



高速低温透平膨胀机转子，稳定运行最高转速可达 4.5 kHz

Rajendran Menon, Anindya Chakravarty, Mukesh Goyal, Mohananand Jadhav,
Arun S., Satish Kumar Bharti and Trilok Singh

低温技术部门

2010 年 10 月 28 ~ 30 日，在由 Rourkela 印度国家理工学院（NIT Rourkela）主办的第 23 届全国低温学研讨会（NSC-23）中，这篇论文拿到了最佳论文奖

摘要

BARC (Bhabha Atomic Research Centre) 一直致力于开发气浮轴承高速透平膨胀机转子，用于国产氨液化器和制冷机。为了得到自然加速（Coast-up）和自然减速（Coast-down）操作期间的转子动态特性，我们已经进行了大量的实验。这些实验的目的是确定转子的临界速度并将其与轴承间隙联系起来。这将开创设计具有适当间隙的径向轴承，以避免转子额定运行速度范围靠近临界转速的情况。本文记录了在最近的实验室试验中几个直径 16 毫米的低温透平膨胀机转子稳定旋转的经验。在实验期间 FFT 分析仪的快照以及自由加速和自由减速操作中的不平衡的同步响应已包括在内。

关键词： 低温透平膨胀机，氨液化器/制冷机厂，气体轴承，不平衡同步响应

简介

透平膨胀机是 BARC 在其氨气制冷机和液化器的国产计划中的一个重点关注领域^[1, 2]。考虑到这些液化器和制冷机的工艺循环设计，转子速度超过 4kHz 且尺寸为 16mm 的透平被设想并开发了出来。极高的转速加上严格的直线度要求，让使用工艺气体（氨气）作为润滑剂成为必要。

垂直向的透平膨胀机转子[图 1]在其两端具有透平和制动轮。轴由一个轴环组成，轴环与其两侧的推力轴承一起构成轴向轴承系统。经过了一段时间，推力轴

承的设计和配置得到了改进，使转子的稳定运行速度从 3.3 kHz^[3] 跃升至 4.2 kHz^[4]，现在达到 4.5 kHz（理论值设计速度）。本设计采用了倾斜垫片式顶部推力轴承^[图 2]而底部则为螺旋槽的^[图 3]。在带垫片枢轴周围有硅橡胶形式的阻尼。在我们的实验室试用期间，这种轴承组合是已经呈现为最好的一种，由于垫的顺应性和倾斜作用以及槽的良好承载特性，在通过临界速度时特别成功。滑动轴承系统构成轴和一对倾斜垫片轴承^[图 4]，设计用于对准转子并承受由于不平衡引起的任何负载。转子的重量由无源磁力轴承承担，该轴承由轴和壳体中的排斥磁铁组成^[图 1]。该系统还有助于转子的平稳加速与减速。

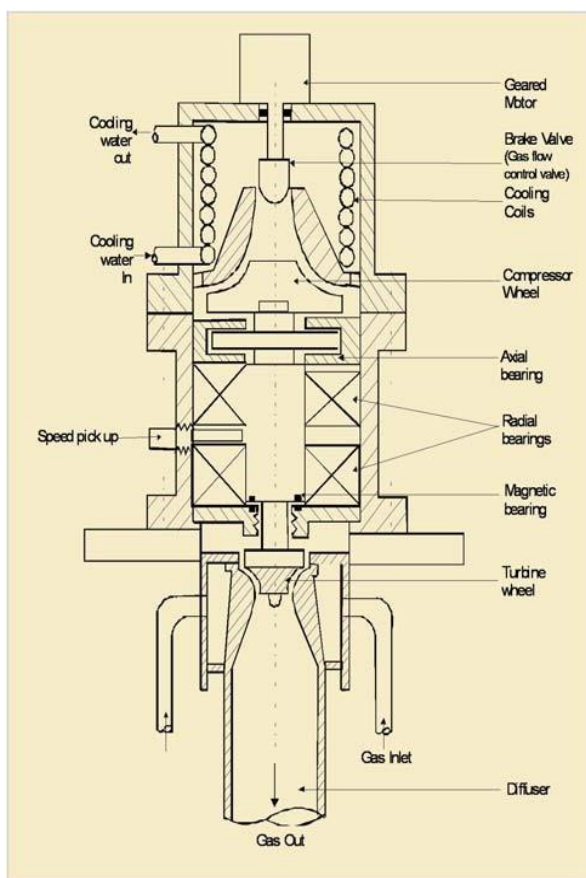


图 1：典型低温透平膨胀机的原理图



图 2：倾斜垫片顶部推力轴承。



图 3：螺旋沟槽底部推力轴承。



图 4：倾斜垫片滑动轴承。

转子轴承系统 – 主要规格

推力轴承

间隙（轴端活动量）：70 至 150 微米（因装置而异）。

垫片材料：AISI 4140 钢。

滑动轴承

径向间隙：75 至 100 微米（因装置而异）。

垫片材料：浸渍巴氏合金的石墨。



转子

不平衡：在 8mm 半径处小于 6 毫克，在透平和制动压缩机端部都是如此。

转子轴承跳动：推力轴承面允许 10 微米或更小。

轴的圆柱度和轴环（推力轴承面）的跳动约为 2 微米。

轴材质：K Monel 500。

磁力轴承

磁性材料：钕钴。

场强：法兰上为 1.65 K 高斯，转子上为 0.5 K 高斯（转子升程为 350 - 400 微米）。

透平和扩散器之间的间隙

200 至 300 微米（因装置而异）。

透平膨胀机壳体设计/装配问题

图 5 示出了典型的低温透平膨胀机壳体的剖视图。下面讨论该系统的主要设计和装配问题。

a) 通过垫片来处理公差累积效应。这些垫片用于控制推力轴承总间隙（轴向端部浮动），透平叶轮和扩压器之间的轴向间隙以及制动压缩机与其导流器之间的间隙。

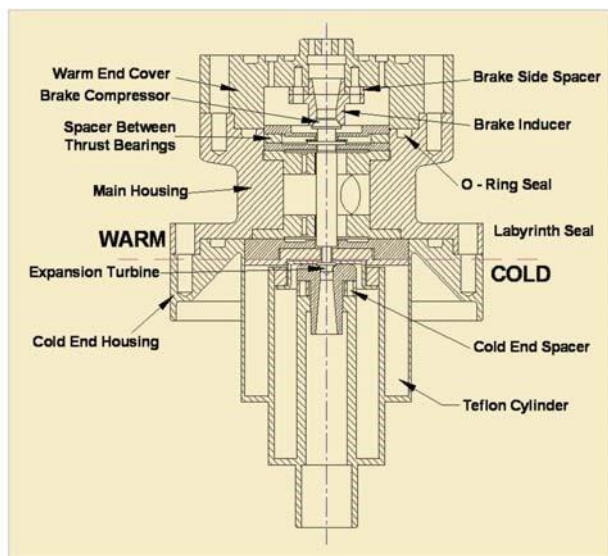


图 5：典型的低温透平膨胀机壳体的剖视图。

b) 装配基于使用 O 形圈的轴向密封。

c) 通过在冷端、Teflon®气缸和迷宫式密封件上使用中空和薄的构件来防止冷泄漏。

d) 为了保证同轴度，需要高质量的制造并且要求弹跳大约为 10 微米。

e) 在冷端使用永久接头（焊接）。

透平膨胀机的转子动力学评估

几个转子在 CrTD 实验室被组装并进行了严格的转子动态试验，以测量该装置的动态特性。这些测试的重要参数是振动特征和每次连续运行时的启动/加速压力。经过测试的转子经历了 20 多次启停，启动压力（高压透平进口 1.5 bar 表压）和振动特征没有任何显著变化。



图 6：实验室实验台



实验台

转子动态试验台由一个小冷箱组成，透平膨胀机单元安装在冷箱上^[6]。氦气从螺杆压缩机（高压 13 bar 到低压 1 bar）进料至系统，最大输送量为 2 Nm³ / min。

振动分析仪系统

仪器涉及工业 ICP[®] 加速度计，制造 IMI，型号 M621B40（重量：2.8 g，范围从 1.6 至 30000 Hz，灵敏度：10mV/g，共振频率：85 kHz）安装在透平膨胀机上，信号输入 OROS[®] 振动分析仪系统^[7]使用 OROS[®] NVGate[®] 软件实现实时快速傅里叶变换（FFT）功能。可以记录振动特征并回放以进行后期分析。

转子速度传感系统

转子速度通过磁式速度传感器^[8]和固定在轴上并位于两个滑动轴承之间的磁性目标来检测。该目标过盈配合在无磁性轴上钻出的径向通孔中。速度测量器跟踪超过阈值极限的磁通链变化率并且每转测量两次。在任何给定的转子速度下，FFT 显示振动、同步、亚同步以及超同步的所有分量。

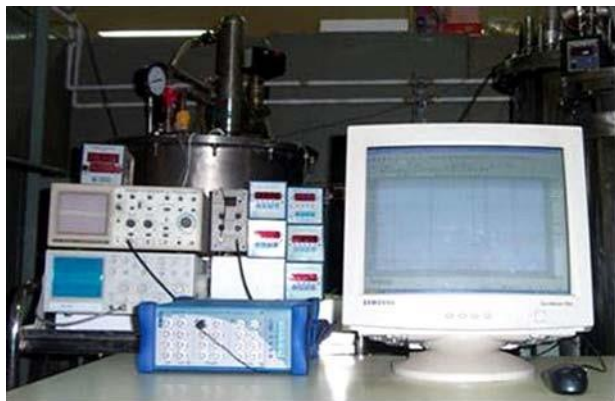


图 7：OROS[®] 振动分析仪系统



图 8：磁式速度传感器

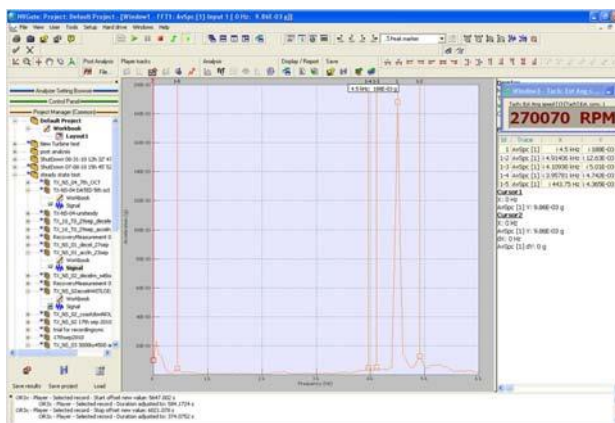


图 9：“tx-ns-01” 的 FFT 快照，最大工作速度为 270070 RPM。

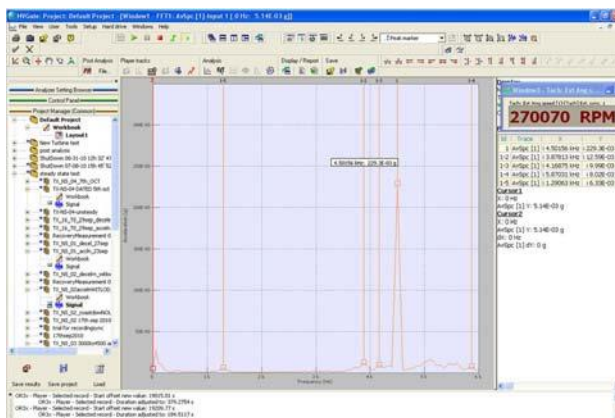


图 10：“tx-ns-02” 的 FFT 快照，最大工作速度为 270070 RPM。

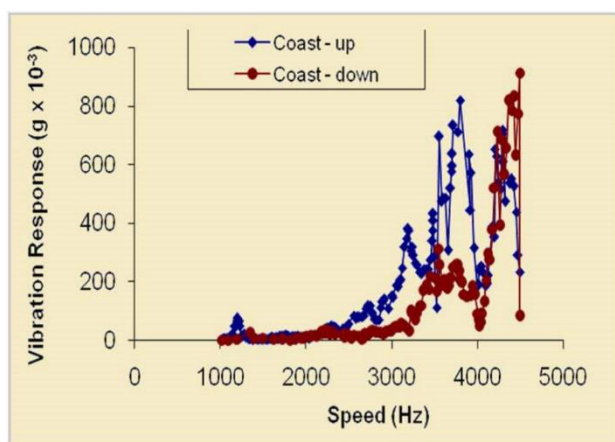


图 11: “tx-ns-01” 的同步振动响应图。

两个不同的组装转子“tx-ns-01”和“tx-ns-02”在最高工作速度 270070 RPM 下的 FFT 响应快照如图 9 和 10 所示。以 ‘g’ ——重力加速度表示的从启动开始直到两个透平膨胀机转子“tx-ns-01”和“tx-ns-02”达到最大运行极限的整个速度范围的同步振动响应如图 11 和 12 所示。自由加速和自由减速响应也都在同一图表中展示。

观察和讨论

从图 9 和 10 中可以清楚地看出，最大工作速度为 4.5kHz 时的振动水平非常低，分别为 0.18g 和 0.22g。对于在实验室中测试的所有其他转子也是如此。整个过程中，在自由加速期间（在自由减速期间同样），没有看到任何半速涡动的证据。甚至快照中也没有显示出任何明显的半速振动分量。由此得出结论，转子轴承系统的当前设计对于我们关注的操作范围中是稳定的。

图 11 和 12 的同步振动图中，对转子动力系统的其他一些方面进行了阐述。曲线非常具有决定性，特别是在自由加速期间，系统临界速度处在 4 kHz 附近。临界速度也被观察到分裂。由于 3 个倾斜垫在 360° 中对称布置，轴承 x-y 不对称可能是这种分裂的原因。

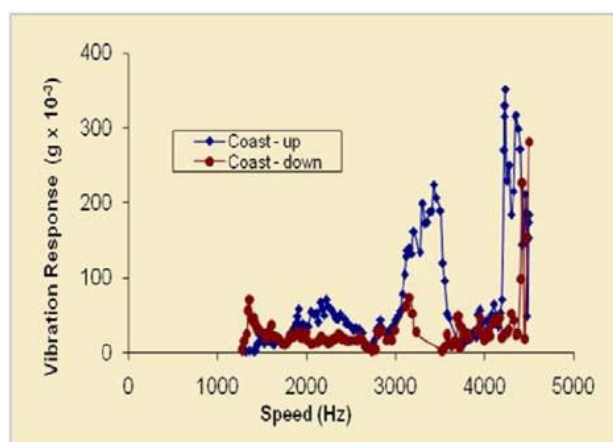


图 12: “tx-ns-02” 的同步振动响应图。

还观察到振动响应峰值随装置而略有不同。由于不可能在所有装置上复制精确的滑动轴承间隙，因此，轴承径向刚度（轴承径向刚度是该间隙的强函数）因装置而异。反过来，临界速度也表现出轻微的变化。当前设计中可用的阻尼足以使所有转子通过临界速度到达最大运行速度。然而，未来的在透平机和扩压器之间间隙更小的高效透平膨胀机可能需要通过更有效的径向阻尼来提供的更小的轴承间隙以通过临界速度而不会出现任何故障。为了实现这些严格的间隙，必须保证更高质量的加工。

参考文献

1. Singh, T., Chakravarty, A. et al. “Cryogenic Refrigeration and Liquefaction Technology Development in BARC”, *Indian Particle Accelerator Conference InPAC – 2006, BARC/TIFR, Mumbai* November 1 – 4, 2006
2. Singh T, Chakravarty A, et al., “Development of Helium Liquefaction/Refrigeration System at BARC”, *Indian Journal of Cryogenics* Special Issue Vol. 1, pp 53-58. (2005)
3. Singh T, Chakravarty A. et al., “Stable Operation of a Cryogenic Turboexpander with Flexible Thrust Bearings”, *Advances in Vibration Engineering* Vol. 3, pp 114-122. (2004)
4. A. Chakravarty, R. Menon, et al., “Development of Tilting Pad Thrust Bearings for Cryogenic Turboexpanders” *Indian Journal of Cryogenics* Vol. 35, pp 39-44. (2010)

