

# 高工况涡轮泵轴系状态 对工作可靠性的影响

黄智勇, 李昌奂, 黄 红  
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 对涡轮泵轴系运转时的跳动量及稳定性对产品可靠性的影响进行了研究。通过对不同频率下的轴系跳动量的对比以及对轴心轨迹的研究发现, 轴系的整体刚度与主要零件的松脱转速是影响转子系统动力特性稳定的主要因素, 轴系的支撑方式和质量分布与转子的振型、径向跳动量密切相关。通过改变轴系状态可以提高转子系统的动力稳定性, 减小轴系的径向跳动量, 使转子的振型合理, 从而提高涡轮泵的可靠性。

**关键词:** 涡轮泵; 轴系; 状态; 跳动量

中图分类号: V434.21

文献标识码: A

文章编号: (2007) 01-0032-04

## The effect of high operating condition turbopump shafting status on reliability

Huang Zhiyong, Li Changhuan, Huang Hong  
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** The effect of the pulsation and stability of a running turbopump shafting on system reliability is investigated. It is found that the total rigidity of the shafting and the loosening rotating speed were the main factors influencing the system, and the shafting support and mass distribution were closely related with the vibration mode and the radial pulsation of the rotator. The methods to improve the turbopump reliability are presented.

**Key words:** turbopump; shafting; state; runout

收稿日期: 2006-06-02; 修回日期: 2006-06-22。

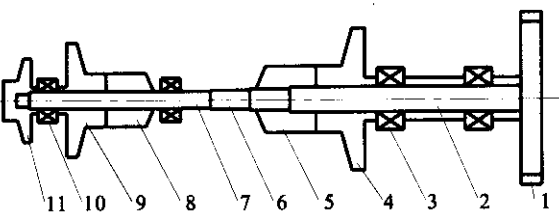
作者简介: 黄智勇 (1964—), 男, 研究员, 研究领域为液体火箭发动机涡轮泵技术。

1 引言

随着航天技术的不断深入发展及新材料、新工艺的出现与应用，世界航天大国正在计划建造大型空间实验室、深空探测器、进行星际飞行和其它星球的登陆，这必须要有大推力、高性能的液体火箭发动机。发动机和涡轮泵的试验表明，涡轮泵转子系统运转时的径向、轴向变化量小、轴心运动轨迹平稳，涡轮泵内部流场就稳定、压力脉动小，发动机可以长时间稳定工作。因此，高压、高速、大功率涡轮泵轴系运转状态与发动机推进剂供应系统的压力脉动和机械振动密切相关，它严重影响着发动机的工作可靠性。

2 涡轮泵轴系的组成及特点

本文研究的涡轮泵轴系为三轴、四支点、同轴线、两主轴通过传动轴连接形式，主要由涡轮、离心轮、诱导轮、动密封、轴承、轴套及其它轴上转动件组成，见图 1。



1-涡轮；2-涡轮氧泵轴；3-轴承；4-氧离心轮；5-氧诱导轮；6-传动轴；7-煤油泵轴；8-煤油泵诱导轮；9-煤油一级离心轮；10-轴承；11-二级叶轮

图 1 涡轮泵轴系组成与支撑方式简图  
Fig.1 Constituting and support mode of the turbopump shafting

右端组合件的两支撑轴承安装在同一个轴承座内，轴承座与壳体的固定采用法兰螺栓连接，转动件质量分布在轴承两侧，左侧悬臂较长，离心轮与涡轮带有复杂型面的叶片。左端组合件的两支撑轴承分别安装在两壳体上，转动件质量主要分布在两轴承中间，但一端轴承的外侧有一个

质量较小的离心轮。中间的传动轴无轴承支撑，两端通过花键与主轴连接。涡轮泵轴系运动状态监测系统的传感器安装在轴系中间右端组件的轴端，一个轴向位移与两个径向位移传感器测量同一个零件，两个径向位移传感器成 90°角安装在同一个测试面上。

3 涡轮泵轴系状态、试验工况与轴系跳动量

3.1 初期状态与测量结果

根据发动机研制进程、工况状态变化要求与地面试验设备能力等情况，涡轮泵必须要经过不同状态与工况的试验。表 1 列出了某型号涡轮泵研制中的几种主要工作状态、试验工况及试验时轴系跳动量的测量平均值。

表 1 初期涡轮泵试验状态与轴系跳动量平均值  
Tab.1 The initial turbopump's hot-firing test state and the average of the shafting's runout

状态		半系统试车	发动机整机热试车		
工况		80%	80%	100%	106%
跳 动 量	径向 1 /mm	1.395	0.936	1.38	1.46
	径向 2 /mm	1.157	0.862	1.355	1.40
	轴向 /mm	0.253	0.204	0.212	0.266

涡轮泵联动试验是不带推力室和其它组合件的试验。半系统试车是不带燃烧室但发动机其他组件基本配套齐全的试车。煤油一级泵出口是通过一多级节流装置降压后与贮箱相连，经过主涡轮作功的燃气不进行二次燃烧，而是经燃气整流栅后进入一个工艺喷管直接排到外界。整机热试车为发动机全系统与全功能状态。从表 1 可以看出，轴系在工作时的跳动量与产品试验状态、试验工况有关，产品系统越齐全轴系径向跳动量就越小，在系统不变的情况下试验工况低轴系径向跳动就小。

3.2 初期试验结果分析

从表 1 可以看出，在初期的试验状态与工况下，轴系的径向跳动总量峰-峰值偏大，且工作

的前 30 秒数值要大于平均值。利用涡轮泵轴系运动状态监测系统获得的数据分析表明,轴系在转速 1 倍频下的径向位移量占到了总量的 40%~50%, 1.13 倍转速频率下的径向位移量也较大,有时达到了 1 倍转速频率下的位移量, 2、3 倍转速频率下的径向位移量不大且较稳定。全周期的轴心轨迹基本上是顺时针偏转  $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$  的椭圆, 轨迹线很光滑, 一阶正进动较大, 反进动较小, 二阶正反进动都较小, 高倍转速频率下的径向跳动量很小。涡轮泵表现为泵出口压力脉动偏大, 机械振动也大, 且随试车时间的增长逐渐加大。

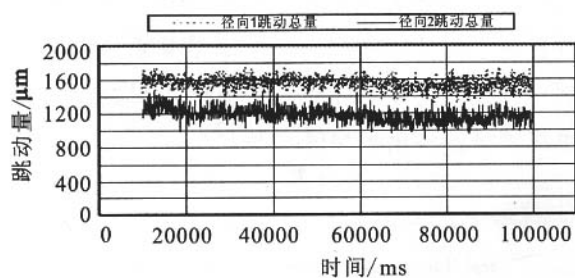


图 2 轴系径向跳动总量随时间的变化

Fig.2 The shafting's total radial runout with time

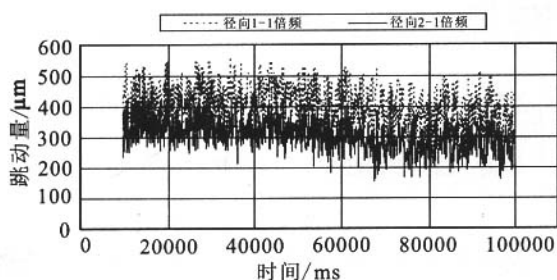


图 3 轴系在 1 倍转速频率下径向跳动量随时间的变化

Fig.3 The shafting's radial runout at single rotation speed frequency with time

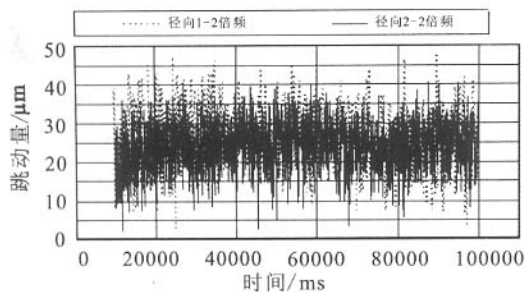


图 4 轴系在 2 倍转速频率下径向跳动量随时间的变化

Fig.4 The shafting's radial runout at double rotation speed frequency with time

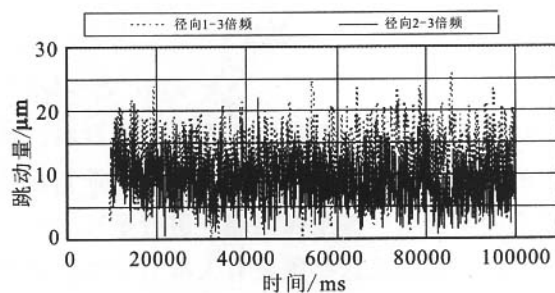


图 5 轴系在 3 倍转速频率下径向跳动量随时间的变化

Fig.5 The shafting's radial runout at triple rotation speed frequency with time

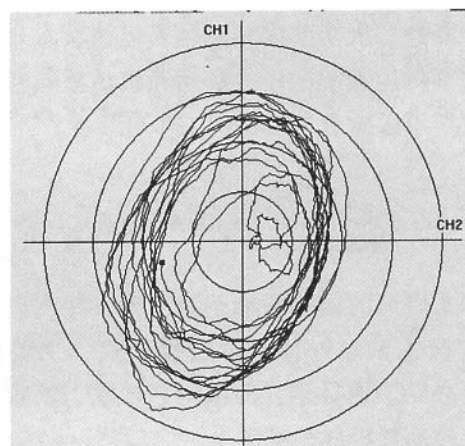


图 6 轴系全周期轴心轨迹图

Fig.6 The shafting's axes track within the cycle

图 2、图 3、图 4、图 5 为某台发动机涡轮泵轴系在额定工况下径向跳动总量、转速 1 倍频、2 倍频、3 倍频的径向跳动量随时间变化的图线, 图 6 为某一时间段全周期的轴心运动轨迹图。

通过对数据与图线分析, 认为原因是: 由于轴系一端处在液氧中, 另一端处在高温燃气中, 工作的前 30 秒组件处在非热平衡状态, 故测量的径向跳动量大且不很稳定。涡轮泵轴系上的质量分配不合理, 离轴承很远的轴端有较大的质量。转动件的轴向压紧度与径向定位精度不够, 在工作时转速引起的质量不平衡量较大, 主要零件的松脱转速可能接近了工作转速。浮动密封环压降和端面的压紧力不匹配, 工作时发生了轴向串动, 轴向力平衡系统灵敏度太高。因此在试验中涡轮泵的轴系径向跳动较大, 引起了较大的压力脉动和振动, 且随着工作时间加长, 振动值逐

渐增大。当工作转速接近某一值时，轴系的径向跳动量急剧增大，这个转速很可能就是某主要零件在此定位精度与压紧力矩下的松脱转速。但从二、三阶的跳动量小可以说明轴承支撑点的同轴度和轴上零件的对中精度较高，轴承座与壳体的刚度好，轴承的精度也较高。

3.3 轴系改进措施

针对初期涡轮泵在不同状态与工况下轴系径向跳动量偏大的结果，对轴系进行了如下改进：

减轻轴系质量，调整转动件质量在轴上的分配；对轴上大质量零件进行单独动平衡，将其不平衡量控制在一定范围内；提高主要零件的径向定位精度和加大轴向压紧力，以增加其松脱转速；调整浮动密封环的径向节流间隙，改变压降和端面的贴合力；调整轴向力平衡系统的平衡能力，降低灵敏度；增加轴承座自身的刚度和与壳体的连接刚度。

3.4 轴系改进后的试验结果

采取上述措施后，涡轮泵经过了多次与长时间的试车考验，轴系径向跳动总量降低了约 30%~40%，转速 1 倍频率下的跳动量减小了一半以上，高同步的跳动量稳定，在转速 1 倍频率的波形上出现了许多高频跳动，使得全周期轴心轨迹线不光滑，即轴在径向上受到很多高频率激振力的作用，这些力没有与转速频率发生耦合。涡轮泵的机械振动与压力脉动稳定且降低，振动频率向高频发展。表 2 是改进后轴系在不同试验工况下的跳动量。

表 2 改进后涡轮泵试验状态与轴系跳动量平均值  
Tab.2 The improved turbopump's hot-firing test state and the average of the shafting's runout

状态		发动机整机热试车		
工况		75%	100%	106%
跳 动 量	径向 1 /mm	0.506	0.787	1.08
	径向 2 /mm	0.555	0.781	1.01
	轴向 /mm	0.161	0.228	0.24

3.5 试验结果对比

用涡轮泵轴系运动状态监测系统对同一试验

状态和工况的轴系运动状态进行测试与研究发现，如果轴系径向位移不稳或数值大，涡轮泵的振动就大，流体压力脉动也大，试验基本上不能继续进行，有时在很短的时间内就引起涡轮泵转动件的碰磨、流体泄漏、起火和爆炸。在一次发动机试车中，涡轮泵轴系的径向位移在某一时刻出现振荡且幅度较大，过 2 秒左右端面密封就出现泄漏，16 秒左右冒火，随后发生爆炸。对产品分解发现轴端压紧螺母在试车中松动，造成轴上零件不定位，轴、径向间隙发生变化，质量动不平衡量增大，导致试验失败。另有一次发动机试车中涡轮泵轴系的径向跳动突然增大，随后端面密封泄漏、冒火，发动机爆炸。对产品分解发现氧离心轮后盖板上平衡活塞进口出现了一条长 40mm 左右的穿透性裂纹，造成质量动不平衡量增大，轴端径向跳动很大，导致端面密封破裂，氧泄漏起火。

4 结论

通过对涡轮泵轴系状态的分析 and 试车中涡轮泵故障检测系统对轴系跳动量的监测结果表明：涡轮泵轴系的状态对跳动量有很大影响，轴跳动量大，机械振动与压力脉动就大，端面密封与浮动密封就很容易发生金属碰磨，导致产品起火爆炸。稳定与减小轴系跳动量的主要措施有：

- (1) 增加主要零件的轴向压紧力，提高轴系的整体刚度；
- (2) 提高主要零件的径向定位紧度与精度，提高其松脱转速；
- (3) 对轴主要零件进行单独动平衡，保证轴系的整体动平衡精度；
- (4) 根据转子的支撑方式与振型，合理分配轴系上的质量，提高轴系的动力稳定性。

参考文献：

[1] 黄智勇. 大功率、高转速、高扬程涡轮泵振动分析与减振研究[J]. 火箭推进, 2005, 31(6).

(编辑：陈红霞)