文章编号:1001-2060(2011)02-0233-05

用于支撑 HTR-10GT 氦气轮机的磁力轴承设计研究

马云翔¹,于晓丽²,于溯源²,张志俭¹

(1. 哈尔滨工程大学 核科学与技术学院 黑龙江 哈尔滨 150001;
 2. 清化十学 核能上新能源社 光理容院 北京 100084)

2. 清华大学 核能与新能源技术研究院 北京 100084)

摘 要:介绍了 10 MW 高温气冷堆氦气透平发电项目(HTR - 10GT) 磁力轴承的设计原理及技术特点,给出了磁力轴承 的详细结构设计及关键设计参数。氦气轮机转子采用立式 一体化布置的结构方式,由两个径向磁力轴承和一个轴向磁 力轴承支撑。轴向磁力轴承的设计承载力为9.800 kN,气隙 为0.7 mm。径向磁力轴承的设计承载能力为1.960 kN,定 转子间气隙为0.6 mm。对磁力轴承的承载特性以及氦气轮 机转子的动力学特性进行了研究,转子动力学计算的结果表 明 在达到 250 Hz 的额定转速前,透平压气机转子必须通过 两阶弯曲临界。

关键词:磁力轴承;氦气轮机;HTR-10GT;承载能力中图分类号:TK474.8 文献标识码:A

引 言

10 MW 高温气冷堆(HTR-10) 是我国 "863"计 划项目的子课题,该项目由清华大学核能与新能源 技术研究院承担。HTR-10 于 2000 年实现首次临 界,并于 2003 年达到满功率^[1]。在 HTR-10 成功的 基础上,为了验证高温气冷堆气体透平发电技术的 可行性,开展了与 HTR-10 耦合的氦气轮机循环发 电系统的研制^[2]。

高温气冷堆气体透平发电系统具有结构简单、 效率高以及经济性好等优点,是未来高温气冷堆技 术领域的重要发展方向之一^[3]。在10 MW 高温气 冷堆氦气透平发电系统中,高速旋转、立式布置的氦 气轮机转子采用磁力轴承支撑^[4]。与传统的机械 轴承相比,磁力轴承具有非接触、无润滑等优点,可 以满足 HTR-10GT 特殊的运行条件。然而,由于磁 力轴承支撑的氦气轮机转子是一根大型柔性转子, 目前尚无设计和运行经验。因此,研究并设计一套 性能优异、安全可靠的磁力轴承系统,对于高温气冷 堆气体透平技术的工程应用具有十分重要的意义。

磁力轴承的性能直接影响气体透平系统的结构 布置,并进一步影响高温气冷堆气体透平发电系统 的安全性和经济性。在前期技术研究和试验验证的 基础上^[5] 最终完成了用于支撑 HTR-10GT 氦气轮 机转子的磁力轴承的技术设计^[6]。本研究结合磁 力轴承的设计原理及技术特点,给出了 HTR-10GT 氦气轮机磁力轴承的结构设计结果及关键技术参 数。此外,对磁力轴承的承载特性及氦气轮机的转 子动力学特性进行了初步研究。

1 总体结构

10 MW 高温气冷堆氦气透平发电系统的氦气 轮机包括低压压气机、高压压气机以及氦气透平3 部分 其中压气机通过压缩过程为回路中的氦气流 动提供驱动力 ,透平通过膨胀过程驱动转子旋转并 带动发电机发电。因此 ,氦气轮机的性能直接影响 到系统总体的效率和经济性。

氦气轮机的转子长度为 3.5 m ,重量为 540 kg , 旋转速度为 15 000 r/min。采用磁力轴承支撑的氦 气轮机的总体结构布置图如图 1 所示。转子由两个 径向磁力轴承和一个轴向磁力轴承支撑 ,以实现在 设计工况下的正常运转。当磁力轴承出现故障或载 荷超过磁力轴承的设计载荷时 ,由保护轴承确保转 子的安全。

磁力轴承支撑系统分为压力壳内和压力壳外两 部分 磁力轴承本体、传感器以及相关引线布置在压 力壳内部。磁力轴承控制系统布置在压力壳外,其 中包括控制器、功率放大器以及在线监测系统。磁 力轴承在反应堆启动、变功率以及停堆过程中均需 保证足够的运行可靠性和稳定性,这对磁力轴承的

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(2003AA5110 2005AAA511010)

作者简介:马云翔(1968-),男 黑龙江肇东人 哈尔滨工程大学博士研究生,现工作在中国船舶重工集团公司第七〇三研究所,研究员.

设计提出了高要求。例如过二阶弯曲临界、高温运 行环境以及高速重载。



图 1 HTR-IOGT 氦气轮机的总体结构示意图

2 技术设计特性

除了满足 API 617、IEC 以及 ISO900X 等工业 标准之外 ,氦气轮机的磁力轴承支撑系统还需满足:

(1)承担在运行工况下氦气轮机所产生的轴向 载荷和径向载荷,并实现转子的稳定支撑。

(2)保证转子在所有运行工况下的运行稳定性 (包括通过弯曲临界)。

(3) 能够实现在高速、高温以及辐射环境下的 长时间稳定运行。

(4)确保在所有正常、非正常运行条件以及设计基准事故下,实现磁力轴承的安全可靠控制。

2.1 透平端磁力轴承

透平的主要功能是将氦气工质的热能转换为机 械能。根据 HTR-10GT 的要求,完成了透平的气动 设计和结构设计。透平的转子和静子结构示意图如 图 2 所示,透平的气动设计参数如图 3 所示。氦气 透平采用等内径设计,共有 6 级叶片。

透平端磁力轴承组件置于透平转子的顶端,实

现轴向和径向的悬浮功能。透平端磁力轴承的主要 部件包括轴向磁力轴承、径向磁力轴承、位移传感 器、速度传感器以及保护轴承等,如图4所示。磁力 轴承的主要参数如表1所示。



图 2 透平的转子和静子结构



图 3 透平的气动设计参数

表1 磁力轴承的主要参数

	参数
径向磁力轴承	
设计承载能力/kN	1.960
磁极的内/外径(mm)	150/270
磁极长/mm	90
最大电流/A	30
转子直径/mm	118
线圈匝数	30
定转子间平衡位置气隙/mm	0.6
保护轴承与转子平衡位置气隙/mm	0.15
轴向磁力轴承	
设计承载力/kN	9.800
磁极内径/外径(mm)	168/308
最大电流/A	30
线圈匝数	80
定转子间平衡位置气隙/mm	0.7
保护轴承与转子平衡位置气隙/mm	0.3

轴向磁力轴承包括静子组件和推力盘,布置在



图 4 透平端磁力轴承组件的结构

透平转子顶端的上部。静子组件包括两个同轴的磁极,产生沿轴向的吸力。在立式的结构布置下,转子的全部重量以及轴向气动力均由轴向磁力轴承支撑,轴向磁力轴承的设计承载力为 9.800 kN,气隙为 0.7 mm。推力盘固定在转子上,置于在两个磁极之间。

径向磁力轴承包括静子组件和转子组件两部 分,布置在透平转子顶端的下部。静子组件采用 16 个磁极的结构,设计承载能力为 1.960 kN。静子部 分包括静子法兰和线圈,线圈形成 16 个方向的磁 极。径向磁力轴承的磁极分为 4 组,每组由 4 个磁 极组成,保证转子受到互相垂直的两个方向(*X* 向和 *Y* 向)的支撑。转子部分固定在转子上,由磁性金属 薄片压制而成。

由于透平叶片与静子部件的间隙为 0.4 mm,为 保护透平转子的安全,径向保护轴承的径向间隙设 计为 0.15 mm,而磁力轴承定转子之间的间隙 为0.6 mm。

磁力轴承的位移传感器是电感式的,灵敏度不低于 10 mV/µm,具有很好的感应特性。位移传感器的截止频率很高(>5 kHz),所以在运行频率下的相位延迟可以忽略。即使经过转换器之后的电压信号的传输距离超过 200 m,也不会发生明显的衰减。

2.2 压气机端磁力轴承

根据 HTR-10GT 的要求,完成了压气机的气动 设计和结构设计。压气机的外形结构示意图如图 5 所示。



图 5 压气机的外形结构

低压压气机和高压压气机采用等内径和模化 设计,分别有7级和10级叶片。部分气动设计的结 果如图6所示。



图 6 压气机的主要气动设计参数

压气机端磁力轴承组件布置在压气机转子的 底端,为转子提供径向支撑。与透平端磁力轴承相 比,压气机端磁力轴承更为简单,仅包括径向磁力轴 承、位移传感器和保护轴承,如图7所示。

由于空间结构的影响,压气机端径向磁力轴承 静子组件的内径和外径分别为180和300mm,比透 平端径向磁力轴承的尺寸大。而设计载荷、气隙、磁 极结构、保护轴承以及传感器等其他设计参数则与 透平端径向磁力轴承相同。

2.3 其它组件

磁力轴承控制器及其辅助设备(A/D 转换器, D/A 转换器等)均采用标准的工业产品,控制器采 用高速 DSP 主板,该主板具有良好的稳定性和优异 的实时中断处理能力。新的双核产品 TI OMAP – L138 整合了一个 300 MHz 320C674x DSP 内核和一 个 300 MHz ARM926 MPU 内核,该产品可以作为磁 力轴承控制器微处理器的理想选择。A/D 转换器 有 10 通道,每个通道具有 500 kS/s 的速率和 16 B 的精度。D/A 转换器有 5 个通道,每个通道 1 MS/s 的速率和 14 B 的精度。



图 7 压气机端磁力轴承的结构布置

运行与监测系统采用标准的 PXI 工业计算机,操作系统采用通用的 MS Windows 系统。主机可以 配置 Intel CPU 及 2 Duo T7500 内核。主机与控制器 之间的连接由工业网络实现。

功率放大器接收来自控制器的模拟电压控制信 号,并根据电压信号维持绕组中的电流。通常功率 放大器是一种受控的稳定电流源。由于单个功率放 大器的功率约为9 kVA (300 V 30 A),所以综合考 虑损失和效率因素,SWITCH 功率放大器是更好的 选择。

其它辅助部件还包括主电源、备用电源用 UPC、电缆以及连接件。

3 承载特性

采用 FEMM 软件,对磁力轴承进行了电磁承载 能力分析。在标准气隙下,轴向磁力轴承和径向磁 力轴承的承载能力随电流的变化曲线如图 8 所示。 从图中可以看出,轴向磁力轴承的最大承载力约为 18 000 N,当设计值为 9 800 N 时,留有高于 80% 的 设计裕量。径向轴承的最大电磁力为 4 500 N,当设 计值为 1 960 N 时, 留有高于 120% 的设计裕量。因此 在系统运行期间 磁力轴承有充足的承载能力保证氦气轮机能够在不同的载荷变化下安全运行。



图 8 标准气隙下磁力轴承的承载力分析

4 转子动力学特性

采用基于有限元分析方法的转子动力学分析软件 SAMCEF 对透平压气机组转子进行了计算。计 算采用三维计算模型,径向轴承的支承刚度系数为 5.0×10⁶ N/m。转子动力学计算的结果表明,在达 到 250 Hz 的额定转速前,透平压气机转子必须通过 两阶弯曲临界。氦气透平压气机转子的各阶振型示 意图如图9 所示 相应的特征频率如表 2 所示。



(Hz)

频率	数值
平动频率	17
摆动频率	32
一阶弯曲临界	70
二阶弯曲临界	191
三阶弯曲临界	302

表2 透平压气机转子的临界频率

5 结 论

(1) 10 MW 高温气冷堆氦气透平发电系统中的氦气轮机采用立式一体化的结构布置方式,其中 氦气透平为6级,低压压气机为7级,高压压气机为 10级。

(2) 氦气轮机转子由两个径向磁力轴承和一个 轴向磁力轴承支撑。两个径向磁力轴承分别布置在 氦气轮机转子的上下两端,轴向磁力轴承布置在转 子的上端。

(3)轴向磁力轴承的设计承载力为9800 N,气
隙为0.7 mm。径向磁力轴承的设计承载能力为1
960 N,定转子间气隙为0.6 mm。

(4) 转子动力学计算的结果表明,在达到250 Hz 的额定转速前,透平压气机转子必须通过两阶弯曲临界。

(5) 磁力轴承承载特性分析结果表明,磁力轴 承的承载能力能够满足氦气轮机在各种运行工况的

承载要求。

参考文献:

- WU Z X ,LIN D C ,ZHONG D X. The design features of the HTR-10[J]. Nucl Eng Des 2002 218(1-3): 25 - 32.
- [2] ZHANG Z Y ,WU Z X. Design of Chinese modular high temperature gas-cooled reactor HTR-PM//In: Proceedings of the 2nd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology [C]. Beijing , 2004.
- [3] BARNERT H ,KUGELER K. HTR Plus modern turbine technology for higher efficiencies //In: Proceedings of a Technical Committee Meeting Held in Beijing , China [C]. IAEA-TECDOC-899 ,1995.
- [4] 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.
- [5] XU Y SHI Z YANG G et al. Design aspects and achievements of active magnetic bearing research for HTR-I0GT[J]. Nuclear Engineering and Design 2008 238: 1121 – 1125.
- [6] 赵 雷 杨国军.国家高技术研究发展计划(863 计划)能源技术领域——高温气冷堆氦气透平发电系统验收科研报告《透平压气机组磁力轴承设计说明书》[R].北京:清华大学 2010.

压气机通用特性的构成及在变工况计算中的应用

据《Теплоэнергетика》2010 年 9 月号报道,为了计算并研究 ГТУ(燃气轮机装置)的变工况的状态,必须 知道在不同工况时压气机流量和其它参数之间的相互关系,这些关系通常是以压气机通用特性的形式给出, 也可以利用计算的方法或试验得到结果。

为了模拟 FTY 的变工况运行、研究并监控它们的技术状态,必须撑握计算结果与工况试验最接近的试验数据的计算方法。在这些算法中,采用了在不同的负荷和气侯条件下同一类型 FTY 试验中所确定下来的特性。

介绍了在 ГТУ 从空转到最大负荷的范围内,当恒定转速时简单循环发电用 ГТУ 压气机通用特性构成的 方法,利用了 ГТУ(ГТЭ-160 (Siemens-JIM3))在电站试验的结果。

同时 提供了利用压气机和涡轮的试验特性以及 ITY 变工况的模拟程序 ,构成在 BHA(进口导叶) 不同 位置时压气机通用特性的方法。

列出了计算数据与同一类型 FTY 试验数据比较的结果。

(吉桂明 摘译)

the requirements for overall performance type tests stipulated in GB/12246-2006. The research findings have filled the technical gap in domestic that only the testing requirements are presented but no real testing conditions are currently available in China. **Key words**: pressure reducing and stabilizing , dynamic testing , type test , error

 N_2 稀释对合成气扩散火焰流场的影响 = Influence of N_2 Dilution on a Synthetic Gas Diffusion Flame Flow Field [刊 汉] GUO Pei-qing , ZANG Shu-sheng , GE Bing (Education Ministry Key Laboratory on Power and Mechanical Engineering , Shanghai Jiaotong University , Shanghai , China , Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(2). -224~228

A PIV (Particle Image Velocimetry) measurement was performed of a combustion flame hot state cyclone flow field of a medium heating value synthetic gas diluted with nitrogen. Moreover, the law governing the influence of different ni-trogen dilution amounts on the combustion flow field was analyzed. The test results show that the presence of nitrogen can mainly change the size of the jet flow zone and the width of the flame is basically not affected. The maximum return flow speed will increase with an increase of the nitrogen dilution amount while the fluctuation in the return flow zone, however, will decrease accordingly. In the meantime, to increase the nitrogen dilution amount may reduce the kinetic energy of the turbulence in the return flow zone, thereby resulting in a drop in the flame temperature. **Key words**: diffusion combustion, synthetic gas, PIV (Particle Image Velocimetry), nitrogen dilution

利用吸收光谱技术对 SO₂ 和 NO 浓度评估的研究 = Study of the Evaluation of SO₂ and NO Concentration by Employing the Absorption Spectrum Technology [刊,汉] WANG Hua-shan, WU Shao-hua, QIN Yu-kun (College of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(2). -229~232

Based on the absorption characteristics of SO_2 and NO in the ultraviolet zone, a new method was presented for simultaneously measuring the concentrations of two gases. During the test, a concentration measurement was completed in the presence of sole SO_2 and $both SO_2$ and NO_2 simultaneously. By processing both transmission spectrums, the SO_2 concentration was obtained and a formula for measuring the concentration of SO_2 gas was established. On this basis, the influence of the presence of SO_2 on NO concentration was also acquired. In addition, the influence of the presence of SO_2 concentration was also analyzed and obtained. Finally, the on-site SO_2 on NO emissions from a utility boiler were monitored, the result of which objectively reflected the variation law of gas emission concentrations. Compared with some traditional commercial detection devices, the system under discussion enjoys a relatively big edge in response time and performance etc. , further satisfying the requirements for monitoring exhaust gas emissions from current power plants. **Key words**: absorption spectrum, SO_2 , NO, concentration, measurement

用于支撑 HTR-10GT 氦气轮机的磁力轴承设计研究 = Study on Design of the Magnetic Bearings for Supporting a HTR-10GT Helium Turbine [刊 汉] MA Yun-xiang , 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(2) . – 233 ~ 237

The design principle and technical features of the magnetic bearings for use in a 10 MW high temperature reactor-

based helium turbine (HTR-10GT) power generation project were described and the detailed structure design and key design parameters of the magnetic bearings , given. A structure with an integral vertical arrangement was adopted for the rotor of the helium turbine. The above-mentioned rotor was supported by two radial magnetic bearings along with an axial magnetic bearing. The design load carrying capacity of the axial magnetic bearings reached 1.960 kN with a clearance of 0.7 mm. The design load carrying capacity of the radial magnetic bearings reached 1.960 kN with a clearance between the stator and rotor being 0.6 mm. Furthermore , the load carrying characteristics of the magnetic bearings and the kinetic characteristics of the helium turbine rotor were studied. The results calculated by using the rotor kinetics show that before arriving at the rated speed of 250 Hz , the turbine and compressor rotor must pass through the first and second order bending critical speed. **Key words**: magnetic bearing , helium turbine , HTR-10GT , load carrying capacity

提高多机风力发电并网系统稳定性的研究 = Study on Enhancement of the Stability of a Multiple Wind Turbine Power Generation and Grid Connection System [刊 汉] KUANG Hong-hai, WU Zheng-qiu (College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha, China, Post Code: 410082), HE Xiao-ning, WANG Bing (College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou, China, Post Code: 412008) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2011, 26(2). -238~243

Wind power can not produce electric energy constantly and stably as influenced by natural elements. When a large amount of wind power is connected to a grid , it will certainly bring about an adverse effect on the stability of the electric power system. To guarantee a stable operation of electric power systems , presented was a solution using a super capacitor energy storage system (SCESS) based on a fuzzy logic control coupled with a dual feed induction generator (DFIG). In this connection , the software Matlab/Smiulink was used to perform a simulation analysis of the multiple wind turbine power generation and grid connection system. The simulation results show that the SCESS and DFIG scheme presented by the authors can improve the transient stability of the above-mentioned system. When an accident occurs to the system , it can continue its stable operation. **Key words**: super capacitor , energy storage system , converter , transient stability , dual feed induction generator

提高反渗透海水淡化用提升泵效率的研究 = Study of Enhancement of the Efficiency of a Booster Pump Destined for Reverse Osmosis Sea Water Desalination [刊 汉] HU Jing-ning , LIU San-hua , JIANG Wei , et al (Research Center for Fluid Mechanical Engineering Technology , Jiangsu University , Zhenjiang , China , Post Code: 212013) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. – 2011 , 26(2). – 244 ~ 247

With a view to solving the problems relating to the efficiency of booster pumps for reverse osmosis sea water desalination , designed were three hydraulic model versions on the basis of the currently available models. By employing software Fluent and multiple reference coordinates , and based on the Renault time-averaged N - S equation and standard $k - \varepsilon$ turbulent flow model , a numerical simulation and performance prediction were preformed of the inner flow fields in the three hydraulic models. On the basis of the prediction results , a model pump was manufactured by choosing a model scheme meeting the performance requirements and having the highest efficiency. Furthermore , an experimental study was conducted. The performance prediction and model test results show that the prediction values are in relatively good agreement with the test ones on a comprehensive basis , among which , the predicted head is relatively close to the test one under the design operating conditions but a certain error still exists under the off-design operating conditions. The real efficiency of the pump manufactured by using the hydraulic model and optimized through a theoretical calculation reaches 81.3% , meeting the requirement for the efficiency of a sea water desalination pump. **Key words**: sea water desalination booster pump *e*fficiency performance prediction *e*ror