

电业工人
学习文选

24



屠 秉 鐸編著

发电厂轉动机械 找平衡的方法

水利电力出版社

科学出版社

一



重工业部

发电厂辅助机械 找平面的方法

机械工业出版社

內 容 提 要

本書根据发电厂內各种轉动机械（主要是汽輪发电机）的特点，介绍了各种常用的找平衡的方法，特別对行之有效的軸承摆动試加重量周移法作了較詳細的叙述，还列举了决定施工措施用的有关参考数据資料和一些实例。書中有很大部分是介绍作者在实际施工过程中所积累的經驗。

本書可供发电厂轉动机械和汽輪发电机安装、檢修工人参考。

发电厂轉动机械找平衡的方法

屠 秉 鐸編著

*

1156R244

水利电力出版社出版（北京西郊科學院二里樓）

北京市書刊出版業營業許可証出字第106号

水利电力出版社印刷厂排印 新华書店发行

*

787×1092 $\frac{1}{32}$ 开本 * 1 3/4 印張 * 40 千字

1958年8月北京第1版

1958年8月北京第1次印刷（0001—4,100册）

統一書号：T15143·155 定价（第9类）0.20元

6

前 言

发电厂的水泵、风机和汽輪发电机等轉动机械，运行是否安全，主要的标志是机組振动的大小。

机組的振动，常是机組各方面缺陷的集中表现。因此，轉动机械产生不正常振动的原因是很多的。但归納起来，最主要的原因有：轉子的質量不平衡，电机的电气不平衡，机組的中心不正，基础和底座有缺陷，以及轉子的零件发生松动等；汽輪机的振动，另外还有特殊原因：如内部摩擦，滑銷系統不正常，軸封不正确，管道安装不良，蒸汽溫度超过設計标准等。所有上述原因，以轉子的質量不平衡較为常見。因为轉子上有很小一块不平衡重量，在急速轉动时，也会在轉子上产生一个很大的离心力，破坏轉子轉动时的均衡平衡状态，使机組发生振动。

例如 3000 轉/分的汽輪机轉子上，在轉动半徑为 1 公尺的地方，有一块 100 克(只含 3 两重)的不平衡重量，运行时就能产生 1000 公斤的离心力。

轉子質量不平衡时，可以在轉子上加平衡重量来平衡。假如所加平衡重量的重心与不平衡重量的重心在同一个垂直于轉軸的平面內，这种不平衡叫做靜不平衡。如果轉子的不平衡重量在轉子的不同輻向截面內，造成两个或两个以上的不同方向离心力时，这种不平衡称为动不平衡。

靜不平衡和动不平衡的簡單情形如图 1 所示，图中的 u_0 、 u_1 和 u_2 是轉子上的不平衡重量。

目 錄

前言

第一章 找靜平衡	5
第一节 准备工作	5
第二节 摩擦消除法	7
第三节 試加重量周移法	10
第四节 秒表法	13
第五节 靜平衡的質量評定	17
第二章 在机体中找动平衡	18
第一节 鉛筆法	19
第二节 三次起动法	22
第三节 三次試加重量法	25
第三章 用軸承摆动試加重量周移法找汽輪发电机轉子 的动平衡	28
第一节 試加重量周移法的应用	28
第二节 准备工作	34
第三节 操作方法	40
第四节 永久平衡重量的配制	48
第五节 动平衡的質量檢查和驗收	55

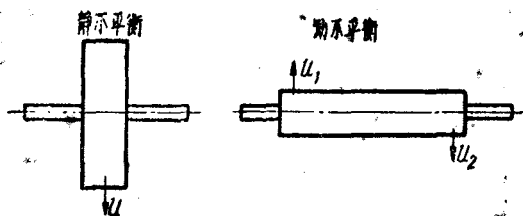


图1 靜不平衡和动不平衡的轉子

轉子处于靜不平衡，可以用各种找靜平衡的方法来校正，如果是动不平衡，就要找动平衡，才能校正。

純粹的靜不平衡是很少的，因为轉子都有一定的长度，所以，如果轉子有質量不平衡的情况，差不多都是动不平衡。但是在实用上，軸向尺寸短而半徑大的轉子，校正了靜平衡，就能保証机組平稳地运行，不发生不正常的振动。軸向尺寸长的轉子都需要校正动平衡以后，才能滿足运行上的要求。

发电厂里的轉动机械，例如风机、单級水泵和中小型电动机等，轉子都不长，半徑比較大，一般都可以在找好靜平衡后就平稳地运行。多級水泵的水輪和汽輪机轉子上拆下的叶輪，可以在逐級校正靜平衡后使用。大型电动机、汽輪机和发电机等设备的长型轉子，便要找好动平衡后，才能投入运行。

有些汽輪机轉子只找了靜平衡就加以使用，这是不很可靠的。因为在同一个縱断面內，两个相等力的偶力，发生扰动力矩是可能的。例如图2所示的汽輪机轉子，如果 u 和 v 两块不

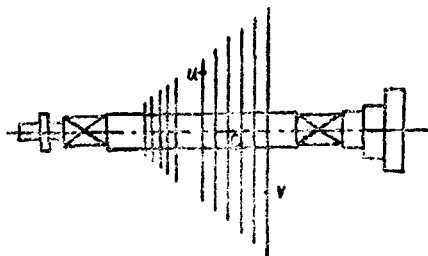


图2 靜平衡动不平衡的轉子

4

平衡重量与它們各自的轉动半徑相乘的乘积相同时靜不平衡是完全沒有的。可是在运行时， u 和 v 在各自的垂直于軸向的截面內产生一对大小相同、方式相反的离心力，以 c 点为中心，組成一对偶力，扰动轉子，就使机組发生振动。

找平衡时，連接在轉子上的一些临时性部件，如皮带輪、假軸等，應該校正靜平衡后再用，才不致因为这些临时性部件的不平衡而影响轉子的平衡結果。

本書拟較全面地介紹一些轉动机械找平衡的原理，操作方法和实例，以及汽輪发电机轉子找动平衡时遇到的某些困难和克服这些困难的措施与經驗。

第一章 找靜平衡

找靜平衡需要的設備很簡單，准备工作也不多，操作又很簡易方便。因此，在发电厂和其它工业厂矿的轉动机械檢修上，找靜平衡是有一定的优越性和实用价值的。

現在把找靜平衡的准备工作、方法和实例，分別介紹于后：

第一节 准备工作

轉子在找好靜平衡以后，每次用手轉动都能在任何位置上停止下来。因此，找靜平衡时，要用两条平行的平滑稜形鋼軌，把轉子架起来，讓它上面轉，察看轉子靜止的位置或轉动的情况。鋼軌和轉子的配置情形如图 3 所示。

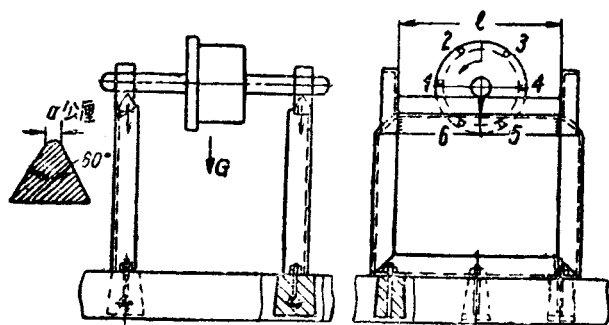


图 3 找靜平衡的鋼軌和轉子配置情形

鋼軌的截面成三稜形。鋼軌应牢固地固定在型钢焊成或生鉄鑄成的座子上，座子要穩固，並且不受附近其它机械振动的

干扰，位置要选择在沒有天然风或机械风（如风机、风扇的吸入侧或压出侧所形成的风）的地方，以免影响轉子的平衡結果。

鋼軌的长度 l 与轉子軸頸的直徑 d 有关，一定要讓轉子在鋼軌上能滚动1.5~2圈，即鋼軌的长度至少要等于轉軸直徑的5.0~6.5倍，两头还应再稍留些余量，通常鋼軌的长度都在1.25~1.5公尺左右。轉子压在鋼軌上，鋼軌不应有弯曲或变形的現象，否則应适当地增加鋼軌的支柱，縮小支柱的档距。

鋼軌的工作面要求平直坚硬，最好要經過焯火。它的寬度 a (图3)与轉子的重量 G 有关：1吨以下的轉子， $a=3\sim6$ 公厘即可；轉子重达1~6吨时， $a=6\sim30$ 公厘；鋼軌工作面寬度 a ，可用下列簡式作比較精确的計算：

$$a = (0.012 \sim 0.013) \frac{G}{d} \text{ 公分；}$$

式中 G ——轉子的重量，公斤；

d ——轉子軸頸的直徑，公分。

两条鋼軌必須严格地平行，全长内相互的平行度不应差0.5公厘以上。两个軌面必須水平，並且在同一水平面上，每公尺长度内不应有0.10公厘以上的坡度。

一端有轉軸的單側吸入式水泵的水輪或风机的叶輪，在找靜平衡时，要在吸入側加配假軸。多級水泵的水輪或冲动式汽輪机

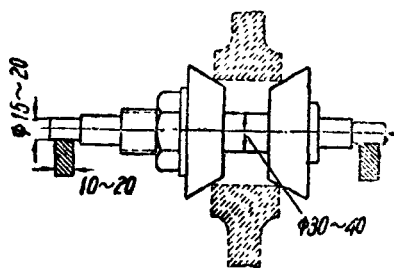


图4 叶輪找靜平衡用的假軸

轉子的叶輪等，在找靜平衡时，也要配制假軸。图4是叶輪找靜平衡时假軸的配置情况。假軸和叶輪的中心偏差容許0.05~

0.075公厘，叶輪的壳面弧偏度不得大于0.2公厘，假軸軸頸容許的橢圓度不應超过0.02~0.03公厘。

找靜平衡的准备工作安排完毕后，將轉子在圓周方向平均分为六等分或八等分，並且編上字號，最后將軸頸和鋼軌上的灰塵、油膩清理乾淨，就可开始进行找平衡工作了。

第二节 摩擦消除法

摩擦消除法能在計算过程中消除經常影响平衡結果的摩擦力矩，操作也比較簡捷，而它的原理和計算却很簡單，因此，这个方法近年来已被經常使用。

不过，这个方法只能用在具有显著不平衡現象的轉子上。所謂显著的不平衡，就是轉子在鋼軌上不能在任何圓周位置上靜止下来；它要自行繼續轉动，直到不平衡重量的一側降到最低位置为止。換句話說，具有显著不平衡現象的轉子，不平衡重量所产生的轉动力矩，超过了轉子軸頸在鋼軌上轉动时所遇到的摩擦力矩；所以，摩擦力矩阻上不住轉子在鋼軌上的轉动，直到不平衡重量轉到最低位置才能停止下来。

用摩擦消除法校正具有显著不平衡現象的轉子的靜平衡方法如下：

1. 先讓轉子在鋼軌上自由地轉动数次，察看哪一側总是沉在下部，找出轉子的不平衡重量 U 所在的位置，並且做好記号。

2. 將轉子上有不平衡重量 U 的一側放成水平位置，如图5所示，然后在 U 的对面一次一次地試加重量，直到加上 P_1 后有 U 的一側仍稍

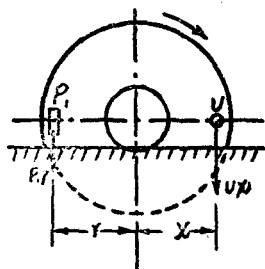


图5 摩擦消除法之一

重一点，轉子能沿图 5 上所示的箭头方向轉动一个小角度，以在 $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 之間为最好。

現在是用油灰粘在轉子上作为試加重量的。

3. 將轉子轉过 180° 后，使 U

和 P_1 仍处于水平位置 (图 6)；在已加 P_1 的地方，再一次一次試加上另一个重量 P_2 ，使轉子能沿图 6 上的箭头方向也轉动一个和前次相等的角度。

4. 第一次轉动轉子的力矩是 $Ux - P_1 r$ 再減去鋼軌对軸頸的摩擦力矩，第二次轉动轉子的力矩是 $(P_1 + P_2)r - Ux$ 再減去鋼軌上的摩擦力矩，由于两次轉动的角度相等，所以这两个轉动力矩也相等，而摩擦力矩却可以消除。

把上述两个轉动力矩列成等式，求出 Ux ，再被平衡重量的轉动半徑去除，就求得应加平衡重量的数值。假如永久平衡重量的轉动半徑和 P_1 、 P_2 相同，都是 r ，(见图 5 图 6)，那末，平衡重量：

$$P = P_1 + \frac{P_2}{2}.$$

就是应加的平衡重量 P ，等于第一次所加的重量与第二次增加的重量的二分之一之和。

例：某冲动式汽輪轉子的一个叶輪換叶片后，因为全部叶片只有一个鎖金，装鎖金处比对面少一个叶片，所以，具有显著的不平衡現象。用图 4 所示的假軸和摩擦消除法找靜平衡，結果在装鎖金方向的根槽上第一次加重量 29.5 克，第二次又增

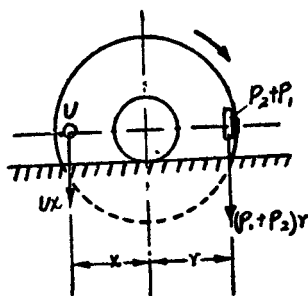


图 6 摩擦消除法之二

加了12.6克，因此，根槽上应校正的重量为 $29.5 + \frac{12.6}{2} = 35.8$ 克。后来在鑽金对面(即相距 180° 处)的根槽上轴向两侧共銑去35.8克，結束平衡工作，使用后情况正常。

更简单的摩擦消除法找靜平衡，还可以这样进行：

1. 將轉子偏重的一側放在水平位置，如图7乙所示；小心地松开轉子，轉子因为 U 的关系就沿箭头方向轉动，直到 U 轉到对面，离地面一定高度后停住，然后又向反方向轉回去。当轉子刚停住，开始要轉回时，測得 U 点离地高度为 h (图7丙)。

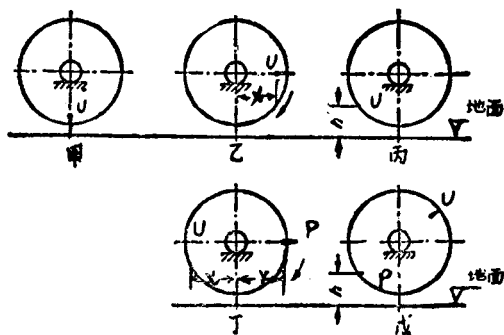


图7 摩擦消除法之三

2. 將轉子轉过半圈后，在 U 的对面一次一次地試加重量，直到最后加上重量 P_1 ，使轉子沿着和前次相同的方向轉动(图7丁)到圆周上的 P_1 也离地面 h 高(图7戊)記下 P_1 的重量。

3. 因为轉子的两次轉动力矩相等，于是，

$$Ux = P_1 r - Ux,$$

或

$$2Ux = P_1 r$$

假如都在半径 r (图7丁)上增加重量，那末，应加的重量是：

$$P = \frac{P_1}{2}$$

第三节 試加重量週移法

当轉子沒有显著的不平衡現象时，轉軸在鋼軌上轉动时所遇到的摩擦力矩大于不平衡重量所产生的轉动力矩，找不出显著偏重的一側，所以不能按照前节所述的方法进行平衡。可以用試加重量週移法来找靜平衡。这个方法是在轉子圓周的几个位置上依次試加重量，試驗出偏重的位置，然后利用曲綫和简单的計算，求出轉子的不平衡重量数值。

一个轉子找好靜平衡后，測定它的剩余不平衡重量也是用試加重量週移法。本章第五节将詳細說明有关剩余不平衡重量的問題。

用試加重量週移法找靜平衡时，轉子要比摩擦消除法多轉几次，因此要慢一些；但是，結果却比摩擦消除法可靠。同时，在它的計算过程中，摩擦力矩也是可以互相抵消的。

試加重量週移法找靜平衡的操作方法如下：

1. 把等分好的轉子清理乾淨，抬到鋼軌上放好，讓它在鋼軌上靜止下来，然后把1~4两点放在水平位置，如图8的右图所示。

2. 在轉子的位置1上，逐次試加重量，直到轉子剛剛能开始沿箭头方向緩慢地轉动，最后将这个重量 P 仔細地秤过，記入下式的表格中。

位 置	1	2	3	4	5	6
試加重量 p (克)						

作为試加重量的物件，可用細綫系在一个小鈎上，然后将小鈎輕輕地掛到轉子上去。找靜平衡时所用的試加重量，除需

要它跟着轉子一起轉動(例如前述的摩擦消除法)外, 應尽可能不用油灰, 因為油灰的位置不很準確。

填入上述表內的試加重量 P , 應包括細綫和小鈎的重量。

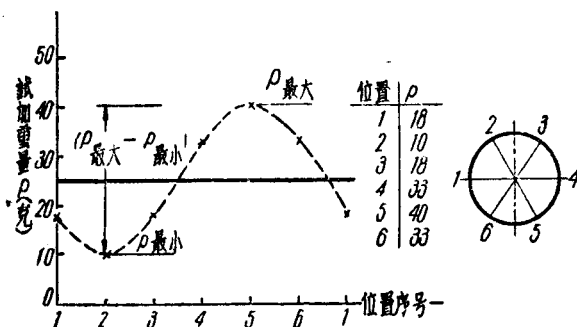


图8 試加重量周移法的图例

3. 依次再将2、3、4、5和6等五点放在水平位置, 用同样方法求出在各点上的試加重量, 一一記入上述表格中。

4. 如果轉子只有一点不平衡重量, 以試加重量 P 为縱座标, 圓周上的位置序号为橫座标, 描出它們的关系曲綫, 为一正弦或余弦曲綫, 图8所示就是这种曲綫的典型例子。

这个方法也能用来平衡具有显著不平衡現象的轉子, 但所得的曲綫包括 $P_{\text{最小}}$ 点的一段是在0克以下, 成为負值。換句話說, 在这些位置上不加試加重量, 轉子也能轉動, 反而要在对面加些重量, 才能剛好向有不平衡重量的一側慢慢地轉去。这說明 $P_{\text{最小}}$ 的位置是不平衡重量 U 所在的位置, $P_{\text{最大}}$ 的位置是应加平衡重量的位置。

因为 $P_{\text{最大}}$ 和 $P_{\text{最小}}$ 都是外面加上去的, 我們可以設想, 加 $P_{\text{最大}}$ 时, 轉動轉子的不平衡重量是 $P_{\text{最大}} - U$; 加 $P_{\text{最小}}$ 时, 是 $P_{\text{最小}} + U$, 这两个不平衡重量恰恰相等, 即:

$$P_{\text{最大}} - U = P_{\text{最小}} + U,$$

因此，轉子上的原有不平衡重量是：

$$U = \frac{1}{2}(P_{\text{最大}} - P_{\text{最小}}).$$

例：在某次找動平衡的準備工作中，有一個連接在轉子上的新配的皮帶輪，曾用試加重量週移法校正它的靜平衡，所得結果如下：

位 置	1	2	3	4	5	6
試加重量p(克)	3	7	13	17.5	14.5	7.5

從描出的曲線(圖9)可以看出轉子的不平衡重量是在位置1上，應在位置4上加平衡重量。

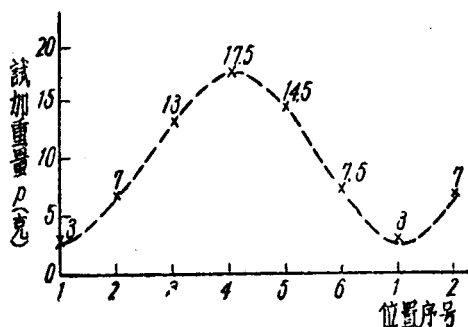


圖9 試加重量週移法實例的曲線

$$U = \frac{1}{2}(17.5 - 3) = 7.25 \text{ 克}.$$

試加重量的小鉤是掛在皮帶輪的480公厘外徑上，但實際上只能在直徑為320公厘的輪轂上去掉重量，因此，7.25克換算到320公厘直徑時，共應去掉 $7.25 \times \frac{480}{320} = 10.9 \text{ 克}$ 。

最后在皮带輪上位置 1 附近銼去 11 克，就可以完成这次找靜平衡工作。

第四节 秒 表 法

以上两节所述的方法，都是測量轉子的轉动距离或轉动角度来进行平衡的；換句話說在平衡时，都是着眼在轉子轉动中所經過的空間。本节所述的秒錶法，則是利用秒錶測量轉子轉动时所經歷的时间来加以計算和平衡的。这种方法比較正規可靠，各位置上只加一个固定試加重量，不但可以消除測量时的誤差，而且在時間上也比試加重量周移法快得多。

秒錶法找靜平衡的准备工作和其它找靜平衡的方法一样，另外还要准备一只精密度为 0.2 秒的秒錶，用以測量轉子每个位置在鋼軌上来回摆动的周期。

一、秒錶法的原理：

一个不平衡的轉子在鋼軌上，由于不平衡重量 U 的关系，使轉子在鋼軌上連續地来回滚动（或称为摆动），如图 10 所示。

假如有一个理想的完全平衡的轉子，在它的八等分的各个圓周位置上，依次加一相同的試加重量 P ，造成人为的不平衡，使轉子在相同的轉动半徑上一次一次地摆动，那末，測得的八个周期应当是完全相等的。

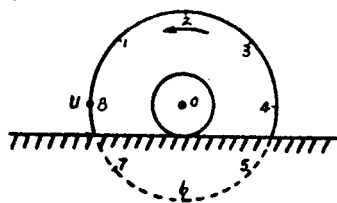


图 10 轉子在鋼軌上用不平衡而摆动

假如在一个具有不平衡重量 U 的轉子上，按同样方法在各个位置上依次加一相同的試加重量 P ，使轉子摆动；当 P 与 U 恰巧重合时，轉子更加不平衡，更容易摆动，同时，摆动一个

周期所需的时间最短,因此,测得轉子的摆动周期最小;但是,当 P 恰巧加在 U 的对面时,轉子比較接近于平衡,摆动一个周期所需的时间最长,因此,将测得轉子摆动的周期也最大。

图11表示摆动周期和試加重量位置的关系,横座标是試加重量的位置序号,縱座标是摆动周期。从图11可知,轉子的不平衡重量 U 是在位置8上,平衡重量应加在8的对面位置4的附近。

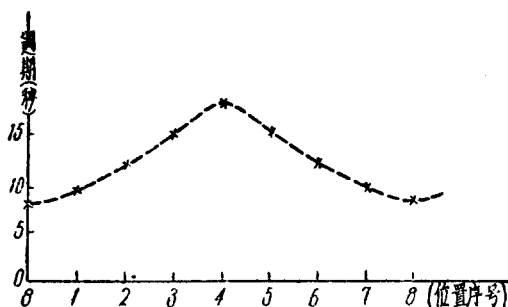


图 11 摆动周期和試加重量位置的关系

应当注意,不平衡重量的位置,要根据描出的周期和位置的关系曲线来确定,不能只根据各位置上的测定结果来确定,因轉子不平衡重量的位置常常可能在两个位置序号的中間。

不平衡重量的位置确定后,不平衡重量的大小,可以分析轉子的摆动周期和不平衡重量的关系来决定。

因为轉子在鋼軌上的运动是一来一去时快时慢的摆动,摆动周期和不平衡重量的关系是比较复杂的。但是根据实验的结果,或者利用一点简单的微积分来分析,我們就能得出轉子的摆动周期 t 和它的不平衡重量 U 的平方根成反比的关系;换句话说,不平衡重量 U 与摆动周期 t 的平方成反比例,用数学符号