



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 118260874 A

(43) 申请公布日 2024.06.28

(21) 申请号 202410684885.5

G06F 119/14 (2020.01)

(22) 申请日 2024.05.30

(71) 申请人 中国空气动力研究与发展中心设备
设计与测试技术研究所

地址 621000 四川省绵阳市二环路南段6号

(72) 发明人 易星佑 赵芳 余永生 张云强

(74) 专利代理机构 成都云纵知识产权代理事务
所(普通合伙) 51316

专利代理师 熊曦 陈婉鹃

(51) Int. Cl.

G06F 30/15 (2020.01)

G01M 9/04 (2006.01)

G06F 30/28 (2020.01)

G06F 113/08 (2020.01)

G06F 119/02 (2020.01)

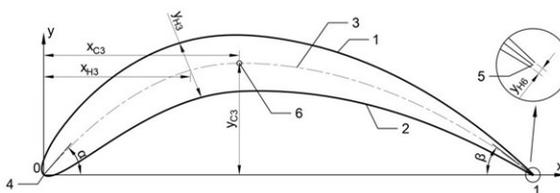
权利要求书5页 说明书15页 附图2页

(54) 发明名称

一种拐角导流片翼型轮廓参数获得方法

(57) 摘要

本发明公开了一种拐角导流片翼型轮廓参数获得方法,涉及风洞设备气动设计领域,所述方法包括:获取拐角导流片翼型的中弧线和厚度分布坐标数据;根据所述坐标数据获得拐角导流片翼型的特征参数,特征参数包括:拐角导流片翼型的前缘点及后缘点坐标、最大弯度、最大厚度大小及位置和后缘厚度;建立中弧线和厚度分布曲线参数化曲线的表达式,利用拐角导流片翼型的特征参数、拐角导流片翼型的中弧线及厚度分布坐标数据,求解获得所述表达式的控制参数;根据所述表达式和所述控制参数求解获得拐角导流片翼型的轮廓坐标;本发明能够以较少的参数实现拐角导流片翼型轮廓高精度描述,同时提高设计参数空间范围内翼型轮廓质量。



1. 一种拐角导流片翼型轮廓参数获得方法,其特征在于,所述方法包括:

获取拐角导流片翼型的中弧线和厚度分布坐标数据;

根据所述坐标数据获得拐角导流片翼型的特征参数,特征参数包括:拐角导流片翼型的前缘点及后缘点坐标、最大弯度、最大厚度大小及位置和和后缘厚度;

建立中弧线和厚度分布曲线参数化曲线的表达式,利用拐角导流片翼型的特征参数、拐角导流片翼型的中弧线及厚度分布坐标数据,求解获得所述表达式的控制参数;根据所述表达式和所述控制参数求解获得拐角导流片翼型的轮廓坐标。

2. 根据权利要求1所述的一种拐角导流片翼型轮廓参数获得方法,其特征在于,拐角导流片翼型的中弧线参数化曲线对应的表达式为第一表达式,第一表达式为:

$$\begin{cases} Z_{Cf}(s, Cf) = \sum_{i=0}^3 Cf_i \cdot b_{i,3}(s) \\ Z_{Cp}(s, Cp) = \sum_{i=0}^3 Cp_i \cdot b_{i,3}(s) \end{cases}, \quad s \in [0,1];$$

其中, Cf 为拐角导流片中弧线前段贝塞尔曲线的控制点, Cp 为拐角导流片中弧线后段贝塞尔曲线控制点, Cf 和 Cp 的计算方式为:

$$\begin{cases} Cf = (C_0 \quad C_1 \quad C_2 \quad C_3) \\ Cp = (C_3 \quad C_4 \quad C_5 \quad C_6) \end{cases};$$

其中, $C_i = x_{C_i} + j*y_{C_i}$, j 为虚数符号, x 为横坐标, y 为纵坐标, x_{C_i} 为 C_i 的横坐标, y_{C_i} 为 C_i 的纵坐标, C_0 为拐角导流片翼型中弧线前缘点的复数坐标, C_6 为拐角导流片翼型中弧线后缘点的复数坐标, C_3 为拐角导流片翼型中弧线最大弯度位置点的复数坐标, C_1 、 C_2 、 C_4 和 C_5 为参数化控制点的复数坐标, $Z_{Cf}(s, Cf)$ 为由 s 和 Cf 控制的拐角导流片中弧线前段的贝塞尔曲线方程, $Z_{Cp}(s, Cp)$ 为由 s 和 Cp 控制的拐角导流片中弧线后段的贝塞尔曲线方程, s 为贝塞尔曲线位置控制参数, C 为拐角导流片中弧线的贝塞尔曲线控制点的复数坐标,下标 i 为序号代表不同的控制点, $b_{i,3}(s)$ 为四次伯恩斯坦多项式。

3. 根据权利要求2所述的一种拐角导流片翼型轮廓参数获得方法,其特征在于,基于拐角导流片中弧线前段贝塞尔曲线无量纲控制参数 c_f 和拐角导流片中弧线后段贝塞尔曲线无量纲控制参数 c_p ,获得 Cf 和 Cp 的无量纲表达式,具体为:

$$\begin{cases} Cf(c_f) = \begin{bmatrix} x_{C0} \\ x_{C0} + a_{C1} \cdot a_{C2} \cdot (x_{C3} - x_{C0}) \\ x_{C0} + a_{C2} \cdot (x_{C3} - x_{C0}) \\ x_{C3} \end{bmatrix} + j \cdot \begin{bmatrix} y_{C0} \\ (a_{C1} + b_{C1} - a_{C1} \cdot b_{C1}) \cdot (y_{C3} - y_{C0}) \\ y_{C3} \\ y_{C3} \end{bmatrix} \\ Cp(c_p) = \begin{bmatrix} x_{C3} \\ x_{C3} + a_{C4} \cdot (x_{C6} - x_{C3}) \\ x_{C3} + (a_{C4} + a_{C4} \cdot a_{C5} + a_{C5}) \cdot (x_{C6} - x_{C3}) \\ x_{C6} \end{bmatrix} + j \cdot \begin{bmatrix} y_{C3} \\ y_{C3} \\ y_{C3} + a_{C5} \cdot (1 - b_{C5}) \cdot (y_{C6} - y_{C3}) \\ y_{C6} \end{bmatrix}; \end{cases}$$

$$\begin{cases} c_f = (a_{C1} & b_{C1} & a_{C2}) \\ c_p = (a_{C4} & a_{C5} & b_{C5}) \end{cases};$$

其中, C_f (c_f) 为 C_f 的无量纲表达式, C_p (c_p) 为 C_p 的无量纲表达式, a_{C1} 、 b_{C1} 、 a_{C2} 、 a_{C4} 、 a_{C5} 和 b_{C5} 均为取值区间在 $[0, 1]$ 范围内的独立无量纲控制变量参数。

4. 根据权利要求2所述的一种拐角导流片翼型轮廓参数获得方法, 其特征在于, $b_{i,3}(s)$ 的求解方式为:

$$b_{i,3}(s) = \frac{3!}{i!(3-i)!} s^i (1-s)^{3-i}。$$

5. 根据权利要求1所述的一种拐角导流片翼型轮廓参数获得方法, 其特征在于, 拐角导流片翼型的厚度分布曲线参数化曲线对应的表达式为第二表达式, 第二表达式为:

$$\begin{cases} Z_{Hf}(s, Hf) = \sum_{i=0}^3 Hf_i \cdot b_{i,3}(s) \\ Z_{Hp}(s, Hp) = \sum_{i=0}^3 Hp_i \cdot b_{i,3}(s) \end{cases}, \quad s \in [0, 1];$$

其中, Hf 为拐角导流片厚度曲线前段贝塞尔曲线的控制点, Hp 为拐角导流片厚度曲线后段贝塞尔曲线控制点, Hf 和 Hp 的表达式分别为:

$$\begin{cases} Hf = (H_0 & H_1 & H_2 & H_3) \\ Hp = (H_3 & H_4 & H_5 & H_6) \end{cases};$$

其中, $H_i = x_{Hi} + j * y_{Hi}$, j 为虚数符号, x 为横坐标, y 为纵坐标, x_{Hi} 为 H_i 的横坐标, y_{Hi} 为 H_i 的纵坐标, H_0 为拐角导流片翼型厚度分布曲线前缘点, H_6 为拐角导流片翼型厚度分布曲线后缘点, $H_6 = 1 + y_{H6}$, y_{H6} 为拐角导流片翼型后缘厚度, H_3 为拐角导流片翼型厚度分布曲线最大厚度位置, H_1 、 H_2 、 H_4 和 H_5 为参数化控制点; $Z_{Hf}(s, Hf)$ 为由 s 和 Hf 控制的拐角导流片厚度曲线前段的贝塞尔曲线方程, $Z_{Hp}(s, Hp)$ 为由 s 和 Hp 控制的拐角导流片厚度曲线后段的贝塞尔曲线方程, s 为贝塞尔曲线位置控制参数, H 为拐角导流片厚度曲线的贝塞尔曲线控制点的复数坐标, 下标 i 为控制参数序号代表不同的控制点, $b_{i,3}(s)$ 为四次伯恩斯坦多项式。

6. 根据权利要求5所述的一种拐角导流片翼型轮廓参数获得方法, 其特征在于, 基于拐角导流片厚度曲线前段贝塞尔曲线无量纲控制参数 h_f 和拐角导流片厚度曲线后段贝塞尔曲线无量纲控制参数 h_p , 获得 Hf 和 Hp 的无量纲表达式, 具体为:

$$\left\{ \begin{array}{l} Hf(h_f) = \begin{bmatrix} x_{H0} \\ x_{H0} \\ x_{H0} + a_{H2} \cdot (x_{H3} - x_{H0}) \\ x_{H3} \end{bmatrix} + j \cdot \begin{bmatrix} y_{H0} \\ y_{H0} + b_{H1} \cdot (y_{H3} - y_{H0}) \\ y_{H3} \\ y_{H3} \end{bmatrix} \\ Hp(h_p) = \begin{bmatrix} x_{H3} \\ x_{H3} + a_{H4} \cdot (x_{H6} - x_{H3}) \\ x_{H3} + (a_{H4} - a_{H4} \cdot a_{H5} + a_{H5}) \cdot (x_{H6} - x_{H3}) \\ x_{H6} \end{bmatrix} + j \cdot \begin{bmatrix} y_{H3} \\ y_{H3} \\ y_{H3} + a_{H5} \cdot (1 - b_{H5}) \cdot (y_{H6} - y_{H3}) \\ y_{H6} \end{bmatrix} \\ \left. \begin{array}{l} h_f = [b_{H1}, a_{H2}] \\ h_p = [a_{H4}, a_{H5}, b_{H5}] \end{array} \right\};$$

其中, $Hf(h_f)$ 为 Hf 的无量纲表达式, $Hp(h_p)$ 为 Hp 的无量纲表达式, b_{H1} 、 a_{H2} 、 a_{H4} 、 a_{H5} 和 b_{H5} 均为取值区间在 $[0, 1]$ 范围内的独立无量纲控制变量参数。

7. 根据权利要求3所述的一种拐角导流片翼型轮廓参数获得方法, 其特征在于, 所述方法还包括对控制变量参数进行约束, 约束方式为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{3}{2} \cdot \frac{(1 - a_{C2})^2}{(1 - a_{C1})(1 - b_{C1})} \cdot \frac{x_{C3}^2}{y_{C3}} \geq \frac{y_{H3}}{2} \\ \frac{3}{2} \cdot \frac{a_{C4}^2}{a_{C5}(1 - b_{C5})} \cdot \frac{(1 - x_{C3})^2}{y_{C3}} \geq \frac{y_{H3}}{2} \end{array} \right. ;$$

其中, y_{H3} 为拐角导流片最大厚度。

8. 根据权利要求1所述的一种拐角导流片翼型轮廓参数获得方法, 其特征在于, 所述方法还包括采用非线性规划求解器对 c_f 、 c_p 、 h_f 和 h_p 进行求解, 具体为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{c_f \in [0, 1]} \delta_{Cf}(c_f) \\ s.t. \quad \frac{3}{2} \cdot \frac{(1 - a_{C2})^2}{(1 - a_{C1})(1 - b_{C1})} \cdot \frac{x_{C3}^2}{y_{C3}} \geq \frac{y_{H3}}{2} ; \\ c_f = [a_{C1}, b_{C1}, a_{C2}] \\ \min_{c_p \in [0, 1]} \delta_{Cp}(c_p) \\ s.t. \quad \frac{3}{2} \cdot \frac{a_{C4}^2}{a_{C5}(1 - b_{C5})} \cdot \frac{(1 - x_{C3})^2}{y_{C3}} \geq \frac{y_{H3}}{2} ; \\ c_p = [a_{C4}, a_{C5}, b_{C5}] \end{array} \right.$$

$$\begin{cases} \min_{h_f \in [0,1]} \delta_{Hf}(h_f) \\ h_f = [b_{H1}, a_{H2}] \end{cases};$$

$$\begin{cases} \min_{h_p \in [0,1]} \delta_{Hp}(h_p) \\ h_p = [a_{H4}, a_{H5}, b_{H5}] \end{cases};$$

其中, y_{H3} 为拐角导流片最大厚度, s. t. 为约束条件, $\delta_{Cf}(c_f)$ 、 $\delta_{Cp}(c_p)$ 、 $\delta_{Hf}(h_f)$ 和 $\delta_{Hp}(h_p)$ 分别为关于 c_f 、 c_p 、 h_f 和 h_p 的目标函数, a_{C1} 、 b_{C1} 、 a_{C2} 、 a_{C4} 、 a_{C5} 和 b_{C5} 均为取值区间在 $[0, 1]$ 范围内的独立无量纲控制变量参数, b_{H1} 、 a_{H2} 、 a_{H4} 、 a_{H5} 和 b_{H5} 均为取值区间在 $[0, 1]$ 范围内的独立无量纲控制变量参数, x_{Ci} 为 C_i 的横坐标, y_{Ci} 为 C_i 的纵坐标, C 为拐角导流片中弧线的贝塞尔曲线控制点的复数坐标, 下标 i 为序号代表不同的控制点, 具体为:

$$\begin{cases} \delta_{Cf}(c_f) = \int_0^1 |Z_{Cf}(s, Cf(c_f)) - Z_{Ctar}|^2 ds \\ \delta_{Cp}(c_p) = \int_0^1 |Z_{Cp}(s, Cp(c_p)) - Z_{Ctar}|^2 ds \\ \delta_{Hf}(h_f) = \int_0^1 |Z_{Hf}(s, Hf(h_f)) - Z_{Htar}|^2 ds \\ \delta_{Hp}(h_p) = \int_0^1 |Z_{Hp}(s, Hp(h_p)) - Z_{Htar}|^2 ds \end{cases};$$

其中, Z_{Ctar} 和 Z_{Htar} 分别为拐角导流片翼型的中弧线和厚度分布曲线, s 为贝塞尔曲线位置控制参数, ds 为 s 的微分, c_f 为拐角导流片中弧线前段贝塞尔曲线无量纲控制参数, c_p 为拐角导流片中弧线后段贝塞尔曲线无量纲控制参数, h_f 为拐角导流片厚度曲线前段贝塞尔曲线无量纲控制参数, h_p 为拐角导流片厚度曲线后段贝塞尔曲线无量纲控制参数; $Z_{Cf}(s, Cf(c_f))$ 为由 s 和 $Cf(c_f)$ 控制的拐角导流片中弧线前段的贝塞尔曲线方程, $Cf(c_f)$ 为 Cf 的无量纲表达式, $Z_{Cp}(s, Cp(c_p))$ 为由 s 和 $Cp(c_p)$ 控制的拐角导流片中弧线后段的贝塞尔曲线方程, $Cp(c_p)$ 为 Cp 的无量纲表达式, $Z_{Hf}(s, Hf(h_f))$ 为由 s 和 $Hf(h_f)$ 控制的拐角导流片厚度曲线前段的贝塞尔曲线方程, $Z_{Hp}(s, Hp(h_p))$ 为由 s 和 $Hp(h_p)$ 控制的拐角导流片厚度曲线后段的贝塞尔曲线方程, $Hf(h_f)$ 为 Hf 的无量纲表达式, $Hp(h_p)$ 为 Hp 的无量纲表达式。

9. 根据权利要求1所述的一种拐角导流片翼型轮廓参数获得方法, 其特征在于, 所述根据所述表达式和所述控制参数求解获得拐角导流片翼型的轮廓坐标, 具体包括:

步骤a: 根据轮廓点控制数目 N , 确定递增的贝塞尔曲线位置控制参数 $s \in [0, 1]$ 共 N 个点;

步骤b: 基于 c_f 、 c_p 、 h_f 和 h_p 分别确定的 Cf 、 Cp 、 Hf 和 Hp , 以及步骤a确定的贝塞尔曲线位置控制参数 s , 计算获得中弧线坐标 $\{Z_{Cf}(s, Cf), Z_{Cp}(s, Cp)\}$ 和厚度分布曲线离散坐标 $\{Z_{Hf}(s, Hf), Z_{Hp}(s, Hp)\}$, 将中弧线坐标 $\{Z_{Cf}(s, Cf), Z_{Cp}(s, Cp)\}$ 记为 (x_c, y_c) , 将厚度分布曲线离散坐标 $\{Z_{Hf}(s, Hf), Z_{Hp}(s, Hp)\}$ 记为 (x_H, y_H) ; c_f 为拐角导流片中弧线前段贝塞尔曲线无量纲控制参数, c_p 为拐角导流片中弧线后段贝塞尔曲线无量纲控制参数, h_f 为拐角导流片厚度曲

线前段贝塞尔曲线无量纲控制参数, h_p 为拐角导流片厚度曲线后段贝塞尔曲线无量纲控制参数, Cf 为拐角导流片中弧线前段贝塞尔曲线的控制点, Cp 为拐角导流片中弧线后段贝塞尔曲线控制点, Hf 为拐角导流片厚度曲线前段贝塞尔曲线的控制点, Hp 为拐角导流片厚度曲线后段贝塞尔曲线的控制点;

步骤c: 对 (x_c, y_c) 采用分段样条曲线拟合, 获得中弧线坐标点位置对应的中弧线倾角 (x_c, θ_c) ;

步骤d: 对 (x_H, y_H) 采用分段样条曲线拟合, 并插值得到对应中弧线各点横坐标对应的厚度坐标 (x_c, y_{HC}) ;

步骤e: 基于 (x_c, y_c) 、 (x_c, θ_c) 和 (x_c, y_{HC}) 计算获得拐角导流片翼型上翼面坐标 Z_{up} 和下翼面坐标 Z_{lw} , 其中, x_c 为中弧线横坐标, y_c 为中弧线纵坐标, y_{HC} 为中弧线横坐标位置对应的厚度, θ_c 为中弧线横坐标位置对应的中弧线倾角。

10. 根据权利要求9所述的一种拐角导流片翼型轮廓参数获得方法, 其特征在于, 拐角导流片翼型上翼面坐标 Z_{up} 和下翼面坐标 Z_{lw} 的计算方式为:

$$\begin{cases} Z_{up} = [x_c - y_{HC}/2 \cdot \sin(\theta_c)] + i \cdot [y_c + y_{HC}/2 \cdot \cos(\theta_c)] \\ Z_{lw} = [x_c + y_{HC}/2 \cdot \sin(\theta_c)] + i \cdot [y_c - y_{HC}/2 \cdot \cos(\theta_c)] \end{cases}^{\circ}$$

一种拐角导流片翼型轮廓参数获得方法

技术领域

[0001] 本发明涉及风洞设备气动设计领域,具体地,涉及一种拐角导流片翼型轮廓参数获得方法。

背景技术

[0002] 拐角段是风洞中实现气流转向的部段,回流式风洞一般通过4个90°的拐角实现气流在洞体内的循环。为了抑制气流转向时离心力所致流动分离,在拐角段布置由多片拐角导流片组成的叶栅来导流。一般风洞拐角导流片采用1/4圆弧弯板翼型或双圆弧翼型,该翼型背风面压力分布不理想,存在较大的逆压梯度。为了避免流动分离,拐角导流片布置稠度大,气流摩擦作用明显,压力损失高。为了降低拐角段压力损失,需要对拐角导流片翼型轮廓进行优化,通过改善表面压力分布特性,在避免出现流动分离的前提下,降低拐角导流片布置稠度。

[0003] 在翼型优化设计中,需要对翼型轮廓进行描述。传统的离散轮廓点坐标描述方法能够简单直接地表达曲线,但该方法参数多,轮廓调整过程中轮廓连续性及光滑性控制差,翼型优化设计效率低、难度大。对翼型轮廓进行参数化曲线描述,减少翼型轮廓描述参数数目,是翼型优化的基本途径。

[0004] 拐角导流片具有气流方向扭转角度大的设计需求,与航空、风力、水力、涡轮机械等翼型相比:翼型弯度通常在0.15以上,远大于常规翼型;前缘点朝下翼面偏移大,下翼面曲率方向存在反转。拐角导流片翼型轮廓描述时,如对翼面轮廓进行参数化曲线描述,上翼面曲线在直角坐标系内为非单一曲线、下翼面曲率方向存在多次反转,参数化描述难度大、误差大。因此,拐角导流片翼型参数化描述一般对翼型中弧线和厚度分布曲线进行参数化曲线描述,而该方法在弯度较大的翼型设计过程中,在设计参数空间内进行参数调整时,下翼面轮廓易出现奇点或转折,形成的轮廓表面不光滑,降低优化效率,甚至导致优化失败。另外,常规采用的翼型参数化曲线描述方法,存在对设计目标翼型的弯度和厚度等关键特征参数控制不足,控制参数没有明确取值范围,参数组合描述的翼型曲率方向转折及位置不可控等其它问题,难以满足大厚度、大迎角的拐角导流片翼型的参数化描述和设计要求。

发明内容

[0005] 针对上述问题,迫切需要发展一种用于拐角导流片翼型轮廓参数获得方法,减少控制参数数目、提高翼型轮廓高精度描述和提高设计参数空间范围内翼型轮廓质量,满足拐角导流片翼型轮廓优化的需要。

[0006] 本发明目的是以较少的参数实现拐角导流片翼型轮廓高精度描述,同时提高设计参数空间范围内翼型轮廓质量。

[0007] 为实现上述目的,本发明提供了一种拐角导流片翼型轮廓参数获得方法,所述方法包括:

获取拐角导流片翼型的中弧线和厚度分布坐标数据;

根据所述坐标数据获得拐角导流片翼型的特征参数,特征参数包括:拐角导流片翼型的前缘点及后缘点坐标、最大弯度、最大厚度大小及位置和厚度;

建立中弧线和厚度分布曲线参数化曲线的表达式,利用拐角导流片翼型的特征参数、拐角导流片翼型的中弧线及厚度分布坐标数据,求解获得所述表达式的控制参数;根据所述表达式和所述控制参数求解获得拐角导流片翼型的轮廓坐标。

[0008] 采用本发明提供的技术方案,对待描述的拐角导流片翼型,通过分别对拐角导流片中弧线、厚度曲线采用参数化曲线描述,解决了拐角导流片翼型因弯度大上翼面曲线在前缘点附近存在多值的参数曲线描述问题,拟合精度高且误差小。

[0009] 采用本发明提供的技术方案,在拐角导流片翼型进行设计时:采用分段贝塞尔曲线分别对中弧线和厚度分布曲线进行描述,在对拐角导流片翼型最大弯度、最大厚度、后缘厚度等控制参数进行约束后,控制参数变量数目为11个(与Parsec等常用的翼型参数描述方法相当),参数空间维度较小;在约束空间内任意参数组合设计的翼型,其中弧线、厚度分布曲线具有单峰值、凸分布特性,满足拐角导流片翼型几何拓扑设计要求,规避了不合理的解。因此,采用本发明的技术方案,便于拐角导流片翼型轮廓优化迭代。

[0010] 优选的,拐角导流片翼型的中弧线参数化曲线对应的表达式为第一表达式,第一表达式为:

$$\begin{cases} Z_{Cf}(s, Cf) = \sum_{i=0}^3 Cf_i \cdot b_{i,3}(s) \\ Z_{Cp}(s, Cp) = \sum_{i=0}^3 Cp_i \cdot b_{i,3}(s) \end{cases}, s \in [0,1];$$

其中, Cf 为拐角导流片中弧线前段贝塞尔曲线的控制点, Cp 为拐角导流片中弧线后段贝塞尔曲线控制点, Cf 和 Cp 的计算方式为:

$$\begin{cases} Cf = (C_0 \quad C_1 \quad C_2 \quad C_3) \\ Cp = (C_3 \quad C_4 \quad C_5 \quad C_6) \end{cases};$$

其中, $C_i = x_{C_i} + j * y_{C_i}$, j 为虚数符号, x 为横坐标, y 为纵坐标, x_{C_i} 为 C_i 的横坐标, y_{C_i} 为 C_i 的纵坐标, C_0 为拐角导流片翼型中弧线前缘点的复数坐标, C_6 为拐角导流片翼型中弧线后缘点的复数坐标, C_3 为拐角导流片翼型中弧线最大弯度位置点的复数坐标, C_1 、 C_2 、 C_4 和 C_5 为参数化控制点的复数坐标, $Z_{Cf}(s, Cf)$ 为由 s 和 Cf 控制的拐角导流片中弧线前段的贝塞尔曲线方程, $Z_{Cp}(s, Cp)$ 为由 s 和 Cp 控制的拐角导流片中弧线后段的贝塞尔曲线方程, s 为贝塞尔曲线位置控制参数, C 为拐角导流片中弧线的贝塞尔曲线控制点的复数坐标,下标 i 为序号代表不同的控制点, $b_{i,3}(s)$ 为四次伯恩斯坦多项式。

[0011] 优选的,基于拐角导流片中弧线前段贝塞尔曲线无量纲控制参数 c_f 和拐角导流片中弧线后段贝塞尔曲线无量纲控制参数 c_p ,获得 Cf 和 Cp 的无量纲表达式,具体为:

$$\left\{ \begin{array}{l} Cf(c_f) = \begin{bmatrix} x_{C0} \\ x_{C0} + a_{C1} \cdot a_{C2} \cdot (x_{C3} - x_{C0}) \\ x_{C0} + a_{C2} \cdot (x_{C3} - x_{C0}) \\ x_{C3} \end{bmatrix} + j \cdot \begin{bmatrix} y_{C0} \\ (a_{C1} + b_{C1} - a_{C1} \cdot b_{C1}) \cdot (y_{C3} - y_{C0}) \\ y_{C3} \\ y_{C3} \end{bmatrix} \\ Cp(c_p) = \begin{bmatrix} x_{C3} \\ x_{C3} + a_{C4} \cdot (x_{C6} - x_{C3}) \\ x_{C3} + (a_{C4} + a_{C4} \cdot a_{C5} + a_{C5}) \cdot (x_{C6} - x_{C3}) \\ x_{C6} \end{bmatrix} + j \cdot \begin{bmatrix} y_{C3} \\ y_{C3} \\ y_{C3} + a_{C5} \cdot (1 - b_{C5}) \cdot (y_{C6} - y_{C3}) \\ y_{C6} \end{bmatrix} \\ \begin{cases} c_f = (a_{C1} & b_{C1} & a_{C2}) \\ c_p = (a_{C4} & a_{C5} & b_{C5}) \end{cases} \end{array} \right. ;$$

其中, $Cf(c_f)$ 为 Cf 的无量纲表达式, $Cp(c_p)$ 为 Cp 的无量纲表达式, a_{C1} 、 b_{C1} 、 a_{C2} 、 a_{C4} 、 a_{C5} 和 b_{C5} 均为取值区间在 $[0, 1]$ 范围内的独立无量纲控制变量参数。

[0012] 优选的, $b_{i,3}(s)$ 的求解方式为:

$$b_{i,3}(s) = \frac{3!}{i!(3-i)!} s^i (1-s)^{3-i}。$$

[0013] 优选的, 拐角导流片翼型的厚度分布曲线参数化曲线对应的表达式为第二表达式, 第二表达式为:

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_{Hf}(s, Hf) = \sum_{i=0}^3 Hf_i \cdot b_{i,3}(s) \\ Z_{Hp}(s, Hp) = \sum_{i=0}^3 Hp_i \cdot b_{i,3}(s) \end{array} \right., \quad s \in [0, 1];$$

其中, Hf 为拐角导流片厚度曲线前段贝塞尔曲线的控制点, Hp 为拐角导流片厚度曲线后段贝塞尔曲线控制点, Hf 和 Hp 的表达式分别为:

$$\left\{ \begin{array}{l} Hf = (H_0 \quad H_1 \quad H_2 \quad H_3) \\ Hp = (H_3 \quad H_4 \quad H_5 \quad H_6) \end{array} \right. ;$$

其中, $H_i = x_{Hi} + j \cdot y_{Hi}$, j 为虚数符号, x 为横坐标, y 为纵坐标, x_{Hi} 为 H_i 的横坐标, y_{Hi} 为 H_i 的纵坐标, H_0 为拐角导流片翼型厚度分布曲线前缘点, H_6 为拐角导流片翼型厚度分布曲线后缘点, $H_6 = 1 + y_{H6}$, y_{H6} 为拐角导流片翼型后缘厚度, H_3 为拐角导流片翼型厚度分布曲线最大厚度位置, H_1 、 H_2 、 H_4 和 H_5 为参数化控制点; $Z_{Hf}(s, Hf)$ 为由 s 和 Hf 控制的拐角导流片厚度曲线前段的贝塞尔曲线方程, $Z_{Hp}(s, Hp)$ 为由 s 和 Hp 控制的拐角导流片厚度曲线后段的贝塞尔曲线方程, s 为贝塞尔曲线位置控制参数, H 为拐角导流片厚度曲线的贝塞尔曲线控制点的复数坐标, 下标 i 为控制参数序号代表不同的控制点, $b_{i,3}(s)$ 为四次伯恩斯坦多项式。优选的, 基于拐角导流片厚度曲线前段贝塞尔曲线无量纲控制参数 h_f 和拐角导流片厚度曲线后段贝塞尔曲线无量纲控制参数 h_p , 获得 Hf 和 Hp 的无量纲表达式, 具体为:

$$\left\{ \begin{array}{l} Hf(h_f) = \begin{bmatrix} x_{H0} \\ x_{H0} \\ x_{H0} + a_{H2} \cdot (x_{H3} - x_{H0}) \\ x_{H3} \end{bmatrix} + j \cdot \begin{bmatrix} y_{H0} \\ y_{H0} + b_{H1} \cdot (y_{H3} - y_{H0}) \\ y_{H3} \\ y_{H3} \end{bmatrix} \\ Hp(h_p) = \begin{bmatrix} x_{H3} \\ x_{H3} + a_{H4} \cdot (x_{H6} - x_{H3}) \\ x_{H3} + (a_{H4} - a_{H4} \cdot a_{H5} + a_{H5}) \cdot (x_{H6} - x_{H3}) \\ x_{H6} \end{bmatrix} + j \cdot \begin{bmatrix} y_{H3} \\ y_{H3} \\ y_{H3} + a_{H5} \cdot (1 - b_{H5}) \cdot (y_{H6} - y_{H3}) \\ y_{H6} \end{bmatrix} \\ \left. \begin{array}{l} h_f = [b_{H1}, a_{H2}] \\ h_p = [a_{H4}, a_{H5}, b_{H5}] \end{array} \right\};$$

其中, $Hf(h_f)$ 为 Hf 的无量纲表达式, $Hp(h_p)$ 为 Hp 的无量纲表达式, b_{H1} 、 a_{H2} 、 a_{H4} 、 a_{H5} 和 b_{H5} 均为取值区间在 $[0, 1]$ 范围内的独立无量纲控制变量参数。

[0014] 优选的, 为了避免下翼面曲线出现奇点, 最大弯度位置曲率半径应大于最大厚度的 $1/2$, 所述方法还包括对控制变量参数进行约束, 约束方式为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{3}{2} \cdot \frac{(1 - a_{C2})^2}{(1 - a_{C1})(1 - b_{C1})} \cdot \frac{x_{C3}^2}{y_{C3}} \geq \frac{y_{H3}}{2} \\ \frac{3}{2} \cdot \frac{a_{C4}^2}{a_{C5}(1 - b_{C5})} \cdot \frac{(1 - x_{C3})^2}{y_{C3}} \geq \frac{y_{H3}}{2} \end{array} \right.;$$

其中, y_{H3} 为拐角导流片最大厚度。

[0015] 优选的, 所述方法还包括采用非线性规划求解器对 c_f 、 c_p 、 h_f 和 h_p 进行求解, 具体为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{c_f \in [0,1]} \delta_{Cf}(c_f) \\ s.t. \quad \frac{3}{2} \cdot \frac{(1 - a_{C2})^2}{(1 - a_{C1})(1 - b_{C1})} \cdot \frac{x_{C3}^2}{y_{C3}} \geq \frac{y_{H3}}{2}; \\ c_f = [a_{C1}, b_{C1}, a_{C2}] \\ \min_{c_p \in [0,1]} \delta_{Cp}(c_p) \\ s.t. \quad \frac{3}{2} \cdot \frac{a_{C4}^2}{a_{C5}(1 - b_{C5})} \cdot \frac{(1 - x_{C3})^2}{y_{C3}} \geq \frac{y_{H3}}{2}; \\ c_p = [a_{C4}, a_{C5}, b_{C5}] \end{array} \right.$$

$$\begin{cases} \min_{h_f \in [0,1]} \delta_{Hf}(h_f) \\ h_f = [b_{H1}, a_{H2}] \end{cases};$$

$$\begin{cases} \min_{h_p \in [0,1]} \delta_{Hp}(h_p) \\ h_p = [a_{H4}, a_{H5}, b_{H5}] \end{cases};$$

其中, y_{H3} 为拐角导流片最大厚度, s.t. 为约束条件, $\delta_{Cf}(c_f)$ 、 $\delta_{Cp}(c_p)$ 、 $\delta_{Hf}(h_f)$ 和 $\delta_{Hp}(h_p)$ 分别为关于 c_f 、 c_p 、 h_f 和 h_p 的目标函数, a_{C1} 、 b_{C1} 、 a_{C2} 、 a_{C4} 、 a_{C5} 和 b_{C5} 均为取值区间在 $[0, 1]$ 范围内的独立无量纲控制变量参数, b_{H1} 、 a_{H2} 、 a_{H4} 、 a_{H5} 和 b_{H5} 均为取值区间在 $[0, 1]$ 范围内的独立无量纲控制变量参数, x_{Ci} 为 C_i 的横坐标, y_{Ci} 为 C_i 的纵坐标, C 为拐角导流片中弧线的贝塞尔曲线控制点的复数坐标, 下标 i 为序号代表不同的控制点, 具体为:

$$\begin{cases} \delta_{Cf}(c_f) = \int_0^1 |Z_{Cf}(s, Cf(c_f)) - Z_{Ctar}|^2 ds \\ \delta_{Cp}(c_p) = \int_0^1 |Z_{Cp}(s, Cp(c_p)) - Z_{Ctar}|^2 ds \\ \delta_{Hf}(h_f) = \int_0^1 |Z_{Hf}(s, Hf(h_f)) - Z_{Htar}|^2 ds \\ \delta_{Hp}(h_p) = \int_0^1 |Z_{Hp}(s, Hp(h_p)) - Z_{Htar}|^2 ds \end{cases};$$

其中, Z_{Ctar} 和 Z_{Htar} 分别为拐角导流片翼型的中弧线和厚度分布曲线, s 为贝塞尔曲线位置控制参数, ds 为 s 的微分, c_f 为拐角导流片中弧线前段贝塞尔曲线无量纲控制参数, c_p 为拐角导流片中弧线后段贝塞尔曲线无量纲控制参数, h_f 为拐角导流片厚度曲线前段贝塞尔曲线无量纲控制参数, h_p 为拐角导流片厚度曲线后段贝塞尔曲线无量纲控制参数; $Z_{Cf}(s, Cf(c_f))$ 为由 s 和 $Cf(c_f)$ 控制的拐角导流片中弧线前段的贝塞尔曲线方程, $Cf(c_f)$ 为 Cf 的无量纲表达式, $Z_{Cp}(s, Cp(c_p))$ 为由 s 和 $Cp(c_p)$ 控制的拐角导流片中弧线后段的贝塞尔曲线方程, $Cp(c_p)$ 为 Cp 的无量纲表达式, $Z_{Hf}(s, Hf(h_f))$ 为由 s 和 $Hf(h_f)$ 控制的拐角导流片厚度曲线前段的贝塞尔曲线方程, $Z_{Hp}(s, Hp(h_p))$ 为由 s 和 $Hp(h_p)$ 控制的拐角导流片厚度曲线后段的贝塞尔曲线方程, $Hf(h_f)$ 为 Hf 的无量纲表达式, $Hp(h_p)$ 为 Hp 的无量纲表达式。

[0016] 优选的, 所述根据所述表达式和所述控制参数求解获得拐角导流片翼型的轮廓坐标, 具体包括:

步骤a: 根据轮廓点控制数目 N , 确定递增的贝塞尔曲线位置控制参数 $s \in [0, 1]$ 共 N 个点;

步骤b: 基于 c_f 、 c_p 、 h_f 和 h_p 分别确定的 Cf 、 Cp 、 Hf 和 Hp , 以及步骤a确定的贝塞尔曲线位置控制参数 s , 计算获得中弧线坐标 $\{Z_{Cf}(s, Cf), Z_{Cp}(s, Cp)\}$ 和厚度分布曲线离散坐标 $\{Z_{Hf}(s, Hf), Z_{Hp}(s, Hp)\}$, 将中弧线坐标 $\{Z_{Cf}(s, Cf), Z_{Cp}(s, Cp)\}$ 记为 (x_c, y_c) , 将厚度分布曲线离散坐标 $\{Z_{Hf}(s, Hf), Z_{Hp}(s, Hp)\}$ 记为 (x_H, y_H) ; c_f 为拐角导流片中弧线前段贝塞尔曲线无量纲控制参数, c_p 为拐角导流片中弧线后段贝塞尔曲线无量纲控制参数, h_f 为拐角导流片厚度曲

线前段贝塞尔曲线无量纲控制参数, h_p 为拐角导流片厚度曲线后段贝塞尔曲线无量纲控制参数, C_f 为拐角导流片中弧线前段贝塞尔曲线的控制点, C_p 为拐角导流片中弧线后段贝塞尔曲线控制点, H_f 为拐角导流片厚度曲线前段贝塞尔曲线的控制点, H_p 为拐角导流片厚度曲线后段贝塞尔曲线的控制点;

步骤c: 对 (x_c, y_c) 采用分段样条曲线拟合, 获得中弧线坐标点位置对应的中弧线倾角 (x_c, θ_c) ;

步骤d: 对 (x_H, y_H) 采用分段样条曲线拟合, 并插值得到对应中弧线各点横坐标对应的厚度坐标 (x_c, y_{HC}) ;

步骤e: 基于 (x_c, y_c) 、 (x_c, θ_c) 和 (x_c, y_{HC}) 计算获得拐角导流片翼型上翼面坐标 Z_{up} 和下翼面坐标 Z_{lw} , 其中, x_c 为中弧线横坐标, y_c 为中弧线纵坐标, y_{HC} 为中弧线横坐标位置对应的厚度, θ_c 为中弧线横坐标位置对应的中弧线倾角。

[0017] 优选的, 拐角导流片翼型上翼面坐标 Z_{up} 和下翼面坐标 Z_{lw} 的计算方式为:

$$\begin{cases} Z_{up} = [x_c - y_{HC}/2 \cdot \sin(\theta_c)] + i \cdot [y_c + y_{HC}/2 \cdot \cos(\theta_c)] \\ Z_{lw} = [x_c + y_{HC}/2 \cdot \sin(\theta_c)] + i \cdot [y_c - y_{HC}/2 \cdot \cos(\theta_c)] \end{cases}^{\circ}$$

[0018] 本发明提供的一个或多个技术方案, 至少具有如下技术效果或优点:

本发明能够以较少的参数实现拐角导流片翼型轮廓高精度求解, 同时提高设计参数空间范围内翼型轮廓质量。

附图说明

[0019] 此处所说明的附图用来提供对本发明实施例的进一步理解, 构成本发明的一部分, 并不构成对本发明实施例的限定;

图1为拐角导流片翼型轮廓示意图

图2为中弧线参数曲线示意图;

图3为厚度分布曲线参数示意图;

图4为某拐角导流片翼型参数化描述误差曲线示意图;

其中, 1-拐角导流片翼型上翼面, 2-拐角导流片翼型下翼面, 3-拐角导流片翼型中弧线, 4-拐角导流片翼型前缘点, 5-拐角导流片翼型后缘点, 6-拐角导流片翼型中弧线最大弯度位置, 7-拐角导流片翼型厚度分布曲线最大厚度位置。

具体实施方式

[0020] 为了能够更清楚地理解本发明的上述目的、特征和优点, 下面结合附图和具体实施方式对本发明进行进一步的详细描述。需要说明的是, 在相互不冲突的情况下, 本发明的实施例及实施例中的特征可以相互组合。

[0021] 在下面的描述中阐述了很多具体细节以便于充分理解本发明, 但是, 本发明还可以采用其他不同于在此描述范围内的其他方式来实施, 因此, 本发明的保护范围并不受下面公开的具体实施例的限制。

[0022] 实施例一;

[0023] 本发明的拐角导流片翼型参数化描述方法, 包括: 获取拐角导流片翼型的中弧线、

厚度分布坐标数据;根据所述坐标数据获得翼型的多个特征参数,其中特征参数包括拐角导流片翼型的前缘点及后缘点坐标,最大弯度、最大厚度大小及位置,后缘厚度;建立中弧线和厚度分布曲线参数化曲线描述方法,利用拐角导流片翼型特征参数、拐角导流片翼型中弧线及厚度分布坐标数据,求解中弧线和厚度分布曲线参数化曲线的控制参数;根据所述建立的参数化曲线及控制参数求解拐角导流片翼型轮廓坐标。

[0024] 在一种可选的实施方式中,所述中弧线参数化描述方法采用分段贝塞尔曲线,具体包括:

$$\begin{cases} Z_{Cf}(s, Cf) = \sum_{i=0}^3 Cf_i \cdot b_{i,3}(s) \\ Z_{Cp}(s, Cp) = \sum_{i=0}^3 Cp_i \cdot b_{i,3}(s) \end{cases}, \quad s \in [0, 1];$$

其中, Cf 为拐角导流片中弧线前段贝塞尔曲线的控制点, Cp 为拐角导流片中弧线后段贝塞尔曲线控制点, Cf 和 Cp 的计算方式为:

$$\begin{cases} Cf = (C_0 \quad C_1 \quad C_2 \quad C_3) \\ Cp = (C_3 \quad C_4 \quad C_5 \quad C_6) \end{cases};$$

其中, $C_i = x_{C_i} + j * y_{C_i}$, j 为虚数符号, x 为横坐标, y 为纵坐标, x_{C_i} 为 C_i 的横坐标, y_{C_i} 为 C_i 的纵坐标, C_0 为拐角导流片翼型中弧线前缘点的复数坐标, C_6 为拐角导流片翼型中弧线后缘点的复数坐标, C_3 为拐角导流片翼型中弧线最大弯度位置点的复数坐标, C_1 、 C_2 、 C_4 和 C_5 为参数化控制点的复数坐标, $Z_{Cf}(s, Cf)$ 为由 s 和 Cf 控制的拐角导流片中弧线前段的贝塞尔曲线方程, $Z_{Cp}(s, Cp)$ 为由 s 和 Cp 控制的拐角导流片中弧线后段的贝塞尔曲线方程, s 为贝塞尔曲线位置控制参数, C 为拐角导流片中弧线的贝塞尔曲线控制点的复数坐标, 下标 i 为序号代表不同的控制点, $b_{i,3}(s)$ 为四次伯恩斯坦多项式。

[0025] 基于拐角导流片中弧线前段贝塞尔曲线无量纲控制参数 c_f 和拐角导流片中弧线后段贝塞尔曲线无量纲控制参数 c_p , 获得 Cf 和 Cp 的无量纲表达式, 具体为:

$$\begin{cases} Cf(c_f) = \begin{bmatrix} x_{C0} \\ x_{C0} + a_{C1} \cdot a_{C2} \cdot (x_{C3} - x_{C0}) \\ x_{C0} + a_{C2} \cdot (x_{C3} - x_{C0}) \\ x_{C3} \end{bmatrix} + j \cdot \begin{bmatrix} y_{C0} \\ (a_{C1} + b_{C1} - a_{C1} \cdot b_{C1}) \cdot (y_{C3} - y_{C0}) \\ y_{C3} \\ y_{C3} \end{bmatrix} \\ Cp(c_p) = \begin{bmatrix} x_{C3} \\ x_{C3} + a_{C4} \cdot (x_{C6} - x_{C3}) \\ x_{C3} + (a_{C4} + a_{C4} \cdot a_{C5} + a_{C5}) \cdot (x_{C6} - x_{C3}) \\ x_{C6} \end{bmatrix} + j \cdot \begin{bmatrix} y_{C3} \\ y_{C3} \\ y_{C3} + a_{C5} \cdot (1 - b_{C5}) \cdot (y_{C6} - y_{C3}) \\ y_{C6} \end{bmatrix}; \\ \begin{cases} c_f = (a_{C1} \quad b_{C1} \quad a_{C2}) \\ c_p = (a_{C4} \quad a_{C5} \quad b_{C5}) \end{cases}; \end{cases}$$

其中, $Cf(c_f)$ 为 Cf 的无量纲表达式, $Cp(c_p)$ 为 Cp 的无量纲表达式, a_{C1} 、 b_{C1} 、 a_{C2} 、

a_{C4} 、 a_{C5} 和 b_{C5} 均为取值区间在 $[0, 1]$ 范围内的独立无量纲控制变量参数。

[0026] 其中, $b_{i,3}(s)$ 为四次伯恩斯坦多项式,求解方式为:

$$b_{i,3}(s) = \frac{3!}{i!(3-i)!} s^i (1-s)^{3-i}。$$

[0027] 在一种可选的实施方式中,所述厚度分布曲线参数化的求解方式采用分段贝塞尔曲线,具体包括:

$$\begin{cases} Z_{Hf}(s, Hf) = \sum_{i=0}^3 Hf_i \cdot b_{i,3}(s) \\ Z_{Hp}(s, Hp) = \sum_{i=0}^3 Hp_i \cdot b_{i,3}(s) \end{cases}, \quad s \in [0, 1];$$

其中, Hf 为拐角导流片厚度曲线前段贝塞尔曲线的控制点, Hp 为拐角导流片厚度曲线后段贝塞尔曲线控制点, Hf 和 Hp 的表达式分别为:

$$\begin{cases} Hf = (H_0 \quad H_1 \quad H_2 \quad H_3) \\ Hp = (H_3 \quad H_4 \quad H_5 \quad H_6) \end{cases};$$

其中, $H_i = x_{Hi} + j * y_{Hi}$, j 为虚数符号, x 为横坐标, y 为纵坐标, x_{Hi} 为 H_i 的横坐标, y_{Hi} 为 H_i 的纵坐标, H_0 为拐角导流片翼型厚度分布曲线前缘点, H_6 为拐角导流片翼型厚度分布曲线后缘点, $H_6 = 1 + y_{H6}$, y_{H6} 为拐角导流片翼型后缘厚度, H_3 为拐角导流片翼型厚度分布曲线最大厚度位置, H_1 、 H_2 、 H_4 和 H_5 为参数化控制点; $Z_{Hf}(s, Hf)$ 为由 s 和 Hf 控制的拐角导流片厚度曲线前段的贝塞尔曲线方程, $Z_{Hp}(s, Hp)$ 为由 s 和 Hp 控制的拐角导流片厚度曲线后段的贝塞尔曲线方程, s 为贝塞尔曲线位置控制参数, H 为拐角导流片厚度曲线的贝塞尔曲线控制点的复数坐标,下标 i 为控制参数序号代表不同的控制点, $b_{i,3}(s)$ 为四次伯恩斯坦多项式。其中,在本发明实施例中,基于拐角导流片厚度曲线前段贝塞尔曲线无量纲控制参数 h_f 和拐角导流片厚度曲线后段贝塞尔曲线无量纲控制参数 h_p ,获得 Hf 和 Hp 的无量纲表达式,具体为:

$$\begin{cases} Hf(h_f) = \begin{bmatrix} x_{H0} \\ x_{H0} \\ x_{H0} + a_{H2} \cdot (x_{H3} - x_{H0}) \\ x_{H3} \end{bmatrix} + j \cdot \begin{bmatrix} y_{H0} \\ y_{H0} + b_{H1} \cdot (y_{H3} - y_{H0}) \\ y_{H3} \\ y_{H3} \end{bmatrix} \\ Hp(h_p) = \begin{bmatrix} x_{H3} \\ x_{H3} + a_{H4} \cdot (x_{H6} - x_{H3}) \\ x_{H3} + (a_{H4} - a_{H4} \cdot a_{H5} + a_{H5}) \cdot (x_{H6} - x_{H3}) \\ x_{H6} \end{bmatrix} + j \cdot \begin{bmatrix} y_{H3} \\ y_{H3} \\ y_{H3} + a_{H5} \cdot (1 - b_{H5}) \cdot (y_{H6} - y_{H3}) \\ y_{H6} \end{bmatrix}; \\ \begin{cases} h_f = [b_{H1}, a_{H2}] \\ h_p = [a_{H4}, a_{H5}, b_{H5}] \end{cases}; \end{cases}$$

其中, $Hf(h_f)$ 为 Hf 的无量纲表达式, $Hp(h_p)$ 为 Hp 的无量纲表达式, b_{H1} 、 a_{H2} 、 a_{H4} 、 a_{H5} 和 b_{H5} 均为取值区间在 $[0, 1]$ 范围内的独立无量纲控制变量参数。

[0028] 其中,为了避免下翼面曲线出现奇点,最大弯度位置曲率半径应大于最大厚度的1/2,即控制变量参数应满足以下非线性约束要求:

$$\begin{cases} \frac{3}{2} \cdot \frac{(1-a_{C2})^2}{(1-a_{C1})(1-b_{C1})} \cdot \frac{x_{C3}^2}{y_{C3}} \geq \frac{y_{H3}}{2} \\ \frac{3}{2} \cdot \frac{a_{C4}^2}{a_{C5}(1-b_{C5})} \cdot \frac{(1-x_{C3})^2}{y_{C3}} \geq \frac{y_{H3}}{2} \end{cases};$$

其中, y_{H3} 为拐角导流片最大厚度。

[0029] 在一种可选的实施方式中,以拐角导流片翼型轮廓与参数化描述翼型的中弧线及厚度分布曲线一致为目标,采用非线性规划求解器对 c_f 、 c_p 、 h_f 和 h_p 进行求解,具体为:

$$\begin{cases} \min_{c_f \in [0,1]} \delta_{Cf}(c_f) \\ \text{s.t.} \quad \frac{3}{2} \cdot \frac{(1-a_{C2})^2}{(1-a_{C1})(1-b_{C1})} \cdot \frac{x_{C3}^2}{y_{C3}} \geq \frac{y_{H3}}{2}; \\ c_f = [a_{C1}, b_{C1}, a_{C2}] \end{cases}$$

$$\begin{cases} \min_{c_p \in [0,1]} \delta_{Cp}(c_p) \\ \text{s.t.} \quad \frac{3}{2} \cdot \frac{a_{C4}^2}{a_{C5}(1-b_{C5})} \cdot \frac{(1-x_{C3})^2}{y_{C3}} \geq \frac{y_{H3}}{2}; \\ c_p = [a_{C4}, a_{C5}, b_{C5}] \end{cases}$$

$$\begin{cases} \min_{h_f \in [0,1]} \delta_{Hf}(h_f) \\ h_f = [b_{H1}, a_{H2}] \end{cases};$$

$$\begin{cases} \min_{h_p \in [0,1]} \delta_{Hp}(h_p) \\ h_p = [a_{H4}, a_{H5}, b_{H5}] \end{cases};$$

其中, y_{H3} 为拐角导流片最大厚度,s.t.为约束条件, $\delta_{Cf}(c_f)$ 、 $\delta_{Cp}(c_p)$ 、 $\delta_{Hf}(h_f)$ 和 $\delta_{Hp}(h_p)$ 分别为关于 c_f 、 c_p 、 h_f 和 h_p 的目标函数, a_{C1} 、 b_{C1} 、 a_{C2} 、 a_{C4} 、 a_{C5} 和 b_{C5} 均为取值区间在 $[0,1]$ 范围内的独立无量纲控制变量参数, b_{H1} 、 a_{H2} 、 a_{H4} 、 a_{H5} 和 b_{H5} 均为取值区间在 $[0,1]$ 范围内的独立无量纲控制变量参数, x_{Ci} 为 C_i 的横坐标, y_{Ci} 为 C_i 的纵坐标, C 为拐角导流片中弧线的贝塞尔曲线控制点的复数坐标,下标 i 为序号代表不同的控制点,具体为:

$$\begin{cases} \delta_{Cf}(c_f) = \int_0^1 |Z_{Cf}(s, Cf(c_f)) - Z_{Ctar}|^2 ds \\ \delta_{Cp}(c_p) = \int_0^1 |Z_{Cp}(s, Cp(c_p)) - Z_{Ctar}|^2 ds \\ \delta_{Hf}(h_f) = \int_0^1 |Z_{Hf}(s, Hf(h_f)) - Z_{Htar}|^2 ds \\ \delta_{Hp}(h_p) = \int_0^1 |Z_{Hp}(s, Hp(h_p)) - Z_{Htar}|^2 ds \end{cases};$$

其中, Z_{Ctar} 和 Z_{Htar} 分别为拐角导流片翼型的中弧线和厚度分布曲线, s 为贝塞尔曲线位置控制参数, ds 为 s 的微分, c_f 为拐角导流片中弧线前段贝塞尔曲线无量纲控制参数, c_p 为拐角导流片中弧线后段贝塞尔曲线无量纲控制参数, h_f 为拐角导流片厚度曲线前段贝塞尔曲线无量纲控制参数, h_p 为拐角导流片厚度曲线后段贝塞尔曲线无量纲控制参数; $Z_{Cf}(s, Cf(c_f))$ 为由 s 和 $Cf(c_f)$ 控制的拐角导流片中弧线前段的贝塞尔曲线方程, $Cf(c_f)$ 为 Cf 的无量纲表达式, $Z_{Cp}(s, Cp(c_p))$ 为由 s 和 $Cp(c_p)$ 控制的拐角导流片中弧线后段的贝塞尔曲线方程, $Cp(c_p)$ 为 Cp 的无量纲表达式, $Z_{Hf}(s, Hf(h_f))$ 为由 s 和 $Hf(h_f)$ 控制的拐角导流片厚度曲线前段的贝塞尔曲线方程, $Z_{Hp}(s, Hp(h_p))$ 为由 s 和 $Hp(h_p)$ 控制的拐角导流片厚度曲线后段的贝塞尔曲线方程, $Hf(h_f)$ 为 Hf 的无量纲表达式, $Hp(h_p)$ 为 Hp 的无量纲表达式。

[0030] 在一种可选的实施方式中, 根据所述表达式和所述控制参数求解获得拐角导流片翼型的轮廓坐标, 具体包括:

步骤a: 根据轮廓点控制数目 N , 确定递增的贝塞尔曲线位置控制参数 $s \in [0, 1]$ 共 N 个点;

步骤b: 基于 c_f 、 c_p 、 h_f 和 h_p 分别确定的 Cf 、 Cp 、 Hf 和 Hp , 以及步骤a确定的贝塞尔曲线位置控制参数 s , 计算获得中弧线坐标 $\{Z_{Cf}(s, Cf), Z_{Cp}(s, Cp)\}$ 和厚度分布曲线离散坐标 $\{Z_{Hf}(s, Hf), Z_{Hp}(s, Hp)\}$, 将中弧线坐标 $\{Z_{Cf}(s, Cf), Z_{Cp}(s, Cp)\}$ 记为 (x_c, y_c) , 将厚度分布曲线离散坐标 $\{Z_{Hf}(s, Hf), Z_{Hp}(s, Hp)\}$ 记为 (x_H, y_H) ; c_f 为拐角导流片中弧线前段贝塞尔曲线无量纲控制参数, c_p 为拐角导流片中弧线后段贝塞尔曲线无量纲控制参数, h_f 为拐角导流片厚度曲线前段贝塞尔曲线无量纲控制参数, h_p 为拐角导流片厚度曲线后段贝塞尔曲线无量纲控制参数, Cf 为拐角导流片中弧线前段贝塞尔曲线的控制点, Cp 为拐角导流片中弧线后段贝塞尔曲线控制点, Hf 为拐角导流片厚度曲线前段贝塞尔曲线的控制点, Hp 为拐角导流片厚度曲线后段贝塞尔曲线的控制点;

步骤c: 对 (x_c, y_c) 采用分段样条曲线拟合, 获得中弧线坐标点位置对应的中弧线倾角 (x_c, θ_c) ;

步骤d: 对 (x_H, y_H) 采用分段样条曲线拟合, 并插值得到对应中弧线各点横坐标对应的厚度坐标 (x_c, y_{HC}) ;

步骤e: 基于 (x_c, y_c) 、 (x_c, θ_c) 和 (x_c, y_{HC}) 计算获得拐角导流片翼型上翼面坐标 Z_{up} 和下翼面坐标 Z_{lw} , 其中, x_c 为中弧线横坐标, y_c 为中弧线纵坐标, y_{HC} 为中弧线横坐标位置对应的厚度, θ_c 为中弧线横坐标位置对应的中弧线倾角。

[0031] 拐角导流片翼型上翼面坐标 Z_{up} 和下翼面坐标 Z_{lw} 的计算方式为:

$$\begin{cases} Z_{up} = [x_C - y_{HC}/2 \cdot \sin(\theta_C)] + i \cdot [y_C + y_{HC}/2 \cdot \cos(\theta_C)] \\ Z_{bw} = [x_C + y_{HC}/2 \cdot \sin(\theta_C)] + i \cdot [y_C - y_{HC}/2 \cdot \cos(\theta_C)] \end{cases}^{\circ}$$

[0032] 某拐角导流片翼型采用NACA 4位数字翼型所采用的解析曲线设计,翼型设计弯度0.15、厚度0.12。对该翼型采用本发明所述方法进行轮廓参数化求解,考察本发明所述方法对拐角导流片翼型轮廓求解能力和求解结果误差。

[0033] 图1给出了该拐角导流片翼型的示意图,表1-表3为拐角导流片翼型中弧线和厚度分布曲线第一至第三坐标表,将拐角导流片翼型分为上下两个翼面,翼面曲线的等距离中心线即为翼型中弧线的复数坐标 Z_{Ctar} 表述为 $Z_{Ctar} = x_{Ctar} + i \cdot y_{Ctar}$,其中 x_{Ctar} 为中弧线横坐标, y_{Ctar} 为中弧线纵坐标;从中弧线沿方向至上下翼面距离之和为当地厚度,沿中弧线横坐标分布即为翼型厚度分布曲线的复数坐标 Z_{Htar} 表述为 $Z_{Htar} = x_{Htar} + i \cdot y_{Htar}$,其中 x_{Htar} 为厚度分布曲线横坐标, y_{Htar} 为厚度分布曲线纵坐标。

[0034] 表1 拐角导流片翼型中弧线和厚度分布曲线第一坐标表

X _{Ctar}	Y _{Ctar}	Y _{Htar}
0.000000	0.000000	0.000000
0.000987	0.000739	0.011041
0.003943	0.002942	0.021768
0.008856	0.006569	0.032157
0.015708	0.011550	0.042176
0.024472	0.017792	0.051787
0.035112	0.025178	0.060946
0.047586	0.033567	0.069606
0.061847	0.042799	0.077717
0.077836	0.052697	0.085230
0.095492	0.063070	0.092098
0.114743	0.073714	0.098276
0.135516	0.084420	0.103725
0.157726	0.094972	0.108415
0.181288	0.105155	0.112320
0.206107	0.114755	0.115428
0.232087	0.123567	0.117733
0.259123	0.131394	0.119239

[0035] 表2 拐角导流片翼型中弧线和厚度分布曲线第二坐标表

X _{Ctar}	Y _{Ctar}	Y _{Htar}
0.287110	0.138052	0.119960
0.300000	0.140625	0.120000
0.315938	0.143375	0.119920
0.345492	0.147215	0.119149
0.375655	0.149444	0.117687
0.400000	0.150000	0.116063
0.437333	0.149419	0.112871
0.468605	0.148039	0.109620
0.500000	0.145833	0.105881
0.531395	0.142806	0.101709
0.562667	0.138975	0.097162
0.593691	0.134368	0.092297
0.624345	0.129029	0.087170
0.654508	0.123011	0.081835
0.684062	0.116379	0.076344
0.712890	0.109208	0.070747
0.740877	0.101585	0.065095

[0036] 表3 拐角导流片翼型中弧线和厚度分布曲线第三坐标表

X _{Ctar}	Y _{Ctar}	Y _{Htar}
0.767913	0.093600	0.059433
0.793893	0.085354	0.053810
0.818712	0.076950	0.048271
0.842274	0.068498	0.042859
0.864484	0.060106	0.037619
0.885257	0.051886	0.032595
0.904508	0.043946	0.027829
0.922164	0.036394	0.023363
0.938153	0.029330	0.019238
0.952414	0.022850	0.015493
0.964888	0.017042	0.012164
0.975528	0.011986	0.009285
0.984292	0.007751	0.006886
0.991144	0.004396	0.004992
0.996057	0.001965	0.003624
0.999013	0.000493	0.002797
1.000000	0.000000	0.002520

[0037] 采用本申请的方案对该拐角导流片翼型进行参数化求解。

[0038] 该翼型中弧线前缘点位置 $C_0=x_{C_0}+i*y_{C_0}=0$ 、后缘点位置 $C_6=x_{C_6}+i*y_{C_6}=1$ 、最大厚度位置 $C_3=x_{C_3}+i*y_{C_3}=0.4+0.23i$ 。厚度分布曲线前缘点位置 $H_0=x_{H_0}+i*y_{H_0}=0$ ，后缘点位置 $H_6=x_{H_6}+i*y_{H_6}=1+0.000252i$ ，最大厚度位置 $H_3=x_{H_3}+i*y_{H_3}=0.3+0.12i$ 。

[0039] 图2给出了某拐角导流片翼型中弧线参数化描述的示意图，由最大弯度位置点 C_3 分为前后两段 Z_{Cf}, Z_{Cp} 。

[0040] 图3给出了某拐角导流片翼型厚度分布曲线参数化求解的示意图,由最大厚度位置点 H_3 分为前后两段 Z_{Hf}, Z_{Hp} 。

[0041] 利用非线性规划拟合求解,得到控制参数 c_f, c_p, h_f 和 h_p :

$$\begin{cases} c_f = (0.495512 & 0.315926 & 0.660830) \\ c_p = (0.364991 & 0.527340 & 0.241955) \\ h_f = (0.527505 & 0.326866) \\ h_p = (0.315346 & 0.643609 & 0.081391) \end{cases};$$

定义位置参数 s 在 $0 \sim 1$ 之间以余弦函数分布,点数101个:

$$s = \frac{1}{2} \left[1 - \cos \left(\frac{n-1}{101-1} \pi \right) \right], n = 1, 2, \dots, 101;$$

将控制参数 c_f, c_p, h_f 和 h_p 及位置参数 s 代入参数化描述方程,定义得到参数化描述翼型中弧线的复数坐标 Z_{Ctar} 表述为 $Z_{Cres} = x_{Cres} + i * y_{Cres}$,其中 x_{Cres} 为参数化描述翼型中弧线的横坐标, y_{Cres} 为参数化描述翼型中弧线的纵坐标;参数化描述翼型厚度分布曲线的复数坐标 Z_{Hres} 表述为 $Z_{Hres} = x_{Hres} + i * y_{Hres}$,其中 x_{Hres} 为参数化描述翼型厚度分布曲线的横坐标, y_{Hres} 为参数化描述翼型厚度分布曲线的纵坐标;请参考表4-表6,表4-表6为参数化描述翼型中弧线和厚度分布曲线第一至第三坐标表;

表4 参数化描述翼型中弧线和厚度分布曲线第一坐标表

X _{Cres}	Y _{Cres}	Y _{Hres}
0.000000	0.000000	0.000000
0.016908	0.012413	0.043615
0.033743	0.024240	0.059917
0.050504	0.035487	0.071458
0.067191	0.046161	0.080438
0.083804	0.056269	0.087721
0.100342	0.065817	0.093759
0.116805	0.074813	0.098826
0.133192	0.083263	0.103101
0.149505	0.091174	0.106714
0.165741	0.098552	0.109757
0.181902	0.105406	0.112305
0.197986	0.111740	0.114413
0.213993	0.117564	0.116130
0.229923	0.122882	0.117492
0.245777	0.127702	0.118532
0.261552	0.132030	0.119278

[0042] 表5 参数化描述翼型中弧线和厚度分布曲线第二坐标表

X _{Cres}	Y _{Cres}	Y _{Hres}
0.277250	0.135874	0.119752
0.292870	0.139241	0.119976
0.308412	0.142136	0.119967
0.323875	0.144567	0.119742
0.339259	0.146541	0.119321
0.354563	0.148065	0.118719
0.369789	0.149144	0.117953
0.384934	0.149787	0.117035
0.400000	0.150000	0.115977
0.421368	0.149810	0.114245
0.442966	0.149231	0.112237
0.464794	0.148251	0.109963
0.486849	0.146858	0.107434
0.509130	0.145039	0.104657
0.531636	0.142781	0.101639
0.554366	0.140072	0.098387
0.577317	0.136900	0.094906
0.600489	0.133253	0.091202
0.623880	0.129116	0.087278

[0043] 表6 参数化描述翼型中弧线和厚度分布曲线第三坐标表

X _{Cres}	Y _{Cres}	Y _{Hres}
0.647487	0.124479	0.083137
0.671311	0.119329	0.078783
0.695350	0.113653	0.074218
0.719601	0.107439	0.069444
0.744064	0.100675	0.064461
0.768737	0.093347	0.059269
0.793618	0.085443	0.053869
0.818706	0.076952	0.048259
0.844000	0.067860	0.042435
0.869499	0.058155	0.036393
0.895199	0.047825	0.030127
0.921102	0.036857	0.023627
0.947203	0.025238	0.016878
0.973503	0.012957	0.009855
1.000000	0.000000	0.002520

[0044] 参数化求解翼型与拐角导流片翼型误差结果如图4所示,其中横坐标为拐角导流片翼型轮廓坐标系的横坐标,纵坐标为中弧线、厚度分布曲线百分比误差;中弧线、厚度分布曲线最大误差分别小于0.001%、0.015%。

[0045] 尽管已描述了本发明的优选实施例,但本领域内的技术人员一旦得知了基本创造性概念,则可对这些实施例作出另外的变更和修改。所以,所附权利要求意欲解释为包括优选实施例以及落入本发明范围的所有变更和修改。

[0046] 显然,本领域的技术人员可以对本发明进行各种改动和变型而不脱离本发明的精神和范围。这样,倘若本发明的这些修改和变型属于本发明权利要求及其等同技术的范围之内,则本发明也意图包含这些改动和变型在内。

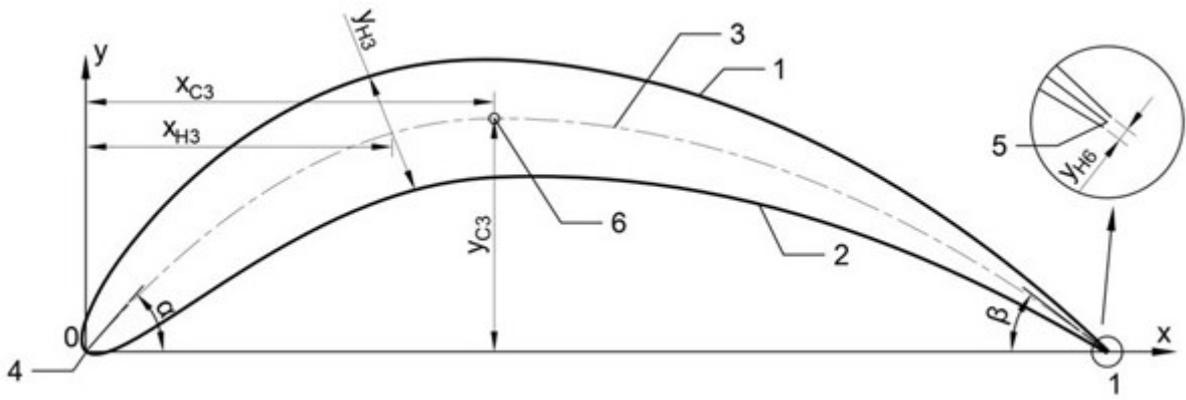


图 1

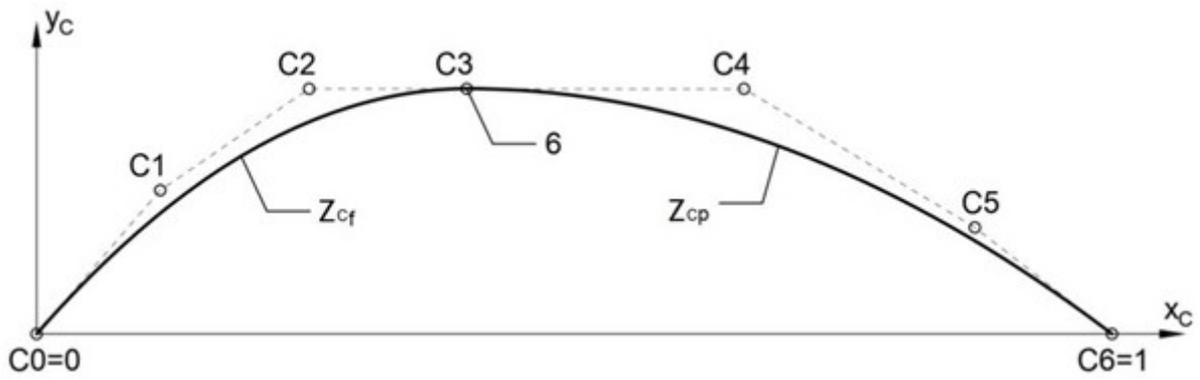


图 2

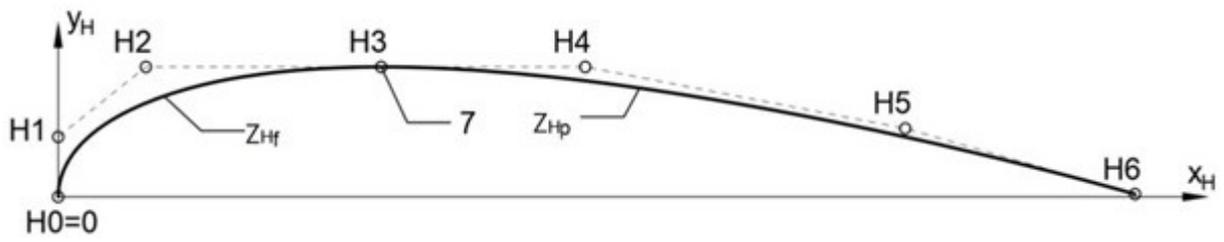


图 3

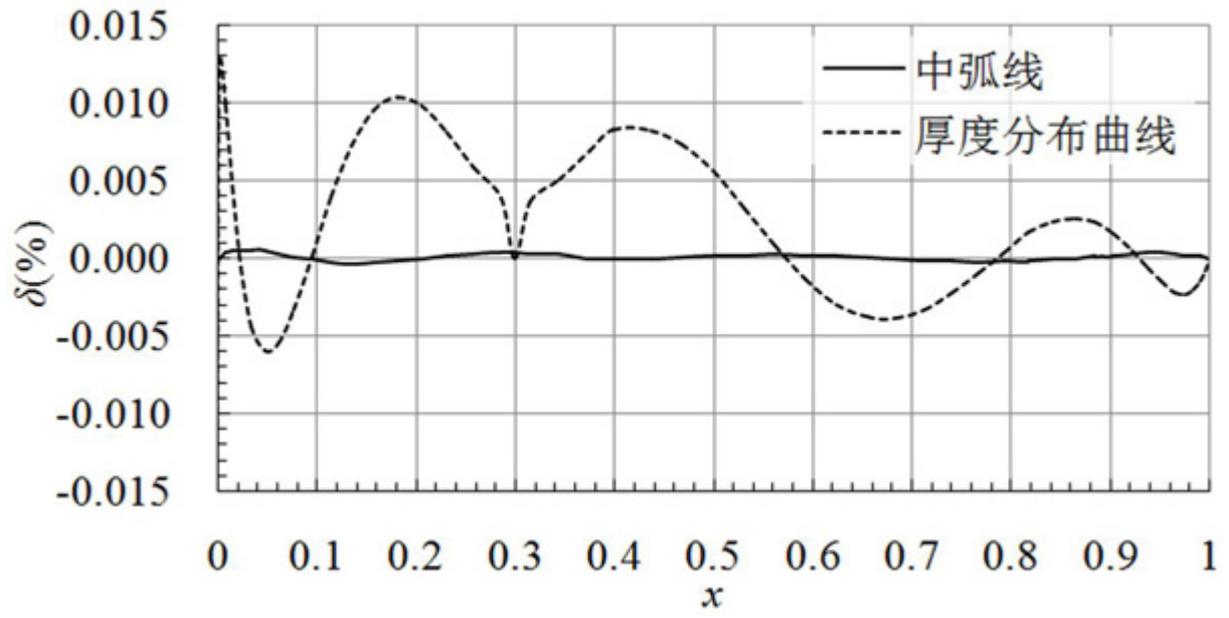


图 4