

# 集流式梳状总压探针设计与应用

陆轶凡

(南京航空航天大学直升机动力学全国重点实验室, 南京 210016)

**摘要:** 从双级、四级低速大尺寸轴流压气机特性及流场测量需求出发, 文章探讨了不同总压探针的结构形式及安装方式, 分析了各种形式探针对前方来流射角度的要求及对测量结果的影响, 提出了用集流梳式总压探针测量压气机进出口及级间气流总压的必要性。其中, 加工、制作了6点集流式梳状总压探针, 通过流场标定证实了该型探针用于压气机内部流场总压测量的优越性。

**关键词:** 压气机; 流场测量; 总压探针

**中图分类号:** V248 **文献标识码:** A

## Design and application of flow-concentrating comb total pressure probe

LU Yifan

(National Key Laboratory of Helicopter Aeromechanics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Starting from the characteristics and flow field measurement requirements of two-stage and four stage low-speed large-size axial compressors, this article explores the structural forms and installation methods of different total pressure probes, analyzes the requirements of various probe forms for the incident angle of the incoming flow and their influence on the measurement results, and proposes the necessity of using a flow comb total pressure probe to measure the total pressure of the compressor inlet and outlet and inter stage airflow. Among them, a 6-point flow collection type dressing total pressure probe was processed and manufactured, and the superiority of this type of probe for measuring the total pressure of the internal flow field of the compressor was confirmed through flow field calibration.

**Key words:** compressor, flow field measurement, total pressure probe

### 1 引言

轴流压气机是航空燃气涡轮发动机中的核心组件, 其性能直接关系到航空发动机的整体表现<sup>[1-3]</sup>。轴流压气机由多排转子叶片与静子叶片交错配置而成, 且每排叶片均由沿周向均匀分布的多个叶片构成。这种复杂的结构导致其内部流场极为复杂。因此, 就目前而言, 试验测量仍是探究轴流压气机内部流场特性及其气性能的重要手段。

流场参数测量的精确度直接关乎试验结果的可靠性。当前, 压气机内部气流总压的测量手段多样, 但常规的接触式测量倾向于采用针式、梳状或直管式总压探针等方法。尽管这些总压探针制作简便, 但它们在压气机内部流场测量中的应用却存在较大的局限性, 且对安装条件有较高要求<sup>[4]</sup>, 因为准确测量气流总压要求探针的感应部分必须正对来流方向, 这是获取准确总压值的前提。在安装探针前, 必须了解气流的流向, 确保探针

的感应部分在安装时正对来流。然而, 压气机内部的气流由上游压气机转子旋转而产生, 其方向往往不确定, 随着压气机工作状态的改变而变化。因此, 虽然常规的探针在流场品质良好且工作状态稳定的测量风洞中能满足需求, 但在测量压气机内部旋转气流时仍存在诸多不足。

近年来, 随着技术的不断进步, 许多学者对总压探针进行了研究。通过收集某型航空发动机试验中实际应用的典型结构总压探针及总温总压复合探针的风洞校准试验数据, 侯孟<sup>[5]</sup>利用工程中常用的偏流角影响系数评估了该复合探针的有效偏流角范围, 为这种典型结构复合探针的应用准确性和可靠性提供了坚实的试验数据支持。武乐群<sup>[6]</sup>提出了一种结合数值模拟和改进粒子群算法的总压探针结构联合优化方法, 成功获得了优化的探针结构。张倩等<sup>[7]</sup>基于正二十面体, 创新地设计了一种新的十八孔探针布局, 有效提升了测孔的使用效率。这些新方法在探测性能上具有显著优势, 但它们

仍存在前期准备复杂、成本大幅增加等问题,因此现有实验多采用常规探针。针对常规探针存在的缺点,本文提出了一种采用集流梳式的总压探针方案,旨在有效解决以上问题。

## 2 常规形式的总压探针

### 2.1 总压探针的基本原理

根据一维定常等熵流动的能量方程,当探针正对来流方向时,探针内测得的压力即为气流完全滞止的总压:

$$\left(p_2 + \frac{1}{2}V_2^2\right) - \left(p_1 + \frac{1}{2}V_1^2\right) = R - k \quad (1)$$

式中, $V_1$ 为进口速度; $V_2$ 为出口速度; $p_1$ 为进口压力; $p_2$ 为出口压力; $R$ 为气体常数; $k$ 为多变指数。当进口速度 $V_2$ 为0时,可得到滞止压力:

$$\frac{p^*}{p} = \left(1 + \frac{k-1}{2}M^2\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (2)$$

值得注意的是,当探针不是正对气流的来流方向而是存在一定的夹角时,探针测得的便是这一方向上的总压,它会小于所测气流的真实总压。

### 2.2 常规总压探针的结构及不足

常规总压探针一般由受压管(即受感部)及支撑受压管的支架组成,如图1所示。受压管的长短可以根据被测对象进行选择,一般以支撑支架不干扰被测对象为准,这一选择过程通常依赖制作者的经验。而在使用安装过程中,被测对象的复杂结构给安装带来了不便。若被测对象在标准风洞中进行试验,那么探针的安装角度通常会预先确定,且在安装时能确保准确。在这种情况下,采用常规探针即可满足试验的测量要求。

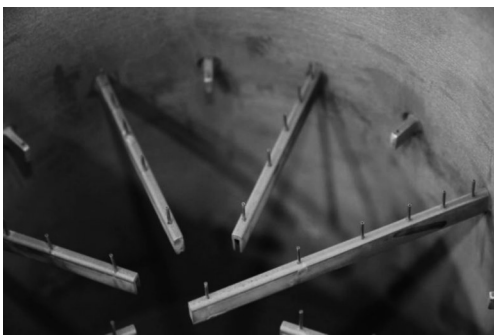


图1 常规总压探针结构形式

图1中的总压探针存在一个显著缺点,即对气流来流方向和安装位置<sup>[8-10]</sup>的敏感性较高(其不敏感角较小)。一旦气流方向发生改变,未能正对探针受感部,其总压的测量结果将产生较大偏差。因此,在尝试用这种总压探针测量压气机内部流场总压时,其缺点会显露无遗,使得测量结果的可靠性大打折扣,主要原因如下。

(1)压气机内部的流场极为复杂,流场参数分布呈

现出显著的不均匀性。以压气机叶片排间沿径向的总压分布测量为例,若采用这种常规的总压探针进行测量,理论上需要在每个不同的径向位置调整探针的安装角度,以确保其正对来流方向。然而,实际操作难以预先精确掌握各径向位置上的气流流动方向,因此这一理想状态无法实现。

(2)压气机内部流场会随着其工作状态的变化而显著变化,工作转速和工作流量的调整都会导致流场发生明显改变。这意味着,同一位置下气流的总压和流动方向会随着压气机工况的变化而变化。在这种情况下,常规总压探针不敏感角较小的缺陷会进一步凸显,使其不适用于压气机内部流场的总压测量。若要使用常规总压探针准确测量出不同工况下压气机内部流场的总压值,就必须根据压气机的工作状态实时调整探针的安装角度。这不仅增加了试验的复杂性,还要求试验人员准确预判压气机在不同工况下、不同位置的气流流动方向,这在实践中是极难实现的。

### 2.3 常规总压探针的标定

为了验证常规总压探针对气流来流方向具有高度敏感性的缺点,本文在不同来流方向条件下对图2所示的常规总压探针进行了标定实验。

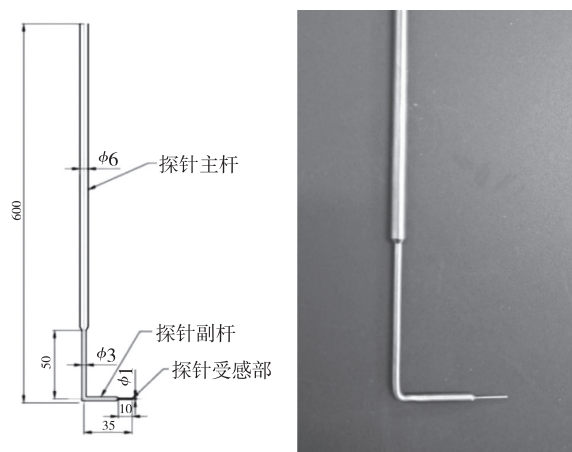


图2 标定用的常规总压探针

该标定实验在实验室内的开口直流式风洞中进行。风洞结构由气源(即离心风机)、流量调节阀、扩张管道、稳定段(内置整流器)、收缩段以及实验测量段组成,具体布局如图3所示。待标定的常规总压探针被安装在风洞实验测量段的位移机构上(见图4),旨在确保探针的受感部正对来流方向。通过位移机构的驱动,探针能够绕其主杆旋转,从而灵活调整受感部与来流方向之间的夹角。在实验过程中,本文使来流状态维持恒定,随后逐步将探针受感部与气流来流方向之间的夹角从 $0^\circ$ 增大至 $60^\circ$ ,并在每个角度下记录探针测得的总压值。该常规总压探针的标定结果如图5所示,展示了探针测得的总压值随其受感部与气流夹角(即对向角)变化的曲线。

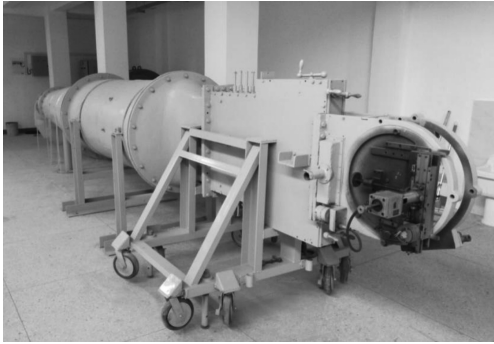


图3 开口直流式风洞

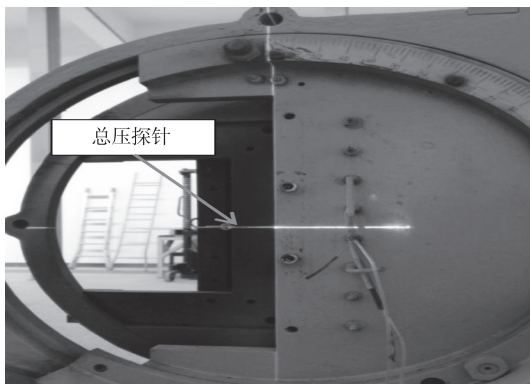


图4 总压探针安装位置

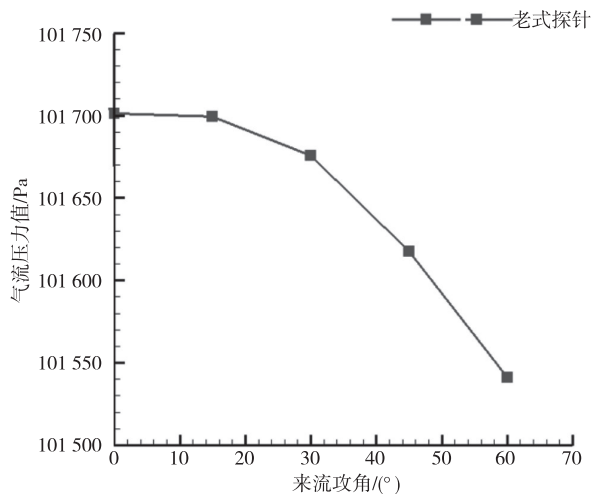


图5 常规总压探针测量的压力随对向角的变化

由图5可知,探针测得的总压值随对向角的增大而逐渐减小,大致呈抛物线形式。当该探针的对向角在 $15^\circ$ 范围内时,其测得的总压值变化并不明显;当对向角超过 $15^\circ$ 后,其测得的总压值明显减小,说明其测量值已无法准确反映来流的实际总压值。根据图5所示的结果可以判断,该总压探针的不敏感角约为 $\pm 15^\circ$ 。

### 3 集流式总压探针

#### 3.1 集流式梳状总压探针结构

由上述分析可知,常规总压探针在压气机内部流场测量中存在明显的不足之处。为了解决压气机内部流场总压测量面临的实际问题,本文设计了一种集流式总压探针。该型探针为集流式梳状总压探针,主要由4个

部分组成,分别是集流器、带引流孔的管状支架、受压管以及安装支架(见图6)。集流器的上部是一个 $60^\circ$ 的喇叭口,下部是 $\Phi 3$  mm的圆柱,受压管固定在带引流孔的管状支架上,经弯曲 $90^\circ$ 后定位焊接在喇叭口的中心。根据具体的测量需求,可以选择安装不同数量的测量点,而安装支架则与带有引流孔的管状支架相连接。为了测量压气机进、出口以及叶排间气流总压沿径向上的分布,本文设计了一种具有6点集流式梳状总压探针,采用等环面面积设计,沿径向布置6个测压点,各点取等环面的面积中心位置。探针支杆直径为8 mm,各测压孔的直径为0.8 mm。图7展示了集流式梳状总压探针的实物照片。

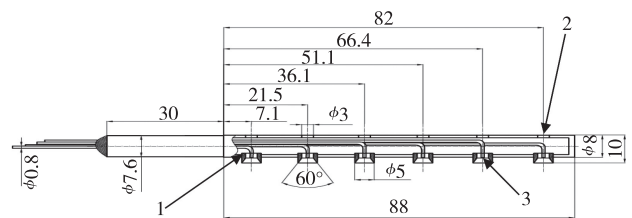


图6 集流式梳状总压探针结构

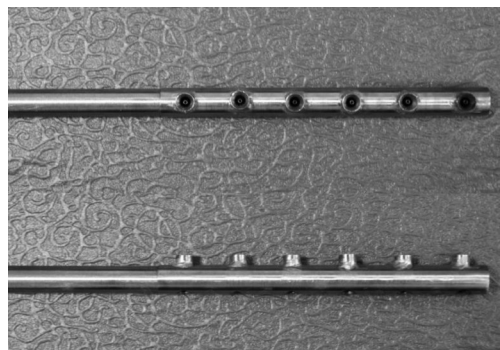


图7 集流式梳状探针实物

#### 3.2 集流式梳状总压探针测量原理

与常规总压探针相比,集流式总压探针增加了集流器这一重要部件。探针受感部(受压管)安装于集流器内部,探针前方的气流在集流器的作用下被汇集到受感部位置,经受感部从后面的引流孔流出。集流器前部是一个 $60^\circ$ 的喇叭口,它起到汇集气流并对气流进行整流的作用,使受压管有效感受来流总压,以减少总压损失。同时,采用引流的管状支架可以减少气流堵塞对上游造成的影响,提高了测量精度。由于该型探针增加了集流器,其不敏感角范围大幅扩大,可应用于压气机内部这种流场不均匀且随工况发生变化的特殊流场中。

#### 3.3 集流式梳状总压探针标定

为了证明集流式总压探针的不敏感角大于常规总压探针,本文采用相同方法对集流式梳状总压探针进行了标定。图8给出了集流式总压探针与常规探针的标定结果对比,其中前者所得测量结果在 $0\sim 45^\circ$ 的对向角范围内基本不变,当对向角超过 $45^\circ$ 后,其测得的总压值明显减小。与常规总压探针相比,集流式总压探针的不敏

感角范围大幅扩大,其不敏感角范围增加至 $\pm 45^\circ$ ,说明这种集流式总压探针的测量范围较常规探针增大了约3倍。

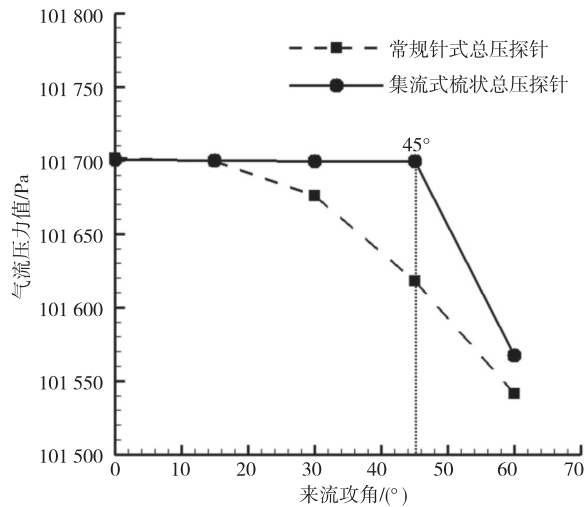


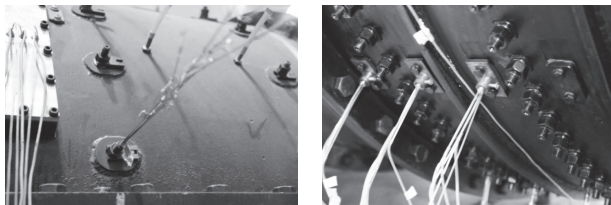
图8 集流式总压探针测量的压力随对向角的变化

#### 4 集流式梳状总压探针在轴流压气机试验测量中的应用

鉴于集流式总压探针具有显著优势,本文在2台低速大尺寸轴流压气机试验台(见图9)上对其进行了全面应用,以测量压气机进出口以及叶排间的总压分布。图10给出了本文集流式梳状总压探针压气机试验件的安装示例。



图9 双级(左)、四级(右)低速轴流压气机试验台



(a)双级压气机

(b)四级压气机

图10 安装集流式梳状总压探针的压气机

#### 5 结束语

本文分析了常规总压探针在测量压气机内部流场参数时存在的不足,设计了一种集流式总压探针。通过标定试验,分别测量了常规总压探针和集流式总压探针的总压测量值随对向角的变化关系。分析2种探针的标定结果可知,常规总压探针的不敏感角范围为 $\pm 15^\circ$ ,而集流式总压探针的不敏感角范围扩大了3倍,为 $\pm 45^\circ$ 。这说明在压气机或在其他流场参数变化较大流体机械中,采用集流式总压探针具有明显的优势,更能准确测量出流场中的总压值。

#### 参考文献:

- [1] CUMPSTY N A. Compressor aerodynamics [M]. Malabar: Krieger, 2004.
- [2] 胡骏. 航空气动稳定性分析方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- [3] 温泉, 马宁, 南希. 航空发动机风扇/压气机技术发展趋势[J]. 航空动力, 2020(2): 42-46.
- [4] 朱高平, 薛伟鹏, 唐国庆, 等. 探针靶对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.
- [5] 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.
- [6] 武乐群. 航空发动机压气机出口动态总压智能测量方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2022.
- [7] 张倩, 安广丰, 王洪伟. 全流向球形十八孔压力探针的发展及应用[J/O]. 推进技术, 2024: 1-17 [2024-11-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1813.v.20241121.1003.004.html>.
- [8] 幸晓龙, 任铭林, 顾杨, 等. 多级轴流压气机级间参数测量的试验研究[J]. 航空动力学报, 2004, 19(4): 478-483.
- [9] 胡金鑫, 郑光华, 孟玉航, 等. 单点总压探针安装位置对压气机进口级出口流场及测量结果的影响[J]. 西北工业大学学报, 2022, 40(3): 602-609.
- [10] 陈伟, 刘鸣飞, 崔树鑫, 等. 出口测量探针布局对轴流压气机气动性能试验的影响研究[J]. 热能动力工程, 2024, 39(1): 216-224.

#### 作者简介:

陆轶凡(1977—), 本科, 助理工程师, 研究方向: 先进制造技术及直升机旋翼实验台机械传动。