



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104048808 A

(43) 申请公布日 2014. 09. 17

(21) 申请号 201310080865. 9

(22) 申请日 2013. 03. 14

(71) 申请人 中国科学院工程热物理研究所
地址 100190 北京市海淀区北四环西路 11 号

(72) 发明人 杨林 王偲臣 李继超 林峰

(74) 专利代理机构 中科专利商标代理有限责任
公司 11021

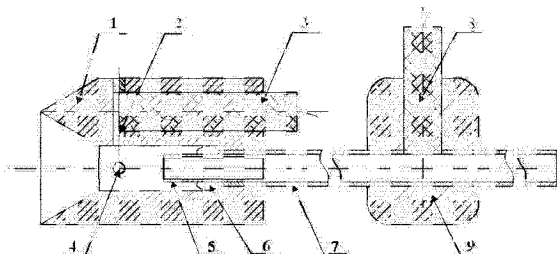
代理人 任岩

(51) Int. Cl.
G01M 9/06 (2006. 01)

权利要求书1页 说明书5页 附图1页

(54) 发明名称
一种动态熵探针

(57) 摘要
本发明公开了一种动态熵探针,包括基尔整流罩、静压孔、第一高频响压力传感器、热线孔、总压管、基尔整流罩孔、引压管、第二高频响压力传感器、压力传感器支架、热线、热线支架和半无限长柔性管。利用本发明提供的动态熵探针,能够对流动的总压、静温和速度进行动态测量,从而得到当地的熵。测量得到的熵是衡量内部流动损失最合理的物理量,因而本发明可以定量分析非定常流动甚至是叶轮机内部流动损失对效率影响的权重。



1. 一种动态熵探针,其特征在于,该动态熵探针包括基尔整流罩(1)、静压孔(2)、第一高频响压力传感器(3)、热线孔(4)、总压管(5)、基尔整流罩孔(6)、引压管(7)、第二高频响压力传感器(8)、压力传感器支架(9)、热线(10)、热线支架(11)和半无限长柔性管(12),其中:

基尔整流罩(1)的进流方向开口呈内切口,静压孔(2)开设于基尔整流罩(1)前端,静压孔(2)与第一高频响压力传感器(3)相连接,热线孔(4)开设于基尔整流罩(1)上与静压孔(2)同一轴向位置且垂直的周向位置处;

热线支架(11)位于基尔整流罩(1)两侧的槽内,热线(10)穿过热线孔(4)并焊接到两侧热线支架(11)上;

总压管(5)位于基尔整流罩(1)内后端且插入引压管(7)内部,引压管(7)从基尔整流罩(1)后端插入基尔整流罩(1)内;

引压管(7)的后部穿过压力传感器支架(9)上的通孔,压力传感器支架(9)上开设有压力孔,第二高频响压力传感器(8)插入该压力孔内与引压管(7)相连接,半无限长柔性管(12)与引压管(7)的尾部相连接。

2. 根据权利要求1所述的动态熵探针,其特征在于,该基尔整流罩(1)的进流方向开口呈内切口的角度为 30° 。

3. 根据权利要求1所述的动态熵探针,其特征在于,该静压孔(2)开设于基尔整流罩(1)前端距离前缘3.5mm处,直径 Φ 为0.5mm。

4. 根据权利要求1所述的动态熵探针,其特征在于,该第一高频响压力传感器(3)用于测量动态静压。

5. 根据权利要求1所述的动态熵探针,其特征在于,该热线孔(4)直径为0.5mm。

6. 根据权利要求1所述的动态熵探针,其特征在于,该热线(10)用于测量探针内部流道静温和Ma数的关系,其长度为4mm。

7. 根据权利要求1所述的动态熵探针,其特征在于,该总压管(5)用于收集总压,优其内径为1mm,外径为1.2mm,插入引压管(7)内部并用AB胶与引压管(7)相连接。

8. 根据权利要求1所述的动态熵探针,其特征在于,该引压管(7)的内径为1.2mm,外径为1.6mm。

9. 根据权利要求1所述的动态熵探针,其特征在于,该压力传感器支架(9)上的通孔的直径为1.6mm,压力孔的直径为1.7mm。

10. 根据权利要求1所述的动态熵探针,其特征在于,该第二高频响压力传感器(8)用于测量动态总压。

一种动态熵探针

技术领域

[0001] 本发明涉及非定常流场测量与叶轮机械测量技术领域,尤其是一种适用于三维非定常流场动态测量的动态熵探针。

背景技术

[0002] 熵是衡量流动不可逆或损失的一个最合理的量,因为它可直观分析各流动损失对效率影响的权重,且与参考系无关。虽然为了理解非定常损失产生的机理,研究上有了很大的进步,但是目前对动态熵的了解还是不全面的,其中的一个原因就是缺乏对动态熵准确的测量。

[0003] 在叶轮机械中的流动是十分复杂的,有关熵的测量比较少见,国际上只有少数的几个人进行了尝试并取得成功。Ng 和 Epstein 是第一个利用双热线吸气式探针来测量跨音压气机中的熵;Payne 也是利用吸气式探针测量了一个高压涡轮级的熵;Michel Mansour 利用一个 48kHz 带宽,1.8mm 直径的熵探针测量了叶轮机械中的流动损失。

[0004] 双热线吸气探针的原理是由 MIT 的 Ng 和 Epstein 两人于 1983 年最初发明的,可同时测量气流总温和总压的波动。探针是基于两根共面的定常温度热线和特殊的吸气式结构,探针内有堵塞的出口,以使热线所在平面的气流始终达到定常的马赫数,从而使热线的输出是当地的总温和总压的函数。

[0005] 传统的热线测量是依靠热能向流体的对流换热,因而对于一个定常温度热线在均匀成分中,其所在电桥输出电压的平方和能量耗散存在正比例关系为:

$$[0006] \quad V^2 = f(\rho U) (T_w - rT_0) \quad (1)$$

[0007] T_w 为线的温度, T_0 为流体的总温, r 为恢复系数, ρU 为线所在平面的质量流量。根据探针所特有的吸气式结构和相关的气动公式推导,气体的密流 (ρU) 是总温总压的函数。最后可以得出双热线吸气式探针的基本方程:

$$[0008] \quad V^2 = \left[C_i \left(\frac{P_0}{\sqrt{T_0}} \right)^{n_i} + D_i \right] (T_w - rT_0) \quad (2)$$

[0009] 其中, C 和 D 是校准系数。公式 (2) 提供热线的输出电压是当地总温和总压的函数,如果双线在不同的电路中工作在不同的 T_w 下,同时测得的两个电压值就可以推得总压 P_0 和总温 T_0 。在 1985 年,两人将新设计的探针用来测量跨音压气机的总温总压分布,成功的测量了转子后的熵。

[0010] 2002 年剑桥大学的 S. J. Payne 等学者,利用吸气式探针测量了一个高压比涡轮级模型叶片后的非定常的熵增,首次定量测量了级效率的不同损失机制。2007 年,Payne 讨论了吸气式探针高频的效果,有三个主要的效果:热线的频率响应、探针流道内马赫数的波动和热线在高频时热转换的变化。

[0011] 2007 年来自瑞士联邦理工学院的 Michel Mansour 成功研制出了一个 48kHz 外径 1.8mm 的快速响应熵探针,为了更加清楚地了解涡轮机械中熵的损失。其中的总温测量采

用薄膜技术。两个 200nm 厚的镍以蛇形喷涂圆柱形石英基板上,薄膜工作于不同的温度,通过建立热传导和对流换热方程即可得出所测的总温值。这样结构坚固稳定,具有较高的空间分辨率和温度敏感性。总压是利用一个内置的压力传感器芯片,总压孔位于薄膜上方 2.25mm 的探针顶部,该芯片位于惠斯顿电桥中,采用定常激励电流的模式,根据输出电压的变化得出总压。该探针经过校准后,分别应用于脉冲射流、离心压气机和轴流压气机,都取得了比较满意的结果。

[0012] 吸气式探针,尽管可以同时测量当地总温总压的波动。但存在较多缺陷。首先探针的角度敏感性有限,最大只能达到 $\pm 12^\circ$,不能应用于大角度的流场。探针的频响有限,无法捕获高频的信号。另外,热线易受污染,由于线的直径较小,极容易发生断裂。气动薄膜熵探针,压力传感器芯片和薄膜流量计容易受损,对于气流的敏感性较大,而且探针的制作成本高。

[0013] 鉴于以上的研究,认为只有热线(热膜)技术,能实现高频响的温度测量,因此本发明提出了以静压、总压和热线的结构来测量动态熵的原理与设计,具有结构稳定、气流敏感性小和成本低等优点,能够适用于叶轮机械内部流动方向和速度大小剧烈变化以及通道狭小等特征。

发明内容

[0014] (一) 要解决的技术问题

[0015] 有鉴于此,本发明的主要目的是提供一种动态熵探针,该探针可以测量流场中的动态总温和总压的值,从而算出熵值。因为熵值与损失是相关联的,其可定量分析非定常流动甚至是叶轮机械的损失对效率影响的权重。

[0016] (二) 技术方案

[0017] 为达到上述目的,本发明提供了一种动态熵探针,该动态熵探针包括基尔整流罩 1、静压孔 2、第一高频响压力传感器 3、热线孔 4、总压管 5、基尔整流罩孔 6、引压管 7、第二高频响压力传感器 8、压力传感器支架 9、热线 10、热线支架 11 和半无限长柔性管 12,其中:

[0018] 基尔整流罩 1 的进流方向开口呈内切口,静压孔 2 开设于基尔整流罩 1 前端,静压孔 2 与第一高频响压力传感器 3 相连接,热线孔 4 开设于基尔整流罩 1 上与静压孔 2 同一轴向位置且垂直的周向位置处;

[0019] 热线支架 11 位于基尔整流罩 1 两侧的槽内,热线 10 穿过热线孔 4 并焊接到两侧的热线支架 11 上;

[0020] 总压管 5 位于基尔整流罩 1 内后端且插入引压管 7 内部,引压管 7 从基尔整流罩 1 后端插入基尔整流罩 1 内;

[0021] 引压管 7 的后部穿过压力传感器支架 9 上的通孔,压力传感器支架 9 上开设有压力孔,第二高频响压力传感器 8 插入该压力孔内与引压管 7 相连接,半无限长柔性管 12 与引压管 7 的尾部相连接。

[0022] 上述方案中,该基尔整流罩 1 的进流方向开口呈内切口的角度为 30° 。

[0023] 上述方案中,该静压孔 2 开设于基尔整流罩 1 前端距离前缘 3.5mm 处,直径 Φ 为 0.5mm。

[0024] 上述方案中,该第一高频响压力传感器 3 用于测量动态静压。

- [0025] 上述方案中,该热线孔 4 直径为 0.5mm。
- [0026] 上述方案中,该热线 10 用于测量探针内部流道静温和 Ma 数的关系,其长度为 4mm。
- [0027] 上述方案中,该总压管 5 用于收集总压,优其内径为 1mm,外径为 1.2mm,插入引压管 7 内部并用 AB 胶与引压管 7 相连接。
- [0028] 上述方案中,该引压管 7 的内径为 1.2mm,外径为 1.6mm。
- [0029] 上述方案中,该压力传感器支架 9 上的通孔的直径为 1.6mm,压力孔的直径为 1.7mm。
- [0030] 上述方案中,该第二高频响压力传感器 8 用于测量动态总压。
- [0031] (三) 有益效果
- [0032] 本发明的动态熵探针,优点在于:
- [0033] 1、热线往往容易断裂,相比于双热线吸气式探针的双热线结构,由于本发明提供的动态熵探针采用单一的热线结构上更加稳定,而且在以上熵探针的原理介绍中并未出现涉及气体成分的参数,因而适用于任意成分的气体。
- [0034] 2、本发明提供的动态熵探针,原理上利用热线技术和动态总压探针技术,热线已经广泛应用于非定常流场的测量,两者技术上比较成熟,大大降低了熵探针加工的难度和成本,更加方便地实现高频响的目标。
- [0035] 3、本发明提供的动态熵探针,整体结构尺寸较小,最大直径为 6mm,基尔整流罩的内切口结构使探针对气流角度敏感性小,能够给实现微小流动结构或大流动角度的测量,达到了较高的空间分辨率。

附图说明

- [0036] 图 1 为依照本发明实施例的动态熵探针静压孔截面的剖视图;
- [0037] 图 2 为依照本发明实施例的动态熵探针热线截面的剖视图;
- [0038] 图 3 为依照本发明实施例的基尔整流罩的剖视图。

具体实施方式

[0039] 为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚明白,以下结合具体实施例,并参照附图,对本发明进一步详细说明。

[0040] 熵探针的原理与设计主要包括:目前申请人所在研究团队研制的动态总压探针技术,静压孔及两个高频响 Kulite 压力传感器和热线风速仪技术,同时测量流场中的动态总压、探针内部流道的静压和 Ma 数,计算得出总温,并最终得出熵。

[0041] 探针工作原理是:

[0042] 基尔整流罩进口内倒角,其中后部壁面上开四个轴对称的孔。基尔整流罩是探针头部的主体结构,目的在于减小气流角度的不敏感性,实现大角度变化流场的测量。

[0043] 总压收集管、刚性引压管、动态压力传感器支架、半无限长柔性管和其中一个高频响 Kulite 压力传感器用于测量流场中的动态总压。

[0044] 热线位于探针内部流道的滞止点前方,基尔整流罩内倒角的后方,热线工作于定常温度的模式下,其输出电压 V 是流场温度 T 和 Ma 数的函数:

[0045] $V = f(T, Ma)$ (3)

[0046] 通过探针头部的静压孔和与之相连的高频响 Kulite 压力传感器测量探针内部流道热线所在同一轴向位置处的壁面动态静压,边界层处压力沿壁面法向的梯度为零,也即探针内部流动的静压。

[0047] 通过总压 P_0 , 静压 P 和 Ma 数的关系:

$$[0048] \quad \frac{P_0}{P} = \left(1 + \frac{k-1}{2} Ma^2 \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (4)$$

[0049] 求出探针内部流道热线处的 Ma 数,其中 k 为气体的绝热指数,利用热线风速仪的输出电压和关系式求出探针内部流动的静温。

[0050] 依据总温 T_0 , 静温 T 和 Ma 数的关系:

$$[0051] \quad \frac{T_0}{T} = 1 + \frac{k-1}{2} Ma^2 \quad (5)$$

[0052] 求出探针内部流道的动态总温,忽略探针内部流道流动损失和热线对流换热的影响,也即流场中的总温。

[0053] 最后依据总温总压和熵的关系:

$$[0054] \quad s - s_{ref} = c_p \ln \left(\frac{T_0}{T_{0,ref}} \right) - R \ln \left(\frac{P_0}{P_{0,ref}} \right) \quad (6)$$

[0055] 得出当地的熵值。其中 s 为待求的熵值, c_p 为定压比热容, R 为气体常数,下标 $_{ref}$ 为参考值。

[0056] 探针的设计一般来讲要包括两个方面,首先是机械机构的设计,确定各部件的详细尺寸及连接方式,满足强度与工艺加工的要求。由于热线的存在,其支架应考虑良好的导电性和较差的导热性,基尔整流罩的材料应绝缘。另外还有气动设计,对于探针内部流动而言,要求流动顺畅无堵塞,总压管位于滞止区,而热线和静压孔则不能位于涡区和滞止区,而且尽量保证两者位于同一个轴向位置。探针头部呈现喇叭状的基尔结构,以减小气流角度的敏感性。对于探针外形,以减小外部流动阻塞为目的,通常设计成圆管状。整体的结构尺寸在满足以上条件的基础上,实现最小化。

[0057] 如图 1 和图 2 所示,本发明提供的动态熵探针包括基尔整流罩 1、静压孔 2、第一高频响压力传感器 3、热线孔 4、总压管 5、基尔整流罩孔 6、引压管 7、第二高频响压力传感器 8、压力传感器支架 9、热线 10、热线支架 11 和半无限长柔性管 12。

[0058] 图 3 所示为基尔整流罩,其是探针最主要的部分,进流方向开口呈内切口,优选地内切口角度为 30° ,是为了减小气流敏感性。在其前端距离前缘 3.5mm 处,开有一个 $\Phi 0.5\text{mm}$ 的静压孔 2,静压孔与第一高频响压力传感器 3 相连接,用于测量动态静压。在同样的轴向位置且与静压孔 2 垂直的周向位置处开有热线孔 4,优选地直径为 $\Phi 0.5\text{mm}$,热线支架 11 位于基尔整流罩 1 两侧的槽内,热线 10 穿过热线孔 4 并焊接到两侧热线支架 11 上,优选地热线的有效长度为 4mm,用于测量场中静温和 Ma 数的关系。总压管 5 位于基尔整流罩 1 内后端,收集总压,优选地总压管 5 的内径为 1mm,外径为 1.2mm,其插入引压管 7 内部并用 AB 胶相连。引压管 7 从后端插入基尔整流罩 1 内,也用 AB 胶粘连,优选地引压管 7 内径为 1.2mm,外径为 1.6mm,引压管 7 的后部穿过有机玻璃材料的压力传感器支架 9 $\Phi 1.6\text{mm}$ 的通孔。压力传感器支架 9 的上方钻有 $\Phi 1.7\text{mm}$ 的压力孔,并将第二高频响压力传感器 8

插入孔内与引压管 7 相连,测量动态总压。半无限长柔性管 12 与引压管 7 的尾部相连接。

[0059] 本发明提供的动态熵探针,对流动的总压、静温和 Ma 数进行动态测量,从而得到当地的熵。涉及目前比较成熟的热线风速仪技术和申请人所在团队研制的动态总压探针测量技术,其可实现高频响的测量目标。测量得到的熵是衡量内部流动损失最合理的量,因为它可直观分析各流动损失对效率影响的权重。因而本发明可以测量非定常流场甚至是叶轮机械中流动的损失和效率。

[0060] 熵探针涉及动态总压探针的测量技术,采用基尔整流罩、总压管、引压管、压力传感器支架、柔性管和高频响的 Kulite 压力传感器的结构,通过动态标定得到动态总压探针的频响特性和传递函数,再对实测输出信号进行逆向修正,得到真实动态压力信号,因而能够实现流场动态总压的测量。进一步通过测量总压计算得到的总压损失系数用来衡量流动的损失。

[0061] 该探针包括热线、总压测量和静压测量,对于定常温度的热线,其输出电压是 Ma 数和静温的函数,由总压和静压算出流动 Ma 数,即可求出静温,因而可同时测量流动 Ma 数和静温。

[0062] 该探针同时测量流动静温和 Ma 数,根据总温和 Ma 数、静温的关系,可进一步算出流场动态总温分布,有利于从能量分布的角度分析叶轮机械甚至非定常流动特性。熵不能直接进行测量,而是通过上面测量的动态总压和计算的总温,间接计算得出。

[0063] 探针的制造,材料应兼顾加工性、强度和耐温性等三个主要因素。探针的整体结构较小,需要相关的精密微加工工艺。至于热线则可采用目前主流的设计,材料选用镀铂钨丝。

[0064] 探针的校准,每个探针都是需要进行相应的校准程序后才能投入使用。对于动态总压测量,通过稳态与动态标定得到其频响特性和传递函数,再对实测输出信号进行逆向修正,得到真实动态压力信号。对于热线确定输出电压和流场温度 T、Ma 数的函数。校准试验台,要实现温度和速度的同时控制,角度的调节和相关的参考值。总温采用热电偶测量,总压采用总压管和压力传感器测量。在同一个温度、同一角度的条件下,对不同流速进行测量标定。选取不同的温度、不同的角度重复进行测量校准,得到校准云图。同时校准也是对探针原理的进一步验证。

[0065] 探针的应用,将两个总压和静压测量用的压力传感器接入放大器和采集电路,热线和控制器相连,选取恰当的过热比。并将探针安装在旋转坐标架上,伸入被测流场中进行测量和采集数据。

[0066] 以上所述的具体实施例,对本发明的目的、技术方案和有益效果进行了进一步详细说明,所应理解的是,以上所述仅为本发明的具体实施例而已,并不用于限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内,所做的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

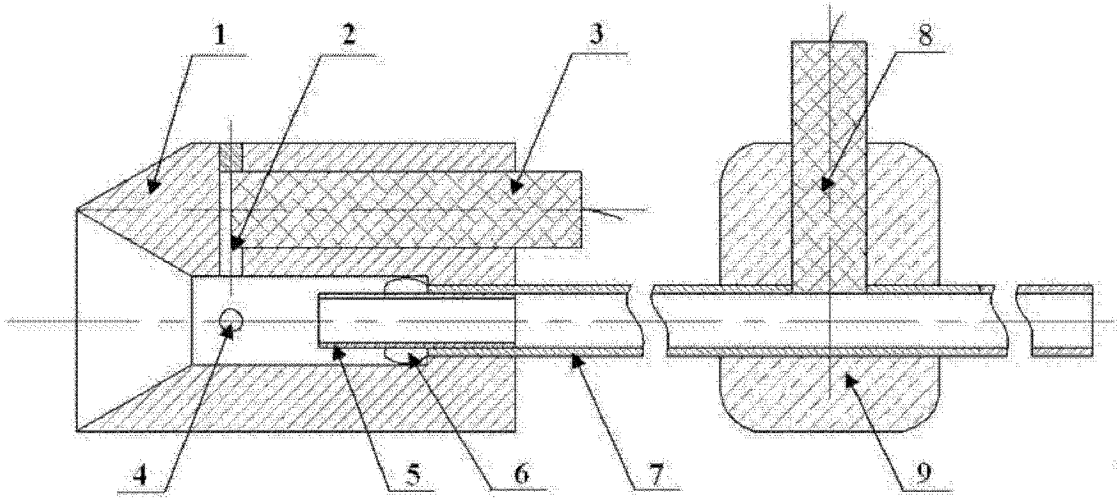


图 1

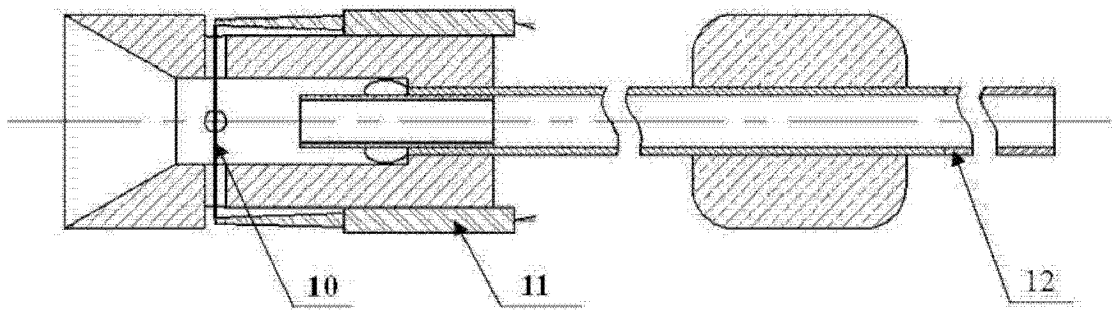


图 2

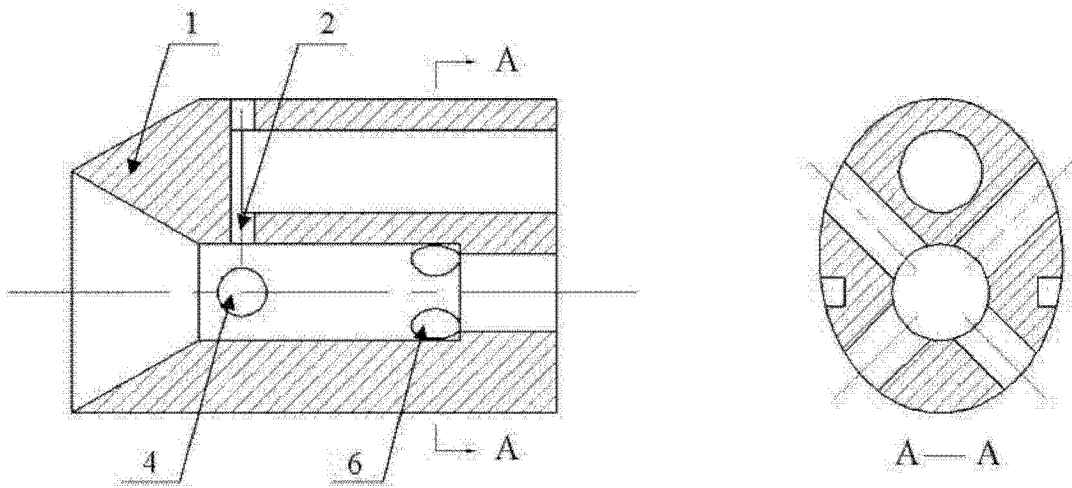


图 3