

柔性支撑转子支撑刚度对临界转速的影响分析

任正义^a,朱健国^b,杨立平^a

(哈尔滨工程大学 a. 工程训练中心; b. 机电工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要:旋转机械的工作转速在其临界转速分布范围内会产生剧烈振动,严重时会使系统遭到破坏,因此研究临界转速的影响因素至关重要。建立柔性支撑的储能飞轮转子有限元模型,基于 ANSYS Workbench 分析软件对不同支撑刚度条件下转子的临界转速进行计算和分析。通过计算结果分析支撑刚度对转子的前三阶临界转速的影响,为使系统的临界转速偏离工作转速提供设计和调整依据。

关键词:柔性支撑;转子;支撑刚度;临界转速

中图分类号:TH133.7 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2019)05-0057-03

Analysis of Influence of Support Stiffness of Flexible Support Rotor on Critical Speed

REN Zhengyi^a, ZHU Jianguo^b, YANG Liping^a

(a. Engineering Training Center; b. College of Mechanical and

Electrical Engineering, Haerbin Engineering University, Haerbin 150001, China)

Abstract: The violent vibration may be caused by the rotating speed of machine within its critical speed distribution range. The system may be damaged by it. Therefore, it is very important to study the influencing factors of the critical speed. The finite element model of the energy storage flywheel rotor with flexible support is established. Based on ANSYS Workbench analysis software, the critical rotating speed of the rotor under different support stiffness conditions is calculated and analyzed. The influence of the support stiffness on the first three critical speeds of the rotor is analyzed according to the calculation results, and the basis is provided for the design of the critical speed of the system and adjusting the deviation of the working speed.

Keywords: flexible support; rotor; support stiffness; critical speed

0 引言

柔性支撑的储能飞轮转子的临界转速与径向电磁轴承的支撑刚度有着密切的关系,而电磁轴承的优势之一就是其支撑刚度在一定范围内可变。改变径向刚度的数值,飞轮各阶临界转速也随之改变,调整这些临界转速的范围,使其偏离系统的工作转速,从而获得相对较好的飞轮转子动态特性^[1]。

本文以 600 Wh 储能飞轮转子为研究对象,建立转子系统的有限元分析模型,采用 ANSYS Workbench 计算分析固定下径向电磁轴承支撑刚度,增加上径向电磁轴承支撑刚度时前三阶临界转速的变化规律。固定上径向电磁轴承支撑刚度,增加下径向电磁轴承支撑刚度时前三阶临界转速的变化规律^[2],同时增加上、下径向电磁轴承支撑刚度时前三阶临界转速的变化规律。通过计算结果分析出调整前三阶临界转速最佳支撑刚度变化范围以及调整方式。

1 转子有限元模型

有限元的中心思想就是将复杂结构划分到各个单元。

因此,单元划分的准确性直接影响结果的准确性。储能飞轮转子三维模型如图 1 所示,储能飞轮转子有限元模型如图 2 所示。储能飞轮转子系统模型由上、下径向电磁轴承转子、轴向电磁轴承推力盘、飞轮、电动机转子、转轴组成^[3]。依据有限元划分原则,将储能飞轮转子按 25 个节点分。在划分过程中,忽略转子中的细小结构(如倒角、小孔等)。对于转子系统中上、下径向磁轴承以弹簧单元模拟。

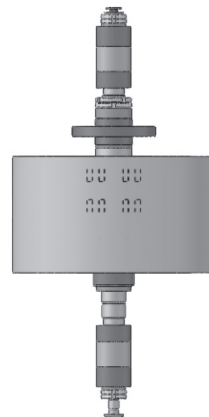


图 1 储能飞轮系统转子三维模型

基金项目:国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2013AA050802)

作者简介:任正义(1962—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,研究方向为飞轮储能技术。

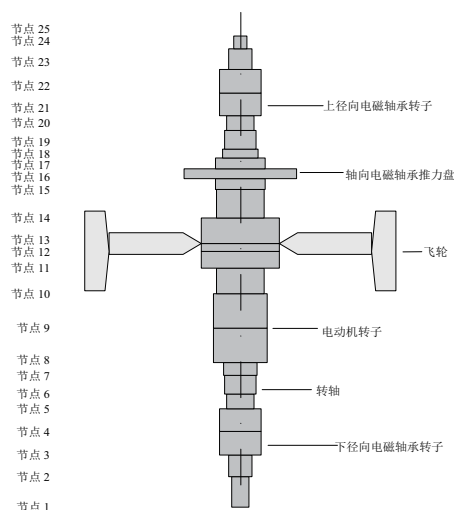


图2 储能飞轮转子有限元模型

2 临界转速计算分析

以上径向电磁轴承作为1号支撑轴承,下径向电磁轴承作为2号支撑轴承。在储能飞轮系统设计完成后,初步确定1号、2号轴承支撑刚度,见表1。

表1 1号和2号轴承支撑刚度 单位: N/m

项目	名称及数值	
支撑轴承	1号轴承	2号轴承
支撑刚度	2×10^6	2×10^6

在此刚度支撑条件下,飞轮的前两阶临界转速在飞轮的工作转速范围内。基于ANSYS Workbench分析软件对不同支撑刚度条件下储能飞轮转子的临界转速进行计算和分析。

1) 保持2号轴承支撑刚度 2×10^6 N/m不变,1号轴承支撑刚度从 0.1×10^6 N/m增大至 10×10^6 N/m,一阶、二阶、三阶临界转速变化如图3所示。

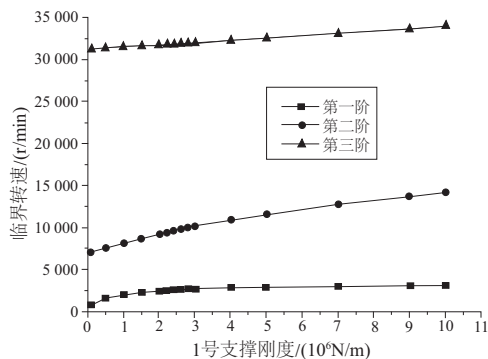


图3 前三阶临界转速随1号轴承支撑刚度的变化曲线

根据图3可以得到2号轴承支撑刚度不变的条件下,1号轴承支撑刚度在一定的刚度变化段内前三阶临界转速的变化率,如表2所示。

表2 1号轴承支撑刚度改变下前三阶临界转速变化率

临界转速 变化率/(%)	刚度范围/(10^6 N/m)		
	0.1~3	3~7	7~10
一阶	242.94	12.26	2.94
二阶	44.47	25.88	11.29
三阶	2.37	3.42	2.61

从图3和表2可以看出:

1号轴承支撑刚度从 0.1×10^6 N/m增大至 3×10^6 N/m时,第一阶临界转速变化242.94%;从 3×10^6 N/m增大至 7×10^6 N/m时,第一阶临界转速变化12.26%;从 7×10^6 N/m增大至 10×10^6 N/m时,第一阶临界转速变化比较小,仅仅变化2.94%。

1号轴承支撑刚度从 0.1×10^6 N/m增大至 3×10^6 N/m时,第二阶临界转速变化44.47%;从 3×10^6 N/m增大至 7×10^6 N/m时,第二阶临界转速变化25.88%;从 7×10^6 N/m增大至 10×10^6 N/m时,第二阶临界转速变化11.29%。

1号轴承支撑刚度从 0.1×10^6 N/m增大至 3×10^6 N/m时,第三阶临界转速变化2.37%;从 3×10^6 N/m增大至 7×10^6 N/m时,第三阶临界转速变化有所提高,变化3.42%;从 7×10^6 N/m增大至 10×10^6 N/m时,第三阶临界转速变化下降,变化2.61%。

2) 保持1号轴承支撑刚度 2×10^6 N/m不变,2号轴承支撑刚度从 0.1×10^6 N/m增大至 10×10^6 N/m,一阶、二阶、三阶临界转速变化如图4所示。

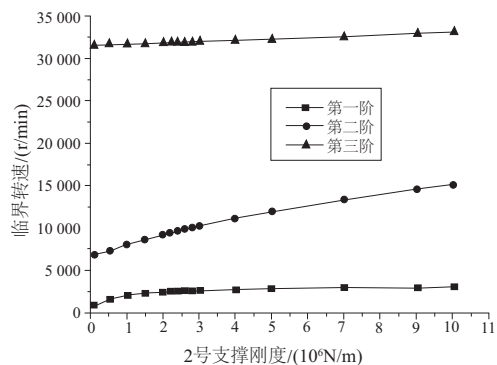


图4 前三阶临界转速随2号轴承支撑刚度的变化曲线

根据图4可以得到1号轴承支撑刚度不变的条件下,2号轴承支撑刚度在一定的刚度变化段内前三阶临界转速的变化率,如表3所示^[4]。

表3 2号轴承支撑刚度改变下前三阶临界转速变化率

临界转速 变化率/(%)	刚度范围/(10^6 N/m)		
	0.1~3	3~7	7~10
一阶	235.81	11.43	2.71
二阶	50.64	30.00	13.56
三阶	1.28	1.99	1.64

从图4和表3可以看出:

2号轴承支撑刚度从 0.1×10^6 N/m增大至 3×10^6 N/m

时,第一阶临界转速变化 235.81%,变化较大;从 3×10^6 N/m 增大至 7×10^6 N/m 时,第一阶临界转速变化 11.43%,下降非常明显;从 7×10^6 N/m 增大至 10×10^6 N/m 时,第一阶临界转速变化比较小,仅仅变化 2.71%。

2 号轴承支撑刚度从 0.1×10^6 N/m 增大至 3×10^6 N/m 时,第二阶临界转速变化 50.64%;从 3×10^6 N/m 增大至 7×10^6 N/m 时,第二阶临界转速变化 30.00%;从 7×10^6 N/m 增大至 10×10^6 N/m 时,第二阶临界转速变化 13.56%。

2 号轴承支撑刚度从 0.1×10^6 N/m 增大至 3×10^6 N/m 时,第三阶临界转速变化 1.28%;从 3×10^6 N/m 增大至 7×10^6 N/m 时,第三阶临界转速变化有所提高,变化 1.99%;从 7×10^6 N/m 增大至 10×10^6 N/m 时,第三阶临界转速变化下降,变化 1.64%。

3) 同时将 1 号、2 号轴承支撑刚度从 0.1×10^6 N/m 增大至 10×10^6 N/m,一阶、二阶、三阶临界转速变化如图 5 所示。

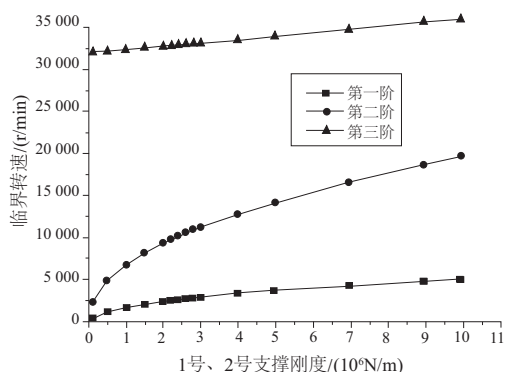


图 5 前三阶临界转速随 1 号、2 号轴承支撑刚度的变化曲线

根据图 5 可以得到同时增大 1 号、2 号轴承支撑刚度前三阶临界转速的变化率,如表 4 所示。

表 4 1 号、2 号轴承支撑刚度改变下前三阶临界转速变化率

临界转速 变化率/(%)	刚度范围/(10^6 N/m)		
	0.1~3	3~7	7~10
一阶	427.24	46.45	14.70
二阶	366.40	46.08	19.02
三阶	3.75	4.85	3.40

从图 5 和表 4 可以看出:

1 号、2 号轴承支撑刚度从 0.1×10^6 N/m 增大至 3×10^6 N/m 时,第一阶临界转速变化 427.24%,变化非常明显;从 3×10^6 N/m 增大至 7×10^6 N/m 时,第一阶临界转速变化

46.45%,下降非常明显;从 7×10^6 N/m 增大至 10×10^6 N/m 时,第一阶临界转速的变化率下降至 214.70%。

1 号、2 号轴承支撑刚度从 0.1×10^6 N/m 增大至 3×10^6 N/m 时,第二阶临界转速变化 366.40%,变化非常明显;从 3×10^6 N/m 增大至 7×10^6 N/m 时,第二阶临界转速变化 46.08%,下降非常明显;从 7×10^6 N/m 增大至 10×10^6 N/m 时,第二阶临界转速变化 19.02%。

1 号、2 号轴承支撑刚度从 0.1×10^6 N/m 增大至 3×10^6 N/m 时,第三阶临界转速变化 3.75%;从 3×10^6 N/m 增大至 7×10^6 N/m 时,第三阶临界转速变化有所提高,变化 4.85%;从 7×10^6 N/m 增大至 10×10^6 N/m 时,第三阶临界转速变化下降,变化 3.40%。

3 结语

本文建立柔性支撑的储能飞轮转子有限元模型,基于 ANSYS Workbench 分析软件对不同支撑刚度条件下储能飞轮转子的临界转速进行计算和分析。通过计算结果分析支撑刚度对储能飞轮转子的前三阶临界转速的影响,得出以下结论:

当调整第一阶、第二阶临界转速时,可以在支撑刚度为 0.1×10^6 N/m~ 3×10^6 N/m 时,调整 1 号轴承支撑刚度或 2 号轴承支撑刚度,或者同时调整 1 号、2 号轴承支撑刚度,同时调整时前两阶临界转速变化最大。虽然第三阶临界转速在刚度范围 3×10^6 N/m~ 7×10^6 N/m 变化相对其他范围段变化大,但是相差变化不大,因此考虑前两阶临界转速变化范围,同样可以在刚度范围 0.1×10^6 N/m~ 3×10^6 N/m 时对其进行调整,以获得理想的第三阶临界转速^[5]。同时,计算出的支撑刚度调整范围以及调整形式与储能飞轮转子的旋转试验所获得的结果吻合。

参考文献:

- [1] 文湘隆,曹操.磁悬浮飞轮转子的临界转速分析[J].机械制造,2011(4):34-37.
- [2] 刘健.转子-气体轴承系统振动特性的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
- [3] 刘静娜.飞轮储能系统电磁轴承-转子动力学特性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2014.
- [4] 方鹏,蒋科坚.采用电磁轴承控制柔性转子临界转速分布的建模和仿真分析[J].浙江理工大学学报,2014(5):221-227,34.
- [5] 邓旺群,聂卫健,何萍,等.高速柔性转子临界转速随支承刚度的变化规律[J].噪声与振动控制,2015(3):98-101.

收稿日期:2018-06-22