

BI3 CENTRIO70 轴系的强度校核及试验应用

张晓芳 高星伟 张 辉 焦俊俊 陈普飞

(陕西陕航环境试验有限公司, 西安 710299)

摘要: 超速试验器是航空发动机涡轮或压气机轮盘进行超转、破裂试验的重要设备, 用以测试轮盘在一定转速下的变形量和爆裂等情况。柔性轴系作为超速试验器的关键部件, 在试验过程中的受力情况较为复杂, 本文通过运用 ANSYS Workbench 软件并结合某型发动机第五级整体叶盘的破裂试验, 对 BI3 CENTRIO70 轴系进行强度校核, 并研究了不平衡力对轴系强度、径向位移的影响规律。分析表明, 轴系(带缺口)在第五级整体叶盘试验转子破裂转速条件下, 不会在盘变形所引起的不平衡力作用下断裂, 其强度满足试验要求; 当试验件破裂瞬间产生的不平衡力 $F \geq 356\text{N}$ 时, 轴系(带缺口)会触碰限位轴承并在其剪切应力集中区域剪切断裂。试验应用结果表明, 轴系(带缺口)的断裂区域与有限元分析结果相吻合。

关键词: 超速试验器; 柔性轴系; 破裂试验; 强度校核; 不平衡力

中图分类号: TH113.2 **文献标识码:** B

The Strength Check and Test Application of BI3 CENTRIO70 Shafting

Zhang Xiaofang Gao Xingwei Zhang Hui Jiao Junjun Chen Pufei

(Shanxi Shanhang Environmental Test Co., Ltd., Xi'an 710299)

Abstract: Overspeed tester is an important equipment for overspeed and burst test for aeroengine disk, which is used to test the deformation and bursting of the disk at a certain speed. As a key component of the overspeed tester, the flexible shafting beared complex forces during the test. The strength of BI3 CENTRIO70 shafting have been checked by using ANSYS Workbench software and combining with the fracture test of the fifth integral disk. On this basis, influence of the unbalance force on the strength and radial displacement of the shafting have been studied. The analysis shows that the shafting (with notch) will not break under the unbalance force caused by disk deformation under the condition of breaking speed of the test piece, and its strength meets the test requirements. When the unbalanced force $F \geq 356\text{N}$, the shafting (with notch) will touch the limit bearing and shear fracture in its shear stress concentration area. The experimental application results show that the fracture area of shafting (with notch) is consistent with the analysis results.

Key words: overspeed tester; flexible shafting; burst test; strength check; unbalanced force

1 引言

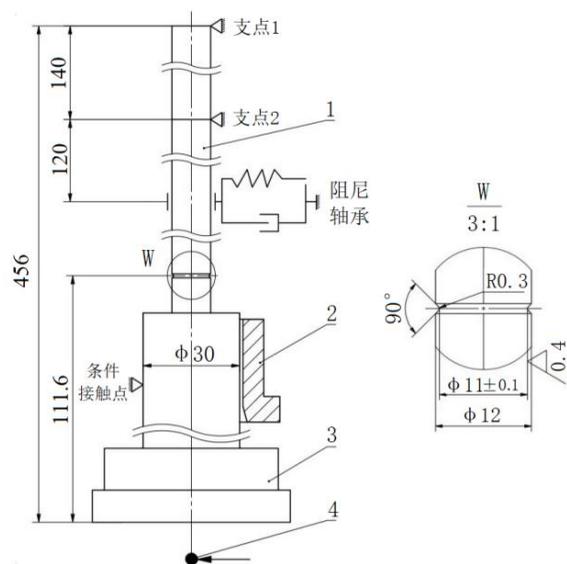
超速试验器是航空发动机涡轮或压气机轮盘进行超转、破裂和低循环疲劳等试验的重要设备, 用以测试轮盘在一定转速下的变形量和爆裂等情况^[1~4]。柔性轴系作为超速试验器的关键部件, 在高速旋转过程中的受力情况较为复杂, 在开展试验(尤其是破裂试验)之前, 必须对其强度进行校核, 以确保试验器的运转

平稳、安全。

本文以申克 BI3 CENTRIO70 型超速试验器的柔性轴系为研究对象, 并结合某型发动机第五级整体叶盘的破裂试验, 通过 ANSYS Workbench 有限元分析对其强度进行了校核, 并研究分析了不平衡力对轴系强度、径向位移的影响规律, 确保了五级整体叶盘破裂试验的安全实施。

2 BI3 CENTRIO 70 轴系结构简介

BI3 CENTRIO70 轴系主要由芯轴及连接法兰组成。芯轴上端通过六方面与齿轮传动系统连接,其支撑连接点可简化为两处刚性支点;阻尼轴承为滑动油膜轴承,装配单边间隙为 2mm;连接法兰的上端与限位轴承衬套间隙配合,单边间隙为 1mm,其条件接触点简化为支点,其下端通过连接法兰与试验工装连接,装配结构简图见图 1。



1—芯轴(带缺口) 2—限位轴承衬套 3—连接法兰 4—试验件质心

图 1 BI3 CENTRIO70 轴系结构简图

3 试验转子的有限元分析

3.1 试验参数

由第五级整体叶盘试验件、陪试件 1 及陪试件 2 组成的第五级整体叶盘试验组件,其主要参数见表 1。试验温度 $T=400^{\circ}\text{C}$; 预设破裂转速 $v_p=26803\text{r}/\text{min}$ 。

表 1 第五级整体叶盘试验组件主要参数

质量/kg	24.42
最大回转直径/mm	460
轴向高度/mm	267
绕旋转轴转动惯量/ $\text{kg}\cdot\text{m}^2$	0.382
过质心横向转动惯量/ $\text{kg}\cdot\text{m}^2$	0.296

3.2 试验转子的建模

3.2.1 试验转子模型

由第五级整体叶盘试验组件、转接轴及 BI3 CENTRIO70 轴系组成的试验转子,其有限模型见图 2。

第五级整体叶盘试验组件与转接轴之间为绑定接触,转接轴与 BI3 CENTRIO70 轴系之间为绑定接触;限位轴承衬套与 BI3 CENTRIO70 轴系中的连接法兰之间为无摩擦接触;结合轴系的装配关系及受力特点(即在限位轴承失效前,其柔性主轴与阻尼轴承不产生接触),在此忽略与阻尼轴承的接触。

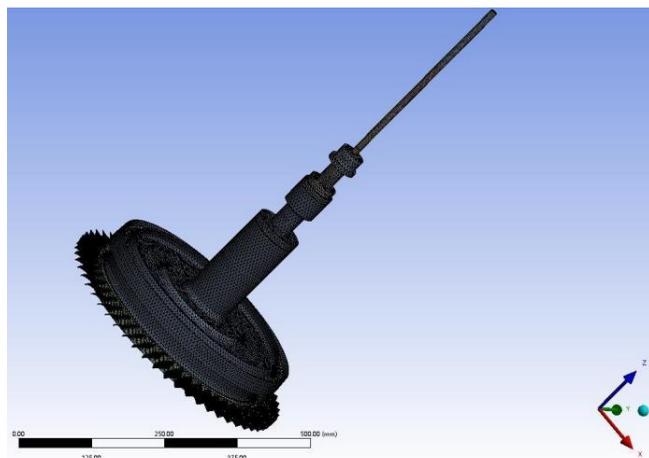


图 2 试验转子的有限元模型

3.2.2 定义材料属性及网格划分

试验转子中第五级整体叶盘试验件、陪试件 2 及转接轴的材料均为 IN718,陪试件 1 的材料为 Ti17;芯轴及连接法兰的材料均为 GH80A;限位轴承衬套的材料为 H62,材料的物理参数见表 2。

表 2 试验条件下材料的物理参数

	$T/^{\circ}\text{C}$	$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	E/GPa	η	R_m/MPa	$R_{p0.2}/\text{MPa}$
GH80A	20	8150	222	0.3	1080	660
H62	20	8430	103	0.3	335	-
IN718	20	8240	204	0.3	1280	1030
	400	8240	176	0.31	1080	1000
Ti17	400	4680	99	0.3	905	800

对试验转子及限位轴承衬套进行网格划分,均采用体网格。其中第五级整体叶盘试验件、陪试件 1、陪试件 2 及转接轴的体网格单元尺寸均为 6mm,在第五件整体叶盘试验件叶片处、螺栓孔处进行局部细划分网格,单元尺寸为 1mm;芯轴、连接法兰及限位轴承衬套的体单元尺寸均为 3mm,在芯轴开槽处、连接法兰倒角处进行局部细划分网格,单元尺寸为 0.25mm,划分网格后如图 2 所示。

3.2.3 约束与加载

试验转子在刚性支点 1 及支点 2 处设置为固定面,限位轴承衬套外表面设置为柱面固定;试验转子施加

旋转载荷 $v_p=26803 \text{ r/min}$ ；试验转子整体施加重力加速度 $g=9.8\text{m/s}^2$ ；在第五级整体叶盘试验件的质心施加径向不平衡力 F ，其相位与最大径向位移的保持一致。

3.3 静力学分析结果

3.3.1 等效应力

第五级整体叶盘试验件在 $v_p=26803\text{r/min}$ 试验条件下的等效应力分布云图见图 3。第五级整体叶盘试验件上自螺栓孔所在位置至中心孔的等效应力均超过 1220MPa ，高于其材料在试验温度下的抗拉强度值 ($R_m=1080\text{MPa}$)；螺栓孔处均存在应力集中，最大应力为 2401.5MPa ，结合平均应力法及大变形法，可判定第五级整体叶盘试验件在 $T=400^\circ\text{C}$ ， $v_p=26803 \text{ r/min}$ 的试验条件下会产生破裂^[5~13]。

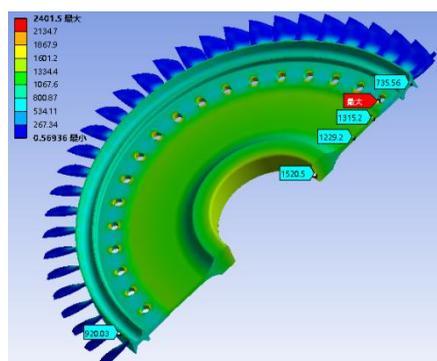
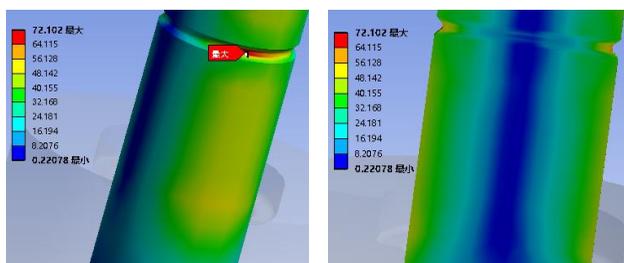


图 3 第五级整体叶盘试验件的等效应力

3.3.2 剪切应力

BI3 CENTRIO70 轴系中的芯轴在第五级整体叶盘试验件破裂试验条件下的剪切应力分布云图见图 4。由图 4a 所示，芯轴上自缺口至法兰装配上端面间均为剪切应力集中区；其缺口处的最大剪切应力为 72.102MPa ，见图 4b，缺口处截面剪切应力平均值约 50MPa ，远小于其材料的剪切强度^[14, 15] ($\tau_c=324\text{MPa}$)，该区域的安全系数不低于 4.5。由此可见，BI3 CENTRIO70 轴系（带缺口）在第五级整体叶盘试验件的破裂试验条件下，不会在盘变形所引起的不平衡力作用下剪切断裂。



a 芯轴（带缺口） b 芯轴（带缺口）轴向剖面

图 4 芯轴的剪切应力分布云图

芯轴在第五级整体叶盘试验件破裂试验条件下，当受到因试验件破裂产生的径向不平衡力 F 作用时，其缺口处截面剪切应力平均值与不平衡力 F 的对应关系见图 5。由图 5 可见，芯轴缺口截面上的剪切应力平均值随着不平衡力 F 的增大而明显升高。在 $F \geq 356\text{N}$ 时，其剪切应力平均值超过其材料的剪切强度。由此预见，当第五级整体叶盘试验件在破裂瞬间引起的不平衡力 $F \geq 356\text{N}$ 时，BI3 CENTRIO70 轴系（带缺口）将会在缺口处或其剪切应力集中区域出现剪切断裂。

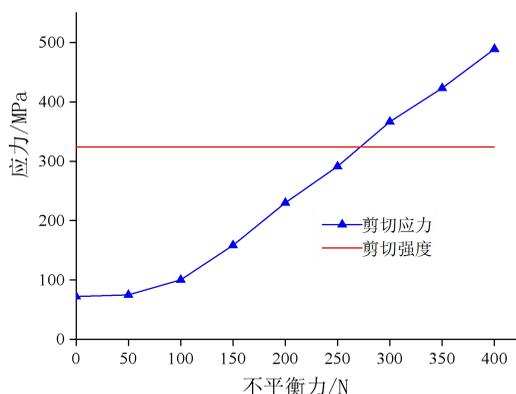


图 5 芯轴缺口处在不平衡力条件下的剪切应力曲线

BI3 CENTRIO70 轴系中的连接法兰在第五级整体叶盘试验件破裂试验条件下的应变云图见图 6。由图 6 所示，连接法兰与限位轴承衬套处的最大径向位移约 0.9mm ，小于其装配单边间隙 1mm ；轴系在缺口上段的最大径向位移 $<0.6\text{mm}$ ，远小于其与阻尼轴承间的装配单边间隙 2mm 。由此可见，在第五级整体叶盘试验件的破裂试验条件下，BI3 CENTRIO70 轴系所产生的径向位移较小，未触碰限位轴承及阻尼轴承。



图 6 BI3 CENTRIO70 轴系的应变云图

连接法兰在第五级整体叶盘试验件破裂试验条件

下,当受到因试验件破裂产生的径向不平衡力 F 作用时,连接法兰在限位轴承衬套处的最大径向位移与不平衡力 F 的对应关系见图7。由图7可知,连接法兰在限位轴承衬套处的最大径向位移随着不平衡力 F 的增大而增大。在 $F < 200\text{N}$ 时,该处的最大径向位移增大明显,并在 $F \geq 59.6\text{N}$ 时,其最大径向位移超过 1mm ,大于其装配单边间隙;在 $F \geq 200\text{N}$ 时,该处的最大径向位移的增大趋向平稳,限位轴承的限位作用愈趋明显。由此预见,当第五级整体叶盘试验件在破裂瞬间引起的不平衡力 $F \geq 59.6\text{N}$ 时,BI3 CENTRIO70轴系将触碰限位轴承;同时随着不平衡力的增大,限位轴承的限位作用愈趋明显。

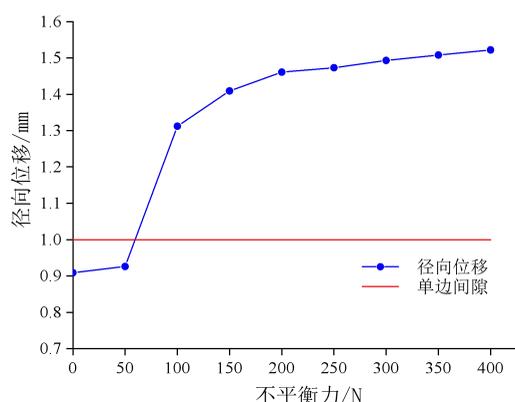


图7 连接法兰在不平衡力条件下的最大径向位移

4 破裂试验

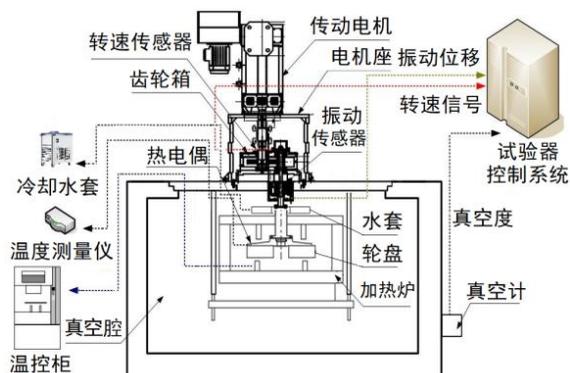


图8 超速试验器工作原理图

结合第五级整体叶盘试验转子的有限元分析结果,采用了BI3 CENTRIO70(带缺口)轴系进行其破裂试验。试验时,试验件通过转接芯轴与轴系相连,在超速试验器上为悬挂立式安装,转接芯轴上段配置冷却装置,控制轴系温度处于常温;试验件置于恒温加热炉内,通过控温装置实现试验温度;试验器上配置有

转速及振动传感器,用于监测试验件的转速及轴系的振动值,其工作原理见图8。

试验时,试验温度为 $T=(400 \pm 10)^\circ\text{C}$,当转速逐渐提升至 26038^{+100}r/min 并满载过程中,转子瞬间爆裂,破裂转速为 26080r/min ,主轴振动值突增至 $245\mu\text{m}$,试验过程中的转速与振动曲线,如图9所示。

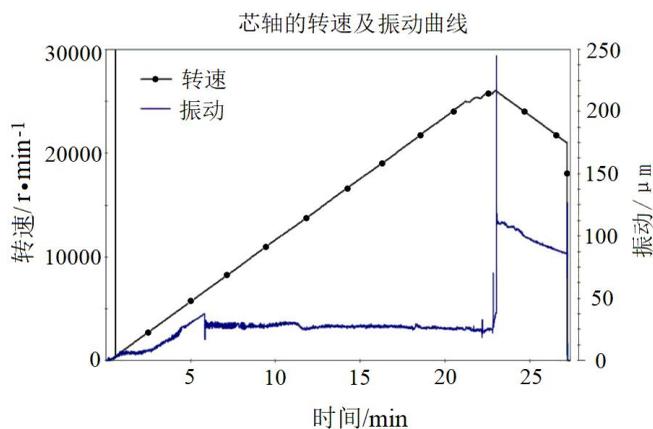


图9 试验过程转速与振动曲线

整个试验过程中,设备运转正常;试验结束时,轴系触碰限位轴承并于剪切应力集中区出现剪切断裂,上段未触碰阻尼轴承,确保了试验过程中的安全性,其试验前及试验后现场照片,见图10。



图10 试验现场照片

试验后,对 BI3 CENTRIO70 轴系进行外观检查,其芯轴于法兰安装上端面处出现剪切断裂,芯轴缺口上段表面光滑,无划痕;其法兰在限位轴承安装高度处存在碰伤凹痕,见图 10d,凹痕深度 $\leq 2\text{mm}$ 。结合有限元分析结果,可见第五级整体叶盘试验件在破裂瞬间产生的不平衡力不低于 356N, BI3 CENTRIO70 轴系在试验过程中触碰限位轴承,且未触碰阻尼轴承,与有限元分析结果相吻合。

5 结束语

a. BI3 CENTRIO70 轴系(带缺口)在第五级整体叶盘试验转子的破裂转速条件下,不会在盘变形所引起的不平衡力作用下断裂;当试验件破裂瞬间产生的不平衡力 $F \geq 356\text{N}$ 时,其缺口处的剪切应力将超过其材料的剪切强度,轴系将会在其剪切应力集中区域剪切断裂。

b. BI3 CENTRIO70 轴系(带缺口)在第五级整体叶盘试验转子的破裂转速条件下,其连接法兰在限位轴承处的最大径向位移小于其装配单边间隙。当试验件破裂瞬间产生的不平衡力 $F \geq 59.6\text{N}$ 时,该处的最大径向位移超过其装配单边间隙,轴系将触碰限位轴承。

c. 有限元分析的基础上,采用 BI3 CENTRIO70 轴系(带缺口)进行第五级整体叶盘的破裂试验。试验过程中,设备运转正常;试验结束时,轴系触碰限位轴承并于剪切应力集中区剪切断裂,且未触碰阻尼轴承,确保了试验过程中的安全性。

参考文献

1 陈欣,肖俊林,沈治国. 浅谈高速旋转试验机技术特点及开发方向[J]. 电

动工具, 2016(1): 6~9

2 蔡显新, 齐思鑫, 吴春来, 等. 航空发动机静强度设计中的保护准则探讨[J]. 机械工程学报, 2017, 53(13): 101~107

3 Standard M. Engine structure integrity program (MILHDBK-1783B) [M]. Washington, USA: United States Air Force, 2004

4 孙力, 胡绪腾, 宋迎东. 基于连续损伤力学的轮盘超转破裂行为预测与研制[J]. 航空发动机, 2018, 44(4): 39~44

5 古爱军, 张学仁, 王屏, 等. 轴流式轮盘破裂转速的数值计算方法[J]. 航空动力学报, 2001, 16(3): 287~290

6 吴长波, 卿华, 冯引利, 等. 某高压涡轮整体叶盘破裂转速计算方法及试验验证[J]. 燃气涡轮试验研究, 2006, 19(3): 33~36

7 万江艳, 周柏卓. 轮盘弹塑性盘破裂准则的建立及变厚度轮盘破裂转速预测[J]. 航空发动机, 2011, 37(5): 4~6

8 洪其麟, 王屏. 计算轮盘破裂转速的大变形解析法[J]. 航空动力学报, 1990, 5(4): 321~324

9 王屏, 刘思永. 用大变形解析法和小变形解析法计算轮盘破裂转速的比较[J]. 机械强度, 1998, 20(2): 95~98

10 Wilterdink P I, Holms A G, Manson S S. A theoretical and experimental investigation of the influence of temperature gradients on the deformation and burst speeds of rotating disks[R]. NACA-1952-2803

11 冯引利, 何云, 陈伟, 等. 轮盘径向破裂转速计算方法分析及修正[J]. 航空动力学报, 2014, 29(11): 2729~2734

12 郑祺选. 轮盘破裂转速试验研究[J]. 航空动力学报, 1990, 5(4): 318~320

13 邵帅, 刘秀芝, 魏峰, 等. 某低压涡轮盘破裂转速分析与试验验证[J]. 航空发动机, 2019, 45(2): 19~22

14 徐自立. 高温合金材料的性能、强度设计及工程应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006

15 闻邦椿. 机械设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010