

热力学分析与经济理论结合的新探讨

——从热力学定律中揭示其内含的经济理论

王加璇, 王清照, 张晓东

(华北电力大学 动力系, 北京 102206)

摘 要: 阐明从物理学诸定律中寻求其暗含的经济理论可成为热力学分析与经济学分析相结合的一条新路, 具体分析了从热力学第一和第二定律中揭示其内含的经济理论, 为此必先澄清这两条定律所存在的误导, 特别是热力学第二定律, 其误导很深。对 Georgescu Roegen 关于“熵定律本身本质上是诸定律中最经济的经济过程”的道理有进一步理解。

关 键 词: 熵; 熵定律; 新经典经济学; 生态经济学

中图分类号: TK123

文献标识码: A

1 引 言

迄今我们所研究和应用的热经济学的理论与方法论, 虽经若干不同模式, 但基本上还是建立在其创始人和先驱者们所开创的框架内——即两门学科的交叉而形成的结合。是否还会有其它方式的结合? 本文作者们参阅了相关文献资料, 进行了探讨, 认为从物理学诸定律, 特别是热力学的第一和第二两定律中寻求其内含的经济理论, 找到共同变化的规律, 是能够达到新方法结合的目的地, 并认为这种结合比现有方式的结合更深层一些, 就是说要更深入细致地研究热力学与经济学双方的理论与方法, 寻求其变化的共同规律, 使之更严密而全方位的结合。Nicholas Georgescu Roegen 生前曾说过“熵定律本身就可成为所有自然定律中本质上最经济的经济过程”。当然这里说更深层一些的涵义也包括从经济学理论中获取更精辟的理论来丰富热力学本身, 如同 Antonio Valero 在熵成本理论方面所作的贡献。

从物理学诸定律中寻求其内含的经济理论的研究在国外早就有人研究了。其先驱者为经济学家而非热力学工作者, 并已初步形成“新经典经济学”(Neoclassic economics)和“生态经济学”(Ecoeconomics)的框架, Nicholas Georgescu Roegen 及其学生们作了大量的贡献, 也有其他方面的专家, 如奥地利

国际高级系统分析研究所的 R. U. Agre 等, 都已取得了进展。但从整体上看, 尚在起步阶段, 他们所发表的许多论文, 尚未引起更多的重视和关注, 国内这方面的研究更为少见。故此我们认为这是两学科结合的一条新路, 从而形成本文, 愿与同行们交流。

2 这种方法形成热经济学的总方法论

这种方法形成热经济学的总方法论是从物理学诸定律, 主要是从热力学第一和第二两定律中寻求其内含的理论, 取其共同的结合点来作过程进行的约束条件, 从而将热力学与经济学的两种分析合二为一, 一举进行分析和优化。

我们知道热力学第一和第二两定律, 特别是热力学第二定律, 多有微妙而费解处, 因此常导致猜测和误导, 因此在分析中常应将它们澄清, 进行正本清源的工作, 为探索其内含的经济理论铺平道路。热力学第一定律的相关理论比较坦直, 费解处不多, 可以在下面结合分析方法予以澄清。然而第二定律却大不相同, 多有曲折费解处, 甚而混淆着一些神秘色彩, 为节省篇幅已作另文《热力学第二定律的再研讨》发表, 这里进行分析时只作一般的说明。

3 热力学第一定律内含经济理论的分析

第一定律虽无太多费解处, 但为了揭示其内含的经济理论, 同样也需要作一些细致入微的分析和探讨。首先它是物质守恒和能量守恒两条分立的定律合二为一而形成的, 这是因为在上个世纪初爱因斯坦发现相对论同时找到质能转换的规律, 即质量和能量可以相互转换, 分立的两条定律都要失真, 而结合起来才能保持其守恒性。但若探求其内含的经

收稿日期: 2001-11-23

基金项目: 国家“973”基础研究基金资助项目(G2000026307)

作者简介: 王加璇(1930-)男, 山东龙口人, 华北电力大学教授。

Copyright © 2002 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

济理论, 两定律却又各守自己的法则, 因而不能笼统对待。所幸在没有核反应条件下, 允许将两定律分开进行研究。

质量守恒定律比较简单, 由此定律所建立的物质平衡原理与经济平衡原理完全一致, 它所含的经济理论, 就是在经济过程中输入物质必然等于其输出物质, 这里只需注意: 输入与输出物质的平衡必须细分到各自所含的化学元素也一一对应平衡, 这样在经济过程中双方在价格平衡上也相吻合。

这条定律中所蕴涵的经济理论可表述为: 所有输入过程的原料(资源)皆取之于环境, 经历过程后分别变成产品(物质)、排放(物质)和损失(物质), 在整个循环中, 最终都变成废料和污染环境的物质而重返到环境中去。伴随着物质生产和消费的扩大与发展, 也与经济因素的扩大与发展完全一致。循环中可能有物料使用的再循环, 这点可以不予理会, 因为物料的再循环使用只是提高资源效能的手段, 其再循环的过程只能使其能量强化, 而不能增加输入过程的物质, 而且它本身也具有不完善性, 故不可能补偿所有的排放和损失。

至于能量守恒法则就比质量守恒法则复杂一些。其复杂性来源于能量守恒性, 按其科学定义, 能量既不能产生也不能消灭, 只能按一定规律相互转换其形式。然而参与经济过程者, 必是商品, 商品必须是在经济过程中能耗尽者, 而不应该是守恒量。输入能量等于输出能量的法则对于工程技术人员是很重要的, 但对于经济师来说是没有意义的。因为守恒量不具备商品的品格, 故此法则不符合经济规律。多年来不少人在此问题上存在着误导。就以热经济学与焓经济学学科名称为例, 存在着这类误导。有人公开解释像宣布定义一样地说: “在第一定律分析的基础上与经济因素相结合者谓‘热经济学’; 在第二定律分析基础上与经济因素相结合者谓‘焓经济学’”。这样的“分摊”似乎是很公平合理, 殊不知第一定律分析是以能平衡原理为基础的, 那么守恒量的能不具备商品的品格, 又怎能与经济因素相结合呢? 又怎样给它定价呢? 其实“热经济学”这个名称是 M. Tribus 等人首先使用的, 而他们也主张热经济学是在焓分析的基础上发展而来的, 又怎能强加上“在第一定律分析基础上的结合”呢? 原来热经济学的首创者们的本意是强调热力学与经济学两个学科的交叉, 而用“Thermodynamics + economics”, 简化而缩写成“Thermo-economics”, 进而将这个联合字的连接符“-”都省略了, 而成为“Thermoeconomics”。

1986 年 A. Valero 公布了其焓成本理论以后, 启用了“焓经济学”的名称, 是可以理解的。焓成本理论跨越的学科领域超出了热力学的学科范围, 他明确地说: “热力学第二定律所提供的信息是不够的”, 同时又说: “只要不走出物理学范围就能解决问题”。因此, 他用“焓经济学”的名称是当之无愧的。焓既是热力学参数, 更是个物理量。

这段论叙主要是说明常见的一些误导。其实在社会上俗语中这类误导还是很多的, 如“焓能”, “能耗”和“能损”皆为俗称叫法, 实指是“焓”, “焓耗”和“焓损”, 要清理这类误导, 将能平衡换上焓平衡, 把能量换成焓, 上述问题就可以解决了。以焓代替能, 可以在经济过程中耗尽, 符合商品的品格。在与经济过程结合中, 焓的作用越来越显出其突出的作用与地位, 特别是在未来经济发展中。限于篇幅, 准备在另文“焓在经济领域中的作用与意义”中细加讨论。

4 热力学第二定律内含经济理论的分析

与第一定律相比, 热力学第二定律是更有内涵、更重要的定律, 所以我们常把它视为热力学的核心内容。但是它不象热力学第一定律那样坦直而易于理解。相反, 它是充满了微妙费解, 甚至有些神秘色彩的。因此, 其误导较第一定律者更多更深, 另有专文《热力学第二定律的再研讨》讨论, 为节省篇幅, 这里只做一些说明。因为这些误导不消除, 难以分析其内含的经济理论。

产生这些误导的根本原因在于 150 年前鲁道夫·克劳修斯导出焓 $dS \geq \frac{dQ}{T}$ 这个公式, 并未说清其物理含义, 只指出等号者代表可逆过程, 大于号者代表不可逆过程。自然界中极少可逆过程, 因此这个熵函数只是有增无减地增加着, 从而派生出熵增原理。Kilwin 发现熵值这样有增无减地发展下去势必达到最大值而全面地达到热平衡, 世上一切活动都将停止, 这就是“热死”或叫“热寂”, 在与宗教的“世界末日”说混合起来而穿上一件神秘的外衣。连克劳修斯本人也无可奈何地承认: “这是不可避免衰败的不详之兆”。这是熵与熵定律问世以来遇到的第一次误导。但是这些都未影响熵函数的意义和使用价值, 致使它的应用范围很广而真正理解的却很少。著名的天文学家 Eddington 把它誉为“宇宙之超级定律”, 爱因斯坦称赞它为“物理学诸定律中的最高定律”。近年来

潜心研究“新经典经济学”的 Georgescu Roegen 又把它作为其新经济理论的“奠基石”。随着这些赞誉影响的扩大,特别是随着把熵定义为“无序性的度量”和把熵增原理描述为“从有序到无序的发展”,其应用范围不断膨胀,以至延伸到社会、政治、经济、心理……等人文科学的各个领域,连被人称为“Technophobe”(鄙薄技术者)的美国著名作家和社会活动家 Jereny. Rifkin 也在 1981 年出版了一本科普读物,书名就叫《熵:一种新的世界观》,他是著作家,因此收集了大量而详实的资料和数据,以其锐利的笔触写出了一本引人入胜的科普读物。其目的与动机也是不错的,是针对 60 年代西方国家在经济无止境的大发展中所形成的“增长无限论”而发的。我们知道 1972 年 MIT 以米杜斯为首的 17 人研究组经过长期调查,向罗马俱乐部提交了一份题为《增长的极限》的报告,以大量的统计数字来批驳所谓“增长无限论”,而 Rifkin 继其后出版了此书,指出“增长无限论”实为统治欧洲 400 年的牛顿机械论作案,因此他要抛出“熵世界观”来取代机械论。应该说其出发点是好的,因此得到 Georgescu-Roegen 的赞同并给他的书写了一个“跋”(afterword)。其中除对 Rifkin 针对当前天然资源呈现的匮乏迹象和环境污染严重的状况而写作的动机加以肯定外,还着重指出其对熵定律理解的片面性,从而得出悲观结论的错误。

Georgescu-Roegen 所指其错误,我们理解至少有二:一是用“从有序到无序的发展”来定义熵增原理,貌似正确而实则不正确,因为有序与无序定义不能界定,在本过程中的有序很可能是前一过程的无序,而本过程的无序又很可能是下一过程的有序。这个问题是比较容易解决的,只要把熵替换成 ΔH 就可以了。过程的熵增换成 ΔH 减,不论过程开始的 ΔH 或其终了的 ΔH 都可以计算出来。这里我们又一次看到了 ΔH 的作用。更大的误导是把从有序到无序的发展扩大成一切事物发展的“总规律”,甚而夸张成世界观。从有序到无序的发展有悖于我们理解的进化,进化魔术般地创造着本星球上的总价值和总有序性,这是不可忽略的,一过程的进行,不论是人工过程还是天然过程都在伴随着熵增的同时而进行着进化过程,忽视了这一面必然导致悲观的结论,因而是极端错误的。那么进化又以什么来表征,如何量化呢?我们说进化使过程中的物理对象的复杂性(complexity)增大,复杂性又可以用系统的信息量来表征,信息量本可用 Shannon 所导出的统计信息量的公式 $H = - \sum P_i \cdot \ln P_i$ (式中 $\sum P_i = 1$) 来量化,但阅览文献资料时才发现有人对此式

的导出提出质疑。这里不想再纠缠于枝节,何况信息论并非我们的专长,回避此公式也可以解决信息量统计的问题。当今高科技,特别是计算机科学的发展,使复杂性和信息之间的关系更加明朗,使一般物理对象都可用其图象和设计在计算机上显示,于是其复杂性的信息量也可用输入计算机时所用最少指令数目来表征,包括它与人工智能之间的关系现在也有人在重点地研究。

我们已经把关于第二定律的误导基本上澄清,还剩下“热死”会不会存在呢?这里有两个问题需要指出:一是推动地球上进化的动力是什么?二是这个推动力所能支持的时间。推动进化过程的推动力是太阳系中太阳所给出的低熵能流,即辐射 ΔH ,这是重要源泉。“热死论”产生的根源就在于把我们赖以生存的地球视为孤立系,孤立于太阳辐射之外。至于太阳上的核聚变辐射能历时多久,我们只能引用权威人士的言论了。著名生态经济学专家 Daly 节录了丹麦的 Mogen Boserupin 的一段话:“太阳足够消耗数亿万年,远远超过现代人类所能想象的遥远,因此,熵的故事或由它产生的恐惧在很准确的观念中是不必要的,……”。

上述这些问题的解决,可使我们回到正题,如何从熵定律中寻求经济理论。Georgescu Roegen 已经进行过这一工作。他的《熵定律与经济过程》一文就是回答此问题的。概言之,他是从认识论上来解决建立什么样的经济学体系的,认为当今所谓之“标准经济学”是机械论的,它所研究的过程是可逆的,没有质量上的差别。但按照熵定律来考察,熵流却是不可逆的。它是有用的资源和无用的废料在质量上差别的尺度,这种质量的变化是单向而不可逆的。与之相比,机械论的经济模型不能处理经济生活中最基本的事实。进而言之,所以有熵流存在,即所消耗的低熵流,是因为维护经济过程的需要,也是该过程在依赖的环境中引起质变的补偿。因此,他的经济理论的框架是一幅圆流图(即循环图),取自于环境的原料(资源)经过各种企业到达商号手中分配到消费者,使用后变成废品,再回到环境中去。这样,返回环境的東西与当初取之于环境的東西在质量上有着极大的差别,而不象第一定律所内含的经济理论:“输入与输出相等”。这就是第二定律所内含的经济理论,也是 Georgescu Roegen“新经典经济学”赖以建立的基础。

5 结束语

通过热力学第一和第二定律内含经济理论的分析,使我们初步地明确热力学分析与经济学分析相结合还另有一条新途径。同时对热力学两定律本身存在着的误导和不确切的理理解进行了一次清理,提出我们的意见,对与否则还需要进一步讨论。我们体会研究这类问题需要有辩证的观点。一过程进行带来负面影响,但其另一面又可能对它是一补偿,如经过一个过程,环境发生了变化,经济上必然再经历一个相应的进化(Co-evolution)来弥补给环境带来的变化。研究这些问题时常使我们处于一个“明与暗交界”(penumbra)的两可之间。在这里 B 可以是 A,也可以是非 A,要刻意追求质量的变化才是经济过程的本质。对于热力学来说不也是一样吗?我们常说的一本热力学发展史,就是在使实际过程向理想过程趋近的刻意追求中发展起来的。说到这里我

们才能理解 Geotrgescu Roegen 关于“熵定律本是所有自然定律中,本质上最经济的经济过程”的深刻内容。

当今,人类面临着持续发展可能性的挑战,把代表质量指标的熵流置于经济理论的核心的这类暗喻尤显出其必要性。

参考文献:

[1] ROBERT U AGERS. Eco-thermodynamics: economics and second law [J]. *Ecological Economics*. 1998, 26: 189-209.
 [2] GEORGESCU ROEGEN N. The entropy law and Economic Process [M]. Harvard University Press, Cambridge, Mass, 1971.
 [3] DALY H E. Steady-state Economics[M]. Island Press, Washington D C 1991.

(渠源 编辑)

(上接第 560 页)

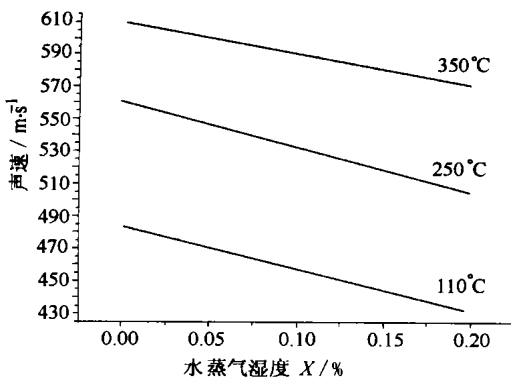


图 2 水蒸气湿度和声速的关系

4.3 可能存在的误差

本方法可能产生误差主要出现在声速的测量方面。在测定声波顺向和逆向传播时间时,应该考虑由于电路、电缆及换能器等产生的延时 τ_1, τ_2 ^[8], 则式(5)、式(6)可表示为

$$u = \frac{L}{2 \cos} \left(\frac{1}{t_1 - \tau_1} - \frac{1}{t_2 - \tau_2} \right)$$

$$c = \frac{L}{2} \left(\frac{1}{t_1 - \tau_1} + \frac{1}{t_2 - \tau_2} \right)$$

其中: τ_1, τ_2 主要由测量设备本身的性质决定,因此只要确定了 τ_1, τ_2 , 就很容易准确测量声速。

4.4 检测计微机方案

为了提高检测的效率和准确性,整体检测过程可由微机来控制。整个检测装置主要有以下几个部分组成:一个测压装置,一个测温装置,两个超声波发射接收及测时装置和一台微机。

两个超声波发射接收及测时装置分别触发换能器 1 和换能器 2,使之发射超声脉冲并分别由对方接受,测得超声脉冲顺相传播时间和逆向传播时间。微机直接读取从超声波测时、测压、测温装置中传送来的数字信号,对它们进行预处理和计算,并在屏幕上以数据、曲线等形式显示各参数和最后结果,自动进行存贮或打印。

而且,还可以将用到的图表存到微机上,以备计算时查找;表中未有的数据,微机可以采用插值的方法获得。这样不仅迅速,还免除了人工查表的麻烦和误差。

最后,计算出的 X 还可以与标准湿度相比较,超标则进入报警或进行其他控制。

参考文献:

[1] 付志胜. 译. 苏联的随钻检测气侵技术[J]. 石油钻探技术, 1990 18(1): 10-12.
 [2] 赵建福. 气液两相流动中的声速[J]. 应用基础与工程科学学报, 1999 9(3): 321-325.
 [3] 同济大学声学教研室. 超声工业测量技术[M]. 上海: 上海人民出版社, 1998.
 [4] 蔡颐年. 湿蒸气两相流[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1985.
 [5] 陈则韶. 饱和液体密度的推算法和通用算式[J]. 工程热物理论, 2001 22(6): 9-12.
 [6] 马大猷. 声学手册[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
 [7] 沈维道. 工程热力学[M] (第三版). 北京: 高等教育出版社, 2001.
 [8] 梁军汀. 微机化超声波气体流量计的研制[J]. 声学技术, 1995, 2(3): 210-213.

(渠源 编辑)

煤燃烧过程中汞释放的研究现状 = **Recent Advances in the Study of Mercury Release in a Coal Combustion Process** [刊, 汉] / WANG Quan-hai, QIU Jian-rong, WU Hao (National Key Laboratory of Coal Combustion under the Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 547 ~ 550

The average content of mercury in Chinese coals is higher than that found in coals of the United States and other countries, resulting in a relatively serious mercury-related pollution. The authors have summed up some study results concerning such pollution, focusing on the following aspects: distribution features of mercury found in coal, migration/transformation and emission characteristics as well as their control. **Key words:** mercury, coal, distribution law, migration/transformation, emission of pollutants

IGCC 电站中气化炉控制系统研究 = **A Study of the Control System of a Gasifier in a IGCC Power Plant** [刊, 汉] / NI Wei-dou WEI Si-liang, LIU Shang-ming (Department of Thermal Energy Engineering, Tsinghua University, Beijing, China Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 551 ~ 554

By way of analyzing the operating characteristics of a gasifier in an integrated gasification combined cycle (IGCC) power plant the basic configuration of a control system of the gasifier has been determined. On the basis of the gasifier dynamic characteristics a control system was designed. The results of its simulation indicate that the coupling factor between the two major links of the gasifier, namely, its temperature and syngas heating value, is relatively low. By using the control system designed by the authors it is possible to fulfill the main control aim of the gasifier. **Key words:** integrated gasification combined cycle (IGCC), gasifier, control system

部分煤气化结合流化床燃烧技术的联合循环(PGFBC-CC)发电系统参数分析 = **Parametric Analysis of a Partial Gasification and Fluidized Bed Combustion-based Combined Cycle (PGFBC - CC) Power Generating System** [刊, 汉] / YU Yan-fang, LIN Zhong-da, CAI Ning-sheng (Power Engineering Department, Southeastern University, Nanjing, China. Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 555 ~ 558

A relatively comprehensive parametric analysis was performed with respect to a typical partial gasification and fluidized bed combustion-based combined cycle (PGFBC-CC) power generating system and the main parameters influencing the system performance were identified. Furthermore, some beneficial measures and proposals have been put forward with a view to enhancing the performance of this type of power generating systems. **Key words:** partial gasification and fluidized bed combustion-based combined cycle system, power generating system, parametric analysis

超声波检测汽轮机中水蒸气湿度方法的探讨 = **Exploratory Study of an Ultrasonic Method for Detecting Steam Wetness in a Steam Turbine** [刊, 汉] / LI Kai, SHANG De-min (Department of Thermal Energy and Power Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 559 ~ 560, 564

The use of an ultrasonic method for detecting the two-phase flow wetness of wet steam is theoretically explored with an accurate analytical expression being obtained. The determination of sonic speed in a two-phase flow by the use of a pulse time-difference method features simplicity, rapidity and precision. The composition and operating principles of a wetness-detection ultrasonic device are predicted from an theoretical perspective. **Key words:** ultrasonic method, water steam, wetness, sonic speed, detection

热力学分析与经济理论结合的新探讨——从热力学定律中揭示其内含的经济理论 = **A New Exploratory Study on the Combination of Thermodynamic Analysis with Economic Theory - an Economic Theory Aimed at**

Revealing from the Law of Thermodynamics Its Connotation [刊, 汉] / WANG Jia-xun, WANG Qing-zhao, ZHANG Xiao-dong (Power Engineering Department, North China University of Electric Power, Beijing, China, Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 561 ~ 564

The exposition and seeking of an implicit economic theory from many a law of physics can serve as a new approach for combining a thermodynamics analysis with an economic one. A specific analysis has been conducted of the economic theory of revealing its connotation from the first and second laws of thermodynamics. To this end, it is essential to clarify the existing misguidance of these two laws, especially the deep-seated misguidance of the second law. A further deepening of the understanding has been attained of the reasoning used by Georgescu Roegen in the statement "entropy law per se constitutes in substance the most cost-effective economic process among numerous laws". **Key words:** entropy, entropy law, new classic economics, ecological economics

地源热泵运行经济性分析 = An Analysis of the Operating Cost-effectiveness of a Ground-source Heat Pump [刊, 汉] / WANG Yong-biao, LI Bing-xi, JIANG Bao-cheng (Energy Science and Engineering School under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 565 ~ 567

In the light of the excessively low outdoor temperatures prevailing in Chinese northern frigid regions the authors have proposed a space heating system based on the use of ground-source heat pumps. There exist three driving modes for such pumps, namely, by electric motors, diesels and gas engines. In addition, there are three auxiliary heat supply sources, i. e., electric boilers, oil-fired ones and gas-fired ones. The authors have analyzed and compared the operating cost of various systems during a change of primary energy utilization rate and fuel price. The results of this comparison show that the operating cost of the driving modes by using gas engines, electric motors and diesel engines are respectively 6%, 40% and 57% higher than that of a central district heating system using boilers. **Key words:** ground-source heat pump, space heating, primary energy utilization rate, operation cost-effectiveness

纳米流体强化导热系数机理初步分析 = A Preliminary Analysis of the Intensified Thermal-conductivity Mechanism of Nano-fluids [刊, 汉] / LI Qiang, XUAN Yi-min (Power Engineering Institute under the Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, China, Post Code: 210094) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 568 ~ 571, 584

The mechanism of an intensified thermal conductivity achieved through the use of nano-fluids is analyzed from the following two aspects, namely, a changed liquid structure due to the addition of nano-particles and the micro-motion of nano-fluids. The results of the analysis indicate that relative to the enhanced thermal conductivity effected by the addition in fluids of millimeter or micrometer-grade particles the enhanced thermal conductivity made possible by nano-fluids has come about mainly due to the micro-motion of the nano-particles. Through the measurement of the thermal conductivity of nano-fluids under various temperatures it has been verified that the micro-motion of the nano-particles represents a major factor contributing to the enhancement of thermal conductivity by the nano-fluids. **Key words:** nano-fluid, intensified heat transfer, thermal conductivity, micro-motion

电厂送粉系统煤粉浓度测量的热探头方法研究 = Research on a Thermal Probe Method for the Measurement of Pulverized-coal Concentration in a Pulverized-coal Transport System of a Power Plant [刊, 汉] / LIU Lei, ZHOU Fang-de (National Key Laboratory for Power Engineering Multi-phase Flows under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 572 ~ 575

The measurement of pulverized coal concentration represents one of the problems requiring an urgent solution in the area of gas-solid two-phase flows. The authors have developed a measuring system incorporating thermal probes. The feasibility