

利用威布尔分布模型对球磨机可靠性分析

周英彪¹, 段权鹏², 范杜平¹

(1. 华中科技大学 煤燃烧国家重点实验室, 湖北 武汉 430074; 2. 中南电力设计院 发电工程分公司, 湖北 武汉 430071)

摘 要:介绍了威布尔分布模型及其优点,对某热电厂 B 磨煤机的缺陷数据进行分类整理,利用二参数威布尔模型和三参数威布尔模型计算时,分别使用 MATLAB 软件及采用相关系数优化法进行拟合,对数据计算的结果进行比较分析,三参数威布尔分布模型与常用的二参数威布尔分布模型很相似,由于三参数威布尔分布模型考虑了位置参数而更加的符合实际,所以在球磨机状态检修的实际分析中采用三参数威布尔分布模型。可靠性分析技术的具体应用是利用三参数威布尔分布的数学期望公式求取平均无故障工作时间(MTBF),运用检测周期与 MTBF 的关系求取设备的状态检测周期以及基于失效率函数的故障类型的诊断。

关 键 词:球磨机; 可靠性分析; 威布尔分布

中图分类号: TM611 文献标识码: A

引 言

随着国民经济的发展,设备的可靠性越来越受到人们的重视。火力发电设备大都是在高温、高压和高速等恶劣的环境下运转,设备与设备之间的联系紧密,系统具有复杂性。同时火力发电机组向着高参数、大容量、高自动化方向发展,机组发生故障的可能性和故障的危害程度将进一步增加,对电厂设备维修管理系统提出了更高的要求。因此,对发电设备的可靠性必须给予足够的重视,文献[1~5]在这方面做了大量工作。20 世纪 80 年代后期,国内大型火电机组实行可靠性管理,并积累了不少主机和辅机的可靠性数据,但统计、分析和应用却不够。威布尔分布对于各种类型的火电机组的可靠性数据拟合能力很强,是可靠性分析技术中使用最为广泛的一种数学模型。球磨机是非常重要的制粉设备,在电厂安全生产中占有举足轻重的地位,对其进行可靠性分析,可以提升设备的可靠性和可用率,明确设备的检修周期,掌握设备的运行状况,提高其经济性,为其状态检修提供技术支持。

1 威布尔分布模型

威布尔分布(Weibull distribution)是瑞典科学家威布尔(Weibull)在计算链的强度时提出来的,因而得名威布尔分布函数。三参数威布尔分布的分布函数为^[6]:

$$F(t)=1-\exp[-(\frac{t-\gamma}{\eta})^\beta] \tag{1}$$

式中: η —尺度参数也称特征寿命,是一种寿命均值并给出分布中点的大致位置; β —形状参数,其大小决定密度曲线的形状; γ —位置参数,也称为最小寿命,表明产品在 γ 以前不会发生失效,且 $\eta, \beta > 0$ 。若位置参数 $\gamma = 0$, 则模型退化为二参数威布尔模型。不同的形状参数 β 表示不同的分布规律,已知 $\beta = 1$ 为指数分布, $\beta = 2$ 为瑞莱分布, $\beta = 3.25 \sim 3.45$ 接近于正态分布^[7], $\beta > 4$ 以及等于其它值皆为广义威布尔分布。

2 球磨机缺陷数据的收集与整理

可靠性数据是描述设备可靠性水平及状况的各种数据,它是开展可靠性工作的基础。根据可靠性数据可以推测设备及系统的可靠性和维修性,并对其可靠性进行定性、定量评估。以收集某热电厂 12 号炉磨煤机运行的缺陷数据为研究对象,12 号炉总共有 A、B、C、D 4 台球磨机,文中仅以 B 磨为例进行分析计算, B 磨数据收集的时间是 2004 年 6 月 12 日~2007 年 3 月 5 日,缺陷记录次数 108,偶然性缺陷次数 10,正常缺陷次数 98。表 1 记录了 B 磨煤机的缺陷,其中缺陷间隔时间也即寿命数据取的都是两次故障缺陷之间的时间差。

数据的缺陷分类主要是按照独立的设备进行的,如入口大瓦、出口大瓦等,也有一些是按照系统,如密封方面,这要视实际应用情况而定。表 1 中的

正常缺陷为设计、生产等环节带来的或者潜在的缺陷,如疲劳破损、断裂等;偶然性缺陷主要指外来物砸伤、人为操作不当等,并不是所有的球磨机都会出现的,所以计算的过程中必须排除,不然会影响计算结果的真实性。

表 1 B 磨缺陷记录

缺陷类型	重复次数	百分比/%	缺陷间隔时间/d
减速机缺陷	10	10.20	40, 361, 79, 60, 19, 86, 24, 50, 90
出口短管漏粉	4	4.08	125, 26, 43, 2
入口短管漏煤粉	11	11.22	133, 297, 13, 18, 54, 138, 16, 3, 12, 9
喷油装置缺陷	19	19.39	9, 8, 90, 120, 55, 4, 7, 19, 15, 8, 12, 2, 72, 274, 66, 12, 14, 21
大罐甩粉	3	3.06	90, 190
高压油泵缺陷	4	5.10	55, 45, 19
低压油泵缺陷	7	6.12	191, 37, 68, 185, 148, 22
入口大瓦漏油	22	22.45	28, 11, 35, 10, 186, 97, 24, 33, 2, 14, 4, 2, 7, 38, 15, 7, 4, 3, 3, 20, 24
出口大瓦漏油	8	8.16	2, 36, 14, 11, 2, 63, 3
过滤器缺陷	4	4.08	158, 58, 60
滤网缺陷	6	6.12	126, 34, 3, 63, 125

3 球磨机缺陷数据的计算与分析

3.1 数据计算

威布尔分布对火电机组可靠性数据拟合能力很强,其参数估计一般方法有:作图法和数值计算法,其中数值计算法有:概率权重计算法、极大似然法、双线性回归法、相关系数优化法以及灰色估计法等^[9~12]。一般认为作图法求解的数据不够准确,往往因人而异;数值计算法的几种方法都有相当的精度,但是精度的高低与样本的数量有一定的关系。

本文三参数威布尔分布的计算方法是采用近年来由傅惠民教授等人提出的以线性相关系数为目标函数确定位置参数 γ 的方法,即三参数相关系数优化法^[13~15],位置参数 γ 估计的方法为右逼近法,运用 c++ 语言编程计算。二参数威布尔分布是利用数据 $(t_i, F(t_i))$, $i=1, 2, \dots, n$, 做线性回归分析,得出线性回归方程,进而可以推导出参数 η 、 β 等,采用 MATLAB 软件统计工具箱里面的相关函数 wblfit、wblplot 等进行计算,相关计算结果如表 2 所示。

表 2 B 磨缺陷记录计算结果

	三参数计算结果					二参数计算结果	
	n	β	η	γ	ρ	β	η
减速机缺陷(B1)	9	0.564 0	63.836 2	18	0.973 3	1.019 3	96.481 0
出口短管漏粉(B2)	3	0.658 0	213.602	3	0.999 9	1.027 5	196.504 7
入口短管漏煤粉(B3)	10	0.579 1	52.275 5	2.5	0.939 1	0.757 1	57.684 7
喷油装置缺陷(B4)	18	0.679 8	35.159 6	1.7	0.945 3	0.777 8	39.072 1
大罐甩粉(B5)	2	1.816 2	176.886	-8.43	1	3.211 1	157.310 5
高压油泵缺陷(B6)	3	1.129 1	38.263 6	9.001	0.917 8	3.062 7	44.605 6
低压油泵缺陷(B7)	6	0.833 6	108.193	13.6	0.950 9	1.551 1	120.584 5
入口大瓦漏油(B8)	21	0.756 6	23.328 7	1.7	0.978 8	0.866 0	27.081 4
出口大瓦漏油(B9)	7	0.892 7	29.450 8	-1.2	0.979 3	1.057 2	25.746 2
过滤器缺陷(B10)	3	0.510 8	72.438 7	48.99	1	2.394 2	122.655 1
滤网缺陷(B11)	5	1.621 5	121.217	-32.85	0.963 6	1.117 5	72.562 7

3.2 结果分析

通过数据的比较分析,有以下几点结论:

(1) 数据拟合较好,缺陷类型的分类基本符合要求。如表 2 所示,三参数分布参数估计的相关系数 $0.91 \leq \rho < 1$,表明所采集的数据能比较好的服从威布尔分布。其所示二参数的参数估计的数据通过 MATLAB 中的 wblplot(data) 命令判断其均服从威布尔分布。

(2) 参数估计值的大小相符合。三参数的 β 值均小于二参数的 β 值,当 $\gamma \geq 0$ 时,三参数 η 的值均小于二参数的 η 的值。当 $\gamma \leq 0$ 时三参数的 η 值均大于二参数的 η 的值。

(3) 三参数威布尔分布与二参数威布尔分布在可靠度函数、概率密度函数等图形方面具有相似性,如图 1~图 3 所示。

(4) 证明位置参数不影响函数曲线的形状,仅

仅是使函数曲线发生平移。

由于三参数威布尔考虑了位置参数也即最小寿命, 更加符合实际情况, 而且三参数威布尔分布与常用的二参数威布尔分布相比仅仅是函数曲线的平移, 所以三参数威布尔分布与二参数威布尔分布相比得到越来越被广泛的应用。

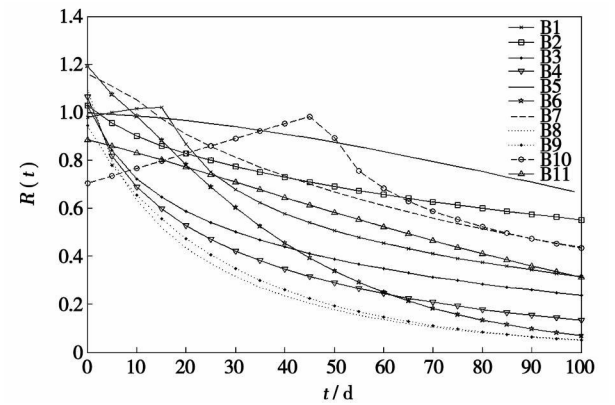


图 1 B 磨缺陷记录三参数计算结果的可靠度函数

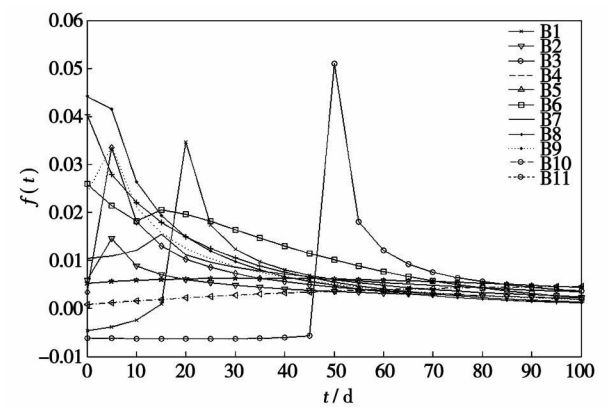


图 2 B 磨缺陷记录三参数计算结果的概率密度函数

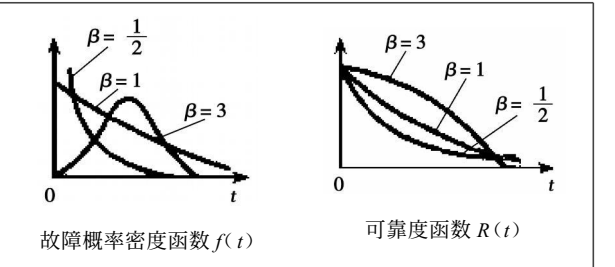


图 3 二参数威布尔分布的 $f(t)$ 和 $R(t)$ 曲线

4 球磨机可靠性数据的应用

4.1 球磨机平均无故障工作时间的确定

平均无故障工作时间 MTBF (Mean Time Between

Failure) 是电站设备可靠性的重要指标之一^[16~17], 对于电站设备的设计、生产、使用和维修都具有重要的影响。它标志着电站产品在同一使用间隔内产品质量的优劣、故障比率的高低和使用寿命的长短。B 磨缺陷的 MTBF 计算结果如表 3 所示, 其中 MTBF 的计算式为:

$$MTBF = \gamma + \eta \Gamma(1 + \frac{1}{\beta})$$

(2)

4.2 球磨机状态检测周期的确定

现在很多电厂都在实施状态检修, 如离线监测、点检管理等。离线监测电站辅机的状态需要一个合理明确的状态监测间隔, 点检管理也需要一个合理的点检周期。检测周期太短, 辅机多, 不易检测; 检测周期太长, 则可能漏检。由文献[18]知电站设备的状态检测间隔与 MTBF 有关, 对于电站辅机, 可以用以下 4 种情况确定设备的状态检测周期 T_m :

- (1) 正常情况下取:
- $$T_{m1} = 0.10MTBF$$
- (2) 在参数良好的情况下取:
- $$T_{m2} = 0.20MTBF$$
- (3) 在参数有异常的情况下取:
- $$T_{m3} = 0.05MTBF$$
- (4) 在出现报警的情况下应立即检测设备的状态。

利用式(3)~式(5)计算求得 B 磨缺陷的检测周期如表 3 所示。

4.3 球磨机故障类型的识别

发电设备故障的一般规律可由“浴盆曲线”描述, 如图 4 所示。

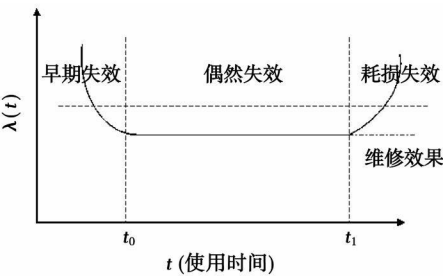


图 4 设备故障特征曲线

故障类型判断方法: 根据三参数威布尔分布的分布函数, 可以求取失效率 $\lambda(t)$ 的计算值^①:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} (\frac{t-\gamma}{\eta})^{\beta-1}$$

(6)

当 $t \geq \gamma$ 时, 部件开始失效。 $\beta = 1$, $\lambda(t) =$ 常数, 部件的失效类型为偶然失效。当 $\beta < 1$, $\lambda(t)$ 随

时间增长呈下降趋势, 部件的失效类型为早期失效。当 $\beta > 1$, $\lambda(t)$, 随着时间的增长呈增长趋势, 部件的失效类型为耗损失效。 β 愈大, $\lambda(t)$ 随时间增长得愈快。一般越大 β 的值表示有明确的耗损失效类型, 当 $\beta > 5$ 表示能够准确预测部件的可靠性, 一般应该尽快采取更换部件的措施²⁰; 当 β 在 1 左右变化的时候均有可能是偶然失效(文献[19] 中形状参数 $\beta = 1.5$ 经分析故障类型可能是偶然失效); 所以故障类型的判断不能完全依赖于形状参数, 不然可能会对采取何种维修方式产生误导。

以 B 磨缺陷的故障类型为例进行简单分析, 如表 3 所示。其中 B2、B5、B6 和 B10 出现的次数比较少, 使用三参数相关系数优化法时参数的结果与所选步长有很大关系, 与二参数的形状参数对比分析有 B2、B5 和 B6 均是偶然失效, B10 属于早期失效(在检修记录中查明是生产缺陷造成的)。B3、B4 和 B8 均属于早期失效, 因为其 $\beta < 1$ 而且三参数和二参数的 β 比较相近。B1、B7、B9 和 B11 根据形状参数的大小和维修记录判断分别是早期失效、偶然失效、偶然失效和耗损失效。

表 3 B 磨可靠性数据的应用

	<i>n</i>	β	MTBF/ d	<i>T</i> _{m1} / d	<i>T</i> _{m2} / d	<i>T</i> _{m3} / d	故障类型
减速机缺陷(B1)	9	0. 564 0	122 640 0	12 264 0	24. 528 0	6. 132 0	早期失效
出口短管漏粉(B2)	3	0. 658 0	541 205 4	54 120 5	108. 241 1	27. 060 3	偶然失效
入口短管漏煤粉(B3)	10	0. 579 1	145 045 7	14 504 6	29. 009 1	7. 252 3	早期失效
喷油装置缺陷(B4)	18	0. 679 8	47. 505 8	4. 750 6	9. 501 2	2. 375 3	早期失效
大罐甩粉(B5)	2	1. 816 2	292 200 3	29 220 0	58. 440 1	14. 610 0	偶然失效
高压油泵缺陷(B6)	3	1. 129 1	81. 153 2	8. 115 3	16. 230 6	4. 057 7	偶然失效
低压油泵缺陷(B7)	6	0. 833 6	132 728 4	13 278 2	26. 556 5	6. 639 1	偶然失效
入口大瓦漏油(B8)	21	0. 756 6	29. 278 1	2. 927 8	5. 855 6	1. 463 9	早期失效
出口大瓦漏油(B9)	7	0. 892 7	29. 927 3	2. 992 7	5. 985 5	1. 496 4	偶然失效
过滤器缺陷(B10)	3	0. 510 8	263 242 9	26 324 3	52. 648 6	13. 162 1	早期失效
滤网缺陷(B11)	5	1. 621 5	75. 700 6	7. 570 1	15. 140 1	3. 785 0	耗损失效

5 结 论

(1) 运用可靠性理论和威布尔数学模型, 通过球磨机缺陷数据的拟合分析, 证明了球磨机的故障缺陷数据是符合威布尔分布的, 并分析比较了二参数威布尔分布和三参数威布尔分布的异同点, 在今后的相关数据分析中可以更好的采用三参数威布尔分布进行拟合分析。

(2) 可靠性分析得出的三参数威布尔分布的参数可以用来确定球磨机相关零部件的平均无故障工作时间 MTBF, 进而可以预测下次失效的时间; 求得球磨机的状态检测周期, 可以合理的安排检修或者维修间隔; 判断球磨机的故障类型, 考虑采用何种方式进行维修。这些应用为球磨机状态检修的状态检测和故障诊断提供参考。

(3) 基于威布尔分布的可靠性分析技术不仅可以运用到球磨机的状态检修之中, 而且可以推广运用到整个电站设备的状态检修中去。

参考文献:

[1] 史进渊, 杨 宇, 朱月祥, 等. 大型火电机组可靠性的增长模型和现场验证[J]. 中国电机工程学报, 2002, 20(2): 39—41

[2] 苏 坚, 史进渊, 杨 宇, 等. 可靠性分析技术在电站主机和辅机状态检修中的应用[J]. 动力工程, 2003, 23(6): 2833—2835.

[3] 许洪全, 史进渊, 蒋安众, 等. 电站辅机可靠性考核验证方案[J]. 热能动力工程, 1998, 13(6): 409—411.

[4] BERGMAN B, RING M. System reliability prediction using data from nonidentical environments [J]. Reliability Engineering and System Safety, 1997, 58(3): 185—190.

[5] 孙奉仲, 王 凯, 黄新元, 等. 600 MW 火电机组可靠性数据的分析及其预测模型[J]. 山东大学学报(工学版), 2005, 35(5): 41—44.

[6] JIANG R, MURTHY D N P. A mixture model involving three weibull distributions //Proceedings of the Second Australia Japan Workshop on Stochastic Models in Engineering, Technology and Management [C]. Australia: Gold Coast, 1996 260—270

[7] MAKINO T. Mean hazard rate and its application to the normal approximation of the weibull distribution[J]. Naval Research Logistics Quarterly, 1984, 31: 1—8.

[8] 蒋仁言, 左明健. 可靠性模型与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.

[9] 严晓东,马翔,郑荣跃等.三参数威布尔分布参数估计方法比较[J].宁波大学学报(理工版),2005,18(3):301—305

[10] 詹世明,程晓鸣.换辊系统传感器预防性维修模型及其最优周期[J].轧钢,2006,23(5):30—32

[11] 胡恩平,罗兴柏,刘国庆.三参数 Weibull 分布几种常用的参数估计方法[J].沈阳工业学院学报,2000,19(3):88—93.

[12] 费鹤良,陈迪.三参数威布尔分布的参数估计方法[J].上海师范大学学报(自然科学版),1996,25(2):1—7.

[13] 傅惠民,高镇同.确定威布尔分布三参数的相关系数优化法[J].航空学报,1990,11(7):324—327.

[14] RICHARD A L, STEPHENS M A. Estimation and tests-of-fit for the three parameter weibull distribution[R]. California: Stanford University, 1993

[15] 杨志忠,刘瑞元.三参数 Weibull 分布参数估计求法的改进[J].工程数学学报,2004,21(2):281—284.

[16] 秦海勤,徐可君,江龙平.基于威布尔分布法的某型发动机 MTBF 计算[J].燃气轮机技术,2006,19(3):40—43

[17] 徐可君,江龙平.军用航空发动机可靠性和寿命管理[J].中国工程科学,2003,5(1):82—88

[18] 莫布雷 J. 以可靠性为中心的维修[M]. 石磊,谷宁昌,译.北京:机械工业出版社,1995.

[19] MCELROY A J, FRUCHTMAN I. Use statistical analysis to predict equipment reliability[J]. Power, 1991(10): 39—46.

(编辑 单丽华)

新技术、新工艺

汽轮机装置换热器管子的胀管及其 对管板应力—应变状态的影响

据《Теплоэнергетика》2008 年 3 月号报道,动力装置换热器在运行过程中工作能力降低的主要原因是它们的管系密封性破坏。制造壳管式换热器工艺过程的最重要阶段之一是把管子固定到管板中。整个换热器的强度和可靠性在很大程度上取决于管子与管板连接的密封性和强度。

在胀管过程中,管子和管板经受塑性变形,导致在它们内部产生工艺的残留应力。这些应力可能导致管板严重的变形,在一些个别的情况下会导致难于安装换热器的水室和其它构件。

因此,模拟并优化胀管过程是一个十分重要又复杂的任务。

提出的强度计算模型可用于所有的壳管式换热器,并提高它们的可靠性。

在换热器设计阶段,应用所提出的胀管连接的计算方法,允许更全面的描述胀管过程;借助于选择最佳的胀管方法和程序,可以提高胀管的质量,并保证减少换热器构件(包括管板)内的应力,结果是提高换热器的可靠性。

(吉桂明 供稿)

利用威布尔分布模型对球磨机可靠性分析 = **Reliability Analysis of a Ball Mill by Using a Weibull Distribution Model**[刊, 汉]/ ZHOU Ying-biao, FAN Du-ping (National Key Laboratory on Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074), DUAN Quan-peng (Power Generation Engineering Sub-company, Central South Electric Power Design Institute, Wuhan, China, Post Code: 430071)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2009, 24(1). - 95 ~ 99

Described were a Weibull distribution model and its merits. Fault data of B ball mill in a thermal power plant were classified and sorted out. When calculating by using a two-parameter Weibull model and three-parameter one, software Matlab and a correlative coefficient optimization method were used respectively to effect a fitting. The results calculated from the above data were compared and analyzed. The three-parameter Weibull distribution model is very similar to the two-parameter one. As the three-parameter Weibull distribution model is more compatible with actual conditions due to the location parameters being taken into account, it was used in the actual analysis of a ball mill during its status inspection and maintenance. A concrete use of reliability analysis technology is to obtain a mean time between failures (MTBF) by using the mathematical expectation formula of the three-parameter Weibull distribution. A cyclic inspection period of equipment condition been obtained by employing the correlation between the detection period and MTBF. Also diagnosed was the fault type based on a failure rate function. **Key words:** ball mill, reliability analysis, Weibull distribution

生物质气微型燃气轮机燃烧室的数值模拟 = **Numerical Simulation Study of a Micro Gas Turbine Combustor Burning Gasified Biomass Fuel**[刊, 汉]/ ZHANG Wei, WENG Yi-wu, LIU Ai-guo (Education Ministry Key Laboratory on Power Machinery and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2009, 24(1). - 100 ~ 104

When biomass gas is used in a micro gas turbine designed for burning natural gas, the temperature field, velocity field and combustion characteristics of the relevant combustor may be influenced by a relatively low heat value and different combustible constituents of the gas. The preliminary design of a 30 kW micro gas turbine combustor was performed, and on this basis, a numerical simulation comparison of the combustor when it burns methane and the biomass gas was conducted by using software Fluent. Moreover, investigated were the influence of burning the biomass gas on the inner flow and temperature distribution in the combustor as well as the NO_x emissions, and the causes of such an influence. The foregoing will provide useful data for the future design of micro gas turbine combustors burning the biomass gas. **Key words:** biomass gas, micro gas turbine, combustor, numerical simulation

OWC 波能装置冲击式透平的计算流体力学分析 = **CFD (Computational Fluid Dynamics) Analysis of an Impulse Turbine in an OWC (Ocean Wave Converter) Wave Energy Device**[刊, 汉]/ LIU Zhen, SHI Hong-da (Oceanological Engineering Department of Engineering College, Ocean University of China, Qingdao, China, Post Code: 266100), XIONG Cong-bo (National Bureau of Oceanography No. 1 Research Institute, Qingdao, China, Post Code: 266061) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2009, 24(1). - 105 ~ 108

In recent years, impulse type turbines provided with fixed guide blades have received widespread attention when used in OWC (Ocean Wave Converter) type wave-energy power-generation plants. A three-dimensional numerical simulation has been performed of this kind of turbines by using software Fluent, and the influence of the ratio between the outer-diameter clearance and the hub on the operation performance of the turbines, investigated. In addition, the pressure distribution and air-flow conditions on the surface of rotating blades were also studied. The calculation results are in relatively good agreement with test data, thus providing a valuable reference for the turbine design. The numerical simulation method in question can become an effective means for an in-depth study of the impulse type turbines for use in wave-energy power generation.