



# (12)发明专利

(10)授权公告号 CN 107061321 B

(45)授权公告日 2018.12.11

(21)申请号 201710154444.4

F04D 29/44(2006.01)

(22)申请日 2017.03.15

F04D 29/66(2006.01)

(65)同一申请的已公布的文献号

审查员 胡志鹏

申请公布号 CN 107061321 A

(43)申请公布日 2017.08.18

(73)专利权人 清华大学

地址 100084 北京市海淀区清华园1号

专利权人 株式会社IHI

(72)发明人 郑新前 孙振中 张美杰

川久保知己 玉木秀明

(74)专利代理机构 北京清亦华知识产权代理事

务所(普通合伙) 11201

代理人 罗文群

(51)Int.Cl.

F04D 25/08(2006.01)

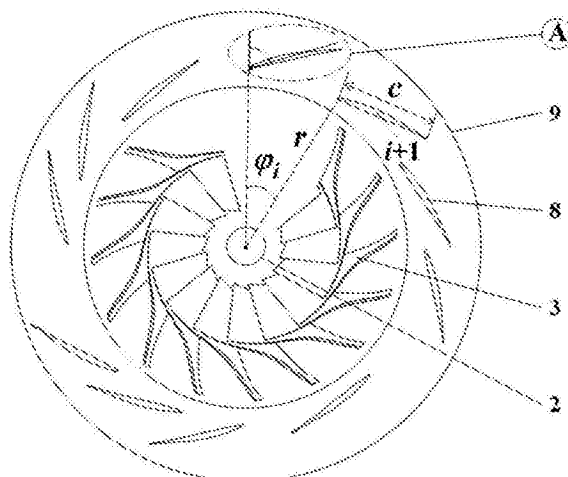
权利要求书1页 说明书5页 附图4页

## (54)发明名称

采用安装角和稠度耦合可变的非对称有叶扩压器的压气机

## (57)摘要

本发明涉及一种采用安装角和稠度耦合可变的非对称有叶扩压器的压气机,属于叶轮机械技术领域。本发明的离心压气机包括蜗壳,离心叶轮和有叶扩压器。本发明中的有叶扩压器进口前缘位置以及叶片形状在周向上是无差别的,而扩压器叶片安装角和稠度在周向上均是非对称分布的,不同周向位置的扩压器叶片安装角和稠度不相等。本发明可以有效适应有叶扩压器下游周向压力畸变,避免局部流动气流攻角过大而造成局部大尺度流动分离,降低有叶扩压器内部流场的非均匀性,有效改善离心压气机流动稳定性,拓宽离心压气机稳定工作范围。



1. 一种采用安装角和稠度周向可变的非对称有叶扩压器的压气机,包括机壳、离心叶轮、背盘和扩压器;所述的机壳与背盘相对固定,机壳两侧形成蜗壳流道,所述的离心叶轮和扩压器同轴安装,离心叶轮由离心压气机旋转轴驱动,扩压器由多个扩压器叶片组成,多个扩压器叶片沿圆周固定在机壳或背盘上,相邻两个扩压器叶片之间形成流道,其特征在于扩压器叶片沿圆周安装的安装角 $\beta_i$ 和稠度 $S_i$ 分别为:

$$\beta_i = \beta_{\text{design}} + k_\alpha \cdot (\alpha_i - \alpha_{\text{ave}}) + \delta_i$$

$$S_i = \frac{c}{r \cdot \varphi_i}$$

其中, $i$ 为扩压器叶片序号, $\beta_{\text{design}}$ 为根据离心压气机的设计流量确定的扩压器叶片的理论安装角, $k_\alpha$ 为第一修正参数,取值范围为 $0 < k_\alpha \leq 5$ , $\alpha_i$ 为第 $i$ 个扩压器叶片前缘处的气流角, $\alpha_{\text{ave}}$ 为所有扩压器叶片前缘处气流角的平均值, $\alpha_{\text{ave}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \alpha_i$ , $N$ 为扩压器的叶片数, $\delta_i$ 是

第二修正参数,取值范围为 $-\beta_{\text{design}} < \delta_i \leq 90^\circ - \beta_{\text{design}}$ , $c$ 为扩压器叶片的弦长, $r$ 为扩压器叶片前缘与离心压气机旋转轴中心之间的距离,即扩压器叶片前缘的半径, $\varphi_i$ 为第 $i$ 个叶片的前缘与第 $i+1$ 个叶片的前缘所形成的圆心角, $\varphi_i = \varphi_{\text{ave}} \cdot (1 - k_p \cdot \frac{\Delta sp_i}{sp_{\text{ave}}} - k_\beta \cdot \frac{\Delta \beta_i}{\beta_{\text{ave}}}) + \varepsilon_i$ , $\varphi_{\text{ave}}$ 为扩压器叶片圆心角的平均值,

$\varphi_{\text{ave}} = \frac{360^\circ}{N}$ , $N$ 为扩压器的叶片数, $k_p$ 为第三修正参数, $k_p$ 的取值范围为 $1 \leq k_p \leq 50$ , $sp_i$ 为第 $i$ 个叶片尾缘下游处的静压, $\Delta sp_i$ 为第 $i+1$ 个叶片尾缘下游与第 $i$ 个叶片尾缘下游之间的静压差,

$$\Delta sp_i = \begin{cases} sp_{i+1} - sp_i & i = 1, 2, \dots, N-1 \\ sp_i - sp_1 & i = N \end{cases}, sp_{\text{ave}} \text{为} N \text{个叶片尾缘下游静压的平均值,}$$

$sp_{\text{ave}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N sp_i$ , $k_\beta$ 为第四修正参数, $k_\beta$ 取值范围为 $1 \leq k_\beta \leq 50$ , $\Delta \beta_i$ 为第 $i+1$ 个

扩压器叶片安装角与第 $i$ 个扩压器叶片安装角之差, $\Delta \beta_i = \begin{cases} \beta_{i+1} - \beta_i & i = 1, 2, \dots, N-1 \\ \beta_i - \beta_1 & i = N \end{cases}$ , $\beta_i$ 为第

$i$ 个扩压器叶片安装角, $\beta_{\text{ave}}$ 为 $N$ 个叶片安装角的平均值, $\beta_{\text{ave}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \beta_i$ , $\varepsilon_i$ 为第五修正参数,

$\varepsilon_i$ 的取值范围为 $-0.5 \cdot \varphi_{\text{ave}} < \varepsilon_i \leq +0.5 \cdot \varphi_{\text{ave}}$ ,且满足 $\sum_{i=1}^N \varepsilon_i = 0$ 。

## 采用安装角和稠度耦合可变的非对称有叶扩压器的压气机

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种采用安装角和稠度耦合可变的非对称有叶扩压器的压气机,属于叶轮机技术领域。

### 背景技术

[0002] 本发明所涉及的采用安装角和稠度耦合可变的非对称有叶扩压器的压气机,涉及车用、船用、航空用等各种用途增压器的离心压气机,以及航空、工业、发电等各种用途涡轴、涡桨发动机的离心压气机。

[0003] 相比于已有的往复式活塞压气机,离心压气机等叶轮式压气机具有效率高、体积重量轻、运转平稳等优势。然而,离心压气机运行工况范围有限。在低流量工况下,由于扩压器进口气流攻角增大,导致大尺度流动分离等现象,离心压气机内部出现不稳定流动,造成失速甚至喘振的发生,将直接导致压气机压比和效率下降,缩短压气机寿命甚至在短时间内损坏压气机。

[0004] 有叶扩压器是离心压气机在高压比需求下提高压气机效率的有效措施,其流道两侧采用固定背盘和机壳,中间是具有特定翼型的叶片。传统有叶扩压器的稠度和安装角通过设计点工况确定,在基于周向来流均匀的假设下保证设计点获得最优性能,能够有效的将叶轮出口气流的动能转化为静压。传统的有叶扩压器是轴对称的,其叶片安装角以及稠度在周向方向上都是均匀分布的。而由于蜗壳等部件的存在,离心压气机内部流场往往是周向非均匀的,当压气机工作在小流量的时候,不均匀的流场导致有叶扩压器某些局部气流攻角过大,出现大尺度流动分离现象,造成流动损失,降低扩压器效率,产生局部流动不稳定;当流量进一步减小时,流动不稳定进一步恶化,导致更大尺度的流动分离甚至是气体回流,诱导压气机出现喘振现象。

### 发明内容

[0005] 本发明目的是提出一种采用安装角和稠度耦合可变的非对称有叶扩压器的压气机,对已有的离心压气机的结构作出改进,在保证采用有叶扩压器的离心压气机高压比高效率优点的同时,拓宽离心压气机的稳定工作范围,以有效降低离心压气机内部流场的非均匀性,抑制有叶扩压器内部流动分离,改善离心压气机气动稳定性。

[0006] 本发明提出的采用安装角和稠度耦合可变的非对称有叶扩压器的压气机,包括机壳、离心叶轮、背盘和扩压器;所述的机壳与背盘相对固定,机壳两侧形成蜗壳流道,所述的离心叶轮和扩压器同轴安装,离心叶轮由离心压气机旋转轴驱动,扩压器由多个扩压器叶片组成,多个扩压器叶片沿圆周固定在机壳或背盘上,相邻两个扩压器叶片之间形成流道,扩压器叶片沿圆周安装的安装角 $\beta_i$ 和稠度 $S_i$ 分别为:

$$[0007] \quad \beta_i = \beta_{\text{design}} + k_{\alpha} \cdot (\alpha_i - \alpha_{\text{ave}}) + \delta_i$$

$$[0008] \quad S_i = \frac{c}{r \cdot \varphi_i}$$

[0009] 其中,  $i$  为扩压器叶片序号,  $\beta_{\text{design}}$  为根据离心压气机的设计流量确定的扩压器叶片的理论安装角,  $k_\alpha$  为第一修正参数, 取值范围为  $0 < k_\alpha \leq 5$ ,  $\alpha_i$  为第  $i$  个扩压器叶片前缘处的气流角,  $\alpha_{\text{ave}}$  为所有扩压器叶片前缘处气流角的平均值,  $\alpha_{\text{ave}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \alpha_i$ ,  $N$  为扩压器的叶片数,  $\delta_i$  是第二修正参数, 取值范围为  $-\beta_{\text{design}} < \delta_i \leq 90^\circ - \beta_{\text{design}}$ ,  $c$  为扩压器叶片的弦长,  $r$  为扩压器叶片前缘与离心压气机旋转轴中心之间的距离, 即扩压器叶片前缘的半径,  $\varphi_i$  为第  $i$  个叶片的前缘与第  $i+1$  个叶片的前缘所形成的圆心角,  $\varphi_i = \varphi_{\text{ave}} \cdot (1 - k_p \cdot \frac{\Delta sp_i}{sp_{\text{ave}}} - k_\beta \cdot \frac{\Delta \beta_i}{\beta_{\text{ave}}}) + \varepsilon_i$ ,  $\varphi_{\text{ave}}$  为扩压器叶片圆心角的平均值,  $\varphi_{\text{ave}} = \frac{360^\circ}{N}$ ,  $N$  为扩压器的叶片数,  $k_p$  为第三修正参数,  $k_p$  的取值范围为  $1 \leq k_p \leq 50$ ,  $sp_i$  为第  $i$  个叶片尾缘下游处的静压,  $\Delta sp_i$  为第  $i+1$  个叶片尾缘下游与第  $i$  个叶片尾缘下游之间的静压差,  $\Delta sp_i = \begin{cases} sp_{i+1} - sp_i & i = 1, 2, \dots, N-1 \\ sp_i - sp_1 & i = N \end{cases}$ ,  $sp_{\text{ave}}$  为  $N$  个叶片尾缘下游静压的平均值,  $sp_{\text{ave}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N sp_i$ ,  $k_\beta$  为第四修正参数,  $k_\beta$  取值范围为  $1 \leq k_\beta \leq 50$ ,  $\Delta \beta_i$  为第  $i+1$  个扩压器叶片安装角与第  $i$  个扩压器叶片安装角之差,  $\Delta \beta_i = \begin{cases} \beta_{i+1} - \beta_i & i = 1, 2, \dots, N-1 \\ \beta_i - \beta_1 & i = N \end{cases}$ ,  $\beta_i$  为第  $i$  个扩压器叶片安装角,  $\beta_{\text{ave}}$  为  $N$  个叶片安装角的平均值,  $\beta_{\text{ave}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \beta_i$ ,  $\varepsilon_i$  为第五修正参数,  $\varepsilon_i$  的取值范围为  $-0.5 \cdot \varphi_{\text{ave}} < \varepsilon_i \leq +0.5 \cdot \varphi_{\text{ave}}$ , 且满足  $\sum_{i=1}^N \varepsilon_i = 0$ 。

[0010] 本发明提出的采用安装角和稠度耦合可变的非对称有叶扩压器的压气机, 其优点是: 本发明的离心压气机, 由于所采用的有叶扩压器安装角和扩压器叶片前缘气流角相关, 稠度和扩压器叶片尾缘下游静压相关, 且均在周向可变, 是针对具体的流场细节进行设计的, 能够更好的和实际的非均匀流场匹配, 因此能够有效降低扩压器内部流场的非均匀性, 适应扩压器出口压力畸变 (实际中常由于蜗壳导致), 避免局部气流攻角过大, 改善有叶扩压器内部流场结构, 使得流场更加均匀, 提升有叶扩压器的性能, 有效抑制了个别流道率先发生流动失稳而诱发压气机整体喘振, 能够显著改善离心压气机的流动稳定性。

## 附图说明

[0011] 图1是本发明提出的采用安装角和稠度耦合可变的非对称有叶扩压器的压气机的剖视图。

[0012] 图2是图1所示的离心压气机中离心叶轮和扩压器的结构示意图。

[0013] 图3是本发明离心压气机的结构参数示意图, 其中图3 (a) 是图2中A部分的局部放大图, 图3 (b) 是扩压器进口气流角示意图。

[0014] 图4是本发明一个实施例中扩压器叶片出口静压分布图。

[0015] 图5是本发明一个实施例中扩压器叶片尾缘下游静压周向分布。

[0016] 图6是根据图4所示扩压器叶片前缘处气流角的周向分布和本发明提出的方法所

确定的流道对应的圆心角分布图。

[0017] 图7是根据图6所示扩压器叶片安装角周向分布和图5所示扩压器叶片尾缘下游静压周向分布通过本发明提出的方法所确定的相邻叶片前缘对应圆心角周向分布。

[0018] 图1-图7中,1是离心压气机进口,2是旋转轴,3是离心叶轮,4是扩压器,5是背盘,6是蜗壳流道,7是机壳,8是扩压器叶片,9是扩压器叶片尾缘下游,c是叶片弦长,i是扩压器叶片序号,r是扩压器叶片的前缘半径, $\varphi_i$ 是第i个扩压器叶片的前缘与第i+1个扩压器叶片的前缘所形成的圆心角,c1是扩压器叶片的中弧线, $\beta_i$ 是第i个扩压器叶片安装角,即扩压器叶片前缘位置中弧线的切线方向 $\tau$ 与径向R的夹角, $\alpha_i$ 是第i个扩压器叶片前缘处的气流角,即扩压器叶片i前缘处的绝对速度V与径向R的夹角。

### 具体实施方式

[0019] 本发明提出的采用安装角和稠度耦合可变的非对称有叶扩压器的压气机,其结构如图1所示,包括机壳7、离心叶轮3、背盘5和扩压器4。机壳7与背盘5相对固定,机壳7两侧形成蜗壳流道6。离心叶轮3和扩压器4同轴安装,离心叶轮3由离心压气机旋转轴2驱动,扩压器4由多个扩压器叶片8组成,多个扩压器叶片8沿圆周固定在机壳7或背盘5上,相邻两个扩压器叶片之间形成流道,如图2所示。扩压器叶片8沿圆周安装的安装角 $\beta_i$ 和稠度 $S_i$ 是可变的,不同周向位置的扩压器叶片安装角和稠度均不相同,安装角 $\beta_i$ 和稠度 $S_i$ 分别为:

$$[0020] \quad \beta_i = \beta_{\text{design}} + k_a \cdot (\alpha_i - \alpha_{\text{ave}}) + \delta_i$$

$$[0021] \quad S_i = \frac{c}{r \cdot \varphi_i}$$

[0022] 其中,i为扩压器叶片序号, $\beta_{\text{design}}$ 为根据离心压气机的设计流量确定的扩压器叶片的理论安装角, $k_a$ 为第一修正参数,取值范围为 $0 < k_a \leq 5$ ,本发明的一个实施例中,k取值为0.8, $\alpha_i$ 为第i个扩压器叶片前缘处的气流角,可以通过仿真或实验测量确定, $\alpha_{\text{ave}}$ 为所有扩压器叶片前缘处气流角的平均值,

$\alpha_{\text{ave}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \alpha_i$ ,N为扩压器的叶片数, $\delta_i$ 是第二修正参数,取值范围为 $-\beta_{\text{design}} < \delta_i \leq 90^\circ - \beta_{\text{design}}$ ,本发明实施例中 $\delta_i$ 的取值为0,c为扩压器叶片的弦长,r为扩压器叶片前缘与离心压气机旋转轴中心之间的距离,即扩压器叶片前缘的半径, $\varphi_i$ 为第i个叶片的前缘与第i+1个叶片的前缘所形成的圆心角,

$\varphi_i = \varphi_{\text{ave}} \cdot (1 - k_p \cdot \frac{\Delta sp_i}{sp_{\text{ave}}} - k_\beta \cdot \frac{\Delta \beta_i}{\beta_{\text{ave}}}) + \varepsilon_i$ , $\varphi_{\text{ave}}$ 为

扩压器叶片圆心角的平均值, $\varphi_{\text{ave}} = \frac{360^\circ}{N}$ ,N为扩压器的叶片数, $k_p$ 为第三修正参数, $k_p$ 的取值范围为 $1 \leq k_p \leq 50$ ,本发明的一个实施例中 $k_p$ 的取值为20, $sp_i$ 为第i个叶片尾缘下游处的静压,

$\Delta sp_i$ 为第i+1个叶片尾缘下游与第i个叶片尾缘下游之间的静压差,

$$\Delta sp_i = \begin{cases} sp_{i+1} - sp_i & i = 1, 2, \dots, N-1 \\ sp_i - sp_1 & i = N \end{cases}, sp_{\text{ave}} \text{为} N \text{个叶片尾缘下游静压的平均值}, sp_{\text{ave}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N sp_i,$$

$k_\beta$ 为第四修正参数, $k_\beta$ 取值范围为 $1 \leq k_\beta \leq 50$ ,本发明的一个实施例中, $k_\beta$ 取值为3, $\Delta \beta_i$ 为第i

+1个扩压器叶片安装角与第i个扩压器叶片安装角之差, $\Delta \beta_i = \begin{cases} \beta_{i+1} - \beta_i & i = 1, 2, \dots, N-1 \\ \beta_i - \beta_1 & i = N \end{cases}, \beta_i$

为第*i*个扩压器叶片安装角,通过前述 $\beta_i$ 的表达式确定, $\beta_{ave}$ 为*N*个叶片安装角的平均值,

$$\beta_{ave} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \beta_i, \varepsilon_i \text{ 为第五修正参数, } \varepsilon_i \text{ 的取值范围为 } -0.5 \cdot \varphi_{ave} < \varepsilon_i \leq +0.5 \cdot \varphi_{ave}, \text{ 且满足}$$

$$\sum_{i=1}^N \varepsilon_i = 0. \text{ 各参数的物理含义如图3所示,其中图3(a)是图2中A部分的局部放大图,图3(b)是}$$

扩压器进口气流角示意图。

[0023] 以下结合附图,对本发明内容作进一步说明:

[0024] 本发明提出的采用安装角和稠度耦合可变的非对称有叶扩压器的压气机,扩压器叶片前缘位置,叶片高度,叶片形状在周向上无差别;扩压器叶片安装角和稠度在周向方向上是非均匀分布的,不同周向位置的扩压器叶片安装角和稠度不相等;稠度的改变通过相邻扩压器叶片前缘对应圆心角(相邻叶片前缘间距)实现。扩压器叶片安装角和扩压器叶片前缘气流角相关,而稠度在周向上的分布方式,和扩压器叶片尾缘下游的静压分布以及扩压器叶片安装角均相关,通过这种关联,所设计的采用安装角和稠度耦合可变的非对称有叶扩压器的压气机能够更好的适应内部非均匀流场,有效降低流场的非均匀性,避免局部气流攻角过大,抑制局部流动率先发生流动分离而导致的压气机提前失稳,能够有效提高压气机流动稳定性。

[0025] 通过本发明的一个实施例来叙述扩压器安装角周向分布的确定方法,过程如下:

[0026] 1) 采用和常规轴对称有叶扩压器相同的方法,确定扩压器叶片总数*N*,本发明实施例叶片数为*N*=16;

[0027] 2) 通过实验测量或仿真手段,获得常规轴对称扩压器叶片前缘气流角。本发明实施例中扩压器叶片出口静压分布如图4所示;

[0028] 3) 通过扩压器叶片前缘气流角周向分布获得各扩压器叶片前缘的气流角数值,总共*N*个,如图4中“+”标记所示,分别对应于扩压器叶片*i*前缘的气流角度,第*i*个扩压器叶片

前缘气流角记为 $\alpha_i$ ,其中*i*=1,2,⋯,*N*,并把这*N*个气流角的平均值记为 $\alpha_{ave}$ ,即 $\alpha_{ave} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \alpha_i$ ;

[0029] 4) 扩压器叶片安装角 $\beta_i$ 根据如下公式确定: $\beta_i = \beta_{design} + k_a \cdot (\alpha_i - \alpha_{ave}) + \delta_i$ ,其中,*i*为扩压器叶片序号, $\beta_{design}$ 为根据离心压气机的设计流量确定的扩压器叶片的理论安装角, $k_a$ 为第一修正参数,取值范围为 $0 < k_a \leq 5$ , $\alpha_i$ 为第*i*个扩压器叶片前缘处的气流角, $\alpha_{ave}$ 为所有

扩压器叶片前缘处气流角的平均值, $\alpha_{ave} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \alpha_i$ ,*N*为扩压器的叶片数, $\delta_i$ 是第二修正参数,取值范围为 $-\beta_{design} < \delta_i \leq 90^\circ - \beta_{design}$ 。

[0030] 5) 通过实验测量、仿真或者其他方式,获得常规轴对称扩压器叶片尾缘下游静压分布。本发明实施例中扩压器叶片尾缘下游静压周向分布如图5所示;

[0031] 6) 通过静压周向分布获得各流道出口的静压数值,总共*N*个,如图5中“+”标记所示,分别对应于不同扩压器叶片*i*尾缘下游的出口静压,第*i*个扩压器叶片尾缘下游的静压

记为 $sp_i$ ,其中*i*=1,2,⋯,*N*,并把这*N*个静压的平均值记为 $sp_{ave}$ ,即 $sp_{ave} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N sp_i$ ;

[0032] 7) 根据公式  $\varphi_i = \varphi_{ave} \cdot (1 - k_p \cdot \frac{\Delta sp_i}{sp_{ave}} - k_\beta \cdot \frac{\Delta \beta_i}{\beta_{ave}}) + \varepsilon_i$  确定第  $i$  个叶片的前缘与第  $i+1$  个叶片的前缘所形成的圆心角  $\varphi_i$ , 由于稠度  $S_i = \frac{c}{r \cdot \varphi_i}$ , 所以确定了  $\varphi_i$  在周向上的分布, 也就确定了稠度在周向上的分布。在公式  $\varphi_i = \varphi_{ave} \cdot (1 - k_p \cdot \frac{\Delta sp_i}{sp_{ave}} - k_\beta \cdot \frac{\Delta \beta_i}{\beta_{ave}}) + \varepsilon_i$  中,  $\varphi_{ave}$  为扩压器叶片圆心角的平均值,  $\varphi_{ave} = \frac{360^\circ}{N}$ ,  $N$  为扩压器的叶片数,  $k_p$  为第三修正参数,  $k_p$  的取值范围为  $1 \leq k_p \leq 50$ ,  $sp_i$  为第  $i$  个叶片尾缘下游处的静压,  $\Delta sp_i$  为第  $i+1$  个叶片尾缘下游与第  $i$  个叶片尾缘下游之间的静压差,  $\Delta sp_i = \begin{cases} sp_{i+1} - sp_i & i = 1, 2, \dots, N-1 \\ sp_i - sp_1 & i = N \end{cases}$ ,  $sp_{ave}$  为  $N$  个叶片尾缘下游静压的平均值,  $sp_{ave} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N sp_i$ ,  $k_\beta$  为第四修正参数,  $k_\beta$  取值范围为  $1 \leq k_\beta \leq 50$ ,  $\Delta \beta_i$  为第  $i+1$  个扩压器叶片安装角与第  $i$  个扩压器叶片安装角之差,  $\Delta \beta_i = \begin{cases} \beta_{i+1} - \beta_i & i = 1, 2, \dots, N-1 \\ \beta_i - \beta_1 & i = N \end{cases}$ ,  $\beta_i$  为第  $i$  个扩压器叶片安装角, 通过步骤 4) 得到,  $\beta_{ave}$  为  $N$  个叶片安装角的平均值,  $\beta_{ave} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \beta_i$ ,  $\varepsilon_i$  为第五修正参数,  $\varepsilon_i$  的取值范围为  $-0.5 \cdot \varphi_{ave} < \varepsilon_i \leq +0.5 \cdot \varphi_{ave}$ , 且满足  $\sum_{i=1}^N \varepsilon_i = 0$ 。

[0033] 8) 通过步骤 (4) 即可确定各扩压器叶片安装角  $\beta_i$  在周向上的分布, 同时通过步骤 7) 可以得到第  $i$  个叶片的前缘与第  $i+1$  个叶片的前缘所形成的圆心角  $\varphi_i$  在周向上的分布, 从而得到安装角在周向上的分布。本发明实施例中所得到的流道对应的圆心角分布如图 6 所示, 而第  $i$  个叶片的前缘与第  $i+1$  个叶片的前缘所形成的圆心角  $\varphi_i$  在周向上的分布如图 7 所示。由于扩压器叶片前缘气流角和扩压器叶片尾缘下游静压在周向上的非均匀特性, 所得到的  $\beta_i$  和  $\varphi_i$  在周向上均是可变的, 故而所得到的有叶扩压器是一种安装角和稠度耦合可变的非对称有叶扩压器。

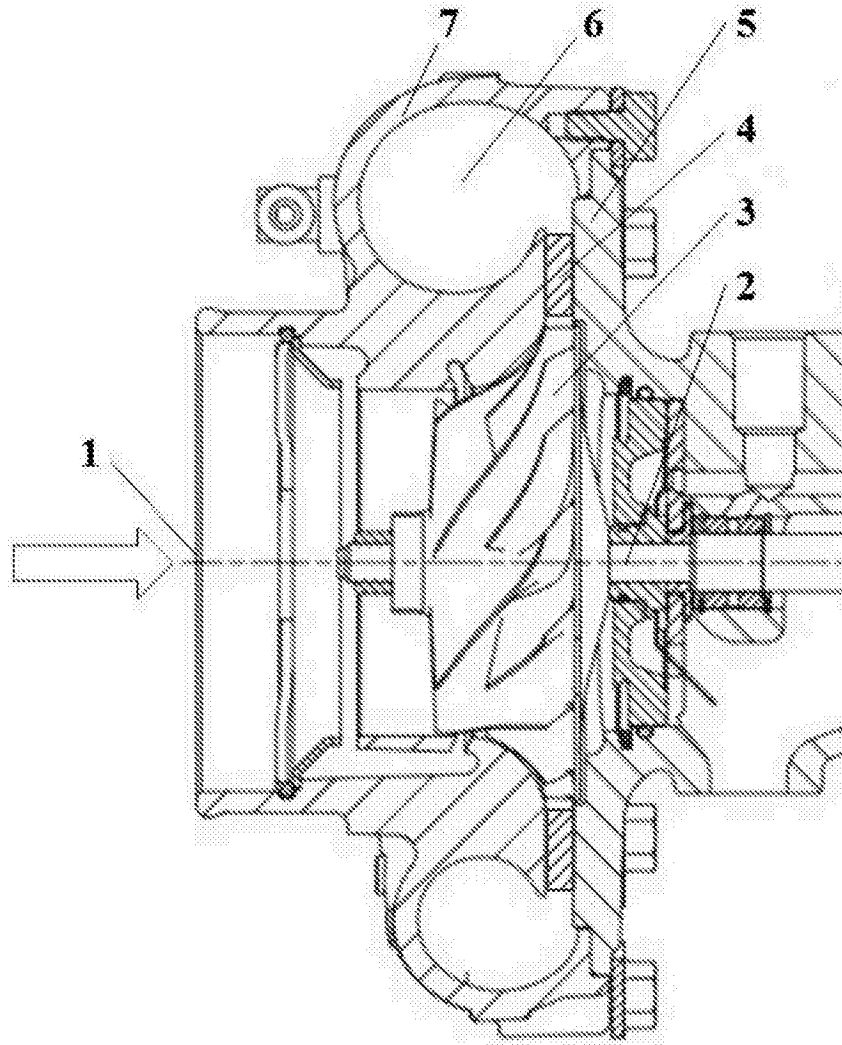


图1



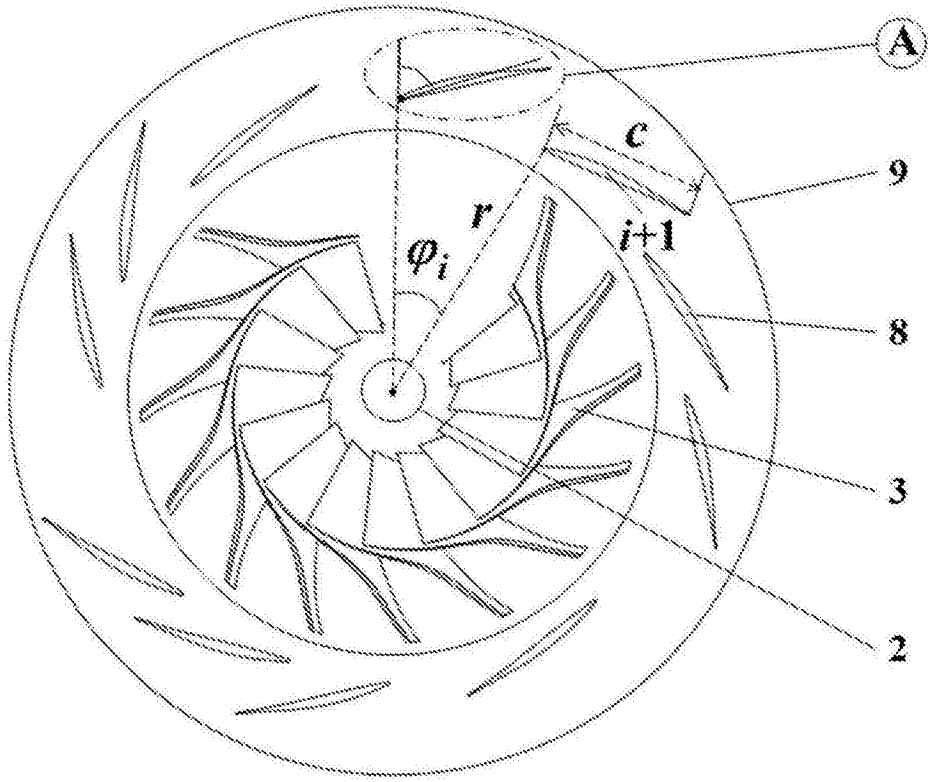


图2

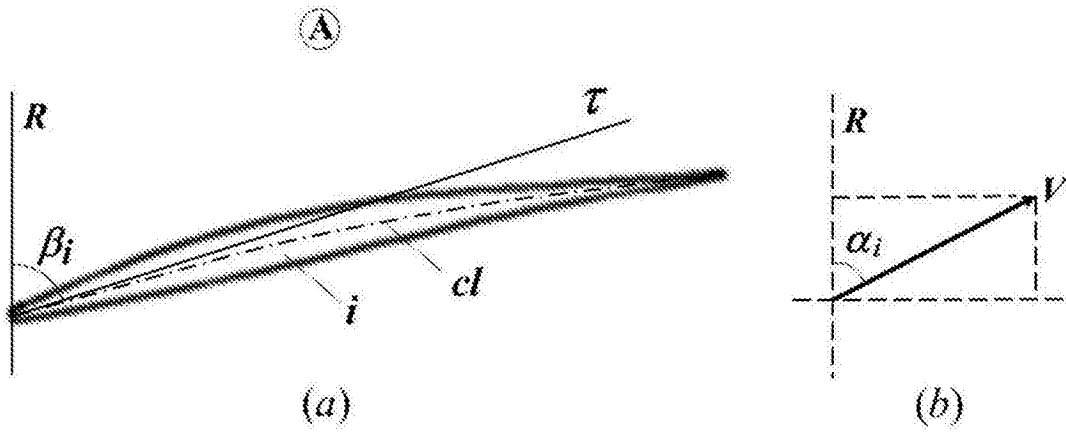


图3

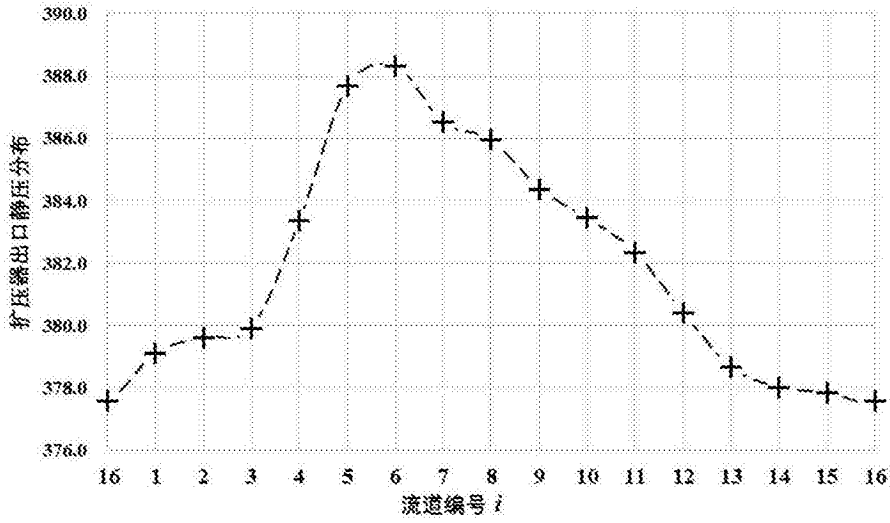


图4

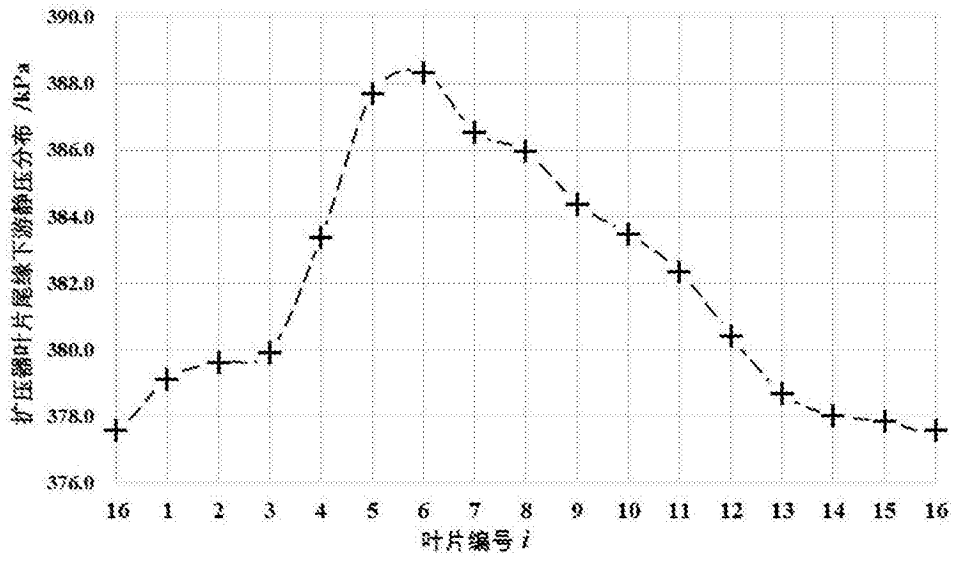


图5

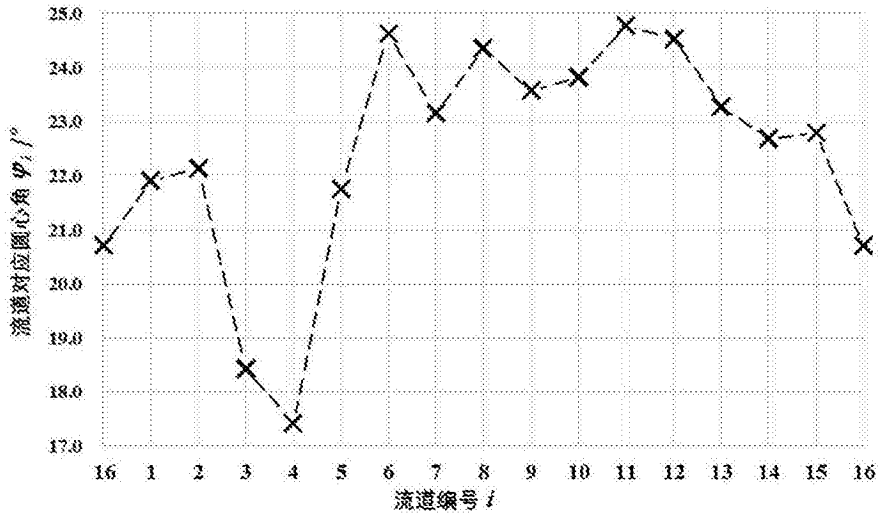


图6

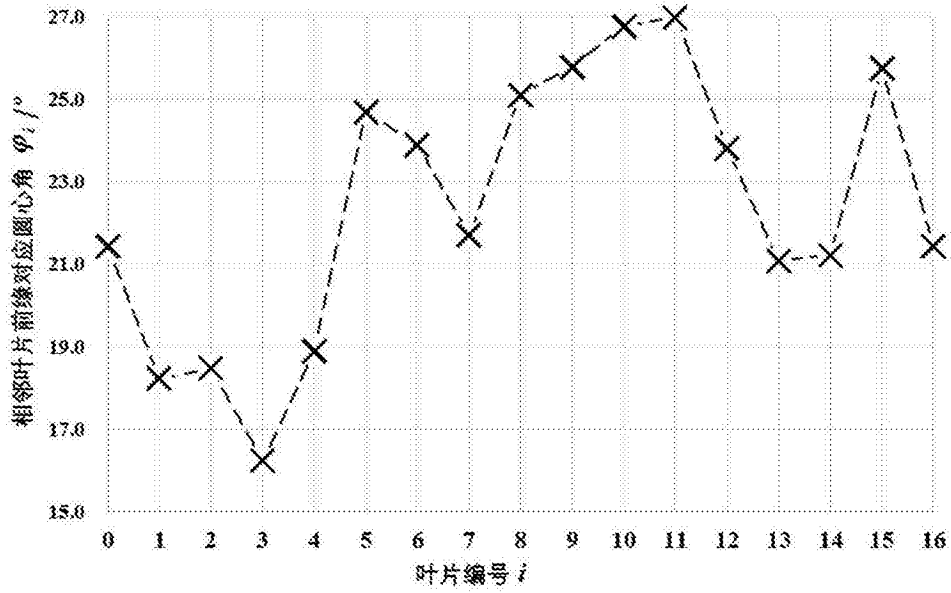


图7