



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 112324517 A

(43) 申请公布日 2021.02.05

(21) 申请号 202011114344.7

(22) 申请日 2020.10.19

(71) 申请人 中国人民解放军海军工程大学

地址 430032 湖北省武汉市解放大道717号

(72) 发明人 刘永葆 蒙泽威 李钰洁 余又红

张筠松 李启杰

(74) 专利代理机构 西安研创天下知识产权代理

事务所(普通合伙) 61239

代理人 郭璐

(51) Int.Cl.

F01D 5/18 (2006.01)

F01D 25/00 (2006.01)

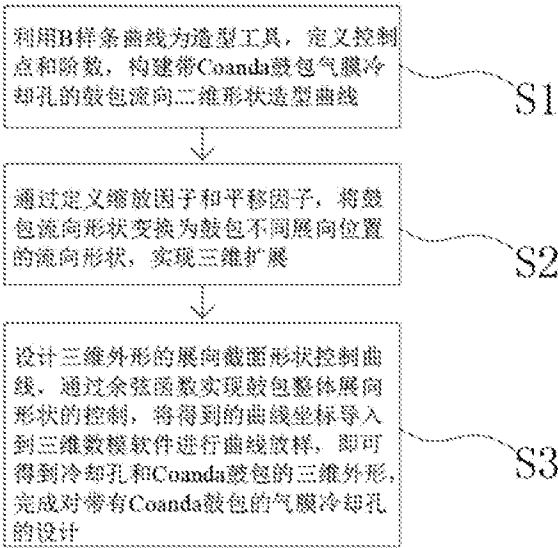
权利要求书2页 说明书6页 附图4页

(54) 发明名称

一种带有Coanda鼓包的气膜冷却孔的设计方法

(57) 摘要

本发明公开了一种带有Coanda鼓包的气膜冷却孔的设计方法,包括步骤S1.利用B样条曲线为造型工具,定义控制点和阶数,构建带Coanda鼓包气膜冷却孔的鼓包流向二维形状造型曲线 $f_B(t)$ ;S2.通过定义缩放因子和平移因子,将鼓包流向形状变换为鼓包不同展向位置的流向形状,实现三维扩展;S3.设计三维外形的展向截面形状控制曲线,通过余弦函数实现鼓包整体展向形状的控制;通过少量的参数控制,能够实现Coanda鼓包和气膜冷却孔的一体化参数化设计,且具有在能够利用康达效应提高冷却性能的同时,减小流动损失的特点。



1. 一种带有Coanda鼓包的气膜冷却孔的设计方法,其特征在于:包括步骤:

S1. 利用B样条曲线为造型工具,定义控制点和阶数,构建带Coanda鼓包气膜冷却孔的鼓包流向二维形状造型曲线 $f_B(t)$ ;

S2. 将二维鼓包流向曲线 $f_B(t)$ 扩展到三维外形设计:

根据椭圆理论,设计 $f_B(t)$ 由二维形状造型到三维外形扩展的缩放因子和平移因子,并将步骤S1得到的 $f_B(t)$ 变换到三维物理坐标系下鼓包外形,得到真实坐标系下的每一个 $y=y_i$ 截面形状控制方程:

$$x = \beta(y_i) \cdot t + \alpha(y_i)$$

$$z = \beta(y_i) \cdot f_B(t)$$

其中: $0 \leq t \leq 1$ ,  $-r \leq y_i \leq r$ ,  $\alpha(y_i)$  定义为平移因子,  $\beta(y_i)$  定义为缩放因子,  $r$  为冷却孔半径;

S3. 设计三维外形的横向截面形状控制曲线:

引入余弦函数,使得步骤S2得到的控制方程在Coanda鼓包曲面和壁面过渡区域在展向上上一阶连续,得到Coanda鼓包每一个 $y=y_i$ 截面形状控制方程:

$$x = \beta(y_i) \cdot t + \alpha(y_i)$$

$$z = \beta(y_i) \cdot f_B(t) \cdot f_s(y_i) = \beta(y_i) \cdot f_B(t) \cdot \frac{1}{2} \left( \cos\left(\frac{\pi y_i}{r}\right) + 1 \right)$$

其中: $0 \leq t \leq 1$ ,  $-r \leq y_i \leq r$ 。

2. 根据权利要求1所述的一种带有Coanda鼓包的气膜冷却孔的设计方法,其特征在于:步骤S1所述的构建带Coanda鼓包气膜冷却孔的鼓包流向二维形状造型曲线 $f_B(t)$ 的具体过程包括:

S101. 利用B样条曲线为造型工具,以主流流向为 $x$ 轴,纵向为 $z$ 轴,设计冷却气流孔与水平方向的倾角为 $\theta$ ,并选取鼓包流向形状的4个控制点的3阶B样条曲线 $f_B(t)$ 对带Coanda鼓包气膜冷却孔的鼓包流向二维形状描述;

其中,所述4个控制点为: $c_1, c_2, c_3$ 和 $c_4$ ;

S102. 对上述控制点的坐标进行归一化,得到各点的控制坐标为 $c_1(0,0)$ ,  $c_2(p_1, p_1 \tan(\theta))$ ,  $c_3(p_2, 0)$ 和 $c_4(1,0)$ ;

其中: $p_1 > 0$ ,  $0 < p_2 < 1$ 。

3. 根据权利要求2所述的一种带有Coanda鼓包的气膜冷却孔的设计方法,其特征在于:在步骤S102中:

(1) 对于 $c_1c_2$ 控制点,其斜率为 $\tan(\theta)$ ;

(2) 对于 $c_3c_4$ 控制点,其斜率为0。

4. 根据权利要求1所述的一种带有Coanda鼓包的气膜冷却孔的设计方法,其特征在于:步骤S2将二维鼓包流向曲线 $f_B(t)$ 扩展到三维外形设计的具体过程包括:

S201. 根据三维物理坐标系中的气膜冷却孔出口形状和Coanda鼓包控制线,由圆锥曲线理论可知,带倾角的冷却孔出口形状为椭圆,其控制方程为:

$$\frac{x_k^2}{a_k^2} + \frac{y_k^2}{b^2} = 1$$

其中:  $(x_h, y_h)$  表示冷却孔出口曲线, 由步骤S1得到的  $f_B(t)$  曲线所表示的二维形状可知:  $a_h = r/\sin(\theta)$ ,  $b = r$ ,  $r$  为冷却孔半径;

S202. Coanda鼓包控制线采用椭圆曲线描述, 其控制方程为:

$$\frac{x_c^2}{a_c^2} + \frac{y_c^2}{b^2} = 1, x_c \geq 0$$

其中:  $(x_c, y_c)$  表示冷却孔出口曲线,  $a_c$  为给定的控制参数;

S203. 设Coanda鼓包在横向离散为  $N$  个截面, 对于不同的  $y_i$  截面,  $s_1$   $s_2$  长度为  $\alpha(y_i)$ , 定义为平移因子;  $s_2$   $s_3$  长度为  $\beta(y_i)$ , 定义为缩放因子; 则  $s_2$   $s_3$  即为该截面Coanda鼓包的流向形状, 长度为  $\beta(y_i)$ , 归一化样条B曲线  $f_B(t)$  流向平移长度为  $\alpha(y_i)$ ;

其中:  $s_1$ 、 $s_2$ 、 $s_3$  分别为Coanda鼓包在展向离散的  $y = y_i$  截面上的三个点,  $i = 1, 2, \dots, N$ ;

S204. 根据椭圆理论可知, 平移因子为:

$$\alpha(y_i) = \frac{a_h}{b} \sqrt{b^2 - y_i^2} = \frac{\sqrt{r^2 - y_i^2}}{\sin(\theta)}$$

缩放因子为:

$$\beta(y_i) = \frac{a_c - a_h}{b} \sqrt{b^2 - y_i^2} = \frac{a_c - r/\sin(\theta)}{r} \sqrt{r^2 - y_i^2}$$

S205. 对  $f_B(t)$  归一化样条曲线进行变换, 可得到真实坐标系下的每一个  $y = y_i$  截面形状控制方程:

$$x = \beta(y_i) \cdot t + \alpha(y_i)$$

$$z = \beta(y_i) \cdot f_B(t)$$

其中:  $0 \leq t \leq 1$ ,  $-r \leq y_i \leq r$ 。

5. 根据权利要求1所述的一种带有Coanda鼓包的气膜冷却孔的设计方法, 其特征在于: 步骤S3所述的设计三维外形的横向截面形状控制模型的具体过程包括:

S301. 在步骤S2得到的控制方程上引入余弦函数进行控制, 保证鼓包表面到部件表面的光滑过渡, 所述余弦函数表示为:

$$f_s(y_i) = \frac{1}{2} \left( \cos\left(\frac{\pi y_i}{r}\right) + 1 \right), -r \leq y_i \leq r;$$

S302. 对步骤S2所述的Coanda鼓包曲面进行变换, 最终Coanda鼓包每一个  $y = y_i$  截面形状控制方程:

$$x = \beta(y_i) \cdot t + \alpha(y_i)$$

$$z = \beta(y_i) \cdot f_B(t) \cdot f_s(y_i) = \beta(y_i) \cdot f_B(t) \cdot \frac{1}{2} \left( \cos\left(\frac{\pi y_i}{r}\right) + 1 \right)$$

其中:  $0 \leq t \leq 1$ ,  $-r \leq y_i \leq r$ ;

S303. 利用上述方法得到每一个  $y = y_i$  截面的  $(x, z)$  曲线坐标, 将曲线坐标导入到三维数模软件进行曲线放样, 即可得到冷却孔和Coanda鼓包的三维外形, 完成对所述的带有Coanda鼓包的气膜冷却孔的设计。

## 一种带有Coanda鼓包的气膜冷却孔的设计方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及燃气涡轮发动机气膜孔设计技术领域,具体涉及一种带有Coanda鼓包的气膜冷却孔的设计方法。

### 背景技术

[0002] 气膜冷却是当今航空、舰船领域燃气涡轮发动机热端部件最常见冷却方式之一,其原理是通过发动机进气口将一股气流(此时温度较低)到冷气腔,之后从受热部件表面的小孔喷射出来,在小孔下游表面形成冷气膜,从而达到降温目的,研究发现冷却孔出口的形狀对冷却效果影响较大,学者们已经对圆形孔、矩形孔、扇形孔等不同孔形进行了深入的研究,发现不同的吹风比、孔形、射流角等对气膜冷却产生不同的影响;尤其是当吹风比较大时,冷气容易与主流掺混,从而降低了冷却效果;

[0003] 有学者研究发现,可以通过在气膜冷却孔下游布置Coanda鼓包(Coanda Bump),利用冷却气流与Coanda鼓包的作用,可以有效提高气膜冷却效率,人们对此也做出了不断的探索和研究;在现有的设计思路中,都是将气膜冷却孔和Coanda鼓包独立起来,分开设计,然后研究两者的综合效应;由于独立设计,两个几何外形并不能良好的过渡衔接,会出现凸台、拐角等表面曲率不连续的外形,从而会影响流动,增加损失。

### 发明内容

[0004] 针对上述存在的问题,本发明旨在提供一种带有Coanda鼓包的气膜冷却孔的设计方法,本方法通过5个形状参数的控制,实现气膜孔和Coanda鼓包的一体化外形设计,且具有在能够利用康达效应提高冷却性能的同时,减小流动损失的特点。

[0005] 为了实现上述目的,本发明所采用的技术方案如下:

[0006] 一种带有Coanda鼓包的气膜冷却孔的设计方法,包括步骤:

[0007] S1.利用B样条曲线为造型工具,定义控制点和阶数,构建带Coanda鼓包气膜冷却孔的鼓包流向二维形状造型曲线 $f_B(t)$ ;

[0008] S2.将二维鼓包流向曲线 $f_B(t)$ 拓展到三维外形设计:

[0009] 根据椭圆理论,设计 $f_B(t)$ 由二维形状造型到三维外形扩展的缩放因子和平移因子,并将步骤S1得到的 $f_B(t)$ 变换到三维物理坐标系下鼓包外形,得到真实坐标系下的每一个 $y=y_i$ 截面形状控制方程:

[0010]  $x=\beta(y_i) \cdot t+\alpha(y_i)$

[0011]  $z=\beta(y_i) \cdot f_B(t)$

[0012] 其中: $0 \leq t \leq 1$ , $-r \leq y_i \leq r$ , $\alpha(y_i)$ 定义为平移因子, $\beta(y_i)$ 定义为缩放因子, $r$ 为冷却孔半径;

[0013] S3.设计三维外形的横向截面形状控制曲线:

[0014] 引入余弦函数,使得步骤S2得到的控制方程在Coanda鼓包曲面和壁面过渡区域在展向上一阶连续,得到Coanda鼓包每一个 $y=y_i$ 截面形状控制方程:

[0015]  $x = \beta(y_i) \cdot t + \alpha(y_i)$

[0016]  $z = \beta(y_i) \cdot f_B(t) \cdot f_s(y_i) = \beta(y_i) \cdot f_B(t) \cdot \frac{1}{2} \left( \cos\left(\frac{\pi y_i}{r}\right) + 1 \right)$

[0017] 其中:  $0 \leq t \leq 1, -r \leq y_i \leq r$ 。

[0018] 优选的,步骤S1所述的构建带Coanda鼓包气膜冷却孔的鼓包流向二维形状造型曲线 $f_B(t)$ 的具体过程包括:

[0019] S101.利用B样条曲线为造型工具,以主流流向为x轴,纵向为z轴,设计冷却气流孔与水平方向的倾角为 $\theta$ ,并选取鼓包流向形状的4个控制点的3阶B样条曲线 $f_B(t)$ 对带Coanda鼓包气膜冷却孔的鼓包流向二维形状描述;

[0020] 其中,所述4个控制点为: $c_1, c_2, c_3$ 和 $c_4$ ;

[0021] S102.对上述控制点的坐标进行归一化,得到各点的控制坐标为 $c_1(0,0), c_2(p_1, p_1 \tan(\theta)), c_3(p_2, 0)$ 和 $c_4(1,0)$ ;

[0022] 其中: $p_1 > 0, 0 < p_2 < 1$ 。

[0023] 优选的,在步骤S102中:

[0024] (1)对于 $c_1c_2$ 控制点,其斜率为 $\tan(\theta)$ ;

[0025] (2)对于 $c_3c_4$ 控制点,其斜率为0。

[0026] 优选的,步骤S2将二维鼓包流向曲线 $f_B(t)$ 拓展到三维外形设计的具体过程包括:

[0027] S201.根据三维物理坐标系中的气膜冷却孔出口形状和Coanda鼓包控制线,由圆锥曲线理论可知,带倾角的冷却孔出口形状为椭圆,其控制方程为:

[0028]  $\frac{x_h^2}{a_h^2} + \frac{y_h^2}{b^2} = 1$

[0029] 其中: $(x_h, y_h)$ 表示冷却孔出口曲线,由步骤S1得到的 $f_B(t)$ 曲线所表示的二维形状可知: $a_h = r/\sin(\theta), b = r, r$ 为冷却孔半径;

[0030] S202.Coanda鼓包控制线采用椭圆曲线描述,其控制方程为:

[0031]  $\frac{x_c^2}{a_c^2} + \frac{y_c^2}{b^2} = 1, x_c \geq 0$

[0032] 其中: $(x_c, y_c)$ 表示冷却孔出口曲线, $a_c$ 为给定的控制参数;

[0033] S203.设Coanda鼓包在横向离散为N个截面,对于不同的 $y_i$ 截面, $s_1-s_2$ 长度为 $\alpha(y_i)$ ,定义为平移因子; $s_2-s_3$ 长度为 $\beta(y_i)$ ,定义为缩放因子;则 $s_2-s_3$ 即为该截面Coanda鼓包的流向形状,长度为 $\beta(y_i)$ ,归一化样条B曲线 $f_B(t)$ 流向平移长度为 $\alpha(y_i)$ ;

[0034] 其中: $s_1, s_2, s_3$ 分别为Coanda鼓包在展向离散的 $y = y_i$ 截面上的三个点, $i = 1, 2, \dots, N$ ;

[0035] S204.根据椭圆理论可知,平移因子为:

[0036]  $\alpha(y_i) = \frac{a_h}{b} \sqrt{b^2 - y_i^2} = \frac{\sqrt{r^2 - y_i^2}}{\sin(\theta)}$

[0037] 缩放因子为:

[0038]  $\beta(y_i) = \frac{a_c - a_h}{b} \sqrt{b^2 - y_i^2} = \frac{a_c - r/\sin(\theta)}{r} \sqrt{r^2 - y_i^2}$

[0039] S205.对 $f_B(t)$ 归一化样条曲线进行变换,可得到真实坐标系下的每一个 $y=y_i$ 截面形状控制方程:

$$[0040] \quad x = \beta(y_i) \cdot t + \alpha(y_i)$$

$$[0041] \quad z = \beta(y_i) \cdot f_B(t)$$

[0042] 其中: $0 \leq t \leq 1, -r \leq y_i \leq r$ 。

[0043] 优选的,步骤S3所述的设计三维外形的横向截面形状控制模型的具体过程包括:

[0044] S301.在步骤S2得到的控制方程上引入余弦函数进行控制,保证鼓包表面到部件表面的光滑过渡,所述余弦函数表示为:

$$[0045] \quad f_s(y_i) = \frac{1}{2} \left( \cos\left(\frac{\pi y_i}{r}\right) + 1 \right), -r \leq y_i \leq r ;$$

[0046] S302.对步骤S2所述的Coanda鼓包曲面进行变换,最终Coanda鼓包每一个 $y=y_i$ 截面形状控制方程:

$$[0047] \quad x = \beta(y_i) \cdot t + \alpha(y_i)$$

$$[0048] \quad z = \beta(y_i) \cdot f_B(t) \cdot f_s(y_i) = \beta(y_i) \cdot f_B(t) \cdot \frac{1}{2} \left( \cos\left(\frac{\pi y_i}{r}\right) + 1 \right)$$

[0049] 其中: $0 \leq t \leq 1, -r \leq y_i \leq r$ ;

[0050] S303.利用上述方法得到每一个 $y=y_i$ 截面的 $(x,z)$ 曲线坐标,将曲线坐标导入到三维数模软件进行曲线放样,即可得到冷却孔和Coanda鼓包的三维外形,完成对所述的带有Coanda鼓包的气膜冷却孔的设计。

[0051] 本发明的有益效果是:本发明公开了一种带有Coanda鼓包的气膜冷却孔的设计方法,与现有技术相比,本发明的改进之处在于:

[0052] 本发明设计了一种带有Coanda鼓包的气膜冷却孔的设计方法,本方法从二维形状出发:利用B样条曲线为造型工具,首先通过定义控制点和阶数,实现鼓包流向形状的控制;然后,通过定义缩放因子和平移因子,将鼓包流向形状变换为鼓包不同横向位置的流向形状,实现三维扩展;最后通过余弦函数实现鼓包整体横向形状的控制;通过少量的参数控制,能够实现Coanda鼓包和气膜冷却孔的一体化参数化设计,且具有在能够利用康达效应提高冷却性能的同时,减小流动损失的优点。

## 附图说明

[0053] 图1为本发明带有Coanda鼓包的气膜冷却孔的设计方法的设计流程图。

[0054] 图2为本发明带Coanda鼓包气膜冷却孔示意图。

[0055] 图3为本发明鼓包流向二维形状示意图。

[0056] 图4为本发明鼓包流向二维形状控制点示意图。

[0057] 图5为本发明横向形状控制参数样条曲线图。

[0058] 图6为本发明横向形状曲线图。

[0059] 图7为本发明实施例1气膜冷却孔和Coanda鼓包一体化设计case1图。

[0060] 图8为本发明实施例1气膜冷却孔和Coanda鼓包一体化设计case2图。

[0061] 其中:在图7和图8中,(a)表示正视图,(b)表示俯视图,(c)表示侧视图,(d)表示斜视图。

## 具体实施方式

[0062] 为了使本领域的普通技术人员能更好的理解本发明的技术方案,下面结合附图和实施例对本发明的技术方案做进一步的描述。

[0063] 参照附图1-6所示的一种带有Coanda鼓包的气膜冷却孔的设计方法,包括步骤:

[0064] S1.利用B样条曲线为造型工具,定义控制点和阶数,构建带Coanda鼓包气膜冷却孔的鼓包流向二维形状造型曲线 $f_B(t)$ ,其具体过程包括(如图3和图4所示):

[0065] S101.利用B样条曲线为造型工具,以主流流向为x轴,纵向为z轴,设计冷却气流孔与水平方向的倾角为 $\theta$ ,并选取鼓包流向形状的4个控制点的3阶B样条曲线 $f_B(t)$ 对带Coanda鼓包气膜冷却孔的鼓包流向二维形状描述(如图3所示);

[0066] 其中,所述4个控制点为: $c_1, c_2, c_3$ 和 $c_4$ ;所述B样条曲线是非常成熟的几何造型工具,已经被广泛应用于各个学科领域中,有关其基本原理不在此处赘述;

[0067] S102.对上述控制点的坐标进行归一化,得到各点的控制坐标为 $c_1(0,0)$ ,  $c_2(p_1, p_1 \tan(\theta))$ ,  $c_3(p_2, 0)$ 和 $c_4(1,0)$ ,如图4所示;

[0068] 其中: $p_1 > 0, 0 < p_2 < 1$ ;

[0069] (1)为保证气膜冷却孔壁面到鼓包壁面在流向上的一阶连续,对于 $c_1c_2$ 控制点,其斜率为 $\tan(\theta)$ ; (2)为保证鼓包壁面到下游壁面的流向上的一阶连续,对于 $c_3c_4$ 控制点,其斜率为0。

[0070] S2.将二维鼓包流向曲线 $f_B(t)$ 拓展到三维外形设计(通过定义缩放因子和平移因子,将鼓包流向形状变换为鼓包不同横向位置的流向形状,实现三维扩展):

[0071] 根据椭圆理论,设计 $f_B(t)$ 由二维形状造型到三维外形扩展的缩放因子和平移因子,并将步骤S1得到的 $f_B(t)$ 变换到三维物理坐标系下鼓包外形,得到真实坐标系下的每一个 $y=y_i$ 截面形状控制方程,其具体过程包括(如图5和图6所示):

[0072] S201.根据三维物理坐标系中的气膜冷却孔出口形状和Coanda鼓包控制线,由圆锥曲线理论可知,带倾角的冷却孔出口形状为椭圆,其控制方程为:

$$[0073] \quad \frac{x_h^2}{a_h^2} + \frac{y_h^2}{b^2} = 1$$

[0074] 其中: $(x_h, y_h)$ 表示冷却孔出口曲线,如图5所示,由步骤S1得到的 $f_B(t)$ 曲线所表示的二维形状结合图3可知: $a_h = r/\sin(\theta)$ ,  $b = r$ ,  $r$ 为冷却孔半径;

[0075] S202.Coanda鼓包控制线采用椭圆曲线描述,如图5所示,其控制方程为:

$$[0076] \quad \frac{x_c^2}{a_c^2} + \frac{y_c^2}{b^2} = 1, x_c \geq 0$$

[0077] 其中: $(x_c, y_c)$ 表示冷却孔出口曲线, $a_c$ 为给定的控制参数(流向长度);

[0078] S203.根据图5所示,图5阴影部分即为Coanda鼓包,设Coanda鼓包在横向离散为 $N$ 个截面,对于不同的 $y_i$ 截面(如图中 $s_1, s_2, s_3$ 截面,  $i=1, 2, \dots, N$ ),  $s_1-s_2$ 长度为 $\alpha(y_i)$ ,定义为平移因子; $s_2-s_3$ 长度为 $\beta(y_i)$ ,定义为缩放因子;则 $s_2-s_3$ 即为该截面Coanda鼓包的流向形状,长度为 $\beta(y_i)$ ,归一化样条B曲线 $f_B(t)$ 流向平移长度为 $\alpha(y_i)$ ;

[0079] 其中: $s_1, s_2, s_3$ 分别为Coanda鼓包在展向离散的 $y=y_i$ 截面上的三个点,  $i=1, 2, \dots, N$ ;

[0080] S204.根据椭圆理论可知,平移因子为:

$$[0081] \quad a(y_i) = \frac{a_h}{b} \sqrt{b^2 - y_i^2} = \frac{\sqrt{r^2 - y_i^2}}{\sin(\theta)}$$

[0082] 缩放因子为:

$$[0083] \quad \beta(y_i) = \frac{a_c - a_h}{b} \sqrt{b^2 - y_i^2} = \frac{a_c - r / \sin(\theta)}{r} \sqrt{r^2 - y_i^2}$$

[0084] S205.对 $f_B(t)$ 归一化样条曲线进行变换,可得到真实坐标系下的每一个 $y=y_i$ 截面形状控制方程( $s_2$ 到 $s_3$ 曲线):

$$[0085] \quad x = \beta(y_i) \cdot t + a(y_i)$$

$$[0086] \quad z = \beta(y_i) \cdot f_B(t)$$

[0087] 其中: $0 \leq t \leq 1$ ,  $-r \leq y_i \leq r$ ,  $a(y_i)$  定义为平移因子,  $\beta(y_i)$  定义为缩放因子,  $r$  为冷却孔半径。

[0088] S3.设计三维外形的横向截面形状控制模型:

[0089] 由于步骤S2建立的Coanda鼓包曲面和壁面在横向上并没有一阶连续,因此本发明引入余弦函数,使得步骤S2得到的控制方程在Coanda鼓包曲面和壁面在横向上的一阶连续,保证鼓包表面到部件表面的光滑过渡,得到Coanda鼓包每一个 $y=y_i$ 截面形状控制方程,其具体过程包括:

[0090] S301.在步骤S2得到的控制方程上引入余弦函数进行控制,保证鼓包表面到部件表面的光滑过渡,所述余弦函数表示为(对应的曲线如图6所示):

$$[0091] \quad f_s(y_i) = \frac{1}{2} \left( \cos\left(\frac{\pi y_i}{r}\right) + 1 \right), -r \leq y_i \leq r;$$

[0092] S302.对步骤S2所述的Coanda鼓包曲面进行变换,最终Coanda鼓包每一个 $y=y_i$ 截面形状控制方程:

$$[0093] \quad x = \beta(y_i) \cdot t + a(y_i)$$

$$[0094] \quad z = \beta(y_i) \cdot f_B(t) \cdot f_s(y_i) = \beta(y_i) \cdot f_B(t) \cdot \frac{1}{2} \left( \cos\left(\frac{\pi y_i}{r}\right) + 1 \right)$$

[0095] 其中: $0 \leq t \leq 1$ ,  $-r \leq y_i \leq r$ ,  $a(y_i)$  定义为平移因子,  $\beta(y_i)$  定义为缩放因子,  $r$  为冷却孔半径;

[0096] S303.利用上述方法得到每一个 $y=y_i$ 截面的 $(x, z)$ 曲线坐标,将曲线坐标导入到三维数模软件进行曲线放样,即可得到冷却孔和Coanda鼓包的三维外形,完成对所述的带有Coanda鼓包的气膜冷却孔的设计。

[0097] 优选的,所述三维数模软件具体为SolidWorks等建模软件。

[0098] 实施例1:设计实例

[0099] 为了展示本设计方案的应用效果,设计如下两个具体设计实例,相关设计参数见表1所示:

[0100] 表1设计实例参数( $r=5\text{mm}$ )

| [0101] | $\theta/^\circ$ | $p_1$ | $p_2$ | $a_2/r$ |
|--------|-----------------|-------|-------|---------|
| Case1  | 30              | 0.2   | 0.8   | 5       |

|       |    |     |     |   |
|-------|----|-----|-----|---|
| Case2 | 45 | 0.5 | 0.5 | 2 |
|-------|----|-----|-----|---|

[0102] 图7和图8展示的设计实例分别对应表1的两个实例设计参数建模得到的效果,可以看出,给定冷却孔的两个参数 ( $r$ 、 $\theta$ ) 和Coanda鼓包的三个参数 ( $p_1$ 、 $p_2$ 和 $a_2$ ),应用本设计方法即可得到气膜冷却孔和Coanda鼓包一体化设计三维外形。

[0103] 以上显示和描述了本发明的基本原理、主要特征和本发明的优点。本行业的技术人员应该了解,本发明不受上述实施例的限制,上述实施例和说明书中描述的只是说明本发明的原理,在不脱离本发明精神和范围的前提下,本发明还会有各种变化和改进,这些变化和改进都落入要求保护的本发明范围内。本发明要求保护范围由所附的权利要求书及其等效物界定。

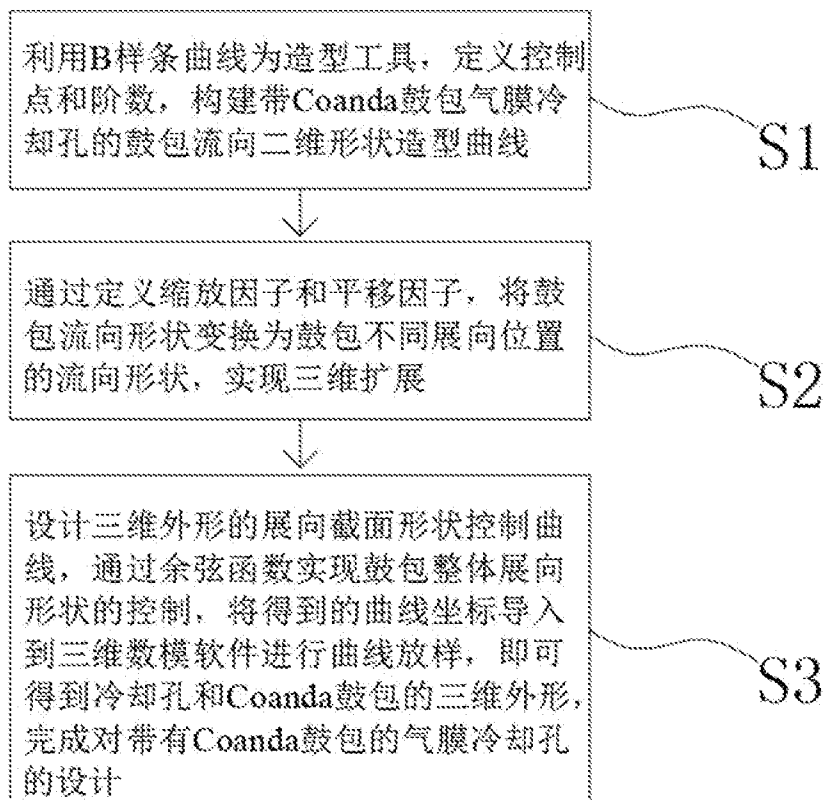


图1

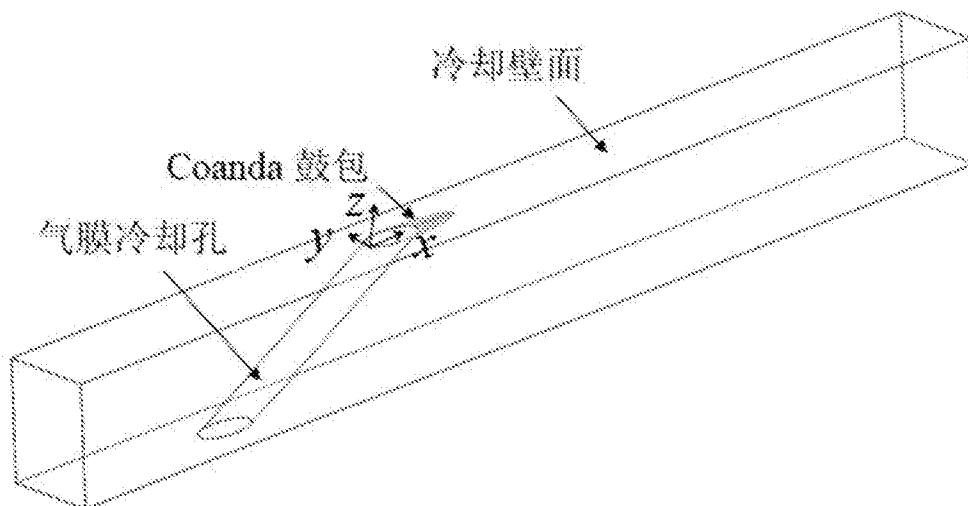


图2

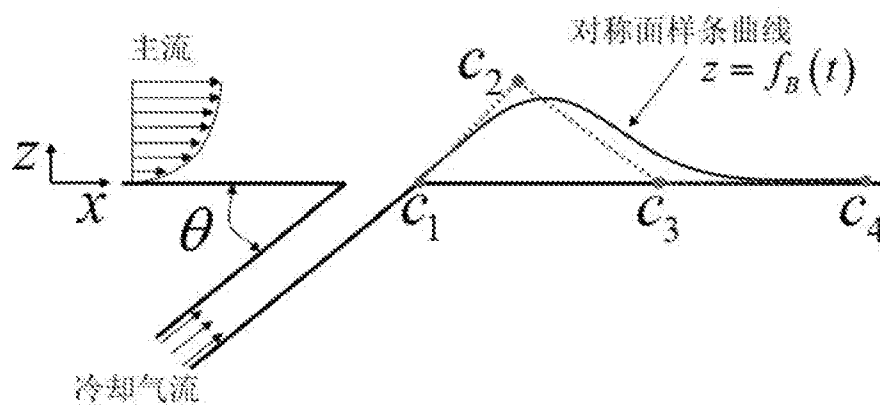


图3

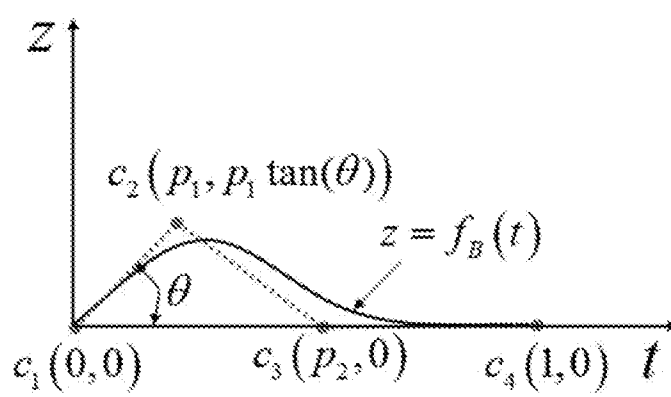


图4

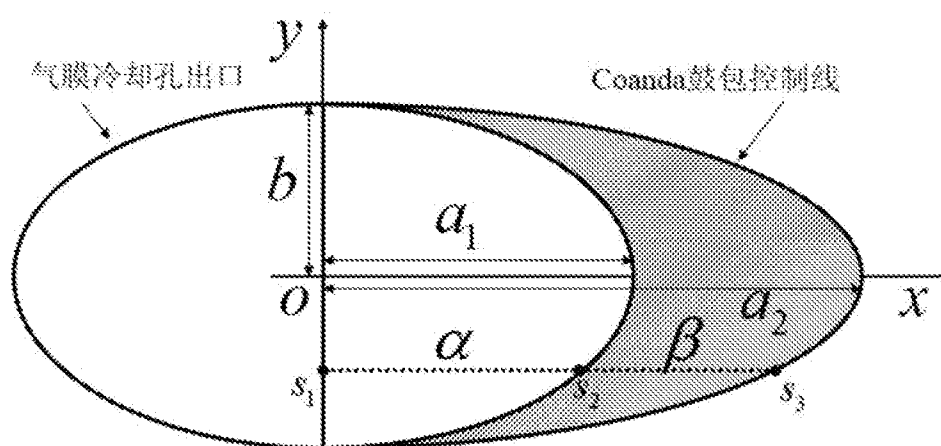


图5

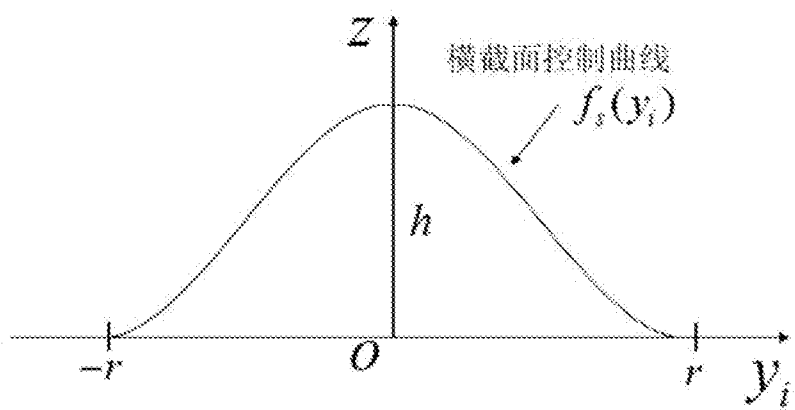


图6

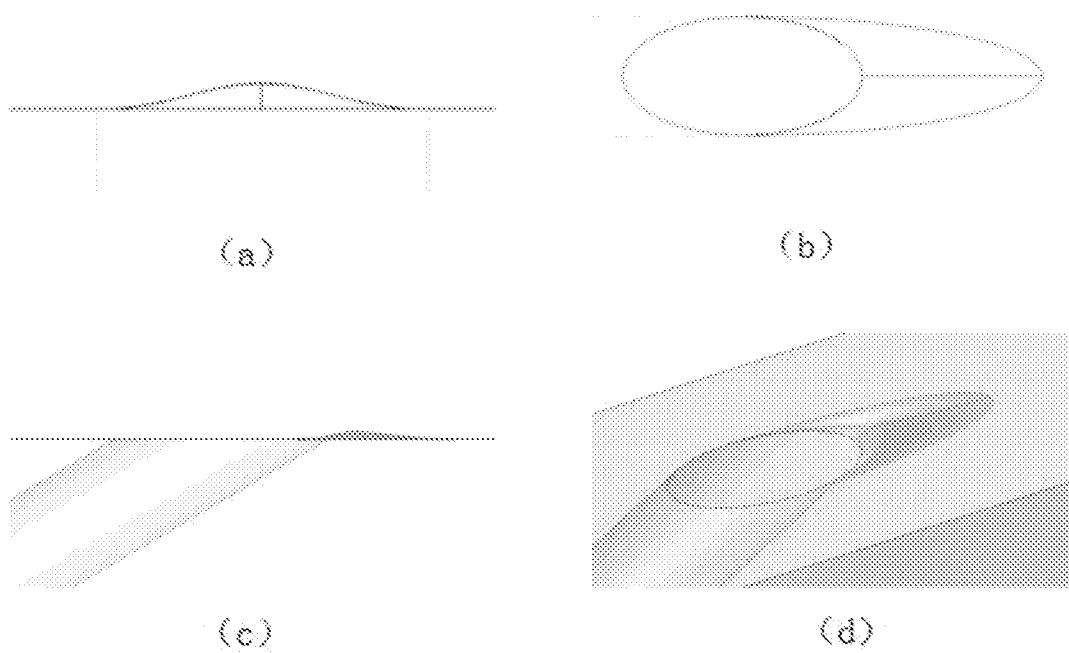


图7

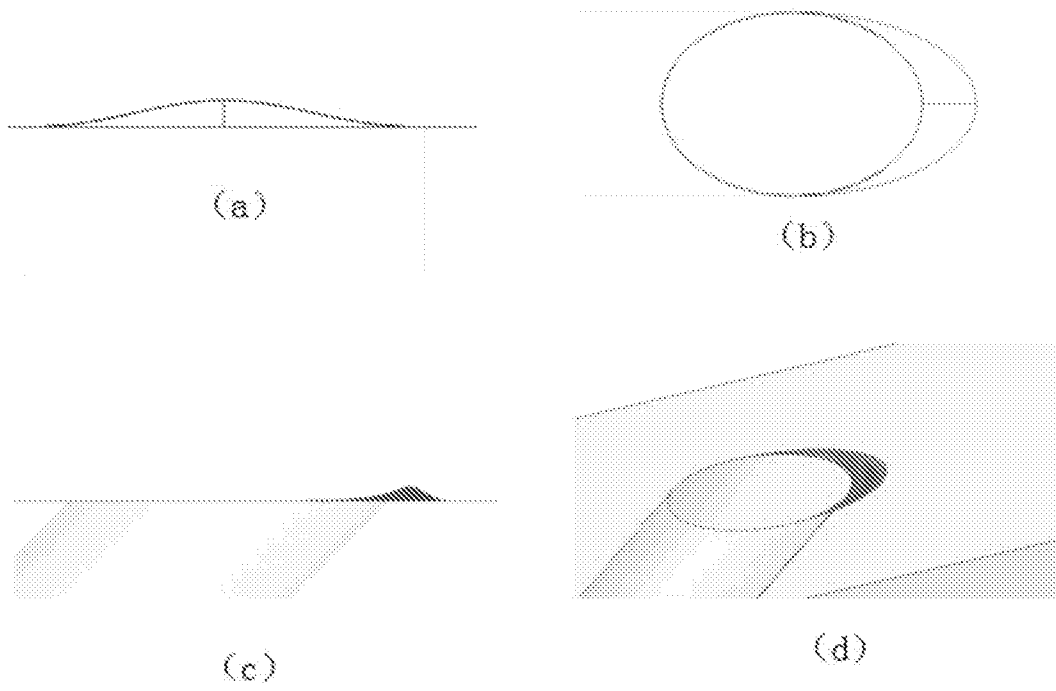


图8