

ISSN: 2328-0514 Volume 12, Number 6, December 2024

Hans 汉斯

# 电力与能源进展

Advances in Energy and Power Engineering

Dian Li Yu Neng Yuan Jin Zhan

2024年12月12卷6期



ISSN: 2328-0514



<https://www.hanspub.org/journal/aepe>

# Editorial Board

## 编委名单

ISSN: 2328-0514 (Print) ISSN: 2328-0506 (Online)

<https://www.hanspub.org/journal/aepe>

### 编委会（按字母排序）

谌伟民副教授 武汉工程大学  
丁勇教授 重庆大学  
方梦祥教授 浙江大学  
韩敏芳教授 清华大学  
韩庆教授 东北大学  
何茜副教授 电子科技大学  
黄建兵副教授 西安交通大学  
刘益青高级工程师 积成电子股份有限公司  
刘中良教授 北京工业大学  
柳文成教授 台湾联合大学  
栾涛教授 山东大学  
冉景煜教授 重庆大学  
孙志嘉研究员 中国科学院高能物理研究所  
王坚教授 同济大学  
王敏庆教授 西北工业大学  
王馨副教授 清华大学  
吴有基教授 台湾联合大学  
谢学军教授 武汉大学  
姚文隆教授 高雄第一科技大学  
叶林教授 中国农业大学  
张传国教授 厦门大学  
张金亮教授 北京师范大学  
张晓晖教授 苏州大学  
赵福宇教授 西安交通大学  
赵永椿副教授 华中科技大学  
赵振宇教授 华北电力大学  
钟北京教授 清华大学  
周亚明高级工程师 上海建安化工设计有限公司  
朱甄教授 俄克拉荷马中央大学

### Editorial Board (According to Alphabet)

Dr. Weiming Chen Wuhan Institute of Technology  
Prof. Yong Ding Chongqing University  
Prof. Mengxiang Fang Zhejiang University  
Prof. Minfang Han Tsinghua University  
Prof. Qing Han Northeastern University  
Dr. Qian He University of Electronic Science and Technology of China  
Dr. Jianbing Huang Xi'an Jiaotong University  
Dr. Yiqing Liu Integrated Electronic Systems Lab Co., Ltd.  
Prof. Zhongliang Liu Beijing University of Technology  
Prof. Wencheng Liu Taiwan United University  
Prof. Tao Luan Shandong University  
Prof. Jingyu Ran Chongqing University  
Dr. Zhijia Sun Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences  
Prof. Jian Wang Tongji University  
Prof. Minqing Wang Northwestern Polytechnical University  
Dr. Xin Wang Tsinghua University  
Prof. Yu-Chi Wu Taiwan United University  
Prof. Xuejun Xie Wuhan University  
Prof. Wenlong Yao Kaohsiung First University of Science and Technology  
Prof. Lin Ye China Agricultural University  
Prof. Chuanguo Zhang Xiamen University  
Prof. Jinliang Zhang Beijing Normal University  
Dr. Xiaohui Zhang Soochow University  
Prof. Fuyu Zhao Xi'an Jiaotong University  
Dr. Yongchun Zhao Huazhong University of Science and Technology  
Prof. Zhenyu Zhao North China Electric Power University  
Prof. Beijing Zhong Tsinghua University  
Dr. Yaming Zhou Shanghai Jianan Chemical Engineering Co., Ltd.  
Prof. Zhen Zhu University of Central Oklahoma

## TABLE OF CONTENTS

### 目 录

<b>偏移控制下 Hyperjerk 系统复杂振荡行为的动态分析</b> <b>Dynamic Analysis of Complex Oscillation Behavior in Hyperjerk System under Offset Control</b>	
陈德, 于蓉蓉, 谢勇 .....	173
<b>大型火电机组高中参数供热综合性能仿真研究</b> <b>Simulation Study on Comprehensive Performance of High and Medium Parameter Heating for Large Thermal Power Units</b>	
王书辉, 陈贻颢, 谭宏, 王斌, 竺有刚, 栾文龙 .....	186
<b>超低负荷下炉膛管内汽水换热性能仿真研究</b> <b>Simulation Study on Steam Water Heat Transfer Performance in Furnace Tubes under Ultra-Low Load</b>	
林永江, 涂宏红, 张扬帆, 王斌, 竺有刚, 乔云枫, 栾文龙 .....	193
<b>纳米流体热毛细对流流型结构及换热机理研究</b> <b>Study on the Flow Pattern Structure and Heat Transfer Mechanism of Nanofluid Thermocapillary Convection</b>	
贾颖, 张永春, 董文利, 孙健 .....	201
<b>基于 LS-SVM 和小波分解的风电功率预测模型研究</b> <b>Research on Wind Power Forecasting Model Based on LS-SVM and Wavelet Decomposition</b>	
王阳 .....	215

## 期刊信息

期刊中文名称:《电力与能源进展》

期刊英文名称: **Advances in Energy and Power Engineering**

期刊缩写: **AEPE**

出刊周期: 双月刊

语 种: 中文

出版机构: 汉斯出版社(Hans Publishers, <https://www.hanspub.org/>)

编辑单位:《电力与能源进展》编辑部

网 址: <https://www.hanspub.org/journal/aepe>

## 订阅信息

通过中国教育图书进出口有限公司订购

订阅邮箱: [sub@hanspub.org](mailto:sub@hanspub.org)

订阅价格: 180 美元每年

## 广告服务

联系邮箱: [adv@hanspub.org](mailto:adv@hanspub.org)

版权所有: 汉斯出版社(Hans Publishers)

Copyright©2024 Hans Publishers, Inc.

## 版权声明

### 文章版权和重复使用权说明

本期刊版权由汉斯出版社所有。

本期刊文章已获得知识共享署名国际组织(Creative Commons Attribution International License)的认证许可。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

### 单篇文章版权说明

文章版权由文章作者与汉斯出版社所有。

### 单篇文章重复使用权说明

注: 著作权者准许任选 CC BY 或 CC BY-NC 作为文章的重复使用权, 请慎重考虑。

## 权责声明

期刊所刊载的评论、意见、观点等均出自文章作者个人立场, 不代表本出版社的观点或看法。对于文章任何部分及文内引用材料给任何个人、机构、及其财产所带来的任何损失及伤害, 本出版社均不承担任何责任。我们郑重声明, 本出版社的出版业务, 不构成对任何产品商业性能的保证, 也不表示本社业已承认本社出版物中所述内容适用于某特定用途。如有疑问, 请寻找专业人士协助。

# 偏移控制下Hyperjerk系统复杂振荡行为的动态分析

陈 德<sup>1</sup>, 于蓉蓉<sup>1\*</sup>, 谢 勇<sup>2</sup>

<sup>1</sup>西京学院计算机学院, 陕西 西安

<sup>2</sup>西安交通大学航天航空学院, 机械结构强度与振动国家重点实验室, 陕西 西安

收稿日期: 2024年10月15日; 录用日期: 2024年11月29日; 发布日期: 2024年12月11日

## 摘 要

运用非线性动力学理论和方法分析一种具有指数非线性的hyperjerk电路系统的复杂动力学行为, 发现周期振荡与混沌现象共存的现象。首先, 通过分析电路系统中物理参数的取值对系统复杂行为的影响, 得出物理参数值对系统会产生不同的分岔现象。随着物理参数的逐渐增加, 对系统周期性的影响呈现稳步递减的现象; 其次, 研究发现系统的复杂动力学行为对初始条件的取值也具有敏感性, 但是不同初始值和物理参数动态调控下系统会产生周期与混沌现象共存的非对称混合模式簇振荡现象; 同时发现一种非常罕见的气泡分岔现象。最后, 对系统增加一个偏移位置常数进行控制。数值计算结果表明, 偏移控制常数对系统全局的动力学行为没有改变, 只影响相应位置信号的整体相位值。

## 关键词

混合模式, Hyperjerk, 分岔图, 偏移控制

# Dynamic Analysis of Complex Oscillation Behavior in Hyperjerk System under Offset Control

De Chen<sup>1</sup>, Rongrong Yu<sup>1\*</sup>, Yong Xie<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Computer Science, Xijing University, Xi'an Shaanxi

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Strength and Vibration of Mechanical Structures, School of Aerospace Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi

Received: Oct. 15<sup>th</sup>, 2024; accepted: Nov. 29<sup>th</sup>, 2024; published: Dec. 11<sup>th</sup>, 2024

\*通讯作者。

文章引用: 陈德, 于蓉蓉, 谢勇. 偏移控制下 Hyperjerk 系统复杂振荡行为的动态分析[J]. 电力与能源进展, 2024, 12(6): 173-185. DOI: 10.12677/aepe.2024.126020

## Abstract

In order to study complex dynamical behaviours behavior exhibited by the hyperjerk circuit system with nonlinear components, the complex oscillation behavior of the system is analyzed using nonlinear dynamics theory and methods. Firstly, the influence of the value of the physical parameters on the complex behavior of the system in the circuit system is analyzed, and there are different bifurcation phenomena for the system produced by the physical parameter values. The change of system periodicity is steadily decreasing as the physical parameters increase gradually. Secondly, the complex dynamical behaviours of the system are also sensitive to the values of the initial conditions. However, the system produces an asymmetric mixed mode bursting oscillation phenomenon which is the coexistence of periodic and chaotic phenomena under the dynamic regulation of different initial values and physical parameters. Meanwhile, a very rare phenomenon named bubbles of bifurcation is also found. Finally, an offset position constant is added to control the signal of the system. The numerical results indicate that the offsetting control constant value does not change the global dynamics behavior of the system, and the overall phase value of the corresponding position signal is only affected.

## Keywords

Mix-Mode, Hyperjerk, Bifurcation Diagram, Offset Control

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来, 有学者提出了一种新奇的混沌系统, 许多研究人员通过在混沌系统/电路中选择非线性组件来丰富其复杂性, 从而产生具有极其丰富的特性(瞬态混沌、混沌、超混沌、超混沌、多稳定性、超扩展性、极端多稳定性、隐藏振荡、多卷轴混沌等), 吸引了很多人去解释复杂电路的现象, 所以这种复杂的振荡模式行为或振荡模式共存现象吸引了大量研究与探索。M. P. Haniyas 等人[1]提出了一种二极管谐振器的混沌电路, 并采用时间序列分析, 计算相关性与最小嵌入维数证明了混沌的存在。G. D. Leutcho 等人[2]分析了具有一个反平行半导体二极管组成的双曲正弦非线性成分的四阶混沌电路, 利用相位图、分岔图等数值手段监测系统参数空间中各种窗口内发生的多个共存吸引子的动力学特性。Q. Lai 等人[3]利用分岔图、时间序列图和李雅普诺夫指数等研究一个四维混沌系统的共存奇异吸引子和平衡态, 有效验证了具有非线性部分(比如正弦函数、符号函数)的系统中会出现多个共存吸引子的数值结果。Negou. A. N. 等人[4]运用了不动点性质, 研究了一种非线性组件是双曲正弦的单参数抖动系统, 在控制参数电阻下调整系统的对称性, 通过混沌过渡的分岔图, 相位图等监测系统参数发现了倍周期分岔, 反向分岔等复杂的动力学现象。B. Bo-Cheng 等人[5]用通量控制的忆阻器和负电导代替二极管, 利用时间序列、相位图和分岔图等动力学分析方法, 研究了新参数和初始条件下系统具有瞬态混沌和间歇周期的稳定混沌等动力学行为。Z. Wei 等人[6]研究了具有点吸引子、极限环、准周期动力学、混沌或超混沌等多个吸引子共存的 5 维超混沌发电系统, 利用数值积分建立相位平面轨迹、分岔图验证在参数空间某些区域系统具有多稳定性和六种复杂动态行为并验证了数值积分的结果。J. Kengne 等人[7]从平衡点和稳定性、相位图、分岔图研究一个具有平滑非线性超反射系统的动力学, 通过数值分析解释不同初始条件的选择形成周期

加倍、混沌以及多个吸引子共存的现象。S. Vaidyanathan 等人[8]研究了具有两个指数非线性的超反射系统，通过平衡点分析、分岔图、李雅普诺夫指数等发现了混沌系统的复杂动力学特性并利用该系统复杂的动力学特征进行了图像加密和声音隐写技术。T. Fonzin Fozin 等人[9]分析了由一个双曲正弦非线性函数组成的简化超混沌振荡系统，在转动系统控制参数时利用相关分岔工具研究了包含超混沌、环面、周期加倍混沌与迟滞现象等丰富的动力学行为。根据近年来的研究，清楚运用分岔图、相位图等数值分析方法，可以去研究复杂现象的产生受哪些参数和初值条件的影响，并且去研究系统的全局动力学是否可以通过参数去控制，这才是本文的主要研究意义。

近年来，G. D. Leutcho 等人[10] [11]研究了一个结构相对简单的 hyperjerk 电路，只有一个半导体二极管作为非线性函数，但是利用分岔图、相位图、李雅普诺夫函数等非线性手段，在研究参数和初始条件下能够发现丰富和复杂的动力学行为，为实验结果提供了理论支撑。通过合理设计非线性组件，能够在所提出的 hyperjerk 电路中观察到在相空间中出现周期或混沌的混合模式簇振荡、共存吸引子等多种复杂而又丰富的动力学行为。由于 hyperjerk 电路系统简单而结构复杂的动力学特性，引起了广泛关注。于蓉蓉等人[12] [13]通过数值模拟，研究了复杂电路中混合模式振荡的变化规律，发现改变电路发放模式的参数区域。本人研究的系统主要考查产生的复杂现象对参数的敏感程度是怎样，动态调控参数区域对周期或混沌现象产生的规则性变化情况进行分析。

在不同的时间尺度下去选取适当的动态参数和初始值条件，探索复杂系统的混合模式振荡或多种吸引子共存的现象，这是一个很有吸引力的研究内容。本文研究的新颖之处在于利用相位图、分岔图等手段，研究系统的复杂性质，研究具有两个指数函数组成的非线性组件下系统的复杂动力学行为，并对系统进行相位偏移控制研究全局的动力学行为。为如何正确选择某些动态参数，去研究系统隐藏吸引子共存现象提供理论数据，为实验电路模拟或实现做准备。

## 2. Hyperjerk 系统振荡模型

本文研究包含 6 个放大器，10 个电阻，4 个电容器和两个二极管组成结构简单的 hyperjerk 电路模型 [10]的动力学行为，通过数值模拟，分析二极管作为指数函数组件对系统振荡行为的影响：

$$\begin{cases} C_1 \frac{dV_1}{dt} = \frac{V_2}{R}, \\ C_2 \frac{dV_2}{dt} = \frac{V_3}{R}, \\ C_3 \frac{dV_3}{dt} = \frac{V_4}{R_4}, \\ C_4 \frac{dV_4}{dt} = -\frac{V_1}{R_3} - \frac{V_2}{R_2} - \frac{V_4}{R_1} - I_{diode} \end{cases} \quad (1)$$

在式(1)中  $I_{diode}$  描述通过二极管的电流，假设本系统在电路中的电阻，电容是在线性范围内的情况下，这是唯一的非线性组件部分。因此，根据肖克利二极管[1]方程进行简化二极管的电流-电压特性，得到一个指数方程如下，

$$I_{diode} = I_s \left[ \exp\left(\frac{V_D}{nV_T}\right) - 1 \right],$$

其中， $I_s = 2.68 \times 10^{-9}$  A 是二极管饱和电流， $n = 1.9$  是质量因子，它的值范围在 1 和 2 之间，取决于材料的选择和二极管的物理结构。 $V_T = 0.026$  V 是热电压，通过二极管的电压， $V_1, V_2, V_3, V_4$  分别是通过四个电容  $C_1, C_2, C_3, C_4$  的电压。

对电路系统进行无量纲化处理, 采用一系列变量和参数, 比如取一系列参数如下: 令  $V_r = nV_T$ , 则  $V_1 = XV_r$ ,  $V_2 = YV_r$ ,  $V_3 = ZV_r$ ,  $V_4 = WV_r$ ; 电阻比  $a = \frac{R}{R_1}$ ,  $b = \frac{R}{R_2}$ ,  $c = \frac{R}{R_3}$ ,  $d = \frac{R}{R_4}$ ;  $\varepsilon = \frac{RI_s}{V_r}$ ,  $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C$ ,  $t = (RC)\tau$ 。

为了方便数值分析与处理, 得到如下的微分方程

$$\begin{cases} \frac{dX}{d\tau} = Y, \\ \frac{dY}{d\tau} = Z, \\ \frac{dZ}{d\tau} = dW, \\ \frac{dW}{d\tau} = -cX - bY - aW - f \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $X, Y, Z, W$  是状态变量,  $a, b, c, d$  是正数。

我们考虑当电路具有两个非线性指数函数二极管下系统的动力学现象:

当  $f = f_2 = \varepsilon(e^Y - 1) + \varepsilon(e^Z - 1)$  时, 分析电路中具有两个指数函数二极管时, 即  $V_{D1} = Z$ ,  $V_{D2} = Y$  分别是通过二极管的电压。这时分析周期、混沌、共存吸引子等复杂动力现象受参数系统变化的影响情况。

参数  $\varepsilon$  取决于固有的二极管特性。在数值解析过程中, 保持如下参数不变:  $\varepsilon = 0.000542915$ 。而在物理参数  $a = \frac{R}{R_a}$ ,  $b = \frac{R}{R_b}$ ,  $c = \frac{R}{R_c}$ ,  $d = \frac{R}{R_d}$  作为控制参数时, 本文重在研究电路系统在两个非线性组件下表现出的复杂动力学行为在控制参数和初始条件下的变化情况, 为后期数值模拟实验电路设计做出理论分析的基础。

### 3. 物理参数电阻比值下的复杂动力学现象

为了研究物理参数对振荡模式的影响, 系统在初始值为  $[0, 0.1, 0, 1]$ ,  $b = 4$ ,  $d = 20$  不变时取其它参数值分别为  $a = 5.2$ ,  $c = 4.48$ ;  $a = 4.92$ ,  $c = 2.6$ ;  $a = 4.75$ ,  $c = 3.18$  时, 系统在这些不同参数下都表现为周期 2 的振荡行为(图 1(a)~(c)); 而当参数分别为  $a = 4.92$ ,  $c = 4.35$ ;  $a = 4.75$ ,  $c = 3.68$ ;  $a = 4.65$ ,  $c = 3.08$  下系统在这些不同参数下都表现为周期 4 的振荡行为(图 1(d)~(f))。从图 1(b)和图 1(d)中发现控制参数  $c$  不同产生不同类型的周期现象, 同样的从图 1(c)和图 1(e)中控制参数  $a$  不变, 但是同样可以从控制参数  $c$  的取值不同得到周期 2 与周期 4 的振荡行为。

由此可以看出, 系统周期数目受控制参数  $a, c$  取值影响。这时, 系统在初始值为  $[0, 0.1, 0, 1]$ ,  $b = 4$ ,  $d = 20$  不变时研究不同的控制参数值下会出现同一类型的周期振荡现象发生。进而, 我们研究控制参数在一定取值范围内时, 对系统振荡周期数目的变化情况进行分析研究, 如图 2 所示。

通过图 2 看到不同的物理参数会产生同一种类型的周期现象, 并且随着控制参数  $a$  的取值逐渐增加, 整体效果上来看周期行为大致呈现逐步减小的阶梯状变化趋势。接下来当物理参数  $a$  取值范围在  $[4.5, 5]$  范围内分别研究物理参数  $c = 2.5$ ,  $d = 20$  和  $c = 4.5$ ,  $d = 19.46$  下, 系统的状态变量  $X$  的分岔图(如图 3)。

从图 3 中可以看出, 控制参数  $a$  逐渐增加时系统表现出不同的分岔动力学行为, 当  $c = 2.5$  与  $c = 4.5$  时都出现周期振荡与混沌现象, 而  $c$  值越小振荡行为出现更复杂, 并且系统都出现倍周期分岔现象。

因此, 在图 3(b)中控制参数  $a$  的影响下, 系统表现出周期 1、周期 2、周期 4、混沌等复杂模式现象。接下来研究在控制参数  $c$  的影响下, 不同物理参数对系统中快变量  $Z$  与  $W$  动力学现象的变化情况进行分析。

分别选取  $c = 2.5$  与  $c = 4.5$  时，随着参数  $a$  逐渐增加，系统表现出不同的分岔行为；分岔图 4 中不同参数下控制着不同的周期现象，参数  $c$  的选取对状态变量  $Z - W$  的行为影响比较大。

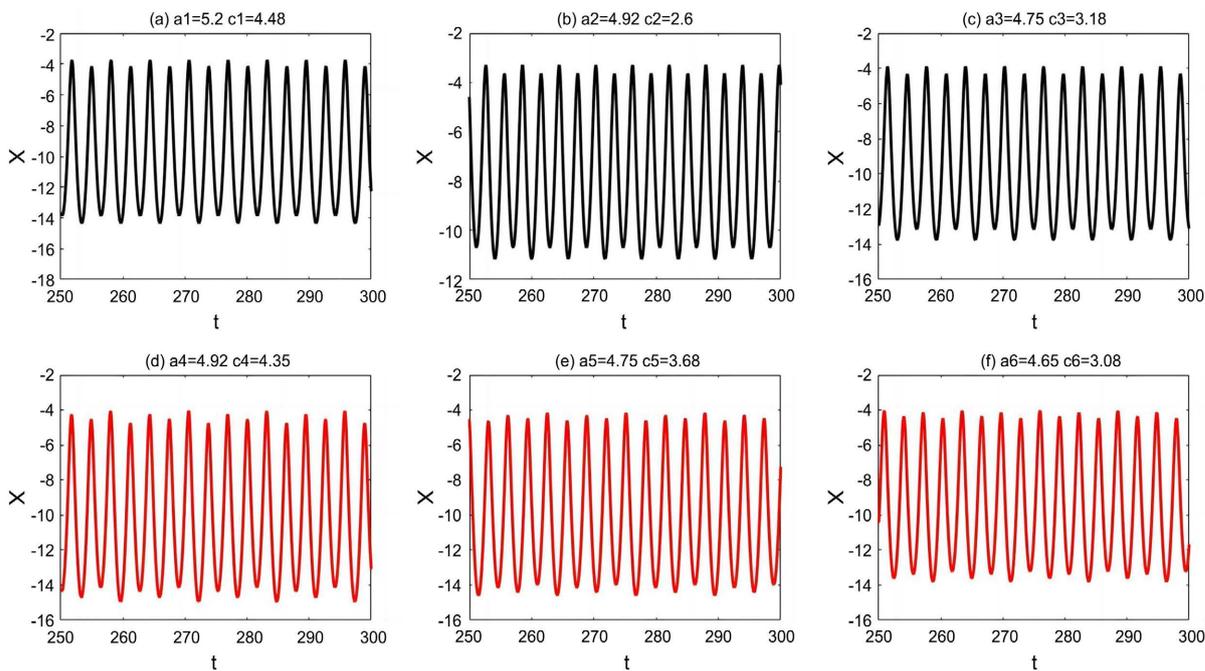


Figure 1. Time evolution of the variable  $X$  under different control parameter values

图 1. 不同控制参数值下变量  $X$  的时间序列

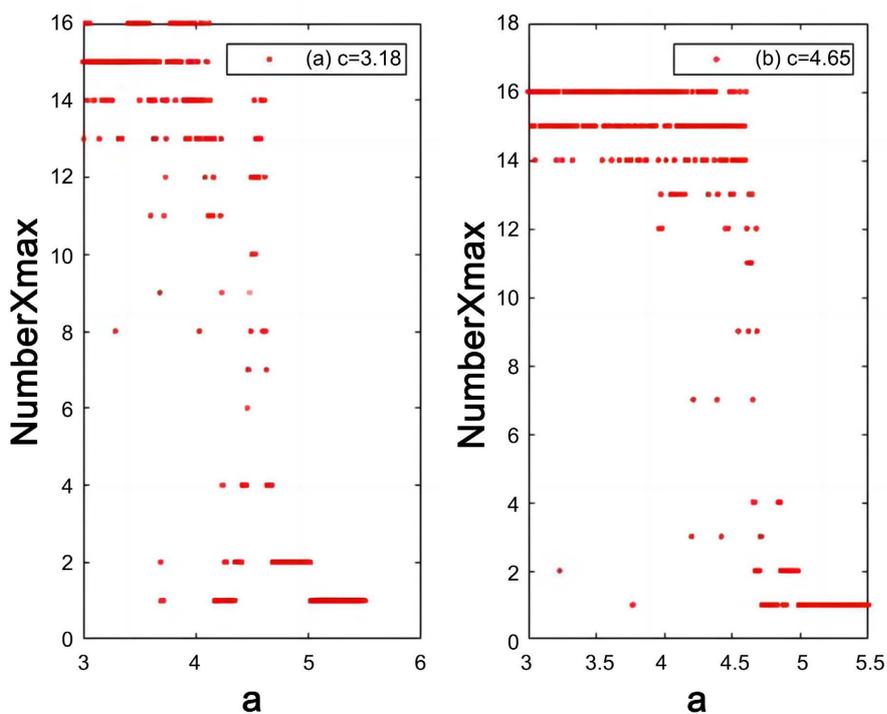
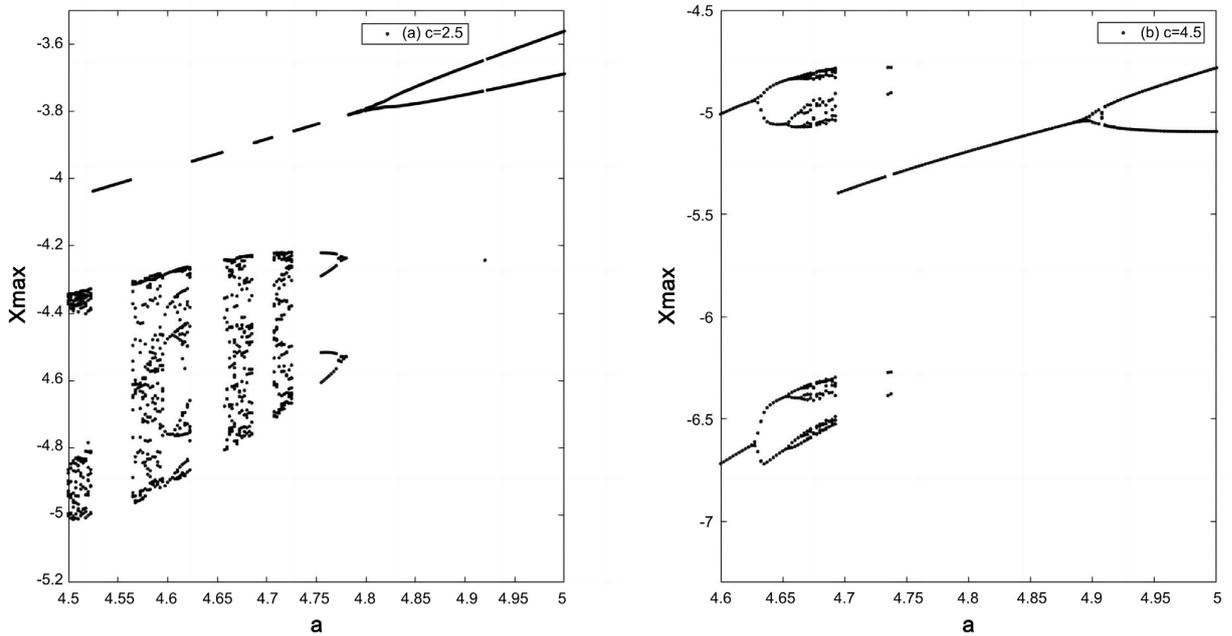
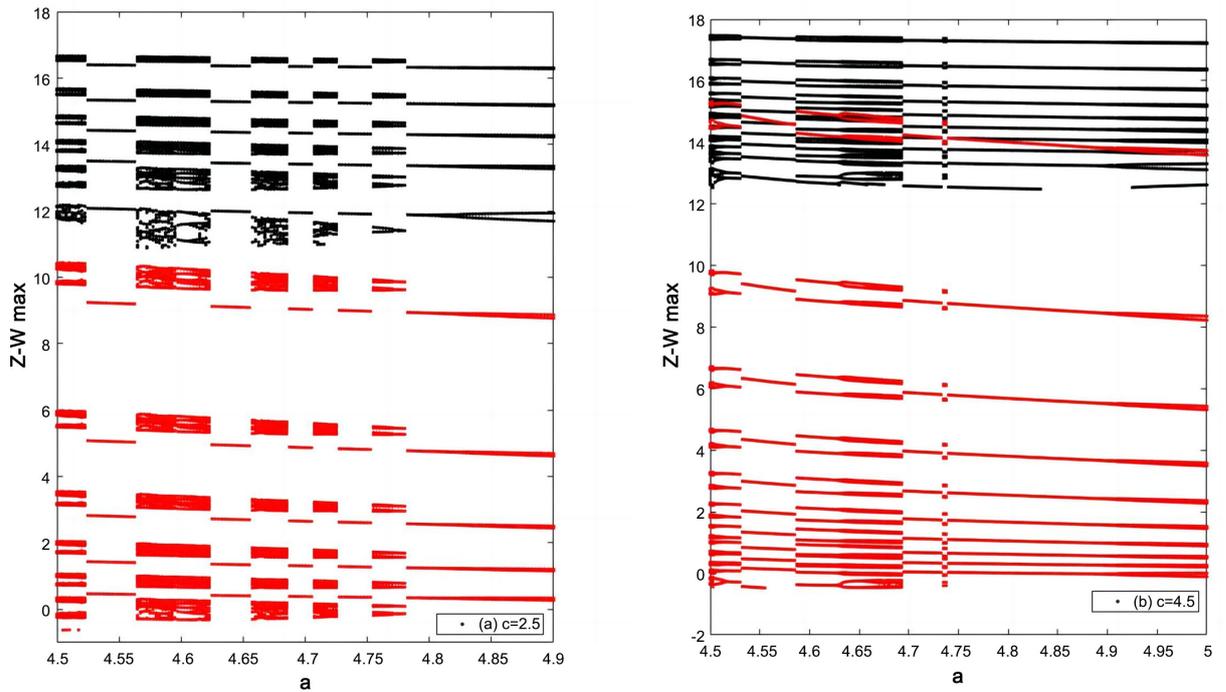


Figure 2. Maximum number of the state variable  $X$

图 2. 状态变量  $X$  的最大值数目



**Figure 3.** Bifurcation diagram of the state variable  $X$   
**图 3.** 系统中状态变量  $X$  的分岔图



**Figure 4.** Bifurcation diagram of the state variable  $Z-W$  under different parameter values  
**图 4.** 系统状态变量  $Z-W$  在不同参数值下的分岔图

#### 4. 不同初始值下的复杂动力学现象

上述已经研究了初值不变情况下控制参数取值不同对系统会产生复杂的振荡现象。接下来进一步研究在控制参数  $a$  在一定范围内取值的情况下，不同初始值对系统的动力学的影响情况。通过如图中初始

值分别选取  $y_0=[0,0.5,0.1,1]$ ,  $y_0=[0.01,0,0,0.2]$ ,  $y_0=[0,-0.5,0.1,-1]$ ,  $y_0=[0.2,0,0,0]$  下系统表现出不同类型的分岔图(如图 5)。

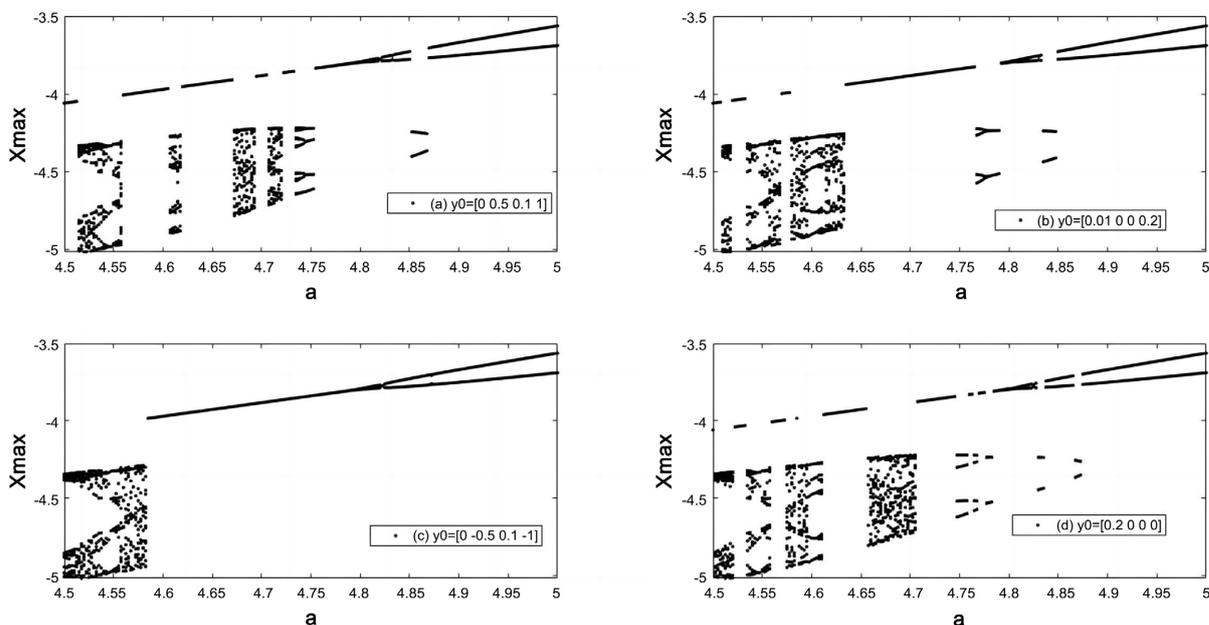


Figure 5. Bifurcation diagram of the state variable  $X$  under different initial conditions

图 5. 系统状态变量  $X$  在不同初始值条件下的分岔图

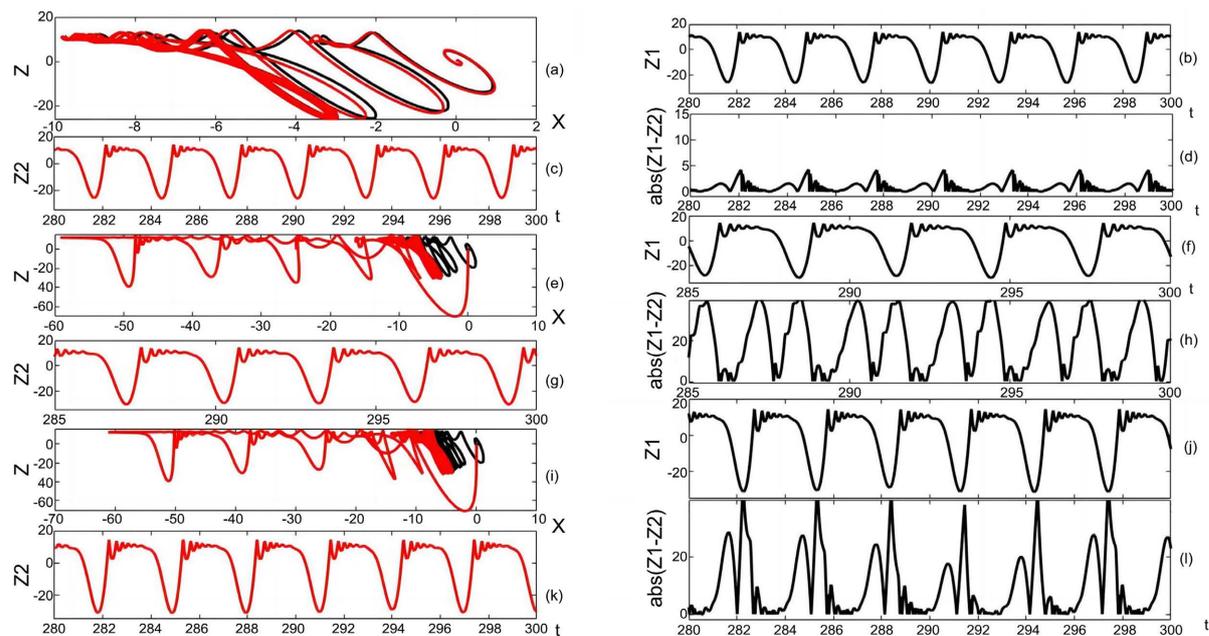


Figure 6. The time series (2-3, 6-7, 10-11), phase diagrams (1, 5, 9), and phase difference diagrams (4, 8, 12) of the system under different parameters

图 6. 不同参数下的系统的时间序列(2-3, 6-7, 10-11)、和相位图(1, 5, 9)、相位差图(4, 8, 12)

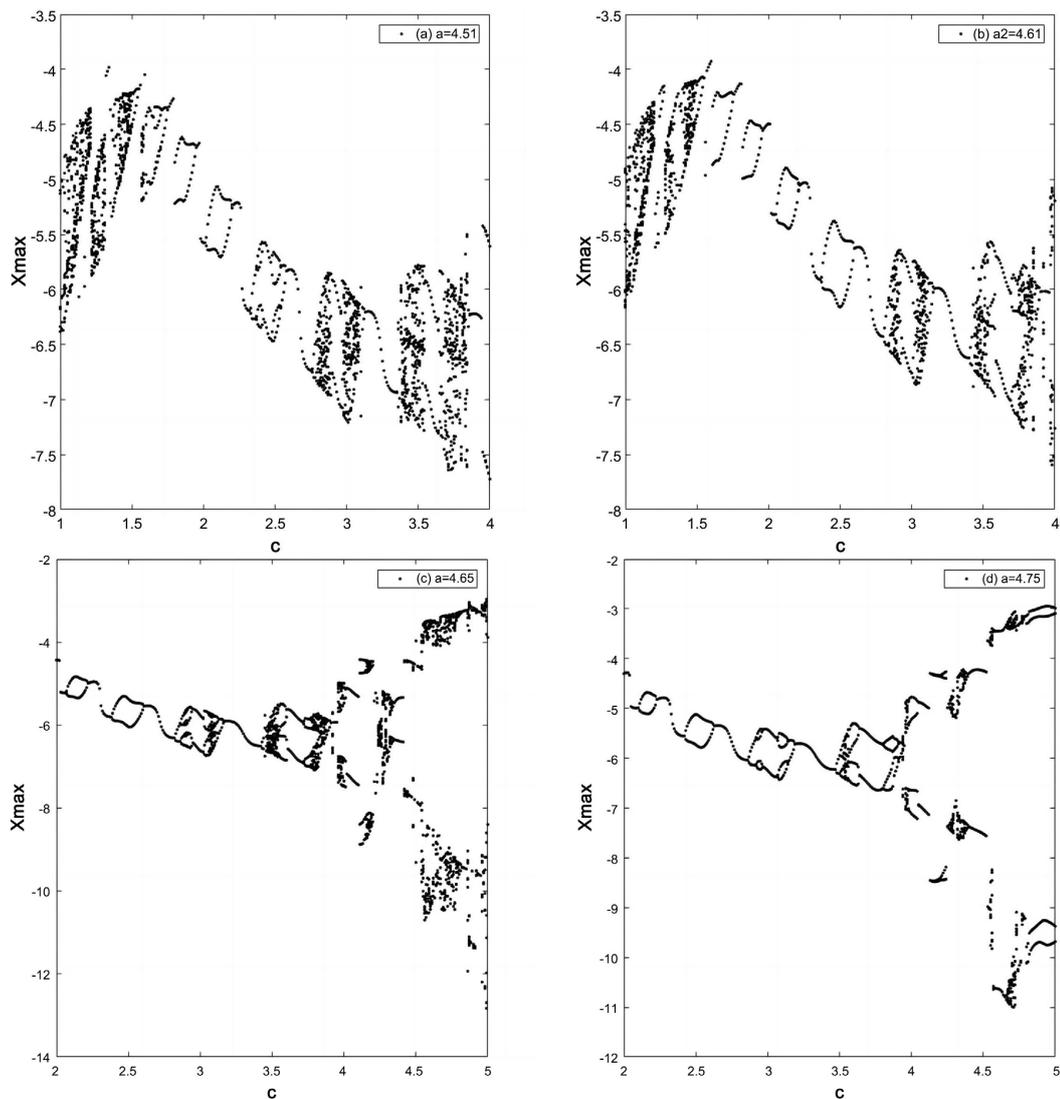
系统复杂动力学现象的发生受物理参数和初值条件的影响, 并发现振荡行为与物理参数取值有关, 也对初值具有敏感性。接下来研究发现, 虽然系统在不同初始值和物理参数下复杂动力学出现完全不同

的行为，但是在一定的数值动态调控下，系统出现了非对称的振荡行为，却有不同周期或混沌现象共存存在的行为发生(其他参数选取  $b=4$ ， $c=2.5$ ， $d=20$ )。

在图 6 中从参数取值角度来看，控制参数  $a$  相同值下，不同初值产生的周期共存现象或周期与混沌共存现象；图 6 中研究发现周期的和混沌的吸引子，当控制参数  $a=5$ ，不同初始值  $y01=(0,0,0,0.19)$  和  $y02=(0,0,0,0.2)$  时出现周期 1 与周期 2 不同的吸引子共存现象，当参数  $a=4.4$  时，不同初始值  $y03=(0,0,0,0.2)$  和  $y04=(0,0,0,-23.4)$  下会出现周期 1 与混沌共存现象，而控制参数  $a=4.3$ ，不同初始值  $y03=(0,0,0,0.2)$  和  $y04=(0,0,0,-23.4)$  下周期 1 与更复杂混沌尺度大的吸引子也有共存现象。而同一初始值下，控制参数  $a$  越小可能产生更复杂的振荡与周期现象共存。在这些参数下，出现了非对称的混合模式簇振荡行为。

### 5. 气泡分岔共存现象

研究在控制参数下系统出现的复杂现象中，会存在一种比较罕见的分岔现象，也就是气泡分岔现象。这一现象很少有文献报道过。接下来，在初始值是  $[0,0.1,0,1]$  与控制参数的不同取值范围下，观察系统表现出的不同类型的气泡分岔现象(如图 7)。



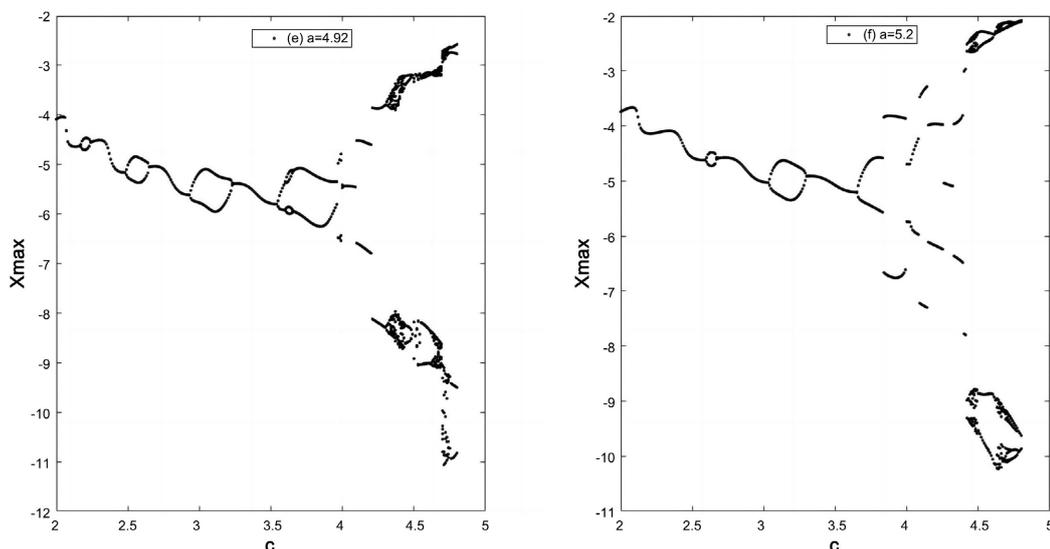


Figure 7. Bifurcation diagram of the state variable  $X$  under different parameter values

图7. 系统状态变量  $X$  在不同参数值下的分岔图

如图气泡分岔图7中依次选取  $a=4.51$ ,  $a=4.61$ ,  $a=4.65$ ,  $a=4.75$ ,  $a=4.92$ ,  $a=5.2$  下, 随着控制参数  $c$  取值范围  $[2,5]$  内发生了一系列的气泡分岔现象。当  $a$  取值逐渐较大, 系统出现平行气泡的串线现象; 而  $a$  的值逐渐变小时系统会出现周期气泡和混沌气泡共存的现象, 并且取值越小, 出现混沌的现象机会更多, 系统的振荡行为会更复杂。如图7(a)中出现1个气泡, 图7(b)中出现2个气泡, 随着控制参数值  $a$  的逐渐增加, 图7(c)中出现6个气泡, 明显发现图7(d)参数  $a=4.75$  下系统出现周期2与周期4共存的气泡8个, 并且另外2个气泡与之串联, 此时系统表现出完整的费根鲍姆树现象, 也就是周期轨道 $\rightarrow$ 混沌轨道 $\rightarrow$ 周期轨道 $\rightarrow$ 周期轨道 $\rightarrow$ 混沌轨道 $\rightarrow$ 周期轨道的振荡过程。而随着  $a$  值增加到  $a=4.92$  出现了5个气泡, 并且5个气泡串联起来的现象, 在随着  $a$  值的增加为  $a=5.2$  时最后出现2个气泡的串联, 同时发现分岔图中控制参数  $c$  的逐渐增加振荡类型越发不规则, 周期现象出现了坍塌现象发生。

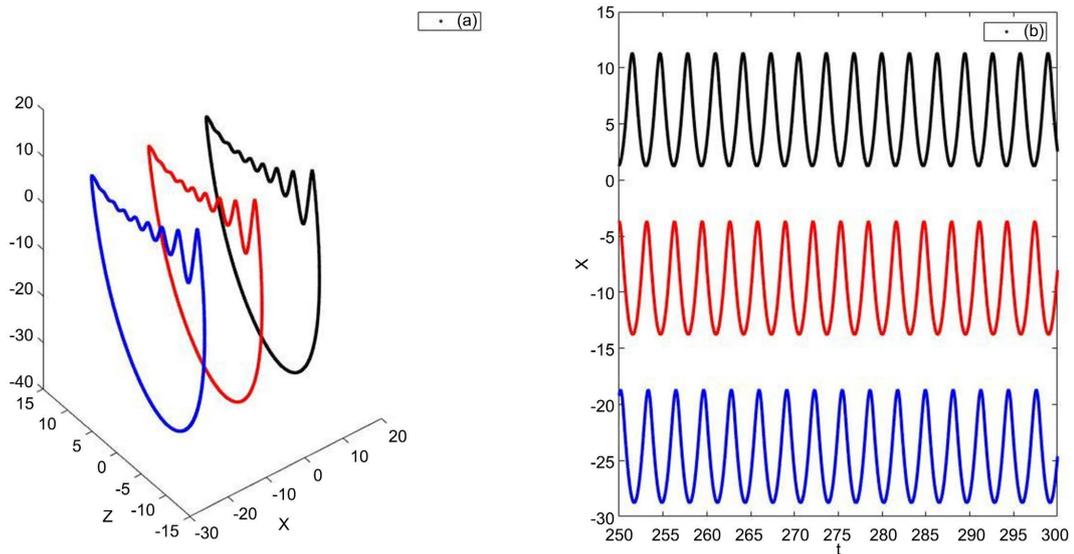
## 6. 信号偏置控制下的动力学分析

在工程应用中, 混沌系统具有一个可以自由控制的偏移常数, 是非常有用的。在具有两个指数非线性组件的系统中, 对系统进行信号的偏置控制, 来研究系统产生的复杂振荡行为。方程(2)中加入一个常数  $m$ , 作为偏置控制项。

$$\begin{cases} \frac{dX}{d\tau} = Y, \\ \frac{dY}{d\tau} = Z, \\ \frac{dZ}{d\tau} = dW, \\ \frac{dW}{d\tau} = -c(X+m) - bY - aW - f_2 \end{cases}$$

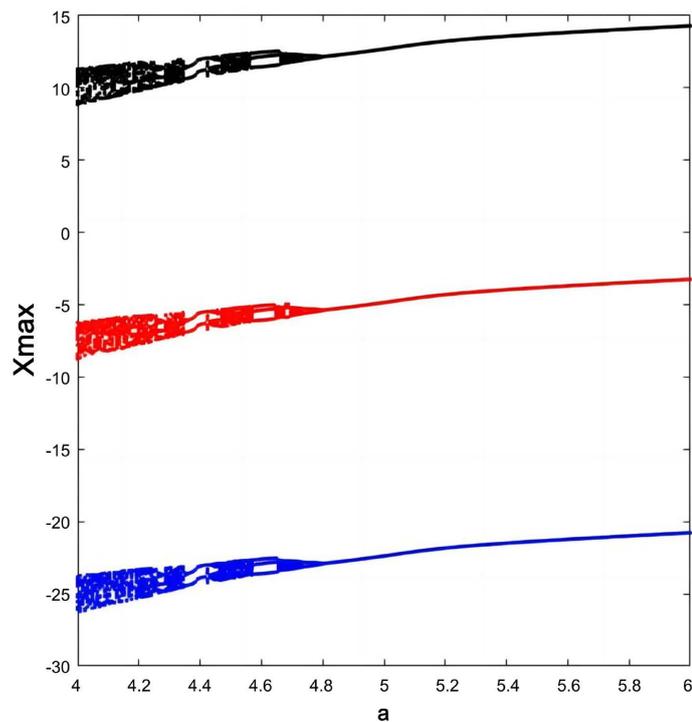
$m$  作为偏置增加放大器, 通过调控  $m$  的值, 来观察系统状态变量的位移变化情况。如图中分别选取  $m=-15$  (黑色),  $m=0$  (红色),  $m=15$  (蓝色) (其他参数  $a=5.2$ ,  $b=4$ ,  $c=4$ ,  $d=20$ , 初始值

$y_0 = [0, 0.1, 0, 1]$  下得出系统相位图和时间序列图(如图 8 所示)。



**Figure 8.** Phase portrait and time evolution of the variable  $X$  under the boosting controller  $m$   
**图 8.** 偏移控制  $m$  下变量  $X$  的相位图与时间序列

通过偏置控制器  $m$  的三个不同值选取, 图 8 中在  $(X, Y, Z)$  平面上的不同的三维相位图和状态变量  $X(t)$  的时间序列图描述了该系统(2)振荡器的位置增强效应。随着控制器  $m$  值的改变, 状态变量  $X(t)$  的时间序列值也在改变。需要注意的是, 状态变量  $X(t)$  的信号形状没有发生改变。



**Figure 9.** Bifurcation diagram of the variable  $X$  under the boosting controller  $m$   
**图 9.** 偏移增压控制  $m$  下变量  $X$  的分岔图

图 9 分岔图中描述随着相位控制器  $m$  值的变化时, 观察物理参数  $a$  区间  $[4,6]$  下系统的全局动力学行为, 数值模拟得出三个不同控制器值下的分岔图, 如图所示。此外, 当偏置控制器  $m$  发生变化时, 状态变量  $X(t)$  的整体相位值也会发生变化(如图 9), 随着控制器  $m$  值的依次增加, 分岔图的整体相位发生逐渐减小的变化趋势, 这样  $m$  值对状态变量  $X(t)$  的相位有影响。然而, 偏置增压控制器  $m$  并没有改变其他状态变量  $Y(t)$ 、 $z(t)$  和  $W(t)$  的相位值, 如图 10 所示。

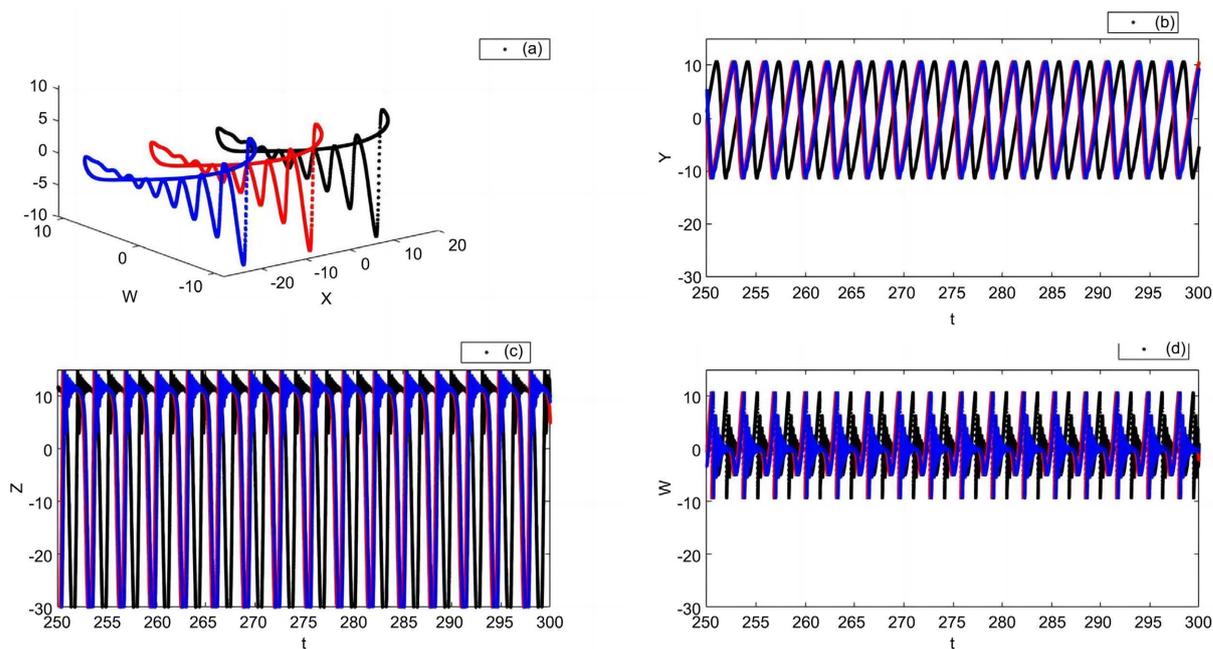


Figure 10. Phase portrait and time evolution of the variable  $Y(t)$ ,  $z(t)$  and  $W(t)$  under the boosting controller  $m$

图 10. 偏移控制  $m$  下变量  $Y(t)$ 、 $z(t)$  和  $W(t)$  的相图与时间序列

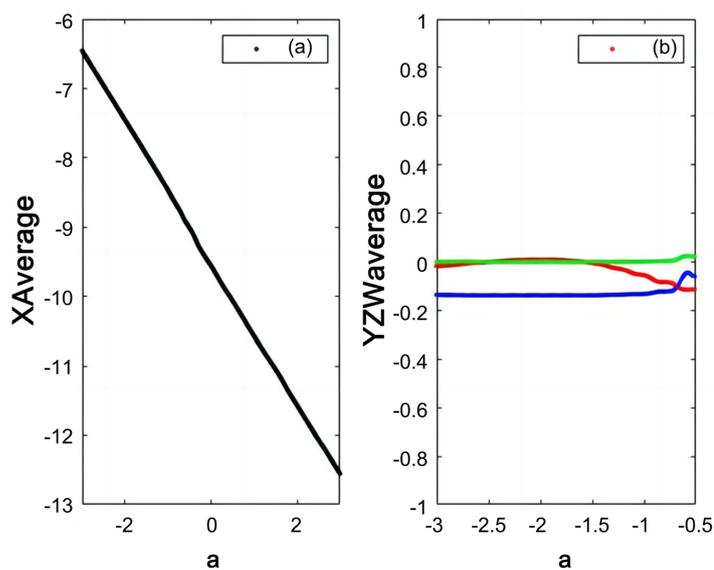


Figure 11. Global phase average values of the state variables  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  and  $W$  under the offset boosting controller  $m$

图 11. 偏移控制器  $m$  下状态变量  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  和  $W$  的相位平均值

本系统研究通过把状态变量  $X(t)$  变化为  $X(t)+m$ ，增加了一项常数项  $m$ ，考察  $m$  作为一个相位控制项，对系统(2)的振荡行为的影响，需要强调的这个控制项，通过分岔图 9 和系统每个状态变量的平均变化值(图 11)，时间序列图和相图等以上观察分析发现，随着值  $m$  在区间  $[-3,3]$  上逐渐增加时，系统信号  $X$  的平均位移呈现单调递减的变化趋势，而其他信号的相位平均值变化没有受到太大的影响。从分岔图和相位平均图观察系统的动力学行为，得出偏置控制器  $m$  没有影响系统(2)的全局动力学行为。

## 7. 结论

本文在 hyperjerk 系统模型的基础上，研究了一个具有两个快变量和两个慢变量的四维混沌系统在相位控制下的动力学现象，从系统的物理参数电阻比和初始条件的取值下演示了一种新颖的气泡分岔现象。

在物理参数选取过程中，不同的参数取值下系统有相同的周期行为发生，而同时动态选取参数值时系统却表现不同类型的周期行为共存现象；对于物理参数对周期振荡性的影响，发现随着物理参数  $a$  的逐渐减小，系统的周期变化大致表现为逐渐减少的变化状态。从系统的分岔图结果看出物理参数的影响改变着系统的动力学行为，不同的物理参数  $c$  的分岔图是不一样的，并且物理参数  $c$  取值小的情况下系统表现的振荡行为更复杂，出现混沌的区域概率更大；而随着参数  $a$  逐渐增加会出现周期 1，周期 2 等不同类型周期行为，混沌现象，倍周期分岔现象，同时控制参数  $a$  和  $c$  对其他状态变量的影响存在各不相同的周期与混沌行为。

在研究系统在固定物理参数时，系统对初始值具有敏感性。但是进而研究物理参数和不同初始值的动态调控下，系统会出现非对称的混合模式簇振荡行为发生；另外，当适当地选择初始值和物理参数时会出现周期 1 与周期 2 不同类型的吸引子共存现象，还有周期与混沌现象共存的行为，并且控制参数  $a$  越小混沌行为可能要更复杂。

虽然系统的复杂行为受初始值与控制参数的影响变化很大，但是会出现一种比较新奇的气泡分岔行为。通过选取物理参数  $a$ ，发生气泡串联行为，周期气泡与混沌气泡并存等现象。随着参数  $a$  的动态调控气泡的数目也发生不同的变化，会出现有名的费根鲍姆树现象。最后，在系统中信号  $X$  增加一个常数项  $m$ ，作为控制位移放大器来对系统进行控制，研究系统整体动力学行为。

通过控制项  $m$  的值逐渐增加，对信号  $X$  的相位整体值发生逐渐减少的变化，而对系统其它信号  $Y, Z, W$  的相位没有发生太大的改变，相位控制器  $m$  的值不影响系统的全局动力学行为。

本文的研究不足之处在于尚未搭建真实电路来验证文中所述的复杂现象，未来的研究方向将着重于电路系统的实际构建以及网络系统阈上与阈下振荡的深入研究。

## 基金项目

国家自然科学基金(NSFC12172269)，陕西省自然科学基金基础研究计划青年项目资助。

## 参考文献

- [1] Haniyas, M.P., Giannaris, G., Spyridakis, A. and Rigas, A. (2006) Time Series Analysis in Chaotic Diode Resonator Circuit. *Chaos, Solitons & Fractals*, **27**, 569-573. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2005.03.051>
- [2] Leutcho, G.D., Kengne, J. and Kengne, L.K. (2018) Dynamical Analysis of a Novel Autonomous 4-D Hyperjerk Circuit with Hyperbolic Sine Nonlinearity: Chaos, Antimonotonicity and a Plethora of Coexisting Attractors. *Chaos, Solitons & Fractals*, **107**, 67-87. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2017.12.008>
- [3] Lai, Q., Chen, C., Zhao, X., Kengne, J. and Volos, C. (2019) Constructing Chaotic System with Multiple Coexisting Attractors. *IEEE Access*, **7**, 24051-24056. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2900367>
- [4] Negou, A.N. and Kengne, J. (2018) Dynamic Analysis of a Unique Jerk System with a Smoothly Adjustable Symmetry and Nonlinearity: Reversals of Period Doubling, Offset Boosting and Coexisting Bifurcations. *AEU-International*

- Journal of Electronics and Communications*, **90**, 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2018.04.003>
- [5] Bao, B.-C., Liu, Z. and Xu, J.-P. (2010) Transient Chaos in Smooth Memristor Oscillator. *Chinese Physics B*, **19**, Article 030510. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/19/3/030510>
- [6] Wei, Z., Moroz, I., Sprott, J.C., Akgul, A. and Zhang, W. (2017) Hidden Hyperchaos and Electronic Circuit Application in a 5D Self-Exciting Homopolar Disc Dynamo. *Chaos*, **27**, Article 033101. <https://doi.org/10.1063/1.4977417>
- [7] Kengne, J., Leutcho, G.D. and Telem, A.N.K. (2018) Reversals of Period Doubling, Coexisting Multiple Attractors, and Offset Boosting in a Novel Memristive Diode Bridge-Based Hyperjerk Circuit. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, **101**, 379-399. <https://doi.org/10.1007/s10470-018-1372-5>
- [8] Vaidyanathan, S., Akgul, A., Kaçar, S. and Çavuşoğlu, U. (2018) A New 4-D Chaotic Hyperjerk System, Its Synchronization, Circuit Design and Applications in RNG, Image Encryption and Chaos-Based Steganography. *The European Physical Journal Plus*, **133**, Article No. 46. <https://doi.org/10.1140/epjp/i2018-11872-8>
- [9] Fozin Fozin, T., Megavarna Ezhilarasu, P., Njitacke Tabekoueng, Z., Leutcho, G.D., Kengne, J., Thamilmaran, K., *et al.* (2019) On the Dynamics of a Simplified Canonical Chua's Oscillator with Smooth Hyperbolic Sine Nonlinearity: Hyperchaos, Multistability and Multistability Control. *Chaos*, **29**, Article 113105. <https://doi.org/10.1063/1.5121028>
- [10] Leutcho, G.D., Kengne, J., Ngoumkam Negou, A., Fozin Fozin, T., Pham, V. and Jafari, S. (2020) A Modified Simple Chaotic Hyperjerk Circuit: Coexisting Bubbles of Bifurcation and Mixed-Mode Bursting Oscillations. *Zeitschrift für Naturforschung A*, **75**, 593-607. <https://doi.org/10.1515/zna-2020-0022>
- [11] Leutcho, G.D., Kengne, J., Kamdjeu Kengne, L., Akgul, A., Pham, V. and Jafari, S. (2020) A Novel Chaotic Hyperjerk Circuit with Bubbles of Bifurcation: Mixed-Mode Bursting Oscillations, Multistability, and Circuit Realization. *Physica Scripta*, **95**, Article 075216. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/ab92da>
- [12] 于蓉蓉, 谢勇, 尚云艳. 具有复杂振荡模式电路系统的数值分析研究[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2021, 34(3): 367-372.
- [13] 于蓉蓉, 惠小健, 尚云艳. 时间延迟下 FitzHugh-Nagumo 振子的动力学行为与同步研究[J]. 机械强度, 2021, 43(3): 517-522.

# 大型火电机组高中参数供热综合性能仿真研究

王书辉<sup>1\*</sup>, 陈贻颢<sup>1</sup>, 谭宏<sup>1</sup>, 王斌<sup>2</sup>, 竺有刚<sup>2</sup>, 栾文龙<sup>3#</sup>

<sup>1</sup>国能(泉州)热电有限公司, 福建 泉州

<sup>2</sup>国能南京电力试验研究有限公司, 江苏 南京

<sup>3</sup>河海大学机电工程学院, 江苏 常州

收稿日期: 2024年10月17日; 录用日期: 2024年10月29日; 发布日期: 2024年12月27日

## 摘要

为了揭示大型超超临界机组高中参数供热综合性能特征, 本文选取某1000 MW一次再热超超临界机组为分析对象, 构建了高精度热力系统仿真模型, 并对不同机组参数下供热综合性能进行了分析。仿真结果表明, 在大型超超临界机组参数一定的前提下, 提升主蒸汽有效温度和再热处理蒸汽有效温度能够提升系统的热适用性, 提升主蒸汽有效温度造成的收益高于再热蒸汽有效温度变化带来的收益, 提升主蒸汽压力更有助于机组能耗、煤耗的降低。

## 关键词

大型供热机组, 1000 MW, 高中参数供热, 热力系统仿真

# Simulation Study on Comprehensive Performance of High and Medium Parameter Heating for Large Thermal Power Units

Shuhui Wang<sup>1\*</sup>, Yihao Chen<sup>1</sup>, Hong Tan<sup>1</sup>, Bin Wang<sup>2</sup>, Yougang Zhu<sup>2</sup>, Wenlong Luan<sup>3#</sup>

<sup>1</sup>Guoneng (Quanzhou) Thermal Power Co., Ltd., Quanzhou Fujian

<sup>2</sup>Guoneng Nanjing Electric Power Test Research Co., Ltd., Nanjing Jiangsu

<sup>3</sup>College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou Jiangsu

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 王书辉, 陈贻颢, 谭宏, 王斌, 竺有刚, 栾文龙. 大型火电机组高中参数供热综合性能仿真研究[J]. 电力与能源进展, 2024, 12(6): 186-192. DOI: 10.12677/aepe.2024.126021

## Abstract

In order to reveal the comprehensive performance characteristics of high and medium parameter heating in large ultra supercritical units, this paper selects a 1000 MW once reheat ultra supercritical unit as the analysis object, constructs a high-precision thermal system simulation model, and analyzes the comprehensive heating performance under different unit parameters. The simulation results show that, under the premise of certain parameters in large ultra supercritical units, increasing the effective temperature of the main steam and the effective temperature of the reheated steam can improve the thermal applicability of the system. The benefits caused by increasing the effective temperature of the main steam are higher than those caused by changes in the effective temperature of the reheated steam. Increasing the main steam pressure is more conducive to reducing the energy and coal consumption of the unit.

## Keywords

Large Scale Heating Units, 1000 MW, High and Medium Parameter Heating, Thermal System Simulation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

当前,在“碳中和,碳达峰”的背景之下,电力行业正在迅速发展,火电机组在政策及多方面因素下面临着许多挑战。大容量、高参数、低排放、高效率逐渐成为火电机组的主流。当前超超临界发电技术在我国电力产业迭代更新、拉近和先进资本主义国家技术与装备差距的过程中起到重要作用,与此同时超超临界发电技术也是推进洁净煤发电技术的便捷途径。因此,大力发展节约能源、环境友好的超超临界火电机组是大势所趋。

目前,国内外众多学者和专家以及科研机构基于热力系统的热力性能、参数优化以及系统的优化改造进行了一系列研究。Lauer 等人[1]对德国四种不同类型燃煤电厂展开仿真分析研究,探讨了减少最低载荷和提升载荷转化比例的严格限制影响因素,经过 EBSILON 仿真操控应用软件建立仿真模型评测,指出合适的集中热能保存在于提升宽载荷运行工作综合水平的高效模式。张思瑞[2]以某国内生产 1000 MW 超临界二次再热处理设备机组为实践应用案例,使用 EBSILON Professional 对设备机组展开了仿真,指出了二次再热处理双机回热系统的概念与方案,并与原始机组和外置蒸汽冷却器机组对比。张微微等人[3]应用模块功能化建立仿真模型模式,在 EASY5 仿真应用平台成立了火电厂设备机组中各主要组成构件的仿真功能应用模块库,从而对设备机组实时动态特征展开仿真,获取了设备机组瞬态反应特征。黄喜军[4]借用 APROS 应用平台分析研究控制阀门部件特征,针对变有效面积的汽轮机高压调门,指出用椭圆运算处理方程式对其建立仿真模型。Simon Hogg 等[5]分析研究了美国某亚临界汽轮机通流改造完善,设计方案中对照运算研究分析了全周进汽和部分进汽对设备机组热量消耗比例的作用影响,分析研究最终结果说明亚临界设备机组仅有载荷比例 90%及其以上、全周进汽时候的热量消耗比例领先于部分配汽,并且列出了热量消耗比例改变分布作用曲线。索中举[6]以西门子某无调节控制级全周进汽超临界 1000

MW 汽轮设备机组为目标对象，分析研究凝结作用水节流一次调节控制频率优化完善控制管理的项目工程使用。此外，国内研究还对热力系统节能及余热高效利用开展相关研究[7]-[10]。

本文选取某 1000 MW 一次再热超超临界机组为分析对象，基于热力系统仿真模拟，开展了大型火电机组高中参数供热综合性能研究。

## 2. 大型火电机组及供热系统方案介绍

本文研究对象为某 1000 MW 超超临界一次再热机组。汽轮机为哈尔滨汽轮机厂生产加工的 N1000-25/600/600 型超临界、一次中间再热处理、四缸、四排汽、单轴、凝汽式汽轮机，发电机组配置了 2 台 50% 容量的汽动给水泵，1 台 30% 容量的公用泵，给水回热系统由 3 台高压加热器、1 台除氧器、4 台低压加热器构成；锅炉是哈尔滨锅炉厂有限责任公司生产的 HG-2980/26.15-YM2 型超超临界、中间一次再热、变压运行直流炉；发电机为哈尔滨电机有限责任公司生产的 QFSN-1000-2 型水-氢-氢冷却静态励磁式发电机。主要设计参数如下表 1 所示。

**Table 1.** Rated parameters of the 1000 MW unit

**表 1.** 1000 MW 机组额定参数

参数	数值	单位
额定功率	1000	MW
额定转速	3000	r/min
新气压力	25	MPa
新气温度	600	°C
再热温度	600	°C
额定进气量	3030	t/h
排气压力	4.9	kPa

该机组的回热系统包含 8 级抽汽，包含 3 级高压加热作用处理器设备、4 级低压加热器设备和 1 级除氧器设备，其各级抽汽系数如表 2 所示。

**Table 2.** Extraction steam parameters

**表 2.** 抽汽参数

抽汽级	抽汽压力/MPa	抽汽温度/°C
1	11.289	435.3
2	4.883	358.5
3	1.788	440.4
4	0.856	338.8
5	0.256	198.2
6	0.154	148.2
7	0.056	84.3
8	0.023	62.7

### 3. 系统仿真模型建立

以 Ebsilon 为仿真模型建立平台, 参考机组在 VWO 工况下的热平衡图, 在软件中选用与机组设备相对应的热力系统基本元件, 根据热力系统的基本建模流程, 按照热力系统的汽水循环过程连接每一个基本元件, 建立大型火电机组的热力系统仿真模型, 如下图 1 所示。

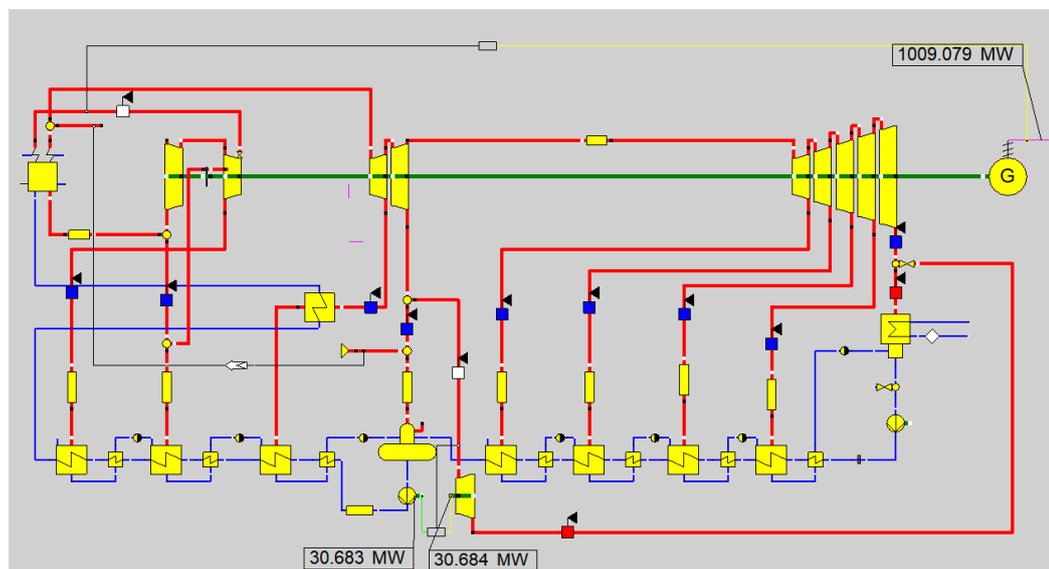


Figure 1. Simulation model of unit Ebsilon of thermal system

图 1. 机组热力系统 Ebsilon 仿真模型

### 4. 机组参数对机组性能的影响分析

主蒸汽有效温度对供热系统参考标准煤耗比例的作用影响分布作用曲线具体如下图 2 所示。在不同运行标准工况下, 伴随着主蒸汽有效温度的提高, 标准煤耗率逐渐下降。这是因为, 在一定载荷下, 当主蒸汽有效温度增高、主蒸汽比热容加大的时候, 引发主蒸汽流量降低, 蒸汽比容加大, 使汽轮机内部损失降低。另一方面, 提升主蒸汽有效温度可以降低低压缸排汽有效湿度, 提升汽轮机的工作效率以减少参考标准煤耗比例。容易得知, 主蒸汽的有效温度改变在不同满足下对参考标准煤耗比例的作用影响有较大差异, 伴随着载荷的加大, 主蒸汽有效温度的改变会对参考标准煤耗比例导致逐步加大的作用影响, 因此提升主蒸汽有效温度更有助于设备机组在高载荷下热适用性的提升。

主蒸汽压力对热力系统参考标准煤耗比例的作用影响分布作用曲线, 如下图 3 所示。在不同载荷下, 参考标准煤耗比例伴随着主蒸汽压力的持续加大呈提高趋向。这是由于, 主蒸汽压力的加大使高压缸进汽比容减少, 造成高压缸内部损失加大。主蒸汽压力的加大还容易导致低压缸排汽有效湿度增长, 湿蒸汽损失加大, 造成汽轮机工作效率降低, 进而参考标准煤耗比例增长。

不同运行标准工况载荷下, 主蒸汽压力的改变对参考标准煤耗比例的作用影响有较大差异。在 100.0% THA 运行标准工况下, 主蒸汽压力对参考标准煤耗比例的作用影响最大, 而部分运行标准工况下主蒸汽压力对参考标准煤耗比例则起不到太大影响, 可以得出在高负荷情况下, 提高主蒸汽压力更有利于机组热经济性的提高。

再热处理蒸汽有效温度对热力系统参考标准煤耗比例的作用影响分布作用曲线, 如下图 4 所示。不同载荷下, 伴随着一次再热处理有效温度的增长, 系统参考标准煤耗比例逐步降低。这是由于再热处理有效温度的增高引发低压缸排汽干度增长, 使汽轮机工作效率增长, 进而导致标准煤耗比例降低。

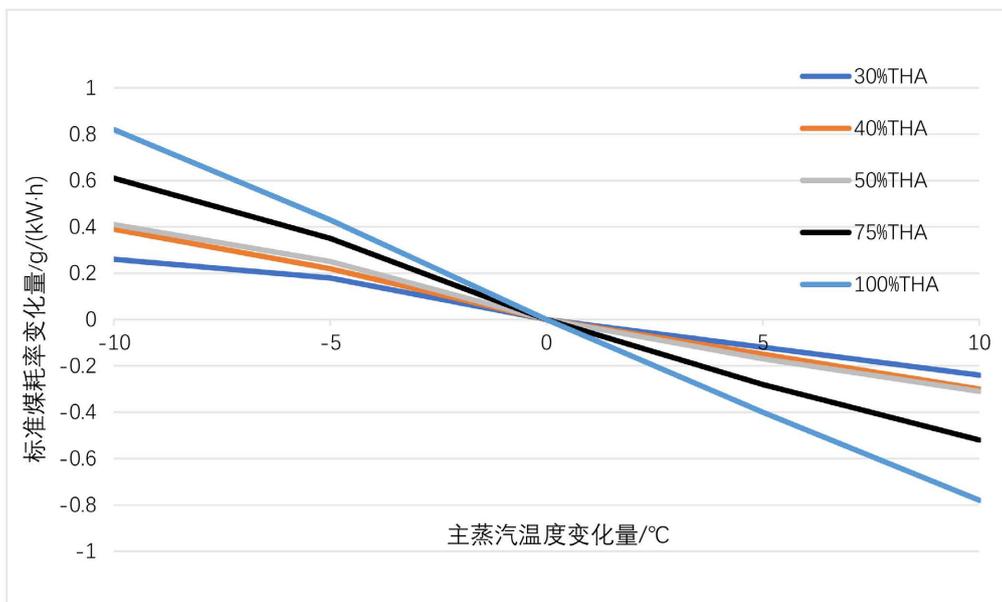


Figure 2. Effect of main steam temperature on standard coal consumption rate under different working conditions

图 2. 不同工况下主蒸汽温度对标准煤耗率的影响

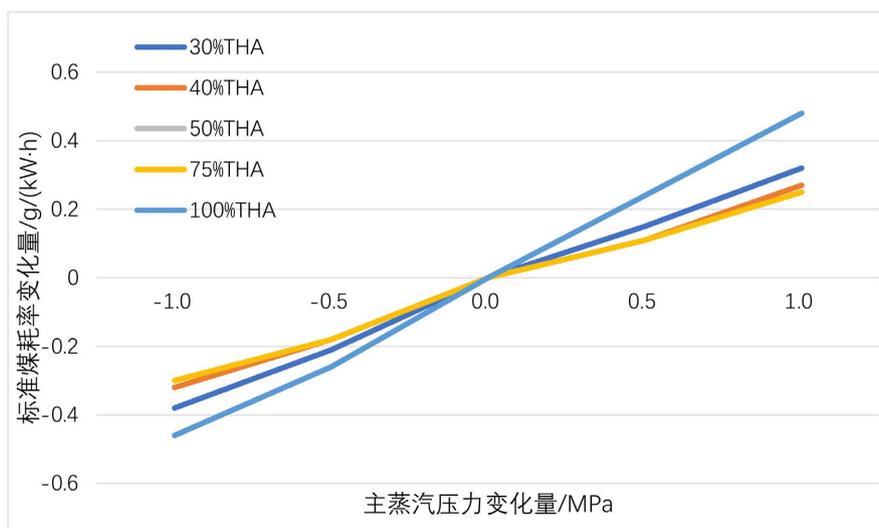
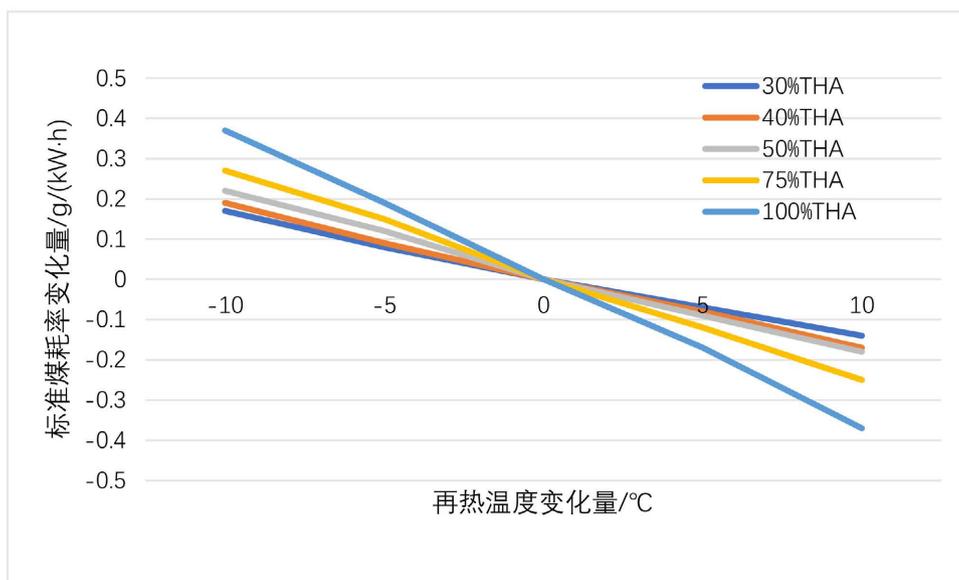


Figure 3. Effect of main steam pressure on standard coal consumption rate under different working conditions

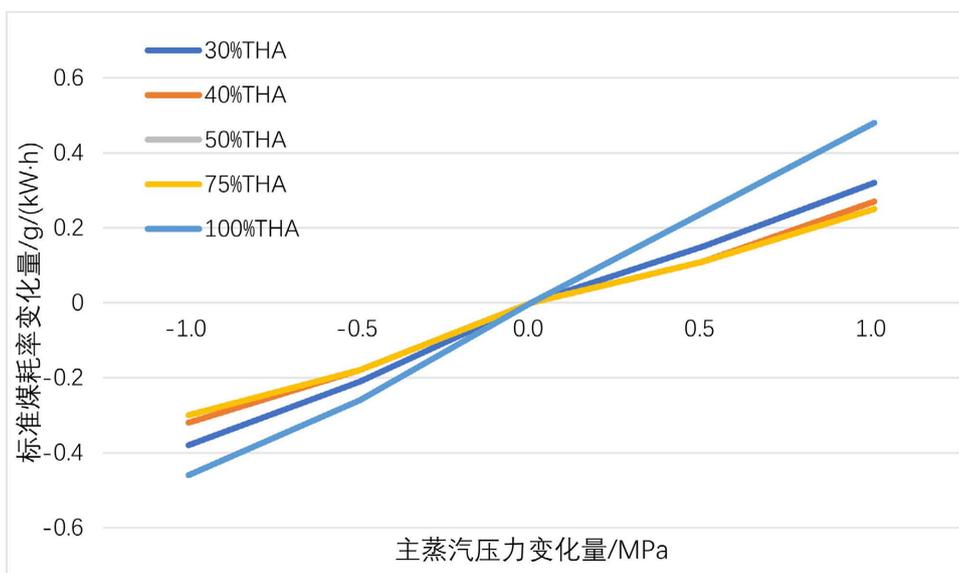
图 3. 不同工况下主蒸汽压力对标准煤耗率的影响

图 5 展示了主蒸汽压力的变化对系统标准煤耗率造成的影响。在不同工况的负荷下，系统的标准煤耗率随主蒸汽压力的持续增加呈现上升趋势。这是由于，主蒸汽压力的升高导致高压缸的进汽比容降低，造成高压缸内部损失加大。主蒸汽压力的升高还容易导致低压缸的排汽湿度升高，湿蒸汽的损失上升，从而造成汽轮机工作效率降低，使得标准煤耗率增长。机组不同工况下运行时，主蒸汽压力的改变对标准煤耗率的作用影响有较大的差异。可以看出在 100%THA 工况下运行时，主蒸汽压力对煤耗率的影响作用最大，而其他部分工况下运行时主蒸汽压力对标准煤耗率则起不到太大影响，可以得出在高负荷情况下，提高主蒸汽压力更有利于机组热经济性的提高。



**Figure 4.** Effect of reheat steam temperature on standard coal consumption rate under different working conditions

**图 4.** 不同工况下再热蒸汽温度对标准煤耗率的影响



**Figure 5.** Effect of main steam pressure on standard coal consumption rate under different working conditions

**图 5.** 不同工况下主蒸汽压力对标准煤耗率的影响

## 5. 结论

本文对某 1000 MW 超超临界机组高中参数供热方案性能进行数值仿真,并分析了不同参数对机组性能的影响,获得的结论如下:

- (1) 提升主蒸汽有效温度和再热处理蒸汽有效温度,能够提升热力系统的供热能耗。
- (2) 提升主蒸汽有效温度的收益高于再热处理蒸汽有效温度提升带来的收益。
- (3) 提升主蒸汽压力更有助于供热机组热耗、煤耗的降低,能够有效提高大型超超临界机组的供热能效。

## 参考文献

- [1] Lauer, M., Dotzauer, M., Hennig, C., Lehmann, M., Nebel, E., Postel, J., *et al.* (2016) Flexible Power Generation Scenarios for Biogas Plants Operated in Germany: Impacts on Economic Viability and GHG Emissions. *International Journal of Energy Research*, **41**, 63-80. <https://doi.org/10.1002/er.3592>
- [2] 张思瑞. 1000 MW 二次再热双机回热系统设计及优化[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学(北京), 2019.
- [3] 张微微, 张会生, 苏明. 基于 EASY5 仿真平台的火电厂热力系统仿真模型[J]. 锅炉技术, 2012, 43(2): 1-6.
- [4] 黄喜军, 胥建群, 于忠平, 等. 节流配汽超超临界汽轮机调门特性与经济运行[J]. 机械工程学报, 2018, 54(22): 168-176.
- [5] Son, S. and Song, H. (2014) Real-Time Peak Shaving Algorithm Using Fuzzy Wind Power Generation Curves for Large-Scale Battery Energy Storage Systems. *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, **14**, 305-312. <https://doi.org/10.5391/ijfis.2014.14.4.305>
- [6] 索中举. 超超临界 1000MW 机组凝结水节流一次调频的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2019.
- [7] 程文煜, 张健, 熊卓, 赵永椿, 张军营, 陈国庆. “双碳”目标下煤电机组节能改造技术发展与实践[J]. 电力科技与环保, 2024, 40(5): 455-464.
- [8] 汪慧晨, 杨梦雪, 冯淼杰, 黄禹杰, 刘永生. 基于 Epsilon 的烟气余热耦合循环水废热深度梯级利用方案研究[J]. 电力科技与环保, 2024, 40(5): 552-560.
- [9] 郑铮毅, 石成博, 殷戈, 姜燕妮. 电厂供热中汽汽换热器动态特性数值模拟[J]. 电力科技与环保, 2023, 39(1): 16-25.
- [10] 史鹏飞, 康朝斌, 张志强, 张华锋, 刘卓萃. 某 330 MW 亚临界直接空冷燃煤机组汽轮机综合节能改造效果分析[J]. 电力科技与环保, 2023, 39(1): 8-15.

# 超低负荷下炉膛管内汽水换热性能仿真研究

林永江<sup>1\*</sup>, 涂宏红<sup>1</sup>, 张扬帆<sup>1</sup>, 王 斌<sup>2</sup>, 竺有刚<sup>2</sup>, 乔云枫<sup>3</sup>, 栾文龙<sup>3#</sup>

<sup>1</sup>国能(泉州)热电有限公司, 福建 泉州

<sup>2</sup>国能南京电力试验研究有限公司, 江苏 南京

<sup>3</sup>河海大学机电工程学院, 江苏 常州

收稿日期: 2024年11月18日; 录用日期: 2024年11月29日; 发布日期: 2024年12月27日

## 摘 要

为了揭示超低负荷下炉膛管内汽水换热性能, 本文以光滑管内超临界水换热特性为研究对象, 采用SST k- $\omega$ 模型描述湍流流动, 对不同工况下超临界水流动换热规律进行了仿真研究。结果表明, 在超临界水大比热区内, 由于超临界水定压比热容大幅增加, 且导热率小幅上升, 超临界水本身的温度变化变得缓慢, 导致换热系数增大; 但当流体温度超过拟临界温度并逐渐远离, 流体的定压比热容和导热率等物性参数会开始大幅降低, 传热性能开始减弱, 换热系数降低。

## 关键词

火电机组, 超低负荷, 炉膛, 汽水换热, 仿真

# Simulation Study on Steam Water Heat Transfer Performance in Furnace Tubes under Ultra-Low Load

Yongjiang Lin<sup>1\*</sup>, Honghong Tu<sup>1</sup>, Yangfan Zhang<sup>1</sup>, Bin Wang<sup>2</sup>, Yougang Zhu<sup>2</sup>, Yunfeng Qiao<sup>3</sup>, Wenlong Luan<sup>3#</sup>

<sup>1</sup>Guoneng (Quanzhou) Thermal Power Co., Ltd., Quanzhou Fujian

<sup>2</sup>Guoneng Nanjing Electric Power Test Research Co., Ltd., Nanjing Jiangsu

<sup>3</sup>College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou Jiangsu

Received: Nov. 18<sup>th</sup>, 2024; accepted: Nov. 29<sup>th</sup>, 2024; published: Dec. 27<sup>th</sup>, 2024

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 林永江, 涂宏红, 张扬帆, 王斌, 竺有刚, 乔云枫, 栾文龙. 超低负荷下炉膛管内汽水换热性能仿真研究[J]. 电力与能源进展, 2024, 12(6): 193-200. DOI: 10.12677/aepe.2024.126022

## Abstract

In order to reveal the heat transfer performance of steam water in furnace tubes under ultra-low load, this paper takes the heat transfer characteristics of supercritical water in smooth tubes as the research object, uses the SST  $k-\omega$  model to describe turbulent flow, and simulates the heat transfer law of supercritical water flow under different operating conditions. The results show that in the high specific heat region of supercritical water, due to the significant increase in the specific heat capacity at constant pressure and the slight increase in thermal conductivity, the temperature change of supercritical water itself becomes slower, resulting in an increase in heat transfer coefficient; but when the fluid temperature exceeds the quasi-critical temperature and gradually moves away, the physical properties such as the constant pressure specific heat capacity and thermal conductivity of the fluid will begin to decrease significantly, the heat transfer performance will begin to weaken, and the heat transfer coefficient will decrease.

## Keywords

Thermal Power Units, Ultra-Low Load, Chamber of a Stove or Furnace, Steam Water Heat Exchange, Simulation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

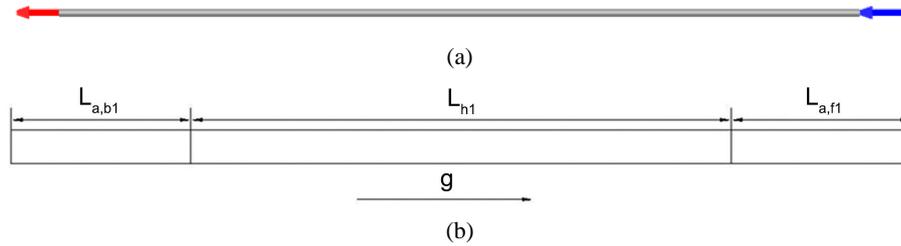
## 1. 引言

在“双碳”的大环境下，构建“清洁低碳、安全高效”的能源体系已是大势所趋。目前，我国新能源发电装机容量占总装机比重已达 37.2%，与 2015 年相比提高了 6.1 个百分点。预计到 2030 年，新能源发电量将达到总发电量的 25% [1]。但新能源也有其弊端，如风电就有着不能保证连续发电，不能随时根据需求进行发电，不能稳定发电等特点[2]。目前来看，选择作为主力电源的火电机组进行深度调峰，是目前解决该问题最有效、最经济的选择[3]。因此考虑传统发电机组如何在低甚至超低负荷下稳定，高效的工作变得愈发重要。在火电机组的深度调峰运行时，水冷壁内部工质的参数变化十分剧烈，这将使得水冷壁受到交变热应力的影响，十分危险。且一旦火电机组负荷降低至 33% 额定功率附近，给水流量就已快要达到为保证水冷壁安全所设置的最小值，炉内水动力循环开始恶化，导致爆管的可能性大幅提升[4]-[7]。

目前，国内外学者对低负荷下锅炉汽水换热做了大量的研究，费家俊等对供热热水锅炉房突然停电导致的热热水锅炉汽化问题[7]，提出热水锅炉防汽化系统，用于防止突然停电时的锅水汽化恶化。张春光等[8]建议将汽化和水击发生的区域控制在锅炉或锅炉房内，避免让影响扩大到管网，增加整个系统的安全隐患和处理难度。刘杨等人[9]通过对锅炉事故现场的分析，提出促进给煤、通风和水泵的连锁运行等措施来预防锅水汽化，保证锅炉安全性。李政等人[10] [11]对给水泵进行研究，提出了给水泵日常维护和故障排除方法，减少由于给水泵故障可能引发的锅水汽化现象。宋广库[12]对已有专利技术进行改造，能够通过向炉内注入等量低温水来改善汽水换热。聂宇宏等[13]应用 CFD 技术对某高炉煤气余热锅炉进行数值模拟，研究了余热锅炉内部的流速和温度分布，分析了各部分管道中的换热情况以及流场对换热的影响。然而，对于大型机组超低负荷下的传热情况研究仍不充分。

因此，针对低负荷下炉膛汽水换热存在的问题，本文建立了炉膛管内换热仿真模型，并开展了均匀热流下与不同负荷下管内换热性能的数值模拟与分析，分析并揭示了管壁换热性能及演化规律。

## 2. 物理数学模型



**Figure 1.** Smooth pipeline ((a) Physical model; (b) Regional distribution)  
**图 1.** 光滑管道((a) 物理模型; (b) 区域分布)

本文计算所采用的光滑管模型如图 1 所示。在管道物理模型图 1(a)中蓝色箭头代表物质入口，红色箭头代表物质出口。管子在实际模拟中为垂直放置，即流体受到如图 1(b)所示重力。管子总长度为 3400 mm，为了更好地模拟超临界水在管道内充分的湍流流动，在管子加热段  $L_{h1}$  的两侧，即管子的入口与出口附近分别设置了绝热段  $L_{a,f1}$  和  $L_{a,b1}$ ，两段绝热段长度为 700 mm，中间的加热段长度为 2000 mm，管的几何尺寸为内径 20 mm，管壁厚 5 mm。壁材为 304 不锈钢。模型采用 Favre 平均法来表达各个控制方程：

连续性方程：

$$\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_j)/\partial x_j = 0 \quad (1)$$

动量方程：

$$\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_i\tilde{u}_j)/\partial x_j = -\partial\bar{p}/\partial x_i + \partial(\bar{\tau}_{ij} - \bar{\rho}\tilde{u}'_i\tilde{u}'_j)/\partial x_j + \bar{\rho}g_i \quad (2)$$

能量方程：

$$\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_j\tilde{h})/\partial x_j = \partial(\lambda\partial\tilde{h}/c_p\partial x_j)/\partial x_j \quad (3)$$

公式中的上标-表示时间平均变量，上标~表示利用 Favre 平均法后处理得到的变量， $\rho$ ， $u$ ， $h$  分别表示流体的密度，速度和焓值。方程(2)中引入的  $\bar{\tau}_{ij}$  为新变量雷诺剪切张力，其被用于表示湍流脉动的影响，公式如式(4)所示：

$$\bar{\tau}_{ij} = \mu \left[ \left( \partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i \right) \right] - 2\delta_{ij} / 3 \cdot \partial u_k / \partial x_k \quad (4)$$

本文研究中的工作压力  $p = 24.8$  MPa，质量流速  $G = 500$  kg/(m<sup>2</sup>·s)，热流密度  $q = 230$  kW/m<sup>2</sup>，入口温度  $T_{in} = 590$  K。

## 3. 计算方法

本文中采用 SIMPLE 算法对速度压力耦合方程进行求解，对流项离散采用二阶迎风格式，扩散项采用中心差分格式。计算过程中，设置对多个变量进行监测，当所有变量的相对变化值均小于 0.01% 时，认为计算收敛。考虑到光管有关的模拟，为了尽可能地提高精度，对网格的独立性对于光滑直管在网格数为 289,000~935,000 的范围内进行了测试。图 2 为工作压力  $p = 24.8$  MPa，质量流速  $G = 500$  kg/(m<sup>2</sup>·s)，热流密度  $q = 230$  kW/m<sup>2</sup>，入口温度  $T_{in} = 590$  K 时管内平均壁温  $T_{iw,ave}$  与管内水的焓值  $H_b$  的关系。如图所示，当网格数处于 289,000~425,000 范围时，壁温波动非常明显，而当网格数进一步增加时，壁温在轴向上的变化趋于相同，当网格数大于 595,000 后，壁温不会因为网格数的增加而有太大的变化。考虑到光管有关的模拟并不算太复杂，时间成本并非十分关键，同时为了尽可能地提高精度，故选择网格数 935,000

的模型作为本研究所使用的光滑直管的模型。而对于弯管，结合对于直管的研究，考虑到流动情况较为复杂，考虑到计算精度和时间成本，故选择了 469,800 作为弯管的网格数。

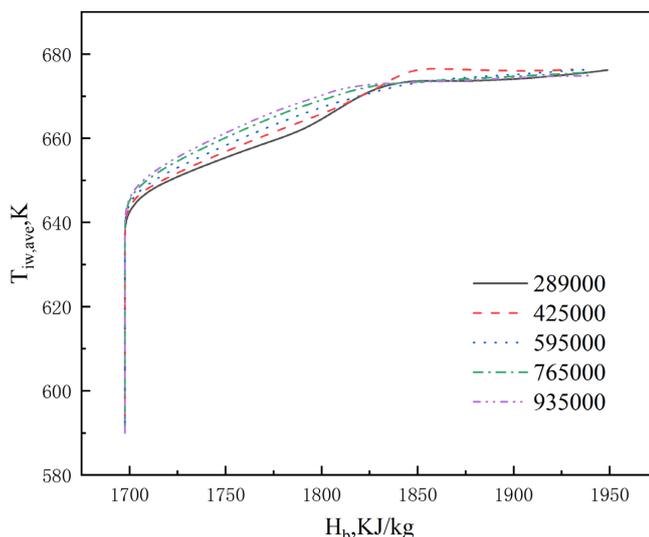


Figure 2. Grid independence verification  
图 2. 网格独立性验证

#### 4. 计算结果与讨论

不同初始条件的超临界水在经过均匀热流加热段加热后的温度分布情况大致相同，图 3 为  $p = 24.8 \text{ MPa}$ ， $G = 500 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ， $q = 230 \text{ kW}/\text{m}^2$ ，入口温度  $T_{in} = 645 \text{ K}$  时的温度云图，可以看出在轴向方向上，加热段水的温度缓慢升高，在径向方向上，热量由管壁进入水中，管壁被冷却，温度下降，水被加热，温度上升。

在压力  $p = 24.8 \text{ MPa}$ ，质量流速  $G = 500 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ，管加热热流密度  $q = 230 \text{ kW}/\text{m}^2$  的条件下，如图 3 所示，给出了不同入口温度下管内平均壁温  $T_{iw,ave}$  与局部水温  $T_b$  以及内壁面换热系数 HTC 随流体焓值  $H_b$  的变化曲线。入口温度  $T_{in}$  取 590 K，610 K，645 K，655 K 四个值。

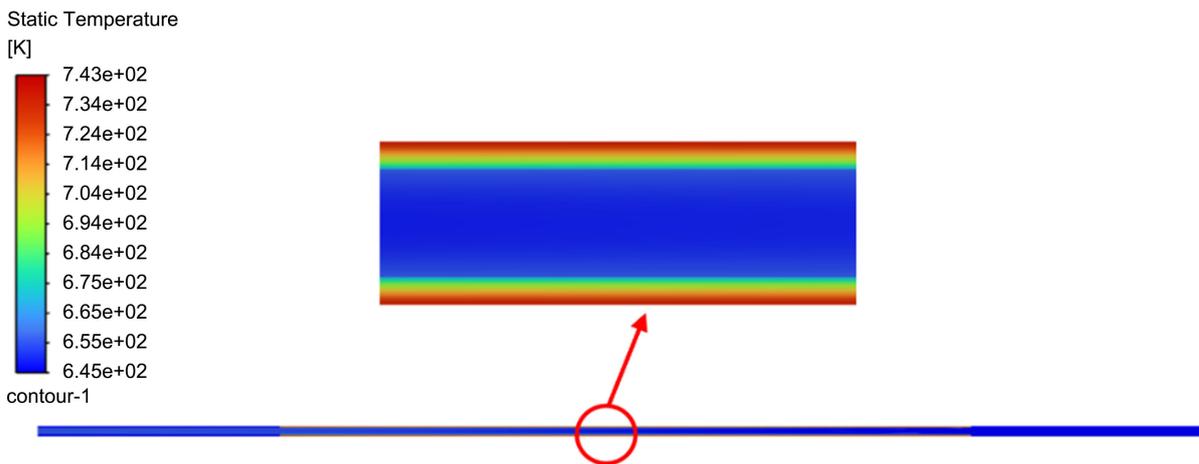
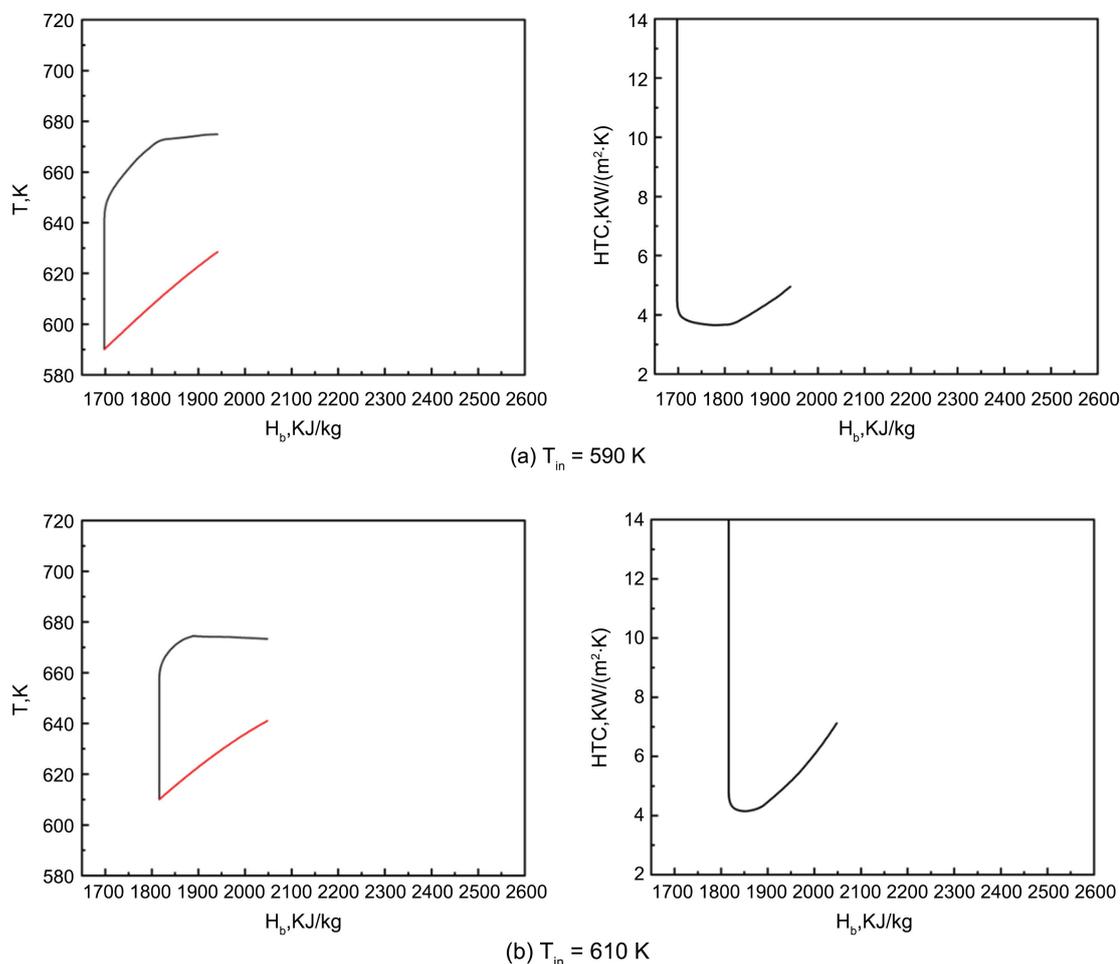


Figure 3. Distribution of temperature cloud map inside the pipeline  
图 3. 管道内部温度云图分布



**Figure 4.** Comparison of heat transfer under different inlet temperatures (the red solid line in the left figure represents the average wall temperature  $T_{w,ave}$  inside the tube, and the black solid line represents the local fluid temperature  $T_b$ )  
**图 4.** 不同入口温度情况下的换热情况对比(左侧图中红色实线为管内平均壁温  $T_{w,ave}$ , 黑色实线为流体局部温度  $T_b$ )

从图 4 可以明显看出, 在流体达到拟临界温度之前, 随着入口温度的增加, 内螺纹管的壁温也逐渐上升, 并最终会达到一个峰值, 且这个峰值所处的位置会沿着管子轴长方向逐渐向入口处偏移, 且内壁面的换热系数也在逐渐增大。当入口温度  $T_{in}$  从 590 K 上升到 610 K 时, 内平均壁温  $T_{w,ave}$  最大值从 674.5 K 上升到 674.9 K, 峰值的轴向位置也从 2692 mm 移动到 1640 mm。这是由于随着水温的升高, 管内水逐渐进入大比热区, 获得了更好的换热性能。当入口温度取为 645 K 时, 此时的入口温度已经非常接近拟临界温度了, 可以看到管壁温度随着水温的上升而上升, 且上升的幅度逐渐变大, 内壁面的换热系数产生了先变大后变小的变化趋势。产生这种现象的原因是在拟临界温度处, 超临界水的物性参数变化剧烈, 流体的定压比热容在此时大幅增加, 且导热率也有一个较小幅度的上升, 超临界水本身的温度变化缓慢, 因此具有从壁面带走大量热量的能力, 使得换热系数上升, 而当流体温度超过拟临界温度并逐渐远离, 流体的定压比热容和导热率等物性参数开始大幅降低, 传热开始恶化, 壁温上升趋势增加, 换热系数降低。而当入口温度为 655 K 时, 此时的入口温度已经超过拟临界温度了, 超临界流体处于拟气态, 且各热物性参数均为下降趋势, 流体换热性能变差, 管壁温快速上升, 换热系数持续降低。

如图 5 所示, 在压力  $p = 24.8$  MPa, 入口工质温度  $T_{in} = 645$  K, 热流密度  $q = 230$  kW/m<sup>2</sup> 的初始条件

下,给出了质量流速  $G$  分别为  $404 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,  $450 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,  $500 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,  $600 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  和  $800 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 5 种情况下内管壁平均温度  $T_{\text{iw,ave}}$  和内壁面换热系数  $\text{HTC}$  与管内流体焓值  $H_b$  的变化曲线。随着质量流速从  $404 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  增加到  $800 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 我们可以看到由于质量流速的增加, 流体温度在管内的增量逐渐降低, 壁面温度也在逐渐降低, 换热系数  $\text{HTC}$  在逐渐增大。但我们也会发现, 当质量流速较低时, 在接近管道入口处, 会出现换热系数  $\text{HTC}$  异常降低的传热恶化现象。当质量流速为  $404 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时, 管入口附近的管内壁平均温度  $T_{\text{iw,ave}}$  会从  $675.84 \text{ K}$  上升至  $678.57 \text{ K}$ , 变化了  $2.73 \text{ K}$ , 传热系数  $\text{HTC}$  会从  $7.71 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  降低至  $7.284 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , 变化了  $0.426 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。出现这种现象的原因是此时质量流速较小, 热流密度和质量流速比值较大, 本研究使用管道又为大管径(当量直径大于  $10 \text{ mm}$ ), 径向温度梯度导致形成了较大的径向密度梯度进而产生了浮升力效应, 引发了超临界第一类传热恶化。当质量流量增大为  $450 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时, 相应的壁温变化了  $1.85 \text{ K}$ , 传热系数变化了  $0.168 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , 相比于质量流速为  $404 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时有所降低, 而当质量流速为  $600 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时, 可以看到传热没有发生恶化, 这是因为在较大的质量流量下, 较大的流速使得流体的流动得到了充分的发展, 由于主流体与近壁面流体之间的扰动变得强烈, 二者之间得到了充分的混合, 遏制甚至阻断了径向密度梯度对于传热的影响, 传热恶化得以减弱。可见传热出现恶化时, 通过增大质量流量来优化传热是一种非常有效的方法。

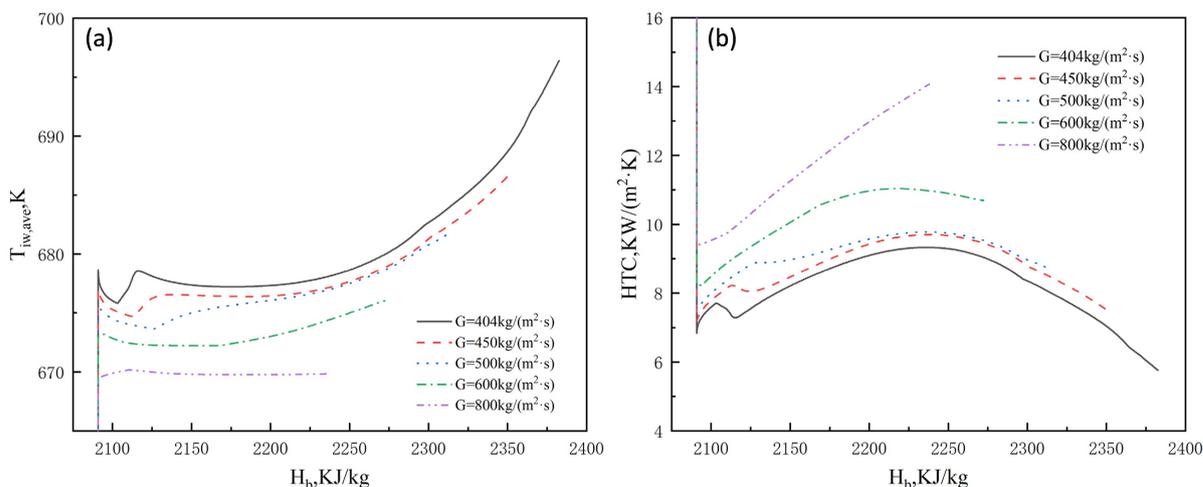
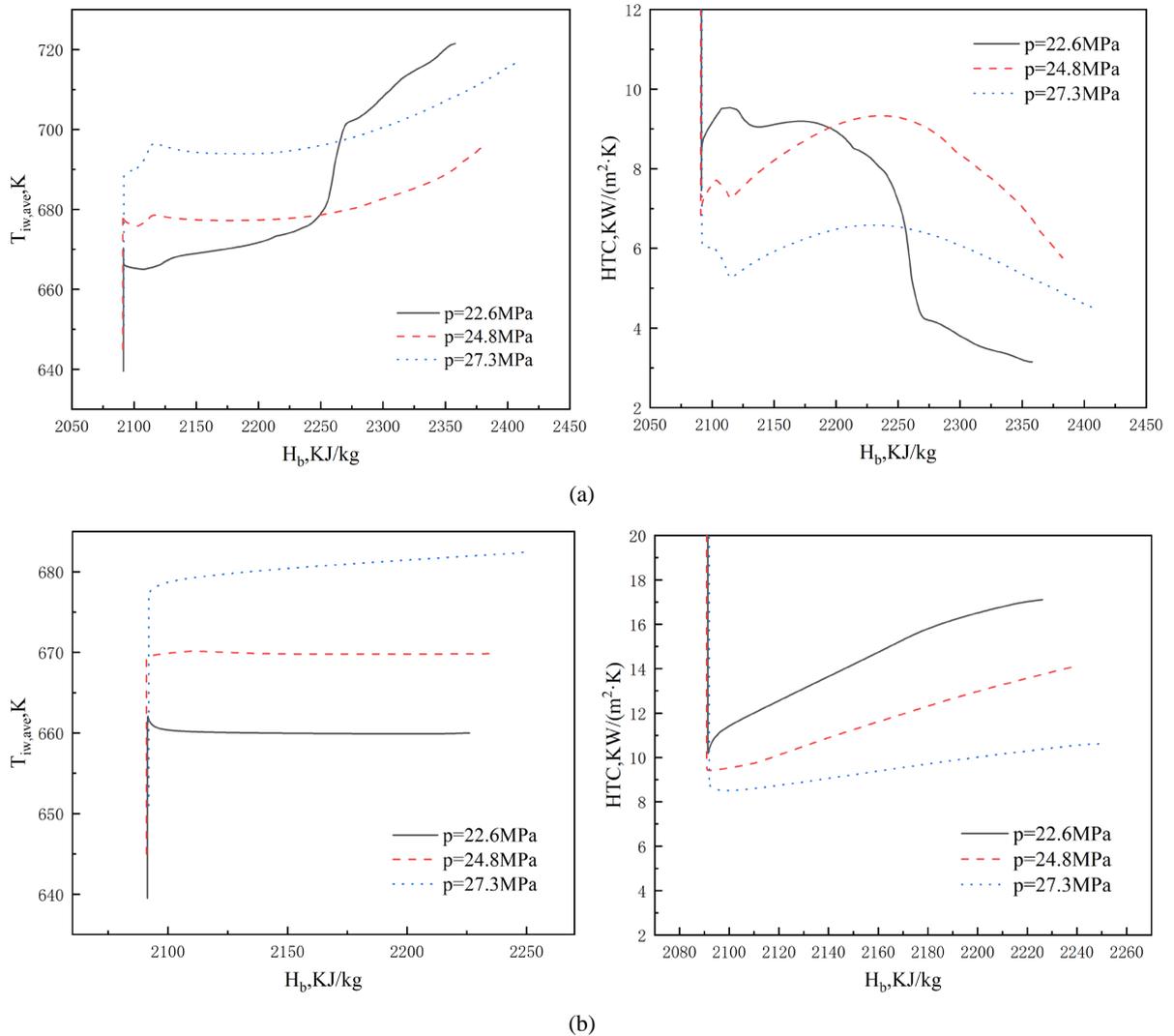


Figure 5. Comparison of tube wall temperature and heat transfer coefficient at different mass flow rates

图 5. 不同质量流速时管壁温度及换热系数比较

图 6 展示了当热流密度  $q = 230 \text{ kW}/\text{m}^2$ , 质量流速  $G$  分别为  $404 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  和  $800 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 且入口超临界水流体焓值一定时, 压力  $p$  分别为  $22.6 \text{ MPa}$ ,  $24.8 \text{ MPa}$ ,  $27.3 \text{ MPa}$  时内管壁平均温度  $T_{\text{iw,ave}}$  和内壁面换热系数  $\text{HTC}$  与管内流体焓值  $H_b$  的变化曲线。从图 5(a)中可以看出, 当质量流速  $G$  为  $404 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时, 三种压力下的传热在入口处都出现了传热恶化的现象, 且在开始时, 压力越低, 壁温越低, 换热系数  $\text{HTC}$  越大。但当压力  $p$  为  $22.6 \text{ MPa}$  时, 其拟临界温度较低, 在  $q = 230 \text{ kW}/\text{m}^2$  和  $G = 404 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  的条件下, 超临界水在管中被加热, 温度会达到并超过拟临界温度, 导致管内壁温飞升, 传热迅速恶化。由图 5(b)可以看出在质量流速  $G$  为  $800 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时, 壁温和换热系数整体变化较为平稳, 且压力较小的内壁温度低于压力较大的内壁温度, 压力较小的换热系数大于压力较大的换热系数, 且变化幅度也大。可以看出, 在高质量流速的情况下, 随着压力逐渐远离流体的临界压力, 流体的换热系数  $\text{HTC}$  会逐渐降低, 强化传热的现象也会逐渐减弱。整体来说, 当压力增大时, 随着压力的增大, 流体的热物性参数的变化程度在逐渐地减小, 大比热区所在区域逐渐滞后, 其定压比热容  $C_p$  峰值也在降低, 这就导致了传热

系数的降低, 壁温升高。然而, 也要注意当质量流速较小时, 在相同热流密度下, 水的温升可能使其温度突破拟临界温度, 导致传热的恶化。



**Figure 6.** Distribution of average temperature and heat transfer coefficient of inner tube wall under different pressure conditions ((a) at low mass flow rate, (b) at high mass flow rate)

**图 6.** 不同压力条件下内管壁平均温度和换热系数变化曲线分布((a) 低质量流速时, (b) 高质量流速时)

## 5. 结论

本文数值研究了超低负荷下炉膛管内汽水换热性能, 分析了不同入口温度、压力下管内换热特性, 获得的结论如下:

(1) 在超临界水的大比热区内, 由于超临界水物性参数变化剧烈, 流体的定压比热容大幅增加, 且导热率也有较小幅的上升, 超临界水本身的温度变化变得缓慢, 可以从壁面带走大量热量, 使得换热系数上升, 但当流体温度超过拟临界温度并逐渐远离, 流体的定压比热容和导热率等物性参数会开始大幅降低, 传热性能开始减弱, 换热系数开始变低。

(2) 当质量流速较小, 热流密度和质量流速比值较大时, 在管道的入口处容易形成传热恶化。此传热

恶化主要原因是浮升力效应, 此时如果增大质量流量可以遏制其对于传热的影响, 优化传热。

(3) 总体来说, 压力越靠近流体的临界压力, 其导热性能就越强, 但压力越低, 流体的拟临界温度就越低, 流体就越有可能在加热的过程中突破拟临界温度, 超过大比热区, 导致传热恶化, 因此需要合理选择压力。

## 参考文献

- [1] 代景旭. “双碳”目标下煤电深度调峰及调频技术研究进展[J]. 电气时代, 2023(10): 43-45.
- [2] 林俐, 邹兰青, 周鹏, 等. 规模风电并网条件下火电机组深度调峰的多角度经济性分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 21-27.
- [3] 龚伟东, 谈紫星, 陈林国. 大型燃煤机组深度调峰工况下安全与经济性探讨[J]. 江西电力, 2023, 47(6): 48-50.
- [4] 王茂贵, 吕洪坤, 李剑. 浙江省燃煤机组深度调峰综述[J]. 浙江电力, 2019, 38(5): 90-97.
- [5] 马达夫, 张守玉, 何翔, 等. 煤粉锅炉超低负荷运行的技术问题和应对措施[J]. 动力工程学报, 2019, 39(10): 784-791.
- [6] 常伟, 徐贤, 魏然, 等. 煤电机组深度调峰对锅炉受热面管的影响[J]. 电力科技与环保, 2022, 38(6): 458-466.
- [7] 费家俊, 杨良仲. 热水锅炉防汽化系统及保安电源设计[J]. 煤气与热力, 2013, 33(1): 1-3.
- [8] 张春光, 付利琴. 角管式热水锅炉突发停电汽化的处理[J]. 能源技术, 2009, 30(2): 119-121.
- [9] 刘扬, 于振江, 郭淼. 分析热水锅炉事故[J]. 品牌与标准化, 2009(14): 40.
- [10] 李政, 许宏杰, 刘英超. 锅炉给水泵的日常维护与故障排除问题研究[J]. 硅谷, 2015(3): 89-99.
- [11] 李庆, 王君华, 王亚林. 锅炉给水泵故障分析与处理措施[J]. 科技资讯, 2013, 11(6): 105.
- [12] 宋广库, 陈雅华, 刘忠国. 锅炉水击事故的应对[J]. 企业标准化, 2008(1): 3-8.
- [13] 聂宇宏, 梁融, 钱飞舟, 等. 高炉煤气余热锅炉数值模拟与传热系数的修正[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2014, 28(1): 46-49.

# 纳米流体热毛细对流流型结构及换热机理研究

贾颖<sup>1,2</sup>, 张永春<sup>1,2\*</sup>, 董文利<sup>1,2</sup>, 孙健<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>江苏省特种设备安全监督检验研究院, 江苏 南京

<sup>2</sup>江苏省市场监管技术创新中心(锅炉安全节能环保), 江苏 南京

收稿日期: 2024年10月21日; 录用日期: 2024年11月26日; 发布日期: 2024年12月31日

## 摘要

为了揭示纳米流体热毛细对流的流型结构及其流动换热特性, 本文建立了二维矩形区域内纳米流体热毛细对流的数学模型, 开展了系统数值研究, 获得了矩形腔内热毛细对流的温度场和速度场, 分析了传热温差、纳米颗粒的体积分数以及不同材料的米颗粒对热毛细对流的影响。结果表明, 在一定范围内, 增大传热温差和纳米颗粒的体积分数都可以增大热毛细对流的强度, 提升换热强度; 当传热温差较大时, 矩形腔内会出现扰动, 流动变得复杂; 纳米流体的换热强弱与Marangoni数的大小呈正相关。

## 关键词

纳米流体, 热毛细对流, 数值模拟, 流型结构, 换热

# Study on the Flow Pattern Structure and Heat Transfer Mechanism of Nanofluid Thermocapillary Convection

Ying Jia<sup>1,2</sup>, Yongchun Zhang<sup>1,2\*</sup>, Wenli Dong<sup>1,2</sup>, Jian Sun<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Special Equipment Safety Supervision Inspection Institute of Jiangsu Province, Nanjing Jiangsu

<sup>2</sup>Jiangsu Market Supervision Technology Innovation Center (Boiler Safety, Energy Conservation and Environmental Protection), Nanjing Jiangsu

Received: Oct. 21<sup>st</sup>, 2024; accepted: Nov. 26<sup>th</sup>, 2024; published: Dec. 31<sup>st</sup>, 2024

## Abstract

To reveal the flow pattern structure and flow heat transfer characteristics of nanofluid thermocapillary convection, this article establishes a mathematical model of nanofluid thermocapillary convection in a two-dimensional rectangular region, conducts systematic numerical research, obtains the

\*通讯作者。

文章引用: 贾颖, 张永春, 董文利, 孙健. 纳米流体热毛细对流流型结构及换热机理研究[J]. 电力与能源进展, 2024, 12(6): 201-214. DOI: 10.12677/aepe.2024.126023

temperature and velocity fields of thermocapillary convection in a rectangular cavity, and analyzes the effects of heat transfer temperature difference, volume fraction of nanoparticles, and different materials of rice particles on thermocapillary convection. The results indicate that within a certain range, increasing the heat transfer temperature difference and the volume fraction of nanoparticles can enhance the strength of thermocapillary convection and improve heat transfer intensity. When the heat transfer temperature difference is large, disturbances will occur inside the rectangular cavity, and the flow becomes more complex. The heat transfer strength of nanofluids is positively correlated with the Marangoni number.

## Keywords

Nanofluid, Thermocapillary Convection, Numerical Simulation, Flow Pattern Structure, Heat Transfer

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

热毛细对流广泛存在于镀膜、晶体生长等领域，矩形液池内热毛细对流的形成如图 1 所示，当左、右两壁面温度分别为  $T_h$  和  $T_c$  不变，且  $T_h > T_c$ ，在气液交界处，表面张力在高温壁面处较大，这时液体区域中就会形成如图所示的流动—热毛细对流。1995 年，Choi 等人[1]提出了具有导热系数高、同时又均匀稳定的纳米流体介质。

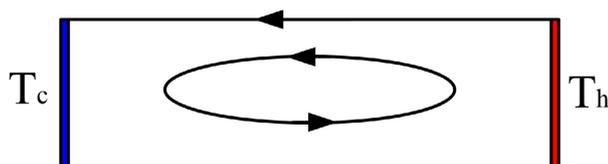


Figure 1. Schematic diagram of thermocapillary convection  
图 1. 热毛细对流示意图

1855 年，James Thomson [2]通过研究酒泪现象，最早提到了表面张力驱动这一概念。不久后，Carlo Marangoni 详尽地研究并解释了表面张力梯度驱动背后的流动机理，他的报道对后来学者的研究意义非凡，因此“表面张力梯度驱动流动”也被称为 Marangoni 对流。

1901 年，Benard [3]进行了对底部加热的浅液池流动实验，发现当液池的上、下表面的温度较小时，流体几乎静止；液池上、下表面的温度梯度超过某一临界值后，液体中会出现一些六角形对流涡胞。1956 年，Block [4]提出六角形对流涡胞的形成原因可能是表面张力。1958 年，Pearson [5]证明了六角形对流涡胞是由表面张力所驱动的，且这个对流涡胞不同于与 Benard 所做实验中浮力引起的自然对流，他提出液体的一个表面是自由表面，是形成表面张力驱动流的必要条件。1964 年，Nield [6]对比和分析了 Benard 等的研究后发现：液池的厚度较小时，表面张力梯度驱动的流体运动影响较大；液层厚度增大后，密度不同引起的自然对流影响较大，导致流动产生不稳定性；液层厚度居中时，两种作用共同存在。周小明等[7]三维数值研究了环形液池内双层流体热毛细浮力对流的流动特性，发现上、下层流体热毛细浮力对流的流动结构依赖于液池深径比的大小，并且热毛细对流的振荡周期随着深径比的减小逐渐

减小。张利等[8]发现,热毛细对流和表面蒸发相互耦合、相互影响。刘佳[9]研究了双向温度梯度作用下的浮力-热毛细对流现象。关于热毛细对流的基本流动形态。Zebib 等[10]在忽略边界层和表面变形、不考虑浮力的情况下,通过实验获得了矩形腔内部热毛细对流的基本流动形态。Ben Hadid [11]在不考虑重力情况下实验发现,当流体的水平温度梯度与矩形的宽深比都较大时,热毛细对流会变得复杂。Schwabe [12]和 Wuest [13]实验时均观察到了热毛细对流涡胞的存在。Garcimartin [14]实验发现了一种与前人对平行流线稳定性分析得到的热力流体波机制不同的波动。Velten [15]进行的热毛细对流实验发现,对不同 Pr 数的流体,不同的几何尺度比,热毛细对流的临界 Marangoni 数不同。关于热毛细对流的不稳定性现象,周小明等[16]研究了在双层流体的环形液池中内外壁温差加热下的热毛细对流不稳定性,发现流体的流动受 Marangoni 效应和浮力效应的影响,并且随着温差的增大,热毛细对流的振荡逐渐增强。马力[17]等研究了双向温度梯度下环形浅液池内的硅熔体的 Marangoni-热毛细对流的不稳定性。

因此,本文的目的是研究纳米流体热毛细对流现象的流动和换热特性并确定流型结构,得到了二维矩形腔内热毛细对流的温度场和速度场,揭示了传热温差、纳米颗粒的体积分数以及不同材料的纳米颗粒对热毛细对流的影响。

## 2. 物理数学模型

矩形腔物理模型如图 2 所示,其为一个长 8 cm 和高为 10 mm 的二维矩形液层。左、右边界分别维持恒定的温度为  $T_c$  和  $T_h$ ,且  $T_h > T_c$ ,上表面为自由表面,自由表面和底面为绝热。初始时流体处于静止。矩形上、下边界绝热,左、右边界温度分别维持在  $T_c$  和  $T_h$ ,且  $T_h > T_c$ 。研究区域内流体流动的控制方程如下:

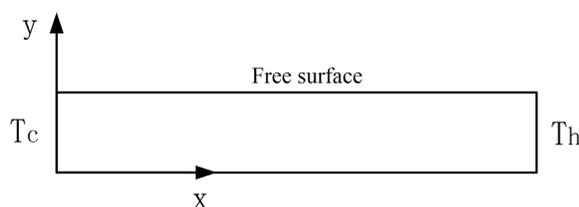


Figure 2. Physical model

图 2. 物理模型示意图

连续性方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$x$  方向动量方程:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu_{nf} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$y$  方向动量方程:

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu_{nf} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{(\rho\beta)_{nf} g (T - T_c)}{\rho_{nf}} \quad (3)$$

能量方程:

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_{nf} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

式中： $T$ ——温度[K]； $u$ —— $x$  方向速度[m/s]； $v$ —— $y$  方向速度[m/s]； $\rho$ ——密度[kg/m<sup>3</sup>]； $\nu$ ——运动粘度[m<sup>2</sup>/s]； $\alpha$ ——导温系数[m<sup>2</sup>/s]； $\beta$ ——热膨胀系数[K<sup>-1</sup>]； $g$ ——重力加速度[m/s<sup>2</sup>]。下标  $nf$  表示纳米流体的物性参数。

## 2.1. 边界条件

矩形腔的左、右边界分别维持恒定的温度为  $T_c$  和  $T_h$ ，且  $T_h > T_c$ ，上表面为自由表面，自由表面和底面为绝热。

自由表面：

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha (T - T_f) \quad (5)$$

底面：

$$u = v = 0 \quad (6)$$

左边界：

$$u = v = 0, T = T_c \quad (7)$$

右边界：

$$u = v = 0, T = T_h \quad (8)$$

## 2.2. 纳米流体物性参数

将纳米流体混合两相流处理为单相流体，其密度  $\rho_{nf}$ 、比热容  $c_{nf}$  和热膨胀系数  $\beta_{nf}$  可分别按下式计算：

$$\rho_{nf} = \varphi \rho_p + (1 - \varphi) \rho_f \quad (9)$$

$$\rho_{nf} c_{nf} = \varphi \rho_p c_p + (1 - \varphi) \rho_f c_f \quad (10)$$

$$\rho_{nf} \beta_{nf} = \varphi \rho_p \beta_p + (1 - \varphi) \rho_f \beta_f \quad (11)$$

式中， $f$  表示悬浮于基液的纳米颗粒的体积分数，下标  $p$  表示纳米颗粒，下标  $f$  表示纳米颗粒，下标  $nf$  表示纳米流体。

本文使用的双组分混合物的导热系数的一种通用规范是由 Hamilton 等[18]发展而得，他们提出

$$\frac{k_{nf}(\varphi)}{k_f} = \frac{(n-1)(1-\varphi)k_f + (n\varphi+1-\varphi)k_p}{k_p(1-\varphi) + (n-1+\varphi)k_f} \quad (12)$$

对于导热系数为  $k_f$  的基础流体，该基础流体包含具有球形度  $n$  和导热系数  $k_p$  的悬浮纳米颗粒。该规范扩展了经典的麦克斯韦有效热导率模型，加入了对纳米颗粒形状的依赖，以其球形指数  $n$  的值为特征。具体来说， $n = 3$  描述了近似球形的纳米颗粒， $n = 6$  描述了棒状纳米颗粒，中间值  $n$  描述了纳米颗粒偏离球形几何形状的程度。本文中对不同材料的纳米颗粒的  $n$  均取值 4 作简化处理。

对于纳米流体的有效动态粘度。本文采用的模型由 Brinkman [19]提出，

$$\mu_{nf}(\varphi) = \mu_f (1 - \varphi)^{\frac{5}{2}} \quad (13)$$

其中  $\mu_f$  为基液的动力粘度， $\varphi$  为悬浮纳米粒子的体积分数。

纳米流体由硅油和纳米颗粒组成，其热物性如表 1 所示。

**Table 1.** Physical properties of nanoparticles and base liquid  
**表 1.** 纳米粒子和基液物性参数

热物理参数	基液和纳米颗粒					
	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (J/kg·K)	$\lambda$ (W/(m·K))	$\mu$ (m <sup>2</sup> /s)	$\beta$ (1/K)	$\gamma_T$ (N/m·K)
硅油	950	1630	0.14	$1.9 \times 10^{-6}$	0.00107	$-6.23 \times 10^{-5}$
氧化铝	3880	773	36	/	/	/
铜	8978	381	387.6			
碳	1600	796	3000			

我们结合表面换热系数  $h$ ，无量纲数 Marangoni 数作为判别矩形腔内换热效果的依据，表达式如下，

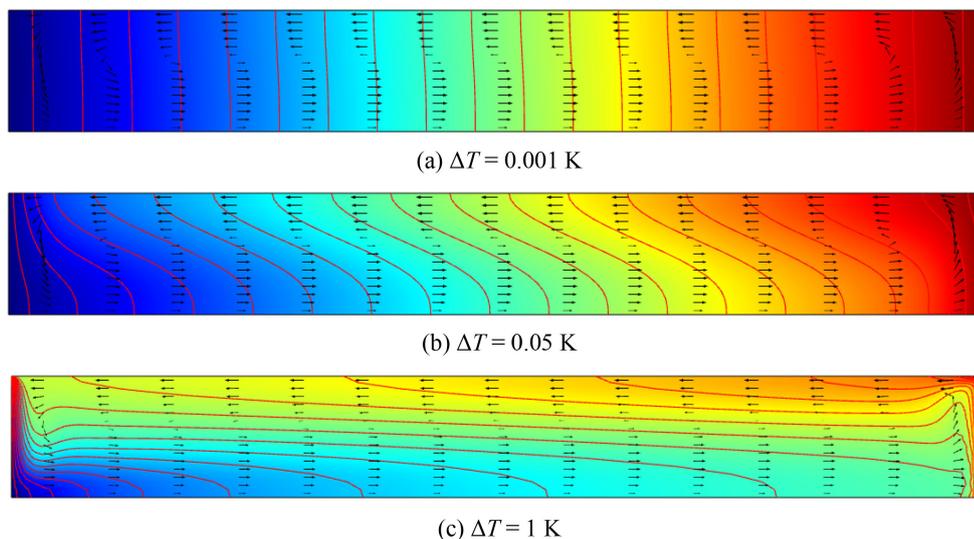
$$h = \frac{\lambda}{\Delta T} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (14)$$

$$Ma = -\frac{\gamma_T L \Delta T}{\mu \kappa} \quad (15)$$

式中，其中  $\lambda$  —— 导热系数[W/(m<sup>2</sup>·K)]， $\gamma_T$  —— 表面张力系数[N/m·K]， $\mu$  —— 动力粘度[Pa·s]， $\kappa$  —— 导热系数[m<sup>2</sup>/s]。无量纲数 Marangoni 数表征热毛细效应与黏性力之比。

### 3. 计算结果

这部分内容介绍热毛细对流现象随着左右边界温差的不同，从不明显到明显的过程，以及不同温差下的热毛细对流的流动和传热特性。



**Figure 3.** Flow and heat transfer characteristics inside rectangular cavity under different temperature differences

**图 3.** 不同温差下矩形腔内的流动和传热特性

图 3 显示了为硅油/氧化铝纳米流体在左、右边界不同温差下，矩形腔内的流动和传热特性，其中红色线表示温度等值线，彩色表示温度云图，箭头表速度矢量。由这三幅图可知，当温差非常低为 0.001 K 时，温度场与速度场几乎不耦合，温度从左到右几乎直线上升，则热量几乎是以水平方向从高温左边界向低温右边界传递的，说明此时传热是以热传导为主；当温差进一步增大时，温度不再直线下降，可以清晰

地看到流动引起的等温线对流；当温差较大(图 4(c)中为 2 K)时，温度场与速度场之间的物理场耦合清晰可见，在冷热壁面附近的薄边界层内保持着垂直，这说明此时在冷热壁面附近的薄边界层内的换热仍以热传导形式进行，但在矩形腔内的大部分地方等温线近乎水平，说明在整个矩形腔内的换热以热对流为主。

图 4 为硅油/氧化铝纳米流体在不同温差下，矩形腔内的速度云图，左右边界温差分别为 0.001 K、0.05 K 和 2 K，左边界温度不变，其中流线表示速度场，表面为速度云图。由这三幅图可知，当左右边界温差非常低为 0.001 K 时，纳米流体在矩形腔内的流动速度很小，速度大的区域位于自由上边界的中间位置处；当温差进一步增大为 0.05 K 时，由表面张力驱动的热毛细流动开始变得明显，矩形腔内的流体流动速度变大，且作为驱动流的上半区域的流体流动速度大于下半区域；当温差较大为 2 K 时，矩形腔内的流体流动的速度峰值变得更大，且速度大的区域位于自由上边界的左、右两端，这两处为热毛细对流现象比较强烈的地方。这部分主要介绍在热毛细对流现象已经比较明显的情况下，矩形腔内的左、右边界温差的不同对纳米流体流动和传热的影响，其中纳米流体中的材料为氧化铝，纳米颗粒的体积分数为 0.05。

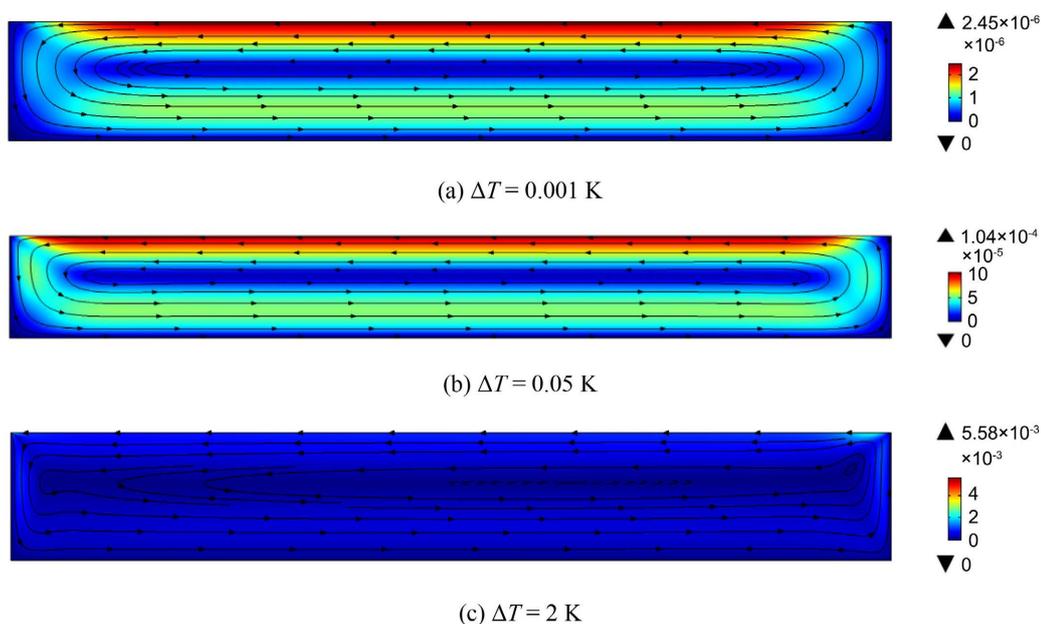
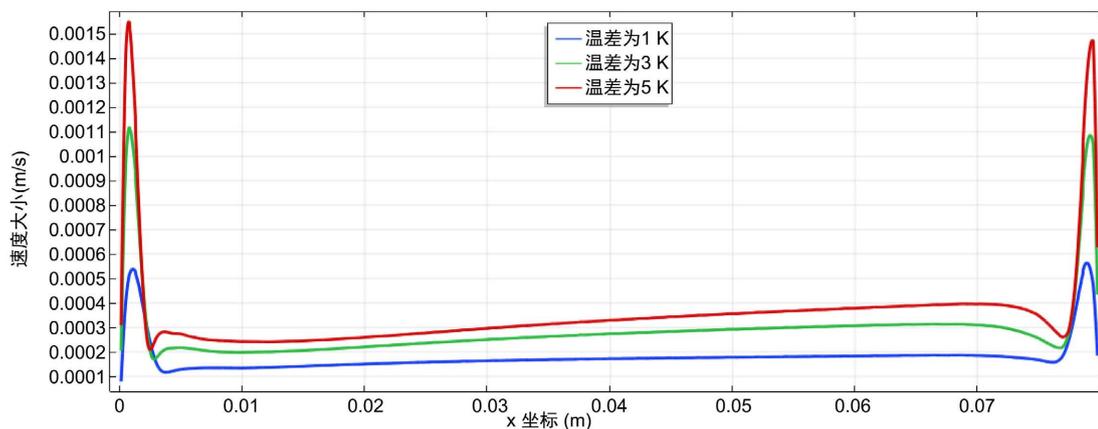


Figure 4. Velocity cloud map inside rectangular cavity under different temperature differences

图 4. 不同温差下矩形腔内的速度云图

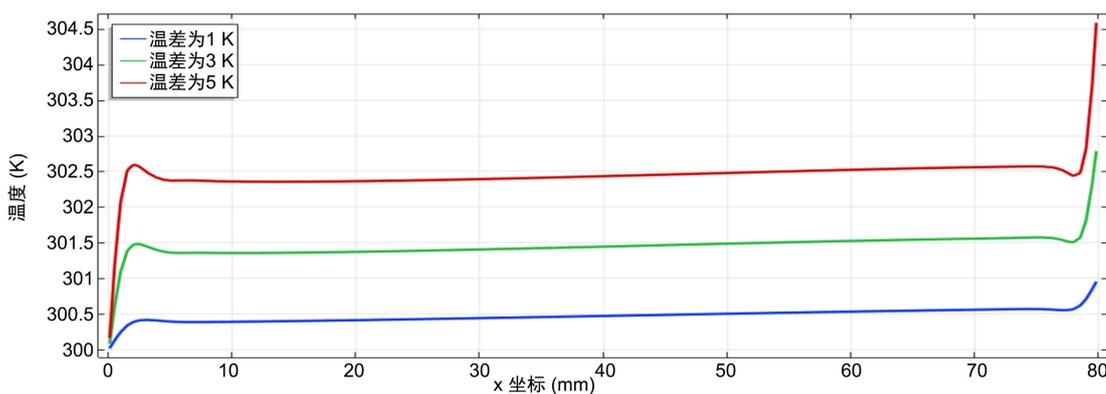
通过图 6 可以看出，由矩形腔内水平中心线上的温度分布图不能直观地看出左右边界温差对传热效果的影响，为了便于分析和比较，特将温度这一参数无量纲化，结合矩形腔内水平中心线上的无量纲温度分布图来一起分析。

图 5~7 分别给出了硅油/氧化铝纳米流体在不同温差下，矩形腔内水平中心线上的速度分布、温度分布和无量纲温度，左右边界温差分别为 1 K、3 K 和 5 K。由这三张图可以得出，1) 热毛细对流基本流动特性：在水平中心线靠近两边界处，纳米流体的流体流动速度较大，温度的变化幅度较大。据此分析，由自由表面张力驱动的热毛细对流在该处的流动速度较大，从而增大了对流热交换效率。这样也可以解释在水平中心线上靠近左边界处，温度存在先升后降的情况，该处由于流动速度较大导致对流热交换效率高于其他地方，因此温度较高。2) 左右边界温差的影响：随着温差的增大，水平中心线上速度整体变大，水平中心线上靠近两边界处的速度峰值增大，说明增大矩形腔左、右边界的温差可以强化流体的内部流动；同时随着温差的增大，水平中心线上靠近两边界处，温升变快，说明此处的对流换热效果变强。



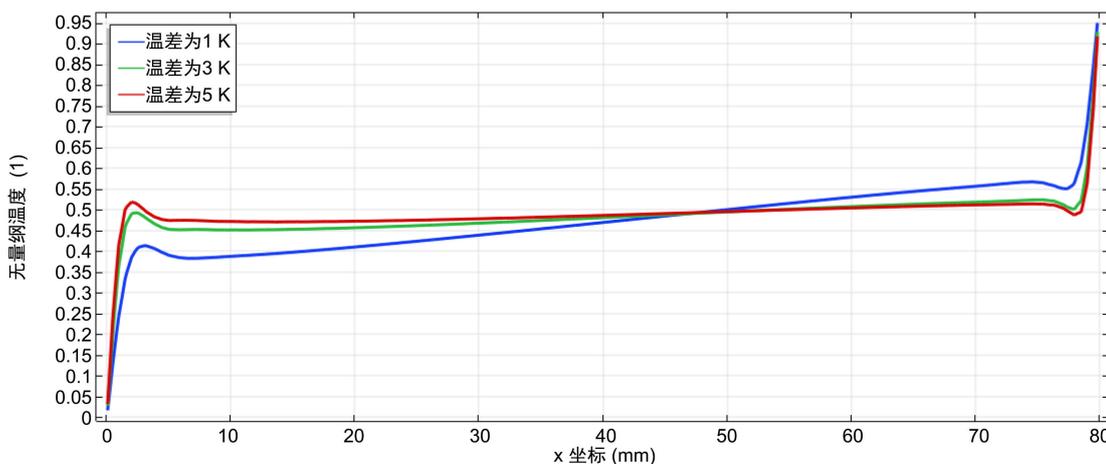
**Figure 5.** Velocity distribution on the horizontal centerline inside a rectangular cavity under different temperature differences

**图 5.** 不同温差下矩形腔内水平中心线上速度分布



**Figure 6.** Temperature distribution on the horizontal centerline inside a rectangular cavity under different temperature differences

**图 6.** 不同温差下矩形腔内水平中心线上温度分布



**Figure 7.** Non-dimensional temperature distribution on the horizontal centerline of a rectangular cavity under different temperature differences

**图 7.** 不同温差下矩形腔内水平中心线上无量纲温度分布

图 8 给出了硅油/氧化铝纳米流体在不同温差下, 矩形腔右边边界上的表面传热系数分布, 可以看出,

1) 随着  $y$  的增大, 右边界上的表面传热系数逐渐减小, 说明右边界处纳米流体的对流换热强度越靠近自由边界变得越小, 这种情况可以用热边界层效应解释, 即在矩形腔区域内的纳米流体环流中, 由左边界(冷边界)过来的冷流体扫掠过右边界(热边界)时, 会发生对流换热, 换热区域集中在一个厚度随  $y$  值不断增大的温度边界层中。且已经计算得右边界上的流体均处于层流状态, 在其他条件不变的情况下, 热边界层厚度增大, 则对流换热效率下降。2) 随着左右边界温差的增大, 右边界上的表面传热系数变大, 即增大左右边界温差可以强化纳米流体的热毛细对流换热效率。

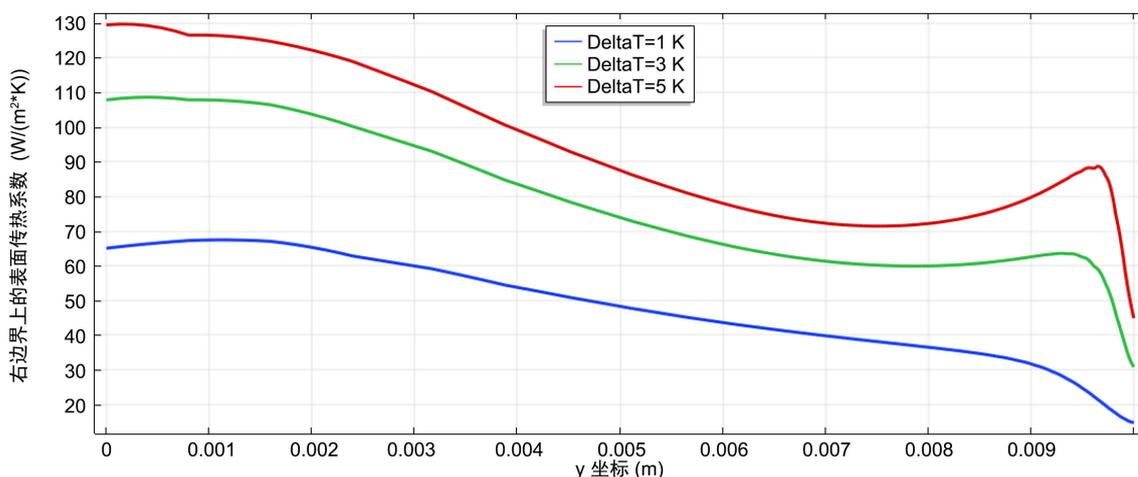


Figure 8. Distribution of heat transfer coefficient on the upper surface of the right boundary of the rectangular cavity under different temperature differences

图 8. 不同温差下矩形腔右边界上表面传热系数分布

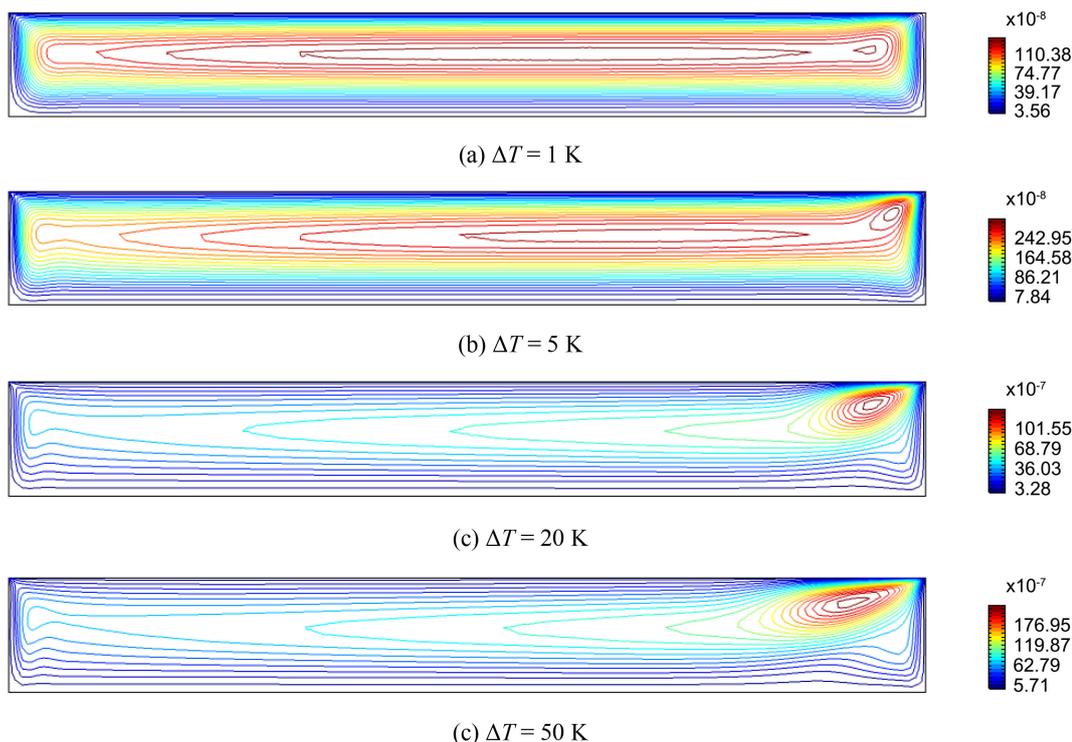


Figure 9. Flow function diagram of rectangular cavity under different temperature differences

图 9. 不同温差下矩形腔内流函数图

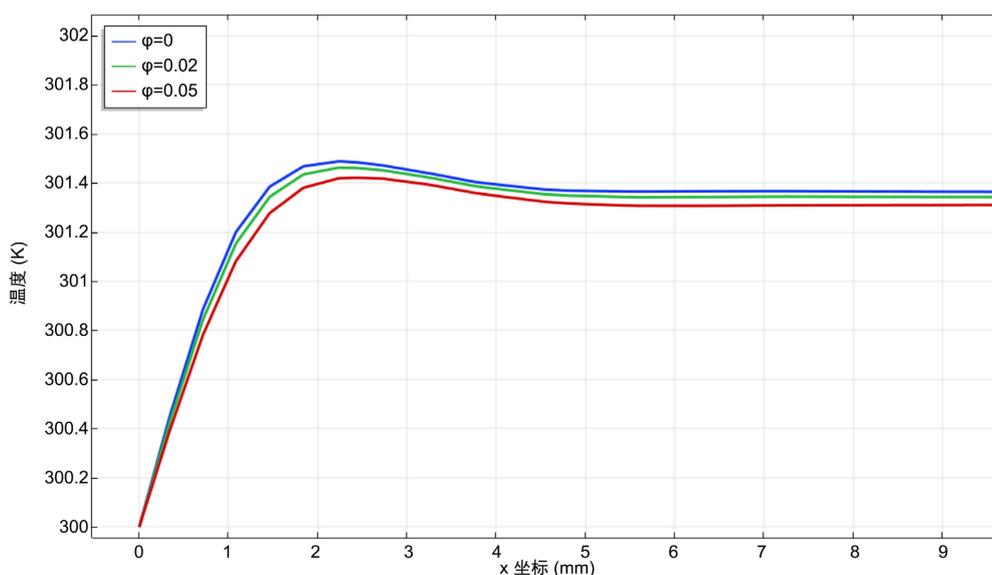
图 9 给出了硅油/氧化铝纳米流体在不同温差的流动和传热特性, 可以看出, 当矩形腔左右边界的温差变得更大(如 5 K)时, 右边界(热边界)附近将首先出现扰动, 并在右边界形成一个新的对流涡胞; 随着温差的继续增大, 对流涡胞不断增大并向流体内部扩散, 结合 Garcimartin [14]的分析, 认为这种现象是由右边界的热边界层效应引起的, 热液不稳定性和垂直边界层不稳定性使矩形腔内热边界层附近出现扰动, 这种扰动随后被拖拽, 进而顺延放大。这部分研究在不同体积分数下, 矩形腔内的流动和传热特性, 其中纳米颗粒为氧化铝, 矩形腔左右边界的温差为 3 K。表 2 给出了不同体积分数下, 硅油/氧化铝纳米流体的热物性参数。

**Table 2.** Thermal properties parameters of silicone oil/alumina nanofluid

**表 2.** 硅油/氧化铝纳米流体的热物性参数

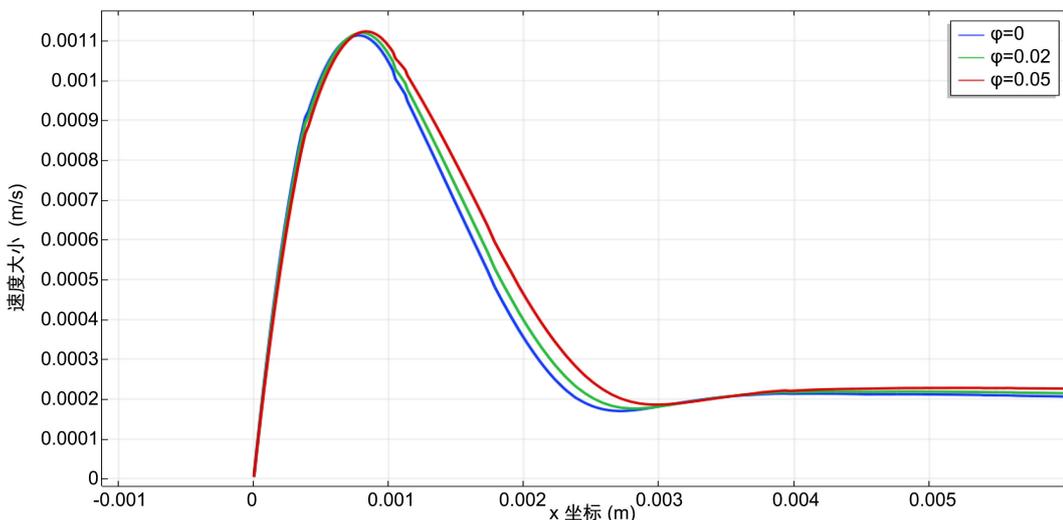
硅油/氧化铝纳米流体	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (J/kg·K)	$\lambda$ (W/(m·K))	$\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	$\mu$ (Pa·s)
0%	950	1630	0.14	$1.90 \times 10^{-6}$	0.001805
1%	979.3	1596	0.1456	$1.94 \times 10^{-6}$	0.001908
2%	1008.6	1564.1	0.1512	$1.99 \times 10^{-6}$	0.002015
5%	1096.5	1478.4	0.169	$2.10 \times 10^{-6}$	0.002245
10%	1243	1362.5	0.2012	$2.15 \times 10^{-6}$	0.002368
15%	1389.5	1271	0.237	$2.47 \times 10^{-6}$	0.003073

图 10、图 11 分别给出了硅油/氧化铝纳米流体在矩形腔内水平中心线上左边界附近的温度和速度分布, 纳米颗粒的体积分数分别为 0、0.02 和 0.05。在靠近壁面处, 由于流体的粘滞力大, 壁面附近流动速度为 0, 静止不动。从图 7 中可以看出, 在左右边界温差相同的情况下, 随着体积分数的增大, 纳米流体的温度在水平中心线上的分布更加均匀, 说明纳米流体在矩形腔内部的换热特性增强。其原因是: 1) 随着体积分数的增大, 纳米流体的有效导热系数增大; 2) 从图 11 中可以看出, 随着体积分数的增大, 水平中心线上速度的峰值变大, 这说明纳米颗粒的运动增强, 使得纳米颗粒和基液之间的相互作用增强, 从而使纳米流体内部热交换率增强, 因此强化了纳米流体的换热特性。



**Figure 10.** Temperature distribution near the left boundary of the horizontal centerline within a rectangular cavity at different volume fractions

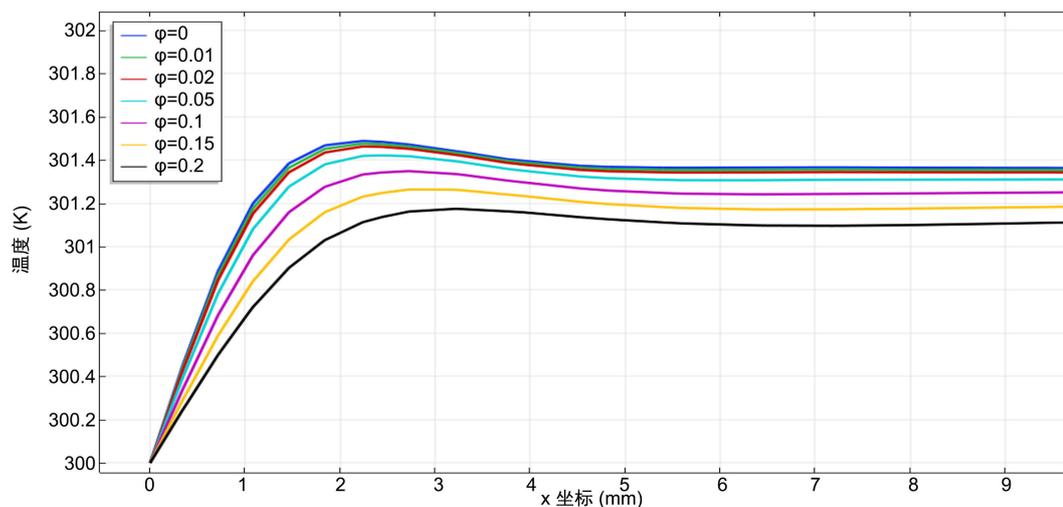
**图 10.** 不同体积分数下矩形腔内水平中心线上左边界附近的温度分布



**Figure 11.** Velocity distribution near the left boundary of the horizontal centerline within a rectangular cavity at different volume fractions

**图 11.** 不同体积分数下矩形腔内水平中心线上左边界附近的温度分布

图 12、图 13 分别给出了硅油/氧化铝纳米流体在矩形腔内水平中心线上左边界附近的温度峰值和速度峰值变化。可以注意到，当纳米颗粒的体积分数进一步增大时( $\geq 0.05$ )，纳米流体在中心线上的温度分布更加均匀，纳米流体的换热特性进一步增强；但是水平中心线上 y 方向速度的峰值变小。原因主要为：1) 由式(13)可知，随着体积分数的增大，纳米流体的动力粘度增大从而减缓了纳米流体的流动，纳米流体速度峰值减小；2) 由式(12)可知，随着体积分数的增大，纳米流体的有效导热系数增大，导热系数增大对传热的增强效果大于动力粘度增大、流动减缓对传热的弱化效果，整体上依然是纳米流体的换热效果增强。

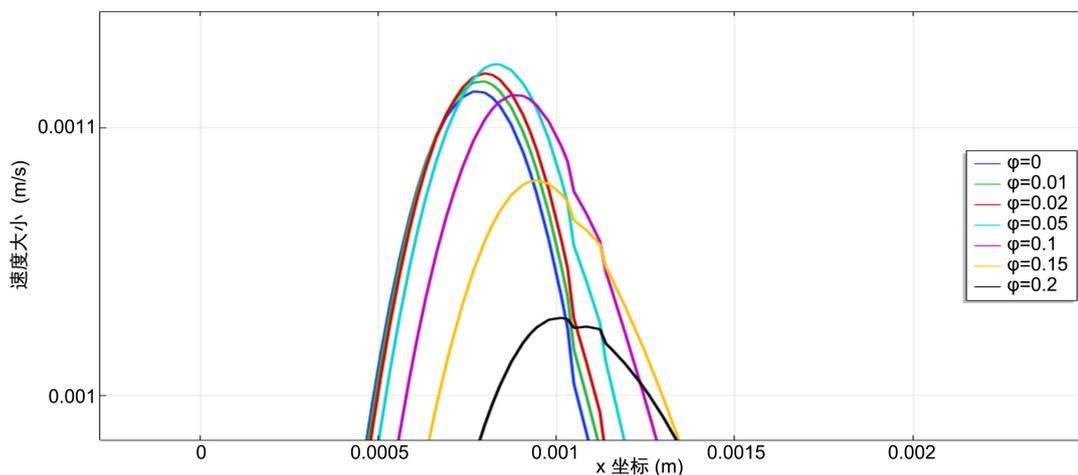


**Figure 12.** Temperature peak variation near the left boundary of the horizontal centerline within a rectangular cavity at different volume fractions

**图 12.** 不同体积分数下矩形腔内水平中心线上左边界附近的温度峰值变化

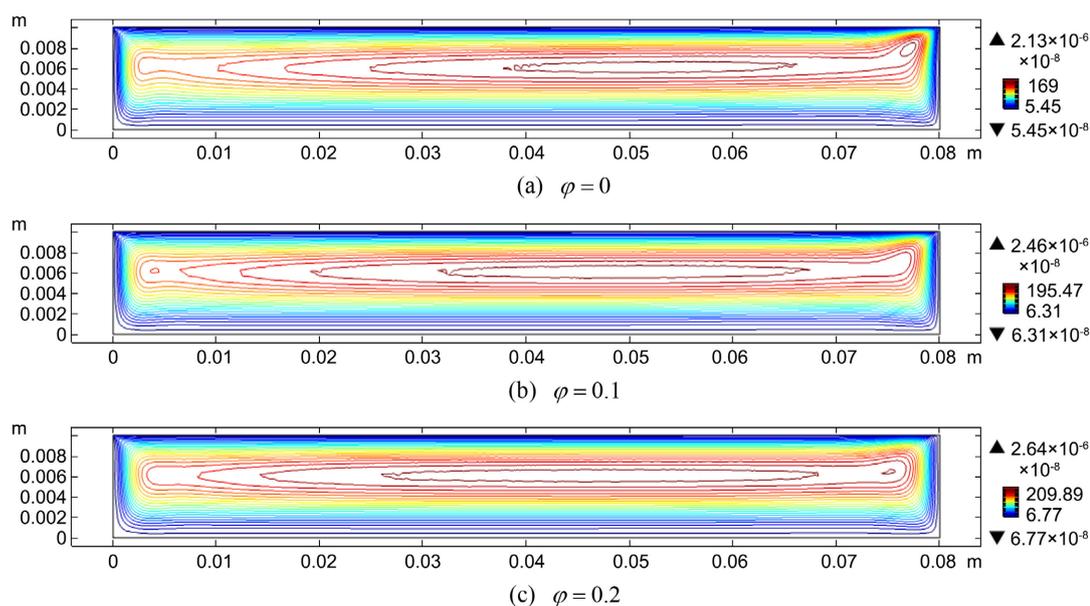
图 14 给出了不同体积分数下矩形腔内的流函数图，纳米颗粒的体积分数分别为 0、0.1 和 0.2。从图中我们可以看出，提升纳米颗粒的体积分数，纳米颗粒的热毛细对流强度增加；先前由热边界效应引起的矩形右上角的对流涡胞逐渐消失，这说明矩形腔内热毛细对流的稳定性增加，分析是随着纳米颗粒体

积分数的增加, 纳米流体的粘度增加, 雷诺数减小, 对流的稳定性变大。这部分研究在不同纳米颗粒的情况下, 矩形腔内部的流动和传热特性, 其中纳米颗粒的体积分数均为 0.04, 矩形腔左右边界的温差为 3 K。表 3 给出了不同纳米流体的物性参数。



**Figure 13.** Peak velocity variation near the left boundary of the horizontal centerline within a rectangular cavity at different volume fractions

**图 13.** 不同体积分数下矩形腔内水平中心线上左边界附近的速度峰值变化



**Figure 14.** Flow function diagram of rectangular cavity under different volume fractions

**图 14.** 不同体积分数下矩形腔内的流函数图

**Table 3.** Physical property parameters of different nanofluids

**表 3.** 不同纳米流体的物性参数

	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (J/kg·K)	$\lambda$ (W/m·K)	$\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	$\mu$ (Pa·s)	$Ma$
硅油/氧化铝纳米流体	1067.2	1505.4	0.1629	$2.1 \times 10^{-6}$	0.002245	65,642
硅油/铜纳米流体	1271.1	1277.1	0.1632	$2.1 \times 10^{-6}$	0.002674	55,574
硅油/碳纳米流体	976	1575.3	0.1633	$2.1 \times 10^{-6}$	0.002053	68,537

图 15 为不同材料下二维矩形液层表面的流函数图，在同样是硅油基液中的纳米颗粒分别为氧化铝、铜和碳。由这三幅图可以看出在纳米颗粒体积分数不大的情况下，硅油/碳纳米流体的热毛细对流最强烈，依次是硅油/氧化铝纳米流体和硅油/铜纳米流体。

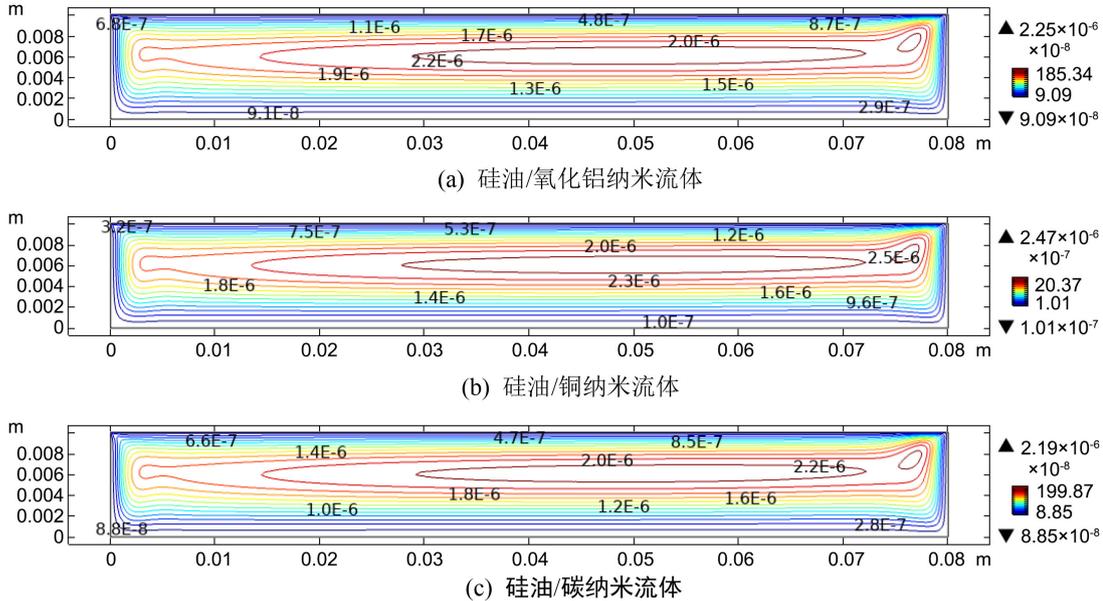


Figure 15. Flow function diagram of rectangular cavity under different materials

图 15. 不同材料下矩形腔内的流函数图

图 16 给出了不同材料下矩形腔内右边界表面  $x$  的分布情况，图上的水平轴代表二维矩形液层的  $y$  轴正方向，可见在右边界越靠近自由表面处对流换热系数越来越小，说明换热强度越小；对比三种不同材料，硅油/碳纳米流体的对流换热系数最大，依次是硅油/氧化铝纳米流体、硅油/铜纳米流体。表明在矩形腔的右边界处，硅油/碳纳米流体的换热效果最好，这与由温度分布得出的结论一致。同时，对比单相化处理之后纳米流体的物性参数，发现纳米流体的换热效果与流体的 Marangoni 数成正相关，即随着 Marangoni 数的增大，纳米流体的换热效果增强，这与之前学者的研究结论相符合。

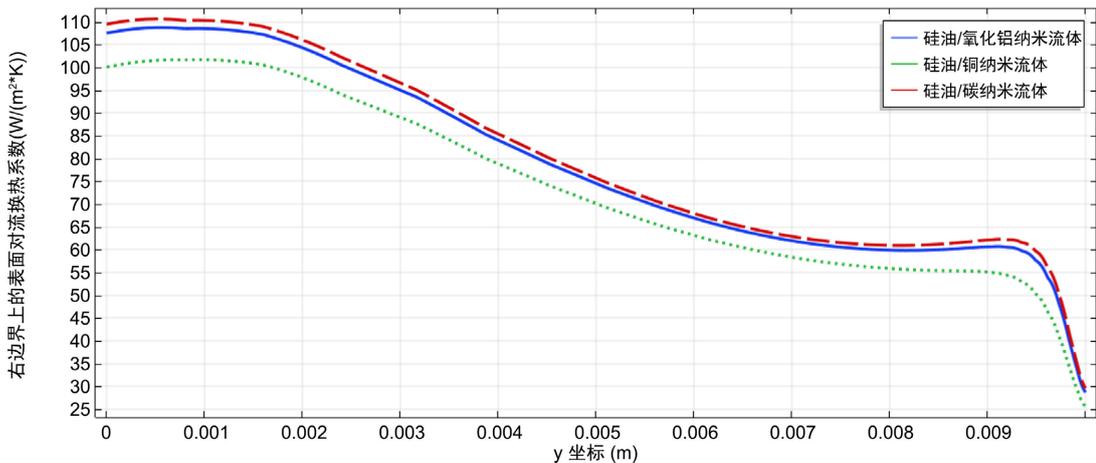


Figure 16. Convective heat transfer coefficient on the upper surface of the right boundary of a rectangular cavity under different materials

图 16. 不同材料下矩形腔右边界上表面对流换热系数

## 4. 结论

本文数值研究了矩形腔内纳米流体的对流和换热特性, 分析了不同温差、不同纳米颗粒的体积分数和不同纳米颗粒材料对热毛细对流换热的影响, 主要结论如下:

- (1) 增大矩形腔左、右边界的温差可以强化纳米流体热毛细对流的内部流动, 继而强化矩形腔内部的对流换热;
- (2) 随着纳米颗粒体积分数的增加, 纳米流体的粘度增加, 雷诺数减小, 热毛细对流的稳定性变大;
- (3) 纳米颗粒为碳的纳米流体传热效果最好, 其次是纳米颗粒为铝的纳米流体, 最后是纳米颗粒为铜的纳米流体。

## 基金项目

江苏省特检院科技计划项目(KJ(Y)202409)。

## 参考文献

- [1] Choi, S.U.S. and Eastman, J. (1995) Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles. *ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, 12-17 November 1995.
- [2] Thomson, J. (1855) XLII. on Certain Curious Motions Observable at the Surfaces of Wine and Other Alcoholic Liquors. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, **10**, 330-333. <https://doi.org/10.1080/14786445508641982>
- [3] Benard, H. (1901) Les tourbillons Cellulaires dan une Nappe Liquide Transportant dela Chaleur par Convection en Re-gime Permanent. *Annales de chimie et de physique*, **23**, 62-144.
- [4] Block, M.J. (1956) Surface Tension as the Cause of Bénard Cells and Surface Deformation in a Liquid Film. *Nature*, **178**, 650-651. <https://doi.org/10.1038/178650a0>
- [5] Pearson, J.R.A. (1958) On Convection Cells Induced by Surface Tension. *Journal of Fluid Mechanics*, **4**, 489-500. <https://doi.org/10.1017/s0022112058000616>
- [6] Nield, D.A. (1964) Surface Tension and Buoyancy Effects in Cellular Convection. *Journal of Fluid Mechanics*, **19**, 341-352. <https://doi.org/10.1017/s0022112064000763>
- [7] 周小明, 淮秀兰, 黄护林. 深径比对双层热毛细浮力对流的影响[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(8): 1575-1580.
- [8] 张利, 吴春梅, 李友荣. 表面蒸发对环形液池内稳态热毛细对流的影响[J]. 重庆大学学报, 2017, 40(7): 1-8.
- [9] 刘佳. 双向温度梯度作用下浮力-热毛细对流的线性稳定性分析[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- [10] Zebib, A., Homsy, G.M. and Meiburg, E. (1985) High Marangoni Number Convection in a Square Cavity. *The Physics of Fluids*, **28**, 3467-3476. <https://doi.org/10.1063/1.865300>
- [11] Hadid, H.B. and Roux, B. (1990) Thermocapillary Convection in Long Horizontal Layers of Low-Prandtl-Number Melts Subject to a Horizontal Temperature Gradient. *Journal of Fluid Mechanics*, **221**, 77-103. <https://doi.org/10.1017/s0022112090003494>
- [12] Schwabe, D., Scharmann, A., Preisser, F. and Oeder, R. (1978) Experiments on Surface Tension Driven Flow in Floating Zone Melting. *Journal of Crystal Growth*, **43**, 305-312. [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(78\)90387-1](https://doi.org/10.1016/0022-0248(78)90387-1)
- [13] Chun, C.-H. and Wuest, W. (1978) A Micro-Gravity Simulation of the Marangoni Convection. *Acta Astronautica*, **5**, 681-686. [https://doi.org/10.1016/0094-5765\(78\)90047-4](https://doi.org/10.1016/0094-5765(78)90047-4)
- [14] Garcimartín, A., Mukolobwicz, N. and Daviaud, F. (1997) Origin of Waves in Surface-Tension-Driven Convection. *Physical Review E*, **56**, 1699-1705. <https://doi.org/10.1103/physreve.56.1699>
- [15] Velten, R., Schwabe, D. and Scharmann, A. (1991) The Periodic Instability of Thermocapillary Convection in Cylindrical Liquid Bridges. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, **3**, 267-279. <https://doi.org/10.1063/1.858135>
- [16] 周小明, 黄护林. 大尺度环形液池内双层热毛细对流不稳定性[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(7): 1195-1198.
- [17] 马力, 彭岚, 高健, 朱承志. 旋转和磁场耦合作用对振荡 Marangoni-热毛细对流的影响[J]. 重庆大学学报, 2019, 42(9): 1-9.
- [18] Hamilton, R.L. and Crosser, O.K. (1962) Thermal Conductivity of Heterogeneous Two-Component Systems. *Industrial*

- & *Engineering Chemistry Fundamentals*, **1**, 187-191. <https://doi.org/10.1021/i160003a005>
- [19] Brinkman, H.C. (1952) The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solutions. *The Journal of Chemical Physics*, **20**, 571-571. <https://doi.org/10.1063/1.1700493>

# 基于LS-SVM和小波分解的风电功率预测模型研究

王 阳

国电电力新疆新能源开发有限公司, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2024年11月13日; 录用日期: 2024年11月28日; 发布日期: 2024年12月31日

## 摘 要

随着风能在电力市场的高度渗透, 开发高效的风电预测模型成为迫切需求。本文利用历史数据和数值天气预报, 应用多种混合预测方法进行风电功率预测, 特别对复杂地形风电场的发电量进行了对比研究。研究评估了带有小波分解(WD)的最小二乘支持向量机(LS-SVM)在不同时间范围内的性能, 并与其他混合预测方法进行了比较。结果表明, 基于LS-SVM和WD的混合方法在大多数情况下优于其他预测方法。通过对均方根误差的分解, 深入分析了预测值与实际测量值之间的差异, 并比较了不同模型的准确性。此外, 研究还进行了敏感性分析, 探讨了各输入变量对LS-SVM模型训练过程的影响, 并对WD技术下LS-SVM模型的分解成分进行了灵敏度分析。

## 关键词

风电功率预测, 最小二乘支持向量机(LS-SVM), 小波分解

# Research on Wind Power Forecasting Model Based on LS-SVM and Wavelet Decomposition

Yang Wang

Guodian Power Xinjiang New Energy Development Co., Ltd., Urumqi Xinjiang

Received: Nov. 13<sup>th</sup>, 2024; accepted: Nov. 28<sup>th</sup>, 2024; published: Dec. 31<sup>st</sup>, 2024

## Abstract

With the increasing penetration of wind energy in the power market, the development of accurate and efficient wind power forecasting models has become a pressing requirement. This paper leverages historical data and numerical weather prediction to apply various hybrid forecasting methods

for wind power prediction, with a particular emphasis on a comparative study of power generation in wind farms situated in complex terrains. The performance of the Least Squares Support Vector Machine (LS-SVM) integrated with Wavelet Decomposition (WD) is evaluated over different forecasting horizons, and the results are compared with those of other hybrid forecasting methods. The findings indicate that the LS-SVM and WD-based hybrid approach outperforms most alternative forecasting techniques in most cases. A detailed analysis of the discrepancies between predicted and actual measurements is conducted through the decomposition of root mean square error, and the accuracy of various models is further compared. Additionally, a sensitivity analysis is performed to examine the influence of different input variables on the training process of the LS-SVM model, and a sensitivity analysis of the decomposition components of the LS-SVM model under the WD technique is also presented.

## Keywords

Wind Power Prediction, Least Squares Support Vector Machine, Wavelet Decomposition

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着全球对可再生能源的需求不断增加,优化可再生能源电力系统的管理已成为能源研究领域的关键问题,尤其在风力发电方面[1]-[3]。风能的随机性和风速的波动性给风电场的电力生产和电网调度带来了极大的挑战,尤其是在电力系统中,如何准确预测风电功率成为高效利用风能的关键因素。风速和气象条件的变化不仅具有短期的随机波动,还受季节性变化、气候变化等长期趋势的影响。因此,开发能够准确预测风电功率的模型,对于实现风电的广泛利用、提高电网的稳定性和优化电力调度至关重要。

风电功率预测是一个复杂的多尺度问题,涉及不同时间尺度的变化模式。通常,统计方法和气象模型分别在短期预测和长期预测中表现出色[4],但由于风速数据的非线性特征,传统的线性模型往往难以准确捕捉风速和气象数据中的复杂变化。为了克服这些挑战,近年来,基于机器学习的方法逐渐成为风电预测领域的研究热点[5]。其中,支持向量机[6][7] (SVM)因其强大的建模能力,尤其是在处理非线性问题时,已被广泛应用于风电功率预测任务。SVM通过构造最优超平面来进行回归分析,并能够较好地拟合复杂的气象数据。然而,单独使用SVM进行风电功率预测时,往往难以应对风速数据的非平稳性及其多尺度的特征。

小波分解(Wavelet Decomposition, WD) [8]作为一种有效的信号处理方法,能够将复杂的非平稳时间序列信号分解为多个频率成分,从而揭示不同时间尺度下的局部变化趋势。与传统的傅里叶变换不同,小波变换不仅能够提供频率信息,还能同时保留时间信息,因此特别适合于分析具有非平稳性和局部突变特征的风速数据。小波分解通过分解信号为近似分量和细节分量,能够从多个尺度上捕捉风速信号的变化特征,尤其对于风速数据中的快速波动和长期趋势具有较好的建模效果。将小波分解与SVM结合,可以有效提高风电功率预测的精度,尤其在处理风速数据的非平稳性方面表现尤为突出。

本研究旨在提出一种基于最小二乘支持向量机(LS-SVM) [9]与小波分解(WD)相结合的混合预测方法,用于风电功率的多尺度预测。具体而言,本文将风速、温度和压力等气象数据通过小波分解技术,分解为不同频率的分量。然后,分别对这些频段的数据应用LS-SVM进行回归预测,最终通过加权合成各频段的预测结果,得到综合的风电功率预测。通过这种方法,能够有效地捕捉到风电功率预测中的短期波

动和长期趋势，从而提高预测的精度和可靠性。

## 2. 方法理论与应用

### 2.1. 最小二乘支持向量机

LS-SVM [10] [11]通过采用最小二乘法优化损失函数，并结合核函数进行非线性映射，使得回归模型能够适应复杂的数据分布，从而提高预测的精度和泛化能力。

LS-SVM 的目标是通过构造一个回归模型，拟合输入数据和输出数据之间的关系。在 LS-SVM 中，假设我们有一个训练集  $\{(x_i, y_i)\}$ ，其中  $x_i$  是第  $i$  个输入数据， $y_i$  是对应的输出数据。LS-SVM 模型的形式如下：

$$y_i = w^T \phi(x_i) + b + \varepsilon_i \quad (1)$$

其中， $w$  是权重向量， $\phi(x_i)$  是输入数据  $x_i$  在映射到高维空间后的特征， $b$  是偏置项， $\varepsilon_i$  是误差项。

为了解决这个回归问题，LS-SVM 采用最小化以下带有约束的二次优化目标函数：

$$\min_{w, b, \varepsilon} \frac{1}{2} \|w\|^2 + \frac{1}{2} C \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 \quad (2)$$

其中， $C$  是正则化参数，用来平衡模型的复杂度与训练误差。这里的目标是通过最小化目标函数来寻找最优的  $w$ 、 $b$  和误差  $\varepsilon_i$ 。

### 2.2. 小波分解

WD [12] [13]是一种有效的信号处理技术，通过将复杂的时间序列分解为多个不同频率的成分，能够揭示不同时间尺度上的局部变化趋势。其基本原理是通过选择适当的小波基函数(如Haar小波、Daubechies小波等)，将原始信号在不同的尺度(即频率)上进行分解和重构。与传统的傅里叶变换不同，小波变换能够提供时间和频率的联合信息，因此特别适合分析具有非平稳性和局部突变的信号[14] [15]。

小波变化则通过一系列离散的尺度和位置来进行信号的多尺度分解。对于信号  $x(t)$  的分解，小波分解公式可以表示为：

$$x(t) = \sum_j \sum_k c_{j,k} \varphi_{j,k}(t) \quad (3)$$

其中， $c_{j,k}$  为小波系数，表示信号在不同尺度  $j$  和位置  $k$  的投影； $\varphi_{j,k}(t)$  为缩放和平移后的小波函数。

小波分解能够有效提取风速、温度和压力等气象数据的局部特征和趋势，从而为预测模型提供更丰富的信息，进而增强模型对复杂时间序列数据的拟合能力和预测精度。因此，结合小波分解处理后的数据作为输入，不仅能保留原始数据中的重要模式，还能抑制噪声和冗余信息，优化预测效果，提升风电功率预测的准确性和稳定性[12] [16]。

### 2.3. 基于 LS-SVM-WD 的风电功率预测方法

本文提出的风电功率预测方法利用小波分解算法将风速、温度和压力等气象数据分解为不同频率的分量，然后应用 LS-SVM 算法将这些频段的数据进行回归预测，最终对各个频率分量的预测结果进行加权重构获得完整的风电功率预测值。具体预测方法的步骤如下：

**步骤 1:** 对风速、温度和压力等气象数据进行小波分解，将时间序列分解为低频近似分量和高频细节分量，提取不同时间尺度的特征并去噪。这个步骤能够有效地捕捉数据中的局部波动和长期趋势，并且有效地去除噪声。

**步骤 2:** 对每个小波分解后的频率分量，使用 LS-SVM 进行回归建模，通过最小化平方误差来求解最优的回归模型，并通过核函数(如径向基函数，RBF)处理输入数据与目标变量之间的非线性关系，捕捉

非线性关系并进行预测。

**步骤 3:** 将各个频段的预测结果合并，得到最终的风电功率预测值，并进行误差分析和性能评估。

### 3. 实验结果与对比分析

#### 3.1. 输入数据

在本文研究中，利用某地实际测量数据和天气预测来预测风电场的发电量。考虑了五个预测范围(1 小时、3 小时、6 小时、12 小时、24 小时)。对于被视为预测开始时间的每个小时“ $i$ ”。前 60 分钟内，第  $i$  小时内三台风机发电的平均值。给定  $P(k, t)$  为每个涡轮机在“ $t$ ”时刻的风力功率，每十分钟记录一次，三台涡轮机的平均值为：

$$P_m(i) = \frac{1}{6} \sum_{t=6i-5}^{6i} P(t), i = 1, \dots, 8760 \quad (4)$$

$$P(t) = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 P(k, t), t = 1, \dots, 52,560 \quad (5)$$

预测模型的训练期为 8 个月，测试期为 4 个月。用于评估模型预测的目标由  $P_i(i, l)$  给出，即预测时间范围  $l$  内每小时平均功率  $P_m(r)$  的总和，定义为：

$$P_i(i, l) = \sum_{r=i+1}^{i+l} P_m(r) \quad (6)$$

#### 3.2. LS-SVM 与 ANN 的预测对比分析

为了更好地展示 LS-SVM 模型的预测优势，本研究将其与 ANN [17] [18]模型进行了对比分析，尤其是在未经过小波分解的原始数据上进行测试。训练期设定为 8 个月，测试期为 4 个月，如图 1 所示。图 1 展示了输入数据的归一化平均绝对误差值(NAME)。从结果来看，除了风速的显著重要性外，气压和温度等数值天气预报数据对预测性能也有积极影响。

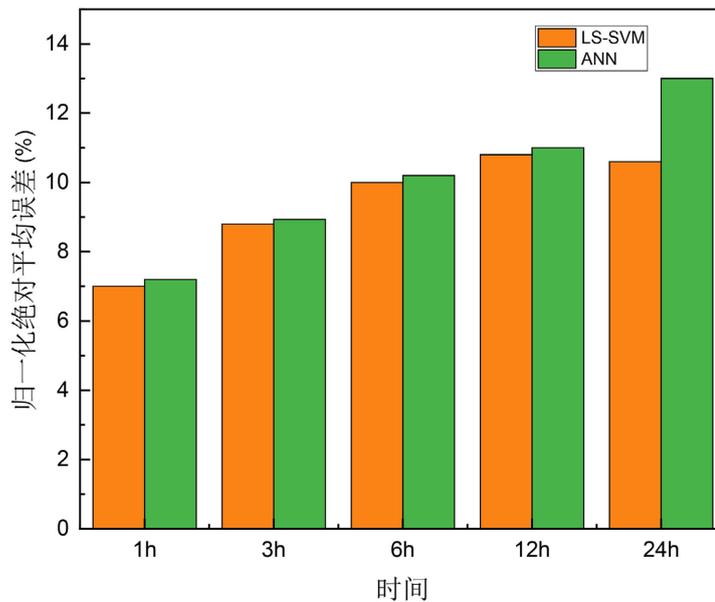


Figure 1. NAME histograms of LS-SVM and ANN

图 1. LS-SVM 和 ANN 的 NAME 直方图

与 ANN 方法相比, LS-SVM 方法显著减少了由于不相关变量(如湿度)所带来的误差。在 LS-SVM 模型中, 输入数据的选择对预测结果尤其重要, 特别是在长时间预测时, LS-SVM 能够提供更稳定和准确的结果。随着预测时间间隔的延长, 由于数据的不相关性, 预测误差通常会增大; 因此, 去除湿度数据能够显著提升预测精度。

对于 24 小时的预测, 在输入数据为同一类型的情况下, 超过 63% 的预测点的归一化误差小于 10%。而在 ANN 模型下, 约 60% 的预测点能达到相同的误差水平。对于较短时间段的预测, LS-SVM 和 ANN 的预测误差分布趋于相似, 但整体上, LS-SVM 在各类预测中表现出更好的准确性和可靠性。

### 3.3. 基于小波分解的风电功率预测方法

所提出的 LS-SVM 算法应用于风电功率数据集。本文研究了 WD 与 LS-SVM 的混合, 并将结果与混合 ANN 的类似结果进行了比较。针对相同输入的风电功率数据集, LS-SVM 与 ANN 在有无 WD 下的对比结果具体如表 1 所示。表 1 给出了带 WD 和不带 WD 的 NAME 值之间的比较。WD 在中短期预测范围内带来的好处是显而易见的。然而, WD 方法本质上是统计方法, 其计算成本往往更高, 尤其是当预测时间段变长时。

**Table 1.** Comparison of NAME between LS-SVM and ANN with and without WD

**表 1.** LS-SVM 与 ANN 在有无 WD 下的 NAME 对比

时间范围	归一化绝对平均误差 NAME			
	ANN	LS-SVM	ANN-WD	LS-SVM-WD
1 h	7.04%	6.88%	5.67%	5.31%
3 h	9.17%	8.67%	6.83%	6.57%
6 h	9.99%	9.89%	8.56%	8.14%
12 h	10.70%	10.51%	10.92%	10.33%
24 h	11.27%	10.36%	15.50%	12.16%

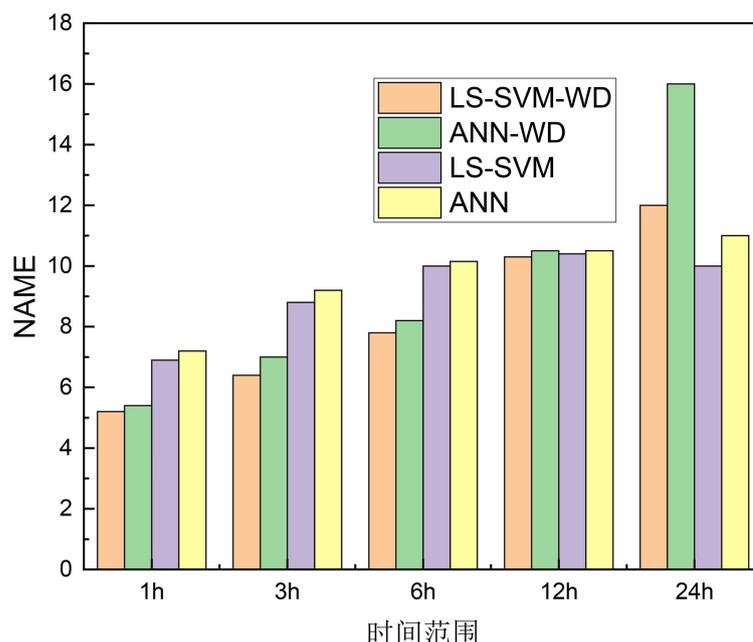
**短期预测(1 小时至 3 小时):** LS-SVM 方法的预测误差普遍低于 ANN 方法, 尤其在小波分解(WD)处理后, LS-SVM 展示出最好的表现。特别是在 1 小时和 3 小时的预测中, LS-SVM 与 WD 的组合显著优于 ANN 和其他方法。

**中期预测(6 小时至 12 小时):** 虽然 LS-SVM 和 ANN 方法的误差相对接近, 但 LS-SVM 与 WD 结合的效果仍然优于未使用小波分解的 ANN 方法。在 6 小时和 12 小时的预测中, LS-SVM 与 WD 方法略有优势, 表现出较低的 NAME 值。

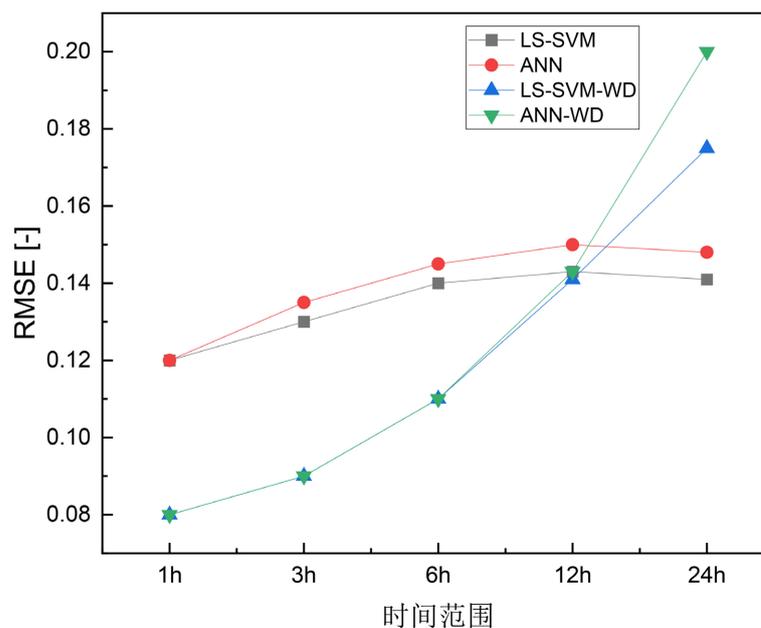
**长期预测(24 小时):** 在 24 小时预测的情况下, LS-SVM 方法表现更为突出, 尤其是在与小波分解(WD)结合时, 其 NAME 值显著低于 ANN 与 WD 结合的结果。这表明 LS-SVM 不仅在短期预测中具有优势, 在长期预测中也能保持较好的精度。

如图 2 所示, 对于短期预测(从 1 小时到 6 小时的提前预测), 基于 WD 的混合方法可以为 ANN 和 LS-SVM 带来更好的结果, 并且 LS-SVM 的准确性稍好一些。从长期(24 小时)来看, 不带 WD 的 LS-SVM 方法优于其他方法。

图 3 中的均方根误差(RMSE) [19]-[21]进一步验证了这一点。RMSE 对大误差赋予更大权重, 而 NAME 则反映了误差和偏差的平均大小, 同时揭示了是否存在系统性过度预测或低估的显著趋势, 这些趋势是可以纠正的。

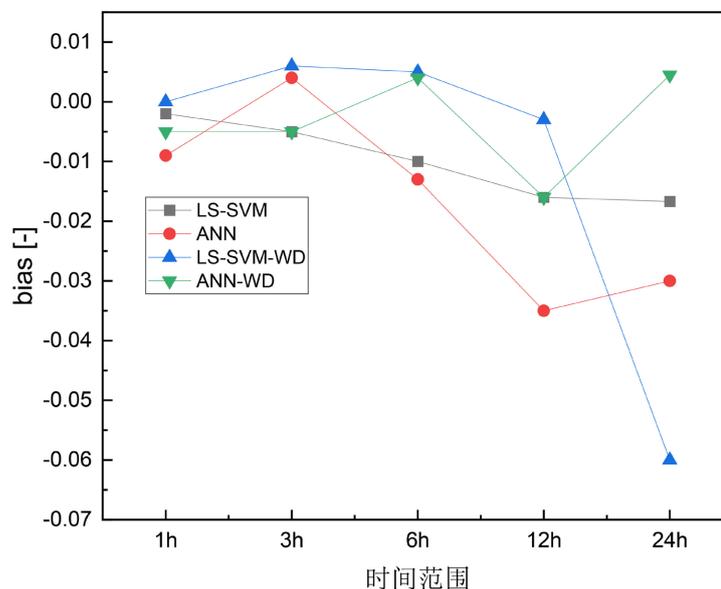


**Figure 2.** NAME histograms of LS-SVM and ANN with and without WD  
**图 2.** LS-SVM 和 ANN 在有无 WD 下的 NAME 直方图



**Figure 3.** RMSE Line Chart of LS-SVM and ANN with and without WD  
**图 3.** LS-SVM 和 ANN 在有无 WD 下的 RMSE 折线图

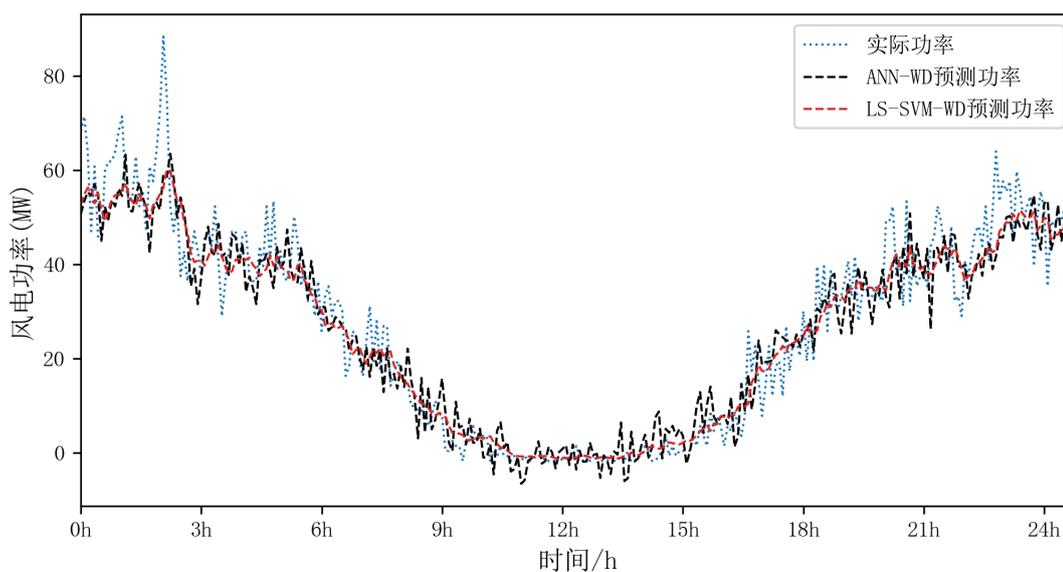
在图 4 中我们可以看出，LS-SVM 方法在不同时间预测中的误差普遍较小，尤其在 1 小时和 3 小时的短期预测中表现优异。相比之下，ANN 方法的误差存在一定波动，特别是在 24 小时的预测中，误差较大，表现不如 LS-SVM。引入小波分解(WD)后的 LS-SVM-WD 方法在某些时间段(如 3 小时和 6 小时)能够提供更小的误差，但在 24 小时预测时误差有所增大。而 ANN-WD 方法的误差波动较大，尤其在 12 小时和 24 小时的预测中，误差值明显较高。



**Figure 4.** Line graph of deviation error between LS-SVM and ANN with and without WD

**图 4.** LS-SVM 和 ANN 在有无 WD 下的偏差误差折线图

图 5 为 24 小时的风电功率预测图，LS-SVM-WD 曲线表现得更加平滑和接近实际值，而 ANN-WD 的预测曲线则显得波动较大。这种波动性尤其在一些快速变化的时间段显著，使 ANN-WD 的预测曲线出现明显的偏差和不稳定性。相比之下，LS-SVM-WD 在应对风速变化时展现出更强的适应性和稳定性，能够更准确地跟踪实际功率的趋势，显示出在 24 小时预测场景下更高的预测精度与稳定性。



**Figure 5.** Comparison of wind power prediction between LS-SVM-WD and ANN-WD

**图 5.** LS-SVM-WD 和 ANN-WD 的风电功率预测对比图

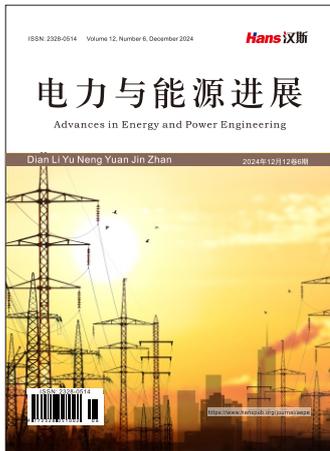
#### 4. 结论

LS-SVM-WD 方法通过小波分解有效地处理了风电功率数据的非平稳性，显著提高了各时间范围内

的预测精度,尤其在短期预测(1小时和3小时)中,误差明显降低。与其他预测方法相比,LS-SVM-WD在所有预测周期内展现了更好的稳定性和准确性,特别是在长时间预测中表现更为优越。研究结果表明,LS-SVM-WD方法能够为风电功率预测提供精确、稳定的预测结果,并在风电场调度优化和并网管理中具有重要的实际应用价值。

## 参考文献

- [1] Jiang, P., Fan, Y.V. and Klemeš, J.J. (2021) Impacts of COVID-19 on Energy Demand and Consumption: Challenges, Lessons and Emerging Opportunities. *APPLIED Energy*, **285**, Article ID: 116441. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116441>
- [2] de Siqueira, L.M.S. and Peng, W. (2021) Control Strategy to Smooth Wind Power Output Using Battery Energy Storage System: A Review. *Journal of Energy Storage*, **35**, Article ID: 102252. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102252>
- [3] 鲍馒, 张继红, 谢波, 等. 用于风电功率平滑的飞轮储能阵列协调控制策略[J]. 山西电力, 2023(6): 1-5.
- [4] 姜兆宇, 贾庆山, 管晓宏. 多时空尺度的风力发电预测方法综述[J]. 自动化学报, 2019, 45(1): 51-71.
- [5] 刘岭. 基于机器学习的风电预测方法与实证研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2022.
- [6] 马妍. 基于混沌遍历 PSO 的 LS-SVM 风电超短期功率预测研究[J]. 微型电脑应用, 2024, 40(5): 179-182, 200.
- [7] 陈元峰, 马溪原, 程凯, 等. 基于气象特征量选取与 SVM 模型参数优化的新能源超短期功率预测[J]. 太阳能学报, 2023, 44(12): 568-576.
- [8] 孙环阳, 张红光, 薛明晨, 等. 基于小波包分解与 BP 神经网络的制动系统电磁阀故障诊断研究[J]. 铁道机车车辆, 2024, 44(5): 39-45.
- [9] 颜旭, 王鼎杰, 张洪波, 等. 基于 LS-SVM 的精确星光折射导航观测模型[J]. 中国空间科学技术(中英文), 2024, 44(4): 20-28.
- [10] 何坚, 王晓芳. 基于 ARIMA 和 LS-SVM 组合模型的短期风速预测[J]. 机电工程技术, 2023, 52(8): 30-34.
- [11] 黄家露, 王文涛, 周莲, 等. 基于 LS-SVM 的宽带接收前端非线性补偿算法[J]. 电子学报, 2023, 51(6): 1500-1509.
- [12] 孙静, 聂士明, 史宝军. 基于小波和经验模态分解的气体泄漏声音端点检测算法[J]. 河北工业大学学报, 2022, 51(6): 10-18.
- [13] 徐精诚, 连增增, 董佳琪, 等. 基于小波包分解重构算法的北斗抗多路径误差[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(35): 15477-15484.
- [14] 任文斌, 付晓强, 俞缙. 小间距隧道台阶法开挖爆破振动信号特征分析[J]. 工程爆破, 2022, 28(6): 119-129.
- [15] 韩晓育, 郭颖奎, 职保平. 基于小波包分解-正交试验的水电站厂房结构振动预测[J]. 水电能源科学, 2022, 40(11): 129-132.
- [16] 李振东, 李先祥, 周星. 基于小波包能量谱的工业机器人智能故障诊断[J]. 机床与液压, 2022, 50(23): 194-198.
- [17] 黄娟, 赵鹏, 王聚博, 等. 基于 EEMD-ANN 的自适应光伏日电量预测方法[J]. 节能技术, 2024, 42(5): 418-424.
- [18] 陈荣亮, 梁海燕, 刘艺涛. 基于人工神经网络的差模 EMI 滤波器插入损耗预测[J]. 电源学报, 2024, 22(5): 67-73.
- [19] 蔡康龙, 胡志群, 谭浩波, 等. 利用卷积神经网络开展偏振雷达定量降水估测研究[J]. 热带气象学报, 2024, 40(1): 64-74.
- [20] 杨富燕, 彭芳, 于飞, 等. CLDAS 温湿产品在贵州的适用性评估及订正[J]. 高原气象, 2023, 42(2): 472-482.
- [21] 陈珂, 仇荣生. 基于面形均方根误差的成像主镜拓扑优化设计[J]. 光学学报, 2022, 42(20): 99-104.



**Call for Papers**

## Advances in Energy and Power Engineering

# 电力与能源进展

国际中文期刊征文启事

<https://www.hanspub.org/journal/aepe>

ISSN: 2328-0514 (Print) ISSN: 2328-0506 (Online)

《电力与能源进展》是一本关注电力与能源领域最新进展的国际中文期刊，主要刊登电力与能源进展领域最新技术及成果展示的相关学术论文。本刊支持思想创新、学术创新，倡导科学，繁荣学术，集学术性、思想性为一体，旨在给世界范围内的科学家、学者、科研人员提供一个传播、分享和讨论电力与能源领域内不同方向问题与发展的交流平台。该期刊由汉斯出版社出版，全球发行，中国教育图书进出口有限公司负责引进及在中国内地的销售。现诚邀相关领域的学者投稿。

### 投稿领域：

能源科学技术	Energy Science and Technology
能源化学	Energy Chemistry
能源地理学	Geography of Energy
能源计算与测量	Calculation and Measurement of Energy Source
储能技术	Energy Storage Technology
节能技术	Energy-Saving Technology
一次能源	Primary Energy
二次能源	Secondary Energy
能源系统工程	Energy Systems Engineering
能源科学技术其他学科	Other Disciplines of Energy Science and Technology
工程热物理	Engineering Thermal Physics
动力机械工程	Power and Mechanical Engineering
动力与电气工程其他学科	Other Disciplines of Power and Electrical Engineering
电力电子技术	Power Electronic Technology
能源技术经济学	Technological Economics of Energy
能源经济学	Energy Economics

### 论文检索：

本刊论文已被知网(CNKI Scholar)、维普、万方、龙源期刊网、超星期刊、博看网、中国科学技术信息研究所—国家工程技术数字图书馆、长江文库、Cornell University Library、CALIS、Google Scholar、Journalseek、Open Access Library、Open J-Gate、PubScholar、Research Bible、Scilit、SHERPA/ROMEO、Worldcat等数据库收录。

### 征文要求及注意事项：

1. 稿件务求主题新颖、论点明确、论据可靠、数字准确、文字精炼、逻辑严谨、文字通顺，具有科学性、先进性和实用性；
2. 稿件必须为中文，且须加有英文标题、作者信息、摘要、关键词和规范的参考文献列表；
3. 稿件请采用WORD排版，包括所有的文字、表格、图表、附注及参考文献；
4. 从稿件成功投递之日起，在2个月内请勿重复投递至其他刊物。本刊不发表已公开发表过的论文。文章严禁抄袭，否则后果自负；
5. 本刊采用同行评审的方式，审稿周期一般为5~14日。

欲了解更多信息请登录 <https://www.hanspub.org/journal/aepe>

联系邮箱：[aepe@hanspub.org](mailto:aepe@hanspub.org)



## 电力与能源进展

主办：汉斯出版社

编辑：《电力与能源进展》编委会

网址：<https://www.hanspub.org/journal/aepe>

电子邮箱：[aepe@hanspub.org](mailto:aepe@hanspub.org)