



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 115717552 B

(45) 授权公告日 2025. 04. 25

(21) 申请号 202211389376.7

(22) 申请日 2022.11.08

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 115717552 A

(43) 申请公布日 2023.02.28

(73) 专利权人 东方电气集团东方汽轮机有限公司  
地址 618000 四川省德阳市高新技术产业  
园区金沙江西路666号

(72) 发明人 钟主海 靳亚峰 范小平 孙奇  
王高亮 平艳 王鑫 翟璇  
陶志坚 罗方 赵先波 覃小文  
王松 范立华 王娟丽 唐军  
杨志 韩扑罅 周嘉 侯俊鹏  
任利莲

(74) 专利代理机构 北京知联天下知识产权代理  
有限公司 11594

专利代理师 孔凡梅

(51) Int.Cl.  
F01D 5/14 (2006.01)

(56) 对比文件  
CN 108757046 A, 2018.11.06  
CN 114483204 A, 2022.05.13

审查员 乔路

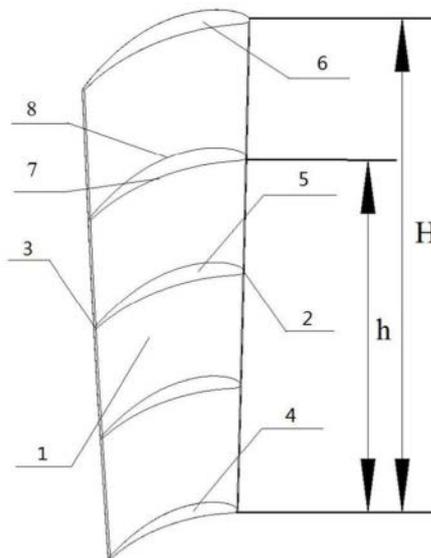
权利要求书2页 说明书7页 附图2页

(54) 发明名称

一种透平动叶片

(57) 摘要

本发明一种透平动叶片,包括叶身,所述叶身由若干个基础二维叶型积叠扭转成型,基础二维叶型包括基础二维叶型截面,基础二维叶型截面具有参数:叶片总高度H和相对栅距;基础二维叶型截面的相对栅距变化规律为:基础二维叶型截面沿叶片总高度H方向根部截面到中部截面的相对栅距逐渐增大,中部截面到顶部截面的相对栅距逐渐减小;依据叶身高度,确定出口几何角、相对栅距沿叶片高度方向的变化规律,从而降低叶顶区域的漏汽量,增加叶根区域动叶片进出口压差,可有效降低端部区域的二次流损失,并随着叶身高度增加时,逐步增加中部区域的相对栅距,有效控制动叶片中部区域的叶型损失。



1. 一种透平动叶片,其特征在于,包括叶身(1),所述叶身(1)由若干个基础二维叶型积叠扭转成型,所述基础二维叶型包括基础二维叶型截面,所述基础二维叶型截面具有参数:叶片总高度H和相对栅距;所述基础二维叶型截面的相对栅距变化规律为:基础二维叶型截面沿叶片总高度H方向,根部截面相对栅距到中部截面相对栅距逐渐增大,中部截面相对栅距到顶部截面相对栅距逐渐减小;基础二维叶型根部截面相对栅距小于基础二维叶型顶部截面相对栅距,所述基础二维叶型的相对栅距为t和b的比值,t表示节距(11),b表示弦长(9),所述根部截面相对栅距,中部截面相对栅距和顶部截面相对栅距分布沿如下规律径向变化:

$$(t/b)_{\text{根}} - (t/b)_{\text{中}} = -\frac{2}{25} \sin\left(\frac{\pi \cdot H}{260} + 0.848\right) \quad H \leq 60 \text{ m}$$

$$(t/b)_{\text{顶}} - (t/b)_{\text{中}} = -\frac{3}{50} \sin\left(\frac{\pi \cdot H}{224} + 0.73\right)$$

在叶片总高度H小于等于60mm时,根部截面相对栅距与中部截面相对栅距差值为 $-\frac{2}{25} \sin\left(\frac{\pi \cdot H}{260} + 0.848\right)$ ,顶部截面相对栅距与中部截面相对栅距差值为 $-\frac{3}{50} \sin\left(\frac{\pi \cdot H}{224} + 0.73\right)$ ;

$$(t/b)_{\text{根}} - (t/b)_{\text{中}} = -\frac{1}{10} \sin\left(\frac{\pi \cdot (H - 60)}{293} + 0.927\right) \quad 60 < H \leq 120 \text{ m}$$

$$(t/b)_{\text{顶}} - (t/b)_{\text{中}} = -\frac{2}{25} \sin\left(\frac{\pi \cdot (H - 60)}{260} + 0.848\right)$$

在叶片总高度H大于60mm小于等于120mm时,根部截面相对栅距与中部截面相对栅距差值为 $-\frac{1}{10} \sin\left(\frac{\pi \cdot (H/5 - 24)}{176} + 0.927\right)$ ,顶部截面相对栅距与中部截面相对栅距差值为

$$-\frac{2}{25} \sin\left(\frac{\pi \cdot (H - 60)}{260} + 0.848\right);$$

$$(t/b)_{\text{根}} - (t/b)_{\text{中}} = -\frac{3}{25} \sin\left(\frac{\pi \cdot (H/5 - 24)}{193} + 0.985\right) \quad 120 < H \leq 300 \text{ m}$$

$$(t/b)_{\text{顶}} - (t/b)_{\text{中}} = -\frac{1}{10} \sin\left(\frac{\pi \cdot (H/5 - 24)}{176} + 0.927\right)$$

在叶片总高度H大于120mm小于等于300mm时,根部截面相对栅距与中部截面相对栅距差值为 $-\frac{3}{25} \sin\left(\frac{\pi \cdot (H/5 - 24)}{193} + 0.985\right)$ ,顶部截面相对栅距与中部截面相对栅距差值为

$$-\frac{1}{10} \sin\left(\frac{\pi \cdot (H/5 - 24)}{176} + 0.927\right);$$

其中,H为叶片总高度。

2. 根据权利要求1所述的一种透平动叶片,其特征在于,所述基础二维叶型截面是由前缘(2)、压力面(7)、尾缘(3)、吸力面(8)依次连接组成。

3. 根据权利要求2所述的一种透平动叶片,其特征在于,所述基础二维叶型截面的迭合规律是:沿相对叶高自根部向顶部,各基础二维叶型截面连续光滑过渡。

4. 根据权利要求3所述的一种透平动叶片,其特征在于,所述相对栅距分布规律满足如下关系式:

$$t/b = Ax^2 + Bx + C$$

其中,  $t/b$  为某叶高处基础二维叶型截面的相对栅距,  $x$  为某叶高处基础二维叶型截面的相对叶高, 所述相对叶高为截面高度  $h$  与叶片总高度  $H$  的比值,  $A$ 、 $B$ 、 $C$  的取值与叶片总高度  $H$  关。

5. 根据权利要求4所述的一种透平动叶片, 其特征在于, 所述基础二维叶型截面还具有参数: 叶片出口几何角  $\arcsin(o/t)$ , 所述叶片出口几何角沿  $\arcsin(o/t)$  相对叶高分布规律满足如下关系式:

$$\arcsin(o/t) = ax^2 + bx + c$$

其中,  $\arcsin(o/t)$  为某叶高处基础二维叶型截面的叶片出口几何角,  $a$ 、 $b$ 、 $c$  的取值与叶片总高度  $H$  相关。

6. 根据权利要求5所述的一种透平动叶片, 其特征在于, 所述叶片出口几何角  $\arcsin(o/t)$  还包括根部截面出口几何角  $\arcsin(o/t)_{\text{底}}$ 、中部截面出口几何角  $\arcsin(o/t)_{\text{中}}$  与顶部截面出口几何角  $\arcsin(o/t)_{\text{顶}}$ 。

7. 根据权利要求6所述的一种透平动叶片, 其特征在于, 所述根部截面出口几何角  $\arcsin(o/t)_{\text{底}}$ 、中部截面出口几何角  $\arcsin(o/t)_{\text{中}}$  与顶部截面出口几何角  $\arcsin(o/t)_{\text{顶}}$  沿如下规律径向变化:

$$\arcsin(o/t)_{\text{根}} - \arcsin(o/t)_{\text{中}} = \arcsin(o/t)_{\text{中}} - \arcsin(o/t)_{\text{顶}} = -(3 \cdot \sin(0.34 + \frac{\pi \cdot H}{153}))^\circ$$

$$H \leq 60\text{mm}$$

$$\arcsin(o/t)_{\text{根}} - \arcsin(o/t)_{\text{中}} = -(2 \cdot \sin(\frac{H \cdot \pi}{180} - \frac{\pi}{6}))^\circ$$

$$60\text{mm} < H \leq 120\text{mm}$$

$$\arcsin(o/t)_{\text{中}} - \arcsin(o/t)_{\text{顶}} = -(\sin(\frac{\pi \cdot H}{120} - \frac{\pi}{2}))^\circ$$

$$\arcsin(o/t)_{\text{根}} - \arcsin(o/t)_{\text{中}} = -(2 \cdot \sin(\frac{(H/5 - 24) \cdot \pi}{108} + \frac{\pi}{6}))^\circ$$

$$120\text{mm} < H \leq 300\text{mm}$$

$$\arcsin(o/t)_{\text{中}} - \arcsin(o/t)_{\text{顶}} = (3 \cdot \sin(\frac{\pi \cdot (H/5 - 24)}{59.2} - 0.34))^\circ$$

其中,  $H$  为叶片总高度。

8. 根据权利要求1-7任一项所述的一种透平动叶片的设计方法, 其特征在于, 根据叶片叶高, 选取不同相对叶高位置的基础二维叶型;  
根据叶片根径、只数、叶高, 确定不同叶高位置基础二维叶型的相对栅距的变化规律;  
根据叶片只数、根径及叶高位置确定不同叶高位置的叶型栅距, 确定不同叶高位置基础二维叶型的弦长;

根据叶片根径、只数、叶高, 确定不同叶高位置基础二维叶型的叶片出口几何角的变化规律;

调动叶片的摆放位置, 使各基础二维叶型截面连续光滑过渡。

## 一种透平动叶片

### 技术领域

[0001] 本发明属于透平叶片领域,特别涉及一种透平动叶片。

### 背景技术

[0002] 二氧化碳由于其工质密度大,存储成本低;容量大、储能时间长、安全可靠;系统建设选址对地理条件无特殊要求等特点,是一种比较理想的压缩气体储能方式。目前工程上用超临界二氧化碳作为工质的透平机组有很多。但将普通二氧化碳作为压缩空气储能的介质,目前尚属空白。以普通二氧化碳为介质,可有效减少成本,并提升透平机组的稳定性。

[0003] 传统透平机组的效率很大程度上取决于通流内静、动叶片的气动性能,叶片的损失很大一部分源于叶型损失、漏汽损失和二次流损失。叶片在基础二维叶型上采用相应成型规律三维成型后,在叶片流道内产生了复杂的三元流动,在叶片端部区域主要呈现二次流损失,叶片中部区域为叶型损失。研究发现,静动部件之间存在的泄漏流体在透平动叶片的端部区域与主流发生掺混,导致二次流损失激增,以二氧化碳为介质,进行压缩空气储能,就需解决叶型损失、二次流损失问题。合理选择动叶片的基础二维叶型,控制叶片流道内的载荷分布,可有效控制动叶片中部区域的叶型损失,但对动叶片端部区域主要呈现二次流损失影响甚微。因此,本发明在动叶片设计过程中,在叶顶区域增加动叶片出口几何角,降低叶顶区域动叶片进出口压差,即降低叶顶区域的漏汽量,在叶根区域减小动叶片出口几何角,增加叶根区域动叶片进出口压差,即降低本级静叶区域的漏汽量,可有效降低端部区域的二次流损失。

### 发明内容

[0004] 针对上述问题,本发明提供一种透平动叶片包括叶身,叶身由若干个基础二维叶型积叠扭转成型,所述基础二维叶型包括基础二维叶型截面,所述基础二维叶型截面具有参数:叶片总高度 $H$ 和相对栅距;所述基础二维叶型截面的相对栅距变化规律为:基础二维叶型截面沿叶片总高度 $H$ 方向,根部截面相对栅距到中部截面相对栅距逐渐增大,中部截面相对栅距到顶部截面相对栅距逐渐减小;基础二维叶型根部截面相对栅距小于基础二维叶型顶部截面相对栅距。

[0005] 其进一步的优选技术方案为:所述基础二维叶型的相对栅距为 $t$ 和 $b$ 的比值, $t$ 表示节距, $b$ 表示弦长。

[0006] 其进一步的优选技术方案为:所述根部截面相对栅距,中部截面相对栅距和顶部截面相对栅距分布沿如下规律径向变化:

$$(t/b)_{\text{根}} - (t/b)_{\text{中}} = -\frac{2}{25} \sin\left(\frac{\pi \cdot H}{260} + 0.848\right) \quad H \leq 60 \text{ m}$$

$$(t/b)_{\text{顶}} - (t/b)_{\text{中}} = -\frac{3}{50} \sin\left(\frac{\pi \cdot H}{224} + 0.73\right)$$

[0007]  $(t/b)_{\text{根}} - (t/b)_{\text{中}} = -\frac{1}{10} \sin\left(\frac{\pi \cdot (H - 60)}{293} + 0.927\right)$   $60 \text{ m} < H \leq 120 \text{ m}$

$$(t/b)_{\text{顶}} - (t/b)_{\text{中}} = -\frac{2}{25} \sin\left(\frac{\pi \cdot (H - 60)}{260} + 0.848\right)$$

$$(t/b)_{\text{根}} - (t/b)_{\text{中}} = -\frac{3}{25} \sin\left(\frac{\pi \cdot (H/5 - 24)}{193} + 0.985\right) \quad 120 \text{ m} < H \leq 300 \text{ m}$$

$$(t/b)_{\text{顶}} - (t/b)_{\text{中}} = -\frac{1}{10} \sin\left(\frac{\pi \cdot (H/5 - 24)}{176} + 0.927\right)$$

[0008] 其中,H为叶片总高度。

[0009] 其进一步的优选技术方案为:所述基础二维叶型截面是由前缘、压力面、尾缘、吸力面依次连接组成。

[0010] 其进一步的优选技术方案为:所述基础二维叶型截面的迭合规律是:沿相对叶高自根部向顶部,各基础二维叶型截面连续光滑过渡。

[0011] 其进一步的优选技术方案为:所述相对栅距分布规律满足如下关系式:

$$[0012] \quad t/b = Ax^2 + Bx + C$$

[0013] 其中,t/b为某叶高处基础二维叶型截面的相对栅距,x为某叶高处基础二维叶型截面的相对叶高,所述相对叶高为截面高度与叶片总高度的比值,A、B、C的取值与叶片总高度相关。

[0014] 其进一步的优选技术方案为:所述基础二维叶型截面还具有参数:叶片出口几何角,所述叶片出口几何角沿相对叶高分布规律满足如下关系式:

$$[0015] \quad \arcsin(o/t) = ax^2 + bx + c$$

[0016] 其中, $\arcsin(o/t)$ 为某叶高处基础二维叶型截面的叶片出口几何角,a、b、c的取值与叶片总高度H相关。

[0017] 其进一步的优选技术方案为:所述叶片出口几何角还包括根部截面出口几何角、中部截面出口几何角与顶部截面出口几何角。

[0018] 其进一步的优选技术方案为:所述根部截面出口几何角、中部截面出口几何角与顶部截面出口几何角沿如下规律径向变化:

$$\arcsin(o/t)_{\text{根}} - \arcsin(o/t)_{\text{中}} = \arcsin(o/t)_{\text{中}} - \arcsin(o/t)_{\text{顶}} = -(3 \cdot \sin(0.34 + \frac{\pi \cdot H}{153}))^\circ \quad H \leq 60\text{mm}$$

$$\arcsin(o/t)_{\text{根}} - \arcsin(o/t)_{\text{中}} = -(2 \cdot \sin(\frac{H \cdot \pi}{180} - \frac{\pi}{6}))^\circ \quad 60\text{mm} < H \leq 120\text{mm}$$

$$[0019] \quad \arcsin(o/t)_{\text{中}} - \arcsin(o/t)_{\text{顶}} = -(\sin(\frac{\pi \cdot H}{120} - \frac{\pi}{2}))^\circ$$

$$\arcsin(o/t)_{\text{根}} - \arcsin(o/t)_{\text{中}} = -(2 \cdot \sin(\frac{(H/5 - 24) \cdot \pi}{108} + \frac{\pi}{6}))^\circ \quad 120\text{mm} < H \leq 300\text{mm}$$

$$\arcsin(o/t)_{\text{中}} - \arcsin(o/t)_{\text{顶}} = (3 \cdot \sin(\frac{\pi \cdot (H/5 - 24)}{59.2} - 0.34))^\circ$$

[0020] 其中,为某叶高处基础二维叶型截面的叶片出口几何角,a、b、c的取值与叶片总高度H相关。

[0021] 其进一步的优选技术方案为:所述基础二维叶型的造型过程包括以下步骤:

[0022] 根据叶片叶高,选取不同相对叶高位置的基础二维叶型;

[0023] 根据叶片根径、只数、叶高,确定不同叶高位置基础二维叶型的相对栅距的变化规律;

[0024] 根据叶片只数、根径及叶高位置确定不同叶高位置的叶型栅距,确定不同叶高位置基础二维叶型的弦长;

[0025] 根据叶片根径、只数、叶高,确定不同叶高位置基础二维叶型的叶片出口几何角的变化规律;

[0026] 调动叶片的摆放位置,使各基础二维叶型截面连续光滑过渡。

[0027] 本发明的有益效果:本发明的二氧化碳透平动叶片叶身由若干个基础二维叶型按一定规律积叠扭转成型,依据叶身高度,确定出口几何角、相对栅距沿叶片高度方向的变化规律,其目的是:叶身高度较小时,大幅增加动叶顶部出口几何角,降低叶顶区域动叶片进出口压差,即降低叶顶区域的漏汽量,在叶根区域大幅减小动叶片出口几何角,增加叶根区域动叶片进出口压差,即降低本级静叶区域的漏汽量,可有效降低端部区域的二次流损失,逐步增加中部区域的相对栅距,有效控制动叶片中部区域的叶型损失。

[0028] 本发明提供的一种透平动叶片不仅可用于二氧化碳透平机组中,同样可使用在以各种不同物质为介质的透平系统中,其主要优势在于利用方程确定透平动叶片的相对栅距、出口几何角,从而达到减少端部区域二次流损失、降低静叶区域漏气量,以及控制动叶片中部区域叶型损失的目的。

[0029] 本发明的其它特征和优点将在随后的说明书中阐述,并且,部分地从说明书中变得显而易见,或者通过实施本发明而了解。本发明的目的和其他优点可通过在说明书、权利要求书以及附图中所指出的结构来实现和获得。

## 附图说明

[0030] 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案,下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作一简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图是本发明的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

- [0031] 图1示出了二氧化碳透平动叶片的结构简图；
- [0032] 图2示出了基础二维叶型的几何尺寸示意图；
- [0033] 图3示出了不同叶身高度时出口几何角 $\arcsin(o/t)$ 沿叶高分布示意图。
- [0034] 图中标记分别为：1—叶身，2—前缘，3—尾缘；4—根部截面；5—中部截面；6—顶部截面；7—压力面；8—吸力面；9—弦长；10—安装角；11—节距；12—喉部宽度；

### 具体实施方式

[0035] 为使本发明实施例的目的、技术方案和优点更加清楚，下面将结合本发明实施例中的附图，对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地说明，显然，所描述的实施例是本发明一部分实施例，而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例，本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例，都属于本发明保护的范围。

[0036] 一种透平动叶片，其叶身结构采用一种特殊的流型规律控制，包括叶身1，所述叶身1由若干个基础二维叶型按一定规律积叠扭转成型，所述基础二维叶型包括基础二维叶型截面，基础二维叶型截面沿叶片总高度(H)方向，根部截面相对栅距 $(t/b)_{\text{根}}$ 到中部截面相对栅距 $(t/b)_{\text{中}}$ 逐渐增大，中部截面相对栅距 $(t/b)_{\text{中}}$ 到顶部截面相对栅距 $(t/b)_{\text{顶}}$ 逐渐减小；其中，基础二维叶型根部相对栅距 $(t/b)_{\text{根}}$ 小于基础二维叶型顶部截面相对栅距 $(t/b)_{\text{顶}}$ 的相对栅距。

[0037] 其外形轮廓如图1所示；

[0038] 如图2所示，所述基础二维叶型截面具有参数：安装角10、弦长9、节距11、喉部宽度12，某截面高度h，即基础二维叶型高度、叶片总高度H，即叶身顶截面与叶身根截面之间的距离；相对叶高 $h/H$ 、相对栅距 $t/b$ ；基础二维叶型截面是由前缘2、压力面7、尾缘3、吸力面8共4段封闭曲线依次连接组成，所述基础二维叶型的造型过程包括以下步骤：

[0039] 选取基础二维叶型：根据叶片叶高，选取不同相对叶高位置的基础二维叶型；

[0040] 确定相对栅距：根据叶片根径、只数、叶高，确定不同叶高位置基础二维叶型的相对栅距的变化规律；

[0041] 确定弦长：根据叶片只数、根径及叶高位置确定不同叶高位置的叶型栅距，确定不同叶高位置基础二维叶型的弦长；

[0042] 确定叶片出口几何角：根据叶片根径、只数、叶高，确定不同叶高位置基础二维叶型的叶片出口几何角的变化规律；

[0043] 调动叶片的摆放位置，使各基础二维叶型截面连续光滑过渡。

[0044] 其中，相对栅距 $t/b$ 为节距11与弦长9的比值，叶片出口几何角为喉部宽度12与节距 $t$ 比值的反正弦函数，即 $\arcsin(o/t)$ 。

[0045] 进一步地，保证相对栅距的沿叶片高度的变化规律满足如下关系式：

$$[0046] \quad t/b = Ax^2 + Bx + C$$

[0047] 其中， $t/b$ 为相对栅距， $x$ 为某叶高处基础二维叶型截面的相对叶高，所述相对叶高为某截面高度 $h$ 与叶片总高度 $H$ 的比值， $A$ 、 $B$ 、 $C$ 的取值与叶片总高度 $H$ 相关；

[0048] 进一步地，根据不同叶高位置基础二维叶型的出口几何角变化规律，叶片出口几何角沿相对叶高 $h/H$ 分布规律满足如下关系式：

$$[0049] \quad \arcsin(o/t) = ax^2 + bx + c \text{ 其中, } x \text{ 为基础二维叶型某截面高度 } h \text{ 的相对叶高 } h/H,$$

$\arcsin(o/t)$  为该截面叶片出口几何角,  $a$ 、 $b$ 、 $c$  的取值与叶片总高度  $H$  相关;

[0050] 进一步地, 基础二维叶型的相对栅距还包括根部截面相对栅距  $(t/b)_{\text{根}}$ , 中部截面相对栅距  $(t/b)_{\text{中}}$  和顶部截面相对栅距  $(t/b)_{\text{顶}}$ 。

[0051] 通过将相对栅距限定为根部截面相对栅距  $(t/b)_{\text{根}}$ , 中部截面相对栅距  $(t/b)_{\text{中}}$  和顶部截面相对栅距  $(t/b)_{\text{顶}}$ , 能够更简单明了的调整相对栅距变化范围, 便于后期的造型施工, 并且可保障本发明应用于不同高度的动叶片中。利用下述公式调整根部截面相对栅距  $(t/b)_{\text{根}}$ , 中部截面相对栅距  $(t/b)_{\text{中}}$  和顶部截面相对栅距  $(t/b)_{\text{顶}}$ , 能够帮助造型施工人员更好控制动叶片造型, 达到光顺造型效果, 气动性良好。

[0052] 进一步地, 根部截面相对栅距  $(t/b)_{\text{根}}$ , 中部截面相对栅距  $(t/b)_{\text{中}}$  和顶部截面相对栅距  $(t/b)_{\text{顶}}$  的变化规律沿径向满足如下关系式:

$$\begin{aligned} (t/b)_{\text{根}} - (t/b)_{\text{中}} &= -\frac{2}{25} \sin\left(\frac{\pi \cdot H}{260} + 0.848\right) \\ (t/b)_{\text{顶}} - (t/b)_{\text{中}} &= -\frac{3}{50} \sin\left(\frac{\pi \cdot H}{224} + 0.73\right) \end{aligned} \quad H \leq 60$$

$$\begin{aligned} (t/b)_{\text{根}} - (t/b)_{\text{中}} &= -\frac{1}{10} \sin\left(\frac{\pi \cdot (H-60)}{293} + 0.927\right) \\ (t/b)_{\text{顶}} - (t/b)_{\text{中}} &= -\frac{2}{25} \sin\left(\frac{\pi \cdot (H-60)}{260} + 0.848\right) \end{aligned} \quad 60 < H \leq 120$$

$$\begin{aligned} (t/b)_{\text{根}} - (t/b)_{\text{中}} &= -\frac{3}{25} \sin\left(\frac{\pi \cdot (H/5-24)}{193} + 0.985\right) \\ (t/b)_{\text{顶}} - (t/b)_{\text{中}} &= -\frac{1}{10} \sin\left(\frac{\pi \cdot (H/5-24)}{176} + 0.927\right) \end{aligned} \quad 120 < H \leq 300$$

[0054] 其中,  $H$  为叶片总高度。

[0055] 在叶片总高度  $H$  小于等于 60mm 时, 根部截面相对栅距与中部截面相对栅距差值为  $-\frac{2}{25} \sin\left(\frac{\pi \cdot H}{260} + 0.848\right)$ , 顶部截面相对栅距与中部截面相对栅距差值为  $-\frac{3}{50} \sin\left(\frac{\pi \cdot H}{224} + 0.73\right)$ 。

此处叶片总高度  $H$  小于等于 60mm, 指基础二维叶型截面处于叶身底部, 即为叶根区域, 此处的相对栅距较小。

[0056] 在叶片总高度  $H$  大于 60mm 小于等于 120mm 时, 根部截面相对栅距与中部截面相对栅距差值为  $-\frac{1}{10} \sin\left(\frac{\pi \cdot (H/5-24)}{176} + 0.927\right)$ , 顶部截面相对栅距与中部截面相对栅距差值为  $-\frac{2}{25} \sin\left(\frac{\pi \cdot (H-60)}{260} + 0.848\right)$  此处叶片总高度  $H$  大于 60mm 小于等于 120mm, 指基础二维叶型截面处于叶身中部, 此处相对栅距最大, 能够有效控制动叶片中部区域的叶型损失。

[0057] 在叶片总高度  $H$  大于 120mm 小于等于 300mm 时, 根部截面相对栅距与中部截面相对栅距差值为  $-\frac{3}{25} \sin\left(\frac{\pi \cdot (H/5-24)}{193} + 0.985\right)$ , 顶部截面相对栅距与中部截面相对栅距差值为

$-\frac{1}{10} \sin\left(\frac{\pi \cdot (H/5-24)}{176} + 0.927\right)$  此处叶片总高度  $H$  大于 120mm 小于等于 300mm, 基础二维叶型截

面处于叶身顶部,其相对栅距相较于处于叶身中部的相对栅距较小,但大于处于叶身根部的相对栅距,使得叶身整体更适应透平工作中的气动需求,以达到更好地控制叶片流道内的载荷分布、减少中部区域的叶型损失的效果。

[0058] 并且,通过限定根部截面相对栅距、中部截面相对栅距和顶部截面相对栅距,并将其分布规律与叶片总高度H联系起来,能够保障在随着叶身高度增加时,逐步增加中部区域的相对栅距,从而达到有效控制动叶片中部区域的叶型损失的目的。

[0059] 进一步地,所述叶片出口几何角 $\arcsin(o/t)$ 还包括根部截面出口几何角 $\arcsin(o/t)_{\text{底}}$ 、中部截面出口几何角 $\arcsin(o/t)_{\text{中}}$ 与顶部截面出口几何角 $\arcsin(o/t)_{\text{顶}}$ 。

[0060] 通过将叶片出口几何角 $\arcsin(o/t)$ 具体限定为根部截面出口几何角 $\arcsin(o/t)_{\text{底}}$ 、中部截面出口几何角 $\arcsin(o/t)_{\text{中}}$ 与顶部截面出口几何角 $\arcsin(o/t)_{\text{顶}}$ ,能够帮助施工设计人员更好控制出口几何角的变量值,并且精细化出口几何角设计方案,从而达到有效减少二次流损失的目的,同时利用光顺造型,减少动叶片中部区域的叶片损失,有效提升动叶片的使用年限,降低使用成本。

[0061] 进一步地,基础二维叶型的出口几何角变化规律沿径向满足如下关系式:

$$\arcsin(o/t)_{\text{根}} - \arcsin(o/t)_{\text{中}} = \arcsin(o/t)_{\text{中}} - \arcsin(o/t)_{\text{顶}} = -(3 \cdot \sin(0.34 + \frac{\pi \cdot H}{153}))^\circ$$

$$H \leq 60\text{mm}$$

$$\arcsin(o/t)_{\text{根}} - \arcsin(o/t)_{\text{中}} = -(2 \cdot \sin(\frac{H \cdot \pi}{180} - \frac{\pi}{6}))^\circ$$

[0062]

$$\arcsin(o/t)_{\text{中}} - \arcsin(o/t)_{\text{顶}} = -(\sin(\frac{\pi \cdot H}{120} - \frac{\pi}{2}))^\circ$$

$$60\text{mm} < H \leq 120\text{mm}$$

$$\arcsin(o/t)_{\text{根}} - \arcsin(o/t)_{\text{中}} = -(2 \cdot \sin(\frac{(H/5 - 24) \cdot \pi}{108} + \frac{\pi}{6}))^\circ$$

$$\arcsin(o/t)_{\text{中}} - \arcsin(o/t)_{\text{顶}} = (3 \cdot \sin(\frac{\pi \cdot (H/5 - 24)}{59.2} - 0.34))^\circ$$

$$120\text{mm} < H \leq 300\text{mm}$$

[0063] 其中,H为叶片总高度。

[0064] 根据叶片总高度H控制叶片出口几何角的角度,对于保障特征截面光滑过度、提升气动性能、减少叶型损耗有着至关重要的作用。

[0065] 确定相对栅距 $t/b$ 及出口几何角,即可确定安装角,从而实现基础二维叶型截面连续光滑过度的目的。

[0066] 如图3所示,当叶片总高度H小于等于60mm时,根部截面出口几何角与中部截面出口几何角差值,和中部截面出口几何角与顶部截面出口几何角差值相等,均为

$-(3 \cdot \sin(0.34 + \frac{\pi \cdot H}{153}))^\circ$ 。此处叶片总高度H小于等于60mm,指基础二维叶型截面处于叶身底部,即为叶根区域,此处的动叶片出口几何角数值相对而言更小,从而可以有效增加叶根局

域动叶片进出口压差,从而降低本级静叶区域的漏汽量,可有效降低端部区域的二次流损失。

[0067] 在叶片总高度大于60mm小于等于120mm时,根部截面出口几何角与中部截面出口

几何角差值为 $-(2 \cdot \sin(\frac{H \cdot \pi}{180} - \frac{\pi}{6}))^\circ$ ,中部截面出口几何角与顶部截面出口几何角差值为 $-(\sin(\frac{\pi \cdot H}{120} - \frac{\pi}{2}))^\circ$ ,此处叶片总高度H大于60mm小于等于120mm,指基础二维叶型截面处于叶身中部,此处出口几何角随叶身高度逐步增加,能够有效控制动叶片中部区域的叶型损失。

[0068] 在叶片总高度H大于120mm小于等于300mm时,根部截面出口几何角与中部截面出口几何角差值为 $-(2 \cdot \sin(\frac{(H/5 - 24) \cdot \pi}{108} + \frac{\pi}{6}))^\circ$ ,中部截面出口几何角与顶部截面出口几何角

差值为 $(3 \cdot \sin(\frac{\pi \cdot (H/5 - 24)}{59.2} - 0.34))^\circ$ ,此处叶片总高度H大于120mm小于等于300mm,基础二维叶型截面处于叶身顶部,本发明在叶顶区域增加动叶片出口几何角,降低叶顶区域动叶片进出口压差,即降低叶顶区域的漏汽量,从而有效避免静动部件之间存在的泄漏流体在透平动叶片的端部区域与主流发生掺混,导致二次流损失激增的问题。

[0069] 本发明一种透平动叶片中包括叶身1,所述叶身1由若干个基础二维叶型按一定规律积叠扭转成型,积叠扭转成型的动叶片本身外形流畅,使用过程,扭转结构本身能够带来良好的气动性效果,从而进一步优化透平效果。

[0070] 基础二维叶型截面参数:某截面高度h、叶片总高度H、相对叶高h/H、相对栅距t/b,利用上述参数对基础二维叶型截面进行限定,从而来限定叶身1的整体轮廓,可保障本发明应用于不同大小的二氧化碳透平动叶片,应用范围广,使用空间大,推广前景好。

[0071] 基础二维叶型截面是由前缘2、压力面7、尾缘3、吸力面8共4段封闭曲线依次连接组成,封闭曲线连接成型,能够保障本发明产品本身线条流畅,在使用过程中,流畅的表面线条也能够有效减少叶型损失,提升气动性能,从而达到更好的经济效益。

[0072] 本发明在造型过程中,通过对叶身高度的限定来严格涉及叶片相对栅距、出口几何角,因此达到了良好的成型效果。在组合安装过程中,仅通过旋转叶型、调整相对栅距、调整出口几何角的微调就能够达到优良的气动性效果,二氧化碳透平机组的透平过程能够顺利进行,并且明显减少叶型损耗。

[0073] 本发明中,相对栅距和安装角 $\theta$ 则沿叶片高度方向按照特定的复合成型规律变化,使得各截面出口几何角跟随变化,从而控制流体沿叶片高度方向的分布规律,将高损失区域流体转移至高效区域,提升叶片通流效率,进而增加整个二氧化碳透平效率。

[0074] 本发明所提供的一种透平动叶片,不仅可应用于以二氧化碳为介质的透平机组中,同样可应用于其他介质的透平机组。本发明所提供的一种透平动叶片,在减少叶型损失、二次流损失方面均有良好表现,应用前景广泛。

[0075] 需要说明的是,本申请中的术语“第一”、“第二”等是用于区别类似的对象,而不必用于描述特定的顺序或先后次序。应该理解这样使用的数据在适当情况下可以互换,以便这里描述的本申请的实施例。“后”、“顶”、“底”、“内”、“外”、“中”、“竖直”、“水平”、“横向”、“纵向”等指示的方位或位置关系为基于附图所示的方位或位置关系。

[0076] 尽管参照前述实施例对本发明进行了详细的说明,本领域的普通技术人员应当理解:其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改,或者对其中部分技术特征进行等同替换;而这些修改或者替换,并不使相应技术方案的本质脱离本发明各实施例技术方案的精神和范围。

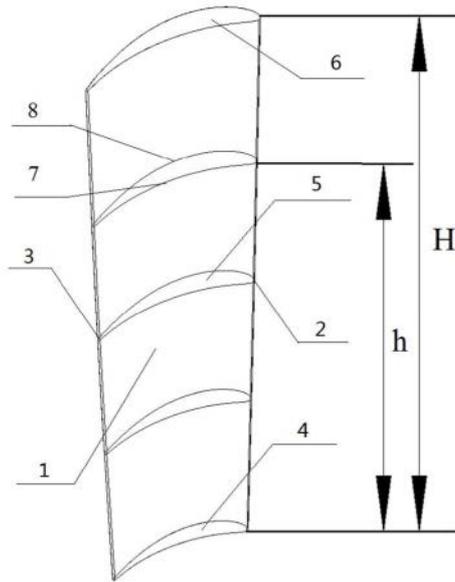


图1

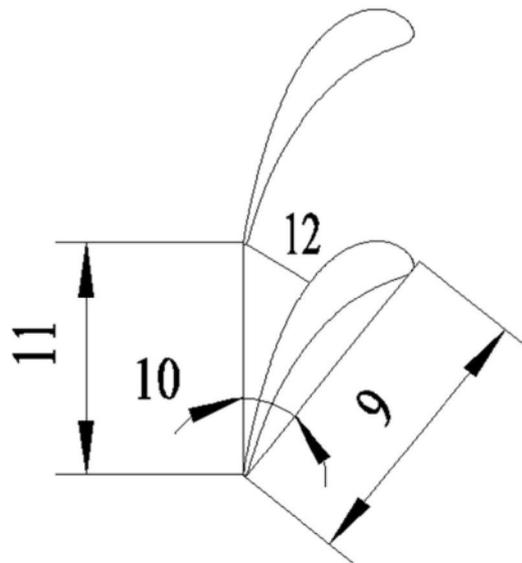


图2

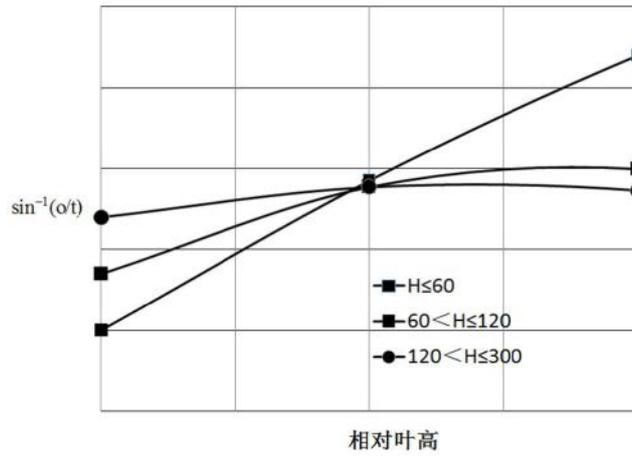


图3