

氢涡轮泵次同步振动问题的试验研究

罗巧军, 褚宝鑫, 须 村

(北京航天动力研究所, 北京 100076)

摘 要: 某型氢氧发动机氢涡轮泵采用了超二阶临界转速工作的柔性转子, 为了解决氢涡轮泵研制中发生的次同步振动问题, 采用氢涡轮泵空转试验的研究方法, 通过布置在涡轮泵机组不同位置的位移和加速度传感器, 获取转子的工作信息, 对轴系预紧力、密封动环安装位置、轴系相关零件的配合间隙、金属阻尼器等影响因素进行了研究和试验。试验结果表明, 增加轴系预紧力对抑制异常频率的出现有较为明显的作用; 密封动环的安装位置与轴承的距离越远, 越容易激发出异常振动频率; 适当增加轴套与轴的配合间隙可减小轴系的内摩擦, 进而提高轴系稳定性裕度; 金属橡胶阻尼器的采用对抑制异常振动有明显效果。

关键词: 液氢液氧发动机; 氢涡轮泵; 转子稳定性

中图分类号: V434.21-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2014) 05-0014-06

Experimental research for sub-synchronous vibration problems of hydrogen turbopump

LUO Qiao-jun, CHU Bao-xin, XU Cun

(Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing 100076, China)

Abstract: A supercritical flexible rotor is applied in the hydrogen turbopump of a LOX/LH₂ rocket engine. To solve the sub-synchronous vibration problems occurred during the hydrogen turbopump development, turbopump idling test is conducted in this study. The operating information of the rotor is obtained through the displacement sensors and acceleration sensors arranged in the turbopump. Studies and tests are conducted on influence factors, such as the pre-load on the shaft, location of the seal rotating ring, clearance between components, metal damper, and etc. From test results, it is well acknowledged that the increase of the pre-load is very useful on suppressing the abnormal frequency; the further the seal rotating ring is from the bearing, the easier the emersion of the abnormal vibration frequency; the proper increase of the clearance between the sleeve and the shaft can reduce the internal friction, and hence increase the stability of the system; the application of metal-rubber damper has a positive effect on suppressing the abnormal vibrations.

Keywords: liquid hydrogen-oxygen engine; hydrogen turbopump; rotor dynamic stability

收稿日期: 2014-03-26; 修回日期: 2014-05-17

基金项目: 中国航天科技集团公司支撑项目(2011JY01)

作者简介: 罗巧军 (1965—), 女, 研究员, 研究领域为液体火箭发动机

0 引言

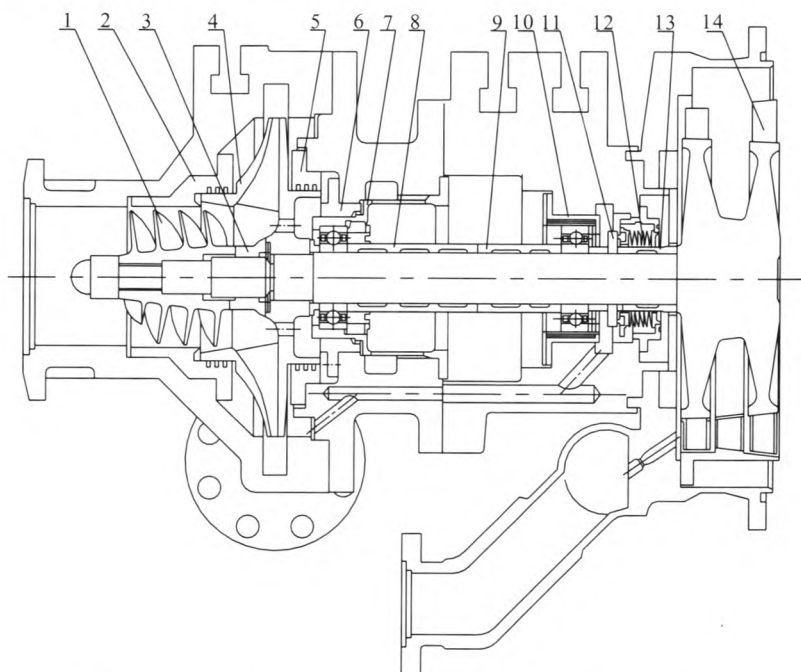
液氢涡轮泵为了得到较好的性能和结构质量, 其转子通常设计为转速较高的超临界柔性转子, 而超临界柔性转子的动态稳定性历来是氢涡轮泵研制中关注的关键和重点问题。

某系列火箭三级氢氧发动机设计于 20 世纪 80 年代末期, 氢涡轮泵工作转速约为 40 000 r/min, 是工作在二、三阶临界转速之间的超临界柔性转子。在研制初期, 曾花费大量的人力和物力解决转子稳定性方面出现的问题, 但受当时经验和研究手段的限制, 以及转子动力学问题的复杂性, 在理论和试验方面开展的研究工作不够深入。因此, 尽管发动机已经多批次的生产, 仍然在某批

次产品的研制过程中再次遇到了转子稳定性的问题, 一度成为影响型号产品交付计划的瓶颈, 为此开展了专题研究工作。本文对研究工作中的部分试验内容进行了总结。

1 氢涡轮泵次同步异常振动特征

氢涡轮泵结构示意图见图 1, 转子系统为双向外伸式结构, 采用双弹性支承, 泵端采用鼠笼式弹性支承, 涡轮端采用衬套式弹性支承。轴系所有零件串装在主轴上, 通过压紧螺母施加预紧力压紧。氢涡轮泵转子的一阶固有频率约为 200 Hz, 二阶固有频率约为 450 Hz, 三阶约为 950 Hz。氢涡轮泵工作转速为 39 000~42 000 r/min (即工频为 660~700 Hz)。



1- 诱导轮; 2- 诱导轮套; 3- 压紧螺母; 4- 离心轮; 5- 密封环; 6- 限制器; 7- 鼠笼座; 8- 轴套 1;
9- 轴套 2; 10- 轴承座; 11- 动环; 12- 静环组件; 13- 轴套 3; 14- 涡轮转子

图 1 氢涡轮泵结构示意图

Fig. 1 Structure of hydorgen turbopump

正常情况下, 氢涡轮泵试车振动数据谱图上的突出频率一般仅为工频及工频的 6 倍频和 12 倍频, 异常振动氢涡轮泵谱图具有如下特征:

1) 振动数据分析谱图中出现转子一阶或二阶临界转速频率的突出频率, 且在试车过程中可能

出现 2 种频率的跳变, 其典型的振动谱图如图 2 所示;

2) 异常频率通常在发动机启动过程时, 氢涡轮泵转速通过一阶或二阶临界转速后被激发, 之后全程一直存在。

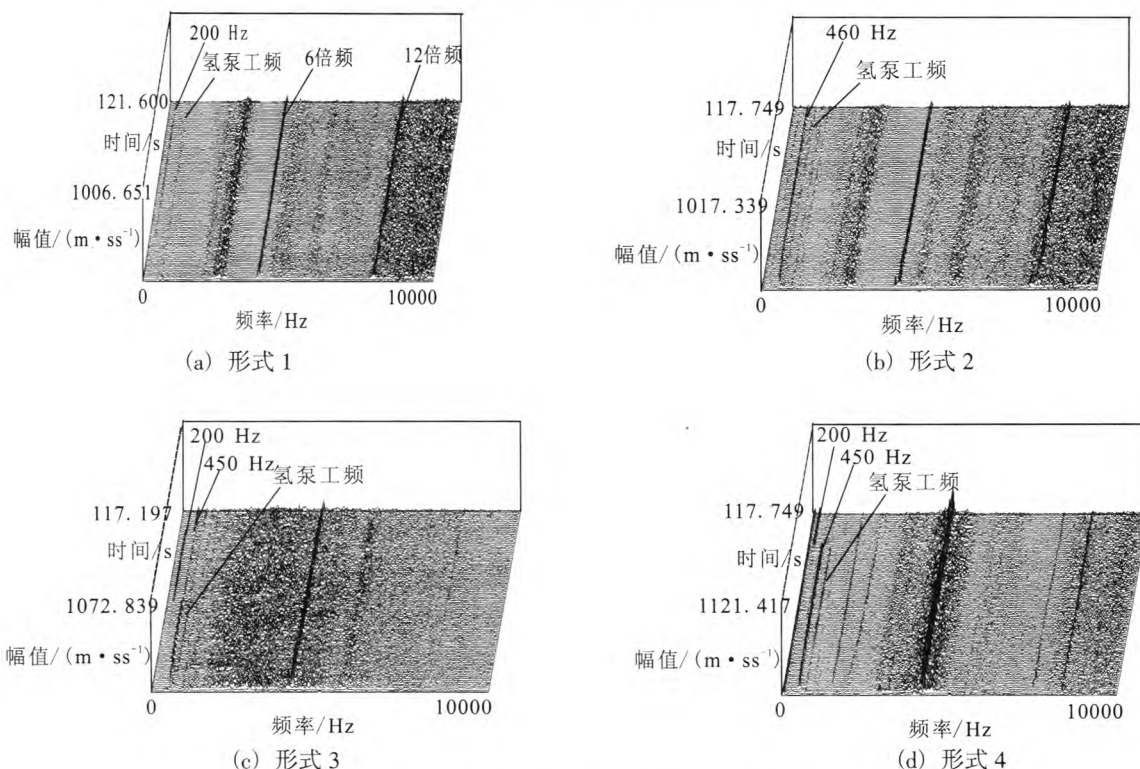


图 2 典型的氢涡轮泵异常振动频率分析谱图

Fig. 2 Spectral analysis of typical abnormal vibration frequency of hydroturbopump

根据研制经验和相关文献,这种转子在以低于自转频率的频率进动的现象称为次同步进动。次同步进动是较常见的转子动态不稳定形式,属于转子系统自激振动。次同步进动是转子通过临界转速后被激发起来的进动频率为低阶固有频率附近的进动。诱发次同步进动的激振力来源于与转子系统自身进动有关联的某些稳定能源,并通过各振动量间的干涉力传递能量。这种相互干涉在运动方程式中具体表现为惯性耦合、阻尼耦合、弹性耦合等。如果干涉力在相位上能够使振动不断加强,则转子的振幅就会不断增大而失稳^[2]。

诱发转子系统发生次同步进动的因素很多,主要有外来干扰力、干摩擦、类似滑动轴承的流体密封、结构内阻尼、材料内阻尼、气弹效应、泵及涡轮因转子进动所产生的流体反作用力等^[2]。

2 氢涡轮泵转子稳定性试验研究方法选择

虽然对旋转机械动态稳定性的理论分析研究是非常有意义的工作,但由于氢涡轮泵转子系统

结构和边界条件的复杂性,理论模型计算分析很难准确地描述出实际转子系统的结构特征,对于解决工程实际问题仍然离不开试验研究方法。

影响氢涡轮泵振动异常的因素非常复杂,如通过发动机试车分析,存在周期长、经费高及制约条件多等问题,而其他如转子动特性试验和模态试验等受试验设备和试验条件等的限制,都无法快速和直观的反应氢涡轮泵机组的整体动态特性,相比之下,涡轮泵空转试验为振动问题的分析提供了快捷方便的分析 and 验证手段。

3 空转研究试验有效性验证

氢涡轮泵空转的试验方法为装配完整的氢涡轮泵机组(个别零组件需考虑常温和低温试验的差异),用压缩空气驱动涡轮,带动氢泵空转(抽吸空气),使转子转速达到二阶临界转速以上。考虑到常温下转动件的强度,将转速控制到约 36 000 rpm。试验中通过布置在壳体和转子不同位置的振动和位移测点获取数据。

为了验证空转试验的有效性,首先针对 1 台试

车振动正常和 2 台试车振动异常的氢涡轮泵进行了空转试验, 结果表明: 由于工作温度和介质等存在差异, 空转试验振动谱图特征与热试车相比存在一些差别, 但试车振动正常的氢涡轮泵在空转试验中

不存在异常振动, 试车振动异常的氢涡轮泵在空转试验中也出现明显的一阶 200 Hz 频率的异常振动, 从而验证了空转试验的有效性。空转试验获得的典型振动谱图见图 3。

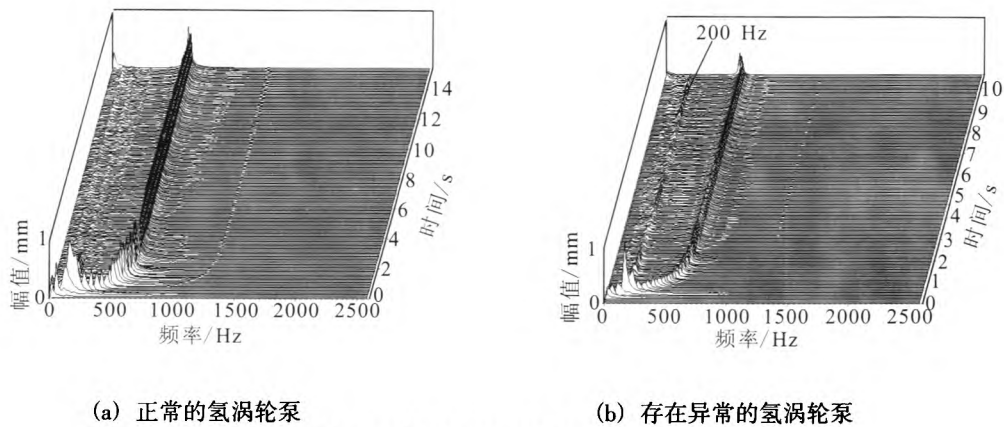


图 3 典型氢涡轮泵空转试验的振动频率分析谱图

Fig. 3 Spectral analysis of typical vibration frequency during idling test of hydrogen turbopump

4 空转试验研究内容

根据氢涡轮泵的结构, 围绕可能影响涡轮泵内、外阻尼的一些因素开展了研究试验, 主要包括端面密封动环轴向安装位置、轴系预紧力、阻尼器、轴套与轴的径向间隙、限制器与鼠笼座间隙、离心轮迷宫密封间隙等开展了试验研究。

4.1 动环轴向安装位置

端面密封动环位于涡轮端轴承与静环组件之间, 装配时其轴向安装位置由动环与轴承座的间隙控制。在转子临界转速计算时是将其简化为作用在轴上的集中质量, 其对轴系稳定性的影响很难从理论上进行分析。

针对动环轴向位置的影响分别采用 2 台经过

试车考核的氢涡轮泵进行了试验对比。对 1 号试车振动数据正常的氢涡轮泵, 将其动环轴与轴承座间隙分别取为 1.2 mm 和 4.0 mm, 对 2 号试车振动数据异常的氢涡轮泵, 将动环与轴承座间隙分别取为 1.5 mm 和 3.2 mm。2 台氢涡轮泵的试验结果均表明: 动环轴向安装位置对氢涡轮泵振动有较大影响, 动环与涡轮端轴承座的间隙越大, 异常振动越容易激发出来。动环轴向安装位置对异常频率量级的影响见表 1。

4.2 轴系预紧力

由图 1 的结构图可见, 氢涡轮泵轴系的零件主要靠离心轮处的螺母压紧, 零件间靠摩擦力连接, 当轴发生交替弯曲变形时, 零件接触面之间会发生微小滑动, 从而产生摩擦力作用, 也可能成为失稳的激振力。

表 1 动环轴向安装位置对异常频率量级的影响

Tab. 1 The influence of rotating ring's installing location on the abnormal frequency order

空转涡轮泵状态	动环与轴承座间隙	mm
		一阶振动频率量级
1 号氢涡轮泵	1.2	0
(试车振动数据正常)	4	0.153
2 号氢涡轮泵	1.5	0.034
(试车振动数据异常)	3.2	0.313

根据转子稳定性理论^[3], 转子失稳开始时的转速即门槛转速或起始失稳转速为:

$$\omega_1 = \left(1 + \frac{n_e}{n_i}\right) \omega_n$$

式中: ω_n 为转子系统的固有频率 (临界转速); n_e 为转子系统的外阻尼; n_i 为内阻尼。可见失稳转速与外、内阻尼比有关, 提高外阻尼 n_e 或减小内阻尼 n_i , 可提高起始失稳转速, 当起始失稳转速高于工作转速时, 转子系统是稳定的。

轴系预紧力对轴系内阻尼有影响, 预紧力越大, 轴的刚性越强, 有利于减小内阻尼。氢涡轮泵的轴系预紧力主要通过压紧螺母的装配力矩控制。为获取压紧螺母装配力矩对振动特性的影响, 使用 1 台试车存在振动异常的氢涡轮泵, 在不同的压紧螺母装配力矩下进行了空转试验。结果表明在状态相同的情况下, 提高压紧螺母的装配力矩对抑制异常振动有明显的影

表 2 压紧螺母装配力矩对异常频率量级的影响

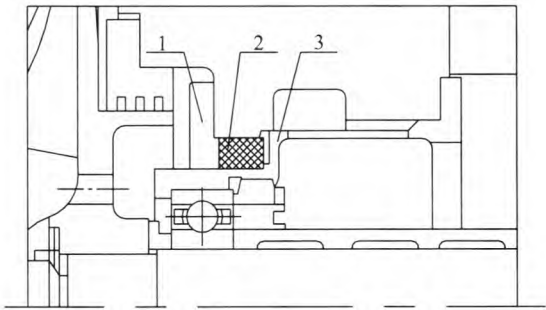
Tab. 2 The influence of pressed nut's installing torque on the abnormal frequency order

涡轮泵状态	装配力矩/(N·m)	异常一阶振动 频率量级/mm
动环与轴承座 间隙 1.5 mm	85	0.25
	100	0.015
	120	0.063
动环与轴承座 间隙 3.2 mm	85	0.313
	150	0.06

4.3 金属橡胶阻尼器

在弹性支承外增加金属橡胶阻尼器是增加转子结构外阻尼的有效方法。为了获取氢涡轮泵鼠笼式弹性支承增加金属橡胶阻尼器的效果, 采用 3 种不同密度的金属橡胶阻尼器, 进行了 3 次空转试验, 增加阻尼器的方案示意图见图 4。

结果表明增加金属橡胶阻尼器后, 原本振动数据异常的氢涡轮泵的异常频率均消失, 表明金属橡胶阻尼器对抑制空转试验氢涡轮泵的异常振动起到了明显的效果。



1- 压板; 2- 金属橡胶阻尼器; 3- 鼠笼座
图 4 增加金属橡胶阻尼器方案的安装示意图
Fig. 4 Installing scheme of the arrangement with metal-rubber damper

4.4 轴套与轴的配合间隙

轴系零件间的内部摩擦也会影响轴系内阻尼, 而轴系零件间的配合间隙对内部摩擦也会产生影响, 为此进行了轴套与轴配合间隙改变对氢涡轮泵振动特性的影响研究。试验进行了 2 次: 第一次将轴套 1 和轴套 2 一端内孔与轴的配合间隙扩大了 1 倍; 第二次试验在第一次基础上, 将轴套 3 靠近涡轮端的 2 个台阶内孔与氢转子的配合间隙分别扩大了 50% 和 1 倍。试验结果表明适当扩大轴套与轴的间隙后异常振动频率均基本消失, 表明扩大轴套与轴间隙可以减小轴系的内摩擦, 进而提高轴系的工作稳定性。但确定合理的配合间隙需要更多的试验及分析, 并且在工程上实施此间隙的控制也较为困难。

4.5 离心轮迷宫密封

针对一台氢涡轮泵进行不安装离心轮后凸肩迷宫密封试验, 结果表明该迷宫密封装配与否, 对抑制该型号氢涡轮泵异常频率的作用不明显。由于空气介质的可压缩性, 相比液氢介质物性相差较大, 结果可能与发动机真实环境存在差异。

4.6 限制器与弹性鼠笼座的间隙

限制器与弹性鼠笼座的径向间隙在氢涡轮泵工作时起到流体外阻尼作用, 为分析其影响, 对该间隙增大了一倍的情况下进行了空转研究试验, 结果表明限制器与弹性鼠笼座间隙变化对异常频率的影响不大。

5 空转试验结论

通过 30 余台次的氢涡轮泵空转试验, 获得了以下结论:

- 1) 动环轴向安装位置对氢涡轮泵振动有较大影响, 动环与涡轮端轴承的距离越远, 越容易激发出异常振动频率;
- 2) 轴系预紧力对异常振动有明显的影响, 装配力矩增大会抑制异常频率的出现或降低其量级;
- 3) 适当扩大轴套与轴的间隙可减小轴系的内摩擦, 进而提高轴系稳定性;
- 4) 离心轮迷宫密封间隙、限制器与弹性鼠笼座的间隙对抑制次同步进动无明显影响;
- 5) 泵端鼠笼座外增加金属橡胶阻尼器对抑

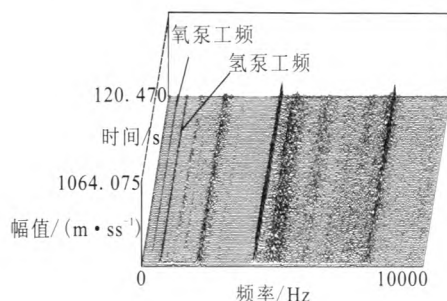
制异常振动有明显效果。

6 发动机热试车验证结果

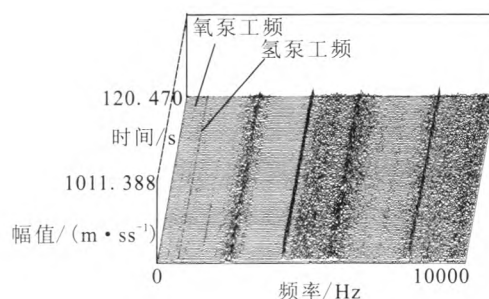
在空转研究试验结果的基础上, 根据工程实际情况确定了氢涡轮泵的改进措施, 并通过了发动机热试车验证考核:

- 1) 适度提高氢涡轮泵装配时轴系拧紧力矩, 提升幅度约为 20%;
- 2) 严格控制动环的轴向安装位置, 满足 1.0 ~ 1.5 mm 的要求;
- 3) 增加阻尼器, 从设计上提高轴系的动态稳定裕度。

采取措施之后的氢涡轮泵试车振动频率分析谱图见图 5。



(a) 试车 1



(b) 试车 2

图 5 采取改进措施后典型的氢涡轮泵试车振动频率分析谱图

Fig. 5 Spectral analysis of typical vibration frequency during the test of hydrogen turbopump after the improvement

7 结束语

通过工程实践, 空转试验是研究涡轮泵动态稳定性的有效方法之一。通过空转试验和发动机热试车证明, 提高轴系预紧力、严格控制端面密封动环的轴向安装位置及鼠笼式弹性支承增加金属阻尼器等措施, 对抑制氢涡轮泵次同步振动具有较显著的效果。

参考文献:

- [1] 黄怀德. 振动工程[M]. 北京: 宇航出版社, 1995.
- [2] 张小龙, 何洪庆. 涡轮泵转子次同步进动的机理[J]. 推进技术, 1999, 20(1): 56-60.
- [3] 晏砺堂, 朱梓根. 结构系统动力特性分析[M]. 北京: 北京航空航天大学, 1989.
- [4] 廖明夫. 转子动力学基础[M]. 西安: 西北工业大学, 1999.
- [5] 修泽尔 D K. 液体火箭发动机现代工程设计[M]. 朱宁昌, 译. 北京: 中国宇航出版社, 2003.

(编辑: 马 杰)