



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110514391 A

(43)申请公布日 2019. 11. 29

(21)申请号 201910742027.0

(22)申请日 2019.08.12

(71)申请人 北京航空航天大学

地址 100191 北京市海淀区学院路37号

(72)发明人 马宏伟 屈冬平

(51)Int.Cl.

G01M 9/06(2006.01)

G01M 9/08(2006.01)

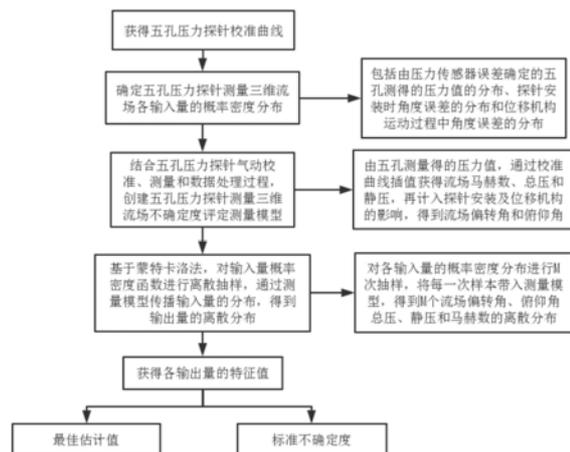
权利要求书2页 说明书5页 附图9页

(54)发明名称

一种五孔压力探针测量三维流场不确定度评定方法

(57)摘要

本发明公开了一种五孔压力探针测量三维流场不确定度评定方法,属于测试计量领域,包含步骤:(1)获得校准曲线;(2)确定输入量的概率密度分布;(3)基于蒙特卡洛法,对输入量的概率密度函数进行离散抽样,结合气动校准,通过基于数据处理插值算法的测量模型传播输入量的分布,获得输出量包括偏转角、俯仰角、总压、静压和马赫数的离散分布;本发明有效解决了五孔压力探针测试系统因不确定度来源较多,数据处理算法复杂非线性显著,GUM不适用的问题;本发明无一种五孔压力探针测量三维流场不确定度评定方法需任何近似,结合探针气动校准、测量和数据处理过程,创建了准确的不确定度评定测量模型;基于蒙特卡洛方法,发展了更加可靠、简便的五孔压力探针测量三维流场的不确定度评定流程。



CN 110514391 A

1. 一种五孔压力探针测量三维流场不确定度评定方法,其特征在于包含以下步骤:

步骤一:校准五孔压力探针,获得五孔压力探针气动校准曲线;

所述的五孔压力探针校准在校准风洞中进行,在不可压缩流场马赫数范围内,同一马赫数下,改变探针偏转角和俯仰角,经气动校准确定五孔探针偏转角系数、俯仰角系数、总压系数和静压系数分别随俯仰角和偏转角变化的曲线;所述偏转角系数、俯仰角系数、总压系数和静压系数定义如下:

$$C_{py} = \frac{P_2 - P_3}{P_2 - \bar{P}}$$

$$C_{pp} = \frac{P_4 - P_5}{P_2 - \bar{P}}$$

$$C_{pt} = \frac{P_1 - P_t}{P_2 - \bar{P}}$$

$$C_{ps} = \frac{P_s - P}{P_2 - \bar{P}}$$

$$\bar{P} = \frac{P_2 + P_3 + P_4 + P_5}{4}$$

其中, C_{py} 为偏转角系数, C_{pp} 为俯仰角系数, C_{pt} 为总压系数, C_{ps} 为静压系数, P_t 和 P_s 分别为校准风洞来流的总压和静压, P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 和 P_5 分别为五孔压力探针中孔、左孔、右孔、上孔和下孔测得的压力值;

步骤二:确定与五孔压力探针测量三维流场输出量相关的输入量的统计特征,构造输入量的概率密度分布;

所述的输出量,其特征在于,包括五孔压力探针测得的偏转角、俯仰角、总压和静压;所述的输入量,其特征在于,包括五孔压力探针中孔、左孔、右孔、上孔和下孔测得的压力值,及探针安装时的偏转角角度误差、俯仰角角度误差以及带动探针运动的位移机构运动过程中的偏转角角度误差、俯仰角角度误差;

步骤三:结合五孔压力探针气动校准、测量和数据处理过程,创建五孔压力探针测量三维流场不确定度评定的测量模型;

所述的测量模型为:由五孔测得的压力值计算得到偏转角系数和俯仰角系数,通过校准曲线插值获得偏转角和俯仰角,根据偏转角和俯仰角,插值进一步得到总压系数和静压系数,根据总压系数和静压系数的定义得到输出量总压、静压;所述偏转角和俯仰角需计入探针安装及位移机构的影响,插值获得的偏转角加上探针安装时的偏转角角度误差和带动探针运动的位移机构运动过程中的偏转角角度误差即得输出量偏转角,插值获得的俯仰角加上探针安装时的俯仰角角度误差和带动探针运动的位移机构运动过程中的俯仰角角度误差即得输出量俯仰角;

步骤四:基于蒙特卡洛方法,对输入量包括五孔压力探针中孔、左孔、右孔、上孔和下孔测得的压力值,及探针安装时的偏转角角度误差、俯仰角角度误差以及带动探针运动的位移机构运动过程中的偏转角角度误差、俯仰角角度误差的概率密度分布分别进行M次抽样,将每一次样本带入测量模型,得到M个流场偏转角、俯仰角、总压和静压的离散分布,通过各输出量离散分布计算得到的均值和标准差即分别为各输出量的最佳估计值和标准不确定

度；

所述的一种五孔压力探针测量三维流场不确定度评定方法,可用于五孔压力探针测量三维不可压缩流场的数据处理,也可用于五孔压力探针测量三维可压缩流场的数据处理;用于可压缩流场时,需计入流场压缩性的变化对五孔探针测量的影响,经气动校准得到马赫数系数、偏转角系数、俯仰角系数、总压系数和静压系数随马赫数、偏转角和俯仰角变化的校准曲线,测量模型还包括马赫数系数的插值过程,输出量还包括马赫数;

所述的一种五孔压力探针测量三维流场不确定度评定方法,其特征在于,无任何近似,结合探针气动校准、测量和数据处理过程,创建测量模型;基于蒙特卡洛方法,建立针对五孔压力探针测量三维流场的不确定度评定流程。

一种五孔压力探针测量三维流场不确定度评定方法

技术领域

[0001] 本发明涉及测试计量技术领域,特别是涉及一种五孔压力探针测量三维流场不确定度评定方法。

背景技术

[0002] 五孔压力探针是测量三维流场总压、静压、马赫数和速度方向常用的技术手段。五孔压力探针应用过程包括气动校准、测量和数据处理。测量过程为,探针安装在二自由度位移机构上,并根据测量需要可在偏转方向和俯仰方向运动,在测量点处,探针五个感压孔感受流场压力,通过五根引压管传递给五个压力传感器,压力传感器通过电缆将数据传输至数据采集系统,数据采集系统将压力信号输出至计算机,由此得到五孔压力探针中孔、左孔、右孔、上孔和下孔测得的压力值。

[0003] 不确定度是五孔压力探针测量重要的技术指标,目前,五孔压力探针测量三维流场参数不确定度评定方法研究较少,相关研究中不确定度评定采用的是《测量不确定度表示指南》(Guide to the Expression of uncertainty in Measurement,简称GUM,ISO/IEC GUIDE-98-3:2008)规定的方法。GUM评定不确定度的不足是:(1)测量模型呈现明显的非线性时,GUM评定不再可靠;(2)测量模型复杂时,难以计算GUM不确定度评定需要的灵敏系数。

[0004] 对于三维流场总压、静压、马赫数的测量,其不确定度来源于压力测量系统(包括计算机数据采集系统、压力传感器及线缆、引压管、五个感压孔)测得的压力的误差,对于三维流场偏转角和俯仰角的测量,其不确定度来源除了上述压力测量系统的测量误差,还包括探针安装时的偏转角角度误差、俯仰角角度误差以及带动探针运动的位移机构运动过程中的偏转角角度误差、俯仰角角度误差。五孔压力探针测量数据的数据处理过程复杂,依赖于风洞气动校准曲线,由于五孔压力探针校准曲线规律性差、非线性显著,其校准曲线无法准确使用解析的数学式表达,因此评定五孔压力探针测量三维流场不确定度时,难以建立其测量模型。五孔压力探针测试系统不确定度来源较多,测量数据处理算法十分复杂、非线性显著导致其不确定度评定的测量模型复杂、非线性显著,采用GUM评定不确定度计算过程困难,结果不可靠。因此,亟待发展一种准确可靠、应用简便的五孔压力探针测量三维流场不确定度评定方法。

发明内容

[0005] 针对现有技术存在的不足,本发明提供了一种五孔压力探针测量三维流场不确定度评定方法,根据已知信息直接给定各个输入量的概率密度函数,无需任何近似,结合五孔压力探针气动校准、测量和数据处理过程,创建准确的测量模型,对输入量的概率密度进行离散抽样,并通过不确定度评定的测量模型传播输入量的分布,获得输出量的离散分布及其特征值,其结果准确、应用简便。

[0006] 为解决上述技术问题,本发明采用的技术方案是:提供一种五孔压力探针测量三维流场不确定度评定方法,包括以下步骤:

[0007] 步骤一:校准五孔压力探针,获得五孔压力探针气动校准曲线;

[0008] 所述的五孔压力探针校准在校准风洞中进行,在不可压缩流场马赫数范围内,同一马赫数下,改变探针偏转角和俯仰角,经气动校准确定五孔探针偏转角系数、俯仰角系数、总压系数和静压系数分别随俯仰角和偏转角变化的曲线;所述偏转角系数、俯仰角系数、总压系数和静压系数定义如下:

$$[0009] \quad C_{py} = \frac{P_2 - P_3}{P_2 - \bar{P}}$$

$$[0010] \quad C_{pp} = \frac{P_4 - P_5}{P_2 - \bar{P}}$$

$$[0011] \quad C_{pt} = \frac{P_1 - P_t}{P_2 - \bar{P}}$$

$$[0012] \quad C_{ps} = \frac{P_s - \bar{P}}{P_2 - \bar{P}}$$

$$[0013] \quad \bar{P} = \frac{P_2 + P_3 + P_4 + P_5}{4}$$

[0014] 其中, C_{py} 为偏转角系数, C_{pp} 为俯仰角系数, C_{pt} 为总压系数, C_{ps} 为静压系数, P_t 和 P_s 分别为校准风洞来流总压和静压, P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 和 P_5 分别为五孔压力探针中孔、左孔、右孔、上孔和下孔测得的压力值;

[0015] 步骤二:确定与五孔压力探针测量三维流场输出量相关的输入量的统计特征,构造输入量的概率密度分布;

[0016] 所述的输出量,其特征在于,包括五孔压力探针测得的偏转角yaw、俯仰角pitch、总压 P_t 和静压 P_s ;所述的输入量,其特征在于,包括五孔压力探针中孔、左孔、右孔、上孔和下孔测得的压力值 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 和 P_5 ,及探针安装时的偏转角角度误差 yaw_{mou} 、俯仰角角度误差 $pitch_{mou}$ 以及带动探针运动的位移机构运动过程中的偏转角角度误差 yaw_{trav} 、俯仰角角度误差 $pitch_{trav}$;

[0017] 步骤三:结合五孔压力探针气动校准、测量和数据处理过程,创建五孔压力探针测量三维流场不确定度评定的测量模型;

[0018] 所述的测量模型无法用解析的数学表达式表达,表述如下:由五孔测得的压力值计算得到偏转角系数 C_{py} 和俯仰角系数 C_{pp} ,通过校准曲线,插值获得偏转角 yaw' 和俯仰角 $pitch'$,根据偏转角 yaw' 和俯仰角 $pitch'$,插值进一步得到总压系数 C_{pt} 和静压系数 C_{ps} ,根据总压系数 C_{pt} 和静压系数 C_{ps} 的定义得到输出量总压 P_t 和静压 P_s ;所述偏转角 yaw' 和俯仰角 $pitch'$ 需计入探针安装及位移机构的影响,插值获得的偏转角 yaw' 加上探针安装时的偏转角角度误差 yaw_{mou} 和带动探针运动的位移机构运动过程中的偏转角角度误差 yaw_{trav} 即得输出量偏转角yaw,插值获得的俯仰角 $pitch'$ 加上探针安装时的俯仰角角度误差 $pitch_{mou}$ 和带动探针运动的位移机构运动过程中的俯仰角角度误差 $pitch_{trav}$ 即得输出量俯仰角pitch;

[0019] 步骤四:基于蒙特卡洛方法,对输入量包括五孔压力探针中孔、左孔、右孔、上孔和下孔测得的压力值 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 和 P_5 ,及探针安装时的偏转角角度误差 yaw_{mou} 、俯仰角角度误差 $pitch_{mou}$ 以及带动探针运动的位移机构运动过程中的偏转角角度误差 yaw_{trav} 、俯仰角角度误差 $pitch_{trav}$ 的概率密度分布分别进行M次抽样,将每一次样本带入测量模型,得到M个

流场偏转角yaw、俯仰角pitch、总压 P_t 和静压 P_s 的离散分布,通过各输出量离散分布计算得到的均值和标准差即分别为各输出量的最佳估计值和标准不确定度;

[0020] 所述的一种五孔压力探针测量三维流场不确定度评定方法,可用于五孔压力探针测量三维不可压缩流场的数据处理,也可用于五孔压力探针测量三维可压缩流场的数据处理;用于可压缩流场时,需计入流场压缩性的变化对五孔探针测量的影响,经气动校准得到马赫数系数、偏转角系数、俯仰角系数、总压系数和静压系数随马赫数、偏转角和俯仰角变化的校准曲线,测量模型还包括马赫数系数的插值过程,输出量还包括马赫数。

[0021] 本发明的有益效果是:(1)本发明有效解决了五孔压力探针测试系统不确定度来源较多,测量数据处理算法复杂、非线性显著导致其不确定度评定的测量模型复杂、非线性显著,GUM评定五孔压力探针测量三维流场不确定度计算复杂、评定不可靠的问题;(2)本发明无需任何近似,结合五孔压力探针气动校准、测量和数据处理过程,创建了准确的不确定度评定测量模型;(3)基于蒙特卡洛方法,发展了更加可靠、简便的五孔压力探针测量三维流场的不确定度评定流程,其评定结果可靠,应用简便,适宜推广使用。

附图说明

[0022] 图1五孔压力探针测试系统图;

[0023] 图2五孔压力探针测量三维流场不确定度评定流程;

[0024] 图3五孔压力探针测量三维不可压缩流场总压、静压不确定度评定流程;

[0025] 图4五孔压力探针测量三维不可压缩流场偏转角、俯仰角不确定度评定流程;

[0026] 图5三维不可压缩流场五孔压力探针偏转角系数、俯仰角系数随偏转角和俯仰角变化的校准曲线;

[0027] 图6三维不可压缩流场五孔压力探针总压系数随偏转角和俯仰角变化的校准曲线;

[0028] 图7三维不可压缩流场五孔压力探针静压系数随偏转角和俯仰角变化的校准曲线;

[0029] 图8五孔压力探针测量三维不可压缩流场偏转角M个输出量的概率分布直方图;

[0030] 图9五孔压力探针测量三维不可压缩流场俯仰角M个输出量的概率分布直方图;

[0031] 图10五孔压力探针测量三维不可压缩流场总压M个输出量的概率分布直方图;

[0032] 图11五孔压力探针测量三维不可压缩流场静压M个输出量的概率分布直方图。

具体实施方式

[0033] 下面结合附图对本发明的较佳实施例进行详细阐述,以使本发明的优点和特征能更易于被本领域技术人员理解,从而对本发明的保护范围做出更为清楚明确的界定。

[0034] 本发明的五孔压力探针测试系统图如图1所示,图中1、2、3、4和5分别表示五孔压力探针的中孔、左孔、右孔、上孔和下孔,6为五孔探针的支杆,7为带动探针在偏转方向和俯仰方向运动的二自由度位移机构,8为引压管,9、10、11、12和13为连接在引压管之后的压力传感器,14为连接压力传感器和数据采集系统的电缆,15为数据采集系统,16为计算机,结合图1定义从左视图看,中孔正对来流时偏转角为零,探针逆时针旋转偏转角为正,探针顺时针旋转偏转角为负,从主视图看,中孔正对来流时俯仰角为零,探针支杆向下偏转时,俯

仰角为正,探针支杆向上偏转时,俯仰角为负。本发明五孔压力探针测量三维流场不确定度评定流程如图2所示,结合附图3-11本发明实施例包括:

[0035] 实施例一:评定三维不可压缩流场五孔压力探针测量不确定度

[0036] 本实施例中,五孔压力探针气动校准在不可压缩工况 $Ma=0.1$, $T=10^{\circ}C$ 下进行,校准偏转角范围为 -24° 至 24° ,间隔为 4° ,俯仰角范围为 -28° 至 16° ,间隔为 4° ,在马赫数 $Ma=0.1$ 下,改变俯仰角 yaw 和偏转角 $pitch$,经气动校准获得偏转角系数 C_{py} 、俯仰角系数 C_{pp} 、总压系数 C_{pt} 和静压系数 C_{ps} 随偏转角 yaw 和俯仰角 $pitch$ 变化的校准曲线;图5为偏转角系数 C_{py} 、俯仰角系数 C_{pp} 随偏转角 yaw 和俯仰角 $pitch$ 变化的校准曲线,图6为总压系数 C_{pt} 随偏转角 yaw 和俯仰角 $pitch$ 变化的校准曲线,图7为静压系数 C_{ps} 随偏转角 yaw 和俯仰角 $pitch$ 变化的校准曲线;

[0037] 进一步,根据已知信息确定各输入量的概率分布和参数,输入量有五孔压力探针中孔、左孔、右孔、上孔和下孔测得的压力值 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 和 P_5 ,探针安装时的偏转角角度误差 yaw_{mou} 、俯仰角角度误差 $pitch_{mou}$ 以及带动探针运动的位移机构运动过程中的偏转角角度误差 yaw_{trav} 、俯仰角角度误差 $pitch_{trav}$,这些输入量均给定矩形分布;五孔测得的压力值 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 和 P_5 的分布参数根据传感器的极限误差确定,探针安装时的偏转角角度误差 yaw_{mou} 和俯仰角角度误差 $pitch_{mou}$ 的分布参数由探针安装的极限误差确定,带动探针运动的位移机构运动过程中的偏转角角度误差 yaw_{trav} 和俯仰角角度误差 $pitch_{trav}$ 的分布参数分别由位移机构的精度决定,各输入量概率分布如下表1;

[0038] 表1五孔压力探针测量三维流场不确定度各输入量及其分布

输入量 X_i	概率密度函数分布	区间上下限	概率分布
[0039] $yaw_{mou}/^{\circ}$	矩形	$a=-1$ $b=1$	$R(a, b)$
$pitch_{mou}/^{\circ}$	矩形	$a=-1$ $b=1$	$R(a, b)$
$yaw_{trav}/^{\circ}$	矩形	$a=-0.05$ $b=0.05$	$R(a, b)$
$pitch_{trav}/^{\circ}$	矩形	$a=-1$ $b=1$	$R(a, b)$
测量 P_j/kPa	矩形	$a = P_j - 0.0031$ $b = P_j + 0.0031$	$R(a, b)$

[0040] 表中, yaw_{mou} 、 $pitch_{mou}$ 分别表示五孔压力探针安装时的偏转角角度误差、俯仰角角度误差, yaw_{trav} 、 $pitch_{trav}$ 分别为位移机构运动过程中的偏转角角度误差、俯仰角角度误差, p_j ($j=1,2,3,4,5$)为测量过程中压力的采集值, a 、 b 分别为区间上下端点;

[0041] 进一步,结合五孔压力探针气动校准、测量和数据处理过程,创建五孔压力探针测量三维流场不确定度评定的数学模型,其数学模型无法用解析的数学表达式表达,表述如下:

[0042] 由五孔测得的压力值计算得到偏转角系数 C_{py} 和俯仰角系数 C_{pp} ,通过校准曲线插值得到偏转角 yaw' 和俯仰角 $pitch'$,根据偏转角 yaw' 和俯仰角 $pitch'$,插值进一步得到总压系数 C_{pt} 和静压系数 C_{ps} ,根据总压系数 C_{pt} 和静压系数 C_{ps} 的定义式得到输出量总压 P_t 和静压 P_s ,其具体流程如图3所示;所述偏转角 yaw' 和俯仰角 $pitch'$ 需计入探针安装及位移机构的影响,插值得到的偏转角 yaw' 加上探针安装时的偏转角角度误差 yaw_{mou} 和带动探针运动的位移机构运动过程中的偏转角角度误差 yaw_{trav} 即得输出量偏转角 yaw ,插值得到的俯仰角 $pitch'$ 加上探针安装时的俯仰角角度误差 $pitch_{mou}$ 和带动探针运动的位移机构运动过程

中的俯仰角角度误差 $pitch_{trav}$ 即得输出量俯仰角 $pitch$,其具体流程如图4所示;

[0043] 进一步,基于蒙特卡洛法,对输入量包括五孔压力探针中孔、左孔、右孔、上孔和下孔测得的压力值 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 和 P_5 ,及探针安装时的偏转角角度误差 yaw_{mou} 、俯仰角角度误差 $pitch_{mou}$ 以及带动探针运动的位移机构运动过程中的偏转角角度误差 yaw_{trav} 、俯仰角角度误差 $pitch_{trav}$ 的概率密度分布分别进行M次抽样,将每一次样本带入测量模型,得到M个流场偏转角 yaw 、俯仰角 $pitch$ 、总压 P_t 和静压 P_s 的离散分布,通过各输出量离散分布计算得到的均值和标准差即分别为各输出量的最佳估计值和标准不确定度;

[0044] 本次测量在三维不可压缩流场 $Ma=0.1$ 下进行,偏转角范围为 -24° 至 24° ,偏转角测量间隔为 3° ,俯仰角测量点为 -28° 、 -27° 、 -21.5° 、 -19° 、 -17° 、 -13° ,也即共102个测量点,每个测量点对输入量进行 $M=10^6$ 次离散抽样,获得输出量M个计算结果的离散分布,以测量点 $Ma=0.1$,偏转角 $yaw=-24^\circ$,俯仰角 $pitch=-28^\circ$ 五孔压力探针测量三维流场为例,偏转角M个输出量的概率分布直方图如图8所示,获得偏转角的估计值为 -23° 、标准不确定度为0.06;俯仰角M个输出量的概率分布直方图如图9所示,获得俯仰角的估计值为 -27.29° 、标准不确定度为0.06;总压M个输出量的概率分布直方图如图10所示,获得总压的估计值为100.567kPa、标准不确定度为0.0015;静压M个输出量的概率分布直方图如图11所示,获得静压的估计值为99.88kPa、标准不确定度为0.003。

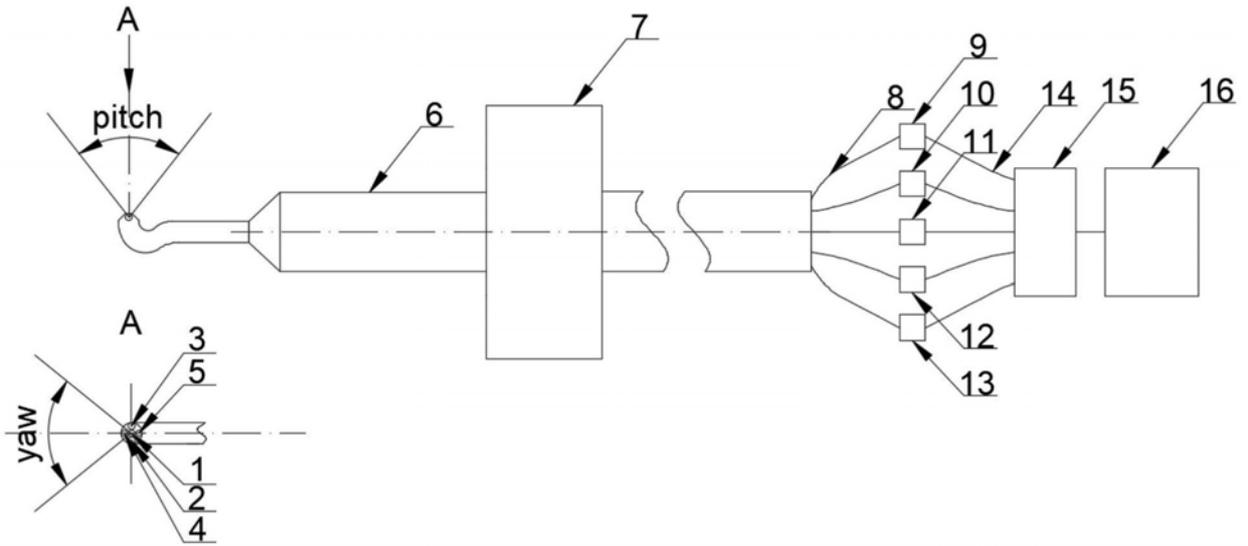


图1

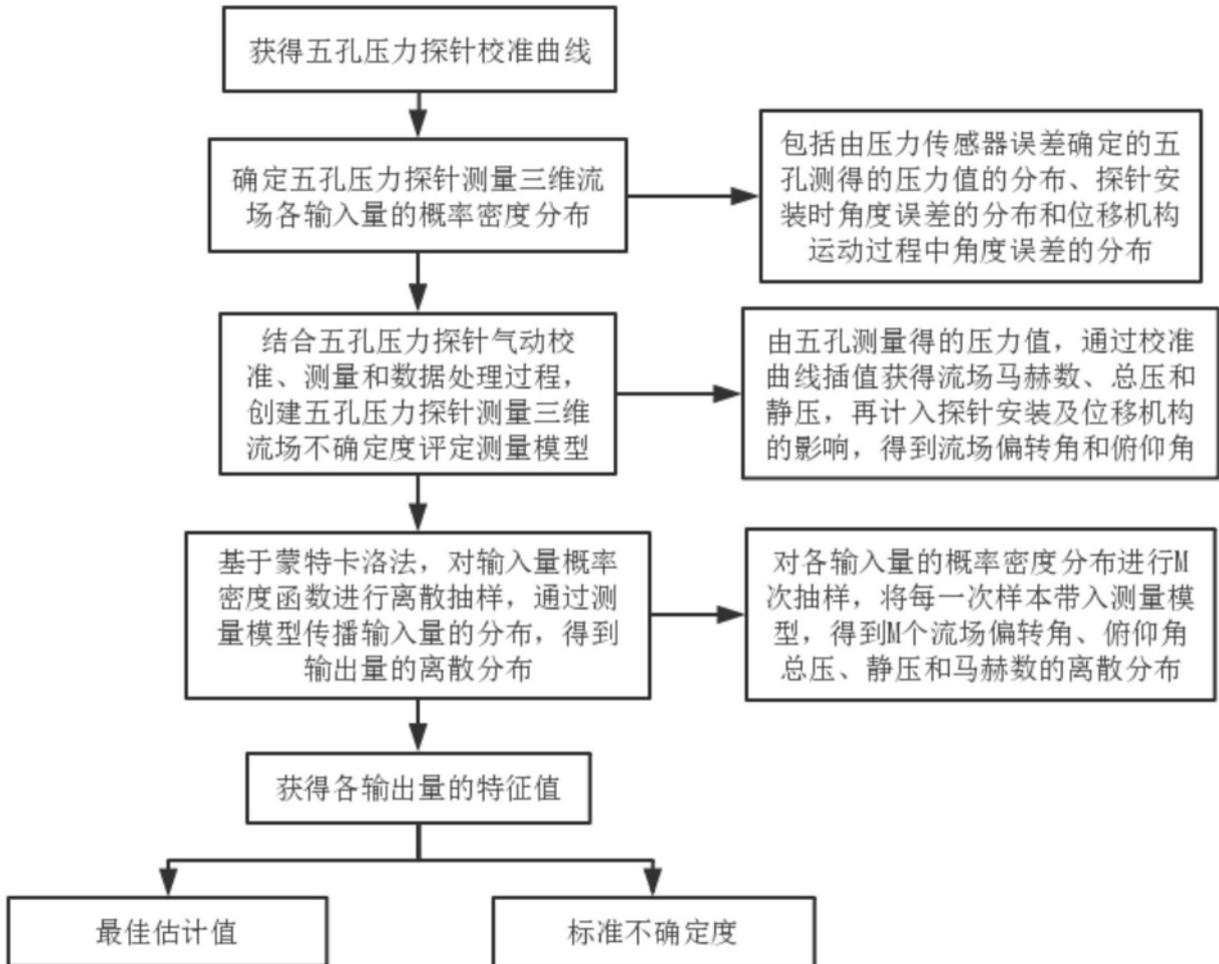


图2

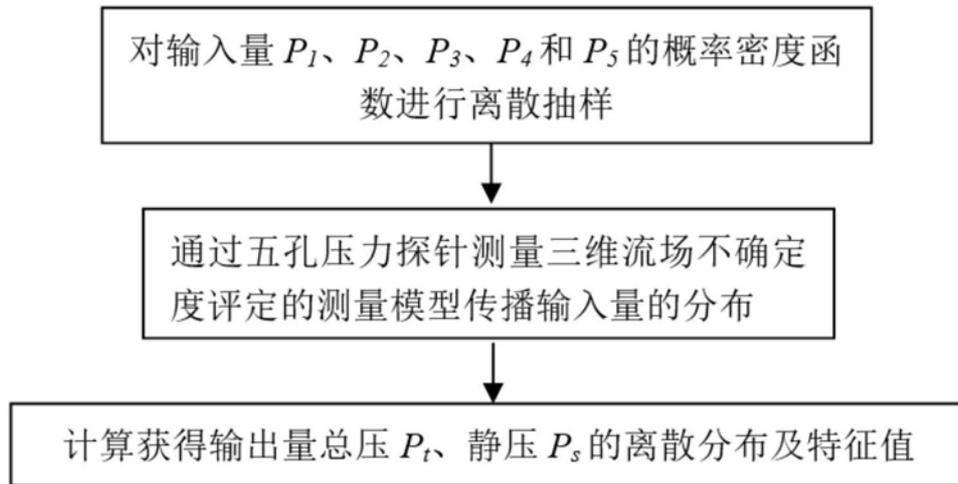


图3

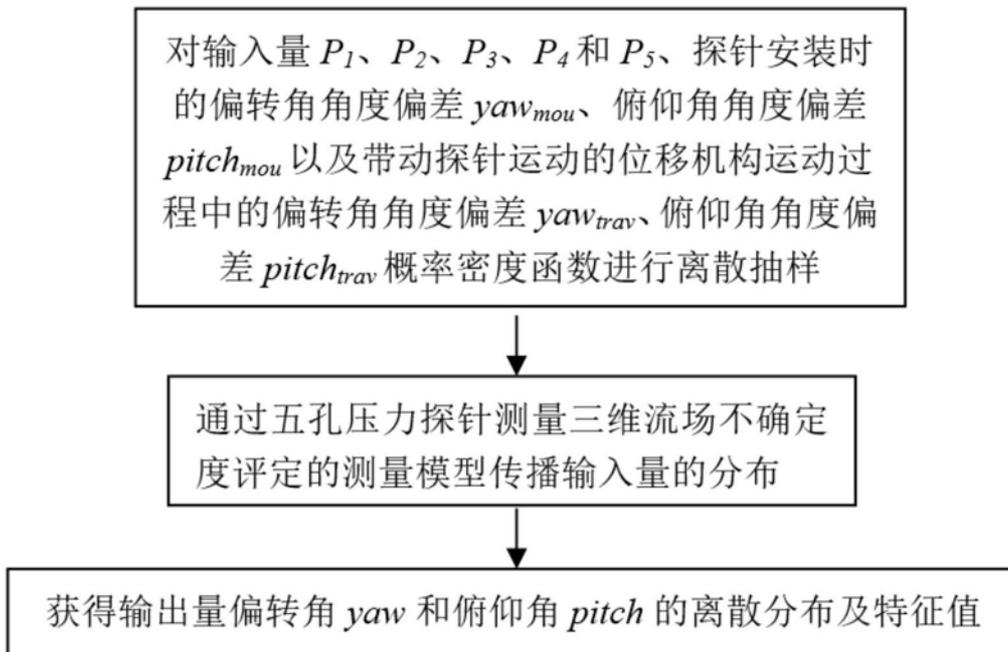


图4

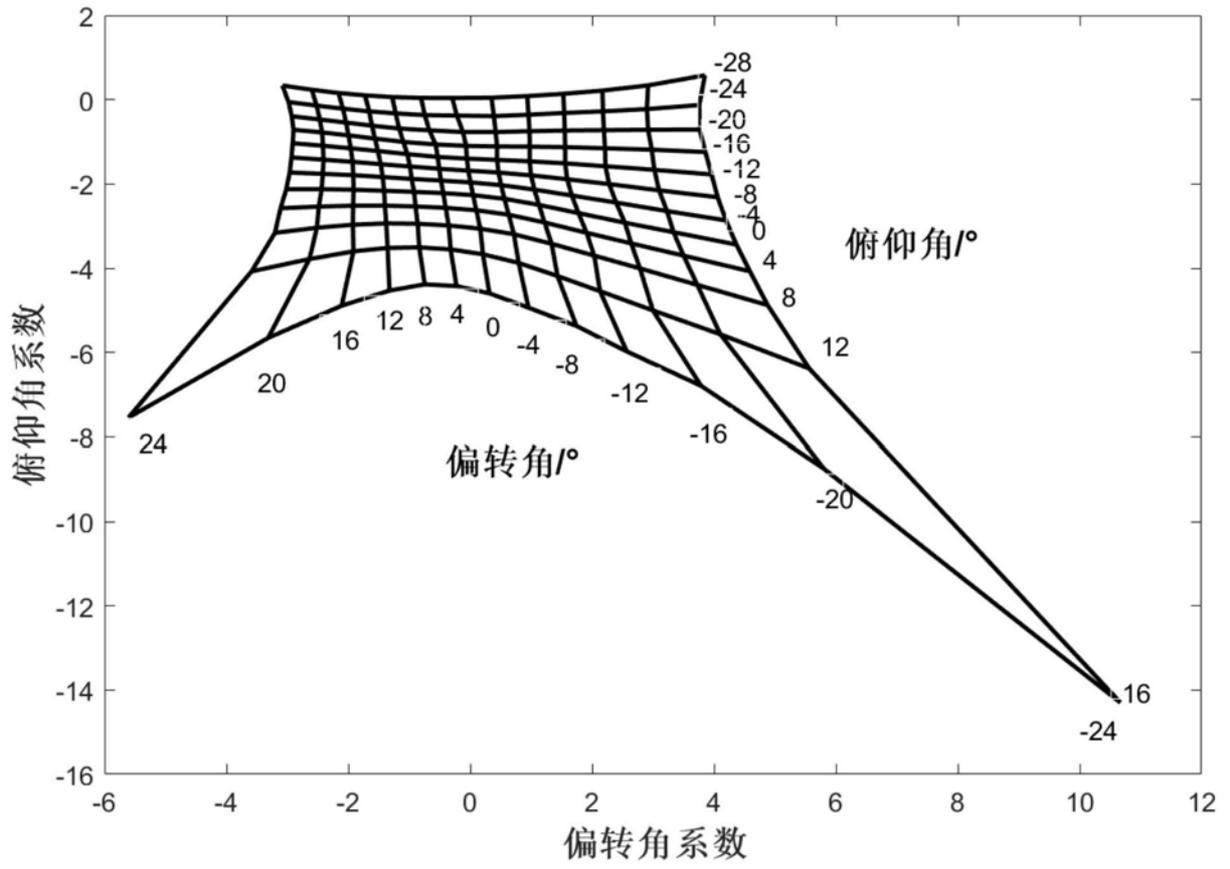


图5

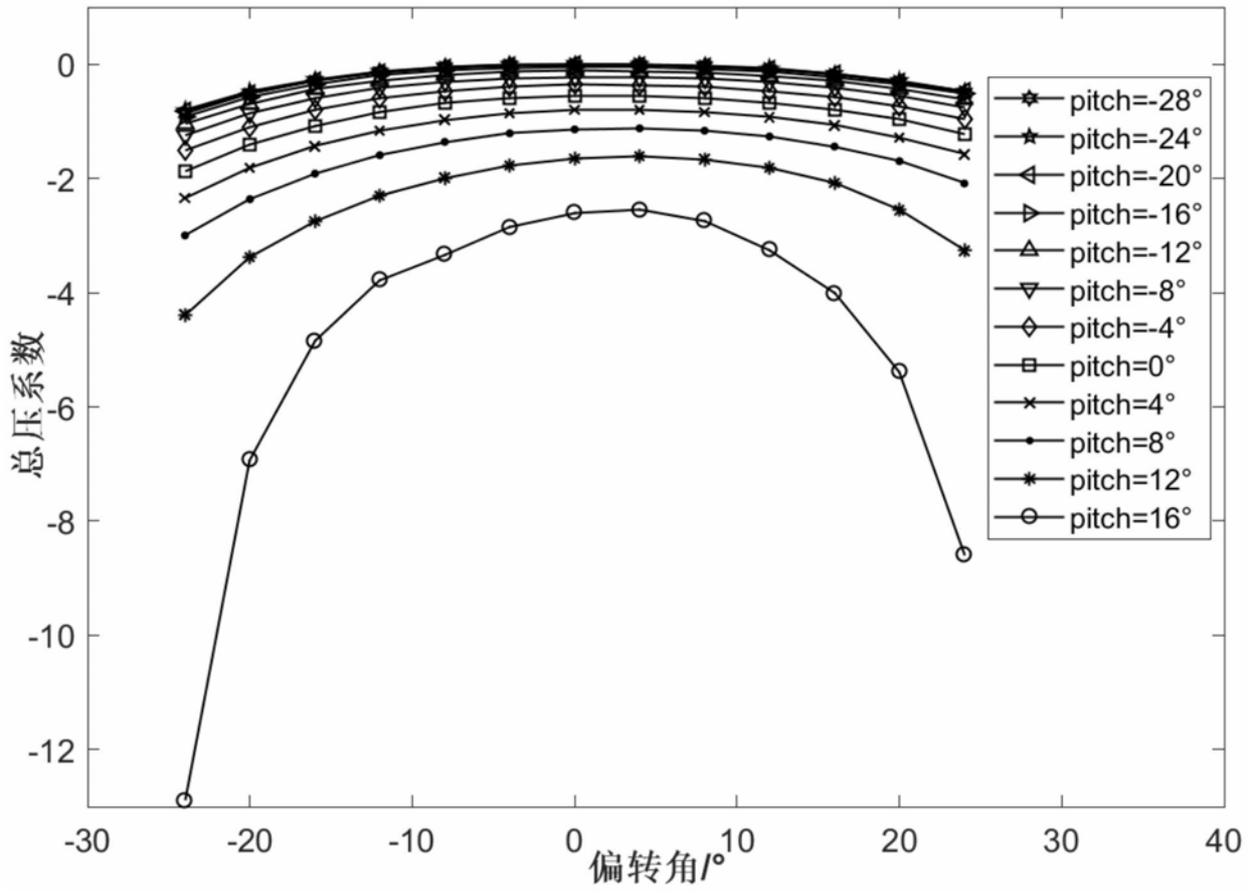


图6

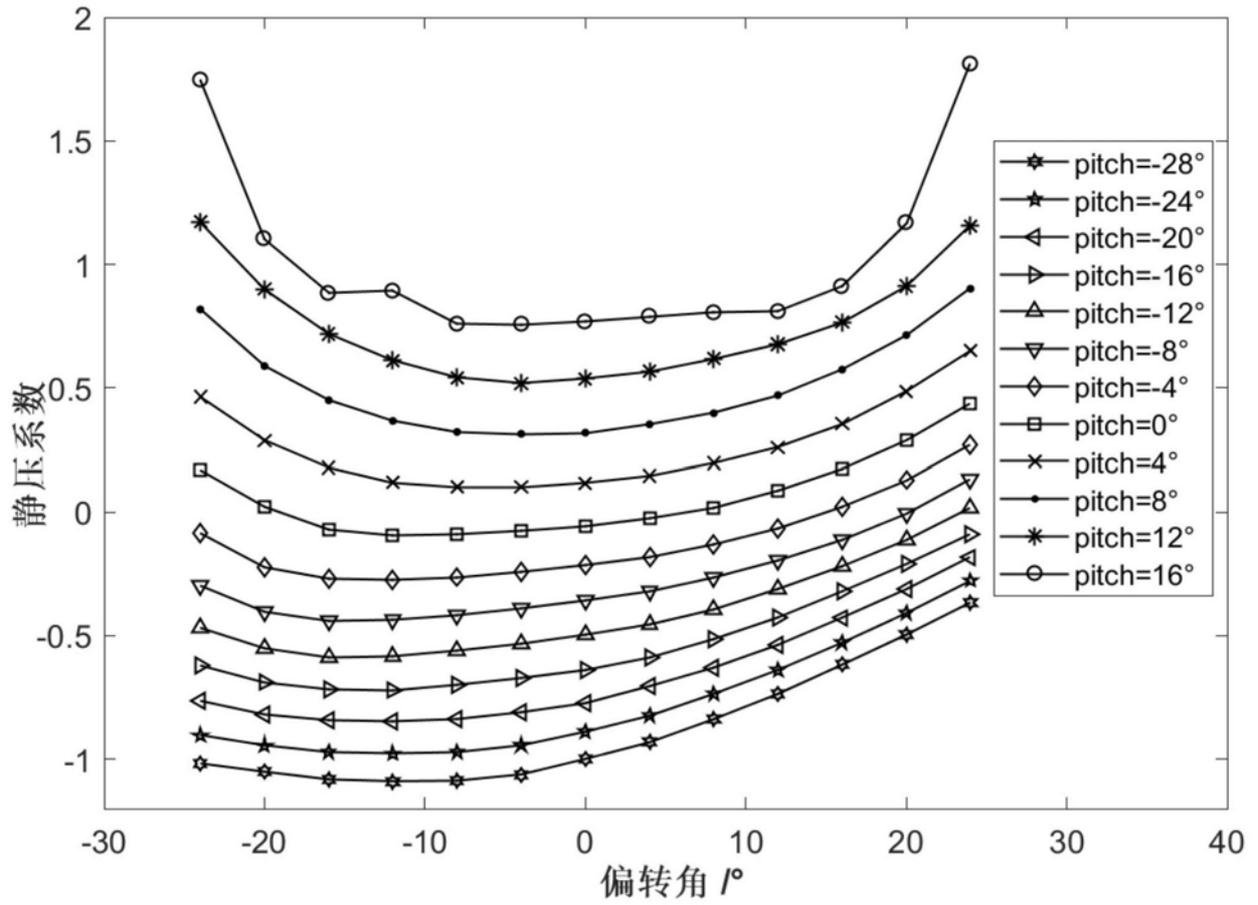


图7

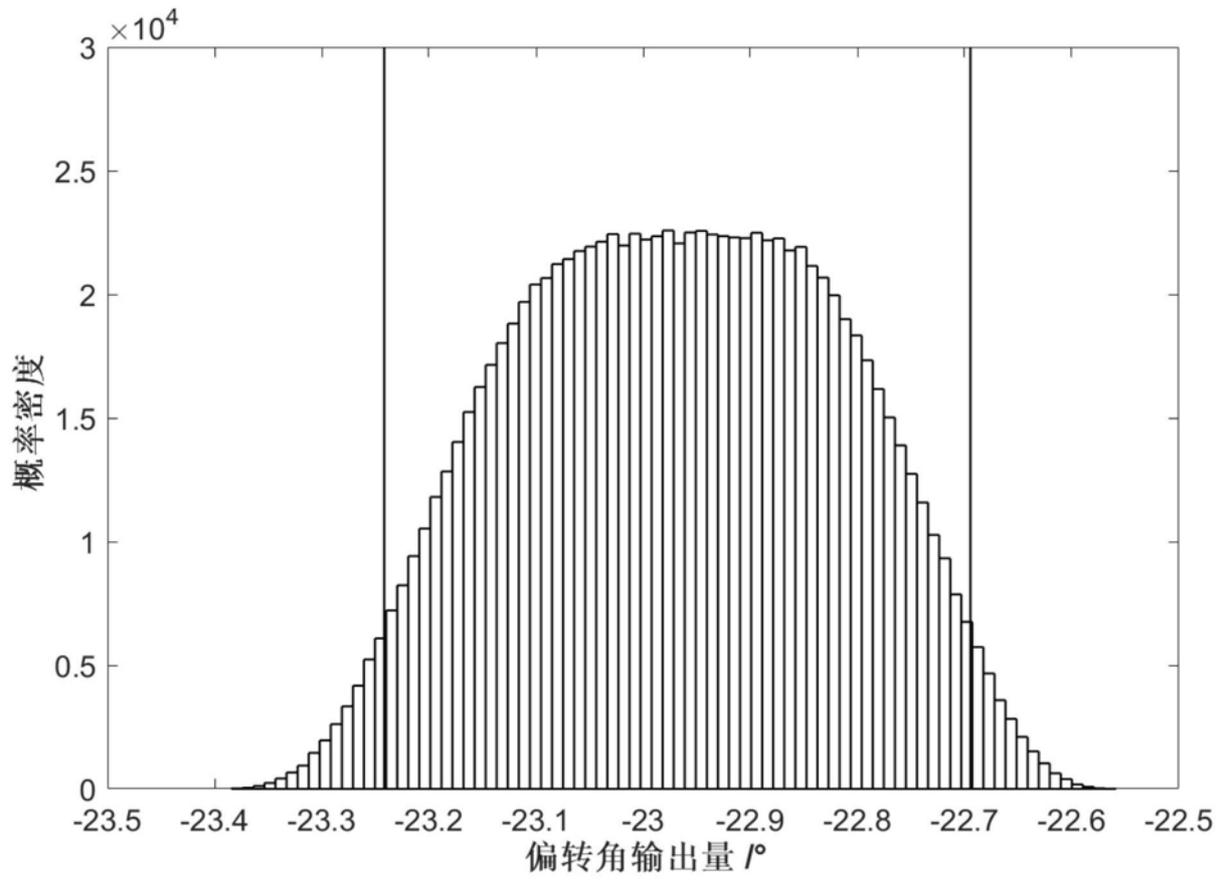


图8

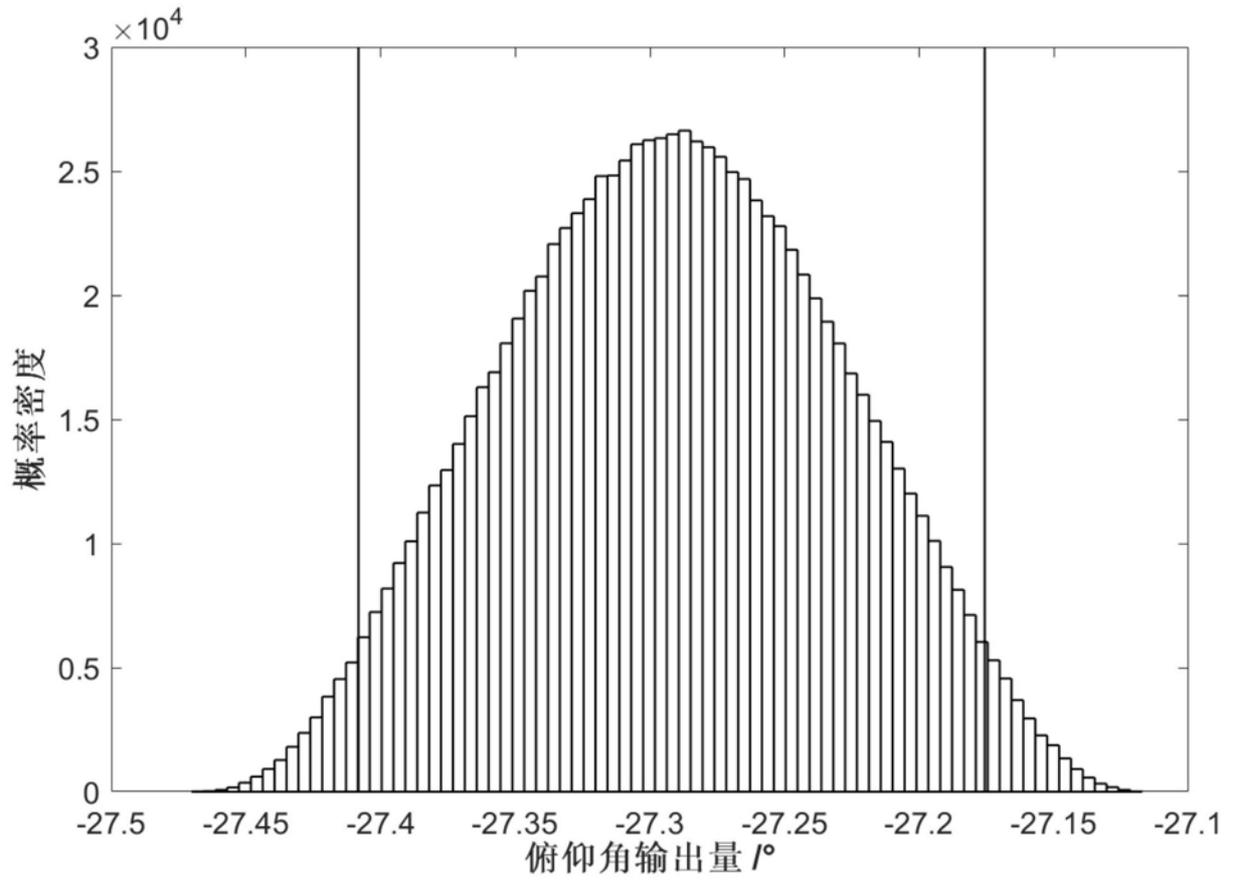


图9

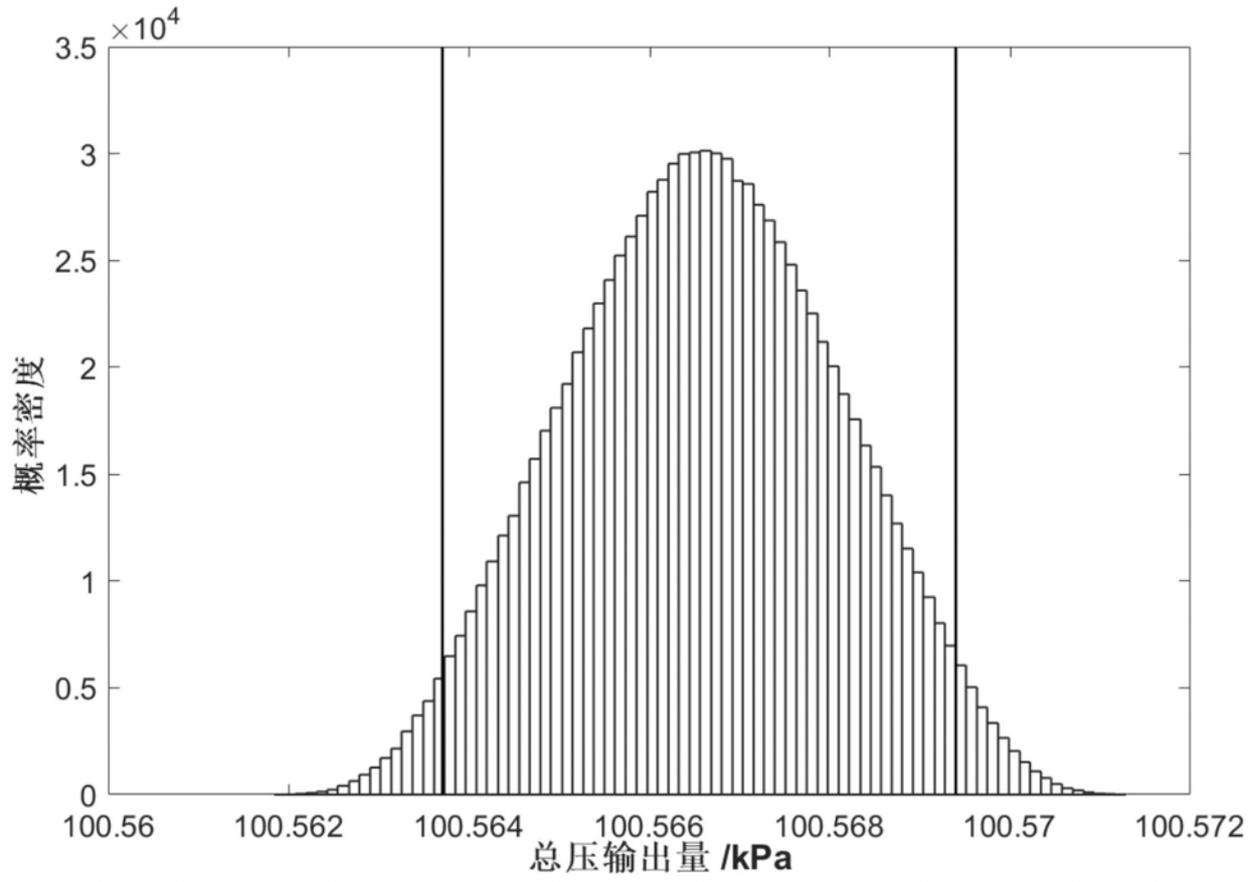


图10

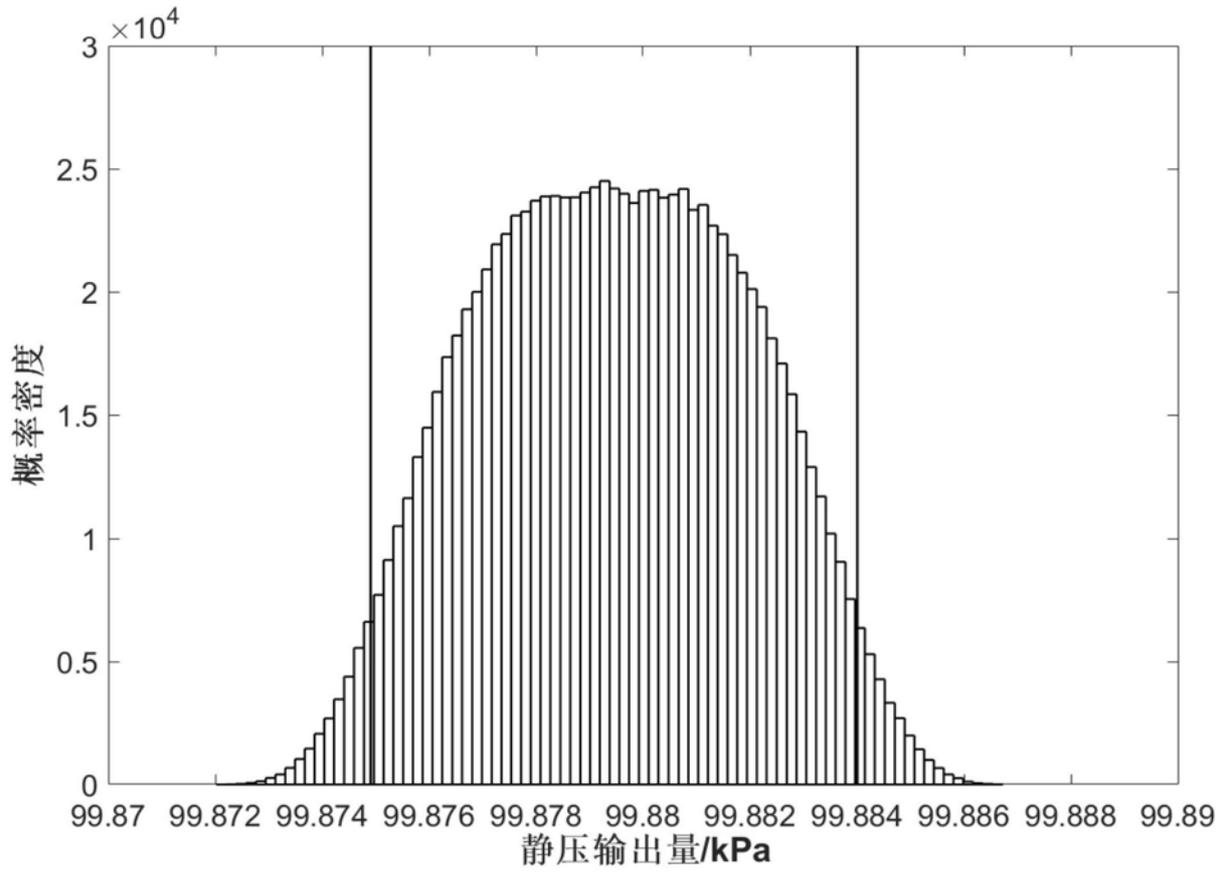


图11