

# S 型叶片可逆式轴流风机的全三维优化设计\*

黄典贵

(上海大学力学研究所 上海 200072)

摘要：可逆风机在正向与反向送风时，都希望具有良好的气动性能。由于几何形状完全对称，S 型叶片是可逆风机中比较理想的叶片。以 NACA4 数字系列叶型的前半部分为雏形，构造出气动性能良好的 S 型叶片。用三维雷诺平均 Navier Stokes 方程的计算流体力学方法，将叶型参数、扭转角和安装角作为设计参数，应用正交优化方法，对 S 型叶片的可逆式轴流风机通流部分进行优化设计，在满足风量、风压要求的前提下，获得最高的流动效率，取得了良好的设计效果。

关键词：风机 Navier-Stokes 方程 设计

中图分类号：V211.7

## 0 前言

在地铁、公路隧道、铁路、大型仓库、船舰、纺织、采矿及石油等行业，需要使用大量的风机。风机的性能参数如风量、风压、效率等是判定风机优劣的指标<sup>[1]</sup>。在很多情况下，还要求风机具有反向通风能力，这种风机称为可逆风机，其翼型称为可逆翼型。对可逆风机的具体要求就是希望在正向和逆向送风时，风机都能具有良好的气动性能。参考文献[1, 2]对可逆翼型进行了一些研究，S 型叶片是可逆风机中比较常用的一种叶片，这种双对称翼型使得风机具有相同的正反向气动性能。

在某风机制造厂的委托下，对这类风机开展了三维气动设计方面的研究。为此，发展了针对轴流风机的三维雷诺平均 Navier-Stokes 方程来模拟其流道内的粘性流动。然后应用该计算程序，采用正交设计方法<sup>[3]</sup>，以叶型参数、安装角及扭转角为设计变量，进行可逆风机流道的优化设计，在风量、风压满足要求的条件下，得到流动效率最佳的 S 型叶片流道。

## 1 流场仿真与数值试验

在圆柱坐标系( $g, q, c$ )下，应用如下的有限体积的三维雷诺平均的 Navier-Stokes 方程

$$\frac{\partial}{\partial t} \oint_V H dv = \oint_A F dA + \oint_V r S dv \quad (1)$$

式中  $r$ ——密度  
 $v$ ——微元体  
 $A$ ——微元体的表面

$H, F, S$  的详细描述见参考文献[4]。

采用 Baldwin 和 Lomax 提出的混合长度紊流模型。

根据以上基本方程，研制出全三维流场仿真计算程序。经过近 20 年的考核及多个企业(哈尔滨汽轮机厂、东方汽轮机厂和南京汽轮机厂等)的应用，证明该程序计算是基本可靠的，计算结果是可信的。

在本研究中，它可以用来进行数值试验，由数值试验可以得到风机的性能参数。

## 2 S 型叶片构造及各种参数

### 2.1 S 型叶片构造过程

S 型叶片构造将以 NACA4 数字系列叶型为基础，具体地讲，由于叶片前半段的弧线形状对气动性能的影响较大，因此希望借鉴现有成熟的叶片前半段弧线来构造新的 S 型叶片。NACA4 系列叶型通常具有良好的气动性能，以 NACA4 系列叶型作为新的 S 型叶片的构造母体应该是不错的选择。

如图 1 所示，这是根据 NACA4 数字系列叶片得到的，其弦长为  $l$ ，最大厚度  $d/l = 0.075$ ，最大拱度  $d$  为 0.025，最大拱度位置  $a/l = 0.5$ 。在下面的设计中，从根部到顶部，叶片弦长规律已经根据经验给定，不参加优化；根据强度及振动要求，从根部到顶部的叶片厚度也根据需要给定，不参加优化；最大拱度位置也已给定，不参加优化。在基本叶型参数里，参加优化的只有一个参数，即影响叶片做功量的最大拱度。

\* 国家自然科学基金(50576049)、上海市教委科技发展基金、上海市基础研究重点项目(05JC14066)和上海市重点学科建设项目(Y0103)资助项目。20050120 收到初稿，20050720 收到修改稿

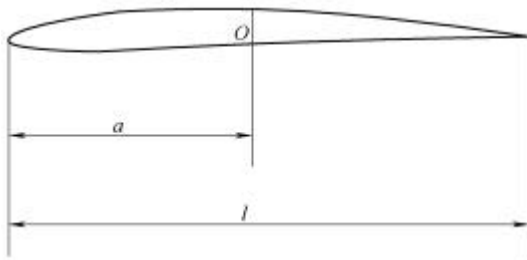


图 1 基本叶型示意图

对图 1 所示的 NACA4 系列翼型，把后半部分擦掉，将前半部分叶型绕 O 点(水平方向中线与垂直方向中线的交点)旋转 180°，可以得到如图 2 所示的基本 S 型翼型。

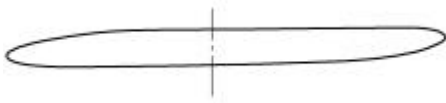


图 2 基本 S 型叶片示意图

图 2 所示的基本 S 型翼型一般在作功能力等方面不能满足实际设计的需要，因此，试图在此基础上加以修正。如作一条“~”型的母线，在这条母线上，叠加图 2 所示的翼型。母线的设计公式

$$x^2 = \frac{l}{\sin a} |y| \quad x \in \left(-\frac{l}{2}, \frac{l}{2}\right) \quad (2)$$

式中， $x, y$  分别为横坐标和纵坐标， $a$  是一个设计变量，由式(2)可得

$$\frac{dy}{dx} = \frac{2|x|\sin a}{l} \quad (3)$$

由式(3)可以看出母线左、右端的斜率为  $\sin a$ ，中间的斜率为 0，斜率沿着横坐标线性变化， $a$  的取值决定了母线的形状。这里的  $a$  作为一个设计变量参加优化。

根据式(2)，得到了某一个  $a$  下的“~”母线形状，如图 3 所示。



图 3 S 型母线形状示意图

将图 2 的基本翼型与图 3 的母线形状叠加，得到如图 4 所示的 S 型叶片。



图 4 S 型叶片示意图

### 2.2 优化参数的选择

如前所述，在设计中，从根部到顶部，叶片弦长规律已经根据经验给定，没有参加优化；根据强度及振动要求，从根部到顶部的叶片厚度规律也根据需要给定，没有参加优化；最大拱度位置也已给定，不参加优化。在基本叶型参数里，最大拱度  $d$  作为优化设计的一个变量，另外，影响母线形状的参数  $a$  也作为设计变量参加优化。

除了翼型参数外，叶片的安装角及扭转角对通道的气动性能影响很大。将叶片的根部安装角  $b$  作为设计变量，扭转角  $\Delta b$  (顶部安装角与根部安装角之间的差值)也作为设计变量参加优化，认为叶片的扭转沿着径向是线性的。

当风机转速、顶部直径和根部直径根据实际条件或需要已经给定后，影响风机性能参数的变量就是  $(d, a, b, \Delta b)$ 。要对风机进行优化设计，就是要在一定范围内找到一组最佳的  $(d, a, b, \Delta b)$ ，使得在满足要求的风量、风压条件下，效率最高。

### 3 目标函数

对委托方要求的可逆风机，给出了如下目标函数

$$h = f(d, a, b, \Delta b) \quad (4)$$

式中， $h$  是效率，约束条件为

$$G \leq G_g \quad p_2 \leq p_{2g}$$

式中  $G$  是风量， $p_2$  是风压，下标  $g$  表示给定值。

### 4 正交优化方法

影响效率的参数可能很多，有些参数已经被委托方的要求所确定，有些参数作了符合情理的假定，最后，只需要对 4 个参数进行优化。优化方法当然很多，但这里认为，对这样一个问题，用优选法(正交设计)是最为简单、方便并且有效的一种。采用正交优化思想，可以通过为数不多的试验，经过综合整理，得到全局最优解，能够节省大量的试验。具体的正交设计思想参见参考文献[3]。

对每个影响效率的因素，分别在其对应的选值范围内，等间距分成 5 个水平，对这种情况，要是每个因素的各种水平之间一一搭配，全部试验，共需要  $5^4 = 625$  次试验，才能找到一组最佳组合。但如果采用表 1 所示的  $L_{5 \times 5}(5^4)$  正交表，只要经过 25 次试验，就可以获得最佳的解，第 2~5 列中的 1, 2, 3, 4, 5 分别代表各个因素的 5 个水平。

表 1  $L_{5 \times 5}(5^4)$  正交表

因素 试验编号	$d$	$a$	$b$	$\Delta b$
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	1	4	4	4
5	1	5	5	5
6	2	1	2	3
7	2	2	3	4
8	2	3	4	5
9	2	4	5	1
10	2	5	1	2
11	3	1	3	5
12	3	2	4	1
13	3	3	5	2
14	3	4	1	3
15	3	5	2	4
16	4	1	4	2
17	4	2	5	3
18	4	3	1	4
19	4	4	2	5
20	4	5	3	1
21	5	1	5	4
22	5	2	1	5
23	5	3	2	1
24	5	4	3	2
25	5	5	4	3

这里  $d$  的 5 个水平选取(0.010, 0.015, 0.020, 0.025, 0.030),  $a$  的 5 个水平为( $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $25^\circ$ ),  $b$  的 5 个水平为( $40^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $55^\circ$ ,  $60^\circ$ ),  $\Delta b$  的 5 个水平为( $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $25^\circ$ ), 将以上的值代入表 1 中, 就可以应用全三维粘性流场计算程序, 对风机的性能进行 25 次数值试验。经过综合整理试验结果<sup>[3]</sup>, 可以获得一组最佳搭配(该组最佳搭配完全可能不包含在 25 组试验内)。

由于上面的选值范围过大, 因此还需要对参数范围细化。在上面得到的最佳搭配附近一定区间, 用同样的方法, 再分成 5 个水平, 进行 25 次数值试验, 可以获得更佳的搭配。如此经过两次细化, 就可以获得满足实际需要的最优解。

## 5 设计结果与讨论

按正交设计方法, 经过 75 次数值试验, 获得了一个满足委托方要求的风量、风压及最佳效率的风机设计。最终得到的主要参数见表 2, 可以看出, 除了风量、风压满足委托方设计要求外, 效率较设计方要求高出 7.67%, 优化设计效果十分理想。

表 2 设计结果与企业要求的比较

参数	设计值或优化结果	企业要求
转速 $n/(r \cdot \min^{-1})$	985	是
此排叶片数 $n$	14	是
内(半径) $r_1/\text{mm}$	475	是
外(半径) $r_2/\text{mm}$	1 000	是
最大拱度 $d/\%$	2.4	否
母线的形状 $a/^\circ$	14.4	否
根部安装角 $b/^\circ$	44	否
扭转角 $\Delta b/^\circ$	19	否
质量流量 $q_m/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	56.366 7	> 55
出口压力 $p_2/(\text{Pa})$	100 957.3	> 100 900
效率 $h/\%$	87.67	> 80

图 5 给出了优化后可逆风机内部的速度矢量分布。其中图 5a 是根部速度矢量图, 图 5b 和图 5c 分别表示中部和顶部的速度矢量图, 从图 5 中可以看出, 优化设计的可逆风机流道内, 流体流动畅通, 没有形成旋涡或分离等导致损失的不理想流场。

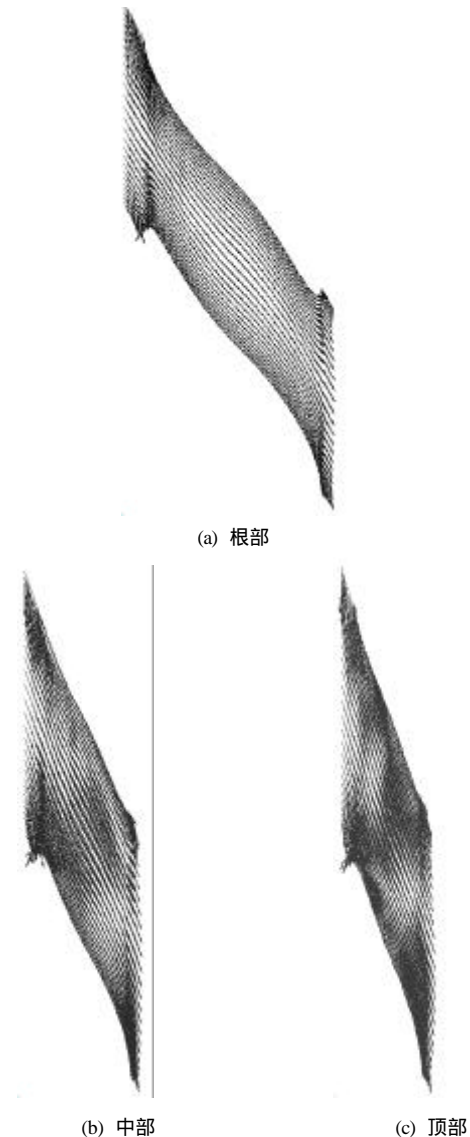


图 5 流道内的速度矢量图

图 6 给出了该风机根部、中部和顶部的等压力线图，从图 6 中可以看出，该风机流道内压力分布合理，变化基本均匀，是一种相当理想的叶片流道。

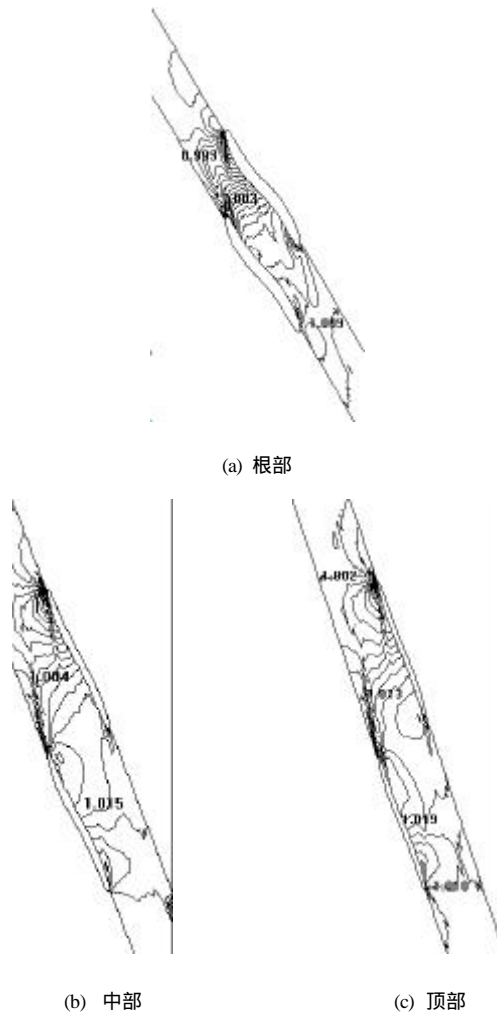


图 6 流道内的等压力线图

## 6 结论

应用正交优化设计思想，以三维粘性流场仿真技术为基础，对某一可逆风机进行优化设计，获得了令人满意的效果。由于叶片是对称的，因此正反转将具有完全同样的性能。

## 参 考 文 献

- 1 钟芳源，杨波，欧阳华．轴流风机叶片设计新方案的探讨．流体机械，2000，28(12)：13～17
- 2 席德科，张仲寅，陆森林，等．可逆风机叶片的翼型研究．机械科学与技术，1999，18(4)：628～630
- 3 北京大学数学力学系数学专业概率统计组．正交设计——一种安排多因素试验的数学方法．北京：人民教育出版社，1976
- 4 黄典贵．蒸汽透平全三维粘性流场计算．热能动力工程，1998，13(6)：444～446

## 3D OPTIMUM DESIGN OF REVERSIBLE AXIAL FLOW FAN WITH S-TYPE BLADE

*Huang Diangui*

*(Institute of Mechanics, Shanghai University,  
Shanghai 200072)*

**Abstract :** A reversible axial flow fan is required to run with high aerodynamic performance both in forward direction and in backward direction. S-type blades are usually used in such fans because of the absolute geometrical symmetry. A new Stype blade with high aerodynamic performance is constructed based on the NACA digital airfoil series. By simulating the flow field in the fans based on Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations, the method of orthogonal design is implemented to design the flow path of a reversible axial flow fan with S-type blade. Choosing the parameters of blade shape, torsional angle and clamping angle as design variable parameters, an optimum flow path of a reversible axial flow fan with Stype blade is obtained.

**Key words :** Fan Navier-Stokes equations Design

作者简介：黄典贵，男，教授，博士生导师。主要从事叶轮机械气动热力学方面的研究。

E-mail : dghuang@staff.shu.edu.cn