

## 链式能量系统热经济孤立化的新方法 with 证明

李世武, 苏莫明

(西北工业大学 航空动力与热力工程系, 陕西 西安 710072)

**摘要:** 基于热经济孤立化的思想, 提出了链式能量系统热经济孤立化优化的新方法, 并证明了该方法的收敛性。对一非线性链式能量系统, 验证了该方法的有效性, 从而使热经济孤立化在链式系统的设计与运行优化决策上具有实用性, 为热经济孤立化在热能动力工程系统和其它系统的应用奠定了基础。

**关键词:** 能量系统; 链式系统; 热经济孤立化

中图分类号: F407.2 文献标识码: A

## 1 引言

在对主要涉及到能量转换与利用的能量系统设计决策时, 应考虑系统在运行期间的效率(泛称热能问题)和系统的建造与维护费用这两个方面, 即为热经济决策, 以达到节能与节资的综合最优效果。当进行系统的热经济决策时, 常将系统划分为诸个单元, 并建立各单元的热经济决策模型。若在某种情况下, 各单元单独求得的热经济优化结果的集合, 能够成为整个系统的热经济优化结果, 这表明该系统能够实现热经济孤立化<sup>[1~2]</sup>。尽管热经济孤立化思想提出了解决系统热经济优化的一个捷径方向, 即以局部或单元优化来代替系统总体优化, 这样既可以避免数学上的求解困难, 又可大大地减少优化计算的工作量。但对其成立条件分析后发现, 仅当各单元的目标函数与输出烟流成线性关系时, 热经济孤立化才能实现<sup>[3~5]</sup>。这一条件极大地限制了热经济孤立化的实用性, 因为系统中各单元的目标函数一般都是该单元输出烟流和若干个决策变量的非线性函数。对串联能量系统, 文献[6]提出了

一个新思路, 即通过采用单元边际烟单价的调整, 以实现系统的热经济孤立化。这种方法的确可增强热经济孤立化的实用性, 然而因未给出数学证明, 所以它的使用条件与范围就未明确。本文在此基础上, 对工程上常见的链式能量系统, 这是比串联能量系统结构复杂的系统, 进行热经济孤立化方法的研究, 以期得出适用于该类系统的热经济孤立化方法。

## 2 链式系统热经济孤立化优化方法

在热动力系统, 常有许多链式能量系统, 它是由许多能量单元设备串结而成, 并允许各单元可与系统的外界有物流或能流的输入与输出, 如图 1 所示。在图 1 中,  $e_{i,j}$  为  $i$  单元与系统外部交换的年烟流集合,  $E_{i,j}$  为  $i$  单元与系统内部单元交换的年烟流集合, 其中下标  $j=1$  表示进入  $i$  单元,  $j=2$  表示  $i$  单元输出。对于链式能量系统具有  $E_{i,2} = E_{i+1,1}$  的特征。 $Z_i$  为  $i$  单元的设备年初投资与年维护费之和。 $x_i$  为  $i$  单元除输出烟流外其它独立决策变量的集合,  $\lambda_i$  为由系统内部进入  $i$  单元烟流的边际烟单价(或称边际微分烟单价),  $C_i$  为由系统外部进入  $i$  单元烟流的烟单价, 则  $e_{i,1}$ 、 $E_{i,1}$  和  $Z_i$  可表示为如下函数关系

$$e_{i,1} = e_{i,1}(x_i, e_{i,2}, E_{i,2}); E_{i,1} = E_{i,1}(x_i, e_{i,2}, E_{i,2}); Z_i = Z_i(x_i, e_{i,2}, E_{i,2})$$

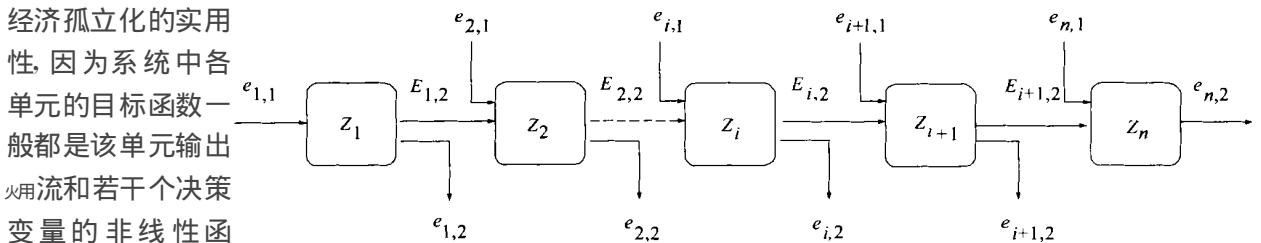


图 1 链式能量系统

故,  $i$  单元热经济优化的目标函数  $Y_i$  及边际用成本  $\lambda_i$  为

$$Y_i = C_i e_{i,1} + \lambda_i E_{i,1} + Z_i \quad (1)$$

$$\lambda_i = \frac{\partial Y_{i-1}}{\partial (e_{i-1,2} + E_{i-1,2})} \quad (2)$$

$i = 1, 2, 3, \dots, n$

系统热经济优化的目标函数  $Y$  为

$$Y = \sum_{i=1}^n Y_i = \sum_{i=1}^n (C_i e_{i,1} + \lambda_i E_{i,1} + Z_i) \quad (3)$$

由于系统的热经济优化是在输出系统的年用流  $e_{i,2}$  和进入系统年用流的用单价  $C_i$  给定下进行的, 在此条件下对式(3) 进行优化计算就可得出系统总体热经济最优化状态下的  $x_i^*, E_{i,2}^*$ , 再由式(2) 可得  $\lambda_i^*$ 。如果通过某种途径能够找到  $i$  单元的  $\lambda_i^*$  和  $E_{i,2}^*$ , 则对各单元的式(1) 进行优化计算就可得出  $i$  单元的  $x_i$ , 此时  $x_i = x_i^*$ , 从而实现系统的热经济孤立化, 并且所得到的各单元优化结果的集合就是整个系统的优化结果。下面将给出这一方法。

### 2.1 确定系统中各单元边际用单价的初值

$$\lambda_i^k = \lambda_i^0; i = 2, 3, \dots, n; k = 1$$

上式中, 各单元边际用单价的初值  $\lambda_i^0$  是在进行系统热经济孤立化前预先给出的, 或者可以令  $\lambda_i^0$  均等于由系统外部进入系统用流的平均用单价;  $i$  表示各单元的序号;  $k$  表示循环计算的次数。

### 2.2 计算系统各单元的决策变量值

由链式系统尾部的单元开始向系统的首部单元发展, 依次进行各单元的热经济优化计算, 即由

$$\text{Min}, Y_i = C_i e_{i,1} + \lambda_i^k E_{i,1} + Z_i \quad (4)$$

$$i = n, n-1, \dots, 2, 1; k = 1, 2, \dots$$

得出各单元的决策变量  $x_i^k$  和相关变量  $E_{i,2}^k$ 。在上式中, 当  $i = 1$  时,  $\lambda_i^k = 0$ 。

### 2.3 新边际用单价的确定与收敛性判别

由链式系统的首部单元开始向系统的尾部单元发展, 依次由下式

$$\lambda_{i+1}^{k+1} = \frac{\partial Y_i}{\partial (e_{i,2} + E_{i,2})}$$

$$= \frac{\partial (C_i e_{i,1} + \lambda_i^k E_{i,1} + Z_i)}{\partial (e_{i,2} + E_{i,2})} \quad (5)$$

$$i = 1, 2, \dots, n-2, n-1$$

计算出各单元新的边际用单价  $\lambda_{i+1}^{k+1}$ 。

设判别热经济优化计算收敛精度的小正数为  $\epsilon$ , 当

$$\left| \frac{\lambda_{i+1}^{k+1} - \lambda_i^k}{\lambda_i^k} \right| < \epsilon \quad (6)$$

成立时, 则已取得了系统的热经济孤立化, 并且第  $k$  次各单元的热经济优化结果的集合就是系统的热经济优化结果。否则令

$$\lambda_i^k = \lambda_i^{k+1}; k = k + 1$$

并进入第 2.2 步计算。

链式系统热经济孤立化方法的实质, 就是通过调整  $i$  单元的边际用单价  $\lambda_i$ , 使  $\lambda_i$  逼近或等于  $\lambda_i^*$ , 从而实现系统的热经济孤立化。

## 3 链式系统热经济孤立化方法的收敛性证明

如果在链式系统中, 只允许由系统外部进入系统的用流发生在系统的首单元, 同时只允许输出系统用流发生在系统的尾单元, 见图 1, 此时的链式系统就变为了串连系统。所以, 串连系统是链式系统的一种特例, 而链式系统是串连系统的扩充。从式(5) 可知, 因为链式系统  $i$  单元中的  $C_i$  和  $e_{i,2}$  是由系统外部所规定, 所以对链式系统热经济孤立化优化方法的收敛性证明, 本质上等同于串连系统。为了书写简明起见, 本文以串连系统为例予以证明。

链式系统或串连系统具有这样的特点, 即由系统尾部单元输出的用流  $e_{n,2}$  和由系统外部进入系统首部单元用流的用单价  $C_1$  是由系统外部所规定。正因为有此特点, 所以上述的链式系统热经济孤立化优化方法从系统的尾部单元开始, 向首部发展, 依次进行各单元的优化。而当进行各单元边际用单价调整时, 利用首部单元输入用流的用单价为已知值, 从系统首部开始向尾部发展, 依次确定新的单元边际用单价, 同时各单元边际用单价的调整, 又利用了上一单元调整之后的边际用单价, 使调整迅速收敛。所以, 利用了系统首尾单元各有一个已知的确定值来夹挤所进行的单元边际用单价, 以朝着收敛的方向发展。证明该方法的收敛性, 就是要证明每次所进行的系统各单元边际用单价的调整, 是朝着  $|\lambda_i - \lambda_i^*|$  减小的正确方向进行, 也就是使调整之后的  $\lambda_i$  逼近系统取得全局最优时的边际用单价  $\lambda_i^*$ 。现给予如下证明:

设系统以及各单元的目标函数均存在着最小值, 见式(1) 和式(3)。在第  $k$  次计算中, 对系统中的  $i$  单元由下式:

$$\begin{aligned} \text{Min } Y_i &= Y_i(x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,j}, E_{i,2}) \\ &= \lambda_i^k E_{i,1} + Z_i \end{aligned} \quad (7)$$

$$i = n, n-1, \dots, 2, 1$$

当  $i = 1$  时,  $\lambda_i^k \equiv C_1$ ; 当  $i = n$  时,  $E_{i,2} \equiv e_{i,2}$

计算得到第  $k$  次的优化结果, 即得到如下决策变量和相关变量:

$$x_{i,j}^k \text{ 和 } E_{i,2}^k$$

其中:  $j = 1, 2, \dots; i = n, n-1, \dots, 2, 1$

由此结果, 再通过式(5), 可得到  $i+1$  单元进行下一次计算(第  $k+1$  次)的新边际费用单价  $\lambda_{i+1}^{k+1}$  为

$$\lambda_{i+1}^{k+1} = \frac{\partial Y_i}{\partial E_{i,2}} \quad (8)$$

式中:  $i = 1, 2, \dots, n-2, n-1$ ; 而  $Y_i$  对  $E_{i,2}$  的偏导数  $\partial Y_i / \partial E_{i,2}$  是在  $(x_i^k, E_{i,2}^k)$  点上取值, 也就是说,  $\lambda_{i+1}^{k+1}$  是  $x_i^k$  和  $E_{i,2}^k$  的函数, 即

$$\lambda_{i+1}^{k+1} = \lambda_{i+1}^{k+1}(x_i^k, E_{i,2}^k) = \frac{\partial Y_i}{\partial E_{i,2}} \quad (9)$$

因为式(9)中的  $x_i^k$  是在  $E_{i,2}^k$  给定后由式(7)计算得出的, 也就是经下式  $m$  个联立方程求得的, 即

$$\frac{\partial Y_i}{\partial x_{i,j}} = 0 \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

由式(10)的  $m$  个方程组可解出  $x_i^k$  是  $E_{i,2}^k$  的函数, 即

$$x_{i,j}^k = x_{i,j}^k(E_{i,2}^k) \quad (11)$$

将式(11)代入式(9), 并根据各单元目标函数均存在着最小值的性质, 从而有

$$\frac{\partial \lambda_{i+1}}{\partial E_{i,2}} = \frac{\partial^2 Y_i}{\partial E_{i,2}^2} > 0 \quad (12)$$

在  $(x_i^*, E_{i,2}^*)$  点上对  $\lambda_{i+1}^{k+1}$  作泰勒级数展开, 得

$$\lambda_{i+1}^{k+1} - \lambda_{i+1}^* \approx \frac{\partial \lambda_{i+1}}{\partial E_{i,2}} (E_{i,2}^k - E_{i,2}^*) + \sum_j \frac{\partial \lambda_{i+1}}{\partial x_{i,j}} \times (x_{i,j}^k - x_{i,j}^*) \quad (13)$$

由式(11)可知

$$x_{i,j}^k - x_{i,j}^* = \frac{\partial x_{i,j}}{\partial E_{i,2}} (E_{i,2}^k - E_{i,2}^*) \quad (14)$$

将式(14)代入式(13)得

$$\lambda_{i+1}^{k+1} - \lambda_{i+1}^* = \left( \frac{\partial \lambda_{i+1}}{\partial E_{i,2}} + \sum_j \frac{\partial \lambda_{i+1}}{\partial x_{i,j}} \cdot \frac{\partial x_{i,j}}{\partial E_{i,2}} \right) \times (E_{i,2}^k - E_{i,2}^*) \cdot \theta \quad (15)$$

式中,  $0 < \theta < 1$

式(12)表明  $\lambda_{i+1}$  是  $E_{i,2}$  的增函数, 所以必有

$$\left( \frac{\partial \lambda_{i+1}}{\partial E_{i,2}} + \sum_j \frac{\partial \lambda_{i+1}}{\partial x_{i,j}} \cdot \frac{\partial x_{i,j}}{\partial E_{i,2}} \right) \cdot \theta > 0 \quad (16)$$

从而得

$$\lambda_{i+1}^{k+1} - \lambda_{i+1}^* = \theta (E_{i,2}^k - E_{i,2}^*) \quad (17)$$

式中,  $\theta > 0$

由式(17)就可得出链式系统热经济孤立化方法是收敛的, 因为调整后的边际费用单价朝着  $|\lambda_i -$

$\lambda_i^*|$  减小的正确方向进行, 也就是使调整之后的  $\lambda_i$  逼近系统取得全局最优时的边际费用单价  $\lambda_i^*$ 。这是由于在第  $k$  次计算中, 对初次给定的或经过调整后的  $\lambda_{i+1}^k$ , 若有

$$\lambda_{i+1}^k > \lambda_{i+1}^* \quad (18)$$

在  $E_{i+1,2}^k$  给定下(因为  $E_{i+1,2}^k$  是系统第  $k$  次由式(7)从尾部逐单元计算得出的, 所以  $E_{i+1,2}^k$  已逼近它取得系统全局热经济最优化下的  $E_{i+1,2}^*$ , 并在第  $k$  次之后的计算中会得到进一步修正, 故认为  $E_{i+1,2}^k \approx E_{i+1,2}^*$ ), 由式(7)对  $i+1$  单元优化计算所得出的  $E_{i,2}^k$  必存在着

$$E_{i,2}^k < E_{i,2}^* \quad (19)$$

将式(19)代入式(17)得

$$\lambda_{i+1}^{k+1} - \lambda_{i+1}^* = \theta (E_{i,2}^k - E_{i,2}^*) < 0 \quad (20)$$

式(20)表明, 调整后的边际费用单价  $\lambda_{i+1}^{k+1}$  将自动反馈减小, 朝着  $|\lambda_{i+1}^{k+1} - \lambda_{i+1}^*|$  减小的正确方向进行, 不会发散。

以上过程就完成了对链式系统热经济孤立化优化方法的收敛性证明。

#### 4 算例

图 2 是由四个单元组成的链式系统, 表示一个热电站, 单元 1、2、3 和 4 分别表示锅炉、主汽管道、汽轮机和换热站。输入该系统热流的费用单价  $C_1$  为 11.1 千元 / (10<sup>10</sup> kJ), 由系统输出外部的三部分年热流  $e_{1,2}$  为 4.6 × 10<sup>10</sup> 千元 / 年、 $e_{3,2}$  为 55.8 × 10<sup>10</sup> 千元 / 年和  $e_{4,2}$  为 13.45 × 10<sup>10</sup> 千元 / 年, 系统的热经济决策变量为各单元的热效率  $\eta_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ), 系统各单元的设备年费用有如下函数关系

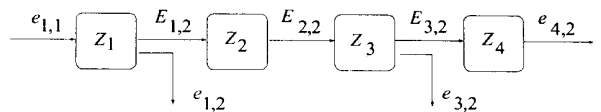


图 2 由四个单元组成的非线性链式系统

$$Z_1 = [72.10 - 1.160 \times (e_{1,2} + E_{1,2}) + 5.380 \times 10^{-2} \times (e_{1,2} + E_{1,2})^2] \times [9.2 \times 10^{-4} \exp(17.5 \eta_1)] \text{ 千元 / 年}$$

$$Z_2 = [10.815 - 0.174 E_{2,2} + 0.807 \times 10^{-2} E_{2,2}^2] \times [2.3 \times 10^{-17} \exp(39.8 \eta_2) + \eta_2] \text{ 千元 / 年}$$

$$Z_3 = [57.68 - 0.928 \times (e_{3,2} + E_{3,2}) + 4.304 \times 10^{-2} \times (e_{3,2} + E_{3,2})^2] \times [1.2 \times 10^{-16} \exp(38.1 \eta_3) +$$

$\eta_3$  千元/年

$$Z_4 = [9.373 - 0.1508e_{4,2} + 0.6994 \times 10^{-2}e_{4,2}^2] \times [9.55 \times 10^{-5} \exp(19.7\eta_4) + \eta_4] \quad \text{千元/年}$$

由以上所给已知条件,可建立系统的热经济优化模型为

$$\text{Min } Y = C_{1e_{1,1}} + Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4$$

在  $e_{1,2}$ ,  $e_{3,2}$  和  $e_{4,2}$  给定下,对以上热经济优化模型进行求解,可得出系统热经济最优的决策变量和最小的年成本费用  $Y^*$  为

$$Y^* = C_{1e_{1,1}} + Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 = 3490.0 \text{ 千元/年}$$

$$\eta_1^* = \frac{e_{1,2} + E_{2,2}}{e_{1,1}} = 39.373\%$$

$$\eta_2^* = \frac{E_{2,2}}{E_{1,2}} = 97.255\%$$

$$\eta_3^* = \frac{e_{3,2} + E_{3,2}}{E_{2,2}} = 93.464\%$$

$$\eta_4^* = \frac{e_{4,2}}{E_{3,2}} = 59.283\%$$

表1 图2所示的链式系统热经济孤立化计算过程及结果

计算次数 $k$	$\lambda_2^k$	$\lambda_3^k$	$\lambda_4^k$	$Y$	$\eta_1$	$\eta_2$	$\eta_3$	$\eta_4$
$k=1$	11.10	11.10	11.10	3671.6	38.95	94.19	89.72	52.75
$k=2$	36.63	40.67	51.29	3490.1	39.38	97.30	93.52	59.38
$k=3$	35.98	39.91	50.21	3490.0	39.37	97.25	93.47	59.29

现用链式系统热经济孤立化的方法对此例进行计算,计算过程及结果见表1。由表1可知,对各单元的边际焓单价仅经过两次调整,就实现了系统的热经济孤立化,并同时得到了热经济最优决策变量

和最小的年运行成本费用。从表1还知道,经调整后的边际焓单价迅速逼近在系统达到热经济最优状态下的边际焓单价。

### 5 结 语

本文作者提出了链式系统的热经济孤立化方法,并证明了该方法的收敛性和有效性,由一个实例验证了该方法具有收敛速度快的特点,从而使热经济孤立化在链式系统的设计与运行优化决策上具有实用性,为热经济孤立化在其它系统的应用奠定了基础。对于一些非链式能量系统,可以通过某些能量单元的处理,变成链式系统,从而可应用本文的方法。

### 参考文献:

[1] El-SAYED Y M, EVANS R B. Thermoeconomics and the design of heat systems[J]. *Trans ASME J Engineering Power*, 1970, 92: 27-35.

[2] EVANS R B. Thermoeconomic isolation and essergy analysis[J]. *Energy*, 1980, 5(5): 805-821.

[3] 杨东华. 热经济学[M]. 上海: 华东化工学院出版社, 1990.

[4] 杨东华, 李德虎. 热经济学的历史与现状[J]. *自然杂志*, 1989, 12(12): 915-918.

[5] 李 晖. 热经济孤立化原理的研究[J]. *自然杂志*, 1988, 11(7): 555-560.

[6] 李世武. 热经济准孤立化优化[J]. *工程热物理学报*, 1990, 11(3): 252-254.

(渠 源 编辑)

## 电站设备

### 性能改进的双级调节阀

据《Электрические станции》2001年12月号报道,为了改进ТТМП-344A型锅炉装置中间过热蒸汽温度的自动调节,根据ВТИ(全俄热工研究所)提出的技术任务书,“ОРГРЭС(全俄国营地区电站、输电网组织与合理化托拉斯)公司研制了性能改进的双级调节阀。它具有很小的不可调节的间隔,并具有线性的流量特性。

阀门具有十分简单的构造型式、制造精良和修理工艺不复杂,并可以根据火电站要求条件下制造。

阀门保证在运行载荷范围内高质量地自动调节过热蒸汽的温度。

在现代的火力发电站应用所研制的阀门能提高锅炉工作的可靠性和经济性。

(思娟 供稿)

grinding capacity for these coals has been identified by an analysis the authors point out the practical service limitations of the raw coal grindability index measured in a laboratory. In addition, investigated are the coal quality factors to be considered during the revision of these grindability indexes. The relevant findings can serve as reference data during a more in-depth study by design and operation management personnel of coal pulverizers. **Key words:** grindability index, maximum grinding capacity, test, revision

链式能量系统热经济孤立化的新方法与其收敛性证明 = **Thermo-economic Isolation of Chain Type Energy Systems and Its Convergence Proof** [刊, 汉] / LI Shi-wu, SU Mo-ming (Department of Aeronautical Power and Thermal Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, China, Post Code: 710072) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(5). — 465 ~ 468

Based on the ideology of thermo-economic isolation the author has proposed a new method for the optimized thermo-economic isolation of a chain type energy system and provided a proof for the convergence of the method. The effectiveness of the method has been verified for a nonlinear chain type energy system. This enables the thermo-economic isolation acquire a practical usage value for a decision-making during the design and optimized operation of chain type energy systems, providing a solid basis for the application of the thermo-economic isolation in thermal energy and power engineering systems as well as in other energy systems. **Key words:** energy system, chain type system, thermo-economic isolation

湿法烟气脱硫系统中的低温腐蚀及烟气再热问题 = **Low-temperature Corrosion and Flue-gas Reheat Problems in a Wet-method Flue Gas Desulfurization System** [刊, 汉] / WANG Hong-tao, WU Shao-hua, SAI Jun-cong, et al (Thermal Energy Engineering Department, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(5). — 469 ~ 471

Described are the low-temperature corrosion problems quite prevalent in the flue-gas desulfurization system of a coal-fired power plant. In conjunction with specific cases a brief analysis is performed of some types of flue gas reheat system and their ensuing secondary corrosion problems. **Key words:** wet-method flue gas desulfurization, flue gas reheat, low-temperature corrosion

火焰筒耐热搪瓷漆熔烧工艺实验研究 = **Experimental Research of a Fusing Technique Involving the Coating of Heat-resistant Ceramic Lacquer on a Gas Turbine Flame Tube** [刊, 汉] / DONG Bin, ZHANG Yong-quan (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(5). — 472 ~ 474

The inner and external surfaces of a gas turbine flame tube have been coated with a foreign-made heat-resistant ceramic lacquer. With a view to mastering in the shortest possible time the fusing technique of heat-resistant ceramic lacquer, contrast tests were conducted on test pieces with regard to the main procedures of fusing technique by applying that technique for the coating of the flame tube. These tests have brought forth the following conclusions. The size of spray sand particles and the change in the viscosity of the coating material have a relatively small influence on the fusing quality while the fusing temperature and time duration exert a fairly large influence on that quality. By putting parts into the fusing furnace at a relatively high stipulated furnace temperature and taking them out after a relatively short time it is possible to obtain a satisfactory coated surface quality and service performance. **Key words:** gas turbine, flame tube, ceramic lacquer, fusing

电场和螺旋线圈复合强化管内强制对流的实验 = **An Experiment on Forced Convection in a Combined-intensi-**