

裂纹对叶盘系统振动特性影响的研究

潘宏刚¹, 梁鑫¹, 张野², 王维东³

(1. 沈阳工程学院 能源与动力学院, 辽宁 沈阳 110136; 3. 中国电科科学技术研究院沈阳分院, 辽宁 沈阳 110102;
3. 中能建投(清原)新能源有限公司, 辽宁 抚顺 113300)

摘要:为减少叶盘系统故障, 针对存在裂纹叶盘系统振动特性展开研究。建立裂纹深度和位置分布不同的叶盘的结构模型, 利用有限元分析方法对其振动特性进行研究。结果表明: 裂纹使叶盘系统固有频率明显降低, 随着裂纹深度的增加, 基频降低的幅度增大; 相比于单个裂纹, 当叶盘结构含有两个裂纹时, 叶盘结构的二阶频率也会降低, 且当两个裂纹分布在相邻的叶片时, 其二阶频率降低的程度弱于其他分布情况。

关键词:叶盘系统; 裂纹深度; 裂纹分布; 振动特性; 模态分析

中图分类号: TK262, V215 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.03.010

[引用本文格式] 潘宏刚, 梁鑫, 张野, 等. 裂纹对叶盘系统振动特性影响的研究[J]. 热能动力工程, 2022, 37(3): 67-71. PAN Hong-gang, LIANG Xin, ZHANG Ye, et al. Study on the effect of crack on the vibration characteristics of bladed disk system[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(3): 67-71.

Study on the Effect of Crack on the Vibration Characteristics of Bladed Disk System

PAN Hong-gang¹, LIANG Xin¹, ZHANG Ye², WANG Wei-dong³

(1. School of Energy and Power, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang, China, Post Code: 110136;

2. China Guodian Science and Technology Research Institute, Shenyang Branch, Shenyang, China, Post Code: 110102;

3. CEEIC (Qingyuan) New Energy Co., Ltd., Fushun, China, Post Code: 113300)

Abstract: In order to reduce the failure of bladed disk system, the vibration characteristics of bladed disk system with crack was studied. The structural model of bladed disk with different crack depth and position distributions was established, and the vibration characteristics were studied by finite element analysis (FEA) method. The results show that the crack significantly reduces the natural frequency of the blade disk system, and the reduction amplitude of the fundamental frequency increases with the increase of the crack depth. Compared with a single crack, when the blade disk structure contains two cracks, the second-order frequency of the bladed disk structure will also be reduced. And when the two cracks are distributed in two adjacent blades, the degree of reduction of the second-order frequency is weaker than that of other distributions.

Key words: bladed disk system, crack depth, crack distribution, vibration characteristics, modal analysis

收稿日期: 2021-04-16; 修订日期: 2022-01-06

基金项目: 中国博士后科学基金(2019M661125); 辽宁省博士启动基金(20180540077); 辽宁省教育厅科学研究经费项目(JL-2003)

Fund-supported Project: China Postdoctoral Science Foundation(2019M661125); Doctoral Setup Fund of Liaoning Province(20180540077); Scientific Research Fund Project of Liaoning Provincial Department of Education(JL-2003)

作者简介: 潘宏刚(1982-), 男, 辽宁沈阳人, 沈阳工程学院副教授。

引 言

随着汽轮机与燃气轮机技术的发展,大容量机组优势日渐显现。由于其容量和转速的不断提升,对于其核心部件叶盘结构性能的要求也随之提高^[1]。由于叶盘系统工作条件恶劣,经常受交变机械应力和热应力等作用产生应力奇异,增加了叶盘系统对失谐的敏感程度,导致疲劳失效时有发生^[2-4]。通常情况下,疲劳故障表现为叶片出现疲劳裂纹,如果不及及时发现,裂纹在交变载荷的作用下扩展,严重时会引起灾难性的断裂事故^[5-6]。因此,对存在裂纹的叶盘结构振动特性进行研究很有必要^[7-8]。

近年来,很多学者对存在裂纹叶盘的振动特性进行了深入研究。Ewins^[9]通过对比叶盘失谐情况下叶片之间的微小变化,发现叶片会表现出显著不同的振动特性,疲劳寿命大大缩短。王维民等人^[10]通过建立有限元模型,分析了裂纹参数对汽轮机叶片振动特性的影响,发现随着裂纹的增大会使叶片发生频率转向等问题。Hou^[11]通过建立有贯穿裂纹的叶根模型,采用柔度矩阵法,对不同深度裂纹失谐系统叶盘的动态特性进行分析,发现有裂纹叶片的出现会导致其他无裂纹叶片的响应幅度显著增加。Hadjileontiadis^[12]对有裂纹的悬臂梁在简谐激励下的动力特性展开研究,结果表明,瞬时频率在开闭状态对应的频率之间振荡,揭示了裂纹的呼吸问题。Fang 等人^[13]通过对悬臂梁等效叶片的研究,得出了含有单个裂纹叶片的失谐叶盘结构的振动特性和耦合强度与失谐叶盘结构振动局部化程度的关系。

本文基于有限元建模方法,建立裂纹深度及分布不同的叶盘结构的有限元模型,揭示了静态和动态(3 000 r/min)下不同裂纹对叶盘系统振动特性的影响规律。并将其与现场实际振动数据相结合,为叶盘结构的故障诊断提供理论参考,从而达到提高生产效率、安全性以及可靠性的目的。

1 建立模型

叶盘系统主要由轮盘和叶片组成,是汽轮机以及燃气轮机等旋转设备的核心部件。叶盘系统理论上是一种循环周期结构,是由若干个相同子结构沿

着周向排列形成的轴对称结构,在运行过程中很容易发生裂纹现象。根据裂纹的几何特征,可将裂纹分为穿透裂纹、表面裂纹和深埋裂纹 3 种。表面裂纹为裂纹的初期表现形式,值得关注,本文即以表面裂纹为研究对象。

为了便于研究,适当简化叶盘系统,建立叶盘系统模型。设计轮盘轴孔直径为 200 mm、轮盘直径为 400 mm、厚度为 24 mm,在轮盘上均匀分布 12 个相同的叶片,叶片的厚度为 8 mm,长度为 120 mm,宽度为 25 mm,裂纹位置在距离叶轮边缘 20 mm 处。设置参数:泊松比为 0.3,弹性模量为 200 GPa,密度为 7 800 kg/m³,材料默认为 45 号钢。含裂纹叶盘系统模型及网格划分如图 1 所示。

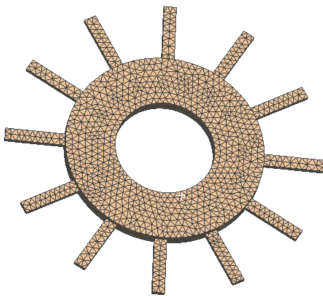


图 1 含裂纹叶盘系统模型及网格划分
Fig.1 Model and mesh division of bladed disk system with cracks

2 裂纹对叶盘系统振动特性影响

对叶盘结构内圈施加约束,分别计算谐调叶盘系统和裂纹叶盘系统前 6 阶振型及固有频率,对静态和动态进行模态分析,得出前 6 阶模态振型如图 2 所示。静态和动态固有频率如表 1 所示。对表 1 数据对比分析,如图 3 所示。

表 1 谐调叶盘与含裂纹叶盘系统静态与动态固有频率
Tab.1 Static and dynamic natural frequencies of tuned bladed disk and cracked bladed disk systems

阶次	静态固有频率/Hz		动态固有频率/Hz	
	谐调叶盘	裂纹叶盘	谐调叶盘	裂纹叶盘
1	420.68	410.66	428.68	418.66
2	420.94	410.86	428.94	428.86
3	421.35	419.06	429.35	429.06
4	422.4	419.94	430.4	429.94
5	422.6	420.55	430.6	430.55
6	424.5	422.74	433.5	432.74

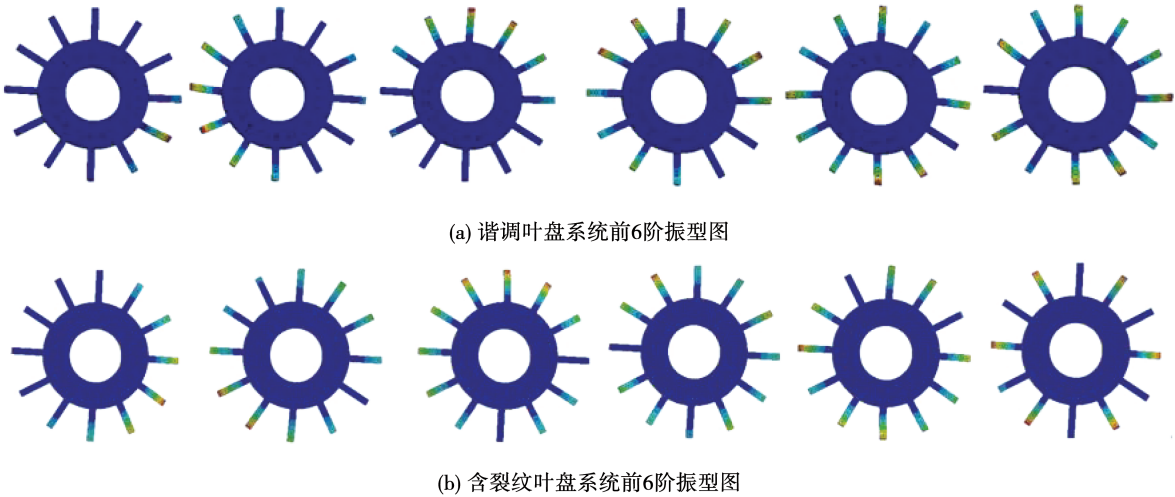


图 2 谐调叶盘与含裂纹叶盘系统前 6 阶振型图

Fig. 2 First six-order mode shapes of tuned bladed disk and cracked bladed disk systems

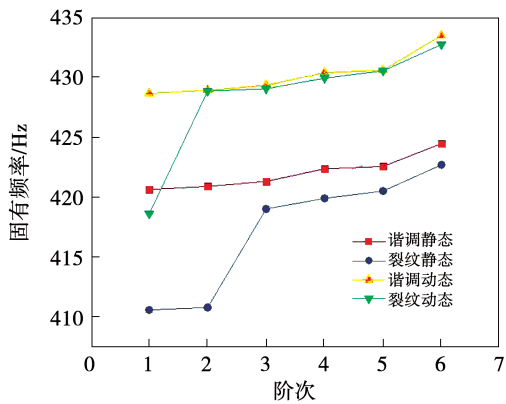


图 3 谐调叶盘与含裂纹叶盘系统固有频率数据对比

Fig. 3 Comparison of natural frequency data between tuned bladed disk and cracked bladed disk systems

从图 3 可以看出,叶盘系统的动态频率明显大于静态频率,谐调叶盘系统静态频率和动态频率随着阶次的增加基本呈线性变化。谐调叶盘与裂纹叶盘的前 6 阶固有频率存在多阶模态间频率接近但无交叉的情况,发生频率转向现象。无论是动态还是静态,叶盘结构的 1 阶频率下降得都比较明显,2 阶以上的频率变化不大。从整体看,裂纹对结构的基频影响比较大。由于裂纹的出现,结构的基频明显降低,但是随着阶次升高,由裂纹出现引起的不同工况下频率之间的差异也越来越小。

3 裂纹深度对叶盘系统振动特性影响分析

在上述建模位置,通过模拟裂纹深度进行研究,

设计裂纹深度分别为 2,5 和 8 mm,并对叶盘结构内圈施加约束,得出不同裂纹深度下静态固有频率如表 2 所示,不同裂纹深度下动态固有频率如表 3 所示,两者对比曲线如图 4 所示。

表 2 静态时不同裂纹深度下叶盘频率 (Hz)

Tab. 2 Frequencies of bladed disk with different crack depth in static state (Hz)

裂纹深度/mm	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶	6 阶
2	413.58	413.87	413.98	415.18	415.51	418.72
5	411.20	413.64	413.80	415.04	415.14	418.09
8	403.66	413.86	414.06	414.94	415.55	417.74

表 3 动态时不同裂纹深度下叶盘频率 (Hz)

Tab. 3 Frequencies of bladed disks with different crack depth in dynamic state (Hz)

裂纹深度/mm	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶	6 阶
2	426.60	426.82	428.83	431.06	433.70	426.60
5	425.01	426.65	428.22	430.58	432.47	425.01
8	418.30	426.90	428.04	430.24	432.16	428.30

根据图 4 可以看出,同样是叶盘系统,动态频率明显大于静态频率。在静态频率和动态频率两种工况下,除裂纹的出现会导致结构基频降低之外,裂纹深度的不同也会对叶盘结构的固有频率产生影响。当裂纹为 2 mm 时,其 1 阶频率下降得很小,而当裂

纹为 8 mm 时,1 阶频率下降最多。可见随着裂纹深度的增加,叶盘结构基频下降的程度也在增加。

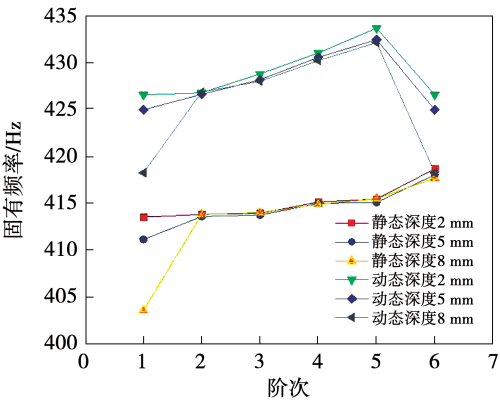


图 4 不同裂纹深度时在不同工况下的频率
Fig. 4 Frequencies of different crack depth under different working conditions

4 裂纹分布对叶盘系统振动特性影响分析

在实际情况中,叶盘上往往会出现两个甚至多个裂纹,而裂纹数量及分布的不同形式都会对叶盘结构的振动特性产生不同程度的影响。对叶盘结构含有两个裂纹时的振动特性进行研究,通过对比两个裂纹分布位置不同的情况,研究其振动特性变化规律。

由于裂纹为 8 mm 时得到的结果较为明显,分别建立含有两个 8 mm 裂纹,且裂纹分布位置相隔 30°,60°,90°,180° 4 种情况下的有限元模型,对其在静态和动态两种工况下叶盘结构的固有频率做进一步分析。在经过模态分析之后,得出不同裂纹位置分布静态固有频率如表 4 所示,不同裂纹位置分布时动态固有频率如表 5 所示,二者对比曲线如图 5 所示。

表 4 裂纹不同分布位置情况下叶盘的静态固有频率 (Hz)
Tab. 4 Static natural frequencies of bladed disks with different crack distribution locations (Hz)

裂纹分布	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶	6 阶
30°	403.17	406.92	413.85	414.22	415.26	416.32
60°	404.89	406.52	413.96	414.27	415.51	416.14
90°	404.96	405.50	413.72	414.59	415.46	416.00
180°	405.91	405.42	412.91	414.36	415.31	415.55

表 5 裂纹不同分布位置情况下叶盘的动态固有频率 (Hz)
Tab. 5 Dynamic natural frequencies of bladed disks with different crack distribution locations (Hz)

裂纹分布	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶	6 阶
30°	416.45	422.33	427.04	428.63	431.04	433.30
60°	418.01	419.95	427.14	428.95	431.42	433.84
90°	418.35	419.39	427.13	429.69	432.08	432.62
180°	418.51	419.12	427.91	428.65	432.01	432.37

通过图 5 可以看出,无论是静态还是动态情况下出现的裂纹,两个裂纹的出现同样会使叶盘结构的基频降低。相比于其他分布情况,当两个裂纹分布在相邻的叶片上时,叶盘结构的频率下降得最多;而当裂纹对称分布时,叶盘结构频率下降最不明显。由此可知,当裂纹出现时,会导致其附近不含裂纹叶片的固有频率发生变化,且越接近变化越大。且由数据可知,动态情况下影响更大。同时,相比于单个裂纹,当叶盘结构含有两个裂纹时,无论哪种工况、何种分布,叶盘结构的 2 阶频率都会降低。并且两个裂纹分布在相邻叶片时,其 2 阶频率降低的程度弱于其他分布情况。

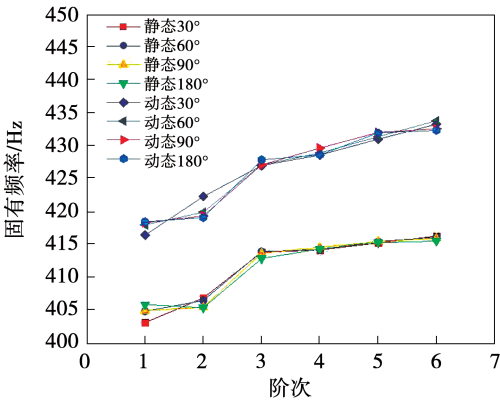


图 5 裂纹不同分布位置情况下各阶次固有频率
Fig. 5 Different order natural frequencies of bladed disks with different crack distribution locations (Hz)

5 结 论

(1) 叶盘系统的动态频率明显大于静态频率,谐调叶盘系统静态频率和动态频率随着阶次的增加基本呈线性变化。由于裂纹的出现,结构的基频明

显降低,但是随着阶次的升高,这种由裂纹的出现引起的不同工况下频率之间的差异也越来越小。

(2) 裂纹的出现会使叶盘结构基频降低,并且随着裂纹深度的增加,结构的基频进一步下降,8 mm 裂纹的叶盘结构频率降低得最多。随着裂纹深度的增加,叶盘结构的基频下降的程度也在增加。

(3) 相比于单个裂纹,当出现两个裂纹时,除了结构的基频降低之外,2 阶频率也有所降低。其中两个裂纹相隔 30° 时基频下降得最多。两个裂纹分布在相邻叶片时,其 2 阶频率降低的程度弱于其他分布情况。

参考文献:

[1] 黄 飞. 含裂纹叶片的失谐叶盘振动特性研究[D]. 长沙:中南大学,2010.
HUANG Fei. Research on vibration characteristics of mistuned bladed disk with cracked blade[D]. Changsha: Central South University,2010.

[2] 姚宗健,于桂兰. 失谐循环周期结构振动模式局部化问题的研究[J]. 科学技术与工程,2005,5(21):1617-1622.
YAO Zong-jian,YU Gui-lan. Study on vibration mode localization of detuned cyclic periodic structures[J]. Science Technology and Engineering,2005,5(21):1617-1622.

[3] 王艾伦,黄 飞. 裂纹叶片分布对失谐叶盘结构振动特性的影响[J]. 振动与冲击,2011,30(4):26-28,94.
WANG Ai-lun,HUANG Fei. Effect of cracked blade distribution on vibration characteristics of mistuned disk structure[J]. Shock & Vibration,2011,30(4):26-28,94.

[4] WALLS D P,DELANEUVILLE R E,CUNNINGHAM S E. Damage tolerance based life prediction in gas turbine engine blades under

vibratory high cycle fatigue[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power,1997,119:143-146.

[5] 徐可君,刘启洲. 裂纹叶片振动特性研究[J]. 航空动力学报,1997,12(2):129-132.
XU Ke-jun,LIU Qi-zhou. Study on vibration characteristics of cracked blade[J]. Journal of Aeronautical Dynamics,1997,12(2):129-132.

[6] MING C W,SHYH C H. On the vibration of a cracked rotating blade[J]. Shock & Vibration,1998,5(5/6):317-323.

[7] DIMAROGONAS A D. Vibration of cracked structures: a state of art review [J]. Engineering Fracture Mechanics,1996,55(1):831-857.

[8] WAUER J. Dynamics of cracked rotating blades[J]. Applied Mechanics Reviews,1991,44(1):273-278.

[9] EWINS D J. A study of resonance coincidence in bladed discs[J]. Archive Journal of Mechanical Engineering Science,1970,12(5):305-312.

[10] 屈 维,王维民,陈立芳,等. 裂纹参数对汽轮机叶片振动特性影响研究[J]. 北京化工大学学报,2016,43(1):78-85.
QU Wei,WANG Wei-min,CHEN Li-fang,et al. Effect of crack parameters on vibration characteristics of steam turbine blade[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology,2016,43(1):78-85.

[11] HOU F J. Cracking induce mistuning in bladed disk[J]. Journal AIAA,2006,44(1):68-73.

[12] HADJILEONTIADIS. Forced vibration behaviour and crack detection of cracked beams using instantaneous frequency[J]. NDT & E International,2005,38:411-419.

[13] FANG X,TANG J,JORDAN E,et al. Crack induce vibration localization in simplified bladed disk structures [J]. Journal of Sound and Vibration,2006,29,1(1):395-418.

(刘 颖 编辑)