

基于CFD仿真的径向集油环收油特性研究

薛筱萌¹ 应坤星² 郑 鹏³

1. 中国航发湖南动力机械研究所 湖南 株洲 412002

摘要: 目前,在大多数航空燃气涡轮发动机中,随着DN值(轴承内径乘以转速,单位 $\text{mm} \times \text{RPM} \times 106$)逐渐增高,环下供油已在各型发动机中广泛应用。一般认为在轴承DN值高于2.4时^[1],由于离心力的影响,无法将足够的滑油喷入内环与滚动体间,喷射润滑冷却效率将会下降。在此情况下,需考虑使用环下供油方法,即通过收油装置将喷嘴喷出的滑油收集,经轴上输通道,进入轴承内环上输油孔,供往轴承润滑部位

关键词: 航空燃气涡轮; 径向集油环收油

1 研究背景

环下供油可保证高DN值轴承的有效冷却,尤其是滚动体与跑道间冷却,但作为实现环下供油的关键元件,集油环的收油效率值直接影响到环下供油效果。根据喷嘴喷射方向,集油环主要可分为径向和轴向两类,径向即喷嘴喷射方向位于主轴径向平面内,而轴向则是在轴向平面内。两种集油环在轴承腔空间要求和效率值上差别较大,虽然轴向集油环对腔内轴向空间要求较高,但其具有较大的收油效率值;径向集油环对轴向空间要求低,但由于其间隔收油特性,效率值比轴向小。

2 国内外发展现状

纵观国内外发展现状,国内在径向集油环设计和仿真方面还比较落后。而目前国内外的研究成果中均未专门针对集油环与喷嘴间匹配性进行研究。本文以现有公开文献为基础,设计了一种具有典型特征的径向集油环,并配备两种不同喷射角度的喷嘴,通过建立计算模型,使用CFD仿真方法,动态模拟了集油环收油过程,预测集油环效率值,并对喷嘴喷射角度及转速等因素对其效率的影响进行研究。

3 径向集油环典型结构及收油原理

为简化集油环设计及后续的仿真计算过程,决定采用与^[2]中相似的双叶片结构,但简化了其弧形叶片。径向集油环及喷嘴主要结构,主要结构包括叶片、护栏及收油窗口,集油环装在主轴上时,其内环上环形槽将与主轴形成输油通道。在窗口与环形输油通道间设置了喉部区域,也可称为“挡油坝结构”,其作用为防止进入输油通道的滑油反向流回窗口区域。基本工作原理是集油环随主轴沿一确定方向旋转,当集油环叶片经过喷嘴时,收集一段滑油,这部分滑油首先停留在窗口区域内,然后沿周向运动到达轴向输油通道,最后沿轴向供往轴承。同时,为对比不同喷嘴位置对集油环效率的影

响,设计了两种不同的喷嘴,喷嘴直径相同,但相对于集油环的位置不同,两种喷嘴分别相对于集油环处于垂直和倾斜位置。

4 仿真计算

径向集油环为间歇性收油,是动态过程,且牵涉到滑油/空气两相流动,同时喷嘴区域与集油环间存在相对运动,因此需进行瞬态计算、选择两相流模型,并模拟两区域间的相对转动。Fluent 17.1和ICEM 17.1将分别作为CFD计算软件和网格划分软件。

4.1 计算流域

基于建立的集油环和喷嘴模型,建立了待仿真流域,由两部份组成:静态喷嘴区域和旋转集油环区域。为模拟远场效应,确保不产生不符合物理规律的现象,静止喷嘴区域分别在轴向和径向上扩大了2倍和5倍^[3]。

4.2 边界条件设置

根据实际物理模型分析结果,结合仿真类型可收敛性需求,选定各边界条件。将喷嘴出口设置为速度入口,其具体流速值可通过喷嘴流量换算。集油环轴向出口及喷嘴区域除交界面外的其他面均选定为压力出口,以大气压为背压。集油环区域与喷嘴区域间的交界面设置为非一致性交界面,即该面两侧网格不用完全一致,可简化网格划分,且能够保证计算结果质量。其余各面设置为壁面。

4.3 网格划分

为提高计算精确度,以及满足滑移网格设置要求,对计算流域进行结构化网格划分。考虑到计算流域几何复杂性,为简化网格划分过程,整个区域被分割为多个区域,分别进行网格划分,然后对划分好的网格进行装配。由于设置了非一致性交界面,因此交界面两侧的网格节点不用保证完全一致。网格划分软件ICEM 17.1中的Y-Block和O-Block单元能够对集油环和喷嘴等复杂区域进

行结构化网格划分。最终，通过局部加密等网格优化处理，完成了网格总数约为1百万^[4]。

4.4 仿真计算设置

根据集油环仿真特点，结合参考文献中其他类型两相流仿真经验，并对各方法的适用性进行了分析，各项具体设置如表1所示。

表1 仿真设置

设置项	所选方法	方法适用性
压力-速度耦合	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations (SIMPLE) algorithm	收敛性已被压力速度耦合所限制，使用SIMPLE算法可更快达到收敛 ^[7] 。
两相流模型	Volume of Fluid (VOF), implicit, air as the primary phase, oil as the secondary phase	VOF两相流模型通过模拟用于两个不相溶的流体间的界面变化，实现两相流模拟 ^[7] 。
湍流模型	Realizable k-ε Standard wall condition	适用具有分离流和强涡流的应用。
参考坐标系	Sliding mesh, no slip condition wall	适用于非稳态模拟，且较为真实的模拟了静动区域间的相对运动。
离散化方法	Pressure: Body Force Weighted VOF: QUICK Momentum, turbulence, density and energy: Second Order Upwind schemes.	较小离散误差，提高效率预测精度。

5 计算结果

5.1 滑油收集过程模拟

集油环叶片通过喷嘴区域的滑油收集过程仿真结果如图1所示，图中所示为滑油体积分数云图，可以看出当集油环叶片经过喷嘴时，会收集一定长度的滑油流，该部分滑油先停留在窗口区域，然后沿圆周方向运动运动，随后供往轴承。该过程与原理分析结果一致。

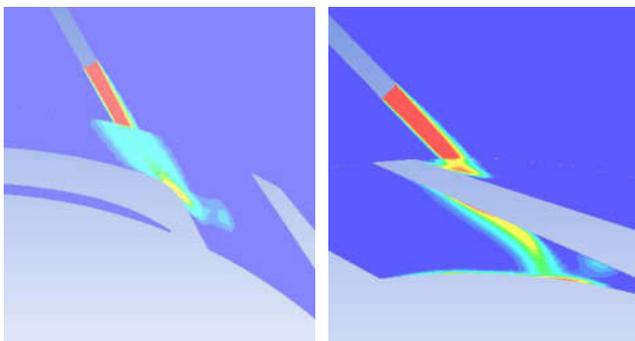


图1 滑油收集过程模拟

注：图中红色代表全部为滑油，蓝色代表全部为空气，其他颜色代表不同油气比的混合物。图中部分交接面处存在的不连续现象，是由于显示精度所致，实际应为连续过渡。

5.2 滑油飞溅现象

除集油环转速与喷嘴流速间的匹配性外，滑油喷射到集油环叶片及跑道上，所造成的滑油飞溅现象也是影响收油效率的主要因素。

5.3 收油效率

通过仿真得到了一定间隔时间点下，进出口流速及油气比，通过换算可得到每个瞬时的收油效率值。

收油效率通过如下公式计算：收油效率=集油环出口滑油流量/喷嘴出口滑油流量

图2所示为效率值随旋转圈数变化的曲线。可以明显看出，收油效率随集油环旋转而周期性变化，这是由于集油环间隙收油特性决定的。在旋转5圈后，效率值趋于稳定，在50%到60%间波动^[5]。同时，通过该曲线也可知，为得到准确的平均效率值，仿真时间应至少高于集油环旋转5圈所用时间。

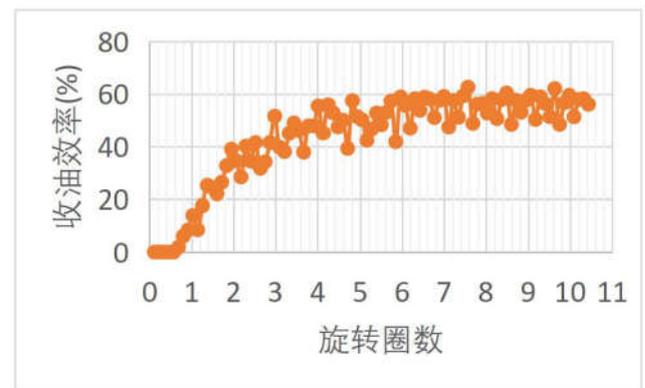


图2 效率值随旋转圈数变化曲线

5.4 转速对效率值的影响规律

通过理论分析可知，在滑油飞溅量一定的情况下，通过保证集油环转速与喷嘴流速的匹配性，使得喷嘴喷出的所有滑油均不喷射到跑道上，则可使得集油效率值达到最高。但在转速较高时，滑油飞溅量也会随之增加。因此，评定转速对收油效率值的影响，需综合考虑滑油飞溅效应及喷嘴流速与转速的匹配性。

为验证转速对收油效率值的影响，在本次模拟中，分别对三个转速下集油环效率值进行了计算，从计算结

果可知,各转速下平均效率值随转速提高而变大。平均效率值从46%增加到了55%。因此,在此转速区间内,喷嘴流速与转速间匹配性的影响大于飞溅效应^[6]。

5.5 喷嘴相对位置的影响

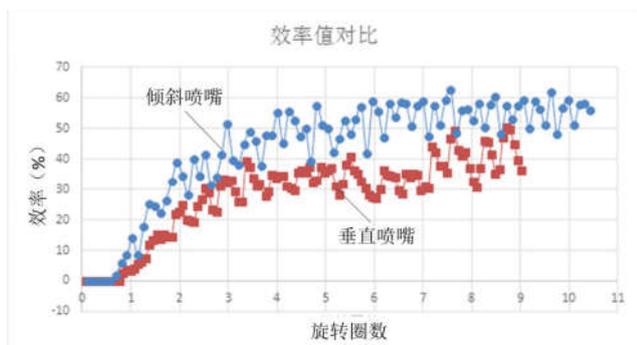


图3 两种喷嘴设置下的效率值对比

在最大转速下,两种喷嘴对应的效率仿真结果如图3所示。从图中可明显看出,带有倾斜喷嘴的集油环喷嘴值效率更高,平均效率值高出近9%。两种喷嘴设置下滑油飞溅效应的不同,是造成该差异的主要原因之一。

通过测量不同时间点,喷嘴区域各出口滑油流量,得到了各瞬时滑油飞溅流量。并对比了两种喷嘴设置下的滑油飞溅量与入口喷嘴流量的比值。从中可看出,对于垂直喷嘴,在一个旋转周期内,几乎每点均有滑油飞溅出现;而对于倾斜喷嘴,在旋转一圈的过程中,只有2-3个明显的飞溅点出现,但其与喷嘴流量比值却远高于垂直喷嘴。出现该差异的主要可能原因是,因滑油与跑道、叶片接触角度较小,倾斜喷嘴喷射出的滑油在接触集油环后,并未立即反弹、飞溅,而是在跑道上不断聚集,在滑油聚集超过护栏高度时,形成较大的飞溅。

6 结论

通过对所设计的带有典型结构的径向集油环进行仿真研究,模拟得到了收油过程及滑油飞溅现象,验证了收油原理等理论分析结果。并基于仿真结果,换算得到

了集油环效率值。对转速、喷嘴相对位置对效率值的影响进行了分析,得到了在一定转速内,收油效率值随转速提高而变大的规律,以及倾斜喷嘴飞溅流量较小导致效率值更高的结论。

所设计集油环在最高转速时,效率值达到了近55%,接近国外参考文献中效率值,后续通过优化喷嘴个数等其他参数,效率值可进一步提高。通过本次仿真分析,得到了径向集油环性能仿真方法,为其性能验证及优化设计提供了方向。同时本文所形成的仿真方法也可为滑油系统其他油气两相流仿真提供参考。

因仿真计算量过大,为简化计算过程,验证仿真方法,本次研究仅针对转速和喷嘴朝向对集油环效率值的影响进行了研究。在后续研究过程中,将结合试验验证等手段,就喷嘴个数、集油环叶片数、喷口位置、喷嘴流速等因素对集油环性能的影响规律开展进一步研究。

参考文献

- [1] 林基恕编.航空燃气涡轮发动机机械系统设计[M].航空工业出版社.2005.
- [2] Dins, Jonathan E., John Hogan, and Arun Kumar. Curved blade oil scoop. U.S. Patent No. 7,244,096.
- [3] Wotzak, Mark Gregory. Oil Scoop Manifold. U.S. Patent No. 13/793,266.
- [4] Daniel Blais. Oil scavenge system for gas turbine engine bearing cavity: U.S. Patent No. 7,699,530.
- [5] 李炎军, 陈国定, 刘亚军, 张永红.航空发动机主轴承环下供油系统两相分相流动分析.润滑与密封[J].2009, 34(5): 58-61.
- [6] 刘鲁.航空发动机叶轮式径向收油装置收油效率研究.哈尔滨工业大学[D].2011.
- [7] 江帆, 黄鹏. Fluent高级应用与实例分析[M]. 北京, 清华大学出版社, 2009.