

离心叶轮内部三元流场计算 在实际工程中的应用

马胜远 赵友生 刘玉良

(哈尔滨七〇三研究所)

〔摘要〕 利用两类相对流面理论,应用有限差分法,求解离心叶轮内部流场,根据计算结果找出原机叶轮结构上的不足,并对新改叶轮的内部流场进行了计算。

关键词 流场 数值计算 叶轮改造

分类号 TK14

1 前言

离心叶轮内部流体的流动情况是十分复杂的,实际的流动是非定常的、三维的、可压缩的粘性流体的流动。用实验方法测量叶轮内部流动的方法,目前虽属可能,但由于试验周期长,费用大,加上测量难度大,还较难于最佳的工程设计。而为了提高叶轮的气动效率、增加负荷,提高设计的精确性和缩短设计周期,对叶轮流道内复杂的三元流场进行数值计算分析是一种经济和有效的方法。数值计算相当于对叶轮进行数值试验,改变几何参数或气动参数可以反复多次进行气动试验,十分方便,可以在一定程度上取代实物试验,避免大量人、财、物浪费,所以说对工程设计最行之有效的办法就是数值计算。本文介绍应用数值计算方法计算叶轮内部流场在实际叶轮改造过程中取得成功的一个实例。

为完成大庆30万吨乙烯裂解气压缩机(EC-301)的扩容改造任务,需对原机的两级叶轮进行改造,以达到增加流量的目的。为

了摸清原机叶轮的性能,为原机叶轮的改造提供依据,因此我们和哈尔滨工程大学动力工程系合作开发了“离心叶轮内部三元流场计算有限元程序”。

运用该程序对原机及新改的两级叶轮内部流场进行计算,对所得的马赫数及压力分布,又结合绘图软件,把大量复杂的计算结果直接处理成可视的直观的曲线,便于分析研究。通过对原机叶轮内部流动参数的分析,找出了原机叶轮结构性能上的不足,为原机叶轮的改造提供了依据;同时,通过对新改三元叶轮内部流动参数的计算及与原机叶轮内部流动参数的对比分析,校核了三元叶轮造型设计计算结果,得到了新改三元叶轮的流动性能优于原机叶轮的结论。

现新改叶轮已研制成功并安装运行,达到了预期性能,裂解气压缩机的扩容改造任务已经成功。这证明了三元流场计算方法在工程实践中应用的成功。下面以裂解气压缩机的低压(4MDF3/3)第一级叶轮为例介绍三元流场计算情况。

收稿日期 1994-12-01

2 程序介绍

本程序属于正命题求解,即已知叶轮的几何形状、转速、流量及其进口气流参数,求解其叶片通道内部的流动场。根据两类相对流面理论,把一个三元的问题化为两类二元问题。运用有限元方法,对离心叶轮内部的三维流场分别在跨盘盖(S_2 流面)和跨叶片(S_1 流面)方向进行计算分析。 S_2 流面和 S_1 流面示意图见图 1、图 2。

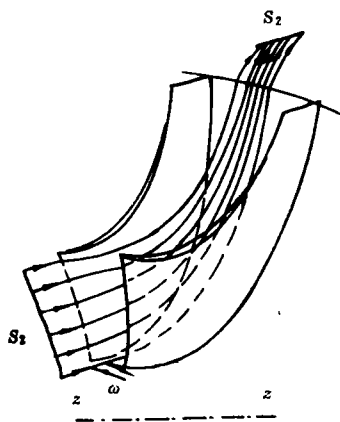


图 1 平均 S_2 流面示意图

程序采用半测地坐标系(半测地坐标系相当于流面上两个坐标加上流面法向坐标)和张量分析,得到离心叶轮内部任意流面上的流函数微分方程,对此非线性椭圆型偏微分方程,运用有限元素法离散得到非线性代数方程组。然后采用数值计算方法,即可得到流场中任一点的速度 W 和密度 ρ ,进而由热力学关系式求出其它热力、气动参数。

程序用 Fortran 语言编制而成。程序框图如图 3。

3 原机叶轮三元流场计算分析

3.1 原机叶轮主要气动参数

性能参数	4MDF3/3 (1)
叶轮进口压力(Pa)	114 961.8
叶轮进口温度(K)	312.055
叶轮进口容积流量(m^3/s)	15.345
叶轮进口质量流量(kg/s)	16.486
气体分子量	24.169
气体绝热指数	1.22
叶轮出口压力(Pa)	147 363.8
叶轮出口温度(K)	329.352
转速(r/min)	5 170.0
叶片数(个)	19

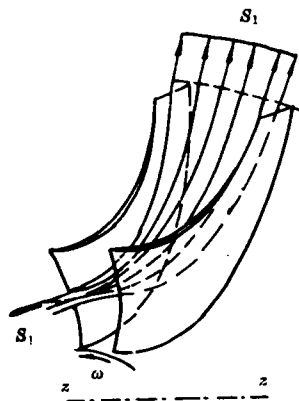


图 2 平均 S_1 流面示意图

3.2 计算网格划分

在轮盘面上沿子午弧长等距划分 23 站,用 $i = 1$ 至 $i = 23$ 表示,轮盖面上在转弯处网格划分要密一些,其它处沿子午弧长尽可能等距,也对应划分 23 站。对 S_1 流面, $J = 1$ 表示轮盘面, $J = 7$ 表示轮盖面。计算网格划分如图 4 所示。

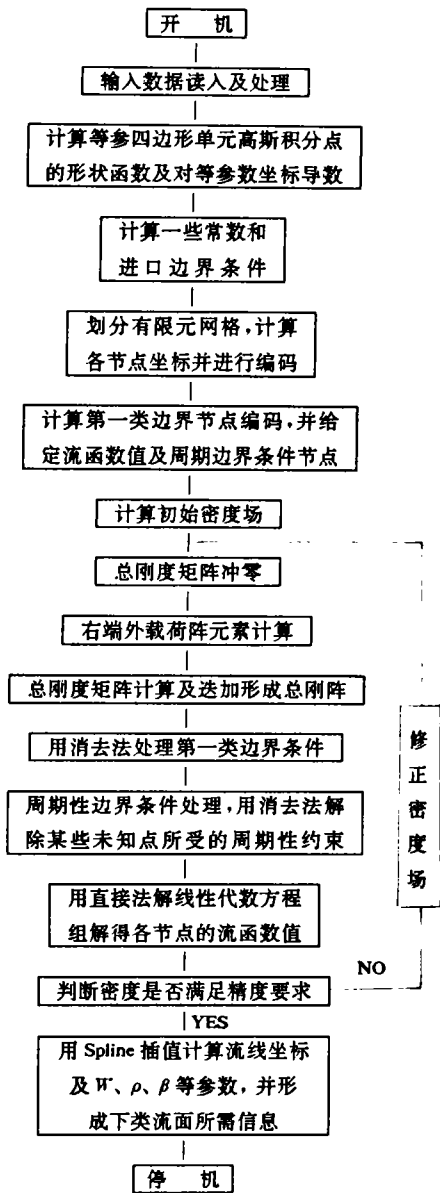


图 3 程序框图

3.3 原机叶轮内部流动参数计算结果

利用三元流场计算程序, 对 4MDF3/3(I) 第一级叶轮的流场进行了计算, 得到了平均 S_2 流面和三个 S_1 流面(轮盖面、轮盘面、平均 S_1 流面) 内的马赫数分布和压力分布。计算结果见图 5 ~ 图 8。

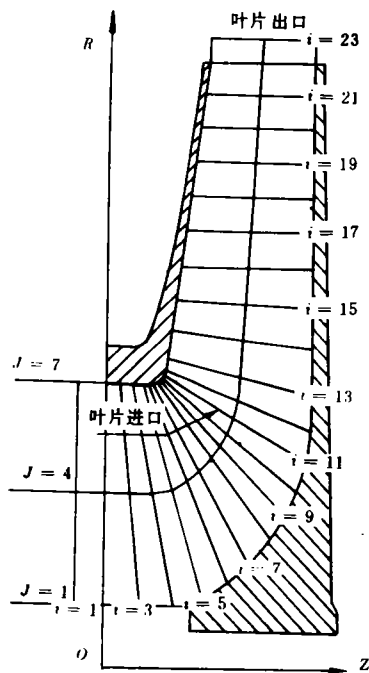


图 4 计算网格划分示意图

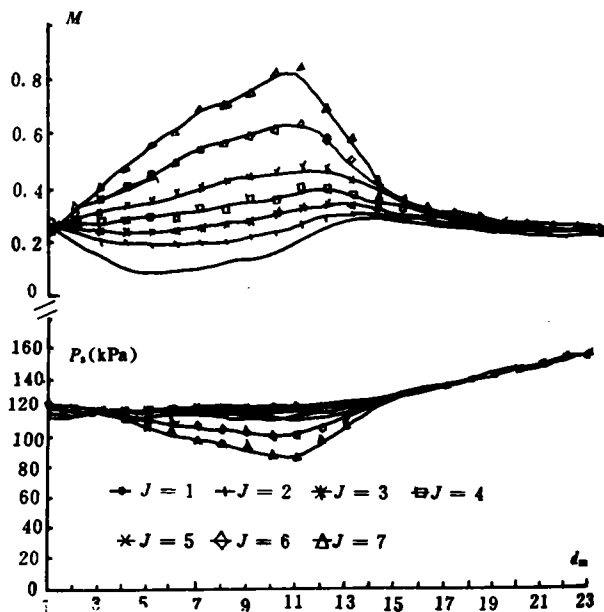


图 5 平均 S_2 流面上马赫数及压力分布图

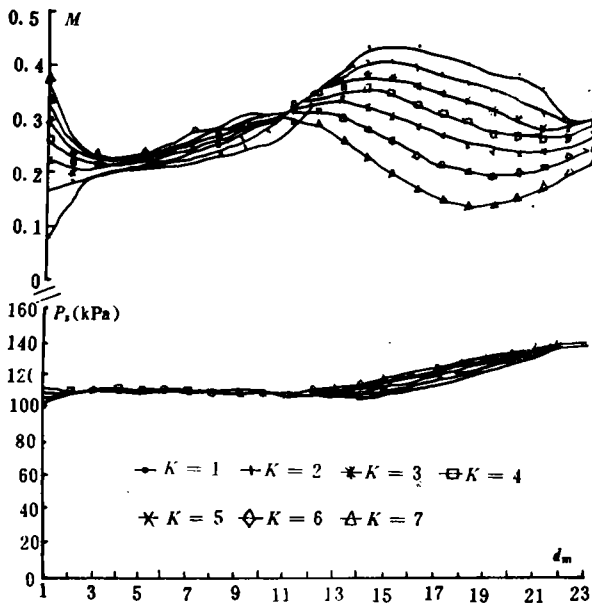


图 6 平均 S_1 流面 ($J = 4$) 上马赫数及压力分布图

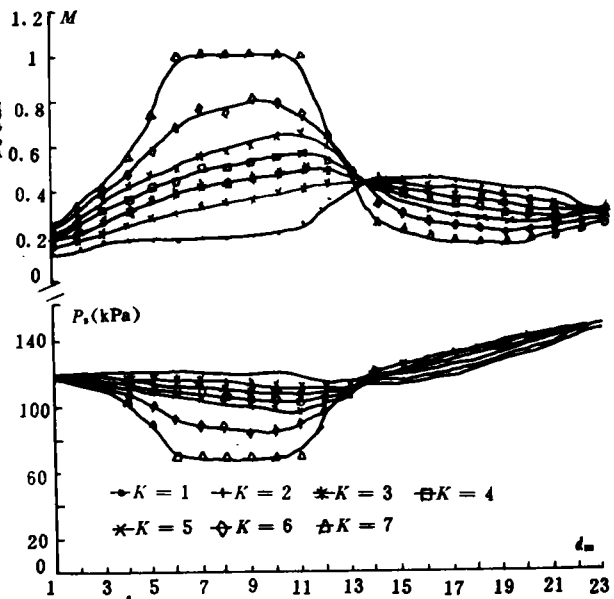


图 8 S_1 流面轮盖面 ($J = 7$) 上马赫数及压力分布图

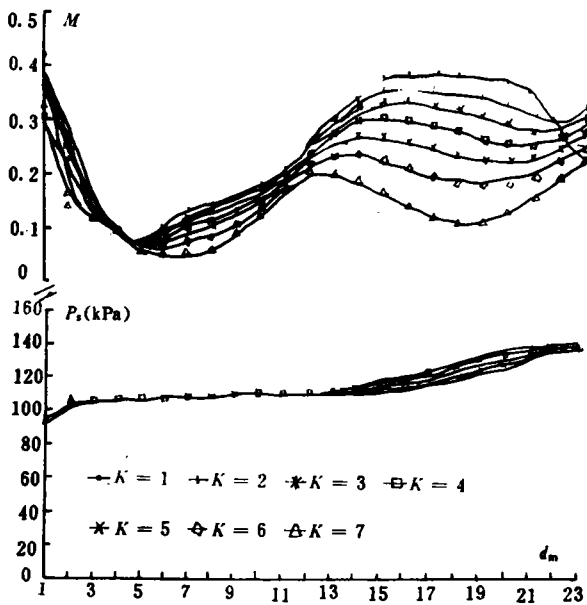


图 7 S_1 流面轮盘 ($J = 1$) 上马赫数及压力分布图

3.4 原机叶轮内部流场计算结果分析

从计算结果看,中压第一级叶轮与低压第一级叶轮内的流场基本相似,对流场进行分析可以得到以下几点结论:

(1) 叶轮内的流动为中低马赫数流动,叶轮内流场转径向向后较均匀。

(2) 从 S_2 流面马赫数分布图上可以看出,轮盖转弯处流动状况不好:① 轮盖转弯处平均马赫数偏高,达 0.85,局部马赫数更高,流动状况不好,有较大的能量损失;② 这里有较大的速度梯度和逆压力梯度,所以会在此位置产生边界层分离而形成有回流的涡流区,对叶轮的性能有较大的影响。

(3) 轮盘转弯处的流动状况不好,从 S_1 ($J = 1$) 流面马赫数分布图上可以看出,在轮盘与叶片压力面相交处有相当长一段范围内的马赫数接近于零,这里有较大的涡流损失。

(4) 叶片进口段的流动状况不好, 这里有较大的速度波动, 流动损失很大。

4 叶轮改进设计

根据对原机叶轮内部流场计算结果分析, 为达到增加流量和提高效率的目的, 对原机叶轮作如下改进:

- 4.1 修改轮盘轮盖型线, 加大轮盖转弯处的曲率半径。
- 4.2 把原叶轮的二元弯曲叶片改为三元扭曲叶片, 新改叶片向前拉长, 成为轴向径向混流叶片。
- 4.3 改变叶片的进出口安装角。

5 新改三元叶轮三元流场计算

5.1 增容改造后叶轮主要气动参数

性能参数	4MDF3/3 (I)
叶轮进口压力(Pa)	119 592.3
叶轮进口温度(K)	312.396
叶轮进口容积流量(m ³ /s)	15.769
叶轮进口质量流量(kg/s)	18.896
气体分子量	25.898
气体绝热指数	1.188
叶轮出口压力(Pa)	157 024.3
叶轮出口温度(K)	327.553
转速(r/min)	4990.0
叶片数(个)	19

5.2 新改叶轮计算网格划分

网格划分方法同原机叶轮。网格划分见图 9。

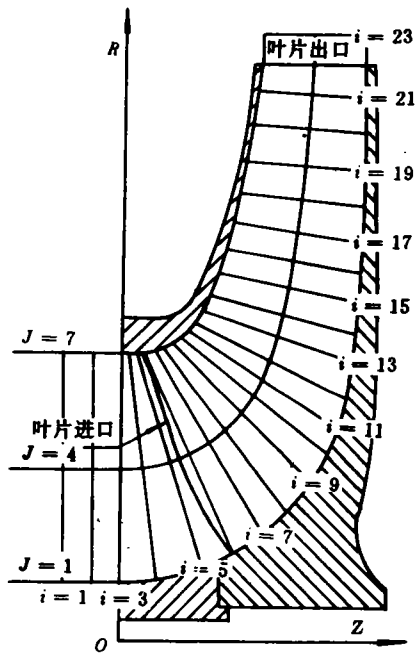


图 9 新改叶轮三元流场计算网格划分

5.3 新改叶轮内部流场计算结果

计算结果见图 10 ~ 图 13

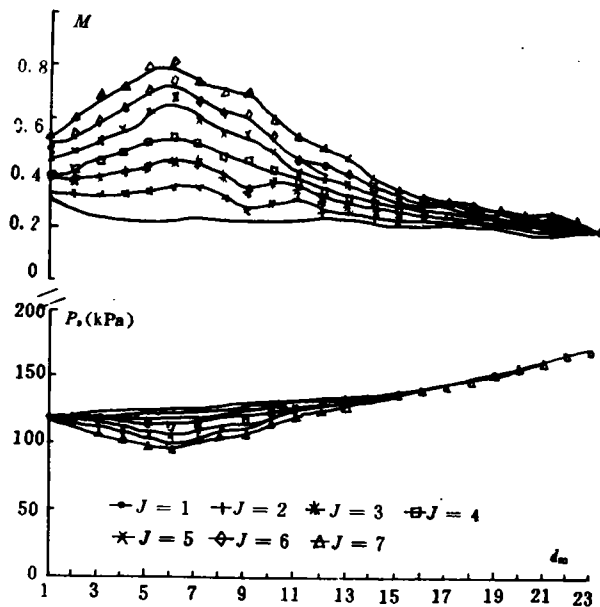


图 10 平均 S_2 流面上马赫数及压力分布图

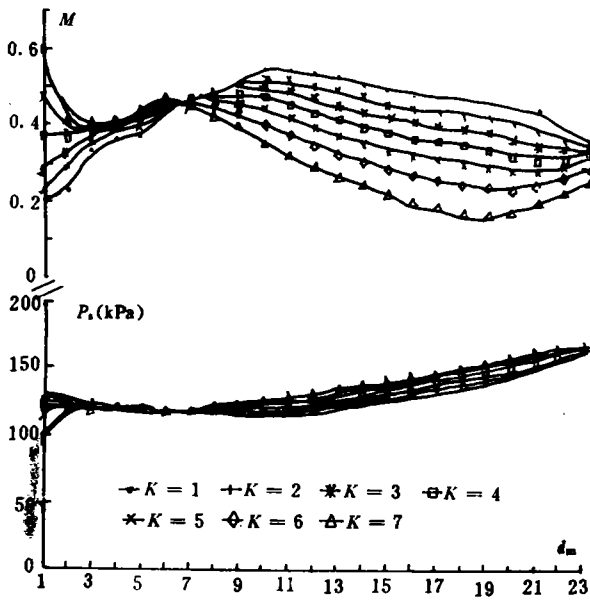


图 11 平均 S_1 流面 ($J=4$) 上马赫数及压力分布图

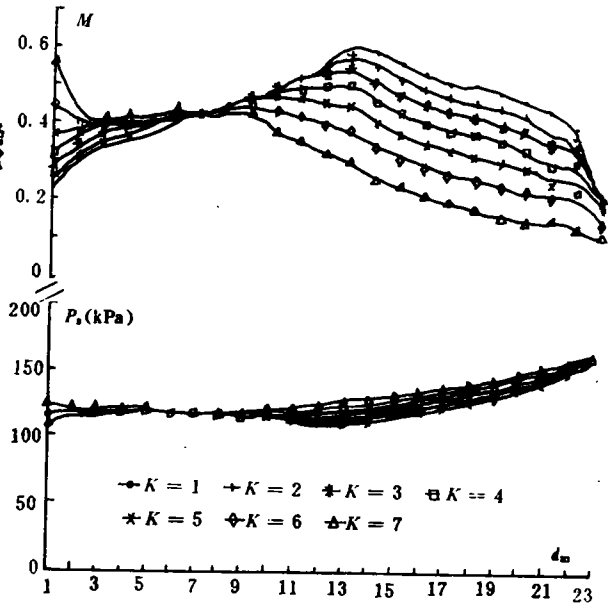


图 13 S_1 流面轮盖面 ($J=7$) 上马赫数及压力分布图

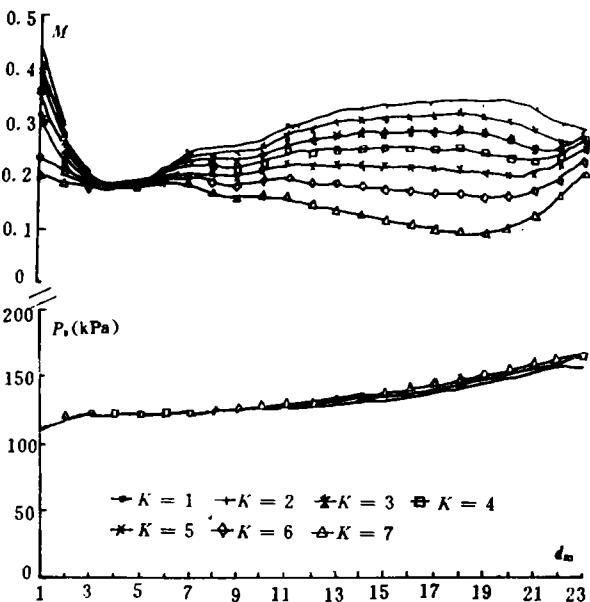


图 12 S_1 流面轮盘面 ($J=1$) 上马赫数及压力分布图

5.4 新改叶轮流动性能分析

原机叶轮为二元叶轮。新叶轮修改了轮盘、轮盖型线,加大了轮盘、轮盖转弯处的曲率半径,并把原叶轮的径向式后弯叶片改为三元空间扭曲叶片,新叶片向前拉长成为轴向、径向混流式叶片,通过对新旧叶轮内部流场的对比分析,得到以下几点结论:

5.4.1 轮盖转弯处流动状况明显好转

原叶轮在轮盖转弯处的相对马赫数达 1.0(见轮盖面 ($S_1, J=7$ 面) 马赫数分布图), 这里出现局部超音速区, 会产生激波, 导致相当大的能量损失, 改造后的三元叶轮加大了这里的弯曲半径, 相对马赫数在 0.80 以下, 流动损失小, 可以较高地提高效率。

5.4.2 轮盘转弯处的流动状况也明显改善

原叶轮在轮盘转弯处相当长一段范围内, 相对马赫数均小于 0.1, 接近于零, 有相当大的涡流损失。改造后的三元叶轮在轮盘

转弯处相对马赫数变化较均匀,没有低速回流区。

5.4.3 整个叶轮流动通道内的流动性能都有了改善

原叶轮通道内沿流动方向逆压力梯度很大,导致附面层增厚并且容易分离。改造后的三元叶轮在整个流场内相对速度变化均匀,沿流动方向逆压力梯度降低,不容易分离。

从 S_1 流面计算结果可以看出,原机叶轮横向压力梯度较大,在大的横向压力梯度作用下,低速度一侧的附面层中的流体将向高速度区一侧流动,形成二次流,导致高速度一侧附面层增厚,甚至分离。改造后三元叶轮的横向压力梯度较小,满足 $\Delta W/W_m < 1.0$ 条件(其中 ΔW 为叶片压力面与吸力面速度差, W_m 为相对速度的平均值),不会发生分离。

5.4.4 加功增压是在较长距离内完成,单位长度内加功量小,使流动更均匀

5.4.5 沿径向加功量均匀

5.4.6 受轴向叶片的作用,叶片前缘的流动情况优于原叶轮

原叶片基本上是径向叶片,改造后的三元叶轮的叶片向前延伸,成为轴向径向混流叶片,从计算结果可以看出在各个流面上,改造后叶轮的叶片进口处的速度场没有原叶轮对应处的速度场变化剧烈,进口处的流动状态比原机好。

通过以上分析可以看出,新改三元叶轮的流动性能明显优于原叶轮,达到了增加容量和提高效率的目的。

参 考 文 献

- 1 忻孝康等. 叶轮机械三元流动与准正交面法. 复旦大学出版社, 1988 年
- 2 叶振邦等. 离心式制冷压缩机. 机械工业出版社, 1981 年
- 3 上海机械学院. 叶轮机械气体动力学基础. 机械工业出版社, 1983 年

作者简介:马胜远,男 27 岁,1991 年毕业于清华大学工程力学系,现在哈尔滨七〇三研究所压气机设计室工作。在大庆 30 万吨乙烯扩容改造工程中,与他人共同完成了裂解气压缩机三元叶轮叶片造型设计、三元流场计算等工作。该文系作者应用三元流场计算结果指导实际改造工程的总结。改造工程现已取得了成功,该文不失为理论与实践相结合的一个好范例。

通讯处:150011 哈尔滨市 78 信箱

纪念世界反法西斯战争及抗日战争胜利五十周年!

忘 记 就 等 于 背 叛 !

国外热电冷三联产的现状和前景—热电联产工程系列报告之四=The Present Status and Future Prospects of Overseas Engineering Projects for the Triple Production and Supply of Thermal Energy, Electricity and Refrigeration—the Fourth in a Series of Technical Reports on Cogeneration Systems [刊,中]/Qiang Guofang(Harbin 703 Research Institute)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(5). -259-265

On the basis of three earlier reports by the present author this paper focuses on some engineering projects for the triple production and supply of process steam, electricity and refrigeration, a new technology evolving from conventional cogeneration systems. The basic concepts and some specific application examples of the said technology are presented along with a general review of the related research work currently conducted in China and a brief assessment of the development prospects. Key words: cogeneration, district heating and refrigeration, heat pump, absorption refrigerator

退役航空涡扇发动机地面应用的有效途径之一——再热燃气—蒸汽联合循环=Combined Gas-steam Turbine Reheat Cycle—an Effective Approach for the Ground Application of Out-of-commission Aero-turbofan Engines[刊,中]/Wu Haoshan, Tao Yue (Harbin 703 Research Institute)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(5). -266-271

Discussed in this paper is a combined gas-steam turbine reheat cycle with an out-of-commission aero-turbofan engine serving as the gas generator. The combustion gas of an inner duct after mingling with the air of an outer duct is heated in a reheat combustor and then enters a power turbine to do expansion work. With the the help of a waste-heat boiler a certain portion of the gas turbine exhaust gas heat is recovered to produce steam for driving a steam turbine, rendering useful power. Through specific examples and calculations it is shown that the said cycle features high power output and significantly enhanced cycle efficiency. Key words: aero-turbofan engine, combined gas-steam turbine reheat cycle, waste-heat utilization

离心叶轮内部三元流场计算在实际工程中的应用=The Calculation of the Inner Three-dimensional Flow Field of a Centrifugal Turbine Disc and Its Engineering Applications[刊,中]/Ma Shengyuan, Zhao Yousheng, Liu Yuliang (Harbin 703 Research Institute)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(5). -272-278

By use of two kinds of relative stream surface theory and a finite differential method the mathematical solution of a centrifugal turbine disc inner flow field has been attained. Based on the calculation results the authors have identified the deficiency of the original turbine disc structural design and calculated the inner flow field of the newly improved turbine disc. Key words: flow field, numerical computation, turbine disc modification

EC-301 旋转叶轮整体结构应力分析=The Stress Analysis of a Rotating Turbine Disc Integral Structure[刊,中]/Zhou Chuanyue, Wang Xu(Harbin 703 Research Institute)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(5). -279-282

By way of the three-dimensional stress analysis of EC-301 closed type centrifugal turbine disc integral structure the authors have come up with a novel method of integral structure stress analysis for a rotating turbine disc by using general finite element analysis procedures and temperature-treated interference fit. Also given is a method for the identification of slackening out and the determination of a suitable interference fit between the turbine disc and the shaft. Key words: turbine disc, finite element, stress analysis

燃气轮机余热锅炉的设计特点=Design Features of Waste-heat Recovery Boilers for Gas Turbines[刊,中]/Chen Qiduo, Liu Changhe, Zhao Shiguang, Chen Bin, Sun Hongyu. (Harbin 703 Research Institute)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(5). -283-290