

燃蒸联合循环单轴发电机布置的启发

王志涛, 李淑英, 孙聿峰

(哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 从供应世界电力市场的 GE 公司、MITSUBISHI 公司、SIEMENS 公司和 ALSTON 公司等最新燃—蒸联合循环发电机组发电机单轴布置的经验数据出发, 对于一体化全电力推进船用联合动力装置做原动机模块的方案进行了初步的论证, 探讨了基于联合动力装置的原动机模块的可行性, 并给出了公布的两艘美国舰船和一艘英国航空母舰全电力推进方案的改进比较, 得到了一些有意义的看法。综合各种情况, 单一发电机比同功率的两台发电机在重量上节约了 10% 以上, 所以这种方案使发电机的数目减少一半, 占地面积减少 10% 以上, 重量减轻, 相关设备大为简化, 同时提高了系统的可靠性和可维护性。

关键词: 燃蒸联合循环发电机组; 一体化全电力推进; 联合动力装置; 原动机模块;

中图分类号: TM611.31

文献标识码: A

引言

综合电力系统代表着当今船舶动力的发展方向, 其主要特点是将推进系统与电力系统合二为一, 将全船所需要的能源以电力的形式集中提供、统一调度、分配和管理, 它主要由发电、配电、变电、推进、储能和监控等部分组成。船舶电力推进的应用历史很悠久, 早在 20 世纪 20 年代的时

候就曾经流行一时, 但是由于在当时电力推进装置笨重、效率低、成本高等问题比较突出, 加上齿轮传动加工技术的提高和发动机技术的飞速发展, 时至今日大部分的船舶仍然采用机械推进。在 20 世纪 80 年代之后, 随着电力电子器件、高功率密度电机及控制技术的发展, 船舶综合电力系统在功率密度、效率和控制等方面更好地满足了船舶动力发展的需要, 同时激光炮等大功率耗电设备的功率要求大大提高, 要求原有的辅助电站同推进用功率能够合二为一, 全电力推进的应用就水到渠成。世界各国已经有了综合电力系统原动机模块的系列化产品, 但是还没有联合动力作为原动机模块的先例。由于联合动力装置具有机动性好和单位重量尺寸小等特点, 所以文献[1]提出把联合动力发电模块作为综合电力系统的一种模块来进行研究具有重要的工程意义。

1 燃气蒸汽联合循环发电机组的布置方案

1988 年以前燃气蒸汽联合循环发电装置的布置通常是燃气轮机驱动 1 台发电机, 燃气轮机的烟气引入到余热锅炉产生过热

蒸汽, 过热蒸汽推动蒸汽轮机驱动另 1 台单独的发电机。燃气轮机的发电机和蒸汽轮机的发电机分别向用户(电网)供电, 如图 1(c)所示。

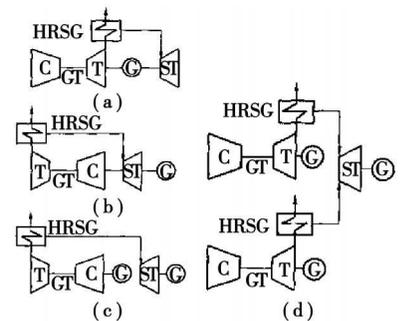


图 1 典型燃气蒸汽联合循环发电机组的配置方式

1989 年以后出现了燃气轮机和汽轮机共同驱动 1 台大功率发电机的单轴布置的方案, 此时由大功率的发电机向用户(电网)供电。近年来投入市场的燃蒸联合循环发电装置大多采用单轴布置的方案, 从实际装置运行经验来看, 单轴布置又分为两种: 一种是发电机在中部, 燃气轮机和汽轮机分别在发电机的左右两侧, 居中布置, 如图 1(a)所示; 第二种是汽轮机在中间, 燃气轮机在左侧, 发电机在右侧的尾置方案, 如图 1(b)所示。

单轴布置只有 1 台发电机及相关的输变电设备, 余热锅炉一

般不需加装旁通烟囱和挡板,同时辅助设施(如润滑油和冷却水系统等)可以统一布置,使得设备简化、布置紧凑、厂房面积小、土建成本降低、使整个电厂紧凑高效及电站投资降低。SIEMENS 公司认为,单轴机组设备造价可比多轴机组低约 5%。

1.1 发电机居中布置(GT-G-ST)

以 SIEMENS 公司 GUD1S.94.3A 和 ALSTOM 公司 KA26-1 为代表的燃气轮机+发电机+3S 离合器+轴向排汽汽轮机的连接方式,简称发电机居中布置方式。

SIEMENS 公司 GUD1S.94.3A 单轴联合循环机组(390 MW)的主厂房跨度为 29 m,长 52 m,空气过滤器安置在 9 m 跨度的披屋顶上,按燃气轮机、发电机、同步离合器、汽轮机和凝汽器顺序排列,汽轮机为轴向排汽,所有主设备均为地面低位布置,机组中心线离地面高 5.5 m,主厂房高 21.5 m,机组纵向长度为 127.5 m,动力岛约为 145 m×88 m,动力岛折算成单位容量的占地为 32.7 m²/MW,如图 2 所示^[2]。

KA26-1 单轴联合循环机组主厂房剖面图主厂房长 57 m,跨度为 38 m,主厂房高 20.5 m,动力岛占地约为 150 m×85 m,动力岛折算成单位容量的占地为 32.4 m²/MW,如图 3 所示^[5]。

1.2 发电机尾部布置(GT-ST-G)

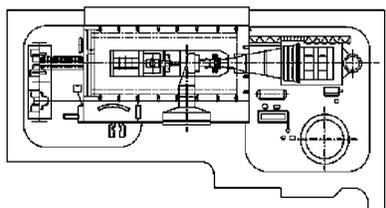


图 4 GE 公司 S109FA 机组发电机尾部布置简图

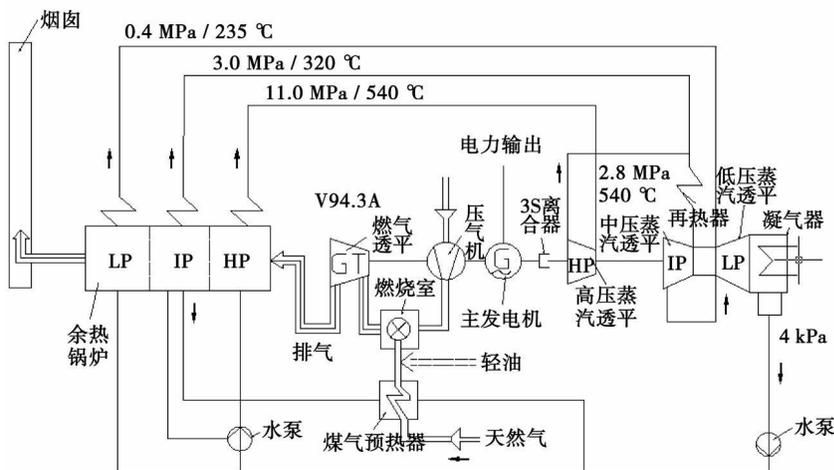


图 2 GUD1S.94.3A 联合循环系统简图

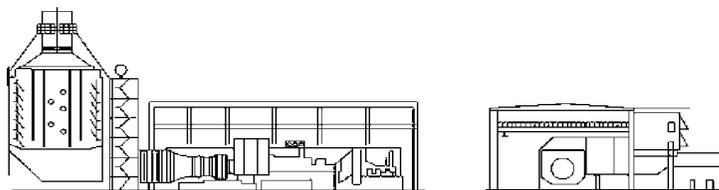


图 3 KA26-1 燃蒸联合循环发电机组布置简图

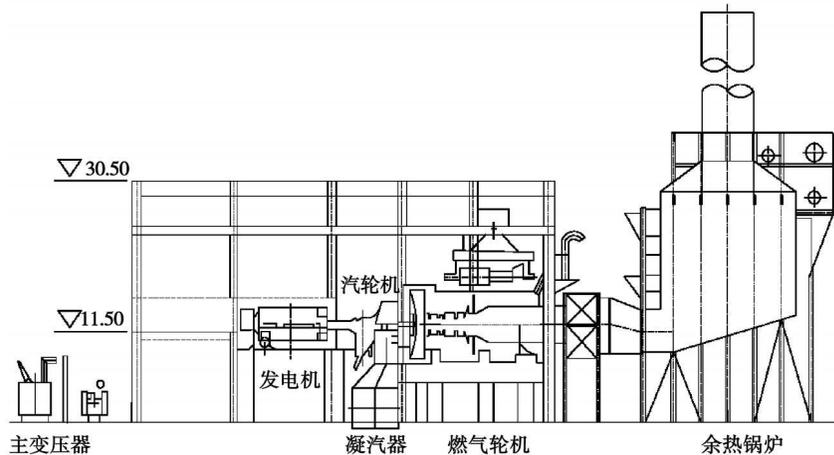


图 5 MITHUBISHI 公司 MPCP1-701F 机组发电机尾部布置简图

以 GE 公司 S109FA 和三菱公司 M701F 为代表的燃气轮机+向下排汽的汽轮机+发电机的连接方式,简称发电机尾部布置方式。

GE 公司 S109FA“1+1”单轴联合循环机组(390.8 MW)的主厂房长约 62 m、跨度约为 28 m;集控室和电气设备间布置在主厂

房侧面的披屋内,其屋顶安置燃气轮机进气过滤器。动力岛约为 150 m×80 m,单位容量的占地为 30.7 m²/MW,如图 4 所示^[5]。

MITHUBISHI 公司 MPCP1-701F 单轴联合循环机组(398 MW)的主厂房跨距为 30 m,长 55 m,高 30.5 m;主厂房旁有宽 17 m 的披屋,披屋底层是电气设备和

控制间, 披屋的屋面 (6 m 高) 安置燃气轮机进气过滤器, 主设备布置在标高为 11.5 m 的运转层上, 动力岛约为 150 m × 85 m, 动

力岛折算成单位容量的占地为 32.0 m²/MW, 如图 5 所示^[5]。

2 联合循环发电机组动力岛单轴布置与多轴布置方案的比较

比较

2.1 动力岛单轴布置方案

表 1 和表 2 给出了 4 家公司近期投入市场的动力岛单轴布置方案。

表 1 4 家公司单套 F 级单轴联合循环机组动力岛布置的比较

	GE	MITHUBISHI	SIEMENS	ALSTOM
联合循环型式容量/MW	S109FA	M701F	GUDIS. 94. 3A	KA26-1
总体占地尺寸/(m × m)	150 × 80	150 × 85	145 × 88	150 × 85
总占地面积/m ²	12 000	12 750	12 760	12 750
单位容量占地面积/m ² ·MW ⁻¹	30.7	32.0	32.7	32.4

表 2 一套 F 级双轴和一套 F 级单轴联合循环机组动力岛布置的比较

	GE		MITHUBISHI	
	S109FA 单轴	S109FA 双轴	M701F 单轴	M701F 双轴
联合循环型式容量/MW	390.8	390.8	398	398
总体占地尺寸/(m × m)	150 × 80	145 × 120	150 × 85	150 × 120
总占地面积/m ²	12 000	17 400	12 750	18 000
单位容量占地面积/m ² ·MW ⁻¹	30.7	44.5	32.0	45.2

2.2 动力岛三轴布置方案

表 3 为单轴与三轴布置的比较。

表 3 F 级单轴和三轴联合循环机组动力岛布置的比较

	GE	MITHUBISHI	SIEMENS
联合循环型式容量/MW	S209FA 三轴	M701F 三轴	GUDIS. 94. 3A 三轴
	786.9	796	780
总体占地尺寸/(m × m)	主设备区: 150 × 80 备用油区: 63 × 40	主设备区: 145 × 135 总体: 150 × 180	总体: 150 × 180
总占地面积/m ²	29 520	27 000	27 000
单位容量占地面积/m ² ·MW ⁻¹	37.5	33.9	34.6

2.2.1 单轴与双轴比较

在占地面积方面, 发电容量完全相同, 单轴机组的单位容量占地面积较小, 双轴机组占地面积约为单轴机组的 1.5 倍; 技术方面, 单轴比双轴少 1 台发电机、1 台主变压器和 1 套电气设备, 燃气轮机和余热锅炉之间省去旁路烟道, 余热锅炉和汽轮机之间的汽、水管道缩短, 压降和温降小, 但对管道的设计和安装要求较高; 燃气轮机和汽轮机可共用 1 套润滑油系统、控制系统简单; 燃气轮机和汽轮机同处一个厂房

内, 便于运行检修, 对于抑制燃气轮机的噪声也较为有利; 轴系较长, 对设计、制造、安装要求较高。

2.2.2 单轴与三轴比较

占地面积方面, F 级三轴联合循环机组动力岛布置的单位容量占地面积为 33.9 ~ 37.5 m²/MW, F 级单轴联合循环机组的单位容量占地面积为 30.7 ~ 32.7 m²/MW, F 级单轴联合循环机组更紧凑; 技术方面, 三轴机组的整体效率大约比单轴机组高 0.6 个百分点, 三轴机组汽水系统和管道较复杂, 三轴机组启动时, 2 台

余热锅炉并炉需要较长的时间, 且三轴机组控制系统较复杂。

3 基于联合动力的原动机模块方案的探讨

3.1 基于联合动力的原动机模块

从上面的内容可以看出单轴与双轴、三轴比较具有如下优势: 一些单轴机组的单位容量占地面积较小, 双轴机组占地面积约为单轴机组的 1.5 倍, 三轴机组占地面积约为单轴机组的 1.1 ~

1.15倍;技术方面单轴比双轴、三轴都要简单;控制系统相对简单;便于运行检修。由此受到启发,可以用联合动力组合成各种发电模块应用到一体化全电力推进系统中,将使发电模块从重量、占地面积、控制系统等各方面具有一定的优势。

众所周知,对于大中型水面船用原动机而言,最佳的配置是3个级别的装置,以某类型船为例,包括作战推进用大功率21 MW,巡航推进用中等功率7~8 MW和锚泊负载1~2 MW的装置,左右舷各3台发动机分别带动3台发电机,总计6台发电机。若以联合动力作为原动机,则左右舷可实现并车,如2台21 MW的燃气轮机带动42 MW的发电机运行,这样6台原动机带动6台发电机变成6台原动机带动3台发电机,减少了发电机的数量,通常1台大功率发电机的重量要小于总功率与之相等的2台小发电机的重量之和,例如,2台功率为1 417 kW的发电机重量之和为9 000 kg,而1台2 868 kW(1 417 kW的近似两倍)的发电机重量为7 570 kg,单位质量的动力单元发出的功率提高了19%;2台功率为1 500 kW的发电机重量之和为20.9 t,而1台3 000 kW的发电机重量为12.9 t,单位质量的动力单元发出的功率提高了38%。综合各种情况,单一发电机比同功率的2台发电机在重量上降低了15%以上,这是一个很可观的数目。

3.2 基于联合动力的原动机模块的布置方案

联合动力发电模块有其诸多优势,其常见的布置方案有3种,但由于2台原动机同轴驱动1台发电机,布置方案1明显地增加了

其轴向尺寸,这就在灵活性方面对该模块提出了要求。同时,采用这种布置方案,2台燃气轮机的动力涡轮必须反向运行。我国海南三亚南山电厂的2台FT-T8就是如图6所示方式布置的。

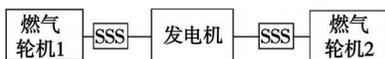


图6 联合动力发电模块原动机布置方案1

图7为方案2的布置情况,2台原动机在发电机的同侧以齿轮啮合的方式完成对发电机的驱动,其优点是考虑到部分地实现紧凑,轴向尺寸明显缩短,而且2台原动机可以同向运行,缺点是增加了齿轮传动部分。

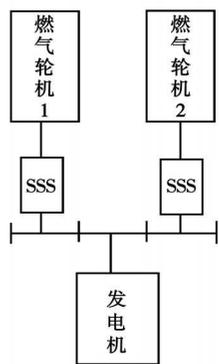


图7 联合动力发电模块原动机布置方案2

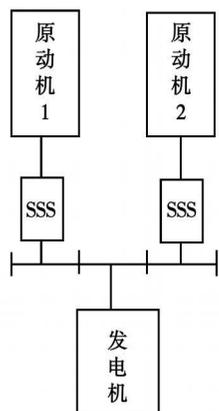


图8 联合动力发电模块原动机布置方案3

图8所示方案的布置情况为两种联合动力装置作为原动机模块的布置方式,一种是功率大小不同的燃气轮机组成联合动力装置作为原动机模块;一种是燃气轮机和柴油机组成的CODAG柴燃联合共同工作的原动机模块。这两种布置方案都有其自身的优缺点,但同时也为其在船上的布置提供了相对的灵活性。

3.3 采用电力推进的船用原动机模块

表4给出了已经投入建造的45型驱逐舰,DDG1000多用途驱逐舰、英国伊丽莎白女王级航空母舰上使用的原动机模块的情况,同时也给出了采用联合动力装置作为原动机模块方案之后的情况。综合各种情况,单一发电机比同功率的2台发电机在重量上降低了10%以上,这种方案不仅节省了发电机的数目,而且降低了很多的重量。除此之外,以联合动力作为原动机的电力推进系统可以省去一些相关的设备,如果2台原动机分别带动各自的发电机并网时,需要两套调频调相的设备;2台原动机带动1台发电机时,相关设备大为简化,减轻了重量,同时提高了系统的可靠性和可维护性。虽然增加了3S离合器的成本,但总的来说仍可大大减少成本。

4 结 论

在燃气蒸汽联合循环发电机组的布置方案,单轴与双轴、三轴的相比,在占地面积、技术、滑油系统、控制系统、运行检修等方面都具有加大的优势。受到这种方案的启发,对采用联合动力装置的原动机的方案进行了研究,得出了以下结论:

表 4 联合动力装置原动机方案与单原动机方案的比较

指标	英国 45 型驱逐舰	美国 DDG1000 驱逐舰	英国伊丽莎白女王级航空母舰
舰总长/m	151	183	292
舰宽/m	20	24	38.6
航速/kn	29	30.3	16~28
动力装置	综合电力推进, 2 台 WR-21 燃气轮机(25 MW)	全电力推进, 原动机为 2 台 MT30 燃气轮机(35 MW)和 2 台 4 500 型燃气轮机(4.5 MW)	一体化全电力推进(IFEP), 发电模块以 1 台 MT30 燃气轮机(35 MW)和柴油机(10 MW)发电机为 1 组, 整个航母上装载 2 组
功率/MW	25	35	35
重量/t	65.92	97.4	97.4
原方案发电机			
台数/个	2	2	2
功率/MW	—	4.5	10
重量/t	—	16.95	31.6
台数/个	—	2	2
联合动力装置方案的发电机			
功率/MW	50	40	45
重量/t	118.65	102.3	110.47
台数/个	1	2	2
相对节省重量	—	13.19	24.1
			37.06

注: 发电机的重量是一个估算值, 按照文献[1]中发电机的参数进行估算。

(1) 采用联合动力装置的原动机模块可以在不同的负载情况下使用不同的原动机配置, 使系统可靠且经济的运行。

(2) 以联合动力作为原动机的电力推进系统, 优于其它的电力推进方式在于它有效地节省了发电机的数目, 降低了很多的重量。

(3) 以联合动力作为原动机的电力推进系统可以省去一些相关的设备, 如果 2 台原动机分别带动自己的发电机并网时, 需要两套调频调相的设备; 两台原动机带动 1 台发电机时, 相关设备大为简化, 减轻了重量同时提高了系统的可靠性和可维护性。虽然增加了 3S 离合器的成本, 但总的来说仍可大大减少成本。

(4) 今后的研究重点应放在联合动力双机共同工作带发电机的控制策略和突增、突减较大负荷时机组的动态特性等方面。

参考文献:

- [1] 蒋德松. 一种基于联合动力的舰船电力推进原动机模块[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2002.
- [2] 焦树建. 燃气—蒸汽联合循环[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [3] 杨顺虎. 燃气—蒸汽联合循环发电设备及运行[M]. 中国电力出版社, 2006.

- [4] 陈国钧. 现代船舶轮机工程[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2001.
- [5] 何语平, 胡立业. 大型天然气联合循环电厂 F 级机组动力岛布置的优化[J]. 中国电力, 2005, 38(10): 56—64.
- [6] 何语平. 大型天然气联合循环电厂机组的轴系配置[J]. 中国电力, 2004, 37(8): 7—9.
- [7] 何语平. 大型天然气联合循环电厂不同机型总体布置与占地的比较[J]. 中国电力, 2005, 38(7): 31—36.
- [8] LIEUTENANT ROY CASSON, SIMON NEWMAN. Integrating MT30 into the UK's future aircraft carrier power at the heart of the electric propulsion system[R]. ASME, GT2008-50206 2008.

(编辑 刘伟)

· 书 讯 ·

《轮机工程基础》

本书共分为十二章, 分别为工程热力学、传热学、理论力学、机械振动、材料力学、流体力学、材料及其工艺、机构与机械传动、机械制图基础、机械制图、船用仪表和量具、单位及单位换算。读者对象: 海船轮机长, 轮机员, 轮机工程专业学生。

2009 年 9 月出版。

燃蒸联合循环单轴发电机布置的启发 = **Edification from a Single-shaft Layout of Gas-steam Combined Cycle Power Generators** [刊, 汉] / WANG Zhi-tao, LI Shu-ying, SUN Yu-feng (College of Power and Energy Source Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(5). — 549 ~ 553

Proceeding from the empirical data of various single-shaft layouts of latest gas-steam combined cycle power generator units supplied by GE, Mitsubishi, Siemens and Alstom company etc. for the world power markets, a preliminary argumentation was conducted of a version in which an IFEP (integrated full electric propulsion) marine combined power plant was used as a primer mover module. Moreover, the feasibility of the module in question based on a combined power plant was investigated and the improvement for full electric propulsion versions published for two warships of USA and one CVN (carrier vessel nuclear) warship of Great Britain was compared with some meaningful viewpoints being obtained. Summing up various circumstances, the authors have concluded that the use of a single generator can reduce the total weight by over 10% compared with the use of two generator sets having the same power output. The version thus obtained can reduce the number of generators by one half and decrease the land area occupied by over 10%, resulting in weight reduction and significant simplification of relevant equipment items. In the meantime, the reliability and maintainability of the system can be improved. **Key words:** gas-steam combined cycle power generator unit, integrated full electric propulsion (IFEP), combined power plant, prime mover module

压汽闪蒸海水淡化方法的研究与进展 = **Recent Advances in the Study of a Pressurized-steam Flash Evaporation Method for Seawater Desalination** [刊, 汉] / CHOU Qiao-li, JIN Cong-zhuo (Hefei Swan Refrigeration Science and Technology Co. Ltd., Hefei, China, Post Code: 230088), JIN Cong-zhuo, SHU Peng-cheng (Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(5). — 554 ~ 559

Analyzed, compared and summed up were the following problems in an open heat enthalpy process among the currently available seawater desalination methods, including the multistage flash evaporation method and multi-effective distillation one. The problems are: condensate latent heat loss of the secondary steam, fouling and corrosion of the distillation method, seawater pretreatment and unstable water quality of its product when a reverse osmosis method is adopted. Summing up all the merits of the methods under discussion, the authors have presented for the first time the flash evaporation method with the highest thermal efficiency to attain the best water quality of its product. Such a wholly new, optimum and integral pressurized-steam and seawater desalination process features low investment cost, and an independent flash evaporation operation coupled with a modularized combination production and other technical advantages. Due to the proven and comprehensive integration technology and the plant safe and reliable operation, the method in question will certainly replace the various currently available methods step by step with its excellent technology and cost-effectiveness, unifying the seawater desalination markets and initiating the further development of seawater desalination technologies. **Key words:** pressurized steam, flash evaporation, seawater desalination, plant

气膜孔形状对涡轮叶片气膜冷却效果的影响 = **Influence of Air-film Hole Shapes on Turbine Blade Air-film Cooling Effectiveness** [刊, 汉] / DAI Ping (College of Power and Energy Source Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001), LIN Feng (Gas Turbine Research Department, CSIC (China Shipbuilding Industrial Corporation) Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(5). — 560 ~ 565

On the basis of a bulk flow control method, discretized was a three-dimensional steady incompressible $N-S$ equation. By using a non-structured grid and two-layer $k-\epsilon$ turbulent flow model and under the condition of the air blowing ratio M being 0.6 and 1.2, numerically simulated was the influence of air-film hole shapes on turbine blade air-film cooling effect-