文章编号:1008-1542(2016)02-0109-09　　doi:10.7535/hbkd.2016yx02001

失谐叶盘结构减振问题研究综述

张　亮,刘铁箭,李　欣,霍绪尧

(辽宁工业大学机械工程与自动化学院,辽宁锦州　121001)

摘　要: 叶盘结构是航空发动机、燃气轮机的重要零部件,在工程实际中应用广泛。失谐普遍存在于叶盘结构中,并且会破坏叶盘系统原有的振动特性,是导致叶盘高周疲劳失效的原因之一,因此研究如何降低叶盘结构振动是非常有必要的。在梳理国内外相关研究的基础上,介绍了叶盘结构失谐振动的机理,归纳了失谐叶盘系统减振的主要技术方法,如人为主动失谐、碰撞阻尼、摩擦阻尼、优化叶片安装排序减振等,提出了今后的一些研究方向。

关键词: 振动控制理论;失谐叶盘结构;碰撞阻尼;摩擦阻尼;优化算法

中图分类号: V232.3　　**文献标志码:** A

Research overview on vibration damping of mistuned bladed disk assemblies

ZHANG Liang, LIU Tiejian, LI Xin, HUO Xuyao

(College of Mechanical Engineering and Automation, Liaoning University of Technology, Jinzhou, Liaoning 121001, China)

Abstract: Bladed disk assemblies are very important parts in auto engine and gas turbine, and is widely used in practical engineering. The mistuning existing commonly in the bladed disk assemblies can destroy the vibration characteristics of the bladed disk assemblies, which is one of the reasons for the high cycle fatigue failure of bladed disk assemblies, so it is necessary to research how to reduce the vibration of the bladed disk assemblies. On the basis of the review of relevant research at home and abroad, the mistuning vibration mechanism of the bladed disk assemblies is introduced, and the main technical methods of the vibration damping of bladed disk assemblies are reviewed, such as artificially active mistuning, collision damping, friction damping and optimization of the blade position. Some future research directions are presented.

Keywords: vibration control theory; mistuned bladed disk; collision damping; friction damping; optimization algorithm

在工程实际中,叶盘结构广泛应用于航空发动机、燃气轮机及汽轮机中。理论上叶盘结构是圆周周期对称结构,但是由于加工制造中的误差、材料质地不均匀、工作中的磨损以及为抑制颤振人为的改变参数等因素,使得各叶片之间存在微小的差异(即失谐)。通常失谐会改变叶盘结构的循环周期性,使若干少量的叶片具有较大的振动能量,易导致循环疲劳失效,从而产生安全隐患。因此,很有必要对如何减轻失谐造成的叶

收稿日期:2015-12-04;修回日期:2016-02-07;责任编辑:冯　民
基金项目:国家自然科学基金(51505206);辽宁省教育厅科学研究项目(L2014246);辽宁工业大学校立基金(X201202)
作者简介:张　亮(1983—),男,辽宁葫芦岛人,副教授,博士,主要从事失谐叶盘结构减振方面的研究。
E-mail:zhangliang545238@163.com
张　亮,刘铁箭,李　欣,等.失谐叶盘结构减振问题研究综述[J].河北科技大学学报,2016,37(2):109-117.
ZHANG Liang, LIU Tiejian, LI Xin, et al. Research overview on vibration damping of mistuned bladed disk assemblies[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology,2016,37(2):109-117.

盘结构振动局部化开展深入研究。随着对失谐引起的叶盘结构振动局部化机理的认识，人们开始采取一系列措施对叶盘结构进行减振[1]。

1 叶盘结构失谐振动

1.1 失谐振动机理

叶片-轮盘系统（叶盘系统）受迫振动方程一般可表示为

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{x}}+\boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{x}}+\boldsymbol{K}\boldsymbol{x}=\boldsymbol{f}(t), \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{x}$ 为位移矩阵；$\boldsymbol{M},\boldsymbol{C},\boldsymbol{K},\boldsymbol{f}(t)$ 分别为质量、阻尼、刚度矩阵和激振力矩阵。由于失谐普遍存在，往往使 $\boldsymbol{M},\boldsymbol{C},\boldsymbol{K}$ 存在一定的失谐量 $\Delta\boldsymbol{M},\Delta\boldsymbol{C},\Delta\boldsymbol{K}$。

振动在叶盘系统中各叶片间的传递可以利用单波通过多层介质的传播过程来模拟[2]，见图 1。可以用不同速度在叶盘结构周向传递波的叠加来解释叶片受迫振动响应，假如相邻两叶片差异较大（频响函数相差较大），则振动波在传播过程中反射分量幅值大，振动能量不易传递就会被抑制在 1 个或多个叶片上，使得这些叶片的振幅远大于其他叶片，这就是失谐引起叶盘系统振动局部化的机理。叶盘系统振动局部化主要包括模态局部化和振动响应局部化[3-4]。

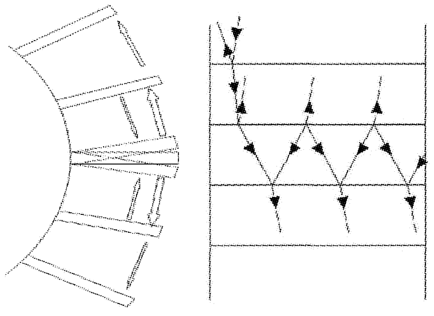

图 1 波传播表示叶片振动传递的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of blade vibration transfer by wave propagation

1.2 叶盘结构模型

叶盘结构模型主要有集中参数模型、连续参数模型和有限元模型，近期人们在有限元模型基础上提出了高保真有限元减缩模型。

1)集中参数模型

用弹簧-质量集中参数来模拟叶盘结构的每个基本扇区，且与基础相连，扇区与扇区之间耦合作用采用无质量的弹簧模拟（见图 2）。在单自由度、多自由度模型中无质量的弹簧分别模拟叶片间耦合、轮盘扇区耦合。

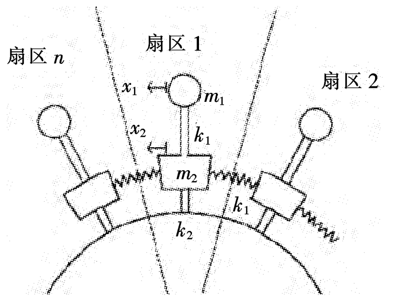

图 2 叶盘结构集中参数模型

Fig. 2 Lumped parameter model of bladed disk

集中参数模型能够方便地揭示叶盘结构振动的一般机理以及特性规律[4-7]。该模型在建模过程中仅考虑了周期性特征，对于其他因素都予以省略，因而求解精度低，误差比较大，适用于对叶盘结构振动定性的研究，是一种用于分析叶盘结构振动的最简单模型。

2)连续参数模型

连续参数模型分别用梁和板等连续参数结构件模拟叶片和轮盘，用无质量的弹簧模拟它们之间的耦合（见图 3）。

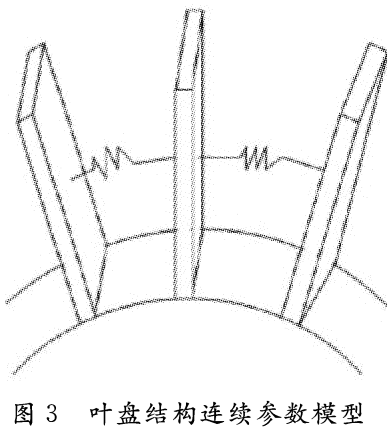

图 3 叶盘结构连续参数模型

Fig. 3 Continuous parameter model of bladed disk

连续参数模型在研究叶盘系统时，可以考虑叶片的弯曲、扭转、转速、裂纹等因素对振动的影响，因此，相对集中参数模型，连续参数模型模拟精度较高。早在 1973 年，EWINS[8]便利用梁模拟叶片进行叶片-轮盘结构系统的分析，但梁中没有考虑阻尼。TURCOTTE 等[9]利用具有结构阻尼的 Euler-Bernoulli 梁来模拟叶片，并在其根部用弹簧连接起来考虑叶片间的耦合。SEUNG 等[10]通过建立连续参数模型分析了由于转动惯量、长度和弹性模量的失谐对叶盘振动局部化的影响。

3）有限元减缩模型

IRRETIER 等[11]最早建立失谐叶盘结构有限元模型（见图 4），分析叶盘振动特性。由于有限元模型更能精确地模拟叶盘系统，计算机技术的发展为计算提供了方便简洁的工具，因此，有限元模型被广泛地应用在叶盘系统失谐振动研究中。由于叶盘结构曲线轮廓的复杂性，建立高保真实际叶盘结构有限元模型的工程量较大，况且失谐是一个随机问题，因此在求解时会花费较大的精力和时间。为了在保证精度的同时提高效率，研究人员提出了高保真有限元减缩模型。

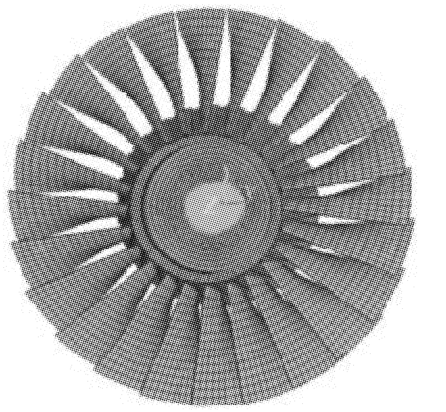

图 4　叶盘系统有限元模型

Fig. 4　Finite element model of bladed disk

减缩模型根据基体的不同分为基于部件和基于整体的减缩模型。基于整体的减缩模型，在经典模态分析方法的基础上对整体结构进行减缩以降低自由度，避免了结构分解带来的误差。基于部件的减缩模型叫作子结构模态综合法（CMS），在分析过程中将叶片和轮盘作为两类子结构，单独计算每个部件的模态，并根据边界条件将所有子结构连接起来。按照边界条件的不同，CMS 分为自由界面子结构模态综合法（Free-interface CMS）、固定界面子结构模态综合法（Fixed-interface CMS）、混合界面子结构模态综合法（hybrid interface substructure CMS）等。TRAN[12]采用 CMS 对叶盘系统减缩建模并分析其振动特性，减少了计算时间。MOYROUND 等[13]在分析叶冠间的摩擦振动时，对带冠叶盘结构进行了减缩建模。BLADH 等[14]基于综合模态分析法提出减缩模型（ROM）用于计算受迫响应的概率问题，为进一步提高计算效率又提出二次模态缩减模型。MARINESCU 等[15]基于固定界面二次降阶（CBSRM）方法，提出了一种组合缩减方法。MARTEL 等[16]把基本失谐模型推广到频率转向区，从物理机理上揭示了失谐对受迫响应的影响，称之为渐进失谐减缩模型。LIM 等[17]又提出了一种新的子结构分解方法（CMM），将失谐叶盘分解为谐调叶盘与整圈的失谐叶片两部分，这种方法可考虑大失谐和非比例失谐问题。王培屹等[18]在减缩建模的基础上提出 CHBM 方法，此法在对失谐叶盘响应计算分析中比 CMS 的效率更高。臧朝平等[19-20]对失谐叶盘结构进行减缩建模及鲁棒性研究，该建模方法既能够保证较高精度，又大大减少了计算过程中的求解维度。

如何建立高精度、实用性的叶盘模型，对后期研究其振动特性起着关键作用，也将成为以后研究叶盘系统的重点问题。

1.3　耦合对振动的影响

叶盘系统通常作为独立系统建模，而这忽略了它们与轴及相邻级耦合的作用，一些学者对此做了相应的研究。CHIU 等[21-22]对叶片-轮盘-轴系统耦合振动进行研究，发现存在 4 种类型的耦合振动模态，分别是轴-叶片模态（shaft-blade）、轴-轮盘-叶片模态（shaft-disk-blade）、轮盘-叶片模态（disk-blade）和叶片-叶片（blade-blade）模态。YANG 等[23]分析了轮盘弹性对叶盘-轴系统耦合振动特性的影响，发现系统耦合振动模态类型随轮盘弹性变化而改变。王红建[4]研究了不同耦合状态时失谐叶片-轮盘系统模态局部化，以及耦合强度对系统受迫响应局部化程度的影响。王培屹等[24]研究了系统中轮盘-叶片耦合振动频率转向特性随轮盘扇区刚度及叶片刚度变化的规律。孙浩琳等[25]利用 ANSYS 软件研究整体叶盘系统耦合振动模态。

但是多级多部件耦合是十分复杂的，这些复杂的耦合可能以不同的耦合形式出现。现有对耦合的研究还不足，需要学者对此进行大量研究。

1.4　失谐灵敏度

由于不同的系统参数对失谐叶盘结构振动的影响程度不等，一些学者对其进行失谐灵敏度的研究[1,21-36]。KENYON 等[29]研究了较小失谐对叶盘系统振动响应灵敏度的影响。廖海涛等[26]运用 GA-SQP 混合算法研究随机失谐时系统最大强迫响应幅值和相应最坏失谐模式，用灵敏度系数评估失谐强度对叶片振幅的影响。PETROV[35]指出可以采用灵敏度标准优化叶盘结构有限元模型。HSU 等[27]利用灵敏度系数预测影响失谐叶盘的空气动力阻尼值。

2 叶盘结构减振的相关研究

叶盘结构减振的主要技术方法包括主动失谐减振、利用叶片阻尼实现减振、优化叶片安装排序减振等。

2.1 主动失谐减振

叶片-轮盘系统振动形式主要分为 2 种[3]:颤振和受迫振动。颤振会导致叶片振幅趋于发散,其中气流速度、叶片固有频率和模态振型都会对颤振有较大影响。如果气流速度超出临界值,振动幅度将迅速增加。研究人员发现人为地改变叶片参数可以抑制叶片颤振,但是这样就会使叶盘系统产生人为的主动失谐。

CASTANIER 等[32-33]研究发现,对于一些谐波失谐形式,当主动失谐系统振幅较小时,其振幅放大因子呈现出了一个峰值,相反当振幅较大时,转子的振动可能会对随机失谐不敏感。CHOI 等[28]研究还发现非谐调形式的主动失谐可以改善叶盘系统对随机失谐的敏感性,并给出了 2 种简单减轻失谐振动的叶片排列顺序,可以消除蒙特卡罗效应。一般情况下,主动失谐能够降低转子对随机失谐的敏感性。SLATER 等[34]研究发现,采用设计有效的主动失谐方式的办法,虽然可以降低系统受迫振动共振幅值,但会加大共振范围,因此该方法容易使系统发生共振。PETROV[35]在理论方面研究了叶片失谐对受迫响应的影响关系,认为合理的设计失谐方式可以降低振动;假设在结构变形较小,并考虑线性气动力对响应的影响时,提出通过优化方法寻找合理失谐来降低振动响应的方案。KENYON 等[29]利用谐波法研究发动机叶盘结构失谐强迫振动,分析失谐灵敏度系数对系统强迫振动响应的影响,得出主动失谐对叶盘结构的响应与随机失谐相比其鲁棒性较好,可以用来指导优化叶盘结构设计以及转子设计。LIM 等[30]通过研究主动失谐与叶片振动响应的关系,给出了灵敏度系数法对实际叶盘结构有限元模型优化的指导方针,并在不考虑结构稳健性的条件下,从振动能量传递角度分析了错频失谐减振理论。王建军等[36]利用“错频失谐”研究叶盘机构模态局部化特性,发现“错频失谐”可以有效地抑制结构颤振,但是相对于谐调结构会引发振动局部化现象。郑赟等[37]在研究叶片频率错频如何影响叶片气动弹性稳定性时,发现频率错频能够使叶栅的气动阻尼系数增加,并且使叶片气动弹性稳定性得到提高。赵志彬等[38]在叶盘结构振动试验中设计叶片主动失谐,研究发现叶片主动失谐引起的振幅放大因子小于随机失谐。段勇亮等[20]发现在同等级失谐强度时,相比随机失谐,主动失谐叶盘的响应幅值较小,并且鲁棒性更好。

2.2 利用叶片阻尼实现减振

理论和试验研究发现,叶片阻尼器可以有效地抑制叶片振动,降低叶片动应力。常用的叶片减振阻尼有材料阻尼、气动阻尼、冲击阻尼和摩擦阻尼。材料阻尼受工作环境影响较大,气动阻尼在工作时有时会引起颤振,因此它们在实际应用中所占比例都很小。以下主要对冲击阻尼和摩擦阻尼在叶片减振中的研究进行简述。

1)冲击阻尼叶片减振

冲击阻尼减振原理:在系统振动时叶片间的碰撞阻尼器反复相互碰撞,消耗系统中一部分振动能量,减小系统的振幅,从而达到减振效果。王栋[39]详细解释了冲击减振器对结构振动能量的耗散过程。图 5 为碰撞机理的物理模型。

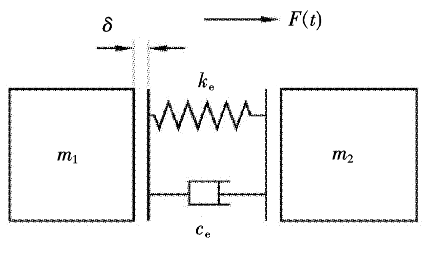

图 5 碰撞机理模型

Fig. 5 Collision mechanism model

LU 等[40-41]对含有碰撞阻尼器的系统在不同状态下的振动做了许多研究:单自由度系统在不同动态负载下,各种结构参数影响碰撞阻尼器对系统的作用结果;两自由度系统进行 3 种不同方式的激励,得到最佳的激励方式;在考虑不同方向的任意水平激励时,相比其他阻尼器,碰撞阻尼器的作用比较明显;指出在一定程度上增加阻尼质量可以提高阻尼器的减振效果。DUFFY 等[42]提出了自调谐碰撞阻尼,并通过试验验证了此结构对旋转叶片的减振优于简单碰撞阻尼结构。KANEKO 等[43]研究旋转状态下的自带冠叶片,发现离心力作用使得叶片整圈的连接为一体并在冠间发生碰撞,从而消耗叶片的振动能量。卢绪祥等[44-46]简述了自带冠叶片碰撞减振研究中取得的成果,发现碰撞振动表现为非线性,带冠叶片会因为接触碰撞达到减振的作用,其叶冠间隙是否对称与间隙大小都会影响减振的效果。李录平等[47]在实验中验证了叶冠间隙非对称形式优于其他形式的减振效果。董明晶等[31]研究发现,斜碰撞直接影响整圈自带冠叶盘系统的振动局部化,使得叶片对失谐更加敏感,且叶片刚度失谐比冠间间隙失谐更敏感。赵亚英等[48]基于有

限元分析软件 ALGOR 对带冠叶片中的碰撞减振进行仿真研究。马晓峰等[49]考虑了气流激振力对叶冠碰撞减振的影响，并解释了叶片冠间间隙接触碰撞的原理。

2)利用摩擦阻尼实现叶片减振

摩擦阻尼件在抑制叶盘系统振动中应用广泛，其减振原理：相邻叶片阻尼件接触面相对滑动，产生非线性的摩擦阻尼运动，以此消耗结构系统的振动能量，从而抑制颤振和降低振动响应，其模型见图 6。

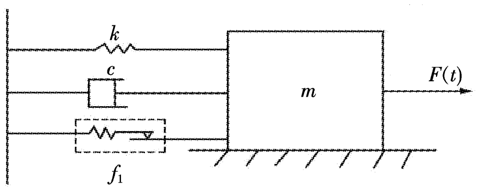

图 6　摩擦阻尼叶片模型

Fig. 6　Friction damping blade model

GRIFFIN 等[50]最早使用简单的集中参数模型研究摩擦部件对抑制失谐叶盘系统受迫响应的影响。ALLARA[51]提出一种新的接触摩擦模型，用接触刚度和摩擦系数来模拟摩擦接触面的刚度和阻尼，研究摩擦接触对发动机叶片强迫振动的响应。WEI 等[52]通过建立多自由度集中参数模型，分别研究了干摩擦阻尼与黏性阻尼对周期结构振动局部化的影响，得出阻尼可以降低结构的振动局部化，干摩擦阻尼比黏性阻尼影响更灵敏。CARDONA[53]提出多谐波平衡法可以用作研究具有干摩擦阻尼叶盘系统振动响应的预测方法。单颖春等[54]运用时频转换方法分析凸肩结构对叶片的减振效果，该方法可以为以后研究带凸肩叶片的振动提供理论支持。陈璐璐等[55]通过优化叶片凸肩位置实现抑制叶片振动应力幅值。漆文凯等[56]在基于二维整体-局部统一滑动模型的基础上，研究分析了不同参数对带缘板阻尼块叶片振动响应的影响，发现缘板阻尼块还能调节叶片的激振频率，从而避免共振，降低振动幅值。李全通等[57]在实验中验证了在叶片间添加缘板阻尼器可以有效地实现叶片减振。陈香等[58]通过设计涡轮带冠叶片干摩擦阻尼减振试验，采用不同参数的阻尼块研究对涡轮叶片减振效果的影响，为干摩擦阻尼器的设计提供数据依据。谢永慧等[59]通过搭建汽轮机叶片振动特性实验台，研究围带和拉筋两种阻尼结构对叶片振动特性的影响规律，并且分析了阻尼结构在不同转速和正压力情况下对叶片起到减振效果的差异。

2.3　优化叶片安装排序减振

研究发现，叶片的不同安装顺序对系统整体振动有一定的影响。于是，研究人员应用不同算法对叶片进行排序，以求找到最佳的叶片安装顺序，以使得系统的振动达到最小。文献[60—61]基于单亲遗传算法与退火算法，建立了退火单亲遗传算法(SA-PGA)，并将其应用于优化压气机叶片的排列顺序。SA-PGA 在优化过程中具有可靠性较高、寻优速度快、便于叶片顺序在线调整、满足静力学配平的优点。文献[62—64]运用遗传算法平衡转子叶片安装后质量矩和频率的不平衡量，为目标优化安装顺序，从而达到减小叶片安装后不平衡量造成的振动过大及发动机颤振。YANG 等[65]运用混合遗传算法(HGA)，以谐响应幅值为寻优的目标函数对 1 007 MW 核电厂的低压蒸汽涡轮机转子进行优化。李丹丹等[66]以降低同一级叶片安装后残余不平衡量为目的，运用改进的蚁群算法对汽轮机叶片的安装顺序进行优化，并在实验测试中有效地将叶轮安装后的残余不平衡量控制在满足要求的范围内。彭国华等[67]基于混合遗传算法优化叶片安装方案，使转子同时满足质量和频率两方面的要求。袁惠群等[68]运用多种算法对航空发动机叶片的安装顺序进行优化，利用改进的嵌套遗传算法对某型航空发动机转子叶片的安装排序进行了优化，使得叶片-轮盘系统的强迫振动响应幅值达到最小；文献[69]以叶盘模态局部化参数最小为优化标准，文献[70]以振动响应局部化参数为评定标准，运用人工蚁群算法对叶片安装排序进行优化，从而降低系统的失谐振动。李岩等[71]将离散粒子群算法(DPSO)和标准遗传算法结合，解决了标准遗传算法的某些缺点，并改善了粒子群算法的全局优化能力，应用于叶片的优化排序，降低了整个叶盘系统的振动，减轻了系统的振动局部化程度。

3　研究展望

由于叶盘结构普遍存在于周期循环结构系统中，其振动状态直接影响到结构整体是否正常工作，因此研究如何减轻叶盘系统在工作中的振动，对于航空发动机和燃气轮机等的研制与设计具有重要意义。今后的研究应在以下几个方面展开：

1)探索建立精度更高更准确地反映实际叶盘的减缩模型，为研究叶盘结构的减振提供理论模型。

2)开展颤振机理相关研究。已有研究发现人为改变结构参数造成的失谐，虽然可以改善叶片颤振，但是同样会加剧系统的受迫振动响应。因此，关于如何在兼顾振动响应的同时，抑制叶片颤振的研究，是今后研

究的一个难点问题。

3)在叶片间的碰撞阻尼振动研究方面,还需对碰撞动力学理论、碰撞模型的建立、结构柔性与碰撞过程的相互作用机理、数值求解方法和碰撞阻尼结构实验等方面做进一步的研究和探索。

4)有学者已经深入研究了摩擦减振机理,但今后还应进一步研究如何考虑接触点的运动,以及计算接触点的非线性摩擦力;接触面往往发生复杂的运动状态,研究如何选择更加符合实际的接触模型,寻求非线性摩擦系统的求解方法。

5)在实际中影响系统振动的因素很多,它们往往共同存在,并且其相互的耦合亦十分复杂。针对这些复杂的耦合形式进行深入研究是今后的一个研究方向。

6)现阶段利用不同算法优化叶片排序时,基本上以某一目标作为寻优标准,今后在寻优过程中还应开展兼顾多标准的研究。

参考文献/References:

[1] PETROV E P. Reduction of forced response levels for bladed discs by mistuning: Overview of the phenomenon[C]//ASME Conference Proceedings 2010. [S. l.]:[s. n.], 2010: 1039-1051.

[2] 姚宗健,于桂兰. 失谐循环周期结构振动模态局部化问题的研究[J]. 科学技术与工程,2005,5(21): 1616-1622.
YAO Zongjian, YU Guilan. Research on vibration mode localization in mistuned cyclic periodic structures[J]. Science Technology and Engineering, 2005,5(21): 1616-1622.

[3] MYHRE M, MOYROUD F M, FRANSSON T H. Numerical investigation of the sensitivity of forced response characteristics of bladed disks to mistuning[C]// Proceedings of ASME Turbo Expo 2003. [S. l.]:[s. n.], 2003: GT2003-38007.

[4] 王红建. 复杂耦合失谐叶片-轮盘系统振动局部化问题研究[D]. 西安: 西北工业大学,2006.
WANG Hongjian. Investigation of the Vibration Localization Problem of the Mistuned Bladed Disk with Complicated Coupling[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006.

[5] PIERRE C. Mode localization and eigenvalue loci veering phenomena in disordered structures[J]. Journal of Sound and Vibration, 1988, 126(3): 485-502.

[6] KENYON J A, GRIFFIN J H, KIM N E. Sensitivity of tuned bladed disk response to frequency veering[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2005, 127(4): 835-842.

[7] HOU J. Cracking-induced mistuning in bladed disks[J]. AIAA Journal, 2006, 44(11): 2542-2546.

[8] EWINS D J. Vibration characteristics of bladed disk assemblies[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 1973, 15(3): 165-186.

[9] TURCOTTE J S, HOLKAMP J J, GORDON R W. Vibration of mistuned blade-disk assembly using structurally damped beams[J]. AIAA Journal,1998, 36 (12): 2225-2228.

[10] SEUNG M K, HONG H Y. Vibration localization of mistimed rotating multi-packet blade system undergoing external cyclic harmonic force[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2011, 25(11): 2769-2774.

[11] IRRETIER H, SCHMIDT H I. Mistuned bladed disks-dynamical behavior and computations[C]//Proceedings of the IFToMM International Conference on Rotordynamic Problems in Power Plants. [S. l.]:[s. n.], 1982: 215-226.

[12] TRAN D M. Component mode synthesis methods using interface modes: Application to structures with cyclic symmetry[J]. Computers and Structures, 2001, 79(2): 209-222.

[13] MOYROUND F, RESEARCH A, FRANSSON T, et al. A comparison of two finite element reduction techniques for mistuned bladed disks[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2002, 124(4): 942-952.

[14] BLADH R, CASTANIER M P, PIERRE C. Component-mode-based educed order modeling techniques for mistuned bladed disks(part Ⅰ): Theoretical models[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2001, 123(1): 89-99.

[15] MARINESCU O, EPUREANU B I, BANU M. Reduced order models of mistuned cracked bladed disks[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2011, 133(5):1-9.

[16] MARTEL C, CORRAL R. Asymptotic description of maximum mistuning amplification of bladed disk forced response[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2009, 131(2):1-10.

[17] LIM S, BLADH R, CASTANIER M P. Compact, generalized component mode mistuning representation for modeling bladed disk vibration[J]. AIAA Journal, 2007, 45(9): 2285-2298.

[18] 王培屹,李琳. 用于失谐叶盘动力学特性分析的减缩计算方法[J]. 航空动力学报,2014,29(6):1395-1402.
WANG Peiyi, LI Lin. Reduced order computational for analysis of mistuning bladed disk dynamics characteristic[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(6): 1395-1402.

[19] 臧朝平,段勇亮,PETROV E P. 失谐叶片轮盘的减缩建模及动力响应预测方法[J]. 航空学报,2015,36(10):3305-3315.
ZANG Chaoping, DUAN Yongliang, PETROV E P. Reduced-order modelling and dynamic response prediction method for mistuned bladed disks[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2015, 36(10): 3305-3315.

[20] 段勇亮，臧朝平，PETROV E P. 主动失谐叶盘振动特性及鲁棒性研究[J]. 航空发动机，2015，41(6)：6-10.
DUAN Yongliang，ZANG Chaoping，PETROV E P. Research on vibration performance and robustness of bladed disks with intentional mistuning[J]. Aeroengine，2015，41(6)：6-10.
[21] CHIU Y J，HUANG S C. The influence on coupling vibration of a rotor system due to a mistuned blade length[J]. International Journal of Mechanical Sciences，2007，49(4)：522-532.
[22] CHIU Y J，HUANG S C. The influence of a mistuned blade's staggle angle on the vibration and stability of a shaft-disk-blade assembly [J]. Shock and Vibration，2008，15(1)：3-17.
[23] YANG C H，HUANG S C. The influence of disk's flexibility on coupling vibration of shaft-disk-blades systems[J]. Journal of Sound and Vibration，2007，301(1/2)：1-17.
[24] 王培屹，李琳. 叶盘结构盘片耦合振动特性的参数敏感性[J]. 航空动力学报，2014，29(1)：81-90.
WANG Peiyi，LI Lin. Parametric sensitivity for coupling vibration characteristics of bladed disk[J]. Journal of Aerospace Power，2014，29(1)：81-90.
[25] 孙浩琳，吴娅辉，朱振宇. 某航空发动机整体叶盘耦合振动特性分析[J]. 计测技术，2015，35(5)：28-31.
SUN Haolin，WU Yahui，ZHU Zhenyu. Coupling vibration characteristics analysis of holistic bladed disk[J]. Metrology & Measurement Technology，2015，35(5)：28-31.
[26] 廖海涛，王建军，李其汉. 随机失谐叶盘结构失谐特性分析[J]. 航空动力学报，2010，25(1)：160-168.
LIAO Haitao，WANG Jianjun，LI Qihan. Mistuning characteristics analysis of mistuned bladed disk assemblies[J]. Journal of Aerospace Power，2010，25(1)：160-168.
[27] HSU K，HOYNIAK D. A fast influence coefficient method for aerodynamically mistuned disks aeroelasticity analysis[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power，2011，133(12)：1-10.
[28] CHOI B K，LENTZ J，RIVAS G A，et al. Optimization of intentional mistuning patterns for reduction of forced response effects of unintentional mistuning：Formulation and assessment[C]//ASME Turbo Expo 2001：Power for Land，Sea，and Air. [S. l.]：American Society of Mechanical Engineers，2001：V004T03A052.
[29] KENYON J A，GRIFFIN J H. Forced response of turbine engine bladed disks and sensitivity to harmonic mistuning [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power，2003，125(1)：113-120.
[30] LIM S，CASTANIER M P，PIERRE C. Intentional mistuning design space reduction based on vibration energy flow in bladed disks[C]// Proceedings of the ASME Turbo Expo 2004. Vienna：American Society of Mechanical Engineers，2004：373-384.
[31] 董明晶，丁千. 整圈自带冠叶盘系统斜碰撞振动局部化研究[J]. 航空动力学报，2014，29(12)：2914-2923.
DONG Mingjing，DING Qian. Study on vibration localization of oblique impact of whole-circle bladed disk with tips system[J]. Journal of Aerospace Power，2014，29(12)：2914-2923.
[32] CASTANIER M P，PIERRE C. Consideration of the benefits of intentional blade mistuning for the forced response of turbomachinery rotors[C]//Analysis and Design Issues for Modern Aerospace Vehicles. [S. l.]：[s. n.]，1997：419-425.
[33] CASTANIER M P，PIERRE C. Investigation of the combined effects of intentional and random mistuning on the forced response of bladed disks[C]//Proc of the 34th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. [S. l.]：[s. n.]，1998：AIAA-98-3720.
[34] SLATER J C，MINKIEWICZ G R，BLAIR A J. Forced response of bladed disk assemblies：A survey[J]. Shock Vib Digest，1999，31(1)：17-24.
[35] PETROV E P. A method for forced response analysis of mistuned bladed disks with aerodynamic effects included[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power，2010，132(6)：1-10.
[36] 王建军，于长波，李其汉. 错频叶盘结构振动模态局部化特性分析[J]. 航空动力学报，2009，24(4)：788-792.
WANG Jianjun，YU Changbo，LI Qihan. Localization characteristics of vibratory mode for bladed disk assemblies[J]. Journal of Aerospace Power，2009，24(4)：788-792.
[37] 郑赟，王静. 错频对叶片的气动弹性稳定性影响[J]. 航空动力学报，2013，28(5)：1029-1036.
ZHENG Yun，WANG Jing. Influence of frequency mistuning on aeroelastic stability of blade[J]. Journal of Aerospace Power，2013，28(5)：1029-1036.
[38] 赵志彬，贺尔铭，陈熠，等. 叶盘结构受迫振动响应特性和主动失谐技术实验研究[J]. 西北工业大学学报，2011，29(6)：892-897.
ZHAO Zhibin，HE Erming，CHEN Yi，et al. A successful experimental investigation on the forced response of random and intentional mistuning bladed disks[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University，2011，29(6)：892-897.
[39] 王栋. 冲击减振器对振动能量耗散性能分析[J]. 机械工程学报，2014，50(7)：87-92.
WANG Dong. Analysis of vibration energy dissipation with vibro-impact absorber[J]. Journal of Mechanical Engineering，2014，50(7)：87-92.
[40] LU Z，LU X L，MASRIB S F. Studies of the performance of particle dampers under dynamic loads[J]. Journal of Sound and Vibration，2010，26(20)：5415-5433.
[41] LU Z，MASRIB S F，LU X L. Studies of the performance of particle dampers attached to a two-degrees-of-freedom system under random excitation[J]. Journal of Vibration and Control，2011，17 (10)：1454-1471.
[42] DUFFY K P，BAGLEY R L，MEHMED O. On a self-tuning impact vibration damper for rotating turbo machinery[C]//Proc of the 36th

AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit.[S. l.]:[s. n.],2000:AIAA-2000-3100.

[43] KANEKO Y, MORI K, OHYAMA H. Development and verification of 3000 rpm 48 inch integral shroud blade for steam turbine[J]. JSME International Journal, 2006, 49(2): 205-211.

[44] 卢绪祥,黄树红,刘正强,等. 汽轮机自带冠叶片碰撞减振的研究现状与发展[J]. 振动与冲击,2010,29(2):11-16.
LU Xuxiang, HUANG Shuhong, LIU Zhengqiang, et al. Impact-damping studies for integral shroud blades of a turbine machinery[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(2): 11-16.

[45] 卢绪祥,黄树红,刘正强,等. 基于谐波平衡法的带冠叶片接触碰撞减振特性研究[J]. 动力工程学报,2010,30(8):578-583.
LU Xuxiang, HUANG Shuhong, LIU Zhengqiang, et al. Study on contact-impact damping characteristics of shrouded blades based on harmonic balance method[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2010, 30(8): 578-583.

[46] 卢绪祥,刘正强,黄树红,等. 含间隙碰撞振动系统的非线性振动特性[J]. 动力工程学报, 2012,32(5): 388-393.
LU Xuxiang, LIU Zhengqiang, HUANG Shuhong, et al. Nonlinear vibration characteristics of a vibro-impact system with clearance[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2012,32(5): 388-393.

[47] 李录平,汪燕,卢绪祥,等. 自带冠叶片碰撞减振过程阻尼特性实验研究[J]. 汽轮机技术,2010,52(4): 259-262.
LI Luping, WANG Yan, LU Xuxiang, et al. Experimental research on damping characteristics for vibration-impact process of steam turbine blades with integral shroud[J]. Turbine Technology, 2010, 52(4): 259-262.

[48] 赵亚英,陈长秀,赵熹. 汽轮机带冠叶片阻尼振动特性的有限元分析[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版),2014, 34(1): 61-67.
ZHAO Yaying, CHEN Changxiu, ZHAO Xi. The finite element analysis on damping vibration dynamic characteristics for shrouded blades of steam turbine[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology(Natural Science), 2014, 34(1): 61-67.

[49] 马晓峰,刘占生,侯宪科. 叶片冠间接触碰撞数值模拟及实验研究[J]. 振动与冲击,2010, 29(3): 34-38.
MA Xiaofeng, LIU Zhansheng, HOU Xianke. Numerical simulation and experimental research on impact-contact between tips of blades [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(3): 34-38.

[50] GRIFFIN J H, SINHA A. The interaction between mistuning and friction in the forced response of bladed disk assemblies[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power,1985, 107(1): 205-211.

[51] ALLARA M. A model for the characterization of friction contacts in turbine blades[J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 320(3): 527-544.

[52] WEI S T, PIERRE C. Effects of dry friction damping on the occurrence of localized forced vibrations in nearly cyclic structures[J]. Journal of Sound and Vibration, 1989, 129(3): 397-416.

[53] CARDONA A. A multi harmonic method for non-linear vibration analysis[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2008, 37(9): 1593-1608.

[54] 单颖春,朱梓根,刘献栋. 凸肩结构对叶片的干摩擦减振研究——理论方法[J]. 航空动力学报, 2006,21(1): 168-173.
SHAN Yingchun, ZHU Zigen, LIU Xiandong. Investigation of the vibration control by frictional constraints between blade shrouds-theoretical method[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(1): 168-173.

[55] 陈璐璐,张大义,文敏,等. 带凸肩风扇叶片振动特性及设计方法研究[J]. 推进技术, 2015,36(9): 1389-1394.
CHEN Lulu, ZHANG Dayi, WEN Min, et al. Dynamical effects of shrouds on fan blade vibration and its corresponding design method [J]. Journal of Propulsion Technology, 2015, 36(9): 1389-1394.

[56] 漆文凯,张云娟. 带缘板阻尼块涡轮叶片减振特性研究[J]. 南京航空航天大学学报,2014,46(2): 280-284.
QI Wenkai, ZHANG Yunjuan. Reduced vibration characteristics of turbine blade with platform damper[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2014, 46(2): 280-284.

[57] 李全通,廖明夫,陈卫,等. 缘板干摩擦阻尼器叶片减振实验研究[J]. 机械科学与技术,2008,27(11): 1392-1396.
LI Quantong, LIAO Mingfu, CHEN Wei, et al. An experimental study of decreasing vibration on blade with platform dry friction damper [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2008, 27(11): 1392-1396.

[58] 陈香,朱靖,李光辉,等. 涡轮带冠叶片干摩擦阻尼减振试验[J]. 航空动力学报, 2012,27(4):817-823.
CHEN Xiang, ZHU Jing, LI Guanghui, et al. Experiment on dry friction damping of shrouded turbine blades[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(4): 817-823.

[59] 谢永慧,吴君,张荻,等. 具有整体围带和凸台拉筋汽轮机长叶片阻尼振动特性实验研究[J]. 汽轮机技术,2011,52(2): 81-85.
XIE Yonghui, WU Jun, ZHANG Di, et al. Experimental study on vibration characteristics of a steam turbine blade with integral shroud and tie wire[J]. Turbine Technology, 2011, 52(2): 81-85.

[60] 张海,浦健,张啸澄. 基于退火单亲算法的压气机叶片排序[J]. 燃气轮机技术,2009, 22(4): 49-53.
ZHANG Hai, PU Jian, ZHANG Xiaocheng. A opmizing sequencing of compressor vanes based on simulated annealing partheno genetic algorithm[J]. Gas Turbine Technology,2009, 22(4): 49-53.

[61] 陈晓敏,王科. 基于退火单亲遗传算法的压气机叶片排序算法[J]. 西南师范大学学报(自然科学版),2009,34(4): 156-158.
CHEN Xiaomin, WANG Ke. The sort algorithm for the air-compressor blade based on simulated annealing partheno genetic algorithm [J]. Journal of Southwest China Normal University(Natural Science Edition), 2009, 34(4): 156-158.

[62] 贺尔铭,耿炎,贺利,等. 遗传算法在发动机转子叶片平衡排序中的应用[J]. 机械科学与技术,2002,22(4):553-555.
HE Erming, GENG Yan, HE Li, et al. Application of genetic algorithm in blade arrangement of engine[J]. Mechanical Science and

Technology，2002，22(4)：553-555.

[63] 戴义平，江才俊，卢世明. 基于遗传算法的叶片安装排序优化系统的开发及应用[J]. 汽轮机技术，2003，45(5)：270-272.
DAI Yiping，JIANG Caijun，LU Shiming. Development and application of blades installation arrangement order optimizing system based on genetic algorithm[J]. Turbine Technology，2003，45(5)：270-272.

[64] 杨训，邢建华. 基于遗传算法的转子叶片优化排序[J]. 计算机仿真，2008，25(11)：94-97.
YANG Xun，XING Jianhua. Optimum arrangement of rotor blades based on genetic algorithms[J]. Computer Simulation，2008，25(11)：94-97.

[65] YANG B S，CHOI S P，KIM Y C. Vibration reduction optimum design of a steam-turbine rotor-bearing system using a hybrid genetic algorithm[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization，2005，30(1)：43-53.

[66] 李丹丹，陈勇，于达仁. 基于改进的蚁群算法的汽轮机叶片安装优化排序研究[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2011，42(sup1)：187-191.
LI Dandan，CHEN Yong，YU Daren. Research of optimizing arrangement for turbine blade installation based on ant colony algorithm [J]. Journal of Central South University(Science and Technology)，2011，42(sup1)：187-191.

[67] 彭国华，余迁，王罡. 混合遗传算法在叶片排序问题中的应用[J]. 西南民族大学学报(自然科学版)，2006，32(1)：8-12.
PENG Guohua，YU Qian，WANG Gang. Application of hybrid genetic algorithm in blade arrangement of engine[J]. Journal of Southwest University for Nationalities(Natural Science Edition)，2006，32(1)：8-12.

[68] 袁惠群，张亮，韩清凯. 航空发动机转子失谐叶片减振安装优化分析[J]. 振动、测试与诊断，2011，31(5)：647-651.
YUAN Huiqun，ZHANG Liang，HAN Qingkai. Reducing vibration mounting optimization for aero-engine rotor mistuned Blade[J]. Journal of Vibration，Measurement & Diagnosis，2011，31(5)：647-651.

[69] 袁惠群，杨少明，吴震宇，等. 基于蚁群算法和模态局部化参数的失谐叶盘减振研究[J]. 东北大学学报(自然科学版)，2010，31(11)：1611-1614.
YUAN Huiqun，YANG Shaoming，WU Zhenyu，et al. Vibration reduction of mistuned blade-disc by ant colony algorithm and modal localization parameter[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science)，2010，31(11)：1611-1614.

[70] 袁惠群，张亮，韩清凯，等. 基于蚁群算法的航空发动机失谐叶片减振排布优化分析[J]. 振动与冲击，2012，31(11)：169-172.
YUAN Huiqun，ZHANG Liang，HAN Qingkai，et al. Optimization of mistuning blades arrangement for vibration absorption in an aero-engine based on artificial ant colony algorithm[J]. Journal of Vibration and Shock，2012，31(11)：169-172.

[71] 李岩，袁惠群，梁明轩. 基于改进 DPSO 算法的航空发动机失谐叶片排序[J]. 东北大学学报(自然科学版)，2013，34(4)：569-572.
LI Yan，YUAN Huiqun，LIANG Mingxuan. Mistuned blade sorting based on improved DPSO algorithm for aero-engine[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science)，2013，34(4)：569-572.

《河北科技大学学报》荣获“河北省十佳期刊”

据河北省新闻出版广电局文件(冀新广发[2015]146 号)，在由河北省新闻出版广电局、河北省期刊协会组织开展的 2012—2014 年度河北省优秀期刊、优秀期刊管理人员、优秀期刊编辑评选活动中，《河北科技大学学报》荣获“河北省十佳期刊”。

本次期刊评选活动的内容涉及期刊的政治标准、技术标准、编辑标准、出版管理标准等，共评选出河北省精品期刊 5 种，河北省十佳期刊 10 种，河北省优秀期刊 18 种。

(本刊编辑部)