

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2022.02.14

钟形口流量管入口段速度型面研究

余楠兮, 王毅, 刘琳琳, 杨振, 余昊澄

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 航空发动机试验中通常使用钟形口流量管对进气流量进行试验。在测量过程中, 针对测点布置不准确造成测量结果不准确及测量成本增加的问题, 开展了管内入口段测量截面上的速度分布情况研究。本文分析了钟形口流量管的测量原理以及湍流状态下管内气流的流动状态, 研究了测量截面沿直径方向上速度的变化, 建立了管内径向速度分布的数学模型, 最终通过试验与仿真的方法对速度分布模型进行了分析与验证, 为准确得到管内空气流量提供了一种基于速度分布模型的新方法, 即通过试验测得流量管测量截面上少数点的数据信息得到管内速度分布模型, 从而得到更准确的管内空气流量值。研究结果对进气流量的测量以及发动机性能的评定试验有重要意义。

关键词: 进气流量; 速度型面; 钟形口流量管; 数值仿真

中图分类号: TB937 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5795(2022)02-0102-09

Research on velocity profile of entrance section of bell-mouth flow tube

YU Nanxi, WANG Yi, LIU Linlin, YANG Zhen, YU Haocheng

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: Bell-mouth flow tube is usually used to test the intake flow in aero engine tests. Aiming at the problem of the inaccurate measurement results and the increased measurement cost caused by the inaccurate layout of measuring points in the process of measurement, the velocity distribution on the measurement section of the inlet section of the tube is studied. The measurement principle of the bell-mouth flow tube and the flow state of the airflow in the tube under the turbulent flow state are analyzed in this paper. The variation of velocity along the diameter direction on the measurement section is studied, and the mathematical model of the radial velocity distribution in the tube is established. Finally, the velocity distribution model is analyzed and verified by the methods of experiment and simulation. A new method based on velocity distribution model is provided for accurately obtaining the air flow in the tube, that is, the data information of a few points on the measurement section of the flow tube is measured through the test to establish the velocity distribution model, so that a more accurate air flow value in the tube is obtained. The research results are of great significance to the measurement of intake air flow and the evaluation test of engine performance.

Key words: intake air flow; velocity profile; bell-mouth flow tube; numerical simulation

0 引言

进气流量参数作为一个状态参数, 在航空发动机的整机试验与部件试验中十分重要。其测量

的准确度影响着发动机性能的评定, 对发动机进气流量进行准确测量十分重要^[1-2]。目前测量发动机进气流量的主要方法是利用钟形口流量管配备总静压探针进行测量^[3-8], 然而这种测量方法存在

收稿日期: 2021-11-03; 修回日期: 2022-03-20

基金项目: 国家“十四五”技术基础科研项目(JSJL2020205XXXX)

引用格式: 余楠兮, 王毅, 刘琳琳, 等. 钟形口流量管入口段速度型面研究 [J]. 计测技术, 2022, 42 (2): 102-110.

Citation: YU N X, WANG Y, LIU L L, et al. Research on velocity profile of entrance section of bell-mouth flow tube [J]. Metrology and measurement technology, 2022, 42 (2): 102-110.



测不准的问题^[9-12]。从物理层面上来看,使用钟形口流量管时无法准确测量流量的根本原因是:空气流体存在粘性,空气流进钟形口流量管后会在管内的壁面附近形成一层附面层。若直接使用总静压计算出的管内速度与管道截面面积进行流量计算,会忽略掉附面层的影响,导致流量的计算值偏大,针对此情况,需使用流出系数来对计算值进行修正。

通常流出系数由两种方法得到:一是测量管内附面层厚度,并通过工程上常用的流出系数计算公式得出,但该公式是由经验总结出的,易造成计算结果不准确;二是从流出系数的定义式出发,在实流中对钟形口流量管进行标定,将测量结果与标准流量装置得出的流量值比较,以二者比值作为流出系数,但该方法受到实流标定装置的流量范围限制,难以实现大流量的实流标定与校准,与发动机进气流量存在量级上的差距。

若从钟形口流量管测量原理角度对测量准确性进行提升,需要对管内的流场分布、速度分布以及测量截面上的速度型面进行研究与分析。现有圆管内气流速度分布的数学模型是对其充分发展段进行力学分析后推导出的,目前尚无专门针对钟形口流量管内未充分发展部分的数学模型。

美国阿诺德工程发展中心(AEDC)发起了一项关于流量测量技术的研究,此研究采用计算流体力学(CFD)的方法,通过仿真模拟预测出钟形口流量管的流动特征(如管内边界层的总压分布以及核心区流动的马赫数等)与流出系数的关系,并在试验中得到了验证^[13]。国内廖小文^[14]、赵彬^[15]等人也通过数值模拟的方法对发动机附面层测量与流场进行了研究,结果表明:数值仿真可作为研究管内流动状态的有效手段。

本文针对钟形口流量管的管内流动状态进行仿真,与试验结果进行比对验证。为得到准确的流量测量值,对钟形口流量管管内的速度型面开展了理论分析与研究,得出钟形口流量管内沿气流方向上的速度变化规律,并针对气流在测量截面沿直径方向上速度的变化进行分析与研究,得到速度变化规律与管内空气的流动特性,最后通过仿真与试验的方式进行验证。

1 管内速度型面的理论模型

1.1 经典管内流动理论

根据气体的典型特征分析,气体具有粘性,当气流以均匀流速流入圆管时,管内的气体速度分布会发生变化,管内的气流会在管壁附近形成一层粘性底层,即附面层。随着气流连续不断地流入圆管,附面层则会沿着气流流动方向逐渐向管轴扩展,直到流动状态达到稳定,即沿着气流在管内的流动方向,管内各个圆形截面上的速度分布都在不断发生变化,在气流流经一段距离 l 后,管内的速度分布达到稳定状态,形成层流或者湍流状态下的典型分布曲线。图1所示为层流状态下气流的速度分布变化图,其中距离 l 被称为进口起始段,经过起始段的逐渐发展后达到稳定状态,即为图中的充分发展段。

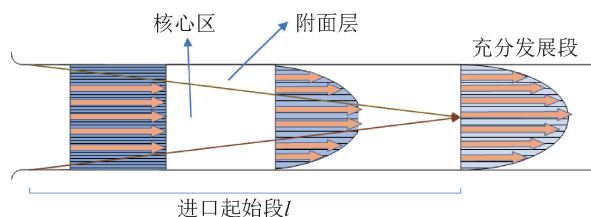


图1 管内流动状态

Fig.1 Flow state in the tube

试验中,对钟形口流量管内的气体流量进行测量时,先对管内的气体流动状态进行研究,即分析管内气流的速度分布以及附面层厚度。如图1所示,在充分发展段,管内速度分布与流动状态均处于一种稳定的状态,理论上针对这部分进行分析更为稳妥。但受实际测量现场环境的限制,只能对钟形口流量管的入口段进行参数测量。测量过程中流动并未定型,不同测量截面上的速度分布与附面层厚度均不相同,因此需针对测量截面进行分析与研究。

1.2 管内速度型面的理论分析

在研究入口段的速度分布与附面层厚度之前,先对状态相对稳定的充分发展段进行分析与研究。根据试验的具体情况进行估算,管内空气的雷诺数均大于2300,说明管内属于湍流流动。在此流动状态下,管内某截面的速度分布结构如图2所示。

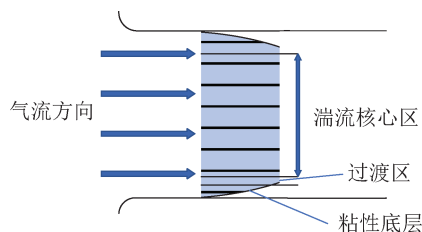


图2 钟形口流量管入口段速度分布结构

Fig.2 Velocity distribution structure of inlet section of bell-mouth flow tube

图2中,近壁部分的流体受管壁的影响,横向脉动受到限制,速度梯度较大,在壁面处速度为0,然后迅速增加至接近于核心区速度。从管道轴心到壁面附近大部分区域的流体流速较均匀,此部分流体受湍流脉动的影响较大,被称为湍流核心区。而在核心区与粘性底层之间的部分速度变化复杂且占比较小,此部分被称为过渡区域。

从理论角度分析光滑圆管内某一截面上空气的流速,流体在流动方向上受到的切应力 τ 由粘性切应力 τ_v 与雷诺应力 τ_r 两部分组成,对靠近壁面的部分,流动状态呈层流,由粘性切应力起主导作用,其粘性切应力 τ_v 满足斯托克斯公式

$$\tau_v = \frac{G}{2} r \quad (1)$$

式中: G 为比压降,即单位流程 l 上的压强降低 Δp , Pa/m; r 为沿圆管的半径方向的不同半径值, m。

该公式表示粘性切应力沿半径方向为线性分布,因此可得到在壁面上的粘性切应力,即壁面切应力为

$$\tau_w = \frac{G}{2} R \quad (2)$$

根据普朗特的假设与验证,粘性底层内速度梯度为常数,其中,粘性切应力与壁面切应力相等,结合牛顿粘性定律可得

$$\tau_w = \mu \frac{dU}{dy} = \mu \frac{U}{y} \quad (3)$$

式中: μ 为空气粘性系数, Pa·s; $y=R-r$ 为离壁面的距离, m; U 为截面上 y 方向上的时均速度分布,即 $U=U(y)$, m/s。

引入壁面摩擦速度得到

$$v^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (4)$$

经化简

$$\frac{U}{v^*} = \frac{\rho v^* y}{\mu} \quad (5)$$

而粘性底层以外,粘性切应力 τ_v 几乎为0,由雷诺应力 τ_r 起主导作用,则有

$$\tau_r = \rho l^2 \left(\frac{dU}{dy} \right)^2 \quad (6)$$

式中: l 为混合长, $l=ky$; k 为卡门常数,由实验测定; $y=R-r$ 为离壁面的距离。根据尼古拉斯的实验结果,规律可扩展到整个湍流区域,普朗特假设在整个湍流区域中,切应力为一个定值 τ_w 。联立式(3)与式(6)求解可得

$$\frac{dU}{v^*} = \frac{1}{k} \frac{dy}{y} \quad (7)$$

积分后有

$$\frac{U}{v^*} = \frac{1}{k} \ln y + C \quad (8)$$

再根据在附面层厚度 δ 处,即当 $y=\delta$ 时同时满足式(5)与式(8),经计算化简后,得到普朗特湍流普适速度分布律为

$$\frac{U}{v^*} = \frac{1}{k} \ln \frac{\rho v^* y}{\mu} + \frac{\rho v^* \delta}{\mu} - \frac{1}{k} \ln \frac{\rho v^* \delta}{\mu} \quad (9)$$

由式(9)可知,在圆管的湍流流动状态下,影响管内速度型面的物理因素有气体粘度、附面层厚度、气体密度、气流速度与管径等,这些物理量的形式可以与雷诺数、马赫数等参数关联。

管内流体的速度从壁面开始发展变化,需经过一定距离后发展充分,在此过程中,附面层厚度逐渐增加。靠近壁面部分的流体先达到相对稳定的状态,再逐步影响径向上靠近管轴部分的流体,此时,未充分发展管段附面层部分的速度分布可参考式(9)的对数函数形式进行表达,得到附面层内速度分布随流动状态变化的规律;管道中心部分的速度分布则用多项式表示,从圆管中心到管壁范围内的速度分布式为

$$U = \begin{cases} a \ln(R-x) + b, & \delta \leq x \leq R \\ px^3 + qx^2 + r, & 0 \leq x < \delta \end{cases} \quad (10)$$

式中: x 为测量截面上某一点到截面圆心的距离, m; U 为该点的速度, m/s; R 为圆管的半径, m; a, b, p, q, r 为与管内流动状态有关的5个待定参数。

2 钟形口流量管试验

为对管内速度型面分布进行验证,需对管内流动及测量数据进行试验分析。

2.1 试验装置

本次试验中用到的仪器设备及参数见表1。

表1 仪器设备参数

Tab.1 Instrument and equipment parameters

设备名称	参数
空气流量实验装置	包括风机段、收缩段、扩张段等,试验段气流速度范围为0~100 m/s
钟形口流量管	直径400 mm
压力扫描阀	量程5"H ₂ O,最大测量误差绝对值0.05% 量程5.0PSID,最大测量误差绝对值0.05%
附面层探针	受感部长20 mm,等间距布置10个测点
总压测量耙	受感部长137 mm,等环面法布置4个测点

试验装置原理如图3所示,将钟形口流量管串联安装在具有排气部分的风机段前方,并将压力测量装置安装在钟形口流量管的测量截面上,通过压力扫描阀与计算机进行压力数据的读取。试验中,不断调节风机的转速,使通过钟形口流量管内的空气流量发生变化。

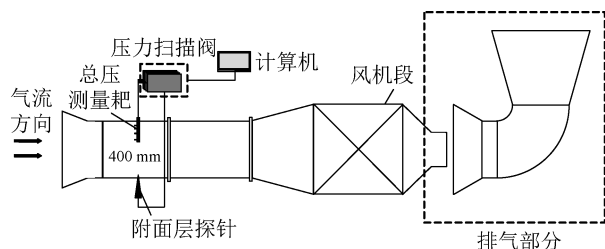


图3 试验装置原理图

Fig.3 Schematic diagram of test device

2.2 布点方式与试验步骤

为保证总压测量耙与附面层探针安装在同一测量截面内,选择0.6D(0.24 m)处为测量截面,安装方式如图4所示。可得到同一截面上的压力数据,再通过不同的数据处理方法计算,得到需要流出系数修正的被校流量与作为管内流量真值的标准流量。

调整风机转速,使流量管内气流速度分别稳定在20, 30, 40, 50 m/s,每个状态下需要在管内

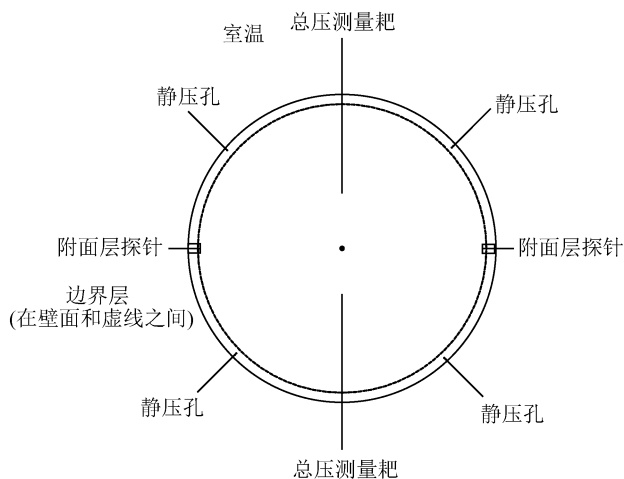


图4 测点安装方案

Fig.4 Installation scheme of measuring points

气流状态稳定后进行数据测量,并重复3次,确保管内气流状态稳定,测得数据有效。

2.3 数据处理

2.3.1 被校流量

钟形口流量管测得的被校流量为

$$q_{\text{被校}} = \rho v' A \quad (11)$$

式中: $q_{\text{被校}}$ 为压力探针求得的空气流量, kg/s; ρ 为空气密度, kg/m³; v' 为通过测量耙数据求出的测量

截面气流速度, m/s, $v' = \frac{\sqrt{2(P_{\text{总压}} - P_{\text{静压}})}}{\rho}$; A 为管道的截面面积, m²。

2.3.2 标准流量

为分析式(10)中的速度型面计算模型是否能用于试验中标准流量的计算,提供了以下两种标准流量计算方法。

1) 分段积分法

通过试验测得的总压、静压,计算出测量耙上不同测点位置的速度,根据式(10)进行拟合,得到实验中的管内速度分布规律,并用该计算模型按照式(12)进行流量的计算

$$q_{\text{标准1}} = q_1 + q_2 \quad (12)$$

式中: $q_{\text{标准1}}$ 为求得的标准质量流量, kg/s; q_1 为附面层内质量流量, kg/s; q_2 为中心区域内质量流量, kg/s。

附面层内质量流量 q_1 为

$$q_1 = \rho \iint_{B_1} v_i dx dy \quad (13)$$

式中： B_1 为圆管内靠近壁面部分的附面层环状积分区间； v_i 为通过计算模型得到的附面层部分内各个微元部分的速度函数，与位置坐标有关，m/s。

中心区域内质量流量 q_2 为

$$q_2 = \rho \iint_{B_2} v_i' dx dy \quad (14)$$

式中： B_2 为圆管内核心区部分的圆形积分区间； v_i' 为过计算模型得到的核心区内各个微元部分的速度函数，与位置坐标有关，m/s。

2) 环形面积法

为了比较得出流量以及流出系数的准确程度，利用求管内流量的定义式求得另一个标准流量，即通过管内不同位置点的速度与该位置所处微元圆环的面积乘积后进行累加计算得到流量值，当测量点无限多时，该流量即为管内流量的真实值。这里则用测点速度与该位置附近范围的圆环面积乘积来计算，这个流量应该是最接近真实值的，

计算式为

$$q_{\text{标准2}} = \rho \sum_{i=1}^n v_i \cdot \Delta s \quad (15)$$

式中： n 为将圆管分成 n 个由中心圆与圆环组成的部分； Δs 为各个微元部分的面积， m^2 。

2.3.3 流出系数

流出系数计算式为

$$C_1, C_3 = \frac{q_{\text{标准}}}{q_{\text{被校}}} \quad (16)$$

式中： C_1, C_3 为流出系数。

为与传统方法计算的流出系数作比较，采用附面层厚度进行计算，即

$$C_2 = \left(1 - \frac{\delta}{4D}\right)^2 \quad (17)$$

式中： C_2 为流出系数； δ 为附面层厚度，mm； D 为钟形口流量管的管道直径，mm。

2.4 结果分析

处理后的数据结果见表2。

表2 试验数据处理结果

Tab.2 Test data processing results

核心区速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	雷诺数	被校流量/($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	标准流量/($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)		流出系数		
			$q_{\text{标准1}}$	$q_{\text{标准2}}$	C_1	C_2	C_3
19.30	819332	2.805	2.777	2.777	0.9900	0.9867	0.9900
30.28	1285276	4.395	4.353	4.356	0.9903	0.9860	0.9910
38.67	1641408	5.614	5.562	5.564	0.9907	0.9865	0.9911
46.51	1974493	6.750	6.690	6.691	0.9912	0.9866	0.9912

通过拟合的速度分布函数积分（即式（11）~式（14））得到标准流量的流出系数 C_1 ，与同一组实验数据中通过附面层厚度计算得出的流出系数 C_2 相比，更接近通过式（15）所得标准流量计算出的流出系数 C_3 。证明了拟合出的速度分布规律的真实性和说明这种通过速度分布求管内标准流量的方法具有一定的可行性。

3 钟形口流量管的数值仿真

3.1 模型建立

针对实际测量过程中使用的管径为400 mm的钟形口流量管，建立仿真模型如图5所示。

为研究钟形口流量管内的流场分布情况并体现出型面段对管内流场的影响，需要在模型上

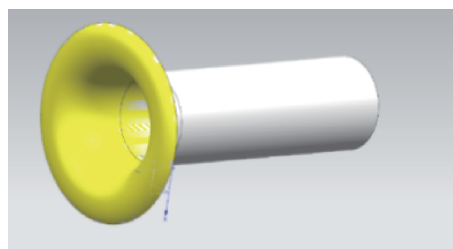


图5 400 mm钟形口流量管模型

Fig.5 Model of 400 mm bell-mouth flow tube

添加流量管附近的计算区域。为减少添加的计算区域对计算结果产生的影响，需设置型面段部分（即进气部分）的计算区域，绘制的模型如图6所示。图6中左侧圆柱形区域为远前方区域，该区域将流量管型面部分包围。

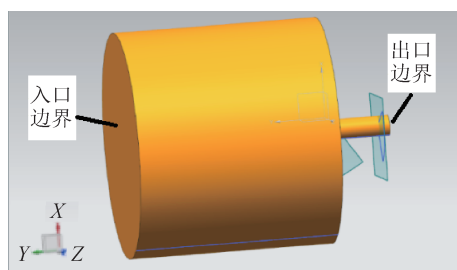


图6 修改后的计算模型

Fig.6 Modified calculation model

3.2 网格划分与计算设置

运用ICEM软件对模拟几何模型进行网格划分时,需要对钟形口流量管中的速度进行分析,绘制网格时需对附面层部分的网格加密,还要考虑网格密度与计算时间的关系。设置边界层层数为25,边界层增长率为1.2,画出的网格如图7所示。

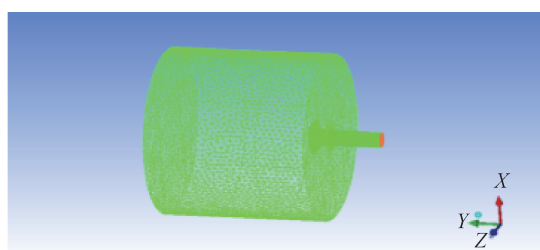
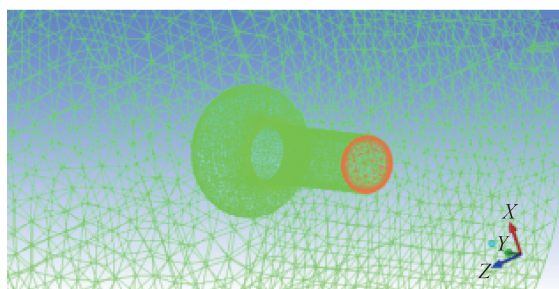
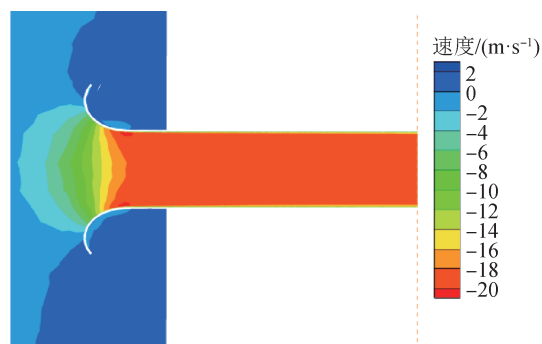
(a) 整体网格
(a) Overall grid(a) 附面层网格加密
(b) Mesh refinement of boundary layer

图7 网格绘制

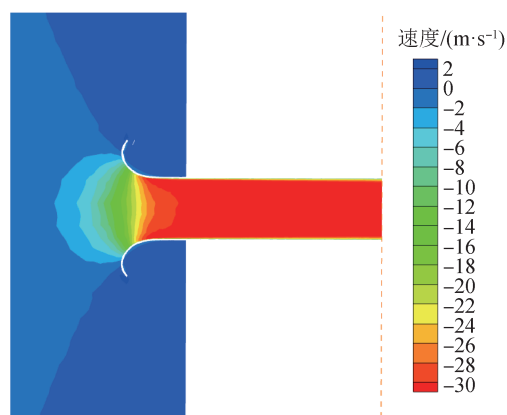
Fig.7 Grid drawing

将划分好的网格导入Fluent19.0进行数值模拟计算,先选择SST k- ω 模型进行计算。按照试验情况将流体材料设置为理想气体,将模型的远前方部分,即图6中的最左侧的圆形面设置为入口边界,最右侧圆形面设置为出口边界,按照试验得到的数据将其分别设置为2.805, 4.395, 5.614, 6.75 kg/s的质量流量出口。



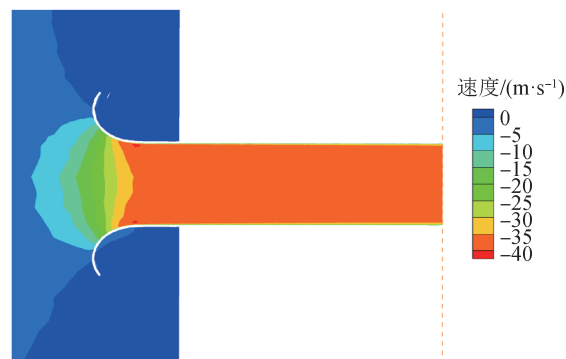
(a) 管内流量为2.805 kg/s

(a) The flow in the tube is 2.805 kg/s



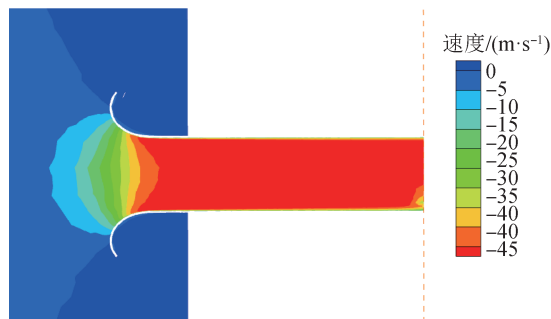
(b) 管内流量为4.395 kg/s

(b) The flow in the tube is 4.395 kg/s



(c) 管内流量为5.614 kg/s

(c) The flow in the tube is 5.614 kg/s



(d) 管内流量为6.75 kg/s

(d) The flow in the tube is 6.75 kg/s

图8 $z=0$ 平面流场速度云图Fig.8 Velocity cloud diagram of $z=0$ plane flow field

3.3 仿真结果分析

数据设置完成后对仿真区域进行计算,当计算收敛或者达到设定迭代次数后,计算自动停止。将数据文件导入Tecplot,取 $z=0$ 平面,可得到沿管轴方向上管内流体的速度分布云图。在管内流量分别为2.805, 4.395, 5.614, 6.75 kg/s状态下,速度云图分布如图8所示。

从图8可知,空气在流入钟形口流量管时,型面段形成弧形的速度型面,不断发展至管内。而流量管管内的速度分布发展方式与圆管内类似,起始部分的附面层较薄,随着流体沿管轴方向不断变厚。

为了验证钟形口流量管内不同流动状态下的速度分布情况,分别对四种流动状态下0.24 m (0.6D) 处的管截面进行速度分布分析。

针对管内壁面附近,目标函数为 $y = a \cdot \ln(R - x) + b$,根据拟合数据选取壁面附近20 mm范围内的点进行拟合,以出口流量为6.75 kg/s状态为例,速度分布如图9所示。

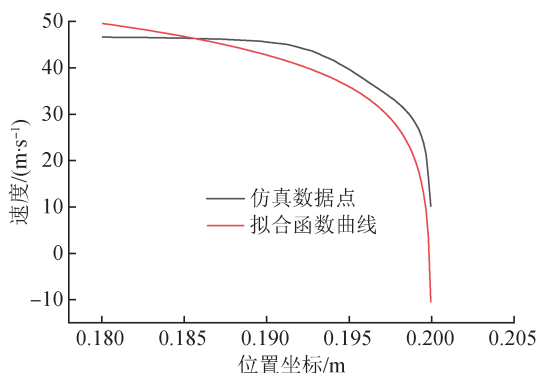


图9 壁面附近速度分布

Fig.9 Velocity distribution near the wall

壁面附近速度分布拟合结果如表3所示。

表3 壁面附近速度分布拟合结果

Tab.3 Fitting results of velocity distribution near the wall

出口流量 $/(kg \cdot s^{-1})$	参数 a	参数 b	拟合判定 系数
2.805	4.528	38.73	0.8853
4.395	6.775	58.76	0.9128
5.614	7.658	71.32	0.8781
6.75	9.856	88.15	0.916

通过表3的拟合结果可知,壁面附近20 mm范围内的流体在4个状态下的速度分布与对数函数拟合程度均较好,拟合判定系数均大于0.85,说明可以使用对数函数对壁面附近20 mm范围内进行速度分布拟合。

针对核心区部分,目标函数使用 $y = px^3 + qx^2 + r$,选取从圆心到距壁面20 mm范围内的点拟合,拟合效果图类似,以出口流量为6.75 kg/s的状态为例,速度分布如图10所示。

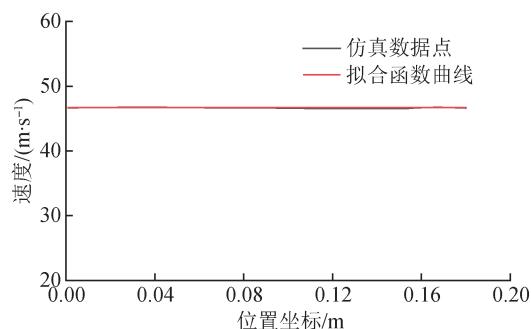


图10 核心区速度分布

Fig.10 Velocity distribution in the core area

核心区速度分布拟合结果如表4所示。

表4 核心区速度分布拟合结果

Tab.4 Fitting results of velocity distribution in the core area

出口流量 $/(kg \cdot s^{-1})$	参数 p	参数 q	参数 r	拟合判定 系数
2.805	5.553	-0.8153	19.42	0.4809
4.395	7.87	-1.453	30.25	0.6915
5.614	10.81	-1.869	38.73	0.5538
6.75	12.8	-2.244	46.69	0.6969

通过表4的拟合结果可知, p , q 两个系数在不同状态下的变化趋势相差不大,常数项 r 与不同流动状态的核心区速度保持一致。考虑到横坐标处于(0, 0.2)之间,经过式(10)中平方项与立方项的计算后,数值较小可忽略,说明核心区的速度相对稳定。在实际试验中,将核心区的速度分布解析式用常数 r 来表示,但需要对具体试验情况进行修正与调整。

4 结论与展望

通过理论分析方法,总结出钟形口流量管的速度分布规律,并针对400 mm管径的钟形口流量管在流量分别为2.805, 4.395, 5.614, 6.75 kg/s状态下的管内速度分布进行了试验与仿真研究。通过试验以及数值仿真的研究方法,得到400 mm管径的钟形口流量管的管内速度分布规律,建立了一种管内速度分布计算模型,该模型可以通过试验测得流量管测量截面上少数点的数据信息,得到管内的速度分布规律,并通过积分的方法计算出准确的管内空气流量,为管内空气流量的准确测量提供了一种新的方法。

后续将针对不同口径、不同流速状态、不同型面的钟形口流量管进行仿真与试验研究,并运用除压力测量装置以外的其他空气流量测量方法对此速度分布计算模型进行进一步验证与研究。

参考文献

- [1] 李亚晋,王毅,王辉.一种用于发动机进气流量管校准的缩比模型实验装置[J].计测技术,2017,37(4): 27-30.
- LI Y J, WANG Y, WANG H. A scaling model test facility for turbo engine airflow calibration[J]. Metrology and measurement technology, 2017, 37(4): 27-30. (in Chinese)
- [2] 向宏辉,侯敏杰,葛宁,等.压气机试验用流量管气动设计与应用验证[J].燃气轮机技术,2015,28(4): 28-34.
- XIANG H H, HOU M J, GE N, et al. Aerodynamic design and application validation of flow tube used in compressor experiment[J]. Gas turbine technology, 2015, 28(4): 28-34. (in Chinese)
- [3] 美国机械工程师协会.用喇叭进流量计测量气体流量:ASME MFC-26-2011[S].2011.
- American Society of Mechanical Engineers. Measurement of gas flow by bellmouth inlet flowmeters: ASME MFC-26-2011[S]. 2011.
- [4] 史建邦,申世才,马燕荣,等.某型涡扇发动机进口空气流量及附面层的测量与计算[J].测控技术,2012,31(6): 38-41.
- SHI J B, SHEN S C, MA Y R, et al. Engine airflow measurement and calculation based on rake parameters[J]. Measurement and control technology, 2012, 31(6): 38-41. (in Chinese)
- [5] 史建邦,申世才,高扬,等.航空发动机空气流量测量与计算方法研究[J].工程与试验,2011,51(4): 15-18, 41.
- SHI J B, SHEN S C, GAO Y, et al. Research on the aero-engine airflow measurement and calculation method[J]. Engineering and test, 2011, 51(4): 15-18, 41. (in Chinese)
- [6] 王红,马明明.某型发动机空气流量计算影响因素研究[J].燃气涡轮试验与研究,2010,23(3): 22-26.
- WANG H, MA M M. Study on the factors affecting air flow calculation of an aero-engine[J]. Gas turbine experiment and research, 2010, 23(3): 22-26. (in Chinese)
- [7] 李冰,郝晓乐,申世才.航空发动机进口空气流量测量方案分析[J].燃气涡轮试验与研究,2013,26(4): 54-57.
- LI B, HAO X L, SHEN S C. Measuring methods of aero-engine inlet airflow[J]. Gas turbine experiment and research, 2013, 26(4): 54-57. (in Chinese)
- [8] 徐国,郭昕,陈建民.高空台标定中空气流量测量方法研究[J].燃气涡轮试验与研究,1995(2): 40-43.
- XU G, GUO X, CHEN J M. Research on air flow measurement method in calibration of high altitude observatory[J]. Gas turbine experiment and research, 1995(2): 40-43. (in Chinese)
- [9] 国家质量监督检验检疫总局.用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量:第1部分 一般原理和要求:GB/T 2624.1-2006[S].北京:中国标准出版社,2006.
- State Administration for Market Regulation. Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full: Part 1 General principles and requirements: GB/T 2624.1-2006[S]. Beijing: China Standard Press, 2006. (in Chinese)
- [10] 国家质量监督检验检疫总局.用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量:第2部分 孔板:GB/T 2624.2-2006[S].北京:中国标准出版社,2006.
- State Administration for Market Regulation. Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full: Part 2 Orifice plates: GB/T 2624.2-2006[S]. Beijing: China Standard Press, 2006. (in Chinese)
- [11] 国家质量监督检验检疫总局.用安装在圆形截面管道

- 中的差压装置测量满管流体流量:第3部分 喷嘴和文丘里喷嘴:GB/T 2624.3-2006[S].北京:中国标准出版社,2006.
- State Administration for Market Regula. Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full: Part 3 Nozzles and Venturi nozzles: GB/T 2624.3-2006 [S]. Beijing: China Standard Press, 2006. (in Chinese)
- [12] 国家质量监督检验检疫总局. 用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量:第4部分 文丘里管:GB/T 2624.4-2006[S].北京:中国标准出版社,2006.
- State Administration for Market Regula. Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full: Part 4 Venturi tubes: GB/T 2624.4-2006[S]. Beijing: China Standard Press, 2006. (in Chinese)
- [13] BEALE D, HAND T, SEBOURN C. Development of a bellmouth airflow measurement technique for turbine engine ground test facilities [C]. Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2013.
- [14] 廖小文,赵海刚,汪涛,等. 发动机进口附面层测量试验与数值模拟[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2012, 25(3): 54-57, 62.
- LIAO X W, ZHAO H G, WANG T, et al. Flight measurement test and numerical analysis for boundary layer of engine inlet [J]. Gas turbine experiment and research, 2012, 25(3): 54-57, 62. (in Chinese)
- [15] 赵彬,王毅. 室内航空发动机进气流场流量测量数值模拟研究[J]. 计测技术, 2017, 37(3): 29-33.
- ZHAO B, WANG Y. Numerical simulation study on measurement of inlet flow field of indoor aeroengines [J]. Metrology and measurement technology, 2017, 37(3): 29-33. (in Chinese)
- [16] 黎星华. 流速分布不均匀流场流量测量装置[D]. 北京:华北电力大学,2019.
- LI X H. Flow measuring device adaptive to flow field with non-uniform flow velocity distribution [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019. (in Chinese)
- [17] 马仁婷. 流速分布未知二维流场流量测量方法研究[D]. 北京:华北电力大学,2017.
- MA R T. Research of flow measurement of two-dimensional flow field adaptive to non-uniform velocity profiles [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017. (in Chinese)
- [18] 刘斌. Fluent 19.0 流体仿真从入门到精通[M]. 北京:清华大学出版社,2019.
- LIU B. Fluent 19.0 fluid simulation from entry to master [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2019. (in Chinese)
- (本文编辑:朱俊真)



第一作者:余楠兮(1996—),女,湖北宜昌人,土家族,助理工程师,硕士,主要研究方向为控制理论与控制工程。