

# 一种基于联合动力装置的船舶电力推进原动机模块

蒋德松, 谢春玲, 孙聿峰

(哈尔滨工程大学 动力与核能工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 电力推进以其诸多的优势成为未来海军战舰的主流推进模式, 目前世界上几支主要海军都在考虑如何在战舰上研制和引入综合全电力推进(IFE)系统, 本文结合柴燃联合动力装置试验台提出以联合动力装置作为船舶电力推进原动机模块, 并深入研究功率分配和单一工作并车的情况, 为船舶电站的设计提供了一种新思想。

**关 键 词:** 联合动力装置; 电力推进

中图分类号: U664.14 文献标识码: A

## 1 引 言

船舶采用电力推进有很多优越性: 首先从造船学的角度出发, 如何把动力装置安装到最佳的位置, 并同时考虑紧凑方案, 最佳质量和最佳维护等方面的因素显得很重要, 电力推进装置的模块化容易实现这一点。其次电能的集中大大简化了主推进电机的选择, 主电机可以根据最佳方案、安装要求、燃料消耗、维护要求和价格等因素来选择。再次, 当推进电机和电网所需功率发生变化时, 主发电机可以恒转速和最佳负载运行。采用统一电站, 机械的总数可以最少, 并简化了相应的辅助系统, 诸如燃料、油、冷却等系统。推进电动机的转速可以在整个速度范围内平滑的调节, 这时的整个系统的调整特性变得非常的灵活和可靠。采用了电力推进, 螺旋桨的推进装置可以不需要减速装置而直接用电动机驱动, 简化了整个传动系统, 在减少噪声源方面也是一个很大的优势。推进电机可在整个速度范围内高效率的产生额定扭矩, 且能短时的保证高于额定扭矩, 当电动机输出轴上的扭矩最大时, 可以保证推进螺旋桨突然停止时快速反向。采用统一电站的电力推进装置还可以提高整个动力系统的机动性和可靠性<sup>[1~2]</sup>。

## 2 基于联合动力的电力推进原动机模块

### 2.1 电力推进的模块化

1992 年美国海军提出了 ASMP(先进水面舰艇机械项目)计划。旨在研制出一种先进的舰艇推进、电力及机械控制系统, 在满足规定性能的同时, 显著的降低军用舰船的投资。1994 年在 ASMP 计划研究过程中, 提出了 IPS 概念, 即将电力推进和舰上日用电力合二为一, 共用一套发电及配电系统, 从而构成一个综合电力系统, 图 1 示出了综合电力系统在舰上的应用。

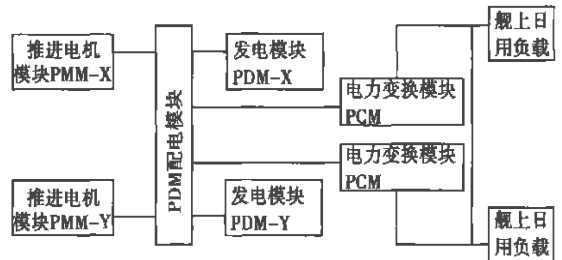


图 1 电力系统在舰上的应用

该系统最大的特点是“模块化”, 以使用通用的技术完成模块的制造装配和试验, 缩短建造周期, 方便部件更换和维护。它可分成五个子系统: 发电和推进子系统、武器用电配电子系统、日用电配电子系统、区域配电子系统和监控子系统。从功能上它可分成八种模块: PGM(发电模块)、PMM(推进电机模块)、PDM(配电模块)、ESM(能量储存模块)、PCM(电力变换模块)、PLM(平台负载模块)、PCOM(监控模块)和 CONM(接口模块)。

### 2.2 联合动力的电力推进

研究指出, 原动机的最佳配置是三个级别的装

收稿日期: 2002-07-20; 修订日期: 2002-10-08

作者简介: 蒋德松(1975-), 男, 安徽安庆人, 哈尔滨工程大学博士研究生。

置,以某类型船舶为例,包括特殊用大功率(21 MW),巡航用中等功率(7~8 MW)和锚泊负载(1~2 MW)的装置,左右舷各三台发动机分别带动三台发电机,若以联合动力作为原动机,则左右舷可实现并车,如两台21 MW的原动机带动42 MW的发电机运行,这样六台原动机带动六台发电机变成六台原动机带动三台发电机。

首先,考虑在某一状态下运行的船舶,例如在巡航状态,也有巡航速度快慢之分,而发动机在低工况下运行是不经济的,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。

其次,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的节省了发电机的数目,从减轻质量上来说另一个突破。表1中所示的某型号发电机参数和表明一台大功率发电机的质量要小于总功率与之相等的两台小发电机的质量之和。单一发电机比同功率的两台发电机在质量上节约了15%以上。

表1 某型发电机的质量和功率关系

型号	质量/kg	功率/kW	型号	质量/kg	功率/kW
1FC2 81-4	125	13	QFC-1.5-2	10.45	1 500
184-4	185	26	QF-3-2	12.90	3 000
1FC2562-4	4500	1417	QF-6-2	21.00	6 000
1FC2 31-4	6850	2285	QF-12-2	36.90	12 000
633-4	7570	2868	QF-25-2	65.92	25 000

另外,以联合动力作为原动机的电力推进系统可以省略一些相关的设备,如果两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,两台原动机带动一台发电机时,相关设备大为简化,减轻了质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,降低船舶建造的投资。

双原动机的并车可以通过离合器实现,也可单机运行。动力切换及3S离合器的研究仍然是原动机研究的重点问题,文献[3~4]在联合动力装置方面进行过深入的研究,有了一些成功的经验,在现有的CODOG试验台上就可以进行相关论证。

### 2.3 原动机的功率分配

功率(包括有功功率和无功功率)分配是一个突出的问题,以有功功率的分配为例,阐述基于联合动力的电力推进机组功率分配。在通常意义上的船舶电站中<sup>[4]</sup>,当系统负荷发生变化时,不断调整各原

动机调速器弹簧的预紧力以平移其调速特性,这些工作由“自动调频调载装置”来承担。自动调频调载装置由测频器、测功器、功率分配器和调整器组成。测频器反映频率对额定值的偏差 $\Delta f$ ,并转换成电压信号 $U_{\Delta f}$ ,测功器测每台发电机的输出功率,也转换成电压信号 $U_p$ , $U_p = K_p \cdot P$ 功率分配器的功能是综合测功器和测频器的信号,经鉴别输出给每组调整器。如图2所示的分配器中,加法器把来自各机组的有功功率信号及系统中频率的偏差信号相加后输出一个合成的基准电压 $U_s$ ,表达式为:

$$U_s = K_1 U_{p1} + K_2 U_{p2} + K_3 U_{p3} + K_4 U_{\Delta f}$$

式中: $U_{p1}$ 、 $U_{p2}$ 、 $U_{p3}$ —发电机的有功功率信号;

$U_{\Delta f}$ —系统的偏差频率信号;

$K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 、 $K_4$ —比例系数。

将在准信号 $U_s$ 与各发电机测功器的输出信号 $U_{pi}$ 进行比较,比较结果经放大器送到各发电机组调整器,调节原动机进油量,使各机组功率平均分配,并使系统的频率恒定<sup>[9]</sup>。

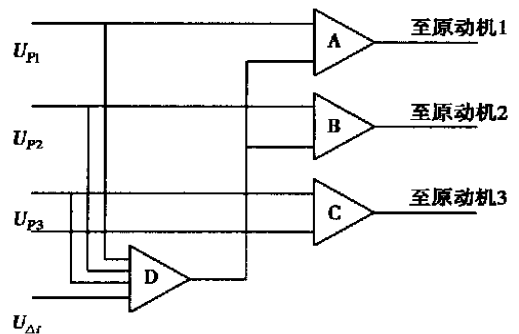
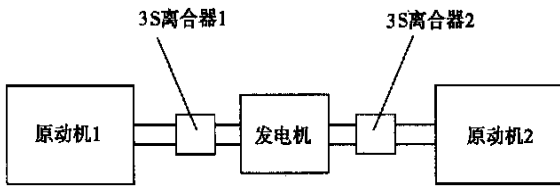


图2 分配器示意图

若各机组都由联合动力作为原动机,情况就有所变化。就上文所述,三台机组分属不同的功率段,功率的均分是不行的,对于某一发电机,并不一定两台原动机都在工作,所以要先判断然后发出调节指令。对于上文所述的三个功率段的发电机,功率按2:8:21分配,当然这指的是各发电机的两台原动机都在工作时的分配比例,这时只需改变测功器中的参数 $K_p$ 使得其比例为 $K_{p1}$ 、 $K_{p2}$ 、 $K_{p3}$ 、=84:21:8,即可沿用同容量同型号的机组并联供电时调频调载装置,如某台发电机上不是两台原动机都处于工作状态,则需判断后给出相应的比例。

联合动力装置的电力推进方式对于改善电力系统的负荷效应有着积极的作用,船舶电网负荷的增加体现在一台发电机上由两台原动机来承担,对特

定发动机的特定的下斜特性, 可有效的减小原动机速度的波动, 有利于发电机频率及电压稳定。在一台发电机内部, 若两台原动机都在线工作, 基于联合动力装置电力推进原动机模块如图 3 所示, 对于运行中的特定一台发电机的两台原动机, 要求其必须有相同的转速, 对两台原动机的下斜特性无严格要求。两原动机的下斜特性有三种情况(见图 4)。当负载增加时, 原动机转速从  $n_0$  有一个微小的下降至  $n_1$ , 图 4(a) 中两原动机的下斜特性完全相同, 输出功率都从  $P_0$  升至  $P_1$ , 即总功率由  $2P_0$  增至  $2P_0 + 2(P_1 - P_0)$ , 电网负荷的增加由两原动机各承担一半。图 4(b) 中两原动机的下斜特性线平行, 原动机 1 的功率由  $P_{01}$  升至  $P_1$ , 原动机 2 的功率由  $P_{02}$  升至  $P_2$ , 即总功率由  $P_{01} + P_{02}$  升至  $P_1 + P_2$ 。图 4(c) 中两原动机的下斜特性线相交, 原动机 1 的功率由  $P_0$  升至  $P_1$ , 原动机 2 的功率由  $P_0$  升至  $P_2$ , 即总功率由  $2P_0$  升至  $P_1 + P_2$ , 如果两台原动机相同, 且考虑平均分配功率, 此时原动机 2 的负担相对较大, 应加以调整。当然, 转速从  $n_0$  降到很低的  $n_1$  时, 导致系统频率的过分降低是不允许的, 此时, 调速器将加大原动机的油门, 使图 4(a)(b)(c) 三种的特性线上移, 维持较高功率下的转速  $n_0$ , 功率的分配仍取决于调速器的特性。



3 联合动力装置电力推进原动机模块布置简图

### 2.4 单一工作与并网

两台原动机都经由各自的 3S 离合器与发电机相连, 可以方便的实现单机或双机运行, 利用各自的调速器以及 3S 离合器的自动同步离合性, 可有效的控制两主机具有相同的转速, 设原动机 1 的转速为  $n_1$ , 原动机 2 的速度为  $n_2$ , 若  $n_1 > n_2$ , 则对原动机 2 的 3S 离合器来说, 因从动件的转速大于主动件的转速(发动机的输出转速)而使原动机 2 脱线, 设计的锁定结构可保证 3S 离合器不至于因为微小的速度波动而频繁的啮合或脱开。更重要的是, 3S 离合器能方便的实现原动机的空载起动及停车。

当然, 系统中也存在一些缺点。首先, 以联合动力作为原动机模块增加了模块的长度, 一定程度上降低了使用的灵活性。其次, 对同一台发电机的两台原动机要求很接近的转速, 否则就有力矩的抵消。在效率方面, 虽然在一定程度上避免了原动机在低工况下的运行, 但同时又带来了一个新的问题, 当两台原动机中只有一台工作时, 那就使得发电机不能在设计点工作, 好在发电机高效的工作范围是我们所能接受的, 总的来说是经济可靠的。在相关的设备如调频调载方面, 控制设备需要有一些补充, 使得局部的控制系统显得复杂, 但在总量上的大量简化而带来的经济性及质量的减轻是我们所期望的。

### 3 陆上运行考证及实验台的建立

TPM 公司(Turbo Power and Marine system, Inc.) 在 1988 年公布了以 FT8 燃气轮机和蒸汽轮机联合循环为动力的发电机组, FT8 燃气轮机和蒸汽轮机同轴对发电机输出机械功率, 并居于发电机的同侧。GE 公司在 1989 年也推出了以 MS7001F (或

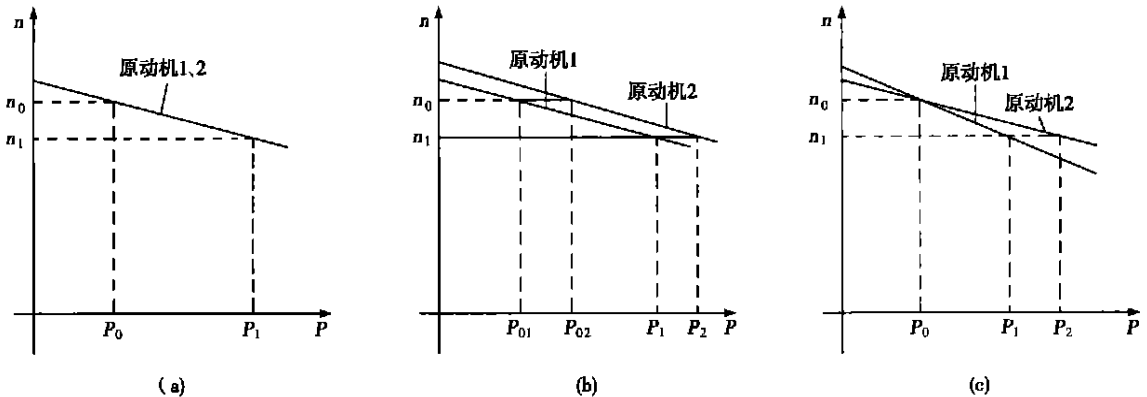


图 4 联合动力装置电力推进原动机下斜特性图谱

MS9001F)燃气轮机和蒸汽轮机联合循环为动力的发电机组。1988年TPM公司又相继推出了FT8 Twin Pac—双FT8燃气轮机模块—两台FT8燃气轮机居于发电机的一侧,如图5所示。1995年中国海南电力公司使用了TPM公司该类型50MW发电机组,由于机组的模块化,从设计到安装直至投入商业运营快速(仅用了38天)而可靠,在较高的经济效益下满足了不同负荷的需要<sup>[6]</sup>。

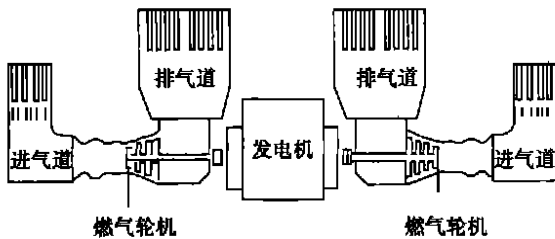
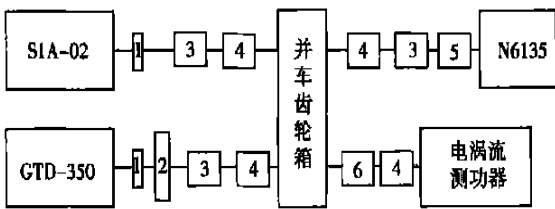


图5 双燃气轮机发电机模块—FT8 Twin Pac



1—轮胎联轴节; 2—减速齿轮箱; 3—3S 离合器  
4—数字扭矩仪; 5—液力耦合器; 6—弹性联轴器

图6 联合动力的电力推进原动机模块试验台

试验用的柴—燃联合(CODOG)动力装置试验台是由N6135柴油机及S1A-02燃气轮机并车组成的。柴油机选用南通柴油机股份有限公司生产的N6135增压中冷式柴油机,柴油机安装了自行设计的电子调速器,能精确的实现调速,并实现了计算机控制;燃机为日本川崎重工生产的S1A-02燃气轮机,燃气轮机经改进后可进行局部的调速。在此基础上,实验室又在国内首次引进了GTD-350燃气

轮机,基于联合动力的电力推进原动机模块,我们考虑最一般(即两台原动机不一样)的情况,重新设计了试验台,原动机模块为CODAG及COGAG两种形式,试验台布置如图6所示。

电涡流测功器,采用CWK4型控制仪,其操作较灵活,控制功能实现多样化,满足实验台在不同工况下实验的要求;还可解决目前国内中小功率发动机测控中普遍存在的测控稳定性差、测量精度低、动态响应差和成本高等问题,通过电涡流测功器模拟负荷的特性,可以在这个试验台上进行原动机及其调速器相关特性的研究,为这种新型的原动机模块的性能研究提供了可靠的试验平台。

## 4 结 论

电力推进以其诸多的优势将成为未来船舶的主流推进模式,目前世界上几支主要海军都在考虑如何在战舰上研制和引入综合全电力推进(IFEF)系统,本文对电力推进的现状和前景作了概括,并根据柴燃联合动力装置试验情况提出以联合动力装置作为船舶电力推进原动机模块,并作了深入的探讨,为船舶电站的设计提供了一种新的思路。

## 参考文献:

- [1] 张志华. 船舶动力装置概论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2002.
- [2] 郝 玉秀. 船舶电力推进[J]. 船电技术, 2001(5): 55-60.
- [3] 蒋德松. CODOG系统的3S离合器的一种数学模型[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2001, 22(4): 22-24.
- [4] 黄伦坤, 朱正鹏, 刘宗德. 船舶电站及其自动装置[M]. 北京: 人民交通出版社, 1994.
- [5] 杨国豪. 船舶电站控制装置及动态模拟系统[M]. 大连: 大连海事大学出版社, 1999.
- [6] 焦树建. 燃气—蒸汽联合循环[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.

( 辉 编辑)

## 敬告作者

为了更好的及时准确报导您的科技成果,本刊编辑部依据著作权法有关规定,著作权人向本刊投稿时,不允许一稿二投,如三个月内没有收到本刊的录用通知,可再投它刊或自行处理。

——编辑部

fuzzy mathematics

热力系统传感器故障检测的动态神经网络方法 = **A Dynamic Neuron Network Method for Sensor Failure Detection in a Thermodynamic System** [刊, 汉] / MA Tao, XU Xiang-dong (Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18 (3) . — 237 ~ 239

A nonlinear time-dependent thermodynamic system status is analyzed with a fault-detection and diagnostic method being carried out by a dynamic neuron-network status observer. Through the simulation tests conducted on a hot-water boiler model by the use of a time-delay neuron network and dynamic recursive neuron network it is shown that the thermodynamic system sensor detection and diagnostic method based on the above-mentioned observer is feasible. After a comparison of the simulation test results one can see that the time-delay RBF (radial basis function) network has a relatively good potential for further widespread applications. The use of the above method in an automatic control system of Qingdao Gas Co. has confirmed its reliability. **Key words:** dynamic neuron network, failure detection

200 MW 机组运行性能诊断的热经济学方法 = **Thermoeconomic Method for the Performance Diagnosis of a 200MW Power Plant** [刊, 汉] / ZHANG Xiao-dong, WANG Jia-xuan, WANG Qing-zhao, et al (Power Engineering Department, North China Electric Power University, Beijing, China, Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18 (3) . — 240 ~ 244

On the basis of a thermoeconomics structure theory discussed is a thermoeconomic method for the operation performance diagnosis of a thermodynamic system. With the thermodynamic system calculation model of a 200MW power plant serving as an example the fuel/product relation of constituent elements is expounded and the thermoeconomics production model set up. After a theoretical analysis and practical calculation of the increase in system resource consumption caused by a failure proposed are indexes of relatively high sensibility for failure discrimination. A quantized index for reflecting the impact of failures is also given while analytical computations are performed with regard to some specific cases. **Key words:** thermoeconomics, failure diagnosis, structure theory

一种基于低品位热源的 LNG 冷能回收低温动力系统 = **A Cryogenic Power System for Recovering LNG (Liquefied Natural Gas) Cooling Energy Based on a Low-grade Heat Source** [刊, 汉] / WANG Qiang, LI Yan-zhong, CHEN Xi (Institute of Refrigeration and Cryogenics Engineering under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18 (3) . — 245 ~ 247

On the basis of analyzing physical cold exergy of LNG (liquefied natural gas) the authors have proposed a low-grade heat source-based cryogenic power system for recovering LNG cooling energy. An investigation was conducted of the relevant parameters having an impact on the system cycle efficiency. The results of the investigation show that under a relatively low heat-source temperature the thermal and exergy efficiency of the system may attain in excess of 30%. From an analysis of the cycle-influencing main parameters it is ascertained that the condensing temperature of secondary cooling medium exercises a very great influence on the cycle efficiency. With the increase in evaporation temperature and the decrease in condensation temperature there will be an enhancement of both the cycle thermal efficiency and exergy. **Key words:** low-temperature heat source, liquefied natural gas, cooling energy recovery, power system

一种基于联合动力装置的船舶电力推进原动机模块 = **A Combined Power Plant-based Prime-mover Module for Marine Electric Propulsion** [刊, 汉] / JIANG De-song, XIE Chun-ling, SUN Yu-feng (Power Engineering Department, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy

&Power. — 2003, 18 (3) . — 248 ~ 251

Electric propulsion represents a main propulsion mode for future ships. After a brief description of the status quo and future prospects of electric propulsion units the authors have proposed an approach for the research and introduction of integrated all-electric propulsion systems on board naval vessels. In connection with a university-installed test rig for combined diesel and gas turbine power plants a combined power plant is assumed as an electric propulsion prime-mover module and a series of problems are explored and investigated, such as power distribution, single and parallel operation, etc.

**Key words:** combined power plant, electric propulsion

水蒸气对液体燃料高温分解碳黑形成影响的研究 = **An Investigation of the Influence of Water Vapor Injection on Soot Formation During Liquid Fuel Pyrolysis** [刊, 汉] / HU Sheng-teng, FU Wei-biao (Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084), XING Gui-ju (Anshan Iron & Steel Institute, Anshan, China, Post Code: 114002) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18 (3) . — 252 ~ 255

The influence of water vapor injection on soot formation during liquid fuel pyrolysis is investigated. By directly measuring the mass of soot deposited on a solid wall surface it was found that water vapor can suppress the formation of soot particles. Some characteristics concerning the deposition of soot on a solid wall surface were ascertained. Meanwhile, by using software "Fluent" the soot particle concentration field was simulated under two kinds of experimental operating conditions, making it possible to confirm the relevant experimental conclusions. Finally, a calculation formula is given. When suitable parameters to be determined are selected, the results of calculation agree quite well with those of tests. **Key words:** soot, pyrolysis

小型燃气轮机热电联供系统的性能计算和分析 = **Performance Calculation and Analysis of a Small Gas Turbine-based Cogeneration System** [刊, 汉] / WU Jian-qiang, LIU Bao-xing, GUAN Xin (Institute of Power Engineering under the Shanghai University of Science & Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18 (3) . — 256 ~ 258

On the basis of the first and second law of thermodynamics as well as stoichiometric combustion proposed is a method for calculating and analyzing the performance parameters of a small gas turbine-based cogeneration system. The method under discussion mainly involves such aspects as power plant cycle efficiency, fuel utilization rate and second law efficiency, etc. with emphasis on identifying the impact on plant performance of some major parameters, such as compressor pressure ratio, turbine inlet temperature, steam process pressure and pinch-point temperature difference, etc. A case study was conducted of a 200kW gas turbine, which provided a practical and feasible method as well as reference data for the rational design of small gas turbine-based cogeneration systems. **Key words:** small-sized gas turbine, cogeneration, performance calculation, stoichiometry

气体横扫单管强制对流换热的大涡模拟 = **Large Eddy Simulation of Forced Convection Heat Exchange by Gases Sweeping Across a Single Tube** [刊, 汉] / WEI Ying-jie, HE Zhong-yi (College of Municipal and Environmental Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150090) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18 (3) . — 259 ~ 262

By using a method of large eddy simulation combined with a second-order full-developed ETG finite element discrete scheme a numerical simulation was performed of the forced convection heat exchange by gases sweeping across a single tube. The temperature fields in the case of a circular tube and a square tube being swept by gases were calculated separately. As a result, an average heat-exchange factor for tube walls was obtained. Numerical results agree relatively well