

# 第13章 机械的平衡与调速

13.1 回转件的平衡

13.2 机器速度波动的调节

习题



平衡与调速是两个不同的力学问题，在机械设计中，尤其是高速机械和精密的设计，必须加以考虑，本章主要介绍刚性回转件的平衡方法以及相关概念和机械速度波动调节的基本原理。❖

## 13.1 回转件的平衡

回转件，由于制造和安装的误差、材料的不均匀性等因素，其质心相对转轴往往存在一定偏心，这使其在工作中会产生惯性力和惯性力偶矩，惯性力和惯性力偶矩必将在运动副中产生附加的动压力，从而增大构件中的内应力和运动副中的摩擦，加剧运动副的磨损，降低机械效率和使用寿命，甚至导致共振，对机器造成破坏。如何消除回转件所产生的惯性力和惯性力偶矩，是对回转件平衡的目的。 

平衡刚性回转件的方法基础是理论力学中力系的平衡原理。回转件可根据需要，进行只消除惯性力的平衡和对惯性力以及惯性力偶矩都进行消除的平衡，前者称为静平衡，后者称为动平衡。

## 13.1.1 静平衡

### 1. 静平衡原理

实际回转件的质量不会都集中在一个平面内，但是当回转件轴向尺寸较小(直径宽度比 $D/b > 5$ )，且转速较低时，回转件的质量可视为分布在同一平面内。这种回转件在工作中如果存在质量偏心，会产生惯性力，但是离心惯性力所产生的惯性力偶矩近似为零，而这种不平衡现象在回转件静态时即可表现出来，因此称为静不平衡。对于这类回转件，只需要消除因质量偏心而产生的离心惯性力，即可认为达到了平衡。其平衡方法是通过增加或除去回转件部分质量，调整质量分布，使回转件质心位于回转轴线上，从而达到对惯性力的平衡。 

如图13-1(a)所示，已知盘形不平衡转子其偏心质量分别为 $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$ ，向径分别为 $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ ，所产生的惯性力分别为 $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ ，则合力 $F$ 为

$$F = F_1 + F_2 + F_3 = \sum_{i=1}^3 m_i r_i \omega^2 \quad (13-1)$$

根据平面力系平衡的原理，所需加的平衡质量 $m_b$ 及其向径 $r_b$ 必须使平衡质量产生的惯性力 $F_b$ 与 $F$ 平衡，即

$$F + F_b = \sum_{i=1}^3 m_i r_i \omega^2 + m_b r_b \omega^2 = 0 \quad (13-2)$$

消去公因子得：

$$\sum_{i=1}^3 m_i r_i + m_b r_b = 0 \quad (13-3)$$

这里，将质量 $m$ 与向径 $r$ 的乘积称为质径积。取定一定的比例尺，作质径积的封闭矢量多边形，如图13-1(b)所示，即可得到所需平衡质量的质径积大小和方向。若选定向径的大小，便可求出应加的平衡质量 $m_b$ 。通常为了减少平衡质量，平衡质量的向径 $r_b$ 应尽可能选大一些。另外，在 $r_b$ 的负方向上按 $m_b r_b$ 减去相应质量的材料，同样可以达到平衡目的。  

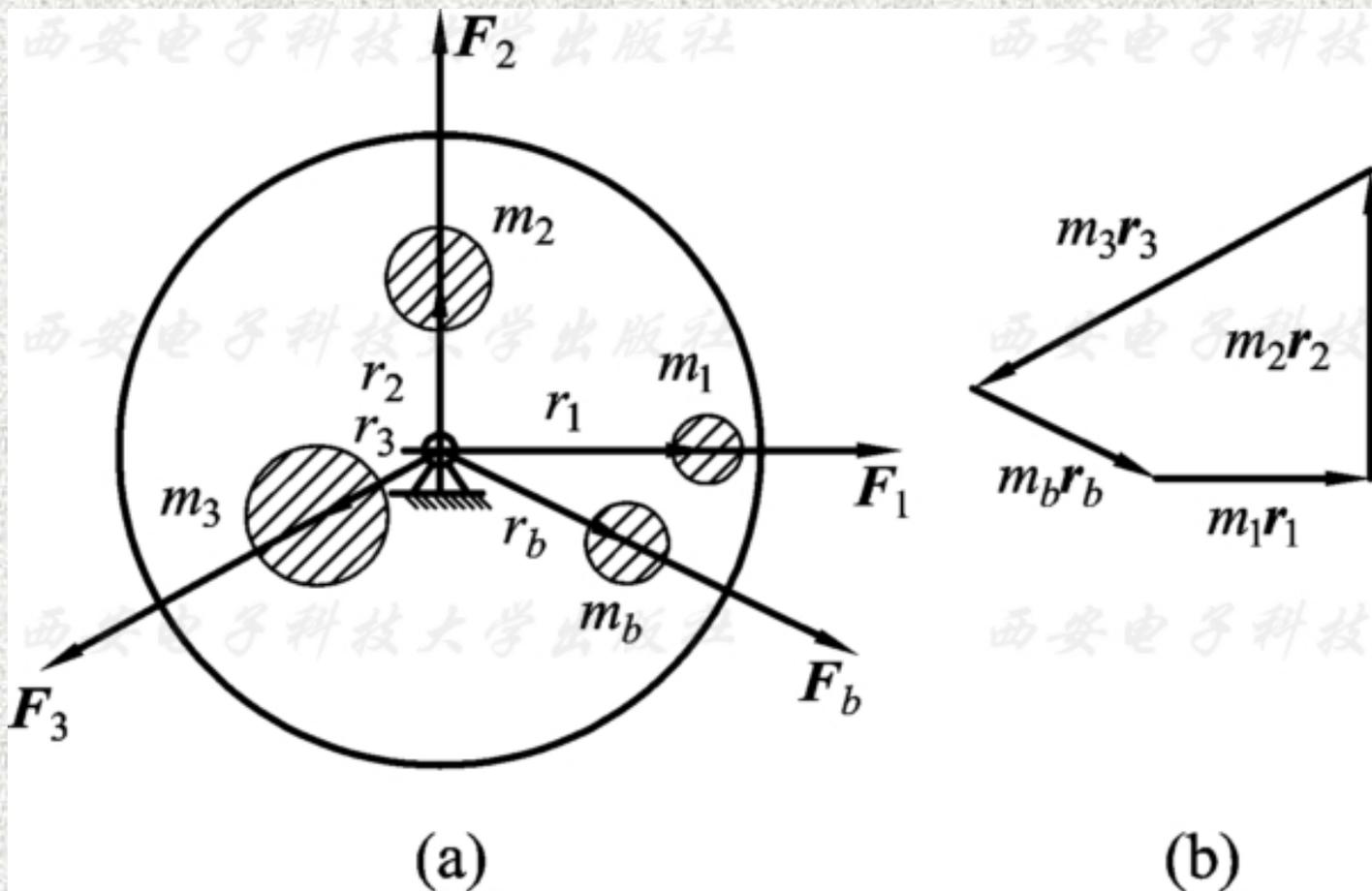


图13-1 回转件的静平衡

通过以上分析，可以得到以下结论：❖

(1)静平衡的条件为：分布于回转件上的各个偏心质量的离心惯性力合力为零或质径积的矢量和为零。❖

(2)对于静不平衡的回转件，不论它有多少个不平衡质量，都可在同一平衡面内增加或除去一个平衡质量来获得平衡，因此回转件的静平衡也称为单面平衡。❖

有时由于实际结构的限制，不能在偏心质量所在的平面内增加或减少平衡质量，则可选择两个校正平面 $T$ 和 $T'$ ，分别在 $T$ 和 $T'$ 面内增加平衡质量，使转子达到平衡，如图13-2所示的曲轴，将平衡质量增加在两平面下部以达到静平衡。

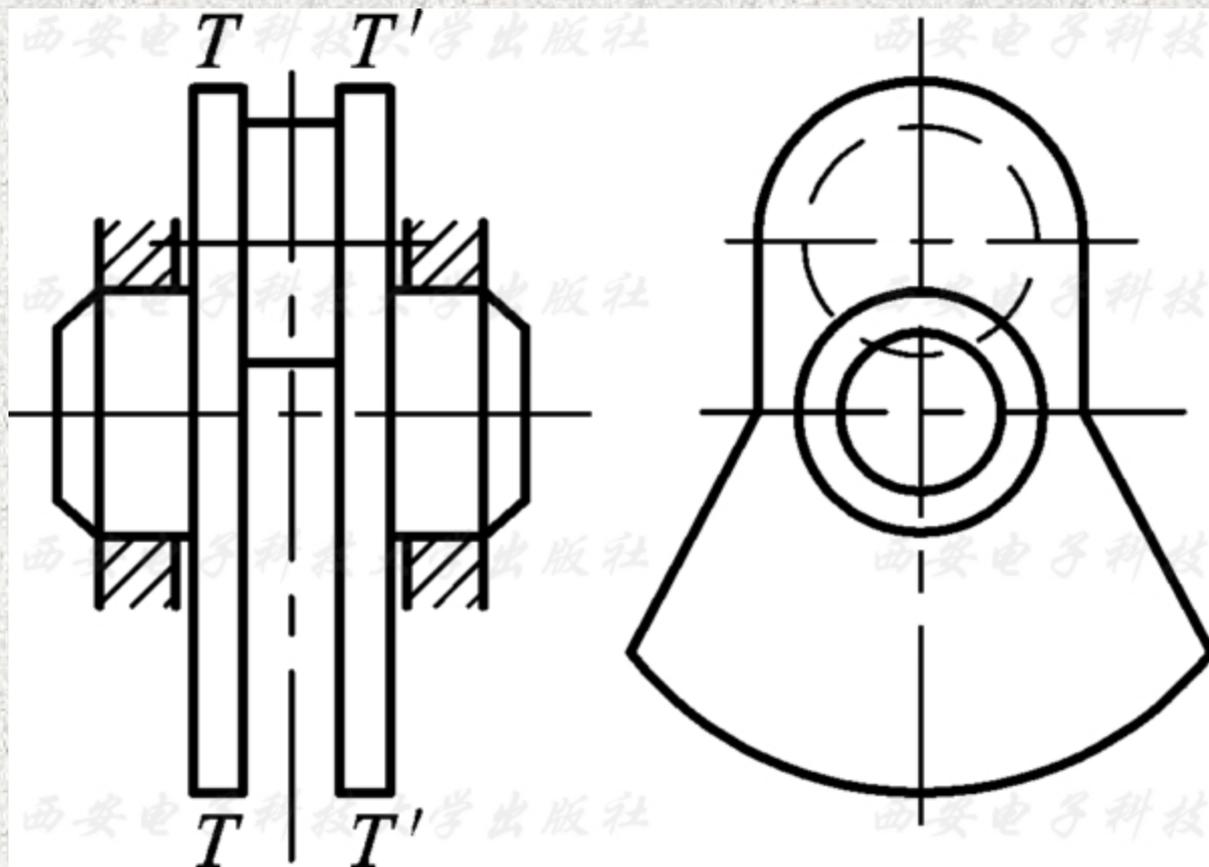


图13-2 曲轴的静平衡

## 2. 静平衡试验

按上述方法，回转件从理论上可以达到静平衡，但是由于制造的误差、材料的不均匀性等因素，实际上总是存在一些不平衡，对于重要的回转件，仍然需要通过试验的方法加以平衡。

如图13-3(a)所示为刀口式静平衡试验装置。试验时将需平衡的回转件的轴安放在两条水平平行的刀口导轨上，如果回转件的重心不在转轴轴线上，则重心有向最低位置移动的趋势，所以只要轻轻转动回转件，使其在导轨上滚动，当回转件停止运动时，其质心必然位于回转轴线的正下方。试验时，当确定出质心偏心方向后，在其反方向上选定某一位置，试加平衡质量，再次试验，通过不断调整这个质量的大小或者偏心距，

直到该回转件能在任意位置保持静止不动，然后记下所添加的平衡质量及其质径积，并在同一方位上以相等质径积的金属焊接到回转件上，或者在其反方向上减去等质径积的材料，便可达到回转件的平衡。

由于结构限制，刀口式静平衡试验装置有两个缺点，一是安装调整要求较高，二是不能用于对两边轴径不相等的回转件进行静平衡。🔥

如图13-3(b)所示的是圆盘式静平衡架，其功能和使用方法与刀口式静平衡试验装置相同，只是其一端的支承上下位置可调，这样便可用于对两边轴径不相等的回转件进行静平衡。这种平衡装置调节简单，但是摩擦面间的总压力较刀口式静平衡试验装置大，当轴承弄脏后，摩擦阻力会增加，对精度有一定的影响。🔥

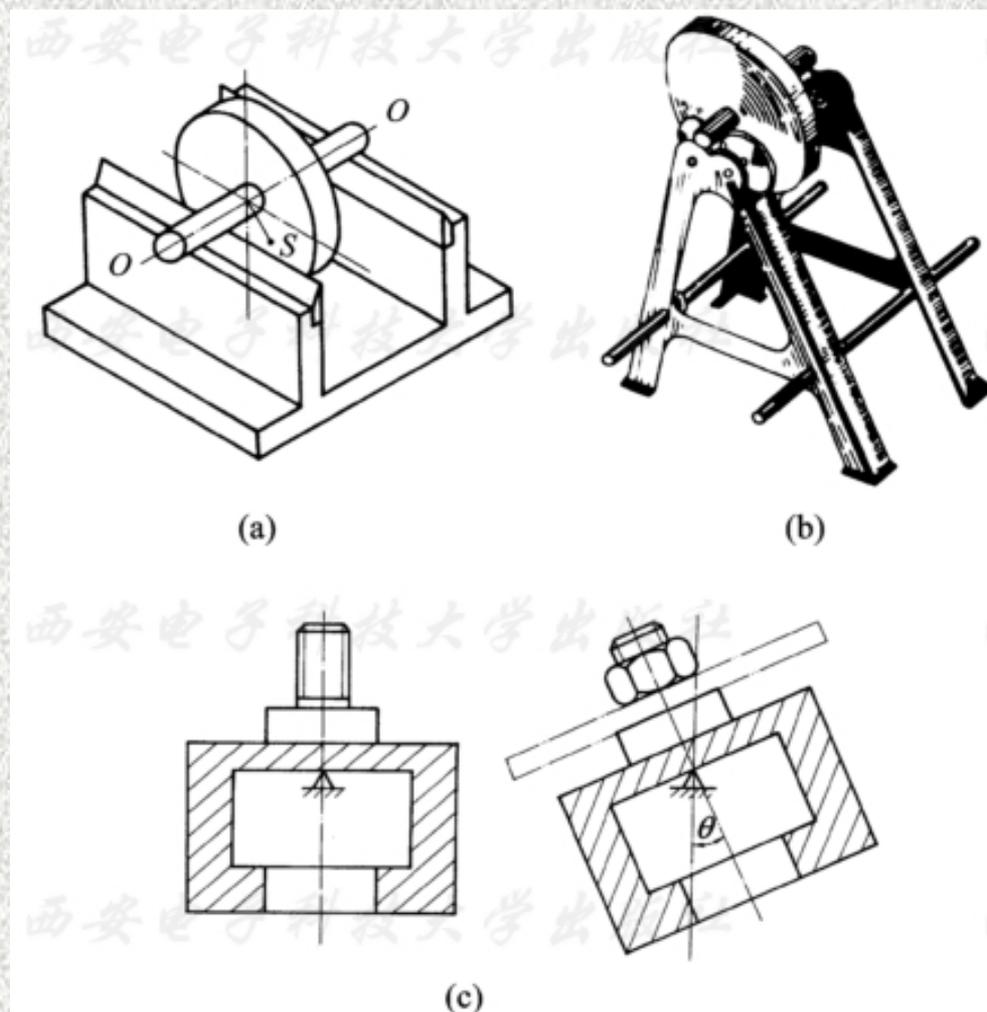


图13-3 常用平衡装置

为了在工程中能够更直接、高效地对回转件进行静平衡，常希望能直接地获得偏心方位和偏心质径积的大小，如图13-3(c)所示为满足这一要求的设备的原理图，其实质是一个可朝任何方向倾斜的单摆。当将不平衡的回转件安装到该平衡机的台架上后，其就会倾斜，倾斜的方向即显示出不平衡质量的方位，而摆角的大小可以显示出不平衡质径积的大小，由此，便可以确定所应添加的平衡质量的大小和位置。

## 13.1.2 动平衡

### 1. 动平衡原理

对于轴向尺寸较大的回转件(直径宽度比 $D/b \leq 5$ ), 如内燃机曲轴、机床主轴等, 其质量不能再简单地被认为分布在同一个平面内, 此时, 回转件转动, 其上的不平衡质量所产生的惯性力就不再是一个平面力系, 而是一个空间力系, 对机架不仅会产生力的作用, 同时还会产生力矩的作用, 即使回转件的质心在回转轴上, 由于各离心惯性力不在同一回转平面内, 所形成惯性力偶矩仍使转子处于不平衡状态。

如图13-4所示的回转件, 虽然其质心处于回转轴上, 但是由于偏心质量 $m_1$ 、 $m_2$ 所产生的惯性力不在同一平面内, 因此形成了惯性力偶矩, 此力偶矩的作用是随回转件转动而变

化的，因此也会引起机械设备的振动，所以此回转件仍然是不平衡的，由于这种不平衡只有在回转件转动时才能表现出来，因此称为动不平衡。对动不平衡的回转件进行平衡就要求同时消除不平衡质量产生的惯性力和惯性力偶矩，即

$$\Sigma F_i = 0 \quad \Sigma M_i = 0$$

对回转件进行动平衡，不能只在某一个选定平面内通过添加平衡质量来达到，通常的方法是在两个选定平面内分别添加适当的平衡质量，以消除回转件在转动过程中所产生的惯性力和惯性力偶矩。此方法的原理如下。

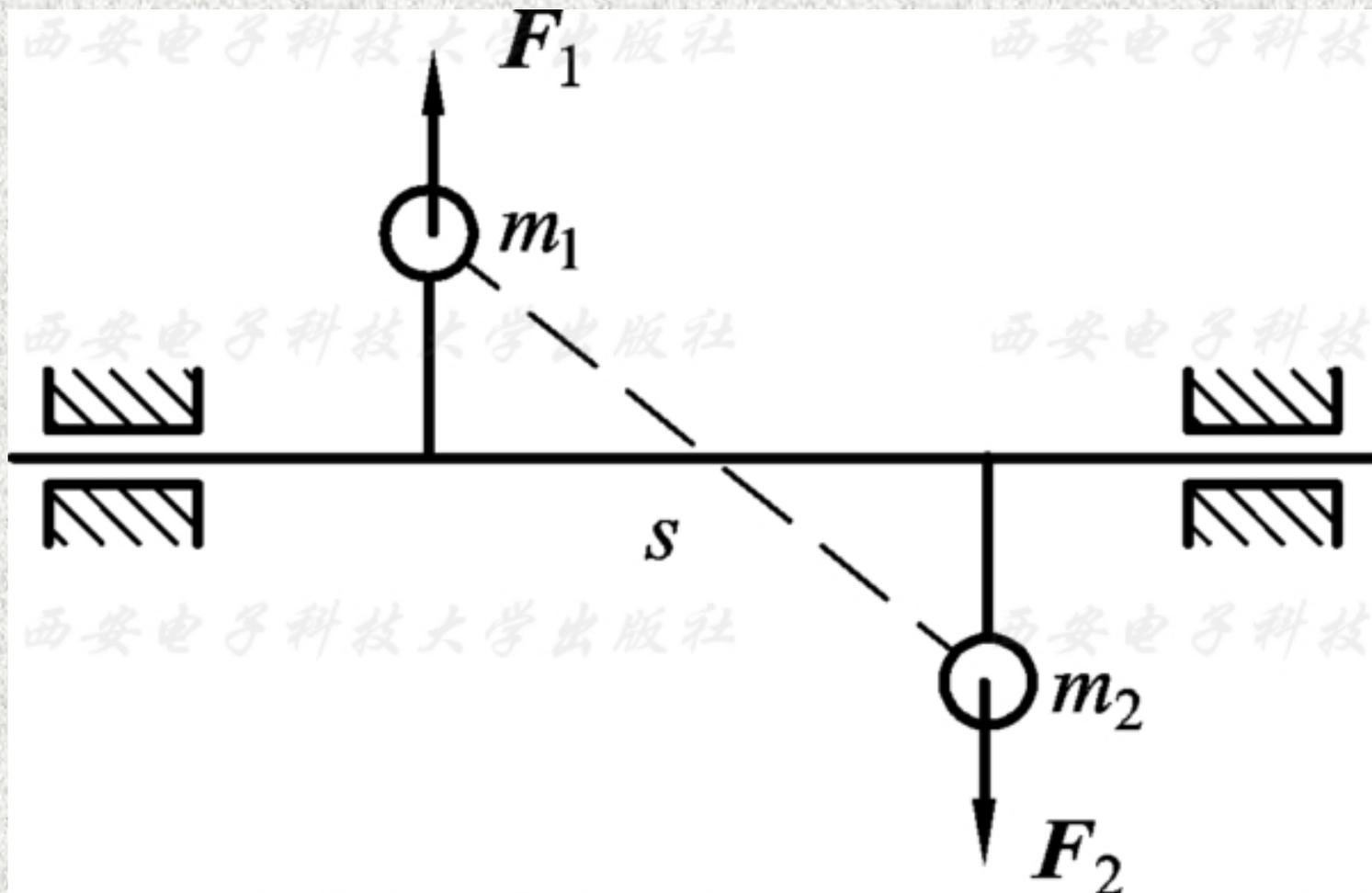


图13-4 质心在转轴上但不平衡的回转件

任何一个不平衡质量的动力效果可以用两个选定平面内的质量的动力效果来代替，如图13-5所示，若 $m$ 、 $m_1$ 、 $m_2$ 满足如下关系：

$$\begin{cases} m_1 + m_2 = m \\ m_1 l_1 = m_2 l_2 \end{cases}$$

则当回转件转动时， $m$ 所产生的离心力对轴的作用效果与 $m_1$ 和 $m_2$ 所产生的离心力的合力对轴的作用效果完全一致，因此， $m$ 可以用 $m_1$ 和 $m_2$ 代换。☞

根据以上分析，可得到结论：回转件上的任何一个不平衡质量都可以用选定的两平面内的两个质量来代换。根据以上原理，如果要使一个回转件动平衡，可先进行质量代换，将所有不平衡质量分别用选定的两个平面内的质量进行代换，然后通过两个选定的平面内添加或减除相应的平衡质量，便可使回转件获得动平衡。具体计算如下：

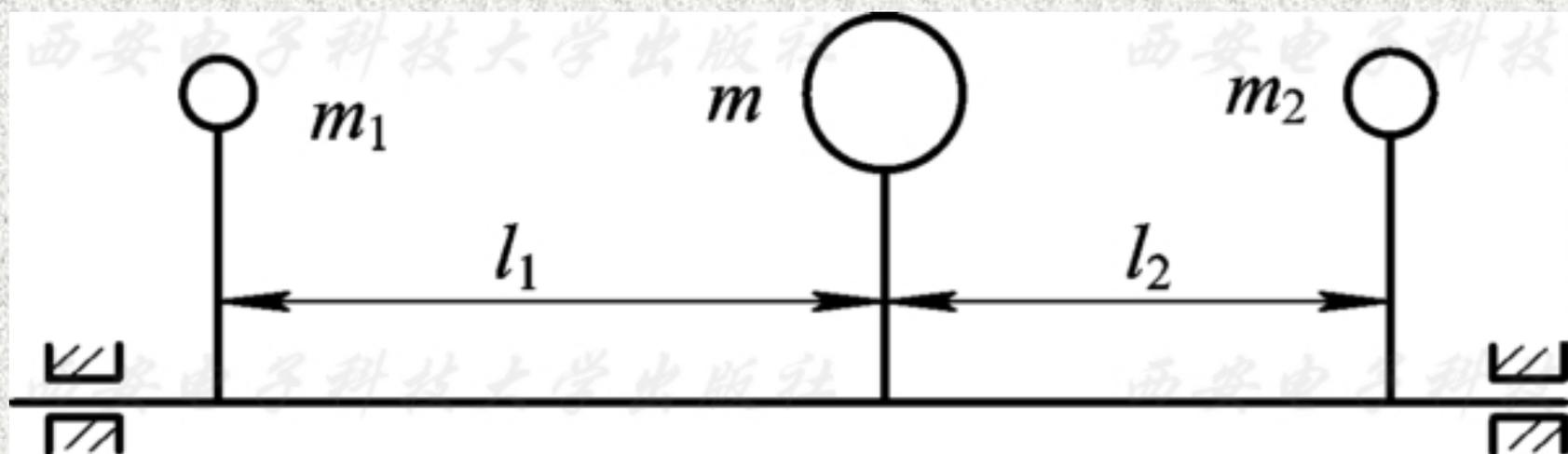


图13-5 质量代换原理图

如图13-6(a)所示，设一回转件上存在三个偏心质量，分别为 $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$ ，且不在同一平面内，它们的回转半径分别为 $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ ，方向如图所示。当回转件以 $\omega$ 回转时，它们产生惯性力 $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 。对其进行动平衡，首先选择两个平衡平面：平面 I 和平面 II。根据上述质量代换的方法将 $m_i$ ( $i=1$ 、 $2$ 、 $3$ )用 $m_{iI}$ 和 $m_{iII}$ 代换，即

$$m_i = m_{iI} + m_{iII} \quad (13-4)$$

$$m_{iI}(l - l_i) = m_{iII}l_i \quad (13-5)$$

联立式(13-4)、式(13-5)求解，得：

$$m_{iI} = m_i \frac{l_i}{l} \quad (13-6)$$

$$m_{\text{II}} = m_i \frac{(l-l_i)}{l} \quad (13-7)$$

然后在两个选定的平衡平面内按静平衡的方法列质径积矢量和方程为

$$m_{b\text{I}}\mathbf{r}_{b\text{I}} + m_{1\text{I}}\mathbf{r}_1 + m_{2\text{I}}\mathbf{r}_2 + m_{3\text{I}}\mathbf{r}_3 = 0 \quad (13-8)$$

$$m_{b\text{II}}\mathbf{r}_{b\text{II}} + m_{1\text{II}}\mathbf{r}_1 + m_{2\text{II}}\mathbf{r}_2 + m_{3\text{II}}\mathbf{r}_3 = 0 \quad (13-9)$$

作矢量图，如图13-6(b)、(c)所示，可求出平衡平面内所需的平衡质量的质径积 $m_{b\text{I}}\mathbf{r}_{b\text{I}}$ 和 $m_{b\text{II}}\mathbf{r}_{b\text{II}}$ ，当选定 $\mathbf{r}_{b\text{I}}$ 和 $\mathbf{r}_{b\text{II}}$ 后， $m_{b\text{I}}$ 和 $m_{b\text{II}}$ 可被确定。

由上述分析可知，动平衡同时满足静平衡的条件，所以经过动平衡的回转件一定满足静平衡，但是静平衡的回转件不一定满足动平衡。 

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/766035212115011010>