

基于基准控制的低压涡轮转静子装测一体化方法

牛孝霞, 龙洋, 卢文彪

(中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

摘要: 为进行大涵道比航空发动机低压涡轮转子同心度的精确测量与控制, 根据其多级耦合的结构特点和 0.05 mm 转子同心度的控制需求, 开展了基于基准控制的低压涡轮转静子高精度装测一体化方法研究。通过基准调节方法实现测量基准与回转轴线重合, 消除了定位误差; 通过基准保持方法避免了装配操作对基准的影响, 保证了测量基准姿态的一致性; 结合质心对转子不平衡量的影响, 搭建了专用测试系统, 实现对低压涡轮转子同心度的装配结果管控。将该方法应用于发动机低压涡轮转静子装配, 结果表明: 实现了 0.0125 mm 转子跳动的精确测量, 有效避免了低压涡轮转子初始不平衡量超差, 减少了重复装分工作, 提高了装配质量和效率, 对多级部件同心度的高精度测量具有工程指导意义。

关键词: 低压涡轮转子同心度; 高精度测量; 装测一体化; 基准控制; 装配精度; 航空发动机

中图分类号: V263.2

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2024.03.018

Integrated Assembly and Measurement Method for LPT Rotor and Stator Based on Datum Control

NIU Xiao-xia, LONG Yang, LU Wen-biao

(AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: In order to accurately measure and control the concentricity of the LPT (Low-Pressure Turbine) rotor of a high bypass ratio engine. Research on high-precision integrated assembly and measurement methods for LPT stator and rotor based on datum control was conducted according to the structural characteristics of multistage coupling and the requirement of 0.05mm rotor concentricity. Positioning errors were eliminated by adjusting the measuring datum to coincide with the rotating axis. The influence of assembly operations on the datum was avoided, and the attitude of the measuring datum was kept consistent by the datum holding technique. By analyzing the influence of centroid on rotor unbalance, a dedicated testing system was built to control the assembly results of concentricity of the LPT rotor. This method was successfully applied to the assembly of the LPT rotor and stator, and the results show that the proposed method can accurately measure the rotor runout of 0.0125mm, effectively avoid the out of tolerance of the LPT rotor initial unbalance, reduce repetitive assembly and disassembly work, and improve assembling quality and efficiency, providing engineering guidance for high-precision concentricity measurement of multi-stage component.

Key words: concentricity of LPT rotor; high-precision measurement; integration of assembly and measurement; datum control; assembling precision; aeroengine

0 引言

转子初始不平衡量是航空发动机的主要振源之一, 需要在装配过程中严格控制。低压涡轮转子的初始不平衡量超差是大涵道比发动机研制过程中时有发生的问题^[1-2], 其中一个主要因素是低压涡轮转子同心度低, 对发动机振动品质和转子稳定性具有直接影响^[3-4]。大涵道比发动机低压涡轮为多级耦合装配的

转静子结构, 转静子必须逐级同步组装, 因此其同心度需要在装配过程中进行测量和控制, 而受加工能力、装配测量基准不统一、操作空间等因素限制, 该装测需求一直是中国航空发动机装配领域的难题, 已成为制约科研生产的关键环节。

国内外学者对于多级转子同心度在装配过程中测量和控制开展了广泛研究。曹茂国^[5]开展了 Powell 角向位置优化研究; 孙贵青等^[6]提出了基于 SPS-

收稿日期: 2021-12-21 基金项目: 航空动力基础研究项目资助

作者简介: 牛孝霞(1990), 女, 硕士, 工程师。

引用格式: 牛孝霞, 龙洋, 卢文彪. 基于基准控制的低压涡轮转静子装测一体化方法[J]. 航空发动机, 2024, 50(3): 122-127. NIU Xiaoxia, LONG Yang, LU Wenbiao. Integrated assembly and measurement method for LPT rotor and stator based on datum control[J]. Aeroengine, 2024, 50(3): 122-127.

1000L测试系统的误差分离方法;吴法勇等^[7]提出了基于SPS-1000L测试系统的堆叠优化方法;琚奕鹏等^[8]在堆叠优化基础上提出双目标优化理论,YANG等^[9-10]提出一种通过计算和调整单级转子跳动优化转子同轴度的方法。其应用对象是机匣为对开结构、各级转子盘间通过止口配合定心的转静子组件,转子在装配平台上按照规定角度组装完成后,再进行静子机匣的装配,例如典型的高压压气机部件。对于转静子同步装配的多级低压涡轮结构,如CFM56发动机用户手册中低压涡轮转静子装配工艺,及Horibe等^[11-12]所述的GE90发动机低压涡轮转静子装配方法只能满足基本的装配需求,无法满足更重要的转子同心度控制需求,同样存在不平衡量超差问题。

大涵道比发动机低压涡轮的装配和测量均在洪艳霞等^[13]所述的装配台上进行。该装配台以1级转子前端面作为基准,滑动轴瓦结构作为回转机构,测量误差高达0.13 mm,无法直接满足同心度测量精度要求,存在引起低压涡轮单元体初始不平衡量超差的风险。

鉴于此,本文提出一种全新的高精度装配测量方法,分析大涵道比发动机低压涡轮结构特点和装配需求,开展基准调节、数据处理分析等方法研究。

1 装配需求分析

低压涡轮转子组件作为大涵道比发动机低压涡轮平衡组件的主要组成部分,要求以A、B为支点进行动平衡时,其C、D面初始不平衡量不能超过7500 g·mm。低压涡轮平衡如图1所示,需要严格控制各级转子同心度。

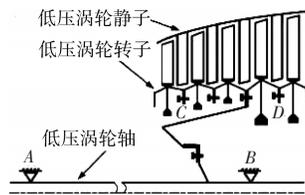


图1 低压涡轮平衡

低压涡轮转子同心度控制通过测量和调整各级盘心跳动实现,多级耦合转静子结构及测量要求如图2所示。由于低压涡轮各级导向器均为整环结构,转子盘间通过精密螺栓定位,为保证转子同心度,需要对各级盘心和锥壁配合面跳动进行严格控制。同时,由于操作空间的限制,导向器叶片安装时需要使转、静子轴向相对移动增加导叶安装空间。

作为典型的多级耦合嵌套结构,其装配必须按照“1级转子、1级静子”的顺序逐级安装,因此转子同心

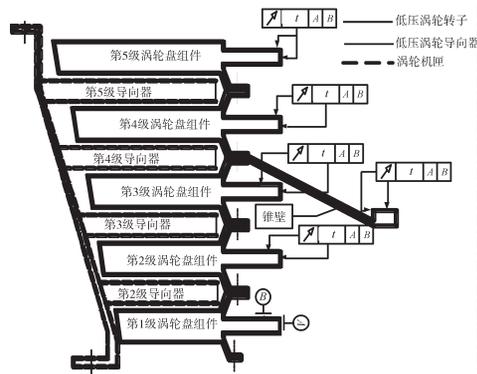


图2 多级耦合转静子结构及测量要求

度必须在转静子装配过程中进行测量控制。而当锥壁安装后,基准A、B均不可测(图2),且由于基准A、B的加工误差相对跳动控制目标 $t=0.05\text{ mm}$ 不可忽略,无法采用传统测量垫盘或实时测量调整方式直接保证基准。

因此需要开展基准控制方法研究,将1级盘轴线无极调节至与回转轴线重合,消除定位误差,同时保持基准姿态;结合专用测试系统和回转系统设计,保证测量精度不低于 $t/4$ ^[14],即0.0125 mm。在耦合装配过程中,保持1级盘相对固定,测量各级盘心跳动,通过改变配合角向位置等方式保证各级盘心跳动不大于 t 。

2 基准控制方法

2.1 基准调节方法

2.1.1 调倾原理

基于定自由度球面支承和导向,通过施加与重力不共线的偏作用力,实现球的转动,将驱动装置的位移转化为球的转动角度,如图3所示。其中调整的角度 θ 与传动机构位移 X 之间的关系满足

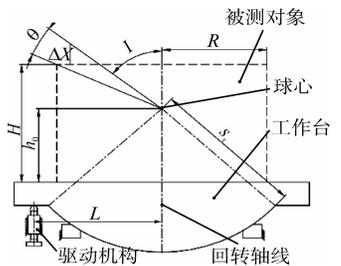


图3 调倾原理

$$\theta = \tan^{-1} \frac{h_0 + X}{L} - \tan^{-1} \frac{h_0}{L} \quad (1)$$

式中: L 为传动机构施力点距离球心的水平距离; h_0 为球心距离工作面的垂直距离。

调整的角度 φ 与测量面位移 ΔX 之间的关系为

$$\begin{cases} \varphi = \tan^{-1} \frac{R}{H - h_0} - \theta \\ \varphi = \cos^{-1} \frac{\Delta X + H - h_0}{\sqrt{R^2 + (H - h_0)^2}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: H 为被测面距离工作面距离; R 为被测件半径。

2.1.2 调心原理

设计螺纹传动机构,控制工作面相对回转部件的位移,垂直布置2组传动机构,分别控制 X 、 Y 向的位移,合理选择固定的螺纹件,将两驱动层整合成单个零件,实现一定范围内任意方向偏心量的调节,如图4所示。

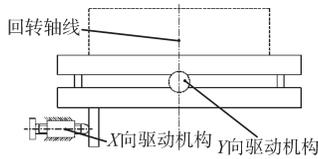


图4 调心原理

2.1.3 基准调节结构设计

基准调节结构包括调心盘、调心调倾盘、十字形分布的2个调心位移发生器(周向相距 90°)和2个调倾位移发生器(周向相距 90°)、调倾盘、转轴等零组件,如图5所示。其中转轴固定在轴承内圈上,且与调倾盘通过调倾位移发生器相连;调倾盘与调心调倾盘通过螺栓固定,与调心盘可沿 X 、 Y 方向相对移动。

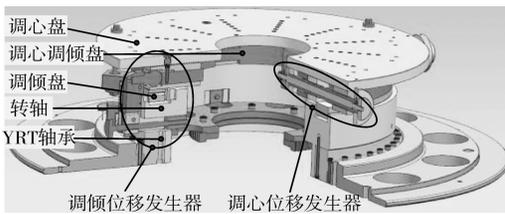


图5 调心调倾机构

在调倾位移发生器中,调倾盘与转轴间为球面接触,驱动双螺纹手柄,通过球面-杠杆机构,实现驱动球绕螺栓的转动,产生轴向位移,实现手柄与基准定比例角度调节,如图6所示。

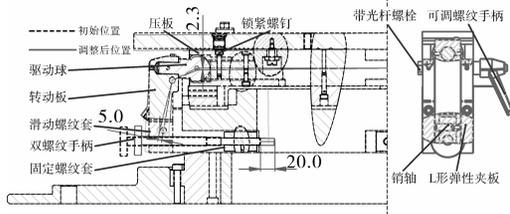


图6 调倾位移发生器原理

在调心位移发生器中,滑动螺纹套固定在调心盘上,调心螺纹套与调心调倾盘径向固定,切向可相对移动,松开锁紧螺母,驱动滚花螺母带动螺纹杆转动,实现螺母旋转角度与平面偏心量的定比调节,如图7所示。

2.2 基准保持方法

利用双螺纹的双向轴向力、防松螺母的预紧力以及球面摩擦力,实现转子落装和连接螺母限力过程中

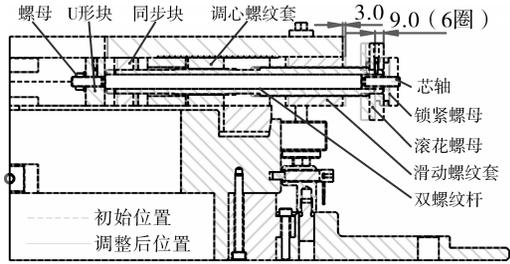


图7 调心位移发生器原理

导致的轴向及径向载荷下基准状态的自锁。机构在2个调倾驱动球及调心盘球面接触下平衡,受初始安装状态和重力影响,其倾角取决于调倾驱动球的位置和驱动球与上下压板的接触状态,其偏心取决于螺杆位置以及螺纹套的受力状态。则机构自锁的充要条件为载荷变化形成的等效作用力,小于防松螺母作用力与双螺纹轴向力之和,保证螺纹杆不松动;同时等效力矩不足以克服摩擦力使其向驱动球与压板间隙方向转动。则根据限力操作的最大输入力和待安装组件最大重力矩,控制机构的尺寸、防松螺母预紧力、球面接触角度和质量即可实现自锁。

采用静子移动方案,避免移动转子导致的基准状态的变化。利用锥齿轮副带动主动带轮-同步带-从动轮同步转动,通过螺纹副将转动转化为顶丝及静子的轴向同步平移。同步升降机构输入端如图8所示。同步传动采用同步带、同步轮及涨紧轮实现。其中一个同步轮与锥齿轮相连,通过手轮驱动。



图8 同步升降机构输入端

3 装测一体化装置集成设计

3.1 测试系统

为达到高效、高精度的数据采集和处理,配备专用测试系统,主要包括数据采集系统和数据处理与显示系统。

数据采集系统主要由接触式位移传感器及其驱动系统组成,为了提高测量效率和基准调整的准确性,系统中采用双路位移传感器同时采集端面 and 柱面跳动信息。数据处理与显示系统包括处理器、程序软件及显示器,除具备圆度、平面度、同心度、平行度的最小二乘评价功能外,还可提供基准调整指导,给定调整的手柄及调节方向。基于不平衡量产生根本原因是质心的偏移导致,因此圆度、平面度的数据处理

在更接近实际质心的最小二乘法评价基础上进行,同心度和平行度均利用评价后的圆度、平面度进行分析。综合考虑机构设计精度、测试能力等条件,将数据采集和处理误差设定为不大于 0.004 mm。

3.2 机构集成

基于高精度回转部件,集成调心调倾结构、基准保持结构、同步升降机构、基准加持等结构。高精度回转系统通常采用转台轴承(机床、精密测量)^[15-16]、交叉滚子轴承(机器人、医疗器械)^[17]或空气静压轴承(堆叠转台)^[18]实现,综合考虑应用对象、精度、使用环境等因素,最终选用精度为 3 μm 的双方向滚子轴承作为回转部件。

低涡高精度装测一体化机构由转子夹持机构、静子支撑机构、转台轴承、调心调倾机构和支架组成,如图 9 所示。其中转子夹持机构固定在调心调倾机构上,后者与轴承内圈固定,轴承外圈与静子支撑组件相连并固定于支架上。

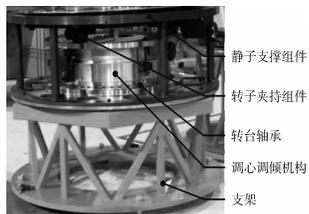


图 9 低涡高精度装测一体化机构

4 误差分析及应用效果

4.1 误差分析

综合测量误差由机构运动误差与数据采集处理误差组成,满足

$$\tau = \sqrt{T^2 + T_s^2} \quad (3)$$

式中: τ 为综合测量误差,即设备精度,目标值 0.05 mm/4,即 0.0125 mm; T_s 为数据采集处理误差,设计值 0.004 mm; T 为机构运动误差。

4.1.1 数据采集和处理精度验证

经过计量机构校准的基准轴(如图 10 所示)安装于堆叠转台 SPS-1000L,该转台的径向回转误差为 0.3 μm,通过传感器进行数据采集后进入数据处理系统,将显示结果与校准结果进行对比,见表 1。最大差值为 $T_s=3.223$ μm,满足 0.004 mm 的精度要求。

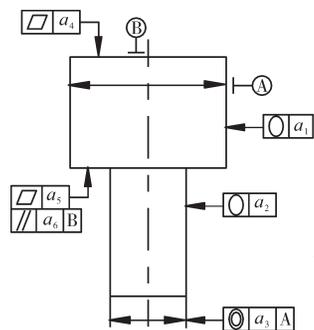


图 10 基准轴

表 1 数据采集和处理精度测试结果

序号	测量参数	校准值	测量值	差值
1	圆度 a_1	1.05	2.948	1.898
2	圆度 a_2	1.48	3.237	1.757
3	同心度 a_3	1.26	0.483	0.777
4	平面度 a_4	7.3	4.077	3.223
5	平面度 a_5	2.7	2.693	0.007
6	平行度 a_6	13.8	14.724	0.924

4.1.2 机构运动误差

为验证装测一体化转台机构部分测量精度,参照低速转台校准规范^[19]以及圆度、圆度仪计量检定规程^[20]进行检定:回转轴系径向回转误差的检测采用圆度误差评定的方法测量,圆度误差采用最小二乘法进行评定。将标准半球置于卡盘中心,回转轴系匀速旋转,采集半球圆周跳动。垂直轴角回转误差检测如图 11 所示。

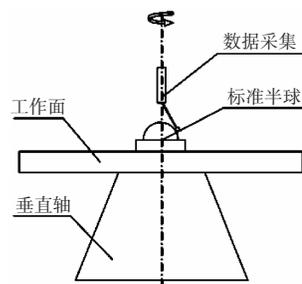


图 11 垂直轴角回转误差检测

当转台在多个轴向位置进行测量时,除校准每一个测量截面外,通常采用倾角回转误差表示。对于可调转台而言,在基准调节后,忽略基准轴线与回转轴不垂直的问题,则回转倾角导致的误差 T

$$T = T_{z1} + T_{z2} = (AC + DC' - A'C' \cdot \cos \theta) + (C'B' \cdot \cos \theta - CB' + DC') = 2OC \cdot \sin \theta \quad (4)$$

式中: T 为回转倾角导致的跳动差值; θ 为回转倾角; AB 为被测对象理论位置; $A'B'$ 为被测对象倾斜后实际位置; O 为回转原点,即轴承内圈下端圆心, OC 与 AB 垂直, OC' 与 $A'B'$ 垂直。

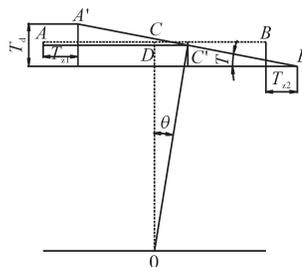


图 12 倾角回转误差模型

倾角回转误差模型如图 12 所示。

则回转误差 T 可设为

$$T = 2\sin \theta \cdot Z \text{ 或 } T = T_0 + 2\sin \theta \cdot \Delta Z \quad (5)$$

式中: Z 为被测对象距离回转原点 O 的垂直距离; T_0 为已知截面的回转误差; Z 为被测对象距离该已知截面的垂直距离。

根据校准规范进行检测得到第 1 级低压涡轮盘心所在截面的回转误差 $T_1=0.00619$ mm。将第 1 级盘

距离回转原点距离 $Z_1=407.7$ mm 带入式(5)得

$$T=2 \sin \theta \cdot Z=1.518 \cdot 10^{-5} Z=0.00619+1.518 \cdot 10^{-5} \Delta Z(6)$$

4.1.3 综合误差验证

根据式(6)可知,回转倾角误差与所测截面高度成正比,因此本设备在第5级低压涡轮盘心所在截面处的误差最大,将 $Z_5=697$ mm 代入式(6)得到 $T_5=0.0106$ mm。

将 T_5 和 T_s 带入式(3),得到设备在本应用对象的最大综合误差为0.011 mm,满足0.0125 mm的精度设计要求。

4.2 应用效果

大涵道比发动机低压涡轮应用传统方法装配后,多台次出现初始不平衡量超差,其装配参数见表2;虽经过多次更换各级盘的相对角向位置后,跳动数值不大于0.05 mm,但由于测量精度低,该数值不能反映真实同心度,因此仍出现初始不平衡量超差现象。

表2 初始不平衡量超差统计

台次	跳动/mm					初始不平衡量 C/D面/(g·mm)
	第1级	第2级	第3级	第4级	第5级	
1	0.020	0.035	0.045	0.050	0.050	10023/8204
2	0.018	0.030	0.040	0.048	0.050	9731/3578
3	0.015	0.030	0.042	0.046	0.050	8280/7200
4	0.020	0.032	0.038	0.040	0.050	9813/4116
5	0.014	0.030	0.040	0.043	0.050	8417/2109

将本文所述方法应用于上述超差台次,在低压涡轮组装过程中进行跳动的同步测量,操作步骤如下:将机匣和第1级盘组件分别安装在静子支撑和转子夹持组件上;根据测试系统提示操作调心调倾机构,使第1级盘心跳动相对其最小二乘圆、最小二乘平面的数值均在0.001 mm以内,保持整个测量过程中调节机构的姿态不变;操纵同步升降机构,逐级安装导向器和转子组件,测量盘心端面和柱面跳动,通过串动涡轮盘的相对角向位置,使其端面和柱面跳动在0.05 mm以内,试验数据见表3。从表中可见,各台次低压涡轮初始不平衡量均可以满足不大于7500 gmm

表3 试验数据

台次	跳动/mm					初始不平衡量 C/D面/(g·mm)
	第1级	第2级	第3级	第4级	第5级	
1	0.001	0.010	0.020	0.035	0.040	4379/2394
2	0.001	0.012	0.024	0.035	0.042	5061/3159
3	0.001	0.0080	0.015	0.030	0.035	3900/2352
4	0.001	0.012	0.025	0.032	0.042	4773/2788
5	0.001	0.010	0.018	0.028	0.039	4240/2410

的要求。此外,该结果可侧面验证设备0.0125 mm的测量精度可满足0.05 mm跳动测量需求,实现通过控制同心度满足初始不平衡量要求的目标。

5 结论

(1)采用基于基准控制的高精度装测一体化方法实现了0.05 mm转子同心度控制所需的0.0125 mm的测量精度,有效避免了初始不平衡量超差问题,提高了发动机装配质量和效率。

(2)基准控制方法和转台轴承的应用,可以实现 $0.00619+10^{-5}(Z)$ mm的机构测量精度。在不提高加工精度的前提下,对多级转子部件、静子部件的同心度测量具有工程指导意义。

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方法分析[J].航空发动机,2013,39(5):1-8.
LIU Yongquan, WANG Deyou, HONG Jie, et al. Analysis of whole aeroengine vibration control technology [J]. Aeroengine, 2013, 39(5): 1-8. (in Chinese)
- [2] 孙贵青,孙慧洁,赵哲,等.低压涡轮初始不平衡量超限计算分析与排除[J].航空发动机,2019,45(4):92-96.
SUN Guiqing, SUN Huijie, ZHAO Zhe, et al. Calculation analysis and elimination of the initial unbalance overrun of lowpressure turbine[J]. Aeroengine, 2019, 45(4): 92-96. (in Chinese)
- [3] 张冬梅,吴法勇,孟庆明,等.基于转子初始不平衡量控制的整机振动排除方法[J].航空维修与工程,2014(2):62-65.
ZHANG Dongmei, WU Fayong, MENG Qingming, et al. Trouble shooting based on rotor original unbalance controlled in aeroengine vibration [J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2014(2): 62-65. (in Chinese)
- [4] 王蕴琦,史新宇,王军.影响平衡质量的工艺要素分析[J].航空发动机,2001(3):29-30.
WANG Yunqi, SHI Xinyu, WANG Jun. Analysis of technology factors affecting balance quality [J]. Aeroengine, 2001(3): 29-30. (in Chinese)
- [5] 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(3):48-52.
CAO Maoguo. Optimization design of process assembly for multi stagedisc rotor [J]. Aeroengine, 1994(3): 48-52. (in Chinese)
- [6] 孙贵青,吴法勇.航空发动机不同心度测试方法研究[C]//第六届中国航空学会青年科技论坛文集.沈阳:中国航空学会,2014:1022-1028.
SUN Guiqing, WU Fayong. Study on test technology of aeroengine nonconcentricity[C]//The sixty Youth Science and Technology Forum of China Aeronautical Society. Shenyang: Chinese Society of Aeronautics, 2014: 1022-1028. (in Chinese)

- [7] 吴法勇,王娟.基于同心度测量的转子不平衡量装配优化方法[C]//第十五届中国科协年会第13分会场:航空发动机设计、制造与应用方法研讨会论文集.贵阳:中国科技协会,2013:1-6.
WU Fayong, WANG Juan. Optimization technique for rotor unbalance control based on the rotor concentricity measurement [C]//The Thirteenth Session of the Fifteenth Annual Meeting of the China Association for Science and Technology: Proceedings of the Symposium on Aero Engine Design, Manufacturing and Application Technology. Guiyang: China Association for Science and Technology, 2013: 1-6. (in Chinese)
- [8] 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.
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. (in Chinese)
- [9] Yang Z, Hussain T, Popv A A, et al. Novel optimization technique for variation propagation control in an aero-engine assembly[J]. Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2011, 225(1): 100-111.
- [10] Yang Z, McWilliam S, Popv A A, et al. Dimensional variation propagation analysis in straight-build mechanical assemblies using a probabilistic approach [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2013 (2): 348-356.
- [11] CFMI. CFM56-7B service bulletins [EB/OL]. [2019-10-10]. <https://www.cfmaeroengines.com/customer/customer-support>.
- [12] Horibe K, Kawahira K, Sakai Jun, et al. Development of GE90-115B turbofan engine [J]. IHI Engineering Review, 2004, 37(1): 1-8.
- [13] 洪艳霞,范秀华,崔艳敏.一种航空发动机低压涡轮装配检测装置:中国,201420659915.9[P].2015-03-11.
HONG Yanxia, FAN Xiuhua, CUI Yanmin. A assembly detection device for LPT of aeroengine: China, 201420659915.9[P]. 2015-03-11. (in Chinese)
- [14] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.GB/T 3177-2009 光滑工件尺寸的检验[S].北京:中国计量出版社,2013: 1-17.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, Standardization Administration of China. GB/T 3177-2009 inspection of plain workpiece size[S]. Bei Jing: Chinese Metrology Press, 2013: 1-17. (in Chinese)
- [15] 成大先.机械设计手册:第2卷[M].第六版.北京:化学工业出版社,2016(3):200-268.
CHENG Daxian. Handbook of mechanical design: Volume 2[M]. Version 6. Beijing: Chemical Industry Press, 2016(3): 200-268. (in Chinese)
- [16] 范长庚.转台轴承在立式车床中的应用[J].机床与液压,2016,44(14):18-19.
FAN Changgeng. Application of rotary table bearing in vertical lathe [J]. Machine tool & Hydraulics, 2016, 44(14): 18-19. (in Chinese)
- [17] 马贤祥,赵锡芳,王德建,等.工业机器人联合式支承回转装置的结构及设计[J].机器人方法与应用,2011(2):23-26.
MA Xianxiang, ZHAO Xifang, WANG Dejian, et al. Structure and design of joint supporting slewing device for industrial robot[J]. Robot Technique and Application, 2011(2): 23-26. (in Chinese)
- [18] 郭力.空气轴承的原理与应用[J].磨床与磨削,2000(2):67-69.
GUO Li. Principle and application of air bearing[J]. Grinder and Grinding, 2000(2): 67-69. (in Chinese)
- [19] 国家质量监督检验检疫总局.JJF 1210-2008 低速转台校准规范[S].北京:中国计量出版社,2008:1-9.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. JJF 1210-2008 calibration specification for low speed turntable[S]. Beijing: Chinese Metrology Press, 2008: 1-9. (in Chinese)
- [20] 国家质量方法监督局.JJG 429-2000 圆度、圆柱度测量仪[S].北京:中国标准出版社,2021:1-28.
State Bureau of Quality Technical Supervision. JJG 429-2000 roundness and cylindricity measuring instrument[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021: 1-28. (in Chinese)

(编辑:程海)