



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112648235 B

(45) 授权公告日 2024. 05. 07

(21) 申请号 202110070689.5

F04D 29/66 (2006.01)

(22) 申请日 2021.01.19

(56) 对比文件

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 112648235 A

AU 3637689 A, 1989.12.21

CA 2991919 A1, 2018.07.20

CN 101029648 A, 2007.09.05

(43) 申请公布日 2021.04.13

CN 214247795 U, 2021.09.21

(73) 专利权人 大连海事大学
地址 116026 辽宁省大连市高新园区凌海
路1号

NL 7011154 A, 1972.01.04

韩吉昂; 李臣; 钟兢军; 杨凌. 喷水推进轴流
泵的水力设计及性能分析. 工程热物理学报
.2014, (12),

(72) 发明人 韩吉昂 胡义 徐文峰 杨嗣涵
江达林 丁小娟

审查员 姜哲伦

(74) 专利代理机构 大连东方专利代理有限责任
公司 21212
专利代理师 徐华燊 李洪福

(51) Int. Cl.

F04D 29/38 (2006.01)

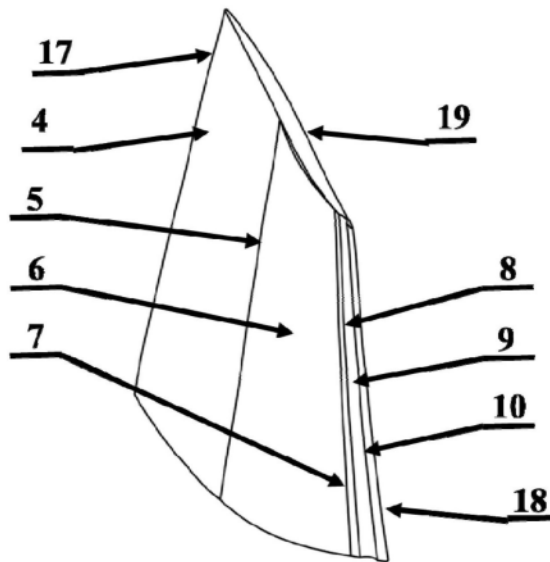
权利要求书3页 说明书15页 附图3页

(54) 发明名称

一种带有鼓包和凹缝结构的跨声速压气机
转子叶片

(57) 摘要

本发明提供一种带有鼓包和凹缝结构的跨
声速压气机转子叶片, 包括压气机动叶叶片, 压
气机动叶叶片包括叶顶、叶根、吸力面和压力面,
吸力面上设有鼓包; 吸力面上还设有凹缝, 凹缝
设置在鼓包的后侧; 凹缝的造型方式设有7种; 鼓
包和凹缝沿叶高方向的连续性进行改变, 分别构
成连续性全叶高鼓包和凹缝叶片、连续性部分叶
高鼓包和凹缝叶片、非连续性全叶高鼓包和凹缝
叶片和非连续性部分叶高鼓包和凹缝叶片。本发
明通过添加鼓包和凹缝结构可对激波和分离进
行控制来减少强激波损失和分离引起的流动损
失, 进而提高跨声速压气机的性能。



1. 一种带有鼓包和凹缝结构的跨声速压气机转子叶片, 包括压气机动叶叶片(1), 所述压气机动叶叶片(1)包括叶顶(15)、叶根(16)、吸力面(4)和压力面(19), 所述吸力面(4)上设有鼓包(6);

其特征在于, 所述吸力面(4)上还设有凹缝(9), 所述凹缝(9)设置在所述鼓包(6)的后侧;

所述鼓包(6)和所述凹缝(9)沿叶高方向的连续性进行改变, 分别构成连续性全叶高鼓包和凹缝叶片、连续性部分叶高鼓包和凹缝叶片、非连续性全叶高鼓包和凹缝叶片和非连续性部分叶高鼓包和凹缝叶片;

所述凹缝(9)的造型方式有5种, 与所述鼓包(6)的造型方式相同, 分别为CST参数化、多项式插值函数、B样条曲线、三次C-Cardinal样条曲线和p-nary细分曲线造型方式;

所述凹缝(9)的造型所涉及到的参数包括所述凹缝(9)的深度H2和长度L2, 分别与所述鼓包(6)的高度H1和长度L1相对应;

所述CST参数化的形状函数S(x)的表达式满足如下公式:

$$S(x) = \sum_{i=0}^n b_i B_n^i(x) = \sum_{i=0}^n b_i [K_n^i x^i (1-x)^{n-1}]$$

$$K_n^i = \frac{n!}{i!(n-i)!}$$

式中, B_n^i 为Bernstein多项式, i 为 B_n^i 的指数, n 为 B_n^i 的阶数; K_n^i 为组合数; b_i 是引进的权重因子, $i=0, 1, \dots, n$; $X=x/b$, b 为叶片弦长, x 为X轴坐标;

所述多项式插值函数y满足如下公式:

$$y = f(x) (1-x)^{0.5} x^{0.5} \pm g(x) (1-x)^{1.5} x^{0.5}$$

式中, $f(x)$ 、 $g(x)$ 为多项式插值函数, $f(x) = \sum_{i=0}^n A_i x^i$ 、 $g(x) = \sum_{i=0}^n B_i x^i$, x 为节点矢量; A_i 、 B_i 为多项式系数, 可通过最小二乘法对原始叶片数据拟合得到; 改变 $f(x)$ 中的多项式的系数和阶次, 可以改变圆弧曲线的弯曲程度, 进而改变鼓包的弯度; 改变 $g(x)$ 中的多项式的系数和阶次, 改变鼓包的厚度;

所述B样条曲线为采用控制顶点定义曲线, B样条基函数是可以描述复杂形状并且具有全局性特殊的基函数, 其曲线方程P(u)满足如下公式:

$$P(u) = \sum_{i=0}^n d_j N_{i,k}(u)$$

式中, d_j 为控制顶点, $j=(i-k, i-k+1, \dots, i)$, $N_{i,k}(u)$ 为k次规范B样条基函数, i 代表序号, $i=0, 1, 2, 3 \dots n$, k 为基函数次数, u 代表参数, 区间为 $[u_i, u_{i+k+1}]$; B样条曲线的基函数是多项式样条, 不仅与次数有关, 还与参数所在的节点区间有关, 这增加了B样条调控曲线的灵活性以及多样性;

所述三次C-Cardinal样条曲线的数学定义式满足如下公式:

$$P_i(t) = \sum_{j=0}^3 b_{i+j} \omega_{j,\alpha}(t)$$

$$0 \leq t \leq \alpha, i=0, 1, 2, \dots, n-3$$

式中, 点 b_i 为给定的型值点, $i=0, 1, 2, 3 \dots n$, j 为0-3, b_{i+j} 包含于 b_i 中, $\omega_{j,\alpha}(t)$ 为样条基

函数, t 为节点值, 在样条曲线绘制中其值大小决定了所绘曲线的精度, 参数 α 可在不影响曲线连续性下对样条曲线进行微调, 亦称之为微调因子, α 大于 0, 曲线段 $P_i(t)$ 组成的曲线 $P(t)$ 称为三次 C-Cardinal 样条曲线;

所述 p-nary 细分曲线满足如下公式:

$$P_j^{k+1} = \sum_{i \in Z} \alpha_{j-pi} P_i^k$$

给定初始有序控制顶点集 $P^0 = \{P_j^0; j \in J_0\}$, $P_j^0 \in R^d$, J_0 为初始有序控制顶点的有限下标集; 设 $P^k = \{P_j^k; j \in J_k\}$ 为第 k 次细分后的有序控制顶点集, J_k 为相应的有限下标集; 其中 $\alpha = \{\alpha_j\}$ 为实系数序列, 只有有限个分量不为零, 称为 mask, 为形状参数; 均匀稳定 p-nary 细分曲线造型方式在曲线情形下实际包含了定义新有序控制点的 p 个细分规则:

$$\begin{cases} P_{pj}^{k+1} = \sum_i \alpha_{pj-pi} P_i^k = \sum_\beta \alpha_{p\beta} P_{j-\beta}^k, \\ P_{pj+1}^{k+1} = \sum_i \alpha_{pj+1-pi} P_i^k = \sum_\beta \alpha_{p\beta+1} P_{j-\beta}^k, \\ \vdots \\ P_{pj+p-1}^{k+1} = \sum_i \alpha_{pj-pi-1-pi} P_i^k = \sum_\beta \alpha_{p\beta+p} P_{j-\beta}^k, \end{cases}$$

式中, P_j^{k+1} 代表第 $k+1$ 次细分后的第 j 个有序控制顶点, P_i^k 代表第 k 次细分后的第 i 个有序控制顶点, Z 代表整数合集, i 代表整数次, 给定 i 小于 j , j 为初始给定值, α_{j-pi} 代表 $j-pi$ 个实系数参数, p 代表整数次细分次数, p 大于等于 1; $\beta = j-i$, β 大于 0;

若 $p=1$, 则细分规则为:

$$P_j^{k+1} = \sum_i \alpha_{j-i} P_i^k = \sum_\beta \alpha_\beta P_{j-\beta}^k ;$$

若 $p=2$, 则细分规则为:

$$P_{2j}^{k+1} = \sum_i \alpha_{2j-2i} P_i^k = \sum_\beta \alpha_{2\beta} P_{j-\beta}^k \text{ 和 } P_{2j+1}^{k+1} = \sum_i \alpha_{2j+1-2i} P_i^k = \sum_\beta \alpha_{2\beta+1} P_{j-\beta}^k ;$$

若 $p=3$, 则细分规则为 3 个, 以此类推。

2. 根据权利要求 1 所述的带有鼓包和凹缝结构的跨声速压气机转子叶片, 其特征在于, 根据不同要求, 调整所述鼓包 (6) 和所述凹缝 (9) 相对于叶片弦向方向的位置, 控制所述鼓包 (6) 和所述凹缝 (9) 相对于叶高方向的长度和连续性, 通过不同所述鼓包 (6) 和所述凹缝 (9) 的造型方式的组合, 实现改型转子叶片对于流场结构和气动参数的影响, 且分别构成连续性全叶高鼓包和凹缝叶片、连续性同长度和位置的部分叶高鼓包和凹缝叶片、连续性不相同长度和位置的部分叶高鼓包和凹缝叶片、非连续性全叶高鼓包和凹缝叶片、非连续性同长度和位置部分叶高鼓包和凹缝叶片以及非连续性不相同长度和位置部分叶高鼓包和凹缝叶片。

3. 根据权利要求 1 或 2 所述的带有鼓包和凹缝结构的跨声速压气机转子叶片, 其特征在于, 所述鼓包 (6) 的流向起始位置 (5) 和流向结束位置 (7) 均与所述吸力面 (4) 在流向光滑相切; 所述凹缝 (9) 的流向起始位置 (8) 和流向结束位置 (10) 根据造型方式均与所述吸力面 (4) 在流向上进行光滑过渡的拟合;

通过控制不同叶高截面上所述鼓包(6)和所述凹缝(9)的起始位置,使得沿叶高方向所述鼓包(6)和所述凹缝(9)的起始位置相对于弦长百分比保持相同或不同。

4.根据权利要求1或2所述的带有鼓包和凹缝结构的跨声速压气机转子叶片,其特征在于,所述鼓包(6)和所述凹缝(9)沿叶高方向的长度和位置可以改变,通过改变所述鼓包(6)的展向起始位置(11)和展向结束位置(13)与所述凹缝(9)的展向起始位置(12)和展向结束位置(14),构成全叶高鼓包和凹缝叶片与部分叶高鼓包和凹缝叶片,所述部分叶高鼓包和凹缝叶片包括:同长度和位置的部分叶高鼓包和凹缝叶片以及不相同长度和位置的部分叶高鼓包和凹缝叶片。

一种带有鼓包和凹缝结构的跨声速压气机转子叶片

技术领域

[0001] 本发明涉及叶轮机械技术领域,具体而言,尤其涉及一种带有鼓包和凹缝结构的跨声速压气机转子叶片。

背景技术

[0002] 对于跨声速压气机来说,激波损失以及分离损失是其流动损失主要来源之一。目前已有的流动控制方法分为主动控制方法和被动控制方法。主动控制方法,如边界层抽吸、等离子激励、合成射流和叶顶喷气等,虽然可以很好的控制激波及分离损失,但是需要添加额外的装置以及能量源,这不仅增加压气机的加工制造成本,而且还会增加压气机设计时的难度,而被动控制方法,如叶型优化、掠叶片设计、空腔与多孔介质表面、机匣处理、涡流发生器等,一般是通过改变压气机转子叶片或流道的设计变量来实现流动控制的目的,通常会导致压气机叶型或者槽道结构较大幅度的改变。激波控制鼓包作为一种相对较新的被动流动控制技术,虽然可以有效的改善跨声速压气机内部的激波系结构,但是对于流动分离的控制效果还有待进一步提高,同时鼓包的添加也会在一定程度上增加压气机转子叶片的质量。

发明内容

[0003] 根据上述提出的激波控制鼓包作为一种相对较新的被动流动控制技术,虽然可以有效的改善跨声速压气机内部的激波系结构,但是对于流动分离的控制效果还有待进一步提高,同时鼓包的添加也会在一定程度上增加压气机转子叶片的质量的技术问题,而提供一种带有鼓包和凹缝结构的跨声速压气机转子叶片。本发明主要通过添加鼓包和凹缝结构对激波和分离进行控制来减少强激波损失和分离引起的流动损失,进而提高跨声速压气机的性能;可以在不需要添加辅助装置的情况下,实现对激波和分离进行控制;并且通过在现有叶型的基础上进行改变鼓包和凹缝的造型方式,节省了重新设计新型叶片的设计难度;通过调整鼓包和凹缝相对叶高方向的长度和连续性,控制叶片的质量,使得总质量不变或相应减少,并且具有设计灵活、成本相对较低等优点。

[0004] 本发明采用的技术手段如下:

[0005] 一种带有鼓包和凹缝结构的跨声速压气机转子叶片,包括压气机动叶叶片,所述压气机动叶叶片包括叶顶、叶根、吸力面和压力面,所述吸力面上设有鼓包;

[0006] 所述吸力面上还设有凹缝,所述凹缝设置在所述鼓包的后侧;所述凹缝的造型方式设有7种;

[0007] 所述鼓包和所述凹缝沿叶高方向的连续性进行改变,分别构成连续性全叶高鼓包和凹缝叶片、连续性部分叶高鼓包和凹缝叶片、非连续性全叶高鼓包和凹缝叶片和非连续性部分叶高鼓包和凹缝叶片。

[0008] 进一步地,根据不同要求,调整所述鼓包和所述凹缝相对于叶片弦向方向的位置,控制所述鼓包和所述凹缝相对于叶高方向(叶展方向)的长度和连续性,通过不同所述鼓包

和所述凹缝的造型方式的组合,实现改型转子叶片对于流场结构和气动参数的影响,且分别构成连续性全叶高鼓包和凹缝叶片、连续性同长度和位置的部分叶高鼓包和凹缝叶片、连续性不相同长度和位置的部分叶高鼓包和凹缝叶片、非连续性全叶高鼓包和凹缝叶片、非连续性同长度和位置部分叶高鼓包和凹缝叶片以及非连续性不相同长度和位置部分叶高鼓包和凹缝叶片。

[0009] 进一步地,所述鼓包的流向起始位置和流向结束位置均与所述吸力面在流向光滑相切;所述凹缝的流向起始位置和流向结束位置根据造型方式均与所述吸力面在流向上进行光滑过渡的拟合;

[0010] 通过控制不同叶高截面上所述鼓包和所述凹缝的起始位置,使得沿叶高方向所述鼓包和所述凹缝的起始位置相对于弦长百分比保持相同或不同,根据具体转子叶片具体设计。

[0011] 进一步地,所述鼓包和所述凹缝沿叶高方向的长度和位置可以改变,通过改变所述鼓包的展向起始位置和展向结束位置与所述凹缝的展向起始位置和展向结束位置,构成全叶高鼓包和凹缝叶片与部分叶高鼓包和凹缝叶片,所述部分叶高鼓包和凹缝叶片包括:同长度和位置的部分叶高鼓包和凹缝叶片以及不相同长度和位置的部分叶高鼓包和凹缝叶片,根据具体转子叶片具体设计。

[0012] 进一步地,7种所述凹缝的造型方式中有5种造型方式与所述鼓包的造型方式相同,分别为CST(Class function/Shape function Transformation)参数化、多项式插值函数、B样条曲线、三次C-Cardinal样条曲线和p-nary细分曲线造型方式;

[0013] 所述凹缝的造型方式还可采用圆弧造型方式构建或方形造型方式构建;

[0014] 所述凹缝的造型所涉及到的参数包括所述凹缝的深度H2和长度L2,分别与所述鼓包的高度H1和长度L1相对应。

[0015] 进一步地,所述凹缝的深度H2和长度L2分别与所述鼓包的高度H1和长度L1相对应是指在涉及的公式中,当鼓包的高度为m,则凹缝深度也为m,只是方向相反, $m>0$;鼓包的长度为n,则凹缝长度也为n,方向相同, $n>0$ 。

[0016] 进一步地,采用圆弧造型方式构建得到圆弧形凹缝,其圆弧直径D用来控制长度L2和深度H2,长度L2为 $0.05b-0.2b$,b为叶片弦长,深度H2不超过所在位置处叶片厚度的50%;

[0017] 通过改变圆弧直径、凹缝长度、凹缝深度来控制所述凹缝的弯度和形状,实现具有不同特征的圆弧形凹缝。

[0018] 进一步地,采用方形造型方式构建得到矩形凹缝,其长度L2为 $0.05b-0.2b$,b为叶片弦长,深度H2不超过所在位置处叶片厚度的50%;

[0019] 通过改变凹缝的长深比控制凹缝产生的流向涡的尺寸,实现对吸力面流动损失的抑制;同时,凹缝底部可以根据具体转子的加工工艺需求,使用圆弧倒角或直线倒角,对凹缝造型进行加工制造。

[0020] 进一步地,所述CST参数化的形状函数S(x)的表达式满足如下公式:

$$[0021] \quad S(x) = \sum_{i=0}^n b_i B_n^i(x) = \sum_{i=0}^n b_i [K_n^i x^i (1-x)^{n-1}]$$

$$[0022] \quad K_n^i = \frac{n!}{i!(n-1)!}$$

[0023] 式中, B_n^i 为Bernstein多项式(伯恩斯坦多项式), i 为 B_n^i 的指数, n 为 B_n^i 的阶数; K_n^i 为组合数; b_i 是引进的权重因子, $i=0, 1, \dots, n$; $X=x/b$, b 为叶片弦长, x 为 X 轴坐标;

[0024] 所述多项式插值函数 y 满足如下公式:

$$[0025] \quad y=f(x)(1-x)^{0.5}x^{0.5} \pm g(x)(1-x)^{1.5}x^{0.5}$$

[0026] 式中, $f(x)$ 、 $g(x)$ 为多项式插值函数, $f(x)=\sum_{i=0}^n A_i x^i$ 、 $g(x)=\sum_{i=0}^n B_i x^i$, x 为节点矢量; A_i 、 B_i 为多项式系数, 可通过最小二乘法对原始叶片数据拟合得到; 改变 $f(x)$ 中的多项式的系数和阶次, 可以改变圆弧曲线的弯曲程度, 进而改变鼓包的弯度; 改变 $g(x)$ 中的多项式的系数和阶次, 可以改变鼓包的厚度等;

[0027] 所述B样条曲线为采用控制顶点定义曲线, B样条基函数是可以描述复杂形状并且具有全局性特殊的基函数, 其曲线方程 $P(u)$ 满足如下公式:

$$[0028] \quad P(u)=\sum_{i=0}^n d_j N_{i,k}(u)$$

[0029] 式中, d_j 为控制顶点, $j=(i-k, i-k+1, \dots, i)$, $N_{i,k}(u)$ 为 k 次规范B样条基函数, i 代表序号, $i=0, 1, 2, 3 \dots n$, k 为基函数次数, u 代表参数, 区间为 $[u_i, u_{i+k+1}]$; B样条曲线的基函数是多项式样条, 不仅与次数有关, 还与参数所在的节点区间有关, 这增加了B样条调控曲线的灵活性以及多样性;

[0030] 所述三次C-Cardinal样条曲线的数学定义式满足如下公式:

$$[0031] \quad P_i(t)=\sum_{j=0}^3 b_{i+j} \omega_{j,\alpha}(t)$$

$$[0032] \quad 0 \leq t \leq \alpha, i=0, 1, 2, \dots, n-3$$

[0033] 式中, 点 b_i 为给定的型值点, $i=0, 1, 2, 3 \dots n$, j 为 $0-3$, b_{i+j} 包含于 b_i 中, $\omega_{j,\alpha}(t)$ 为样条基函数, t 为节点值, 在样条曲线绘制中其值大小决定了所绘曲线的精度, 参数 α 可在不影响曲线连续性下对样条曲线进行微调, 亦称之为微调因子, α 大于 0 , 曲线段 $P_i(t)$ 组成的曲线 $P(t)$ 称为三次C-Cardinal样条曲线;

[0034] 所述 p -nary 细分曲线满足如下公式:

$$[0035] \quad P_j^{k+1}=\sum_{i \in Z} \alpha_{j-pi} P_i^k$$

[0036] 给定初始有序控制顶点集 $P^0=\{P_j^k; j \in J_k\}$, $P_j^0 \in R^d$, J_0 为初始有序控制顶点的有限下标集; 设 $P^k=\{P_j^k; j \in J_k\}$ 为第 k 次细分后的有序控制顶点集, J_k 为相应的有限下标集; 其中 $\alpha=\{\alpha_j\}$ 为实系数序列, 只有有限个分量不为零, 称为mask, 为形状参数; 均匀稳定 p -nary 细分曲线造型方式在曲线情形下实际包含了定义新有序控制点的 p 个细分规则:

$$[0037] \quad \begin{cases} P_{pj}^{k+1}=\sum_i \alpha_{pj-pi} P_i^k=\sum_{\beta} \alpha_{p\beta} P_{j-\beta}^k, \\ P_{pj+1}^{k+1}=\sum_i \alpha_{pj+1-pi} P_i^k=\sum_{\beta} \alpha_{p\beta+1} P_{j-\beta}^k, \\ \vdots \\ P_{pj+p-1}^{k+1}=\sum_i \alpha_{pj-pi-1-pi} P_i^k=\sum_{\beta} \alpha_{p\beta+p} P_{j-\beta}^k, \end{cases}$$

[0038] 式中, P_j^{k+1} 代表第K+1次细分后的第j个有序控制顶点, P_i^k 代表第K次细分后的第i个有序控制顶点, Z代表整数合集, i代表整数次, 人为给定i小于j, j为初始给定值, α_{j-pi} 代表j-pi个实系数参数, p代表整数次细分次数, p大于等于1; $\beta = j - i$, β 大于0;

[0039] 若p=1, 则细分规则为:

$$[0040] \quad P_j^{k+1} = \sum_i \alpha_{j-i} P_i^k = \sum_\beta \alpha_\beta P_{j-\beta}^k ;$$

[0041] 若p=2, 则细分规则为:

$$[0042] \quad P_{2j}^{k+1} = \sum_i \alpha_{2j-2i} P_i^k = \sum_\beta \alpha_{2\beta} P_{j-\beta}^k \text{ 和 } P_{2j+1}^{k+1} = \sum_i \alpha_{2j+1-2i} P_i^k = \sum_\beta \alpha_{2\beta+1} P_{j-\beta}^k ;$$

[0043] 若p=3, 则细分规则为3个, 以此类推。

[0044] 较现有技术相比, 本发明具有以下优点:

[0045] 1、本发明提供的带有鼓包和凹缝结构的跨声速压气机转子叶片, 通过添加鼓包和凹缝结构可对激波和分离进行控制来减少强激波损失和分离引起的流动损失, 进而提高跨声速压气机的性能。

[0046] 2、本发明提供的带有鼓包和凹缝结构的跨声速压气机转子叶片, 可以在不需要添加辅助装置的情况下, 实现对激波和分离进行控制; 并且通过在现有叶型的基础上进行改变鼓包和凹缝的造型方式, 节省了重新设计新型叶片的设计难度。

[0047] 3、本发明提供的带有鼓包和凹缝结构的跨声速压气机转子叶片, 可以根据不同工况, 分别调整鼓包和凹缝相对叶高方向的长度和连续性, 即连续性全叶高和连续性部分叶高的鼓包和凹缝、非连续性全叶高和非连续性部分叶高的鼓包和凹缝, 使鼓包和凹缝更精准的控制激波及分离情况。

[0048] 4、本发明提供的带有鼓包和凹缝结构的跨声速压气机转子叶片, 通过调整鼓包和凹缝相对叶高方向的长度和连续性, 控制叶片的质量, 使得总质量不变或相应减少; 并且具有设计灵活、成本相对较低等优点。

[0049] 综上, 应用本发明的技术方案能够解决现有技术中的激波控制鼓包作为一种相对较新的被动流动控制技术, 虽然可以有效的改善跨声速压气机内部的激波系结构, 但是对于流动分离的控制效果还有待进一步提高, 同时鼓包的添加也会在一定程度上增加压气机转子叶片的质量的问题。

[0050] 基于上述理由本发明可在跨声速压气机等叶轮机械领域广泛推广。

附图说明

[0051] 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做以简单地介绍, 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性的前提下, 还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0052] 图1为本发明带有连续性全叶高鼓包和凹槽的跨声速压气机转子示意图。

[0053] 图2为本发明带有连续性全叶高鼓包和凹槽的跨声速压气机转子叶片示意图。

[0054] 图3为本发明连续性同长度和位置的部分叶高鼓包和凹槽的跨声速压气机转子叶片示意图。

[0055] 图4为本发明连续性同长度和位置的部分叶高鼓包和凹槽的跨声速压气机转子示意图。

[0056] 图5为本发明连续性不同长度和位置的部分叶高鼓包和凹槽的跨声速压气机转子叶片示意图。

[0057] 图6为本发明连续性不同长度和位置的部分叶高鼓包和凹槽的跨声速压气机转子示意图。

[0058] 图中:1、压气机动叶叶片;2、轮毂;3、轮盘;4、吸力面;5、流向起始位置;6、鼓包;7、流向结束位置;8、流向起始位置;9、凹缝;10、流向结束位置;11、展向起始位置;12、展向起始位置;13、展向结束位置;14、展向结束位置;15、叶顶;16、叶根;17、叶片前缘;18、叶片尾缘;19、压力面。

具体实施方式

[0059] 需要说明的是,在不冲突的情况下,本发明中的实施例及实施例中的特征可以相互组合。下面将参考附图并结合实施例来详细说明本发明。

[0060] 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、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。以下对至少一个示例性实施例的描述实际上仅仅是说明性的,决不作为对本发明及其应用或使用的任何限制。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。

[0061] 需要注意的是,这里所使用的术语仅是为了描述具体实施方式,而非意图限制根据本发明的示例性实施方式。如在这里所使用的,除非上下文另外明确指出,否则单数形式也意图包括复数形式,此外,还应当理解的是,当在本说明书中使用术语“包含”和/或“包括”时,其指明存在特征、步骤、操作、器件、组件和/或它们的组合。

[0062] 为了不断提高压气机增压比和效率,需要对压气机内部流动情况进行深入了解并发展和应用各种流动控制技术。对于跨声速压气机来说,由于压气机通道存在超声速区域,会产生较强的激波,由激波引起的损失主要为以下两个方面:一是激波本身带来的损失;二是激波会诱导边界层分离,使得边界层分离损失增加。为了提高跨声速压气机性能,合理的控制激波损失和分离损失是一种有效的方法。

[0063] 本发明提供了一种带有鼓包和凹缝结构的跨声速压气机转子叶片,通过调整鼓包和凹缝的造型方式、布置位置和配合方式得到带有鼓包和凹缝的压气机转子叶片,并且可以调整鼓包沿叶高方向的长度和连续性,适应不同工况,改善压气机内部的激波系结构从而实现减弱激波强度、降低分离损失、提高压气机气动性能的目的。

[0064] 如图所示,所述带有鼓包和凹缝结构的跨声速压气机转子叶片,包括压气机动叶叶片1,所述压气机动叶叶片1包括叶顶15、叶根16、吸力面4和压力面19,所述吸力面4上设有鼓包6。

[0065] 所述吸力面4上还设有凹缝9,所述凹缝9设置在所述鼓包6的后侧;所述凹缝9的造型方式设有7种。

[0066] 所述鼓包6和所述凹缝9沿叶高方向的连续性进行改变,分别构成连续性全叶高鼓

包和凹缝叶片、连续性部分叶高鼓包和凹缝叶片、非连续性全叶高鼓包和凹缝叶片和非连续性部分叶高鼓包和凹缝叶片。

[0067] 优选的,根据不同要求,调整所述鼓包6和所述凹缝9相对于叶片弦向方向的位置,控制所述鼓包6和所述凹缝9相对于叶高方向(叶展方向)的长度和连续性,通过不同所述鼓包6和所述凹缝9的造型方式的组合,实现改型转子叶片对于流场结构和气动参数的影响,且分别构成连续性全叶高鼓包和凹缝叶片、连续性同长度和位置的部分叶高鼓包和凹缝叶片、连续性不相同长度和位置的部分叶高鼓包和凹缝叶片、非连续性全叶高鼓包和凹缝叶片、非连续性同长度和位置部分叶高鼓包和凹缝叶片以及非连续性不相同长度和位置部分叶高鼓包和凹缝叶片。

[0068] 优选的,所述鼓包6的流向起始位置5和流向结束位置7均与所述吸力面4在流向光滑相切;所述凹缝9的流向起始位置8和流向结束位置10根据造型方式均与所述吸力面4在流向上进行光滑过渡的拟合;

[0069] 通过控制不同叶高截面上所述鼓包6和所述凹缝9的起始位置,使得沿叶高方向所述鼓包6和所述凹缝9的起始位置相对于弦长百分比保持相同或不同,根据具体转子叶片具体设计。

[0070] 优选的,所述鼓包6和所述凹缝9沿叶高方向的长度和位置可以改变,通过改变所述鼓包6的展向起始位置11和展向结束位置13与所述凹缝9的展向起始位置12和展向结束位置14,构成全叶高鼓包和凹缝叶片与部分叶高鼓包和凹缝叶片,所述部分叶高鼓包和凹缝叶片包括:同长度和位置的部分叶高鼓包和凹缝叶片以及不相同长度和位置的部分叶高鼓包和凹缝叶片,根据具体转子叶片具体设计。

[0071] 优选的,7种所述凹缝9的造型方式中有5种造型方式与所述鼓包6的造型方式相同,分别为CST(Class function/Shape function Transformation)参数化、多项式插值函数、B样条曲线、三次C-Cardinal样条曲线和p-nary细分曲线造型方式;

[0072] 所述凹缝9的造型方式还可采用圆弧造型方式构建或方形造型方式构建;

[0073] 所述凹缝9的造型所涉及到的参数包括所述凹缝9的深度H2和长度L2,分别与所述鼓包6的高度H1和长度L1相对应。

[0074] 优选的,所述凹缝的深度H2和长度L2分别与所述鼓包的高度H1和长度L1相对应是指在涉及的公式中,当鼓包的高度为m,则凹缝深度也为m,只是方向相反, $m>0$;鼓包的长度为n,则凹缝长度也为n,方向相同, $n>0$ 。

[0075] 优选的,采用圆弧造型方式构建得到圆弧形凹缝,其圆弧直径D用来控制长度L2和深度H2,长度L2为 $0.05b-0.2b$,b为叶片弦长,深度H2为不超过所在位置处叶片厚度的50%;

[0076] 通过改变圆弧直径、凹缝长度、凹缝深度来控制所述凹缝9的弯度和形状,实现具有不同特征的圆弧形凹缝。

[0077] 优选的,采用方形造型方式构建得到矩形凹缝,其长度L2为 $0.05b-0.2b$,b为叶片弦长,深度H2不超过所在位置处叶片厚度的50%;

[0078] 通过改变凹缝的长深比控制凹缝产生的流向涡的尺寸,实现对吸力面流动损失的抑制;同时,凹缝底部可以根据具体转子的加工工艺需求,使用圆弧倒角或直线倒角,对凹缝造型进行加工制造。

[0079] 优选的,所述CST参数化的形状函数S(x)的表达式满足如下公式:

$$[0080] \quad S(x) = \sum_{i=0}^n b_i B_n^i(x) = \sum_{i=0}^n b_i [K_n^i x^i (1-x)^{n-1}]$$

$$[0081] \quad K_n^i = \frac{n!}{i!(n-i)!}$$

[0082] 式中, B_n^i 为Bernstein多项式(伯恩斯坦多项式), i 为 B_n^i 的指数, n 为 B_n^i 的阶数; K_n^i 为组合数; b_i 是引进的权重因子, $i=0, 1, \dots, n$; $X=x/b$, b 为叶片弦长, x 为 X 轴坐标;

[0083] 所述多项式插值函数 y 满足如下公式:

$$[0084] \quad y = f(x) (1-x)^{0.5} x^{0.5} \pm g(x) (1-x)^{1.5} x^{0.5}$$

[0085] 式中, $f(x)$ 、 $g(x)$ 为多项式插值函数, $f(x) = \sum_{i=0}^n A_i x^i$ 、 $g(x) = \sum_{i=0}^n B_i x^i$, x 为节点矢量; A_i 、 B_i 为多项式系数, 可通过最小二乘法对原始叶片数据拟合得到; 改变 $f(x)$ 中的多项式的系数和阶次, 可以改变圆弧曲线的弯曲程度, 进而改变鼓包的弯度; 改变 $g(x)$ 中的多项式的系数和阶次, 可以改变鼓包的厚度等;

[0086] 所述B样条曲线为采用控制顶点定义曲线, B样条基函数是可以描述复杂形状并且具有全局性特殊的基函数, 其曲线方程 $P(u)$ 满足如下公式:

$$[0087] \quad P(u) = \sum_{i=0}^n d_j N_{i,k}(u)$$

[0088] 式中, d_j 为控制顶点, $j = (i-k, i-k+1, \dots, i)$, $N_{i,k}(u)$ 为 k 次规范B样条基函数, i 代表序号, $i=0, 1, 2, 3 \dots n$, k 为基函数次数, u 代表参数, 区间为 $[u_i, u_{i+k+1}]$; B样条曲线的基函数是多项式样条, 不仅与次数有关, 还与参数所在的节点区间有关, 这增加了B样条调控曲线的灵活性以及多样性;

[0089] 所述三次C-Cardinal样条曲线的数学定义式满足如下公式:

$$[0090] \quad P_i(t) = \sum_{j=0}^3 b_{i+j} \omega_{j,\alpha}(t)$$

$$[0091] \quad 0 \leq t \leq \alpha, i=0, 1, 2, \dots, n-3$$

[0092] 式中, 点 b_i 为给定的型值点, $i=0, 1, 2, 3 \dots n$, j 为 $0-3$, b_{i+j} 包含于 b_i 中, $\omega_{j,\alpha}(t)$ 为样条基函数, t 为节点值, 在样条曲线绘制中其值大小决定了所绘曲线的精度, 参数 α 可在不影响曲线连续性下对样条曲线进行微调, 亦称之为微调因子, α 大于 0 , 曲线段 $P_i(t)$ 组成的曲线 $P(t)$ 称为三次C-Cardinal样条曲线;

[0093] 所述 p -nary 细分曲线满足如下公式:

$$[0094] \quad P_j^{k+1} = \sum_{i \in Z} \alpha_{j-pi^k} P_i^k$$

[0095] 给定初始有序控制顶点集 $P^0 = \{P_j^k; j \in J_k\}$, $P_j^0 \in R^d$, J_0 为初始有序控制顶点的有限下标集; 设 $P^k = \{P_j^k; j \in J_k\}$ 为第 k 次细分后的有序控制顶点集, J_k 为相应的有限下标集; 其中 $\alpha = \{\alpha_j\}$ 为实系数序列, 只有有限个分量不为零, 称为mask, 为形状参数; 均匀稳定 p -nary 细分曲线造型方式在曲线情形下实际包含了定义新有序控制点的 p 个细分规则:

$$[0096] \quad \begin{cases} P_{pj}^{k+1} = \sum_i \alpha_{pj-pi} P_i^k = \sum_\beta \alpha_{p\beta} P_{j-\beta}^k, \\ P_{pj+1}^{k+1} = \sum_i \alpha_{pj+1-pi} P_i^k = \sum_\beta \alpha_{p\beta+1} P_{j-\beta}^k, \\ \vdots \\ P_{pj+p-1}^{k+1} = \sum_i \alpha_{pj-pi-1-pi} P_i^k = \sum_\beta \alpha_{p\beta+\gamma} P_{j-\beta}^k, \end{cases}$$

[0097] 式中, P_j^{k+1} 代表第K+1次细分后的第j个有序控制顶点, P_i^k 代表第K次细分后的第i个有序控制顶点, Z代表整数合集, i代表整数次, 人为给定i小于j, j为初始给定值, α_{j-pi} 代表j-pi个实系数参数, p代表整数次细分次数, p大于等于1; $\beta = j - i$, β 大于0。

[0098] 若p=1, 则细分规则为:

$$[0099] \quad P_j^{k+1} = \sum_i \alpha_{j-i} P_i^k = \sum_\beta \alpha_\beta P_{j-\beta}^k ;$$

[0100] 若p=2, 则细分规则为:

$$[0101] \quad P_{2j}^{k+1} = \sum_i \alpha_{2j-2i} P_i^k = \sum_\beta \alpha_{2\beta} P_{j-\beta}^k \text{ 和 } P_{2j+1}^{k+1} = \sum_i \alpha_{2j+1-2i} P_i^k = \sum_\beta \alpha_{2\beta+1} P_{j-\beta}^k ;$$

[0102] 若p=3, 则细分规则为3个, 以此类推。

[0103] 本发明提出的带有鼓包和凹缝结构的跨声速压气机转子叶片, 结合了鼓包和凹缝结构在流动控制方面的优点, 不仅可以有效控制激波强度、降低激波损失, 而且还能抑制流动分离、减小流动分离损失, 同时还能使叶片总质量基本不改变。

[0104] 实施例1

[0105] 如图1-2所示, 一种带有鼓包和凹缝结构的跨声速压气机转子叶片, 包括压气机动叶叶片1, 该压气机动叶叶片1为带有连续性全叶高鼓包和凹槽结构的跨声速压气机转子叶片, 安装在跨声速压气机转子上。该跨声速压气机转子上设有的轮盘3为压气机动叶叶片1的基座, 轮盘3的外缘设有轮毂2, 多个包括压气机动叶叶片1沿轮毂2的周向依次间隔设置。

[0106] 所述压气机动叶叶片1包括叶顶15、叶根16、叶片前缘17、叶片尾缘18、吸力面4和压力面19, 所述吸力面4上设有鼓包6, 该鼓包6为连续性鼓包。

[0107] 所述吸力面4上还设有凹缝9, 所述凹缝9为连续性凹缝, 设置在所述鼓包6的后侧; 所述凹缝9的造型方式设有7种。

[0108] 所述鼓包6的流向起始位置5和流向结束位置7均与所述吸力面4在流向光滑相切; 所述凹缝9的流向起始位置8和流向结束位置10根据造型方式均与所述吸力面4在流向上进行光滑过渡的拟合; 通过控制不同叶高截面上所述鼓包6和所述凹缝9的起始位置, 使得沿叶高方向所述鼓包6和所述凹缝9的起始位置相对于弦长百分比保持相同或不同, 根据具体转子叶片具体设计。

[0109] 所述鼓包6和所述凹缝9沿叶高方向的长度和位置可以改变, 通过改变所述鼓包6的展向起始位置11和展向结束位置13与所述凹缝9的展向起始位置12和展向结束位置14, 构成全叶高鼓包和凹缝叶片, 根据具体转子叶片具体设计。

[0110] 所述鼓包6和所述凹缝9沿叶高方向的连续性进行改变, 构成连续性全叶高鼓包和凹缝叶片。

[0111] 根据不同要求,调整所述鼓包6和所述凹缝9相对于叶片弦向方向的位置,控制所述鼓包6和所述凹缝9相对于叶高方向(叶展方向)的长度和连续性,通过不同所述鼓包6和所述凹缝9的造型方式的组合,实现改型转子叶片对于流场结构和气动参数的影响,且构成连续性全叶高鼓包和凹缝叶片。

[0112] 本实施例中,所述凹缝9的造型方式采用圆弧造型方式构建,所述凹缝9的造型所涉及到的参数包括所述凹缝9的深度H2和长度L2,分别与所述鼓包6的高度H1和长度L1相对应,具体是指当鼓包6的高度为m,则凹缝9深度也为m,只是方向相反, $m>0$;鼓包6的长度为n,则凹缝9长度也为n,方向相同, $n>0$ 。采用圆弧造型方式构建得到圆弧形凹缝,其圆弧直径D用来控制长度L2和深度H2,长度L2为2-8mm,深度H2不超过1mm;通过改变圆弧直径、凹缝长度、凹缝深度来控制所述凹缝9的弯度和形状,实现具有不同特征的圆弧形凹缝。

[0113] 所述鼓包6的造型方式为CST参数化造型方式。

[0114] 所述CST参数化的形状函数S(x)的表达式满足如下公式:

$$[0115] \quad S(x) = \sum_{i=0}^n b_i B_n^i(x) = \sum_{i=0}^n b_i [K_n^i x^i (1-x)^{n-1}]$$

$$[0116] \quad K_n^i = \frac{n!}{i!(n-i)!}$$

[0117] 式中, B_n^i 为Bernstein多项式(伯恩斯坦多项式), i 为 B_n^i 的指数, n 为 B_n^i 的阶数; K_n^i 为组合数; b_i 是引进的权重因子, $i=0,1,\dots,n$;X=x/b,b为叶片弦长,x为X轴坐标。

[0118] 实施例2

[0119] 如图3-4所示,与实施例1不同的是,本实施例中,一种带有鼓包和凹缝结构的跨声速压气机转子叶片,包括压气机动叶叶片1,该压气机动叶叶片1为带有连续性同长度和位置的部分叶高鼓包和凹缝结构的跨声速压气机转子叶片,安装在跨声速压气机转子上。

[0120] 所述压气机动叶叶片1包括叶顶15、叶根16、叶片前缘17、叶片尾缘18、吸力面4和压力面19,所述吸力面4上设有鼓包6,该鼓包6为连续性鼓包。

[0121] 所述吸力面4上还设有凹缝9,所述凹缝9为连续性凹缝,设置在所述鼓包6的后侧;所述凹缝9的造型方式设有7种。

[0122] 所述鼓包6的流向起始位置5和流向结束位置7均与所述吸力面4在流向光滑相切;所述凹缝9的流向起始位置8和流向结束位置10根据造型方式均与所述吸力面4在流向上进行光滑过渡的拟合;通过控制不同叶高截面上所述鼓包6和所述凹缝9的起始位置,使得沿叶高方向所述鼓包6和所述凹缝9的起始位置相对于弦长百分比保持相同或不同,根据具体转子叶片具体设计。

[0123] 所述鼓包6和所述凹缝9沿叶高方向的长度和位置可以改变,通过改变所述鼓包6的展向起始位置11和展向结束位置13与所述凹缝9的展向起始位置12和展向结束位置14,构成同长度和位置的部分叶高鼓包和凹缝叶片,根据具体转子叶片具体设计。

[0124] 所述鼓包6和所述凹缝9沿叶高方向的连续性进行改变,构成连续性部分叶高鼓包和凹缝叶片。

[0125] 根据不同要求,调整所述鼓包6和所述凹缝9相对于叶片弦向方向的位置,控制所述鼓包6和所述凹缝9相对于叶高方向(叶展方向)的长度和连续性,通过不同所述鼓包6和所述凹缝9的造型方式的组合,实现改型转子叶片对于流场结构和气动参数的影响,从而构

成连续性同长度和位置的部分叶高鼓包和凹缝叶片。

[0126] 本实施例中,所述凹缝9的造型方式采用方形造型方式构建;所述凹缝9的造型所涉及到的参数包括所述凹缝9的深度H2和长度L2,分别与所述鼓包6的高度H1和长度L1相对应。采用方形造型方式构建得到矩形凹缝,其长度L2为2-8mm,深度H2小于等于1mm;通过改变凹缝的长深比控制凹缝产生的流向涡的尺寸,实现对吸力面流动损失的抑制;同时,凹缝底部可以根据具体转子的加工工艺需求,使用圆弧倒角或直线倒角,对凹缝造型进行加工制造。

[0127] 所述鼓包6的造型方式为多项式插值函数造型方式。

[0128] 所述多项式插值函数y满足如下公式:

$$[0129] \quad y = f(x) (1-x)^{0.5} x^{0.5} \pm g(x) (1-x)^{1.5} x^{0.5}$$

[0130] 式中, $f(x)$ 、 $g(x)$ 为多项式插值函数, $f(x) = \sum_{i=0}^n A_i x^i$ 、 $g(x) = \sum_{i=0}^n B_i x^i$, x 为节点矢量; A_i 、 B_i 为多项式系数,可通过最小二乘法对原始叶片数据拟合得到;改变 $f(x)$ 中的多项式的系数和阶次,可以改变圆弧曲线的弯曲程度,进而改变鼓包的弯度;改变 $g(x)$ 中的多项式的系数和阶次,可以改变鼓包的厚度等。

[0131] 实施例3

[0132] 如图5-6所示,与实施例1不同的是,本实施例中,一种带有鼓包和凹缝结构的跨声速压气机转子叶片,包括压气机动叶叶片1,该压气机动叶叶片1为带有连续性不相同长度和位置的部分叶高鼓包和凹缝结构的跨声速压气机转子叶片,安装在跨声速压气机转子上。

[0133] 所述压气机动叶叶片1包括叶顶15、叶根16、叶片前缘17、叶片尾缘18、吸力面4和压力面19,所述吸力面4上设有鼓包6,该鼓包6为连续性鼓包。

[0134] 所述吸力面4上还设有凹缝9,所述凹缝9为连续性凹缝,设置在所述鼓包6的后侧;所述凹缝9的造型方式设有7种。

[0135] 所述鼓包6的流向起始位置5和流向结束位置7均与所述吸力面4在流向光滑相切;所述凹缝9的流向起始位置8和流向结束位置10根据造型方式均与所述吸力面4在流向上进行光滑过渡的拟合;通过控制不同叶高截面上所述鼓包6和所述凹缝9的起始位置,使得沿叶高方向所述鼓包6和所述凹缝9的起始位置相对于弦长百分比保持相同或不同,根据具体转子叶片具体设计。

[0136] 所述鼓包6和所述凹缝9沿叶高方向的长度和位置可以改变,通过改变所述鼓包6的展向起始位置11和展向结束位置13与所述凹缝9的展向起始位置12和展向结束位置14,构成不相同长度和位置的部分叶高鼓包和凹缝叶片,根据具体转子叶片具体设计。

[0137] 所述鼓包6和所述凹缝9沿叶高方向的连续性进行改变,构成连续性部分叶高鼓包和凹缝叶片。

[0138] 根据不同要求,调整所述鼓包6和所述凹缝9相对于叶片弦向方向的位置,控制所述鼓包6和所述凹缝9相对于叶高方向(叶展方向)的长度和连续性,通过不同所述鼓包6和所述凹缝9的造型方式的组合,实现改型转子叶片对于流场结构和气动参数的影响,从而构成连续性不相同长度和位置的部分叶高鼓包和凹缝叶片。

[0139] 7种所述凹缝9的造型方式中有5种造型方式与所述鼓包6的造型方式相同,分别为CST(Class function/Shape function Transformation)参数化、多项式插值函数、B样条

曲线、三次C-Cardinal样条曲线和p-nary细分曲线造型方式。本实施例中,所述凹缝9的造型方式为CST参数化造型方式。

[0140] 所述CST参数化的形状函数S(x)的表达式满足如下公式:

$$[0141] \quad S(x) = \sum_{i=0}^n b_i B_n^i(x) = \sum_{i=0}^n b_i [K_n^i x^i (1-x)^{n-1}]$$

$$[0142] \quad K_n^i = \frac{n!}{i!(n-1)!}$$

[0143] 式中, B_n^i 为Bernstein多项式(伯恩斯坦多项式), i 为 B_n^i 的指数, n 为 B_n^i 的阶数; K_n^i 为组合数; b_i 是引进的权重因子, $i=0, 1, \dots, n$; $X=x/b$, b 为叶片弦长, x 为X轴坐标。

[0144] 所述鼓包6的造型方式为B样条曲线造型方式。

[0145] 所述B样条曲线为采用控制顶点定义曲线, B样条基函数是可以描述复杂形状并且具有全局性特殊的基函数, 其曲线方程P(u)满足如下公式:

$$[0146] \quad P(u) = \sum_{i=0}^n d_j N_{i,k}(u)$$

[0147] 式中, d_j 为控制顶点, $j=(i-k, i-k+1, \dots, i)$, $N_{i,k}(u)$ 为k次规范B样条基函数, i 代表序号, $i=0, 1, 2, 3, \dots, n$, k 为基函数次数, u 代表参数, 区间为 $[u_i, u_{i+k+1}]$; B样条曲线的基函数是多项式样条, 不仅与次数有关, 还与参数所在的节点区间有关, 这增加了B样条调控曲线的灵活性以及多样性。

[0148] 实施例4

[0149] 与实施例1不同的是, 本实施例中, 一种带有鼓包和凹缝结构的跨声速压气机转子叶片, 包括压气机动叶叶片1, 该压气机动叶叶片1为带有非连续性全叶高鼓包和凹缝结构的跨声速压气机转子叶片, 安装在跨声速压气机转子上。

[0150] 所述压气机动叶叶片1包括叶顶15、叶根16、叶片前缘17、叶片尾缘18、吸力面4和压力面19, 所述吸力面4上设有鼓包6, 该鼓包6为非连续性鼓包。

[0151] 所述吸力面4上还设有凹缝9, 所述凹缝9为非连续性凹缝, 设置在所述鼓包6的后侧; 所述凹缝9的造型方式设有7种。

[0152] 所述鼓包6的流向起始位置5和流向结束位置7均与所述吸力面4在流向光滑相切; 所述凹缝9的流向起始位置8和流向结束位置10根据造型方式均与所述吸力面4在流向上进行光滑过渡的拟合; 通过控制不同叶高截面上所述鼓包6和所述凹缝9的起始位置, 使得沿叶高方向所述鼓包6和所述凹缝9的起始位置相对于弦长百分比保持相同或不同, 根据具体转子叶片具体设计。

[0153] 所述鼓包6和所述凹缝9沿叶高方向的长度和位置可以改变, 通过改变所述鼓包6的展向起始位置11和展向结束位置13与所述凹缝9的展向起始位置12和展向结束位置14, 构成全叶高鼓包和凹缝叶片, 根据具体转子叶片具体设计。

[0154] 所述鼓包6和所述凹缝9沿叶高方向的连续性进行改变, 构成非连续性全叶高鼓包和凹缝叶片。

[0155] 根据不同要求, 调整所述鼓包6和所述凹缝9相对于叶片弦向方向的位置, 控制所述鼓包6和所述凹缝9相对于叶高方向(叶展方向)的长度和连续性, 通过不同所述鼓包6和

所述凹缝9的造型方式的组合,实现改型转子叶片对于流场结构和气动参数的影响,从而构成非连续性全叶高鼓包和凹缝叶片。

[0156] 7种所述凹缝9的造型方式中有5种造型方式与所述鼓包6的造型方式相同,分别为CST(Class function/Shape function Transformation)参数化、多项式插值函数、B样条曲线、三次C-Cardinal样条曲线和p-nary细分曲线造型方式。本实施例中所述凹缝9的造型方式为多项式插值函数造型方式。

[0157] 所述多项式插值函数y满足如下公式:

$$[0158] \quad y=f(x)(1-x)^{0.5}x^{0.5} \pm g(x)(1-x)^{1.5}x^{0.5}$$

[0159] 式中, $f(x)$ 、 $g(x)$ 为多项式插值函数, $f(x)=\sum_{i=0}^n A_i x^i$ 、 $g(x)=\sum_{i=0}^n B_i x^i$, x 为节点矢量; A_i 、 B_i 为多项式系数,可通过最小二乘法对原始叶片数据拟合得到;改变 $f(x)$ 中的多项式的系数和阶次,可以改变圆弧曲线的弯曲程度,进而改变鼓包的弯度;改变 $g(x)$ 中的多项式的系数和阶次,可以改变鼓包的厚度等。

[0160] 所述鼓包6的造型方式为三次C-Cardinal样条曲线。

[0161] 所述三次C-Cardinal样条曲线的数学定义式满足如下公式:

$$[0162] \quad P_i(t) = \sum_{j=0}^3 b_{i+j} \omega_{j,\alpha}(t)$$

[0163] $0 \leq t \leq \alpha, i=0,1,2,\dots,n-3$

[0164] 式中,点 b_i 为给定的型值点, $i=0,1,2,3,\dots,n$, j 为 $0-3$, b_{i+j} 包含于 b_i 中, $\omega_{j,\alpha}(t)$ 为样条基函数, t 为节点值,在样条曲线绘制中其值大小决定了所绘曲线的精度,参数 α 可在不影响曲线连续性下对样条曲线进行微调,亦称之为微调因子, α 大于0,曲线段 $P_i(t)$ 组成的曲线 $P(t)$ 称为三次C-Cardinal样条曲线。

[0165] 实施例5

[0166] 与实施例1不同的是,本实施例中,一种带有鼓包和凹缝结构的跨声速压气机转子叶片,包括压气机动叶叶片1,该压气机动叶叶片1为带有非连续性同长度和位置部分叶高鼓包和凹缝结构的跨声速压气机转子叶片,安装在跨声速压气机转子上。

[0167] 所述压气机动叶叶片1包括叶顶15、叶根16、叶片前缘17、叶片尾缘18、吸力面4和压力面19,所述吸力面4上设有鼓包6,该鼓包6为非连续性鼓包。

[0168] 所述吸力面4上还设有凹缝9,所述凹缝9为非连续性凹缝,设置在所述鼓包6的后侧;所述凹缝9的造型方式设有7种。

[0169] 所述鼓包6的流向起始位置5和流向结束位置7均与所述吸力面4在流向光滑相切;所述凹缝9的流向起始位置8和流向结束位置10根据造型方式均与所述吸力面4在流向上进行光滑过渡的拟合;通过控制不同叶高截面上所述鼓包6和所述凹缝9的起始位置,使得沿叶高方向所述鼓包6和所述凹缝9的起始位置相对于弦长百分比保持相同或不同,根据具体转子叶片具体设计。

[0170] 所述鼓包6和所述凹缝9沿叶高方向的长度和位置可以改变,通过改变所述鼓包6的展向起始位置11和展向结束位置13与所述凹缝9的展向起始位置12和展向结束位置14,构成同长度和位置的部分叶高鼓包和凹缝叶片,根据具体转子叶片具体设计。

[0171] 所述鼓包6和所述凹缝9沿叶高方向的连续性进行改变,构成非连续性部分叶高鼓

包和凹缝叶片。

[0172] 根据不同要求,调整所述鼓包6和所述凹缝9相对于叶片弦向方向的位置,控制所述鼓包6和所述凹缝9相对于叶高方向(叶展方向)的长度和连续性,通过不同所述鼓包6和所述凹缝9的造型方式的组合,实现改型转子叶片对于流场结构和气动参数的影响,从而构成非连续性同长度和位置部分叶高鼓包和凹缝叶片。

[0173] 7种所述凹缝9的造型方式中有5种造型方式与所述鼓包6的造型方式相同,分别为CST(Class function/Shape function Transformation)参数化、多项式插值函数、B样条曲线、三次C-Cardinal样条曲线和p-nary细分曲线造型方式;本实施例中,所述凹缝9的造型方式为B样条曲线造型方式。

[0174] 所述B样条曲线为采用控制顶点定义曲线,B样条基函数是可以描述复杂形状并且具有全局性特殊的基函数,其曲线方程 $P(u)$ 满足如下公式:

$$[0175] \quad P(u) = \sum_{i=0}^n d_j N_{i,k}(u)$$

[0176] 式中, d_j 为控制顶点, $j = (i-k, i-k+1, \dots, i)$, $N_{i,k}(u)$ 为k次规范B样条基函数,i代表序号, $i = 0, 1, 2, 3 \dots n$,k为基函数次数,u代表参数,区间为 $[u_i, u_{i+k+1}]$;B样条曲线的基函数是多项式样条,不仅与次数有关,还与参数所在的节点区间有关,这增加了B样条调控曲线的灵活性以及多样性。

[0177] 所述鼓包6的造型方式为p-nary细分曲线造型方式。

[0178] 所述p-nary细分曲线满足如下公式:

$$[0179] \quad P_j^{k+1} = \sum_{i \in Z} \alpha_{j-pi} P_i^k$$

[0180] 给定初始有序控制顶点集 $P^0 = \{P_j^k; j \in J_k\}$, $P_j^0 \in R^d$, J_0 为初始有序控制顶点的有限下标集;设 $P^k = \{P_j^k; j \in J_k\}$ 为第k次细分后的有序控制顶点集, J_k 为相应的有限下标集;其中 $\alpha = \{\alpha_j\}$ 为实系数序列,只有有限个分量不为零,称为mask,为形状参数;均匀稳定p-nary细分曲线造型方式在曲线情形下实际包含了定义新有序控制点的p个细分规则:

$$[0181] \quad \begin{cases} P_{pj}^{k+1} = \sum_i \alpha_{pj-pi} P_i^k = \sum_{\beta} \alpha_{p\beta} P_{j-\beta}^k, \\ P_{pj+1}^{k+1} = \sum_i \alpha_{pj+1-pi} P_i^k = \sum_{\beta} \alpha_{p\beta+1} P_{j-\beta}^k, \\ \vdots \\ P_{pj+p-1}^{k+1} = \sum_i \alpha_{pj-pi-1-pi} P_i^k = \sum_{\beta} \alpha_{p\beta+\gamma} P_{j-\beta}^k, \end{cases}$$

[0182] 式中, P_j^{k+1} 代表第K+1次细分后的第j个有序控制顶点, P_i^k 代表第K次细分后的第i个有序控制顶点,Z代表整数合集,i代表整数次,人为给定i小于j,j为初始给定值, α_{j-pi} 代表j-pi个实系数参数,p代表整数次细分次数,p大于等于1; $\beta = j-i$, β 大于0。

[0183] 若p=1,则细分规则为:

$$[0184] \quad P_j^{k+1} = \sum_i \alpha_{j-i} P_i^k = \sum_{\beta} \alpha_{\beta} P_{j-\beta}^k ;$$

[0185] 若 $p=2$,则细分规则为:

$$[0186] \quad P_{2j}^{k+1} = \sum_i \alpha_{2j-2i} P_i^k = \sum_\beta \alpha_{2\beta} P_{j-\beta}^k \quad \text{和} \quad P_{2j+1}^{k+1} = \sum_i \alpha_{2j+1-2i} P_i^k = \sum_\beta \alpha_{2\beta+1} P_{j-\beta}^k ;$$

[0187] 若 $p=3$,则细分规则为3个,以此类推。

[0188] 实施例6

[0189] 与实施例1不同的是,本实施例中,一种带有鼓包和凹缝结构的跨声速压气机转子叶片,包括压气机动叶叶片1,该压气机动叶叶片1为带有非连续性不相同长度和位置部分叶高鼓包和凹缝结构的跨声速压气机转子叶片,安装在跨声速压气机转子上。

[0190] 所述压气机动叶叶片1包括叶顶15、叶根16、叶片前缘17、叶片尾缘18、吸力面4和压力面19,所述吸力面4上设有鼓包6,该鼓包6为非连续性鼓包。

[0191] 所述吸力面4上还设有凹缝9,所述凹缝9为非连续性凹缝,设置在所述鼓包6的后侧;所述凹缝9的造型方式设有7种。

[0192] 所述鼓包6的流向起始位置5和流向结束位置7均与所述吸力面4在流向光滑相切;所述凹缝9的流向起始位置8和流向结束位置10根据造型方式均与所述吸力面4在流向上进行光滑过渡的拟合;通过控制不同叶高截面上所述鼓包6和所述凹缝9的起始位置,使得沿叶高方向所述鼓包6和所述凹缝9的起始位置相对于弦长百分比保持相同或不同,根据具体转子叶片具体设计。

[0193] 所述鼓包6和所述凹缝9沿叶高方向的长度和位置可以改变,通过改变所述鼓包6的展向起始位置11和展向结束位置13与所述凹缝9的展向起始位置12和展向结束位置14,构成不相同长度和位置的部分叶高鼓包和凹缝叶片,根据具体转子叶片具体设计。

[0194] 所述鼓包6和所述凹缝9沿叶高方向的连续性进行改变,构成非连续性部分叶高鼓包和凹缝叶片。

[0195] 根据不同要求,调整所述鼓包6和所述凹缝9相对于叶片弦向方向的位置,控制所述鼓包6和所述凹缝9相对于叶高方向(叶展方向)的长度和连续性,通过不同所述鼓包6和所述凹缝9的造型方式的组合,实现改型转子叶片对于流场结构和气动参数的影响,从而构成非连续性不相同长度和位置部分叶高鼓包和凹缝叶片。

[0196] 7种所述凹缝9的造型方式中有5种造型方式与所述鼓包6的造型方式相同,分别为CST(Class function/Shape function Transformation)参数化、多项式插值函数、B样条曲线、三次C-Cardinal样条曲线和p-nary细分曲线造型方式。本实施例中,所述凹缝9和所述鼓包6的的造型方式相同,均为三次C-Cardinal样条曲线或p-nary细分曲线造型方式。

[0197] 所述三次C-Cardinal样条曲线的数学定义式满足如下公式:

$$[0198] \quad P_i(t) = \sum_{j=0}^3 b_{i+j} \omega_{j,\alpha}(t)$$

$$[0199] \quad 0 \leq t \leq \alpha, i = 0, 1, 2, \dots, n-3$$

[0200] 式中,点 b_i 为给定的型值点, $i=0,1,2,3 \dots n$, j 为0-3, b_{i+j} 包含于 b_i 中, $\omega_{j,\alpha}(t)$ 为样条基函数, t 为节点值,在样条曲线绘制中其值大小决定了所绘曲线的精度,参数 α 可在不影响曲线连续性下对样条曲线进行微调,亦称之为微调因子, α 大于0,曲线段 $P_i(t)$ 组成的曲线 $P(t)$ 称为三次C-Cardinal样条曲线。

[0201] 所述p-nary细分曲线满足如下公式:

$$[0202] \quad P_j^{k+1} = \sum_{i \in Z} \alpha_{j-pi} P_i^k$$

[0203] 给定初始有序控制顶点集 $P^0 = \{P_j^k; j \in J_k\}$, $P_j^0 \in R^d$, J_0 为初始有序控制顶点的有限下标集; 设 $P^k = \{P_j^k; j \in J_k\}$ 为第 k 次细分后的有序控制顶点集, J_k 为相应的有限下标集; 其中 $\alpha = \{\alpha_j\}$ 为实系数序列, 只有有限个分量不为零, 称为 mask, 为形状参数; 均匀稳定 p -nary 细分曲线造型方式在曲线情形下实际包含了定义新有序控制点的 p 个细分规则:

$$[0204] \quad \begin{cases} P_{pj}^{k+1} = \sum_i \alpha_{pj-pi} P_i^k = \sum_\beta \alpha_{p\beta} P_{j-\beta}^k, \\ P_{pj+1}^{k+1} = \sum_i \alpha_{pj+1-pi} P_i^k = \sum_\beta \alpha_{p\beta+1} P_{j-\beta}^k, \\ \vdots \\ P_{pj+p-1}^{k+1} = \sum_i \alpha_{pj-pi-1-pi} P_i^k = \sum_\beta \alpha_{p\beta+\gamma} P_{j-\beta}^k, \end{cases}$$

[0205] 式中, P_j^{k+1} 代表第 $K+1$ 次细分后的第 j 个有序控制顶点, P_i^k 代表第 K 次细分后的第 i 个有序控制顶点, Z 代表整数合集, i 代表整数次, 人为给定 i 小于 j , j 为初始给定值, α_{j-pi} 代表 $j-pi$ 个实系数参数, p 代表整数次细分次数, p 大于等于 1; $\beta = j-i$, β 大于 0。

[0206] 若 $p=1$, 则细分规则为:

$$[0207] \quad P_j^{k+1} = \sum_i \alpha_{j-i} P_i^k = \sum_\beta \alpha_\beta P_{j-\beta}^k ;$$

[0208] 若 $p=2$, 则细分规则为:

$$[0209] \quad P_{2j}^{k+1} = \sum_i \alpha_{2j-2i} P_i^k = \sum_\beta \alpha_{2\beta} P_{j-\beta}^k \text{ 和 } P_{2j+1}^{k+1} = \sum_i \alpha_{2j+1-2i} P_i^k = \sum_\beta \alpha_{2\beta+1} P_{j-\beta}^k ;$$

[0210] 若 $p=3$, 则细分规则为 3 个, 以此类推。

[0211] 最后应说明的是: 以上各实施例仅用以说明本发明的技术方案, 而非对其限制; 尽管参照前述各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, 或者对其中部分或者全部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范围。

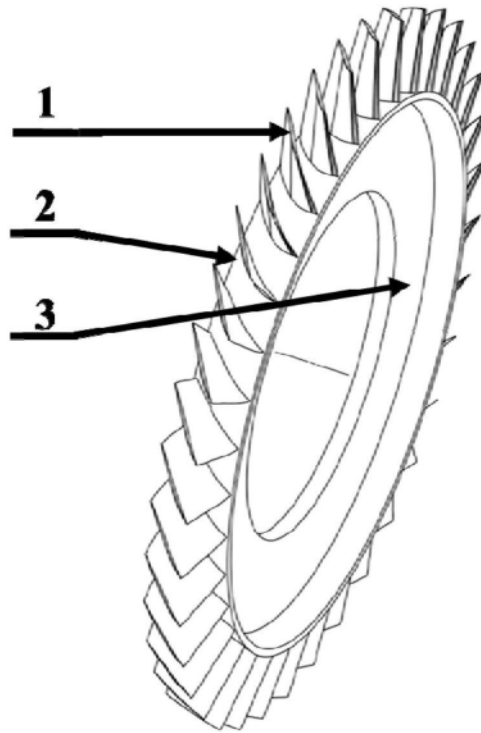


图1

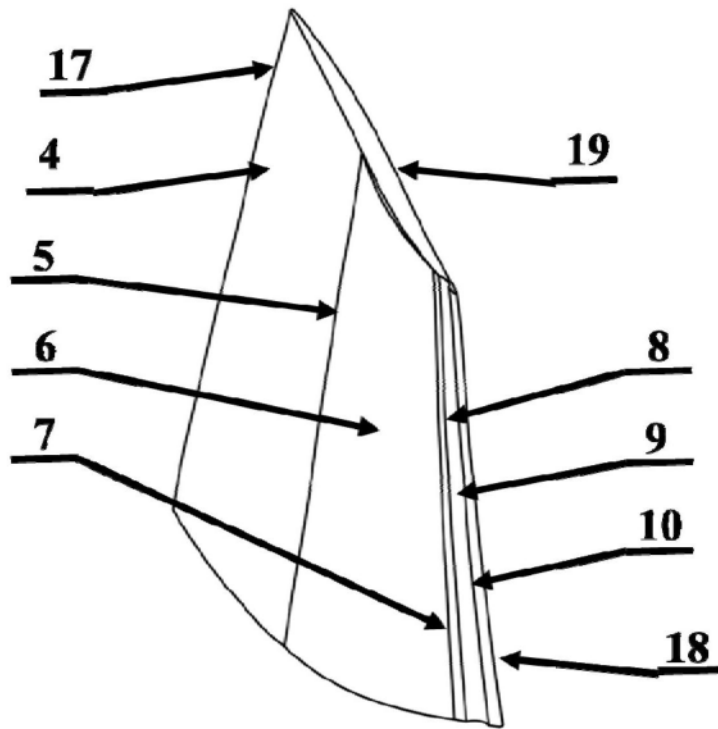


图2

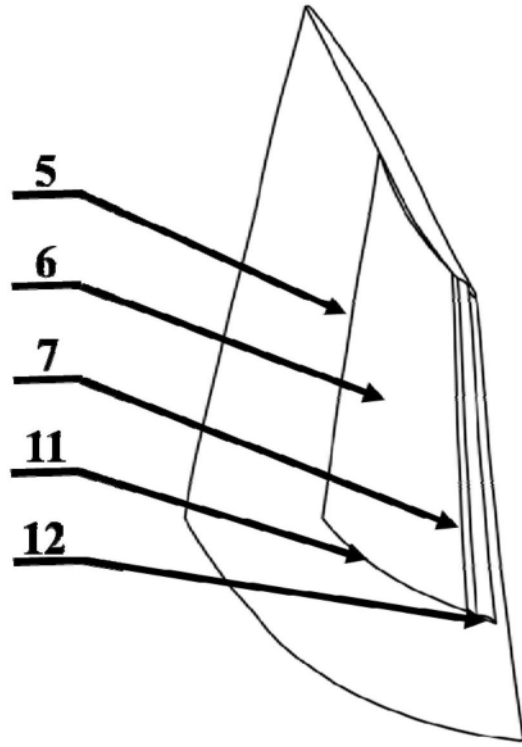


图3

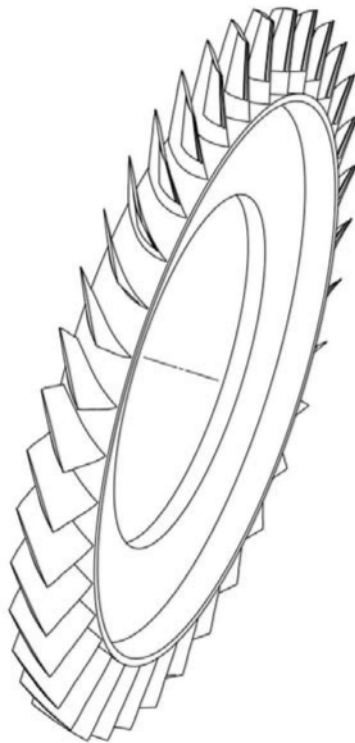


图4

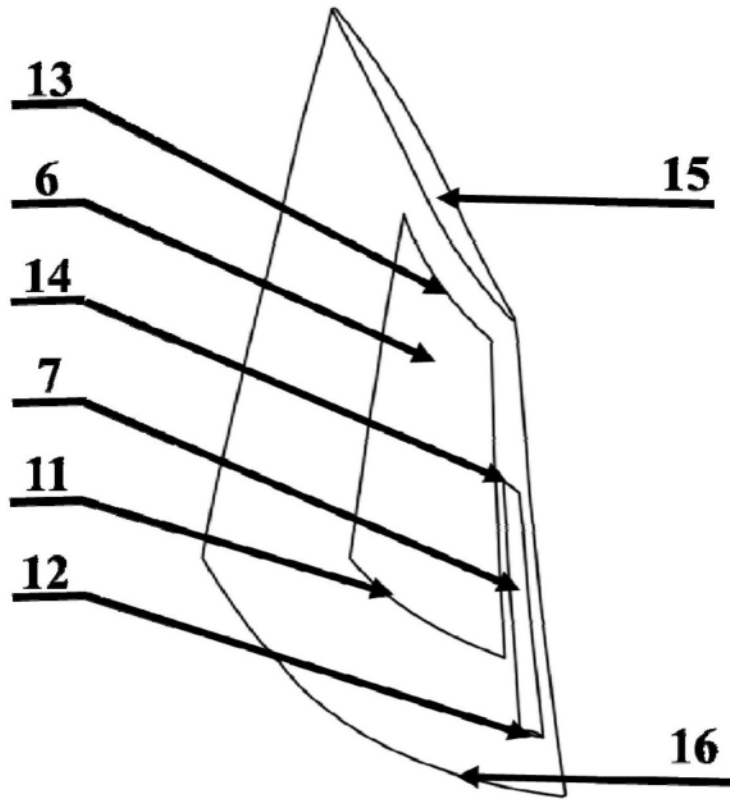


图5

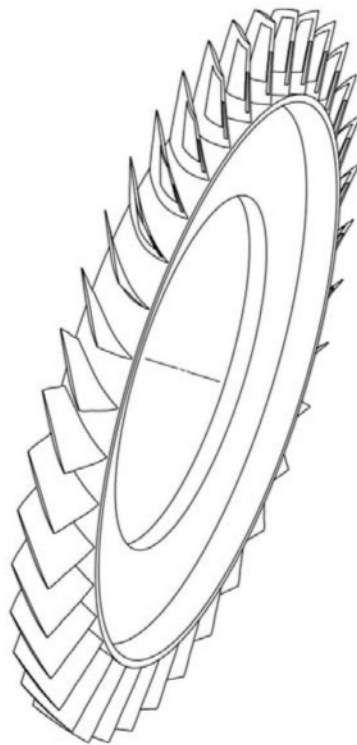


图6