

航空发动机转子装配精度预测及堆叠分析

解国明 韩东岳 林瑞丰

中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 辽宁 沈阳 110043

[摘要]航空技术作为我国高尖端技术领域的重要组成部分,它对航空发动机转子的装配精度有着极高的要求。基于此,文章对一种利用SPS系统计算机来测量计算转子最优装配方案的技术——预测堆叠技术原理进行分析阐述,并对预测堆叠技术的具体应用情况进行分析。希望通过此文,可以使航空技术部门总结SPS系统的先进理论经验,能够有效转子类零部件的装配精度,减少发动机转子的跳动值,提升改进航空发动机的制造工艺。

[关键词]发动机转子;装配精度;预测堆叠技术

DOI: 10.33142/sca.v4i6.5082

中图分类号: V263.2

文献标识码: A

Prediction and Analysis of Aeroengine Rotor Assembly Accuracy

XIE Guoming, HAN Dongyue, LIN Ruifeng

AECC Shenyang Liming Aero Engine Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110043, China

Abstract: As an important part of Chinese high cutting-edge technology field, aviation technology has high requirements for the assembly accuracy of aeroengine rotor. Based on this, this paper analyzes and expounds the principle of predictive stacking technology, which uses SPS system computer to measure and calculate the optimal assembly scheme of rotor, and analyzes the specific application of predictive stacking technology. It is hoped that through this paper, the aviation technology department can summarize the advanced theoretical experience of SPS system, effectively improve the assembly accuracy of rotor parts, reduce the runout value of engine rotor, and improve the manufacturing process of aeroengine.

Keywords: engine rotor; assembly accuracy; predictive stacking technology

引言

转子是航空发动机中一个由轴承支撑的旋转体,是发动机进行动力运转的主要旋转部件。转子在进行高速转动时,当它的速度接近临界转速时,会引起转动轴产生挠度变形,继而引发共振进一步损伤机械。因此需要采用高精度的装配技术,来使其运动时质量分布更加合理,减少运动跳动值。而预测堆叠技术作为国际范围内先进的转子装配技术,它能够显著提升航空发动机转子装配的效率与质量。

1 航空发动机转子装配的技术难题

现代航空发动机设备中,都会有一个转速在一万 rpm 以上的风压机结构,它的转速远大于临界速度,因此从转子性质上来看,航空发动机上的转子是属于一种柔性转子。但这种性质的转子若是在装配时出现了不平衡因素,则会呈几何倍数地放大离心力,造成发动机振动,而一旦引发整个发动机共振,很容易出现故障问题,甚至酿成严重的事故灾害。而若是想消除这种离心力,就必须减小转子的径向跳动,确保转子转动平衡。简而言之,就是要通过工艺优化来减小转子结构的偏心,这样的途径主要有两个:一是减少转子的制造误差,我国近年来在航空发动机制造工艺上不断优化完善,理论上可以达到比以往缩减 12% 的径向跳动幅度;二就是转子部件的装配技术优化,使其尽量让转子结构平衡转动,使累积误差最小化。但以往的装配技术采用的是对每个转子单独分配平衡,分别测量不同部位的跳动幅值与不平衡相位的,而后在装配中,将转子的不平衡相位分别交错 180° 的位置进行装配,并在低速运行的情况下进行测试。但这样的装配方法存在诸多弊端:一是不平衡相位的测量结果会受到夹具误差的影响,使测试结果与实际存在较大差异;二是低转速与高转速运动状态完全不同,采用这种装配方法的发动机转子会受到“曲轴”误差影响;三是它对平衡机的精度以及校检工作质量要求极高。因此常规装配技术下航空发动机转子经常存在偏心,产生发动机振动的故障问题。

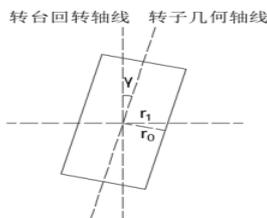


图1 转子的不平衡状态示意图

2 预测堆叠技术原理

2.1 预测堆叠技术概念

预测堆叠技术又称为 SPS 技术，与传统装配检测技术不同，预测堆叠技术是采用非接触测量的方式检测的，不存在人为操作的误差。它通过对转子部件的运行矢量进行数字化检测，就能够根据自有的数据模型分析，来判断转子此时的径向状态。首先它需要依靠一个单独的基于 window 系统平台的应用软件，这是一个专门为涡轮发动机组转子部件的测试与校准而开发的工学软件。配套软件使用的，是几组高灵敏度的传感探测装置，它们通过对静止转子的轮廓进行扫描形成初始数据，在整个转子组的检测中，它从以下几个方面数据来对转子部件进行描述：转子的圆度、轴度、垂直度与平行度等信息^[1]。而后再如图 2 利用最小二乘法如图 2 所示那样做出关于端面跳动的拟合平面图，最后再将转子理想状态的轴线、平直度等信息求出，并用相同的方法求出各部分转子的轴线、与同心度，将这些数据再与理想模型做差值分析，计算各个部件分段的差值矢量之和，即为堆叠 SP 值，而后再采用模型分析对测算的堆叠 SP 值进行不断的优化与调整，最终形成最佳的转子装配角度方案。在这个方案中，由于不是以单独平衡作为参照基准进行装配的，所以它在装配时也不存在参照误差，采用预测堆叠技术优化过的装配方案，可以直接在各级盘上直接作出相对于一级盘的装配角度标注，辅助指导转子的装配工作。

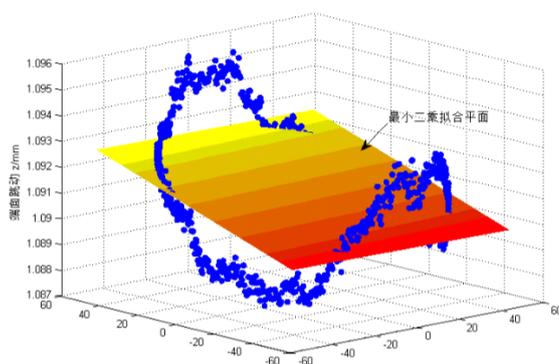


图 2 某发动机转子系统端面跳动的最小二乘拟合平面图

2.2 传感测量

SPS 技术是采用四组高精度的过程测量装置，来计算转子件配合止口相对于基准止口的同心度与垂直度的，这种传感装置的精度为微米级，最高可以捕捉到 $0.25\ \mu\text{m}$ 的位置变化。利用传感测量装置，可以轻松实现对转子部件运行过程的检测，包括径向跳动与轴向跳动的具体幅度等信息，而另外两组传感器则负责传感测量止口的圆跳与端跳，这样就综合组成了整个转子运动的不平衡测量。采用 SPS 技术进行预测堆叠测量前，首先应当将转子用三爪卡台固定，使其能够在气浮测试台上自由转动。而后调整四组传感器的测量轨道，使其分别到达测量位置，再将传感器外置的压力表归回中间位置。最后再调整转台的倾斜角度，并调整转台偏心，使整个测试模型与计算机模拟的转子模型完全拟合。所以总的来说，SPS 技术不但在零部件径向与轴向关系上的计算精度远高于传统装配测量，甚至还可以借助传感器对转子部件的接触面积变化等，难以考虑的差异因素进行分析计算。

3 预测堆叠技术在转子装配的具体应用

3.1 常规转子装配技术现状

从上文可知，预测堆叠技术是建立在非物理接触测量、计算机模型分析，来对不平衡矢量进行优化的一种装配设计技术。常规的装配技术的主要问题是转子装配过程中废件率较高，由于常规装配技术只采用人工调整，虽然也可以在气浮转动台上测量转子的轴线，但是无法对转子组件的各个部位在各个转动位置上的角向位置进行精准测量与调整，只能通过反复的装夹调整，通过多次重复的试验调整来使径向跳动降低到合理范围内。期间不仅无法消除装夹误差带来的偏差影响，检查转子径向轴向跳动的仪器精度也十分有限，且在多次装夹试验时，也很容易因机械疲劳给转子部件带来磨损，如止口处的变形导致转子的过盈量不合格。因此常规转子装配技术的合格率极低，同一批装配的发动机转子合格率仅为 72% 左右，因装配质量不合格的问题，给发动机制造单位带来了严重的制造成本负担。

3.2 预测堆叠技术带来的效率质量提升

以某发动机的生产制造为例，除了装配完成后的动态径向跳动量检测外，它所有的不平衡相位检测都交由 SPS 系统来完成，首先它降低了人为施测与估读数值的误差问题，极大地减轻了测量人员的劳动工作量的同时，由于不再需要像以往一样反复装夹调试，所以它对装配技术的水平要求也有所降低。某发动机制造厂将该型号发动机转子的装配信息，如各级盘的基准盘轴与相对于一级盘的装配位置等全部输入 SPS 系统后，由 SPS 分析生成一个关于该型号发动机转子运动轴向的理想模型，而后通过传感测量得出各个部件的 SP 差值，并综合给出缩小 SP 差值的优化装配方案，最终再由装配人员采用 SPS 系统预测的角向位置进行装配。另一方面，由于应用 SPS 系统进行转子装配的工艺由于没有了传统装配中的反复装夹试验调整，它的装配花费时间仅为传统装配工艺的 2/5 左右^[2]。随机抽调 20 台由 SPS 系统辅助装配的高压转子进行跳动值测量发现，篦齿盘的径向与端面跳动均不高于 0.025，符合该型号发动机转子的装配标准。所以可以直接得出结论：应用 SPS 技术进行航空发动机转子装配，可以大幅度地提升转子装配质量，加快转子装配效率。

4 结语

综上所述，传统的航空发动机转子装配技术不仅效率低下，且只能通过反复的试验调整来降低转子振动，在调整优化的过程中难免对转子部件造成磨损伤害，且由于装夹误差与测试误差等原因，难以给出合理的优化装配方案。而 SPS 技术则是采用计算机数据模型分析，与传感器非接触测量来完成径向跳动与轴向跳动的测量工作的，所以它能够显著地提高发动机转子的装配效率与装配质量，能使发动机共振的问题得到合理的优化解决，从而提升发动机的出产质量。

[参考文献]

[1]涂建波.航空发动机转子装配精度预测与优化[D].大连:大连理工大学,2021.

[2]高一超.航空发动机转子装配精度预测及相位优化方法研究[D].大连:大连理工大学,2020.

作者简介：解国明（1990.10-）男，毕业院校：沈阳航空航天大学；现就职单位：中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司。