

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2022.01.09

总压探针性能结构敏感性分析

万浩涵, 赵俭, 李亚晋

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 总压探针结构是影响探针性能的关键因素, 结构对总压系数、不敏感角大小等性能影响很大。为了研究总压探针性能的结构敏感性, 制作不同类型且不同关键尺寸的总压探针, 包括凸嘴型总压探针和带套型总压探针。在校准风洞上对这些探针进行总压系数校准试验, 发现整流罩型探针性能最好, 屏蔽罩型探针次之, 凸嘴型探针性能最差。通过对比试验结果, 得到了探针关键尺寸对其性能的影响规律。

关键词: 总压探针; 结构敏感性分析; 总压系数; 不敏感角; 关键尺寸

中图分类号: TB93; TU453 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5795(2022)01-0058-05

Structure sensitivity analysis of total pressure probe performance

WAN Haohan, ZHAO Jian, LI Yajin

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 10095, China)

Abstract: The structure of total pressure probe is the key factor affecting the probe performance. The structure greatly influences the total pressure coefficient and insensitive angle. In order to study the structural sensitivity of the performance of total pressure probe, different types of total pressure probes with different key dimensions are made, including convex-nosed total pressure probe and sleeve-type total pressure probe. The total pressure coefficient calibration test of these probes were carried out in the calibration wind tunnel, and the results show that the rectifier-type probe has the best performance, the shield-type probe takes the second place, and the convex-nose type probe has the worst performance. By comparing the test results, the influence law of key dimensions of probe on its performance is obtained.

Key words: total pressure probe; structure sensitivity analysis; total pressure coefficient insensitive angle; key dimensions

0 引言

总压探针结构是总压探针设计时需要考虑的关键问题, 结构对总压系数、不敏感角等性能影响很大^[1-2]。

林其勋和游绍堃等人^[3]研究了总压探针不敏感角与气流速度的关系, 发现在总压探针感压孔外面加引导管可以提高探针不敏感角, 感压孔有倒角的总压探针不敏感角更大, 并给出了L型、带套型、球窝型等几种典型总压探针结构及其不敏

感角。

VENKATESWARAN S 和 WALL M M 等人^[4-5]发现临壁测量时, 壁面与探针的相互干扰会严重影响被测流场结构, 引起测量误差。

王肖等^[6]对单点和多点梳状总压探针的堵塞效应进行了研究, 发现总压探针的介入使被测流场流量减小, 相比于探针结构, 堵塞效应受堵塞比的影响更大。

李正^[7]以二级低速轴流压气机为基础, 研究探针对压气机性能的影响, 发现叶型探针几乎不

收稿日期: 2021-11-20; 修回日期: 2022-01-13

基金项目: 国家“十三五”技术基础科研项目(JSJL 2018205B005)

引用格式: 万浩涵, 赵俭, 李亚晋. 总压探针性能结构敏感性分析[J]. 计测技术, 2022, 42(1): 58-62.

Citation: WAN H H, ZHAO J, LI Y J. Structure sensitivity analysis of total pressure probe performance[J]. Metrology and Measurement Technology, 2022, 42(1): 58-62.



影响压气机平均流场结构, 探针尺寸越小对流场的影响越小。

以往研究多结合发动机试验, 聚焦总压探针结构设计较少, 且发动机流场复杂, 试验条件重复性低, 不同车次试验工况相差较大, 导致试验结果不确定度大, 难以准确找到影响规律^[8-12]。为了研究结构对探针性能的影响, 制作不同类型且不同关键尺寸的总压探针, 其中有凸嘴型总压探针、带套型总压探针^[3]。在校准风洞上对探针进行校准试验^[14-15], 比较不同结构探针的试验结果, 研究总压探针结构对探针性能的影响。

1 凸嘴型总压探针

凸嘴型是一种结构简单、易加工的总压探针结构, 引压管直接从支杆伸出, 引压管口直对气流^[3], 结构如图1所示。凸嘴型总压探针不敏感角可达 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$, 迎风面积小, 适合需要密集排布的场所, 如作为附面层探针使用。

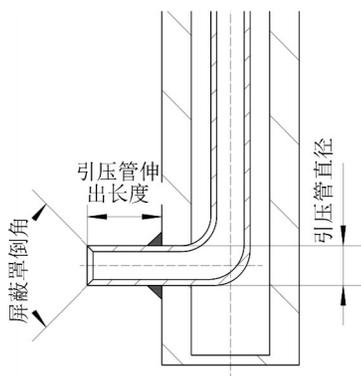


图1 凸嘴型探针结构图

Fig.1 Structure of the convex-nosed probe

本次试验采用了不同的引压管头部长径比即 l/d , 引压管倒角 a , 共加工了6支关键尺寸不同的凸嘴型总压探针, 结构尺寸如表1。

为了探究长径比 l/d 对于总压探针性能影响, 将1号、2号、3号探针同时安装在风洞气流核心区进行总压系数校准试验^[4]。试验马赫数 Ma 为0.5, 气流偏转角为 $0^{\circ}, \pm 10^{\circ}, \pm 15^{\circ}, \pm 20^{\circ}, \pm 25^{\circ}$, 每次试验重复5次, 结果取平均值。第一次凸嘴型探针总压系数校准试验结果如图2所示。

从试验结果来看, 1号探针不敏感角较小, 在气流偏角 $\pm 10^{\circ}$ 内总压系数小于1‰, 当气流偏角大于 15° 时, 总压系数较大; 2号探针不敏感角大,

表1 凸嘴型总压探针尺寸表

Tab.1 Dimensions of the convex-nosed total pressure probe

编号	l/d	倒角 $a/(^{\circ})$
1	2	60
2	5	60
3	10	60
4	5	90
5	10	90
6	5	120

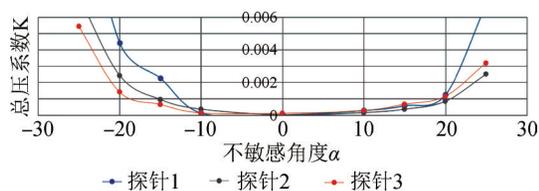


图2 第一次凸嘴型探针总压系数校准试验结果

Fig.2 Results of first calibration test of the total pressure coefficient of convex-nosed probe

在气流偏角 $\pm 15^{\circ}$ 内, 总压系数小于1‰; 3号探针不敏感角大, 在气流偏角 $\pm 15^{\circ}$ 内, 总压系数小于1‰, 在负偏角气流下, 总压系数小于2号探针; 2号探针出现了正负偏角结果不对称, 可能由于加工误差所致。由此看来, 对于凸嘴型探针而言, 长径比在5~10之间性能较好, 长径比小于2时性能较差。

将2号、4号、6号探针同时安装在风洞气流核心区进行总压系数校准试验, 探究凸嘴型探针倒角对总压探针性能的影响规律。试验条件与第一次试验一致, 第二次试验结果如图3所示。

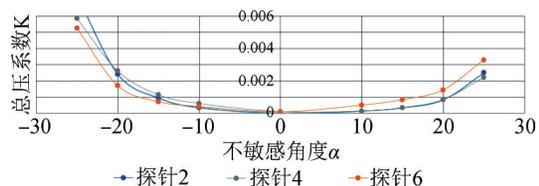


图3 第二次凸嘴型探针总压系数校准试验结果

Fig.3 Results of second calibration test of the total pressure coefficient of convex-nosed probe

从试验结果来看, 2号、4号、6号探针性能比较接近, 不敏感角较大, 在气流偏角 $\pm 15^{\circ}$ 内总压系数都小于1‰。考虑到加工误差对于探针性能的影响, 凸嘴型探针倒角 a 对总压探针性能的影响不

大, 60°~90°都有不错的性能。

将2号、3号、4号、5号探针都安装在风洞气流核心区, 同时进行总压系数校准试验, 研究最佳凸嘴型总压探针的关键尺寸。试验条件保持不变, 得到结果如图4所示。

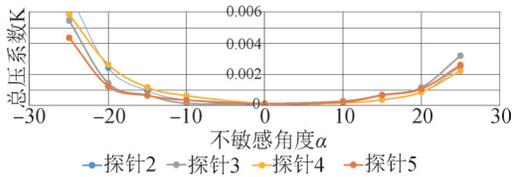


图4 第三次凸嘴型探针总压系数校准试验结果

Fig.4 Results of third calibration test of the total pressure coefficient of convex-nosed probe

由图4可见, 5号探针性能最佳, 不敏感角大, 气流偏角±15°内总压系数小于1‰, 是凸嘴型探针中的最佳结构。综上, 凸嘴型探针的长径比 l/d 选择5~10、引压管倒角为60°时, 探针性能最佳。

2 带套型总压探针

为了提高总压探针的不敏感角性能, 在凸嘴型结构探针试验结果的基础上, 研究了两种不同结构的带套型总压探针, 带套型总压探针是在引压管外套上一个气流罩, 使气流更加集中, 可以提高总压探针的不敏感角, 但会增加迎风面积, 对测点间距要求较大^[3]。

第一种带套型探针是有后端出气口的整流罩总压探针, 结构如图5。第二种带套型总压探针是屏蔽罩无出气口的总压探针, 结构如图6, 这种总压探针比较适用于多点总压耙, 所需空间小, 可以将测点间距布置得比较密集。

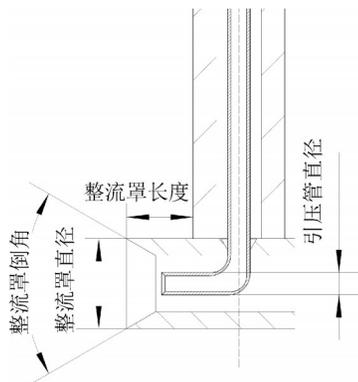


图5 整流罩总压探针

Fig.5 Structure of the rectifier-type total pressure probe

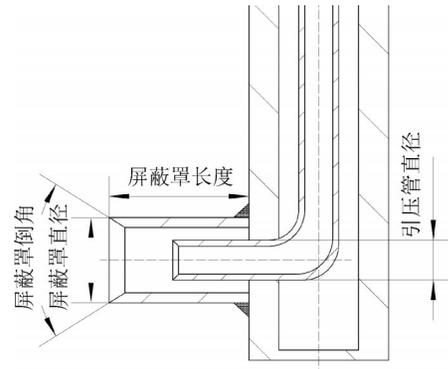


图6 屏蔽罩总压探针

Fig.6 Structure of the shield-type total pressure probe

针对整流罩型总压探针的结构, 改变整流罩直径与引压管直径 d 的比例即 D/d 、整流罩长径比 l/D 、以及倒角 a , 加工了不同结构尺寸的带套型总压探针, 结构尺寸见表2。

表2 整流罩型总压探针尺寸表

Tab.2 Dimensions of the rectifier-type total pressure probe

编号	D/d	l/D	倒角 $a/(^\circ)$
1	1.5	2	60
2	2	2	60
3	3	2	60
4	2	3	60
5	2	5	60
6	2	3	90

将1~6号整流罩型探针安装在风洞气流核心区同时进行总压系数校准试验, 试验马赫数 Ma 为0.5, 气流偏转角度为0°, ±10°, ±15°, ±20°, ±25°, 每次试验重复5次, 结果取平均值, 得到整流罩型探针总压系数校准试验结果如图7所示。

由图7可见, 整流罩型探针中4号性能最佳, 不敏感角大, 气流偏角±20°内总压系数小于1‰, 是整流罩型探针中的最佳结构。对比1号、2号、3

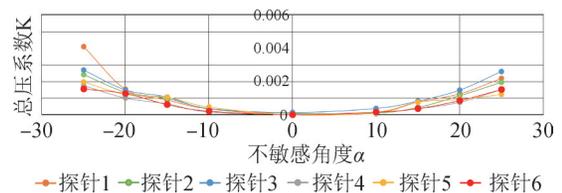


图7 整流罩型探针总压系数校准试验结果

Fig.7 Calibration test results of the total pressure coefficient of rectifier-type probe

号的试验结果,三者性能数据无显著性差别,考虑到探针加工误差对探针性能的影响,说明 D/d 在1.5~3范围内,探针性能差异不大。进一步对比2号、4号、5号探针,发现整流罩长径比 l/D 小的探针性能劣于长径比大的探针,说明大长径比整流罩型总压探针不敏感角更大。对比4号、6号的试验结果来看,两只探针性能差别不大,考虑到探针加工误差对探针性能的影响,说明倒角 60° 和 90° 的整流罩型总压探针不敏感角相差不大。

屏蔽罩型总压探针的关键尺寸与整流罩型类似,加工了几支不同结构尺寸的屏蔽罩型总压探针,如表3所示。将所有探针安装在风洞气流核心区同时进行总压系数校准试验,试验马赫数 Ma 为0.5,气流偏转角度为 $0^\circ, \pm 10^\circ, \pm 15^\circ, \pm 20^\circ, \pm 25^\circ$,每次试验重复5次,结果取平均值。得到屏蔽罩型探针总压系数校准试验结果如图8。

表3 屏蔽罩型总压探针尺寸表

Tab.3 Dimensions of the shield-type total pressure probe

探针编号	D/d	l/D	倒角 $\alpha/(^\circ)$
1	1.5	2	60
2	2	2	60
3	3	2	60
4	2	5	60
5	2	8	60
6	2	5	90

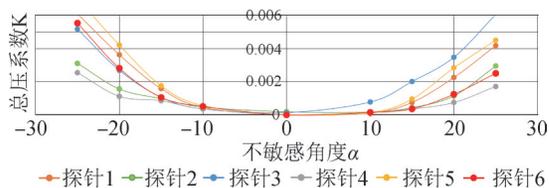


图8 屏蔽罩型探针总压系数校准试验结果

Fig.8 Calibration test results of the total pressure coefficient of shield-type probe

从图8看来屏蔽罩型探针中4号性能最佳,不敏感角大,气流偏角在 -20° 时,总压系数为1.1‰,是屏蔽罩型探针中的最佳结构。对比1号、2号、3号的试验结果,屏蔽罩直径与引压管直径 d 之比 D/d 选择2较为合适,当 $D/d < 2$ 时,总压性能下降较多,当 $D/d > 2$ 时,总压性能也会降低。对比2号、4号、5号的试验结果,发现屏蔽罩型长径比

$l/D=5$ 时不敏感角最大,当 $l/D < 5$ 时,总压性能下降较多,当 $l/D > 5$ 时,总压性能也会降低。对比4号、6号的试验结果来看,倒角为 60° 性能更好。综合看来,在设计整流罩型总压探针时,选择 $D/d=2, l/D=5$,倒角为 60° 的尺寸设计较为合适。

3 结论

综合所有试验结果来看,整流罩型总压探针性能最好,考虑到探针加工误差,大长径比探针不敏感角更大,而整流罩倒角和整流套直径与引压管直径 d 之比 D/d 对探针性能影响较小,其中 $D/d=2, l/D=5$,倒角为 60° 的探针性能最佳,在气流偏角 $\pm 20^\circ$ 内总压系数小于1‰。屏蔽罩型总压探针性能略差于整流罩型,气流偏角在 -20° 时,总压系数为1.1‰。凸嘴型探针性能较差,气流偏角小于 $\pm 15^\circ$ 时总压系数小于1‰。

可见在设计总压探针时选择带套型结构优于引压管凸出的结构,有后端出气口的整流罩型最佳。但整流罩型总压探针迎风面积大,安装工艺较复杂,如果不敏感角要求不高,而多测点密集排列的总压探针可以采用凸嘴型设计,而屏蔽罩型的设计适用于测点密集且不敏感角要求较高的总压测试环境。

为对试验结果更深入地分析,下一步将通过气动仿真模拟和气动机理分析,对这几种结构总压探针机理进行理论分析,使结论更好地作用于探针优化设计。

参考文献

[1] 王振华,王亮. 航空发动机试验测试技术发展探讨[J]. 航空发动机, 2014, 40(6): 47-51.
WANG Z H, WANG L. Discussion on the development of aeroengine test technology [J]. Aircraft engine, 2014, 40(6): 47-51. (in Chinese)

[2] ABERNATHY R B, POWELL B D, COLBERT D L, et al. Handbook, uncertainty in gas turbine measurements[R]. AEDC-TR-73-5.

[3] 林其勋,游绍堃. 航空发动机气动参数测量[M]. 北京:国防工业出版社, 1980: 27-35.
LIN Q X, YOU S K. Aeroengine aerodynamic parameter measurement [M]. National Defense Industry Press, 1980: 27-35. (in Chinese)

[4] VENKATESWARAN S. Experimental study of casing boundary layers in a multistage axial compressor [J].

- Journal of fluids engineering, 1991, 113(2): 102-110.
- [5] WALL M M. Proximity effects on the measuring accuracy of wedge probes [C]. Proceeding of the Fourth Asian Congress of Fluid Mechanics, 1989:50.
- [6] 王肖, 惠呈程, 吕文召. 亚声速条件下总压探针堵塞效应的数值研究[C]. 中国航天第三专业信息网第四十届技术交流会暨第四届空天动力联合会议论文集, 2019, (8):43-52.
- WANG X, HUI C C, LYU W Z. Numerical study on the blocking effect of total pressure probe at subsonic velocity [C]. Proceedings of the 40th Technology Exchange Conference and the 4th Aerospace Power Joint Conference of the third professional information network of China Aerospace, 2019, (8): 43-52. (in Chinese)
- [7] 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:南京航空航天大学, 2012.
- LI Z. Effect of the blockage ratio of the sensing part on the performance of the compressor [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [8] 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, 8(39): 858-863.
- ZHENG G H, SHUI F, HU J X, et al. Effects of different probe structures on flow field and measurement results of compressor inlet stage [J]. Journal of northwest university of technology, 2021, 8(39):858-863. (in Chinese)
- [9] TAO H G, CHEN H X, XIE J L, et al. An alternative approach to quantifying fluid flow uniformity based on area-weighted average velocity and mass-weighted average velocity [J]. Energy & buildings, 2011, 45(2): 116-123.
- [10] 王洪伟, 方剑, 王治. 速度梯度对圆柱探针测量的影响及修正[J]. 航空动力学报, 2008, (4): 712-717.
- WANG H W, FANG J, WANG Z. Influence of velocity gradient on cylindrical probe measurement and its correction [J]. Journal of aeronautical power, 2008, (4): 712-717. (in Chinese)
- [11] 马宏伟, 蒋浩康. 速度梯度和近壁效应对压力探针测量误差的影响[J]. 燃气涡轮试验与研究, 1997, (4): 42-47.
- MA H W, JIANG H K. Influence of velocity gradient and near wall effect on measurement error of pressure probe [J]. Test and research of gas turbine, 1997, (4): 42-47. (in Chinese)
- [12] 林其勋, 许都纯, 刘松龄. 压力探针临壁效应的试验研究[J]. 航空动力学报, 1996, (1): 57-59.
- LIN Q X, XU D C, LIU S L. Experimental study on wall effect of pressure probe [J]. Journal of aeronautical power, 1996, (1): 57-59. (in Chinese)
- [13] 袁帅, 孙琪, 王晓良, 等. 某型汽轮机排气总压探针设计研究[J]. 自动化仪表, 2015, (4): 56-59.
- YUAN S, SUN Q, WANG X L, et al. Design and research of total exhaust pressure probe for a steam turbine [J]. Automatic instrument, 2015, (4): 56-59. (in Chinese)
- [14] 赵彬, 赵俭. 超音速条件下基于CFD的压力探针校准特性数值模拟[J]. 计测技术, 2017, 37(2): 15-18.
- ZHAO B, ZHAO J. Numerical simulation of pressure probe calibration characteristics based on CFD under supersonic conditions [J]. Metrology & measurement technology, 2017, 37(2): 15-18. (in Chinese)
- [15] 侯孟. 一种典型总温总压复合探针气动特性的试验研究[J]. 内燃机与配件, 2019, (2): 14-15.
- HOU M. Study on the aerodynamic characteristics of a typical composite probe [J]. Internal combustion engines and accessories, 2019, (2): 14-15. (in Chinese)

(本文编辑:朱俊真)



第一作者:万浩涵(1993—),男,湖北石首人,工程师,硕士,主要从事特种测温及流速测量研究。