

# 用于支撑 HTR-10 GT 氦气轮机的磁力轴承试验研究

李 东<sup>1</sup>, 于晓丽<sup>2</sup>, 于溯源<sup>2</sup>, 张志俭<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 核科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150004

2. 清华大学 核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

**摘 要:** 为了验证氦气轮机磁力轴承支撑的技术可行性, 根据动力学相似的基本原理, 搭建了一个小型的模拟转子试验台架。介绍了试验台架的基本结构及关键参数, 并在试验台架上完成的静态悬浮试验、过弯曲临界试验以及自平衡控制算法试验。试验结果表明: 静态悬浮时, 转子的振动幅度不超过 2 μm 串联相位补偿器的 PD 控制器能够使转子顺利通过了前两阶弯曲临界; 自平衡控制 (AUVC) 方法能够有效地消减转子的振动幅度和线圈电流的变化幅度。通过模拟试验, 验证了磁力轴承的设计原理及控制方法, 积累了设计和运行经验。

**关 键 词:** 磁力轴承; 氦气轮机; 试验台架; 控制算法

中图分类号: TK497.22 文献标识码: A

## 引 言

高温气冷堆是具有第四代核能系统特征的反应堆<sup>[1]</sup>。由于气体透平发电系统具有结构简单, 效率高优点, 作为高温气冷堆的能量转换系统, 被广泛研究和探讨。PBMR, GT-MHR, GTHTR300 等项目均以气体透平发电系统与高温气冷堆的耦合技术作为研究目标。

在气体透平发电系统的支撑系统中, 常采用磁力轴承替代常规的润滑油轴承。磁力轴承有诸多优点, 其中包括排除润滑油系统, 系统可靠性高, 非接触无磨损等<sup>[2]</sup>。在 PBMR, GT-MHR, GTHTR300 等项目中, 气体透平转子均采用磁力轴承支撑。

10 MW 高温气冷堆氦气透平发电系统 (HTR-10 GT) 于 2002 年起由清华大学核能与新能源技术研究院开始实施。在 HTR-10 GT 的能量转换单元中, 立式布置高速旋转的氦气透平转子也采用非接触、无润滑的磁力轴承支撑<sup>[3]</sup>。然而, 目前还没有

磁力轴承在高温气冷堆氦气氛围下支撑大型柔性转子的运行经验。因此, 针对磁力轴承开展相关试验, 验证磁力轴承运行的可靠性, 对于高温气冷堆的工程应用意义重大。

为了验证用于支撑氦气轮机的磁力轴承的设计原理和控制方法<sup>[4]</sup>, 搭建了一个小型的模拟转子试验台架, 该试验台架中的模拟转子与 HTR-10 GT 氦气透平压气机转子保持动力学相似。本研究介绍了试验台架的基本结构及关键参数, 并对试验结果进行了分析。通过模拟试验, 验证了用于支撑 HTR-10 GT 氦气透平压气机转子磁力轴承的设计原理和关键技术。

## 1 氦气轮机系统

采用高速电机方案的 HTR-10 GT 能量转换系统的总体结构如图 1 所示。透平和压气机转子采用同轴设计, 通过挠性联轴节直接与发电机转子连接, 上述所有部件立式布置在能量转换系统压力壳内。氦气透平压气机转子长 3.5 m, 重 540 kg, 额定转速为 15 000 r/min。氦气透平压气机转子是一根挠性转子, 并且在达到额定转速之前, 需要通过两阶弯曲临界转速。

挠性转子在可控状态下超越临界转速是磁力轴承的优势所在, 也是磁力轴承研究领域中的难点, 需要集成结构设计、转子动力学分析、系统辨识、自动控制、传感器和电力电子技术等诸多学科的先进知识, 体现了综合全面的研究实力, 当今只有极少数几个国家在实验室条件下完成了过临界试验, 而在大型工程应用中超越二阶挠性临界转速目前还是空白。

收稿日期: 2010-11-29 修订日期: 2011-01-10

基金项目: 国家“863”计划基金资助项目 (2003AA511010, 2005AA511010)

作者简介: 李 东 (1968-), 男, 北京人, 哈尔滨工程大学博士研究生。

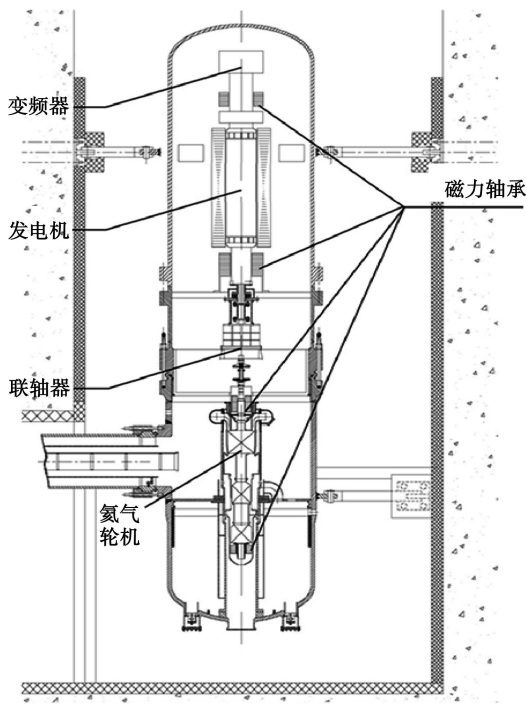


图 1 HIR-10GT 能量转换系统总体结构示意图

## 2 模态分析及控制方法

在试验台架设计之前, 采用有限元方法对氦气轮机系统 (包括发电机) 转子的转子动力学特性进行了分析计算。图 2 显示了模态分析的结果, 这些分析计算结果对于磁力轴承的轴承和传感器的分布设计非常重要。与普通轴承相比, 磁力轴承的一个明显优势是可以根据实际需要在一定的设计范围内自由改变支承刚度和阻尼。在分析中, 磁力轴承的支撑刚度选取为  $5 \times 10^5 \text{ N/m}$ ; 为了简化分析, 将阻尼选取为零。

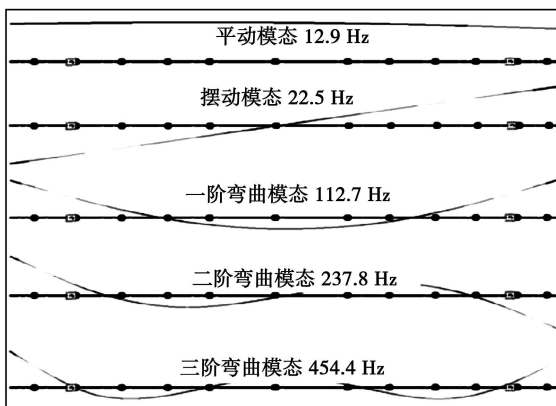


图 2 转子的特征频率及振型

此外, 为了得到更精确的临界频率的计算结果, 在转子的模态分析中, 考虑了陀螺效应的影响, 这对于磁力轴承的控制系统设计非常重要。图 3 显示了陀螺效应对临界频率变化的影响。

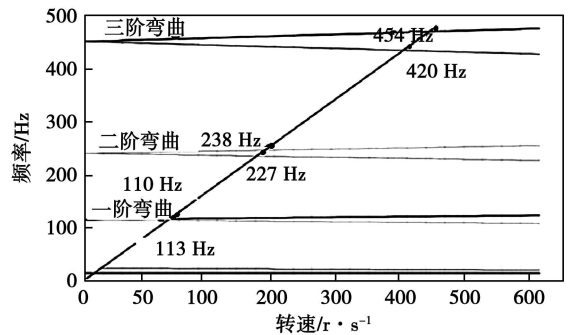


图 3 考虑陀螺效应情况下临界频率的变化情况

从图 3 可以看出, 特征频率随着转速的增加, 发生了分叉现象, 正向涡动使得特征频率随转速的增加而增加, 反向涡动使得特征频率随转速的增加而减小。由于在模拟转子的前两阶弯曲振型中, 临界频率只有很小的偏离, 因此为了简化控制算法的设计, 陀螺效应的影响可以忽略。

在控制器设计方面, 采用了串联相位补偿器后的 PD 复合控制器, 该控制器完全可以满足超越低阶挠性临界转速的要求, 具有物理意义清晰、系统结构简单、控制参数易于调节和工程适用性强等优点。

## 3 试验台架

小型氦气透平压气机转子磁力轴承试验台架的结构示意图如图 4 所示。为了支撑转子, 共设置了 4 组径向磁力轴承。磁力轴承 A 和 B 为主支撑轴承, 磁力轴承 C 和 D 为可选支撑轴承, 这样的设置可以研究不同磁力轴承组合的支撑效果。在本研究中, 重点验证磁力轴承 A 和 B 的支撑特性。

在模拟氦气透平压气机转子的小型试验台架上, 重点研究了过弯曲临界转速的控制方法, 以及减小振动、增加系统稳定性的措施, 这些试验对于实现柔性转子的安全运行和控制非常重要。此外, 为了得到磁力轴承的最佳结构布置方案, 还开展了针对轴承和传感器的布置位置的研究。

小型模拟转子的第一阶和第二阶弯曲临界分别为 112 和 237 Hz 略高于实际透平压气机转子。这样的设计综合考虑了小型转子与实际大型转子的差

别,并且增加了控制难度。由于转子轴向和径向控制是解耦的,因此轴向磁力轴承和径向磁力轴承可以分开来单独进行设计。小型试验台架的主要参数如表 1所示。

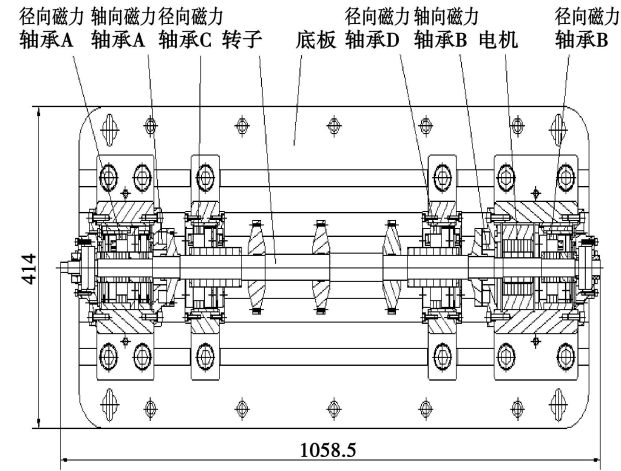


图 4 小型氦气透平压气机转子磁力轴承试验台架结构

表 1 小型试验台架的主要参数

	数 值
转子参数	
转子长度 /mm	1 058
转子重量 /kg	15.8
转速 / r·m <sup>-1</sup>	0 ~ 24 000
径向磁力轴承	
每个轴承的最大承载能力 /N	300
定子磁极的内径 /mm	40
最大电流 /A	6
线圈匝数	160
轴承定转子之间的间隙 /mm	0.3
保护轴承与转子间的间隙 /mm	0.15
轴向磁力轴承	
轴承的最大承载能力 /N	800
定子磁极的外径 /mm	100
最大电流 /A	6
线圈匝数	250
轴承定转子之间的间隙 /mm	1.0
保护轴承与转子间的间隙 /mm	0.5

## 4 试验结果分析

### 4.1 静态悬浮试验

在试验过程中,转子顺利的实现了静态稳定悬浮。此时,转子的轴心轨迹如图 5所示。静态悬浮时,转子的振动幅度不超过 2 μm。转子的起浮过程如图 6所示,可以看出,转子从起动到稳定的时间约为 0.4 s,振动次数少,系统阻尼较大,有利于挠性模态振动的抑制。

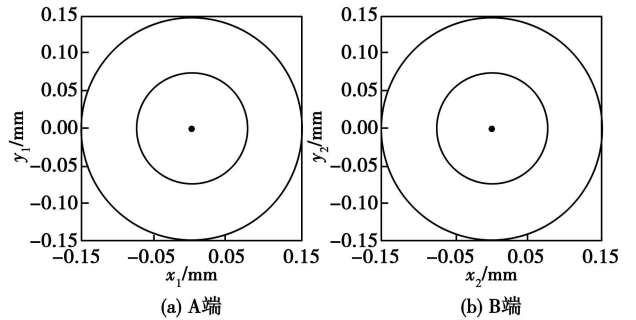


图 5 转子稳定悬浮时的轴心轨迹监测

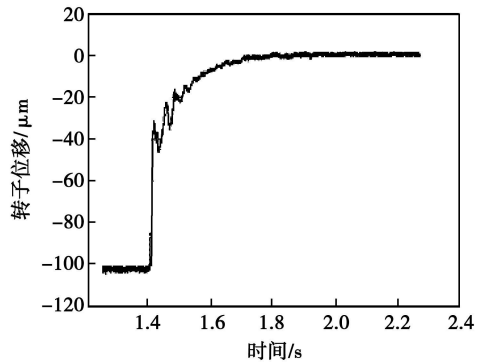


图 6 转子起浮过程

### 4.2 过弯曲临界试验

在小型模拟转子试验台架上,完成过弯曲临界的试验。串联相位补偿器的 PID控制器能够使转子顺利通过了前两阶弯曲临界,频率分别为 112和 237 Hz并实现了在 450 Hz 频率下的稳定悬浮,试验结果如图 7所示。

### 4.3 自平衡控制算法试验

在小型模拟转子试验台架上,还完成了自平衡控制算法的试验研究。图 8给出了磁力轴承 A处的轴心轨迹,对比了控制器采用和不采用“位移最小”控制算法的试验结果,试验转速为 3 000 r/m。图 9给出了线圈中电流的变化情况,对比了同转速下采用和不采用“力最小”控制算法的试验结果。

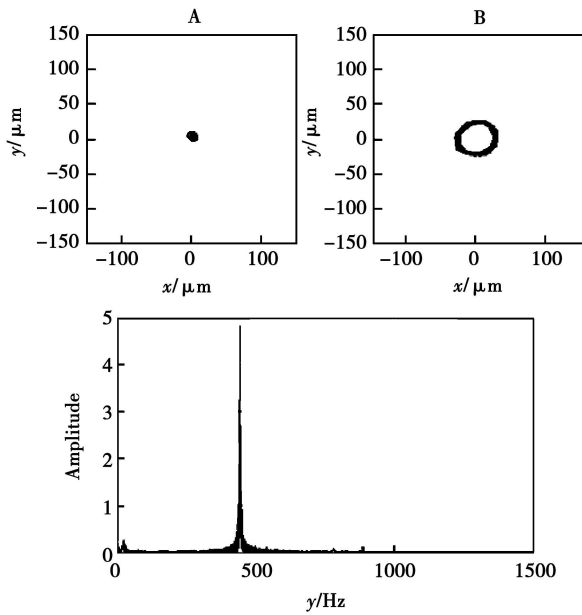


图 7 转子位移频域分析

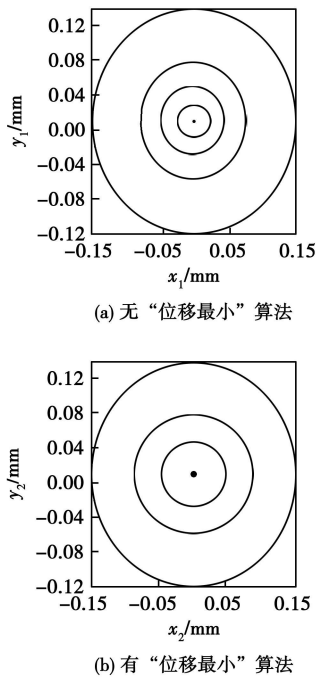


图 8 轴承 A 的轴心轨迹

通过试验结果, 可以明显地看出自平衡控制方法能够有效地消减转子的振动幅度和线圈电流的变化幅度, 实现比其它控制方法更为优异的控制性能。

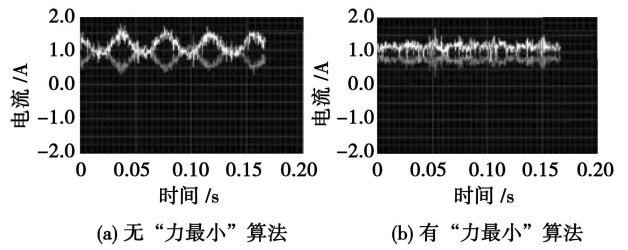


图 9 轴承 A 的线圈电流

### 5 结 论

(1) 根据动力学相似的基本原理, 搭建了一个小型的氦气轮机模拟转子试验台架。该试验台架能够有效验证磁力轴承的设计原理及控制方法, 并能够研究转子的过二阶弯曲临界特性。

(2) 在试验台架上顺利完成了静态悬浮试验、过弯曲临界试验以及自平衡控制算法试验。

(3) 静态悬浮时, 转子的振动幅度不超过  $2 \mu\text{m}$ , 转子从起动到稳定的时间约为  $0.4 \text{ s}$ 。

(4) 串联相位补偿器的 PID 控制器能够使转子顺利通过了前两阶弯曲临界, 并实现了在  $450 \text{ Hz}$  频率下的稳定悬浮。

(5) 自平衡控制 (AUVIC) 方法能够有效地消减转子的振动幅度和线圈电流的变化幅度, 实现比其它控制方法更为优异的控制性能。

(6) 试验的开展将为磁力轴承在 HTR-10GT 项目上的工程应用积累更多的设计和运行依据。

### 参考文献:

[1] WANG JIE GU YI HUA Parametric studies on different gas turbine cycles for a high temperature gas cooled reactor Nuclear Engineering and Design 2005 235: 1761 - 1772

[2] BRUNE M DETOMB J Application of active magnetic bearings in turbo compressors and turbo expanders of the gas industry [ J ]. Chemical and Petroleum Engineering 2002 38: 7 - 8

[3] YANG G XU Y SHI Z et al Characteristic analysis of rotor dynamics and experiments of active magnetic bearing for HTR-10GT [ J ]. Nuclear Engineering and Design 2007 237: 1363

[4] 马云翔, 于晓丽, 于溯源, 等. 用于支撑 HTR-10GT 氦气轮机的磁力轴承设计研究 [ J ]. 热能动力工程, 2011, 26(2): 233 - 237.

(编辑 伟)

formance of Pd Catalyst Used in Low-temperature Combustion of Methane [刊, 汉] PU Ge MAO Houchao, CHEN Sen et al (Education Ministry Key Laboratory on Low Quality Energy Source Utilization Technologies and Systems, College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing, China, Post Code: 400044) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2011, 26(3). — 358 ~ 361

A series of Pd/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Pd-16Zr/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts were prepared by adopting a step-by-step dipping method. The catalysts such prepared were used to conduct a catalytic combustion experiment of methane at an ultra low concentration. In this connection, the influence of the calcination temperature on the activity of palladium catalyst was investigated and its thermal decomposition characteristics were studied by using a thermogravimetric analyzer. The research results show that for Pd/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> series catalysts, when the calcination temperature is 600 °C, the activity of the catalyst is highest. For Pd-16Zr/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> series catalysts, when the calcination temperature reaches 500 °C, the activity of the catalyst attains the highest. Among the palladium catalysts, the magnitude of the decomposition activation energy of PdO is closely correlated with the catalytic activity of the catalyst used, i.e. when the decomposition activation energy of PdO is relatively small, the activity of the catalyst is comparatively high and vice versa.

Key words: catalytic combustion, methane, Pd catalyst, calcination temperature, thermogravimetric analyzer, thermal decomposition

用于支撑 HTR-10GT 氦气轮机的磁力轴承试验研究 = Experimental Study of the Magnetic Bearings for Supporting a HTR-10GT Helium Turbine [刊, 汉] LI Dong, ZHANG Zhi-jian (College of Nuclear Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001), YU Xiao-li, YU Su-yuan (Nuclear Energy and New Energy Source Research Institute, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2011, 26(3). — 362 ~ 365

To verify the technical feasibility of the magnetic bearings for supporting a helium turbine, a small-sized rotor simulation test rig was built based on the basic theory of the kinetic similarity. The basic structure and key parameters of the test rig were described. On the test rig, completed were a static state levitation test, bending critical speed passing test and self-balance control algorithm test. The test results show that during the static state levitation period, the vibration amplitude of the rotor does not exceed 2  $\mu$ m. The PID (proportional, integral and differential) controller of the tandem phase compensator can make the rotor successfully pass through the first and second order critical speed. The self-balance control method can effectively reduce and eliminate the vibration amplitude of the rotor and narrow the variation range of the current through the coils. By the simulation test, the design principle and control method of the magnetic bearings were verified and certain design and operation experience was accumulated.

Key words: magnetic bearing, helium turbine, test rig, control algorithm