

发动机篦齿-橡胶涂层碰摩转子振动特性实验研究*

马瑞贤¹, 马倩玲¹, 廖明夫¹, 王四季¹, 刘准¹, 李斌²

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072;
2. 中国航发商用航空发动机有限责任公司, 上海 200241)

摘要: 转静碰摩是航空发动机的多发故障, 其引起的转子振动特性受转静碰摩材料的影响。考虑了碰摩机匣的硫化橡胶软涂层, 实验研究了发动机增压级封严篦齿与封严机匣之间的渐进式碰摩, 分析了转静碰摩过程中的转速、振动位移波形、轴心轨迹和进动特征的变化规律。结果表明: 封严篦齿与橡胶涂层机匣的碰摩可分为四个阶段, 转子转速经过了掉转-超加速-波动恢复-过减速的过程, 振动位移波形在转速掉转阶段变化最明显, 轴心轨迹呈现稳定-不稳定-稳定的变化规律, 篦齿-橡胶软碰摩激起了转静子局部共振, 表现为正反进动的高阶超次谐波, 碰摩同时引起了对正反进动基频和低阶倍频的速率调制, 增压级转静碰摩对涡轮端振动的影响相对较弱。

关键词: 航空发动机; 软碰摩; 振动特征; 轴心轨迹; 进动分析

中图分类号: V231.9 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2023) 10-2211067-09

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2211067

Experimental Study on Vibrational Characteristics Induced by Rubbing Between Labyrinth and Rubber-Coating for Aero-Engine

MA Rui-xian¹, MA Qian-ling¹, LIAO Ming-fu¹, WANG Si-ji¹, LIU Zhun¹, LI Bin²

(1. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2. AECC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd, Shanghai 200241, China)

Abstract: Rotor-stator rubbing is common in aero-engines, and the induced rotor vibrational characteristics are affected by the rubbing materials. The soft coating made by vulcanized rubber is considered for rubbing case, followed by the experimental investigations on the kind of progressive rubbing between the seal-labyrinth and the seal-case of aero-engine booster. The rotating speed, vibrational displacement waveforms, shaft orbits and whirl features during the rubbing process are analyzed. In the results, four variation-phases are observed for the investigated rubbing, wherein the rotating speed experiences a period of uncontrolled-deceleration, super-acceleration, oscillating-recovery, and excessive-deceleration. The most significant changes of vibrational displacement waveform are captured in the uncontrolled-deceleration phase. The shaft orbit varies from stable to unstable, and recovers to be stable finally. High-order superharmonics (corresponding to the resonance of the rotor and stator), the modulations of the fundamental frequency and low-order harmonics of forward whirl and back-

* 收稿日期: 2022-11-23; 修订日期: 2023-03-19。

基金项目: 国家自然科学基金 (52205128); 国家科技重大专项 (2017-IV-0001-0038; 2021-IV-0005-0072)。

通讯作者: 马瑞贤, 博士, 副教授, 研究领域为旋转动力机械转子动力学与减振降噪。E-mail: maruixian@nwpu.edu.cn

引用格式: 马瑞贤, 马倩玲, 廖明夫, 等. 发动机篦齿-橡胶涂层碰摩转子振动特性实验研究[J]. 推进技术, 2023, 44(10): 2211067. (MA Rui-xian, MA Qian-ling, LIAO Ming-fu, et al. Experimental Study on Vibrational Characteristics Induced by Rubbing Between Labyrinth and Rubber-Coating for Aero-Engine [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2023, 44(10): 2211067.)

ward whirl are excited by the soft rubbing. The vibrations at the turbine end are slightly impacted by the rubbing at the booster end.

Key words: Aero-engine; Soft-rubbing; Vibrational characteristics; Shaft orbit; Whirl analysis

1 引言

转静碰摩是航空发动机的典型故障,其引发转子振动过大甚至失稳、静子机匣耦合共振和叶片断裂等诸多问题,严重威胁发动机可靠性^[1]。尤其是现代航空发动机追求高推重比和低油耗,使转静间隙愈发小,转静碰摩发生概率更高,碰摩潜在危害更大。

揭示转静碰摩所导致的转子振动特征对准确判断及排除碰摩故障具有重要意义,国内外学者对此开展了深入研究,包括碰摩动力学建模^[2-4]、转子振动特性仿真^[5-7]与实验测量^[8]等。碰摩转子的振动特性呈现多样性,在振动频谱特征方面,Muszynska^[9]指出转静碰摩会导致转子振动出现 $1X/n$ 的低频和高分成分;Chu等^[10]的研究进一步表明转子碰摩也能激起 $nX/2$ 和 $nX/3$ 的分数倍频;Ma等^[8,11]的仿真结果表明,在1阶临界转速以下,转子碰摩主要产生高倍频振动,而高于1阶临界转速时,还会出现间断、不可公约的低频振动成分;侯理臻等^[12]对稳态碰摩信号的进动分析表明,碰摩进动特征包括正反进动超次谐波,其中以 $3/2$ 倍频最明显;李岩等^[13]通过仿真和实验观察到,碰摩可激起转子的反进动固有频率。在转子振动幅值方面,武新华等^[14]的研究结果表明,转子转速低于1阶临界转速时,碰摩后转子振幅较碰摩前小,而碰摩发生在1阶临界转速以上时,转子振幅会变大。在转子稳定性方面,数值仿真结果表明,碰摩会导致转子发生反向涡动^[15]、分叉^[16]和混沌^[17]等复杂运动。

为了减轻碰摩的危害,实际发动机篦齿或叶片的封严机匣一般敷设可磨损耐磨涂层。涂层的可侵入性^[18-19]和可磨损性^[20-22]、以及碰摩产生的热效应和黏结作用^[23-25],均影响转静子的振动特性(如上述文献中的叶片、机匣及二者耦合振动);文献^[26]分析了涂层硬度对碰摩转子振动的影响,发现软涂层易导致转子的周期运动,而硬涂层则导致拟周期运动。由此可见,为了更精确反映涂层对转静碰摩振动特性的影响,需在碰摩过程模拟和实验中进一步考虑耐磨涂层的作用。

国外先进大涵道比发动机 Leap 系列和 CFM56 系列在增压级密封处均采用了篦齿-流道板式密封,在

机匣内圈敷设了硫化橡胶封严涂层,该涂层柔性大,具有对密封流场自适应变形的特点,从而提高密封效率。同时,橡胶涂层具有可磨损、高温可融化的特点。然而,针对这种软材质密封的转静碰摩振动特性研究尚很少。本文设计了低压转子增压级篦齿-橡胶涂层碰摩实验器,开展了径向碰摩实验,测量了转子在升转速碰摩过程中的振动位移,分析了橡胶软碰摩引起的轴心轨迹、进动等振动特征。

2 实验系统

2.1 实验器总体结构

低压转子实验器总体结构示意图如图1所示,主要由转子系统、静子系统和驱动电机组成。转子系统采用“0-2-1”支承方案,1号轴承为滚棒轴承,2号轴承为滚珠轴承,二者内环过盈安装于风扇轴上,5号轴承为滚棒轴承,安装于涡轮盘后的轴上,在1号轴承和5号轴承处均采用了鼠笼式弹性支承和挤压油膜阻尼器。转子包括风扇盘、增压级鼓筒、风扇轴、涡轮轴、涡轮盘等,实验器增压级转子为薄壁鼓筒结构,与风扇盘过盈装配,鼓筒上加工两级封严篦齿。静子部分主要包括前/后支座、弹性支承、挤压油膜阻尼器和增压级机匣,其中与篦齿对应的机匣内部设有硫化橡胶涂层。驱动电机为永磁同步电机,最大功率220kW,最高转速20kr/min。转子主要部件的特征尺寸如表1所示。

如图1中所示,实验中分别在增压级鼓筒和涡轮盘的位置布置水平和竖直两个方向的涡流位移传感器,用于测量转子振动位移,传感器频率响应为0~2600Hz,灵敏度为 $8\text{mV}/\mu\text{m}$,量程为1.5mm。

2.2 转静碰摩结构

增压级鼓筒篦齿和机匣碰摩部分的局部放大图如图1红色虚线框中所示。篦齿高度8mm,封严环内环敷设2mm厚、21mm宽的硫化橡胶涂层,转静碰摩结构实物如图2所示。

实验中,通过沿竖直(重力)方向调整增压级篦齿碰摩机匣的安装偏心量来调节转静间隙。在给定的篦齿与机匣涂层之间偏心间隙和风扇盘不平衡配重下,通过升高转子转速、增大鼓筒的不平衡响应实现转静子碰摩。实验分为机匣对中状态下的转子振动测量和机匣偏心状态下的碰摩转子振动测量两部

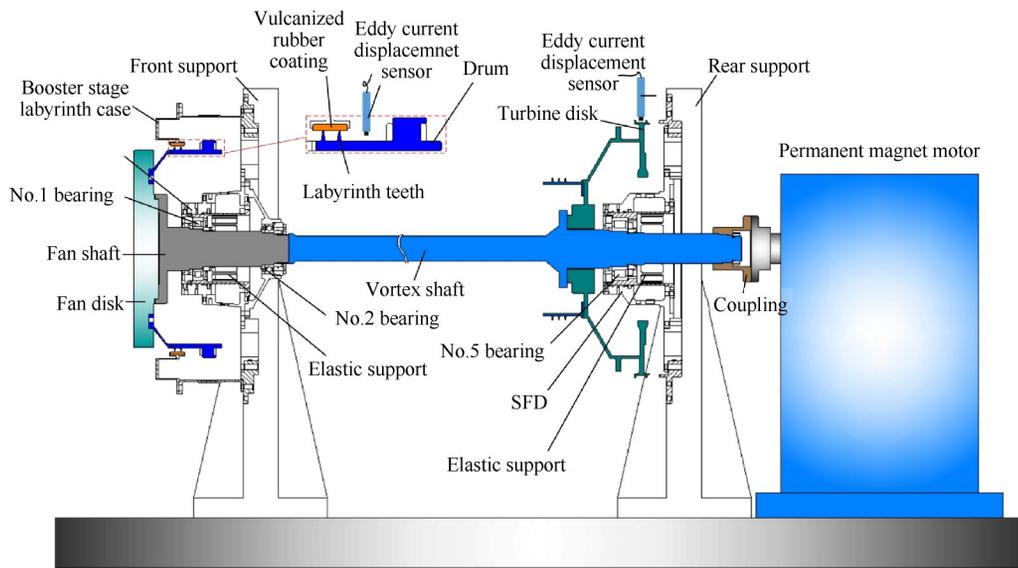


Fig. 1 Schematic diagram of test rig

Table 1 Main characteristic dimensions of rotor system

Component	Inner diameter/mm	Outer diameter/mm	Length/mm
Fan disk	60	396	50
Booster drum	382	398	138
Fan shaft	47	71	262
Turbine shaft	0	50	1772
Turbine disk	289	507.8	20

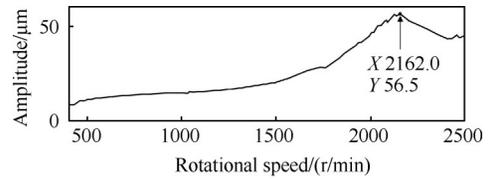


Fig. 3 Curve of vibration amplitude versus rotating speed

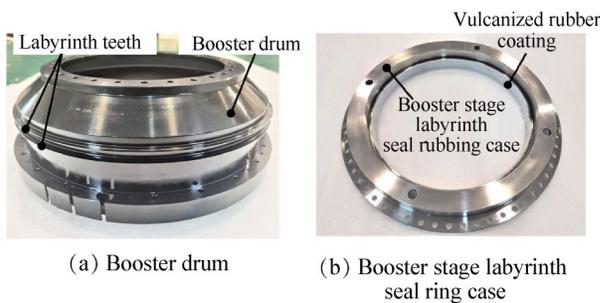


Fig. 2 Photos of rotor and stator for rubbing

分,前者获得转子振动的基准状态,便于后续与转静碰摩状态进行对比。

3 实验结果与分析

3.1 趋势分析

图3给出了机匣对中状态下转子振动位移幅值随转速的变化曲线。可以看到,转子振动位移有明显的先增大后降低的过程,振幅在2162r/min附近达到最大,该转速与仿真得到的转子一阶临界转速基本一致,为转子的实测一阶临界转速。

转静子径向碰摩对转子产生与旋转方向相反的扭矩,易引起转子转速的波动。对于本文研究的篦

齿与硫化橡胶涂层碰摩,为了说明碰摩对转子转速的影响,图4对比了碰摩工况和基准工况(未碰摩)的转速曲线,图中黑色实线为碰摩工况的实测转速,蓝色虚线为未碰摩时的转速(即预设转速)。其中,预设转速在升速阶段以台阶形式将转速逐渐升至2400r/min后,随即降速至停机,转子升速率和降速率均为10r/s。从图4(a)中可以看到,对于碰摩工况,在转子过临界转速的过程中(红色圆形标记),转速出现了与预设转速曲线的偏离,存在突降、突升和波动。该转速波动阶段的局部放大图如图4(b)所示,整个转速波动过程大致分为4个阶段:阶段I,当转子转速到达2121r/min后,转速不升反快速降至2031r/min;阶段II,转速快速升高,其升速率约为原始设定升速率的13倍,最终转速最高到达2381r/min;阶段III,转速先下降,后基本按照预设升速率升转速,如图中红色虚线所示;阶段IV,电机接收减速停机指令,转速呈波动下降趋势,但降速率约为预设值的3.5倍,当转速降低至2000r/min附近时,转子降速率恢复至预设值。

上述转速波动过程是作用于转子的碰摩反向扭矩与电机拖动力矩延迟相耦合的结果,具体分析为:在阶段I,篦齿与橡胶涂层摩擦对转子产生了大反

扭矩,超过了电机按照预设升速率对转子作用的拖动力矩,因此出现了“掉转”现象,由于碰摩持续作用,转速最低降低至2031r/min。在阶段Ⅱ,电机控制回路监测到转速下降后,会增大扭矩以使转子保持预设升速率;同时转静摩擦产生的热量积累到一定程度后,转静接触部位的橡胶涂层在高温下熔化,减弱了篦齿对橡胶涂层的侵入,从而减小了碰摩作用于转子的反向扭矩;正反扭矩的相对变化使转子受到的实际净拖动扭矩远大于预设升速率所需的扭矩,因此造成了转子的“超转”,从2031r/min快速升高至2381r/min。在阶段Ⅲ,电机控制系统调整升速率至预设值,但由于控制扭矩、转速和反馈之间的延迟和动态调节,导致仍存在一定的转速波动。在阶段Ⅳ,电机进入减速停机阶段,电机给转子施加反向扭矩,同时由于篦齿与橡胶涂层之间仍存在摩擦,增大了反向扭矩,使转子减速率高于预设值。当篦齿与涂层完全脱离后,转子减速率回归到预设值,如图4(a)所示。

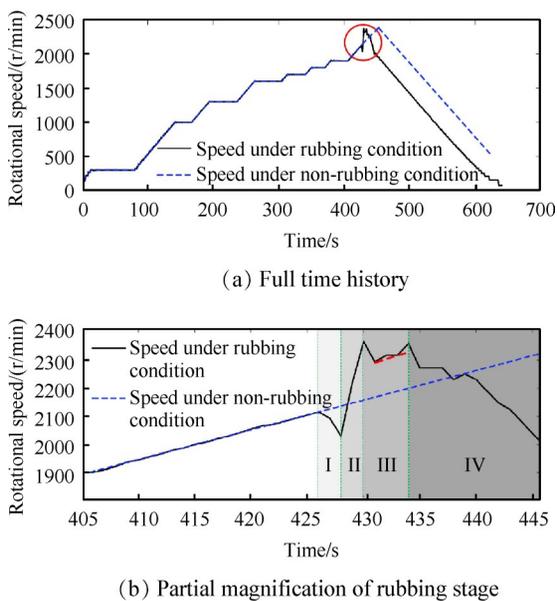


Fig. 4 Rotating speed curve

可见,篦齿与硫化橡胶涂层封严的碰摩对转子转速产生了显著影响,引起剧烈的转速波动。鉴于航空发动机采用了燃气驱动,较同步电机驱动具有更长的响应延迟时间,可推测若发动机产生此类碰摩,亦会出现类似的转速不稳定现象。

对于转子振动,图5(a),5(b)分别给出了鼓筒在篦齿碰摩过程中水平位移和竖直位移的时间波形。可以看到,在碰摩最严重的阶段Ⅰ,鼓筒的振动位移发生了显著变化:振动峰值有所减小,同时振幅关于

零值的对称性被破坏,尤其在竖直方向较明显,这是由于机匣偏心的调节方向是沿竖直向下,使碰摩对转子沿竖直向上的振动产生限幅作用;在碰摩阶段Ⅰ的后半程,转子振动位移的时变性较强,同时振幅关于零值的对称性逐渐得以恢复,这是由于橡胶涂层在摩擦高温作用下逐渐熔化,涂层对转子的限幅作用逐渐减弱,如图5(b)所示。进入碰摩阶段Ⅱ后,随着篦齿与橡胶涂层摩擦作用的减弱,转子篦齿处的振动位移恢复周期性运动;在碰摩阶段Ⅱ与阶段Ⅲ之间,由于电机扭矩变化,对转子产生了一定的冲击,可观察到几个周期内的振动位移信号出现突增;在碰摩阶段Ⅲ,转子振动较稳定,反映了篦齿与橡胶涂层摩擦作用小。

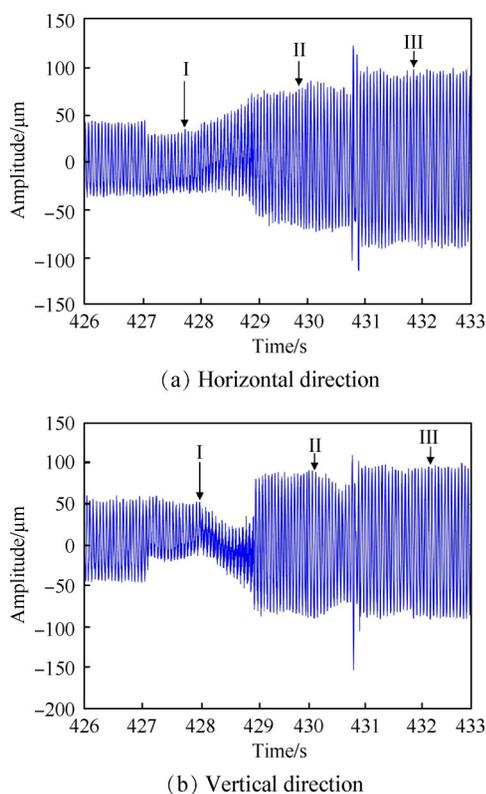


Fig. 5 Time waveforms of drum displacement during rubbing

为了进一步说明增压级篦齿-橡胶涂层碰摩对转子不同部位振动的影响,图6给出了碰摩过程中涡轮盘振动位移的时间波形。在碰摩阶段Ⅰ,涡轮盘的振动信号未观察到明显变化,除幅值随着转速升高有所增大外,整体较为稳定;在阶段Ⅱ后半程中振幅有所减小,这主要由转子越过临界转速后振动自然衰减所引起,并非碰摩现象。以上结果表明,与靠近碰摩位置的鼓筒相比,碰摩位置远端的振动位移时域信号中,碰摩特征不明显。

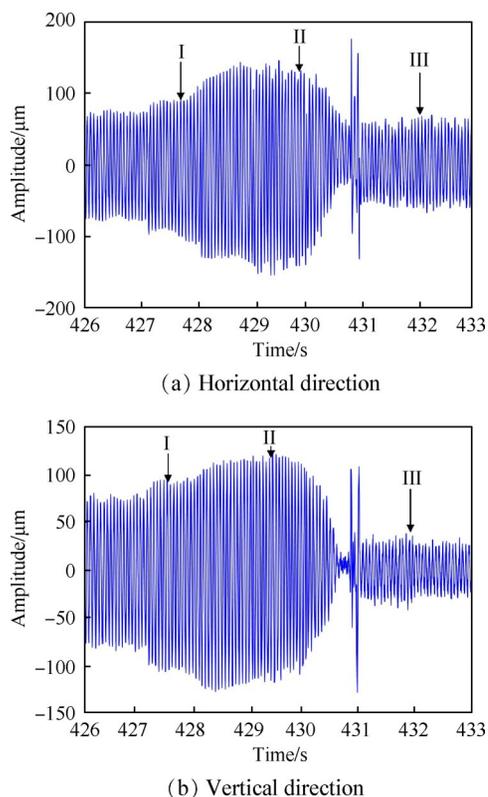


Fig. 6 Time waveforms of turbine displacement during rubbing

3.2 轴心轨迹分析

为了便于后续对比碰摩时的轴心轨迹特征,图7(a)给出了未碰摩工况 2000~2300r/min 转速范围内,鼓筒轴心轨迹的变化过程。采样点数为 16 个旋转周期,为了使轨迹更为清晰,每周期取三分之一的数据点予以显示。从图 7(a)中可以看出,鼓筒在未碰摩时轴心轨迹重复性较好,稳定规则,在不同转速下的轴心涡动轨迹变化不大。对于涡轮盘,如图 7(b)所示,虽然其轴心轨迹始终较为稳定,但在过临界转速过程中,其涡动轨迹有所改变:在临界转速之前接近于圆形,而在过临界之后呈现椭圆形。

作为对比,图 8(a)给出了鼓筒在篦齿碰摩过程中的轴心轨迹,图例中各转速从上至下依次对应于图 4 碰摩过程中的各个转速。可以看出,在碰摩之前(2121r/min),鼓筒的轴心轨迹与未碰摩工况基本一致;在碰摩导致转速掉转之后(2098r/min,阶段 I),鼓筒轴心轨迹出现振荡不稳定,同时竖直振动关于零轴明显不对称,与该碰摩阶段振动波形不对称的特征吻合;篦齿与橡胶涂层继续摩擦,转速掉转至 2031r/min 时,鼓筒轴心轨迹呈现无规则混乱状态;进入碰摩超转阶段 II 和阶段 III 后(2228, 2305, 2329r/min),篦齿与橡胶涂层摩擦减弱,鼓筒轴心轨迹逐渐恢复

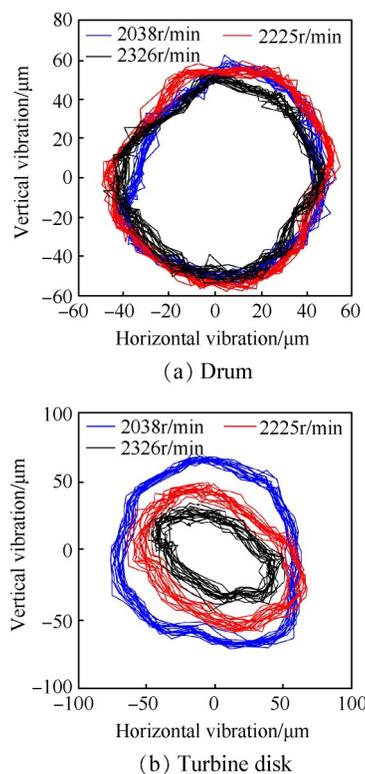


Fig. 7 Rotor orbit without rubbing

稳定。由此可见,在篦齿与橡胶涂层碰摩的过程中,鼓筒轴心轨迹经历了由稳定-不稳定-稳定的过程。

图 8(b)给出了涡轮盘在篦齿碰摩过程中的轴心轨迹,图中各转速与图 8(a)保持一致。可以看出,碰摩过程涡轮盘的轴心轨迹始终较为稳定,且关于零轴的对称性保持较好。从低于临界转速的 2098r/min 和 2031r/min 中,可以看到涡轮盘的涡动轨迹接近于圆形;在临界转速的前、后(分别为 2121r/min 和 2228r/min),轴心轨迹逐渐转变为椭圆,椭圆的长轴也发生相位变化;在越过临界转速的碰摩阶段 III,涡轮盘的轴心轨迹具有明显的椭圆特征,其长轴接近为水平轴,即过临界后涡轮盘的振动相位发生了转变。涡轮盘轴心轨迹在该过临界过程的变化趋势与图 7 未碰摩工况整体较类似。进一步反映了增压级篦齿-橡胶涂层碰摩对转子远端的影响较小。

3.3 转子进动分析

图 9 给出了未碰摩工况 2000~2300r/min 内,鼓筒的进动阶次-幅值特性,图中横轴为进动阶次,纵轴为进动幅值。红色、蓝色曲线分别表示反进动和正进动。可以看出,对于未碰摩工况,鼓筒在过一阶临界转速前后的涡动成分为转频的整数倍频,其中以 1X 正进动为主,反进动-1X, -2X 成分的振动幅值均小于对应的正进动成分。

图 10 给出了涡轮盘在过临界过程中的进动阶

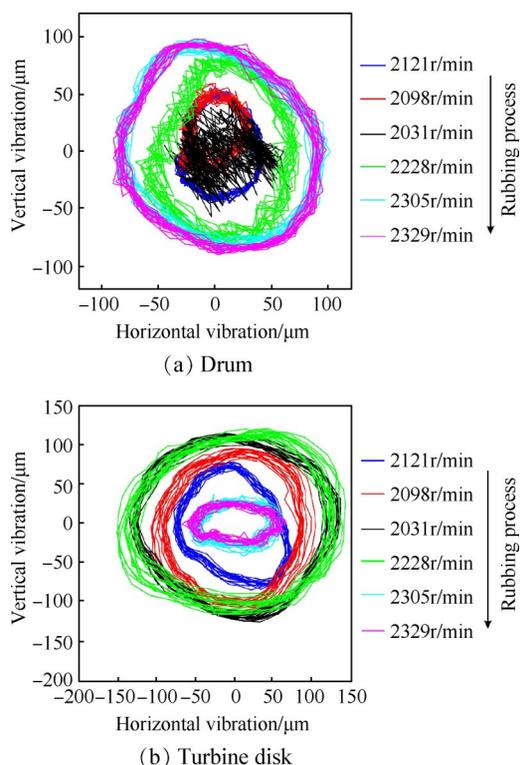


Fig. 8 Rotor orbit during rubbing

次-幅值特性。可以看出,涡轮盘的进动也以 1 倍频正进动为主,但是在过一阶临界转速后(图 10(b)、10(c)),1 倍频正进动幅值降低,而 1 倍频反进动成分的振幅升高。同时,可以注意到除了整数倍频外,涡轮盘进动还存在超次谐频成分,如图 10(b)中的 $\pm 1.75X$

成分和图 10(c)中的 $\pm 1.69X$ 成分,其特征为:相对应的正反进动振幅基本相等。这些频率来源于始终存在的一个约为 67.23Hz 的定频成分(如图 11(a)涡轮盘振动瀑布图中所示),该定频是涡流位移传感器支架的固有频率。此处需要说明的是,在碰摩实验中也可捕捉到该定频成分的振动,故由以上结果可在后续的分析中排除碰摩的影响。与此同时,在图 11(b)鼓筒处测点的振动瀑布图中,不存在该定频成分,进一步说明了该频率为涡轮端局部共振。

对于篦齿与橡胶涂层碰摩的工况,图 12(a)~(f)给出了鼓筒在篦齿碰摩过程中各转速下的进动阶次谱图,图中转速与图 8(a)和 8(b)完全对应。可以看出,在碰摩掉转速阶段 I 之前(图 12(a)),鼓筒的进动成分与未碰摩工况相同,以基频的低阶整数倍频为主。在进入转子掉转速阶段的图 12(b)中,在碰摩作用下转子产生了 21.4X 的超谐波正进动成分,同时出现 -21.4X 和 -27.34X 的反进动成分。随着碰摩作用加剧,如图 12(c)所示,出现了更多高阶超次谐频的正、反进动成分,同时这些成分振幅增大,如进动成分 $\pm 14.33X$, $\pm 22.27X$ 和 -28X,在转子超加速阶段的图 12(d)中,高阶进动仅存在 $\pm 13.2X$ 成分,经三维有限元仿真,在上述高频成分中, $\pm 13.2X$, $\pm 14.33X$ 与鼓筒二节径固有频率 500Hz 基本一致, $\pm 21.4X$, $\pm 22.27X$ 与篦齿封严环局部模态固有频率 735Hz 相近,而

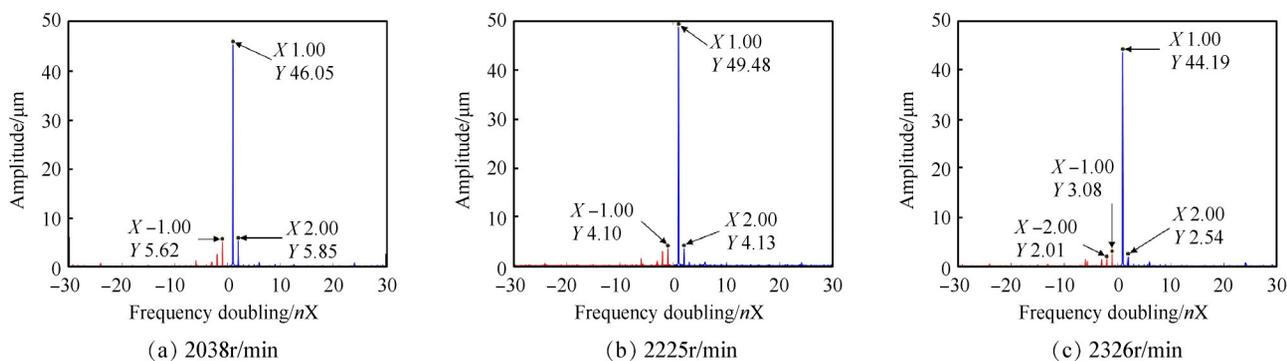


Fig. 9 Whirl order analysis of the drum without rubbing

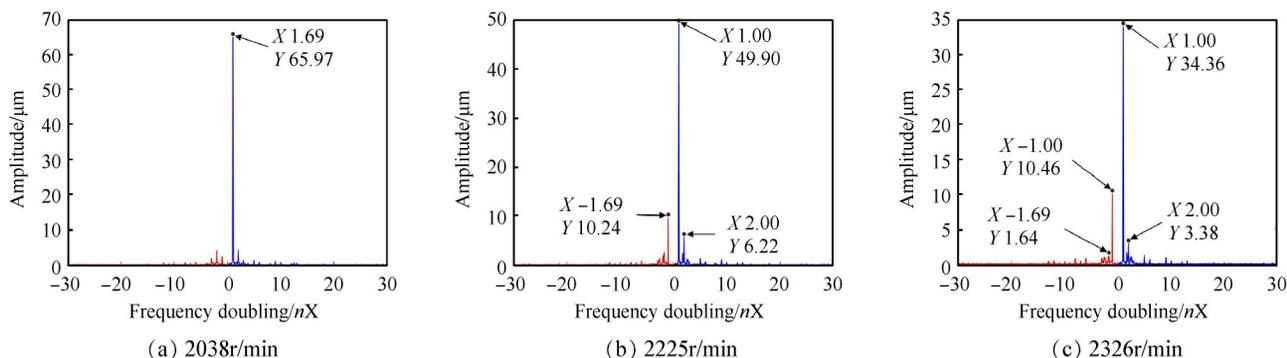


Fig. 10 Whirl order analysis of the turbine disk without rubbing

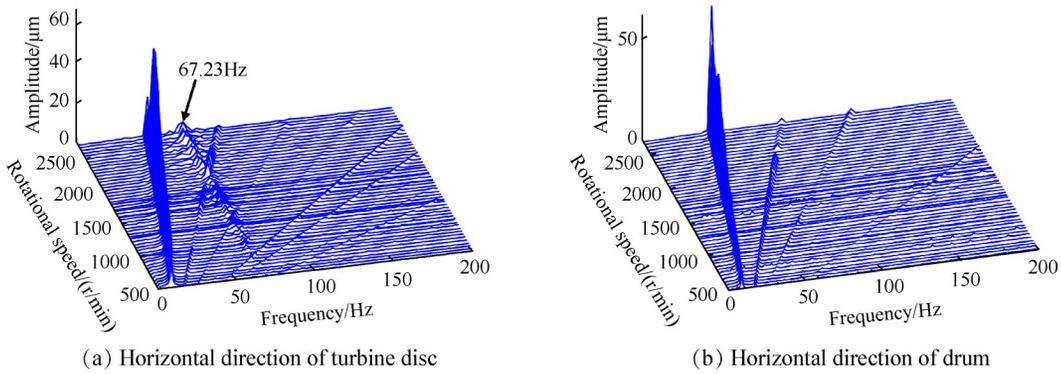


Fig. 11 Vibrational waterfall of the turbine disk and drum without rubbing

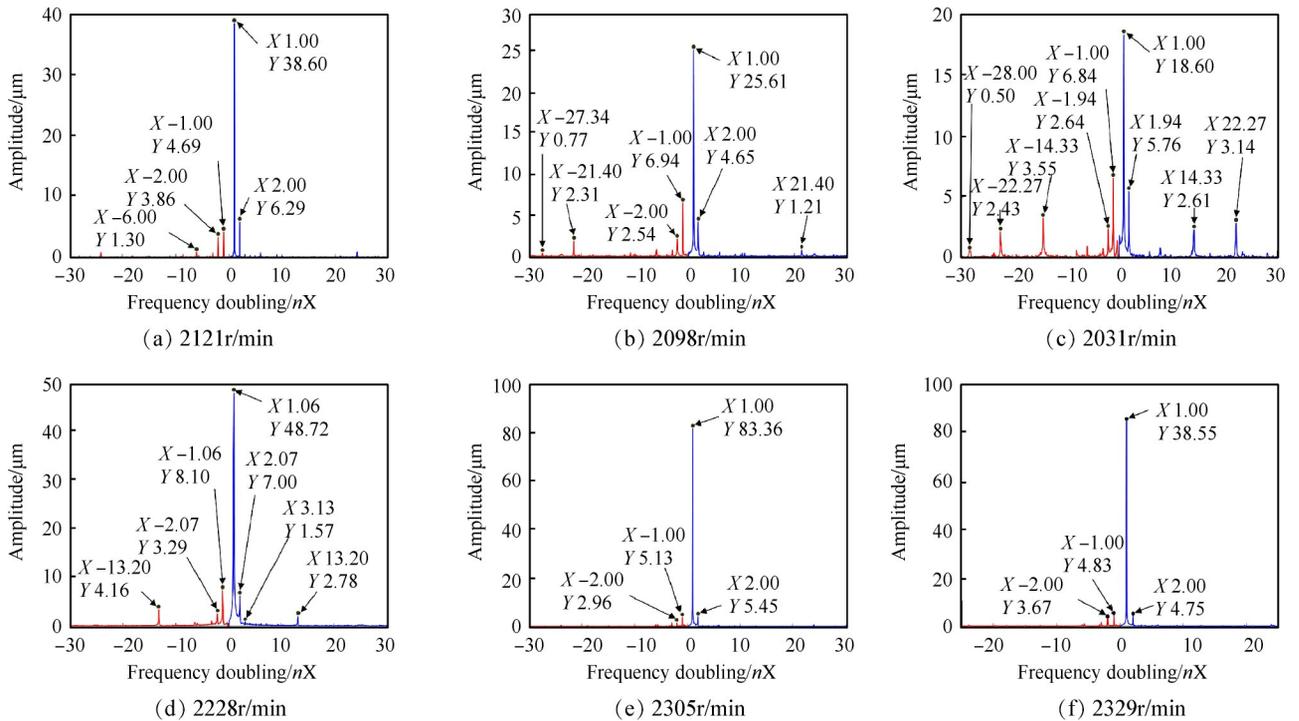


Fig. 12 Whirl order analysis of the drum during rubbing

-27.34X, -28X 与篦齿封严环机匣三节径固有频率 930Hz 基本一致,可见,篦齿与橡胶涂层碰摩导致了转静子耦合振动,产生了机匣与鼓筒的共振;另一方面,基频正进动幅值继续降低;此外,由于碰摩导致的频率调制,使 $\pm 2X$ 进动分别变为了超次谐频 $\pm 1.94X$ 成分,如图 12(c)及其局部细化图 13 所示。碰摩进入转速超转阶段 II 后(图 12(d)),可捕捉到 $\pm 13.20X$ 的正反进动超次谐频,正反进动基频和 2 倍频均受到碰摩的调制,分别变为 $\pm 1.06X$ 和 $\pm 2.07X$ 。随着篦齿与橡胶涂层逐渐脱离,基频幅值变大,同时进动成分中的超次谐频成分消失,恢复为整数倍频成分,如图 12(e)和 12(f)所示。

为了对比分析碰摩位置远端的转子进动特征,图 14 给出了涡轮盘在增压级鼓筒篦齿与橡胶涂层碰

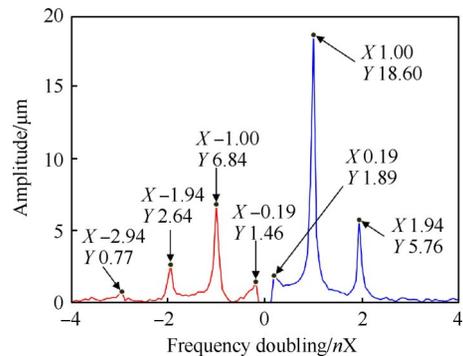


Fig. 13 Whirl order analysis of the drum during rubbing (2031r/min)

摩过程中的进动阶次变化。可以看到,在碰摩超转速阶段 II 之前(图 14(a)~(c)),涡轮盘的进动均以 1X 正进动为主,而其它进动成分的幅值很小,且均为整数低倍频。而在超转速阶段,从图 14(d)中也可观察

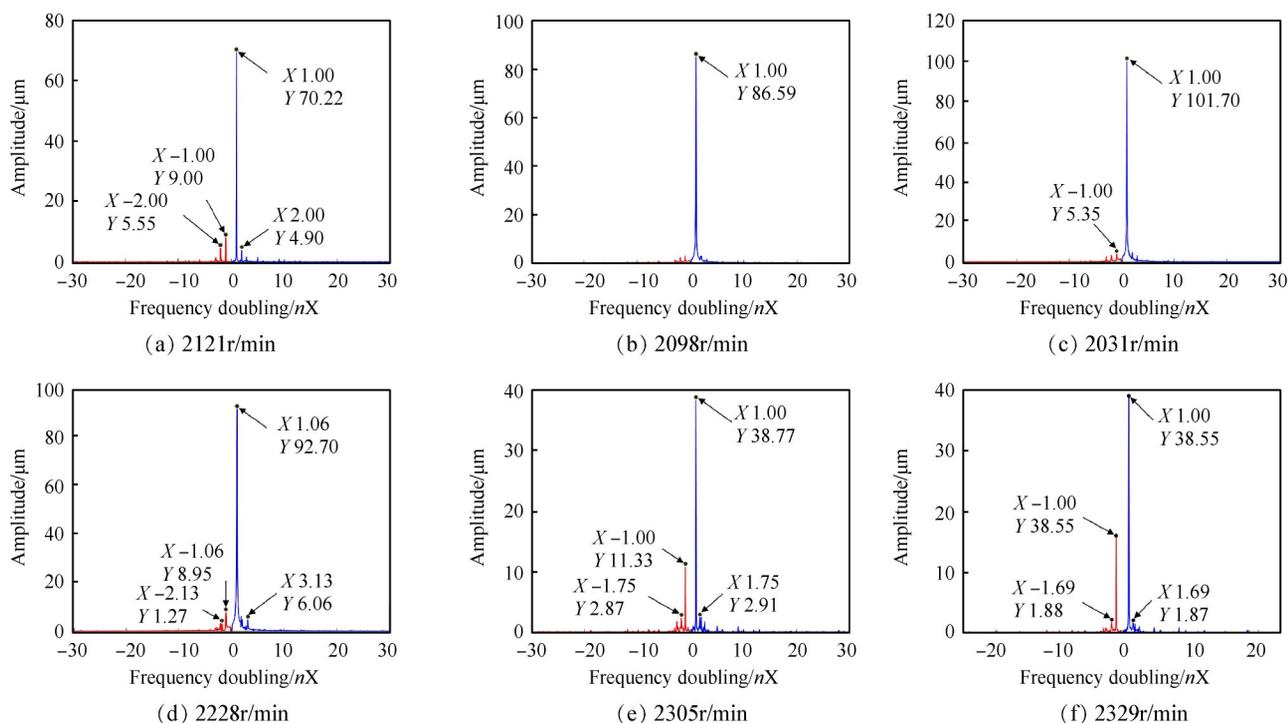


Fig. 14 Whirl order analysis of the turbine disk during rubbing

到类似于鼓筒处的频率调制现象,包括 $\pm 1.06X$ 和 $\pm 2.13X$ 成分,但未捕捉到高阶超次谐频成分。转子越过超转阶段后,转子进动成分恢复为基频及其整数倍频,如图14(e)和14(f)所示,图中 $-2.13X$, $3.13X$, $\pm 1.75X$ 和 $\pm 1.69X$ 等成分来源于图11中的定频。

4 结论

本文通过研究,得到如下结论:

(1) 封严篦齿与橡胶涂层软碰摩时,在碰摩反向扭矩与电机拖动力矩控制延迟的综合作用下,转速发生明显波动,经过了掉转-超加速-波动恢复-过减速的4个阶段;实际发动机采用燃气驱动,扭矩控制系统的滞后更大,由此导致的转速波动应更明显。

(2) 增压级鼓筒的振动位移波形和轴心轨迹在碰摩掉转速阶段变化最明显:波形和轴心轨迹关于零值的对称性被破坏后,又逐渐恢复对称;轴心轨迹经过了稳定-不稳定-稳定的过程。

(3) 在碰摩掉转速阶段和碰摩超加速阶段,转子进动 $\pm 1X$ 和 $\pm 2X$ 等低阶倍频受到频率调制作用。同时出现了 $\pm 14.33X$, $\pm 22.27X$ 和等阶超次谐频成分,是与机匣、鼓筒结构参数相关的转静子共振频率。

(4) 增压级篦齿-橡胶软碰摩对转子远端涡轮振动的影响相对较小,其振动信号无法完全反映篦齿碰摩的4个阶段。

本文获得的篦齿-橡胶涂层碰摩作用下的转子

振动特征,可为识别篦齿-橡胶软碰摩类振动故障提供参考。橡胶涂层在碰摩过程中可熔化的特性应对上述振动现象的出现起到重要作用,针对橡胶涂层碰摩,后续将从以下三个方面开展研究:一是限于条件限制,本文未对橡胶涂层本体的变化过程进行监测,后续可设计相应的碰摩可视化实验器开展测试;二是由于橡胶的可熔化特性,使碰摩后橡胶涂层与篦齿间隙急剧增大,难以产生二次碰摩,因此本文未对碰摩量对振动特性的影响进行测量,后续可加工多个橡胶涂层碰摩机匣,从定性定量角度研究不同碰摩严重程度下的转子振动特征;三是建立橡胶碰摩迟滞模型,进行仿真与试验对比分析,为橡胶涂层优化设计提供理论支撑。

致谢:感谢国家自然科学基金和国家科技重大专项的资助;感谢杨伸记老师对实验测试给予的建议;感谢王俨凯老师对数据分析给予的帮助;感谢黄江博、王瑞、李杰同学在实验过程中给予的协助。

参考文献

- [1] 王四季, 廖明夫, 蒋云帆, 等. 对转双转子局部碰摩故障实验[J]. 推进技术, 2013, 34(1): 31-36. (WANG Si-ji, LIAO Ming-fu, JIANG Yun-fan, et al. Experimental Study on Local Rub-Impact Fault of Counter-Rotating Dual-Rotor[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2013, 34(1): 31-36.)
- [2] Yu P, Zhang D, Ma Y, et al. Dynamic Modeling and Vi-

- bration Characteristics Analysis of the Aero-Engine Dual-Rotor System with Fan Blade Out[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 106: 158-175.
- [3] 曾振坤, 张大义, 范雨, 等. 碰摩引发的增压级转静耦合振动特性分析方法[J]. *航空动力学报*, 2022, 37(10): 2233-2241.
- [4] 王海飞, 陈果. 考虑多叶片-机匣多点变形转静碰摩模型的机匣响应特征与验证[J]. *推进技术*, 2016, 37(1): 128-145. (WANG Hai-fei, CHEN Guo. Casing Response Characteristics and Its Verification Considering Multiple Blades-Casing Multiple Point Deformation Rotor-Stator Rubbing Model[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(1): 128-145.)
- [5] 袁惠群, 贺威, 韩清凯. 发动机双转子-机匣耦合系统碰摩故障分析[J]. *航空动力学报*, 2011, 26(11): 2401-2408.
- [6] Sun C, Chen Yu, Hou L. Steady-State Response Characteristics of a Dual-Rotor System Induced by Rub-Impact[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2016, 86: 91-105.
- [7] Song X, Chai Z, Wang C, et al. Vibration Performance of Rotating Thin-Walled Cylindrical Shell with Tip-Rubbing Excitation Between Drum and Stator Vane Segment of Aero-Engine[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2022, 525: 116759.
- [8] 马辉, 杨健, 宋溶泽, 等. 转子系统碰摩故障实验研究进展与展望[J]. *振动与冲击*, 2014, 33(6): 1-12.
- [9] Muszynska A. Rotordynamics [M]. *New York: CRC Press*, 2005: 559-661.
- [10] Chu F, Lu W. Experimental Observation of Nonlinear Vibrations in a Rub-Impact Rotor System[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 283(3/5): 621-643.
- [11] Ma H, Shi C, Han Q, Wen B. Fixed-Point Rubbing Fault Characteristic Analysis of a Rotor System Based on Contact Theory[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2013, 38: 137-153.
- [12] 侯理臻, 廖明夫, 王四季, 等. 航空发动机转子不平衡下转静碰摩试验研究[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(22): 14-20.
- [13] 李岩, 廖明夫, 王四季, 等. 挤压油膜阻尼器同心度及碰摩对转子振动特性的影响[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(1): 150-156.
- [14] 武新华, 刘占生, 夏松波. 旋转机械碰摩故障特性分析[J]. *汽轮机技术*, 1996, 38(1): 31-34.
- [15] 刘棣, 李超, 杨海, 等. 突加不平衡激励碰摩转子反向涡动分析[J]. *航空动力学报*, 2021, 36(7): 1509-1519.
- [16] 张华彪, 陈予恕, 李军. 弹性支承-刚性转子系统同步全周碰摩的分岔响应[J]. *应用数学和力学*, 2012, 33(7): 812-827.
- [17] 陈巍, 杜发荣, 丁水汀, 等. 超高速转子系统动力学特性(II): 碰摩转子[J]. *推进技术*, 2012, 33(6): 866-874. (CHEN Wei, DU Fa-rong, DING Shui-ting, et al. Research on Dynamic Characteristics for a Super-High Speed Rotor System II: Rotor System with Rubs[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2012, 33(6): 866-874.)
- [18] 张俊红, 王杰, 鲁鑫, 等. 考虑封严涂层的航空发动机叶片碰摩过程[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2018, 52(5): 980-987.
- [19] Padova C, Dunn M, Barton J, et al. Casing Treatment and Blade-Tip Configuration Effects on Controlled Gas Turbine Vane Tip/Shroud Rubs at Engine Conditions[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2011, 133(1): 011016.
- [20] Batailly A, Legrand M, Millecamps A, et al. Numerical Experimental Comparison in the Simulation of Rotor/Stator Interaction Through Blade-Tip/Abradable Coating Contact[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2012, 134(8): 082504.
- [21] Batailly A, Legrand M. Unilateral Contact Induced Blade/Casing Vibratory Interactions in Impellers: Analysis for Flexible Casings with Friction and Abradable Coating[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2015, 348: 344-364.
- [22] Nyssen F, Batailly A. Sensitivity Analysis of Rotor/Stator Interactions Accounting for Wear and Thermal Effects Within Low-and High-Pressure Compressor Stages[J]. *Coatings*, 2020, 10(1).
- [23] Agrapart Q, Nyssen F, Lavazec D, et al. Multi-Physics Numerical Simulation of an Experimentally Predicted Rubbing Event in Aircraft Engines[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2019, 460: 1-25.
- [24] Millecamps A, Brunel J F, Dufrenoy P, et al. Influence of Thermal Effects During Blade-Casing Contact Experiments[C]. *San Diego: Proceedings of the ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, 2009.
- [25] Wang N, Jiang D, Xu H. Effects of Rub-Impact on Vibration Response of a Dual-Rotor System-Theoretical and Experimental Investigation[J]. *Experimental Techniques*, 2020, 44: 299-311.
- [26] Yang Y, Dengqing C, Yuqian X. Rubbing Analysis of a Nonlinear Rotor System with Surface Coatings[J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2016, 84: 105-115.

(编辑:梅瑛)