

引文格式: 李鹏飞, 金彬, 丰少宝, 等. 基于同心度优化的高压压气机转子装配工艺研究[J]. 航空制造技术, 2025, 68(11): 104-111.

LI Pengfei, JIN Bin, FENG Shaobao, et al. Research on assembly technology of high-pressure compressor rotor based on concentricity optimization[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(11): 104-111.

基于同心度优化的高压压气机转子装配工艺研究

李鹏飞, 金彬, 丰少宝, 张涛涛, 祖建国

(中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

[摘要] 为了提高航空发动机高压压气机转子装配后的同心度水平、同心度测量结果的稳定性, 以及叠加装配过程预测结果的准确性, 对压气机转子装配时无法对组件后止口端面垂直度优化、同心度测量结果重复性差等问题开展研究。通过建立核心机转子中间截面偏心量计算模型, 分析得出压气机转子组件后止口垂直度偏差对核心机转子中间截面偏心量的影响是同心度偏差的 3.4 倍。通过建立压气机转子组件同心度测量过程基准修正模型, 分析得出测量结果重复性差、预测结果准确性差的原因是转子高度与基准端面半径的比值较大导致修正后结果对前轴颈基准端面不同径向位置的拟合型面微小差异高度敏感, 因此通过减小转子高度与基准端面半径的比值, 将组件后止口端面作为测量基准并改进叠加装配方向既可以改善转子同心度测量结果的稳定性, 又可以在叠加优化过程中考虑后止口端面垂直度的影响。验证结果表明, 改进后装配工艺相比原装配工艺转子的同心度偏差减小了 68%, 同时测量结果重复性误差由 32% 降至 13%。

关键词: 高压压气机; 转子装配; 同心度; 垂直度; 叠加优化

中图分类号: V263.2+2

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.11.104



李鹏飞

高级工程师, 从事航空发动机装配工艺技术研究。

航空发动机转子在高温、高压环境中高速旋转, 同心度是检验多级转子装配质量的核心参数^[1]。当航空发动机在工作转速下, 如民用发动机一般工作转速可达 12000 r/min 以上^[2], 多级转子装配后同心度误差引起的不平衡响应会被放大, 导致发动机振动, 造成叶片与机匣发生碰磨^[3-4]。转子的同心度水平对发动机的性能参数和振动响应都有显著影响, 需要在装配过程中进行准确测量和控制^[5]。

国内在航空发动机多级盘转子同心度优化方面, 广泛采用基于矢量堆叠优化的方法^[6-8]。曹茂国^[9]利用 Powell (鲍威尔) 法优化多级盘转子结构的不平衡量。在此基础上, 李立新等^[10]提出基于遗传算法的优化理论使计算过程得到优化。刘君等^[11]通过计算转子旋转轴线与部件

惯性轴之间的偏差, 提出一种转子同心度和不平衡量的估算方法。据奕鹏等^[12]通过分析转子系统跳动与不平衡量叠加机理及相互影响关系, 介绍一种基于双目标优化理论的装配工艺优化方法。单福平等^[13]通过建立航空发动机典型转子件形位偏差的尺寸链模型来实现装配偏差的分布形态计算。Yang^[14]提出了一种通过在装配过程中逐步减小偏心量来控制误差传播的准直装配模型, 通过该模型对发动机转子装配时的偏心量进行逐级控制, 从而达到对最终装配体的装配质量进行预测的目的。Hussain 等^[15]针对轴对称的刚性转子, 提出通过逐级减小偏心误差来对装配质量进行优化的方法, 实现了对部件几何公差优化。

虽然应用以上研究成果能够实

现高压压气机转子装配过程中的同心度控制和优化,但在工程应用领域,仍存在无法优化高压压气机转子组件后止口端面垂直度、同心度测量结果重复性差、叠加装配同心度结果预测准确性差等问题,针对以上问题开展研究,提出解决措施并进行验证,为后续压气机转子同心度优化装配提供了具体指导。

1 转子同心度优化装配工艺现状及存在的问题

某航空发动机高压压气机转子主要由一/二级盘、三级盘轴、四~九级鼓筒、篦齿盘组成,通过紧度配合止口定心、螺栓连接的方式将各级轮盘装配形成转子组合件,高压压气机转子结构如图1所示。

轮盘部件的定位(同心度)和定向(垂直度)偏差在装配过程中通过接触面进行传递,影响装配后转子组合件的累积偏心误差,进而影响其同心度偏差,偏差传递关系如图2所示。根据国家标准 GB/T 1182—2018 对同心度的定义^[16],装配过程测量的同心度是指止口柱面最小二乘拟合圆的圆心相对于基准轴线的偏移程度,且同心度偏差大小是偏心的2倍,同心度相位是偏心相位角,垂直度是止口连接端面最小二乘拟合平面相对基准轴线在垂直方向的变动量,垂直度偏差大小为拟合平面在基准轴线垂直方向的两平行平面间距离,垂直度相位为拟合平面高点角相位。

多级盘转子同心度偏差传递关系可表达为

$$\begin{cases} \overline{Sp}_i = \overline{Z}_{Dat_i} - \frac{\overline{D}_{Dat_i} \cdot H_{pro_i}}{R_i} \\ \overline{Z}_{Dat_i} = \sum_{i=1}^n \overline{Sp}_i \end{cases} \quad (1)$$

式中, \overline{Sp}_i 为单件同心度、垂直度对组件同心度偏差影响矢量,mm \angle° ; \overline{Z}_{Dat_i} 为单件同心度偏差矢量,mm \angle° ; \overline{D}_{Dat_i} 为

单件垂直度偏差矢量,mm \angle° ; R_i 为单件连接面半径,mm; H_{pro_i} 为单件连接面至组件优化面高度,mm; \overline{Z}_{Dat_i} 为转子组件同心度偏差矢量,mm \angle° 。

装配过程利用测量系统测量各轮盘止口柱面拟合圆的同心度偏差矢量参数和拟合端面的垂直度偏差矢量参数,测量基准和测量部位如图3所示,以各轮盘的相对安装相位为设计变量,以转子组合件篦齿盘后止口柱面同心度 \overline{R}_{06} 最小为优化目标,实现转子组件同心度的预测和优化装配。

测量系统的4套传感器通过一次测量提取出被测转子的基准面和

被测面的径向和轴向装配面轮廓信息,如图4所示。采用最小二乘法实现基准和被测位置平面和圆心的拟合^[17],进而分离出测量面相对于转台回转主轴的位置偏差。

按照使装配后组件的篦齿盘后止口柱面同心度 \overline{R}_{06} 达到最小的原则,对压气机转子进行同心度优化装配的工艺方法存在以下问题。

(1)仅优化压气机转子组合件篦齿盘后止口柱面的同心度,无法对篦齿盘后止口连接端面的垂直度进行优化,优化目标单一,导致装配后虽然组件状态下篦齿盘后止口柱面同心度可以优化到较小,但组件篦齿

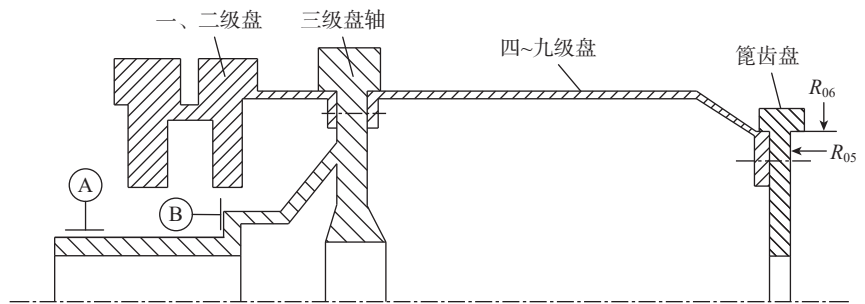


图1 压气机转子组件结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of compressor rotor assembly structure

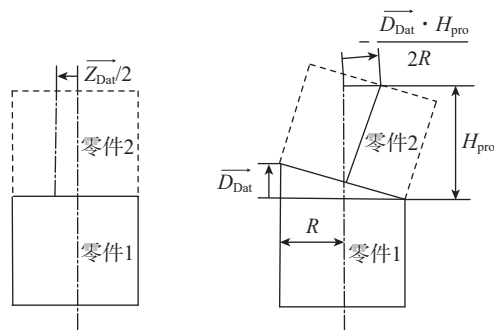


图2 同心度偏差传递示意图
Fig.2 Schematic diagram of concentricity error transfer

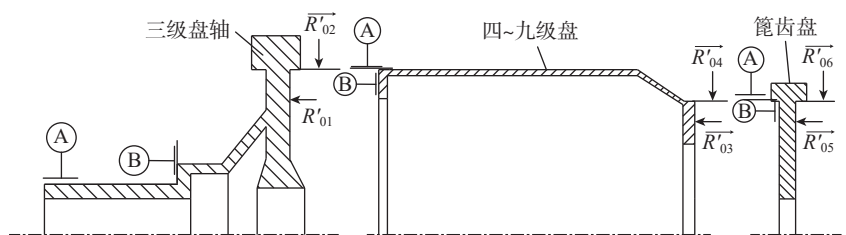


图3 各轮盘测量示意图
Fig.3 Schematic diagram of the measurement of each turbine disk

盘后止口端面垂直度可能会超出设计要求,对装配高压涡轮转子组件后的核心机转子中间截面偏心量会产生不利影响,核心机转子同心度过大,产生附加不平衡量,进而引起整机振动超限。

(2) 实际应用中发现,同一转子重复进行同心度测量时测量结果的重复性差,结果预测准确性差,测量重复性极差的大小甚至达到 0.025 mm,极差大小甚至与转子同心度的设计限制值相当,某转子重复多次测量结果如图 5 所示。

2 压气机转子篦齿盘后止口位置偏差对核心机转子中间截面偏心量影响分析

为定量分析压气机转子篦齿盘后止口端面垂直度及同心度对核心机转子中间截面偏心量的影响,首先建立基准变换模型,如图 6 所示。以前轴颈柱面 A、轴肩端面 B 为基准测量组件后止口的拟合端面的垂直度偏差矢量为 $\overline{R_{05}}$,止口柱面拟合圆的同心度偏差矢量为 $\overline{R_{06}}$,根据几何关系,变换为以组件后止口柱面 C、端面 D 为基准,前轴颈的轴肩拟合端面的垂直度偏差矢量为 $\overline{R_{01}}$,轴颈柱面拟合圆的同心度偏差矢量 $\overline{R_{02}}$ 的表达式为

$$\begin{cases} \overline{R_{02}} = -\left(\frac{H}{R} \cdot \overline{R_{05}} + \overline{R_{06}}\right) \\ \overline{R_{01}} = -\frac{r}{R} \cdot \overline{R_{05}} \end{cases} \quad (2)$$

式中, H 为转子组件前轴颈柱面基准至篦齿盘后止口高度, mm; r 为前轴颈轴肩端面基准半径, mm; R 为转子组件后止口半径, mm。

如图 7 所示,某发动机核心机转子由高压压气机转子和高压涡轮转子组成,建立核心机转子中间截面相对前、后轴颈柱面基准的偏心量计算模型。 EF 为以两转子配合止口确定的基准轴线; \overline{CO} 为篦齿盘后止口柱面相对于前后支点构成的回转轴线

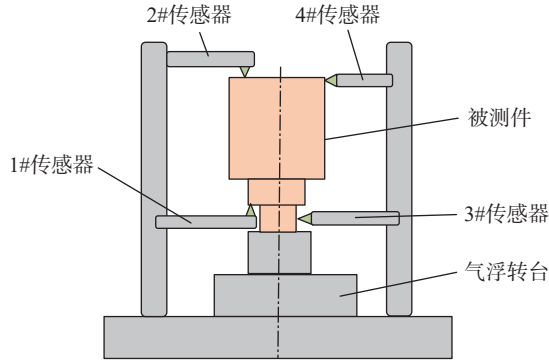


图 4 转子同心度测量过程示意图

Fig.4 Schematic diagram of the rotor concentricity measurement process

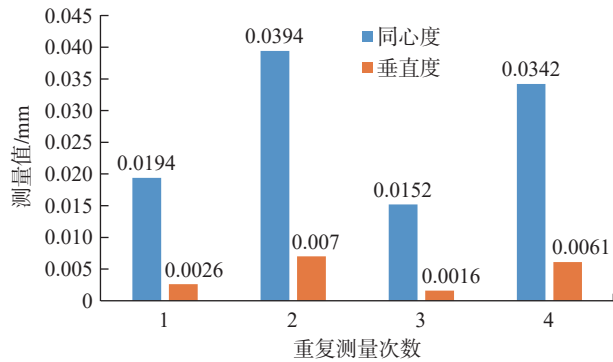


图 5 同一转子多次测量结果

Fig.5 Multiple measurement results of the same rotor

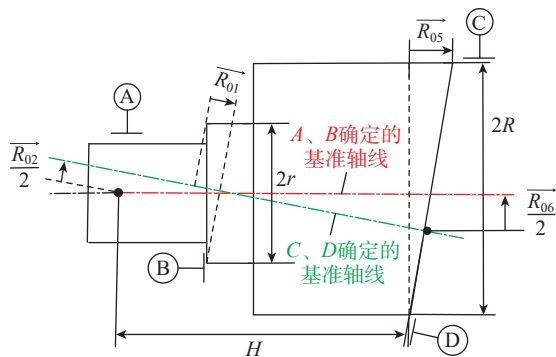


图 6 基准变换示意图

Fig.6 Schematic diagram of the reference transformation

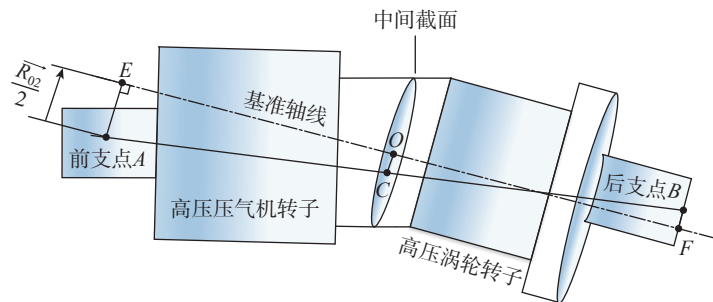


图 7 中间截面偏心量计算模型

Fig.7 Calculation model of eccentricity of middle section

AB 的偏心矢量; \overline{FB} 为高涡转子后轴颈相对于鼓筒前止口基准 OF 的偏心矢量; \overline{EA} 为压气机转子前轴颈相对于篦齿盘后止口基准 OE 的偏心矢量, 当高压压气机转子与高压涡轮转子的偏心方向呈 180° 装配时, 核心机转子中间截面偏心量最小。

根据几何关系, 核心机转子中间截面最小偏心量大小的计算值为

$$|\overline{CO}| = \frac{|\overline{FB}| \cdot AC - |\overline{EA}| \cdot BC}{AB} \quad (3)$$

对于压气机转子

$$\overline{EA} = \frac{\overline{R_{02}}}{2} = -\frac{1}{2} \times \left(\frac{H}{R} \cdot \overline{R_{05}} + \overline{R_{06}} \right) \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)可得核心机转子中间截面相对前后支点轴线的最小偏心量, 即

$$|\overline{CO}| = \frac{|\overline{FB}| \cdot AC - \left[\frac{H}{2} \times \left(\frac{H}{R} \cdot \overline{R_{05}} + \overline{R_{06}} \right) \right] \cdot BC}{AB} \quad (5)$$

根据式(5), 压气机转子篦齿盘后止口端面垂直度 $\overline{R_{05}}$ 对核心机转子中间截面偏心量的影响比例系数为 3.4 ($H/R=3.4$), 篦齿盘后止口同心度 $\overline{R_{06}}$ 对核心机转子中间截面偏心量的影响比例系数为 1, 即相同量级的垂直度偏差对核心机转子中间截面偏心量的影响是同心度偏差的 3.4 倍, 因此从核心机转子同心度优化的角度, 必须要优化压气机转子后端连接端面的垂直度。

3 转子同心度测量结果重复性差原因分析

为确定引起压气机转子同心度测量重复性差的根本原因, 应用鱼骨图分析法, 从人、机、料、法、环等方面列举了可能引起该问题的因素, 共 9 项, 如图 8 所示。

通过对操作工艺过程复查、设备参数设置复查、测量环境监测、物料复查, 排除了人员、物料、环境的影响, 重点对测量设备系统误差及算法影响两方面进行分析。

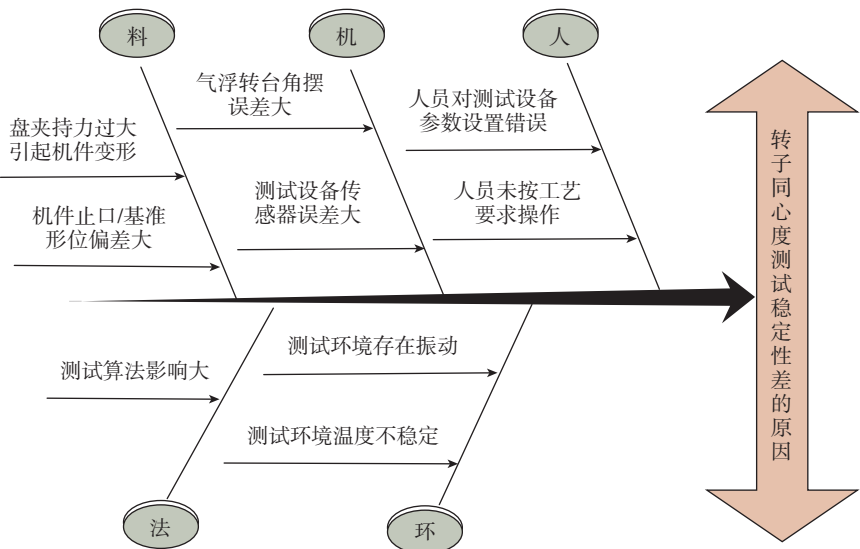


图 8 压气机转子同心度测量稳定性差原因鱼骨图

Fig.8 Fishbone diagram of reasons for poor stability of compressor rotor concentricity measurement

3.1 测量设备误差分析

测量设备的误差包括气浮转台角摆误差、测量设备传感器误差。

因回转轴线存在一定角摆会导致角摆误差 Δ_{Table} , 如图 9 所示。

$$\Delta_{Table} = \tan \alpha \times L \quad (6)$$

式中, α 为角回转精度, ($^{\circ}$); L 为测量截面至调倾零点跨距, mm。

经校准, 气浮转台的角回转精度为 0.7", 压气机转子篦齿盘后止口端面距调倾零点的跨距为 861.75 mm, 根据式(6)可以计算出 $\Delta_{Table}=2.92 \mu\text{m}$ 。

测量系统配备 GT31 (杠杆式) 和 AX/1/SHT (伸缩式) 2 型电感位移传感器共 4 支, 将传感器校准数据中 $\pm 50 \mu\text{m}$ 范围内最大示值误差作为传感器示值误差, 测量设备的误差 Δ_m 为转台角摆误差 Δ_{Table} 和传感器示值误差 $\Delta_{Sensors}$ 的综合误差, 即

$$\Delta_m = \sqrt{\Delta_{Table}^2 + \Delta_{Sensors}^2} = ((2.92)^2 + (+0.6)^2 + (-0.8)^2 + (+0.6)^2 + (-1.2)^2)^{\frac{1}{2}} = 3.365 \mu\text{m} \quad (7)$$

测量设备的综合误差为 3.365 μm , 并非引起测量结果重复性差的主要原因。

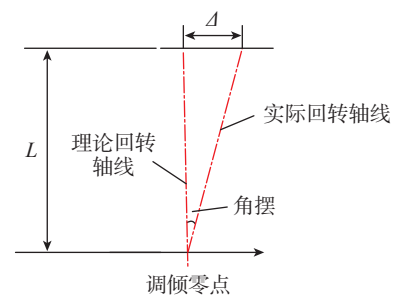


图 9 角摆误差原理图

Fig.9 Schematic diagram of angular swing error

3.2 算法影响分析

压气机转子在转台进行跳动测量过程如图 4 所示, 4 支传感器分别测量在转台回转轴线下机件基准面及机件被测面的位置误差, 为获得被测面相对机件基准轴线下同心度及垂直度, 建立基准修正模型(图 10), 根据几何关系, 则有

$$\overline{Z_{Dat}} = \frac{2 \times (H + H_0)}{r} \cdot \overline{D_{tilt}} + \overline{Z_{Rot}} - 2 \cdot \overline{Z_{cen}} \quad (8)$$

$$\overline{D_{Dat}} = \overline{D_{Rot}} - \frac{2 \times R'}{r'} \cdot \overline{D_{tilt}} \quad (9)$$

式中, $\overline{Z_{Dat}}$ 为被测柱面相对机件基准轴线的同心度偏差矢量, $\text{mm} \angle ^{\circ}$; $\overline{Z_{Rot}}$ 为被测柱面相对转台轴线的同心度

偏差矢量, $\text{mm}\angle^\circ$; $\overline{D_{\text{tilt}}}$ 为基准端面相对转台轴线的垂直度偏差矢量的 $1/2$, $\text{mm}\angle^\circ$; $\overline{Z_{\text{cen}}}$ 为基准柱面相对转台轴线的偏心矢量, $\text{mm}\angle^\circ$; $\overline{D_{\text{Dat}}}$ 为被测端面相对基准轴线的垂直度偏差矢量, $\text{mm}\angle^\circ$; $\overline{D_{\text{Rot}}}$ 为被测端面相对转台轴线的垂直度偏差矢量, $\text{mm}\angle^\circ$; R' 为被测端面的测量半径, mm ; r' 为基准端面的测量半径, mm ; H_0 为前轴颈柱面基准至端面基准高度, mm ; H 为前轴颈端面基准至被测柱面高度, mm 。

本研究所用压气机转子的 H_0 为 40 mm , H 为 523 mm , r' 为 60.5 mm , R' 为 165 mm 。

根据式 (8) 及表 1 的结构参数, 偏心矢量 $\overline{Z_{\text{cen}}}$ 对被测柱面同心度偏差矢量 $\overline{Z_{\text{Dat}}}$ 的影响比例系数为 2, 而倾斜矢量 $\overline{D_{\text{tilt}}}$ 对被测柱面同心度偏差矢量 $\overline{Z_{\text{Dat}}}$ 的影响比例系数是 17.7。因此, 当重复测量不改变机件姿态, 仅改变基准端面传感器的径向位置时, 受基准端面不同径向位置型面差异的细微影响, 倾斜矢量 $\overline{D_{\text{tilt}}}$ 的微小变化会导致基准修正后被测柱面的同心度偏差矢量 $\overline{Z_{\text{Dat}}}$ 产生很大的变化, 即在同等测量精度的条件下, 不同基准端面径向位置对最终测量误差有较大影响。

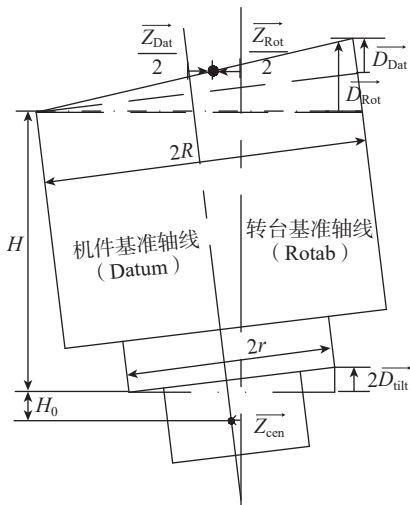


图 10 基准修正模型

Fig.10 Datum correction model

4 装配过程同心度结果预测准确性分析

叠加装配过程的同心度预测值是通过单件 $\overline{Sp_i}$ 的矢量叠加计算得到的, $\overline{Sp_i}$ 反映了单件同心度偏差、垂直度偏差对组件同心度偏差的综合影响。

为了得到 $\overline{Sp_i}$ 与原始测量结果的关系, 将式 (8) 和 (9) 代入式 (1) 可得

$$\overline{Sp_i} = -\frac{H_{\text{pro}_i}}{R_i} \times \overline{D_{\text{Rot}_i}} + \left[\frac{2(H_{\text{pro}_i} + H_i + H_{0_i})}{r} \right] \times \left[\overline{D_{\text{tilt}_i}} + \overline{Z_{\text{Rot}_i}} - 2 \times \overline{Z_{\text{cen}_i}} \right] \quad (10)$$

将各单件结构参数代入式 (10), 得到各测量参数对单件 Sp_i 的比例系数, 如表 1 所示。

由表 1 可以看出, 导致堆叠预测结果出现很大不确定性的主要原因是装配基准件三级盘轴的 D_{tilt} 比例系数为 17.56, 过大的比例系数使 Sp_i 结果对基准端面拟合型面过于敏感, 这与测量结果重复性差的原因是一致的。

5 转子同心度优化装配工艺改进

综合以上分析, 原装配工艺以三级盘轴作为装配基准及组件同心度测量基准, 以装配形成组件后篦齿盘后止口柱面同心度最小为优化目标进行位置偏差测量及装配, 该工艺过程存在测量结果重复性差, 预测准确性差等问题, 导致该问题的主要原因

是转子高度与作为装配基准件的三级盘轴肩端面半径比值较大, 且该工艺过程未对组件篦齿盘后止口端面垂直度优化。若以篦齿盘后止口作为同心度测量基准, 以前轴颈柱面同心度 (图 11 中 R_{02}) 最小为优化目标进行叠加装配及组件同心度检查, 既能通过减小转子高度与基准端面半径的比值来改善转子组件同心度测量结果的重复性、预测结果的准确性, 又能通过将压气机转子组件篦齿盘后止口端面设置为测量基准而达到控制其垂直度的目的, 改进后工艺的叠加优化方向与单件测量示意图如图 12 所示, 组件同心度测量如图 11 所示。

6 工艺试验验证

为验证改进装配工艺对转子同心度及测量结果重复性的改善效果, 设计并进行了工艺试验。

对 5 台压气机转子采用原装配工艺进行装配、位置偏差测量, 装配后按图 11 进行转子组件同心度测量, 结果如表 2 所示。

采用改进装配工艺进行装配、位置偏差测量, 装配后按图 11 进行转子同心度测量结果如表 3 所示。

对比表 2、表 3 结果, 以 5 台转子测量结果的算术平均值作为最佳估计值, 可见改进后的装配工艺相比原装配工艺, 转子的垂直度偏差无明显变化, 转子的同心度偏差减小了 68%, 验证了改进叠加优化方向的装配工艺方法的有效性。

表 1 单件各测量参数对 Sp_i 值的比例系数

Table 1 Proportional coefficients of each measurement parameters of a single piece to the Sp_i value

单件	D_{Rot}	Z_{Rot}	D_{tilt}	Z_{cen}
三级盘轴	1.9	1	17.56	2
四~九级盘	0.059	1	3.7	2
篦齿盘	0	1	0.15	2

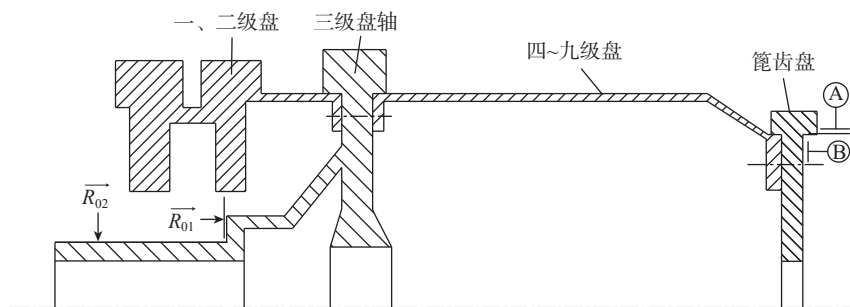


图 11 改进后组件同心度测量示意图

Fig.11 Schematic diagram of the improved component concentricity measurement

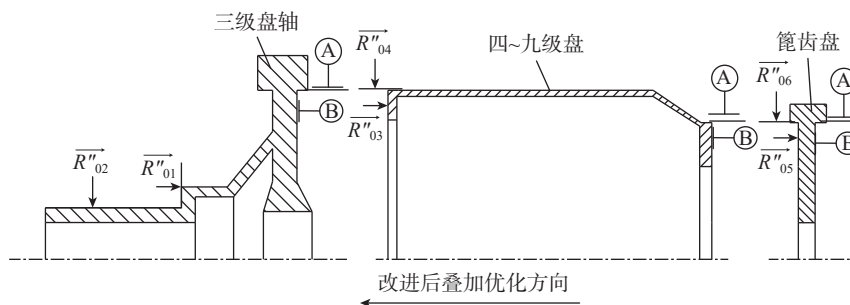


图 12 改进后工艺的叠加优化方向与单件测量示意图

Fig.12 Schematic diagram of superposition optimization direction and single piece measurement of the improved process

表 2 原装配工艺转子同心度测量结果

Table 2 Measurement results of rotor concentricity in the original assembly process

转子序号	同心度/mm	偏心角/(°)	垂直度/mm	最高点位置/(°)
1	0.0550	267	0.0073	167
2	0.0467	263	0.0047	250
3	0.0449	160	0.0054	171
4	0.0445	122	0.0038	129
5	0.0386	233	0.0017	246
平均值	0.0459	—	0.0045	—

表 3 改进装配工艺转子同心度测量结果

Table 3 Measurement results of rotor concentricity in the improved assembly process

转子序号	同心度/mm	偏心角/(°)	垂直度/mm	最高点位置/(°)
1	0.0173	122	0.0063	266
2	0.0147	244	0.0037	68
3	0.0165	150	0.0062	317
4	0.0117	179	0.0044	299
5	0.0133	75	0.0025	261
平均值	0.0147	—	0.0046	—

对某一转子同心度进行 i 次测量 ($i=1,2,3,\dots,n$), 其中按图 1 以前轴颈为基准, 测量篦齿盘后止口柱面同心度的结果记为 Δc_i , 按图 11 以篦齿盘后止口为基准, 测量前轴颈的柱面同心度的结果记为 $\Delta c'_i$, 测量结果如表 4 所示。

以测量结果的重复性误差评价两种方式测量结果的稳定性, 计算过程如下。

样本平均值为

$$\bar{\Delta c}_i = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta c_i}{n} \quad (11)$$

样本标准差为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta c_i - \bar{\Delta c}_i)^2}{n}} \quad (12)$$

重复性误差为

$$\Omega = \frac{\sigma}{\bar{\Delta c}_i} \times 100\% \quad (13)$$

根据式 (11)~(13) 计算得出改进测量方式相对原方式的结果重复性误差由 32% 降至 13%, 测量结果的稳定性显著提高。

7 结论

(1) 利用叠加优化方法仅优化压气机转子组件最终装配状态篦齿

表 4 转子同心度重复测量结果

Table 4 Repeated measurement results of rotor concentricity

测量次数 i	Δc_i /mm	$\Delta c'_i$ /mm
1	0.0194	0.0186
2	0.0394	0.0137
3	0.0152	0.0196
4	0.0342	0.0169
5	0.0227	0.0138
6	0.0383	0.0173
7	0.0166	0.0185
8	0.0362	0.0191
9	0.0282	0.0145
10	0.0290	0.0156

盘后止口柱面同心度,而未优化篦齿盘后止口端面垂直度的方式,会导致装配高涡转子后中间截面相对核心机转子支撑轴线产生较大的偏心量,通过建立压气机转子基准变化模型、核心机转子中间截面偏心量计算模型得出了压气机转子终端配合面的垂直度对核心机转子中间截面偏心量的影响是同心度影响量的3.4倍。

(2)通过分析计算得到压气机转子组件同心度测量结果重复性差、叠加结果预测准确性差的原因是转子高度与基准端面半径的比值较大,使测量设备的修正后结果对基准端面不同径向位置的型面轻微差异极其敏感,在同等测量精度的条件下,不同基准位置对最终测量误差有较大影响。

(3)以压气机转子组件篦齿盘后止口为测量基准,以前轴颈柱面同心度最小为优化目标的改进装配工艺,既能通过减小转子高度与基准端面半径的比值改善转子同心度测量结果的重复性、叠加预测结果的准确性,又能考虑转子组件篦齿盘后止口端面垂直度的影响。验证结果表明,改进后装配工艺相比原装配工艺,转子的同心度偏差减小了68%,同时测量结果重复性误差由32%降至13%。

参考文献

- [1] 刘永泉,王德友,洪杰,等.航空发动机整机振动控制技术分析[J].航空发动机,2013,39(5):1-8,13.
- [2] LIU S G, MA Y H, ZHANG D Y, et al. Studies on dynamic characteristics of the joint in the aero-engine rotor system[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 29: 120-136.
- [3] 郑旭东,张连祥.航空发动机整机振动典型故障分析[J].航空发动机,2013,39(1):34-37.
- [4] ZHENG Xudong, ZHANG Lianxiang. Typical failure analysis of aeroengine vibration[J]. Aeroengine, 2013, 39(1): 34-37.
- [5] EWINS D J. Control of vibration and resonance in aero engines and rotating machinery—An overview[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2010, 87(9): 504-510.
- [6] 吕玉红,吴法勇,魏秀鹏,等.整机装配阶段的同心度测量研究现状综述[C]//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.贵阳:中国科技协会,2013:123-128.
- [7] LU Yuhong, WU Fayong, WEI Xiupeng, et al. Summarization of concentricity measurement research in engine assembly progress[C]//Proceedings of the 15th China Association for Science and Technology Annual Conference on Aero engine Design, Manufacturing and Application Technology. Guiyang: China Science and Technology Association, 2013: 123-128.
- [8] 丁司懿,金隼,李志敏,等.航空发动机转子装配同心度的偏差传递模型与优化[J].上海交通大学学报,2018,52(1):54-62.
- [9] DING Siyi, JIN Sun, LI Zhimin, et al. Deviation propagation model and optimization of concentricity for aero-engine rotor assembly[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2018, 52(1): 54-62.
- [10] YANG Z, HUSSIAN T, POPOV A A, et al. A comparison of different optimization techniques for variation propagation control in mechanical assembly[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2011, 26: 012017.
- [11] YANG Z, HUSSAIN T, POPOV A A, et al. Novel optimization technique for variation propagation control in an aero-engine assembly[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2011, 225(1): 100-111.
- [12] 曹茂国.多级盘结构转子的工艺装配优化设计方法[J].航空发动机,1994,20(3):48-52.
- [13] CAO Maoguo. Optimal design method of process assembly for multi-stage disk structure rotor[J]. Aeroengine, 1994, 20(3): 48-52.
- [14] 李立新,艾延廷,王志,等.基于遗传算法的多级盘转子平衡方案优化设计[J].振动、测试与诊断,2008,28(2):139-142,182.
- [15] LI Lixin, AI Yanting, WANG Zhi, et al. Optimum design for balance in multi-disk rotor installation based on genetic algorithm[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2008, 28(2): 139-142, 182.
- [16] 刘君,吴法勇,王娟.航空发动机转子装配优化技术[J].航空发动机,2014,40(3):75-78.
- [17] LIU Jun, WU Fayong, WANG Juan. Optimization technique of aeroengine rotor assembly[J]. Aeroengine, 2014, 40(3): 75-78.
- [18] 琚奕鹏,吴法勇,金彬,等.基于转子跳动和初始不平衡量优化的多级盘转子结构装配工艺[J].航空发动机,2018,44(6):83-90.
- [19] JU Yipeng, WU Fayong, JIN Bin, et al. Structure assembly technique of multi-stage disc rotor based on rotor runout and unbalance optimization[J]. Aeroengine, 2018, 44(6): 83-90.
- [20] 单福平,李志敏,朱彬.航空发动机典型转子件装配偏差建模及分析[J].制造业自动化,2015,37(7):100-103.
- [21] SHAN Fuping, LI Zhimin, ZHU Bin. Modeling and analysis of assembling deviation of typical aeroengine rotor parts[J]. Manufacturing Automation, 2015, 37(7): 100-103.
- [22] YANG Z, MCWILLIAM S, POPOV A A, et al. A probabilistic approach to variation propagation control for straight build in mechanical assembly[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 64(5): 1029-1047.
- [23] HUSSAIN T, YANG Z, POPOV A A, et al. Straight-build assembly optimization: A method to minimize stage-by-stage eccentricity error in the assembly of axisymmetric rigid components (two-dimensional case study) [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2011, 133(3): 031014.
- [24] 国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会.产品几何技术规范(GPS)几何公差、形状、方向、位置和跳动公差标注:GB/T 1182—2018[S].北京:中国标准出版社,2018:65-92.
- [25] State Administration for Market Regulation, China National Standardization Administration. Geometrical product specifications (GPS)—Geometrical tolerancing—Tolerances of form, orientation, location and run-out: GB/T1182—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018: 65-92.
- [26] CHETWYND D G. Roundness measurement using limacons[J]. Precision Engineering, 1979, 1(3): 137-141.

Research on Assembly Technology of High-Pressure Compressor Rotor Based on Concentricity Optimization

LI Pengfei, JIN Bin, FENG Shaobao, ZHANG Taotao, ZU Jianguo
(AECC Shenyang Aero Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

[ABSTRACT] In order to improve the concentricity level and stability of concentricity measurement results after the assembly of high pressure compressor rotors in aircraft engines, as well as the accuracy of predicting results during the assembly process, research has been conducted on issues such as the inability to optimize the perpendicularity of the rear end face of the components and poor repeatability of concentricity measurement results during the assembly of compressor rotors. By establishing the calculation model of the eccentricity of the middle section of the core machine rotor, found that the influence of the perpendicularity error of the back end face of the compressor rotor on the eccentricity of the middle section of the core machine rotor was 3.4 times that of the concentricity error. By establishing the datum correction model of the concentricity measurement process of the compressor rotor, it is analyzed that the reasons for the poor repeatability of the measurement results and the poor accuracy of prediction results are that the ratio of the rotor height to the radius of the reference end face is large, which makes the corrected results highly sensitive to the slight differences in the fitting surfaces of the reference end faces of the front shaft at different radial positions. Therefore, by reducing the ratio of the rotor height to the radius of the reference end face, taking the back end face as the measurement datum and improving the stack assembly direction, not only could the stability of the rotor concentricity measurement results be improved, but also the influence of the perpendicularity of the back end face could be considered in the stack optimization process. The verification results show that the concentricity error of the rotor is reduced by 68%, and the repeatability error of the measurement results decreases from 32% to 13%.

Keywords: High-pressure compressor; Rotor assembly; Concentricity; Perpendicularity; Stack optimization

(责编 阳光)

(上接第 88 页)

Research on Defect Detection and Characterization of Compressor Blades Based on Point Clouds

WEI Yongchao¹, WANG Yinghai², MO Duheng³, LIU Jiawei⁴, CAI Shuang⁴

(1. Scientific Research Office, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China;

2. School of Computer Science, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China;

3. Institute of Electronic and Electrical Engineering, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China;

4. College of Civil Aviation Safety Engineering, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

[ABSTRACT] Aiming at the problem of accurately detecting and quantifying scratches and crater defects in compressor blades with existing methods, an algorithm based on structured light point cloud data is proposed. First, an IDW-NA point cloud feature enhancement algorithm, which integrates inverse distance weighted curvature and normal angle of large and small regions, is used to highlight the defects. In the defect localization process, the Otsu method (OTSU) is innovatively introduced to eliminate the limitations of manually setting thresholds, followed by the Z-score-based defect integrity expansion (ZDE) algorithm to achieve complete segmentation of the defects. Finally, the PCA algorithm is improved to perform quantitative analysis of the defects. Experimental results show that, compared to existing algorithms, the proposed method provides better performance in terms of defect segmentation integrity and continuity. The average absolute error of the final segmented defect size is no more than 0.105 mm, and the average percentage error is no more than 7.27%, confirming the accuracy and effectiveness of this approach.

Keywords: Defect detection; Defect analysis; Structured light point clouds; Aero-engine; Compressor blade

(责编 阳光)