

## 长短叶片前向离心式通风机中短叶片 对滑移系数的影响及计算修正

桂利川 谷传纲 常鸿寿  
(西安交通大学)

### 摘 要

本文在文(1)、(2)的基础上,通过理论计算和试验研究进一步讨论了短叶片对叶轮滑移系数的影响,并提出了一种计算长短叶片前向离心式叶轮滑移系数的修正计算方法。

### 一、前 言

文(1)通过对长短叶片离心式通风机的实验研究,定性地分析了短叶片的长度,周向位置和安装角度对风机外特性的影响规律。文(2)结合数值计算,分析了短叶片对长叶通道回转面流场的影响,进一步为文(1)的观点提供了理论依据。但上述工作和已有文献尚未涉及到长短叶片离心式通风机的设计计算问题,进一步的研究是很有意义的。

在离心式通风机叶轮设计计算中,最重要的问题之一是尽可能准确地计算叶轮的作功量,众所周知其关键是如何较正确地计算滑移系数的数值。常规叶轮的滑移系数计算时,已有许多经验和半经验公式可供选用,但还未见到专门针对长短叶片叶轮的滑移系数计算公式。对于后弯式长叶道的离心式压缩机叶轮,有时为了减小进口阻塞而采用长短叶片的结构,一般可以用常规叶轮的经验公式计算其滑移系数。但对于通风机,特别是前向离心式通风机叶轮,由于叶道短,叶片数少,根据本文的试验数据和理论计算结果表明,短叶片的长度和周向位置对叶轮滑移系数有着不可忽视的影响,已不能简单地套用常规叶轮的计算公式。

本文通过对理论计算结果和试验数据的分析,针对目前应用最广泛的前向离心式叶轮滑移系数的计算公式(B.Eck公式)提出修正计算方法,考虑了短叶片长度的影响,使其适合于长短叶片前向离心式叶轮的滑移系数的计算。本文还讨论了考虑到周向位置的影响时的修正方法。

本文采用有限元(FEM)方法对带有短叶片的长叶通道回转面势流流场进行了计算,根据所得叶片表面的压力分布,沿叶片积分得出叶轮对气体的作功量。试验叶轮是一个典型的前向离心式叶轮,可在其中装入可更换可调节的一组短叶片。通过风机的外特性试验,可间接地确定滑移系数数值。

## 二、滑移系数的试验确定

本文以一个典型的前向离心风机为基础建立试验台。试验叶轮的基本参数为：叶片出口直径  $D_2 = 280\text{mm}$ ，叶片出口宽度  $b_2 = 37\text{mm}$ ，叶片出口安装角  $\beta_{2A} = 120^\circ$ ，长叶进口直径  $D_1 = 140\text{mm}$ ，长叶进口宽度  $b_1 = 57.5\text{mm}$ ，长叶进口安装角  $\beta_{1A} = 38^\circ$ 。长叶片数目为  $Z = 12$ ，在每一个长叶片通道中可放置一个短叶片。短叶片的长度可通过更换而改变，可通过调节活动的后盘来改变短叶片的周向位置，短叶片的型线与长叶片相同。记长叶片长度为  $L$ ，短叶片长度为  $l$ ，试验中所用的三组短叶片的长度为分别为： $l/L = 0.247, 0.400, 0.614$ 。设短叶片与长叶片压力面之间所夹的圆心角为  $\varphi$ ，相邻长叶片之间所夹圆心为  $\Phi$ ，试验中短叶片分别处于以下几个周向位置： $\varphi/\Phi = 0.25, 0.333, 0.500, 0.667$ 。去掉短叶片后该叶轮就成为  $Z = 12$  的常规叶轮。还备有一个  $Z = 16$  的常规叶轮以作试验比较。

试验电机转速为  $n = 3000\text{rpm}$ ，额定功率为  $750\text{W}$ 。该电机经专门测试，配有准确的负载曲线，可用电测法较准确地测定风机的输入功率。

根据实验所得的风机性能曲线，我们可以得到风机设计点的质量流量  $G$ ，内功率  $N_{in}$ ，总压头  $P$  等特性参数，利用下式可推算滑移系数：

$$\mu = \frac{N_{in}}{G(1 + \beta_l + \beta_{df})(1 - \varphi_{2r} \text{ctg} \beta_{2A})u_2^2} \quad (1)$$

其中：

$u_2$ —圆周速度；

$\varphi_{2r}$ —径向速度系数；

$\beta_l$ —泄漏损失系数；

$\beta_{df}$ —轮阻损失系数。

泄漏损失系数  $\beta_l$  由下式计算：

$$\beta_l = \frac{2\alpha\pi D_o \delta \sqrt{\frac{\rho P}{3}}}{G} \quad (2)$$

其中： $\alpha$ —泄漏系数，取  $\alpha = 0.7$ ；

$\delta$ —泄漏间隙；  $D_o$ —泄漏处直径；

$\rho$ —气体密度。

轮阻损失系数  $\beta_{df}$  由下式计算：

$$\left. \begin{aligned} N_r &= \beta \rho u_2^3 D_2^2 \\ \beta_{df} &= \frac{N_r}{N_{in} - N_r} (1 + \beta_l) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中： $\beta = 0.81 \sim 0.88$

径向速度系数  $\varphi_{2r}$  由下式确定：

$$\varphi_{2r} = \frac{G(1 + \beta_l)}{\rho \pi D_2 b_2 \tau_2 u_2} \quad (4)$$

其中： $\tau_2$ —叶轮出口阻塞系数。

用式(1)推算  $\mu$  时, 由于  $\beta_1$  和  $\beta_{dr}$  由经验公式(2)、(3)计算, 因而有一定近似性, 但本文实验采用的是流量较大, 叶轮较宽的通风机模型,  $\beta_1$  和  $\beta_{dr}$  相对较小 ( $\beta_1 \approx 0.03$ ,  $\beta_{dr} \approx 0.01$ ), 故  $\beta_1$  和  $\beta_{dr}$  的近似计算不会使滑移系数  $\mu$  的实验确定产生较大误差。

### 三、回转面流场的势流计算

作者用有限元方法对实验叶轮在不同短叶片长度和周向位置的情况下进行了回转面势流流场计算。为了讨论短叶片对滑移系数的影响, 将流场计算结果作如下处理:

$$W = Z \int_0^L \omega r \tau (P_p - P_s) dl + Z' \int_0^{L'} \omega r \tau (P'_p - P'_s) dl \quad (5)$$

其中:  $W$ —叶轮作功能力

$\omega$ —叶轮角速度

$r$ —流面所在半径

$\tau$ —流面厚度

$P_s$ —长叶片吸力面压力

$P'_s$ —短叶吸力面压力

$Z$ —长叶片数

$Z'$ —短叶片数

$P_p$ —长叶压力面压力

$P'_p$ —短叶压力面压力

式(5)的计算结果仅具有相对比较的意义, 设无短叶片情况下上式积分为  $W_0$ , 我们在以后均讨论其相对值  $W/W_0$ 。若在无短叶片情况下滑移系数为  $\mu_0$ , 则在本文所讨论的范围内有:

$$W/W_0 = \mu/\mu_0 \quad (6)$$

由于势流计算没有考虑到粘性和气流分离的影响, 所得结果与实际情况有一定偏差, 但可以在一定程度上反映短叶片的影响规律。

### 四、试验与经验公式的对比

前向离心式通风机滑移系数计算时最常用的公式是 B.Eck 公式:

$$\mu = \frac{1}{1 + \frac{1.5 + 1.1\beta_{2A}/90}{Z \left[ 1 - \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^2 \right]}} \quad (7)$$

下面将试验分析所得的滑移系数值与式(7)的计算值进行比较。

#### (一) 常规叶轮的试验与计算结果的对比

无短叶片情况下, 叶片数分别为 12 和 16 时的试验分析结果与式(7)的计算结果列入表(1)。

表 (1)

叶片数	试验值 $\mu_0$	计算值 $\mu'$	相对误差
12	0.7698	0.7521	0.023
16	0.8110	0.8018	0.011

从表(1)中可以看出, 试验分析结果与计算结果是相吻合的, 计算值比试验值略保守一些。为了在后面作比较精确的分析, 我们用滑移系数的相对值进行比较, 即试验值和计算值皆除以各自在无短叶片情况下的数值。

### (二) 不同长度短叶片情况下试验与计算的比较

表(2)列出了长短叶片各为 12 片, 短叶片相对径向长度分别为  $l/L = 0.247, 0.400, 0.614$  时的试验分析结果与叶片数分别为 12 和 24 的情况下式(7)的计算结果。从表(2)中可知, 无论以长叶片数目还是以叶片总数按 B.Eck 公式直接计算长短叶片叶轮的滑移系数, 都将产生较大的误差。因此, 直接套用常规叶轮的经验公式计算长短叶片叶轮的滑移系数是不恰当的。

表 (2)

$\frac{l}{L}$	试验值 $\frac{\mu}{\mu_0}$	Z = 12 时的计算值		Z = 14 时的计算值	
		$\mu' / \mu'_0$	误差	$\mu' / \mu'_0$	误差
0.247	1.0510	1.0	0.0510	1.1415	-0.0904
0.400	1.0908	1.0	0.0908	1.1415	-0.0507
0.614	1.1047	1.0	0.1047	1.1415	-0.0368

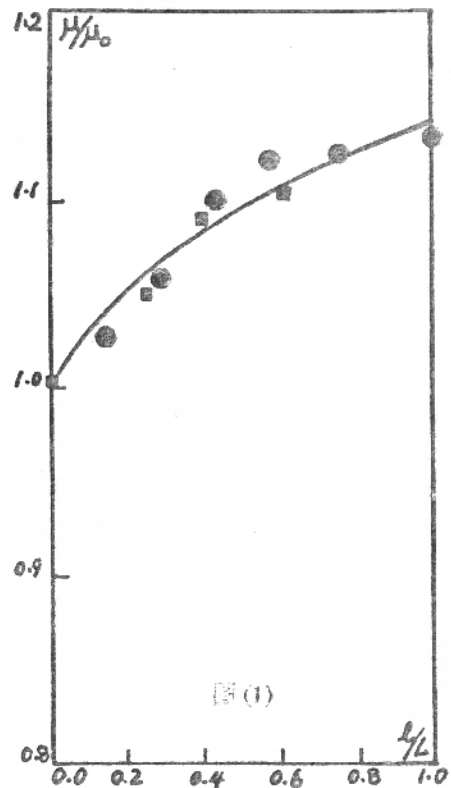
## 五、短叶片长度对滑移系数的影响

图(1)展示了滑移系数随短叶片长度的变化规律, 其中“●”为有限元流场计算(FEM)结果, “■”为试验结果。图(1)表明实验和理论计算的趋势是一致的。从图(1)中可以看出:  $l/L$  较小时 ( $< 0.6$ ), 短叶片长度的变化对滑移系数的影响比较明显; 在短叶片长度大到一定值时 ( $l/L > 0.6$ ), 短叶片长度的变化对滑移系数几乎没有影响。

根据轴向涡理论, 可对 B.Eck 公式(7)提出如下修正式:

$$\mu = \frac{1}{1 + \frac{1.5 + 1.1\beta_{2A} / 90}{Z[1 + (l/L)^n] \left[ 1 - (D_1/D_2)^2 \right]}} \quad (8)$$

式中 Z 为长叶片数目, 式(8)适用于短叶片与长叶片数目相等, 且位于长叶片叶道中央的情况。修正项  $[1 + (l/L)^n] \leq 2$ , 故待定常数  $n > 0$ ; 由于在一般情况下叶片的外径部位比内径部位



对叶轮作功起着更大的作用,因此  $n \leq 1.0$ 。试算表明,取  $n = 0.9$  时,式(8)的计算结果最接近于实验值而且与有限元流场计算的趋势比较吻合,故建议该值。图(1)中的实线表示式(8)在  $n = 0.9$  时的计算结果,它和试验值的最大误差为 0.9%。

对于不同  $\beta_{2A}$  范围的离心通风机, $n$  的取值应有不同。但本文试算表明,取  $n = 1.0$  时,最大计算误差仅比  $n = 0.9$  时大 0.5%,说明  $\mu$  对  $n$  的变化并不十分敏感。因此作者认为, $\beta_{2A}$  在  $120^\circ$  附近时,为了比较准确地计算滑移系数,可取  $n = 0.9$ ;如果  $\beta_{2A}$  较大地偏离  $120^\circ$ ,则简单地取  $n = 1.0$  进行计算,误差也不会很大。

## 六、短叶片周向位置对滑移系数的影响

表(3)列出了实验所得在不同短叶片长度和周向位置情况下的滑移系数值。表中数据表明,短叶片的周向位置对叶轮滑移系数有着十分明显的影响。从表中可见,当短叶片靠近长叶片压力面一侧放置时滑移系数明显增大,而短叶片靠近长叶片吸力面放置时滑移系数的增大不明显。

表 (3)

效率 $\eta$ 滑移系数 $\mu$		短叶片径向相对长度 $l/L$			
		0.00	0.247	0.40	0.61
短叶片周向相对位置 $\frac{\varphi}{\Phi}$	0.667	—	$\frac{0.7863}{0.7783}$	$\frac{0.7861}{0.7798}$	—
	0.5	$\frac{0.7863}{0.7698}$	$\frac{0.7794}{0.8091}$	$\frac{0.7805}{0.8397}$	$\frac{0.7812}{0.8500}$
	0.333	—	$\frac{0.7794}{0.8394}$	$\frac{0.7785}{0.8790}$	—
	0.25	—	—	$\frac{0.7712}{0.8693}$	—

图(2)表示了当  $l/L = 0.40$  时滑移系数随短叶片周向位置的变化趋势。其中“●”为有限元计算结果(FEM),“■”为试验结果。势流计算表明,使滑移系数最大的短叶片周向位置偏向长叶片压力面一侧( $\varphi/\Phi \approx 0.4$ ),这说明由于叶道曲率的影响,叶道内主流偏向长叶压力面,从而当短叶片偏向长叶片压力面放置,更能有效地抑制气流的滑移。实验数据表明,使滑移系数最大的短叶周向位置向长叶压力面一侧的偏向更明显,而在长叶片吸力面附近放置的短叶片,几乎起不到提高滑移系数的作用。这是由于实际的前向风机叶轮在叶片吸力面存在着较严重的附面层分离,分离区的出现更加重了主流向长叶片压力面的偏向,从而使靠近吸力面放置的短叶片很难起到抑制气流滑移的作用。

从表(3)和图(2)可以看出,在一定的条件下调整短叶片的周向位置比调整短叶片的

长度更能有效地改变叶轮的滑移系数。由于叶道曲率和气流分离对主流偏向的影响规律很难定量地确定,因此仅依据本文的试验和计算工作很难总结出考虑短叶片周向位置影响的计算滑移系数的公式。如果我们能够确定由于上述因素使主流区减小为 $\zeta\Phi$ ,则在 $\varphi/\Phi = \zeta/2$ 处可视为主流中央,而在 $\varphi/\Phi > \zeta$ 时可以认为短叶片对提高叶轮滑移系数已不起作用,在此前提下试用下面的修正计算公式:

$$\mu = 1 / \left\{ 1 + \frac{1.5 + 1.1\beta_{2A} / 90}{Z \left\{ 1 + \left( \frac{l}{L} \right)^n \left[ \frac{\zeta^2 - (2\varphi/\Phi - \zeta)^2}{2\zeta - 1} \right]^m \right\} \left[ 1 - (D_1/D_2)^2 \right]} \right\} \quad (9)$$

其中: n: 待定常数,一般可取 $n=0.9$ 或 $n=1.0$ ;

m: 待定常数;

$\zeta$ : 有效主流区范围。

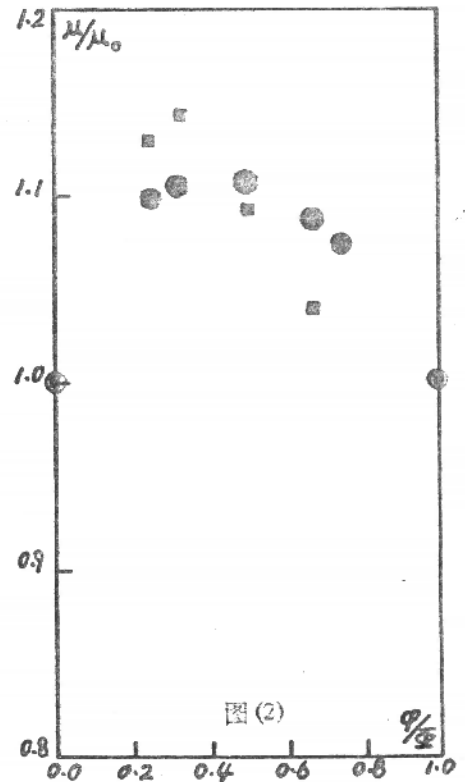
从表(3)和图(2)的趋势可见,对于本文讨论的通风机可取 $\zeta=0.7$ 。试算表明,当 $n=0.9$ 时,取 $m=4.0$ 可得到与本文试验较吻合的修正公式。表(4)表(5)分别比较了 $1/L=0.247, 0.40$ 两种情况下的试验结果与式(9)的计算结果,表明式(9)能够初步反映短叶周向位置对滑移系数的影响。

表 (4)  $1/L=0.247$

周向位置 $\varphi/\Phi$	试验值 $\mu/\mu_0$	计算值 $\mu'/\mu'_0$	误差
0.3333	1.904	1.0618	-0.0158
0.5000	1.0511	1.0579	-0.0068
0.6667	1.0110	1.0002	0.0109

表 (5)  $1/L=0.40$

周向位置 $\varphi/\Phi$	试验值 $\mu/\mu_0$	计算值 $\mu'/\mu'_0$	误差
0.250	1.1293	1.1132	0.0162
0.333	1.1419	1.1389	0.0029
0.500	1.0908	1.0812	0.0096
0.667	1.0130	1.0002	0.0127



## 八、结 论

(1) 长短叶片前向离心式通风机滑移系数的计算不能简单地套用常规叶轮的经验公式,当短叶片相对长度 $1/L > 0.6$ 时以总叶片数按常规叶轮计算不会产生较大误差, $1/L < 0.6$ 时则不能按常规叶轮方法计算。

(2)本文提出的考虑短叶片长度影响的滑移系数计算公式(式 8)能够比较准确地进行长短叶片前向离心通风机叶轮滑移系数的计算,亦可在计算其它型式的长短叶片叶轮时参考。

(3)短叶片周向位置对叶轮滑移系数有显著的影响,在某些情况下短叶片周向位置的变化较其长度变化更能有效地改变叶轮的滑移系数。本文讨论的考虑短叶周向位置影响的修正公式能够初步地解决长短叶片前向离心叶轮的短叶片不在长叶通道中央时的滑移系数计算问题。

### 参考资料

- [1] 桂利川,常鸿寿,谷传纲,“长短叶片离心通风机的实验研究”,《流体工程》1987年第10期
- [2] Influences of Splitter Blads on the Centrifugal Fan Performances [ASME Paper No. 89-GT-33]
- [3] “任意旋成面叶栅气动正命题的广义变分原理与互偶极值原理”《力学学报》No.4. 1979.10
- [4] “有限元近似解方法(FEAM)在流体机械内部流场计算中的应用”《工程热物理学报》1987.第4期 谷传纲,桂利川,常鸿寿
- [5] “叶轮机械回转面流长的有限元近似解方法的研究和数值计算”,谷传纲,桂利川,常鸿寿《力学学报》1989, No.2