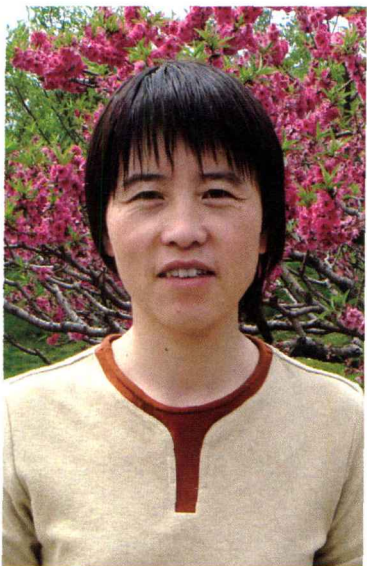


先进气膜密封技术研究 进展与分析

Development and Analysis of Advanced Gas Film Sealing Technology

北京航空航天大学机械工程及自动化学院 马 纲 沈心敏



马 纲

北京航空航天大学副教授。主要从事流体密封技术、机械设计领域的研究工作。主持和参加航空基金、国家863项目等研究工作,在国内外核心期刊发表论文多篇。

1台现代航空燃气涡轮发动机上,大约有几十处流体动密封。已经应用的流体动密封有多种型式,典型的有篦齿密封、刷密封及“紧间隙”密封等。

航空发动机的流体动密封,一般指气流离开主流道进入第二流道的动密封。主要包括:转子内流系统不同部位(如静子叶尖、级间、压气机出口、涡轮入口、轴承腔室等)的密封,

先进的密封技术对于航空发动机整机性能提高的影响日益突出,气膜密封技术的发展意义重大。针对航空发动机密封工况和研究进程的研究分析表明,柱面气膜密封研究具有大的潜力。

以控制泄漏;转子叶尖处密封,以防止回流或泄漏。它们对于航空发动机的整机性能(工作效率、推重比、耗油率、可靠性和经济性等)影响重大,但是在工程应用中很容易被忽视,因此应重视改进密封设计以提高整机性能。

对改进密封设计的效益和潜力,有诸多预测评估。

(1) 研究认为,改进第二流道系统密封设计,在高压压气机处可以增加效率4.4%,这个效率改善可通过降低涡轮入口温度85°F(47℃)来延长有关构件寿命,或提高净推力7.6%;改进高压涡轮处的密封设计,可增加效率4.2%,也可通过降低涡轮入口温度93°F(52℃)来延长构件寿命,或增加推力9.7%。

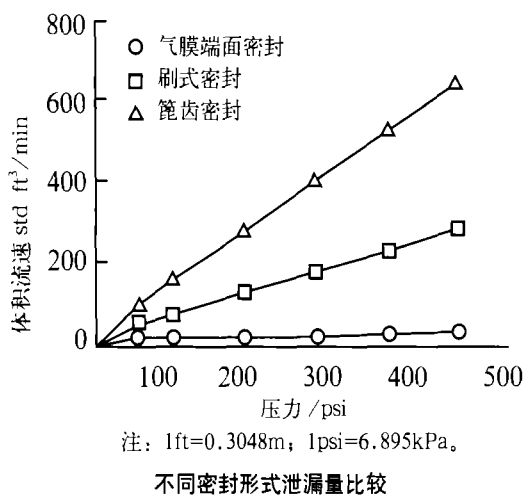
(2) 我国发动机研究者在20世纪末已经明确意识到,在当前技术水平下,在发动机设计上花很大气力的改进能使发动机的耗油率降低0.1%

~0.2%,但如果改进气封的设计来提高密封效果,就可使耗油率降低1%~2%。

(3) 用于压气机和涡轮设计以改进性能的经费投入,与改进有关密封设计收到同样效果所需费用相比,前者比后者至少要高4~5倍。

(4) 目前在发展的一种用于高压压气机后的气/气非接触气膜密封装置,能使发动机的推力提高2%~2.5%。

随着航空发动机整机性能的提高,对密封的要求也日益提高,传统的密封方式难以满足要求。气膜密封技术是基于气体动静压原理,在密封位置形成一定薄的压力气膜,产生密封效果。其突出的特点在于通过很薄的压力气膜实现密封界面的非接触和小间隙,由此所表现出的优越的防泄漏特性和长寿命、低维护特性,已使其成为先进密封技术领域的一个重要研究方向。



由于气膜间隙很小且适宜在高界面滑速和高环境温度下工作,因此特别适宜作为高速转子系统在高压差下的流体动密封。研究已经取得了阶段性成果,在地面工业用鼓风机和压缩机等高速流体机械上,已大量成功应用了端面气膜密封,然而在航空发动机上尚未有成功应用的实例。制约的关键在于,航空发动机转子系统的剧烈振动和热、力变形所引起的密封副表面的位移远大于密封气膜的厚度。

在对相关主要研究资料分析研究的基础上,本文将较详细地介绍有关气膜密封结构应用研究的进展和进一步研究的要点。

转子系统气膜密封应用研究

针对航空发动机转子第二流道的内流系统应用气膜密封技术的研究已经进行了相当长的一段时间,所涉及的密封形式多种多样。这里所介绍的重点为具有一定试验或实用背景的典型结构形式的研究进展。

1 端面气膜密封研究进展

20世纪60年代后期,开始构想航空发动机这类流体机械的高速柔性转子系统中应用研究端面气膜密封。为了适应新一代先进航空发动机性能显著提高的要求,NASA与普惠美国公司签订了2份合同,分别研究端面气膜密封技术应用于压气机出口和主轴承腔的可行性。

研究认为气膜密封支承应有较高的柔性,而密封气膜应具有较高的刚性,以使转子动态大振位移能主要被柔性密封不转环所吸收。设计和试验了主直径为711.2mm的动静压混合的扇形浮块型端面气膜密封,将扇形浮块支在整体的波形弹簧上,以使密封不转环有高的柔性。但是在动态试验中,由于转子的振动位移过大、气膜间隙过小及不转环柔性不够而发生了磨损失效。

20世纪70年代开始,NASA与普惠美国公司对发动机主轴承腔位置采用气膜密封进行了一系列的研究。设计了端面结构带有锐利阶梯升力垫和环形平端面密封坝组合的气膜端面密封。该位置较压气机出口,工况条件大为改善,整体浮环动静压混合的气膜端面密封经试验器试验成功。结果表明,该密封不但避免了接触磨损,而且其气体泄漏率仅为篦齿密封的1/10。

其后,NASA刘易斯研究中心从升力垫、密封坝和力平衡等方面做了进一步详细的设计分析和试验研究。针对这种密封的泄漏量计算,发展了一种气流由垫经自由流槽到坝,再到低压区的准一维可压流理论,与试验较吻合。

1976年,带螺旋槽的端面气膜密封首先成功地应用于地面大型流体机械(天然气管道压缩机)上,目前地面设备中的端面气膜密封技术已得到了广泛的成功应用。

20世纪80年代,端面气膜密封应用于发动机的重点研究是反转轴间密封。NASA和普惠公司进行了反转轴间端面螺旋槽气膜密封的开拓性研究,积累了许多经验。其后续进一步进行了以静压增加气膜厚度、以对置气膜提高气膜刚度和密封性能的研究,试用新的端面结构形式以解

决由于高温下振动和变形带来的问题,在高强度碳石墨材料研究方面取得了较大的进展。

20世纪90年代,在IHPTET等计划的推动下,端面气膜密封研究进一步得到重视和发展。发动机主轴承腔应用端面气膜密封已经到了实用化阶段,对压气机出口和涡轮入口应用气膜密封成为研究的热点。

这一期间具有代表性的研究是GE公司和STEIN公司研发的直径为914.14mm的革新的全金属“吸气式”静压气膜密封。它所特有的不转环弹性支承结构,使它的密封副能够在较大间隙下具有良好的启动和停车性能;在进入工作状态时,密封界面间隙因发动机的第二流道的内流系统气压,在一定闭合情况下,仍可保持较大。当时将静压气膜厚度拟定在0.038mm~0.064mm,但在偏离设计条件的动态试验中,因泄漏过大而未成功。21世纪初,考虑因转子倾斜使章动轴向跳动较大,而将密封静压膜厚增至0.0635mm~0.0889mm,试验结果也是泄漏较大,难以令人满意。

20世纪末至今,对端面气膜密封的研究主要集中在高温、高速和大直径条件下。EG&G公司提出了双螺旋静压气膜密封结构,希望通过双螺旋结构产生一定的运动来补偿密封界面的变形,使得该密封具有一定的柔顺性。进行了该结构用于高温、高速和较大直径的地面试验,结果泄漏较大。这些新型结构目前处于研究探索阶段。

国内对于端面气膜密封技术已经进行了较深入的研究,取得了一定的进展。

2 柱面气膜密封研究进展

自20世纪90年代中期以来,随着对转子内流系统密封技术研究的深入,气膜密封的研究开始由端面气膜密封转向对于柱面气膜密封的研究。笔者认为,比较而言后者的优势

在于：易于在径向实现较大的柔性，以应对剧烈振动和热、力变形，且结构尺寸可以更为紧凑。代表性的研究有：

(1) 柔顺轴密封。NASA 首先在 1994 年提出了这种新概念密封。其薄片密封元件在流体动压气膜上浮，以有效消除密封副磨损，并运转在设计径向位移范围以内 ($\leq 0.381\text{mm}$)。这是一种典型的通过密封系统构件的弹性实现浮动，以允许在所设计径向位移范围内避免磨损的柱面气膜密封。同时又提出了带对数曲线的分层薄片指密封，它的指垫与轴颈之间能形成气膜。

(2) 柔顺箔密封。该密封形式是在成功应用的径向柔顺箔轴承 (CFB) 的基础上提出来的。

它的基本组成包括顶箔、弹性凸起波形箔和支座。工作过程中，在顶箔孔与轴颈之间形成动压气膜，波形箔作为弹性支承适应转子轴颈的振动和变形。Gardner 和 Mohsen Salehi 等从 1994 年开始，进行了一系列的相关理论和试验研究。Mohsen Salehi 首先在小型燃气涡轮发动机模拟器上，进行了柔顺箔密封 (CFS) 系统的性能试验研究。在转速 56000r/min 、轴颈 72.1mm 、环境温度 650°C 、边界压差 10Psi 之下试验表明，这种密封的泄漏远小于刷密封，在箔片孔和轴颈表面未发现

明显的摩擦和磨损迹象。

该密封系统形式具有较高的柔性，地面试验效果较好，但在航空发动机高速柔性转子动态工况下的特性尚待研究；同时波形柔顺弹性支承难以进行定量设计和性能预测，限制了其应用推广。

(3) 混合浮动刷密封 (HFBS)。该密封结构是一种刷密封和端面气膜密封的组合型式。这种密封的特点是：既可以消除它们各自单独使用时来自转子的振动位移工况下的不良后果，又能够在混合运用中，发挥刷密封的“极富柔性”以应对振动位移等工况，发挥气膜密封的摩擦小、易浮动、密封性好并能应对高转速、高环境温度的长处。此项研究仅为一种新颖的设计概念，还未进行深入的理论和试验研究。

(4) 薄叶板密封。该密封结构与指密封类似。 $5 \sim 10\text{mm}$ 宽的多片薄叶板沿圆周方向规则排列，相邻叶板间留有很小的间隙，同时叶板的刚性通过厚度、径向高度、倾斜角来控制。叶板尖部在转子停止时与转子轴径接触，转子旋转时，由动压开启力使得叶板与转子轴颈分开，从而实现非接触状态。其工作特点为：由于叶板密封有一定的轴向宽度，叶板间的间隙非常小，空气的流动被叶板阻隔，总泄漏量减小；动压作用使得叶板与轴颈处于非接触状态，避免了工作过程中的摩擦和生热；轴向宽度和不同压差下刚度的变化使得叶板密封可以适用于多种不同的压差环境。在地面涡轮发动机的压气机与涡轮之间部位的试验研究表明：这种密封的泄漏性能接近刷式密封，叶板的尖部有轻微擦亮，磨损量非常小。

从结构和工作特点看，这种薄叶板密封也可以看

成是柔顺轴密封的一种具体设计结构和试验运转验证。

国内对于柱面气膜密封技术的研究刚刚起步，相关的研究资料很少。

3 转子叶尖应用气膜密封研究

气膜密封的应用研究多集中在内流系统，近年来国外已开始关注气膜密封型式在航空燃气轮机转子叶尖处应用的形究，认为叶尖位置密封性能的改善更为重要。叶尖 0.01in (0.025cm) 的间隙意味着减少 1% 的典型油耗，可降低出口温度 10°C ，叶尖密封研究将成为一个重要的方向。

英国帝国理工大学的 Sayma 等首先提出了在大直径航空燃气轮机的转子叶尖处应用气控密封 (air-riding seal) 即气膜密封 (gas film seal) 的问题，提出了这种密封应有结构柔性和基于纳维-斯托克斯方程的气弹性分析模型，但未提出具体结构形式。

鉴于转子叶尖部位处的结构特点，不拟采用端面密封结构。目前，采用和研究的叶尖气封形式包括紧间隙气封、叶尖带有篦齿的气封、机匣内装有刷封的气封和浮动控制环式气封等结构。这类柱面气封结构的研发趋势，与前面所介绍的转子内流系统的柱面气膜密封结构的研发进展非常类似，也趋于采用密封的有关柔性或浮动构件，满足工况要求。

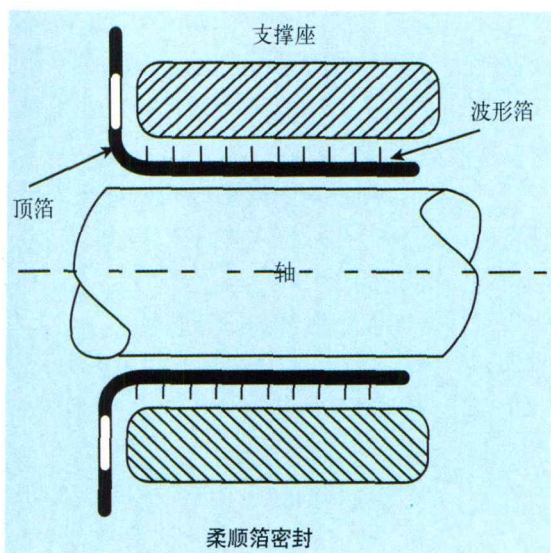
研究进展的启示

从航空发动机密封技术的需求、气膜密封研究进展和典型气膜密封系统特点分析，可以得到如下启示。

1 研究进展演变的核心追求——密封的大柔性浮动支承和刚性气膜

(1) 特殊的工况条件。

航空发动机高速柔性转子系统密封的工况条件可以概括为静态“三高”（密封副的高界面滑速、高环境温度和高边界压差）和动态的大位



移变形。高滑速和高环温有利于形成动压密封气膜,膜厚约 $10\mu\text{m}$ 左右,甚至更薄气膜,这样即使在高压差下,也能使泄漏很小;同时这样还可避免接触式流体动密封的高摩擦热、高磨损和高泄漏,既降低整机耗油率,又提高整机可靠性。

相对于静态的“三高”工况,航空发动机动态工况对密封状态的影响更为突出。与地面设备相比,其结构单薄容易变形,频繁起动停车和变化转速状态以及经受有高度机动载荷和离心载荷等均会造成其转子具有大偏心振动位移。研究表明转子进动的径向位移可达 $0.2\sim 0.5\text{mm}$,章动的轴向位移达 0.125mm 甚至更大,其数值远大于气膜厚度。保证密封气膜有可靠的最小膜厚,避免工作过程中出现金属直接接触,是气膜密封技术中需要克服的主要障碍。

(2) 研究进展演变的核心。

转子内流系统应用气膜密封的有关研究(无论是端面还是柱面),在克服上述主要障碍中,虽各有不同的具体结构物理形式,但是能够应对大位移的形式都分别采用了一个类同的方法:气膜密封系统中有关构件具有大的柔性或浮动特性,气膜刚度较高;通过这种柔性构件承担动态位移,确保必要的气膜厚度。通过追求密封系统有大柔性浮动支承和刚性气膜,以避免密封副表面接触摩擦和磨损的方法是气膜密封一系列研究实践进展演变的核心内容。

2 柱面气膜潜力

(1) 端面气膜密封的局限。

端面气膜密封在比较平稳运转的地面大型流体机械上获得成功应用的事实表明:在这类密封副旋转表面轴向位移跳动较小的流体机械中,端面气膜密封结构的柔性能够满足要求。在航空发动机这类特殊流体机械上,端面气膜密封研究的诸多努力(包括端面密封副的可倾块、锐利阶梯动压、螺旋槽动压、增加膜厚

的静压、增加刚度的对置静压等),都因转子系统剧烈振动和热力变形过大,或是接触磨损、泄漏过大而未能奏效。表明在适应大位移的工况上,存在着较大的局限性。

(2) 柱面气膜密封的潜力。

在典型的流体动密封中,就能够真正有能力应对航空发动机的大振位移来讲,只有刷密封具备较大的柔性,且经过大量的成功应用实践的考验;但接触式的刷密封难以形成流体动力气膜,存在着固有的金属接触摩擦和磨损。

上述对于航空发动机转子内流系统应用柱面气膜密封的研究呈现出:柱面密封可有较强的柔性浮动支承结构,在转子剧烈振动和热力变形下保持一定气膜润滑。柔顺箔密封和薄叶板密封在模拟试验器和地面燃气轮机上的试验表明其能够在轴颈处形成流体动力的气膜密封,避免金属直接接触所发生的剧烈摩擦和磨损。虽然这种密封还存在着不足,但其具有较强的柔性适应能力,使其在克服大位移的障碍上更具潜力。

(3) 柱面气膜密封的受力特点为柔性浮动支承的结构设计提供了可能。

航空发动机转子内流系统和转子叶尖处的密封在工作过程中都不承受转子支反力,这就为这些部位采用柱面气膜密封的密封副构件的大柔性浮动支承结构设计提供了可能。

柱面气膜密封研究的关键

适应航空发动机柔性转子系统特殊工况下密封要求,先进的柱面气膜密封的研究关键在于以下2个方面。

1 密封系统结构形式

柱面气膜密封研究的基础是提出新型的密封系统结构形式,应满足2个基本要点:

(1) 从系统整体结构进行考虑,通过有关弹性和浮动件使系统具

有足够的柔性支承,形成来自转子的大振位移主要为柔性支承所吸收,通过系统的自适应性确保有足够气膜厚度形成非接触摩擦气膜密封。

(2) 结构形式设计中要充分考虑到,具有自适应性的大柔性支承结构形式要易于进行定量设计和分析。

2 完整定量设计分析方法

建立特定工况条件下密封系统定量分析方法,对密封性能进行预测分析,对密封系统相关参数进行定量协调设计,是密封系统试验研究和应用的前提,能够起到事半功倍的效果。其分析要点包括:

(1) 建立转子大振位移工况下的系统模型,进行最小膜厚要求下密封气膜力学性能分析和系统密封特性的定量分析计算;

(2) 进行旨在检验上述密封系统分析的气膜密封系统的宏微结合的设计分析,包含气膜的高速紊流效应、薄膜滑流效应及表面粗糙度效应的影响,修正前述计算分析;

(3) 进行密封系统稳定性分析。

结束语

先进的密封技术对于航空发动机整机性能提高的影响日益突出,气膜密封技术的发展意义重大。针对航空发动机密封工况和研究进程的研究分析表明,柱面气膜密封研究具有大的潜力。

在国外对于相关技术设计分析研究严格保密的情况下,对于航空燃气轮机转子柱面气膜密封研究的关键在于:从结构的柔性出发,探求具有足够“自适应性”且易于进行定量设计分析的大柔性支承结构形式;建立密封系统完整的定量设计分析方法,以期进行进一步的试验研究和应用。

注:本文有参考文献39篇,因篇幅所限未能一一列出,读者如有需要,请向编辑部索取。(贞编 依然)