

# 悬臂式单盘柔性试验转子的三圆法本机动平衡

孙国维

[提要] 本文介绍了悬臂式单盘涡轮试验转子 WJ5A—1 型发动机第Ⅲ级涡轮盘低循环疲劳试验转子低速动平衡存在的一些问题; 在高转速下进行本机动平衡的必要性; 本机平衡的三圆法在立式轮盘超转循环试验台上的具体应用、所取得的效果以及就如何进一步提高本机平衡的精度提出了改进意见。

关键词 循环试验 单盘柔性转子 本机动平衡

## 一 前言

已往单个轮盘试验转子在试验前均要在平衡机上进行低速动平衡。一般情况下, 低速动平衡有时也能满足试验要求。但当试验转速很高时, 特别是在柔性转子通过临界转速时, 不太大的不平衡量也会引起试验转子的相当大的振动, 甚至可能使试验无法进行。这就要求试验转子在进行低速动平衡后还要进行高速动平衡。高速动平衡的实施办法是在轮盘超转——循环试验台上进行本机动平衡。本文叙述的是 WJ5A—1 型发动机第Ⅲ级涡轮盘在进行低循环疲劳试验过程中, 对其试验转子采用三圆法进行本机平衡的情况。试验表明: 三圆法本机动平衡有很多优点, 比较容易实现, 可以明显地提高试验转子的动平衡精度。从而使试验转子在高速或通过临界转速时运行相当平衡, 解决了多年来因转子平衡精度不高而影响试验进行的问题。

参加本试验的还有金淑敏, 刘连元、白宗魁、陈艳芬等同志。

## 二 悬臂柔性试验转子进行高速动平衡的必要性

用于低循环疲劳试验的 WJ5A—1 型发动机第Ⅲ级涡轮盘试验转子结构如图1所示为柔性结构, 其一级临界转速为1050转/分, 二级临界转速为11450转/分。图2是该转子在一、二阶临界转速时的振型及挠度值。

第Ⅲ级涡轮盘低循环疲劳试验时, 其转速变化范围是800转/分——15600转/分——800转/分, 每一次循环都要经过四个临界转速。如果试验转子存在较大的不平衡量, 在

本文收到日期: 1986年12月30日

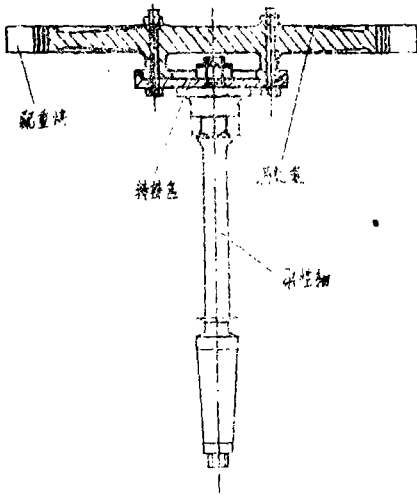


图1 第三级涡轮盘低循环疲劳试验转子

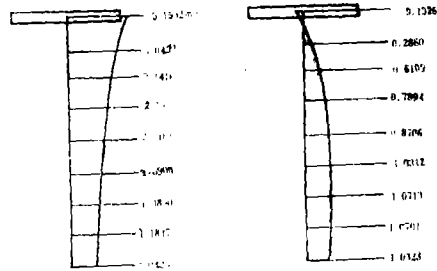


图2 临界转速时试验转子的振型和挠度  
a. 一阶临界转速时, b. 二阶临界转速时

高速运转时就会产生很大的不平衡力和力矩。受此不平衡力和力矩的影响，或者引起较大的振动，使轴承负荷过重、温升增加；或者引起轴承和设备损坏。两种情况都会影响试验进行。因此，对试验转子的动平衡问题必须给予充分的注意。设法减小试验转子在高速下的不平衡力和力矩。在循环试验的最初阶段是通过低速动平衡的方法来减小试验转子的不平衡量。但低速动平衡方法用来解决供循环试验的试验转子动平衡问题则存如下几个问题。

1. 由于低速动平衡的平衡转速（800转/分）较低，所以平衡的结果是试验转子的剩余不平衡量较大。通常在10~20克一公分左右。这一不平衡量在转速为15000转/分时对设备的弹性支承轴承来说将引起25~50公斤的作用力。这个作用力在轴承的阻尼和润滑条件处于不利条件下，往往会产生轴系的极大振动，甚至使试验转子无法通过临界转速。有时即使勉强通过临界转速，但继续提高转速时振动又急剧加大，致使试验无法进行。为使试验转子平稳地通过临界转速或在循环的上限转速（15600转/分）运转平稳，需要使转子的剩余不平衡量达到4~6克一公分左右。在低速平衡机上达到这一实验要求，通常要有较熟练的技术和经验丰富的操作人员，且平衡所用时间较长。即使具备这些条件，平衡到最后多数情况是给出一个大概的平衡结果。而试验者则往往是凭侥幸心理来进行试验。

2. 低速动平衡时，试验转子如图3所示，是水平放置的。而试验时转子则垂直安装。这种安装状态的不同导致三个问题：一是试验设备上的试验转子旋转中心与平衡时的旋转中

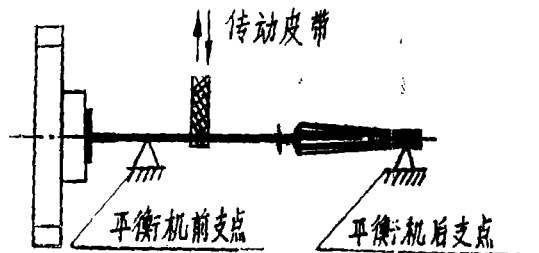


图3 试验转子在动平衡机上的支承

心有偏差,不能保证平衡时的平衡度;二是由于试验轮盘的配重叶片有一定的轴向串动量。已经平衡过的试验转子安装到试验台上后,配重叶片的轴向位置会发生少量变化,因而会使平衡受到破坏。实践表明,经水平安装低速动平衡后的转子在立式运转时,多数振动较大;三是由于试验转子结构复杂,即使配重叶片没有轴向串动量,转子其它另件在高温,高转速运行时的巨大离心力作用下其相互位置和配合关系也会产生细微变化,使转子的平衡受到一定程度的破坏。

3. 柔性转子对动平衡要求高。从图可以看出,如果转子的不平衡量较大,在临界转速时会产生很大的振动,尤其在二阶临界转速振动更大。只进行低速动平衡不能完全解决高转速时,特别是临界转速时的平衡问题。

4. 低循环疲劳试验时,试验转子在试验台上每循环一定次数后要停车分解,对轮盘进行裂纹检查。然后按原样重新组装。即使这样,转子的平衡也会破坏。因此,每次必须重新进行动平衡才能进行下一阶段的循环试验。如此多次的分解、组装、动平衡,若靠低速动平衡机,那么既不能保证平衡精度,又不经济。

综上所述,为了保证在试验过程中,试验转子顺利通过两阶临界转速时运转平稳,减小转子剩余不平衡量的最有效的方法是在超转——循环试验台上对试验转子进行高速本机平衡。对于低循环疲劳试验转子来说进行高速本机平衡具有两个明显的优点:

1) 由于平衡时转子的安装状态和工作情况与试验运转时相同或接近,因此,平衡的精度高,容易保证试验转子平稳运转。

2) 试验转子为柔性转子,其平衡与平衡转速有关。只有在靠近临界转速的高转速下平衡才能使转子平稳通过临界转速。本机平衡可以满足柔性转子的平衡要求。因此,该试验转子在试验台上进行高速本机平衡最为适宜。

### 三 应用三圆法对试验转子进行本机平衡的效果

#### 1. 三圆法本机平衡所用仪器仪表

由于应用三圆平衡法时不需要测出振动向量的方向,而仅测量振动大小相对值即可。所以平衡时测试设备简单。一般试验台的振动监测仪表即可满足要求。不必使用特殊的振动测量仪表。本机平衡时所用的设备及仪表如图4所示。

图中拾振器 GZ-2 测振仪用来测出上部弹性支承轴承外壳的振动值。该振动值作为衡量试验转子剩余不平衡量大小的依据。

#### 2. 三圆法本机平衡的步骤

使试验转子升速至平衡转速 $n_1$ ,测出上部弹性支承轴承的振动值 $A_1$ (小于预先规定的允许值)。在坐标纸上以 $0.4A_1$ 为半径划圆。将此圆12等分,每一分点代表试验轮盘与转接盘联接螺栓(八只)及平衡螺钉

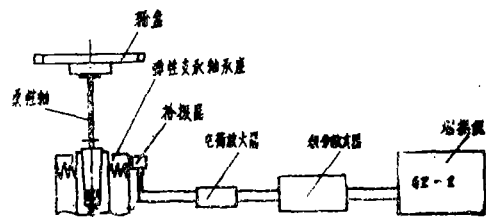


图4 试验转子本机平衡时的设备及仪器

(四只均布)的位置。然后任选彼此相隔120°角的三个位置  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、(对应轮盘的三个连接螺钉或平衡螺钉的位置)先后加上试配重  $q_0$ 。(每次只在一个方位上加)。每加一次试配重开车并升至  $n_1$  转速。测出  $n_1$  转速时上部弹性支承外壳的振动值。设三次加试配重在三个位置上至  $n_1$  转速时测得的振动值分别为  $0x_1$ 、 $0x_2$ 、 $0x_3$ 。分别以  $0x_1$ 、 $0x_2$ 、 $0x_3$  为半径,在坐标纸上相对应的  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为圆心作三个圆。如果试配重选得准确,理论上可以证明三个圆应当交于一点  $x$ 。连接  $0x$ , 则  $0x$  的大小表示试配重单独引起的振动。从点  $0$  向点  $x$  的方向应当是平衡对加配重的不平衡度的方向。试验转子在该平衡面的原不平衡度的方向则与此相反,应加配重的大小为:

$$q_c = q_x = \frac{Ax}{0x} \cdot q_0$$

将配重  $q_c$  加在  $0x$  指向与  $a$ 、 $b$ 、 $c$  各点所在圆周上。但事实上该点不一定恰是连接螺钉和平衡螺钉的位置。这时可按交点与最近的两个螺钉距离之比,将  $q_c$  分成两部分,分别加在这两个螺栓的位置上。

由于  $q_0$  选取的近似性,  $q_c$  不可能一次就能确定得很准确,可以逐渐使  $q_0$  的选取接近理想值。

在  $n_1$  转速下平衡后,继续升速。如果上部弹性支承振动值也继续增大,为达到  $A$  值时则停车。选取略低于  $A$  值所对应的转速  $n_2$ 。在  $n_2$  转速下重复上述三圆法平衡过程。这样不断提高转速进行平衡直至达到要求为止。

在一般情况下在接近二阶临界转速下进行的本机平衡使振动值达到要求后,再继续升速可能有两种情况。一种情况是过临界转速后,振动值先减小,而后又慢慢增加。这种情况往往能满足试验要求;另一种情况是过了临界转速后振动值迅速加大。对于后者必须继续加大本机平衡转速进行更高转速下的平衡。

### 3. 平衡的实例及效果

下表所列数据为  $WJ5A-I$  型发动机第Ⅲ级涡轮盘经  $3.35 \times 10^4$  次试验台循环后,重新组装的试验转子进行本机平衡时所记录的上部弹性支承外壳振动的  $mV$  值。

$g$	上部弹性支承振动 $mV$ 数 ( $10mV=1g$ )															
	$n_{rpm}$	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.145	1.2	1.3	1.4	1.5
No	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$
1	0.8	2.2	4.2	5.2	7.0	5.8	7.5	7.0	5.0	11	92	35	18	22	29	
2							6.0	7.0	6.5	21	46	36	14	19	24	
3							3.9	6.0	6.0	5.0	42	29	20	25	30	
4						3.9	6.0	7.0	6.0	18	34	20	18	21	26	
5						5.0	5.5	7.0	9.0	14	28	10	14	18	23	
6																

初次运转在临界转速11450转/分的振动值达到 $92mV$  (即 $9.2g$ ) 远超过振动允许值 ( $A = 30mV$ )。故最初阶段以二阶临界转速为平衡转速。从表中数字可知, 通过两次本机平衡, 二阶临界转速时的振动 $mV$ 数降至 $42mV$ 。但在过临界后, 当转速升至15000转/分时, 振动又有急速增大的趋势。故第三次平衡转数取为15000转/分。接着又进行两次平衡, 最后使二阶临界转速的振动 $mV$ 值降至 $28mV$ ; 15000转/分时的振动 $mV$ 降至 $23mV$ 。基本上满足了循环试验的要求。图5所示为在15000转/分转速下进行本机平衡时应用三圆法所确定的加配重的方向及数值。

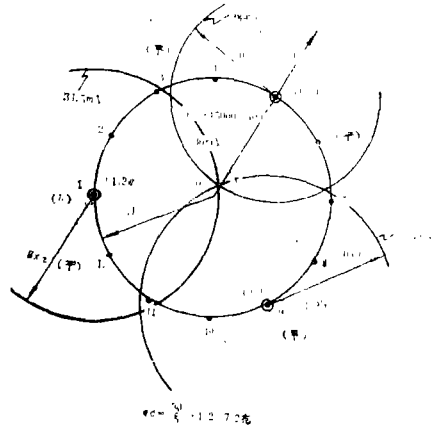


图5 应用三圆法在15000转/分时确定加配重的方向及大小

#### 四 几点体会

1. 对于象图1所示的单盘悬臂式柔性试验转子, 可以近似地在一个平衡面上进行本机平衡。应用三圆法进行本机平衡比较方便, 所用仪器设备简单, 易见成效, 节省时间。一般进行一次高速本机平衡只需用四小时左右时间。经本机平衡后, 轮盘可立即进行试验。

2. 对于用来进行低循环疲劳试验的悬臂式单盘柔性转子来说, 本机平衡方法应以低速动平衡为基础。尽管低速动平衡不能完全保证试验转子在高速时运行一定平稳, 但它能使转子总的平衡量减小到一定程度, 从而也能够使不平衡量形成的力和力矩减小到很小。由于总的平衡量及其所形成的力矩所造成一、二阶临界转速时的振动必然减小, 这就有利于进行高转速下的本机平衡。实际上, 第Ⅲ级涡轮盘低循环疲劳试验转子的本机平衡就是以低速动平衡为基础的。具体的作法有两种, 其一是试验转子经低速动平衡后, 直接进行试验。但如果在升速时振动过大则应立即进行本机平衡; 其二是试验过程中试验转子必须分解检查时, 应将试验转子的原来安装状态 (包括原来平衡重量的位置、大小等) 仔细记录下来。待轮盘裂纹情况检查后再按照原来状态组装试验转子 (尽管是按原样组装轮盘转子, 平衡也还是要被破坏), 然后再进行本机动平衡, 这就容易得多。实践表明, 把低速动平衡与本机动平衡结合起来, 可以使低速循环疲劳试验能够顺利进行。

3. 对试验转子本机平衡进一步改进的想法。为了使本机平衡的精度进一步提高, 可以在试验件上设计两个平衡面, 并在试验设备上增加一个测振点, 测出上下两个支点振动相位。这样不仅可以平衡由于不平衡量所产生的不平衡力, 而且可以平衡掉由于不平衡量所产生的不平衡力矩, 从而提高试验转子的平衡精度。

#### 主要参考文献

1. 高速转子的本机平衡, 北京航空学院 405教研室 1981年10月
2. 转子及其零部件平衡, 杭州汽轮机厂 杭州工业汽轮机研究所
3. 机械振动学, 【日】井町 男编著
4. 转盘超转—循环试验台阻尼轴承计算 七〇三所孙维国 1984年1月