

航空发动机低压涡轮转子平衡工艺研究

王娟^{*}, 史新宇

沈阳发动机设计研究所, 辽宁 沈阳, 110015

摘 要: 航空发动机低压涡轮转子具有结构紧凑、重心靠近轴承支撑端、装配精度要求高等特点, 给转子平衡带来了极大挑战。在分析该转子结构特点的基础上, 提出并详细论述了低压涡轮转子带支点轴承与不带支点轴承两种平衡方案, 进而对两种方案工装设计的关键因素及方案实施的优缺点进行分析, 总结了轴套类和框架类平衡工装的设计准则, 并通过试验对比验证了两种方案的稳定性, 对其他转子平衡工艺方案设计具有参考及推广价值。

关键词: 航空发动机; 低压涡轮; 转子平衡; 平衡工艺; 稳定性试验

中图分类号: V233.1+2 文献标识码: A 文章编号: 1007-5453 (2016) 02-0025-04

转子平衡是指通过低速平衡机对转子的不平衡量进行测量及修正。平衡过程中通常在转子修正面上增加或减小质量, 使转子的重心与其几何中心及其中心主惯性轴尽量和旋转轴线靠近, 以减小转子工作时的不平衡力、力偶, 控制其在临界转速附近的径向振动量在允许范围内, 从而降低转子系统及整机的振动应力。航空发动机旋转部件的平衡, 是发动机装配过程中的重要环节之一, 转子平衡的质量会直接影响到发动机试车的振动表现, 进而影响发动机可靠性。

某型航空发动机为双级低压涡轮转子, 具有结构紧凑、转子重心靠近支点轴承支撑端、装配精度要求高等特点, 给转子平衡带来了极大的挑战。转子平衡工艺工装的设计, 需根据转子结构特点、实施条件等来确定。本文提出两种该型低压涡轮转子的平衡工艺方法, 通过分析验证, 两种平衡方案均能够满足转子平衡需求, 为其他转子平衡工艺方案的设计提供参考。

1 低压涡轮转子结构特点分析

某型低压涡轮转子为两级涡轮, 转子组件结构示意图如图1所示, 两级轮盘通过止口定心, 螺栓压紧连接在低压涡轮轴上。与其他类型转子相比, 航空发动机转子结构相对紧凑, 对转子的平衡精度要求也相对较高, 给转子平衡工艺的设计带来一定的挑战。

该转子典型结构特点为两级涡轮盘前后平衡修正面距

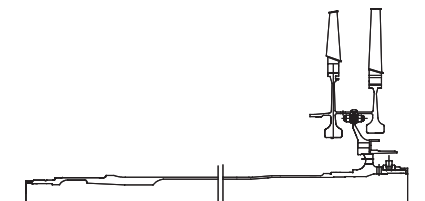


图1 低压涡轮转子结构示意图

Fig. 1 Low pressure turbine rotor structure diagram

离较近, 平衡修正过程中可能会出现两修正面相互影响。两级低压涡轮盘靠近支点轴承, 使得整个转子重心后移, 因此在转子平衡时, 后面支点的支撑形式是否合适对转子平衡效果影响很大。此外, 该转子后端支点轴承内嵌于二级低压涡轮盘中, 这给平衡过程中支撑带来了一定的困难。

2 典型平衡工艺方案

通常多级转子的平衡流程为, 先对单件进行静平衡然后再对组合件进行动平衡, 这里主要对转子组件的动平衡方案进行介绍。对转子进行平衡工艺设计, 最重要的是选择合适的平衡支撑形式。应用卧式平衡机对转子进行低速动平衡时, 可以采用滚轮支撑及轴承支撑等形式, 对于该型低压涡轮转子, 前支撑位于低压涡轮轴头, 可采用平衡工艺轴套支撑在平衡机滚轮上, 后支撑位置可以选择用支点轴承支撑或者平衡工艺轴套两种形式。此即该低压涡轮转子的两种平衡

收稿日期: 2015-11-13; 退修日期: 2015-12-30; 录用日期: 2015-12-30

*通讯作者: Tel.: 024-24282530 E-mail: wang371179231@163.com

引用格式: WANG Juan, SHI Xinyu. Research on the balancing technology of aeroengine low-pressure turbine rotor [J]. Aeronautical Science & Technology, 2016, 27(02): 25-28. 王娟, 史新宇. 航空发动机低压涡轮转子平衡工艺研究[J]. 航空科学技术, 2016, 27(02): 25-28.

方案,下面对两种方案分别进行介绍。

2.2 不带轴承平衡工艺方案

不带支点轴承平衡工艺方案,即平衡时转子通过前、后平衡轴套支撑在平衡机滚轮上,此时转子平衡组件不具备带静子的条件,所以又称该平衡方案为转子单独平衡。其示意图如图2所示,由于低压涡轮转子组件的轴端与风扇转子有轴向传动的套齿,前平衡工艺轴套利用套齿结构连接平衡机传动装置进行传扭。

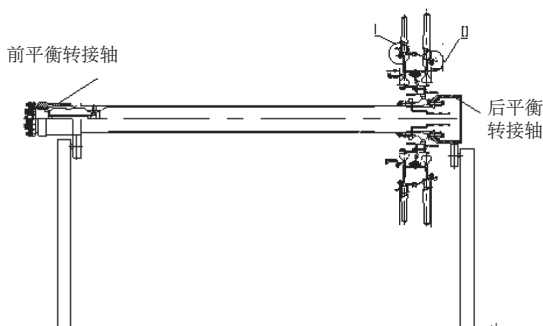


图2 不带轴承平衡工艺方案

Fig. 2 Balancing process program without bear

转子单独平衡方案的突出优点是在平衡过程中仅需要用到前、后平衡转接轴,转子平衡前工装准备时间短,操作简单。需要重点说明的是,由于转子重心十分靠近后支撑位置,转子不平衡量测量对后支点工艺轴套的形位公差比较敏感,需要严格控制轴套内外基准面的同轴度要求。假设低压涡轮转子质量 $M=120\text{kg}$,轴套内外基准存在 $e=0.005\text{mm}$ 的偏心量,简单的估算转子重心处也产生 0.005mm 的偏心,那么:

$$U=M \cdot e=600\text{gmm}$$

即转子组件就会产生约为 600gmm 的附加不平衡量,所以在设计及加工条件允许的情况下,应尽可能提高轴套类工装的形位公差要求,如工装与机件配合面及滚轮支撑面之间的同轴度要求;另外轴套与机件间应采用过盈配合,以保证定位精度。平衡操作过程中,对参与转动的平衡工装进行 180° 转位,可以实现进一步降低工装对不平衡量测量的影响。

该平衡方案与转子工作状态存在一定差异,方案实施过程中需要在转子平衡前后分别对低压涡轮转子叶片、导向器及支点轴承进行分解及装配。该方案存在主要不足如下:

(1) 转子平衡完成后,需要分解二级转子叶片,进行导向器装配后对二级转子叶片按原位置恢复装配,对叶片的分装破坏了转子的平衡状态;

(2) 重复分装工作,增加了工人操作的工作量,同时增加了出错了概率,平衡前后对轴承进行分装,会影响轴承的使用寿命。

2.3 带轴承平衡工艺方案

若转子平衡带支点轴承,需要通过工艺轴承座支撑在平衡机上。然而支点轴承内嵌在二级盘内,给工艺轴承座的设计带来了一定的挑战。若简单使用如图3所示的轴承座进行支撑,在平衡过程中轴承座会产生扭转效应,导致转子不平衡量测量失真,结果不稳定。

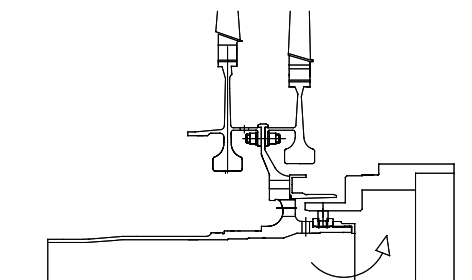


图3 工艺轴承座示意图

Fig. 3 Technology bearing block

这就需要刚度结构较强的整体框架结构来支撑整个平衡系统,使前后支撑成为一个整体,同时框架结构的工装可以实现支撑静子。所以带支点轴承的平衡方案也可称为带静子平衡,如图4所示。

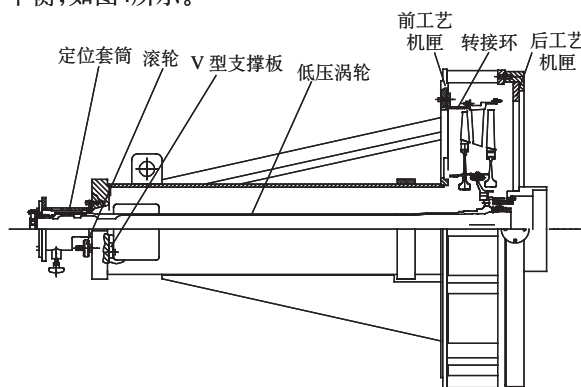


图4 带静子平衡工艺方案

Fig. 4 With the stator balancing process program

平衡时,通过轴前的定位套筒、法兰盘与平衡机传动轴连接,带动转子转动;轴向定位夹装置保证转静子轴向间隙。V型支承板和螺纹杆的设计,使得在平衡过程中对前轴套的转位操作简单方便。前后工艺机匣件采用钢管连接,方便平衡过程中加平衡配重块进行平衡。在平衡工装的设计过程中,为保证达到平衡精度,在对轴承座的刚度及配合面的同轴度精度有较高的要求。另外,平衡工装设计一般原则重量尽量轻,但对于框架类支撑结构,更要关注的是其刚度是否满足要求。

带静子平衡工艺方案的突出优点为:

(1) 通过平衡工装支撑静子,平衡过程中利用支点轴承进行支撑,平衡工序前后不需要对转子叶片、导向器及支点

轴承进行分解,提高了工作效率;

(2) 平衡过程中利用支点轴承进行支撑,平衡状态更接近转子工作状态,也避免了由工装带来的影响;

(3) 减少不必要的分解工作,增加了机件的寿命。

带静子平衡工艺相对转子单独平衡工艺,该平衡工装结构较复杂,具体体现在平衡准备操作过程中。

3 稳定性试验

两种平衡方案均能够达到对低压涡轮转子进行平衡的目的,这里主要是对两种平衡方案的稳定性进行验证。通过对多次测量不平衡量数据进行对比分析,反映出转子平衡系统测量是否稳定。

试验完成后需要对试验数据进行处理,由于不平衡量为矢量数据,所以在计算均值及标准差过程中均采用矢量计算。计算标准差主要是用来反映不平衡量数据的波动情况,计算公式如下:

(1) n 个测量值 样本的矢量平均值:

$$\bar{\vec{y}} = \frac{\sum_{i=1}^n \vec{y}_i}{n}$$
 (1)

(2) n 个测量值 $y_1, y_2, \dots, y_n$ 的样本标准差:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\vec{y}_i - \bar{\vec{y}})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n y_i^2 - n(\bar{y})^2}{n-1}}$$
 (2)

试验过程为:分别组装好低压涡轮转子平衡组件,按照操作规范将转子平衡组件吊装到平衡机上,做好平衡前准备工作。设定好平衡机额定转速,待平衡机运转稳定后采集转子不平衡量。连续开车测量转子不平衡量,分别测量5次。

表1为两种平衡方案5次测量的数据及数据处理结果,图5为两修正面动不平衡量分布情况。

分别计算了低压涡轮转子动不平衡量及静不平衡量的标准差,两种平衡方案测量的转子不平衡量稳定性均较好,能够满足转子平衡的需求。由于转子本身叶片结构、叶片活动量等因素的影响,在对转子不平衡量测量过程中会存在一定的波动,而且实际工作中不同台份的转子叶片松紧度也会有差异,所以波动情况会略有不同。

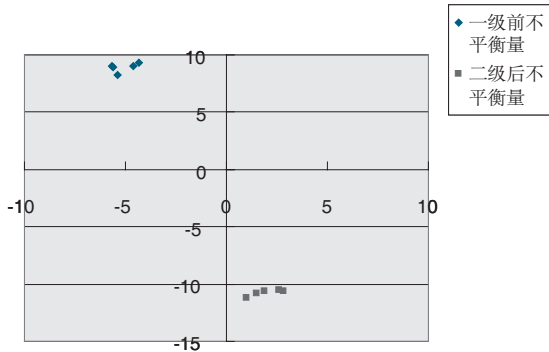
4 结论

本文介绍了航空发动机低压涡轮转子平衡的两种方案,从方案工艺性、试验数据来看,两种平衡方案均能满足对转子不平衡量测量平衡的需求。两种工艺方案各有优缺点,分析总结如下:

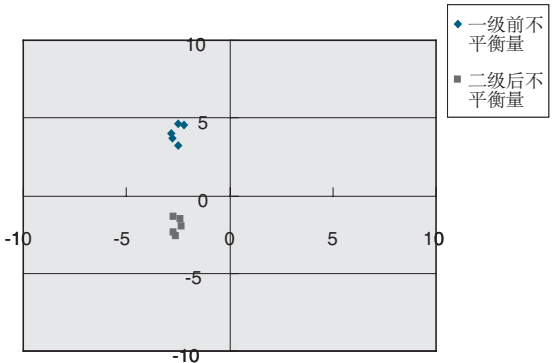
表1 5次不平衡量测量结果

Table 1 Imbalance measurement results in 5 times

测量 次数	一级修正面 不平衡量		二级修正面 不平衡量		静不 平衡量	
	大小/g	相位/(°)	大小/g	相位/(°)		
转子 单独 平衡	1	9.9	123	10.8	284	3.54
	2	10.6	122	10.8	284	3.35
	3	10.7	122	11.0	283	3.60
	4	10.1	117	11.0	278	3.58
	5	10.3	115	11.2	277	3.66
标准差		0.72g		0.74g		0.11
带静子 平衡	1	4.1	128	3.0	207	5.52
	2	4.6	127	2.8	213	5.55
	3	4.9	125	3.1	220	5.53
	4	5.3	118	3.7	225	5.47
	5	5.1	116	3.6	221	5.42
标准差		0.65g		0.56g		0.05



(a) 转子单独平衡连续开车不平衡量分布



(b) 带静子平衡连续开车不平衡量分布

图5 5次测量不平衡量分布图

Fig. 5 Imbalance measurement distribution in 5 times

(1) 转子单独平衡方案,需要对导向器、转子叶片以及支点轴承进行重复分装,增加了工作量同时也破坏了转子的平衡状态,但其平衡工装相对简单,操作方便;

(2) 带静子平衡方案更接近转子工作状态,不需要进行重复分装工作,但平衡工装相对复杂,平衡过程中添加配重块等操作会受空间的限制;

综上,在对平衡工艺方案进行设计过程中,应根据实际情况进行选择,若需要将低压涡轮静子分下,则可以采用转子单独平衡的方式,操作简单;若不需要分解,选择带静子平

衡方式即提高效率同时也能够达到平衡效果。

AST

参考文献

- [1] 哈托·施耐德. 平衡技术理论与实践[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.
Hato Schneider. Balancing technology theory and practice [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1981. (in Chinese)
- [2] SAEARP4163. Balancing machines: tooling design criteria[S]. 2003.
- [3] GB/T 9239.2-2006. 机械振动: 恒态(刚性)转子平衡品质要求[S]. 2006.
GB/T 9239.2-2006. Mechanical vibration; Balance quality requirements for rotors in a constant(rigid) state[S]. 2006.
- [4] 廖明夫. 转子动力学基础[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2004.
LIAO Mingfu. Rotor dynamics[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2004. (in Chinese)
- [5] 王娟, 史新宇, 王文宇. 发动机转子平衡测量稳定性技术研究[J]. 航空科学技术, 2015, 26(07): 17-21.
WANG Juan, SHI Xinyu, WANG Wenyu. Research on the measurement stability technology of engine rotor balancing[J]. Aeronautical Science & Technology, 2015, 26(07): 17-21. (in Chinese)
- [6] 周仁睦. 转子动平衡原理、方法和标准[M]. 北京: 化学工业出版社, 1992: 7-24.
ZHOU Renmu. Rotor dynamic balance principle, method and standard [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1992: 7-24. (in Chinese)
- [7] 刘长福, 邓明. 航空发动机结构分析[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006.
LIU Changfu, DENG Ming. Aircraft engine structure analysis [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2006. (in Chinese)
- [8] 王冰. 航空发动机平衡模拟转子加工工艺分析[J]. 航空发动机, 1997(3): 44-47.
WANG Bing. Aeroengine rotor balance simulation process analysis [J]. Journal of Aircraft Engine, 1997(3): 44-47. (in Chinese)
- [9] 周骏, 潘晓铭, 周哲为. 转子动平衡技术研究[J]. 机械设计与制造, 2007, 4(4): 151-153.
ZHOU Jun, PAN Xiaoming, ZHOU Zhewei. Rotor balancing technology research[J]. Machinery Design & Manufacture, 2007, 4(4): 151-153. (in Chinese)
- [10] 刘志强. 航空发动机高压转子动平衡工艺技术研究[J]. 中国科技博览, 2014: 385-385.
LIU Zhiqiang. Aircraft engine high-pressure rotor dynamic balancing technology research [J]. China Science and Technology Review, 2014: 385-385.

作者简介

王娟(1986—)女, 硕士, 工程师。主要研究方向: 发动机装配研究。
Tel: 024-24282530 E-mail: wang371179231@163.com

Research on the Balancing Technology of Aeroengine Low-pressure Turbine Rotor

WANG Juan*, SHI Xinyu

Shenyang Gngine Design Institute, Shenyang 110015, China

Abstract: The low-pressure turbine rotor of aeroengine has the characteristics of compact structure, center near end bearing and high assembly accuracy, brings great challenge to the rotor balance. In this paper, on the basis of analyzing the structural characteristics of the rotor, put forward and discussed in detail with pivot bearings with low pressure turbine rotor, without pivot bearing two equilibrium solution. And then analyzed the key factors and the advantages and disadvantages of two kinds of scheme design. Summarized the shaft sleeve and framework class balance tooling design criterion, and the stability of the two schemes was verified by experimental comparison, design with reference to other rotor balancing technology and popularization value.

Key Words: aeroengine; low-pressure turbine; rotor balance; balance process; stability test

Received: 2015-11-13; Revised: 2015-12-30; Accepted: 2015-12-30

*Corresponding author. Tel.: 024-24282530 E-mail: wang371179231@163.com