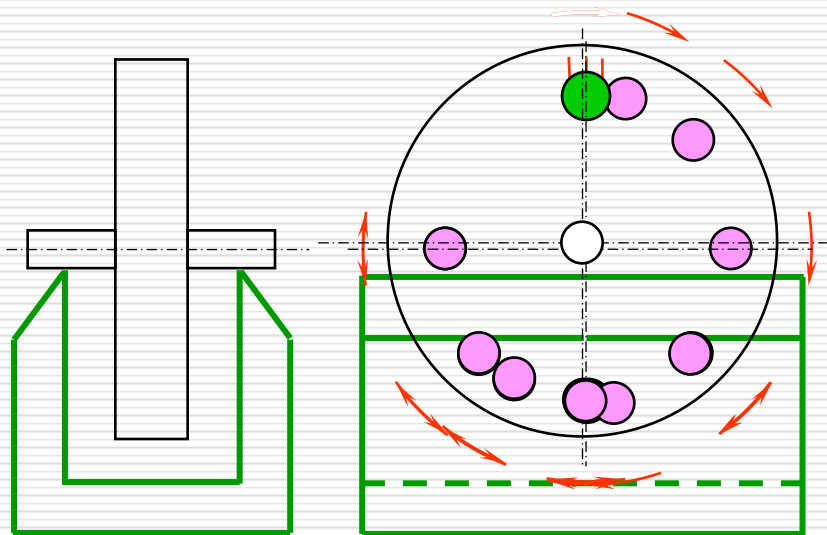
【例题1】 双凸轮轴的动平衡

【例题2】 印刷机凸轮轴的动平衡

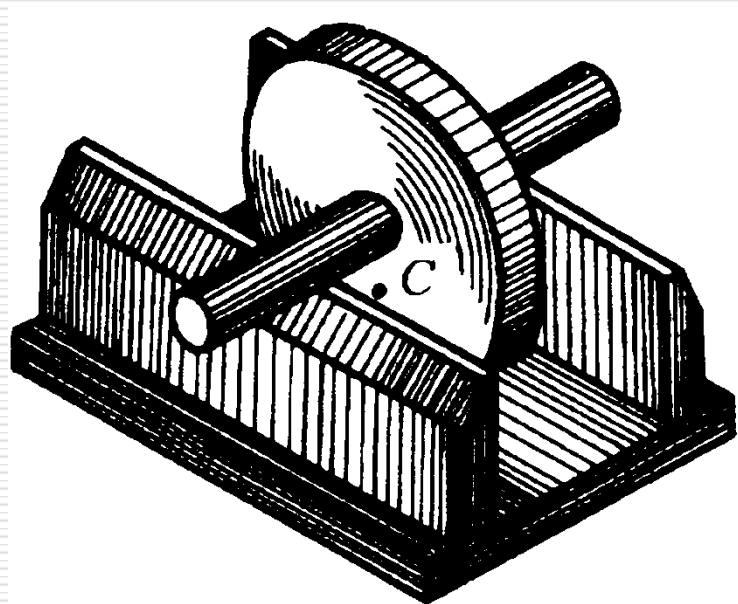


# 11-3 刚性转子的平衡实验

## 一、静平衡实验



随遇平衡



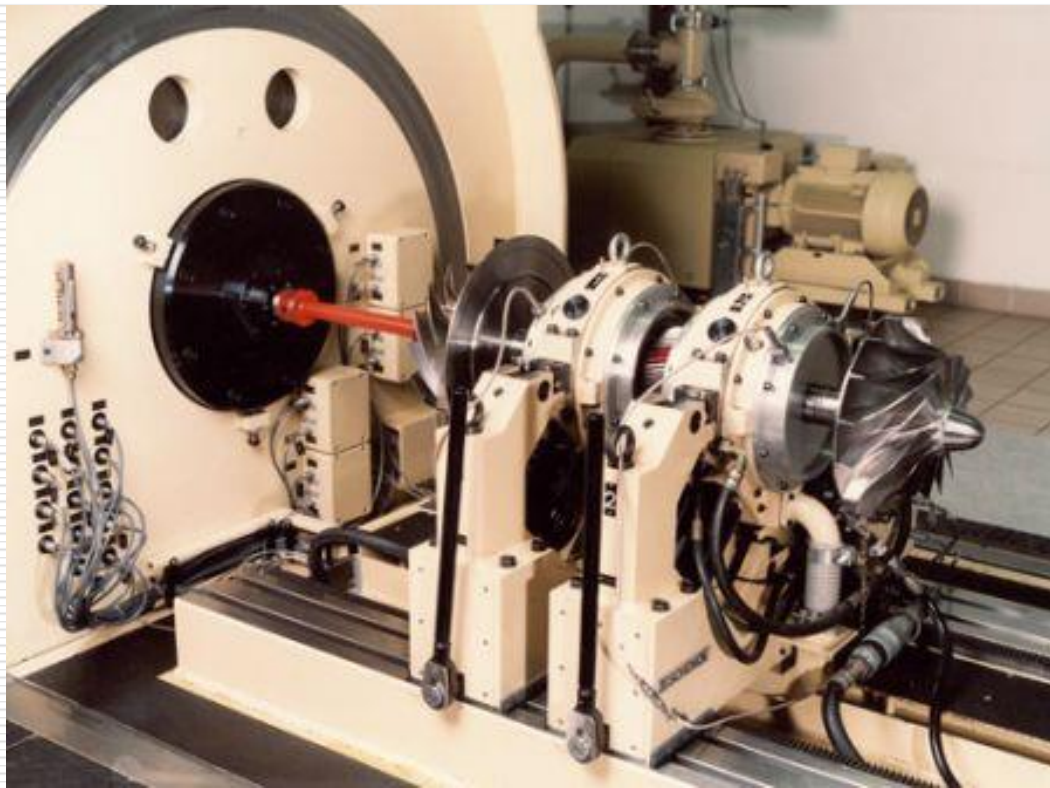
刀口试验台

静平衡：

消除离心惯性力的影响。只需要一个平衡面。

## 二、刚性转子的动平衡实验

### 动平衡机的工作原理



高速平衡机和超转测试系统

balancing-machine,  
Schenck, Germany.

## 11-5 平面机构的平衡简介

机构平衡的条件(总惯性力和惯性力矩)：

$$\sum \vec{F} = 0$$

$$\sum \vec{M} = 0$$

**平衡方法：**设计机构时，通过其构件的合理布置，**加平衡质量或加平衡机构**等方法来使机构的惯性力得到完全或部分地平衡。

**机构的质心静止不动。**

## 一、完全平衡

### 1、利用机构对称平衡 (1)

### 2、利用平衡质量平衡

铰链四杆机构 (2)

曲柄滑块机构 (3)

## 二、部分平衡

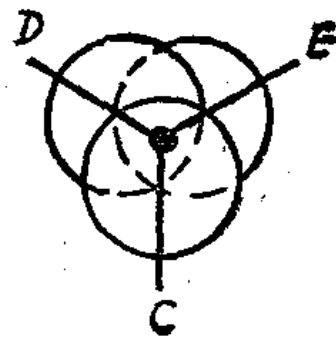
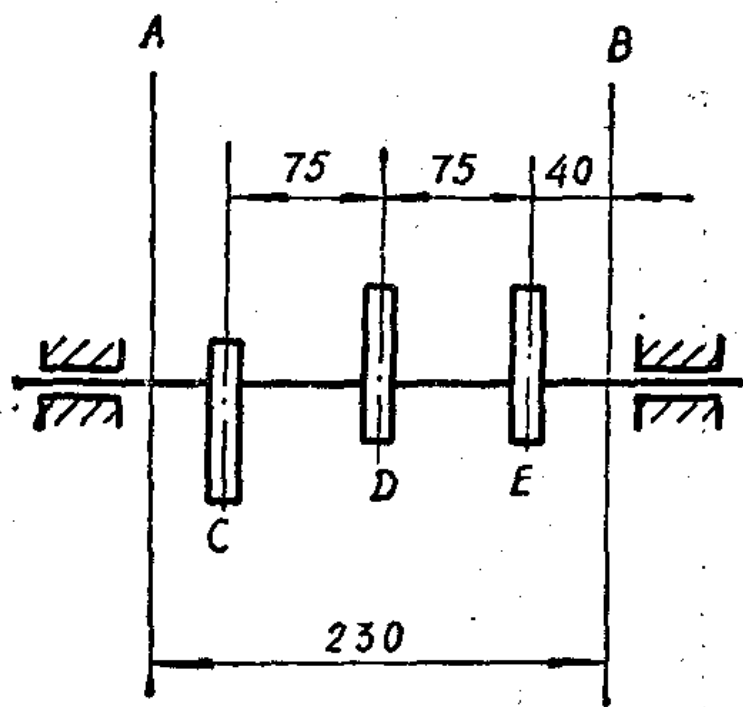
### 1、利用非完全对称机构（曲柄滑块）平衡 (4)

利用非完全对称机构（铰链四杆）平衡 (5)

### 2、利用平衡质量平衡 (6)

### 3、利用弹簧平衡 (7)

**【例题3】** 高速水泵的凸轮轴系由三个相互错开120度的偏心轮所组成，每一个偏心轮的质量为0.4kg，其偏心距为12.7mm，设在平衡面A和B中各装一个平衡质量 $Q_A$ 和 $Q_B$ 使之平衡，其回转半径为10mm，其他尺寸如图所示。求所加平衡质量 $Q_A$ 和 $Q_B$ 的大小和位置。











谢谢！