

压气机流道中砂粒轨迹及碰撞位置的计算方法研究

赵磊,刘璐璐,赵振华,陈伟

(南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016)

摘要:飞机在沙尘地带工作时吸入大量砂粒,砂粒进入核心机后会对叶片造成永久性的磨损,改变发动机的总体性能,对发动机造成极大损伤。通过建立碰撞反弹数据库,采用颗粒轨道模型,并调用已存入数据库中的气动参数,对砂粒在叶片通道中的飞行过程进行数值模拟,获得了砂粒在压气机流道中的运动轨迹及碰撞位置,为掌握影响砂粒在压气机内部的运动轨迹及其碰撞点位置提供研究方法,同时也为今后提高压气机叶片相应部位强度的研究提供理论依据。

关键词:发动机;防砂;球形砂粒;运动轨迹;碰撞反弹;数值模拟

中图分类号:V231.3 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2020)03-0105-04

Numerical Simulation of Compressor Flow Path and Trajectory of Sand Impact Position

ZHAO Lei, LIU Lulu, ZHAO Zhenhua, CHEN Wei

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: When the aircraft works in the sand-dust zone, it can inhale a large amount of sands. When the sands enter into the core machine, it can wear down the blade, thus making the overall performance of the engine lowering. This paper establishes a collision bounce database, uses the particle orbit model, and calls the aerodynamic parameters already stored in the database, which are used to numerically simulate the flight process of the sand in the blade channel and obtain the trajectory and collision of the sand in the compressor flow channel. The research method and the theoretical basis are provided for mastering the movement trajectory of sand in the compressor and the location of the collision point, and improving the strength of the corresponding part of the compressor blade in the future.

Keywords: engine; sand control; spherical sand; motion trajectory; collision rebound; numerical simulation

0 引言

固体颗粒对压气机机匣、静子和转子叶片的冲蚀会造成永久性的磨损、点蚀和前缘破损,增加叶片表面粗糙度^[1]和叶片通道的总压损失^[2],研究表明^[3-4]叶尖间隙和表面粗糙度的增加所引起的叶片几何形状变化是影响压气机气动性能的主要因素。因此在对压气机进行抗冲蚀设计前,需要了解砂粒在压气机流场中受气流影响后的运动轨迹,并掌握其在相关部件上的碰撞位置,为压气机抗冲蚀设计提供参考。

早在20世纪80年代,国外已经开始对飞机防砂及抗冲蚀性能展开大量系统、深入的研究。GHENAIET采用Runge-Kutta-Fehlberg算法解决了砂粒的运动方程问题^[4],但是高阶Runge-Kutta-Fehlberg每一步计算右函数的次数和阶数相同,即在遇到复杂情况(多颗砂粒轨迹计算)时,会占用大量程序计算内存,同时该算法的局部截断误差估计比较复杂,使用固定时间步长计算在砂粒与壁面反弹处的轨迹,会使得局部误差波动较大,对运动轨迹求解造成更大误差,因而该研究方法还需进一步完善。孙露^[5]以Visual C++为基础,采用颗粒轨道模型对风扇叶片流道中

砂粒的飞行轨迹进行了研究,但未获得砂粒在叶片上的碰撞分布,对叶片相关部位所受的冲蚀损伤研究较少。

目前公开的文献对砂粒在压气机流场中飞行轨迹的研究还存在许多不足之处。根据有限的试验数据总结一个碰撞反弹的经验公式不能够对所有砂粒的反弹情况做出一个统一的描述,由于砂粒形状存在差异,碰撞后必然会出现远离公式计算结果的特殊情况,因而需要建立一个碰撞反弹数据库直接对试验结果数据进行插值调用。同时也需要得到一个在计算多颗砂粒运动轨迹时占用计算内存较少、迭代次数较低、拟合程度较高的计算方法。因此,本文针对第一级压气机流场,建立砂粒在流场中运动的数学模型,并通过对碰撞反弹数据库的调用与砂粒运动轨迹的数值模拟,揭示流场对砂粒运动轨迹的影响及砂粒在叶片上的碰撞规律。

1 计算方法

1.1 基本假设

本文的研究基于以下假设:1)作为方法研究,为简化计算,本文砂粒选用质量均匀的圆球模型。2)砂粒在运

动过程不会发生破碎,也不会发生变形。3) 忽略砂粒对压气机内部定常流场的影响^[6-7]。4) 在计算砂粒受力与碰撞时取质心为受力点。5) 不考虑叶片受到冲击后产生凹坑、鼓包、磨损。

1.2 运动轨迹求解步骤

单颗砂粒在压气机流场中运动轨迹的计算流程如图1所示。将压气机某一工况气动计算结果以及碰撞反弹试验数据导入数据库后,设置砂粒初始参数,根据单颗粒轨道模型,计算砂粒在每一时刻的受力和单位步长下的运动轨迹。根据碰撞反弹程序,在获得该步长下运动轨迹的同时进行壁面和叶片的碰撞判断,若发生碰撞则通过调用碰撞反弹数据库插值获得反弹参数,而后进行下一数值点的计算,直至砂粒飞出计算域。在结束当前砂粒的轨迹计算后程序立即将数据保存至数据库中,包括各计算步的位置、速度以及碰撞点位置、碰撞速度和碰撞角度,而后程序立即开始下一颗砂粒的轨迹计算。

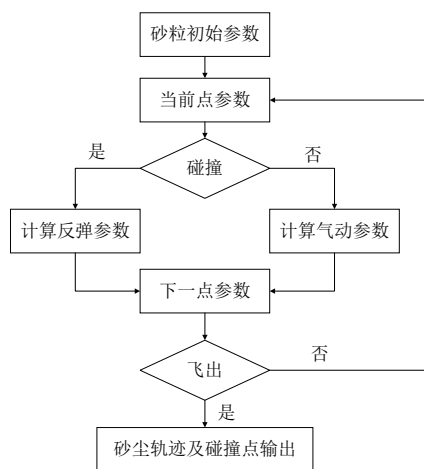


图1 单颗砂粒运动轨迹计算流程图

1) 受力分析与运动方程

根据牛顿第二定律^[8]建立砂粒在流场中的受力运动方程 $F=ma$, 式中 F 为砂粒在流场中受到的合力, a 为在当前条件下砂粒的加速度, m 为球形砂粒的质量。要获得砂粒在压气机流场中的运动轨迹, 首先要确定其在流场中所受合力。研究表明, 球形砂粒在流场中主要受到气流曳力、压力梯度力与离心力的影响^[9], 故本文也仅考虑这3个力对砂粒的作用。 $F=F_d+F_p+F_f$, 式中 F_d 为气动曳力, F_p 为压力梯度力, F_f 为离心力。其中 F_d 和 F_p 与砂粒所在位置的压力、密度、温度等因素有关, 而这些气动参数仅存在于密集的网格节点上。因而要获得任意位置所受合力, 必须首先分析压气机流场气动数据。在任意时刻下, 考虑了网格点与砂粒位置的距离, 采用加权平均方法, 获得砂粒所在位置的压强、温度、密度等参数。本文采用球形搜索方法, 以砂粒所在位置为圆心, 搜索半径为 R , 如图2所示。

2) 碰撞反弹数据库的建立

碰撞反弹数据库的建立与调用对于求解砂粒与壁面、叶片发生碰撞后的运动轨迹以及提高程序计算效率发挥了极其重要的作用。砂粒的形状对碰撞后的反弹速度、角度有较大的影响^[6], 作为初步分析, 本文使用球形模拟分析结

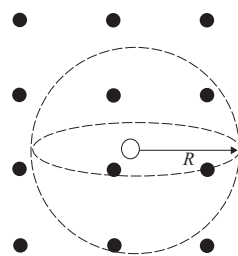
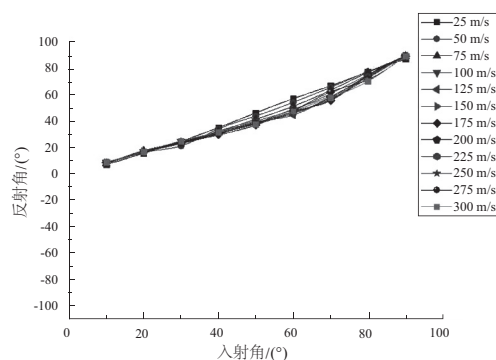
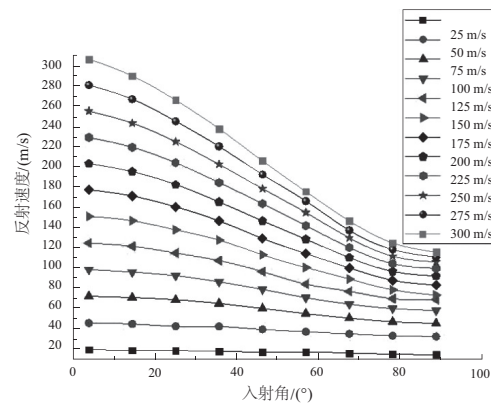


图2 球形搜索示意图

果^[2]进行简化, 部分数据如图3所示(因本刊为黑白印刷, 如有疑问请咨询作者), 当碰撞反弹试验完成后再将所获得数据更新至数据库中。将碰撞反弹数据和流场参数按程序调用所需格式直接导入至数据库, 当计算需要某个数据时直接查询调用, 大大节省了计算内存, 提高运行效率。



(a) 入射角与反射角关系图



(b) 入射角与反射速度关系图

图3 不同入射速度下砂粒反弹参数

2 运动轨迹的数值计算分析

2.1 压气机进口参数设定

压气机流场的计算模型是基于某型轴流压气机进口部件建立的, 包括导流叶片、转子叶片、机匣面与轮毂面。由于流道为周期对称结构, 为了减少计算量, 流场计算域选取包含一个完整导流-转子叶片的流道区域, 如图4所示。计算域的上端面为外机匣内壁面, 下端为为轮毂面, 转子叶片绕轴向旋转。

进口段砂粒初始条件设定选用已有的压气机入口砂

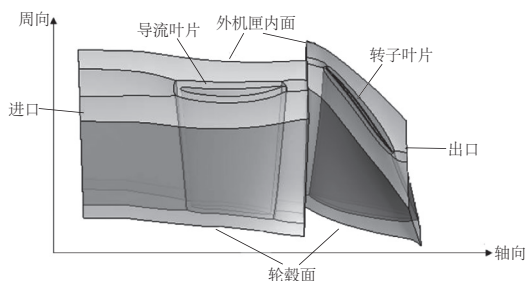
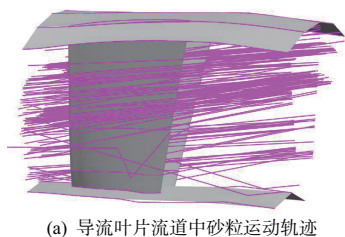


图4 单通道计算域

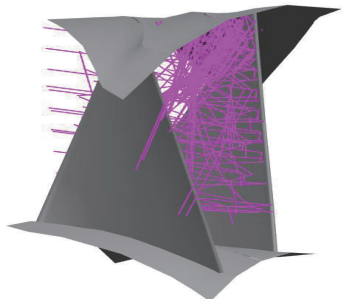
粒分布数据,46%砂粒分布于80%及以上叶高处,其他砂粒在30%~80%叶高处分布较均匀,砂粒初始速度在100m/s左右。

2.2 砂粒运动轨迹的计算结果与分析

经过程序循环计算得到了所有砂粒的飞行轨迹图,选取其中部分典型砂粒轨迹如图5所示,砂粒从右端进入。导流叶片周围的砂粒运动轨迹以绝对坐标系表示,转子叶片周围的砂粒运动轨迹以相对坐标系表示。砂粒从压气机入口处飞入,保持原有速度进入导流叶片流场随气流沿轴向运动。由于周向初始速度较低,砂粒质量较小,约81.33%的砂粒通过气流不断加速飞入下一流场,剩余18.67%砂粒则与导流叶片前缘、叶盆等部位发生碰撞,飞行速度下降,运动轨迹发生偏离。转子叶片流场中,砂粒与叶片的相对速度远远大于其在导流叶片流场中的相对速度,因而更容易撞击叶片的压力表面。图5(b)中砂粒在转子叶片前缘和叶尖附近部位发生了较为密集的碰撞,由于转子叶片转速远高于砂粒的周向速度,很容易在叶片前缘与砂粒发生碰撞。初次碰撞造成了砂粒能量的损失,飞行速度降低,离心力在飞行中起主导作用,砂粒迅速向叶片尖端移动。



(a) 导流叶片流道中砂粒运动轨迹



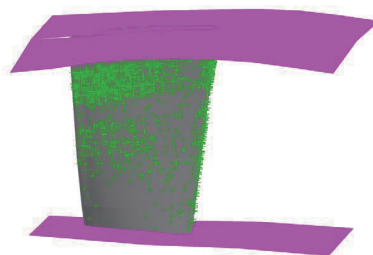
(b) 转子叶片流道中砂粒运动轨迹

图5 砂粒飞行轨迹

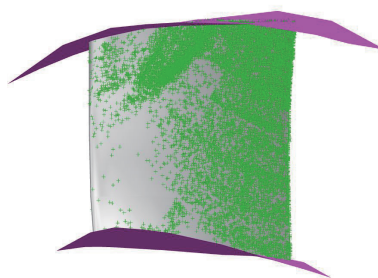
图6为砂粒在叶片表面碰撞点的位置分布。图

6(a)、图6(b)给出了叶片上碰撞点(灰色点)的疏密分布,图6(c)、图6(d)给出了砂粒在叶片表面各部位的撞击次数沿叶高、弦长的分布。

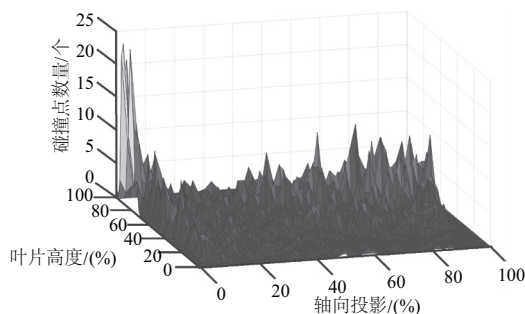
在图6(c)中,砂粒在导叶中的碰撞概率约为17.63%,碰撞点主要分布于叶片前缘、叶尖以及60%~100%叶高处。在图6(d)中,砂粒在动叶上的碰撞概率约为97.85%,碰撞点主要集中于70%叶高以上的位置。同时从图6(b)中也能看出,碰撞点在弦长方向上主要分布于叶片前缘位置。砂粒在叶片高度方向碰撞点的比例如图7所示,砂粒在70%及以上叶片高度处每隔10%叶高的碰撞概率均在10%以上。



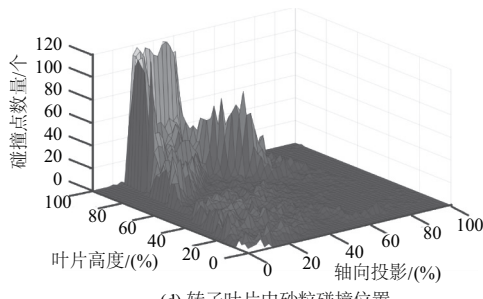
(a) 导流叶片中砂粒碰撞位置



(b) 转子叶片中砂粒碰撞位置



(c) 导流叶片中砂粒碰撞位置



(d) 转子叶片中砂粒碰撞位置

图6 砂粒碰撞位置

图8为砂粒在叶片碰撞位置处的速度分布。砂粒在导流叶片流场中随流特性较好,与导流叶片各个部位的碰

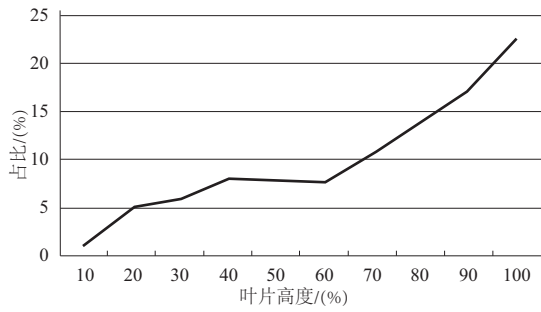
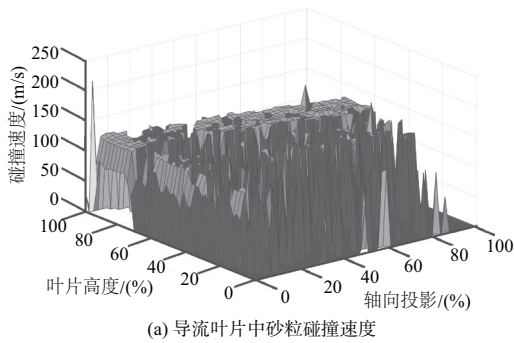
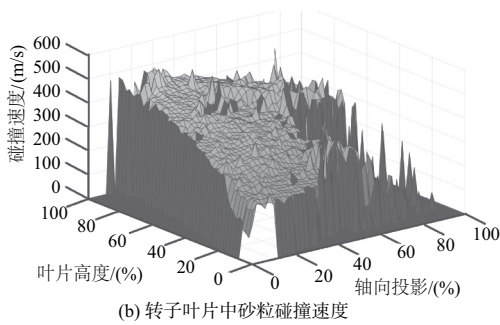


图7 动叶上砂粒在不同叶高处碰撞点比例

撞速度较为接近(约为 130 m/s)。砂粒进入转子叶片流道后,由于叶片的飞速旋转与离心力的作用,砂粒在叶尖附近位置与叶片有极高的碰撞速度,随着叶片高度的降低,碰撞速度逐渐下降,其速率分布如图9所示,平均碰撞速度呈线性降低,从 423.98 m/s 降至 215.06 m/s。同时由于在转子叶片的其他部位(顶端、前缘)也较为密集,因而这些部位受到的冲击损伤会更为严重。



(a) 导流叶片中砂粒碰撞速度



(b) 转子叶片中砂粒碰撞速度

图8 砂粒碰撞速度

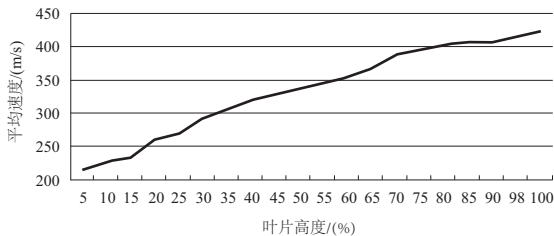
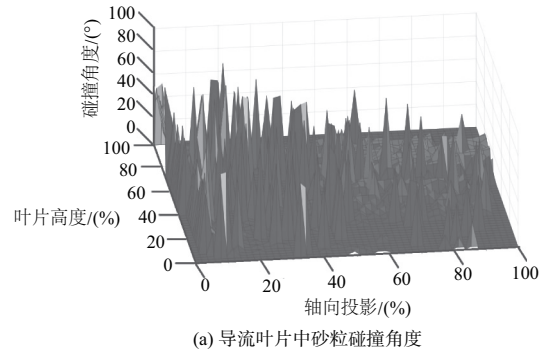


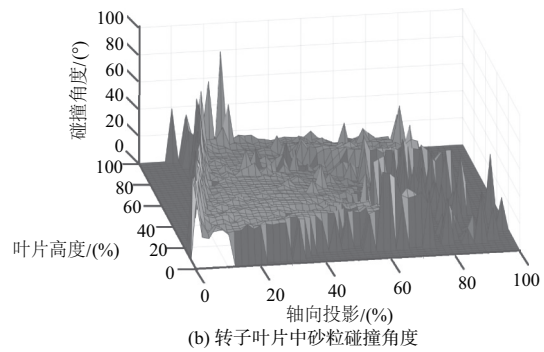
图9 动叶上不同叶高处碰撞速度

图10为砂粒与导叶、转子叶片各个碰撞部位的碰撞角度分布。砂粒在导流叶片流场中与叶片的碰撞概率较低,当发生碰撞时,碰撞角度在叶片弦长方向随着与叶片前缘距离的增加而降低。在转子叶片上,叶片前缘及叶

尖附近位置的砂粒碰撞角度高达 65°,而在其他部位的碰撞角度约为 25°。叶片前缘及叶尖附近位置在该角度高速碰撞下使得在该部位叶片受到的冲蚀损伤更为严重^[10]。



(a) 导流叶片中砂粒碰撞角度



(b) 转子叶片中砂粒碰撞角度

图10 砂粒碰撞角度

3 结语

本文通过对进入单级轴流压气机流道砂粒运动轨迹计算方法研究得到以下结论:

- 1) 导流叶片通道中砂粒运动速度在 100~150 m/s 范围内,与叶片碰撞角低于 60°。碰撞前后砂粒飞行速度变化较小,与叶片碰撞概率较低(约为 18%),对叶片造成的冲蚀损伤相对较小。转子叶片通道中,50%及以上叶高处砂粒与叶片的相对速度均在 350 m/s 以上,而较低叶片高度的砂粒相对速度在 220~350 m/s 内,叶片前缘及叶尖附近处碰撞角度较大(约为 65°)。同时由于砂粒与叶片的碰撞概率较大(约为 98%,特别是 70%叶高以上位置及叶片前缘处),对叶片造成的冲蚀损伤相对较大。

- 2) 利用单颗粒轨道模型结合数据库调用的方法对压气机流道中砂粒运动轨迹和碰撞位置数值模拟的计算效率较高。与现有研究结论相对比^[11-12],本研究方法计算结果趋势相同,误差较小。在数据库中碰撞反弹数据实时更新为可供调用的试验数据后,将大大提高计算精度,具有极高的实用性。针对不同型号的压气机乃至风扇、发动机,只需修改研究对象载入数据库中的流场参数、碰撞反弹参数以及模型参数即可直接编译获得砂粒飞行轨迹及碰撞位置,即可作为压气机内部砂粒运动轨迹及碰撞位置的研究方法。

(下转第 133 页)

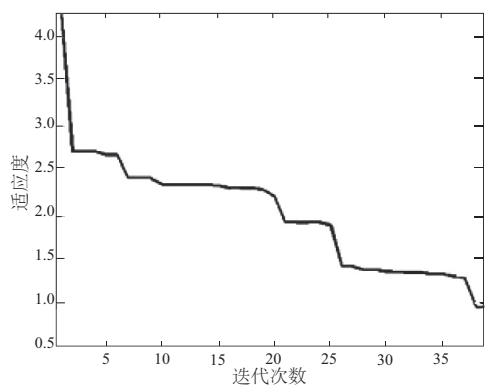


图3 贝叶斯粒子群算法性能指标变化图

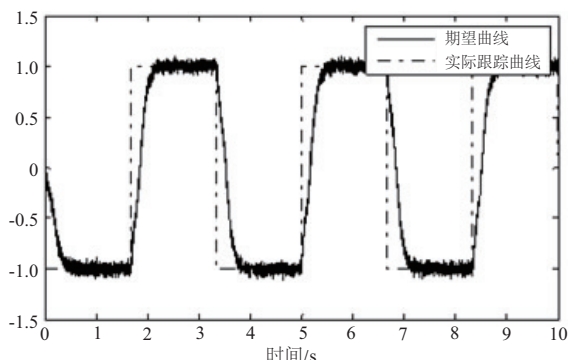


图4 贝叶斯粒子群优化权重矩阵优化跟踪曲线对比图

贝叶斯粒子群算法在优化之前对粒子进行了预处理,能够使得粒子在短时间内达到最优速度和移动方向。通过图3可以观察到,经过40次的迭代,粒子的移动速度与方向已经达到了稳定状态,这个也就预示着对控制权重矩阵的优化达到了最优状态。

由图4可以看到,通过贝叶斯粒子群方法能够对控制权重矩阵进行优化,贝叶斯粒子群方法能够逼近期望曲线

的变化,而且误差均在 μm 量级之内。因此,贝叶斯粒子群算法能够优化控制权重矩阵和增益矩阵 K ,提高系统的稳定性,超调小、响应速度快,优化前后的跟踪位置及控制输入基本一致。

4 结语

本文通过在传统粒子群算法中引入了贝叶斯思想,对粒子群寻优初始阶段进行了预处理,使得粒子能够按照最优的速度与方向移动,避免了传统粒子群算法中陷入最优解的弊端,并将该方法运用到控制权重矩阵的优化中,通过实验仿真验证了贝叶斯粒子群算法的有效性。实验证明:贝叶斯粒子群算法在控制权重矩阵的优化过程中能够满足性能指标要求,响应速度快,超调量小。

参考文献:

- [1] 张丽平. 粒子群优化算法的理论及实践[D]. 杭州:浙江大学,2005.
- [2] 陈富. 粒子群优化算法的改进研究及其在倒立摆控制系统中的应用[D]. 长沙:中南大学,2012.
- [3] 范娜,云庆夏. 粒子群优化算法及其应用[J]. 信息技术,2006(1):53-56.
- [4] 闫兴雪. 柔性结构控制算法的研究与应用[D]. 西安:西安电子科技大学,2014.
- [5] 康健,靳斌,段秀娟,等. 基于贝叶斯-粒子群算法的微电网优化运行[J]. 电力系统保护与控制,2018,12(46):32-41.
- [6] 褚灵伟,许延伟. 一种混合粒子群算法的贝叶斯网络优化模型[J]. 计算机时代,2014(9):31-32.
- [7] 汪春峰,吕军成. 学习贝叶斯网络结构的混合粒子群算法[J]. 科技导报,2013,31(22):50-55.
- [8] 尉永清,陈小雪,伊静,等. 基于混合粒子群优化的贝叶斯网络结构学习方法[J]. 小型微型计算机系统,2018,9(39):2060-2066.

收稿日期:2019-02-18

(上接第108页)

参考文献:

- [1] TABAKOFF W. Measurements of particles rebound characteristics on materials used in gas turbines[J]. Journal of Propulsion and Poewr,1991,7(5):805-813.
- [2] 吴铁鹰,赵梦熊. 颗粒-壁面碰撞建模与数据处理[J]. 振动工程学报,2014(4):589-597.
- [3] GHENAIET A. Numerical study of sand ingestion through a ventilating system[J]. Lecture Notes in Engineering & Computer Science,2009(1):101-132.
- [4] GHENAIET A, TAN S C, ELDER R L. Experimental investigation of axial fan erosion and performance degradation[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A Journal of Power & Energy,2004,218(6):437-450.
- [5] 孙露. 沙粒在风扇中的飞行轨迹模拟与研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2012:68.

- [6] 孙海鸥. 轴流压气机气固两相流及磨损特性数值模拟[J]. 哈尔滨工程大学学报,2018(2):310-316.
- [7] 昌泽舟,王建军, A. Berlemont. 颗粒间相互作用对稠密气固两相流影响[C]. 青岛:中国工程热物理学会,2001.
- [8] 曾卓雄. 可压密相气固两相湍流流动的数值模拟方法[J]. 西安交通大学学报,2000(10):76-79.
- [9] 昌泽舟, A Berlemont, G Gouesbet. 气固两相流中颗粒弥散的拉格朗日模拟[J]. 计算力学学报,2001(3):284-289.
- [10] 曾强. 气流通道中沙粒运动轨迹的数值模拟研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2013.
- [11] 高骏东. 钛合金叶片抗砂粒冲蚀性能研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2016.
- [12] 李本威,李冬,李姜华,等. 单级压气机性能衰退定量研究[J]. 航空动力学报,2010(7):1588-1594.

收稿日期:2019-03-08