

引文格式: 张立可, 栗瑞瑞, 梅英杰, 等. 发动机高压涡轮转子标准器装配调控方法研究[J]. 航空制造技术, 2025, 68(11): 98-103.

ZHANG Like, LI Ruirui, MEI Yingjie, et al. Assembly adjustment method for multi-stage high-pressure turbine rotor calibrator in engine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(11): 98-103.

发动机高压涡轮转子标准器装配调控方法研究

张立可^{1,2}, 栗瑞瑞^{1,2}, 梅英杰³, 邵春雨^{1,2}, 李结安^{1,2}, 刘永猛^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学仪器科学与工程学院超精密光电仪器工程研究所, 哈尔滨 150080;

2. 哈尔滨工业大学超精密仪器技术及智能化工信部重点实验室, 哈尔滨 150080;

3. 哈尔滨工业大学信息科学与工程学院, 威海 264209)

[摘要] 发动机高压涡轮转子组装后的平衡过程是保证发动机运行稳定性的关键。模拟平衡工艺广泛应用于发动机转子平衡, 在此过程中转子标准器作为平衡工装使用。为提高高压涡轮转子标准器在平衡过程中的自身稳定性, 提出多目标规划的同轴度和垂直度装配调控方法。建立转子标准器装配误差传递模型, 针对现场应用需求, 调控转子标准器装配同轴度和垂直度。对高压涡轮转子标准器三级部件装配过程展开分析, 结果表明, 通过改变各级部件装配角度, 能够实现转子标准器同轴度和垂直度的优化。在满足指标要求的前提下, 可根据应用现场需求选择装配角度, 使得同轴度或垂直度极小化。

关键词: 航空发动机; 转子标准器; 同轴度; 垂直度; 装配

中图分类号: V23; TG8

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.11.098



张立可

博士研究生, 研究方向为数字孪生发动机精度调控技术。

多级转子系统广泛应用于精密回转装备中, 如燃气轮机、航空发动机等^[1-3]。发动机多级高压涡轮转子工作在高速回转状态, 部件加工、装

配导致的转子不平衡将引起振动, 影响发动机的稳定性和使用寿命, 极端情况下甚至会造成发动机失效, 从而造成生命和财产损失。因此, 多级转子在制造完成后必须进行平衡, 以确保其质量符合发动机生产要求^[4-5]。组合发动机转子系统后统一进行平衡是一种常见的方式, 但是组合平衡方式导致压气机段转子和涡轮段转子配对使用, 更换部分转子后必须重新进行平衡。发动机转子标准器与真实发动机的互换平衡技术因为灵活的平衡过程广泛应用于民用发动机的平衡过程。在转子标准器与转子的互换平衡过程中, 转子标准器作为平衡工装与转子组合进行平衡。

转子标准器作为标准件, 为平衡过程提供基准, 其自身设计和加工工艺直接影响平衡过程。转子标准器用于在平衡过程中替代真实转子, 因

此在宏观几何尺寸方面要求与对应的真实转子尽可能保持一致, 如在各转子处的半径对应、整体高度相同。整体结构和尺寸相似使得转子标准器拥有与真实转子相似的质心位置、支撑跨距等参数, 但相比真实转子, 转子标准器省略了叶片及其连接部分以简化结构, 便于控制加工精度。在转子标准器的微观几何误差方面, 首先各级部件的加工工艺要求极高, 部件偏心、垂直度、表面跳动等参数有着严格的公差要求; 其次, 部件装配后组成的转子标准器装配体的同轴度、垂直度参数同样需要符合最终要求, 以确保转子标准器在平衡过程中的自身稳定性。作为转子平衡过程中的工装, 其加工精度要求甚至高于转子。但是受限于当前的实际加工精度, 转子标准器部件仍存在微米级的加工误差。在装配过程中加工

误差累积最终影响转子标准器的制造质量,从而进一步影响发动机转子平衡过程^[6]。高压涡轮转子标准器参照转子设计,通常由三级部件组成,平衡时与压气机段转子连接后通过后轴末端的环形槽支撑在平衡机上。转子标准器的同轴度和支撑导轨垂直度(垂直度)是影响转子平衡过程的两项指标,其中同轴度指标是在转子标准器加工材料高密度一致性下对自身不平衡的表征。同轴度超差导致转子标准器自身的不平衡,在转子平衡过程中引入额外的振动。垂直度超差直接影响支撑槽与平衡机的接触质量,在高速旋转下带来不稳定的旋转支撑。为尽量减少转子标准器自身制造误差对转子平衡过程的影响,装配过程逐渐成为转子标准器制造过程的关键一环^[7-8]。通过利用合理的部件装配角度抵消部分加工误差,在不改变加工精度的情况下提高转子标准器的制造质量。

当前的转子标准器研究主要集中在其整体和各级部件的结构设计、与真实转子装配体装配后不平衡量的建模、转子标准器的标准建立及失效分析等,忽视了转子标准器的装配过程,容易导致加工误差在装配过程中累积。平衡时在高速转动中产生的振动影响发动机真实转子的平衡质量。刘艳良等^[9]系统介绍了使用高压压气机转子标准器平衡高压涡轮转子的操作过程,并重点分析了操作人员对平衡过程的影响、平衡机的摆架调整对平衡过程的影响及不同转子标准器对平衡过程的影响。汪俊熙等^[10]详细分析了转子标准器偏差对平衡过程的影响、系统建模转子标准器与转子组合后的初始不平衡量,量化评估转子标准器质量偏差、重心位置偏差、转动惯量偏差等,以及待平衡转子的端面跳动偏差对转子平衡质量的影响。此外,通过实际试验证明采用互换性平衡技术后无须进行转子组合体的再次平衡,从实

际的应用需求来看,互换平衡后的转子可以达到发动机的转子平衡需求。王文宇等^[11]研究了转子标准器用于发动机转子平衡的内在机理和转子标准器的设计方法,通过建立转子互换平衡过程的静不平衡量和偶不平衡量模型,分析了影响平衡的误差源。唐敏杰等^[12]分析了转子标准器导致的转子平衡结果失真问题,为转子标准器的设计制造和使用过程中的检修制定了标准。综上,转子标准器的应用过程是当前研究的中心,其制造精度主要依赖机械加工能力。

高压涡轮转子标准器的同轴度和垂直度分别通过自身不平衡和与支撑结构的不稳定接触影响转子平衡,仅仅通过提高加工精度无法满足要求。因此,本文对转子标准器装配过程中的同轴度和垂直度预测及调控方法展开研究,介绍高压涡轮转子标准器的组成结构,基于齐次坐标变换矩阵建立转子标准器三级部件装配同轴度和垂直度预测模型。基于同轴度和垂直度预测值,构建面向应用需求的多目标规划,在满足转子标准器设计要求的前提下实现同轴度或垂直度的最优化装配。

1 转子标准器结构

发动机高压涡轮转子标准器组成如图1所示,其结构设计参照真实高压涡轮转子,包含多级圆柱形回转体部件,但是对叶片等复杂结构进行了简化。高压涡轮转子标准器同样为三段式结构,由后轴、涡轮盘和鼓筒装配而成,各级部件之间采用螺栓连接。支撑导轨位于后轴的末端,在与真实转子连接后进行平衡时通过其支撑在动平衡机上。当转子标准器垂直度超差时,支撑导轨在高速旋转过程中无法获得稳定的支撑,从而产生振动,影响真实转子的平衡过程。

单级部件或转子标准器装配体的垂直度定义如图2所示,端面 f 被两垂直于基准轴的平面 f_1 和 f_2 所包

容,此时两个包容平面之间的距离 h 即为端面 f 的垂直度。部件或装配体的端面垂直度是一种定向公差,确定基准的方向是精确测量的前提和关键,当部件基准体系与转台基准体系相重合时,部件或装配体的垂直度也等于其平行度误差。

同轴度引起转子标准器自身的不平衡,在转子平衡过程中引入额外振动。单级部件或转子标准器装配体的同轴度定义如图3所示。基准轴线是评定部件或装配体同轴度的关键,不同的评定基准轴产生完全相异的评定结果。部件或装配体测量通常采用超精密装配测量仪完成,高精度气浮转台为测量任务提供了稳定的回转基准,气浮转台的回转轴是理想的评定基准。在单级部件的测量过程中,部件下端轴轴向和径向止口偏心和倾斜被两传感器分别测量,配合调心调倾台,将下端面调至近似水平状态,且其端面形心尽量位于气浮转台回转轴线上。此时,通过

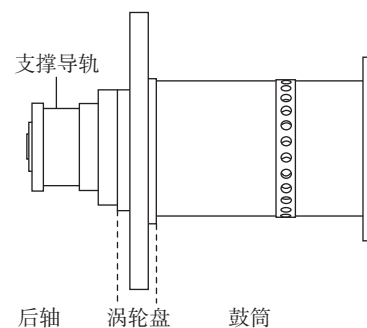


图1 高压涡轮转子标准器结构
Fig.1 Rotor standardizer structure for high-pressure turbine

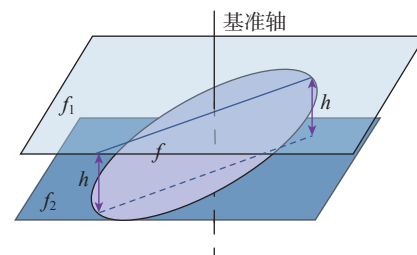


图2 垂直度示意图
Fig.2 Schematic diagram of perpendicularity

测量部件截面形心相对下端面的偏心量来计算同轴度。对于转子标准器装配体的同轴度评定,由于测量时底层部件装夹在气浮转台上,同轴度评定基准轴线仍为气浮转台回转轴线,也可表示为垂直于底层转子下端面且过其形心的直线。

2 转子标准器装配调控

转子标准器用于在平衡过程中替代真实转子,作为平衡过程的工装,其结构通常被设计和加工为与转子相似的多级轴盘装配体结构。圆柱形部件加工时易形成“单倾面”类型的加工误差,由于机械加工精度无法满足转子标准器的需求,优化装配过程成为控制同轴度和垂直度的关键。转子标准器各级部件之间的止口连接仍视为面接触,加工误差在装配过程中通过接触面传递、累积,最终造成转子标准器的同轴度和垂直度超差。带有加工误差的部件端面等效为“单倾面”,装配过程中的传递机理明确,可通过数学分析建立由部件加工误差到装配同轴度和垂直度的预测模型,进而根据预测值调节各级部件的装配角度,实现转子标准器装配同轴度和垂直度优化。

图4为三级单倾面部件装配模型。转子标准器的鼓筒轴、涡轮盘和后轴三级部件按照自下而上的顺序进行装配,以底层部件的下表面作为装配基准面,将通过下表面几何中心且垂直于基准面的直线作为基准轴线。由于加工误差的存在,部件装配后偏离其理想位置,各级部件上端面

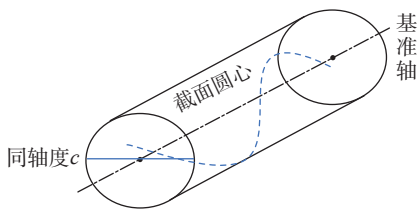


图3 同轴度示意图

Fig.3 Schematic diagram of coaxiality

作为测量面其空间位置不仅与当前部件的加工误差有关,还受到下层已装配部件的影响。以O表示装配基准面圆心,则在三级部件装配后各部件上端面偏心位置为O₁、O₂和O₃。并且在顶层部件的上端面由于加工误差累积,产生如图4所示的同轴度c和垂直度h。

齐次坐标变换矩阵是描述旋转、平移变换常用的方法之一。在由下端面向上端面传递过程中,端面的空间变换可以看作先将下端面绕x轴和y轴旋转为上端面的姿态,之后将其平移至上端面的位置。平移和旋转变换矩阵分别为

$$T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & 1 & z+d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T_0 = \begin{bmatrix} S_x & 0 \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_y & 0 \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_y & 0 & \sin\theta_y & 0 \\ \sin\theta_x \sin\theta_y & \cos\theta_x & -\sin\theta_x \cos\theta_y & 0 \\ -\cos\theta_x \sin\theta_y & \sin\theta_x & \cos\theta_x \cos\theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, S_x和S_y为基准面绕x轴和y轴旋转θ_x和θ_y角度的变换矩阵; d_x、d_y和d_z分别为上端面形心在x轴、y轴和z轴上的误差。

为获取各级部件上端面相对下

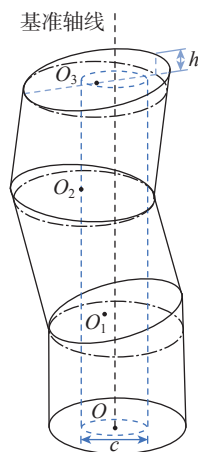


图4 三级部件装配

Fig.4 Assembly of three-stage components

端面的旋转和平移矩阵,采用超精密测量装配仪对部件几何参量进行测量。测量装配仪结构如图5所示,由气浮转台带动待测部件旋转,4个位移传感器分别测量上下端面的表面跳动数据。调心调倾台能够调整部件下端面圆心位置,使部件基准与转台基准重合。根据测量数据即可计算部件的径向测量面偏心e_i、径向测量面偏心角θ_i、轴向测量面垂直度h_i、测量面圆心指向采样最低点方向与x轴的夹角θ_t,如图6所示。

部件加工误差通常很小,上端面绕x轴和y轴的旋转角度为

$$\begin{cases} \sin\theta_y = \cos\theta_1 \sqrt{\sin^2\theta_x + \sin^2\theta_y} \\ \sin\theta_x = -\sin\theta_1 \sqrt{\sin^2\theta_x + \sin^2\theta_y} \\ \sin\theta_t = \sqrt{\sin^2\theta_x + \sin^2\theta_y} = \frac{h}{2r} \end{cases} \quad (3)$$

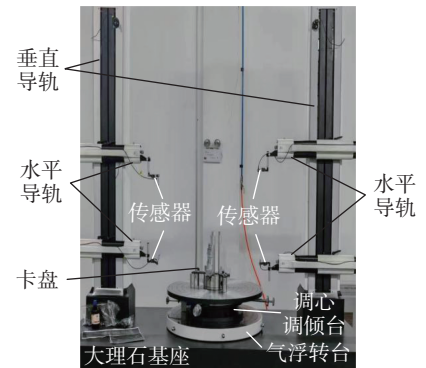


图5 超精密装配测量仪

Fig.5 Ultra-precision assembly and measurement instrument

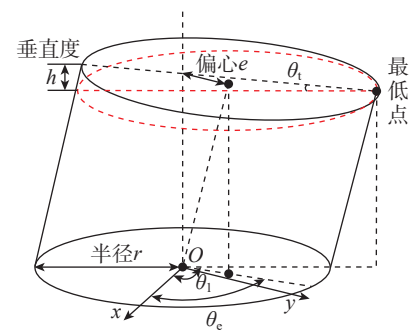


图6 单级部件几何误差参数

Fig.6 Geometric error parameters of single-stage component

式中, r 为部件半径。

由于 θ_i 为微小角度, 因此有设定 $\tan \theta_i = \sin \theta_i$, $\cos \theta_x = \cos \theta_y = 1$, 且二阶及以上的 θ_x 和 θ_y 趋近于 0, 则旋转矩阵可化简为

$$T_o = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \sin \theta_i \cos \theta_i & 0 \\ 0 & 1 & \sin \theta_i \sin \theta_i & 0 \\ -\sin \theta_i \cos \theta_i & -\sin \theta_i \sin \theta_i & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

转子标准器同轴度受各级部件上端面形心位置影响, 最终由装配过程中最大的偏心量决定。建立由底层部件下端面至各级转子上端面形心的变换矩阵, 即

$$T_{0-n}^c = \sum_{i=1}^n T_r T_l T_o \quad (5)$$

式中, T_r 为各级部件的装配角度, 底层部件即一级部件的装配角度对装配过程无影响, 因此固定其值; T_l 为第 i 级部件下端面至其上端面的平移变换矩阵; 相应的 T_o 为第 i 级部件下端面至其上端面的旋转变换矩阵。由 T_{0-n}^c 可求得三级部件上端面的偏心位置坐标分别为 (d_{x_1}, d_{y_1}) 、 (d_{x_2}, d_{y_2}) 和 (d_{x_3}, d_{y_3}) , 进而可得最终的转子标准器装配同轴度, 即

$$c = \max \left\{ 2\sqrt{d_{x_i}^2 + d_{y_i}^2}, i = 1, 2, 3 \right\} \quad (6)$$

多级转子垂直度仅受最高级转子轴向测量面与基准平面夹角影响, 与坐标系原点位置无关。因此, 建立的装配过程中的旋转变换模型为

$$T_{0-3} = T_{o_1} T_{r_2} T_{o_2} T_{r_3} T_{o_3} \quad (7)$$

设基准面的法向量为 $P=[0,0,1]^T$, 根据三级部件的旋转变换矩阵, 转子标准器后轴上端面的法向量 Q 的计算公式为

$$Q = T_{0-3}P = \begin{bmatrix} \frac{h_3}{2r_3} \cos(\theta_{r_2} + \theta_{r_3} + \theta_{l_3}) + \frac{h_2}{2r_2} \cos(\theta_{r_2} + \theta_{l_2}) + \frac{h_1}{2r_1} \cos(\theta_{l_1}) \\ \frac{h_3}{2r_3} \sin(\theta_{r_2} + \theta_{r_3} + \theta_{l_3}) + \frac{h_2}{2r_2} \sin(\theta_{r_2} + \theta_{l_2}) + \frac{h_1}{2r_1} \sin(\theta_{l_1}) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

转子标准器后轴上端面与水平面的夹角等同于两平面法向量之间的夹角, 角 θ 的计算公式为

$$\theta = \arccos \frac{PQ}{|P||Q|} \quad (9)$$

最终的转子标准器垂直度计算公式为

$$h_c = 2r_3 \sin \left[\arccos \frac{P \cdot (T_{0-3}P)}{|P||T_{0-3}P|} \right] \quad (10)$$

构建的转子标准器同轴度和垂直度双目标优化模型为

$$\begin{cases} F(\theta) = \min \{c(\theta), h_c(\theta)\} \\ \theta = (\theta_{r_2}, \theta_{r_3}) \end{cases} \quad (11)$$

式中, θ_{r_2} 和 θ_{r_3} 分别为第二级和第三级部件的装配角度。由于转子标准器通过螺栓连接, 螺栓孔数量限制了部件装配角度。假设由于螺栓孔的存在部件装配角度调整间隔为 22.5° , 则同轴度和垂直度双目标优化的约束条件可表示为

$$\text{sub.to} \begin{cases} c(\theta_{r_i}) \leq \tau_c, i = 2, 3 \\ h_c(\theta_{r_i}) \leq \tau_h, i = 2, 3 \\ \theta_{r_i} = 0^\circ, 22.5^\circ, \dots, 337.5^\circ, i = 2, 3 \end{cases} \quad (12)$$

式中, τ_c 和 τ_h 分别为同轴度和垂直度的最大允许值, 可在同轴度和垂直度均满足设计要求的前提下根据现场需求选择合理的装配角度, 使得同轴度或垂直度极小化。

根据以上分析, 通过选择各级部件合理的装配角度, 可对转子标准器装配同轴度和垂直度进行装配优化, 以提高转子标准器制造质量, 满足发动机转子平衡要求。

3 实例验证

根据同轴度和垂直度优化模型,

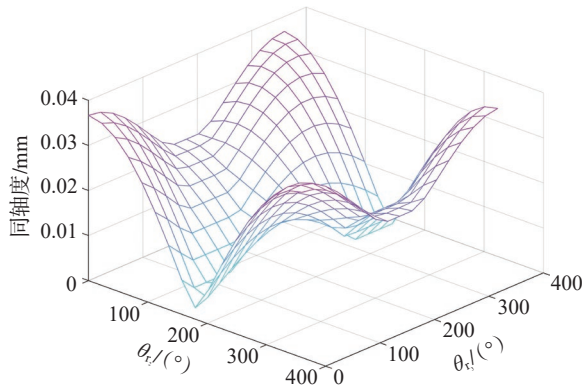
可在实施装配前实现转子标准器的同轴度和垂直度预测与调控。在装配过程中根据预测的涡轮盘和后轴最优装配角度 θ_{r_2} 和 θ_{r_3} 进行装配, 可提高装配效率, 减少重复装配过程中对转子标准器部件的磨损。依据转子标准器公差要求, 高压涡轮转子标准器的各级部件几何特征如表 1 所示, 规定各级部件上端面圆心指向最低点的方向与 x 轴夹角 θ_{l_i} 为 0° , 各级部件径向测量面偏心角 θ_{e_i} 为 0° 。

由于转子标准器各装配接触面直接通过螺栓固定, 各级部件相位调整间隔为 22.5° 。高压涡轮转子标准器三级部件装配时, 不同装配角度下的同轴度和垂直度如图 7 所示。

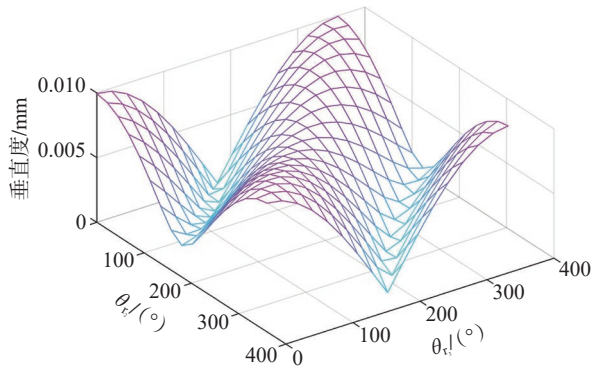
满足同轴度小于等于 $5 \mu\text{m}$ 要求的装配角度如表 2 所示, 同时列出了对应的同轴度和垂直度。在此次筛选出的装配角度下, 垂直度均能够满足 $5 \mu\text{m}$ 的装配要求。之后, 可根据现场需求选择优化装配角度。如在满足同轴度和垂直度设计要求的前提下使得同轴度最小, 可选择涡轮盘装配角度为 180° , 后轴装配角度为 0° , 此时, 同轴度为 $2.5 \mu\text{m}$, 垂直度为 $2.4 \mu\text{m}$ 。综合全部装配角度下的同轴度和垂直度, 该角度为最优的装配角度, 它同时使得同轴度和垂直度最小。而在单一指标的优化中, 筛选出的装配角度有 3 组使得垂直度最小, 为 $2.4 \mu\text{m}$ 。在考虑同轴度的情况下, 无法仅凭垂直度来选择装配角度, 如同样使得垂直度为 $2.4 \mu\text{m}$ 时在装配角度为 $(157.5^\circ, 22.5^\circ)$ 和 $(202.5^\circ, 337.5^\circ)$ 下对应的同轴度为 $4.8 \mu\text{m}$,

表 1 高压涡轮转子标准器几何特征参量
Table 1 Geometric parameters of a rotor standardizer for high-pressure turbine

名称	高度 z/mm	半径 r/mm	偏心 $e/\mu\text{m}$	垂直度 $h_c/\mu\text{m}$
鼓筒	550	120	5	5
涡轮盘	50	300	5	4
后轴	120	90	4	5



(a) 各装配角度下的同轴度



(b) 各装配角度下的垂直度

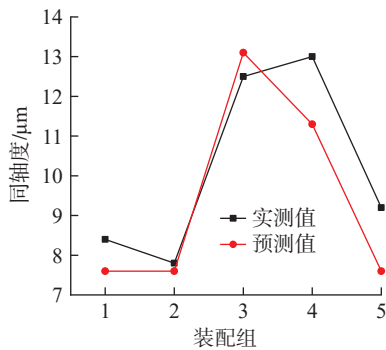
图7 不同装配角度下的同轴度和垂直度

Fig.7 Coaxiality and perpendicularity at different assembly angles

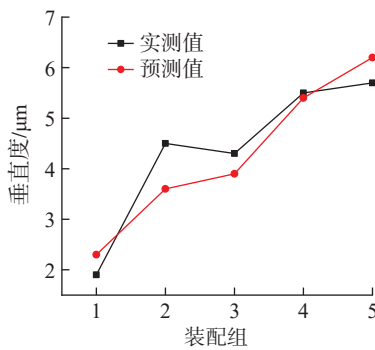
表2 满足同轴度要求的装配角度

Table 2 Assembly angle meeting coaxiality requirements

(θ_1, θ_2)	同轴度 $c/\mu\text{m}$	垂直度 $h_c/\mu\text{m}$	(θ_1, θ_2)	同轴度 $c/\mu\text{m}$	垂直度 $h_c/\mu\text{m}$
$(157.5^\circ, 22.5^\circ)$	4.8	2.4	$(180.0^\circ, 337.5^\circ)$	3.6	2.8
$(157.5^\circ, 45.0^\circ)$	4.8	2.5	$(180.0^\circ, 360.0^\circ)$	2.5	2.4
$(157.5^\circ, 67.5^\circ)$	4.8	3.2	$(202.5^\circ, 270.0^\circ)$	4.8	4.2
$(157.5^\circ, 90.0^\circ)$	4.8	4.2	$(202.5^\circ, 292.5^\circ)$	4.8	3.2
$(180.0^\circ, 0^\circ)$	2.5	2.4	$(202.5^\circ, 315.0^\circ)$	4.8	2.5
$(180.0^\circ, 22.5^\circ)$	3.6	2.8	$(202.5^\circ, 337.5^\circ)$	4.8	2.4



(a) 同轴度对比



(b) 垂直度对比

图8 预测值和实测值的对比

Fig.8 Comparison between predicted and measured values

并不是最优化的装配。在同一装配角度无法满足同轴度和垂直度同时最小时,则需要根据具体需求合理地选择装配角度。

为进一步分析同轴度和垂直度预测准确度,对比实际装配中预测值与超精密装配测量仪实测值,如图8所示。在5组装配中,同轴度最大预测误差为1.7 μm,最小为0.1 μm,垂直度最大预测误差为0.9 μm,最小为0.1 μm。在选择装配组1时,同轴度和垂直度同时取得最小值。同轴度和垂直度的预测曲线与实测值曲线有着相同的变化趋势,但仍存在可接受范围内的偏差,这是因为受螺栓拧紧过程中产生的微小位移、表面加工一致性等因素的影响。综上,通过建模误差传递过程,选择合理的装配角度能够为转子标准器提供装配指导,以满足转子平衡要求。

4 结论

针对转子标准器装配过程中加工误差逐级累积导致同轴度和垂直度超差,影响发动机转子平衡质量的问题,采取的措施和得出的结论如下。

(1) 基于齐次坐标变换矩阵和各级部件半径、偏心、垂直度等参数,构建了转子标准器三级部件的误差传递模型,实现了转子标准器装配前的同轴度和垂直度预测。

(2) 根据同轴度和垂直度预测模型,建立装配过程的双目标装配规划,通过遍历各级部件装配角度,根据现场需求寻找转子标准器各级部件最优装配策略。

(3) 高压涡轮转子标准器实例分析表明,所提方法能够实现转子标准器的装配指导,避免单指标优化过程中的另一指标超差,且能够在满足设计要求前提下根据现场需求实现单参数的极小化调控。

参考文献

[1] YANG Z, POPOV A A, MCWILLIAM

S. Variation propagation control in mechanical assembly of cylindrical components[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2012, 31(2): 162–176.

[2] ZHAO B B, WANG Y L, SUN Q C, et al. Monomer model: An integrated characterization method of geometrical deviations for assembly accuracy analysis[J]. *Assembly Automation*, 2021, 41(4): 514–523.

[3] 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.

LI Lin, LIU Hao, ZHU Linbo, et al. Simulation analysis on crucial assembly parameter of high pressure rotor in aero-engine[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2022, 65(12): 72–76.

[4] 孙贵青, 马峰, 余治国, 等. 某发动机高压转子平衡工艺问题分析与排除[J]. *航空制造技术*, 2020, 63(16): 95–101.

SUN Guiqing, MA Feng, YU Zhiguo, et al. Analysis and elimination of high-pressure rotor balancing process problems[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2020, 63(16): 95–101.

[5] 范潘潘, 庄周柱, 袁胜. 某涡浆发动机低压模拟转子动平衡试验研究[J]. *航空科学技术*, 2023, 34(6): 35–41.

FAN Panpan, ZHUANG Zhouzhu, YUAN Sheng. Dynamic balance experiment research

on the simulated low-pressure rotor of turboprop engine[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2023, 34(6): 35–41.

[6] XI Y, GAO Z Y, CHEN K, et al. Error propagation model using Jacobian-torsor model weighting for assembly quality analysis on complex product[J]. *Mathematics*, 2022, 10(19): 3534.

[7] ZHANG M W, LIU Y M, LI R R, et al. Perpendicularity detection of multistage rotor considering compensation of datum error[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 1004909.

[8] LI M H, WANG Y L, SUN Q C, et al. Assembly accuracy prediction and optimization of aero-engine rotor under the separation condition of assembly and measurement[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 120(5): 3103–3112.

[9] 刘艳良, 冯硕. 带模拟转子的燃气轮机转子组件动平衡影响因素分析[J]. *中国新技术新产品*, 2022(14): 73–75.

LIU Yanliang, FENG Shuo. Analysis of influencing factors on dynamic balance of gas turbine rotor assembly with simulated rotor[J]. *New Technology & New Products of China*, 2022(14): 73–75.

[10] 汪俊熙, 任家海, 汤福龙. 航空发动机高压转子模拟平衡工艺分析与控制[J]. *航空动力学报*, 2023, 38(3): 522–534.

WANG Junxi, REN Jiahai, TANG Fulong. Analysis and control of dummy balance process of aero-engine high pressure rotor[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2023, 38(3): 522–534.

[11] 王文宇, 吴法勇, 金彬. 基于建模仿真分析的模拟转子平衡技术[J]. *航空发动机*, 2023, 49(3): 147–154.

WANG Wenyu, WU Fayong, JIN Bin. Simulated rotor balancing technology based on mathematical model and simulation analysis[J]. *Aeroengine*, 2023, 49(3): 147–154.

[12] 唐敏杰, 陈永澎, 柴开通, 等. 某型航空发动机平衡模拟转子检修和制造控制标准研究[J]. *航空维修与工程*, 2022(12): 42–45.

TANG Minjie, CHEN Yongpeng, CHAI Kaitong, et al. Standard research on maintenance and manufacturing of balance simulation rotor for a certain type of aero-engine[J]. *Aviation Maintenance & Engineering*, 2022(12): 42–45.

通信作者: 刘永猛, 教授, 博士, 研究方向为航空发动机超精密装配测量技术。

栗瑞瑞, 副研究员, 博士, 研究方向为航空发动机几何量测量与调控。

Assembly Adjustment Method for Multi-Stage High-Pressure Turbine Rotor Calibrator in Engine

ZHANG Like^{1,2}, LI Ruirui^{1,2}, MEI Yingjie³, SHAO Chunyu^{1,2}, LI Jian^{1,2}, LIU Yongmeng^{1,2}

(1. Center of Ultra-Precision Optoelectronic Instrument Engineering, School of Instrumentation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China;

2. Key Lab of Ultra-Precision Intelligent Instrumentation Engineering, Ministry of Industry and Information Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China;

3. School of Information Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Weihai 264209, China)

[ABSTRACT] The balancing process post-assembly of engine's high-pressure turbine rotor is pivotal to ensuring the operational stability of the engine. Simulated balancing techniques are widely employed in the balancing of engine rotor, during which the rotor calibrator serves as a balancing fixture. To enhance the inherent stability of the high-pressure turbine rotor calibrator during the balancing process, a multi-objective planning approach for coaxiality and perpendicularity assembly adjustment has been proposed. An assembly error propagation model for the rotor calibrator has been established to regulate the coaxiality and perpendicularity of the rotor calibrator assembly in response to field application requirements. An analysis of the three components assembly process of the high-pressure turbine rotor calibrator reveals that optimizing the coaxiality and perpendicularity of the rotor calibrator can be achieved by altering the assembly angles of components at each level. Under the premise of meeting the specified criteria, the assembly angles can be selected based on the requirements of the application site to minimize either coaxiality or perpendicularity.

Keywords: Aero-engine; Rotor calibrator; Coaxiality; Perpendicularity; Assembly

(责编 青燕)