



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112648240 B

(45) 授权公告日 2024. 11. 08

(21) 申请号 202110070706.5

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

CN 105298912 A, 2016.02.03

申请公布号 CN 112648240 A

CN 106250652 A, 2016.12.21

(43) 申请公布日 2021.04.13

审查员 李鑫杰

(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

(72) 发明人 韩吉昂 胡义 徐文峰 江达林

杨嗣涵 丁小娟

(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 29/54 (2006.01)

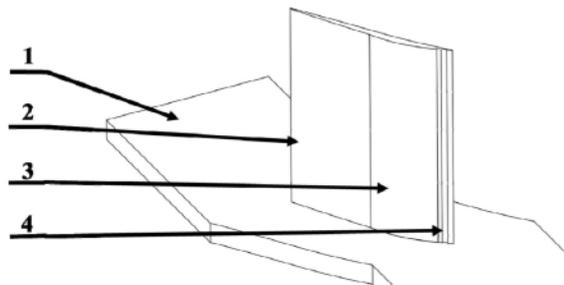
权利要求书3页 说明书10页 附图5页

(54) 发明名称

一种带有鼓包和凹缝结构的跨声速压气机平面叶栅叶片及其设计方法

(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平面叶栅叶片及其设计方法,包括如下步骤:步骤一、通过数值模拟分析确认鼓包和凹缝的位置;步骤二、将不同的几何参数分别代入鼓包和凹缝的造型公式中,确定鼓包和凹缝的起始位置及长度,构成不同的鼓包和凹缝组合结构方案,使用数值模拟软件进行二维数值模拟,得到效果较好的鼓包和缝组合结构方案;步骤三、根据得到的效果较好的组合结构方案,利用三维建模软件,得到带有鼓包和凹缝的吸力面,将新的吸力面与原始的压力面组合即可得到效果较好的带有鼓包和凹缝的平面叶栅叶片。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弱强激波和分离引起的流动损失,进而提升压气机性能。



1. 一种带有鼓包和凹缝结构的跨声速压气机平面叶栅叶片的设计方法, 其特征在于, 包括如下步骤:

步骤一、确认鼓包和凹缝的位置: 使用数值模拟软件对原始压气机平面叶栅进行数值模拟, 通过结果分析, 得到激波在吸力面的位置, 进而确定鼓包的布置位置范围, 包括鼓包的起始安装位置和鼓包的结束位置; 通过附面层分离的位置, 确定凹缝的布置位置范围, 包括凹缝的起始位置和凹缝的结束位置;

步骤二、将鼓包的不同几何参数代入鼓包的造型公式中, 同时确定鼓包的起始位置及长度后, 根据附面层分离位置确定凹缝的起始位置及长度;

将凹缝的不同几何参数代入到凹缝的造型公式中; 不同的鼓包高度与长度、凹缝深度与长度以及鼓包与凹缝布置间距相互匹配可以构成不同的鼓包和凹缝组合结构方案, 并得到不同鼓包和凹缝组合结构方案的点数据; 结合点数据, 使用数值模拟软件对不同的组合结构方案进行二维数值模拟, 得到效果较好的鼓包和凹缝组合结构方案;

步骤三、根据得到的效果较好的组合结构方案, 利用三维建模软件, 对原始的吸力面进行改型重构, 得到带有鼓包和凹缝的吸力面, 将新的吸力面与原始的压力面组合即可得到效果较好的带有鼓包和凹缝的平面叶栅叶片;

步骤二中, 所述鼓包的造型公式采用CST参数化、多项式插值函数、B样条曲线、三次C-Cardinal样条曲线或p-nary细分曲线造型方式;

所述凹缝的造型公式采用CST参数化、多项式插值函数、B样条曲线、三次C-Cardinal样条曲线或p-nary细分曲线造型方式;

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;

所述CST参数化的形状函数S(x)的表达式满足如下公式:

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

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

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:

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

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 所述的设计方法, 其特征在于, 步骤二中, 所述鼓包的不同几何参数包括鼓包的起始位置、鼓包的高度和鼓包的长度; 所述鼓包的结束位置由鼓包的起始位置和鼓包长度确定;

所述凹缝的不同几何参数包括凹缝的起始位置、凹缝的深度和凹缝的长度；所述凹缝的结束位置由凹缝起始位置和凹缝长度确定；

所述凹缝的起始位置可在鼓包结束位置的0-0.15倍弦长范围内进行调整。

3. 根据权利要求1所述的设计方法,其特征在于,所述凹缝的深度 H_2 和长度 L_2 分别与所述鼓包的高度 H_1 和长度 L_1 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 ,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, $n>0$ 。

4. 根据权利要求1所述的设计方法,其特征在于,所述凹缝的造型公式还可采用圆弧造型方式构建或方形造型方式构建。

5. 根据权利要求4所述的设计方法,其特征在于,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 L_2 和深度 H_2 ,长度 L_2 为 $0.05b-0.2b$, b 为叶片弦长,深度 H_2 不超过所在位置处叶片厚度的50%;

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。

6. 根据权利要求4所述的设计方法,其特征在于,采用方形造型方式构建得到矩形凹缝,其长度 L_2 为 $0.05b-0.2b$, b 为叶片弦长,深度 H_2 不超过所在位置处叶片厚度的50%;

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。

7. 根据权利要求1或4所述的设计方法,其特征在于,步骤二中,不同叶栅结构,根据具体情况调整鼓包和凹缝相对于叶片弦向方向的位置,通过不同鼓包和凹缝的造型方式的组合,进一步实现改型叶栅叶片对于流场结构和气动参数的影响。

一种带有鼓包和凹缝结构的跨声速压气机平面叶栅叶片及其设计方法

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平面叶栅叶片及其设计方法。

背景技术

[0002] 平面叶栅的研究在压气机设计和研究中占据了极为重要的地位。随着压气机负荷提高,跨声速压气机得到了大力发展和应用。压气机内部流动逐渐由亚声速转变为跨声速的过程中会出现较强的激波,强激波不仅会导致逆压梯度和激波损失增加,还会诱导附面层的分离使分离损失增加。因此,控制激波及其相关损失对于跨声速压气机性能的提升十分必要。

[0003] 对于跨声速压气机来说,任何用于减弱激波强度、改善波系结构和降低分离损失的方法都可能改善其性能。目前已有的流动控制方法包括附面层抽吸、等离子激励、合成射流和叶顶喷气等主动控制方法,也包括激波控制鼓包、叶型优化、掠叶片设计、空腔与多孔介质表面、机匣处理和涡流发生器等被动控制方法。主动控制方法虽然可以很好的控制激波及分离流动损失,但需要添加额外的装置和能量源,这不仅需要消耗额外的能量,而且会导致设计难度增加。而被动控制的方法在大对数情况下则会导致较大幅度的叶型改变,如空腔与多孔介质表面,使工作量增加。添加激波控制鼓包可以有效的降低激波损失,但对流动分离的改善效果没有那么明显。鼓包和凹缝这种结构可在控制激波的同时降低流动分离,并且保证了叶片质量基本不变。

发明内容

[0004] 根据上述提出的主动控制方法虽然可以很好的控制激波及分离流动损失,但需要添加额外的装置和能量源,这不仅需要消耗额外的能量,而且会导致设计难度增加;而被动控制的方法在大对数情况下则会导致较大幅度的叶型改变,如空腔与多孔介质表面,使工作量增加;添加激波控制鼓包可以有效的降低激波损失,但对流动分离的改善效果没有那么明显的技术问题,而提供一种带有鼓包和凹缝结构的跨声速压气机平面叶栅叶片及其设计方法。本发明主要通过调整鼓包和凹缝的造型方式及布置位置得到带有鼓包和凹缝的平面叶栅结构,从而实现激波强度减弱、分离损失减弱和叶栅扩压能力的提高。

[0005] 本发明采用的技术手段如下:

[0006] 一种带有鼓包和凹缝结构的跨声速压气机平面叶栅叶片的设计方法,包括如下步骤:

[0007] 步骤一、确认鼓包和凹缝的位置:使用数值模拟软件对原始压气机平面叶栅进行数值模拟,通过结果分析,得到激波在吸力面的位置,进而确定鼓包的布置位置范围,包括鼓包的起始安装位置和鼓包的结束位置;通过附面层分离的位置,确定凹缝的布置位置范围,包括凹缝的起始位置和凹缝的结束位置;

[0008] 步骤二、将鼓包的不同几何参数代入鼓包的造型公式中,同时确定鼓包的起始位置及长度后,根据附面层分离位置确定凹缝的起始位置及长度;

[0009] 将凹缝的不同几何参数代入到凹缝的造型公式中;不同的鼓包高度与长度、凹缝深度与长度以及鼓包与凹缝布置间距相互匹配可以构成不同的鼓包和凹缝组合结构方案,并得到不同鼓包和凹缝组合结构方案的点数据;结合点数据,使用数值模拟软件对不同的组合结构方案进行二维数值模拟,得到效果较好的鼓包和凹缝组合结构方案;

[0010] 步骤三、根据得到的效果较好的组合结构方案,利用UG等三维建模软件,对原始的吸力面进行改型重构,得到带有鼓包和凹缝的吸力面,将新的吸力面与原始的压力面组合即可得到效果较好的带有鼓包和凹缝的平面叶栅叶片。

[0011] 进一步地,步骤二中,所述鼓包的不同几何参数包括鼓包的起始位置、鼓包的高度和鼓包的长度;所述鼓包的结束位置由鼓包的起始位置和鼓包长度确定;

[0012] 所述凹缝的不同几何参数包括凹缝的起始位置、凹缝的深度和凹缝的长度;所述凹缝的结束位置由凹缝起始位置和凹缝长度确定;

[0013] 所述凹缝的起始位置可在鼓包结束位置的0-0.15倍弦长范围内进行调整。

[0014] 进一步地,步骤二中,所述鼓包的造型公式采用CST参数化、多项式插值函数、B样条曲线、三次C-Cardinal样条曲线或p-nary细分曲线造型方式;

[0015] 所述凹缝的造型公式采用CST参数化、多项式插值函数、B样条曲线、三次C-Cardinal样条曲线或p-nary细分曲线造型方式;

[0016] 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。

[0017] 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,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, $n>0$ 。

[0018] 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:

$$[0019] \quad S(x) = \sum_{i=0}^n b_i B_n^i(x) = \sum_{i=0}^n b_i [K_n^i x^i (1-x)^{n-1}]$$

$$[0020] \quad K_n^i = \frac{n!}{i!(n-i)!}$$

[0021] 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;

[0022] 所述多项式插值函数y满足如下公式:

$$[0023] \quad y = f(x) (1-x)^{0.5} x^{0.5} \pm g(x) (1-x)^{1.5} x^{0.5}$$

[0024] 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;

[0025] 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:

$$[0026] \quad P(u) = \sum_{i=0}^n d_j N_{i,k}(u)$$

[0027] 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;

[0028] 所述三次 C-Cardinal 样条曲线的数学定义式满足如下公式:

$$[0029] \quad P_i(t) = \sum_{j=0}^3 b_{i+j} \omega_{j,\alpha}(t)$$

$$[0030] \quad 0 \leq t \leq \alpha, i = 0, 1, 2, \dots, n-3$$

[0031] 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;

[0032] 所述 p -nary 细分曲线满足如下公式:

$$[0033] \quad P_j^{k+1} = \sum_{i \in Z} \alpha_{j-pi} P_i^k$$

[0034] 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:

$$[0035] \quad \begin{cases} P_{pj}^{k+1} = \sum_i \alpha_{pj-pi} P_i^k = \sum_{\beta} \alpha_{p\beta} P_{j-\beta}^k, \\ P_{pj+1}^{k+1} = \sum_i \alpha_{pj+1-pi} P_i^k = \sum_{\beta} \alpha_{p\beta+1} P_{j-\beta}^k, \\ \vdots \\ P_{pj+p-1}^{k+1} = \sum_i \alpha_{pj-pi-1-pi} P_i^k = \sum_{\beta} \alpha_{p\beta+p} P_{j-\beta}^k, \end{cases}$$

[0036] 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;

[0037] 若 $p=1$, 则细分规则为:

$$[0038] \quad P_j^{k+1} = \sum_i \alpha_{j-i} P_i^k = \sum_{\beta} \alpha_{\beta} P_{j-\beta}^k;$$

[0039] 若 $p=2$, 则细分规则为:

$$[0040] \quad P_{2j}^{k+1} = \sum_i \alpha_{2j-2i} P_i^k = \sum_{\beta} \alpha_{2\beta} P_{j-\beta}^k \text{ 和 } P_{2j+1}^{k+1} = \sum_i \alpha_{2j+1-2i} P_i^k = \sum_{\beta} \alpha_{2\beta+1} P_{j-\beta}^k;$$

[0041] 若 $p=3$, 则细分规则为 3 个, 以此类推。

[0042] 进一步地,所述凹缝的造型公式还可采用圆弧造型方式构建或方形造型方式构建。

[0043] 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%;

[0044] 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。

[0045] 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%;

[0046] 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。

[0047] 进一步地,步骤二中,所述鼓包的造型公式与所述凹缝的造型公式相同或不同;

[0048] 不同叶栅结构,可以根据具体情况调整鼓包和凹缝相对于叶片弦向方向的位置,通过不同鼓包和凹缝的造型方式的组合,进一步实现改型叶栅叶片对于流场结构和气动参数的影响。

[0049] 本发明还提供了一种带有鼓包和凹缝结构的跨声速压气机平面叶栅叶片,通过上述所述的设计方法获得,包括平面叶栅栅板、叶片、鼓包和凹缝,所述叶片通过设置在所述平面叶栅栅板上的叶型凹槽与所述平面叶栅栅板固定连接,所述鼓包和所述凹缝设置在所述叶片上。

[0050] 较现有技术相比,本发明具有以下优点:

[0051] 1、本发明提供的带有鼓包和凹缝结构的跨声速压气机平面叶栅叶片及其设计方法,考虑到跨声速压气机中激波损失和分离损失带来的影响,通过添加鼓包和凹缝结构可对激波和分离进行控制来减弱强激波和分离引起的流动损失,进而提升压气机性能。

[0052] 2、本发明提供的带有鼓包和凹缝结构的跨声速压气机平面叶栅叶片及其设计方法,可以在不需要添加辅助装置,并且在对叶片改变较小的条件下,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。

[0053] 3、本发明提供的带有鼓包和凹缝结构的跨声速压气机平面叶栅叶片及其设计方法,相比其他的控制技术,这种结构设计通过改变局部的结构使得叶片的质量基本不变,并且具有结构简单、加工难度相对较低以及可靠性较高等优点。

[0054] 综上,应用本发明的技术方案能够解决现有技术中的主动控制方法虽然可以很好的控制激波及分离流动损失,但需要添加额外的装置和能量源,这不仅需要消耗额外的能量,而且会导致设计难度增加;而被动控制的方法在大对数情况下则会导致较大幅度的叶型改变,如空腔与多孔介质表面,使工作量增加;添加激波控制鼓包可以有效的降低激波损失,但对流动分离的改善效果没有那么明显的问题。

[0055] 基于上述理由本发明可在跨声速压气机平面叶栅激波控制等领域广泛推广。

附图说明

[0056] 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。

- [0057] 图1为本发明带有鼓包和凹缝的跨声速压气机叶栅结构示意图。
- [0058] 图2为本发明带有鼓包和凹缝的跨声速压气机叶栅二维示意图。
- [0059] 图3为本发明跨声速压气机叶栅的鼓包和凹缝参数示意图。
- [0060] 图4为本发明跨声速压气机叶栅的鼓包和圆弧形凹缝结构和参数示意图。
- [0061] 图5为本发明跨声速压气机叶栅的鼓包和方形凹缝结构和参数示意图
- [0062] 图6为本发明矩形凹缝底部倒角示意图。
- [0063] 图7为本发明跨声速压气机的原始叶栅的压力等值线图。
- [0064] 图8为本发明跨声速压气机的带有鼓包和凹缝叶栅的压力等值线图。
- [0065] 图9为本发明跨声速压气机的原始叶栅的总压损失系数云图。
- [0066] 图10为本发明跨声速压气机的带有鼓包和凹缝叶栅的总压损失系数云图。
- [0067] 图中:1、平面叶栅栅板;2、叶片;3、鼓包;4、凹缝;5、直线倒角;6、圆弧倒角。

具体实施方式

[0068] 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。

[0069] 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。

[0070] 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。

[0071] 除非另外具体说明,否则在这些实施例中阐述的部件和步骤的相对布置、数字表达式和数值不限制本发明的范围。同时,应当清楚,为了便于描述,附图中所示出的各个部分的尺寸并不是按照实际的比例关系绘制的。对于相关领域普通技术人员已知的技术、方法和设备可能不作详细讨论,但在适当情况下,所述技术、方法和设备应当被视为授权说明书的一部分。在这里示出和讨论的所有示例中,任何具体值应被解释为仅仅是示例性的,而不是作为限制。因此,示例性实施例的其它示例可以具有不同的值。应注意到:相似的标号和字母在下面的附图中表示类似项,因此,一旦某一项在一个附图中被定义,则在随后的附图中不需要对其进行进一步讨论。

[0072] 实施例1

[0073] 本发明提供了一种带有鼓包和凹缝结构的跨声速压气机平面叶栅叶片的设计方法,包括如下步骤:

[0074] 步骤一、确认鼓包和凹缝的位置：使用数值模拟软件对原始压气机平面叶栅进行数值模拟，通过结果分析，得到激波在吸力面的位置，进而确定鼓包的布置位置范围，包括鼓包的起始安装位置和鼓包的结束位置；通过附面层分离的位置，确定凹缝的布置位置范围，包括凹缝的起始位置和凹缝的结束位置；其中：激波会与附面层相互作用导致附面层分离，添加鼓包可以延后激波入射到叶片吸力面的位置，使附面层分离位置延后；而凹缝可以减小附面层的分离，所以要根据附面层的分离位置确定凹缝的布置位置；

[0075] 步骤二、将鼓包的不同几何参数代入鼓包的造型公式中，同时确定鼓包的起始位置及长度后，根据附面层分离位置确定凹缝的起始位置及长度；

[0076] 将凹缝的不同几何参数代入到凹缝的造型公式中；不同的鼓包高度与长度、凹缝深度与长度以及鼓包与凹缝布置间距相互匹配可以构成不同的鼓包和凹缝组合结构方案，并得到不同鼓包和凹缝组合结构方案的点数据；结合点数据，使用数值模拟软件对不同的组合结构方案进行二维数值模拟，得到效果较好的鼓包和缝组合结构方案；

[0077] 步骤三、根据得到的效果较好的组合结构方案，利用UG等三维建模软件，对原始的吸力面进行改型重构，得到带有鼓包和凹缝的吸力面，将新的吸力面与原始的压力面组合即可得到效果较好的带有鼓包和凹缝的平面叶栅叶片。

[0078] 优选的，步骤二中，所述鼓包的不同几何参数包括鼓包的起始位置、鼓包的高度和鼓包的长度；所述鼓包的结束位置由鼓包的起始位置和鼓包长度确定；

[0079] 所述凹缝的不同几何参数包括凹缝的起始位置、凹缝的深度和凹缝的长度；所述凹缝的结束位置由凹缝起始位置和凹缝长度确定；

[0080] 所述凹缝的起始位置可在鼓包结束位置的0-0.15倍弦长范围内进行调整。

[0081] 优选的，步骤二中，所述鼓包的造型公式采用CST参数化、多项式插值函数、B样条曲线、三次C-Cardinal样条曲线或p-nary细分曲线造型方式；

[0082] 所述凹缝的造型公式采用CST参数化、多项式插值函数、B样条曲线、三次C-Cardinal样条曲线或p-nary细分曲线造型方式；

[0083] 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。

[0084] 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，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， $n > 0$ 。

[0085] 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：

$$[0086] \quad S(x) = \sum_{i=0}^n b_i B_n^i(x) = \sum_{i=0}^n b_i [K_n^i x^i (1-x)^{n-1}]$$

$$[0087] \quad K_n^i = \frac{n!}{i!(n-i)!}$$

[0088] 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；

[0089] 所述多项式插值函数y满足如下公式：

$$[0090] \quad y = f(x) (1-x)^{0.5} x^{0.5} \pm g(x) (1-x)^{1.5} x^{0.5}$$

[0091] 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;

[0092] 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:

$$[0093] \quad P(u) = \sum_{i=0}^n d_j N_{i,k}(u)$$

[0094] 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;

[0095] 所述三次C-Cardinal样条曲线的数学定义式满足如下公式:

$$[0096] \quad P_i(t) = \sum_{j=0}^3 b_{i+j} \omega_{j,\alpha}(t)$$

$$[0097] \quad 0 \leq t \leq \alpha, i = 0, 1, 2, \dots, n-3$$

[0098] 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;

[0099] 所述 p -nary 细分曲线满足如下公式:

$$[0100] \quad P_j^{k+1} = \sum_{i \in Z} \alpha_{j-pi} P_i^k$$

[0101] 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:

$$[0102] \quad \begin{cases} P_{pj}^{k+1} = \sum_i \alpha_{pj-pi} P_i^k = \sum_{\beta} \alpha_{p\beta} P_{j-\beta}^k, \\ P_{pj+1}^{k+1} = \sum_i \alpha_{pj+1-pi} P_i^k = \sum_{\beta} \alpha_{p\beta+1} P_{j-\beta}^k, \\ \vdots \\ P_{pj+p-1}^{k+1} = \sum_i \alpha_{pj-pi-1-pi} P_i^k = \sum_{\beta} \alpha_{p\beta+p} P_{j-\beta}^k, \end{cases}$$

[0103] 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 ;

[0104] 若 $p=1$, 则细分规则为:

$$[0105] \quad P_j^{k+1} = \sum_i \alpha_{j-i} P_i^k = \sum_\beta \alpha_\beta P_{j-\beta}^k ;$$

[0106] 若 $p=2$,则细分规则为:

$$[0107] \quad P_{2j}^{k+1} = \sum_i \alpha_{2j-2i} P_i^k = \sum_\beta \alpha_{2\beta} P_{j-\beta}^k \text{ 和 } P_{2j+1}^{k+1} = \sum_i \alpha_{2j+1-2i} P_i^k = \sum_\beta \alpha_{2\beta+1} P_{j-\beta}^k ;$$

[0108] 若 $p=3$,则细分规则为3个,以此类推。

[0109] 优选的,所述凹缝的造型公式还可采用圆弧造型方式构建或方形造型方式构建。

[0110] 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 L_2 和深度 H_2 ,长度 L_2 为 $0.05b-0.2b$, b 为叶片弦长,深度 H_2 不超过所在位置处叶片厚度的50%;

[0111] 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。

[0112] 优选的,采用方形造型方式构建得到矩形凹缝,其长度 L_2 为 $0.05b-0.2b$, b 为叶片弦长,深度 H_2 不超过所在位置处叶片厚度的50%;

[0113] 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6或直线倒角5,对凹缝造型进行加工制造。

[0114] 优选的,步骤二中,所述鼓包的造型公式与所述凹缝的造型公式相同或不同;

[0115] 不同叶栅结构,可以根据具体情况调整鼓包和凹缝相对于叶片弦向方向的位置,通过不同鼓包和凹缝的造型方式的组合,进一步实现改型叶栅叶片对于流场结构和气动参数的影响。

[0116] 实施例2

[0117] 如图1-6所示,本发明还提供了一种通过实施例中设计方法获得的带有鼓包和凹缝结构的跨声速压气机平面叶栅叶片,包括平面叶栅栅板1、叶片2、鼓包3和凹缝4,所述叶片2通过设置在所述平面叶栅栅板1上的叶型凹槽与所述平面叶栅栅板1固定连接,所述鼓包3和所述凹缝4设置在所述叶片2上。如图3-5所示, C_1 为叶片前缘点到鼓包最高点的位置, C_2 为叶片前缘点到凹缝最深点的位置, C_0 为叶片弦长,即参数 b 。

[0118] 实施例3

[0119] 一种带有鼓包和凹缝结构的跨声速压气机平面叶栅叶片的设计方法,包括如下步骤:

[0120] 步骤一、选取某跨声速转子的70%叶高平面叶栅,叶栅的具体参数如表1所示:

[0121] 表1叶栅参数

| | 参数名 | 参数值 | 单位 |
|--------|---------|------|----|
| | 栅距 | 27 | mm |
| [0122] | 弦长 | 40 | mm |
| | 叶高 | 100 | mm |
| | 设计马赫数 | 1.35 | Ma |
| | 设计进口气流角 | 61.2 | ° |

[0123] 步骤二、使用数值模拟软件对原始压气机平面叶栅进行数值模拟,通过分析数值模拟结果,得到强激波位置以及附面层分离位置。根据强激波位置确定鼓包安装范围,根据附面层分离位置确定凹缝安装范围。

[0124] 步骤三、本步骤的鼓包造型采用多项式插值函数方法,方程表达式如下:

$$[0125] \quad y=f(x)(1-x)^{0.5}x^{0.5} \pm g(x)(1-x)^{1.5}x^{0.5}$$

[0126] 其中,根据强激波位置初步确定鼓包起始位置在0.5倍弦长处;根据主流区附面层厚度,初步确定鼓包高度为0.4倍弦长; $f(x)=0.4 \times 5.7 \times 0.1$; $g(x)=0.4 \times 5.7 \times 1$ 。

[0127] 步骤四、通过数值模拟分析,根据主流区附面层分离位置,确定凹缝起始位置在鼓包结束位置后0.01倍弦长处。本步骤的凹缝造型采用圆弧形方法构建,初步选用凹缝长度为0.05倍弦长,凹缝深度为0.02倍弦长。

[0128] 步骤五、根据上述步骤得到的鼓包点数据和凹缝点数据,利用UG软件将吸力面进行改型,确定鼓包和凹缝在吸力面的位置及形状,可得到一个新的吸力面。将新得到的吸力面与原始压力面进行组合,可以得到效果较好的带有鼓包和凹缝的平面叶栅叶片。

[0129] 步骤六、利用Numeca数值模拟软件分别对原型叶栅、鼓包叶栅及鼓包和凹缝叶栅进行数值计算,得到结果如表2和表3所示:

[0130] 表2原型叶栅与鼓包和凹缝叶栅的总压损失与流量变化

| | 气动参数 | 原型叶栅 | 鼓包和凹缝叶栅 | 变化量 |
|--------|---------------------|---------|---------|--------|
| [0131] | 总压损失系数 (ω) | 0.21261 | 0.20883 | -1.78% |
| | 设计点流量 (Kg/s) | 50.211 | 50.192 | -0.38% |

[0132] 如表2所示,根据结果表明,鼓包和凹缝叶栅可以在基本不改变流量的前提下,有效的减少损失,提高压气机的性能。鼓包和凹缝叶栅与原型叶栅相比,在设计工况下,总压损失系数降低了1.78%,流量减少了0.38%。

[0133] 表3鼓包叶栅与鼓包和凹缝叶栅的总压损失与流量变化

| | 气动参数 | 鼓包叶栅 | 鼓包和凹缝叶栅 | 变化量 |
|--------|---------------------|---------|---------|--------|
| [0134] | 总压损失系数 (ω) | 0.21024 | 0.20883 | -0.67% |
| | 设计点流量 (Kg/s) | 50.198 | 50.192 | -0.01% |

[0135] 根据表3中数据表明,鼓包叶栅相比原型叶栅,在设计工况下也可使总压系数降低。但鼓包和凹缝叶栅可以在此基础上,使得总压损失系数降低0.67%,流量减少0.01%。所以鼓包和凹缝叶栅可以更有效的减少损失。

[0136] 通过图7原始叶栅的压力等值线图 and 图8鼓包和凹缝叶栅的压力等值线图可知,在黑色方框区域,鼓包和凹缝结构可有效降低流道内的激波强度,并使得激波入射到吸力面上的位置后移,鼓包和凹缝结构控制附面层的分离位置延后,使得流动损失降低。

[0137] 通过图9原始叶栅的总压损失系数云图和图10鼓包和凹缝叶栅的总压损失系数云图可知,在黑色矩形区域,鼓包和凹缝叶栅的流场高损失区域相比原始叶栅明显的变小。而鼓包和凹缝结构使得激波系结构改变,改善了吸力面的压力梯度,有利于减小附面层的分离损失。

[0138] 鼓包和凹缝结构可以在降低激波强度,减小激波损失的同时,降低流动的损失,提升压气机的性能。

[0139] 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。

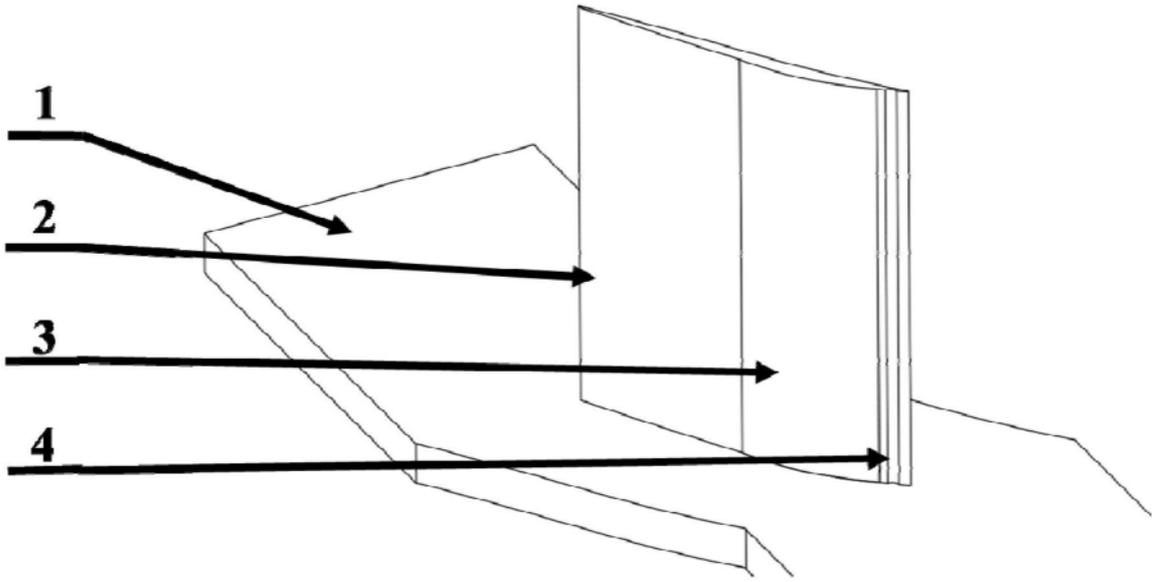


图1

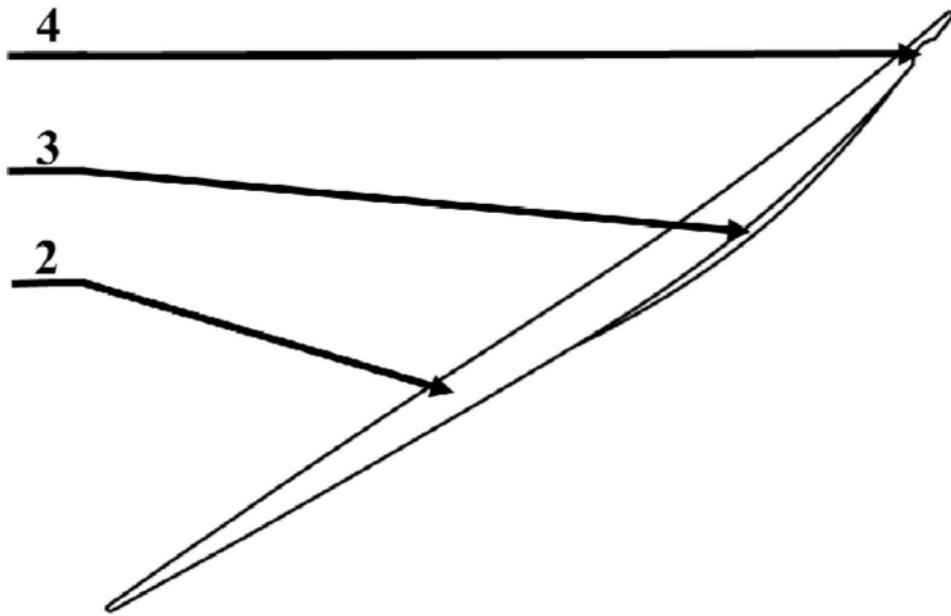


图2

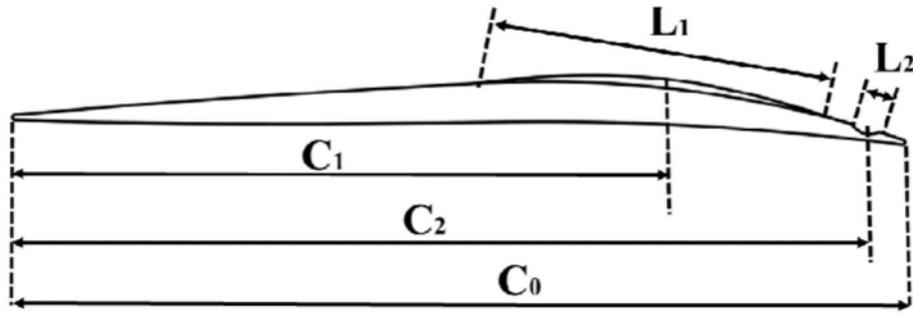


图3

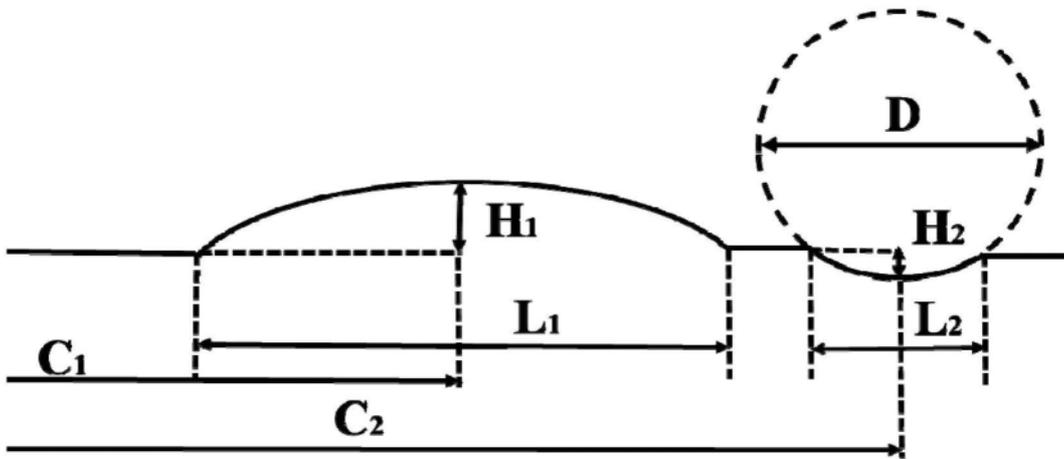


图4

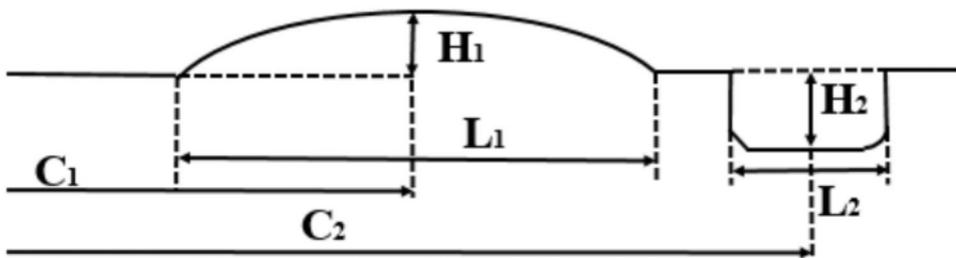


图5

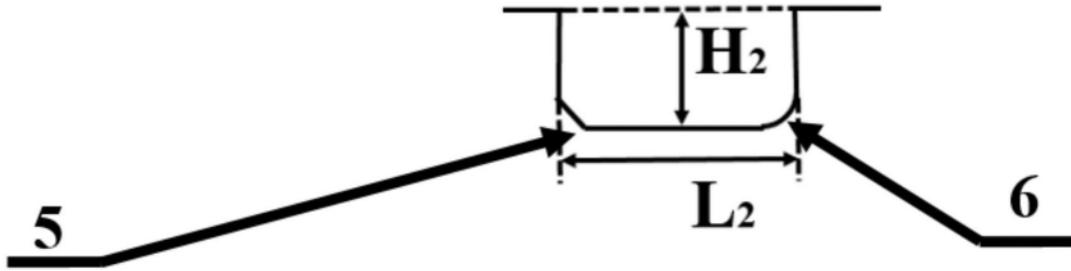


图6

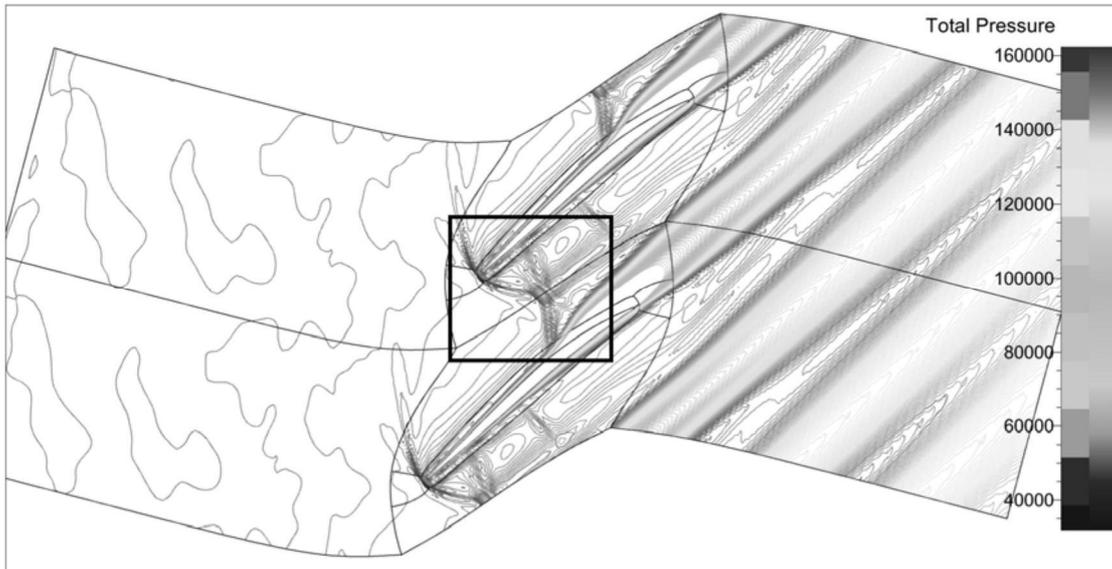


图7

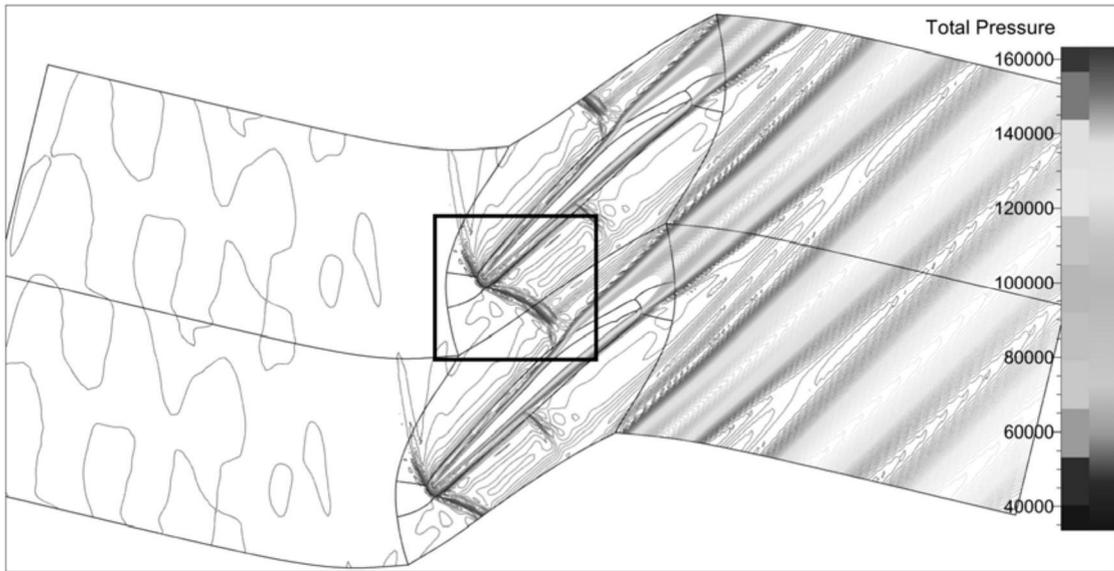


图8

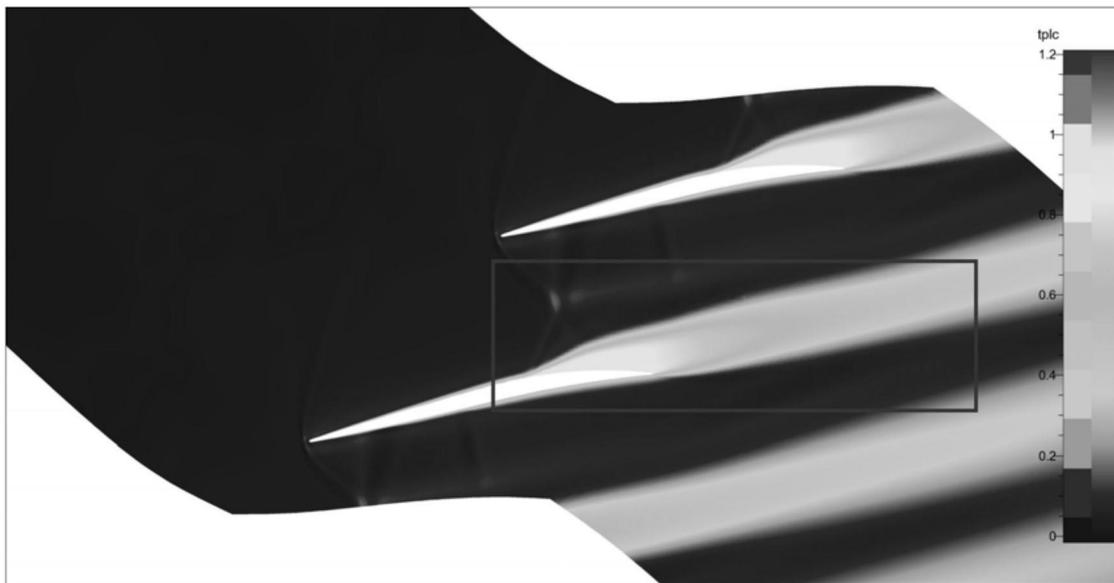


图9

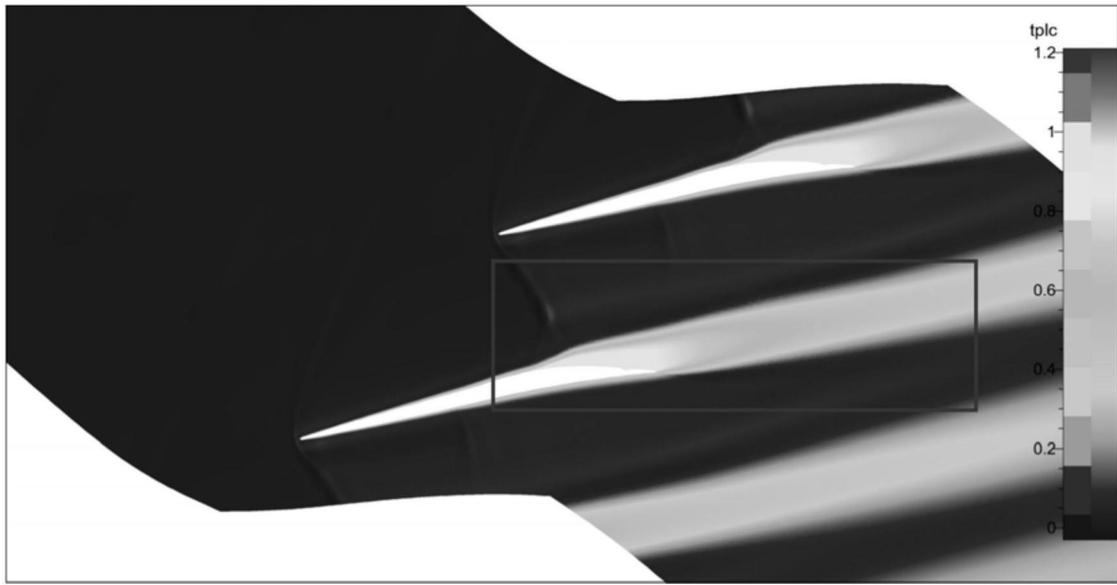


图10