

# 叶轮间隙差引起激振实验器的研究

北京航空航天大学 赵福安\*\*

**【摘要】** 叶轮相对机匣存在几何偏心时,作用在叶片上的气动力将会产生使转子发生失稳的横向力。经实践探讨,对其实验设备进行了设计尝试并经多次调试改进,终于获得了设计这项实验器的可行方法,经实用证明成功的捕捉到不同条件时 Alford 力值。

**关键词:** 叶轮间隙差 激振 实验器设计

## 1 理论分析

轴流压气机转子和涡轮转子由于动挠度或加工误差及安装不佳等原因,转子与机匣内空腔不同心,致使叶尖与机匣之间的间隙沿周分布不均。间隙小的区域叶片工作效率高,而间隙大的区域叶片工作效率相对低,因而造成工作叶片受到的切向气动力大小不等,其合力为一横向力,此力通称 Alford 力。Alford 力在涡轮中推动转子正进动,在压气机中推动反进动。

理论上证实这一力的存在并不困难,直观上也容易接受,这点从叶轮相对机匣偏心叶片受气动力显然大小不等的受力分析图 1 中得到解答。然而用实验手段精确的测出此力却极不容易,所以实验至今尚未得到满意的结果。其实验难度估计有 3 方面的主要因素:一是实验设备的结构合理性;二是实验器的加工、安装及调试技巧与精度,三是测试方法的得当。

## 2 实验器结构形式的探讨

本实验器在充分考虑到以上因素的前提下,设计并加工了一套叶轮旋转设备(图 2),经多次改装调试,直至排除多种微小杂乱振动源,成功地捕捉到 Alford 力。经试验证明此实验器成败的关键在于其实验器的理想化程度。现将其结构特点及典型经验教训分别介绍如下:

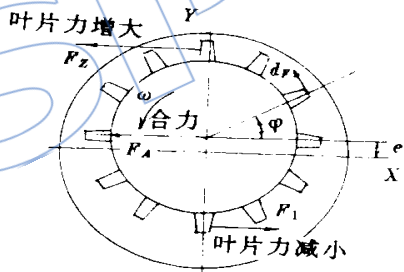


图 1 涡轮转子产生间隙激振原理

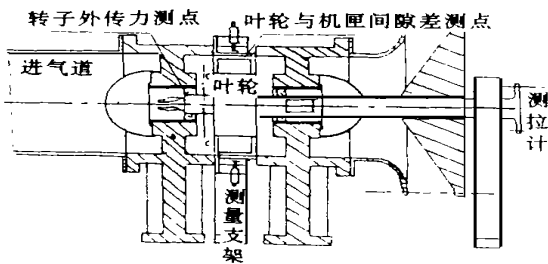


图 2 实验器结构

**叶轮:** 叶轮是本实验的主要试件, 为确保其精度和发动机压气机条件近似, 故选用了某型发动机压气机叶轮。其叶轮长 163mm, 直径 232mm, 由 13 个叶片与盘轴组成, 全重 4.75kg。它适应的工作转速可高达 30000r/min。其不足之处是长度太短; 致使叶轮前后离支承太近, 而难形成光滑稳定的气流流场, 这也是在实验过程发现难得到清晰稳定的 Alford 力的一个重要原因。为补救这种欠缺不得不把前支座上的弹性套筒和后支座上的刚性套筒反向悬臂装于支座上, 以此加长叶轮支座的距离以改善前后的气流稳定性。

**轴承:** 由于原叶轮轴条件限制, 轴承只能用内外环整体轴承, 即 HRB-207 普通机械轴承, 实验结果发现这种精度不高的轴承引起的微小杂波振动混杂到被测的参数中, 因此不得不设法改装上 276207Q 高精度高速滚珠轴承。

**弹性套筒:** 采用鼠笼式弹性套筒。它的刚性取决于笼条的长度、条数及条的断面尺寸。鼠笼刚性分别为  $K_1 = 13000\text{N/cm}$ ,  $K_2 = 8900\text{N/cm}$ , 采用如此低刚性的弹性套筒的目的是让其在不大的 Alford 力的作用下易于变形和便于测量, 同时让叶轮转子通过临界转速可进一步显示出 Alford 力的特性。

**测量转子轨迹的小轴:** 需要随时跟踪采集转子的轨迹信号, 但由于叶轮转子处于全包容状态无法测试, 因此在原叶轮轴的前端配加一段长为 110mm, 直径为 45mm 的延长轴, 用于轴心轨迹的测量。

**气流通道内壁:** 圆柱形的气流通道内壁是用铝板卷成的与叶轮盘直径相同的两节环筒, 分别悬臂固定在支承叶轮的前后支座上。环筒的另一端分别以 2mm 的轴向间隙靠近盘缘的前后, 以此形成气流通道的圆内壁。

**外机匣:** 气流通道的外壁即是机匣, 它是用无缝钢管加工而成, 壁外中端焊有安装发兰盘。其内径分别为 237.5、234 和 236mm 三类, 为试验改变叶轮与机匣的间隙用。其机匣长度分别设计成 170mm 和 314mm 等几种, 以便研究叶轮前后气流条件不同时 Alford 力的变化规律。

**机匣支架:** 机匣支架是用 100mm 原整钢板加工而成, 用来支承机匣和安装调节叶轮间隙的测头而用, 其上、下左右有 4 个螺栓把机匣固定在上面。机匣安装发兰盘的 4 个孔直径大于固定螺栓的直径, 另外支架上下左右分别装有测微头。只要把 4 个固定螺栓松开, 调节测微头, 便能精确的改变叶轮与机匣的偏心间隙。

**机匣的端面封严:** 机匣的前后端面与支承叶轮轴的前后铸铁座轴向环面贴紧。由于试验时需多次径向移动机匣位置, 给气体封严带来一定困难, 利用橡皮泥封其环隙可简便、可靠。气压测量孔沿靠近叶片进出口机匣径向分别开有 8 个 M6 螺孔, 以测试叶轮前后静压, 同时在机匣的前端开有 M6 螺孔, 后端开有 U 型缺口, 以安装测试叶轮前后的气流总压的测头。此孔和缺口的设计必须保证固定在两支座上的测压设施在径向转动机匣时不受碰撞。

**叶轮支座:** 叶轮前后支座均是铸造后精加工而成。后支座已经与其轴系调好同心并固定好后再在整个试验中无需拆动。而前支座一面支承叶轮的一端, 另一面还支承着长长的气流管道的一端, 因试验过程中需经常移动这一组件, 故在此座后的台面上加了轴向定位座, 以确保每次拆装后轴向位置相同。支座底部与通气管另一端支架底部均装了定位滑块, 以确保每次拆装后与其相配部件的同心。

**进气管道:** 气流管道用内径为 230mm 的无缝钢管作成, 全长 1.1m。为模拟发动机的工况, 此管道同样加了进气集流器, 叶轮后的气流出口处加了扩压管。

过渡轴: 由于叶轮轴伸出有限并处在铸铁座中心孔内, 要带动其旋转需经一过渡轴。其轴长 700mm, 一端由内花键与叶轮轴的外键相连; 另一端设计有连接盘与测扭轴端的连接盘连接并支承在同一支座上。

测扭弹性轴: 测扭弹性轴是为测定试验需用的扭矩而设计的。它是由一锻件加工而成易于变形的细轴, 两端有与细轴同一锻件车成的定位和联接用发兰盘, 一端与过渡轴相联, 另一端与增速器输出轴联轴器相联, 并与其支承在同一支座上。试件所需功率经此轴传递, 并使其产生相应的扭角变化, 由测到的扭角变化可计算它各种试验条件下需用的功率和扭矩。考虑到弹性轴扭转变形会有轴向约束力, 故此轴的联接型式为一端与过渡轴固接, 另一端连接形式设计成只能传扭而轴移动不受约束, 以避免不同心等因素引起的振动干扰。

电机转速控制: 用直流电机带动, 其转速为 3000r/min, 功率为 30kW。为满足高速试验的需要并在试件前加了增速比为 11.05 的增速器, 因而试件最高转速可高达 30000r/min 以上。转速的控制是用 KGSF21 可控硅装置无级调速。为确保各不同试验而转速在同一准线上, 各对比试验均是同一次开车并稳定在同一转速下进行。为防止或减小电机增速器的振动影响试验精度, 采取了电机增速器台基与试验装置台基分开的措施。

调心: 调心是本设备难度较大的工作, 整个设备有 7 根轴串联, 只要有一根轴同心不好, 其动态出现的振动就会混淆或掩埋掉 Alford 力的信号, 整个同心度达到 0.03mm 以下。排除了轴系 5 处振动源。

润滑: 增速器的润滑是用 A-30 号滑油经压力泵和加油泵快速循环。而对于试验器结构的润滑, 由于高速气流流经轴承处容易把不易封严的滑油带走, 减小油膜力对转子系统的影响, 突出所研究的 Alford 力影响。根据本试验每次开车时间持续不长的特点, 故采用了油脂润滑。为避免油脂随开车时间温差变化而引起阻尼不同给测量数据带来影响, 采取了开车预热措施, 使温差基本变化不大时进行试验。

## 3 测试方法

### 3.1 间隙的调整及测量

在静态 Alford 力的测量中, 为了要调整转子叶轮相对于机匣的位置在实验中应用调整机匣来得到不同的静偏心, 外机匣安装在支承架上, 在支承架上有 4 个微调螺栓, 通过调整微调螺栓来改变外机匣的位置, 从而获得相对转子的不同偏心位置。

### 3.2 Alford 力的测量方法

在本实验中, 为了测得作用在转子上的横向激振力 (Alford 力), 采用灵敏度较高的应变片贴在转子的前弹性支承上, 测量转子水平和垂直方向上的应变, 通过标定来得到作用在转子上的横向力。为了监视轴的运动轨迹在 B 点的水平和垂直方向均安装了非接触式涡流传感器, 通过测量轴的水平和垂直方向的振动, 来分析转子的动力特性。转速的测量是通过在测扭轴边的电涡流传感器测出。

### 3.3 静 Alford 力的测试

当调整机匣径向位置使叶轮相对机匣有一定偏心时, 因偏心大小和方向固定不变, 称静偏心, 引起的横向 Alford 力也大小方向固定不变, 故称为静 Alford 力。转子常有不平衡力必然同时使转子有一动挠度, 即叶轮还有一旋转的偏心, 简称动偏心, 此偏心必然引起一旋转

的 Alford 力。当转速和不平衡量一定时, 动 Alford 力大小不变但方向是随转子旋转的。静 Alford 力使应变产生静应变, 动 Alford 力使应变产生动应变, 故容易区别开来, 通过测量静应变, 标定后可得静 Alford 力。

### 3. 4 动 Alford 力的测试

动 Alford 力和转子上的不平衡力是同时存在, 且都与转子同速旋转, 故不能由应变片上测出动 (交) 应变标定出动 Alford 力, 必须消除不平衡力方能求得动 Alford 力。消除动 Alford 力的方法是先测出同转速下的不平衡量向量, 方法是将机匣后移远离叶轮, 使转子无动 Alford 力而仅有不平衡力, 然后再测出转子在机匣内动偏心旋转时的旋转振动向量, 并标定出力的向量, 两次所测向量相减便可求出动 Alford 力向量。

## 4 实验验证结果

对于动态 Alford 力的测量, 转子的动挠度是通过变化不同的附加不平衡量来实现的。由于 Alford 力的大小是正比于气动载荷的, 为了突出 Alford 力, 试验在超临界下进行。试验内容包括不同条件下轴轨迹等, 由于受篇幅之限, 本文仅就有机匣与无机匣时的对比实验捕捉到 Alford 力的测量结果列于表 1。其中  $Ae$  为无机匣时不平衡力激动的振幅,  $A$  为有机匣时 Alford 力和不平衡力同作用结果,  $Fa$  为通过换算后纯净的 Alford 值。

表 1 动态 Alford 力测量

| 转速   | 160Hz  | 180Hz  | 200Hz  | 220Hz   |
|------|--------|--------|--------|---------|
| $Ae$ | 420mv  | 500mv  | 450mv  | 430mv   |
| $A$  | 600mv  | 700mv  | 770mv  | 800mv   |
| $Fa$ | 17.9kg | 23.5kg | 29.9kg | 32.55kg |

结论 (1) 实验结果证明, 叶轮相对机匣偏心后, 确有 Alford 力产生, 这就证明了理论分析的正确性。(2) 实验所测静、动 Alford 力与理论分析结果基本一致, 参见文献 [1、2]。(3) 实用证明, 本文构思的扑捉 Alford 力实验器的设计是成功的。

致谢 本文在研制构思实验器的过程中, 博士生洪杰、王旭同学作过大量工作, 课题组成员曹福良同志在设备的安装调试工作中付出了艰辛的劳动, 在此表示谢意。

## 参 考 文 献

- 晏砺堂, 洪杰, 李其汉, 朱樟根, 赵福安. 压气机叶轮偏心引起的自激力和稳定性分析. 中国航空学会第三届动力年会 CSAA93- P- 033 (s)
- 晏砺堂, 洪杰, 李其汉, 朱樟根, 赵福安. 压气机叶轮偏心引起的自激力和稳定性研究. 中国航空学会第三届动力年会 CSAA93- P- 034 (s)

(责任编辑 王震华)