

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.014

基于流固耦合的多级潜水泵叶轮结构强度分析*

施卫东 徐燕 张启华 陆伟刚 周岭

(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

摘要: 利用 ANSYS 的 Workbench 平台,通过单向流固耦合模型对叶轮的应力应变进行了数值研究。分别计算出叶轮受流体压力及离心力载荷作用所产生的最大等效应力及变形量,进一步获得 2 种载荷共同作用时的效果。在此基础上,研究了叶轮最大等效应力及变形量随流量的变化特征,并对叶轮进行结构强度校核。结果表明,叶轮最大等效应力及变形量主要受流体压力作用影响,而受离心力的影响较小。当流量逐渐增加,叶轮最大等效应力先增大后减小,叶轮变形量则逐渐减小。强度校核结果表明,叶轮符合强度要求。

关键词: 多级潜水泵 叶轮 结构强度 流固耦合

中图分类号: TH311 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2013)05-0070-04

Structural Strength Analysis of Multistage Submersible Pump Impeller Based on Fluid-structure Interaction

Shi Weidong Xu Yan Zhang Qihua Lu Weigang Zhou Ling

(Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: To accurately figure out the stress and the deformation of the impeller, the one-way fluid-structure interaction was performed, utilizing the ANSYS Workbench. The pressure of the fluid flow and the centrifugal force imposed on the impeller respectively were used to evaluate the maximum equivalent stress and deformation of the impeller. Then the effect of two loads jointly imposed on the impeller was obtained. Based on these procedures, the stress and deformation behavior under different flow rates were numerically investigated. And the structural strength of the impeller was also checked. The results showed that the maximum equivalent stress and the deformation were primarily determined by the fluid flow pressure, and were less affected by the centrifugal force. With increasing flow rate, the maximum equivalent stress increased gradually and then decreased, while the deformation gradually decreased. The strength check result showed that the impeller could meet the strength requirement.

Key words: Multistage submersible pump Impeller Structural strength Fluid-structure interaction

引言

多级潜水泵的叶轮采用多级串联方式工作,一旦设计强度不够或者超负荷运转,非常容易遭到破坏。叶轮的结构强度关系到整个机组的可靠性及安全稳定运行,因此,对多级潜水泵叶轮进行强度分析显得尤为重要。

由于高速旋转,多级潜水泵叶轮内部为复杂的

三维湍流流动,运行中叶轮受到较大的流体压力,因而会产生一定量的结构变形。对于流场引起的结构变形问题,若采用流场与结构单独求解的方法,将导致计算结果偏离实际情况,而流固耦合方法能准确反映流体-结构变形的相互作用,近年来获得越来越多的应用。目前,在旋转机械流固耦合研究方面,已有很多研究成果报道^[1~4]。但是,目前为止还尚未发现对多级潜水泵进行流固耦合的研究。因此,本

收稿日期: 2012-05-11 修回日期: 2012-06-29

* 国家自然科学基金资助项目(51079063)、江苏省自然科学基金资助项目(BK2011503)和国家博士后科学基金资助项目(2011M500117)

作者简介: 施卫东,研究员,博士生导师,主要从事流体机械及工程研究,E-mail: wdshi@ujs.edu.cn

文利用 ANSYS 的 Workbench 平台,对多级潜水泵叶轮进行单向流固耦合求解,分别计算出多级潜水泵叶轮在流体压力、离心力及两者共同作用时的应力和变形量分布。分析流量变化对叶轮应力及变形量的影响,并对叶轮强度进行校核,为多级潜水泵叶轮的结构强度设计提供依据。

1 流固耦合计算方法

流固耦合力学是流体力学和固体力学交叉产生的一门力学分支^[5],主要涉及固体在流场作用下的各种行为以及固体变形对流场的影响。按处理方法的不同,可以把流固耦合分析方法分为:非耦合方法、弱耦合方法和强耦合方法^[6]。在多级潜水泵中,叶轮大多采用不锈钢或工程塑料制造,叶轮结构在流场作用下的变形量一般较小。考虑到多级潜水泵过流部件边界非常复杂,开展强耦合研究比较困难,而采用弱耦合方法中的单向耦合较为可行。因此,本文只研究流场对叶轮结构的作用,而忽略结构变形对流场的影响。

2 数值模拟

2.1 计算模型

以 150QJ20 型多级潜水泵叶轮为研究对象,对其进行数值计算及试验。设计参数为:流量 $Q = 20 \text{ m}^3/\text{h}$ 、单级扬程 $H = 11 \text{ m}$ 、转速 $n = 2\,850 \text{ r}/\text{min}$ 。叶轮叶片数为 7,采用扭曲叶片。其叶轮结构示意图和计算模型分别如图 1、图 2 所示。

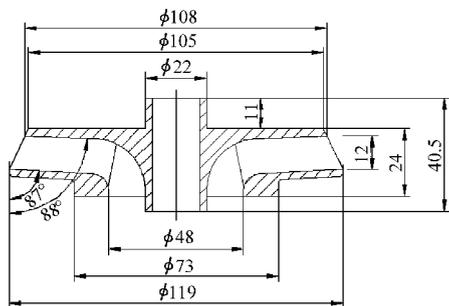


图 1 叶轮结构

Fig. 1 Impeller structure

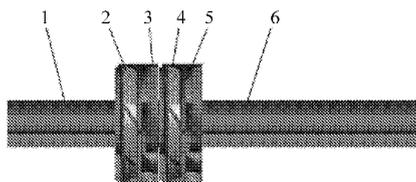


图 2 计算模型

Fig. 2 Calculating model

1. 进口段 2、4. 叶轮水体 3、5. 导叶水体 6. 出口段

根据有关文献的介绍,本文所进行的流场计算区域只要取多级潜水泵的两级三维全流场(包括进

口段、第 1 级叶轮水体、第 1 级导叶水体、第 2 级叶轮水体、第 2 级导叶水体、出口段)即可,结构区域只考虑叶轮。运用 Gambit 软件对流场划分四面体非结构网格,共划分 1 635 041 个单元。结构域使用 ANSYS Workbench 软件中的网格划分功能,对叶轮划分自由网格,共划分 91 386 个单元。

2.2 流场边界条件及控制方程

流场计算在 Fluent 中进行,将进口段向前延伸 1 倍叶轮外径,设置进口端面处来流速度均匀。将出口段向后延伸至 2 倍叶轮外径处,出口端面流动满足充分发展状态,边界条件设置为出流(Outflow)形式。采用标准 $k - \epsilon$ 湍流模型, SIMPLEC 算法,设进口面中心处为压力参考点,其相对压力为零,设置收敛精度为 1×10^{-5} 。设置无滑移固壁面边界条件,即壁面上各向速度均为零。对近壁面的湍流流动按标准壁面函数处理。

多级潜水泵内部流场的数值计算控制方程包括流体域的连续性方程、动量方程及 $k - \epsilon$ 模型中的 k 方程和 ϵ 方程^[7-9]。

2.3 结构方程及固体模型设置

利用 Hamilton 原理建立结构整体的运动方程。考虑流体对叶轮的作用,在液体中离散后弹性体的结构动力学方程^[10]为

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F \quad (1)$$

式中 M ——质量矩阵 C ——阻尼矩阵

K ——刚度矩阵

u, \dot{u}, \ddot{u} ——节点的位移矢量、速度矢量、加速度矢量

F ——节点所受的力,包括自身重力、离心力和流场的压力

叶轮实体模型选用工程中广泛采用的工程塑料 PPO,其密度 $\rho = 1\,100 \text{ kg}/\text{m}^3$,弹性模量 $E = 2.5 \text{ GPa}$,泊松比 $\mu = 0.46$,极限应力为 56 MPa 。进行流固耦合计算时,在方孔面上施加位移约束 $U_x = U_y = U_z = 0$ 。叶轮所荷载荷主要为离心力和表面压力,离心力通过设置叶轮密度、重力加速度及旋转速度施加,表面压力主要为作用在叶轮表面的流体压力载荷。将叶轮与流体接触的表面属性设置为 Fluid Solid Interface,以引入流场的压力载荷信息。

3 结果分析

3.1 多级潜水泵外特性参数对比

为验证数值模拟的准确性,对该型号的多级潜水泵进行了外特性试验。图 3 所示为由试验得到的泵效率 η 及单级扬程 H 与数值模拟结果对比图,其中 Q/Q_{opt} 表示实际流量与设计流量的比值。从图中

可以看出,模拟预测的泵效率随着流量的增大先增大后减小,在设计工况达到最大值;扬程则随着流量的增大而逐渐减小,预测的性能曲线趋势与试验结果基本一致。另外,在设计工况附近误差较小,偏离设计工况时误差较大,基本验证了数值模拟方法是准确的。

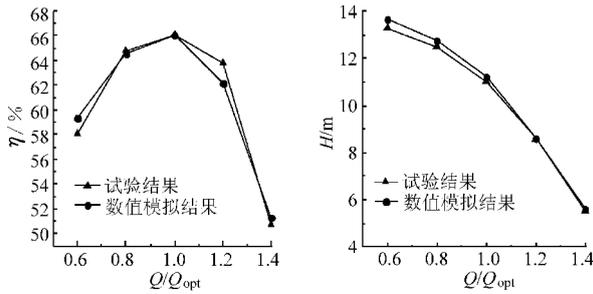


图3 数值模拟结果与试验结果对比

Fig. 3 Comparison between numerical and testing results

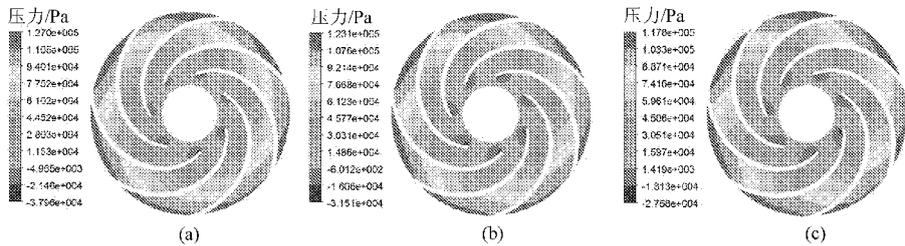


图4 不同流量时叶轮静压分布

Fig. 4 Impeller static pressure distribution at different flow rates

(a) $Q/Q_{opt} = 0.8$ (b) $Q/Q_{opt} = 1.0$ (c) $Q/Q_{opt} = 1.2$

从图5、图6中可以看出,不同载荷作用下叶轮的应力及变形量在数值上有明显不同。离心力载荷作用下应力及变形量明显小于流体压力载荷及两者共同作用时的应力和变形量,而流场载荷对应的应力和变形量略大于载荷共同作用下的应力和变形量。这主要是由于作用在叶轮上的惯性离心力沿径

3.2 不同流量工况下叶轮内压力分布

通过对多级潜水泵三维全流场的数值计算,得到不同工况下潜水泵流场的静压分布,如图4所示。可以看出,叶轮流道内静压随着流动方向从进口到出口逐渐增加,压力梯度比较明显。同一半径处,叶轮叶片工作面的静压大于叶片背面,且在叶片背面进口处最小,因此该处也最容易发生汽蚀。不同工况下,各点处的静压随着流量的增加而逐渐减小。

3.3 不同载荷作用下叶轮应力及变形量分析

多级潜水泵叶轮在工作过程中处于高速旋转状态,主要受到旋转离心力及流体压力。为了比较不同载荷对多级潜水泵叶轮的影响,分别计算了旋转离心力、流体压力以及两者共同作用时潜水泵叶轮的应力与变形大小及分布。

向向外,离心力在叶片上形成的力矩沿圆周方向,与叶轮旋转方向相同,而作用在叶片工作面上的流体压力明显大于背面的压力(压力方向均沿表面法向指向表面),流体压力可分为沿径向向内的分量和沿圆周方向的分量,而圆周分量产生的力矩与叶轮旋转方向相反。

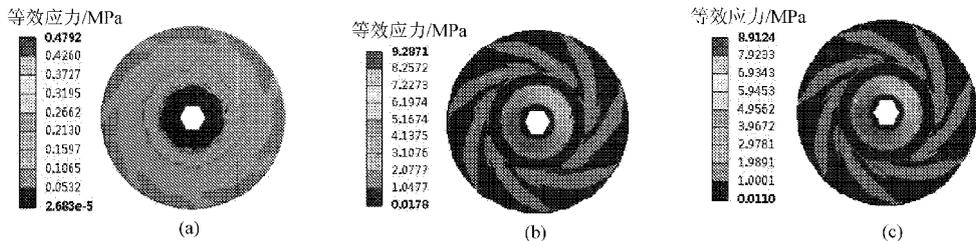


图5 叶轮应力分布

Fig. 5 Equivalent stress distribution of impeller

(a) 惯性离心力载荷 (b) 流场压力载荷 (c) 两种载荷共同作用

因此,流体压力载荷作用时在离心力加载后叶轮的应力和变形量有所减小。

当只考虑离心力作用时,叶轮的最大变形发生在叶轮叶片出口处,而流体压力载荷及两者共同作用时叶轮的最大变形发生在叶轮后盖板处。

3.4 流量对叶轮应力及变形量的影响

为研究流量对多级潜水泵叶轮最大等效应力及总变形量的影响,本文分别计算了小流量工况

($0.6Q_{opt}$ 、 $0.8Q_{opt}$)、设计工况 Q_{opt} 及大流量工况 ($1.2Q_{opt}$ 、 $1.4Q_{opt}$) 下叶轮的结构变形特征。图7所示为不同流量下叶轮的最大等效应力及总变形量曲线。可以看出,叶轮的最大等效应力随着流量的增加先增加后减小,在 $0.8Q_{opt}$ 工况下达到最大值;叶轮的总变形量随着流量的增大而逐渐减小。

3.5 强度校核

为检验叶轮的结构强度,对叶轮的许用应力进

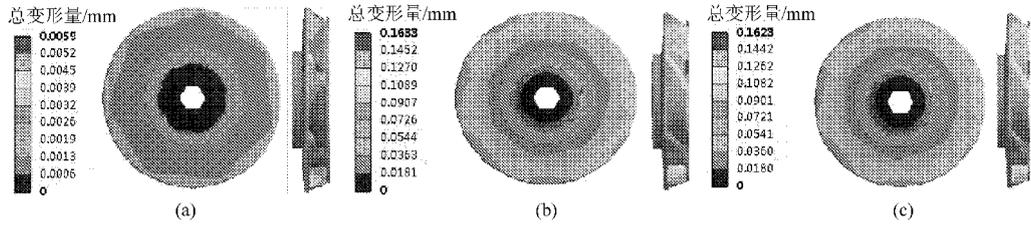


图6 叶轮总变形量分布

Fig. 6 Total deformation distribution of impeller

(a) 惯性离心力载荷 (b) 流场压力载荷 (c) 两种载荷共同作用

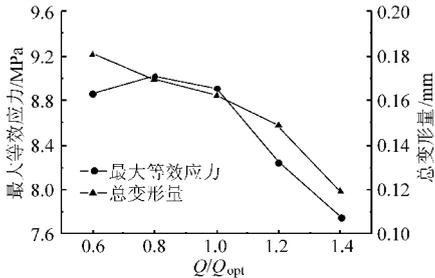


图7 不同流量下叶轮最大等效应力及总变形量

Fig. 7 Maximum equivalent stress and total deformation of impeller at different flow rates

行计算,叶轮工作过程中应保证所产生的应力低于该许用应力才能够使其安全运行,否则叶轮将在使用时发生破坏。

根据所选用的PPO材料属性,取安全系数为4,材料极限应力为56 MPa。安全系数 n_b 、极限应力 σ_b 和许用应力 $[\sigma]$ 的关系为

$$n_b = \sigma_b / [\sigma]$$

在 $0.6Q_{opt} \sim 1.4Q_{opt}$ 工况范围内,计算得出的叶

轮的安全系数分别为:6.56、6.20、6.29、6.80、8.20。由此可见所计算的多级潜水泵叶轮在各工况下运行时均满足强度要求。

4 结论

(1) 多级潜水泵叶轮的应力和变形量主要受流体压力作用的影响,而受离心力作用影响较小。

(2) 不同载荷作用下,多级潜水泵叶轮的最大等效应力均发生在叶片进口与轮毂相交的区域;而叶轮的最大变形位置有所不同,当只考虑惯性离心力作用时,叶轮的最大变形发生在叶轮叶片出口处;而考虑流体压力载荷及两者共同作用时,叶轮的最大变形发生在叶轮后盖板处。

(3) 多级潜水泵叶轮的最大等效应力随着流量的增加先增加后减小,在0.8倍设计工况下达到最大值;叶轮的总变形量随着流量的增大而逐渐减小。各工况下,叶轮的最大应力均小于其许用应力,证明了叶轮运行的安全性。

参 考 文 献

- 袁寿其,徐宇平,张金凤,等. 流固耦合作用对螺旋离心泵流场影响的数值分析[J]. 农业机械学报,2013,44(1):38~42,47. Yuan Shouqi, Xu Yuping, Zhang Jinfeng, et al. Numerical analysis for effect of fluid-structure interaction on flow field in screw centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(1):38~42,47. (in Chinese)
- 王洋,王洪玉,徐小敏,等. 冲压焊接离心泵叶轮有限元计算[J]. 排灌机械工程学报,2011,29(3):109~113. Wang Yang, Wang Hongyu, Xu Xiaomin, et al. Finite element computation for impeller of stamping and welding centrifugal pump[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2011,29(3):109~113. (in Chinese)
- 江伟,郭涛,李国君,等. 离心泵流场流固耦合数值模拟[J]. 农业机械学报,2012,43(9):53~56. Jiang Wei, Guo Tao, Li Guojun, et al. Numerical calculation on flow field in centrifugal pump based on fluid-structure interaction theorem[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(9):53~56. (in Chinese)
- 袁启明. 轴流泵叶片流固耦合振动特性分析[D]. 扬州:扬州大学,2009. Yuan Qiming. Study on fluid-solid coupling for vibration characteristics of axial-flow pump blades[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2009. (in Chinese)
- 邢景棠,周盛,崔尔杰. 流固耦合力学概述[J]. 力学进展,1997,21(1):19~38. Xing Jingtang, Zhou Sheng, Cui Erjie. A survey on the fluid solid interaction mechanics[J]. Advances in Mechanics, 1997,21(1):19~38. (in Chinese)
- 叶正寅,张伟伟,史爱明,等. 流固耦合力学基础及其应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2010.
- 曹卫东,高一,王秀兰,等. 基于Ansys的矿用潜水泵转子系统的优化设计[J]. 排灌机械工程学报,2012,30(2):157~161. Cao Weidong, Gao Yi, Wang Xiulan, et al. Optimization design of submersible pump rotor system for coal mine based on Ansys[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2012,30(2):157~161. (in Chinese)
- 施卫东,汪永志,孔繁余,等. 旋流泵无叶腔内部流场数值模拟[J]. 农业工程学报,2005,21(9):72~75. Shi Weidong, Wang Yongzhi, Kong Fanyu, et al. Numerical simulation of internal flow field within the volute of vortex pump[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005,21(9):72~75. (in Chinese)

- CATENA, 2003, 50(2~4): 91~133.
- 8 Brice J C. Erosion and deposition in the loess-mantled Great Plains, Medecine Creek drainage basin, Nebraska [C]. U. S. Geological Survey Professional Paper 352-H, 1966: 235~339.
 - 9 Imeson A C, Kwaad F J P M. Gully types and gully prediction[J]. Geografisch Tijdschrift, 1980, 14(5): 430~441.
 - 10 Vandaele K, Poesen J, Govers G, et al. Geomorphic threshold conditions for ephemeral gully incision[J]. Geomorphology, 1996, 16(2): 161~173.
 - 11 王文龙,雷阿林,李占斌,等. 土壤侵蚀链内细沟浅沟切沟流动力机制研究[J]. 水科学进展,2003,14(4):471~475.
Wang Wenlong, Lei Alin, Li Zhanbin, et al. Study on dynamic mechanism of rills, shallow furrows and gully in the soil erosion chain[J]. Advances in Water Science, 2003, 14(4): 471~475. (in Chinese)
 - 12 龚家国,周祖昊,贾仰文,等. 黄土区浅沟侵蚀沟槽发育及其水流水力学基本特性模拟试验研究[J]. 水土保持学报, 2010,24(5):92~100.
Gong Jianguo, Zhou Zuhao, Jia Yangwen, et al. Simulation experiment of ephemeral gully on basis hydraulics parameters of concentrated flow and erosion morphology in loess area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(5): 92~100. (in Chinese)
 - 13 Gong Jianguo, Jia Yangwen, Zhou Zuhao, et al. An experimental study on dynamic processes of ephemeral gully erosion in loess landscapes[J]. Geomorphology, 2011, 125(1): 203~213.
 - 14 仇宝云,刘超,汤方平,等. 探针测定大型水泵流量研究[J]. 农业机械学报,2004,35(4):66~69.
Qiu Baoyun, Liu Chao, Tang Fangping, et al. Flowrate measurement of large pumps by probe system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(4): 66~69. (in Chinese)
 - 15 Dunkerley D L. Estimating the mean speed of laminar overland flow using dye injection uncertainty on rough surfaces[J]. Earth Surf Process Landforms, 2001, 26(4): 363~374.
 - 16 Zhang Guanghui, Luo Rongting, Cao Ying, et al. Correction factor to dye-measured flow velocity under varying water and sediment discharges[J]. Journal of Hydrology, 2010, 389(1~2): 205~213.
 - 17 Lei Tingwu, Xia Weisheng, Zhao Jun. Method for measuring velocity of shallow water flow for soil erosion with an electrolyte tracer [J]. Journal of Hydrology, 2005, 301(1~4): 139~145.
 - 18 夏卫生. 电解质脉冲法测量坡面薄层恒定水流速度的研究及其初步应用[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2003.
Xia Weisheng. Study on velocity measurement of steady sheet flow with the electrolyte pulse method and its application [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2003. (in Chinese)
 - 19 Lei Tingwu, Chuo Ruiyuan, Zhao Jun, et al. An improved method for shallow water flow water flow velocity measurement with practical electrolyte inputs[J]. Journal of Hydrology, 2010, 390(1~2): 45~56.
 - 20 刘青泉,李家春,陈力. 坡面流及土壤侵蚀动力学(I):坡面流[J]. 力学进展,2004,34(3):360~373.
Liu Qingquan, Liu Jiachun, Chen Li. Dynamics of overland flow and soil erosion (I)—overland flow [J]. Advances in Mechanics, 2004, 34(3): 360~373. (in Chinese)
 - 21 夏卫生,雷廷武,刘春平,等. 坡面薄层水流流速测量的比较研究[J]. 农业工程学报,2004,20(2):23~26.
Xia Weisheng, Lei Tingwu, Liu Chunping, et al. Comparative analysis of measurement of velocity of slope laminar flow [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(2): 23~26. (in Chinese)
 - 22 夏卫生,雷廷武,刘春平,等. 降雨条件下坡面薄层水流速度特征[J]. 水利学报,2004,35(11):119~123.
Xia Weisheng, Lei Tingwu, Liu Chunping, et al. Flow characteristics of sheet flow on slope under the condition of raining [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(11): 119~123. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 73 页)

- 9 刘超,金燕. 双向流道泵装置内三维流动数值模拟[J]. 农业机械学报,2011,42(9):74~78.  
Liu Chao, Jin Yan. Numerical simulation on three dimensional flow in two-way reversible pumping system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9): 74~78. (in Chinese)
- 10 罗永要,王伟伟,梁权伟. 混流式水轮机转轮动载荷作用下的应力特征[J]. 清华大学学报:自然科学版,2005,45(2): 235~237.  
Luo Yongyao, Wang Zhengwei, Liang Quanwei. Stress of Francis turbine runners under fluctuant work conditions [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2005, 45(2): 235~237. (in Chinese)