

# 基于转子动力学特性分析的 局部共振诊断研究

金 路, 朱东华, 王 伟, 黄金平, 宣 统  
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 建立了支承局部共振动力学模型, 给出了利用振动数据进行局部共振频率预测的方法。进行了转子动力学试验, 试验转子含有 2 个盘和 2 个支承并固定到柔性摆架上, 试验中出现单个支承外传力超限, 但盘的振动位移幅值较小, 且有上升趋势的现象, 符合支承局部共振的特征。利用局部共振频率预测方法对振动数据进行处理, 得到了理论预测的局部共振频率。进行了模态试验, 得出的局部共振频率与理论预测吻合, 同时也验证了局部共振诊断。结合模态振型对摆架进行了改进, 改进后, 消除了该处局部共振。

**关键词:** 转子特性参数; 局部共振; 模态试验; 故障诊断

**中图分类号:** TH113.1-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2017) 03-0006-05

## Fault diagnosis of local resonance based on rotordynamic analysis

JIN Lu, ZHU Donghua, WANG Wei, HUANG Jinping, XUAN Tong  
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** Local resonance rotordynamic model was developed. The method of forecasting local resonance frequency was carried out using the vibration data picked from the rotor. Rotordynamic experiment was taken with the rotor which consists of two disks and two bearings supported by flexible pedestals. The outward force of one pedestal was out of range, while the vibration of the disks was small with uptrend. The phenomena accords with local resonance. The method of forecasting local resonance frequency was used to analyze the vibration data, as the result, the theoretical frequency was found. Modal test was carried out, and similar frequency to theoretical one was got, which also prove the fault diagnosis of local resonance. The pedestals was redesigned based on the mode shape, which removes the local resonance out of the working range.

**Keywords:** rotordynamic characteristic parameter; local resonance; modal test; fault diagnosis

收稿日期: 2016-09-29; 修回日期: 2017-02-14

基金项目: 国家重大基础研究项目(613321)

作者简介: 金路 (1986—), 男, 博士, 研究领域为涡轮泵设计, 转子动力学

## 0 引言

由于轴承、密封等特性参数难以准确地建模, 临界转速及不平衡响应计算存在不同程度的误差, 因而, 动力学计算往往需要试验修正。转子特性参数估计法是在测试得到转子不同转速下振动数据的基础上, 利用转子动力学理论模型, 估计出转子的特性参数的方法<sup>[1-3]</sup>。

局部共振是指某些结构组件受到激振力的作用时, 当激振力的频率域该结构的固有频率相等而引起的共振<sup>[4]</sup>, 在共振频率附近, 临界转速共振与局部共振有着相似的动力学方程。本文将预测动力学特性参数的转子特性参数估计法用于支承结构局部共振的诊断中, 并通过试验进行了验证。

## 1 局部共振动力学模型

支承系统发生局部共振时, 其激振力主要为转子在该转速下的不平衡力。与临界转速附近的运动学方程<sup>[5-7]</sup>类似, 局部共振转速附近的动力学方程为:

$$\ddot{r} + 2\xi\omega_n \dot{r} + \omega_n^2 r = \varepsilon \Omega^2 e^{j\Omega t} \quad (1)$$

式中:  $\xi$  为模态阻尼比;  $\omega_n$  为支承系统局部结构固有频率;  $\varepsilon$  为不平衡偏心距;  $\Omega$  为转子转频。

方程的通解为:

$$r = \frac{\varepsilon \Omega^2}{\sqrt{(\omega_n^2 - \Omega^2)^2 + (2\xi\omega_n\Omega)^2}} e^{(j\Omega t - \beta)} \quad (2)$$

将式 (2) 的幅值部分定义为  $R$ , 则:

$$R = \frac{\varepsilon \Omega^2}{\sqrt{(\omega_n^2 - \Omega^2)^2 + (2\xi\omega_n\Omega)^2}} \quad (3)$$

式中:  $R$ ,  $\Omega$  为测量值;  $\varepsilon$ ,  $\omega_n$  和  $\xi$  为未知量。

构造误差函数:

$$f = \sum_{k=1}^n \left| \bar{R}(\Omega_k) - R(\Omega_k) \right|^2 \quad (4)$$

式中  $\bar{R}(\Omega_k)$  和  $R(\Omega_k)$  分别为各转速下的测试值和理论值。

对误差函数 (4) 可使用优化算法进行求解,

求解前, 可使用如下方法求初值。

先假设阻尼比  $\xi=0$ , 则整理式 (3) 可得:

$$R\omega_n^2 - \varepsilon\Omega^2 = R\Omega^2 \quad (5)$$

将各转速下的振幅  $\bar{R}(\Omega_k)$  带入方程 (5) 中, 得到以  $\omega_n^2$  和  $\varepsilon$  为未知数的  $n$  个二元一次方程, 构造矩阵  $A$  和向量  $b$ ,  $x$ :

$$A = \begin{bmatrix} \bar{R}(\Omega_1) - \Omega_1^2 \\ \bar{R}(\Omega_2) - \Omega_2^2 \\ \dots \\ \bar{R}(\Omega_n) - \Omega_n^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$b = \begin{bmatrix} \bar{R}(\Omega_1)\Omega_1^2 \\ \bar{R}(\Omega_2)\Omega_2^2 \\ \dots \\ \bar{R}(\Omega_n)\Omega_n^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$x = \begin{bmatrix} \omega_n^2 \\ \varepsilon \end{bmatrix} \quad (8)$$

则方程 (5) 变为:

$$Ax = b \quad (9)$$

利用最小二乘法求解方程 (9), 方程 (9)

两边同时乘以  $A^T$ , 得:

$$A^T Ax = A^T b \quad (10)$$

求解方程 (10), 则可以得到方程 (5) 的最小二乘解。该解可作为误差函数 (4) 优化算法的初始值, 并可以用来预估参数的取值范围。

利用以上方法, 可在转子转速接近但不通过局部共振点的情况下, 预测到转子的局部共振点。

## 2 局部共振故障分析

某试验转子的结构示意图如图 1 所示。转子由转轴、2 个轮盘和 2 个支承组成。

试验在高速动平衡机上进行, 2 个支承均固定到动平衡机自带的柔性摆架上, 柔性摆架见图 2。在 2 个盘上测试振动位移, 并在 2 个摆架上测试支承外传力。

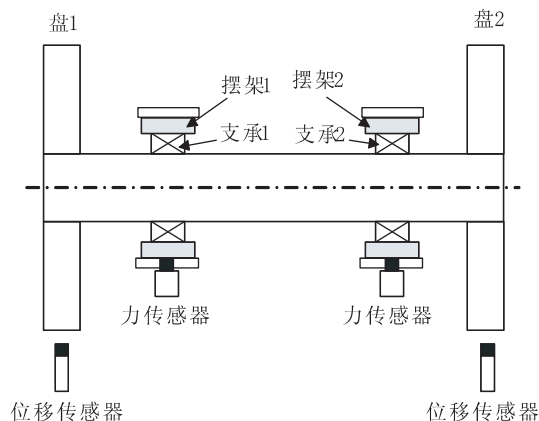


图1 某试验转子结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the test rotor



图2 柔性摆架

Fig. 2 Flexible pedestal

试验中，转子顺利通过一阶和二阶临界转速。继续升速过程中，转速经过 21 000 转/分后，支承 2 的外传力突增，超过预设停机值（2 000 N）时触发停机，停机前转速最高为 23 100 转/分。在此过程中，支承 1 的外传力没有增加的趋势；盘 2 的振动位移也出现突增，但是幅值较小，停机前最大位移为 16  $\mu\text{m}$  左右；盘 1 的振动位移出现小幅增大，停机前最大位移为 3.3  $\mu\text{m}$  左右。

2 个支承的外传力和 2 个盘的振动位移分别如图 3 和图 4 所示。

该转子的计算一阶、二阶临界转速与试验吻合，而计算的三阶临界转速大于 60 000 转/分。如果是运行到临界转速附近，盘 1 的振动位移以及支承 1 的外传力也应该急剧增大。因而，排除接近临界转速的可能性。

本故障发生时，支承 2 的外传力急剧增大，

但是支承 1 的外传力变化不明显，且 2 个盘的振动位移均很小，符合支承 2 局部共振的特征。发生支承局部共振时，支承发生较大振动，但是由于支承刚度较大，导致传输到转子上的力较小，只能在转子上表现出振动小范围增大的趋势。

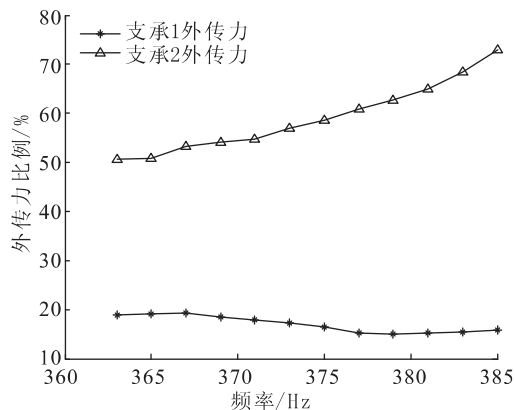


图3 2个支承的外传力

Fig. 3 Outward force of the pedestals

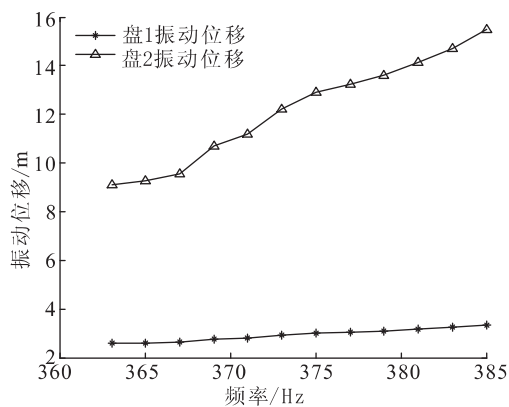


图4 2个盘的振动位移

Fig. 4 Vibration displacement of the disks

为证实以上推论，利用局部共振动力学特性参数估计方法对共振频率进行理论预测，并进行模态试验验证。

将盘 1 的振动位移数据作为方程（5）的输入，利用最小二乘法求出共振频率和偏心距的初始值，并在初始值的基础上扩大 2 倍作为优化计算的最大取值，对误差函数（4）进行优化计算，目标为寻找使误差函数  $f$  为最小值的转子特性参数。

经过优化计算, 得到使误差函数最小的共振频率为 414.7 Hz。试验数据与理论预测得到的结果对比如图 5 所示。

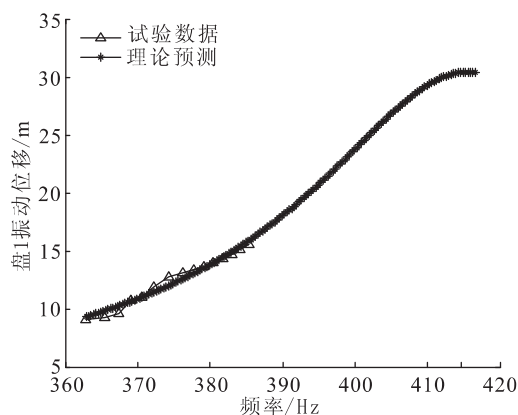


图 5 试验数据与理论预测的对比

Fig. 5 Compare experimental data with theoretical prediction

### 3 试验验证

#### 3.1 模态试验验证

为了对本文的理论和故障诊断结论进行验证, 对整个转子-支承系统进行了模态试验。在 2 个盘、2 个支承、2 个摆架以及转轴上共布置了 50 个振动测点, 并通过锤击得到各测点的响应。通过分析各响应得到转子-支承系统的各阶模态。

试验得到了频率为 413.9 Hz、振型为摆架 2 及支承 2 扭转的局部模态, 该局部模态对转子和支承 1 的影响较小, 符合测试数据反映的现象。结合图 2 所示柔性摆架的结构, 可以看出, 该摆架在与局部模态相同的扭转方向的刚度较小, 消除该局部共振主要需要加强该方向的刚度。

理论预测的局部共振频率比模态试验得到的局部共振频率高 0.8 Hz, 相对误差为 0.2%, 可见, 理论预测的结果是可信的。本次运转试验所采集到的最高频率为 385 Hz, 是局部共振频率的 93%。

#### 3.2 动力学试验验证

为了解决局部共振故障, 不再使用原动平衡机自带的柔性摆架, 而是对 2 个摆架进行重新设计, 使其扭转方向的刚度远大于柔性摆架。

柔性摆架更换为刚性摆架后, 重新对转子进行试验。转子顺利通过 413.9 Hz, 且在 500 Hz 工作转速范围以内不再出现局部共振现象。再一次验证了本文诊断的局部共振故障的准确性。

### 4 结论

通过本文的理论推导和试验验证, 得到如下结论:

1) 转子特性参数估计法所建立的动力学模型同样适用于局部模态共振时的情况。

2) 本文所建立的方法可以在转频尚未达到局部共振频率时 (本文的试验证明达到 93% 转频即可), 预测局部共振的频率, 具有一定的工程实用价值。

3) 模态试验证明本文预测的共振频率准确性较高, 动力学试验证明本次故障诊断及解决措施正确。

#### 参考文献:

- [1] 廖明夫, 蒲秋洪, 钟志才. 转子特性参数的预估和临界响应的预报[J]. 航空动力学报, 2003, 18(3): 367-372.
- [2] 于潇, 廖明夫. 转子特性参数估计和试验研究[J]. 机械科学与技术, 2004, 23(1): 101-104.
- [3] 金路, 廖明夫, 宋明波. 转子在临界转速点的振动和阻尼比的估计方法[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(3): 502-504.
- [4] 廖明夫. 航空发动机转子动力学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2015, 19-23.
- [5] 张洪飏, 李志广. 航空发动机设计手册 转子动力学及整机振动[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000, 371-372.
- [6] 毛乐园, 尹健昭. 立式超速试验台轴系动力特性分析[J]. 火箭推进, 2016, 42(1): 88-94.  
MAO Leyuan, YIN Jianzhao. Analysis on dynamic characteristics of shaft system of vertical overspeed tester [J]. Journal of rocket propulsion, 2016, 42(1): 88-94.
- [7] 窦唯, 刘占生. 液体火箭发动机涡轮泵转子弯扭耦合振动研究[J]. 火箭推进, 2012, 38(4): 17-25.  
DOU Wei, LIU Zhansheng. Research on bend-twist coupling vibration of liquid rocket engine turbopump rotors [J]. Journal of rocket propulsion, 2012, 38(4): 17-25.

(编辑: 马 杰)