

热力系统综合评价模型研究

刘 卫 华, 昂 海 松

(南京航空航天大学 宇航学院, 江苏 南京 210016)

摘 要: 提出一种综合评价模型, 它采用分层评价体系, 将社会环境对热力系统各方面的要求作为评价模型的第一层, 而对各方面要求的具体评价指标作为模型的第二层, 应用模糊综合评价方法, 将两层因素结合在一起, 评价结果通过模糊运算隶属度的大小来反映。文中还通过对具体实例的应用, 证实该模型的可行性及合理性。

关 键 词: 热力系统; 综合评价; 模型; 经济; 环境; 模糊数学

中图分类号: TK515 文献标识码: A

1 前 言

任何热力系统都具有多种属性, 除了反映系统在物理环境下的工作能力、性能参数, 在经济环境下的运行费用、制造成本等定量指标外, 还有反映系统在工程环境下的劳动安全程度、对生态环境的污染和侵蚀等定性指标, 因此, 评价热力系统必须综合考虑经济、环境、管理等多方面因素。特别是随着我国把环境保护和可持续发展列入国家发展目标的重中之重, 再单纯强调系统的经济性而忽视环境、节能要求的评价方法已不能适应社会发展需要, 必须改进。

人类社会文明进步对热力系统综合评价表现出一定的约束力, 而这些约束力大小, 单纯用能量和热经济学分析都难以直接反映, 因而需要对现行的

分析方法进行拓展。本文所提出的评价模型就是这方面的探索。

2 现行评价方法的缺陷

现行评价方法可分为两类: 一是单纯从经济性要求出发^[1~2]; 二是综合考虑经济、环保等多方面的要求^[3~4]。在可持续发展的要求下, 第一类评价方法的缺陷是不言而喻的。就第二类评价方法而言, 由于对环境因素考虑的出发点不同, 它又有两种形式: 一是从环保所需的治污费出发, 如文献[3]所述。该评价方法就是将对环境的定性要求转化为治污费用多少来定量表达, 它的主要缺陷在于: 选择热力系统时, 人们首先是希望该热力系统不造成环境污染, 这是用治污费无法反映的; 同时限于当前的技术水平, 某些热力系统对环境的污染也不是多用一点治污费就能解决的事情。也就是说, 治污费用并不能全面地反映环境对热力系统的要求, 它仅反映问题的一个方面。事实上, 这也是一种经济性的评价方法。文献[4]介绍了另一种综合评价模型, 它的基本做法是: 设某一热力体系优化决策的论域 U 是评价系统方案的集合, 选择对热力系统起着重要影响作用的因素指标, 建立因素指标集合 V , 通过研究各热

收稿日期: 2002-07-04

作者简介: 刘卫华(1965-), 男, 湖南衡阳人, 南京航空航天大学教授。

参考文献:

- [1] 岑可法, 倪明江, 骆仲决, 等. 循环流化床锅炉理论设计与运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [2] 程乐鸣, 骆仲决, 方梦祥, 等. 卧式热交换式方形分离器[P]. 中国专利: ZL 00201914. 0.
- [3] 周 强, 程乐鸣, 骆仲决, 等. 方型卧式分离器的试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), (已录用).
- [4] CHENG LEMING, ZHOU QIANG, LUO ZHONGYANG, et al. De-

velopment of a horizontal heat-exchanger square cyclone[A]. **Circulating Fluidized Bed Technology VII Proc of the 7th Inter Conf on Circulating Fluidized Beds**[C]. Canada: Niagara Falls, Ontario, 2002. 551-558.

- [5] SAHA S K, BASU P, DYTIA A. Performance of a novel horizontal gas-solid separator in a circulating fluidized bed riser[A]. **Circulating Fluidized Bed Technology VII Proc of the 7th Inter Conf on Circulating Fluidized Beds**[C]. Canada: Niagara Falls, Ontario, 2002. 567-574.

(辉 编辑)

力方案与因素指标集合 V 之间的相互作用, 构造一个评价矩阵; 研究因素指标集内部的相互作用, 获得基于因素重要程度的权重向量; 建立模糊方程, 计算权重向量与评价矩阵相互作用的值, 通过隶属度来反映对各热力方案综合评价的结果。在该模型中, 由于因素指标中有反映环保、节能方面的参数, 因此它综合考虑了多方面因素, 这是该模型的可取之处。但它存在一些缺陷: 首先是因素指标个数的多少对综合评价结果有极大地影响, 在实际情况中应如何选择反映各方面要求的因素指标个数就是难题; 其次在两两比较各因素以确定重要度权系数时, 反映环保要求的一些定性因素与反映经济性的一些定量因素就很难直接给出各自的重要度, 如: 要确定系统初投资费用高低与噪声大小的重要度时, 就很困难; 同时, 当因素指标个数较少时, 不能对系统进行客观地评价; 而因素指标个数较多时, 该模型复杂, 计算难度加大。

综上所述, 目前常用的一些评价方法都存在这样或那样的缺陷, 需要改进。

3 分层评价模型的建立

3.1 评价模型在方法论上的特点

任何热力系统的决策研究都是一个与自然、社会、经济、工程相结合的复杂大系统的评价和多方面人员参加的多目标决策优化问题, 其总要求是达到经济效益、环境效益和社会效益综合最优的目标。由于影响经济性的因素一般用数值表示, 可采用定

量分析; 而反映环境和社会的一些因素则不能或不易用数值表示, 需采用定性分析。因此对热力系统的评价既要考虑多种因素, 又是一个模糊概念。只有对定量、定性分析的各种因素加以综合评价, 使其“定量化”, 才能得出合理的结论, 也就是说, 综合评价模型应建立在模糊分析基础上。

3.2 评价模型结构

评价模型基本构造如图 1 所示。它是由两层评价体系组成的, 第一层是从经济、环境、社会、节能等方面来综合评价各方案, 评价的依据来源有二: 一是第二层的各因素模糊运算结果, 二是第一层的各方面权值大小; 第二层是对各方案中每一方面分别进行评价, 其评价方法与单纯的经济性评价方法相类似, 通过模糊运算, 为第一层的综合评价提供基本数据。由于第一层着重考虑影响热力系统评价的各主要方面, 它具有很好的发展性, 可随社会进步的要求而拓展, 同时因不涉及到各方面因素的具体指标个数, 对各方面的重要度评价亦可根据社会进步及政策要求来合理分析, 使综合评价结果更符合于实际; 同时模型中的第二层分别就各方案的某方面进行综合评价, 它仅考虑同类因素, 不仅使问题处理方便, 而且可采用一些技术成熟的评价方法, 充分利用前人的研究成果。同时, 由于是同类指标进行对比, 各指标的重要度确定将更合理, 为评价的准确性提供了前提条件; 采用分层模型, 不但降低了数学处理的难度, 同时使分析过程更符合人类思维方式, 可弥补目前常用评价方法的某些缺陷。

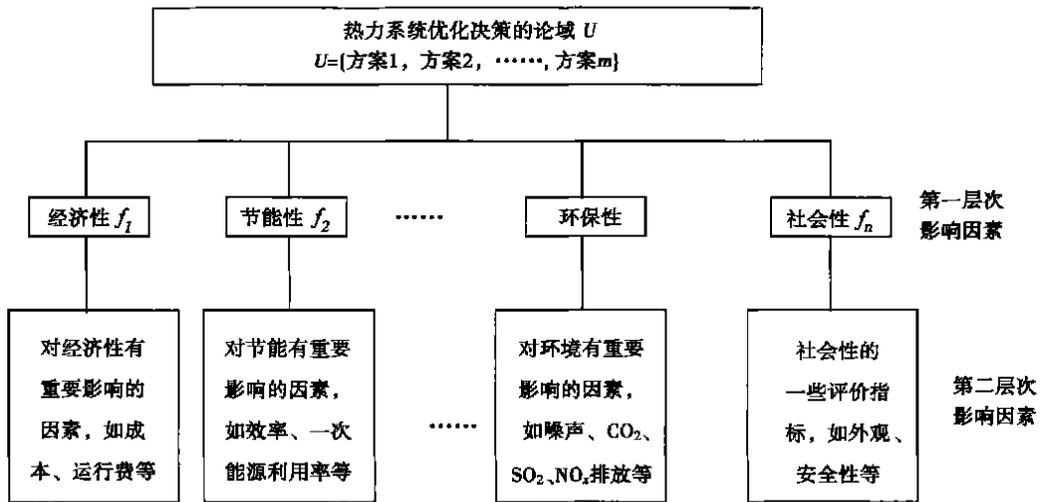


图 1 评价模型基本构造图

3.3 评价模型的计算方法

设某一热力系统优化决策的论域 U 是评价各具体方案的集合

$$U = \{ \text{方案 1, 方案 2, } \dots, \text{方案 } m \} = \{ U_1, U_2, \dots, U_m \}$$

取方案评价的因素指标集合为 $V: V = \{ f_1, f_2, f_3, \dots, f_n \}$, 其中 $f_1, f_2, f_3, \dots, f_n$ 分别表示经济性、节能性、环保性等各方面, 通过研究优化决策论域 U 与因素指标集 V 之间的相互作用, 构造出一个评价矩阵

$$R = (r_{ij})_{m \times n} \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m$$

R 是因素指标集到决策域的一个模糊关系, $r_{ij} = \mu_R(f_i, u_j)$ 表示因素 f_i 对决策目标 u_j 的隶属度。

通过研究因素指标集内部的相互作用, 可以获得因素 V 的因素重要程度模糊子集

$$A = [\mu_R(f_1), \mu_R(f_2), \dots, \mu_R(f_n)] = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$$

式中: $\alpha_i (0 < \alpha_i < 1)$ 为 f_i 对 A 的隶属度, 也称为因素 f_i 的重要程度系数。

当权重向量 A 和模糊关系矩阵 R 已知时, 可建立模糊方程:

$$B = A \circ R$$

B 中的各元素 $b_j (j = 1, 2, \dots, m)$ 是在广义模糊合成运算下得出的最后结果。 B 称为决策论域 U 上的模糊子集, b_j 为方案 U_j 对综合评价方案模糊子集 B 的隶属度。按最大隶属度原则, 与 $b_j (j = 1, 2, \dots, m)$ 中最大者相对应的方案 U_j 为最优方案^[9]。

由于各方案的经济性、节能性、环保性等方面都是由众多因素综合来决定的, 因而, 亦可重复上述过程, 分别计算出各方案中这些方面的具体数值, 即 f_i 值(当然, 也可采用其它方法来确定 f_i 值)。

4 应用实例

以北京某小区供热工程为例, 论述模型的具体应用。设需评价的方案是: (1) 热电联产, (2) 燃气区域锅炉房, (3) 燃煤区域锅炉房, (4) 分散式燃气锅炉房, (5) 分户单独式燃气炉, (6) 热泵供热。各方案的经济性、节能性、环保性、社会性影响因素的原始值分别见表 1~表 4^[6~8]。

表 1 各方案经济性影响因素值

	初投资 /万元	年经营成本 /万元·年 ⁻¹	燃料费年值 /万元·年 ⁻¹	年总费用值 /万元·年 ⁻¹	总费用现 值/万元
方案 1	10 192.2	684	368.3	1 912.1	12 550.5
方案 2	10 337.2	2 273.8	1 951.3	3 519.3	12 746.3
方案 3	9 366.8	783.2	473.5	1 911.8	11 680.3
方案 4	7 318	2 242.2	2 022.7	3 123.9	8 957.7
方案 5	7 552.65	2 257.3	2 073.1	3 167.4	8 928.6
方案 6	18 750	1 725.1	1 499.6	3 984.3	20 434.5

注: 各方案的基准收益率取 12%, 其中安全收益率为 8%, 风险报酬率 4%; 寿命年限均为 20 年, 经济寿命期终结时的残值均为初投资的 10%。

表 2 各方案环保性影响因素值

	NO _x	CO ₂	SO ₂	CO	烟尘
方案 1	中等	中等	中等	良	中等
方案 2	良	良	良	良	良
方案 3	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微
方案 4	良	良	良	良	良
方案 5	中等	良	良	良	良
方案 6	优	优	优	优	优

注: 燃气两用炉布置在每户, 燃烧时产生的 NO_x 直接排放至室外, 户与户之间相互影响, 所在 NO_x 的评价项中评价值为中等。

表 3 各方案节能性影响因素值

	一次能源利用 率/%	单位燃料 供热比	单位面积 供热能耗 /煤·年 ⁻¹ ·m ⁻²	单位燃料 供热量
方案 1	90	1.29	27.88	26 466 kJ/kg
方案 2	85	1.22	29.26	34 850 kJ/m ³
方案 3	70	1.0	35.96	20 516 kJ/kg
方案 4	85	1.22	29.62	34 850 kJ/m ³
方案 5	80	1.14	31.54	32 804 kJ/m ³
方案 6	110	2.14	16.78	61 500 kJ/m ³

表 4 各方案社会性影响因素

	技术先进性	安全性	分户收费 方便性	系统维护 方便性
方案 1	好	好	中等	中等
方案 2	较好	较好	中等	中等
方案 3	中等	较好	中等	中等
方案 4	较好	中等	较好	较好
方案 5	较好	一般	好	较好
方案 6	较好	较好	较好	好

4.1 各方案经济性、节能性评价

由于原始数据中, 反映经济性、节能性的指标均为定量数值, 可直接构成因素指标矩阵 F_1, F_3 , 按定量指标综合决策法对 F 矩阵进行评价, 各因素指标的评价值 r_{ij} 为

$$r_{ij} = \begin{cases} 0.1 + \frac{f_{\max} - f_{ij}}{d}, & \text{当 } f_i \text{ 为负指标时;} \\ 0.1 + \frac{f_{ij} - f_{\min}}{d}, & \text{当 } f_i \text{ 为正指标时。} \end{cases}$$

式中: $d = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{1 - 0.1}$ 。

由计算出的 r_{ij} 可构成评价模糊矩阵 R_1, R_3 ; 采用判断矩阵分析法, 确定各因素的权重向量 A_1, A_3 (所谓判断矩阵法, 是将 n 个评价因素排成一个 n 阶判别矩阵, 通过两两因素的对比, 根据各因素的重要程度来确定矩阵中因素值的大小, 然后计算判别矩阵的最大特征根及其对应的特征向量, 对特征向量进行归一化处理, 所得结果即为权重向量); 选择综合决策判别初始模型为: $M(\bullet, \oplus)$, 运用模糊计算, 可得出隶属度评价结果:

$$B_1 = (0.716 \quad 0.354 \quad 0.728 \quad 0.446 \quad 0.431 \quad 0.322) \quad \text{经济性评价结果}$$

$$B_3 = (0.713 \quad 0.624 \quad 0.454 \quad 0.624 \quad 0.536 \quad 0.769) \quad \text{节能性评价结果}$$

4.2 各方案环境、社会性评价

由于原始数据中, 反映环境、社会性的指标均为定性值, 因此需要采用定性分析量化的方法, 具体作法如下: 构造一个定性因素的评语集 V , 其论域为 $V = \{\text{优, 良, 中等, 及格, 不及格}\}$, 给评语集赋值 $Q = \{0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5\}$, 再建立各定性因素的评语集隶属度的模糊子集 $R = \{R_1, R_2, R_3, R_4, R_5\}$, 应用 $U_j = R_k Q^T$, 可确定各评语的定量值, 如表 5 所示。

表 5 评语等级及隶属度子集

评语	等 级					隶属度的模糊子集	定量值 U_j
	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5		
优	0.67	0.33	0	0	0	R_1	0.843
良	0.25	0.5	0.25	0	0	R_2	0.8
中等	0	0.25	0.5	0.25	0	R_3	0.7
及格	0	0	0.25	0.5	0.25	R_4	0.6
不及格	0	0	0	0.33	0.67	R_5	0.533

利用该方法, 可将表 2 和表 4 中的定性指标量化, 然后采用 4.1 中所述的过程对各方案进行环境、社会性评价, 评价结果如下:

$$B_2 = (0.478 \quad 0.533 \quad 0.4 \quad 0.533 \quad 0.513 \quad 0.562) \quad \text{环境因素评价结果}$$

0.562) 环境因素评价结果

$$B_4 = (0.551 \quad 0.491 \quad 0.415 \quad 0.518 \quad 0.533$$

0.533) 社会性评价结果

4.3 综合评价结果

将计算得出的有关各方案经济性、环保性、节能性、社会性评价结果综合在一起, 构成综合评价因素矩阵 F

$$F = \begin{bmatrix} 0.716 & 0.354 & 0.728 & 0.446 & 0.431 & 0.322 \\ 0.478 & 0.533 & 0.4 & 0.533 & 0.513 & 0.562 \\ 0.713 & 0.624 & 0.454 & 0.624 & 0.536 & 0.769 \\ 0.551 & 0.491 & 0.415 & 0.518 & 0.533 & 0.533 \end{bmatrix}$$

对 F 矩阵按定量指标综合决策法进行处理, 得出评价模糊矩阵 R , 采用判断矩阵分析法, 确定权重向量 A , 通过模糊运算, 得出综合评价最终结果 B

$$B = (0.795 \quad 0.443 \quad 0.674 \quad 0.743 \quad 0.558 \quad 0.752)$$

根据最大隶属度原则, 可知方案 1 为最优, 即最佳供热方案是热电联产; 其次是热泵供热和分散燃气锅炉房供热。热电联产是我国的基本国策, 得到各方面的支持和保证, 而热泵技术及分散燃气锅炉供热目前发展势头很好, 这说明评价结果与实际情况相吻合, 证实了该评价模型的可行性和合理性。

5 结束语

任何热力系统都具有多方面的属性, 对其进行评价必须综合考虑这些属性, 本文所给出的热力系统评价模型就是针对解决这个问题而提出的一种新方法。

参考文献:

- [1] 李新国, 赵 军, 朱 强. 地源热泵供暖空调的经济性[J]. 太阳能学报, 2001, 22(4): 418-421.
- [2] 李延喜. 供热方式的经济效益分析及发展趋势研究[J]. 暖通空调, 1999, 29(1): 28-30.
- [3] 杨 昭, 张世钢, 刘 斌, 等. 燃气热泵及其它供热空调系统的能源利用分析评价[J]. 太阳能学报, 2001, 22(4): 171-175.
- [4] 郑祖义, 彦启森, 江 亿. 热经济工程模糊分析[J]. 清华大学学报, 1996, 36(4): 19-22.
- [5] 贺仲雄. 模糊数学及工程应用[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1983.
- [6] 曹 勇, 陈光明, 许文发. 大中型城市供热模式优化方法研究[J]. 暖通空调, 2002, 32(1): 5-8.
- [7] 李先瑞, 韩有朋, 赵振农. 住宅区采暖方式的选择[J]. 北京节能, 1999(6): 3-6.
- [8] 李先瑞. 多种能源采暖方式的现状与展望[J]. 节能与环保, 2001(2): 11-15.

(辉 编辑)

非线性鲁棒控制方法的新进展 = **New Developments in Robust Control Methods for Nonlinear Systems** [刊, 汉] / LI Da-zhong, WANG Xiao-hui, ZHANG Ai-ping (Power Engineering Department, North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18 (3). — 220 ~ 223

Main methods of nonlinear robust control are described. In the light of various types of uncertainty specific to controlled objects of a nonlinear system the authors have expounded recent advances in nonlinear robust control methods, such as an improved version of Lyapunov and H^∞ method as well as an innovative method involving a combination of the above improved version with an intellectualized method. On this basis some new research results in the above area of study are analyzed. **Key words:** nonlinearity, robust control, uncertainty, intellectualized method

四角切圆空气分级燃烧技术及应用 = **Graded Air Feeding-based Tangential Corner Firing Technology and Its Applications** [刊, 汉] / ZHANG Hui-juan, SONG Hong-peng, HUI Shi-en (Institute of Energy & Power Engineering under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18 (3). — 224 ~ 228

The theory and technology of tangential corner firing with graded air feeding are described, and axial and radial air feeding-based combustion processes separately explained. The technical merits and demerits of these two processes are discussed. On the basis of investigating copious relevant literature available in China the authors give a comprehensive account of the current situation about the use of the above-cited technology at Chinese power plants. **Key words:** pulverized coal-fired boiler, graded firing, NO emissions reduction

卧式热交换式方形分离器分离性能的试验研究 = **Experimental Study of the Separation Performance of a Square Separator Assuming a Horizontal Heat Exchange Mode** [刊, 汉] / WANG Dong, CHENG Le-ming, ZHOU Qiang, et al (Thermal Engineering Institute under the Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18 (3). — 229 ~ 233

An experimental study was conducted of the separation efficiency and separator resistance of a horizontal heat exchange mode-based square separator under different air speeds and inlet concentrations. The influence of operating conditions on separation performance was analyzed. To achieve an optimized design, the authors have carried out optimization tests with respect to various construction schemes. The test results indicate that a separator incorporating an exhaust pipe with a diameter and insertion length equal respectively to 1/3 and 1/15 of separation characteristic size will offer high efficiency and low resistance, etc. For solid particles with a diameter greater than $100\mu\text{m}$ the separation efficiency will be in excess of 90% and the resistance less than 1.5 kpa. **Key words:** separator, square separator, horizontal separator

热力系统综合评价模型研究 = **The investigation of a Comprehensive Evaluation Model for a Thermodynamic System** [刊, 汉] / LIU Wei-hua, ANG Hai-song (College of Aerospace Engineering under the Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, China, Post Code: 210016) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18 (3). — 233 ~ 236

A comprehensive evaluation model is proposed. By using a stratified evaluation system the requirements of social environment on various aspects of a thermodynamic system are assumed to be the first layer of an evaluation model, while specific evaluation indexes are taken as the second layer of the model. With the use of a fuzzy comprehensive evaluation method the factors of the two layers were joined together. The results of evaluation may be reflected through the magnitude of subordination degree of fuzzy operations. The feasibility and rationality of the model has been substantiated by its use on some specific cases. **Key words:** thermodynamic system, comprehensive evaluation, model, economy, environment,

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