

# 太阳能集热器系统的四维热网络 动态仿真模型

乔力 叶宏 葛新石 魏蔚\*

(中国科学技术大学)

**〔摘要〕** 在首次提出太阳能集热器系统单元(微元)段分节点热阻、热容网络——四维热网络概念基础上,建立腔体式吸收器——槽形抛物镜太阳能集热器系统的集热过程动态仿真模型。在外界驱动力均变的情况下,该模型不但可求得集热器系统中任一切面各部件温度随时间的分布,也可求得任一时刻各部件温度沿集热器系统的空间分布,从而首次实现大型太阳能集热器运行工况的四维动态仿真。

**关键词** 腔体式吸收器 太阳能集热器 四维热网络 动态仿真

**分类号** TK512

## 0 引言

动态仿真模型在大型集热器理论研究中占有重要地位。因为大型集热器实验研究代价高昂(单元段系统十几万元,中试系统几百万元),而且集热器系统的设计是个不断协调、修改、完善的过程,不可能用实验来验证每一次的修改。集热器系统在运行过程中出现问题,在采取改进措施之前,需要尽快预测可能的温度变化及热效率水平,而实验所需时间较长,较难满足这种要求。

自从 Close 首次建立描述自然循环式平板型太阳能热水系统热过程的数学模型(1962年)以来,它的建模方法被广泛应用于强制循环式平板型太阳能热水系统和直流式平板型太阳能热水系统,并经许多学者继续研究而做了多方面的改进<sup>[1]</sup>。但所有这些方法对于系统中任一串联部件只能采用一个能量

平衡方程、一个热容项,只能求得一个综合点的瞬时温度分布,因此对于较为复杂的系统部件(如集热器)就难以求出任一时刻沿切向和轴向的温度分布。所以,用于对太阳能热水系统求解动态热过程的数学模型,对集热器而言,均属随时间一维动态热网络。

## 1 太阳能集热器系统的四维热网络动态仿真模型

集热器系统热网络的维数是指沿集热器空间方向或随时间延伸所具有和所能计算的温度梯度分布的项数。

腔体式吸收器——槽形抛物镜太阳能集热器系统的循环回路和四维热阻、热容网络如图 1 所示。其标准化方程如式(1)至式(4)所求:

\* 中国烟草总公司合肥设计院

收稿日期 1996-07-30 收修改稿 1996-07-30

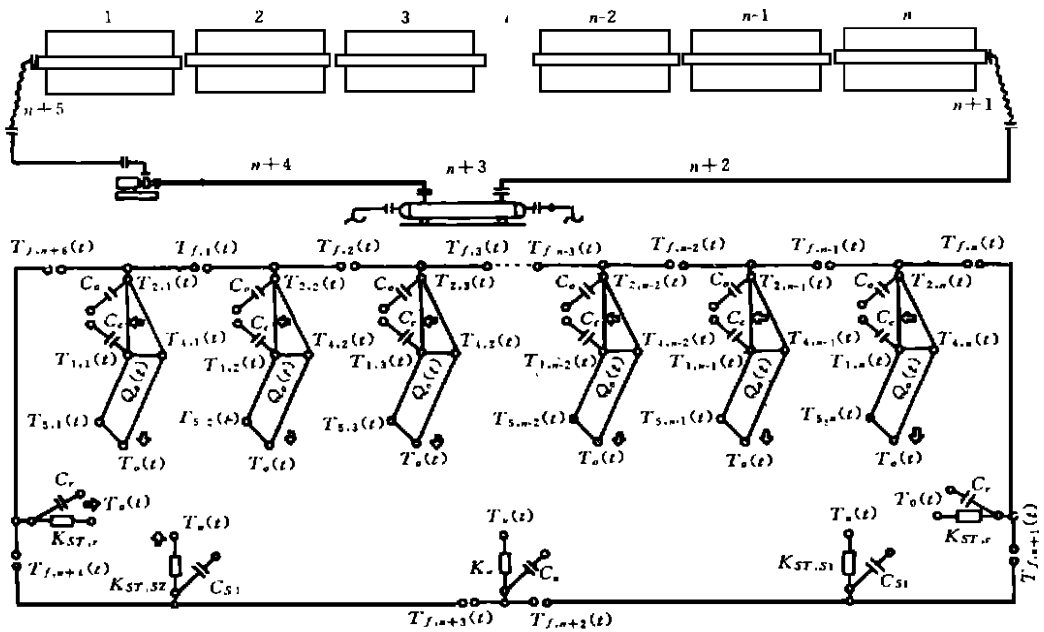


图 1 腔体式吸收器——槽形抛物镜太阳能集热器系统的四维热阻、热容网络

$$\begin{cases} \dot{E} \left[ P_j I_b(t) = \sum_{k=1}^m \frac{T_{j,i}(t) - T_{k,i}(t)}{R_{j-k}} + C_j \frac{dT_{j,i}(t)}{dt} \right] & (1) \\ \frac{T_{2,i}(t) - [T_{f,i}(t) + T_{f,i-1}(t)]/2}{H_{f,i}} = MC_p [T_{f,i}(t) - T_{f,i-1}(t)] & (2) \\ \left. \begin{aligned} MC_p [T_{f,i-1}(t) - T_{f,i}(t)] &= \frac{T_i(t) - T_a(t)}{R_i} + C_i \frac{dT_i(t)}{dt} \\ \frac{T_i(t) - [T_{f,i}(t) + T_{f,i-1}(t)]/2}{H_{f,i}} &= MC_p [T_{f,i}(t) - T_{f,i-1}(t)] \end{aligned} \right\} & (3) \end{cases}$$

式中:  $n$ —集热器所分单元段数;  $t$ —循环系统所分段数;  $m$ —集热器横切面上所分节点数;  $t$ —时间;  $I_b(t)$ —太阳直射辐射强度;  $P_j$ —第  $j$  节点太阳直射辐射吸收系数;  $T_{j,i}(t)$ —第  $i$  单元第  $j$  节点温度;  $C_j$ —第  $j$  节点热容;  $R_{j-k}$ —第  $j$  节点至第  $k$  节点间热阻;  $T_{k,i}(t)$ —第  $k$  节点温度;  $T_{2,i}(t)$ —吸收管温度;  $T_{f,i}(t)$ —第  $i$  单元工作介质出口温度;  $T_{f,i-1}(t)$ —第  $i$  单元工作介质进口温度;  $H_{f,i}$ —第  $i$  单元工作介质至吸收管热阻;  $M$ —工作介质质量流量;  $G_p$ —工作介质定压比热;  $T_i(t)$ —循环系统第  $i$  单元管壁温度;  $C_i$ —循环系统第  $i$  单元管壁热容;  $T_a(t)$ —环境空气温度;  $R_i$ —循环系统第  $i$  单元管壁至

环境空气热阻。

图 1 中:  $C_0$ —吸收管热容;  $C_c$ —腔体壁热容;  $C_r$ —金属软管热容;  $C_{sr}$ —下循环管热容;  $C_{ss}$ —上循环管热容;  $C_u$ —换热器热容;  $T_{li}(t)$ —腔体壁温度;  $Q_a(t)$ —吸收器吸收太阳直射辐射功率;  $T_{4i}(t)$ —腔体窗温度;  $T_{5i}(t)$ —隔热层温度;  $K_{ST,r}$ —金属软管至环境空气热阻;  $K_{ST,ss}$ —下循环管至环境空气热阻;  $K_{ST,ss}$ —上循环管至环境空气热阻;  $K_u$ —换热器管壁至被加热介质热阻;  $T_u(t)$ —用户温度。

式 (2) 为集热器各单位元段间的温度耦合方程, 式 (4) 为循环系统各部件段间的温度耦合方程。

## 2 四维热网络动态仿真模型建立的条件、方法

### 2.1 条件

2.1.1 在诸如供热、供冷管道或吸收器、换热器的管道柱状体中,沿轴向的温度梯度  $dT/dl$  和沿径向的温度梯度  $dT/dr$  相比可忽略。

2.1.2 由于  $dT/dl$  和  $dT/dr$  相比可忽略,各单元段或部件段之间轴向传热可忽略,由此可建立的两个互相独立的沿轴向一维温度场和沿径向一维(如果点对称)或二维(如果轴对称等)温度场,各单元段或部件段之间在管内存在温度耦合关系,在管外则按相互绝热考虑,即每个单元段内各节点的温度分布除管内工作介质存在升温或温降外,只取决于管径径向传热状况,而与轴向传热无关;

### 2.2 方法

2.2.1 单元(微元,以下“单元”均含有“微元”)的概念/段热阻、热容网络法:把集热器和循环系统各部件依据轴向温度梯度的大小各自分成许多单元段。在每个单元段内:①假设各部件在横切面上的平均温度在轴向上为线性分布;②对单元段内的各部件分别考虑其热容量和相互间传热热阻,并以此给出相应的热阻、热容网络图。

2.2.2 单元段节点能量平衡法:列出单元段热阻、热容网络中各节点的能量平衡方程(即节点数学模型),各节点的能量相互传输,以此建设单元段微分方程组。

2.2.3 分节点热容法:把各节点能量平衡微分方程离散化处理时,各部件的热容按单元段内的线性平均温度计算,传热按“一维”处理,对传热性能较差或由于热量分布不均匀导致温差较大的部件,可对原节点加密,分解成更多的热阻、热容网络节点,直至满足模型应达到的精度要求为止。

2.2.4 单元段间工作介质温度耦合法:相互联接的单元段热阻、热容网络在工作介质节点上,存在温度耦合关系,由此建立温度耦合方程。

2.2.5 闭式循环多段联合热网络法:由工作介质温

$$I_b(t) = \begin{cases} \frac{(t-6)}{4} \times 800 & (6.00 \sim 10.00) \\ 800 & (10.00 \sim 14.00) \\ 800 - \frac{(t-14)}{4} \times 800 & (14.00 \sim 18.00) \end{cases} \quad (\text{W/m}^2) \quad (5)$$

度耦合关系把集热器和循环系统所有各单元段的热阻、热容网络联系在一起,构成闭式循环多段联合热网络(如图1所示),再将闭式循环多段联合热网络中的各单元段微分方程组通过耦合方程相互联接,构成闭式循环多段联合微分方程组。

2.2.6 循环耦合迭代算法:各单元段内各节点温度联立求解,各单元段间工作介质温度相互耦合、循环迭代求解。

2.2.7 离散化方法:对微分方程中的时间微商进行前差分或后差分处理,从而得到相应的显式或隐式有限差分格式,再将逐时的太阳直射辐射强度  $I_b(t)$ 、环境空气温度  $T_a(t)$  和风速  $V_{om}(t)$  作为已知驱动力数据输入,联立求解闭式循环多段联合微分方程组,便可求得集热器系统各部件在一天中随着时间  $t$  的推进所达到的温度四维动态分布。

以上方法可总称为单元段分节点热阻、热容网络法——四维热网络,它的思想精华在于,首先把传统、粗糙的部件“集总”热容法改造发展成该部件中几个单元段上的  $n \cdot m$  个分节点热容,这个单元段划分的过程可无限精细到微元段水平,从而极大地提高了集热器系统的动态仿真精度;其次通过对吸收器及循环系统管路轴向与径向温度梯度所做的量级分析,忽略其部件在轴向的传热过程,这样只通过工作介质的温度耦合关系把  $n \times m + 5 \times 2$  个方程联系在一起,从而又极大地简化了数值计算强度。

## 3 算例

设抛物镜开口宽度  $B = 4 \text{ m}$ ,长度  $L = 100 \text{ m}$ ,聚光倍数  $E = 40$ ,吸收器开口圆心角  $J = 60^\circ$ ,腔体壁内侧均匀布置 7 根  $\varnothing 15 \times 3$  的钢管,吸收器隔热层厚度  $W = 80 \text{ mm}$ ,循环管道为  $\varnothing 40 \times 3$  的钢管,其隔热层厚度为  $50 \text{ mm}$ ,用户温度恒定在  $180^\circ$ (假想为相变蓄热过程),9 点前循环系统走旁通,9 点以后切换至相变蓄热换热器。

又设太阳直射辐射强度  $I_b(t)$  的变化为

设空气温度  $T_a(t)$  的变化为

$$T_a(t) = T_{a,\max} - \Gamma \cdot \Delta t_a$$

式中:  $T_a(t)$ —计算日第七小时的空气温度;  $T_{a,\max}$ —计算日的最高气温;  $\Delta t_a$ —日较差, 为计算日最高气温与最低气温之差, 可从文献中查得;  $\Gamma$ —模比系数, 可从文献中查得。

由四维热网络所计算得到的腔体式吸收器—槽形抛物镜集热器系统的温度沿轴向、径向和随时间的分布如图 2 至图 7 所示。由图中可知:

- 3.1 除保温层外表面温度  $T_s(t)$  是空气温度  $T_a(t)$  的强函数外, 其余各部件温度受太阳直射辐射强度  $I_b(t)$  影响较大, 并相对  $I_b(t)$  有一滞后;
- 3.2 工作介质温度可达  $300^\circ\text{C}$  左右, 因此该设计完全适用于中温热发电;
- 3.3 除保温层外表面温度  $T_s(t)$  外, 其余温度值, 在切换至热用户之前温度值上升较快, 在切换时, 存在一下降波动, 然后几乎平稳升降;

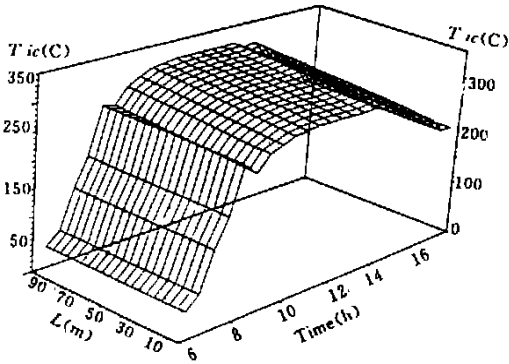


图 2 腔体壁温  $T_w$  沿长度  $L$  和随时间的分布

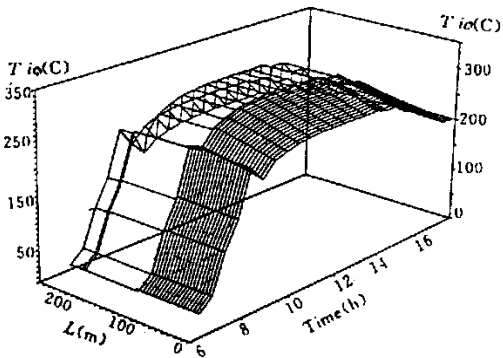


图 3 管道温度  $T_{i0}$  沿长度  $L$  和随时间的分布

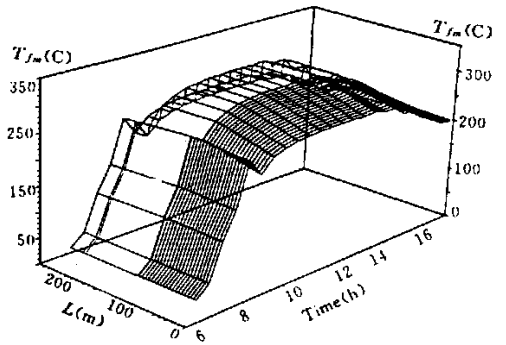


图 4 工作介质温度  $T_{fm}$  沿长度  $L$  和随时间的分布

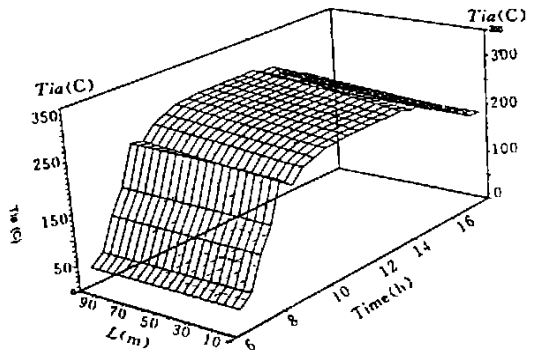


图 5 腔内空气温度  $T_{ia}$  沿长度  $L$  和随时间的分布

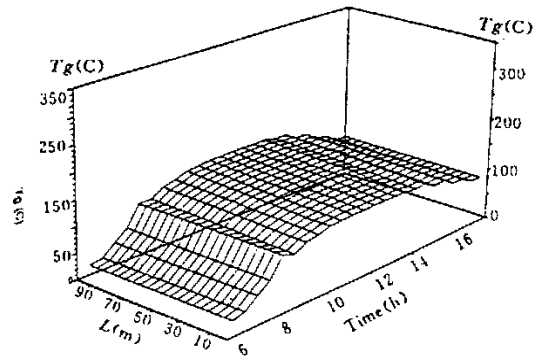


图 6 腔体窗温度  $T_g$  沿长度  $L$  和随时间的分布

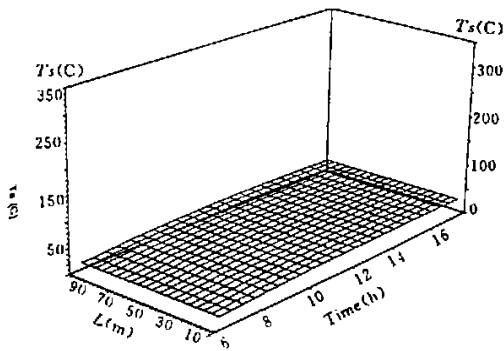


图 7 保温层外表面温度  $T_s$  沿长度  $L$  和  
随时间的分布

3.4 在切换至热用户之前,吸收器各部件进出口温差较小,切换至热用户后,吸收器各部件进出口温差明显加大;

3.5 由图可见腔体壁温  $T_{ic}$  比管簇温度  $T_b$  高  $10^{\circ}\text{C}$  以上,管簇温度比工作介质温度  $T_{in}$  高  $4^{\circ}\text{C}$  左右。

## 4 结语

作者简介 乔力,男,1963,博士生,主要从事太阳能、暖通工程方面的研究。现工作在中国科技大学。(通讯处 230026 安徽合肥 中国科大 13系)

(上接 387页)

则还可用于其它工质。

(4)快速性:程序计算时间不长,一般几分钟内即可完成。

本方法具有广泛的适应性,即使对于同一机组的计算,其允许考虑程度不同。细致的考虑可涉及火电机组的任一根小管道,如蒸汽管道疏水、排污管、轴封漏汽等;粗略的考虑可只涉及机组原则性热力系统,而计算程序没有任何变化,只是输入的拓扑结构发生变化。因此,利用同一程序可以进行不同程度上的计算,这些都由用户根据自身需要确定,从而使该方法及这种软件具有广泛的应用前景。

作者简介 岳洪,男,1964年生,讲师,主要研究现代火电厂热力系统;蒸汽—燃气联合循环;热电联产;动力设备仿真等。曾先后在国内外杂志上发表论文十余篇。现重庆大学热力工程学任教。(通讯处 400044 重庆沙坪坝)

通过程序演算证明四维热阻、热容网络对腔体式吸收器—槽形抛物镜太阳能集热器系统的动态仿真是可行的,其结果与国内外的类似装置运行参数相仿。四维热网络模型把传统模型中的系统部件的“集总”热容法发展成对该部件众多分节点热容的求解,因而极大地提高了动态仿真精度,使“集总”热容法随时间的一维动态仿真,扩充为沿轴向一维、沿径向二维和随时间一维的四维动态仿真;由于忽略了除工作介质以外的其它部件沿轴向的传热过程,从而又极大地简化了模型计算量。

四维热网络可方便地运用于其它以传热为主要能量转换形式的闭式循环能源工程进行动态仿真,如对闭式循环的锅炉供热系统、压缩式制冷循环、供热或供冷管路等进行动态仿真,对于以可用能为主要能量转换形式闭式循环能源工程,如果辅之以流场计算模,则仍有望对其进行动态仿真。

## 参 考 文 献

- 1 葛斯石等.太阳能工程——原理和应用,北京:学学期刊出版社,1988

## 参 考 文 献

- 1 Kam W Li. Power plant system design. John Wiley & son Ltd. 1985
- 2 郭炳然. 火电厂计算机分析,水利电力出版社,1989
- 3 岳洪. 回热系统通用热平衡及其应用. 汽轮机技术, 1990, 32(3)
- 4 Perz E. A computer method for thermal power cycle calculation. ASME Journal of Engineering for Gas Turbine and power, 1991, 113
- 5 Sonnenschei H. A modular optimal calculation method of power station energy balance and plant efficiency. ASME Journal of Engineering for Power. 1982, 104

scheme some meaningful conclusions were obtained, which can serve as a solid basis for parameter optimization and selection in future design work. **Key words** gas turbine, simulation technology, mathematical model

**太阳能集热器系统的四维热网络动态仿真模型 = Dynamic Simulation Model of a Four-dimensional Heat Network for a Solar Energy Collector System** [刊, 中] Chou Qiaoli, Ye Hong, et al (China National University of Science & Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12(5). - 388~ 392  
The authors have for the first time come up with the conception of a unit(differential) section separate node point heat resistance and heat capacity four-dimensional heat network for a solar energy collector system and on this basis set up a heat collection process dynamic emulation model for the solar energy collector system with a cavity absorber-trough paraboloidal mirror. Under the conditions of a variation of all outside driving forces this model can be used not only to determine the variation of temperature distribution with time of any section of a component but also obtain the spatial distribution of the temperature of each component at any time along the collector system, thereby realizing for the first time the four-dimensional dynamic emulation of the operating conditions of a large-sized solar energy collector. **Key words** cavity absorber, solar energy collector, Four-dimensional heat network dynamic emulation

**机组旁路系统减温减压装置热力特性的计算机分析 = Computer Aided Analysis of the Thermodynamic Properties of a Pressure and Temperature Reduction Device for a Steam Turbine Bypass System** [刊, 中] Zhang Qi, Wang Shizhong, Wang Huaibin (Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12(5). - 369~ 373

On the basis of an IFC formula and one-dimensional search method realized are a computer-aided calculation of steam thermodynamic properties and a computer-aided search of steam enthalpy-entropy diagram. Through the use of two-phase flow theory and compressible fluid thermodynamic principles the problem of steam and cooling water mixed flow multi-stage multi-orifice throttling can be transformed into a problem of iterative root extraction of a nonlinear equation. The above makes it possible to perform a computer-aided analysis of the thermodynamic properties of a pressure and temperature reduction device for a steam turbine bypass system. **Key words** steam turbine, bypass system, pressure and temperature reduction device, thermodynamic properties, computer-aided analysis

**汽泡生长诱导的速度场 = An Induced Velocity Field of Steam Bubble Growth** [刊, 中] Gu Pingdao, Lu Changgen (Jiangsu Petrochemical Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12(5). - 374~ 376

With the help of Apollonius conformal transformation and Fourier series method obtained is an induced velocity field of steam bubble growth process in a stationary flow field. **Key words** steam bubble expansion, induced velocity field, conformal transformation, expansion circle

**含不凝气体的蒸汽冷凝换热系数的关联式 = A Correlation of Condensation Heat Exchange Factor of Steam Containing Non-condensable Gases** [刊, 中] Xiong Mengquing, Lin Zonghu (Xi'an Jiaotong University), Liu Shengding (Xi'an Architectural University of Science & Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12(5). - 377~ 380

The authors have established a heat exchange model for condensation heat exchange of steam-containing non-condensable gases. By using the said model and numerous heat exchange data a correlation for factor of condensation heat exchange between air-containing steam and the outer surface of a horizontal smooth round tube is obtained, which has practical engineering applications and is easy to use. **Key words** mixed gases, conden-