

新能源动力技术

文章编号: 1001 - 2060(2013) 04 - 0420 - 05

Bezier 函数型径向弯叶片及其在 AP1000 核电常规岛前置泵中的应用

梁卫兵 胡永海

(上海电力修造总厂有限公司, 上海 201316)

摘 要: 基于 Bezier 函数叶片造型设计方法, 针对 AP1000 核电常规岛前置泵大容量高参数的特性, 提出性能优良的“正弯叶片”和“反弯叶片”两种叶片径向弯曲结构。详细比较这两种形式径向弯叶片几何特征。在此基础上, 通过计算流体力学技术并结合试验方法对上述两种径向弯叶片的水力特性进行研究, 并提出最优的叶片径向弯度参数。通过 CFD (计算流体力学) 技术并结合试验方法对上述两种径向弯叶片的水力特性进行研究, 结果表明: 叶片径向弯曲使叶片负荷沿叶高重新分布, 这是提升 AP1000 前置泵性能的主要因素; 在设计工况下, “正弯叶片”相对于传统“直叶片”扬程提高 12 m, 效率提高 0.6%, 相对于“反弯叶片”扬程提高 17 m, 效率提高 0.7%, 满足了将 AP1000 核电机组常规岛前置泵性能提升的要求。

关 键 词: 核电常规岛前置泵; 径向弯叶片; Bezier 函数; 水力性能

中图分类号: TL335 文献标识码: A

引 言

离心泵叶轮结构参数对泵的性能存在密切关系。在离心泵叶轮设计中, 叶片周向弯曲是提高泵水力性能的一种有效途径。目前, 主要有两种设计方法, 即“叶片进出口安装角”及“叶片包角”^[1~2]。叶片周向弯曲是基于沿流线方向的叶片弯曲形式, 迄今为止, 对于离心泵叶轮径向弯曲的设计方法尚未见任何报道。本研究以山东海阳 AP1000 核电机组常规岛给水泵叶片设计为背景, 采用传统火电机组锅炉给水泵“直叶片”方法设计, 水力性能参数不满足设计要求, 因此引入叶片径向弯曲变量来控制叶片结构参数。

叶片沿径向弯曲形式有助于增加流体与叶片的作用面积, 同时叶高方向上的低能流体与高能流体重新分布, 进而实现提升叶轮水力性能的作用^[3~5]。

根据叶轮的径向弯曲形式分为“正弯叶片”和“反弯叶片”两种形式。而本研究提出的径向弯叶片是基于沿叶高方向的叶片弯曲形式, 即垂直于流线方向。

1 Bezier 函数型叶片设计方法

叶片径向弯曲的形式完全决定于沿叶高方向中弧线的形状。本研究提出了一种基于 Bezier 函数的弯叶片生成方法, 采用 Bezier 曲线的函数式推导。

Bezier 曲线的数学基础是完成控制多边形的起点和终点之间插值的一个多项式混合函数。 n 次多项式定义的曲线是 $J_{i,n}(t)$ 对给定的控制点 P_0 直至 P_n 混合的结果^[6], 即:

$$P(t) = \sum_{i=0}^n P_i J_{i,n}(t) \quad 0 \leq t \leq 1 \quad i = 0, 1, \dots, n \quad (1)$$

由各段曲线 $P_0(t), P_1(t), \dots, P_n(t)$ 组成的整体曲线 $P(t)$ 称为 n 次 Bezier 曲线, 即:

$$J_{j,n}(t) = \frac{n!}{i!(n-i)!} u^i (1-u)^{n-i} \quad 0 \leq t \leq 1, \quad j = 0, 1, \dots, n \quad (2)$$

$J_{j,n}(t)$ 为 Bezier 基函数, J_{i+j} 为第 i 段 Bezier 曲线特征多边形的第 $j+1$ 控制顶点。

本研究应用的二次 Bezier 曲线是由 3 个控制顶点构成的三角形, 具有二阶连续性, 其分段表达式为:

$$P(t) = \sum_{i=0}^2 P_i J_{i,2}(t) = P_0 J_{0,2}(t) + P_1 J_{1,2}(t) + P_2 J_{2,2}(t) \quad t \in [0, 1] \quad (3)$$

分别以 $i = 0, 1, 2$ 带入上式, 得到分别混合 $P(0), P(1), P(2)$ 的基函数:

$$J_{0,2}(t) = (1-t)^2 \quad (4)$$

收稿日期: 2012-09-14; 修订日期: 2012-10-19

作者简介: 梁卫兵 (1959-) 男, 上海人, 上海电力修造厂有限公司总经理。

$$J_{0,2}(t) = 2t(1-t) \quad (5)$$

$$J_{0,2}(t) = t^2 \quad (6)$$

二次 Bezier 曲线径向弯叶片参数如图 1 所示。据此, 引入控制 Bezier 曲线的参数: 壁面弯角 α_1 与 α_2 , 即积迭线两端点切线与上下盖板壁面法线之间的夹角, 仅研究上下壁面弯曲角相等的结构, 即 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ 。定义前盖板与后盖板的垂直距离叶高为弦长 L 。

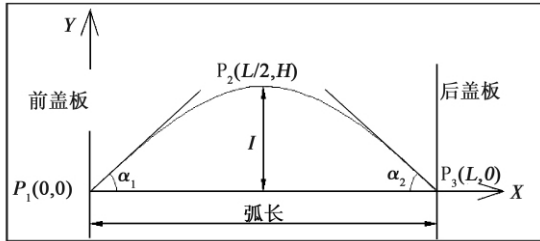


图 1 二次 Bezier 曲线径向弯叶片参数示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the parameters of a radially bended blade formed by a quadratic Bezier curve

引入弯度 e 参数, 定义为拱高 H 与叶高 L 的比值, 即:

$$e = H/L \quad (7)$$

一般而言 P_1 和 P_3 点的位置是已知的, 因此, 只需规定弯度 e 即可确定沿叶高方向中弧线的形状。

基于沿叶高方向的叶片弯曲形式将径向弯叶片分为“正弯叶片”、“反弯叶片”和“直叶片”。其中, “正弯叶片”定义为叶片叶高方向弯曲与叶轮旋转方向一致, “反弯叶片”定义为叶片叶高方向弯曲与叶轮旋转方向相反, “直叶片”定义为叶片叶高方向无弯曲。

2 径向弯叶片几何形式比较

本研究对 AP1000 常规岛前置泵叶片分别采用“正弯叶片”和“反弯叶片”进行叶片径向弯曲设计, 如图 2 所示。叶轮采用双吸叶轮, 部分参数为: 叶片个数 $Z=5$ 片, 叶轮外径 $D=771$ mm, 设计点流量 $Q_d=2548$ m³/h, 设计点扬程 $H=212$ m, 设计点效率 $\eta=86.3\%$, 转速 $n=1494$ r/min。

图 3 是 3 种叶片安装角沿前缘叶高和尾缘叶高的分布图, 叶片弯度 $e = \pm 0.15$ 。图 3 表明, 两种径向弯曲叶片前缘沿叶高方向从前盖板到后盖板安装角

均逐渐增大, 同时, 3 种叶片前缘两端点处具有相同的安装角。但其差别在于“正弯叶片”前缘沿叶高方向安装角增速先快后慢, 而“反弯叶片”前缘沿叶高方向安装角增速接近线性分布, 而“直叶片”则介于两者之间。对于安装角沿尾缘叶高分布差异较大, “正弯叶片”与“反弯叶片”安装角分布规律截然相反。

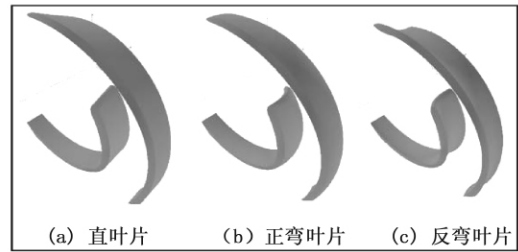
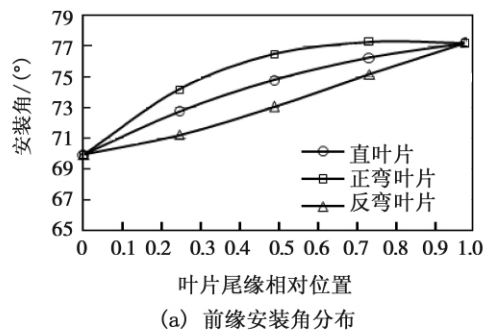
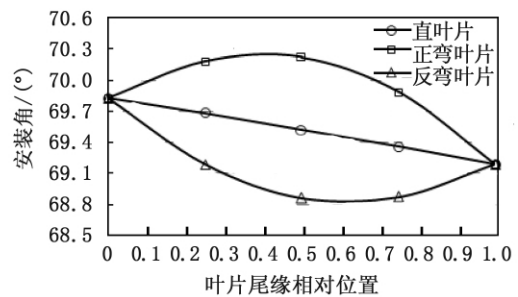


图 2 3 种叶型三维实体示意图

Fig. 2 Schematic drawing of 3-D real entities of three types of blade profile



(a) 前缘安装角分布



(b) 尾缘安装角分布

图 3 前缘和尾缘安装角分布

Fig. 3 Distribution of the installation angle at the leading edge of a blade

由于径向弯叶片沿叶高方向两端处与直叶片具有相同的安装角, 而叶高中部安装角沿流线方向则不同, 图 4 给出在叶高中部安装角沿子午线方向分

布图,“正弯叶片”叶高中部进口安装角最大,其次是“直叶片”,“反弯叶片”叶高中部进口安装角最小。但3种径向弯叶片叶高中部出口安装角相同。

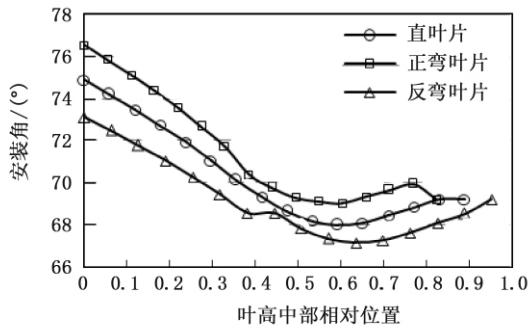


图4 叶高中部安装角沿子午线分布

Fig. 4 Distribution of the installation angle in the middle of the blade height along the meridian

对于常规直叶片的电站锅炉给水泵设计而言,叶片进口安装角对泵性能影响体现在进口安装角角度增大时,扬程流量性能曲线趋于平缓,效率向大流量方向移动^[7],但对于径向弯叶片,在引起叶高中部安装角不同时还增大了叶片与流体的作用面积,因此探究径向弯叶片对提升 AP1000 常规岛核电机组前置泵性能意义重大。

3 Bezier 函数型径向弯叶片水力特性

3.1 物理模型与计算方法

流场计算采用商用 CFD 软件 CFX 上完成,计算采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型,压力和速度的耦合采用 SIMPLE(单一)算法。通过理论分析发现在旋转坐标系下雷诺应力的表达式与惯性坐标系下不同,但湍动能方程是相同的,修正湍动能 k 为主要模型参数的湍流模型以提升非设计工况下叶轮内部流动进行预测时的精度。

叶片和前后盖板等移动壁面采用旋转的参考坐标并设定旋转速度相对流域旋转速度为零,固定壁面采用绝对静止的绝对坐标。具体方法可参见文献^[8]。

整个计算在双吸叶轮全流场内进行。网格拓扑形式采用 $H/J/C/L$ 混合型,整个计算域网格总数近 420 万。在叶片近壁面,叶片端壁、头尾缘等流动复杂区域,对网格进行了局部加密以提高这些区域内解的分辨率,壁面第一层网格距壁面的距离达到了

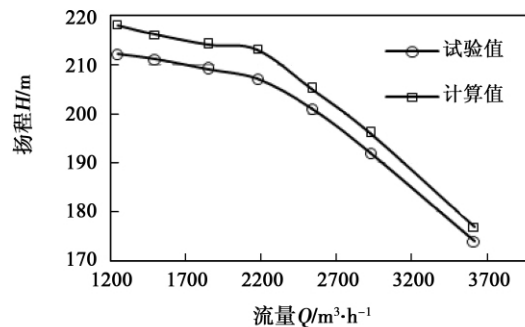
0.38 mm 以下。边界条件设定为:

进口采用压力边界为 $P_{in} = 0.8 \text{ MPa}$; 出口采用质量流量边界,叶片表面与前后盖板采用无滑移边界条件;收敛标准定义为基于所有控制体的平均残差下降至 10^{-5} ; 进出口质量流量差在 0.1% 以下。

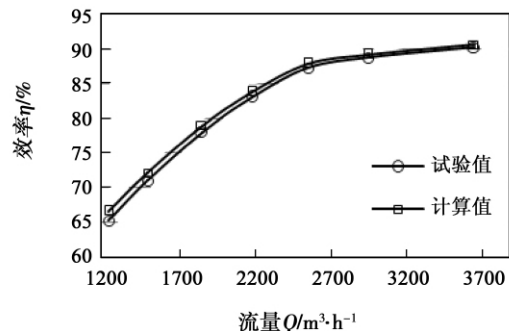
3.2 试验验证

试验设备为上海电力修造总厂有限公司超超临界锅炉给水泵试验台,试验标准按 GB/T 3216 - 2005 进行。针对 AP1000 常规岛前置泵改型前“直叶片”分别采用试验研究与仿真计算相结合的方法对两组叶轮水力性能比较研究。以论证计算方法应用在 Bezier 函数型径向弯叶片设计的可行性。

图 5 计算与试验的结果对比表明,数值计算结果与试验值的变化趋势基本一致,额定工况点附近扬程误差低至 2.2%,效率误差低至 1.8%。采用修正后的湍动能系数 k 计算,误差明显降低,整个运行流量工况范围内,扬程最大误差为 2.9%,效率最大误差 2.2%。计算误差在给水泵设计的正常误差 5% 以内。因此,可以将该计算方法应用在 AP1000 常规岛核电前置泵叶片径向弯曲设计中。



(a) “直叶片”扬程计算试验比较



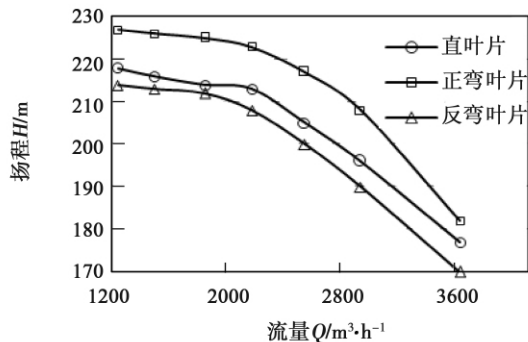
(b) “直叶片”效率计算试验比较

图5 直叶片扬程、效率计算试验比较

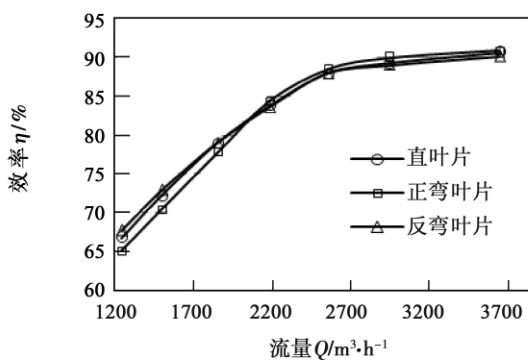
Fig. 5 Comparison of the calculated efficiency of a straight blade with the test one

3.3 3 种叶片水力性能比较

图 6 给出 3 种不同叶片的流量与扬程及效率性能曲线。图中表明“正弯叶片”的扬程在各个工况点均高于其余两种叶片。在非设计工况小流量区域“正弯叶片”效率略低,大流量区域效率略高。在设计流量 $Q_d = 2\,548\text{ m}^3/\text{h}$ 处,“正弯叶片”相对于“直叶片”和“反弯叶片”具有高扬程高效率的特点,与“直叶片”相比其扬程增加 5.9%,效率增加 0.6%。



(a) 3种叶片流量与扬程性能曲线



(b) 3种叶片流量与效率性能曲线

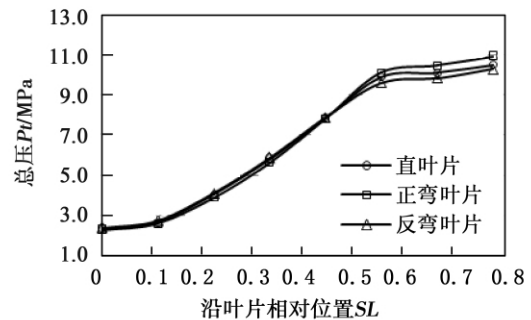
图 6 3 种叶片流量与扬程、效率性能关系曲线

Fig. 6 Curves showing the flow rate-efficiency performance of three types of blade

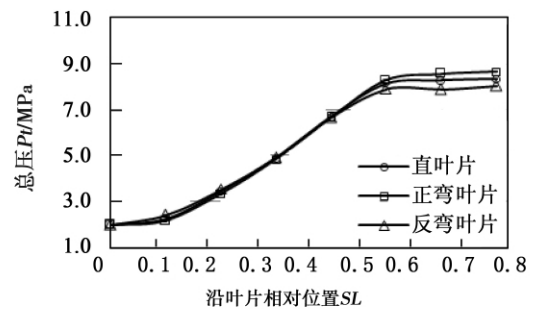
真正影响叶轮水力性能的是流体在叶轮内部的实际流动特性,并选取小、中、大流量 3 个工况点 ($0.25Q_d$ 、 Q_d 、 $1.25Q_d$),分析这 3 个工况下 3 种叶片的内特性,图 7 为叶高中部沿流线方向的总压曲线。

图 7 表明 3 种叶片具有相同的增压特性,当流线位移 $SL < 0.4$ 时,即叶片前半部分,“反弯叶片”具有较好的增压特性,而当 $SL > 0.4$ 时,“正弯叶片”的增压效果与“反弯叶片”相比提升明显。这是由于“正弯叶片”压力面的压力梯度由叶高中部指向两端处,叶片中部高能流体流向叶片两端处,使叶

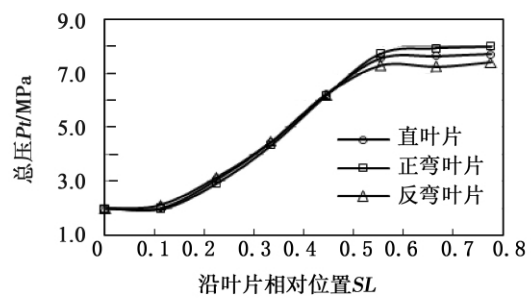
片两端处载荷提升,叶片沿叶高方向的载荷趋于均匀。而“反弯叶片”压力面在流道中形成沿叶高两端处指向叶高中部的负压梯度,从而将两端处堆积的低能流体迁移到中部主流区,增加流动损失。因此,“正弯叶片”综合增压效果优于“反弯叶片”。



(a) 小流量工况 ($Q=0.25Q_d$)



(b) 设计点工况 ($Q=Q_d$)



(c) 大流量工况 ($Q=1.25Q_d$)

图 7 3 种叶片在不同流量下局部总压分布曲线

Fig. 7 Curves showing the distribution of the local total pressure of three types of blade at various flow rates

4 结 论

(1) 针对 AP1000 常规岛机组前置泵采用修正

湍动能 k 的计算方法,计算结果与试验结果误差在水泵设计的正常误差 5% 以内。

(2) “正弯叶片”叶高中部进口安装角最大,其次是“直叶片”,“反弯叶片”叶高中部进口安装角最小,但 3 种径向弯叶片叶高中部出口安装角相同。

(3) 叶片表面负荷重组是提升 AP1000 前置泵性能的主要因素,额定工况下,相对于传统“直叶片”扬程提高 12 m 效率提高 0.6% 相对于“反弯叶片”扬程提高 17 m 效率提高 0.7%。

(4) 叶片前半部分,“反弯叶片”具有较好的增压特性,但“正弯叶片”综合增压效果优于“反弯叶片”。

参考文献:

[1] Gulich J F. Centrifugal pumps [M]. 1st ed. Germany: Springer, 2007.

[2] Stepanoff A J. Centrifugal and axial flow pumps [M]. 2nd ed. Florida U. S. A: Krieger Publishing Company, 1992.

[3] 王仲奇,郑 严. 叶轮机械弯扭叶片的研究现状及发展趋势 [J]. 中国工程科学 2000 2(6): 40 - 48.

WANG Zhong-qi, ZHENG Yan. Status quo and development tendency of the study of bowed-twisted blades for turbomachines [J]. China Engineering Science 2000 2(6): 40 - 48.

[4] 胡永海,童正明,王珊珊. Bezier 函数型弯叶片及其在带遮风罩垂直轴风力机中的应用 [J]. 动力工程学报 2009 29(12): 84 - 89.

HU Yong-hai, TONG Zheng-ming, WANG Shan-shan. Bezier function type bowed blade and its application in perpendicular shaft wind turbines with a wind shield [J]. Journal of Power Engineering 2009 29(12): 84 - 89.

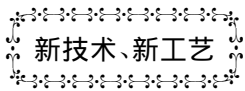
[5] WANG Z Q. Three dimensional theory and design method for twisted-bowed blades [R]. Von Karman Institute for Fluid Dynamics, VKI Lecture Series 1999 - 02, Belgium, 1999.

[6] WANG W T, WANG G Z. Bezier curves with shape parameter [J]. Journal of Zhejiang University Science A 2005 6(6): 497 - 501.

[7] 关醒凡. 泵的理论与设计 [M]. 北京: 宇航出版社, 1987.

GUAN Xing-fan. Pump theory and design [M]. Beijing: Yuhang Press, 1987.

(陈 滨 编辑)



联合循环设计额定性能

《Gas Turbine World》2013 年 1 - 2 月刊发布了 2013 年度的联合循环技术规范。

介绍了世界各国各燃机制造公司的各型联合循环装置,叙述了各型装置的设计性能规范,包括首台可供应用年份、装置净输出功率、热耗率、装置净效率、冷凝器压力、燃气轮机功率、汽轮机功率、燃气轮机数量和型号。

在注解一栏中还对这些装置的细节作了补充说明,包括余热锅炉的类型(双压、双压不再热、三压不再热、三压再热)、再热、不再热、喷水、DLE、NO_x 排放、单轴等。

目前,世界上联合循环装置新产品的推出十分活跃,仅 2011 年就推出了 12 型联合循环装置,其中包括 Alston 的功率 467 000 kW 和效率 59.5% 的 KA26-I、GE 功率 512 037 kW 和效率 61.0% 的 9F7-Senes、MHI 的效率 470 000 kW 和功率 61.5% 的 M501J 等。

2012 年也推出了 7 型新联合循环装置,其中包括 Alston 的功率 281 000 kW 和效率 53.5% 的 KA13E2-1、BHE 功率的 452 600 kW 和效率 59.2% 的 CC109FB 和 Siemens 功率为 47 340 kW 和效率 51.0% 的 SCC-750 1 × 1 等。

(吉桂明 摘译)

Slag Through Hydration by Using Additives [刊, 汉] FAN Bao-guo, YANG Jing, LIU Jun-e, JIN Yan (College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan, China, Post Code: 030024) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013, 28(4). - 415 ~ 419

Under the condition in a laboratory, prepared was a desulfurization agent used for circulating fluidized bed boilers through a hydration reaction between the magnesium slag and the pulverized coal ash. The calcium conversion rate of the desulfurization agent was studied under various hydration conditions by using the thermogravimetric analytic method. Changes of substances before and after the hydration and desulfurization were analyzed and studied with the help of the X-ray diffraction and the principle governing the hydration and desulfurization reaction was analyzed. On this basis, the influence of various additives on the hydration process was studied. It has been found that under the optimum hydration condition, the calcium conversion rate of the desulfurization agent thus prepared can reach 36.70% with the optimum desulfurization reaction temperature being 920 °C. If acetic acid or sodium hydroxide is added during the hydration process, the calcium conversion rate of the desulfurization agent can further increase to 73.7%. **Key words:** magnesium slag, pulverized-coal ash, hydration parameter, Bezier function, calcium conversion rate, additive

Bezier 函数型径向弯叶片及其在 AP1000 核电常规岛前置泵中的应用 = Bezier Function Type Radially Bent Blades and Their Applications in the Booster Pumps Installed in the Conventional Island of the AP1000 Nuclear Power Station [刊, 汉] LIANG Wei-bing, HU Yong-hai (Shanghai Electric Power Repairing and Manufacturing Works Co. Ltd., Shanghai, China, Post Code: 201316) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013, 28(4). - 420 ~ 424

By adopting the method for modeling and designing Bezier function type blades and in the light of such specific features as a large capacity and high parameters of the booster pumps installed in the conventional island of the AP1000 nuclear power station, presented were two types of radially bent blade structure with excellent performance, i. e. “positively bent blade” and “negatively bent blade”. The hydraulic characteristics of both radially bent blades mentioned above were studied by adopting the CFD technology in combination with the test methods. It has been found that to radially bend the blades to make the blade load redistributed along the blade height is regarded as the

main factor in improving the performance of the AP1000 booster pumps. Under the design condition the “positively bent blade” has a head of 12 meters higher than that of the traditional straight blade and an efficiency of 0.6% higher than that of the traditional one while 17 meters higher than that of the “negatively bent blade” and 0.7% higher than that of the “negatively bent one” thus meeting the requirements set for improvement in the performance of the booster pumps installed in the conventional island of the AP1000 nuclear power station. **Key words:** nuclear power booster pump ,radially-bent blade ,Bezier function ,hydraulic performance

空气添加方式对甲烷自热重整、制氢特性影响的热力学分析 = **Thermodynamic Analysis of the Influence of the Air Addition Modes on the Characteristics of Hydrogen Preparation Through a Self-heat-reforming of Methane** [刊 汉] YAN Yun-fei ZHANG Jie ZHANG Li (Education Ministry Key Laboratory on Low-grade Energy Source Utilization Technologies and Systems ,College of Power Engineering ,Chongqing University ,Chongqing ,China ,Post Code: 400030) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013 28(4) . - 425 ~ 430

By using the thermodynamic equilibrium constant method ,analyzed was the influence of the dilution and replacement addition of air on the characteristics of hydrogen preparation through a self-heat reforming of methane. It has been found that with an increase of the air/carbon ratio ,both addition modes will lower the extent of the methane and steam reforming reaction and even turn to the reverse direction. The extent of the water-gas conversion reaction will gradually increase when the dilution addition is adopted and will decrease when the replacement addition is adopted. To increase the air/carbon ratio α can promote the hydrogen production and CH_4 conversion in the dilution addition mode but play a prohibition role in the replacement addition mode. When $\alpha + 0.5\beta = \text{const} = 2$ and α increases from 0 to 1 ,the CH_4 conversion rate will increase from 94.54% to 97.89% in the dilution addition mode and that will decrease from 99.11% to 78.02% in the replacement addition mode. The air/carbon ratio will have almost no influence on the H_2/CO mole ratio in the dilution addition mode. When $\alpha + 0.5\beta = \text{const} = 2$ and α falls in a range from 0 to 2 ,the H_2/CO mole ratio will be kept in a range from 4.3 to 4.4. The H_2/CO mole ratio will decrease sharply in the replacement addition mode ,being 6.63 ,4.30 and 2 respectively when α equals to 0 ,1 and 2. **Key words:** dilution addition ,replacement addition ,thermodynamics ,equilibrium constant method ,self-heat reforming ,hydrogen preparation ,air/carbon ratio