

# 高压压气机篦齿盘松脱原因分析及改进

## Analysis and Improvement for the Loosing of Labyrinth Disc of High Pressure Compressor

■ 宋宝鑫 姚世珍 马红涛 赵建 余祎腾 / 航发动力

发动机装配工艺过程中保证篦齿盘的稳定性是高压转子同心度控制的前提条件，若装配工艺方法不合理，轻则造成装配返工，重则造成零件损伤，引发发动机振动、碰磨等故障。

发动机振动的主要激振源是转子的不平衡量造成的，而转子不同心会使其质量偏心较大，进而产生较大的不平衡量<sup>[1]</sup>。工程上，一般以高压转子前、后轴颈为联合基准测量篦齿盘盘心孔跳动来表征高压转子的同心度<sup>[2]</sup>。在发动机装配过程中一般采取堆叠预测（SPS）技术对高压转子的同心度进行优化，为了使高压转子的不平衡量处于较低水平，还要进行高压转子组合平衡。然而，航空发动机结构复杂、装配精度高、装配流程长，装配工艺既要保证各零件之间有正确的配合和位置，还要求全装配流程有可靠的连接以及稳定的过程控制措施。高压压气机转子组件中，篦齿盘止口形位尺寸直接参与高压转子同心度预测，是关键装配参数，也是衡量装配品质的重要指标之一。

### 故障描述

发动机在完成一次试车后发生故障，按工艺要求需分解进行故障检查。在分解时发现，高压涡轮转子从核心机上拆下后，高压压气机转子后端的篦齿盘偏斜，手动检查后发现篦齿盘与高压压气机九级盘止口脱开。正常情况下，高压涡轮转子拆下时，篦齿盘与高压压气机九级盘连接止口仍处于较好的配合状态。

### 零件结构

高压转子主要由高压压气机转子和高压涡轮转子组成。高压压气机转子主要由多级带工作叶片的盘、篦齿盘和盘腔引气导流装置组成；高压涡轮转子主要由鼓筒轴、涡轮盘、工作叶片、前挡板、后挡板、盘前封严盘、后轴颈等零组件构成。篦齿盘将高压压气机转子与高压涡轮转子联成一体，用螺栓、螺母固定。为保证高压压气机与高压涡轮之间有较佳的装

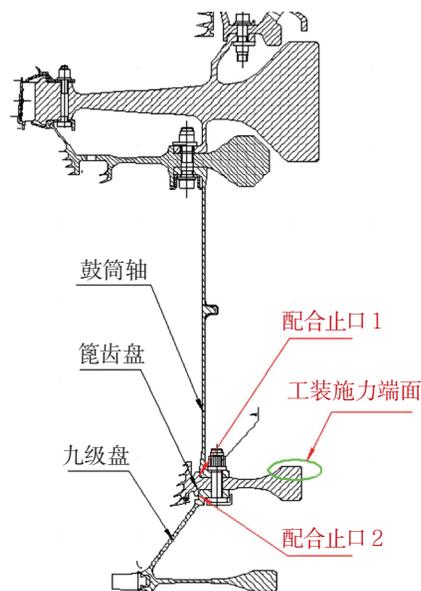


图1 高压转子局部示意

配定心和可靠的工作定心，篦齿盘与高压压气机转子、高压涡轮转子的配合止口均采用过盈配合，如图1所示。

### 装配工艺

发动机的总装工艺流程如图

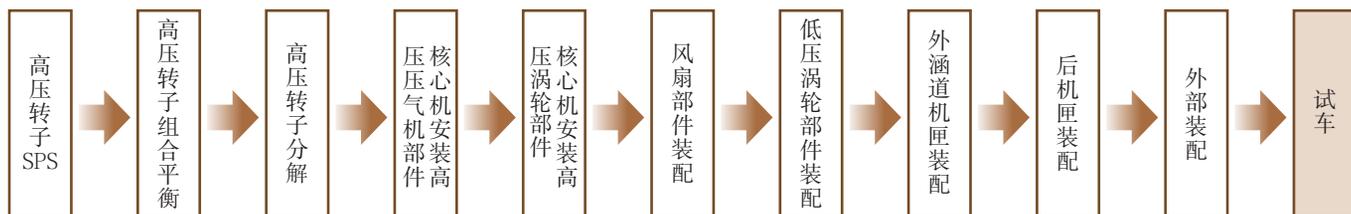


图2 发动机总装工艺流程

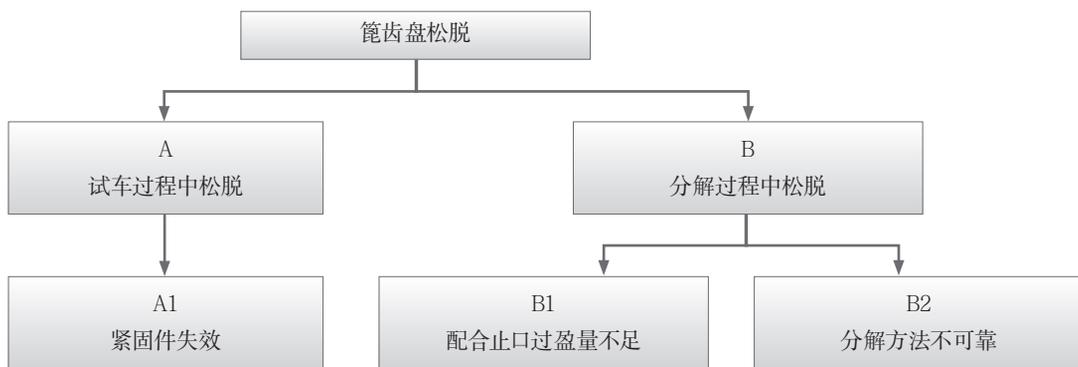


图3 篦齿盘松脱故障树



图4 高压涡轮转子专用分解工装

2所示。高压压气机转子与高压涡轮转子之间的配合为过盈0.051 ~ 0.144mm,为保证高压压气机转子(篦齿盘处)与高压涡轮转子能够顺利装配到位,采用温差装配法,即装前将高压涡轮转子止口用液氮冷冻一定的时间后,将其安装至高压压气机转子上。高压涡轮转子分解采用拉拔法对过盈配合的高压涡轮转子和高压压气机转子施加方向相反、大小相等的力将其分开。

## 故障原因分析

对篦齿盘松脱的原因列出故障树如图3所示,共梳理出底事件3项,依次进行分析排查。

### 篦齿盘连接紧固件

发动机分解前,检查固定篦齿盘的螺栓、螺母,完整性好;分解过程中,测量螺母的松脱力矩,均在正常的范围内;分解后,检查连接件螺纹及螺母贴合端面,未见损伤情况。排除底事件A1。

### 篦齿盘与压气机九级盘配合尺寸

分解后,对篦齿盘及压气机九级盘进行尺寸复测,计算压气机九级盘与篦齿盘之间的配合为过盈0.143mm,单件止口柱面跳动均在0.01mm以内,无异常。排除底事件B1。

### 高压涡轮转子分解方法

高压涡轮鼓筒前端的安装边上设计有6处M6的顶丝孔,用于将高压涡轮转子与高压压气机转子连接止口脱开。但采用顶丝分解时,需从高压涡轮后轴内孔进入转子鼓筒腔体内部进行作业,长时间俯身作业,劳动负荷较大,因此发动机采用了新改进的专用分解工装进行分解。

高压涡轮转子专用分解工装主要由定位板、传力轴、螺母组成,如图4所示。其原理为用定位板顶住篦齿盘盘心孔后端面,螺母与高压涡轮后轴内孔螺纹连接,借助手压泵通过传力轴向高压压气机篦齿盘和高压涡轮加载反向相等的力,加载力超过篦齿盘与高压涡轮转子过盈止口处的预压力,过盈配合段脱开。该方法能够极大缩减操作人员高压涡轮鼓筒腔内部的工作量和作业时间,显著提升分解效率。

仔细分析该分解工装结构可以发现,工装前端定位板支撑在篦齿盘盘心孔后端面上能够简化人员操作,但分解力加载位置距篦齿盘配合止口较远,加载时可能会引起篦齿盘前端止口变形,导致篦齿盘与九级盘配合处过盈量变小甚至消失,在高压涡轮转子连接止口脱开的瞬

间,篦齿盘与九级盘配合止口也一并脱开,篦齿盘松脱。

### 仿真分析

采用软件对鼓筒轴与篦齿盘(含九级盘)的分解过程进行计算,计算中对所用实体模型零件特征进行简化,为了便于计算,有限元模型也进行了简化,周向取1/4。

在盘心孔后端面施加分解力,对鼓筒轴与篦齿盘(含九级盘)组件进行有限元分析,结果显示:盘心孔轴向偏移0.536mm,螺栓孔轴向偏移0.149mm,篦齿盘前端止口最大径向单边偏移0.0489mm,如图5所示。

通过上述分析,在篦齿盘盘心孔后端面施加分解力时,篦齿盘变形较大,前端止口径向偏移量与配合过盈量接近。由此可以断定,故障发动机篦齿盘脱出是新结构分解工装加载位置不合理引起篦齿盘前端止口变形过大造成的。

## 改进措施

改进分解工装定位板结构,将分解加载位置由篦齿盘盘心孔后端面调整至篦齿盘安装边处,如图6所示。

在篦齿盘安装边施加分解力,对鼓筒轴与篦齿盘(含九级盘)组件进行有限元分析,结果显示:盘心

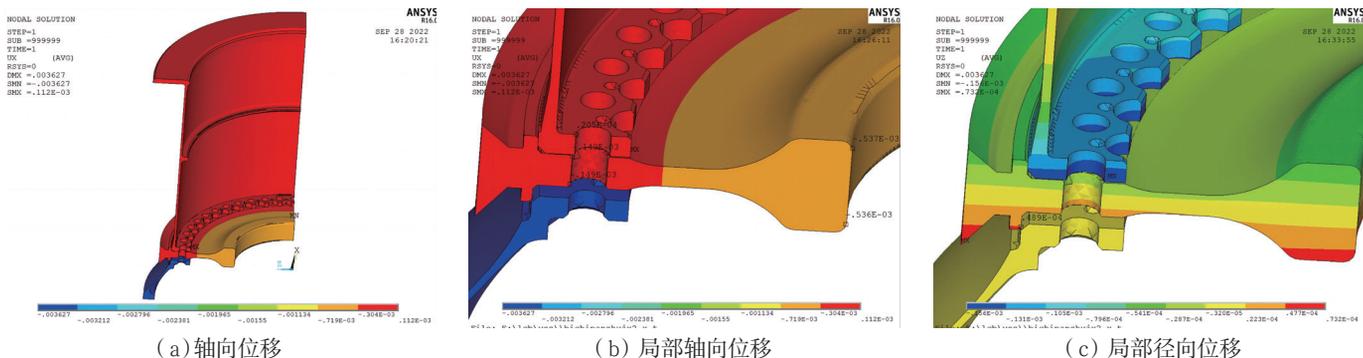


图5 盘心孔后端面施加分解力仿真

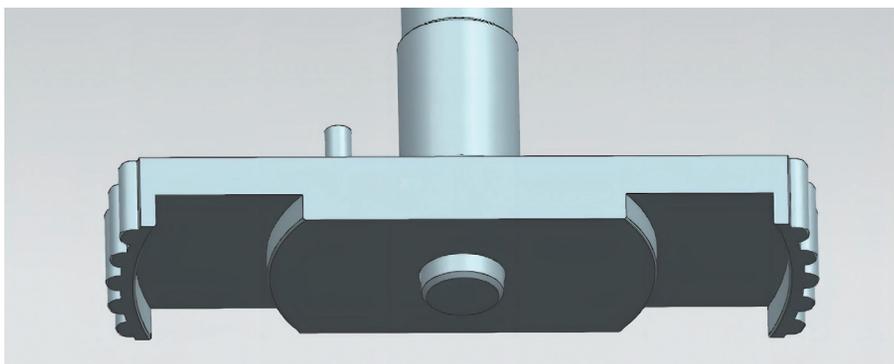


图6 分解工装定位板结构（改进后）

孔轴向偏移0.94mm，螺栓孔轴向偏移0.865mm，篦齿盘前端止口最大径向单边偏移0.0169mm，如图7所示。

### 结束语

通过对故障原因的排查、分析及仿真，可以得出以下结论：将篦齿盘

盘心孔端面作为高压涡轮转子分解加载位置，会引起篦齿盘前端止口径向严重变形，变形量几乎与止口配合过盈量相当，分解时存在篦齿盘与九级盘止口松脱的风险；将分解工装的加载位置由篦齿盘盘心孔端面调整至安装边处，篦齿盘前端

止口的径向变形能够改善65.4%。对高压涡轮转子分解工装进行结构优化，有效规避了分解过程中篦齿盘脱落的风险，新结构的分解工装能够大幅降低操作人员的劳动强度，一定程度上提高了装配效率。

**航空动力**

（宋宝鑫，航发动力，工程师，主要从事航空发动机装配工艺技术研究）

### 参考文献

- [1] 吴法勇,王娟.基于同心度测量的转子不平衡量装配优化技术:第十五届中国科协年会航空发动机设计、制造与应用技术研讨会论文集[C].贵阳:中国科学技术协会,2013.
- [2] 李琳,刘浩,朱林波,等.航空发动机高压转子关键装配参数仿真分析[J].航空制造技术,2022,65(12):72-76.

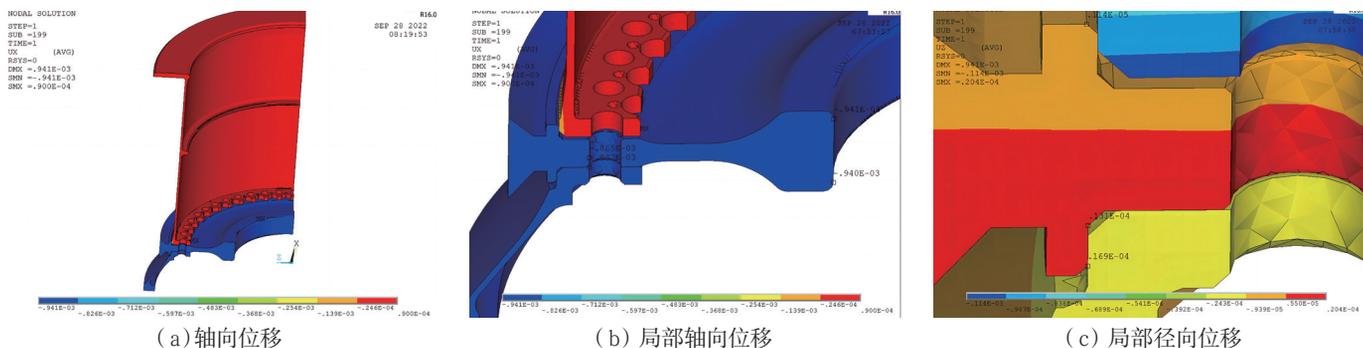


图7 篦齿盘安装边施加分解力仿真