

# CPL 系统的非稳态数值模拟

钱吉裕, 李 强, 陈小波, 宣益民

(南京理工大学 动力工程学院, 江苏 南京 210094)

**摘 要:** 针对 CPL 系统给出了描述系统温度、压力和流量等物理量的一维动态模型, 在蒸发器毛细芯中采用了非热平衡温度模型, 模型考虑了毛细力对蒸发温度和速度的影响, 模型还考虑了储液管中温度的波动对系统运行的影响, 运用该模型重点分析了 CPL 系统的启动过程, 分析了影响顺利启动的几个关键因素, 数值结果与实验结果有很好的—致性。

**关 键 词:** CPL; 非稳态模型; 储液罐温度波动; 压力波动; 启动特性;

中图分类号: TK124+TQ051.5 文献标识码: A

## 1 概 述

毛细泵回路 CPL(capillary pumped loops) 具有结构灵活、在很小温差下可远距离传递很大的热量、无任何运动部件等主要特点, 其控温能力、传热能力均优于普通热管系统, 可靠性也很高, 它在空间站、航天器以及大功率电子元器件的冷却方面有着广阔的运用前景。由于 CPL 系统是一个两相系统, 工作过程包括相变, 多孔介质中对流传热等复杂过程, 对 CPL 系统的研究绝大部分靠地面实验, 但正确的数值模拟不仅能指导实验的过程还能减少实验的费用和时间, 有助于系统的进一步优化设计和改良。数值模型方面的研究当前主要是针对其中的某个部件<sup>[1-2]</sup>, 对于整个系统的模拟比较少, 而且主要集中在稳态模型, 但是稳态模型无法描述系统启动特性, 以及运行过程中压力温度等的波动对系统的影响, 而这些问题恰恰是影响 CPL 性能的关键因素。所以建立系统级的非稳态模型对于 CPL 的研究有着十分重要的意义。

## 2 数学模型

本文研究的 CPL 系统包括蒸发器、蒸汽管路、

冷凝器、储液器和液体管路五个部件(如图 1)。系统启动时首先加热储液器到设点温度(set point temperature), 由于设点温度高于系统其它点温度, 使得蒸发器中充满了过冷液态工质, 保证 CPL 系统的顺利启动, 这个过程称为压力灌注, 然后蒸发器在热负荷的作用下, 工质被加热并蒸发进入蒸汽管道, 又在冷凝器中冷凝成液体, 液体工质经过液体管路又回到蒸发器中完成了一个循环。系统数值模拟的目的是从系统级角度考察 CPL 的运行特点, 特别是启动或者热负荷等工作条件改变时系统中温度、压力以及流量等物理量随时间的变化情况, 从而指导 CPL 各部件的优化设计, 预测给定系统的热负荷极限及顺利启动的工况要求, 所以数学模型中包括耦合的热力学和动力学两个模型, 本文的数学模型基于下列几个基本假设: (1)毛细芯外壁的热流密度均匀, 考虑到圆柱状蒸发器的轴对称性, 认为只在径向存在温度梯度; (2)回路与环境没有热交换; (3)管路中存在汽液界面, 并垂直于管轴方向; (4)不考虑重力的作用; (5)工质不可压。

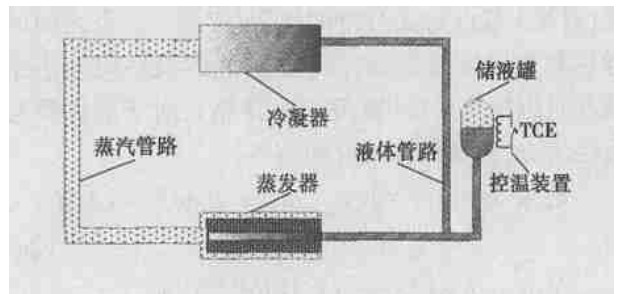


图 1 系统示意图

为了证明假设(5)的合理性, 设系统中蒸汽体积分别为  $V_1$ , 总质量  $M$ , 总体积  $V$ , 则有:

$$\frac{\partial V_1}{\partial P} = \frac{1}{\rho_1 - \rho_v} (V_1 \frac{\partial \rho_v}{\partial P} + (V - V_1) \frac{\partial \rho_1}{\partial P}) \ll V_1$$

收稿日期: 2004-02-23; 修订日期: 2004-04-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50306007); 南京理工大学科研发展基金资助项目(20020801)

作者简介: 钱吉裕(1978-), 男, 江苏常州人, 南京理工大学博士生。

$$\frac{\partial V_1}{\partial T} = \frac{1}{\rho_1 - \rho_v} (V_1 \frac{\partial \rho_v}{\partial T} + (V - V_1) \frac{\partial \rho_1}{\partial T}) \ll V_1$$

由于系统在工作过程中温度和压力变化不大, 所以可以近似认为工质不可压。

本文的热力学模型基于节点网络法<sup>3</sup>, 首先将整个系统离散成有限个等温节点, 根据各节点之间的关系计算得到整个系统的温度及其它物理量的分布。

蒸发器是 CPL 系统最关键的部件, 大部分的数值模型都认为工质与周围的骨架始终处于热平衡态下, 通过引入有效导热系数等参数计算的区域的温度, 这种模型计算简单, 但是无法正确地考察多孔介质颗粒直径、骨架材料等对系统的影响, 本文采用多孔介质非热平衡温度模型, 将同一个区域的骨架与工质认为是两个独立的节点, 这种模型更本质地反映了毛细芯中的温度, 同时可以根据结果来分析选择最佳的骨架材料和毛细芯厚度。

蒸发器中蒸发前后节点的温度方程如下:

$$M_{iCp,i} \frac{dT_i}{dt} = \sum_{j=1}^{N1} k_{ij} A_{ij} (T_j - T_i) / \Delta x_{ij} + \sum_{j=1}^{N2} k_v V_i (T_j - T_i) / \Delta x_{ij} \quad (1a)$$

$$M_{iCp,i} \frac{dT_i}{dt} = \sum_{j=1}^{N1} k_{ij} A_{ij} (T_j - T_i) / \Delta x_{ij} + \sum_{j=1}^{N2} h_v V_i (T_j - T_i) + \sum_{j=1}^{N3} m_{ijCp,f} (T_j - T_i) + Q \quad (1b)$$

源项  $Q$  用来处理汽化潜热问题, 在汽液界面上有  $Q = -m_v \lambda$ , 其它  $Q = 0$ ,  $m_v$  是蒸发速度,  $k_v V_i (T_j - T_i) / \Delta x_{ij}$ ,  $h_v V_i (T_j - T_i)$  分别表示毛细芯内第  $i$  个工质(骨架)节点与其对应的骨架(工质)节点之间的导热和对流换热量,  $k_v$ ,  $h_v$  分别是体积平均导热系数和对流换热系数(蒸发前为导热), 对于固体颗粒直径为  $d_p$  的烧结多孔介质有<sup>[4]</sup>:

$$k_v = k_{ij} 6(1 - \epsilon) / d_p \quad h_v = h_{sf} 6(1 - \epsilon) / d_p \quad (2a)$$

$$Nu_{sf} = h_{sf} d_p k_f = [ (1.18 Re^{0.58})^4 + (0.23 Re_h^{0.75})^4 ]^{1/4} \quad (2b)$$

$$Re = \epsilon \rho u_f d_p / \mu, \quad Re_h = Re / (1 - \epsilon) \quad (Re < 10) \quad (2c)$$

蒸发器中的汽液界面位置根据流体的温度来确定。冷凝器和管路中的能量方程可做如下描述:

$$M_{iCp,i} \frac{dT_i}{dt} = \sum_{j=1}^{N1} k_{ij} A_{ij} (T_j - T_i) / \Delta x_{ij} + \sum_{j=1}^{N2} m_{ijCp,f} (T_j - T_i) + \sum_{j=1}^{N3} h S_i (T_j - T_i) + Q \quad (3)$$

右边前三项分别表示第  $i$  节点与周围节点的热

传导、对流以及与管壁的换热量, 源项  $Q$  用来处理冷凝潜热问题, 在汽液界面上有  $Q = m_1 \lambda$ , 其它  $Q = 0$ ,  $m_1$  是冷凝速度。

开始启动时, 由于液体有一定过冷度, 蒸发器内没有蒸汽产生, 当温度到达一定温度后蒸发器开始蒸发, 又因为在多孔介质中蒸发时, 汽液界面上有毛细力的作用, 考虑毛细力的影响, 修正后的 Kucherov-Rikenglaz 方程如下<sup>[5~9]</sup>:

$$m = A_{eva} \sqrt{\frac{1}{2\pi R_g T_{sat}}} \frac{P_1}{\rho_1 R T_{sat}} [P_s(T_{sat}) - P_1 - \frac{2\sigma}{r} - P_d] \quad (4)$$

式中:  $A_{eva}$ —蒸发的表面积, 本文中取圆柱表面积;  $R_g$ ,  $T_{sat}$ —气体常数和饱和液的温度;  $P_1$ —液面上的蒸汽压;  $\frac{2\sigma}{r}$ —毛细抽力,  $P_d$ —蒸汽脱离汽液界面的压损, 由于相对较小, 可忽略不记。气体或液体在芯内的流动满足 Darcy 定律:

$$m_f = -\frac{KA \rho_f \Delta p}{\mu} \quad (5)$$

式中: 渗透率  $K = d_p^2 \epsilon^3 / (150(1 - \epsilon)^2)$ , 如果系统正常运行有  $m_f = m_v$ 。

同样冷凝速度也可以用 Kucherov-Rikenglaz 方程计算:

$$m_1 = A_{con} \sqrt{\frac{1}{2\pi R_g T_{int}}} \frac{P_2}{\rho_1 R T_{int}} [P_2 - P_s(T_{int})] \quad (6)$$

式中:  $T_{int}$ —管路中汽液界面上的温度;  $P_2$  和  $P_s$  分别是当地的蒸汽压和饱和压。

管内层流和紊流时压降分别为:

$$\Delta p = \frac{128 \mu_i m_i}{\pi \rho_i D^4} l i \quad (7a)$$

$$\Delta p = \frac{0.241 \mu_i^{0.25} m_i^{1.75}}{\pi \rho_i D^{4.75}} l i \quad (7b)$$

蒸汽管路中的汽液界面的位置可以通过下面的公式来计算:

$$L_x(t + dt) = L_x(t) + (m_v - m_1) dt / (0.25 \rho_v \pi D^2) \quad (8)$$

CPL 工作时通过控制储液罐的设点温度来调节系统的工作压力, 从而决定了 CPL 的工作温度, 工作过程中可以认为储液管中的液体处于饱和状态, 则储液罐中相变速度为:

$$m_r = A_r \sqrt{\frac{1}{2\pi R_v T_r} [P_0 - P_s(T_r)]} \quad (9)$$

考虑到液体的不可压性,系统中总的蒸汽体积保持不变,则有:

$$m_r = (m_v - m_l) \quad (10)$$

整个数值模型的计算流程如图 2 所示。该数值模型根据以下两个方面判断系统是否失效, (a) 蒸发器中工质的温度, 即蒸发器中汽液界面的位置; (b) 系统阻力小于最大毛细力, 即有  $P_{c,max} \geq \Delta P_{loop}$ 。

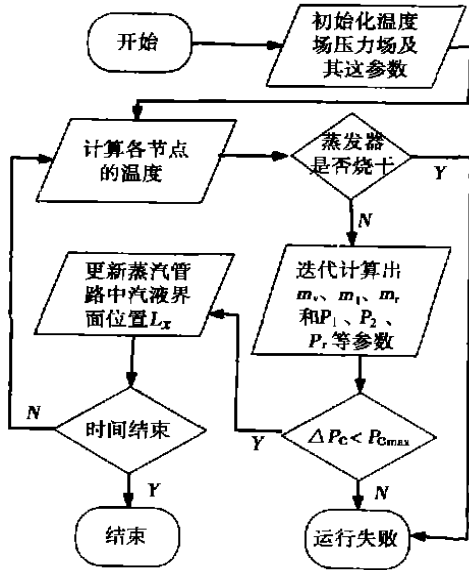


图 2 计算流程图

### 3 结果及讨论

模型的基本参数如下: 蒸发器毛细芯是用镍粉烧结而成, 内径 3.5 mm, 外径 6.95 mm, 芯长 114 mm, 孔隙率 0.58, 最大毛细抽力 5 000 Pa, 渗透率  $5 \times 10^{-13} m^2$ ; 蒸发器到冷凝器间管长 2.5 m, 管内径 2.6 mm; 冷凝器采用蛇管, 管长 0.7 m, 管内径 2.6 mm, 管外冷凝液 280 K; 冷凝器到储液罐的管长 2.6 m, 储液器到蒸发器间管长 0.5 m, 储液器管长 0.5 m, 管内径均为 2.6 mm; 工质采用氨; 储液器设点温度 313 K, 初始温度 286 K。整个系统节点分布如下: 蒸发器多孔芯骨架和流体工质沿径向各 15 个, 液体通道 1 个; 外壳 5 个; 蒸汽管路 10 个; 冷凝器 15 个; 液体管路 10 个; 储液器管路 5 个; 储液器 1 个; 管路外壁 43 个。

图 3 运用本文的数值模型(不考虑储液罐中温度的波动)计算的蒸发器温度变化情况与实验值的

比较, 从图中可以看出, 在启动前两者吻合的很好, 但是本模型结果在启动过程的温度变化较实验结果来的迅速, 分析原因如下: 在蒸发器中采用的是一维模型, 当达到蒸发条件时, 认为靠近齿顶的工质同时蒸发, 所以温度迅速改变, 而实际上由于多孔结构以及与齿顶接触好坏的差异导致了刚开始启动时, 工质不可能同时蒸发, 所以温度应该有一个先缓慢上升后不变的过程。从图 3 中还发现, 达到稳态后, 实验值高于计算, 原因可能是模型中没有考虑蒸发器外壳与毛细芯的接触热阻以及实验过程中加热膜片与测温热电偶有接触等造成的。

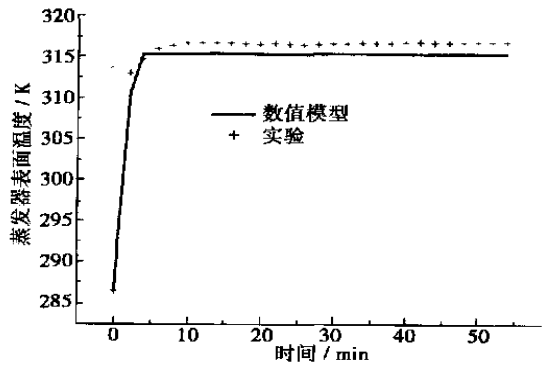


图 3 蒸发器温度数值结果与实验值比较

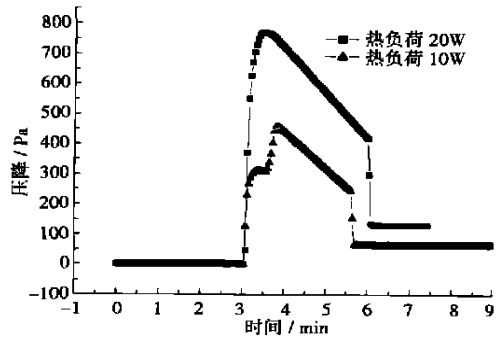


图 4 系统运行过程中环路压损

图 4 为系统运行过程中系统阻力随时间变化的模拟结果。从计算结果可以看出, 启动时系统中的阻力要远远高于稳态运行时的阻力, 这就是为什么 CPL 能承受的实际功率要远远小于基于稳态假设计算出来的功率, 同时也说明了 CPL 启动困难的事实。造成启动时阻力最大的原因是: 启动前蒸汽管路中充满了液体工质, 启动后由于蒸汽管路中冷凝速度很小, 蒸汽管路汽液界面推进速度很快, 使得管路中的液体工质流量很大; 另一方面, 由于蒸汽管路

中蒸汽的产生, 液体被压回储液罐中, 使得储液管中冷凝速度较大, 储液器中的压力升高, 所以启动时系统的阻力和所需的毛细抽力最大。

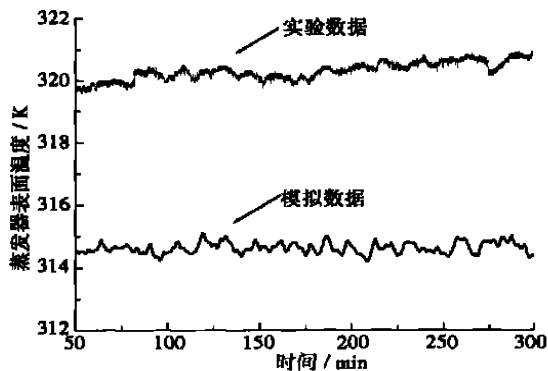


图 5 储液罐温度波动对蒸发器温度的影响  
储液罐温度  $T = T_r + 1 \times \text{RAND}$ ,  $Q = 20 \text{ W}$

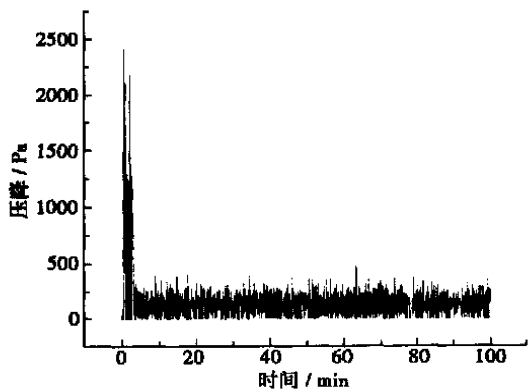


图 6 储液罐温度波动对系统阻力的影响  
储液罐温度  $T = T_r + 1 \times \text{RAND}$ ,  $Q = 20 \text{ W}$

图 5 为考虑储液罐中温度波动后, 蒸发器温度的模拟值与实验值的比较。实验过程中采用 XMT6000 型温控仪对储液罐进行控温, 设定温度波动为 1K, 数值模型中在设定温度  $T_r$  上加上波动范围为  $[-0.5, 0.5]$  的随机变量 RAND 来表示储液罐温度的波动。从比较结果来看两者具有一定的相似性, 特别是两者波动范围基本一致, 可以认为, 蒸发器上温度的波动主要是由储液罐中温度的波动引起的。结合图 6 和图 4 可以发现, 由于储液罐中温度的波动引起了系统中阻力的大范围波动, 系统最大阻力从 800 Pa 上升到 2 500 Pa 左右, 可见储液罐中的温度波动对系统运行的稳定性有着十分重要的意义, 也是影响系统是否成功启动的关键因素之一, 这一点与我们的实验研究结果是一致的。

图 7 和 8 分别是系统稳定后的  $P-T$  示意图及数值计算结果。首先, 液体工质在蒸发器内蒸发 (1 点), 经过蒸发器内蒸汽通道到达出口 2, 在此过程中, 蒸汽被进一步加热同时压力降低; 经过绝热的蒸汽管路到达冷凝器入口 3; 过热蒸汽在冷凝器中经过气体冷却阶段 3—4、两相区 4a—4b 和过冷液体区 4b—5; 过冷液经过绝热液体管路后达到蒸发器入口 6; 最后在蒸发器中过冷工质温度升高压力下降, 到达汽液界面是变成了过饱和液体 8。整个循环过程中的压差就是有效毛细力  $P_c$ 。图 8 是由上述数值模型模拟的结果, 与分析结构基本一致, 由于假设冷凝器中不存在两相区, 模拟结构与理论分析结果在冷凝器中略有不同。

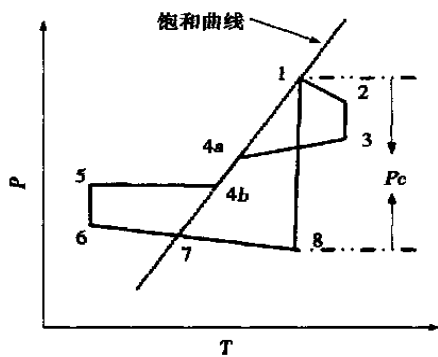


图 7 理论分析  $P-T$  图

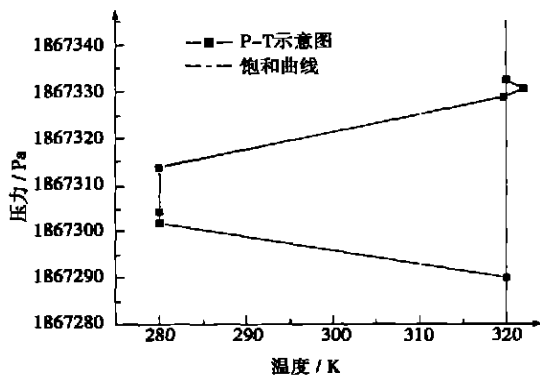


图 8 数值结果  $P-T$  图

#### 4 结 论

基于节点网络法建立了描述整个 CPL 系统运行的一维非稳态模型, 计算值与实验值有较好的一致性。本文运用该模型着重分析了系统的启动特性, 计算结果表明, 刚启动时系统中的流动阻力最

大,如果系统承受的额定功率较大,可以首先用小功率启动,慢慢增加功率的方法来保证启动的成功性。另外,还分析了储液罐中设点温度的波动对系统运行的影响,结果表明了储液罐温度的波动能引起系统运行特别是启动时阻力的大范围波动,是影响系统正常启动的主要因素之一,实验过程中应该尽量保证储液罐温度的恒定性。运用计算出来的系统PT图与理论分析结果有很好的—致性。

#### 参考文献:

[ 1 ] CAO YIDING. Amir faghri analytical solutions of flow and heat transfer in a porous structure with partial heating and evaporation on the upper surface[ J ] . *Int J Heat Mass Transfer*. 1994 37(10) 1525—1533.

[ 2 ] FIGUS C, BRAY Y LE, BORIES S, et al. Heat and mass transfer with phase change in a porous structure partially heated: continuum model and pore network simulations[ J ] . *Int J Heat and Mass Transfer*. 1999 42: 2557—2569.

[ 3 ] MURAOKA I, RAMOS F M, V V. Vlassov analysis of the operational characteristics and limits of a bop heat pipe with porous element in the condenser[ J ] . *Int J. of Heat and Mass Transfer* 2001, 44: 2287—2297.

[ 4 ] JIANG PEI XUE, REN ZE PEL. Numerical investigation of forced convection heat transfer in porous media using a thermal non— equilibrium model[ J ] . *Int J of Heat and Fluid Flow*, 2001, 22: 102—110.

[ 5 ] AMIRFAGHRI. Heat pipe science and technology[ M ] . Talor & Francis press 1995. 72—75.

[ 6 ] ZHANG J T, WANG B X. Effect of capillary at liquid-vapor interface on phase change without surfactant[ J ] . *Int J of Heat and Mass Transfer*, 2002, 45: 2689—2694.

## 《热能动力工程》征订启事

《热能动力工程》是学术性与技术性结合的技术刊物。本刊报导内容力求结合我国实际,具有很强的针对性和实用性,本刊为国内外公开发行,覆盖面大。本刊曾多次荣获国防科工委、中国船舶工业总公司、黑龙江省、全国优秀科技期刊奖。荣获船舶总公司科技进步三等奖。本刊还被定为国家核心期刊,中国科学引文数据库来源期刊,编入光盘期刊。被录入美国工程索引数据库,并被俄罗斯文摘期刊录用。

《热能动力工程》刊载的主要内容是:国内外蒸汽轮机、燃气轮机的研究成果及发展状况;国内外电站及各种锅炉的设计和试验研究;传动装置设计和试验研究;热能工程、能源开发利用和节能技术研究与设计运行经验;新技术转让消息和新产品介绍等。

读者对象:热能动力工程领域的科研单位的研究人员;大专院校的师生;工矿企业动力部门的工程技术人员及运行、维护人员。

刊号 ISSN1001—2060 双月刊 A4 版。  
CN23—1176/TK

本刊既有理论性,也有实用性。对科研设计,使用单位有较大参考价值,有需要者请按下列办法办理订阅手续:

(1) 全国各地邮局均可订阅,邮发代号 14—158;也可向编辑部直接订阅,每期 12 元,全年定价 72 元。本刊还备有部分过刊,可以订阅。

(2) 银行汇款:中国船舶重工集团公司第七〇三研究所;开户银行:中国银行哈尔滨市开发区支行红旗分理处。帐号: 19143628092001 邮编: 150036

(3) 邮局汇款: 150036 哈尔滨市香坊区公滨路 452 号 A 座 407《热能动力工程》编辑部

注:汇款时注明您的详细地址,以便我们及时邮寄收据和杂志。

CPL系统的非稳态数值模拟= **Unsteady-state Numerical Simulation of a CPL (Capillary Pumped Loops) System** [刊, 汉] / QIAN Ji-yu, LI Qiang, CHEN Xiao-bo, XUAN Yi-min (Power Engineering College under the Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, China, Post Code: 210094) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(6). — 605 ~ 609.

A one-dimensional dynamic model was set up for a CPL (capillary pumped loops) system. The model can describe a whole variety of physical quantities, such as the system temperature, pressure and flow rate, etc. In an evaporator capillary core a non-thermal equilibrium temperature model is adopted. The model has taken into account the impact of capillary force on the evaporation temperature and speed, as well as the impact of temperature fluctuations in a liquid-storage tube on the system operation. The model was employed to undertake a focus-point analysis of the CPL system start-up process, analyzing several key factors believed to have an impact on the performance of a successful start-up. Numerical calculation results have been found to be in very good agreement with experimental ones. **Key words:** capillary pumped loop, unsteady state model, temperature fluctuation in a liquid storage tank, pressure fluctuation, start-up characteristics

火电厂热力系统并联算法通用逻辑—矩阵模型= **General Logic-matrix Model of a Parallel Algorithm Used for the Thermodynamic System of a Thermal Power Plant** [刊, 汉] / WANG Nai-hua, HUANG Xin-yuan, SUN Feng-zhong (College of Energy and Power Engineering under the Shandong University, Jinan, China, Post Code: 250061), GAO Yu-chuan (Thermal Power Plant of Qixing Group Co., Zouping, China, Post Code: 256200) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(6). — 610 ~ 613, 630.

By using logic variables to express the structural characteristics of a thermodynamic system and a regenerative heater and on the basis of matrix theory an analysis is performed of the material balance and energy balance of the regenerative heater. As a result, set up was a general logic-matrix model of parallel algorithm for the thermodynamic system of the thermal power plant. The model has comprehensively taken into account the thermal efficiency of the regenerative heater and the various factors relating to auxiliary steam and water services, etc. The logic-matrix model features clarity of conception, ease of construction and suitability for universal applications, thus providing a basis for the preparation of computation programs for a general thermodynamic system. Moreover, the model can also serve as a convenient tool for real-time measurement and test, control and optimization. **Key words:** thermodynamic system, logic variable, general logic-matrix model

基于现场数据的中速磨煤机动态建模研究= **A Study of the Dynamic Modeling of a Medium Speed Pulverizer Based on On-site Data** [刊, 汉] / ZHANG Xiao-tao, NI Wei-dou, LI Zheng, ZHENG Song (Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(6). — 614 ~ 616, 633.

On the basis of on-site data and in conjunction with the working principle of a power plant coal-pulverizer system a state-space dynamic mathematical model has been set up of the coal pulverizer outlet temperature and pulverizer inlet-air flow rate through an analysis of the coal pulverizer control system. During the process of various off-design operating conditions with the coal-pulverizer cold air port and hot air port opening degree serving as an input a dynamic model was built for the coal-pulverizer outlet temperature and inlet air flow rate. This dynamic model features relatively high precision and can quite truly reflect the actual operating condition of the coal pulverizer. Due to a strong coupling effect of the system itself the created coal pulverizer model can lay a good foundation for the optimized configuration of the control system and for enhancing the quality of control. **Key words:** coal pulverizer, outlet temperature, inlet air flow rate, dynamic modeling

联合循环电站在线性能计算及分析诊断= **On-line Performance Calculation and Fault Diagnosis of a Combined Cycle Power Plant** [刊, 汉] / XIAO Rui, TANG Sheng-li (College of Power Engineering under the Chongqing University