

粗糙度对风力机翼型气动性能影响的数值预测*

李德顺 李仁年 杨从新 王秀勇 李银然

(兰州理工大学能源与动力工程学院, 兰州 730050)

【摘要】 采用二维不可压缩 N-S 方程和 SST $k-\omega$ 湍流模型研究了风力机翼型 DU 95-W-180 在粗糙表面时的空气动力学性能,在整个翼型表面均匀分布不同高度的粗糙带时,得到了该翼型的升力和阻力特性曲线,以及最敏感的粗糙度;同时,研究了在翼型压力面和吸力面的不同位置布置粗糙带时,粗糙带位置对翼型的升力和阻力特性的影响,通过分析得到了该翼型对粗糙带的最敏感位置,并进一步分析了翼型两个敏感位置的粗糙度对翼型升力特性、阻力特性和升阻比的影响。

关键词: 风力机 翼型 粗糙度 气动性能

中图分类号: TK83 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)05-0111-05

Numerical Prediction of the Effect of Surface Roughness on Aerodynamic Performance of a Wind Turbine Airfoil

Li Deshun Li Rennian Yang Congxin Wang Xiuyong Li Yinran

(School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract

The two-dimensional incompressible N-S equations and the SST $k-\omega$ turbulence model were used to study the aerodynamic performance of a wind turbine airfoil under rough surface conditions. The DU 95-W-180 airfoil that is widely used in wind turbines was chosen as the object. The studies were mainly done as described: the lift coefficient and the drag coefficient of the airfoil under different roughness heights on full surface and different roughness tape locations were computed, the trend of the lift coefficient and the drag coefficient with the roughness height and the roughness tape location were analyzed, the critical value of the roughness height and the roughness tape location, the trends of the lift coefficient, the drag coefficient and the ratio of lift coefficient and drag coefficient with the roughness height at the critical locations were also analyzed and the results were gained.

Key words Wind turbine, Airfoil, Roughness, Aerodynamic performance

引言

风力机经常工作在比较恶劣的自然环境下,盐雾、冰雪、沙尘都会不可避免地增加叶片的表面粗糙度,这将对风轮的气动性能产生较大的影响。翼型的气动性能参数是风力机叶片设计的基础,表面粗糙度是影响风力机翼型气动性能的主要因素之一。研究表明,二维 N-S 方程和 SST $k-\omega$ 湍流模型可

以有效地预测粗糙度对翼型气动性能的影响^[1~3],并能预测由大尺度粗糙度诱发的非定常速度波动和涡分布^[3],包能胜等的研究表明:在翼型后缘附近粘贴粗糙带能够提高翼型的升力^[4~5]。尽管国内外已经开展了一些粗糙度对风力机翼型气动性能影响的实验和数值研究^[6~11],但这些研究仍不充分。

本文选用风力机专用的 DU 95-W-180 翼型作为研究对象,控制方程采用二维不可压缩 N-S

收稿日期: 2010-06-17 修回日期: 2010-07-26

* 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2007CB714605)

作者简介: 李德顺,讲师,博士生,主要从事风力机空气动力学研究,E-mail: lideshun_8510@sina.com

通讯作者: 李仁年,教授,博士生导师,主要从事风力机空气动力学、流体机械流动理论研究,E-mail: lirn@lut.cn

方程及 SST $k-\omega$ 湍流模型对该翼型的气动性能进行数值计算,研究粗糙度对该风力机翼型气动性能的影响。

1 数值计算模型

控制方程采用二维不可压缩雷诺平均 N-S 方程和连续性方程,湍流模型选用 SST $k-\omega$ 湍流模型。

2 几何模型

DU 95-W-180 翼型常用在风力机叶片的叶尖部分,相对厚度为 18%,风洞实验是在荷兰 Delft 大学的低速风洞中开展的,风洞实验段长 2.6 m、高 1.25 m、宽 1.8 m,当雷诺数为 3×10^6 ,来流风速为 75 m/s 时,实验段的湍流度为 0.07%,翼型弦长为 0.6 m^[12]。

为了较好模拟风洞实验,并进行数据对比,几何模型同样选用 0.6 m 弦长,选用风洞实验段的纵向截面为计算域,但是为了保证数值计算的收敛性,将其长度延长到 7.8 m,如图 1 所示,离散网格采用结构化和非结构化的混合网格,即翼型周围区域采用结构化的 C 型网格,外部计算域采用非结构化网格,网格节点数为 213 752,翼型周围第 1 层网格高度为 0.005 mm。边界条件选用速度进口和压力出口,以及标准壁面无滑移条件,速度和压力耦合采用 SIMPLE 算法,动量、湍动能和耗散率方程均采用二阶迎风格式离散。

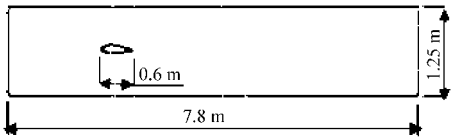


图 1 计算域

Fig. 1 Computational zone

3 结果及分析

3.1 光滑表面的数值计算

当雷诺数为 3×10^6 ,攻角在 $-6^\circ \sim 14^\circ$ 之间变化时,对 DU 95-W-180 翼型表面光滑时的气动性能进行了数值模拟,得到了升力系数 C_L 和阻力系数 C_D 随攻角 α 的变化曲线,如图 2 所示。由图可知,数值计算所得升力系数和阻力系数与实验数据吻合良好,故采用的二维 N-S 方程和 SST $k-\omega$ 湍流模型进行该风力机翼型的气动性能预测方法是正确的。

3.2 表面粗糙度对风力机翼型气动性能的影响

为了研究表面粗糙度对该翼型气动性能的影响,

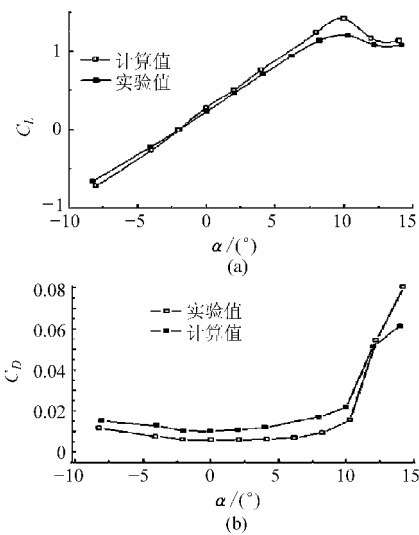


图 2 数值计算结果与实验数据对比

Fig. 2 Comparison of the experimental and simulation data
(a) 升力系数 (b) 阻力系数

响,假设在整个翼型表面均匀分布粗糙度分别为 0.03、0.08、0.1、0.2、0.3、0.5、0.6、0.7、1.0、1.5、2.0 mm 的粗糙带,当攻角为 2° ,雷诺数为 3×10^6 时,通过数值计算得到了不同粗糙度时,翼型表面的压力系数 C_p 分布曲线(图 3)以及翼型的升力系数和阻力系数随粗糙度变化的曲线(图 4)。选用 2° 攻角主要是为了能够有效地预测由于粗糙度变化产生的层流边界层向湍流边界层转变对翼型气动性能的影响,同时,小攻角时数值计算结果的准确性高。

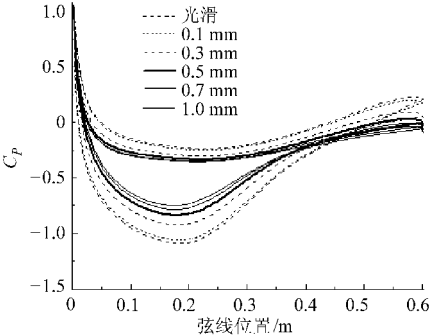


图 3 不同粗糙度时的压力系数分布曲线

Fig. 3 Pressure coefficient at different roughness heights

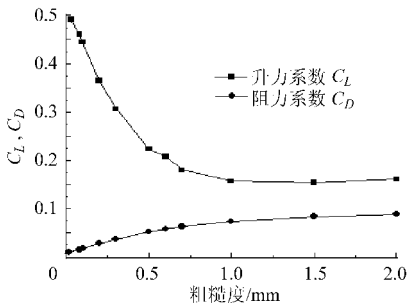


图 4 升力系数和阻力系数随粗糙度变化曲线

Fig. 4 Lift coefficient and drag coefficient with roughness heights

由图4可以看出,当粗糙度小于0.5 mm时,升力系数减小较快,当粗糙度大于0.7 mm时,升力系数曲线变化比较平缓;同时,当粗糙度小于0.5 mm时,阻力系数增大较快,当粗糙度大于0.7 mm时,阻力系数曲线变化比较平缓。由图5、图6可知,造成这种现象的原因是:粗糙度小于0.5 mm时,随着粗糙度的增加,层流边界层逐渐转变成了湍流边界层,使得阻力系数急剧增大,当粗糙度大于0.7 mm时,湍流对于翼型气动性能的影响不再那样剧烈,变化速度逐渐减缓。因此,可以认为0.5 mm为该翼型的关键粗糙度。由图4可知,随着粗糙度的增大,升力系数可以下降到光滑表面时的40%以下,同时,阻力系数可增大近10倍,可见,粗糙度对风力机翼型气动性能的影响非常大。

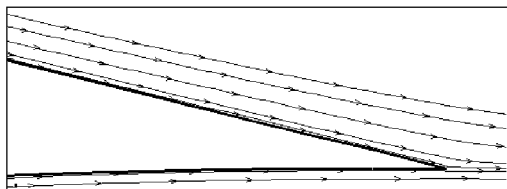


图5 光滑表面时的流线图($Re = 3 \times 10^6$, $\alpha = 2^\circ$)
Fig. 5 Streamline of smooth surface($Re = 3 \times 10^6$, $\alpha = 2^\circ$)

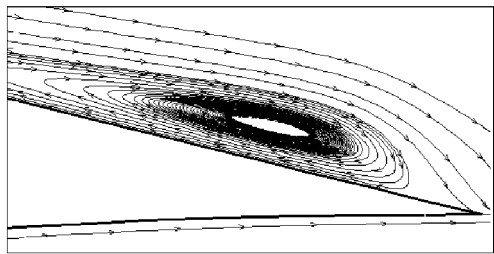


图6 粗糙度0.5 mm时的流线图($Re = 3 \times 10^6$, $\alpha = 2^\circ$)
Fig. 6 Streamline of 0.5 mm roughness height
($Re = 3 \times 10^6$, $\alpha = 2^\circ$)

3.3 粗糙带位置对翼型气动性能的影响

当粗糙度为该翼型的关键粗糙度0.5 mm,攻角为 2° ,雷诺数为 3×10^6 时,通过分别在翼型的压力面和吸力面的距前缘5%、10%、20%、30%、60%和100%弦长位置布置宽度为10 mm的粗糙带,研究了粗糙带位置对翼型气动性能的影响,分别获得了在翼型吸力面布置粗糙带时,其升力系数和阻力系数随粗糙带位置的变化曲线(图7),以及在翼型的压力面布置粗糙带时,其升力系数和阻力系数随粗糙带位置的变化曲线(图8)。

由图7可知:当在吸力面布置粗糙带时,在距前缘10%弦长位置之前,翼型的升力系数快速减小,并达到最小值,此后逐渐增大,当大于距前缘20%弦长位置后,增加速度减缓,但始终低于光滑表面时的值;同时,在距前缘10%弦长位置之前,翼型的阻力系数快速增大,并达到最大值,此后逐渐减小,当

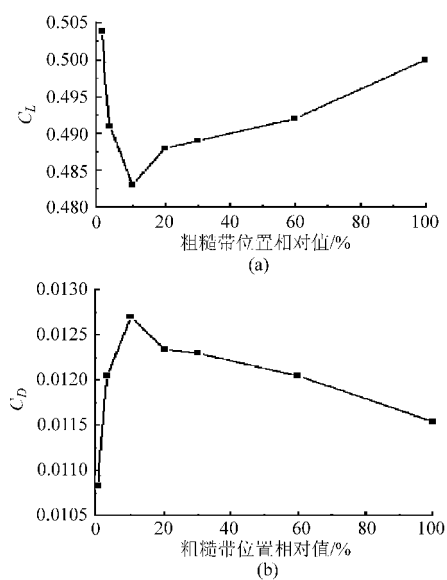


图7 升力系数和阻力系数随粗糙带位置变化曲线
(吸力面, $Re = 3 \times 10^6$, $\alpha = 2^\circ$)
Fig. 7 Lift coefficient and drag coefficient with roughness tape location on the suction surface($Re = 3 \times 10^6$, $\alpha = 2^\circ$)
(a) 升力系数 (b) 阻力系数

大于距前缘20%弦长位置后,减小速度减缓,但始终高于光滑表面时的值。

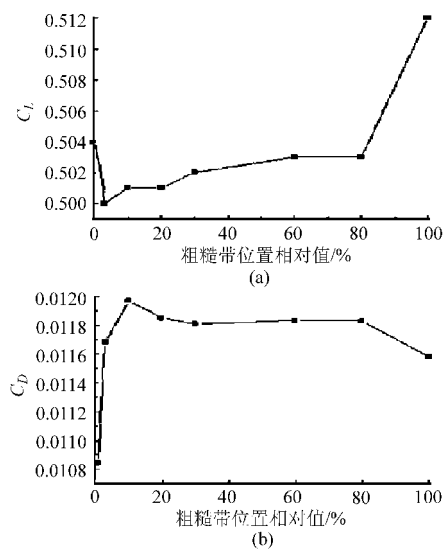


图8 升力系数和阻力系数随粗糙带位置变化曲线
(压力面, $Re = 3 \times 10^6$, $\alpha = 2^\circ$)
Fig. 8 Lift coefficient and drag coefficient with roughness tape location on pressure surface($Re = 3 \times 10^6$, $\alpha = 2^\circ$)
(a) 升力系数 (b) 阻力系数

由图8可知:在压力面布置粗糙带时,在距前缘5%弦长位置之前,翼型的升力系数快速下降,并达到极小值,此后缓慢增大,但是当粗糙带位置大于距前缘80%弦长位置后,升力系数开始快速增加,尤其当大于距前缘90%弦长位置后,升力系数甚至超过了光滑表面时的值;在距前缘10%弦长位置之前,翼型的阻力系数快速增大,并达到极大值,此后

逐渐减小,当粗糙带位置在距前缘 25% 至 80% 弦长位置时,阻力系数曲线趋于平坦,当大于 80% 弦长位置后,阻力系数减小速度略有增大,但始终高于光滑表面时的值。

由此可见,该翼型的第 1 个关键粗糙带位置在吸力面距前缘 10% 弦长处,此时,翼型的升力系数最小,阻力系数最大,粗糙度的影响最为严重;第 2 个关键粗糙带位置在压力面后缘附近,适当增加粗糙度,翼型的升力系数甚至会高于光滑翼型的值,与此同时,阻力系数也有所增加。

3.4 两个关键位置的气动性能模拟

当粗糙度分别为 0.1、0.3、0.5、0.7、1.0、1.5 mm 时,对 DU 95 - W - 180 翼型的两个关键位置布置粗糙带时的气动性能进行数值模拟,分别得到了在吸力面距前缘 10% 弦长处布置粗糙带时,升力系数和阻力系数随粗糙度的变化曲线(图 9);在压力面后缘附近布置粗糙带时,升力系数和阻力系数随粗糙度的变化曲线(图 10)以及升阻比随粗糙度的变化曲线(图 11)。

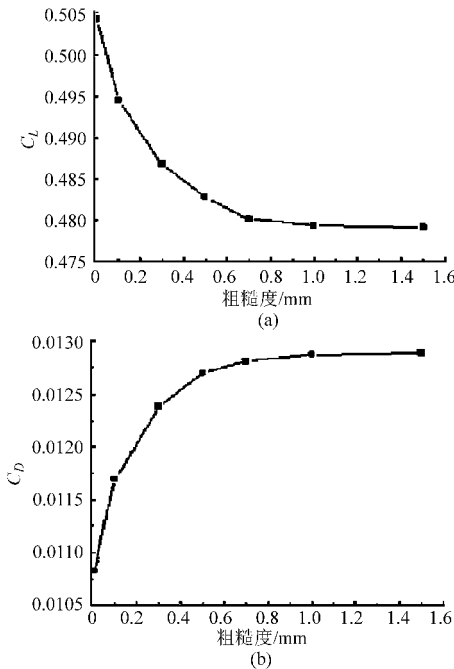


图 9 吸力面距前缘 10% 弦长处升力系数和阻力系数随粗糙度的变化曲线 ($Re = 3 \times 10^6$, $\alpha = 2^\circ$)

Fig. 9 Lift coefficient and drag coefficient with roughness height ($Re = 3 \times 10^6$, $\alpha = 2^\circ$)
(a) 升力系数 (b) 阻力系数

在吸力面距前缘 10% 弦长位置布置不同高度的粗糙带时,由图 9 可知:当粗糙度从零增大到 0.5 mm 时,升力系数迅速减小,当粗糙度从 0.5 mm 增大到 1.5 mm 时,升力系数减小速度减缓;当粗糙度从零增大到 0.5 mm 时,阻力系数迅速增大,当粗糙度从 0.5 mm 增大到 1.5 mm 时,阻力系数增大速

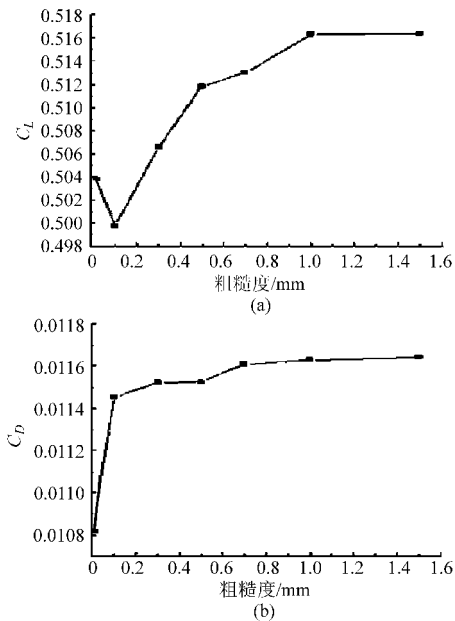


图 10 压力面后缘附近升力系数和阻力系数随粗糙度的变化曲线 ($Re = 3 \times 10^6$, $\alpha = 2^\circ$)

Fig. 10 Lift coefficient and drag coefficient with roughness

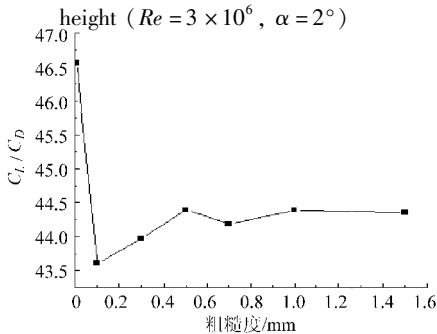


图 11 压力面后缘附近升阻比随粗糙度的变化曲线 ($Re = 3 \times 10^6$, $\alpha = 2^\circ$)

Fig. 11 Ratio of lift coefficient and drag coefficient with roughness height ($Re = 3 \times 10^6$, $\alpha = 2^\circ$)

度减缓,当大于 0.7 时,升力系数和阻力系数曲线均趋于平缓,这也进一步验证了 0.5 mm 为该翼型的关键粗糙度。

在压力面后缘附近布置不同高度的粗糙带时,由图 10 可知:当粗糙度从零增加到 0.1 mm 时,升力系数略有减小,但是,当粗糙度从 0.1 mm 增加到 0.5 mm 时,升力系数反而迅速增大,当粗糙度大于 0.7 mm 后,增加速度减缓;同时可以看出,当粗糙度大于 0.25 mm 后,升力系数始终大于光滑表面时的值。也就是说,并不是在翼型压力面后缘附近增加粗糙度,就可以提高其升力系数,只有当粗糙度大于某一临界值后,翼型升力系数才会大于光滑表面时的值。因此,可以通过在翼型压力面后缘附近适当增加粗糙度的方法来提高翼型的升力系数。当粗糙度从零增加到 0.1 mm 时,阻力系数迅速增大,当大于 0.1 mm 后,阻力系数缓慢增大。

由图 11 可知,虽然在翼型压力面后缘附近适当增加粗糙度可以提高其升力系数,但是翼型的升阻比 C_L/C_D 始终低于光滑表面的值。众所周知,要增大风力机的风能捕获能力,主要途径是提高风力机叶片主要功率产生区(叶片径向 0.75 倍叶片长度附近)相关翼型的升阻比,从这个角度来讲,增加翼型压力面后缘附近的表面粗糙度并不能够有效提高风力机风轮的出力。

4 结论

(1) 采用二维 N-S 方程和 SST $k-\omega$ 湍流模型作为控制方程模拟粗糙度对风力机翼型气动性能影响的方法是行之有效的。

(2) 对于 DU 95-W-180 翼型,关键粗糙度为

0.5 mm。粗糙度对风力机翼型气动性能的影响非常大,随着粗糙度增大,升力系数可以下降到光滑翼型时的 40% 以下,同时阻力系数可增大近 10 倍。

(3) 对于 DU 95-W-180 翼型来讲,第 1 个关键粗糙带位置为吸力面距前缘 10% 弦长位置,此处升力系数最小,阻力系数最大;第 2 个关键位置在压力面后缘附近,随着粗糙度的增加升力系数先略有减小,然后逐渐增加,并超过光滑翼型的升力系数,因此可以通过在翼型压力面后缘附近增加适当粗糙度的方法来提高翼型的升力系数。

(4) 在翼型压力面后缘附近增加适当粗糙度可以提高其升力系数,但是,翼型的升阻比始终低于光滑表面时的值,因此增加翼型压力面后缘附近的表面粗糙度并不能够有效地提高风力机风轮的出力。

参 考 文 献

- 1 Ren Nianxin, Ou Jinping. Dust effect on the performance of wind turbine airfoils[J]. Journal of Electromagnetic Analysis & Applications, 2009, 1(2): 102 ~ 107.
- 2 Menter F R. Zonal two-equation model $k-\omega$ models for aerodynamic flows [C]//24th Fluid Dynamics Conference, AIAA 93-2906, Orlando, Florida, 1993.
- 3 Huebsch Wade W, Rothmayer Alric P. Numerical prediction of unsteady vortex shedding for large leading-edge roughness [J]. Computers & Fluids, 2004, 33(3): 405 ~ 434.
- 4 包能胜, 霍福鹏, 叶枝全, 等. 表面粗糙度对风力机翼型性能的影响[J]. 太阳能学报, 2005, 26(4): 458 ~ 462.
Bao Nengsheng, Huo Fupeng, Ye Zhiquan. Aerodynamic performance influence with roughness on wind turbine airfoil surface [J]. Acta Energaiae Solaris Sinaica, 2005, 26(4): 458 ~ 462. (in Chinese)
- 5 霍福鹏, 孟繁娟, 钟洪亮, 等. 提高叶片局部粗糙度对风机效率影响的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2000, 21(6): 697 ~ 699.
Huo Fupeng, Meng Fanjuan, Zhong Hongliang, et al. The experiment research on the effect of the increasing blade local roughness on the fan efficiency[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2000, 21(6): 697 ~ 699. (in Chinese)
- 6 Mohammed G K, Aboelyazied M K. Effect of dust on the performance of wind turbines [J]. Desalination, 2007, 209(1 ~ 3): 209 ~ 220.
- 7 Van R, Timmer W A. Roughness sensitivity considerations for thick rotor blade airfoils [C] // Proceedings of the 41st Aerospace Sciences Meeting(AIAA), Reno, USA, 2003: 472 ~ 480.
- 8 Van J A Rij, Belnap B J, Ligrani P M. Analysis and experiments on three-dimensional irregular surface roughness [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2002, 124(3): 671 ~ 677.
- 9 Roberts S K, Yaras M I. Boundary-layer transition affected by surface roughness and free-stream turbulence [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2005, 127(3): 449 ~ 457.
- 10 Walid Chakroun, Issa Al-Mesri, Sami Al-Fahad. Effect of surface roughness on the aerodynamic characteristics of a symmetrical airfoil [J]. Wind Engineering Volume, 2004, 28(5): 547 ~ 564.
- 11 Zhang Qiang, Lee Sang Woo, Ligrani Phillip M. Effects of surface roughness and turbulence intensity on the aerodynamic losses produced by the suction surface of a simulated turbine airfoil [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2004, 126(2): 257 ~ 265.
- 12 Timmer W A, van Rooij R P J O M. Summary of the Delft University wind turbine dedicated airfoils [J]. ASME Journal of Solar Energy Engineering, 2003, 125(4): 488 ~ 496.