

# HTR-10 GT 磁力轴承实验转子临界转速分析

王洪涛, 孙立斌, 于溯源

(清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

**摘要:** 临界转速的计算是转子动力学分析的一个基础课题, 其计算结果的准确性至关重要。本文以磁力轴承过弯曲临界转速的实验台架为研究对象, 采用 Samcef Rotor 动力学软件, 分析了实验转子的临界转速和振型, 并深入研究了临界转速与支承刚度的关系。相关结论为磁力轴承控制系统设计提供重要的数值依据。

**关键词:** 高温气冷堆; 磁力轴承; 临界转速; Samcef Rotor 软件

**中图分类号:** TH133.3      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-6931(2008)S1-0576-04

## Critical Speed Analysis of Active Magnetic Bearing Test Rotor for HTR-10 GT

WANG Hong-tao, SUN Li-bin, YU Su-yuan

(Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The evaluation of the critical speed is a basic subject in the rotor dynamics analysis, and its accuracy is very important. The simulation of active magnetic bearing (AMB)-test rotor for the HTR-10GT was presented, and critical speeds and models were obtained by using Samcef Rotor software. The relationship between the critical speed and the bearing stiffness was also analyzed. The conclusion can offer an important numerical basis for the design of the AMB control system.

**Key words:** high-temperature gas-cooled reactor; active magnetic bearing; critical speed; Samcef Rotor software

10 MW 高温气冷堆氦气透平发电系统 (HTR-10GT) 是在 HTR-10 基础上的扩展, 是国家“863”计划重点项目。HTR-10GT 拟采用气体透平发电机组代替 HTR-10 蒸汽透平热力循环, 由氦气直接推动透平, 实现氦气直接循环, 以提高发电效率。HTR-10GT 能量转换系统中竖直放置的转子上装有发电机、透平、压气

机等, 其中, 透平转子采用磁力轴承支承<sup>[1-3]</sup>, 长约 3.5 m, 转速高达 15 000 r/min, 需经 2 阶弯曲临界转速。

临界转速的计算是转子动力学分析的一重要课题, 其计算结果的准确与否将直接影响控制系统的设计。为掌握磁力轴承临界转速的分析方法及研究转子动力学特性, 本文以过弯曲

收稿日期: 2008-08-15; 修回日期: 2008-11-30

作者简介: 王洪涛(1978—), 男, 辽宁营口人, 工程师, 博士, 反应堆结构力学专业

临界转速的实验台架中的转子为研究对象,采用有限元方法及 Samcef Rotor 软件对其进行临界转速分析,将计算结果与试验结果进行对比,并进一步研究临界转速与支承刚度的关系。

## 1 磁力轴承原理

磁力轴承是一能进行主动控制的机电一体化轴承。其基本原理是利用磁场力将转轴悬浮在磁场中,使转轴在空间无机械接触、无磨损地旋转。

简单磁力轴承的组成及其工作原理示于图 1。传感器检测出转子偏离参考点的位移,作为控制器的微处理器将检测的位移变化成控制信号,然后功率放大器将该控制信号转换成控制电流,控制电流在执行磁铁中产生磁力从而使转子维持其悬浮位置不变。控制系统决定着磁悬浮系统的刚度、阻尼和稳定性。

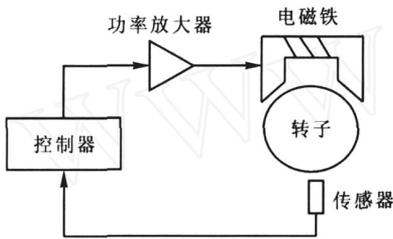


图 1 磁力轴承的工作原理

Fig. 1 Working principle of magnetic bearing

随着转子动力学、自动控制及计算机技术等相关学科的迅速发展,磁力轴承也相应向着多功能、智能化方向发展<sup>[4-5]</sup>。

## 2 有限元方法及 Samcef 软件

临界转速的计算是转子动力学分析的一重要课题,其主要的计算方法为传递矩阵法和有限元法。传递矩阵法计算量小,但计算精度比有限元法差。近年来,随计算机性能的不提高,有限元法的应用越来越广泛,并出现了一系列比较成熟的商业软件。其中,Samcef 系列软

件是处理旋转机械问题的有限元分析软件,其包括前后处理软件 Samcef Field、转子动力学分析模块 Samcef Rotor 等。Samcef Rotor 软件是目前世界上广泛应用的单轴或多轴转子动力学特性分析的商用有限元分析软件。Samcef Rotor 软件与 Samcef Field 软件组成转子动力学特性集成仿真分析系统,能实现完整转子从建模到动力学特性分析的整个过程<sup>[6]</sup>。本文采用有限元方法及 Samcef Rotor 软件,对实验台架的转子进行临界转速分析。

## 3 实验转子临界转速分析

实验转子的三维模型示于图 2。转子全长 1 058.5 mm,轴承的支承刚度为  $5.0 \times 10^4$  N/m。轴的弹性模量为  $2.078 \times 10^{11}$  N/m<sup>2</sup>,泊松比为 0.3。由于部件(如磁力轴承转子、转盘等)均是通过热过盈配合安装到转轴上,因此,这些部件在计算模型中均按粘接为一体考虑。转盘按集中质量单元考虑,共 5 个。由于通过热过盈配合安装部件对整体抗弯刚度的贡献较小,实际计算中通过减小这些部件的弹性模量来模拟。具体试算中发现,弹性模量过小将引发实际中并不存在的局部振动。因此,根据试算的经验将这些部件的弹性模量取为轴的 1/10。



图 2 实验转子的三维模型

Fig. 2 Three dimensional model of experimental rotor

采用 Samcef Field 软件建立转子用于有限元分析的二维轴对称模型(图 3)。此模型采用二维轴对称傅里叶级数单元,集中质量和转动惯量采用集中质量单元(lumpedmass),轴承采



图 3 二维轴对称模型

Fig. 3 Two dimensional axisymmetric model

用接地轴承单元(ground bearing)。施加边界条件,约束轴向位移和绕轴向转动。划分网格,施加边界条件,生成完整的有限元分析模型。单元数为778,节点数为2773。利用Samcef Rotor软件求解转子的进动转速、振型及临界转速。

采用Pseudo-Modal算法计算得到坎贝尔图(图4)。采用Direct算法(直接法)计算得到转子系统的临界转速(表1)及第1、2、3阶正向涡动临界转速振型图(图5)。

文献[3]中通过试验得到转子的实际特征频率分别为127(第1阶挠性)、248.5(第2阶挠性)和489 Hz(第3阶挠性)。通过将表1中正向涡动临界转速的计算结果与试验结果进行比较,可看出,计算结果与试验结果符合较好,特别是第2阶临界转速。

#### 4 临界转速与支承刚度的关系

与常规轴承相比,磁力轴承可在设计的支承刚度范围内根据实际需要进行改变。因此,系统的临界转速与转子的支承刚度有着密切的

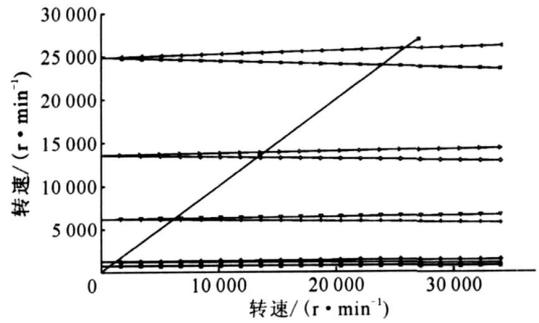


图4 转子系统的坎贝尔图

Fig. 4 Campbell diagram of rotor system

- 平动反向涡动; — 平动正向涡动;
- 摆动反向涡动; — 摆动正向涡动;
- + — 第1阶挠性反向涡动; ∇ — 第1阶挠性正向涡动;
- 第2阶挠性反向涡动; > — 第2阶挠性正向涡动;
- \* — 第3阶挠性反向涡动; ▶ — 第3阶挠性正向涡动;
- 同步激励线

关系。对于图2所示的实验转子,假设其支承刚度变化范围为10<sup>4</sup>~10<sup>7</sup> N/m。采用Samcef Rotor软件,分析了转子临界转速与支承刚度的关系(图6)。由图6可知,支承刚度的大小

表1 临界转速

Table 1 Critical speeds

工况	第1阶		第2阶		第3阶	
	频率/Hz	转速/(r·min <sup>-1</sup> )	频率/Hz	转速/(r·min <sup>-1</sup> )	频率/Hz	转速/(r·min <sup>-1</sup> )
正向涡动	110.61	6 637	244.90	14 694	457.16	27 430
反向涡动	107.85	6 471	234.48	14 069	422.75	25 365

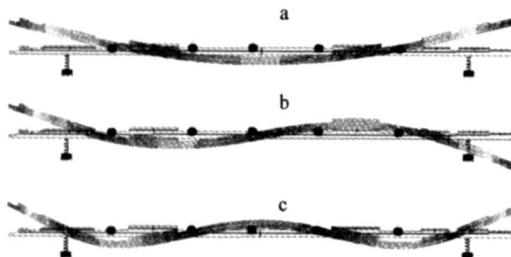


图5 第1(a)、2(b)、3(c)阶正向涡动临界转速振型图

Fig. 5 Critical speeds modal shapes of the first (a), the second (b) and the third (c) orders for forward whirls

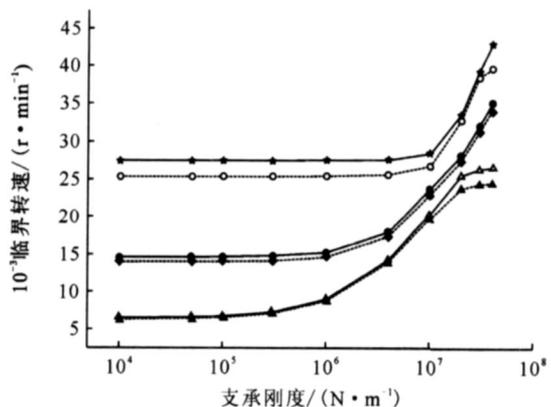


图6 转子临界转速与支承刚度的关系  
Fig. 6 Relationship between supporting stiffness and critical speeds

- ▲ — 第1阶反向涡动; △ — 第1阶正向涡动;
- ◆ — 第2阶反向涡动; ● — 第2阶正向涡动;
- — 第3阶反向涡动; ★ — 第3阶正向涡动

将直接影响实验转子的临界转速。

从图 6 可看出支承刚度对各阶涡动临界转速的影响。在支承刚度较小时,其对临界转速的影响不大,这主要由于支承刚度比转子的抗弯刚度小。随支承刚度的增大,当支承刚度约达  $1.0 \times 10^5$  N/m 时,其对第 1 阶正向和反向涡动临界转速开始产生较大影响;当支承刚度约达  $1.0 \times 10^6$  N/m 时,其对第 2 阶正向和反向涡动临界转速开始产生较大影响。但当支承刚度达到非常大时,即接近于固支的情况下,转子本身材料特性将对临界转速产生较大影响。

在设计该转子支承刚度时,尽可能将刚度设置在  $1.0 \times 10^6$  N/m 以下。此时,在调整控制器参数而使支承刚度在小范围内变化时,转子的临界转速变化不大,便于对转子的控制。从图 6 可看出,如果选择在  $1.0 \times 10^6$  N/m 以上的区域,在某些刚度下,转子的各阶挠性临界转速间距较小,当转子的工作转速位于两个挠性临界转速之间时,会同时激发两个较强的挠性模态振动,不利于对转子的控制。

## 5 结语

针对 HTR-10GT 透平转子需要经过 2 阶弯曲临界转速的问题,采用 Samcef Rotor 动力学分析软件对建立的过弯曲临界转速实验台架转子进行了临界转速分析,并与试验结果进行了对比,结果吻合得较好。研究结果为磁力轴承控制系统的设计提供了依据,并为 HTR-10GT 透平转子磁力轴承的设计及过 2 阶弯曲

转速奠定了理论基础。

## 参考文献:

- [1] 施韦策 G,布鲁勒 H,特拉克斯勒 A. 主动磁轴承基础、性能及应用[M]. 虞烈. 北京:北京新时代出版社,1997.
- [2] 胡业发,周祖德,江征风. 磁力轴承的基础理论与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [3] 李红伟. 高温气冷堆氦气透平磁力轴承-挠性转子系统的性能研究[D]. 北京:清华大学,2008.
- [4] PETELA G, BOTROS K. Magnetic bearing control of flexible shaft vibrations based on multi-access velocity-displacement feedback [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1995, 117: 188-197.
- [5] SUZUKI Y, MICHIMURA S, TAMURA A. Unbalance response attenuation of a flexible rotor suspended by magnetic bearings with open loop control[J]. JSME Int J Series C, 1994, 37(2): 285-291.
- [6] 周传用. Samcef Rotor 在转子动力特性分析中的应用[C]//磁悬浮轴承研究进展——暨第一届中国电磁轴承学术会议论文集. 北京:原子能出版社,2005:195-203.
- [7] 杨国军,于渊源. HTR-10 磁轴承转子动力学的初步研究[J]. 核动力工程,2003,24(6):514-516.  
YANG Guojun, YU Suyuan. Preliminary study on rotor dynamics of magnetic bearing for 10 MW High-Temperature Gas-Cooled Reactor[J]. Nuclear Power Engineering, 2003, 24(6): 514-516 (in Chinese).