



# (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113125103 B

(45) 授权公告日 2023. 02. 17

(21) 申请号 202110314172.6

(22) 申请日 2021.03.24

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 113125103 A

(43) 申请公布日 2021.07.16

(73) 专利权人 中国空气动力研究与发展中心空  
天技术研究所

地址 621000 四川省绵阳市二环路南段6号

(72) 发明人 李一鸣 余安远 乔文友 杨大伟  
杨辉 张胜 曲俐鹏 秦思  
张小庆 贺元元 陈锐杰 贺佳佳

(74) 专利代理机构 重庆市信立达专利代理事务  
所(普通合伙) 50230  
专利代理师 包晓静

(51) Int. Cl.

G01M 9/06 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 208333564 U, 2019.01.04

CN 111426480 A, 2020.07.17

CN 103063399 A, 2013.04.24

CN 106482923 A, 2017.03.08

CN 109098995 A, 2018.12.28

CN 111551339 A, 2020.08.18

CN 107560822 A, 2018.01.09

US 2009255330 A1, 2009.10.15

US 2005066722 A1, 2005.03.31

US 2007004023 A1, 2007.01.04

JP 2010285871 A, 2010.12.24

袁化成等. 矩形截面高超声速进气道高焓  
风洞实验.《航空动力学报》.2010,

审查员 林宇豪

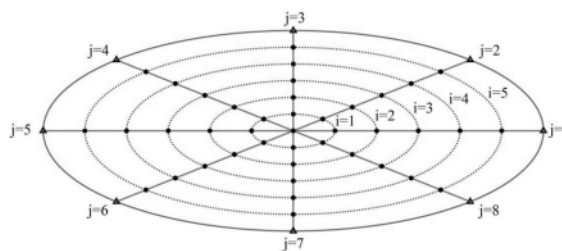
权利要求书3页 说明书8页 附图2页

(54) 发明名称

一种41测点等距分布的椭圆截面流量计数据  
处理方法

(57) 摘要

本发明公开了一种41测点等距分布的椭圆  
截面流量计数据处理方法,通过位于进气道椭圆  
截面出口下游的流量计,测得进气道出口椭圆截  
面各测点的皮托压和该截面位置的静压,利用线  
性插值法得到各测点的静压,经计算得到各测点  
的比流量密度、气流马赫数和总压恢复系数,将  
各测点的比流量密度、气流马赫数和总压恢复系  
数分别在椭圆截面内积分并进行叠加,得到椭圆  
截面内的流量、叠加的马赫数和叠加的总压恢复  
系数,将椭圆截面内叠加的马赫数和叠加的总压  
恢复系数分别除以椭圆截面的面积,得到椭圆截  
面内平均马赫数和总压恢复系数。本发明填补了  
椭圆截面流量计测点等距分布时后处理方法的  
空白,能更为全面地获得进气道性能参数。



1. 一种41测点等距分布的椭圆截面流量计,其特征在于:包括椭圆壳体,所述椭圆壳体连接在进气道下游的椭圆截面出口,所述椭圆壳体用于安装皮托耙和静压测量装置,所述皮托耙沿周向布置8个耙位,8个耙位将椭圆出口截面面积8等分,8个耙位的中心交点布置1个皮托压测点,每个耙位上沿径向均匀布置5个皮托压测点,所述皮托压测点安装有皮托压力传感器,所述静压测量装置包括在椭圆壳体上沿周向均匀布置的8个壁面压力传感器,所述壁面压力传感器的位置分布与所述耙位对应,所述皮托压力传感器用于获取对应的皮托压测点的皮托压,所述壁面压力传感器用于测量对应位置的流场静压。

2. 一种41测点等距分布的椭圆截面流量计的数据处理方法,应用于权利要求1所述的一种41测点等距分布的椭圆截面流量计,其特征在于,包括:

步骤1:将8个壁面压力传感器的测量结果求平均值,得到椭圆截面中心的静压,根据椭圆截面中心的静压和相应耙位对应的壁面静压,沿径向利用线性插值法,得到各皮托压测点的静压;

步骤2:根据各皮托压测点的皮托压和静压,计算得到各皮托压测点的气流马赫数;

步骤3:根据各皮托压测点的静压和气流马赫数,计算得到各皮托压测点的气流总压;

步骤4:根据各皮托压测点的气流马赫数和气流总压,计算得到各皮托压测点的比流量密度;

步骤5:根据各皮托压测点的气流总压和来流总压,计算得到各皮托压测点的总压恢复系数;

步骤6:将各皮托压测点的比流量密度、气流马赫数和总压恢复系数分别在椭圆截面内积分并进行叠加,得到椭圆截面内的流量、叠加的马赫数和叠加的总压恢复系数;

步骤7:将椭圆截面内叠加的马赫数和叠加的总压恢复系数,分别除以椭圆截面的面积,得到椭圆截面内平均马赫数和总压恢复系数。

3. 根据权利要求2所述的一种41测点等距分布的椭圆截面流量计的数据处理方法,其特征在于,所述将各皮托压测点的比流量密度、气流马赫数和总压恢复系数分别在椭圆截面内积分并进行叠加,得到椭圆截面内的流量、叠加的马赫数和叠加的总压恢复系数,包括:

步骤61:由椭圆截面的中心和最内层相邻两皮托压测点组成的扇形区域,利用线性插值法对各皮托压测点的比流量密度进行插值,得到每个扇形区域的比流量密度插值函数,对比流量密度的插值函数在本扇形区域内进行积分,获得每个扇形区域内流量;其中所述扇形区域内比流量密度插值函数的计算公式为:

$$m^A(t, \alpha) = \frac{t_1 - t}{\Delta t} m^A_{00} + \frac{t(\alpha_{j+1} - \alpha)}{\Delta t \Delta \alpha} m^A_{1j} + \frac{t(\alpha - \alpha_j)}{\Delta t \Delta \alpha} m^A_{1j+1} \quad (1)$$

所述扇形区域内流量的计算公式为:

$$q^m_{0j} = \int_{\alpha_j}^{\alpha_{j+1}} \int_0^{t_1} m^A(t, \alpha) abt dt d\alpha = \frac{ab\Delta t^2 \Delta \alpha}{6} (m^A_{00} + m^A_{1j} + m^A_{1j+1}) \quad (2)$$

步骤62:由最内层相邻两皮托压测点和与这两个相邻皮托压测点对应的最外层相邻两皮托压测点组成的第一圆弧形区域,利用线性插值法对各皮托压测点的比流量密度进行插

值,得到每个第一圆弧形区域的比流量密度插值函数,对比流量密度的插值函数在本第一圆弧形区域内进行积分,获得每个第一圆弧形区域内流量,其中所述第一圆弧形区域内比流量密度插值函数的计算公式为:

$$m^A(t, \alpha) = \frac{(t_{i+1} - t)(\alpha_{j+1} - \alpha)}{\Delta t \Delta \alpha} m^A_{ij} + \frac{(t_{i+1} - t)(\alpha - \alpha_j)}{\Delta t \Delta \alpha} m^A_{i,j+1} \\ + \frac{(t - t_i)(\alpha_{j+1} - \alpha)}{\Delta t \Delta \alpha} m^A_{i+1,j} + \frac{(t - t_i)(\alpha - \alpha_j)}{\Delta t \Delta \alpha} m^A_{i+1,j+1} \quad (3)$$

所述第一圆弧形区域内流量的计算公式为:

$$q^m_{ij} = \int_{\alpha_j}^{\alpha_{j+1}} \int_{t_i}^{t_{i+1}} m^A(t, \alpha) abt dt d\alpha \\ = \frac{ab\Delta t^2 \Delta \alpha}{12} [(3i + 1)(m^A_{ij} + m^A_{i,j+1}) + (3i + 2)(m^A_{i+1,j} + m^A_{i+1,j+1})] \quad (4)$$

步骤63:由最外层相邻两皮托压测点和对应的椭圆壳体组成的第二圆弧形区域,沿径向采用最外层测点近似,沿周向采用线性插值对各皮托压测点的比流量密度进行插值,得到每个第二圆弧形区域的比流量密度插值函数,对比流量密度的插值函数在本第二圆弧形区域内进行积分,获得每个第二圆弧形区域内流量;其中所述第二圆弧形区域内比流量密度插值函数的计算公式为:

$$m^A(t, \alpha) = \frac{\alpha_{j+1} - \alpha}{\Delta \alpha} m^A_{5j} + \frac{\alpha - \alpha_j}{\Delta \alpha} m^A_{5j+1} \quad (5)$$

所述第二圆弧形区域内流量的计算公式为:

$$q^m_{5j} = \int_{\alpha_j}^{\alpha_{j+1}} \int_{t_5}^{t_6} m^A(t, \alpha) abt dt d\alpha = \frac{11ab\Delta t^2 \Delta \alpha}{4} (m^A_{5j} + m^A_{5j+1}) \quad (6)$$

步骤64:将每个扇形区域内流量、每个第一圆弧形区域内流量和每个第二圆弧形区域内流量进行叠加,得到椭圆截面内流量;其中,所述椭圆截面内流量的计算公式为:

$$q^m = \sum q^m_{ij} \\ = ab\Delta t^2 \Delta \alpha \sum_{j=1}^8 \left\{ \frac{1}{6} (m^A_{00} + m^A_{1j} + m^A_{1,j+1}) + \frac{11}{4} (m^A_{5j} + m^A_{5,j+1}) \right. \\ \left. + \frac{1}{12} \sum_{i=1}^4 [(3i + 1)(m^A_{ij} + m^A_{i,j+1}) + (3i + 2)(m^A_{i+1,j} + m^A_{i+1,j+1})] \right\} \quad (7)$$

步骤65:将公式(1)(3)(5)中的比流量密度替换成各皮托压测点的马赫数,重复步骤61~步骤64,得到椭圆截面内叠加的马赫数;

步骤66:将公式(1)(3)(5)中的比流量密度替换成各皮托压测点的总压恢复系数,重复

步骤61~步骤64,得到椭圆截面内叠加的总压恢复系数;

其中, $a$ 为椭圆截面半长轴; $b$ 为椭圆截面半短轴; $i$ 为每个耙位上测点位置编号, $i=1, 2, \dots, 5$ ;  $j$ 为耙位位置编号, $j=1, 2, \dots, 8$ ;  $m_{00}^A$ 为椭圆截面中心处比流量密度,  $m_{ij}^A$ 为各测点  $D_{ij}$  处比流量密度;  $m^A(t, \alpha)$  为比流量密度插值函数;  $t$  为径向参数,  $0 \leq t \leq 1$ ,  $\Delta t$  为径向参数间距;  $\alpha$  为周向角度参数,  $0 \leq \alpha \leq 2\pi$ ,  $\Delta \alpha$  为周向角度参数间距;  $q^m$  为椭圆截面内流量;  $q_{0j}^m$  为椭圆截面中心与最内层相邻两皮托压测点组成的扇形区域内流量,  $q_{ij}^m$  为不同小区域内流量。

## 一种41测点等距分布的椭圆截面流量计数据处理方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于实验空气动力学技术领域,尤其涉及一种41测点等距分布的椭圆截面流量计及其数据处理方法。

### 背景技术

[0002] 进气道位于发动机的最前端,肩负着捕获来流,并对来流进行减速增压,为下游燃烧室提供气流的作用,进气道的工作能力直接关系到整个吸气式推进系统的工作效率。

[0003] 进气道出口流量、马赫数和总压恢复系数等参数是影响进气道设计的关键参数,马赫数是当地气流速度与声速之比,总压恢复系数系数是当地气流总压和来流总压之比。通过在出口截面安装测压耙测量气流总压,皮托耙上测点的位置,受传感器尺寸的限制,往往采用等距分布,并在测量截面所在壁面上开测压孔测量气流静压,通过数据处理获得出口截面的参数。

[0004] 但是目前的截面参数测量都是针对矩形截面或者圆截面进气道,随着进气道设计技术的发展,椭圆出口进气道也成为另一类常见进气道。针对矩形截面进气道,往往采用网格均匀分布的测量方法;针对圆截面进气道,利用了圆的对称性,往往通过简单平均各个测点的压力数据,获得出口的平均流量。传统方法中通过平均各个测点的压力数据,无法代表出口截面数据,而且无法获得截面上参数分布规律。

### 发明内容

[0005] 本发明旨在提供一种41测点等距分布的椭圆截面流量计及其数据处理方法,以克服进气道椭圆出口流量、马赫数及总压恢复系数难以测量的技术问题。

[0006] 为达到上述目的,本发明提供如下技术方案:

[0007] 一种41测点等距分布的椭圆截面流量计,包括椭圆壳体,所述椭圆壳体连接在进气道下游的椭圆截面出口,所述椭圆壳体用于安装皮托耙和静压测量装置,所述皮托耙沿周向布置8个耙位,8个耙位将椭圆出口截面面积8等分,8个耙位的中心交点布置1个皮托压测点,每个耙位上沿径向均匀布置5个皮托压测点,所述皮托压测点安装有皮托压力传感器,所述静压测量装置包括在椭圆壳体上沿周向均匀布置的8个壁面压力传感器,所述壁面压力传感器的位置分布与所述耙位对应,所述皮托压力传感器用于获取对应的皮托压测点的皮托压,所述壁面压力传感器用于测量对应位置的流场静压。

[0008] 本发明的另一目的,在于提供一种41测点等距分布的椭圆截面流量计的数据处理方法,应用于上述一种41测点等距分布的椭圆截面流量计,包括:

[0009] 步骤1:将8个壁面压力传感器的测量结果求平均值,得到椭圆截面中心的静压,根据椭圆截面中心的静压和相应耙位对应的壁面静压,沿径向利用线性插值法,得到各皮托压测点的静压;

[0010] 步骤2:根据各皮托压测点的皮托压和静压,计算得到各皮托压测点的气流马赫数;

[0011] 步骤3:根据各皮托压测点的静压和气流马赫数,计算得到各皮托压测点的气流总压;

[0012] 步骤4:根据各皮托压测点的气流马赫数和气流总压,计算得到各皮托压测点的比流量密度;

[0013] 步骤5:根据各皮托压测点的气流总压和来流总压,计算得到各皮托压测点的总压恢复系数;

[0014] 步骤6:将各皮托压测点的比流量密度、气流马赫数和总压恢复系数分别在椭圆截面内积分并进行叠加,得到椭圆截面内的流量、叠加的马赫数和叠加的总压恢复系数;

[0015] 步骤7:将椭圆截面内叠加的马赫数和叠加的总压恢复系数,分别除以椭圆截面的面积,得到椭圆截面内平均马赫数和总压恢复系数。

[0016] 优选地,所述将各皮托压测点的比流量密度、气流马赫数和总压恢复系数分别在椭圆截面内积分并进行叠加,得到椭圆截面内的流量、叠加的马赫数和叠加的总压恢复系数,包括:

[0017] 步骤61:由椭圆截面的中心和最内层相邻两皮托压测点组成的扇形区域,利用线性插值法对各皮托压测点的比流量密度进行插值,得到每个扇形区域的比流量密度插值函数,对比流量密度的插值函数在本扇形区域内进行积分,获得每个扇形区域内流量;其中所述扇形区域内比流量密度插值函数的计算公式为:

$$[0018] \quad m^A(t,\alpha) = \frac{t_1 - t}{\Delta t} m^A_{00} + \frac{t(\alpha_{j+1} - \alpha)}{\Delta t \Delta \alpha} m^A_{1j} + \frac{t(\alpha - \alpha_j)}{\Delta t \Delta \alpha} m^A_{1,j+1} \quad (1)$$

[0019] 所述扇形区域内流量的计算公式为:

$$[0020] \quad q^m_{0j} = \int_{\alpha_j}^{\alpha_{j+1}} \int_0^{t_1} m^A(t,\alpha) abt dt d\alpha = \frac{ab\Delta t^2 \Delta \alpha}{6} (m^A_{00} + m^A_{1j} + m^A_{1,j+1}) \quad (2)$$

[0021] 步骤62:由最内层相邻两皮托压测点和对应的最外层相邻两皮托压测点组成的第一圆弧形区域,利用线性插值法对各皮托压测点的比流量密度进行插值,得到每个第一圆弧形区域的比流量密度插值函数,对比流量密度的插值函数在本第一圆弧形区域内进行积分,获得每个第一圆弧形区域内流量。其中所述第一圆弧形区域内比流量密度插值函数的计算公式为:

$$[0022] \quad m^A(t,\alpha) = \frac{(t_{i+1} - t)(\alpha_{j+1} - \alpha)}{\Delta t \Delta \alpha} m^A_{ij} + \frac{(t_{i+1} - t)(\alpha - \alpha_j)}{\Delta t \Delta \alpha} m^A_{i,j+1} \\ + \frac{(t - t_i)(\alpha_{j+1} - \alpha)}{\Delta t \Delta \alpha} m^A_{i+1,j} + \frac{(t - t_i)(\alpha - \alpha_j)}{\Delta t \Delta \alpha} m^A_{i+1,j+1} \quad (3)$$

[0023] 所述第一圆弧形区域内流量的计算公式为:

$$[0024] \quad q^m_{ij} = \int_{\alpha_j}^{\alpha_{j+1}} \int_{t_i}^{t_{i+1}} m^A(t,\alpha) abt dt d\alpha \\ = \frac{ab\Delta t^2 \Delta \alpha}{12} [(3i + 1)(m^A_{ij} + m^A_{i,j+1}) + (3i + 2)(m^A_{i+1,j} + m^A_{i+1,j+1})] \quad (4)$$

[0025] 步骤63:由最外层相邻两皮托压测点和对应的椭圆壳体组成的第二圆弧形区域,沿径向采用最外层测点近似,沿周向采用线性插值对各皮托压测点的比流量密度进行插值,得到每个第二圆弧形区域的比流量密度插值函数,对比流量密度的插值函数在本第二圆弧形区域内进行积分,获得每个第二圆弧形区域内流量。其中所述第二圆弧形区域内比流量密度插值函数的计算公式为:

$$[0026] \quad m^A(t,\alpha) = \frac{\alpha_{j+1} - \alpha}{\Delta\alpha} m^A_{5j} + \frac{\alpha - \alpha_j}{\Delta\alpha} m^A_{5,j+1} \quad (5)$$

[0027] 所述第二圆弧形区域内流量的计算公式为:

$$[0028] \quad q^m_{5j} = \int_{\alpha_j}^{\alpha_{j+1}} \int_{t_5}^{t_6} m^A(t,\alpha) abt dt d\alpha = \frac{11ab\Delta t^2 \Delta\alpha}{4} (m^A_{5j} + m^A_{5,j+1}) \quad (6)$$

[0029] 步骤64:将每个扇形区域内流量、每个第一圆弧形区域内流量和每个第二圆弧形区域内流量进行叠加,得到椭圆截面内流量。其中,所述椭圆截面内流量的计算公式为:

$$[0030] \quad \begin{aligned} q^m &= \sum q^m_{ij} \\ &= ab\Delta t^2 \Delta\alpha \sum_{j=1}^8 \left\{ \frac{1}{6} (m^A_{00} + m^A_{1j} + m^A_{1,j+1}) + \frac{11}{4} (m^A_{5j} + m^A_{5,j+1}) + \frac{1}{12} \sum_{i=1}^4 [(3i + 1)(m^A_{ij} + m^A_{i,j+1}) + (3i + 2)(m^A_{i+1,j} + m^A_{i+1,j+1})] \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

[0031] 步骤65:将公式(1)(3)(5)中的比流量密度替换成各皮托压测点的马赫数,重复步骤61~步骤64,得到椭圆截面内叠加的马赫数;

[0032] 步骤66:将公式(1)(3)(5)中的比流量密度替换成各皮托压测点的总压恢复系数,重复步骤61~步骤64,得到椭圆截面内叠加的总压恢复系数。

[0033] 利用上述技术方案,本发明具有如下有益技术效果:

[0034] 通过本发明的椭圆截面流量计及其数据处理方法,不仅可以获得进气道椭圆截面出口的流量、马赫数及总压恢复系数,填补椭圆截面流量计测点等距分布时后处理方法的空白,以便更为全面的获得进气道性能参数,而且可以为椭圆截面的流量计算以及进一步的椭圆截面马赫数和总压恢复系数分布、平均马赫数、平均总压恢复系数后处理提供科学依据。

## 附图说明

[0035] 图1为本发明实施例提供的一种41测点等距分布的椭圆截面流量计的结构简图;

[0036] 图2为本发明实施例提供的一种41测点等距分布的椭圆截面流量计的数据处理方法的流程图。

## 具体实施方式

[0037] 下面结合附图和实施方式对本发明作进一步的详细说明:

[0038] 如图1所示,一种41测点等距分布的椭圆截面流量计,包括椭圆壳体,所述椭圆壳体连接在进气道下游的椭圆截面出口,椭圆壳体用于安装皮托耙和静压测量装置。

[0039] 为方便计算,以椭圆中心为原点,椭圆长轴为x轴,长度为2a,椭圆短轴为y轴,长度为2b,建立坐标系,椭圆方程为 $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$ 。设 $D_{ij}$ 为皮托压测点(如图1中实心圆点所示), $i$ 为每个耙位上传感器测点位置 $i = 1, 2, \dots, 5$ ,沿径向由内向外递增, $j$ 为耙位编号 $j = 1, 2, \dots, 8$ ,从x轴沿周向逆时针递增, $D_{00}$ 为椭圆中心处皮托压测点。设 $E_j$ 为壁面静压测点(如图1中三角点所示), $j = 1, 2, \dots, 8$ ,从x轴沿周向逆时针递增,与皮托耙编号对应。

[0040] 皮托耙包括8个耙位,8个耙位将椭圆出口截面面积8等分,其中4个正向耙位呈十字分布,与坐标轴重合,另外4个斜向耙位与椭圆长轴夹角为 $\theta_0 = \arctan(b/a)$ ;8个耙位的中心交点布置1个皮托压测点,每个耙位上沿径向均匀布置5个皮托压测点,总共41个皮托压测点;每个皮托压测点安装有皮托压力传感器,静压测量装置包括在椭圆壳体上沿周向均匀布置的8个壁面压力传感器,壁面压力传感器的位置分布与所述耙位对应,皮托压力传感器用于获取对应的皮托压测点的皮托压,壁面压力传感器用于测量对应位置的流场静压。

[0041] 参考图2,一种41测点等距分布的椭圆截面流量计的数据处理方法,应用于上述一种41测点等距分布的椭圆截面流量计,包括:

[0042] 步骤1:将8个壁面压力传感器的测量结果求平均值,得到椭圆截面中心的静压,根据椭圆截面中心的静压和相应耙位对应的壁面静压,沿径向利用线性插值法,得到各皮托压测点的静压;

[0043] 具体的,通过8个测点 $E_j$ 的静压求平均值,计算出椭圆中心 $D_{00}$ 的静压 $p_{00}$ ;对于第 $j$ 个耙位上的测点 $D_{ij}$ ,利用 $D_{00}$ 处静压 $p_{00}$ 和 $E_j$ 处静压 $p_j^E$ ,沿径向通过线性插值获得 $D_{ij}$ ( $i = 1, 2, \dots, 5$ )处静压 $p_{ij}$ ,如公式(8)所示,

$$[0044] \quad p_{ij} = \left(1 - \frac{i}{6}\right)p_{00} + \frac{i}{6}p_j^E \quad (8)$$

[0045] 步骤2:根据各皮托压测点的皮托压和静压,计算得到各皮托压测点的气流马赫数;

[0046] 具体的,借助皮托耙测量得到 $D_{ij}$ 处皮托压 $p_{ij}^t$ ,计算皮托压和静压之比 $p_{ij}^t/p_{ij}$ ,进而通过公式(2)计算 $D_{ij}$ 处气流马赫数 $M_{ij}$ ,

$$[0047] \quad \frac{p_{ij}^t}{p_{ij}} = \begin{cases} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_{ij}^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}, & M_{ij} \leq 1 \text{ 即 } \frac{p_{ij}^t}{p_{ij}} \leq 1.893 \\ \left(\frac{\gamma+1}{2} M_{ij}^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \left(\frac{2\gamma}{\gamma+1} M_{ij}^2 - \frac{\gamma-1}{\gamma+1}\right)^{-\frac{1}{\gamma-1}}, & M_{ij} > 1 \text{ 即 } \frac{p_{ij}^t}{p_{ij}} > 1.893 \end{cases} \quad (9)$$

[0048] 式中 $\gamma$ 为气体比热比,对于空气 $\gamma = 1.4$ 。

[0049] 步骤3:根据各皮托压测点的静压和气流马赫数,计算得到各皮托压测点的气流总压;

[0050] 具体的,借助 $D_{ij}$ 处静压 $p_{ij}$ 和 $D_{ij}$ 处气流马赫数 $M_{ij}$ ,通过公式(3)计算 $D_{ij}$ 处气流总压 $p_{ij}^0$ ,

$$[0051] \quad p_{ij}^0 = p_{ij} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_{ij}^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (10)$$



[0052] 步骤4:根据各皮托压测点的气流马赫数和气流总压,计算得到各皮托压测点的比流量密度;

[0053] 具体的,计算比流量密度 $m_{ij}^A = \rho u$ ,即气体密度 $\rho$ 和速度 $u$ 之积,

$$[0054] \quad m_{ij}^A = \rho u = \sqrt{\frac{\gamma}{R} \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \frac{p_{ij}^0}{T_{ij}^0}} M_{ij} \left[ \frac{2}{\gamma+1} \left( 1 + \frac{\gamma-1}{2} M_{ij}^2 \right) \right]^{-\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \quad (11)$$

[0055] 式中 $T_{ij}^0$ 为气流总温,可以用来流总温近似,或者通过热电偶等测量。

[0056] 步骤5:根据各皮托压测点的气流总压和来流总压,计算得到各皮托压测点的总压恢复系数;

[0057] 具体的,总压恢复系数 $\sigma_{ij}$ 是总压 $p_{ij}^0$ 和来流总压 $p_{\infty}^0$ 之比, $\sigma_{ij} = p_{ij}^0 / p_{\infty}^0$ 。

[0058] 步骤6:将各皮托压测点的比流量密度、气流马赫数和气流总压分别在椭圆截面内积分并进行叠加,得到椭圆截面内的流量、叠加的马赫数和叠加的总压恢复系数;

[0059] 优选地,所述将各皮托压测点的比流量密度、气流马赫数和气流总压分别在椭圆截面内积分并进行叠加,得到椭圆截面内的流量、叠加的马赫数和叠加的总压恢复系数,包括:

[0060] 步骤61:由椭圆截面的中心和最内层相邻两皮托压测点组成的扇形区域,利用线性插值法对各皮托压测点的比流量密度进行插值,得到每个扇形区域的比流量密度插值函数,对比流量密度的插值函数在本扇形区域内进行积分,获得每个扇形区域内流量;

[0061] 步骤62:由最内层相邻两皮托压测点和对应的最外层相邻两皮托压测点组成的第一圆弧形区域,利用线性插值法对各皮托压测点的比流量密度进行插值,得到每个第一圆弧形区域的比流量密度插值函数,对比流量密度的插值函数在本第一圆弧形区域内进行积分,获得每个第一圆弧形区域内流量;

[0062] 步骤63:由最外层相邻两皮托压测点和对应的椭圆壳体组成的第二圆弧形区域,沿径向采用最外层测点近似,沿周向采用线性插值对各皮托压测点的比流量密度进行插值,得到每个第二圆弧形区域的比流量密度插值函数,对比流量密度的插值函数在本第二圆弧形区域内进行积分,获得每个第二圆弧形区域内流量;

[0063] 步骤64:将每个扇形区域内流量、每个第一圆弧形区域内流量和每个第二圆弧形区域内流量进行叠加,得到椭圆截面内流量;

[0064] 步骤65:将比流量密度替换成各皮托压测点的马赫数,重复步骤61~步骤64,得到椭圆截面内叠加的马赫数;

[0065] 步骤66:将比流量密度替换成各皮托压测点的总压恢复系数,重复步骤61~步骤64,得到椭圆截面内叠加的总压恢复系数。

[0066] 具体的,为便于计算,针对标准方程 $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$ 的椭圆,其内任意一点可以用如下参数方程(12)表示

$$[0067] \quad \begin{cases} x = at \cos \alpha \\ y = bt \sin \alpha \end{cases} \quad (12)$$

[0068] 式中, $t$ 为径向参数, $0 \leq t \leq 1$ , $\alpha$ 为周向角度参数, $0 \leq \alpha \leq 2\pi$ 。

[0069] 在参数方程中,测点 $D_{ij}$ 的坐标为 $(t_i, \alpha_j)$ ,在本发明中测点按照等间距分布,测点坐标可以采用间距 $\Delta t$ 和 $\Delta \alpha$ 表示, $t_i = i \Delta t$ , $\Delta t = 1/6$ , $\alpha_j = j \Delta \alpha$ , $\Delta \alpha = \pi/4$ ,椭圆面积 $S$ 可以

按照公式(6)计算,

$$[0070] \quad S = \iint abt dtd\alpha \quad (13)$$

[0071] 然而比流量密度 $m^A_{ij}$ 是离散的点,为了实现比流量密度 $m^A_{ij}$ 在椭圆截面内的积分,需要利用离散点进行插值,获得连续的插值函数,然后对插值函数进行积分。根据椭圆内离散的测量点分布位置,插值函数分成三部分。

[0072] 第一部分,椭圆中心和最内层相邻测点组成的扇形区域( $0 \leq t \leq t_1$ ),在每个扇形区域内,对椭圆中心 $D_{00}$ 和第一层测点 $D_{1j}$ 、 $D_{1,j+1}$ 处的数据进行线性插值,获得比流量密度的插值函数 $m^A(t, \alpha)$

$$[0073] \quad m^A(t, \alpha) = \frac{t_1 - t}{\Delta t} m^A_{00} + \frac{t(\alpha_{j+1} - \alpha)}{\Delta t \Delta \alpha} m^A_{1j} + \frac{t(\alpha - \alpha_j)}{\Delta t \Delta \alpha} m^A_{1,j+1} \quad (1)$$

[0074] 将比流量密度的插值函数进行积分,可以获得每个扇形内流量 $q^m_{0j}$

$$[0075] \quad q^m_{0j} = \int_{\alpha_j}^{\alpha_{j+1}} \int_0^{t_1} m^A(t, \alpha) abt dtd\alpha = \frac{ab\Delta t^2 \Delta \alpha}{6} (m^A_{00} + m^A_{1j} + m^A_{1,j+1}) \quad (2)$$

[0076] 第二部分,最内层测点和最外层测点包裹的环形区域( $t_1 \leq t \leq t_5$ ),在相邻4个测点组成的第一圆弧形区域内,对 $D_{ij}$ 、 $D_{i,j+1}$ 、 $D_{i+1,j}$ 、 $D_{i+1,j+1}$ 处的数据进行线性插值,获得插值函数 $m^A(t, \alpha)$

$$[0077] \quad m^A(t, \alpha) = \frac{(t_{i+1} - t)(\alpha_{j+1} - \alpha)}{\Delta t \Delta \alpha} m^A_{ij} + \frac{(t_{i+1} - t)(\alpha - \alpha_j)}{\Delta t \Delta \alpha} m^A_{i,j+1} \\ + \frac{(t - t_i)(\alpha_{j+1} - \alpha)}{\Delta t \Delta \alpha} m^A_{i+1,j} + \frac{(t - t_i)(\alpha - \alpha_j)}{\Delta t \Delta \alpha} m^A_{i+1,j+1} \quad (3)$$

[0078] 将比流量密度的插值函数进行积分,可以获得每个扇形内流量 $q^m_{ij}$

$$[0079] \quad q^m_{ij} = \int_{\alpha_j}^{\alpha_{j+1}} \int_{t_i}^{t_{i+1}} m^A(t, \alpha) abt dtd\alpha \\ = \frac{ab\Delta t^2 \Delta \alpha}{12} [(3i + 1)(m^A_{ij} + m^A_{i,j+1}) + (3i + 2)(m^A_{i+1,j} + m^A_{i+1,j+1})] \quad (4)$$

[0080] 第三部分,最外层测点和椭圆壳体之间的部分 $t_5 \leq t \leq t_6$ ,即第二圆弧形区域,这一区域只有区域内侧 $D_{5j}$ 测点的数据,如果对数据向外插值,会出现较大偏差,因此沿径向采用最外层测点近似,沿周向采用线性插值,由 $D_{5j}$ 、 $D_{5,j+1}$ 、 $E_j$ 、 $E_{j+1}$ 组成的区域内比流量密度插值函数 $m^A(t, \alpha)$

$$[0081] \quad m^A(t, \alpha) = \frac{\alpha_{j+1} - \alpha}{\Delta \alpha} m^A_{5j} + \frac{\alpha - \alpha_j}{\Delta \alpha} m^A_{5,j+1} \quad (5)$$

[0082] 将比流量密度的插值函数进行积分,可以获得每个扇形内流量 $q^m_{5j}$

$$[0083] \quad q^m_{5j} = \int_{\alpha_j}^{\alpha_{j+1}} \int_{t_5}^{t_6} m^A(t, \alpha) abt dtd\alpha = \frac{11ab\Delta t^2 \Delta \alpha}{4} (m^A_{5j} + m^A_{5,j+1}) \quad (6)$$

[0084] 最后,将各部分流量进行叠加,计算椭圆截面内流量 $q^m$

$$\begin{aligned}
 q^m &= \sum q_{ij}^m \\
 [0085] \quad &= ab\Delta t^2 \Delta \alpha \sum_{j=1}^8 \left\{ \frac{1}{6} (m_{00}^A + m_{1j}^A + m_{1,j+1}^A) + \frac{11}{4} (m_{5j}^A + m_{5,j+1}^A) + \right. \\
 &\quad \left. \frac{1}{12} \sum_{i=1}^4 [(3i+1)(m_{ij}^A + m_{i,j+1}^A) + (3i+2)(m_{i+1,j}^A + m_{i+1,j+1}^A)] \right\} \\
 &\quad (7)
 \end{aligned}$$

[0086] 根据椭圆沿周向的周期性,当 $j=8$ 时, $m_{i,j+1}^A = m_{i1}^A$ 。

[0087] 将插值公式(1)(3)(5)中的比流量密度替换成各皮托压测点的马赫数或总压恢复系数,即可获得椭圆截面内马赫数或总压恢复系数的分布;将流量公式(7)中的比流量密度替换成马赫数和总压恢复系数,获得叠加的马赫数和叠加的总压恢复系数。

[0088] 步骤7:将椭圆截面内叠加的马赫数和叠加的总压恢复系数,分别除以椭圆截面的面积,得到椭圆截面内平均马赫数和总压恢复系数。

[0089] 具体的,将叠加的马赫数和总压恢复系数除以椭圆面积 $\pi ab$ ,即可获得截面内平均马赫数和总压恢复系数。

[0090] 实施例中,公式中相关符号说明如表1所示:

符号	符号说明
$a$	椭圆半长轴
$b$	椭圆半短轴
$D_{ij}$	皮托压测点位置
$D_{00}$	椭圆截面中心点处皮托压测点位置
$E_j$	壁面静压测点位置
[0091] $i$	每个耙位上测点位置编号, $i=1, 2, \dots, 5$
$j$	耙位位置编号, $j=1, 2, \dots, 8$
$m_{ij}^A$	各测点 $D_{ij}$ 处比流量密度
$m^A(t, \alpha)$	比流量密度插值函数
$p_{ij}$	各测点 $D_{ij}$ 处静压
$p_{00}$	中心点 $D_{00}$ 处静压
$p_j^E$	壁面测点 $E_j$ 处静压

[0092]	$p'_{ij}$	各测点 $D_{ij}$ 处皮托压
	$p^0_{ij}$	各测点 $D_{ij}$ 处总压
	$p^0_{\infty}$	来流总压
	$q^m$	椭圆截面内流量
	$q^m_{ij}$	不同小区域内流量
	$R$	气体常数, $R = 287 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
	$S$	椭圆面积
	$T^0_{ij}$	各测点 $D_{ij}$ 处总温
	$t$	径向参数, $0 \leq t \leq 1$
	$\Delta t$	径向参数间距
	$\alpha$	周向角度参数, $0 \leq \alpha \leq 2\pi$
	$\Delta \alpha$	周向角度参数间距
	$\gamma$	比热比, 空气 $\gamma = 1.4$
	$\theta_0$	斜向耙位与椭圆长轴夹角

[0093] 表1

[0094] 以上所述的仅是本发明的实施例, 方案中公知的具体技术方案和/或特性等常识在此未作过多描述。应当指出, 对于本领域的技术人员来说, 在不脱离本发明技术方案的前提下, 还可以作出若干变形和改进, 这些也应该视为本发明的保护范围, 这些都不会影响本发明实施的效果和专利的实用性。本申请要求的保护范围应当以其权利要求的内容为准, 说明书中的具体实施方式等记载可以用于解释权利要求的内容。

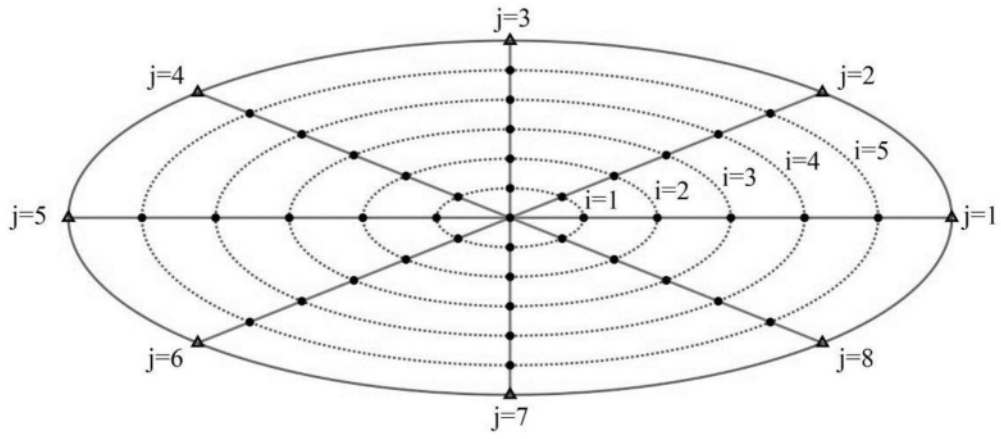


图1

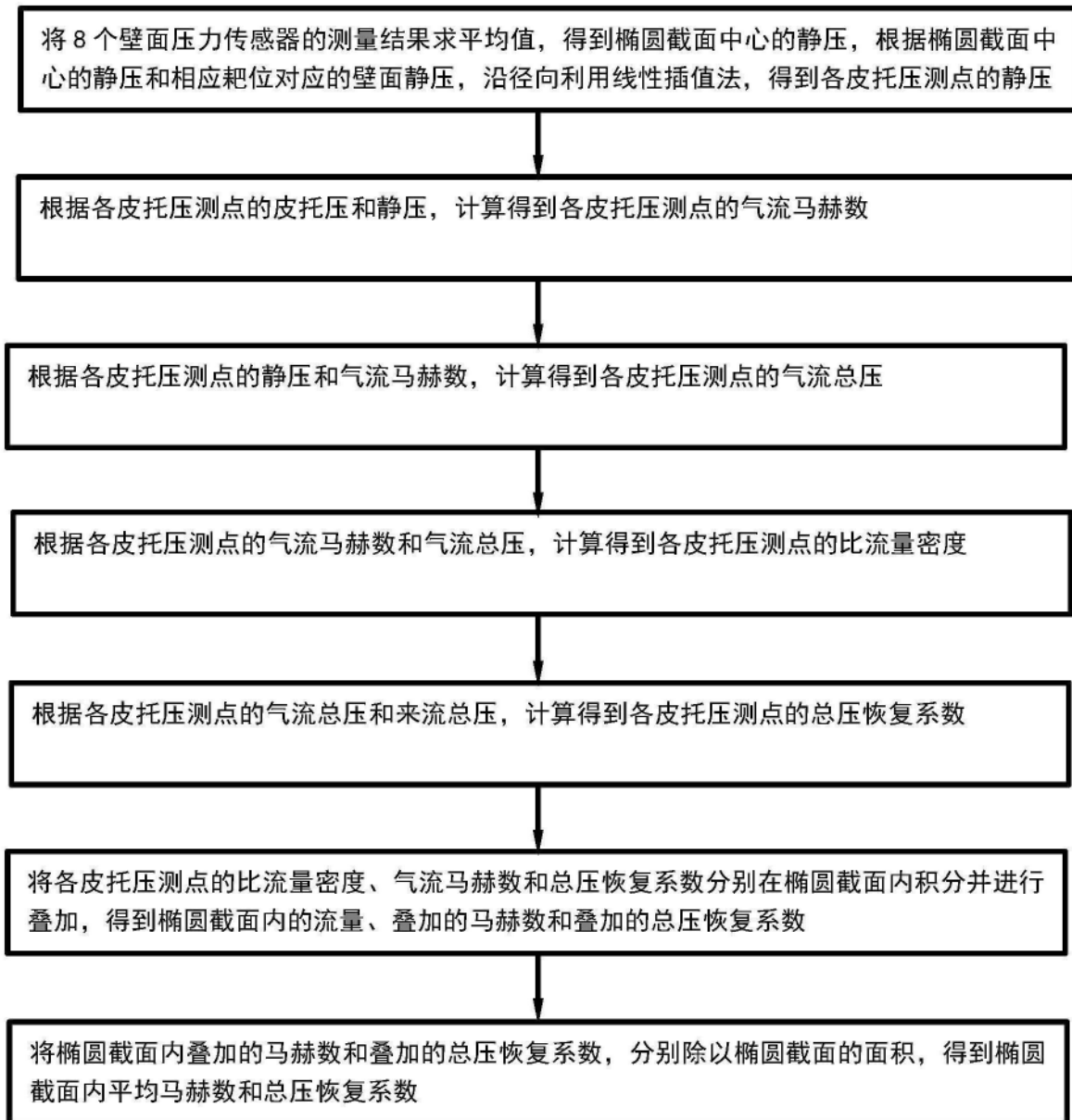


图2