

风力机叶尖涡特性及其控制

马兴宇 明晓

(南京航空航天大学航空宇航学院,南京,210016)

摘要:通过数值模拟研究了风力机叶片尖部尾涡强度和控制方法。在叶片尖部设计了不同倾斜角的漩涡扩散器来控制叶尖涡,分析了风力机叶片尖部漩涡特征和叶片表面压力分布情况。同时,研究了叶尖涡强度随风轮尖速比变化规律。研究结果表明,叶尖涡扩散器能够提高叶尖涡涡核的总压,削弱其漩涡强度。在粘性作用下,风力机尾流漩涡耗散更快,可有效地削弱翼尖尾涡的强度,提高叶片效率。

关键词:叶尖涡;漩涡扩散器;流动控制;数值模拟

中图分类号:V211.7

文献标识码:A

文章编号:1005-2615(2011)05-0635-05

Characteristics and Control of Blade Tip Vortex of Wind Turbine

Ma Xingyu, Ming Xiao

(College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: The vortex of a wind turbine blade tip is studied, and a control device is designed by numerical simulation. Vortex diffusers with different pitch angles are installed at the blade tips to control the vortex. The characteristics of the blade-tip vortex and the surface pressure distributions along the blade are analyzed. Moreover, the variation of the flow characteristic of vortex in different tip speed ratios is analyzed. Results show that the strength of blade-tip vortex can be reduced by the control of vortex diffusers.

Key words: blade-tip vortex; vortex diffuser; flow control; numerical simulation

叶片空气动力特性是决定风力机优劣的关键问题之一。叶尖是气动力产生的主要区域。有限长度的叶片旋转运动时,由于叶尖压力面和吸力面的压力差,导致压力面气流绕过叶尖端面流入吸力面,既破坏了叶尖二维流动情况,同时会产生叶尖涡。叶尖涡是造成叶片效率减小、疲劳载荷增加的主要原因之一^[1]。这种情况广泛存在于风力机叶片和飞机机翼工作中:丹麦技术大学研究了风力机叶尖小翼的技术,分别利用扭转和后掠的叶尖小翼提高风力机叶片效率的方法^[2];内蒙古工业大学研究了在叶尖加装小翼的控制方法^[3];北京大学研究了各种翼梢扰流片对漩涡的控制效果^[4];南京航空航

天大学研究了在有限展长机翼尖部安装漩涡扩散器控制翼尖涡^[5]。通过优化漩涡扩散器形状和安装角度,达到降低漩涡强度的目的。

本文利用流动控制技术,在风力机叶片尖部设计安装漩涡扩散器,并改变倾斜角。通过研究叶片扭矩、叶片表面压力分布和下游流场特性,证明叶尖漩涡扩散器可以有效地保持叶尖二维流动特性,减小叶尖涡影响,从而提高叶片效率。

1 数值计算方法

1.1 三维模型

风力机模型采用三叶片以及轮毂模型,忽略塔架及变桨距机构。风轮参数如表1所示。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)(2007CB714600)资助项目;江苏高校优势学科建设工程资助项目。

收稿日期:2011-04-29;**修订日期:**2011-08-05

通讯作者:明晓,男,教授,博士生导师,1944年5月生,E-mail:mingam@nuaa.edu.cn。

表1 叶片参数

参数	数值
叶片数	3
叶片长/m	1.35
风轮直径/m	3
叶尖弦长/m	0.05
展弦比	10
叶尖安装角/(°)	3
叶片翼型	FX 60-100

风力机叶尖采用 FX60-100 翼型,弦长 $c = 0.05 \text{ m}$ 。在风力机叶片尖部、叶片压力面安装三角形涡扩散器,尺寸如图1所示。

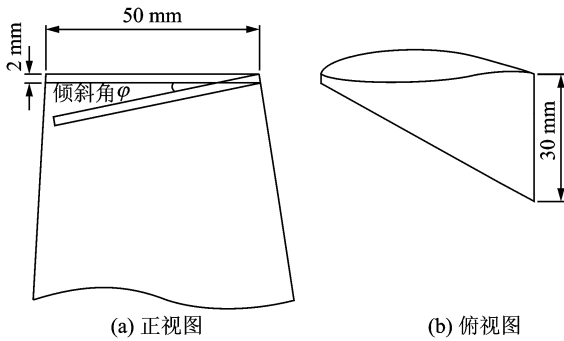


图1 涡扩散器示意图

涡扩散器厚度 2 mm ,头部和尾部分别与叶尖翼型前缘和后缘对齐,叶尖端面平行,倾斜角设为 0° 。为了研究涡扩散器倾斜角 φ 变化的对叶片受力和叶尖涡强度的影响,以三角形长边为轴,逆时针旋转为正,角度为 φ 。本文分别计算 $\varphi = 0, 5$ 和 7° 状态。

1.2 远场及边界条件

风力机叶片的流场是三维非定常的旋转流场,本文利用旋转参考系模型求解。当来流风速恒定、风力机处在设计状态下工作时,叶片周期性掠过求解域,相对于惯性参考系来讲,流动是非定常的。当取与旋转部件一起运动的旋转参考系时,相对这个旋转参考系分析,流动就是定常的^[6]。

风力机叶片和轮毂模型以及涡扩散器采用壁面无滑移条件,旋转参考系固连于风轮中心。模型相对于旋转参考系角速度为零。在叶片周围建立圆柱体旋转计算域 F_1 ,直径 $1.2D$,使用旋转参考系,相对 Z 轴转速 $\omega = 40 \text{ rad/s}$,转动中心和转动轴与风力机模型重合。在旋转计算域外围建立圆柱形固定计算域 F_2 ,直径 $5D$,使用惯性参考系,静止、轴线与风力机轴线重合,如图2所示, D 表示风轮直径。

风力机设计转速 $\omega = 40 \text{ rad/s}$,来流风速 $V = 10 \text{ m/s}$,定常,平行于风力机转动轴线。以叶尖弦长为参考长度的雷诺数 $Re_c = 2.19 \times 10^5$ 。湍流模型采用 Spalart-Allmaras 模型。Spalart-Allmaras 模型是设计用于航空领域的,主要是墙壁束缚流动,而且已经显示出很好的效果。在透平机械中的应用也愈加广泛。

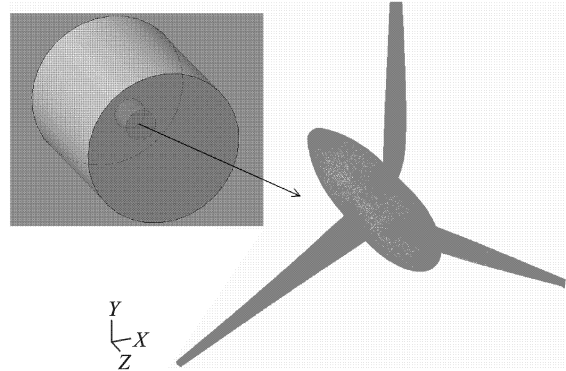


图2 风力机模型示意图

2 计算结果和分析

2.1 总压系数定义

叶尖涡是指由于风力机叶尖三维效应,从叶尖处拖出并螺旋发展至下游的集中涡系。相对于有限展长的机翼产生的翼尖涡,风力机叶尖涡由各个叶片尖部拖出,在下游相互影响,流场更加复杂,漩涡造成的震动和噪声危害更明显^[7]。对于单个叶片,漩涡的涡核是涡量集中的区域,能量损失明显,涡核处的总压低于周围流场。研究漩涡强度的标准主要是总压系数 C_{ps} ,定义如下

$$C_{ps} = \frac{p_s - p_\infty}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2} \quad (1)$$

式中: p_s 为总压; p_∞ 表示大气压; ρ 表示空气密度; V_∞ 表示来流风速。本文中设定 $V_\infty = 10 \text{ m/s}$, $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ 。

本文在叶尖下游建立3个虚拟的截面,大小 $0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$,位于 $x/c = 0.5, 1, 1.5$,垂直于叶尖弦线。 x 表示距叶尖后缘长度, c 表示叶尖弦长。3个截面上最低总压作为漩涡的涡核总压,利用总压系数判断漩涡强度和涡扩散器控制效果。

2.2 涡扩散器对叶尖涡的控制效果

在3个 $x/c = 0.5, 1, 1.5$ 平面内,分析压力分布情况。各个平面内涡核总压 p_s 及其总压系数 C_{ps} 详见表2所示。

表 2 叶尖下游不同截面内涡核静压和静压系数

截面位置		$x=0.5c$	$x=c$	$x=1.5c$
干净叶尖	p_s/Pa	-237	-137	-86.1
	C_{ps}	-3.869 39	-2.236 73	-1.405 71
涡扩散器 0°	p_s/Pa	-215	-132	-91.4
	C_{ps}	-3.510 2	-2.155 1	-1.492 24
涡扩散器 5°	p_s/Pa	-219	-131	-86.7
	C_{ps}	-3.575 51	-2.138 78	-1.415 51
涡扩散器 7°	p_s/Pa	-222	-129	-80.3
	C_{ps}	-3.624 49	-2.106 12	-1.311 02

图 3 表示在 3 个平面内, 涡核总压系数的变化。从曲线分析可知:

- (1) 涡扩散器可以提高涡核总压系数, 降低漩涡强度;
- (2) 改变涡扩散器倾斜角的状态, 涡核总压系数变高, 漩涡强度有所下降。

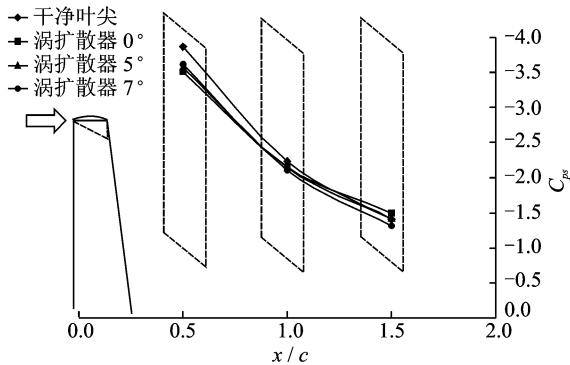


图 3 不同截面内叶尖涡核总压系数变化

图 4 表示干净叶尖和 0° 涡扩散器两种情况下, 在 $x/c=0.5$ 平面内压力分布云图。通过对比可知, 涡扩散器可以明显减弱下游涡核强度, 促进漩涡扩散。

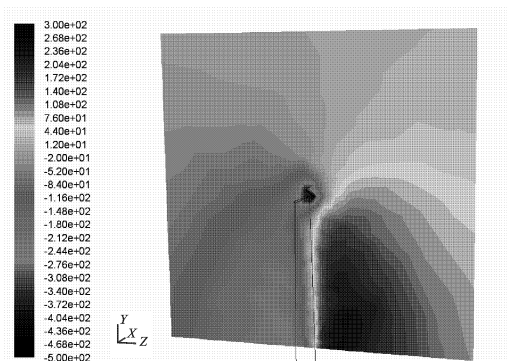
图 5 表示干净叶尖和 0° 涡扩散器两种情况下, 在 $x/c=0.5$ 平面内压力山峰图。涡扩散器可以有效增加叶尖前后压力差, 有助于提高叶片效率, 漩涡强度明显降低。

2.3 叶尖涡强度随风力机尖速比的变化规律

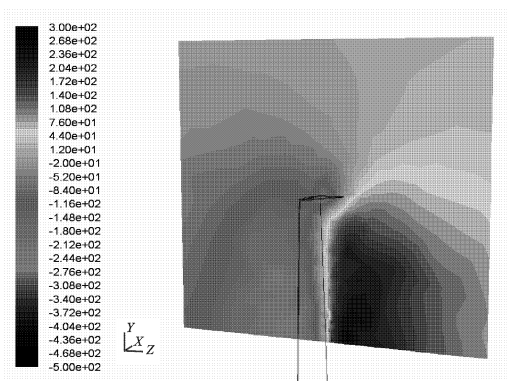
尖速比, 又称叶尖速比, 是指风轮叶片尖端的线速度与风速之比, 用 λ 表示^[6]。尖速比是设计风力机风轮和叶片的基本参数之一。尖速比 λ 定义如下

$$\lambda = \frac{\omega \times R}{V_\infty} \quad (2)$$

式中: ω 表示风力机设计状态下的角速度; R 表示风轮半径; V_∞ 表示来流风速。本文风力机叶片设计尖速比 $\lambda=6$ 。

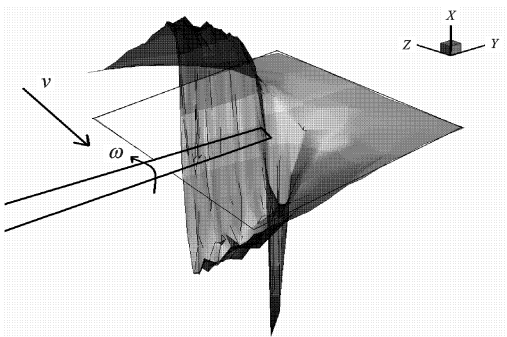


(a) 干净叶尖

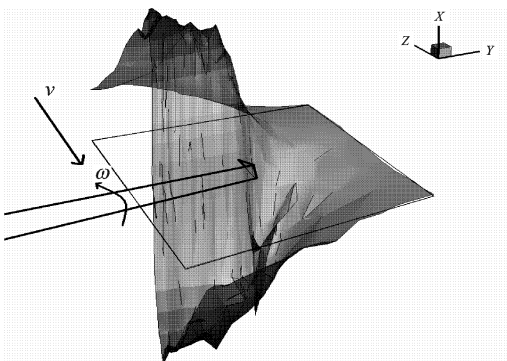


(b) 带涡扩散器叶尖

图 4 $x/c=0.5$ 平面的静压云图



(a) 干净叶尖



(b) 带涡扩散器叶尖

图 5 $x/c=0.5$ 平面的静压山峰图

在恒定风速下启动运行的风力机,尖速比是逐渐增大的。在设计状态下运行的风力机,当来流风速变化,尖速比也随之变化。本节主要研究恒定来流条件下,改变风轮转速,叶尖涡强度随尖速比变化规律。

2.3.1 干净叶尖

对于干净叶尖,取不同尖速比 $\lambda=5,6,7,8$,分别分析下游 $x/c=0.5,1,1.5$ 三个截面内,涡核总压系数变化规律。涡核总压 p_s 及其总压系数 C_{ps} 详见表3所示。

图6表示在下游3个平面内,干净叶尖下游的叶尖涡涡核强度随尖速比的变化规律。

表3 不同尖速比下干净叶尖的叶尖涡总压系数

尖速比 λ	截面	$x=0.5c$	$x=c$	$x=1.5c$
5	p_s/Pa	-231	-129	-56.2
	C_{ps}	-3.78	-2.11	-0.92
6	p_s/Pa	-237	-137	-86.1
	C_{ps}	-3.87	-2.24	-1.41
7	p_s/Pa	-285	-171	-118
	C_{ps}	-4.65	-2.79	-1.93
8	p_s/Pa	-343	-206	-147
	C_{ps}	-5.6	-3.36	-2.4

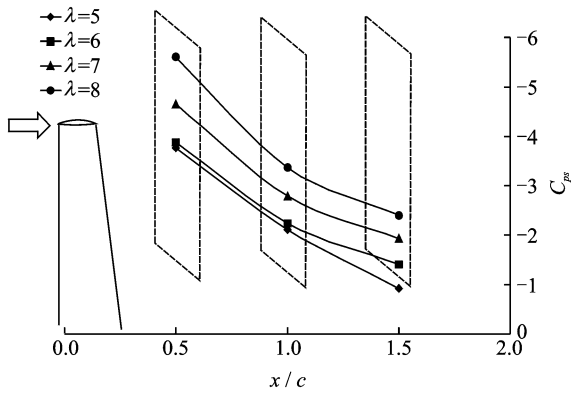


图6 不同尖速比条件下干净叶尖涡核总压系数变化

2.3.2 安装漩涡扩散器的叶尖

对于安装漩涡扩散器的叶尖,取不同尖速比 $\lambda=5,6,7,8$,分别分析下游 $x/c=0.5,1,1.5$ 三个截面内,涡核总压系数变化规律。涡核总压 p_s 及其总压系数 C_{ps} 详见表4所示。

图7表示在3个平面内,安装漩涡扩散器的叶尖下游的叶尖涡涡核强度随尖速比的变化规律。

从图6,7的曲线分析可知:

- (1)随着尖速比增大,叶尖涡强度随之增强。
- (2)随着尖速比增大,下游涡强度衰减越慢。

(3)漩涡扩散器可以减弱叶尖涡强度,促进下游漩涡扩散。

表4 不同尖速比下安装漩涡扩散器叶尖的叶尖涡总压系数

尖速比 λ	截面	$x=0.5c$	$x=c$	$x=1.5c$
5	p_s/Pa	-162	-92.4	-59.7
	C_{ps}	-2.65	-1.51	-0.97
6	p_s/Pa	-215	-132	-91.4
	C_{ps}	-3.51	-2.16	-1.49
7	p_s/Pa	-273	-172	-123
	C_{ps}	-4.46	-2.8	-2.01
8	p_s/Pa	-332	-209	-152
	C_{ps}	-5.42	-3.41	-2.48

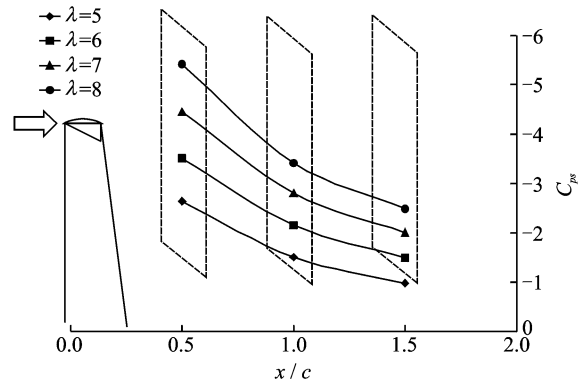


图7 不同尖速比条件下安装漩涡扩散器叶尖涡核总压系数变化

2.4 叶尖压力分布

由于有限长叶片的尖部附近的三维流动,压力面的高压气体绕过叶尖进入吸力面,导致叶尖附近表面压力分布与二维翼型的压力分布完全不同。叶尖漩涡扩散器可以有效抑制三维流动,改善叶尖及其下游的流场特性,使叶尖附近流场趋近二维流动。如图8所示。

为了分析叶尖部分上下表面压力变化,在叶尖部分 $Y=1.49\text{ m}$ 处建立截面,如图9所示。风轮半径 $R=1.5\text{ m}$,截面相距叶尖垂直距离 0.01 m 。本节中,对比交界线上翼型压力分布情况,并与翼型二维流动压力分布情况相对比。

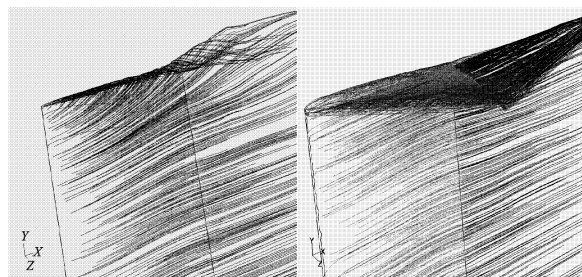
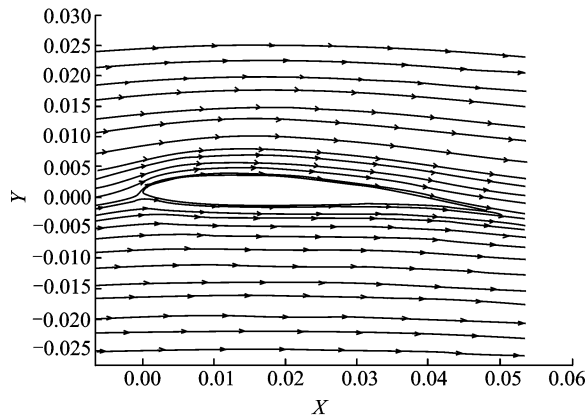
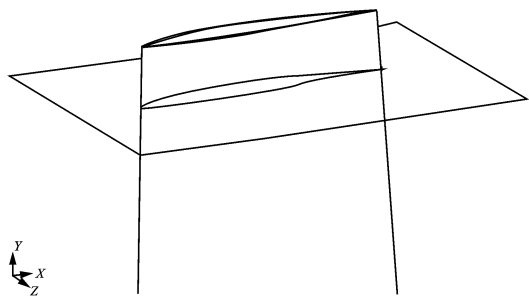


图8 干净叶尖和带漩涡扩散器叶尖的流线对比



(a) 二维翼型流场示意图



(b) 三维叶尖与截面示意图

图9 叶尖截面示意图

本节中对比了干净叶尖和加装涡扩散器两种情况下,截面交界线上表面压力分布与二维翼型压力分布对比。由图10可以看出,涡扩散器有效抑制了叶尖三维效应的影响。叶尖部分流动更符合二维翼型的流动。

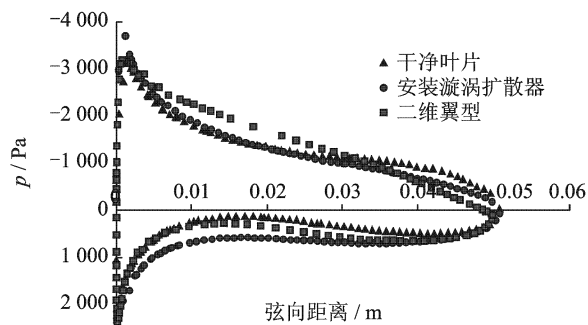


图10 三维叶尖与二维翼型压力分布对比

2.5 叶尖涡扩散器对叶片功率的影响

为了研究叶尖涡扩散器对叶片运行效率的影响,本节分别计算干净叶片和安装漩涡扩散器的叶片在设计状态下对风轮转动轴线Z轴的扭矩 M_z ,并计算漩涡扩散器在不同角度参数下,对叶片扭矩的贡献。

表5对比了干净叶片和安装漩涡扩散器的叶片设计状态下对Z轴的扭矩 M_z ,漩涡扩散器产生的扭矩 M'_z 以及相对比例 M'_z/M_z 。由表5数据可知,

漩涡扩散器对叶片扭矩影响极小。其中5°和7°状态下的漩涡扩散器对Z轴有正的扭矩,即可以适当地利用叶尖涡的能量,不产生附加的损失。

表5 干净叶片和安装漩涡扩散器叶片的扭矩对比

扭矩/(N·m)	M_z	M'_z	M'_z/M_z
干净叶尖	12.8	0	0
涡扩散器0°	12.94	-0.065	-0.005 0
涡扩散器5°	12.52	0.028	0.002 2
涡扩散器7°	12.47	0.023 2	0.001 86

3 结束语

叶尖下游总压系数是衡量叶尖涡强度的主要参数。当来流风速不变的情况下,叶尖涡的强度随叶片尖速比的增大而增强。

相同风速和尖速比条件下,叶尖涡扩散器可以有效地减小叶尖三维效应的影响,减弱了下游漩涡的强度。叶尖涡强度越低,在下游扩散衰减得越快。此外,叶尖涡扩散器可以利用叶尖漩涡的能量,在改善流场特性的同时,不对叶片产生附加损失。

叶尖涡是风力机气动噪声主要来源之一。由于风力机尾流区的存在(大约10倍风轮直径),会损害下游风力机运行效率,降低大型风电场的利用率。通过叶尖漩涡扩散器减弱叶尖涡的强度并促进其扩散,不仅可以降低气动噪声,而且可以改善风力机下游流场,提高整体风电场的利用效率。

参考文献:

- [1] Hansen M O L. 风力机空气动力学[M]. 肖劲松,译. 北京:中国电力出版社,2009:16-22.
- [2] Johansen J, Gaunaa M, Sorensen N N. Increased aerodynamic efficiency on wind turbine rotor using winglets [C]//26th AIAA Applied Aerodynamics Conference. Hawaii, USA; AIAA, 2008:12-21.
- [3] 东雪青,汪建文,韩晓亮,等. 风力机叶尖加小翼流场的试验研究[J]. 工程热物理学报,2009,30(10): 1162-1164.
- [4] 余永生,杜向东. 翼梢涡的结构与控制方法探索[J]. 空气动力学学报,1999,17(4):405-412.
- [5] 顾蕴松,程克明,郑新军. 翼尖涡流场特性及其控制[J]. 空气动力学学报,2008,26(4):446-451.
- [6] 韩占中,王敬,兰小平. FLUENT 流体工程仿真实例与应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2004.
- [7] 苏绍禹. 风力发电机设计与运行维护[M]. 北京:中国电力出版社,2003.