

# 航空发动机转子装配工艺优化方法分析

解国明 苏奥长 罗程

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]** 转子是航空发动机中负责旋转运动的重要部件, 理想状态下的发动机转子组应当是与同心轴线重合运动的, 此时转子部件无跳动, 无不平衡因素, 因此航空发动机对转子装配工艺要求极为严苛。基于此, 文章首先分析了影响转子正常运转的装配问题, 而后提出一种关于优化改良转子装配工艺的大体思路。希望通过此文, 可以使发动机制造单位从改进装配工艺方面出发, 综合提高出产发动机的制造的可靠稳定性。

**[关键词]** 发动机转子; 装配工艺; 优化方法

DOI: 10.33142/ec.v4i12.4826

中图分类号: V263.2

文献标识码: A

## Analysis of Optimization Methods of Aeroengine Rotor Assembly Process

XIE Guoming, SU Aochang, LUO Cheng

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

**Abstract:** Rotor is an important component responsible for rotating motion in aeroengine and the engine rotor group should coincide with the concentric axis. At this time, the rotor components have no runout and imbalance factors. Therefore, aeroengine has extremely strict requirements for rotor assembly process. Based on this, this paper first analyzes the assembly problems affecting the normal operation of the rotor, and then puts forward a general idea of optimizing and improving the rotor assembly process. It is hoped that through this paper, the engine manufacturing unit can comprehensively improve the reliability and stability of engine manufacturing from the aspect of improving assembly technology.

**Keywords:** engine rotor; assembly process; optimization methods

### 引言

转子装配作为航空发动机制造中最关键的工序, 它对发动机出产质量起到了决定性的作用。由于转子长期处于高速运转的工作状态, 若是装配精度不高导致发动机存在偏心, 则会引起转子转轴的不规则跳动, 进而引发整个发动机的振动, 严重时会使转子部件磨损消耗, 损伤发动机组的使用寿命, 甚至引发一系列的发动机故障问题。因此深入探究优化发动机转子的装配工艺, 从而提高转子装配精度, 对于改进发动机制造质量有着重要意义。

### 1 传统发动机转子装配的问题

发动机转子装配分为总装和部装, 总装是指将已经组装成单元件的部件与发动机进行拼装组合, 得到整个发动机部件的过程。而部装则是指将发动机转子组装成发动机转子系统单元的过程。相比于部装工艺来讲, 我国航空发动机的总装技术已经实现了机械化、自动化组装。但我国部装工艺, 尤其是压气机等发动机关键部件的装配技术与国际先进水平仍然存在较大的差距, 特别是多级转子盘的装配, 是我国航空发动机制造行业目前正着手解决的技术瓶颈。分析以往的传统转子装配工艺, 主要是出现以下几个方面的问题:

#### 1.1 多级转子同轴超差的问题

多级同轴转子是指在多个转动盘上运转的转子组在以一定的相位差值的安装位置上, 进行同轴旋转的转子系统。它的装配工艺主要分为两个部分: 一是多级转子的相位调整; 二是螺栓拧紧, 我国的多级转子装配工艺中, 还是需要以人工测量的方式来估算不同转子组的相位差值, 再根据操作技术员的装配经验来对转子系统的初始相位进行调整。但人工测量装配的方式一次装配成型概率极低, 且难以依靠经验来保证装配精度。而多级同轴转子在高速高压的运行环境中, 在合件运动的过程中会将这种相位误差累计放大, 使同轴转子的同心度在不断地旋转工作中累加超差<sup>[1]</sup>。即使是调整后的多级转子相位差符合装配需求, 也难免在后续的粗螺栓拧紧固定工序中因预紧力问题导致转子错位, 且纵观我国的多级转子组质量检测体系, 尚未形成关于转子拧紧工艺的规范要求, 因此多级转子装配存在的同轴超差问题没有得到有效解决。

#### 1.2 重复装配的部件磨损问题

上文中提及, 不光是多级转子装配工序一次性装配成功的几率极低, 当前任何一种航空发动机转子系统的装配,

都需要反复的人工装配调整，直至转子径向跳动幅度达标为止。而在这个过程中，需要操作人员反复对转子部件进行装夹与拆装，在装配过程中就会对转子部件造成极大的测试损伤，以某型号的高压压气机为例，它的转子系统部分结构如图 1 所示，这个转子系统中包括了一二级转动盘、前轴径与篦齿盘，调整初始装配相位时，需要反复拆装测试，这个过程中对篦齿盘的损伤极大，在装配过程中，因止口磨损导致工件报废率极高。因此优化装配工艺首先需要解决的便是物理接触调试的问题，尽量在调试相位的工序中，最大程度避免工件自磨损。

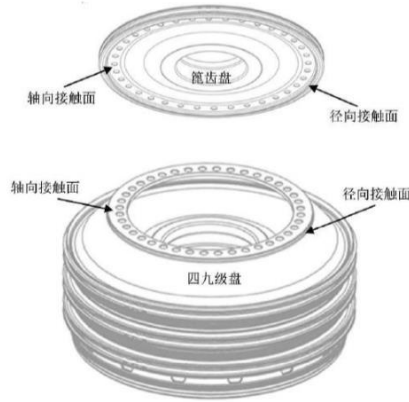


图 1 某高压压气机的部分转子系统组件构造图

### 1.3 单级转子的平衡跳动问题

以压气机为例，航空发动机转子系统是由多个单级转子在止口的配合下完成同轴转动的，但单独的转子部件在制造生产时不可避免地会存在细微的加工误差，使单级转子的运动轴线与转子组的同心轴存在实际偏差，这也是导致转子不平衡的主要原因。在实际转子组运转时，止口也并非理想的加工状态，因此会出现如图 2 所示那样的端面跳动问题，并且会在法兰端面互相配合的过程中，会将这种不平衡跳动偏差累积放大成为一种轴线偏心现象，影响发动机装配后的运行性能。而我国的转子装配工艺调试相位差的环节，就是要通过人工调整来将各个转子部件的不平衡因素重新进行平衡调整，从而起到减小整个转子组系统的径向与轴向跳动值的效果，那么优化装配工艺的思路便是，要通过实际测量来将数据拟合平面形状，将所有的转子误差视为一种可以叠加或消减的矢量，最终通过对转子系统偏心位置以及偏斜率的计算，来设计最优化的初始相位调整方案。

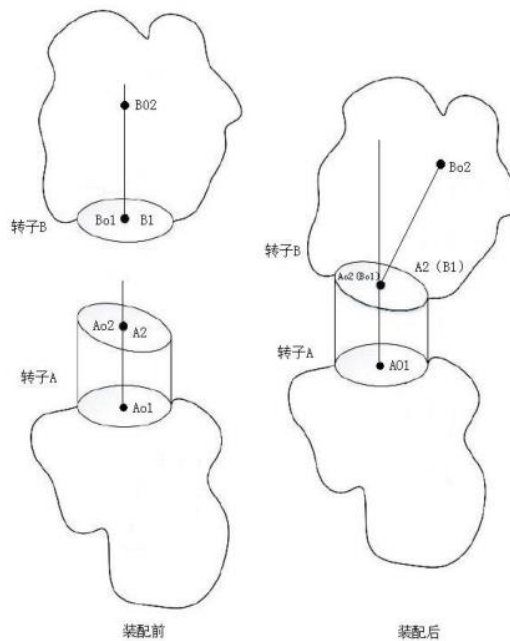


图 2 端面跳动导致的轴线偏心影响示意图

## 2 优化发动机转子装配工艺的思路

### 2.1 基于同心度优化目标的装配思路

通过分析端面跳动与径向跳动对转子系统偏斜率的影响可以得知，转子系统的装配质量是可以依靠同心度来客观评价的。也就是以第一级转子端面作为同心基准，计算它之上各级转子端面的不同心度。可以采用装配精度预测计来对转子系统的不同心度进行计算分析，采用目标函数  $z=f(x_1/x_2/x_3 | H, R, \delta)$  ( $i=1, 2, 3, \dots, n$ ) 来计算，其中将转子级数设置为  $x$ ，将与  $x$  对应的转子高度设置为  $H$ ，将该转子的半径设为  $R$ ，而  $\delta$  则表示为该级转子的跳动数值。函数  $f$  则为装配精度预测系统的模型计算过程<sup>[2]</sup>。借助计算机预测软件来找到转子相位与装配质量（同心度）之间的函数关系。

### 2.2 组合优化和遗传算法

转子系统在装配中，由于单级转子与止口的配合嵌入的相位位置情况是有限的，因此可以理解为，转子装配的组合方案数量是有一个固定值的，那么优化的转子装配工艺思路，就是将以往人工调整方案的过程，变更为一种依靠精确算法得到最优解的方案指导，达到枚举法的效果。鉴于多级同心转子的跳动数据分析是极大的，因此需要借助堆叠预测软件来实现装配位置组合与跳动值变化的曲线分析。优化装配方案的算法采用遗传算法，这是一种将同心度设置为函数适应度，在给出优化方案后，会自动淘汰掉优化前方案的算法逻辑，将同心度视为最终优化目标，将不断调整的转子装配相位作为算法收敛条件，以跳动值作为变异现象。当筛选到同心度提升的方案时，会自动过滤掉此前所有的优化装配方案，而后再以新方案作为新种群进行交叉变异的优化过程。

### 2.3 堆叠预测技术

#### 2.3.1 定心误差预测

引起定心误差的主要原因就是止口在配合转子级时，由于弹性变形或者磨损导致的过盈量变化，因此采用 SPS 堆叠预测系统进行误差预测时，需要在传统拟合圆法的基础上进行滤值拟合，以此来提高定心误差预测的估测精度。需要充分考虑到止口接触时产生的弹性变形因素，将接触点视为具有一定系数的等效弹簧，再借助力学平衡方程来求出整个转子系统的偏心差值。

#### 2.3.2 偏斜误差预测

转子系统的偏斜误差则主要来自于转子装配的法兰接触面加工误差，由于传统的拟合平面法在分析偏斜误差时，难以对存在多个峰值的复杂平面的具体形貌进行还原，影响了偏差误差预测的精度。因此考虑仍然是将法兰接触面的弹性变形视为固定系数的等效弹簧，通过寻找三组在两个转子盘平面最近的接触点的方式来确定拟合平面的向量基准。最后再借助平面联合力矩方程来对装配方案的偏斜误差进行表述。

#### 2.3.3 应用 SPS 系统指导装配

基于同心度目标的堆叠预测优化装配模式，相比于传统装配工艺，首先它没有机械装夹测试工件的过程，在转子装配相位方案的制定环节全程采用数据模型分析预测技术，避免了反复拆装部件造成的机械损伤。另一方面，它相比于传统的装配模式，将质量管控的标准从现象化变为数值化，大幅度地提高装配精度。

## 3 结语

综上所述，航空发动机部件构造复杂，尤其是对转子系统的装配质量要求极高。而优化装配工艺，提高装配精度，就是为了解决转子系统偏心跳动的问题。因此需要航空发动机制造部门，在装配过程中采用 SPS 预测堆叠软件来辅助分析最优的装配相位方案，改进装配策略，采用以同心度测量为装配目标的装配工艺。只有有效提升转子的装配精度，才能避免装配工作中多次调试给转子部件带来的机械损伤，解决转子动态不平衡的振动磨损问题。

### [参考文献]

[1] 李小冬. 航空发动机转子止口一螺栓装配工艺研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.

[2] 孟亮国. 航空发动机转子装配工艺优化方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.

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。