

低密度下氦气透平压气机组高速机械性能试验 热工特性研究

叶萍¹, 丁超², 杨小勇¹, 王捷¹

(1. 清华大学核能与新能源技术研究院, 先进核能技术协同创新中心, 北京 100084;

2. 环境保护部核与辐射安全中心, 北京 100081)

摘要: 将闭式氦气透平循环与高温气冷堆相结合, 是未来高温气冷堆发电技术的潜在发展方向之一。高速机械性能试验是设计与研制氦气透平压气机组的关键环节, 能考验电磁轴承支承的透平压气机组的机械旋转性能, 为未来机组顺利与反应堆相连接进行热态运行奠定基础。本文设计并分析一种在密闭空间内低密度下进行高速机械性能试验的方案, 建立试验系统热工模型, 获得了低密度下透平压气机组性能, 得到了系统温度场分布, 从而确定电机定子温度为试验系统的温度限制条件。对密闭空间试验系统的传热和流动分析表明, 在低密度下, 存在合理的压力调节范围使得系统散热能力高于发热能力, 从而保证整个系统的安全运行, 确定了低密度方案的可行性。

关键词: 高速机械性能试验; 氦气透平; 低密度; 特性曲线

中图分类号: TL364.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2015)S0-0321-06

doi: 10.7538/yzk.2015.49.S0.0321

Thermo-hydraulic Analysis of High Speed Mechanical Performance Test of Helium Turbomachinery under Low Density Condition

YE Ping¹, DING Chao², YANG Xiao-yong¹, WANG Jie¹

(1. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Collaborative Innovation Center of Advanced Nuclear Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Nuclear and Radiation Safety Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100081, China)

Abstract: It's a potential developing direction for power generation of high temperature gas-cooled reactor combined with helium turbine closed cycle. The high speed mechanical performance test plays a key role in design and development of helium turbine system. It would verify the mechanical performance of turbine-compressor which was supported by active magnetic bearings. The results would provide basis for normal operation while helium turbine system is successfully connected with reactor in the future. A high speed mechanical performance test of helium turbomachinery was designed and analyzed. The rotor was supposed to be arranged in an enclosed vessel and low density environment inside the vessel can be acquired. By analyzing the preliminary

收稿日期: 2015-01-04; 修回日期: 2015-03-03

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2005AA511010); 国家科技重大专项资助项目(2011ZX06901-019)

作者简介: 叶萍(1982—), 女, 江西上饶人, 工程师, 硕士, 从事高温堆叶轮机械特性研究

thermo-hydraulic characteristics of test system, turbomachinery performance under low density was achieved and temperature distribution was estimated. The results indicate that the maximum temperature of motor's stator is the temperature limit of test system. The thermo-hydraulic analysis shows there exists a certain pressure adjusting range to achieve the safe operation of test and it ensures the feasibility of this low density plan.

Key words: high speed mechanical performance test; helium turbine; low density; characteristic curve

模块式高温气冷堆具有第4代反应堆特征,有广阔的应用前景^[1]。将闭式氦气透平循环与高温气冷堆结合成高温气冷堆氦气透平发电系统,能充分利用高温气冷堆的高温潜力,提高发电效率,是未来高温气冷堆发电技术的潜在发展方向之一。

氦气透平压气机组是高温气冷堆氦气透平发电系统的核心部件,在驱动发电机发电的同时,为氦气循环提供动力。目前,世界上还没有实际与反应堆连接运行的氦气透平压气机组;俄国、美国、日本等对其进行的大量研究多集中在设计和比例试验方面^[2]。自20世纪90年代以来,PBMR、GTHTR300、GT-MHR等的新一代反应堆都采用单轴氦气透平压气机组设计,其中只有GT-MHR为立式布置,额定转速依次为6 000、3 600和4 400 r/min,但都未研制出全尺寸样机或进行全尺寸样机的整机试验^[2]。

在10 MW高温气冷堆(HTR-10)研制成功的基础上,清华大学核能与新能源技术研究院对10 MW高温气冷堆氦气透平发电系统(HTR-10GT)进行了深入研究,完成了氦气透平压气机组的设计和全尺寸样机研制。该氦气透平压气机组为多级轴流式,立式布置,转子长约3.85 m,额定转速为15 000 r/min。在国际上尚无容量相当、结构相似的机组,突破了大型立式机组的转速范围和结构型式。与燃气轮机相比,该氦气透平压气机组的级数多,机组转子长度长,由无润滑、非接触的高速重载电磁轴承支承,额定转速超过机组转子二阶弯曲临界,技术挑战很大。因此,必须对其进行系统可靠性试验,尤其是全尺寸样机的高速机械性能试验验证,以考验机组整机的制造质量,检验机组运行的稳定性与可靠性,并根据试验数据对气体透平的开发进行相应的调整^[3]。

目前国际上只有美国、法国等少数几个国家建有大型燃气轮机试车台^[4],近几年来,哈尔滨电站集团、东方汽轮机厂等都建设了重型燃气轮机试验平台,并进行了相应试验研究^[5-6]。邓旺群等^[7]在高速旋转试验器上对航空发动机动力涡轮转子的动力特性进行了试验研究。因此需要为氦气透平压气机组设计相应的试验台架,将透平、高压压气机、低压压气机一体化装配,由电机带动机组,进行各种转速(包括额定转速、最高转速)下的空载机械运转,从而为系统与反应堆等热源连接进行热态试验进而上堆运行奠定基础。

由于转速高、叶片密,如果直接在大气开放环境下开展高速机械运转试验,鼓风损失极大,所需高速电机功率接近22 MW。而目前高速电机功率有限,无法满足试验需求。因此,本文提出一种在密闭空间内低密度下进行氦气透平压气机组高速机械性能试验的方案,并进行相应论证。

1 高速机械运转试验系统初步设计

由于透平压气机组的旋转阻力与气体密度呈一定比例关系,可用压力壳承纳整个试验装置,通过抽真空降低气体密度的方法来降低旋转阻力。在此条件下,可能存在合适功率的高速电机能够拖动透平压气机组完成高速机械运转试验。设计的高速机械运转试验系统(图1)由压力壳、氦气透平压气机组、电磁轴承、高速电机和仪控系统组成。氦气由透平压气机组底部的入口进入,由透平压气机组旋转产生的压头带动,高速流过低压压气机、高压压气机和透平内部,被加热后流入压力壳内的大空间。部分氦气继续流过电机内外,冷却发热的电机。所有的热量最终通过压力壳散出。但气体的对流换热能力会随密度的降低而减弱,而电机的

绝缘存在温度限制,如果散热能力不足导致绝缘超温,可能会造成绝缘击穿,甚至烧毁机组。因此,需研究压力壳内气体密度变化对透平压气机组功率和电机处温度分布的影响,确保既有合适功率的高速电机可用,又能保证符合电机绝缘温度限值,确保系统安全运行。

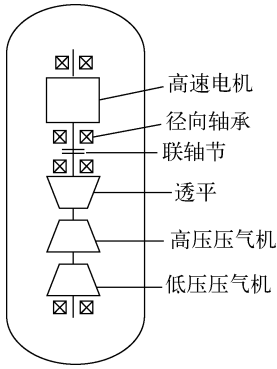


图1 高速机械性能试验系统模型

Fig.1 Model of high speed mechanical performance test system

2 电机内部一维温度场模型

在电机的绝缘温度限制中,定子温度最高为 $112\text{ }^{\circ}\text{C}$,转子温度最高为 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。如图2所示,可将电机内的热传导过程视为具有内热源的圆柱体导热问题,对电机建立一维径向微分导热方程,有:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) + \frac{q_{Vi}}{\lambda_i} = 0 \quad (1)$$

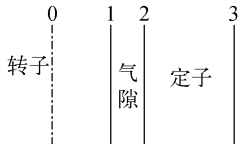


图2 电机内部一维温度场模型

Fig.2 One-dimensional temperature profile model for inner motor

由于转子、气隙、定子内部的发热源、材料导热系数不同,它们各自的边界条件如式(2)~(6)所示。其中:脚标 r 表示转子部分, g 表示气隙部分, s 表示定子部分;界面 1、2 分别为气隙与转子、气隙与定子内缘的界面,界面 3 为定子的外缘面,与其对应的半径依次为 r_1 、 r_2 、 r_3 。

并将气隙等效为考虑两个界面对流换热的导热热阻,有:

转子:

$$r = 0, \frac{dT}{dr} = 0 \quad (2)$$

$$\lambda_r \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=r_{1-}} = \lambda_g \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=r_{1+}} \quad (3)$$

气隙:

$$T \Big|_{r=r_{i+}} = T \Big|_{r=r_{i-}}, i = 1, 2 \quad (4)$$

$$\lambda_g \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=r_{2-}} = \lambda_s \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=r_{2+}} \quad (5)$$

定子:

$$r = r_3, -\lambda_s \frac{dT}{dr} = \alpha(T_3 - T_f) \quad (6)$$

式(2)~(6)中,变量主要包括电机内热源 q_{Vr} 、 q_{Vg} 、 q_{Vs} ,电机外侧气流温度 T_f ,对流换热系数 α 以及 T_1 、 T_2 、 T_3 。密度 ρ 变化会导致透平压气机组的发热功率 q 以及 T_f 的变化。电机发热包括电磁损耗和风摩损耗,风摩损耗与 ρ 有关。 α 则与系统的速度场相关。因此,对系统内各部件进行热工特性分析,计算出系统流场,即可逐一解出上述变量,从而获得电机温度场,最终确定电机是否在安全范围内运行。

3 试验系统初步热工特性分析

试验系统的散热主要通过对流换热和热辐射进行,发热主要来自氦气透平压气机组中的鼓风损失、电气部件的电磁损耗和风摩损耗发热。如果系统密度过高,则会导致电机耗功增大,鼓风损失太大,从而造成整个系统内的温度上升,电机温度可能超过安全限制。如果系统密度过低,则可能导致散热不及时,也可能造成电机超温。因此,需要选取并确定一个密度范围,以选用合适功率的电机,同时保证系统的散热能力大于发热能力。

3.1 透平压气机组发热特性分析

在之前的工程试验中,尚无准确计算透平压气机组空载运行发热的模型。在高速空载运行条件下,透平压气机组的耗功全部转换为热量,因此计算出透平压气机组的耗功,再结合密闭容器的散热分析,便能获得式(6)中的电机外侧气流温度 T_f 。

1) 透平压气机特性曲线拟合法

本文运用透平压气机特性曲线拟合法分析透平压气机组高速空载运行的功率。根据相似原理,有 $\eta = f\left(\frac{G\sqrt{T_1^*}}{p_1^*}, \frac{n}{\sqrt{T_a^*}}\right)$ 及 $\pi = f\left(\frac{G\sqrt{T_1^*}}{p_1^*}, \frac{n}{\sqrt{T_a^*}}\right)$ 。因此已知某一工况参数,运用特性曲线,便可得到它在特性曲线图上对应的压比 π 和效率 η ^[8-9],从而得到机组的发热功率。由于已知的特性曲线参数离散且有限,需对特性曲线参数进行拟合^[10]。对等转速线、等效率线进行拟合后,得到等转速线上的效率分布,进而得到转速在 4 000~22 000 r/min(压气机)、12 610~16 400 r/min(透平)区间内,不同质量流量下低、高压压气机与透平的压比与效率,进一步计算可得到实际过程的压比、效率乃至温升,从而计算得到透平压气机组的发热功率。

2) 计算结果

在计算中,假设气流在低压压气机、高压压气机以及透平机间无能量损失,保持温度与压力不变。由于已知低压压气机、高压压气机与透平机的工作参数,采用迭代检验计算的方式,得到透平压气机组的运行工况。代入不同入口温度、压力参数,可得到机组质量流量定义域内所有流量下的功率。计算结果如图 3 所示,透平压气机的发热量与系统的压力呈正比,也与质量流量即氦气密度呈正比。计算结果表明,低压压气机处于正常设计点附近工作,高压压气机工作在超设计流量位置,透平机处于远低于设计流量的工作状态。

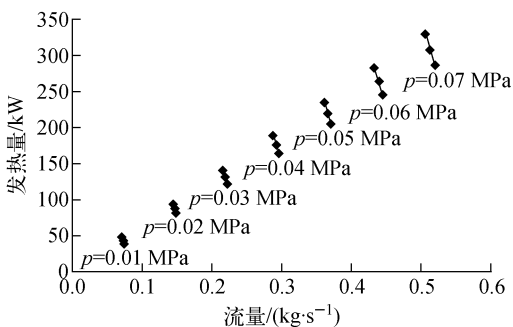


图 3 不同系统压力下流量-发热量关系

Fig. 3 Relationship between flow rate and heat under different system pressures

3.2 电气部件发热分析

如式(1)所示,电气部件的发热功率是电机内温度场的内热源,极大地影响着系统的温度分布。系统中的电气部件主要包括电机和电磁轴承,其损耗发热主要包括铁损、铜损和风摩损耗。

铁损包括转子的铁损和定子的铁损。转子的铁损 P_{Fe} 包括磁滞损耗和涡流损耗。磁滞又包括由交变磁场产生的交变磁滞和由旋转磁场产生的旋转磁滞,根据文献[11-12]公式进行计算。由于磁滞损耗与频率 f 呈正比,而涡流损耗与频率 f 的高阶指数呈正比,当转速很高时,磁滞损耗占的比例较小,忽略不计。按照 Bertotti 铁耗分立计算模型^[13]计算定子发热,根据焦耳-楞次定律计算铜耗,根据文献[14]进行电机的风摩损耗计算。

3.3 二维流场数值模拟

为得到式(6)中的 α ,必须获得压力壳内速度场,本文采用 FLUENT 对高速机械性能试验系统的流场进行了二维数值模拟。图 4 所示的温度场模拟结果表明,压力壳内的温度从下向上升高;速度场模拟结果表明,氦气从透平压气机组出口流出后,在压力壳内产生大空间的循环流动,在透平压气机与电机外围分别产生涡流,增强了换热效果。

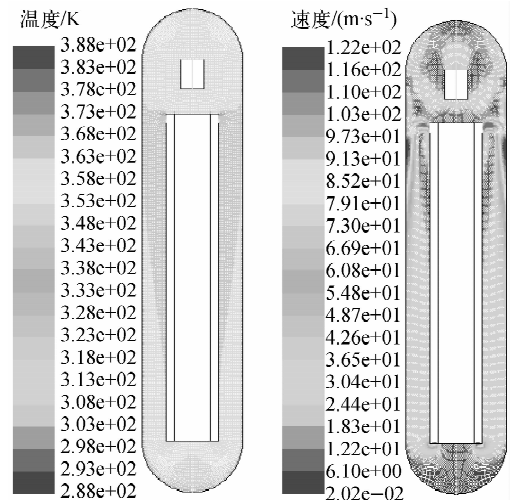


图 4 温度场及速度场分布

Fig. 4 Temperature and velocity distributions

4 密闭容器壁面散热分析

根据简化系统的原则,在系统内不设冷却

器,系统通过密闭容器的壁面向周围环境散热。该方案也是偏保守的设计。其温度场模型为:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (7)$$

$$-\lambda_w \frac{dT}{dr} = \alpha(T_i - T_w) \quad (8)$$

式中, T_w 为壁面温度。

5 密度对电机绝缘最高温度的影响分析

5.1 电机内温度分布

联立上述方程,可得到如图 5 所示的电机内温度分布。研究表明,定子内缘是绝缘线圈的最高温度点位置,是系统的温度限制条件。保持电机定子外围的温度在 $52\text{ }^\circ\text{C}$ 以下,即可约束定子内缘温度低于温度限值,保证役前试验系统的安全运行。

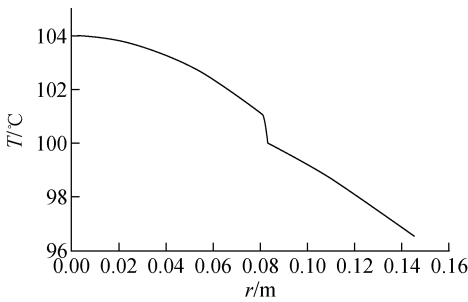


图 5 电机内温度分布

Fig. 5 Temperature distribution of inner motor

5.2 密度影响分析

在高速机械性能试验中,合理地调节系统压力以调节氦气密度是保证系统安全运行的关键。综合上述分析与计算结果,得到图 6 所示的合理压力调节范围。分析表明,通过抽真空

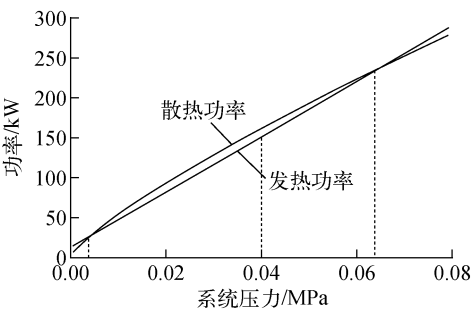


图 6 试验系统压力调节范围

Fig. 6 Pressure adjusting range of test system

控制系统内氦气密度的方式将试验系统的压力调节在 $0.004\sim 0.064\text{ MPa}$ 之间,即可保证试验系统在稳态时散热能力大于发热能力,确保系统的稳定运行。

从图 6 可知,散热功率的斜率随密度变化先增大后减小,斜率的转折点发生在系统压力为 0.04 MPa 左右。因此,将高速机械性能试验系统的压力控制在 0.04 MPa 附近是控制较安全的位置。一方面,当系统压力为 0.04 MPa 时,散热功率与发热功率的差值有足够的裕量;另一方面,当试验系统出现温度突然升高的事故时,可通过降低系统的压力来迅速调节发热功率和散热功率。

6 结束语

本文分析了在密闭空间内低密度下进行氦气透平压气机组高速机械性能试验的方案,对试验系统进行了热工建模和流场分析,研究结论如下:

1) 在密闭空间内低密度下存在散热能力高于发热能力的区间,可保证整个系统的安全运行,开展氦气透平压气机组高速机械性能试验方案可行。

2) 用特性曲线拟合法可计算得到透平低密度下透平压气机性能。

3) 通过分析电机发热模型,发现定子内缘是绝缘线圈的最高温度点位置,是整个试验系统的限制条件。

4) 确定了密度变化时系统散热功率、发热功率与系统温度的关系,获得了系统压力调节范围,为后续工作提供了重要的理论依据。

参考文献:

- [1] 吴宗鑫. 先进核能系统和高温气冷堆[M]. 北京:清华大学出版社,2004:16-22.
- [2] McDONALD C F. Helium turbomachinery operating experience from gas turbine power plants and test facilities[J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 44: 108-142.
- [3] 周鸿儒,陈光. 中国首台 F 级重型燃气轮机全转速空负荷试验研究[J]. 汽轮机技术,2008,50(1):29-31.

ZHOU Hongru, CHEN Guang. Introduction of initial F class gas turbine full speed no load test

- [J]. *Turbine Technology*, 2008, 50(1): 29-31 (in Chinese).
- [4] JANSEN M, SCHULENBERG T, WALDINGER D. Shop test results for the V64. 3A gas turbine [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1992, 114(4): 676-681.
- [5] 何华庆, 陈光, 王锋. 燃气轮机全转速空载试验技术研究[J]. *发电设备*, 2007(5): 332-335.
HE Huaqing, CHEN Guang, WANG Feng. Full speed no load testing of gas turbines[J]. *Power Equipment*, 2007(5): 332-335(in Chinese).
- [6] 徐自力, 赵世全, 王建录, 等. 重型燃气轮机转子-轴承系统综合试验平台[J]. *动力工程学报*, 2012, 32(10): 786-791.
XU Zili, ZHAO Shiquan, WANG Jianlu, et al. Comprehensive test-rig for rotor-bearing system of heavy-duty gas turbine[J]. *Journal of Power Engineering*, 2012, 32(10): 786-791 (in Chinese).
- [7] 邓旺群, 王桢, 舒斯荣, 等. 涡轴发动机细长柔性转子动力特性及高速动平衡技术研究[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(7): 162-170.
DENG Wangqun, WANG Zhen, SHU Sirong, et al. Dynamic characteristics and high speed dynamic balance technique for a power turbine rotor of a turbo-shaft engine[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(7): 162-170(in Chinese).
- [8] 孙明臣. 相似原理在高温气冷堆氦气透平特性研究中的应用[D]. 北京: 清华大学, 2005.
- [9] WANG J, GU Y. Parametric studies on different gas turbine cycles for a high temperature gas-cooled reactor[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2005, 235(16): 1 761-1 772.
- [10] 丁超. HTR-10GT 氦气透平役前试验系统热工特性研究与设计[D]. 北京: 清华大学, 2013.
- [11] KASARDA M E F, ALLAIRE P E, MASLEN E H, et al. High-speed rotor losses in a radial eight-pole magnetic bearing, Part 2: Analytical/empirical models and calculations[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1998, 120(1): 110-114.
- [12] SCHWEITZER G. 主动磁轴承基础、性能及应用[M]. 北京: 新时代出版社, 1997: 46-78.
- [13] BERTOTTI G. General properties of power losses in soft ferromagnetic materials [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1988, 24(1): 621-631.
- [14] 丁舜年. 大型电机的发热与冷却[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 18-24.