doi:10.3969/j.issn.1005－0329.2025.01.010

技术进展

发动机燃油泵空化研究进展

王永康[1,2],陈文刚[1,2],王海军[1,2],Dongyang LI[2,3],王文[1,2]
(1.西南林业大学 机械与交通学院,昆明 650224;2.云南省 Dongyang Li 院士工作站,昆明 650224;
3.Department of Chemical and Materials Engineering,University of Alberta,T6G2H5,Canada)

摘　要:发动机燃油泵的空化对发动机的使用安全和寿命有着重大影响,通过综合国内外对于发动机燃油泵内空化研究成果的概述,系统地归纳总结了空化在燃油泵中形成的原因、影响因素、研究方法以及发展现状等,指出了影响流体机械内空化产生与发展的两大因素,即发生空化作用物体的几何形态以及物理因素(如压力、温度等)。对研究与观察燃油泵空化现象的方法进行了整理与划分,并给出了研究流体机械内空化现象以及降低空化影响的新方案,为发动机燃油泵的优化提供了方向。

关键词:空化;燃油泵;影响因素;流体机械
中图分类号:TH117　　**文献标志码:**A

Cavitation in engine fuel pumps and its research progress

WANG Yongkang[1,2],CHEN Wengang[1,2],WANG Haijun[1,2],LI Dongyang[2,3],WANG Wen[1,2]
(1.School of Mechanical and Transportation,Southwest Forestry University,Kunming 650224,China;
2.Yunnan,Dongyang Li Academician Workstation,Kunming 650224,China;
3.Department of Chemical and Materials Engineering,University of Alberta,T6G2H5,Canada)

Abstract: Cavitation in engine fuel pumps has a significant impact on the safety and life of the engine. Through a comprehensive overview of domestic and international research results on cavitation in engine fuel pumps,we have systematically summarized the reasons for the formation of cavitation in fuel pumps,the factors affecting it,the research methods and the current status of the development of cavitation,and introduced the two major factors affecting the generation and development of internal cavitation in fluid machinery,namely,the geometrical form of the objects in which cavitation occurs and physical factors(such as pressure,temperature,etc.). And for the research and observation of the cavitation phenomenon in this component of the method for organization and division,and gives the study of cavitation phenomenon in the fluid machinery and reduce the impact of the cavitation of the new program,for the optimization of the engine fuel pump to provide a direction.

Key words:cavitation;fuel pumps;influence factor;fluid mechanics

0　引言

目前,世界上大规模使用的发动机仍以内燃机为主,尤其是工业以及交通业[1],在未来仍然会是比较重要的动力来源,并将继续在汽车、船舶、航空航天等行业中发挥举足轻重的作用。在对燃油发动机的研究中发现,其内部许多位置都会发生空化现象,如发动机的喷嘴、燃油泵、冷却水泵、挤压油膜阻尼器、诱导轮等。空化气泡破裂的过程中会对发动机零件的金属表面产生冲击[2],从而使其发生气蚀,影响发动机的性能以及使用寿命等。

通过研究总结发现,在供油系统中,燃油泵中发生的空化现象对于发动机的影响较大。燃油泵作为发动机供油系统中重要的零部件之一,在发动机供油中发挥着重要的作用[3],其输送性能对

收稿日期: 2024－03－09　**修回日期:** 2024－10－28
基金项目: 云南省 Dongyang Li 院士工作站项目(202305AF150019);云南省外国专家重点项目(202305AO350001)

整个燃油系统有着至关重要的影响，在燃油泵内部出现的空化现象及空化所引起的噪声，旋转失速及扬程、效率急剧下降等是阻碍燃油泵性能优化的重要因素，这些空化问题对于发动机的使用安全和寿命有着不可忽略的影响。

鉴于此，本文主要针对发动机燃油泵中所发生的空化现象的研究进展与研究现状进行梳理，并在此基础上提出了新的研究方法与改进措施，对于发动机燃油泵的研究与优化有着重要的意义。

1 燃油泵空化的形成与发展

空化现象的本质是多尺度的复杂相变，发生空化现象一般需要具备 3 个条件：（1）存在低压区，且最低压力达到临界压力；（2）流动液体内存在气核；（3）该气核在低压区保持时间够长。一方面，在燃油泵供油过程中，其内部燃油所形成的复杂湍流流场满足了空化形成条件，诱发了空化现象的发生，另一方面，燃油泵的工作环境对于空化的形成以及发展也有一定的影响，如在航空燃油泵[4]工作过程中，大部分时间处于高空环境下，此时的燃油泵温度高、大气压力小、流量大、转速高，这也使得航空燃油泵中更加容易发生空化现象。燃油泵内空化的形成是多方面因素共同作用的结果，由于燃油泵内流场复杂，且内部空化现象难以观察，使得空化的形成是否还受其他因素的影响目前犹未可知，这也是后续研究如何有效降低燃油泵空化的主要方向。

目前，部分燃油泵内部会安装诱导轮，主要以高速离心泵为主，一般位于一级叶轮上游，随叶轮同步转动。其作用是为主叶轮提供一定增压值，同时对泵的扬程影响较小，是一种比较常用的提高燃油泵内部抗空化性能的手段。诱导轮工作时同样会产生空化现象，进而对其叶片造成冲击、产生振动、形成噪声等影响[5]。其产生空化的主要原因是叶片尖部与燃油泵的内壁面间隙所形成的压力差[6]。研究发现，诱导轮上所发生的不稳定空化现象大致可以分为 2 种：非对称附着空化和旋转空化，而为了提高诱导轮的抗空化性能，对这 2 种不稳定空化做出改进，KANG 等[7]和王珏等[8]通过试验以及仿真研究了环形槽对于诱导轮空化性能的影响，结果表明，环形槽对旋转空化以及非对称空化引起的振荡有较好的抑制作用。GUO 等[9]设计了 5 种不同短叶片位置的诱导轮（如图 1 所示），并进行了空化仿真分析以及试验研究，结果表明，短叶片位置对泵的抗蚀性能有显著影响，且对比发现，IND3 诱导轮空化性能较好。KIM 等[10]则是利用压力传感器以及高速摄像机研究了温度对于诱导轮空化的影响，结果表明，温度的升高可降低临界空化值。项乐等[11]对诱导轮空化进行了可视化试验，经研究发现，诱导轮附近液体流量对于空化性能有一定影响，存在着某个临界值可使得空化性能达到最佳。FAN 等[12]通过试验研究了入口温度和转速对于诱导轮空化的影响，结果表明，温度升高会引起扬程系数下降，进而降低临界空化值；而转速提升会导致型腔体积的增加和气蚀恶化。

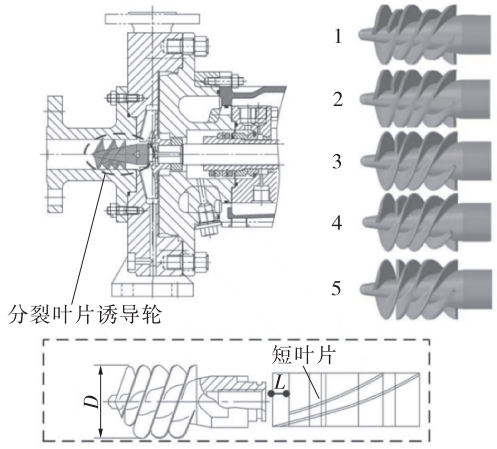


图 1 泵以及 5 个不同短叶片诱导轮及其位置

Fig.1 Pump as well as five different short bladed induced wheels and their positions

诱导轮具有较小的冲角以及较薄的进口边，这使得其对于泵内的燃油流动几乎不干扰，泵内空化性能得到了进一步的提升。但随着科技的发展，航空航天等领域中对于泵的性能要求也越来越高，这就仍需要进一步提升其内部空化性能，以便使其适用于更高强度、更高精度的机械领域。

2 燃油泵中影响空化的因素

影响燃油泵内空化的产生与发展的因素有很多，如：诱导轮选取、诱导轮出口安放角、燃油温度、泵内压力大小、叶轮进口安放角、燃油泵隔舌位置加入圆角及圆角的大小、燃油泵内叶片的包角等。薛梅新等[13]在研究中发现，加力燃油泵在小流量的工作状态下，当倒圆半径为 2 mm 时，隔舌处会产生空化；当倒圆半径为 4 mm 时，隔舌

处则不会产生空化现象。GUO 等[14]就不同叶片诱导轮对高速离心泵内空化性能的影响进行了仿真以及试验研究，结果表明，3 叶片诱导轮的效率以及抗气蚀性能最好。刘晓超[15]以某型号航空燃油泵为研究对象，设计了不同叶片包角（190°，220°，250°，280°，310°，340°，370°，400°），通过仿真与试验研究了不同叶片包角对于泵内空化性能的影响，结果表明，叶片包角越大，空化发展越缓慢，空化性能越高。张静等[16]在低速离心泵内部的进口叶片处进行开孔，研究了开孔对离心泵空化性能的影响，结果表明，开孔可以抑制离心泵内空化的发生，改善空化性能，同时也减小湍动能的损耗，使燃料流动更为稳定。

李嘉等[17]对一体式航空燃油泵的诱导轮空化进行仿真试验，研究发现，当该泵的进口压力为 13 770 Pa 时，达到临界空化状态。LI 等[18]研究了叶轮周围沟槽对空化的影响，结果表明，空化现象的形成与流体的局部压力密切相关。

综上可知，影响燃油泵内部空化的因素大致可分为 2 类，即几何因素（叶轮以及泵内的几何形状等）与物理因素（温度以及压力等）。以此为基础，对于后续研究水力机械内部发生空化现象的影响因素时，可大致以这两大方向为主。

3 研究发动机燃油泵空化现象的方法

针对燃油泵空化的研究大致可以分为试验研究、数值模拟仿真以及两种相结合等方法，而随着近年来深度学习等先进的人工智能技术的发展以及广泛应用，其已成为适合复杂、规模庞大的信息分析和理解的有效工具，为泵内空化流场特征提取与可视化提供了新的思路。

3.1 试验研究

目前，可用于研究燃油泵中的空化现象的设备与技术可以分为直接观察类与间接观察类。直接观察一般是运用高速摄影装置对进行可视化改装后的泵内空化现象的产生与发展进行直接观察，如 TAO 等[19]通过在叶轮入口处的透明截面上安装高速摄像机和频闪仪来捕捉空化气泡，设备及数据传输示意如图 2 所示，研究表明，初始空化数的最佳范围与临界空化数的最佳范围没有交集。BACHERT 等[20]利用了高速摄像与 PIV 技术相结合对离心泵内隔舌位置所发生的空化现象进行了观察与研究，并以此解释了离心泵性能下降的原因之一是由于隔舌处空化。叶阳辉等[21]利用德国 Mikrotron 公司的 Eosens mini-2 高速摄像机，对使用有机玻璃加工蜗壳的离心泵内的空化现象进行观察，研究发现，泵内叶轮压力面上发生的空化比吸力面上发生的空化更为剧烈。XIANG 等[22]使用自制可视化装置研究了叶尖顶隙大小对涡轮泵诱导轮内空化特性的影响，使用高速摄像机记录了不同条件下的空腔状态，结果表明，较大的叶尖间隙明显降低了空化性能。

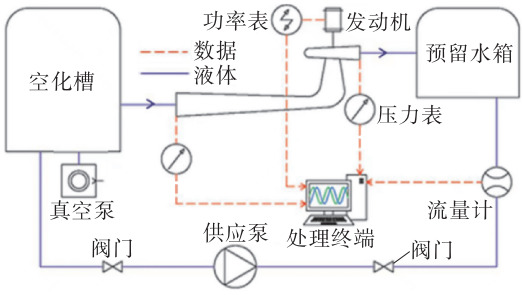


图 2 设施和数据传输示意

Fig.2 Schematic diagram of facilities and data transmission

利用高速摄像机以及使用透明材质加工泵，从而对泵内所发生的空化现象进行直接可视化观察，是对泵内空化进行试验研究的基本手段，也能够为其他的空化检测方式提供一定的验证，但这种试验状态下的泵与真实工作状态下的泵有一定的区别，实际情况下，发动机燃油泵的转速非常高，一般在 10 000 r/min 以上，压力增益大，一般在 1 MPa 以上，这种工况条件下透明材料无法满足强度要求，且高速旋转的漩涡也会影响测试结果。并且燃油泵实际工作状态下的环境较为复杂多样，如轮船在大海中行驶，火箭发射到太空等，其内部都有燃油泵工作的身影，这些外因对于燃油泵内部所发生的空化现象是否有一定的影响还未经验证。这些因素可能会使得试验结果产生一定的误差，影响试验整体的准确性。

间接观察类则是利用一些技术，如超声波探测技术、X 光探测技术等，对泵内的空化流场进行探测，也有利用传感器对其内部空化进行表征，比如压力测试、声振测试等。ČDINA 等[23]利用麦克风作为传感器，后接计算机，对泵内的噪声进行捕捉，得到噪声频谱，通过该频谱对泵内发生的空化进行了分析。DUPLAA 等[24]利用 X 光探测技术对离心泵内的空化现象进行了探测，结果表明，X 光探测有利于确定其内部的空化情况。YAN 等[25]利用了超声波技术对空化现象级进行了识别，结合信号解调，得到了空化的流场，并

利用试验验证了该空化流场的准确性。TIWARI等[26]对泵中的堵塞情况进行了模拟，使用机械调节阀将吸入管的流通面积分为6个等间隔（即0%，16.7%，33.3%，50%，66.6%，83.33%）来限制内部压力，而后利用压力传感器对离心泵内的压力进行检测，进而验证了利用压力传感器对泵内的空化的存在以及发展程度进行判断的可行性。TONG等[27]则建立了一种基于振动传感器的检测方法以及利用高速摄像机对离心泵内空化图像采集的神经网络，以此研究了泵内空化、振动信号与泵性能之间的相关性。

目前，利用X光、超声波等高科技设备对燃油泵内的空化现象进行研究受到一定的可靠性，但在工业中，设备的安装受到一定的限制。而利用一些传感器对泵内的情况进行数值记录，从而对泵内空化现象进行判断则具有较高的准确性，并且设备安装方便，适用范围广。但空化现象复杂多变，还需多方面考虑，通过单一的传感器对泵内的空化判定无法兼容。而通过将这些技术与可视化试验相结合并建立空化检测系统的方式，目前使用较少且能进一步提高试验精度，值得后续研究采纳。总的来说，对于具体试验研究方法的使用还需结合研究目标以及研究环境。

3.2 数值模拟仿真研究

随着计算机技术的发展以及计算流体动力学（CFD）技术被用于空化水射流研究，对流体机械内部空化现象进行数值模拟仿真也越发成熟。空化模型大部分仍是基于N-S方程和质量输运方程，其中使用较为广泛的空化模型有Schnerr-Sauer空化模型、Singhal空化模型、Zwart空化模型及Kunz空化模型等，它们都是通过输运方程对液相和汽相的相变过程进行控制，不同的空化模型所运用的蒸发项及凝结项有所不同[28]，模型以及蒸发凝结速率表达式见表1。MEDVITZ等[29]建立空化模型，通过CFD软件对离心泵中的不同程度的空化进行了仿真，得到了离心泵内空化状态下液体的流动特征；杨孙圣等[30]利用ANSYS-CFX软件对单级轴向离心泵进行了气蚀性能的计算与分析，得到了叶片表面气泡以及温度的分布规律；陈娅等[31]同样使用ANSYS-CFX软件，基于Zwart空化模型以及RNG k-ε湍流模型对高速航空燃油泵的非空化和空化状态下的流场进行了仿真，结果表明，当有效汽蚀余量较大时，燃油泵扬程基本不发生变化，当有效汽蚀余量减小到一定值，扬程开始缓慢下降而后急剧减小；CAO等[32]采用RNG k-ε湍流模型，同时采用了ZGB空化模型、Kunz空化模型和Schnerr-Sauer空化模型对离心泵内的流体空化进行了数值模拟，以对比不同空化模型仿真效果。通过试验结果与各个空化数值结果对比发现，ZGB空化模型计算的结果与试验结果更为吻合。华有明等[33]利用ANSYS中的FlUENT模块，基于Schnerr-Sauer空化模型以及Realizable k-ε湍流模型对液体射流泵内的压力、流速以及安装高度对空化的影响进行了分析，结果表明，较大的工作液压力及流速会加快空化的发展过程。

表1 离心泵空化数值计算相变模型蒸发凝结速率表达式

Tab.1 Centrifugal pump cavitation numerical calculation phase change model evaporation condensation rate expression

模型	公式
Kunz空化模型	$\dot{m}^- = \frac{c_{vap}\alpha_l\rho_v}{\left(\rho_l U_\infty^2/2\right)t_\infty}\left(p-p_{sat}\right)$ $\dot{m}^+ = \frac{c_{cond}\left(\alpha_l-\alpha_{ng}\right)^2\rho_v}{t_\infty}\left(1-\alpha_l-\alpha_{ng}\right)$
Singhal空化模型	$\dot{m}^- = -C_{vap}\frac{\sqrt{k}}{s}\rho_v\rho_l\left(\frac{2}{3}\frac{p_{sat}-p}{\rho_l}\right)^{1/2}\left(1-f_v-f_{ng}\right)$ $\dot{m}^+ = C_{cond}\frac{\sqrt{k}}{s}\rho_l\rho_l\left(\frac{2}{3}\frac{p_{sat}-p}{\rho_l}\right)^{1/2}f_v$
Schnerr-Sauer空化模型	$\dot{m}^- = -\frac{\rho_v\rho_l}{\rho_m}\alpha_v\left(1-\alpha_v\right)\frac{3}{R_g}\left(\frac{2}{3}\frac{p_{sat}-p}{\rho_l}\right)^{1/2}$ $\dot{m}^+ = \frac{\rho_v\rho_l}{\rho_m}\alpha_v\left(1-\alpha_v\right)\frac{3}{R_g}\left(\frac{2}{3}\frac{p-p_{sat}}{\rho_l}\right)^{1/2}$
Zwart空化模型	$\dot{m}^- = -C_{vap}\frac{3\alpha_{nuc}\left(1-\alpha_v\right)\rho_v}{R_B}\left(\frac{2}{3}\frac{p_{sat}-p}{\rho_l}\right)^{1/2}$ $\dot{m}^+ = C_{cond}\frac{3\alpha_{nuc}\rho_v}{R_B}\left(\frac{2}{3}\frac{p-p_{sat}}{\rho_l}\right)^{1/2}$

随着仿真技术的不断进步，PBM方法逐渐发展成为新兴的空泡模拟方法，与传统VOF方法相比，其采用Fluent软件耦合用户自定义函数建立一种新流场的CFD-PBM数值模拟方法具有更符合物理实际的优势。如ZHANG等[34]将CFD-PBM与双欧拉法进行比较，发现两者的扬程相差不大，但双欧拉法的效率却高得多，甚至接近单相，这与以前的试验研究不同，相比之下CFD-PBM法与试验更为贴合。TAO等[35]利用CFD-

PBM 模拟方法研究了多相泵在不同工况下气泡尺寸以及分布规律，研究表明，气泡尺寸的发展规律受入口气体体积分数（IGVF）和转速的影响，呈现出较为明显的规律，IGVF 的增加增强了气相聚集，促进了气泡聚并的趋势，使气泡尺寸逐渐增大。ALAM 等[36]以离心泵以及喷嘴为原型，制作了一个空泡发生器，仿真方面采用耦合的 PBM 模型，利用不同的湍流模型所得的仿真结果与试验结果对比，得出 $k-\varepsilon$模型与 PBM 模型配合更为合适，与试验结果更为吻合。

空化仿真作为研究流体机械内部空化现象的一种重要的方法，其模型的精度通过一些具体试验进行了一定程度的验证。但由于模型模拟的空化状态无法考虑到一些燃油泵真实工况，可能会导致与实际空化存在一定差异，这需要着重关注，对燃油泵等复杂流体机械内的空化的仿真精度仍需进一步提高。

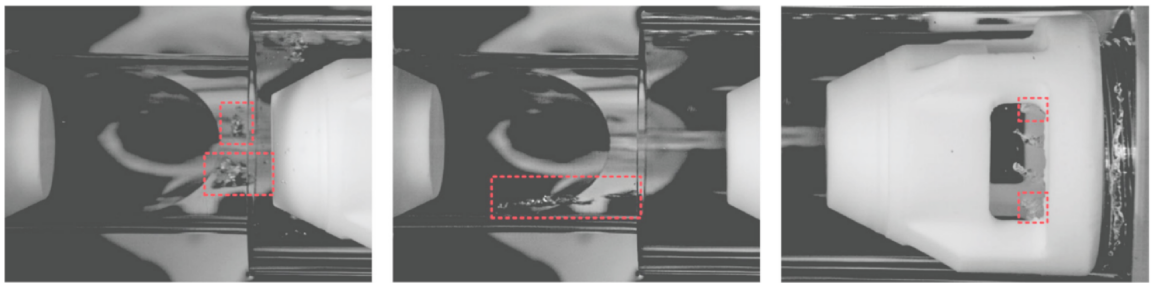
3.3 基于深度学习的泵内空化研究

深度学习是通过将数据映射到高维空间，提取数据中所隐藏的关联性，从而得到数据的隐藏规律信息，以此反映目标的特性。而泵的流体性能和空化的发展对其能量转换具有决定性的影响，且在泵内流场的实时测量和可视化显示中，使用现有的试验方法和仿真算法仍存在瓶颈，试验成本高昂，以及庞大的计算量不容忽视。近年来，逐渐有学者将深度学习运用于泵内空化状态测试，如：曹玉良等[37]采集了在3种工况下泵壳的振动信号，构建了振动信号的改进倍频带特征矩阵和时频特征矩阵，然后基于自动编码器构建了深度学习网络，对离心泵的4类空化状态进行了分类识别，结果表明，该方法对于泵内的 4 类空化状态有很好的识别效果，且对于弱空化状态的识别中，深度学习网络比 BP 神经网络更有效。TIWARI 等[38]在离心泵壳体圆周上安装压力传感器，在不同阻塞水平和不同运行速度下捕获压力特征，基于深度学习的二进制数据分类方法对从压力传感器获取的数据进行分类，以此确定了离心泵内空化的程度。赵佳伟[39]提出了 CEEMDAN 分解与深度学习结合的空化状态识别方法，对比了 3 种不同的 RNN 网络算法，最终证明了该方法有效降低了时间成本。LI 等[40]将流体动力学（CFD）技术、实验平台以及深度学习网络相结合，运用所生成泵中空化流动特性的模拟数据作为测试数据集，完成深度学习算法过程，并检测其与试验结果的一致性。经验证，该深度学习框架在准确性、计算成本、视觉显示等方面比其他方法更具优势。

利用深度学习对燃油泵内的空化进行测试，提高了各种传感器对于泵内空化测试的准确性，相比其他方法，减少了计算成本，且对于泵内的各种空化的针对性更强，这为后续建立燃油泵空化检测以及故障检测方法提供了方向，对于泵内空化性能改善具有一定帮助。

4 发动机燃油泵空化危害及性能优化研究现状

研究发现，燃油泵主要发生空化现象的位置有叶片前缘、隔舌处及一些带有诱导轮泵的诱导轮叶片上等[41]。其中泵叶片前缘发生的空化现象是对泵内产生破坏，造成泵在工作中性能下降的主要原因[42]。李晓俊等[43]和卢加兴[44]对离心泵空化进行研究，总结出泵内的空化可大致分为 3 个阶段，即空化的初生阶段、弱空化阶段以及不稳定空化阶段，初生空化主要发生在叶片进口处，具有空化形成的空泡小、弱稳定的特点；弱空化和不稳定空化主要发生在泵叶片的工作面以及背面，主要以空化的区域长度是否到达叶轮流道宽度的 65%作为区分条件。不稳定空化对泵有着较大的影响，为了减小这一影响，YOSHIDA 等[45]对泵内的诱导轮进行了可视化试验，试验结果表明，叶片前缘后缩可以抑制该空化现象。郁金红[46]通过对离心泵的后盖板底部加装小叶片的试验研究发现，加装小叶片后有效地降低了通道内空化气泡的体积，进而对泵内的空化产生了一定的抑制。GAN 等[47]通过调节泵内压力对透明泵内的空化特性进行了研究，提出了空化气泡破裂对泵内壁产生强烈的冲击是泵内产生噪声的主要原因。GE 等[48]利用数值模拟与可视化试验相结合的方式，研究了 PDBP 泵中的空化行为，利用高速摄像机拍摄出的 PDBP 泵内典型空泡如图 3 所示，研究结果表明，强剪切产生的高强度涡流是空化的开始原因。ANDREW 等[49]对离心泵内的诱导轮进行了空化仿真，研究了叶尖滞后对空化的影响，结果表明，叶尖滞后延迟了空化的发生，改善了空化性能，但对离心泵性能有一定影响，随着间隙的增加，叶片尖端处的回流范围也会增加。KARAGIOVANIDIS 等[50]利用声振传感器以及数据采集系统建立了一个泵空化检测的神经网络，通过这种方法可以研究不同类型、尺寸的泵，并以此确定其内部不同的空化状态。



（a）入口管和通道交叉点处片状空腔 （b）入口通道核心的带状空腔 （c）入口阀底部的空化

图 3 捕获 PDBP 泵中的典型蒸气结构

Fig.3 Typical vapor structure in a captured PDBP pump

如今，航空航天等领域对泵的高性能以及高稳定性的需求促使着国内外对泵内流场的不断研究，其中，不少学者针对其空化性能优化做了大量工作。总结发现，目前大多数研究都是通过改变蜗壳形状、叶轮形状以及在叶轮顶部增加诱导轮等改变其物理特性的方式，进而改变泵内流场，以此来对燃油泵内的空化性能进行优化。WANG 等[51]采用不同的螺旋蜗壳对航空燃油泵空化性能影响进行了研究，结果表明，双蜗壳可显著提高航空燃油泵的效率，提高其空化性能。赵伟国等[52]研究了叶轮凹槽结构对离心泵空化特性的影响，结果表明，凹槽结构能有效限制离心泵空化发展，使离心泵的运行更加稳定。而有一部分研究则是通过改变燃料或在燃料中添加助燃剂等方式，来改善燃油泵空化性能。熊英华等研究了 74.5% 的正十二烷、10% 的甲基环已烷、10% 的甲苯和 5.5% 的辛烷燃料对 RP–3 航空燃油泵空化性能的影响，结果表明，不同燃料对于燃油泵空化性能影响有一定差异[53–60]。而由于各种燃料特性不同且存在较大差异，对于燃油泵还存在其他影响，故这种研究方式目前较少。随着这些研究的深入，对于燃油泵内流动机理有了进一步的了解，有利于对气蚀损坏进行预测、改善空化所产生的负面影响，对于工程应用具有着重要的意义。

5 总结与展望

5.1 总结

通过对发动机燃油泵中空化的形成原因、影响因素以及研究与观察方法进行分析与总结，得出了该部件内形成空化的原因与内部压力有很大的关系。影响空化的因素可大致分为两个方面，即空化作用物体的几何形态以及物理因素（如压力、温度、流速等）。并在归纳这些影响因素的基础上提供了优化燃油泵空化性能的方向。

对于燃油泵内部空化现象的研究方法进行了总结，大致可以分为以下几点。首先，大多数都采用透明材料模拟该部件工作状态，利用高速摄像机进行可视化观察与研究。其次，随着科技的发展以及技术上的进步，也有利用一些传感器对机械内部进行压力测试、声振测量，或使用超声波探测技术、X 光探测技术进行间接研究的。而在数值模拟仿真方面则是建立空化模型以及湍流模型进行数值模拟，利用 ANSYS 等软件进行仿真分析，随着与具体试验结果进行不断的对比与验证，得出了一些较为准确的空化模型以及湍流模型，并对其进行了具体的归纳。然后，随着深度学习被广泛的运用于各个领域，也渐渐将其运用于燃油泵空化。通过对燃油泵空化研究方法的总结，为后续对于水利机械内部空化的试验研究以及模拟仿真提供了基石。最后，对发动机燃油泵空化的类型以及每种空化发生的位置以及发生原因进行了详细的整理和划分，对该部件目前的研究进展以及发展前景进行了补充，明确了未来针对燃油泵内部空化现象的处理目标。

5.2 展望

（1）针对燃油泵内部发生空化现象的研究，可将一些传感器，如压力传感器、振动传感器等安装在汽车发动机的燃油泵位置，在汽车行驶的状态下，进行压力脉动测试、声振测试等，基于得到的数据进行空化表征，以此研究空化带来的影响。

（2）水力机械中空化气泡破裂会对金属表面产生冲击、气蚀破坏等影响，可将表面涂层技术以及表面织构技术等用于发生空化现象的金属表面，如采用超高分子量聚乙烯、铬这种抗冲击性能好的材料进行涂层，利用球冠状、三角形织构等这种较为稳定的织构对空化发生的表面进行织构制备，将无涂层金属表面作为对照组进行空化试验，然后对比这几项的抗气蚀性能。

参考文献：

[1] 周遊 . 基于机械 – 电液式可变气门机构的发动机燃烧性能研究 [D]. 吉林：吉林大学，2023.
ZHOU Y.Research on engine combustion performance based on mechanical-electro-hydraulic variable valve mechanism [D].Jilin：Jilin University，2023.

[2] PAYRI F，BERMÚDEZ V，PAYRI R，et al.The influence of cavitation on the internal flow and the spray characteristics in diesel injection nozzles [J]. Fuel，2004，83 (4–5)：419 – 431.

[3] 蒲志理 . 航空油泵设计 [M]. 北京：国防工业出版社，1983.
PU Z L.Design of aviation oil pump [M].Beijing：National Defense Industry Press，1983.

[4] 熊英华，刘影，赵兴安，等 . 基于代理模型的航空燃油泵空化性能分析 [J]. 航空学报，2016，37 (10)：2952 – 2960.
XIONG Y H，LIU Y，ZHAO X A，et al.Cavitation performance analysis of aviation fuel pump based on agent model [J].Journal of Aviation，2016，37 (10)：2952 – 2960.

[5] TSUJIMOTO Y，YOSHIDA Y，MAEKAWA Y，et al. Observations of oscillating cavitation of an inducer [J].Journal of Fluids Engineering，1997，119 (4)：775 – 781.

[6] SEKITA R，WATANABE A，HIRATA K，et al.Lessons learned from H–2 failure and enhancement of H–2A project [J].Acta Astronautica，2001，48 (5/12)：431 – 438.

[7] KANG D，ARIMOTO Y，YONEZAWA K，et al. Erratum：suppression of cavitation instabilities in an inducer by circumferential groove and explanation of higher frequency components [J].International Journal of Fluid Machinery and Systems，2010，3 (2)：137 – 149.

[8] 王珏，陈晓，毕辰宇，等 . 环形槽对诱导轮空化性能的影响研究 [J]. 导弹与航天运载技术，2023 (2)：47 – 51.
WANG J，CHEN X，BI C Y，et al.Effect of annular groove on cavitation performance of induced wheel [J].Missile and Space Launch Vehicles Technology，2023 (2)：47–51.

[9] GUO X M，ZHU Z C，CUI B L，et al.Effects of the short blade locations on the anti-cavitation performance of the splitter-bladed inducer and the pump [J].Chinese Journal of Chemical Engineering，2015，23 (7)：1095 – 1101.

[10] KIM J，SONG S J.Measurement of temperature effects on cavitation in a turbopump inducer [J].Journal of Fluids Engineering，2016，138 (1)：011304.

[11] 项乐，陈晖，谭永华，等 . 诱导轮空化流动特性实验研究 [J]. 农业机械学报，2019，50 (12)：125 – 132.
XIANG L，CHEN H，TAN Y H，et al.Experimental study on induced cavitation flow characteristics [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2019，50 (12)：125 – 132.

[12] FAN Y，CHEN T，LIANG W，et al.Numerical and theoretical investigations of the cavitation performance and instability for the cryogenic inducer [J]. Renewable Energy，2022，184：291 – 305.

[13] 薛梅新，朴英 . 加力燃油泵隔舌倒圆抑制分离的数值模拟 [J]. 航空动力学报，2012，27 (12)：2799 – 2804.
XUE M X，PU Y.Numerical simulation of chamfering inhibition separation of afterfuel pump spacer [J]. Journal of Aerospace Power，2012，27 (12)：2799 – 2804.

[14] GUO X M，ZHU Z C，CUI B L，et al.Effects of the number of inducer blades on the anti–cavitation characteristics and external performance of a centrifugal pump [J].Journal of Mechanical Science and Technology，2016，30：3173 – 3181.

[15] 刘晓超 . 叶片进口边线型及叶片包角对螺旋离心式燃油泵空化特性影响 [D]. 兰州：兰州理工大学，2021.
LIU X C.Influence of vane inlet edge line shape and vane wrap angle on cavitation characteristics of spiral centrifugal fuel pump [D].Lanzhou：Lanzhou University of Science and Technology，2021.

[16] 张静，陈先培，苏春明，等 . 叶片进口边开孔对离心泵空化和湍动能影响的研究 [J]. 流体机械，2021，49 (7)：14 – 19.
ZHANG J，CHEN X P，SU C M，et al.Study on the effect of vane inlet side opening on cavitation and turbulence energy of centrifugal pump [J].Fluid Machinery，2021，49 (7)：14 – 19.

[17] 李嘉，李华聪，符江锋，等 . 一体式诱导轮与叶轮航空离心泵汽蚀特性研究 [J]. 推进技术，2015，36 (7)：1005 – 1012.
LI J，LI H C，FU J F，et al.Study on cavitation characteristics of an aero-centrifugal pump with integrated inductor and Impeller [J].Journal of Propulsion Technology，2015，36 (7)：1005 – 1012.

[18] LI Y J，CHEN H S，WANG J D，et al.Effect of grooves on cavitation around the body of revolution [J].ASME

Journal of Fluids Engineering,2010,132(1):011301.
[19] TAO R,XIAO R,WANG F,et al.Cavitation behavior study in the pump mode of a reversible pump-turbine [J].Renewable Energy,2018,125:655 – 667.
[20] BACHERT R,STOFFEL B,DULAR M.Unsteady cavitation at the tongue of the volute of a centrifugal pump[J].Journal of Fluids Engineering,2010,132(6):061301.
[21] 叶阳辉,朱相源,孙光普,等.离心泵内空泡演化与其对振动的影响[J].农业机械学报,2017,48(6):88 – 93.
YE Y H,ZHU X Y,SUN G P,et al.Evolution of cavitation in centrifugal pumps and its effect on vibration[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(6):88 – 93.
[22] XIANG L,TAN Y,CHEN H,et al.Experimental investigation of cavitation instabilities in inducer with different tip clearances[J].Chinese Journal of Aeronautics,2021,34(9):168 – 177.
[23] ČDINA M.Detection of cavitation phenomenon in a centrifugal pump using audible sound[J].Mechanical Systems and Signal Processing,2003,17(6):1335 – 1347.
[24] DUPLAA S,COUTIER-DELGOSHA O,DAZIN A,et al. Experimental study of a cavitating centrifugal pump during fast startups[J].Journal of Fluids Engineering,2010,132(2):021301.
[25] YAN Z,LIU J,CHEN B,et al.Fluid cavitation detection method with phase demodulation of ultrasonic signal [J].Applied Acoustics,2015,87:198 – 204.
[26] TIWARI R,BORDOLOI D J,DEWANGAN A. Blockage and cavitation detection in centrifugal pumps from dynamic pressure signal using deep learning algorithm[J]. Measurement,2021,173:108676.
[27] TONG Z,LIU H,CAO X E,et al.Cavitation diagnosis for water distribution pumps:An early-stage approach combing vibration signal-based neural network with high-speed photography[J].Sustainable Energy Technologies and Assessments,2023,55:102919.
[28] 罗光钊.加力燃油泵空化特性研究及结构改进[D].镇江:江苏大学,2021.
LUO G Z.Study on cavitation characteristics and structural improvement of afterfuel pump[D]. Zhenjiang:Jiangsu University,2021.
[29] MEDVITZ R B,KUNZ R F,BOGER D A,et al. Performance analysis of cavitating flow in centrifugal pumps using multiphase CFD[J].Journal of Fluids Engineering,2002,124(2):377 – 383.
[30] 杨孙圣,孔繁余,周水清,等.离心泵气蚀性能的数值计算与分析[J].华中科技大学学报(自然科学版),2010,38(10):93 – 95.
YANG S S,KONG F Y,ZHOU S Q,et al.Numerical calculation and analysis of cavitation performance of centrifugal pump[J].Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition),2010,38(10):93 – 95.
[31] 陈娅,徐三树,张小波,等.高速航空燃油泵水力设计及两相流场数值模拟[J].大电机技术,2021(6):47 – 55.
CHEN Y,XU S S,ZHANG X B,et al.Hydraulic design and numerical simulation of two-phase flow field for high speed aviation fuel pump[J].Big Motor Technology,2021(6):47 – 55.
[32] CAO W,JIA Z,ZHAO Z,et al.Validation and simulation of cavitation flow in a centrifugal pump by filter-based turbulence model[J].Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics,2022,16(1):1724 – 1738.
[33] 华有明,陈云良,熊顺,等.液体射流泵空化流动特性分析[J].流体机械,2023,51(1):36 – 43.
HUA Y M,CHEN Y L,XIONG S,et al.Cavitation flow characteristics of liquid jet pump[J].Fluid Machinery,2023,51(1):36 – 43.
[34] ZHANG F,ZHU L,CHEN K,et al.Numerical simulation of gas-liquid two-phase flow characteristics of centrifugal pump based on the CFD–PBM[J]. Mathematics,2020,8(5):769.
[35] TAO S,SHI G,XIAO Y,et al.Effect of operating parameters on the coalescence and breakup of bubbles in a multiphase pump based on a CFD–PBM coupled model[J].Journal of Marine Science and Engineering,2022,10(11):1693.
[36] ALAM H S,SUTIKNO P,FAUZI SOELAIMAN T A, et al.CFD–PBM Coupled modeling of bubble size distribution in a swirling-flow nanobubble generator [J].Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics,2022,16(1):677 – 693.
[37] 曹玉良,明廷锋,贺国,等.基于深度学习的离心泵空化状态识别[J].西安交通大学学报,2017,51(11):165 – 172.
CAO Y L,MING T F,HE G,et al.Cavitation state recognition of centrifugal pump based on deep learning [J].Journal of Xi′an Jiaotong University,2017,51(11):165 – 172.
[38] TIWARI R,BORDOLOI D J,DEWANGAN A. Blockage and cavitation detection in centrifugal pumps

from dynamic pressure signal using deep learning algorithm[J].Measurement,2021,173:108676.

[39] 赵佳伟.基于CEEMDAN分解与深度学习的单叶片离心泵空化状态识别研究[D].镇江:江苏大学,2023.
ZHAO J W.Cavitation state recognition of single-blade centrifugal pump based on CEEMDAN decomposition and deep learning[D].Zhenjiang:Jiangsu University,2023.

[40] LI G,SUN H,HE J,et al.Deep learning,numerical,and experimental methods to reveal hydrodynamics performance and cavitation development in centrifugal pump[J].Expert Systems with Applications,2024,237:121604.

[41] GRIST E.Cavitation and the centrifugal pump:a guide for pump users[M].London:Routledge,2023.

[42] CHRISTOPHER S,KUMARASWAMY S.Identification of critical net positive suction head from noise and vibration in a radial flow pump for different leading edge profiles of the vane[J].Journal of Fluids Engineering,2013,135(12):121301.

[43] 李晓俊.离心泵叶片前缘空化非定常流动机理及动力学特性研究[D].镇江:江苏大学,2013.
LI X J.Study on unsteady flow mechanism and dynamic characteristics of leading edge cavitation of centrifugal pump blade[D].Zhenjiang:Jiangsu University,2013.

[44] 卢加兴.离心泵空化诱导非定常动力特性及其机理研究[D].镇江:江苏大学,2017.
LU J X.Study on unsteady dynamic characteristics and mechanism of cavitation induced centrifugal pump[D].Zhenjiang:Jiangsu University,2017.

[45] YOSHIDA Y,TSUJIMOTO Y,KATAOKA D,et al.Effects of alternate leading edge cutback on unsteady cavitation in 4-bladed inducers[J].Journal of Fluids Engineering,2001,123(4):762 – 770.

[46] 郁金红.后盖板小叶片对离心泵空化特性的影响研究[D].兰州:兰州理工大学,2020.
YU J H.Study on the influence of rear cover vane on cavitation characteristics of centrifugal pump[D].Lanzhou:Lanzhou University of Technology,2020.

[47] GAN J,ZHANG K,WANG D.Research on noise-induced characteristics of unsteady cavitation of a jet pump[J].ACS Omega,2022,7(14):12255 – 12267.

[48] GE T Y,HU L,SU R,et al.Analysis of cavitation and shear in bellows pump:transient CFD modelling and high-speed visualization[J].Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics,2023,17(1):2247474.

[49] ANDREW S,DEHGHANIYAN S.Numerical investigation of the effect of tip clearance on the cavitation performance of the centrifugal pump inducer[J].Preprints,2023:2023091024.

[50] KARAGIOVANIDIS M,PANTAZI X E,PAPAMICHAIL D,et al. Early detection of cavitation in centrifugal pumps using low-cost vibration and sound sensors[J].Agriculture,2023,13(8):1544.

[51] WANG W,LI Z.Influence of different types of volutes on centrifugal aviation fuel pump[J].Advances in Mechanical Engineering,2021,13(3):16878140211005202.

[52] 赵伟国,张栩,杨良,等.凹槽结构对离心泵空化特性的影响[J/OL].华中科技大学学报(自然科学版),1–7[2024–05–04].https://doi.org/10.13245/j.hust.240724.
ZHAO W G,ZHANG X,YANG L,et al.Groove structure on the influence of the centrifugal pump cavitation characteristics[J/OL].Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition),1–7[2024–05–04].https://doi.org/10.13245/j.hust.240724.

[53] 廉佳,王维军,王晓全,等.微型高速燃油泵空化数值模拟与试验研究[J].流体机械,2024,52(6):58 – 66.
LIAN J,WANG W J,WANG X Q,et al.Numerical simulation and experimental study on cavitation of micro high-speed fuel pump[J].Fluid Machinery,2024,52(6):58 – 66.

[54] 孟遥志,石艳,廖映华,等.多工位回转复合型压曲机结构设计[J].包装与食品机械,2023,41(4):84 – 89.
MENG Y Z,SHI Y,LIAO Y H,et al.Structure design of multi-station rotary compound bending press[J].Packaging and Food Machinery,2023,41(4):84 – 89.

[55] 帅泽豪,王凯,罗光钊,等.叶根圆弧对航空燃油离心泵空化性能的影响[J].流体机械,2023,51(7):60 – 67.
SHUAI Z H,WANG K,LU G Z,et al.Influence of arcs of the impeller blade roots on the cavitation performance of aviation fuel centrifugal pump[J].Fluid Machinery,2023,51(7):60 – 67.

[56] 连加俤,吴鑫燚,黎义斌,等.弹性转子油气混输泵的非线性动力学研究[J].排灌机械工程学报,2023,41(12):1203 – 1211.
LIAN J D,WU X Y,LI Y B,et al. Study on nonlinear dynamics of an elastic rotor oil-gas mixed transport pump[J].Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2023,41(12):1203 – 1211.

(下转第96页)

HU Z Q.Research on the construction of evaluation system in green product standard of household appliances [J].Journal of Appliance Science & Technology, 2020(5):32 – 36.

[33] MAKHNATCH P,KHODABANDEH R.The role of environmental metrics(GWP,TEWI,LCCP) in the selection of low GWP refrigerant[J].Energy Procedia, 2014,61:2460 – 2463.

[34] 胡玉坤,沈致和,慈超.地源热泵空调系统生命周期碳排放研究[J].制冷与空调,2017,31(2):140 – 144.
HU Y K,SHEN Z H,CI C,et al.Carbon emissions research in life cycle of ground source heat air conditioning system[J].Refrigeration & Air Conditioning,2017,31(2):140 – 144.

[35] 程浩,刘秋新.空调新技术对碳排放量影响的探讨[J].工业安全与环保,2012,38(9):66 – 70.
CHENG H LIU Q X.Discussion on impact of new air conditioning technologies on carbon emissions[J]. Industrial Safety and Environmental Protection,2012, 38(9):66 – 70.

[36] 周孟怡,张华,李芳.房间空调器的二氧化碳排放生命周期气候性能分析[J].制冷技术,2023,43(6):14 – 19.
ZHOU M Y,ZHANG H,LI F.Life cycle climate performance analysis of CO_2 emissions of room air conditioner[J].Chinese Journal of Refrigeration Technology,2023,43(6):14 – 19.

[37] 崔志恒,杨昌智.基于DLCA的家用空调器碳排放研究[J].制冷学报,2023,44(2):61 – 67.
CUI Z H,YANG C Z.Research on carbon emission of household air conditioners based on DLCA[J]. Journal of Refrigeration,2023,44(2):61 – 67.

作者简介:张秀平(1971),女,研究员,主要从事制冷空调技术研究工作,通信地址:230031 安徽省合肥市长江西路888号合肥通用机械研究院有限公司,E – mail:zhangxiuping@hgmri.com。

本文引用格式:
张秀平,屈博艺,吴俊峰,等.冷冻空调设备生命周期碳排放评价方法[J].流体机械,2025,53(1):85 – 96.
ZHANG X P,QU B Y,WU J F,et al.The evaluation method of carbon emissions during the life cycle of refrigeration and air conditioning equipment [J].Fluid Machinery,2025,53(1):85 – 96.

(上接第84页)

[57] 赵会宾,曹骞,康灿,等.结构形式对渣浆泵前腔密封面磨损特性的影响[J].排灌机械工程学报,2023,41(3):247 – 252.
ZHAO H B,CAO Q,KANG C,et al.Influence of structure on wear characteristics performance for sealing surface of front chamber of slurry pump [J].Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2023,41(3):247 – 252.

[58] 吕思妍,马挺军.苦荞多肽的制备、功能活性及其在食品中的应用[J].包装与食品机械,2023,41(4):69 – 75.
LYU S Y,MA T J.Preparation,functional activity of tartary buckwheat polypeptide and its application in food[J].Packaging and Food Machinery,2023,41(4): 69 – 75.

[59] 杨明,王磊,尚臣,等.OD1422 mm X80管道环焊接头拉伸应变行为研究[J].压力容器,2023,40(2):18 – 26.
YANG M,WANG L,SHANG C,et al.Study on deformation behavior of girth welded joint of OD1422 mm X80 pipe[J].Pressure Vessel Technology,2023, 40(2):18 – 26.

[60] 熊英华,刘影,李述林,等.基于替代燃料的航空燃油泵内部空化特性[J].航空动力学报,2015,30(11):2607–2615.
XIONG Y H,LIU Y,LI S L,et al.Cavitation characteristics of aviation fuel pump based on alternative fuels[J].AerodynamicsNewspaper,2015, 30(11):2607 – 2615.

作者简介:王永康(1999),男,硕士,主要研究方向为机械摩擦磨损,E–mail:2446176480@qq.com。

通信作者: Dongyang Li(1959),男,加拿大工程院院士,欧洲科学与艺术院院士,主要研究方向为计算材料科学和摩擦学,通信地址:650224 南省昆明市盘龙区青云街道白龙寺300号西南林业大学云南省DongYang Li院士工作站,E – mail:dongyang@ualberta.ca.

本文引用格式:
王永康,陈文刚,王海军,等.发动机燃油泵空化研究进展[J].流体机械,2025,53(1):76 – 84.
WANG Y K,CHEN W G,WANG H J,et al.Cavitation in engine fuel pumps and its research progress[J].Fluid Machinery,2024,53(1):76 – 84.