

文章编号: 1674-8190(2024)03-120-15

直升机整体式惯性粒子分离器研究现状

张永利¹, 单小恬¹, 杜周^{1,2}, 刘存良³, 张常贤⁴

(1. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 阜新 123000)

(2. 清华大学 航空发动机研究院, 北京 100084)

(3. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710129)

(4. 中国航空发动机研究院, 北京 101304)

摘要: 整体式惯性粒子分离器是一种直升机进气防护装置, 其性能优异、应用广泛, 对于保护直升机发动机、延长其使用寿命具有重要意义。本文从 4 个方面对整体式惯性粒子分离器的研究现状进行归纳总结, 包括: 总结了现有直升机进气防护装置的类型及相关气动参数, 梳理了整体式惯性粒子分离器现有的研究方法及取得的相关成果, 分析了影响整体式惯性粒子分离器工作性能的因素, 并展望了整体式惯性粒子分离器未来的发展方向。研究成果可为今后开展整体式惯性粒子分离器研究及优化设计提供一定参考。

关键词: 整体式惯性粒子分离器; 研究方法; 影响因素; 分离效率; 进气总压损失

中图分类号: V275⁺.1

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.03.12

Review status of helicopter integral inertial particle separators

ZHANG Yongli¹, SHAN Xiaotian¹, DU Zhou^{1,2}, LIU Cunliang³, ZHANG Changxian⁴

(1. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

(2. Institute for Aero Engine, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(3. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

(4. Aero Engine Academy of China, Beijing 101304, China)

Abstract: The integral inertial particle separator is a helicopter air inlet protection device. It has excellent performance and wide application, which is of great significance to ensure the regular operation and improve the service life of helicopter engines. This paper summarizes the research progress of integral inertial particle separators, including the following aspects: the classification and aerodynamic parameters of the integral inertial particle separators are introduced. The research methods and their results of the integral inertial particle separators are sorted out. The factors affecting the performance of the integral inertial particle separators are summarized and analyzed. The future development of integral inertial particle separators is predicted. This paper can be the reference for future study and the guide to integral inertial particle separators' optimization design.

Key words: integral inertial particle separator; research method; factors affected; separation efficiency; total inlet pressure loss

收稿日期: 2023-03-16; 修回日期: 2023-05-24

基金项目: 国家自然科学基金(U2241268)

通信作者: 单小恬(1998-), 女, 硕士研究生。E-mail: 913368143@qq.com

引用格式: 张永利, 单小恬, 杜周, 等. 直升机整体式惯性粒子分离器研究现状[J]. 航空工程进展, 2024, 15(3): 120-134.

ZHANG Yongli, SHAN Xiaotian, DU Zhou, et al. Review status of helicopter integral inertial particle separators[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(3): 120-134. (in Chinese)

0 引言

现如今,中国航空科技发展迅速,航空发动机的重要性不言而喻。作为航空业的短板,直升机发动机的研究优先等级正在提高。直升机可以在多种环境下完成起飞和降落,具有良好的机动性。也正因如此,直升机在某些特殊情况下起降时,大量的外来颗粒物会被吸入发动机内。这些颗粒物的尺寸从微米到毫米量级不等,颗粒物的存在不仅会使压气机工作条件进一步恶化,还会加速机器零部件的磨损和腐蚀。其中较大尺寸的颗粒撞击压气机叶片,将造成叶片损伤,且剥脱的金属碎屑由于硬度大和伴有尖角存在,容易给下游的压气机和涡轮叶片带来较大损伤;而较小尺寸的颗粒则可能黏附于压气机叶片,扰乱其动态平衡,甚至会使叶片的实际型线发生改变,进而使压气机气动效率下降。另外,小尺度颗粒进入燃烧室和涡轮,还可能堵塞喷油口和气膜冷却孔,影响发动机性能,缩短其使用寿命^[1]。因此,安装进气防护装置对于保护直升机发动机正常工作有重要意义。目前,大部分直升机都采用了进气防护装置来防止气流中的细小粒子进入机体内部并沉积,进而保证飞行安全,提高整机可靠性,延长使用寿命。

自直升机发动机进气防护装置出现以来,国内外已有许多研究人员开展了相关研究^[1-3],随之产出了大量研究成果,对整体式惯性粒子分离器的已有研究成果进行合理梳理,有助于获得研究规律,突出当前研究中的不足及面临的挑战,为接下来的研究和发展提供参考。

本文对整体式惯性粒子分离器的研究现状进行分析,简要介绍整体式惯性粒子分离器的基本概念,从实验和数值模拟两个角度概述整体式惯性粒子分离器研究成果,总结影响其性能的主要因素,并对进一步研究工作进行探讨。

1 直升机进气防护装置分类

现有的直升机发动机进气防护装置主要分为3种类型:进气阻拦式过滤器(IBF)、涡旋管分离器(VTS)、整体式惯性粒子分离器(IPS)。3种进气防护装置实物如图1所示。

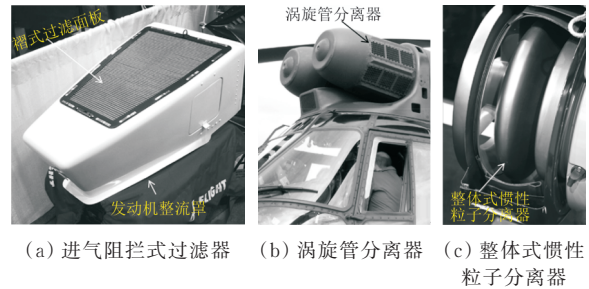


图1 直升机发动机进气防护装置实物图^[2]

Fig. 1 Helicopter engine air inlet preventer device physical image^[2]

进气阻拦式过滤器利用过滤介质黏附空气中的粒子,阻挡粒子进入发动机,其示意图如图2所示。其结构简单、经济实用、清除效率高,但存在使用寿命短、需要频繁清扫或更换等短板。该类分离器在早期的直升机中有所应用,例如美国的UH-1直升机、CH-46直升机和OH-6A直升机,法国的“云雀”“超黄蜂”等直升机也采用了该种分离装置。

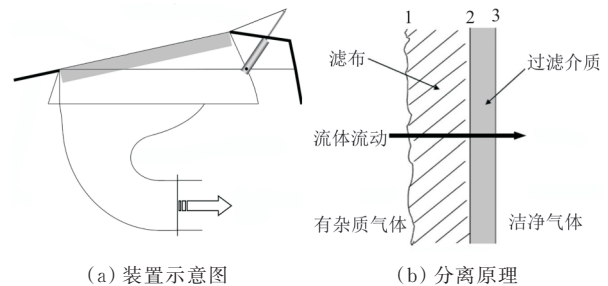
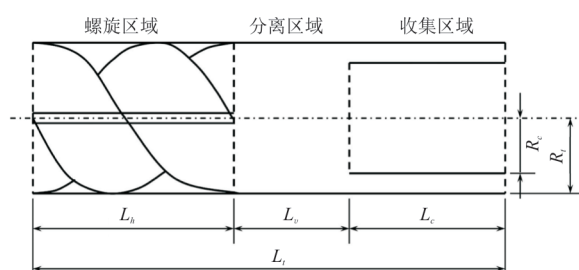


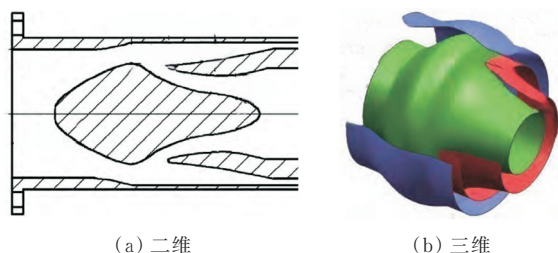
图2 进气阻拦式过滤器示意图^[4-5]

Fig. 2 Schematic diagram of inlet blocking filter^[4-5]

整体式惯性粒子分离器与涡旋管分离器均利用了粒子的惯性,通过粒子对壁面的反弹作用进行粒子分离。与整体式粒子分离器不同,涡旋管分离器需要单独设置,装于发动机进气口附近,涡旋管分离器截面如图3所示。当外界空气流入涡旋管分离器时,涡旋叶片的独特构型使砂粒带有离心力,配合排砂风扇,利用涡旋管的外通道将颗粒分离,这样便可以使清洁的空气通过涡旋管流入发动机。涡旋管分离器虽然分离效率高,但是缺点同样明显,即对迎风面积及安装体积的需求相对较大。“超美洲豹”直升机上就安装了该类型的粒子分离器。

图3 涡旋管分离器分离截面图^[5]Fig. 3 Schematic diagram of the separation of the vortex tube separator^[5]

整体式惯性粒子分离器是一种集成在发动机进气道中的进气防护装置^[2]。该类型的进气防护装置通过特殊的型面设计,使进气中的颗粒物在惯性和与壁面碰撞的双重影响下进入清除流路,进而排出发动机外,达到净化空气的效果。整体式惯性粒子分离器是发动机的一部分,与另外两种粒子分离器不同,不需要额外安装是它的优势之一,此外还具有重量轻、维护方便、发动机气动性能损失小以及工作稳定可靠等优点。因此在近代直升机中得到了广泛应用,常见于先进的涡轮轴发动机中。本文主要介绍和讨论整体式惯性粒子分离器(如图4所示),美国“黑鹰”直升机上就采用了这种粒子分离器。



(a) 二维

(b) 三维

图4 整体式惯性粒子分离器示意图^[6]Fig. 4 Schematic diagram of integral inertial particle separator^[6]

2 整体式惯性粒子分离器

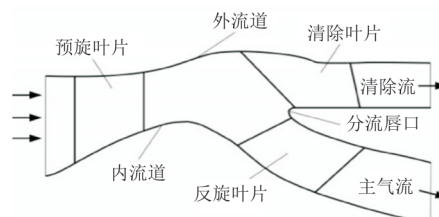
2.1 整体式惯性粒子分离器分类

整体式惯性粒子分离器分为预旋式和无旋式两种,分类根据进口段是否装配带有预旋角度的叶片进行。

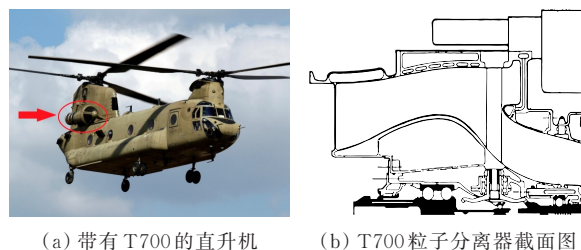
1) 预旋式粒子分离器

预旋叶片位于预旋式粒子分离器入口并有一定的预旋角度,可以使进入粒子分离器的空气和

杂质获得周向分速度。通过离心力和惯性的协同作用,空气中的粒子朝着流路外壁飞去,经过外侧的清除流路排至机外,分离后的洁净气流流经反旋叶片消除旋流,最终保持稳定流动。预旋式粒子分离器结构示意图如图5所示。

图5 预旋式粒子分离器结构示意图^[7]Fig. 5 Structure diagram of particle separator with pre-rotating blades^[7]

1975年,美国GE公司设计出了T700型预旋式粒子分离器^[8-9],T700整体式惯性粒子分离器示意图如图6所示。Duffy等^[8]对装配在T700发动机上的整体式惯性粒子分离器进行了包括流道设计、预旋叶片与反旋叶片设计、分离器改进、蜗壳设计等一系列研究工作;Drury^[10]分析了T700发动机安装位置与分离效率之间的关系,强调了粒子分离装置的有效性和必须性。



(a) 带有T700的直升机

(b) T700粒子分离器截面图

图6 T700整体式惯性粒子分离器示意图^[9]Fig. 6 Diagram of T700 integral inertial particle separator^[9]

Hamed等^[11-15]基于T700粒子分离器,对粒子轨迹和不同粒径粒子分离的机理、效率进行了相关理论研究,其研究的重点落在粒子运动轨迹以及粒子与壁面碰撞上,并未考虑叶片对流场的影响。

侯凌云等^[16]采用分块计算考虑叶片对流场的影响,数值模拟预旋式粒子分离器三维湍流有黏分叉流场,发现在预旋式粒子分离器中,弯曲分叉结构和预旋叶片形成的旋流都对粒子分离具有促进作用,使得粒子分离。

董晓婷^[17]研究发现,预旋式粒子分离器的分离效率和总压损失均会随着预旋叶片个数增多及角度增大而增大,并且预旋叶片的位置也对分离效率产生影响。尺寸较大的颗粒在进气道和预旋叶片的作用下更容易进入清除流路进而被分离,而尺寸较小的粒子则容易被气流带入主气流路而无法顺利分离^[18]。

预旋叶片增加了含砂粒气流的切向速度,由此增大了向外壁面输送砂粒时所需的离心力,这有助于完成砂粒的分离。然而,实际的预旋式粒子分离器不仅有预旋叶片,还在主流流路装有反旋叶片,在清除流路装有清除叶片,它们的叶片数目各不相同,不能在流动中形成一个通道。目前,大部分有关预旋式粒子分离器的数值模拟研究,为了便于计算,没有同时考虑3种叶片的影响,而是忽略了反旋叶片和清除叶片,仅考虑对预旋式粒子分离器分离效率影响最大的预旋叶片^[16,18],这对数值模拟结果的准确性会产生一定影响。在后续的预旋式粒子分离器数值模拟中,同时考虑三种叶片及其数目、位置和旋转角度等因素的影响,对于提高其计算准确性具有一定意义。

2) 无旋式粒子分离器

无旋式粒子分离器型面弯曲剧烈,依靠内外壁大转折面产生的反弹特性使砂粒进入清除流路中,实现沙尘等外物的清除。相对于预旋式粒子分离器而言,无旋式粒子分离器没有安装预旋叶片和反旋叶片,增加了进口流道的曲率和中心体内壁的鼓包高度,缩短了轴向长度。因此无旋式粒子分离器结构简单、附加流动阻力小,具有重量轻、成本低等优点,应用更为广泛,也更具研究价值^[19]。应用此类粒子分离器的发动机有美国Lycoming公司和P&W公司合作研制的T800发动机以及英国RR公司研制的GEM-2发动机等。

Vittal等^[20]研究了无旋式粒子分离器的设计过程和分析方法,提供了无旋式粒子分离器研究的前期数据;叶静等^[21]探讨了各设计要素对无旋式粒子分离器工作性能的影响,并建立了基于两相流的计算流体力学流道设计方法。

无旋式粒子分离器以流道型面的优化配置为主,来实现更高的砂粒分离效率。吴恒刚等^[22]、李洁琼等^[6]分别通过数值模拟和实验方法,对比了不同型面曲率下无旋式粒子分离器的性能,研究结果皆表明:型面曲率大的粒子分离器是分离小颗

粒的理想选择,而型面曲率小的粒子分离器则更适用于大颗粒的分离。

Higgins^[23]在无旋式粒子分离器基本构型的基础上提出了一种新型变几何方案,即可调节鼓包粒子分离器。该设计方案改变了粒子分离器原有的固定几何结构,用充气式气囊作内壁鼓包,以满足粒子分离器在各种工作条件下的使用需求:在高砂尘浓度环境下,可增大鼓包高度,以提升分离效率;而在低砂尘浓度环境下,鼓包高度可适当降低,以提升气流的气动性能,同时保持一定分离效率。凌械等^[24]提出一种带柔性可变形鼓包的粒子分离器的设计方案,并通过仿真方法对其工作特性进行研究,带柔性可变形鼓包的粒子分离器工作原理如图7所示。这种新型的变几何粒子分离器设计概念,或将成为无旋式粒子分离器未来发展的新方向。

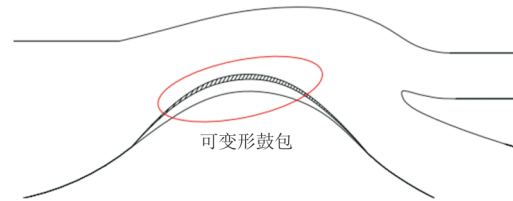


图7 带柔性可变形鼓包的粒子分离器工作原理示意图^[24]
Fig. 7 Schematic diagram of working principle of a particle separator with flexible bump^[24]

2.2 相关气动参数

1) 分离效率

分离效率是评价整体式惯性粒子分离器好坏的首要指标,分为浓度分离效率和质量分离效率。现有研究中使用的分离效率通常指质量分离效率,其定义为

$$\eta = \frac{N - N_1}{N} = \frac{N_2}{N} \times 100\% \quad (1)$$

式中: N 为单位时间进入粒子分离器的沙尘总质量; N_1 为单位时间由主气流路流出的沙尘质量; N_2 为单位时间由清除流道排出的沙尘质量。

2) 进气总压损失

进气总压损失对评价整体式惯性粒子分离器的经济性具有重要意义。总压损失越大,燃料消耗越多。通常表示为进出口相对总压差,其计算方法为

$$\bar{P} = \frac{\Delta P}{P_{in}} = \frac{P_{in} - P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2)$$

式中： P_{in} 为进气入口截面总压； P_{out} 为主气流路出口截面总压。

3) 扫气比

扫气比又称清除比,用 R_{sc} 表示,是影响分离器性能的重要因素之一,也是通过质量分离效率换算到浓度分离效率的桥梁。其大小反映了主气流路流量与清除流路流量的配比关系,定义为

$$R_{sc} = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} \times 100\% \quad (3)$$

式中： \dot{m}_1 为主气流流量； \dot{m}_2 为清除流流量。

3 研究方法

国内外研究粒子分离器、获得其相关信息,一般采用实验和数值模拟两种方法。对粒子分离器进行模型实验,能更准确直观地论证研究结果。而对粒子分离器进行数值模拟,则是快速、全面了解粒子分离器几何形状和操作条件对内部流场及分离效率影响的简便方法。这两种方法相辅相成,相互检验。

3.1 实验方法

实际中的整体式惯性粒子分离器通常集成为发动机进气道的一部分,且具有很高的内部流速,单独测试具有较大难度。国内外现有的粒子分离器实验设备大都只是用来量化其设计的总体性能^[25],例如,中国航空动力机械研究所的粒子分离器实验台,一般只用于检测产品的分离性能,无法获得清除流路、主气流路以及分离舌前后等流道内部的气流场和颗粒场的情况。

徐大成等^[7]通过砂尘试验系统,对试验过程中影响砂尘分离效率的各种因素进行研究,结果表明:砂尘在粒子分离器进口处分布的均匀性是影响砂尘试验结果的主要因素;关玉璞等^[26-27]通过外物冲击损伤试验方法,对鸟和金属块撞击粒子分离器涡流叶片的过程进行了研究;张蕊等^[28]开展了粒子分离器滑油换热特性试验,掌握了一套可用于粒子分离器换热结构的测试方法,获得了粒子分离器在典型工况下的换热特性。

Stiefel^[29]采用 T800 发动机进行结冰试验,在粒子分离器进气道下游支板发现有结冰现象存

在;Tabakoff等^[30-31]利用 LDV(激光多普勒测速仪)技术,分别在二维 LDV 和三维 LDV 系统下,研究粒子撞击不同材料壁面时的反弹规律;Barone等^[32]通过 PIV(粒子成像测速技术)对整体式惯性粒子分离器内部气砂两相流场进行可视化实验,对 3 种外壁面型线条件下,粒子分离器内流动结构进行比较,验证了清除流道口处存在典型回流涡。PIV 测试装置示意图如图 8 所示。由于粒子分离器的壁面在周向呈弯曲状态,使得 PIV 测试有一定困难,在测试中通常用矩形截面通道模型(如图 9 所示)代替环形通道。支明等^[33]采用矩形截面模型,通过 PIV 技术,分段测量流道各区域的流场并分析了模型中各个位置的流动特点;王彤等^[34-35]在整体式惯性粒子分离器弯曲通道模型中用 PIV 技术进行了内部流动测试,对清除流道流场特性进行了分析,研究结果为粒子分离器数值模拟和结构优化设计提供了依据。

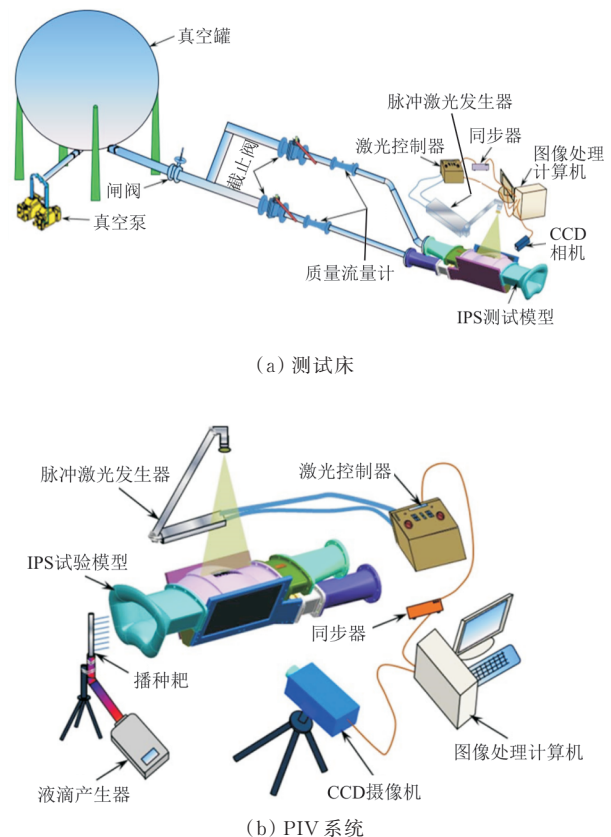
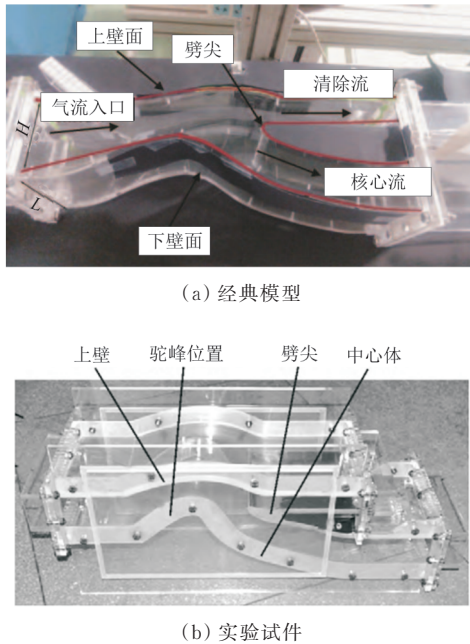


图 8 PIV 测试装置示意图^[36]

Fig. 8 Schematic diagram of PIV testing device^[36]

图9 简化的矩形截面模型^[33,35]Fig. 9 Simplified rectangular section model^[33,35]

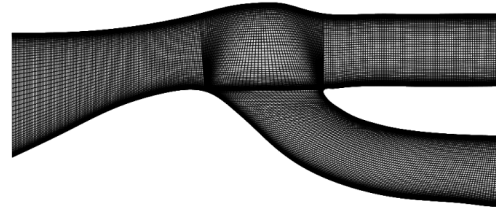
上述研究多是在粒子分离器二维结构模型基础上进行的,无法得到周向结构改变对分离效率造成的影响。而三维实验研究不仅能准确反映粒子分离器周向结构变化带来的影响,还能支撑三维数值模拟研究,因此粒子分离器的三维模型实验研究必不可少。李洁琼等^[6]首次开展粒子分离器三维模型实验,研究了特征参数与粒子分离器性能之间的关系,其研究成果可为三维数值模拟计算提供参考。

开展实验研究与数值模拟相比,成本较高、难度较大,但要验证目前直升机粒子分离器的数值方法、优化粒子分离系统,仍然需要有明确的实验数据^[37]。若缺乏实验测量数据的验证,则产品开发依据不足,数值模拟的可靠性难以保证。因此,粒子分离器实验研究的重要性不容忽视。

3.2 数值模拟方法

相比于实验,数值模拟方法简单易行,便于观测,更有益于对粒子分离器的特性形成规律认识。

当前粒子分离器的研究以数值计算为主,通过数值计算操作,可以反映粒子分离器几何结构及操作条件对其内部流场、分离效率等方面的影响。其二维建模及网格划分示意图如图10所示。常用的CFD仿真软件有FLUENT、CFX等。

图10 二维建模及网格划分示意图^[10]Fig. 10 Schematic diagram of 2D modeling and meshing^[10]

Saeed等^[38]采用多元分析方法进行建模,发展了对流场、粒子轨迹以及基于多段翼型的IPS系统冲击分析的数值计算工具及应用,但该计算工具对于粒子与壁面的碰撞缺乏合适的粒子反弹模型。在粒子分离器数值模拟的建模过程中,参数化建模可以快速生成粒子分离器的结构模型,便于研究不同结构粒子分离器之间的性能差异和优化设计,有利于粒子分离器的系列化发展。现有研究在参数化建模的基础上,将数值模拟与人工智能方法相结合,实现粒子分离器构型的优化。例如,于广元等^[39]利用4次样条曲线,参数化描述粒子分离器模型,建立了自动化仿真流程,基于椭球径向基函数神经网络代理模型,采用非支配排序遗传算法和序列二次规划算法进行全局多目标优化和局部优化;高彬彬等^[40-41]开发出分离器参数化造型软件,建立流道参数化模型,在数值模拟结果的基础上,利用神经网络建立流道型线和气动参数的非线性关系,并通过遗传算法得到了分离效率和总压损失的近似最优解。

使用结构复杂的三维粒子分离器计算模型,可以更加准确地得到粒子的运动轨迹^[42]。侯凌云等^[16]采用三维非正交曲线坐标系下壁面函数处理弯曲壁面,通过数值模拟捕捉三维湍流有黏分叉流场及三维砂粒运动状态;Taslim等^[43]通过求解三维N-S方程与拉格朗日守恒方程对发动机进口处的空气流动与粒子运动进行了数值研究;童悦等^[44]采用全三维黏性数值模拟,研究带扫气蜗壳的粒子分离器,总结出安装扫气蜗壳对粒子分离器内部流动特性的影响。带扫气蜗壳的粒子分离器三维模型如图11所示。董晓婷等^[18]进行了整体的三维数值计算,考虑进气道、预旋叶片等因素,使分流器处没有出现明显的回流区域,粒子的分离效率得到改善,粒子分离器内部流动数值模拟结果更加逼真。

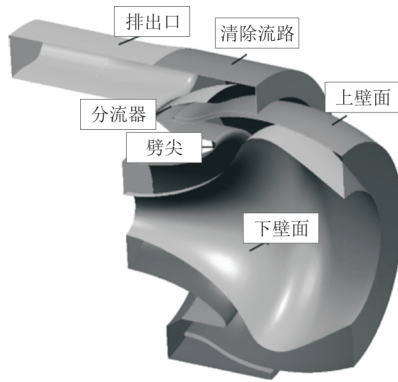


图 11 带扫气蜗壳的粒子分离器三维模型^[44]

Fig. 11 Three-dimensional model of inertial particle separator with scavenger scroll^[44]

刘海健等^[45]针对近年来新出现的可变形粒子分离器鼓包,建立了一种考虑帘线/橡胶之间剪切应变能的本构模型,实现对其复杂工况下力学行为的预测,为可变形粒子分离器鼓包有限元仿真分析奠定理论基础。

Vittal等^[20]首次采用贴体H-C型网格系统对二维轴对称粒子分离器进行数值模拟研究,但对流场的计算仍采用二维无黏流函数法;Zedan等^[46]采用椭圆形H网格,结合黏性N-S方程,对整体式惯性粒子分离器内部粒子流动进行了较为详尽的数值模拟。相比之下,黏性流动分析可以计算出边界层的分离现象和清除流路的回流现象,由此可快速测定分离效率和总压损失随气动设计参数发生的变化,有利于提高粒子分离器的数值计算精度和对粒子轨迹的预测精确度,继而发展高性能的粒子分离器^[15,46-47]。侯凌云等^[48]针对粒子分离器结构的特殊性,将多区域法和多重网格法结合,提出了多区域多重网格法,适用于一般曲线坐标系下交错网格布局的粒子分离器,提高了粒子分离器数值计算的速度和精度;徐弘历^[19]提出将多气路分区和高效拓扑结合,该方法有助于实现粒子分离器数值模拟过程中高质量网格划分,对精确化防冰数值模拟具有一定指导意义。

值得注意的是,在粒子分离器数值模拟计算过程中,反弹模型的选取至关重要^[21,49]。粒子在壁面上的反弹碰撞轨迹如图12所示。粒子分离效率与粒子反弹模型直接相关,选用不同的粒子反弹模型对砂尘运动轨迹和表面侵蚀特性的计算结果也均会造成影响^[50]。马松林等^[51]采用显式动力分

析有限元法,建立砂粒在不同条件下的反弹模型,为粒子分离器中砂尘运动轨迹预测提供了反弹特性相关的数据支持;吴铁鹰等^[52]使用LS-Dyna软件建模并划分网格,再通过ANSYS Mechanical Launcher求解器动态仿真,对颗粒-壁面碰撞反弹动力学过程进行了更加精确的仿真;张可可等^[53]分别采用自行建立的粒子与固体碰撞/概率反弹模型以及两种常用的粒子与固壁碰撞反弹模型进行数值模拟,并对计算结果进行对比,用3种不同反弹模型追踪粒径在 $30\ \mu\text{m}$ 以下的粒子,发现所得出的轨迹几乎没有差别,然而在预旋式粒子分离器的计算中,概率反弹模型具有精度优势。

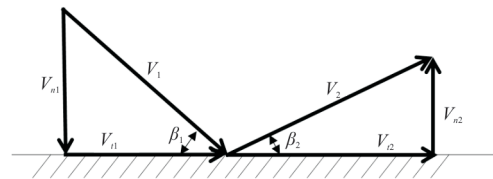


图 12 粒子在壁面上的反弹碰撞轨迹示意图^[10]

Fig. 12 Schematic diagram of sand particles colliding and rebounding on the wall^[10]

4 整体式惯性粒子分离器性能的影响因素

分离效率和进气总压损失是评价整体式惯性粒子分离器性能的两个重要参数,这两个参数对发动机的功率有直接影响。有关粒子分离器的优化设计,就是要在分离效率和总压损失这一对矛盾体内,寻找一个平衡点,在分离效率最大化的同时,保持进气总压损失在允许的范围之内。目前国外的标准一般将总压损失控制在3%以内。

4.1 结构参数

整体式惯性粒子分离器包括流路壁面(流道内壁、流道外壁)、叶片(预旋叶片、反旋叶片、清除叶片)以及分流器等组成部分。分叉处的两个流路分别为主气流路和清除流路,整体式惯性粒子分离器的简化几何结构如图13所示。粒子分离器的主要结构参数包括:流道进出口区域及流道内各典型截面区域的面积,流道内壁和外壁的形状,分流器的形状及其轴向、径向位置。

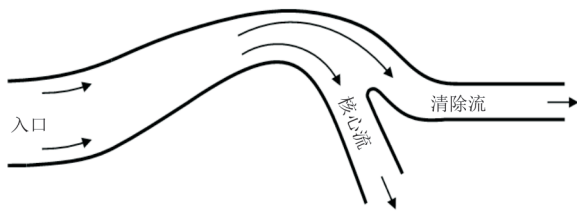


图 13 IPS 简化几何结构^[32]
Fig. 13 Geometry of IPS^[32]

流道内壁的形状一定程度上对粒子分离器的性能产生影响,粒子碰撞流道内壁的次数与分离效率正相关,流道内壁不仅起到引导气流转向的作用,还会影响碰撞后大粒子的运动趋势^[54]。流道内壁的最小进出口直径应根据分离器的特定几何约束和功能而定,在粒子分离器结构许可的限度内,直径越小越易产生强离心力场,粒子的分离效率越高。Ren C Q 等^[55]分析了内壁和流道高度降低对粒子分离器性能的影响,研究发现,具有较低内壁高度的模型比具有较低流道高度的模型性能更好。此外,流道内壁上的凹弧面会引发逆压力梯度,加大局部总压损失,因此,减小流道内壁面上的凹弧面区域或曲率有助于降低流道的总压损失^[21]。

流道外壁是构成流道的基本元素。为了增大分离效率、减少流体沿壁的分散,进而减少流道的压力损失,流道外壁的设计应有利于与壁面碰撞的粒子反弹和聚集到清除流道,但这两者互相冲突。已有的研究表明,增加流道外壁曲率会增加气流沿壁的发散量和粒子碰撞后的分散度,使流场的总压损失增加,与此同时,促进粒子反弹并进入清除流路,有助于提高分离效率^[21]。Barone^[32]通过试验更改清除流道入口外壁面的几何形状,发现在低清除比流态下,该位置的大回流区对小粒径砂尘的分离效率影响明显,回流区越靠近下游,砂尘分离效率越高。

在粒子分离器的结构中,分流器起了至关重要的作用。它连同流道的内壁和外壁,形成了主气流路和清除流路。分流器的设计对分离效率及总压损失等性能指标有直接影响,其唇口的形状及其与流道内壁凸峰值之间的轴、径向相对距离均会影响粒子分离器性能。叶静等^[21]的研究结果表明,分流器唇口处的气流攻角随着唇口曲率的增大而增大,流体经过分流后,加速度增大且转向

加剧,由此提高了分流后的流体速度和分散度,进而加大了总压损失。分流器轴向移动,流道内的减速扩压段长度增加,流体的流动速度减小,流道内的压力损失减小;分流器在一定范围内纵向移动,压力损失以及分流后流体绕流量在一定范围内减小,继续纵向移动,唇口处气流攻角变大,压力损失增加。吴恒刚等^[56]进一步得出:劈尖轴向移动,对粒子分离器总压损失产生的影响较大;劈尖纵向移动,对分离效率产生的影响较大,且劈尖位置变化时,大粒径粒子分离效率变化范围较大。Breitman 等^[25]发现分流器劈尖形状影响流道出口性能,因此,要选择合适的劈尖形状还需要考虑粒子分离器工况。况开鑫等^[57]研究了分流器唇口处与内壁面最高点轴、径向距离比值对粒子分离器性能的影响,结果表明,比值较大时,随着轴向距离的增加,总压损失呈下降趋势,且下降梯度较大;比值较小时,总压损失先降后升。变化前后分流器的位置如图 14 所示。其在分流器唇口上所做的变化有效降低了总压损失及唇口处最高马赫数,改善了分离效率。两种入口形状下速度和静压分布情况如图 15 所示(1 ft=0.304 8 m, 1 psi=6 894.76 Pa)。乔松松等^[58]研究表明,分流器径向位置还对粒子分离器雷达散射特性具有一定影响。

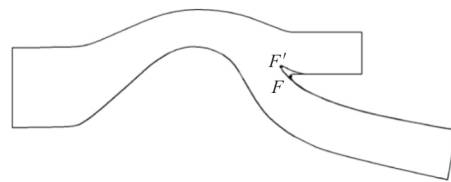
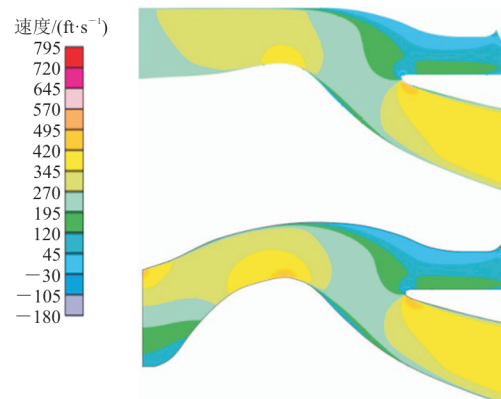
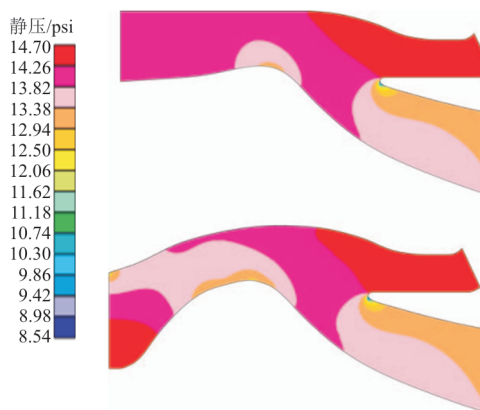


图 14 变化前后分流器位置示意图^[57]
Fig. 14 Diagram of the shunt position before and after the change^[57]



(a) 速度云图



(b) 静压云图

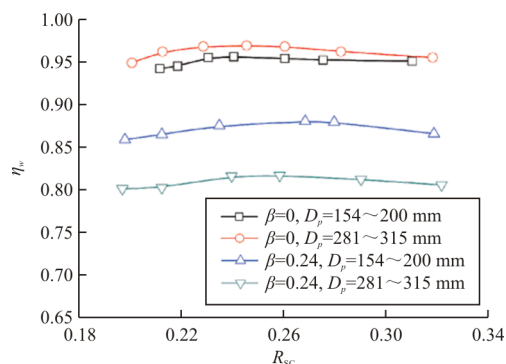
图 15 两种入口形状下速度和静压分布情况^[43]Fig. 15 Distribution of velocity and static pressure for two inlet shapes^[43]

综上所述,在粒子分离器优化设计过程中,应综合考虑各种结构参数对粒子分离器性能的影响,以获得最佳的优化结果。

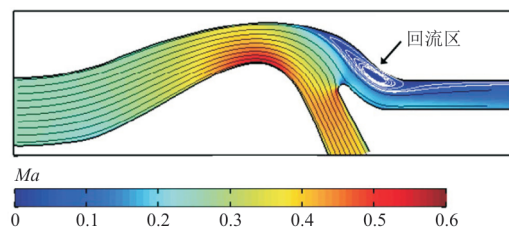
4.2 工作条件

整体式惯性粒子分离器在复杂气动环境和非均匀砂尘分布场下工作。旋翼气流中含有的大量颗粒粉尘,使得粒子分离器内流场结构十分复杂。不同工况下直升机的飞行来流与旋翼下洗气流相叠加,形成复杂的上下游条件,对气动力特性具有显著影响,会引起分离效率及总压损失等性能参数的变化。研究不同工况下粒子分离器工作性能的变化,有利于更好地应用粒子分离器,提升其使用价值。

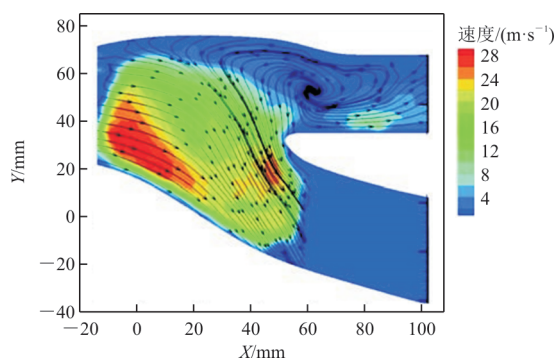
扫气比越大,沿主气流路的质量流量越小,主流对粒子的作用越小,粒子越朝外围偏移,分离效率越高,这一特性在颗粒粒径较小时尤其明显^[33,50]。李洁琼等^[6]进一步发现分离效率随 R_{sc} 增大而先升高后降低,并且该规律与砂粒粒径大小无关,其研究中分离效率随 R_{sc} 变化曲线如图 16 所示。扫气比增大还意味着清除流道流动损失加剧,总压损失增大,经济性降低。吴恒刚等^[22]发现,当进气流量不变时,随 R_{sc} 的增加,进气总压损失减小,且砂粒粒径越大,总压损失越小。一般设计时, R_{sc} 选定在 16%~22% 之间^[59]。

图 16 分离效率随 R_{sc} 变化曲线^[6]Fig. 16 Separation efficiency curve along with the change of R_{sc} ^[6]

R_{sc} 还是内部流场以及回流涡尺度的主要影响因素。回流涡存在会导致小粒径颗粒分离效率降低,回流区域示意图如图 17 所示。王彤等^[35]研究发现,不同 R_{sc} 下,产生的回流涡结构不同。 R_{sc} 值越大,回流涡占清除流道面积越小。回流涡的尺度越小,对颗粒的分离阻碍作用越小,分离效率越高^[21,32]。



(a) 回流区马赫数云图



(b) 回流涡诱导主流道流场

图 17 回流区域示意图^[32,35]Fig. 17 Schematic diagram of reflux area^[32,35]

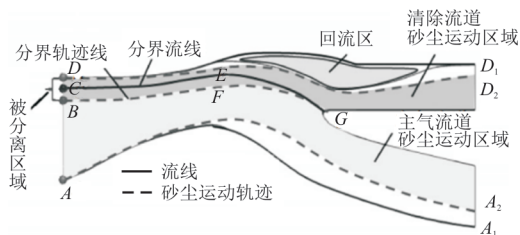
此外,粒子分离器性能受各流路气体流量、速度以及均匀度等因素影响。进气流量增大,分离效率增大^[17]。主流路流量增大,分离效率减小^[6]。进口来流不均匀,粒子分离器主流出口、扫气流出

口的总压损失均会加大^[60]。气流速度增大,颗粒分布系数增加,粒子(特别是小粒子)易于分离,分离效率基本呈线性增长,总压损失也相应地增加^[59]。由此可见,当直升机航速较高时,小尺度颗粒的分离效果较好;但当直升机航速较低,尤其在近地面悬停状态下,粒子分离器进气速度较低,可通过减少通道的截面积,提高气流速度,以改善小尺度颗粒分离效果^[61-62]。

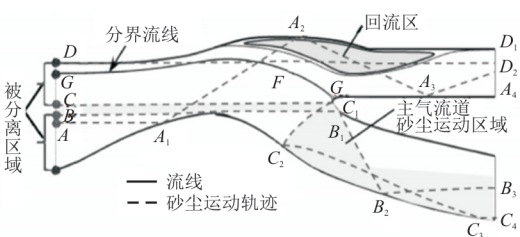
4.3 沙尘粒径

AC粗砂和C规范砂为两种标准沙尘,二者的分离效率是评价粒子分离器分离效率的标准。AC粗尘和C规范砂分离效率的差异由平均粒径的差异决定。AC粗尘的平均粒径约为 30 μm ,而C级砂的平均粒径约为 200 μm 。AC粗尘的粒径较小,运动轨迹受气体作用力的影响较大,因而受扫气比影响较明显;而C级砂的粒径较大,运动轨迹主要受惯性力作用,砂粒撞击壁面后进入清除流路,故受扫气比的影响不大。

早期研究结果表明:分离效率随粒子尺寸的增大而增大^[47]。而后研究进一步发现,当粒子增大到一定粒径,分离效率会有所下降^[18]。这是由于不同粒径范围内的颗粒运动分离机理不同,不同粒径粒子分离机理如图 18 所示。



(a) $d=5 \mu\text{m}$



(b) $d=500 \mu\text{m}$

图 18 不同粒径粒子分离机理^[9]

Fig. 18 Separation mechanism of different particle sizes^[9]

Hamed 等^[11]研究得出,大粒径粒子分离主要取决于流道结构,通过与壁面碰撞反射完成;小粒径粒子分离则主要是流场的气动作用,这使得小粒径粒子很难达到大粒径粒子的分离效果,部分微小粒子还会进入到主气流路中。王彤等^[35]研究发现,15 μm 以下粒径的小颗粒运动主要由气体的曳力作用,因为其质量较低,流动性较好;粒径大于 15 μm 的颗粒由于惯性较大,与壁面之间有碰撞的情况发生,其运动主要由自身惯性及其与壁面的碰撞决定,粒径越大,与壁面的碰撞现象就越明显。对此,袁永青等^[63]针对性地提出了提高大粒径沙尘分离效率的方法,对鼓包迎风面等关键区域的壁面材料采取特殊布置;程飞等^[64]针对小粒径沙尘运动受气动力影响这一特点,引入局部射流改变粒子分离器内局部流场,形成一个可变直径的气动鼓包,实现对小粒径沙尘分离效率的提升,引入射流前后的小粒径沙尘分离效率对比如图 19 所示。

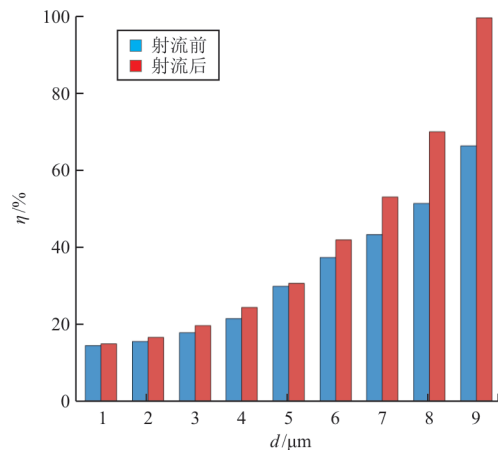


图 19 引入射流前后的小粒径沙尘分离效率^[64]

Fig. 19 Separation efficiencies of small sands before and after the introduction of jet^[64]

综上所述,粒径决定了粒子分离器内粒子的分离方式。因此,在计算过程中,采用不同的反弹模型对分离性能的计算结果有较大的影响;在粒子分离器优化设计过程中,改变流道布置方式和改变壁面材料是提高粒子分离器分离效率的两种有效途径。

5 研究展望

1) 粒子分离器表现出的性能与其内部的结构息息相关。现有关于粒子分离器的优化设计,大

多是在整体式惯性粒子分离器经典结构形式的基础上,通过调整内部的结构参数实现。然而,随着设计理念的发展和对粒子分离器性能的更高要求,单一的粒子分离器结构形式已经难以满足需求。为发展更高性能的粒子分离器,可以考虑打破原有结构形式的桎梏,在整体式粒子分离器上组合其他结构,甚至将不同种类的粒子分离器以并联或串联的方式结合,研发出新的结构形式。通用电气公司在整体式粒子分离器上增加一个增压级,设计出一种新型进气粒子分离器。增压级由动力涡轮驱动,置于发动机进口处。在叶片的作用下,气流加速流动,提高了分离效率^[65]。Snyde等^[66]将两个粒子分离器上下并联组合,使气流分为两部分后,分别通过两个粒子分离器,以解决气流过大带来的粒子随流性过强问题,有利于提高分离效率。但此方案具有体积大、重量重、结构复杂、安装困难等弊端,不利于直升机降低能耗,因而还未得到广泛应用。从现有研究成果来看,发展多种结构组合的粒子分离器,能够提升粒子分离器的性能,但在研究过程中,还应注重控制整体结构的体积和重量,以保证设计方案的实用性。

2) 直升机通常工作在较为恶劣的环境当中。不同工作环境下,直升机对粒子分离器性能的要求不同,粒子分离器在不同工况下能实现的效果也不同。因此,进一步发展粒子分离器需要考虑到环境的需求。这可以通过研发可调节、可拆卸的粒子分离器来实现。在不同的环境条件下,将粒子分离器调节成不同的结构,甚至在更好的工作条件下直接拆卸,以优化功率和油耗。通用电气公司研发的整体轴流式粒子分离器,即为一种可根据需要拆下的进气粒子分离器,并且在拆卸时,无需拆卸其他机匣,不破坏发动机轴线,也不影响发动机转子平衡^[67]。在此基础上,近些年还出现了变几何粒子分离器的概念。波音公司通过记忆合金、蜗杆和层叠板改变粒子分离器的几何结构,实现变几何设计方案^[68];凌斌等^[24]则是采用柔性结构,通过改变气压调节粒子分离器的鼓包高度。这种变几何粒子分离器设计概念理论上可以实现粒子分离器几何结构随环境变化的实时调节,进而使其适应直升机的不同工作需求。但目

前,变几何粒子分离器设计方案在实际制造和使用上仍存在技术难题,因而并未得到广泛应用。解决当前存在的技术问题,使变几何粒子分离器设计概念得以实际应用,对粒子分离设备的研究和发展乃至直升机性能的提升具有重要意义。

3) 现有粒子分离器的研究方法主要采用数值模拟方法,在此基础上通过模型试验来验证补充。然而,实验和数值模拟方法均具有一定局限性,且长此以往,粒子分离器相关研究难以产出突破性成果。因此,发展粒子分离器的新研究方法具有重要意义。研究指出,流体力学计算或试验中所产生的数据具有天生的大数据特点,通过神经网络、强化学习等机器学习方法利用这些数据,缓解理论和方法层面对人脑的依赖,将可能成为一种新的研究范式^[69]。现有粒子分离器的研究,已有应用神经网络的成功先例^[39-41],但若想进一步实现智能化,逐步摆脱对人工干预的依赖,则可以尝试使用深度学习方法。与机器学习相比,深度学习的模型更加复杂,需要更大的数据量,对于非线性问题处理的能力较强,且不需人为干预参数。目前,深度学习在压气机叶型优化设计^[70]、气动特性预测^[71]、翼型流场预测^[72]等方面已有应用,该方法可行性已经得到印证。因此,可尝试将深度学习应用于粒子分离器的研究当中,实现对粒子分离器性能的快速预测以及优化设计,促进粒子分离器的进一步发展,使其发展顺应时代的潮流与方向。

6 结束语

本文针对整体式惯性粒子分离器的研究现状进行分析,简要介绍了整体式惯性粒子分离器的基本概念,从实验和数值模拟两个角度概述整体式惯性粒子分离器研究成果,根据现有研究成果总结了影响其性能的主要因素,并对整体式惯性粒子分离器未来的发展方向进行了展望。在未来,整体式惯性粒子分离器的结构形式将不仅局限于经典构型,而是发展出多种结构组合、可调节、可拆卸的粒子分离器。另外,随着人工智能的发展,已有将数值模拟与深度学习相结合应用于航空领域相关研究中的成功案例,可将此方法类比应用到粒子分离器的相关研究中,紧跟时代发

展潮流,为粒子分离器发展带来更广阔的前景。

参考文献

- [1] 李立国,王锁芳. 直升机发动机的进气防护[M]. 北京:国防工业出版社,2009.
LI Liguó, WANG Suofang. Inlet prevent of the helicopter engine [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009. (in Chinese)
- [2] 陈亮. 直升机发动机粒子分离装置研究综述[J]. 科技风, 2018(26): 166-167,175.
CHEN Liang. Review of helicopter engine particle separation device[J]. Science and Technology Wind, 2018(26): 166-167,175. (in Chinese)
- [3] 范文正,于海滨. 直升机进气防护装置的现状和发展趋势[J]. 航空科学技术, 2000(1): 31-32.
FAN Wenzheng, YU Haibin. Status and trends of the inlet preventer of helicopter[J]. Aeronautical Science and Technology, 2000(1): 31-32. (in Chinese)
- [4] FILIPPONE A, BOJDO N. Turboshaft engine air particle separation[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2010, 46(5/6): 224-245.
- [5] BOJDO N, FILIPPONE A. Comparative study of helicopter engine particle separators[J]. Journal of Aircraft, 2014, 51(3): 1030-1042.
- [6] 李洁琼,王锁芳,董伟林,等. 整体式粒子分离器性能的试验研究[J]. 推进技术, 2016, 37(9): 1617-1623.
LI Jieqiong, WANG Suofang, DONG Weilin, et al. Experimental study on performance of inertial particle separator [J]. Journal of Propulsion Technology, 2016, 37(9): 1617-1623. (in Chinese)
- [7] 徐大成,陈冰. 粒子分离器沙尘分离效率试验参数影响分析[J]. 航空发动机, 2021, 47(6): 63-68.
XU Dacheng, CHEN Bing. Influence analysis of test parameters on sand dust separation efficiency of particle separator [J]. Aeroengine, 2021, 47(6): 63-68. (in Chinese)
- [8] DUFFY R J, SHATTUCK B F. Integral engine inlet particle separator(Volume 2)—design guide: AMRDL-TR-75-31B[R]. USA: NASA, 1975.
- [9] DU Z, MA Y L, XU Q Y, et al. Sand discharge simulation and flow path optimization of a particle separator[J]. Entropy, 2023, 25(1): 147-158.
- [10] DRURY E A. Design of an inlet air cleaner for the black hawk helicopter auxiliary power unit (APU): No. 871809 [R]. USA: SAE Technical Paper, 1987.
- [11] HAMED A. Particle dynamics of inlet flow fields with swirling vanes[J]. Journal of Aircraft, 1982, 19(9): 707-712.
- [12] HAMED A. Solid particle dynamic behavior through twisted blade rows[J]. Journal of Fluids Engineering, 1984, 106(3): 251-256.
- [13] HAMED A. Effect of particle characteristics on trajectories and blade impact patterns[J]. Journal of Fluids Engineering, 1988, 110(1): 33-37.
- [14] HAMED A. An investigation in the variance in particle surface interactions and their effects in gas turbines[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1992, 114: 7-16.
- [15] HAMED A, JUN Y D, YEUN J J. Particle dynamics simulations in inlet separator with an experimentally based bounce model[J]. Journal of Propulsion and Power, 1995, 11(2): 230-235.
- [16] 侯凌云,严传俊. 直升机粒子分离器三维两相流场的数值模拟[J]. 航空动力学报, 2000(2): 215-218.
HOU Lingyun, YAN Chuanjun. Numerical simulation of 3-D two phase flowfield in inlet particle separator for helicopter [J]. Journal of Aerospace Power, 2000(2): 215-218. (in Chinese)
- [17] 董晓婷. 有叶片粒子分离器性能研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2009.
DONG Xiaoting. Characteristic study on inertial particle separator with vanes[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009. (in Chinese)
- [18] 董晓婷,王锁芳. 有叶片整体式粒子分离器三维两相流数值模拟[J]. 机床与液压, 2008(10): 136-139.
DONG Xiaoting, WANG Suofang. Numerical simulation of three-dimensions two-phase flow in inlet particle [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2008(10): 136-139. (in Chinese)
- [19] 徐弘历. 粒子分离器复杂热气防冰问题的网格划分研究[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(22): 13-16.
XU Hongli. Research on meshing of complex hot air anti icing in particle separator[J]. Technology Innovation and Application, 2022, 12(22): 13-16. (in Chinese)
- [20] VITTAL B, TIPTON D, BENNETT W. Development of an advanced vaneless inlet particle separator for helicopter engines[J]. Journal of Propulsion and Power, 1986, 2(5): 438-444.
- [21] 叶静,胡柏安,熊焰. 涡轴发动机无叶片粒子分离器流道设计[J]. 现代机械, 2007(2): 39-42.
YE Jing, HU Baian, XIONG Yan. Flow path design of vaneless particle separator for turbo shaft engine[J]. Modern Machinery, 2007(2): 39-42. (in Chinese)
- [22] 吴恒刚,王锁芳. 整体式粒子分离器数值模拟[J]. 航空学报, 2007, 28(5): 1073-1079.
WU Henggang, WANG Suofang. Numerical simulation of inertial particle separator[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(5): 1073-1079. (in Chinese)
- [23] HIGGINS T J. Adaptive inertial particle separator: EP1908939[P]. 2008-04-09.
- [24] 凌斌,谭慧俊,陈昊,等. 带柔性可变形鼓包的粒子分离器

- 的工作特性研究[C]//中国力学大会. 北京: 中国力学学会, 2017: 1211-1222.
- LING Yu, TAN Huijun, CHEN Hao, et al. Study on the characteristics of particle separator with flexible bump[C]// The Chinese Mechanics Conference. Beijing: The Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2017: 1211-1222. (in Chinese)
- [25] BREITMAN D S, DUECK E G, HABASHI W G. Analysis of a split-flow inertial particle separator by finite elements [J]. *Journal of Aircraft*, 1985, 22(2): 135-140.
- [26] 关玉璞, 张在坤, 赵振华, 等. 粒子分离器涡流叶片鸟撞击损伤试验[J]. *航空动力学报*, 2007(12): 2094-2100.
- GUAN Yupu, ZHANG Zaikun, ZHAO Zhenhua, et al. Experimental study on bird damage of vortex vane in the particle separator[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2007(12): 2094-2100. (in Chinese)
- [27] 关玉璞, 王君, 赵振华, 等. 粒子分离器涡形叶片金属块撞击损伤研究[J]. *机械科学与技术*, 2008(9): 1187-1190.
- GUAN Yupu, WANG Jun, ZHAO Zhenhua, et al. Investigation of metalwork impact damage to the volute vane in a particle separator[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2008(9): 1187-1190. (in Chinese)
- [28] 张蕊, 李旺. 粒子分离器滑油换热结构的散热性能研究[J]. *科学技术创新*, 2019(22): 65-66.
- ZHANG Rui, LI Wang. Study on heat dissipation performance of the particle separator slip oil heat transfer structure [J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2019(22): 65-66. (in Chinese)
- [29] STIEFEL W. Environmental icing test of T800 helicopter engine with integral inlet particle separator[C]// 25th Joint Propulsion Conference. US: U. S. Army, 1989: 2324-2335.
- [30] TABAKOFF W. Measured particle rebound characteristics on materials used in gas turbines[C]// AIAA 24th Thermophysics Conference. US: AIAA, 1989: 12-14.
- [31] EROGLU H, TABAKOFF W. 3-D LDV measurements of particle rebound characteristics[C]// 29th Aerospace Sciences Meeting. [S. l. : s. n.], 1991: 11.
- [32] BARONE D, LOTH E, SNYDER P. Efficiency of an inertial particle separator[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2015, 31(4): 997-1002.
- [33] 支明, 李维, 王彤. 惯性粒子分离器流场特性的 PIV 试验研究[J]. *风机技术*, 2017, 59(2): 56-60,70.
- ZHI Ming, LI Wei, WANG Tong. PIV measurements of the flow field characteristics in an inertial particle separator [J]. *Chinese Journal of Turbomachinery*, 2017, 59(2): 56-60,70. (in Chinese)
- [34] WANG T, SUN L L, GU C. Measurement and analysis on flow structure of inertial particle separator[C]// Fluids Engineering Division Summer Meeting. USA: American Society of Mechanical Engineers, 2015: V01AT32A002.
- [35] 王彤, 孙亮亮, 邵昱昌. 惯性粒子分离器清除流道 PIV 测量与分析[J]. *航空学报*, 2016, 37(10): 2961-2969.
- WANG Tong, SUN Liangliang, SHAO Yuchang. PIV test and flow analysis of scavenge passage in inertial particle separator [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(10): 2961-2969. (in Chinese)
- [36] CHEN H, TAN H J, YUAN Y Q, et al. Separated flows in bifurcated region of a vaneless inertial particle separator [J]. *Journal of Aircraft*, 2017, 54(3): 1234-1237.
- [37] JIANG L, BENNER M, BIRD J. Assessment of scavenge efficiency for a helicopter particle separation system [J]. *AIAA Journal*, 2011, 111(10): 1123-1201.
- [38] SAEED F, AL-GARNI A Z. Analysis method for inertial particle separator [J]. *Journal of Aircraft*, 2007, 44(4): 1150-1158.
- [39] 于广元, 雷雨冰. 基于混合优化算法的无叶片粒子分离器优化设计[J]. *航空动力学报*, 2013, 28(8): 1858-1864.
- YU Guangyuan, LEI Yubing. Optimization design of vaneless inlet particle separator based on hybrid algorithm [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2013, 28(8): 1858-1864. (in Chinese)
- [40] 高彬彬, 王彤, 傅耀, 等. 惯性粒子分离器流道型线分析与改进[J]. *热能动力工程*, 2012, 27(5): 566-571,624-625.
- GAO Binbin, WANG Tong, FU Yao. Analysis and improvement of the profile of an inertia particle separator[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2012, 27(5): 566-571,624-625. (in Chinese)
- [41] 高彬彬. 直升机惯性粒子分离器流道结构型线分析与优化[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- GAO Binbin. Analysis and optimization of the flow channel structure profile of helicopter inertial particle separators[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012. (in Chinese)
- [42] KIM J, BREER M, GASS J, et al. Sand separator efficiency calculation for the JVX tilt rotor aircraft inlet[J]. *American Helicopter Society*, 1986, 2: 955-965.
- [43] TASLIM M E, KHANICHEH A, SPRING S. A numerical study of sand separation applicable to engine inlet particle separator systems [J]. *Journal of the American Helicopter Society*, 2009, 54(4): 042001.
- [44] 童悦, 谭慧俊, 曾平君. 带扫气蜗壳的整体式惯性粒子分离器仿真[J]. *航空动力学报*, 2013, 28(5): 1125-1133.
- TONG Yue, TAN Huijun, ZENG Pingjun. Numerical simulation of inertial particle separator with scavenge scroll [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2013, 28(5): 1125-1133. (in Chinese)

- [45] 刘海健, 崔海涛, 张宏建, 等. 粒子分离器鼓包柔性复合材料的本构模型研究[J]. 推进技术, 2019, 40(8): 1869-1875.
LIU Haijian, CUI Haitao, ZHANG Hongjian, et al. A constitutive model of flexible composites used in bump of particle separator[J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(8): 1869-1875. (in Chinese)
- [46] ZEDAN M, MOSTAFA A, HARTMAN P, et al. Viscous flow analysis of advanced particle separators[J]. Journal of Propulsion and Power, 1992, 8(4): 843-848.
- [47] 侯凌云, 严传俊. 二维粒子分离器的流场及分离效率的数值模拟[J]. 航空动力学报, 1997(4): 39-41, 101-102.
HOU Lingyun, YAN Chuanjun. Numerical simulation of two-dimensional flowfield in particle separator[J]. Journal of Aerospace Power, 1997(4): 39-41, 101-102. (in Chinese)
- [48] 侯凌云, 严传俊. 多区域多重网格法在直升机粒子分离器中的应用[J]. 航空学报, 2000, 43(3): 238-240.
HOU Lingyun, YAN Chuanjun. Application of multiblock/multigrid method to inlet particle separator in helicopter[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2000, 43(3): 238-240. (in Chinese)
- [49] 牛佳佳, 王锁芳, 董伟林, 等. 反弹特性对惯性粒子分离器效率的影响[J]. 动力工程学报, 2018, 38(7): 545-551.
NIU Jiajia, WANG Suofang, DONG Weilin, et al. Influence of rebound characteristics on the separation efficiency of an inertia particle separator[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2018, 38(7): 545-551. (in Chinese)
- [50] HAMED A, KUHN T P. Effects of variational particle restitution characteristics on turbomachinery erosion[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power: Transactions of the ASME, 1995, 117(3): 432-440.
- [51] 马松林, 赵振华, 颜诚, 等. 沙尘在典型金属壁面上的反弹特性仿真研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(1): 142-149.
MA Songlin, ZHAO Zhenhua, YAN Cheng, et al. Simulation study of rebound characteristics of sand and dust on typical metal wall[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(1): 142-149. (in Chinese)
- [52] 吴铁鹰, 赵梦熊. 颗粒一壁面碰撞建模与数据处理[J]. 振动工程学报, 2014, 27(4): 589-597.
WU Tieying, ZHAO Mengxiong. Data processing and modeling of particle-wall collision[J]. Journal of Vibration Engineering, 2014, 27(4): 589-597. (in Chinese)
- [53] 张可可, 胡海洋, 王强. 基于概率反弹碰撞模型的进气粒子分离器两相流数值模拟[J]. 航空动力学报, 2017, 32(2): 382-389.
ZHANG Keke, HU Haiyang, WANG Qiang. Numerical simulation of two-phase flow in inlet particle separator based on probabilistic bounce model[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(2): 382-389. (in Chinese)
- [54] DE LA CALZADA P, VAZQUEZ R, FERNANDEZ F, et al. Particle dynamics simulation for aeroengine intake design[R]. Barcelona: Industria De Turbo Propulsores Madrid (Spain) Aerothermal and Systems, 1999.
- [55] REN C Q, WANG Q, ZHANG D W. Multivariant performance study of vaneless integral particle separator[J]. Procedia Engineering, 2011, 24: 743-748.
- [56] 吴恒刚, 王锁芳. 劈尖位置对整体式粒子分离器性能的影响研究[C]// 第六届动力年会论文集(下). 南京: 南京航空航天大学, 2006: 581-587.
WU Henggang, WANG Suofang. Study on the effect of split tip position on the performance of integral particle separator[C]// Proceedings of the Sixth Annual Power Conference (Next). Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006: 581-587. (in Chinese)
- [57] 况开鑫, 王锁芳. 分流器对进气粒子分离器性能的影响[J]. 航空动力学报, 2012, 27(7): 1542-1548.
KUANG Kaixin, WANG Suofang. Effect of splitter on performance of inlet particle separator[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(7): 1542-1548. (in Chinese)
- [58] 乔松松, 杨青真, 杨涛, 等. 整体式惯性粒子分离器雷达散射特性数值仿真[J]. 计算机仿真, 2012, 29(8): 35-39, 264.
QIAO Songsong, YANG Qingzhen, YANG Tao, et al. Numerical simulation of radar cross section for inertial particle separator[J]. Computer Simulation, 2012, 29(8): 35-39, 264. (in Chinese)
- [59] 吴恒刚. 无叶片整体式粒子分离器性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
WU Henggang. Characteristic study on vaneless integral particle separator[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)
- [60] 曾平君, 孙姝, 黄河峡, 等. 直升机/粒子分离器一体化流场特性: 前进比的影响[J]. 航空动力学报, 2014, 29(4): 858-866.
ZENG Pingjun, SUN Shu, HUANG Hexia, et al. Integrated flow field characteristics of helicopter/particle separator: influence of advance ratio[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(4): 858-866. (in Chinese)
- [61] 许峰, 王彤, 傅耀. 弯管内小尺度颗粒运动的数值模拟与分析[J]. 四川兵工学报, 2010, 31(2): 74-77.
XU Feng, WANG Tong, FU Yao. Numerical simulation of small-scale particle motion in the bent pipe[J]. Journal of Sichuan Military Engineering, 2010, 31(2): 74-77. (in Chinese)
- [62] 许峰, 王彤, 谷传纲, 等. 带射流方腔内气固流动实验与模拟[J]. 煤炭技术, 2010, 29(10): 8-10.

- XU Feng, WANG Tong, GU Chuangang, et al. Experiment and simulation for gas-particle in cubic duct with jet flow[J]. *Coal Technology*, 2010, 29(10): 8-10. (in Chinese)
- [63] 袁永青, 谭慧俊, 陈昊. 采用非均匀反弹特性壁面的粒子分离器研究[J]. *航空动力学报*, 2018, 33(1): 108-115.
- YUAN Yongqing, TAN Huijun, CHEN Hao, et al. Investigation of a type of inertial particle separator based on surfaces with different rebounding characteristics [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2018, 33(1): 108-115. (in Chinese)
- [64] 程飞, 孙姝, 谢买祥, 等. 基于局部射流提升粒子分离器分砂性能的方法[J]. *航空动力学报*, 2023, 38(6): 1414-1422.
- CHENG Fei, SUN Shu, XIE Maixiang, et al. Method of improving sand separation performance of particle separator based on local jet[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2023, 38(6): 1414-1422. (in Chinese)
- [65] QUINN J. Rapid technology insertion into the T700 growth engines [C] // *Annual Forum Proceedings-American Helicopter Society*. USA: American Helicopter Society, 1997: 33-36.
- [66] SNYDE R, PHILI P, HAROL D. Particle separators for gas turbine engines: EP1893862[P]. 2014-05-21.
- [67] 张建华. 涡轴发动机进气粒子分离器的发展[C]// *中国航空学会第七届动力年会*. 贵阳: 中国航空学会, 2010: 1-4.
- ZHANG Jianhua. Development of intake particle separator for turboshaft engines[C]// *The 7th Power Annual Conference of CSAA*. Guiyang: CSAA, 2010: 1-4. (in Chinese)
- [68] HARTMAN P A. High particle separation efficiency system: US6702873[P]. 2004-03-09.
- [69] 张伟伟, 寇家庆, 刘溢浪. 智能赋能流体力学展望[J]. *航空学报*, 2021, 42(4): 26-71.
- ZHANG Weiwei, KOU Jiaqing, LIU Yilang. Prospect of intelligent enabling fluid mechanics[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(4): 26-71. (in Chinese)
- [70] 杜周, 马玉林, 徐全勇, 等. 基于 ResNet 数据驱动的压气机叶型优化[J]. *航空动力学报*, 2023, 38(7): 1592-1603.
- DU Zhou, MA Yulin, XU Quanyong, et al. Optimization of compressor blade profile based on ResNet data drive [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2023, 38(7): 1592-1603. (in Chinese)
- [71] 杜周, 徐全勇, 宋振寿, 等. 基于深度学习的压气机叶型气动特性预测[J]. *航空动力学报*, 2023, 38(9): 2251-2260.
- DU Zhou, XU Quanyong, SONG Zhenshou, et al. Prediction of aerodynamic characteristics of compressor blade profile based on deep learning[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2023, 38(9): 2251-2260. (in Chinese)
- [72] SEKAR V, JIANG Q, SHU C, et al. Fast flow field prediction over airfoils using deep learning approach[J]. *Physics of Fluids*, 2019, 31(5): 057103.

(编辑:马文静)