

# 基于旋流分离器的气液分离数值模拟研究

王瑾程,韩东,李世瑞,汪胜,何伟峰,郑明瑞,高斯杰

(南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016)

**摘要:**采用轴流式旋流分离器分离通入压缩机的蒸汽夹带液滴,选用欧拉-欧拉多相流模型和雷诺应力湍流模型的数值模拟方法,研究叶片出口角和分离段长径比对分离性能的影响,详细描述了流场特征。结果表明:叶片出口角 $>20^\circ$ 时,减小其角度可有效提高分离效率,对粒径 $>5\ \mu\text{m}$ 液滴的分离效率可达95%以上;分离段长径比对分离效率几乎没有影响,设计时可适当减小。分离效率的提高可以减少液滴对压缩机的损害,提高运行的安全性。

**关键词:**蒸汽;液滴;旋流分离器;数值模拟;分离效率

**中图分类号:**TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)03-0101-05

## Numerical Simulation of Vapor-liquid Separation Based on Cyclone Separator

WANG Jincheng, HAN Dong, LI Shirui, WANG Sheng, HE Weifeng, ZHENG Mingrui, GAO Sijie

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

**Abstract:** An axial flow cyclone separator is employed to separate the droplets entrained by the steam flowing into the compressor. The Eulerian-Eulerian approach and Reynolds stress model are combined by numerical simulation to investigate the effects of the vane exit angle and the length of separation section on the separation performance and describe flow field characteristics in the cyclone in detail. The research results demonstrate that the separation efficiency can be effectively improved by reducing the angle when vane exit angle is  $>20^\circ$ , with separation efficiency of droplet of particle size  $>5\ \mu\text{m}$  higher than 95%. Since the length of separation section has hardly any effect on the separation efficiency, its length can be moderately reduced in design. The improvement of separation efficiency can effectively reduce the damage to compressor from droplets and enhance operation safety.

**Keywords:** steam; droplet; cyclone separator; numerical simulation; separation efficiency

## 0 引言

蒸汽机械再压缩机技术(MVR),是指重新利用其自身二次蒸汽的能量,减少从外界获取能源的一种节能技术,其基本原理是将蒸发器中产生的原本需要冷却水冷凝的二次蒸汽,经压缩机增压后,再作为热源进入加热室循环蒸发<sup>[1-2]</sup>。在蒸发过程中,蒸汽在沸腾时难免夹带出部分溶液。若长期将这类蒸汽直接通入压缩机,将会对压缩机产生气蚀影响,导致疲劳失效,造成严重的损坏。因此,气液分离器是该过程中必不可少的设备,分离器通常有旋流分离器、丝网和折流板等类型。旋流分离器由于其结构简单,体积小,无相对运动部件的设备,能满足不同生产中的特殊需求,所以被广泛应用于工程领域,它可以减少制造及维护成本,提高空间利用率。

旋流分离器可分为3种:Stairmand旋风分离器、气液圆柱旋流器和轴流式旋流分离器<sup>[3]</sup>。相比切向进气的旋流分离器,轴向进气的轴流式旋流分离器具有单元体积小、压力损失小、处理气体量大的特点,并且由于轴向进气不改变主流的运动方向,其工艺布局更为合理<sup>[4]</sup>。随着计算流体力学(CFD)的发展,相比于实验,CFD能够通过模拟得到更多流场内部细节,并节省时间和实验成本。所

以许多研究人员已采用CFD来研究旋流分离器的性能,并对其结构进行优化。王鲁平<sup>[5]</sup>通过数值模拟和实验方法,主要针对叶片内准线方程,研究了叶片参数变化对轴流式旋流分离器压力损失和分离效率的影响,分析总结了不同叶片的性能特点,为轴流式旋流分离器导流叶片的设计提供了指导;韩传军等<sup>[6]</sup>以油气田输气站除粉尘为背景,通过使用3种不同的导向叶片,对比了不同叶片数对旋流管内分离性能的影响,结果表明分离效率和压降会随叶片数量的增加而增大,并且当叶片数大于4时分离效率增长缓慢;MAO Y Q等<sup>[7]</sup>通过正交实验设计方法研究了主要结构参数对旋流分离器性能的影响,并提出一种新的旋流分离器优化设计,通过CFD仿真测试其流动特性,改善了粮仓粉尘分离器的性能;TANG Y F等<sup>[8]</sup>对不同导流叶片数量的旋流分离器模型进行CFD数值模拟;并考虑了侵蚀的影响,综合评估得出8叶片的旋流分离器是最优设计;LI J等<sup>[9]</sup>使用响应曲面法,对4个重要结构参数进行研究,通过数值模拟和实验得到了在压降和分离效率之间权衡的优化设计。

目前大多数轴流式旋流分离器的研究都集中在除尘、净化气体方面,而适用于蒸发浓缩系统中分离蒸汽夹带液滴研究的文献很少。因此,本文研究的目的是分析轴流式

**基金项目:**南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金立项资助项目(kfj20200214)

**第一作者简介:**王瑾程(1996—),男,福建三明人,硕士研究生,研究方向为工程热物理。

旋流分离器内的流场信息,以提高蒸发浓缩系统的效率,减少夹带液滴对压缩机的损伤。本文分析主要结构参数对轴流式旋流分离器性能的影响,展示分离器的速度分布、压力分布和分离效率,可为轴流式旋流分离器设计提供参考。

## 1 模型与方法

### 1.1 模型建立

本文所使用的轴流式旋流分离器原始设计模型如图1所示,其参数如表1所示。旋流分离器由装有导向叶片的导流锥以及排气管组成,排气管与旋流管之间的间隙为排液口。水蒸汽夹带液滴进入旋流分离器,气液混合物流经导流段,在叶片导流的作用下形成旋流。由于离心力的差异,液滴相比于水蒸气更容易被甩向壁面,并通过排液口排出,蒸汽和部分残留液滴则通过排气管离开旋流管。本文采用圆弧函数型叶片。

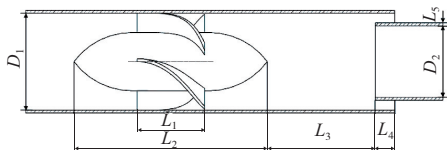


图1 轴流式旋流分离器模型

表1 旋流分离器参数表

符号	参数	值
$D_1$	旋流管直径/mm	50
$D_2$	排气管直径/mm	40
$L_1$	叶片长度/mm	35
$L_2$	导流锥长度/mm	100
$L_3$	分离段长度/mm	75~175
$L_4$	排气管嵌入深度/mm	10
$L_5$	管壁厚度/mm	1.5
$\beta$	叶片出口角/(°)	20~40
$n$	叶片数	4

### 1.2 数学模型与边界条件

由于流体在旋流分离器分离过程中压力和温度的变化很小,所以在模拟中将流体视为不可压缩流体。雷诺应力模型适用于模拟旋流分离器中的强旋流,该模型可以很好地捕捉湍流涡以及速度分布,能提供很高的预测精度<sup>[10]</sup>。多相流模型可分为欧拉-拉格朗日法和欧拉-欧拉法两种。在由流体和分散相组成的弥散多相流体系中,欧拉-拉格朗日法将分散相视为离散介质处理,而欧拉-欧拉法将分散相作为拟连续介质<sup>[11]</sup>,求解过程中不对每个分散相颗粒的运动进行追踪,对计算机的要求远小于欧拉-拉格朗日法,也更能适应工程计算的需要<sup>[12]</sup>。因此,本文采用雷诺应力模型与欧拉-欧拉多相流模型相结合的方法对旋流分离器内的流动进行模拟。

本文模拟了温度为333.15 K下饱和水蒸气与饱和水的分离过程。参考REFPROP数据库,温度为333.15 K饱

和水蒸气对应的操作压力为0.019 95 MPa,饱和水蒸气与水的物性如表2所示。

表2 水的物性参数

状态	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	动力黏度/( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )
水蒸气	0.130 4	$10.85 \times 10^{-6}$
液态水	983.2	$466.02 \times 10^{-6}$

排气管出口和排液口设置为环境压力,即表压为0 Pa,液相体积分数为1%,当液滴与壁碰撞时发生反射<sup>[13]</sup>,恢复系数设定为0.97。

### 1.3 网格无关性验证

本文所研究模型采用ICEM CFD软件进行网格划分,如图2所示。由于旋流管内的流动十分复杂,为了保证网格质量、提高计算效率以及减少计算的发散,采用结构化网格来划分计算域。为了节省计算成本,确保模拟结果的准确性,本文探究了6组不同网格数 $n$ 的模型,模拟的切向速度变化以及压降对比结果如图3所示。计算结果表明,采用网格数 $n$ 为50万的方案即可表征流动特性。

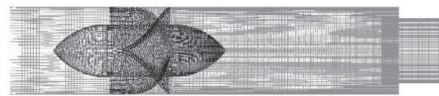
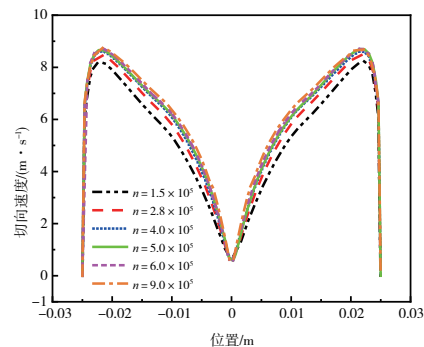
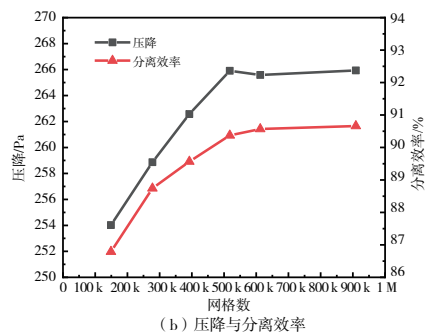


图2 结构化网格模型



(a)  $z=175$  mm截面处切向速度分布



(b) 压降与分离效率

图3 网格无关性验证图

### 1.4 模型验证

现有关于轴流式旋流分离器可参考的实验数据很少,满晓伟<sup>[14]</sup>在大气压下对空气-水两相进行了轴流式旋流分离器实验,为数值模拟的验证提供了珍贵的实验数据。

如图4(a)所示,对比实验中不同流量下测得的压降,最大相对误差为8.93%;如图4(b)所示,对比实验中 $x=0$  mm、平面上 $z=50$  mm的切向速度,结果表明数值模拟与实验的速度分布具有良好一致性,以此验证了本研究建立的数值计算模型的准确性。

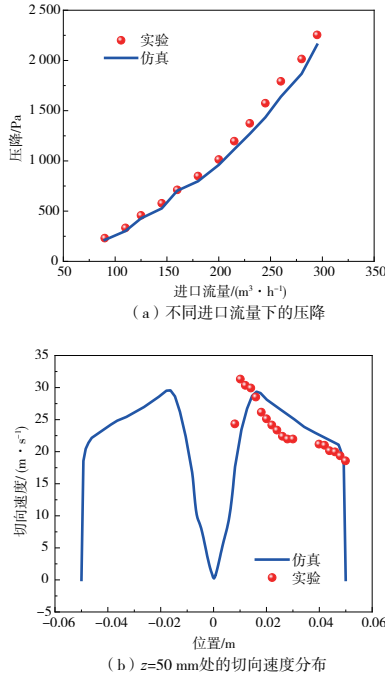


图4 模型验证图

## 2 结果与分析

本文定义分离段长径比为分离段长度 $L_3$ 与旋流管直径 $D_1$ 的比值,通过改变分离段长径比 $A$ 以及叶片出口角度 $\beta$ ,分析进口速度 $5$  m/s的条件下不同结构参数旋流分离器的流动特性。分离段长径比取值分别为 $A=1.5、2.0、2.5、3.0$ 和 $3.5$ ;叶片出口角度取值为 $\beta=20^\circ、25^\circ、30^\circ、35^\circ$ 和 $40^\circ$ 。以此对比旋流分离器25个结构的分离性能。

### 2.1 单管气相流场

叶片出口处( $z=125$  mm)径向截面的切向速度分布如图5所示,切向速度在径向上呈现对称的双峰分布。由于壁面的黏性作用,靠近壁面边界有一个极大的速度梯度,使壁面处的速度降为0,并且可以发现速度峰值均出现在与排气管边界同样的径向位置。图5(a)展示了叶片出口处不同叶片出口角度下的切向速度分布。由于叶片出口角度决定了流体流动的方向,随着叶片出口角度的增大,速度偏转到切向的部分降低,所以切向速度的峰值也会降低,切向速度峰值在叶片出口角度为 $20^\circ$ 时最大,可达到 $14$  m/s左右。图5(b)展示了叶片出口处不同分离段长径比下的切向速度分布,可以发现各长径比下的切向速度分布和峰值基本保持一致。

图6、图7为 $yz$ 截面上的切向速度分布云图。气流在导流叶片中部和尾部开始产生明显的切向速度,并且一直延续至排液口处,整体呈现对称分布,产生的最大切向速度近似有进口速度的4倍,表明旋流管内形成了强离心力

场,这种旋转效果使得液滴从气流中分离出来。图6展示了 $yz$ 截面上不同叶片出口角下的切向速度分布,显而易见,叶片出口处的切向速度随着角度的增大而降低,且大角度下的切向速度在分离段内沿程衰减更为明显。图7为不同分离段长径比下 $yz$ 截面上的切向速度分布,可以发现不同长径比结构在同一高度上的切向速度分布几乎一致,旋流管分离段延长的部分仅为切向速度分布的延伸且持续衰减,并不影响之前的部分。所以分离段长径比对切向速度几乎没有影响。

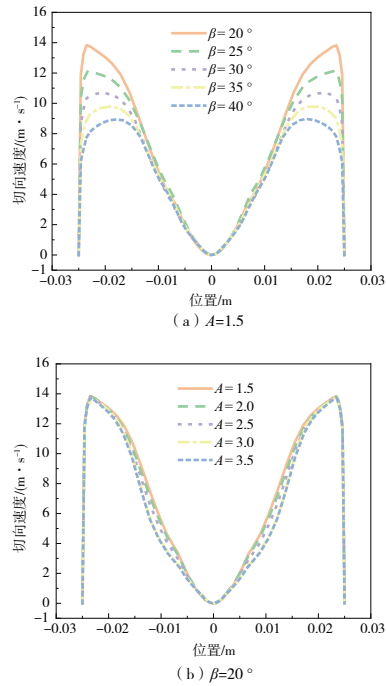


图5 不同结构参数对切向速度的影响

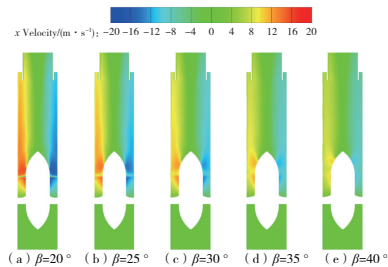


图6 不同叶片出口角下的切向速度( $A=1.5$ )

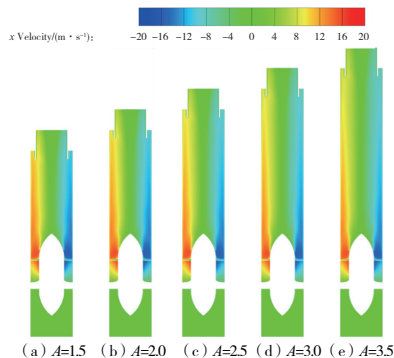


图7 不同分离段长径比下的切向速度( $\beta=20^\circ$ )

图8对比了不同叶片出口角度 $\beta$ 以及分离段长径比 $A$ 下旋流管内压降的变化趋势。由于压降与切向速度的大小密切相关,导流叶片后的切向速度会随着叶片出口角的增大而减小,流体势能转换为动能的比例降低,所以压降随着叶片出口角的增大呈下降趋势。而导流叶片后的切向速度基本不随分离段长径比的变化而变化,所以分离段长径比对压降的影响很小。图9为 $yz$ 平面不同叶片出口角下的静压分布。可以发现,压力近似呈对称分布,管内静压值沿轴向呈逐渐降低的趋势,在导流锥尾部的分离段内存在明显的低压区,最大压力梯度出现在旋流叶片段。这是由于静压在这转化为动压,从而使旋流速度增大。在分离段内径向方向,由于局部湍流强度的影响,压力由壁面向内逐渐减小。旋流管入口处的压力值随着叶片出口角的增大而降低。由此可见,压力的变化与速度的变化具有一致性。

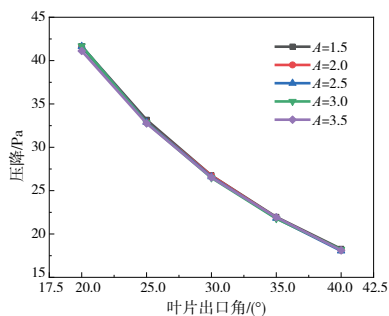


图8 不同叶片出口角及分离段长径比对旋流管内压降的影响

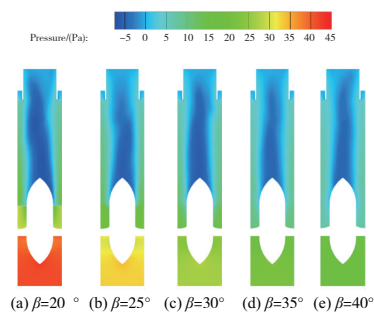


图9 不同叶片出口角下的静压云图( $A=1.5$ )

## 2.2 单管结构参数对旋流分离器分离性能的影响

研究轴流式旋流分离器的目的是优化结构,从而提高分离效率,并尽可能降低旋流管压降和成本。分离效率定义为从排气口排出液相的质量流量与进口液相质量流量的比值。如图10(a)—图10(e)所示,分别为旋流管对不同颗粒直径 $d$ 的液滴分离效率。分离效率随结构参数的变化趋势与压降的变化趋势相似,分离效率随着叶片出口角度 $\beta$ 的增大而减小,而分离段长径比 $A$ 的变化对分离效率的影响不大。这是由于气相和液相的质量差异,液相在旋流中所受离心力更大,所以较小的叶片出口角度有更强的诱导作用,可以实现更高的切向速度,获得更强的离心力场,有利于实现液滴的高效分离。而在叶片出口角度较大的情况下,大分离段长径的分离效率才显现出了略微的

优势。结果表明:增长分离段的长度对改善分离效率的能力很有限,并且通过对比可以发现,旋流管对小粒径液滴的分离效率要低于对大粒径液滴的分离效率。这是由于更大粒径的液滴具有更大的质量,其在流经导叶后的旋流过程中所受离心力更大,大粒径液滴能获得更大的动能而更容易被甩向壁面,所以旋流管对较大粒径的液滴具有更好的分离性能,对直径为 $10\ \mu\text{m}$ 液滴的分离效率能接近100%。

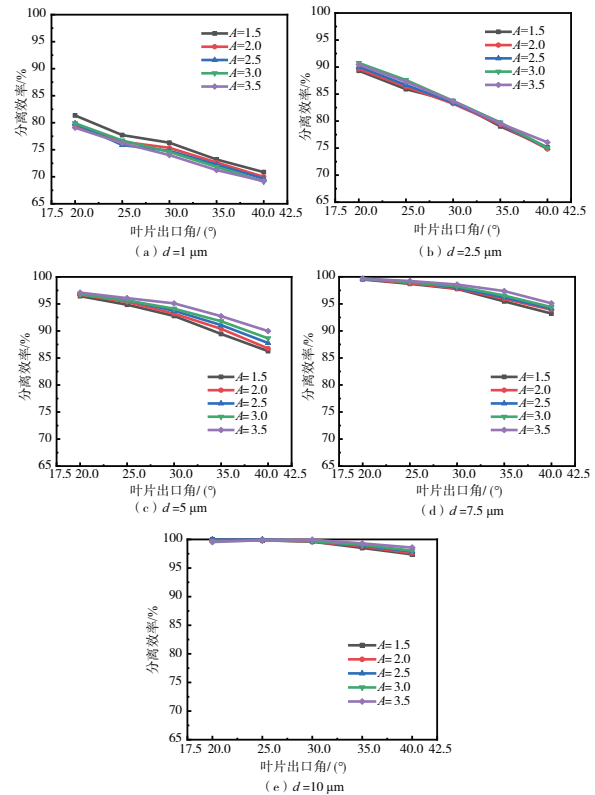


图10 不同叶片出口角以及分离段长径比对分离效率的影响

## 3 结语

为了防止液滴对压缩机的损害,使用气液分离器去除蒸汽中夹带的液滴是必要的。本文采用欧拉-欧拉多相流模型和雷诺应力湍流模型,模拟轴流式旋流分离器中气液两相的流体动力学,分析了流场情况,评估了结构参数对性能的影响,为轴流式旋流分离器的设计提供指导。主要结论如下所述。

1) 导流叶片是使流体旋流的核心部件,其可使静压转换为动压。压力的变化与速度的变化具有一致性,切向速度在径向上呈现对称的双峰分布,速度峰值出现在与排气管边界同样的径向位置上。

2) 叶片出口角度决定了流体切向速度的大小,并影响旋流的离心力。受质量的影响,大粒径液滴在旋流中受到的离心力更强,分离器对其的分离效果更好。当叶片出口角为 $20^\circ$ 时,分离器对粒径 $>5\ \mu\text{m}$ 液滴的分离效率可达95%以上。

3) 分离段长径比对旋流器的分离效率几乎没有影响,所以在设计旋流器时,可以适当减小分离段长径比;导流叶片直接决定了切向速度的大小,减小叶片出口角角度可以有效提高分离效率。

## 参考文献:

- [1] HAN D, YUE C, HE W F, et al. Energy saving analysis for a solution evaporation system with high boiling point elevation based on self-heat recuperation theory [J]. Desalination, 2015, 355: 197-203.
- [2] 闫敏, 李玉忠, 马春元. 基于机械蒸汽压缩的燃煤烟气余热及水回收系统[J]. 动力工程学报, 2018, 38(9): 755-762.
- [3] HUANG L, DENG S S, CHEN Z, et al. Numerical analysis of a novel gas-liquid pre-separation cyclone [J]. Separation and Purification Technology, 2018, 194: 470-479.
- [4] 栾一刚. 轴流旋风分离器数值模拟与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- [5] 王鲁平. 直流式旋风除尘器的数值模拟与实验研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- [6] 韩传军, 杨雪, 余成, 等. 不同导叶结构对旋风管分离性能的影响[J]. 机械设计, 2017, 34(5): 47-52.
- [7] MAO Y Q, PU W H, ZHANG H, et al. Orthogonal experimental design of an axial flow cyclone separator[J]. Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, 2019, 144: 107645.
- [8] TANG Y F, QIAO Z L, CAO Y, et al. Numerical analysis of separation performance of an axial-flow cyclone for supercritical CO<sub>2</sub>-water separation in CO<sub>2</sub> plume geothermal systems [J]. Separation and Purification Technology, 2020, 248: 116999.
- [9] LI J, WANG T, ZHANG L Q, et al. Multi-objective optimization of axial-flow-type gas-particle cyclone separator using response surface methodology and computational fluid dynamics [J]. Atmospheric Pollution Research, 2020, 11(9): 1487-1499.
- [10] BALESTRIN E, DECKER R K, NORILER D, et al. An alternative for the collection of small particles in cyclones: experimental analysis and CFD modeling [J]. Separation and Purification Technology, 2017, 184: 54-65.
- [11] ZHANG H, LIU Q F. Numerical investigation on performance of moisture separator: experimental validation, applications and new findings [J]. Annals of Nuclear Energy, 2020, 142: 107362.
- [12] XIONG Z Q, LU M C, WANG M L, et al. Study on flow pattern and separation performance of air-water swirl-vane separator [J]. Annals of Nuclear Energy, 2014, 63: 138-145.
- [13] 邓雅军. 直流式气液旋流分离器数值模拟方法及分离规律研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018.
- [14] 满晓伟. 新型直流导叶式旋风管的性能研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2011.

收稿日期: 2021-11-23

(上接第 82 页)

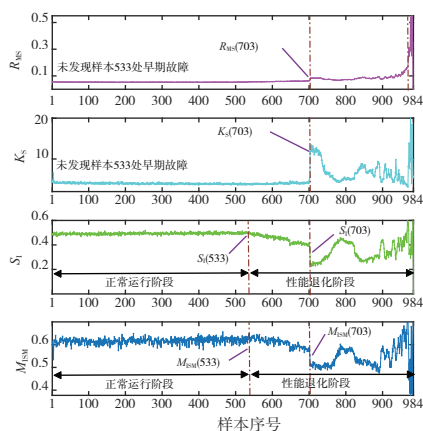


图 6 对数据集 1 的 RMS、KS、SI、MISM 值退化评估结果

上述实验结果表明,所提方法能准确描述轴承退化趋势并及时诊断早期故障。由 DEPI 值描述的轴承状态退化曲线呈现逐步下降趋势,与轴承的实际退化趋势相符;同时,DEPI 值结合 Thr 值可及时发现早期故障;早期故障发生后,增强功率谱能检测出故障相关特征频率,快速诊断轴承故障类型。

## 4 结语

本文提出一种增强故障特征信息的滚动轴承状态评估方法,包括性能退化评估和故障类型快速诊断。通过验证和对比实验验证了该方法的有效性与优越性。综上,所提方法的主要结论如下:

1) 该方法通过 WPT 提取信号特征,基于 HMM 结合 EWMA 的概率描述方法能有效评估轴承退化状态,包括退化趋势描述和早期故障识别;基于增强功率谱的方法快速诊断出故障类型;

2) 该方法的建模对数据的需求量小、要求低;模型训练时间短,计算效率高,适合在线监测;

3) 本文的工作为轴承的在线监测提供了一种高效方式,可避免因轴承严重故障而导致的设备危险运行,可为机械系统的运维决策提供有力参考。

## 参考文献:

- [1] ZHOU H T, CHEN J, DONG G M, et al. Detection and diagnosis of bearing faults using shift-invariant dictionary learning and hidden Markov model [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 72/73: 65-79.
- [2] 常鹏, 王英剑, 吴云峰, 等. 基于主成分分析的温度敏感性结构损伤识别[J]. 振动工程学报, 2019, 32(2): 234-240.
- [3] WANG D, TSE P W, TSUI K L. An enhanced Kurtogram method for fault diagnosis of rolling element bearings [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 35(1/2): 176-199.
- [4] 夏裕彬, 梁大开, 郑国, 等. 基于耦合隐马尔可夫的轴承故障诊断方法[J]. 振动·测试与诊断, 2018, 38(6): 1091-1095, 1286.
- [5] JIANG H M, CHEN J, DONG G M. Hidden Markov model and nuisance attribute projection based bearing performance degradation assessment [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 72/73: 184-205.
- [6] QIU H, LEE J, LIN J, et al. Wavelet filter-based weak signature detection method and its application on rolling element bearing prognostics [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 289(4/5): 1066-1090.
- [7] WANG B, LEI Y G, LI N P, et al. A hybrid prognostics approach for estimating remaining useful life of rolling element bearings [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2020, 69(1): 401-412.
- [8] WANG D, TSUI K L. Theoretical investigation of the upper and lower bounds of a generalized dimensionless bearing health indicator [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 98: 890-901.

收稿日期: 2021-12-07