航空科学技术
Aeronautical Science & Technology
Aug. 15 2018 Vol. 29 No.08 23-27

封严环的不平衡量及配合关系对低压系统振动的影响分析

王洪明*， 孙汕民，李希顺

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：为研究低压系统振动的影响因素，通过结构平面简化和数据统计，分析盘间封严环不平衡量、盘间封严环与低压一级涡轮盘配合间隙值等因素对低压系统振动的影响，提出盘间封严环的不平衡量越大则低压系统振动的可能性越大、盘间封严环与低压一级涡轮盘配合间隙值越大则低压系统振动的可能性越大。因此，控制盘间封严环不平衡量和盘间封严环与低压一级涡轮盘的配合间隙值是控制低压系统振动的有效措施。

关键词：低压涡轮转子部件；低压系统；不平衡量；配合间隙；发动机振动

中图分类号：V231.92 **文献标志码**：A DOI：10.19452/j.issn1007-5453.2018.08.023

航空发动机作为飞机的重要组成部分，被喻为飞机的“心脏”[1,2]，其工作中的振动问题是重要故障之一，影响航空发动机的使用寿命和工作效率[1,3]。航空发动机转动系统由四大核心转子部件组成，即高压压气机转子部件、低压压气机转子部件、高压涡轮转子部件和低压涡轮转子部件，转子部件工作过程中产生不平衡惯性力和惯性力矩，是航空发动机振动主要的激振源，因此，各转子部件的不平衡量控制和稳定性尤为重要[1,5~11]。

低压涡轮转子部件作为航空发动机的重要组成部分，盘间封严环的不平衡量对低压涡轮转子部件不平衡量贡献较大。盘间封严环与低压一级涡轮盘的配合关系影响低压涡轮转子部件的稳定性，当配合间隙较大时，盘间封严环的活动量较大，给旋转的低压涡轮转子部件带来不稳定性，影响低压涡轮转子平衡。因此，亟待研究盘间封严环不平衡量、盘间封严环与低压涡轮盘配合关系对低压系统振动的影响。

1 低压涡轮转子结构

低压涡轮转子部件由低压一级涡轮盘片组件、低压二级涡轮盘片组件、盘间封严环和低压涡轮轴等组成，如图1所示。在装配时，低压一级涡轮盘片组件、低压二级涡轮盘片组件、低压涡轮轴通过螺栓连接，盘间封严环与低压一级涡轮盘通过配合止口和定位销定位、盘间封严环与低压二级涡轮盘通过配合止口定位。其中，低压一级涡轮盘片组件、低压二级涡轮盘片组件、低压涡轮轴不平衡量较小，低压涡轮转子部件不平衡量主要由盘间封严环贡献。

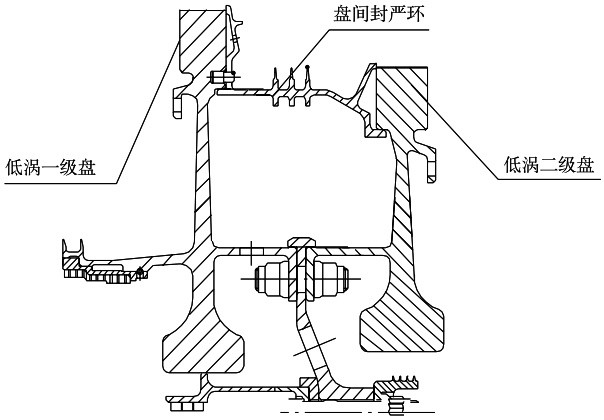

图1 低压涡轮转子部件组成

Fig.1 Composition of low-pressure turbine rotor

2 盘间封严环不平衡量对低压系统振动影响分析

2.1 理论分析

低压一级涡轮盘片组件、低压二级涡轮盘片组件、低压涡轮轴不平衡量较小，低压涡轮转子的不平衡量主要由盘间

收稿日期：2018-05-11； 退修日期：2018-06-24； 录用日期：2018-07-26

* 通信作者 . Tel.：010-85672460 E-mail：375416007@qq.com

引用格式：Wang Hongming, Sun Shanmin, Li Xishun. Influence of the imbalance and matching relationship of the sealing ring on the vibration of the low pressure system [J].Aeronautical Science & Technology,2018,29(08)：23-27. 王洪明，孙汕民，李希顺 . 封严环的不平衡量及配合关系对低压系统振动的影响分析 [J]. 航空科学技术,2018,29(08)：23-27.

封严环不平衡量贡献，在低压涡轮转子部件平衡时，以低压涡轮轴两端轴承面作为支点，对低压涡轮转子部件进行不平衡量检查，当低压涡轮转子部件存在不平衡量时，通过调整低压二级涡轮工作叶片的顺序使低压涡轮转子部件达到平衡状态。

可以将低压涡轮转子平衡过程简化成如图 2 所示模型。

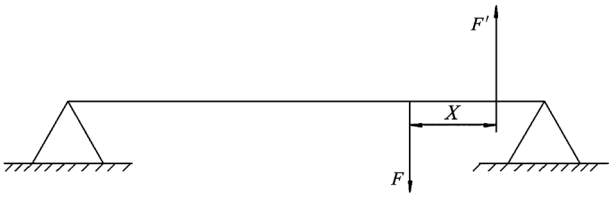

图 2 低压涡轮转子平衡简化模型

Fig.2 Simplified model of low-pressure turbine rotor balance

假设盘间封严环的不平衡量为 P，则：

$$P=\Delta m\times r \tag{1}$$

式中：Δm 为盘间封严环对点质量差，单位为 kg；r 为盘间封严环旋转半径，单位为 m。

假设盘间封严环中心到各点的半相等，则说明盘间封严环质量不均匀，存在质量差 Δm，当低压涡轮转子部件旋转时，所受到的离心力为：

$$F=\Delta m\times\omega^2\times r \tag{2}$$

式中：F 为盘间封严环离心力，单位为 N；w 为盘间封严环旋转角速度，单位为 rad/s。

当通过调整低压二级涡轮叶片使低压涡轮转子部件达到力的平衡时，低压二级涡轮盘片组件存在一个不平衡力 F'，则：

$$F=F'$$

假设盘间封严环与低压二级涡轮盘片组件之间距离为 X，则低压涡轮转子部件承受的力矩不平衡量为：

$$M=F\times X \tag{3}$$

式中：M 为力矩，单位为 N·m。

盘间封严环与低压二级涡轮盘片组件之间距离 X 不变，根据式 (1)～式 (3)，盘间封严环不平衡量越大时，低压涡轮转子部件的力矩不平衡量越大，对低压系统的振动越不利。并且发动机工作时低压涡轮转子部件的角速度大于不平衡量检查时低压涡轮转子部件的角速度，根据式 (2)、式 (3)，随着角速度的增大，力矩不平衡量会增大，对低压系统的振动越极为不利。

2.2 统计分析

统计 200 台次盘间封严环的不平衡量，分析发动机的试车表现，低压分量值是低压系统振动结果的体现，一般以 Y 作为分界线，振动值在 Y 以下的认为表现良好，振动值在 Y 以上的认为表现较差。

将盘间封严环不平衡量每 500g·mm 划分为一个阶段，分析每个阶段中低压分量在 0~Y 以及低压分量在 Y 以上的比例分布，如图 3 所示。

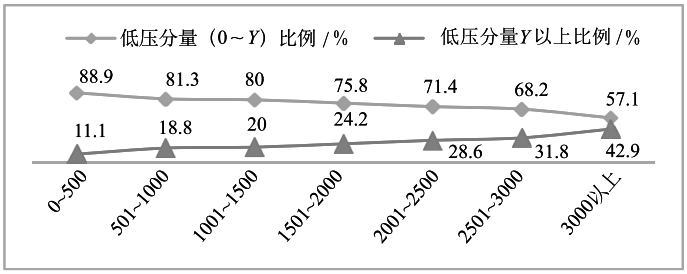

图 3 盘间封严环不平衡量对低压系统振动影响比例图

Fig.3 Proportional diagram of the influence of disc seal ring imbalances on vibration of low-pressure system

根据图 3 可知，随着盘间封严环不平衡量值的增大，试车时低压分量在 0~Y 之间的比例逐渐下降，而低压分量超过 Y 的比例在不断上升，表明盘间封严环的不平衡量越大，低压系统振动的可能性越大，因此，控制盘间封严环不平衡量是控制低压系统振动的有效措施之一。

3 盘间封严环、低压涡轮盘配合量对低压系统振动影响分析

3.1 理论分析

盘间封严环通过止口配合与低压一级涡轮盘连接，配合量在过盈 0.10~ 间隙 0.12 之间，盘间封严环与低压二级涡轮盘之间亦是间隙配合，配合量在间隙 0.06~ 间隙 0.24 之间，因此，盘间封严环与低压一级涡轮盘配合尺寸关系到盘间封严环在低压涡轮转子部件中的稳定性。

当盘间封严环与低压一级涡轮盘配合量为间隙时，低压一级涡轮盘与盘间封严环的理论圆心为 O，低压涡轮转子部件旋转时，盘间封严环的几何圆心由 O 点移动至 O_1 点，旋转圆心仍然为 O 点，盘间封严环做偏心运动，产生新的不平衡量，如图 4 所示。

设盘间封严环与低压一级涡轮盘的配合为间隙 z，则 O 点到 O_1 点的直线距离为 $z/2$。设盘间封严环的几何半径为 r，则盘间封严环旋转半径为：

$$r_1=r-\frac{z}{2}$$

$$r_2=r+\frac{z}{2}$$

式中：r_1 为短轴半径，单位为 m；r_2 为长轴半径，单位为 m。

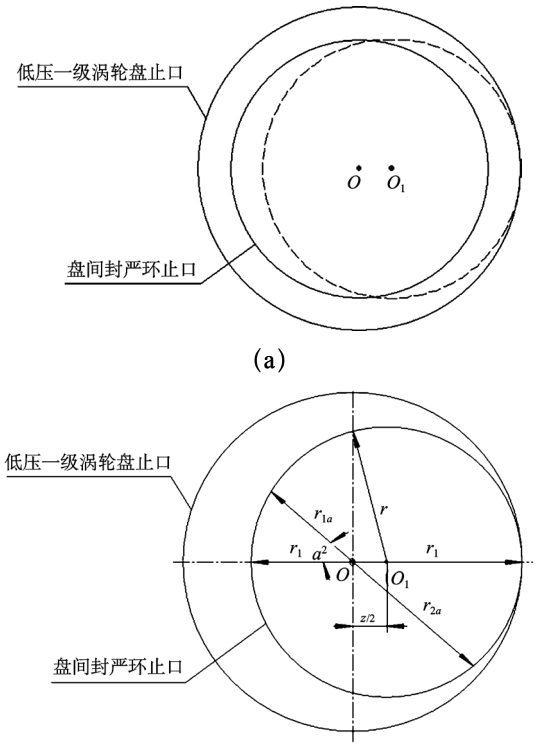

图 4 盘间封严环偏心图

Fig.4 Eccentricity diagram of disc sealing ring

设盘间封严环的整体质量为 M，以旋转中心 O 为原点，在 $a°$ 时，d_a 的质量为：

$$M_{1a}=\frac{M\times r_{1a}\times d_a}{2\times\pi\times r} \tag{4}$$

式中：M_{1a} 为短轴侧在 $a°$ 时 d_a 的质量，单位为 kg；r_{1a} 为短轴侧在 $a°$ 时旋转半径，单位为 m。

$$M_{2a}=\frac{M\times r_{2a}\times d_a}{2\times\pi\times r} \tag{5}$$

式中：M_{2a} 为长轴侧在 $a°$ 时 d_a 的质量，单位为 kg；r_{2a} 为长轴侧在 $a°$ 时旋转半径，单位为 m。

根据式 (4)、式 (5) 可得：

$$\Delta P=2\int_0^{\frac{\pi}{2}}(M_{2a}\times r_{2a}\times\cos a-M_{1a}\times r_{1a}\times\cos a) \tag{6}$$

式中：ΔP 为不平衡量差值。

将式 (4)、式 (5) 代入式 (6) 得出：

$$\Delta P=\frac{M}{2\times\pi\times r}\int_0^{\frac{\pi}{2}}(r_{2a}^2-r_{1a}^2)\times\cos\alpha d_\alpha \tag{7}$$

根据余弦定理得：

$$r^2=r_{2a}^2+\left(\frac{Z}{2}\right)^2-2\times r_{2a}\times\frac{z}{2}\times\cos\alpha \tag{8}$$

$$r^2=r_{1a}^2+\left(\frac{Z}{2}\right)^2-2\times r_{1a}\times\frac{z}{2}\times\cos\alpha \tag{9}$$

由式 (8)、式 (9) 得：

$$r_{2a}-r_{1a}=z\times\cos\alpha \tag{10}$$

再根据：

$$r_{2a}+r_{1a}=2r \tag{11}$$

由式 (10)、式 (11) 得出：

$$r_{2a}^2-r_{1a}^2=2r\times z\times\cos\alpha \tag{12}$$

将式 (12) 代入式 (7) 得出：

$$\Delta P=\frac{M}{\pi}\times\int_0^{\frac{\pi}{2}}z\times(\cos\alpha)^2 d_\alpha \tag{13}$$

由式 (13) 可以得出，盘间封严环与低压一级涡轮盘的止口配合间隙越大，由盘间封严环引起的不平衡量越大，低压涡轮转子在工作过程中稳定性越差，越易引起发动机振动问题。

3.2 统计分析

统计 200 台次盘间封严环与低压一级涡轮盘配合情况，分析发动机的试车表现，低压分量值是低压系统振动结果的体现，一般以 Y 作为分界线，振动值在 Y 以下的认为表现良好，振动值在 Y 以上的认为表现较差。

将盘间封严环不平衡量每 0.02mm 划分为一个阶段，分析每个阶段中低压分量在 0~Y 以及低压分量在 Y 以上的比例分布，如图 5 所示。

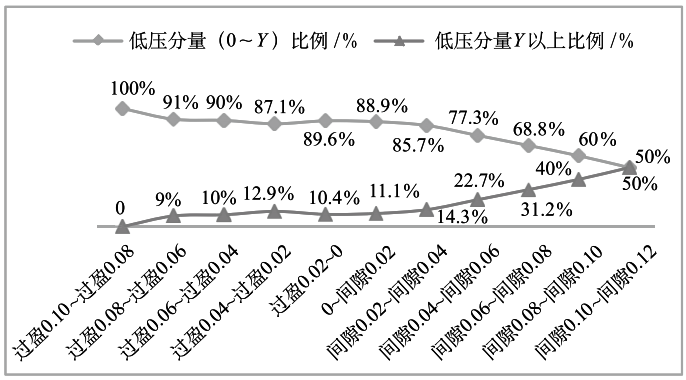

图 5 盘间封严环与低压一级涡轮盘配合对低压系统振动影响比例图

Fig.5 Proportional diagram of the influence of the relationship between disc seal ring and low-pressure turbine diskon vibration of low-pressure system

根据图 5 可知，随着盘间封严环与低压一级涡轮盘的配合间隙值的增大，试车时低压分量在 0~Y 之间的比例逐渐下降，而低压分量超过 Y 的比例在不断上升，表明盘间封严环与低压一级涡轮盘的配合的间隙值越大，低压系统振动的可能性越大。当盘间封严环与低压一级涡轮盘配合在间隙 0.04 至过盈时，试车时低压分量在 0~Y 之间的比例基本相当，因为受盘间封严环形位公差影响，盘间封严环与低压

一级涡轮盘存在局部过盈，配合尺寸对低压系统振动影响不明显。因此，当盘间封严环与低压一级涡轮盘配合间隙在0.04以上时，控制盘间封严环与低压一级涡轮盘的配合量是控制低压系统振动的有效措施之一。

4 结论

通过研究，可以得出以下结论：

（1）盘间封严环的不平衡量越大，低压系统振动的可能性越大，控制盘间封严环不平衡量是控制低压系统振动的有效措施之一。

（2）盘间封严环与低压一级涡轮盘配合在间隙0.04至过盈时，试车时低压分量在0~Y之间的比例基本相当，当盘间封严环与低压一级涡轮盘配合间隙在0.04以上时，控制盘间封严环与低压一级涡轮盘的配合量是控制低压系统振动的有效措施之一。

参考文献

[1] 罗立，唐庆如．航空发动机振动与平衡研究 [J]. 中国民航飞行学院学报，2014（5）：57-60.
Luo Li，Tang Qingru. Research on vibration and balance of aero-engine[J].Journal of Civil Aviation Flight University of China，2014（5）：57-60.（in Chinese）

[2] 岳聪，任兴民，邓旺群，等．航空发动机转子突加不平衡参数分析及LQR控制技术应用 [J]. 振动与冲击，2015，34（17）：174-179.
Yue Cong，Ren Xingmin，Deng Wangqun，et al. Parametric analysis due to sudden unbalance change and LQR control application for aeroengine rotor systems[J].Journal of Vibration and Shock，2015，34（17）：174-179.（in Chinese）

[3] 张群岩，史建邦，符烧．基于多元线性回归方法的试验条件对发动机振动的影响分析 [J]. 机械研究与应用，2016，29（4）：114-117.
Zhang Qunyan，Shi Jianbang，Fu Yao. Influence analysis of testing conditions on engine vibration base on MLR[J].Mechanical Research & Application，2016，29（4）：114-117.（in Chinese）

[4] 朱亚夫，丁宏刚，曹光光．汽车起重机发动机振动分析 [C]// 中国工程机械学会工程起重机械分会第17届年会会刊，2015：201-207.
Zhu Yafu，Ding Honggang，Cao Guangguang.Vibration analysis of motor crane engine[C]//Association Journal of the 17th Annual Conference of China Construction Machinery Academy，Council of Hoisting Machiney，2015：201-207.（in Chinese）

[5] 周骏，潘晓铭，周哲为．转子动平衡的技术研究 [J]. 机械设计与制造，2007（04）：151-153.
Zhou Jun，Pan Xiaoming，Zhou Zhewei. Rotator dynamic balance technology studies[J]. Machinery Design & Manufacture，2007（04）：151-153.（in Chinese）

[6] 张大林．离心泵不平衡振动的故障诊断分析 [J]. 建设机械技术与管理，2015，28（12）：67-69.
Zhang Dalin. Diagnosis and analysis of unbalance vibration fault for the centrifugal pump[J].Machinery Technology & Management，2015，28（12）：67-69.（in Chinese）

[7] 刘静宇．CFM56-7B发动机振动指示高故障分析 [J]. 航空维修与工程，2012（01）：58-59.
Liu Jingyu. Analysis of CFM56-7B engine vibration high fault[J].Aviation Maintenance and Engineering，2012（01）：58-59.（in Chinese）

[8] 王宇飞，谢永鹏．旋转机械转子不平衡故障的诊断与分析 [J]. 湖南工业职业技术学院学报，2009，9（05）：6-7.
Wang Yufei，Xie Yongpeng. Fault diagnosis and analysis of rotor imbalance of rotation machinery[J]. Journal of Hunan Industry Polytechnic，2009，9（05）：6-7.（in Chinese）

[9] 刘翠红，王克明，夏锟，等．转子系统不平衡响应的逆向分析 [J]. 沈阳航空航天大学学报，2016，33（4）：30-37.
Liu Cuihong，Wang Kepeng，Xia Kun，et al. Reverse analysis of rotor unbalance response[J]. Journal of Shengyang Aerospace Uniwersity，2016，33（4）：30-37.（in Chinese）

[10] 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）

[11] 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.
Wang Juan，Shi Xinyu. Research on the balancing technology of aeroengine low-pressure turbine rotor[J].Aeronautical Science & Technology，2017，27（02）：25-28.（in Chinese）

作者简介

王洪明（1987- ）男，硕士，工程师。主要研究方向：航空发动机盘轴修理装配技术。

Tel：010-85672460 E-mail：375416007@qq.com

孙汕民（1980- ）男，学士，高级工程师。主要研究方向：航空发动机修理装配技术。

李希顺（1979- ）男，学士，高级工程师。主要研究方向：航空发动机平衡技术。

Influence of the Imbalance and Matching Relationship of the Sealing Ring on the Vibration of the Low Pressure System

Wang Hongming*, Sun Shanmin, Li Xishun

AECC Shenyang Liming Aero-engine Co., Ltd., Shenyang 110043, China

Abstract: In order to study factors affecting the vibration of low pressure system, through structural plane simplification and statistical analysis, the influence of the unbalance between the disc seal ring, the gap between the disc seal ring and the low pressure turbine disk on the vibration of the low pressure system was analyzed. It is proposed that the greater imbalance of disc seal ring, the greater possibility of the vibration of the low pressure system, and the greater clearance between the seal ring and the low pressure first turbine disk, the greater the possibility of the vibration of the low pressure system. Therefore, it is an effective measure to control the vibration of the low pressure system by controlling the unbalance between the disc seal ring and the gap between the disc seal ring and the low-pressure first level turbine disk.

Key Words: low-pressure turbine rotor; low-pressure system; unbalance; clearance; aero-engine vibration

Received: 2018-05-11; **Revised:** 2018-06-24; **Accepted:** 2018-07-26

***Corresponding author.Tel.:** 010-85672460 **E-mail:** 375416007@qq.com