

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.03.009

探针支杆对离心压气机性能影响的研究

李文凯¹, 左志涛^{1,2,3}, 张华良^{1,2,3}, 郭文宾², 沈昊天¹, 刘俊杰¹, 徐玉杰^{1,2,3}, 陈海生^{1,2,3}

(1. 中科南京未来能源系统研究院, 江苏 南京 211135;

2. 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100190;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:在离心压气机进口处加入探针支杆, 研究其对压气机气动性能的影响, 计算带有不同堵塞比、不同轴向位置和不同形状探针支杆的离心压气机特性线。结果表明: 相比于无探针支杆的工况, 带探针支杆的压气机特性线整体向左下方偏移; 探针支杆在流动中堵塞比越大, 压气机性能衰减越严重; 探针支杆轴向位置对压气机特性线基本无影响; 堵塞比相同时, 水滴型支杆相比于圆柱型支杆压气机性能有所改善, 水滴型支杆前尾缘直径比为 5 : 3 时压气机性能最佳。

关键词:探针支杆; 离心压气机; 流场; 特性线; 数值分析

中图分类号:V231.3 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2026)03-0043-05

Research on the Influence of Probe Radius Rod on the Performance of Centrifugal Compressor

LI Wenkai¹, ZUO Zhitao^{1,2,3}, ZHANG Hualiang^{1,2,3}, GUO Wenbin², SHEN Haotian¹, LIU Junjie¹, XU Yujie^{1,2,3}, CHEN Haisheng^{1,2,3}

(1. Nanjing Institute of Future Energy System, Nanjing 211135, China;

2. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: With a probe radius rod being added at the inlet of the centrifugal compressor, the research looks into its influence on the aerodynamic performance of the compressor, and calculates the characteristic lines of the centrifugal compressor with probe radius rods of different blockage ratios, axial positions, and shapes. The results show that compared to the working condition without probe radius rod, the characteristic line of the compressor with probe radius rod is generally shifted to the lower left, that the larger the blockage ratio of the probe support in the flow channel, the more severe the performance degradation of the compressor, that the axial position of the probe radius rod has little effect on the compressor characteristic line, and that when the blockage ratio stays the same, the performance of the compressor with water-drop-shaped radius rod is improved compared to the cylinder-shaped support, and the compressor works best when the diameter ratio of the front and tail edges of the water-drop-shaped radius rod is 5 : 3.

Keywords: probe radius rod; centrifugal compressor; flow field; characteristic line; numerical analysis

0 引言

接触式气动探针可以简单有效地测量流场中压力、温度等参数, 是压气机性能试验中常用的测量手段^[1]。进口总压探针一般均匀分布在叶片上游^[2], 探针支杆基本为圆柱型, 对此早期的研究可以追溯到圆柱绕流^[3]。实际的叶轮流场更为复杂, 随着压气机研究与试验的发展, 对测试的方法和精度要求越来越高, 由于探针的存在其所产生的影响变得不可忽视。

LEPICOVSKY^[4] 试验研究了叶轮上的探针对压气机出口流场的影响。GOLDMAN 等^[5] 试验测

量了涡轮叶栅的速度, 发现探针的堵塞作用会降低叶片下游的速度。郭文宾^[6] 计算了探针在叶轮出口时的离心压缩机流场, 结果表明: 探针支杆的存在使上游局部气流角和马赫数偏低。MA 和李少辉等^[7-9] 在压气机转子上游安装了一个 50% 叶高的圆柱支杆, 研究证实加入支杆后压气机静压升系数和总压升系数均降低, 安装支杆后压气机的稳定裕度下降, 压气机从不稳定工作状态开始到完全失速的时间更久。杨荣菲和赵建通等^[10-11] 在 1.5 级压气机进口导叶上游, 分别加入直径为 5 mm、10 mm、20 mm 的探针支杆, 数值研究表明随着支杆直径的增加, 压气机特性线向左

第一作者简介:李文凯(1991—), 男, 江苏句容人, 工程师, 硕士, 研究方向为叶轮机械试验与测试, liwenkai1991@126.com。

下方移动,直径越大偏移越大。COLDRICK 等^[12]研究得到探针支杆所在通道流量降低,相邻通道流道相应升高。郑光华等^[13]研究了压气机进口级流道内不同的探针,得到出口截面的总压损失系数与探针支杆的直径和形状都有关。XIANG 等^[14]研究了探针支杆尾部结构对压气机叶栅流场的影响,椭圆型支杆可以抑制探针的尾流损失。向宏辉和李正等^[15-16]对安装在叶片上的叶型探针也有相关研究。刘氢旭等^[17]对进口探针支杆诱发压气机转子叶片振动进行了流固耦合研究。李文凯等^[18]总结了探针对叶轮机械流场与性能影响研究的进展。

国内外有关探针对压气机性能的研究,大多数集中在轴流压气机和叶栅通道,而离心压缩机具有高压比、结构简单、稳固等特点,在工业领域被广泛应用,同样具有研究意义。本文采用数值模拟手段,详细研究进口处探针对离心压气机性能和流场的影响。

1 方法

1.1 研究对象

研究对象为单级离心压气机,共 24 个叶片。由于接触式探针主体部分为支杆,在研究时将其简化为探针支杆对离心压气机性能的影响。离心压气机设计转速为 22 343 r/min,探针支杆位于压气机进口处。国内外学者为了降低计算量,均采用多通道计算^[19-20],结果满足分析要求,因此本文采用 1/3 圆周,即按 8 个叶片通道计算。

离心压气机及探针轴向位置如图 1 所示,探针支杆直径为 5 mm、10 mm、15 mm,轴向位置分别为 $0.5L$ 、 $0.8L$ 、 L 、 $1.2L$,其中 L 为离心叶轮叶尖前缘到尾缘的轴向长度。

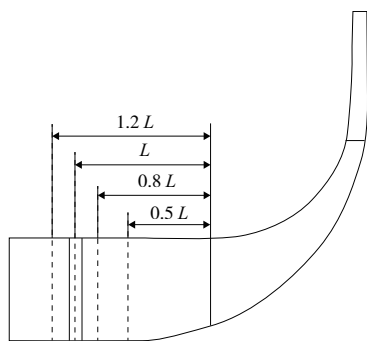


图 1 探针支杆轴向位置图

1.2 数值计算方法

采用 CFX 软件进行数值模拟,选用 SST 湍流

模型,进气方向为轴向,壁面采用绝热无滑移。计算给定进口总压 101 325 Pa、总温 288.15 K,出口为平均静压,定常计算通过不断地调节出口背压得到压气机性能曲线,收敛依据为残差曲线低于 10^{-6} 。

1.3 网格可靠性

如图 2 所示,模型进口处采用 ICEM、叶轮处采用 Turbogrid 进行六面体结构化网格划分,探针支杆、叶片和流道壁面进行网格加密。同时进行网格无关性检验,如图 3 所示,选取直径 10 mm 探针在轴向位置 L 处的模型,对比网格数量为 227×10^4 、 489×10^4 、 697×10^4 和 985×10^4 下的压气机性能,当网格达到 697×10^4 以后,最高效率点工况下进出口压比稳定,可认为该数量网格满足要求。

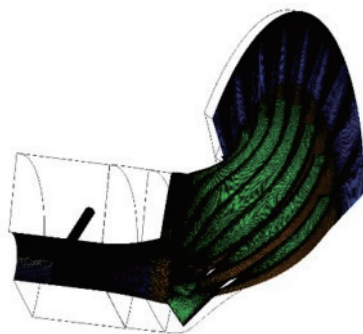


图 2 探针支杆和叶轮网格示意图

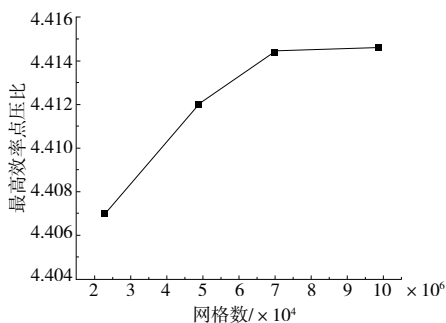


图 3 网格无关性检验

2 结果与讨论

本文分析了进口探针支杆几何参数对离心压气机气动性能的影响,以直径为 10 mm 的圆柱型探针支杆为基准,比较了堵塞比、轴向位置,以及形状不同的支杆对压气机性能的影响。

2.1 探针支杆堵塞比对压气机性能的影响

选取直径为 5 mm、10 mm、15 mm 的探针支杆,在流道中对应的堵塞比分别为 0.032 6、0.065 2、0.097 9,探针轴向位置均为 L ,计算压气机性能。结果如图 4,探针支杆直径增加导致压气机特性线向

左下方偏移,且支杆直径越大特性线下降越大。对比无探针工况,支杆直径为 5 mm、10 mm、15 mm 时,压气机平均压比分别降低 0.23%、0.91%、2.20%;平均效率分别降低 0.20%、0.53%、1.02%。

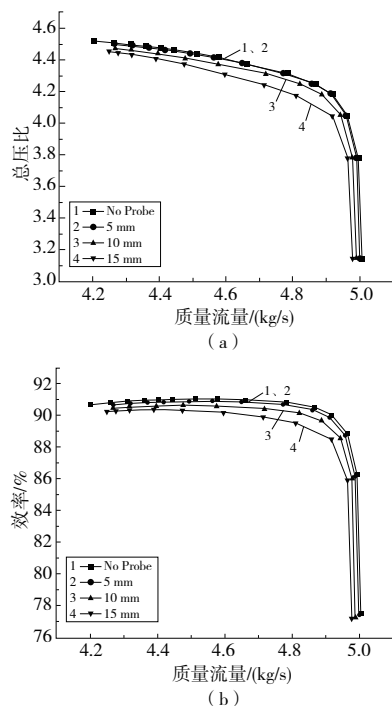


图 4 不同直径探针支杆压气机特性线

图 5、图 6 分别是压气机最高效率点 50% 叶高截面的静熵云图和马赫数云图,从图中可以看出,随着探针支杆直径的增加,支杆的尾迹强度与厚度相应增大,直径越大的支杆尾迹影响程度越高,流道内气流损失的增加是造成压气机特性线下降的原因。

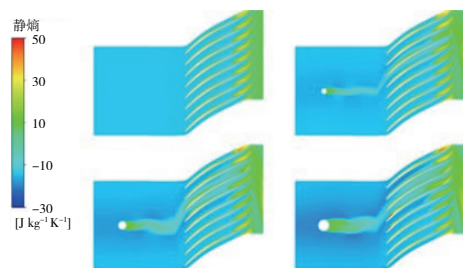


图 5 不同直径探针支杆静熵云图

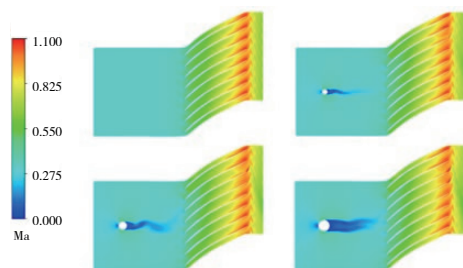


图 6 不同直径探针支杆马赫数云图

2.2 探针支杆轴向位置对压气机性能的影响

选取直径为 10 mm 的探针支杆,分别计算其轴向位置 0.5L、0.8L、L、1.2L 处 4 种模型的压气机性能。如图 7 所示,探针轴向位置不同,压气机特性线变化不大。

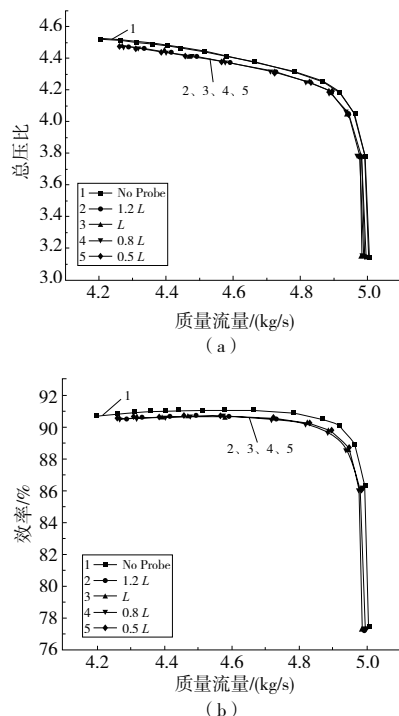


图 7 不同轴向位置探针支杆压气机特性线

图 8、图 9 分别是压气机最高效率点 50% 叶高截面的静熵云图和马赫数云图,从图中可以看出,探针支杆轴向位置不同,支杆尾迹强度与厚度基本没有变化,压气机性能差别较小。

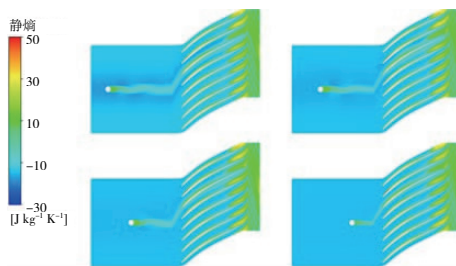


图 8 不同轴向位置探针支杆静熵云图

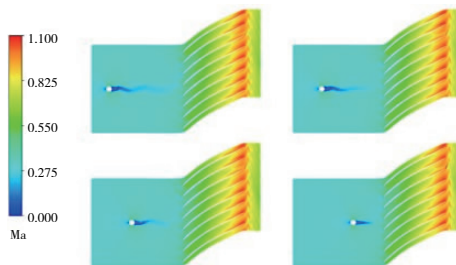


图 9 不同轴向位置探针支杆马赫数云图

2.3 探针支杆形状对压气机性能的影响

为了降低探针支杆对压气机性能的影响,将支杆形状优化,在堵塞比相同条件下,选取了尾缘不同的5种水滴型支杆,与圆柱型进行对比分析,几何结构如图10所示,圆柱型支杆直径为10 mm,水滴型支杆前缘直径 $d_1=10$ mm,尾缘直径 d_2 为2~10 mm,探针轴向位置均为 L 。

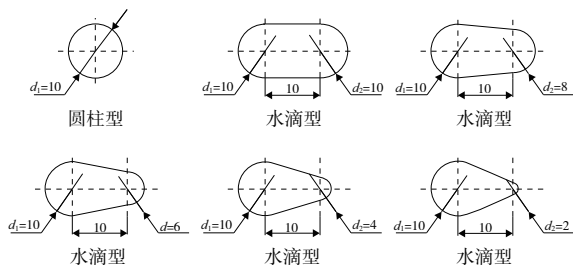


图10 圆柱型和水滴型探针支杆

通过数值计算,6种模型的压气机特性线如图11所示,尾缘直径 $d_2=4\sim 10$ mm的4种水滴型支杆的压气机特性线较圆柱型有所提升,其中 $d_2=6$ mm时压气机性能最佳,平均压比和效率相比于圆柱型分别提高0.73%和0.31%;尾缘直径为2 mm的水滴型支杆与圆柱型支杆压气机特性线相当。

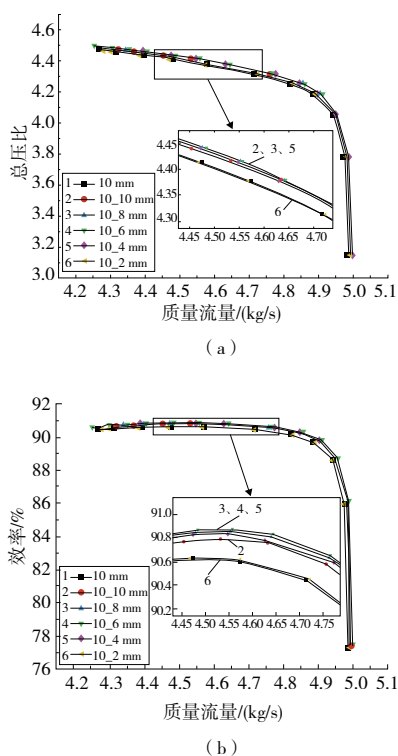


图11 不同形状探针支杆压气机特性线

图12为压气机最高效率点50%叶高截面的静熵云图,当探针支杆由圆柱型转变为水滴型并随着尾缘直径从10 mm到2 mm逐渐减小时,支杆的尾迹强度与厚度呈现先减小后增加的趋势,尾缘直径为6 mm的支杆尾迹强度与厚度最小。

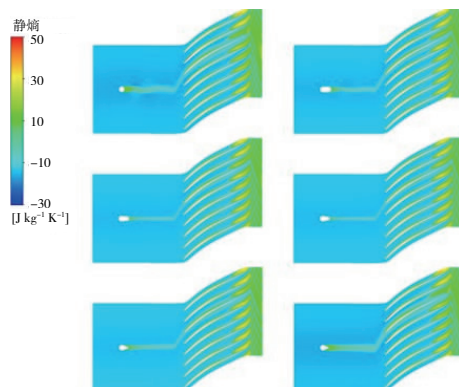


图12 不同形状探针支杆静熵云图

对流动机制分析,图13对比了不同形状探针支杆周围的流线图,随着水滴型支杆尾缘的减小其气流分离区范围呈现先减小后增大的趋势,规律与静熵云图变化一致,尾缘直径为6 mm的支杆分离区范围最小,与圆柱型相比流场有了显著的改善。这说明了探针支杆的形状一定程度上影响了气流的耗散,最优前缘与尾缘直径比为5:3,这与图11中结果相符。

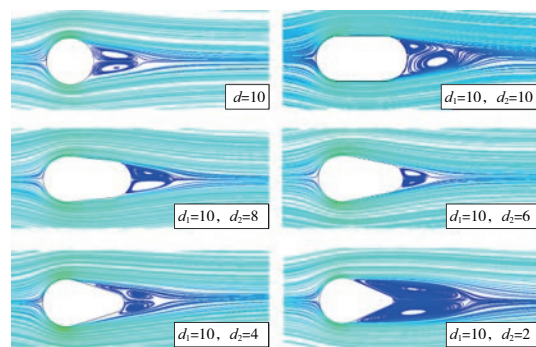


图13 不同形状探针支杆流线图

3 结语

本文通过数值计算,研究了探针支杆对离心压气机性能的影响,得到如下结论:

1) 探针支杆造成压气机进口堵塞,其尾迹影响了下流的流动,相比于无探针工况压气机流量、压比、效率均有所降低,特性线也整体向左下方偏移。

2) 对于圆柱型探针支杆,其在流道中堵塞比的增加使得压气机性能衰减更严重,直径为5 mm、10 mm、15 mm的探针支杆相比于无探针的压气机,平均压比分别降低了0.23%、0.91%、2.2%,平均效率分别降低了0.2%、0.53%、1.02%。探针支杆轴向位置对压气机性能基本无影响。

3) 堵塞比相同时,水滴型支杆相比于圆柱型,其尾迹的能量耗散可以得到减弱。当水滴前尾缘直径比为5:3时,支杆尾迹的强度与厚度以及分离区范围最小,平均压比和效率相比于圆柱型支杆压气机分别提高了0.73%和0.31%,这对以后试验中探针形状的选取具有指导意义。

参考文献:

- [1] 盛森芝. 流速测量技术[M]. 北京大学出版社,1987.
- [2] 张宝诚. 航空发动机试验和测试技术[M]. 北京航空航天大学出版社,2005.
- [3] 丁祖荣. 流体力学(中册)[M]. 高等教育出版社,2003.
- [4] LEPICOVSKY J. Effects of a rotating aerodynamic probe on the flow field of a compressor rotor[R]. Wadding: NASA. 2008.
- [5] GOLDMAN L J, SEASHOLTZ R G, MCLALLIN K L. Velocity surveys in a turbine stator annular-cascade facility using laser Doppler techniques[R]. Washington: NASA, 1976.
- [6] 郭文宾. 压缩空气储能系统离心压缩机变工况特性及调节规律研究[D]. 中国科学院大学(中国科学院工程热物理研究所),2021.
- [7] MA H, LI S, WEI W. Effects of Probe Support on the flow field of a low-speed axial compressor[J]. Journal of Thermal Science, 2014(2):120-126.
- [8] MA H, LI S, WEI W. Effects of probe support on the stall characteristics of a low-speed axial compressor[J]. Journal of Thermal Science, 2016,25(1):43-49.
- [9] 李少辉. 探针支杆对压气机下游流场的影响[D]. 北京:北京航空航天大学,2013.
- [10] 杨荣菲,赵建通,向宏辉等. 进口探针支杆对1.5级压气机气动性能的影响[J]. 推进技术,2017,38(5):1038-1046.
- [11] 赵建通. 稳态测试布局对压气机气动性能的影响[D]. 南京航空航天大学,2016.
- [12] COLDRICK S, IVEY P, WELLS R. Considerations for using 3-D pneumatic probes in high-speed axial compressors[J]. Journal of Turbomachinery, 2003, 125(1):149-154.
- [13] 郑光华,水飞,胡金鑫等. 不同结构探针对接气机进口级流场及测量结果的影响[J]. 西北工业大学学报,2021,39(4):858-864.
- [14] XIANG H H, GE N, GAO J, et al. Experimental investigation of the effect of the probe support tail structure on the compressor cascade flow field[J]. International Journal of Turbo Jet-Engines, 2019, 36(1):9-18.
- [15] 向宏辉,任铭林,马宏伟等. 两类叶型探针对接压叶栅流场影响的对比[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2011,24(3):26-30.
- [16] 李正. 压气机级间叶型受感部堵塞比对压气机性能的影响[D]. 南京航空航天大学,2012.
- [17] 刘氩旭,杨荣菲,向宏辉等. 进口探针支杆诱发压气机转子叶片振动的流固耦合研究[J]. 机械制造与自动化,2021,50(1):211-214.
- [18] 李文凯,左志涛,张华良,等. 探针对接叶轮机流场及性能影响的研究进展[J]. 内燃机与配件,2025,(1):1-5.
- [19] 马宏伟,项乐. 探针支杆对接气机转子性能及流场影响的数值模拟研究[J]. 推进技术,2016,37(12):2288-2295.
- [20] 朱高平,薛伟鹏,唐国庆等. 探针对接跨声速环形涡轮叶栅流场的影响[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2019,32(2):28-33,41.

收稿日期:2024-02-27