

# 基于熵产理论的大型后置灯泡贯流泵 灯泡体水力优化设计

张二峰<sup>1</sup>, 潘 强<sup>1</sup>, 袁寿其<sup>1</sup>, 张仁田<sup>2</sup>, 黄从兵<sup>3</sup>, 张德胜<sup>1</sup>

(1. 江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013;

2. 江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 扬州 225127; 3. 南水北调东线江苏水源有限责任公司, 江苏 南京 210019)

**摘要:**大型灯泡贯流泵广泛应用于调水工程、防洪排涝等重要领域, 其中, 灯泡体尾部的脱流问题是机组运行稳定性的关键因素之一。基于扫掠优化与熵产最小化理论, 对大型灯泡贯流泵装置泡体尾锥段的长径比进行了优化, 并对系统的水力性能及内部能量损失特性进行了深入分析。研究表明: 通过优化灯泡体尾锥段的长径比, 扬程提升了4.5%, 效率提高了3%, 泡体段的流动损失降低了21.7%。此外, 湍流熵产在尾锥段中占据主导地位, 是贯流泵中不可逆能量损失的主要来源。随着长径比的增大, 湍流熵产逐渐减少, 但过大的长径比会导致壁面熵产增大, 从而增加总熵产。泡体尾部的涡流区域为高熵产的集中区域, 流动分离引发的涡流显著增加湍流动能与能量损失。通过熵产理论, 可以有效识别高损失区域并量化其损失程度, 为大型灯泡贯流泵的水力优化提供了理论支撑。

**关键词:**贯流泵; 熵产; 灯泡体; 漩涡

中图分类号: TV675

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839(2025)02-0011-0007

## Hydraulic optimization design of bulb body of large rear-mounted tubular pump based on entropy production theory

ZHANG Erfeng<sup>1</sup>, PAN Qiang<sup>1</sup>, YUAN Shouqi<sup>1</sup>, ZHANG Rentian<sup>2</sup>,  
HUANG Congbing<sup>3</sup>, ZHANG Desheng<sup>1</sup>

(1. National Research Center of Pumps and Pumping System, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. Jiangsu Surveying and Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Yangzhou 225127, China;

3. The Eastern Route of South-to-North Water Diversion Jiangsu Water Resource Co., Ltd., Nanjing 210019, China)

**Abstract:** Large bulb tubular pumps are extensively used in crucial areas such as water transfer projects and flood control, and the issue of flow separation at the tail of the bulb is one of the key factors affecting the stability of the unit's operation. Utilizing sweep optimization and entropy production minimization theories, this study optimizes the length-to-diameter ratio at the tail of large bulb tubular pump devices and thoroughly analyzes the internal hydraulic performance and characteristics of energy loss within the system. The study results show that by

收稿日期: 2024-09-28

基金项目: 江苏省水利科技项目(2021007)

作者简介: 张二峰(1994—), 男, 博士研究生, 主要从事流体机械及工程研究。E-mail: 1603073043@qq.com

通信作者: 张德胜(1982—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事流体机械及工程研究。E-mail: zds@ujs.edu.cn

optimizing the length-to-diameter ratio at the tail of the bulb body, the head is increased by 4.5%, efficiency is improved by 3%, and flow losses in the bulb section are reduced by 21.7%. Additionally, turbulent entropy generation is predominant in the tail cone section, serving as the principal source of irreversible energy losses in the tubular pump. With the increase in the length-to-diameter ratio, turbulent entropy generation gradually lessens; However, an excessively large length-to-diameter ratio will lead to an increase in wall entropy production, thereby increasing the total entropy production. The vortex area at the tail of the bulb body is a region with concentrated high entropy production; flow separation induces vortex formation, increases turbulent kinetic energy, and causes energy losses. Through the entropy production theory, high-loss areas can be effectively identified and their loss levels can be quantified, providing theoretical support for the hydraulic optimization of large bulb tubular pumps.

**Key words:** tubular pump; entropy production; bulb body; vortex

灯泡贯流泵装置机组由于其高效、低扬程、大流量的特点,广泛应用于南水北调、江水北调等重大水利工程。这类泵装置能够在低水头、高流量的工况下保持稳定的运行性能,且具有较强的抗泥沙和杂质能力,适应复杂的水质环境。灯泡贯流泵装置在大型泵站系统中的广泛应用,对其结构稳定性、水力高效性也提出了更高的要求<sup>[1]</sup>。

目前学者们已经针对大型贯流泵的高效运行稳定展开了广泛研究。张仁田等<sup>[2]</sup>分析了不同结构型式贯流式水泵的结构特点、水力性能和经济指标,指出在特低扬程的泵站可以采用轴伸贯流式、竖井贯流式和灯泡贯流式等多种泵型;邵园园等<sup>[3]</sup>基于非定常数值计算,对大型轴伸贯流泵进行全流道数值模拟,并基于双向流固耦合对叶轮叶片结构进行结构性能分析;徐磊等<sup>[4]</sup>采用单因素变化方法,对出水流道的平面扩散角、立面扩散角、过渡段长度时的出水流道水头损失及出水流态分别进行了三维湍流流动数值模拟,改善了出水流道的不良流态。

灯泡体是灯泡贯流泵中的关键组成部分,其主要功能是容纳电机和其他驱动设备,并且优化流体的流动路径,以提高泵装置的整体效率。在重大水利工程中,灯泡体的优化设计能够有效提升整个泵系统的运行效率和稳定性<sup>[5]</sup>。尾锥段的形状和长度对泵装置的流态及水力性能产生显著影响。通过优化尾锥段的形状和长度,可以有效减少水力损失,改善流动均匀性,从而提升泵装置的整体运行效率<sup>[6]</sup>。通过CFD(计算流体力学)分析和模型试验,可以深入研究尾锥段形状和长度对流态的影响,以提高灯泡贯流泵的水力效率<sup>[7-8]</sup>。

扫掠优化,是指通过改变物体的几何形状或结构在流动过程中的扫掠效果,优化其流体动力学性

能。扫掠优化的目标通常包括减少流动阻力、改善压力速度分布、降低噪声或提高气动效率。熵产最小化理论是用于描述和优化非平衡热力学系统中熵产生的理论框架。该理论认为,在不违反热力学第二定律的前提下,可以通过控制某些参数或设计优化某些过程来最小化熵的产生,从而提高系统的能效或稳定性。在流体系统中,通过设计优化流动路径、减少涡流或摩擦,可以实现最小的能量损耗<sup>[9-10]</sup>。目前,熵产最小化理论已在旋转机械的优化中得到广泛应用。

综上所述,灯泡体尾锥段的设计是贯流泵水力性能优化的关键环节。通过对尾锥段形状和长度的合理设计,可以有效减少能量损失,优化流动特性,从而提升泵装置的效率和运行稳定性。这对南水北调等大型水利工程的可靠运行至关重要,因此,本文基于熵产最小化理论与扫掠优化方法,对大型灯泡贯流泵的灯泡体尾锥段结构进行优化与分析,旨在为大型灯泡贯流泵的设计提供参考。

## 1 数值方法

### 1.1 数学模型

#### 1.1.1 控制方程

控制方程为三维定常不可压缩下的N-S方程<sup>[11]</sup>,如下:

(1)连续性方程

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

(2)动量方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \quad (2)$$

式中: $\rho$ 为流体密度; $u$ 为流体速度; $\mu$ 为流体动力黏度; $p$ 为压强; $f$ 为体积力。

### 1.1.2 湍流模型

考虑到计算域内流场的高曲率性及叶顶泄流的分离性,采用SST  $k-\omega$ 湍流模型对模型泵进行全流道数值模拟。SST  $k-\omega$ 湍流模型主要包含湍动能  $k$  和湍流频率  $\omega$  两个方程。其湍流系数如下:

$$\mu_t = \frac{\rho a_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, S F_2)} \quad (3)$$

$k$  和  $\omega$  的运输方程如下:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = P_k - \beta' \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega u_j)}{\partial x_j} = \alpha S^2 - \beta \rho \omega^2 +$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_{\omega_2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (5)$$

式中:  $a_1, \alpha_1, \beta, \beta', \sigma_k, \sigma_\omega, \sigma_{\omega_2}$  为经验常数;  $F_1, F_2, P_k$  为混合函数与闭合函数。

### 1.1.3 熵产理论

熵产是不可逆过程的一个重要指标,通过计算局部熵产,可以确定哪些区域在流动过程中产生了最大的能量损失,帮助设计更高效的流动控制系统<sup>[12]</sup>。贯流泵内部的熵产主要由脉动速度,壁面效应和时均速度3部分引导产生。

时均速度引发的熵产率被称为直接熵产率  $S'_d$ , 其计算公式为<sup>[13-14]</sup>

$$S'_d = \frac{2\mu}{T} \left[ \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{\mu}{T} \left[ \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (6)$$

式中:  $\mu$  为流体动力黏度;  $u, v, w$  分别为速度在直角坐标系  $x, y, z$  方向下的速度分量;  $T$  为温度。

脉动速度引发被称为湍流耗散熵产率  $S'_r$ , 其计算公式为

$$S'_r = \frac{2\mu}{T} \left[ \left( \frac{\partial u'}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v'}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w'}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{\mu}{T} \left[ \left( \frac{\partial v'}{\partial x} + \frac{\partial u'}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w'}{\partial x} + \frac{\partial u'}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v'}{\partial z} + \frac{\partial w'}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (7)$$

在SST  $k-\omega$ 湍流模型中,湍流耗散直接熵产率  $S'_d$  的计算公式为<sup>[15]</sup>

$$S'_d = \beta \frac{\rho k \omega}{T} \quad (8)$$

式中:  $\beta=0.09$ ;  $\omega$  为湍流涡频率;  $k$  为湍动能。

壁面效应引发的熵产率  $S'_w$  计算公式为

$$S'_w = \frac{\tau \cdot v_{\text{cell}}}{T} \quad (9)$$

式中:  $\tau$  为壁面剪切应力;  $v_{\text{cell}}$  为壁面第一层网格位置处的速度。

因此,总熵  $S_{\text{total}}$  可以通过上述3种熵产率在计算域内积分后求和获得。

$$S_{\text{total}} = \int_V S'_r dV + \int_V S'_d dV + \int_S S'_w dS \quad (10)$$

### 1.1.4 漩涡识别

$Q$  准则是一种用于识别流体流动中旋涡结构的数学准则,能够有效地区分旋转主导的区域(即旋涡)与伸展或压缩主导的区域(即非旋涡)<sup>[16]</sup>。 $Q$  准则的定义如下:

$$Q = \frac{1}{2} (\|\Omega\|^2 - \|S\|^2) \quad (11)$$

式中:  $S$  为应变率张量,对称部分;  $\Omega$  为旋转率张量,反对称部分。当  $Q$  值为正时,表示流动中的旋涡效应占主导地位,可以识别出旋涡结构;当  $Q$  值为负时,此时剪切效应占主导地位。

## 1.2 物理模型

本文的研究对象为后置灯泡贯流泵,如图1所示。计算域包含进水流动、叶轮、导叶、灯泡体、出水流动。叶轮直径为400 mm,叶片数量为3片,转速为875 r/min,流量为580 kg/s,导叶叶片数量为7片。本文优化的对象为该灯泡贯流泵灯泡体的尾锥形状与长度,根据长径比进行形状与长度的控制,如图2所示。

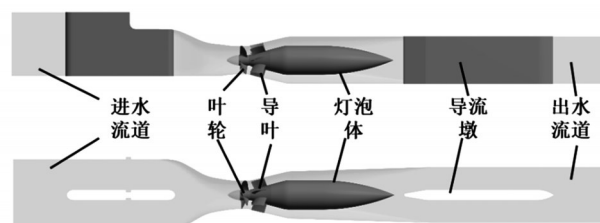


图1 大型后置灯泡贯流泵计算域

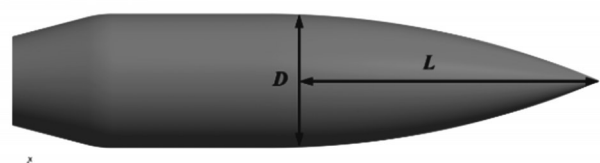


图2 灯泡体尾部长径比( $L/D$ )

## 1.3 网格划分与验证

本文使用Turbogrid软件对叶轮及导叶部分进行了六面体结构网格的划分,见图3。叶轮部分采用了C型网格拓扑结构,叶顶间隙尺寸设定为0.3 mm,

径向方向均匀分布了20个网格节点,整体 $Y+$ 值控制在30以下,如图4所示。其余流体区域的网格采用Mesh软件进行非结构网格划分。所有流体域近壁面采用10层边界层网格,第一层网格距壁面0.2 mm,其余各层按照1.2倍的间距递增。

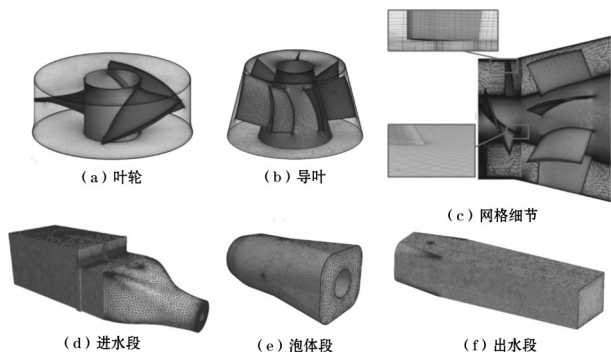


图3 网格划分示意

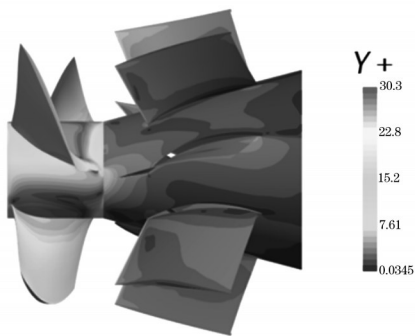


图4 叶轮及导叶壁面 $Y+$

在完成网格划分后,进行了网格无关性验证。最终整个流体域的网格总数约为1 100万,其中进水流道为332万,叶轮段为526万,导叶段为472万,出水流道为240万。经检查,网格质量良好,满足数值模拟的要求。

#### 1.4 数值模拟设置

##### 1.4.1 数值计算设置

本模拟使用STAR-CCM+进行,模拟采用MRF与SST  $k-\omega$ 湍流模拟求解定常结果,迭代步数为3 000,使用Simple算法求解控制方程,湍流对流项选用二阶,分离流对流项为二阶,壁面函数选用全 $Y+$ 壁面函数处理,梯度插值格式为混合高斯-LSQ,精度为二阶。采用质量流量进口,静压出口(0 atm)边界条件,参考压力为0.1 MPa,壁面采用光滑无滑移壁面。

##### 1.4.2 扫掠优化设置

基于模型几何参数的扫掠优化的基本流程如图5所示。本文优化的目标函数为灯泡体流道与出

水流道的总熵,约束属性为最小值。设计变量为灯泡体尾部的长径比( $L/D$ ),参数范围为 $[0.5, 8.5]$ ,增量为0.5,设计空间为10。自动化网格划分为局部网格划分,只修改灯泡体段与出水段的网格。

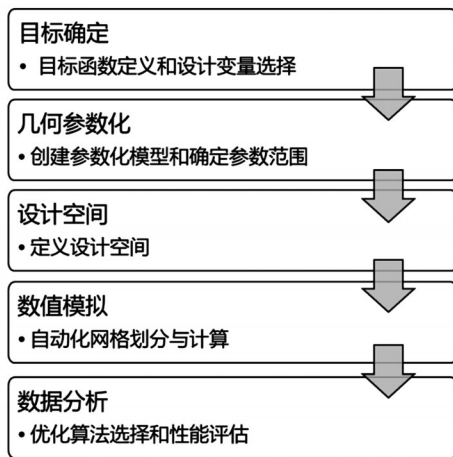


图5 扫掠优化流程

## 2 结果与讨论

### 2.1 水力性能分析

贯流泵装置在不同长径比下的总熵产分布如图6所示。图6中显示,湍流熵产约占总熵产的80%,为主要组成部分,直接熵产和壁面熵产分别占比5%和15%。因此,湍流熵产的变化决定了总熵产的变化趋势。灯泡体尾部的长径比对熵产分布有明显影响,特别是湍流熵产始终是主导因素。因此,在贯流泵设计优化时,重点应放在湍流控制上,以减少湍流引发的熵增。

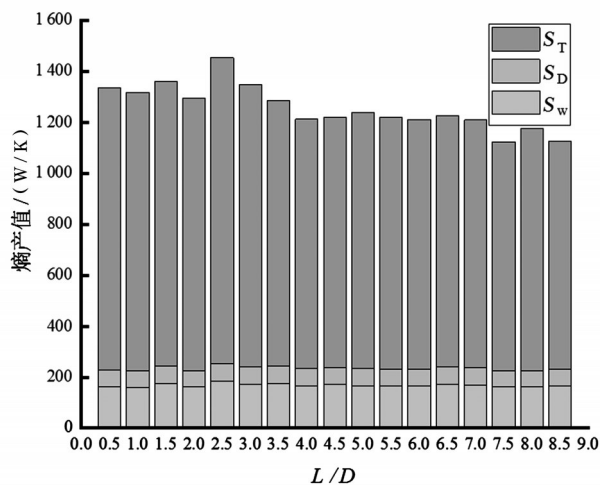


图6 不同 $L/D$ 下的湍流熵产( $S_T$ )、直接熵产( $S_D$ )与壁面熵产( $S_w$ )

对比不同长径比下的泡体流道与出水流道总熵产,如图7所示,由图7可以看出,随着长径比的增大,总熵整体先增大后减小,在 $L/D$ 为7.5时最小。对比原始方案与最优方案的、与,可以看出优化之后模型比原模型分别降低了25%,7%,12%。对比原始方案与最优方案的外特性数据,如表1所示,优化之后扬程增加4.5%,效率提高3%,进一步说明了优化灯泡体尾部流场的熵产可以极大地提升装置的性能。

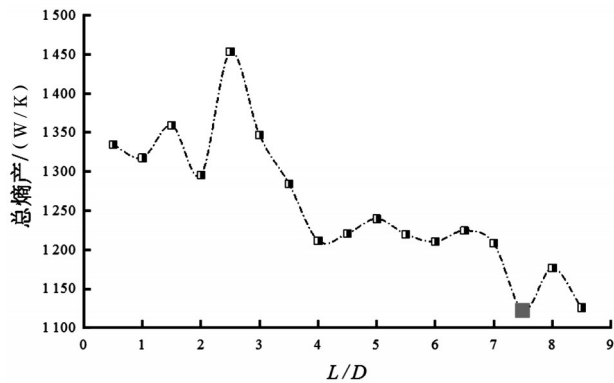


图7 不同 $L/D$ 下的总熵产

表1 优化前后贯流泵装置外特性对比

方案	$L/D$	叶轮 扬程/m	叶轮 效率/%	装置 扬程/m	装置 效率/%
原始方案	2.5	2.853	94.3	2.226	73.6
优化方案	7.5	2.852	94.3	2.328	76.6

如图8所示,原始方案与优化方案的流道损失统计结果显示,灯泡体流道的损失在总水力损失中占据最大比例。经过优化后,灯泡体流道的损失降低了21.7%,而其他流道的水力损失变化较小。这表明,通过优化灯泡体尾部的长径比,可以显著减少泡体段的流动损失,从而降低泵装置系统的总能量损失,显著提升其水力效率。

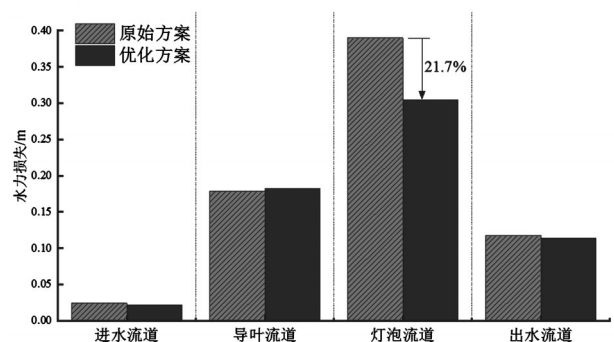
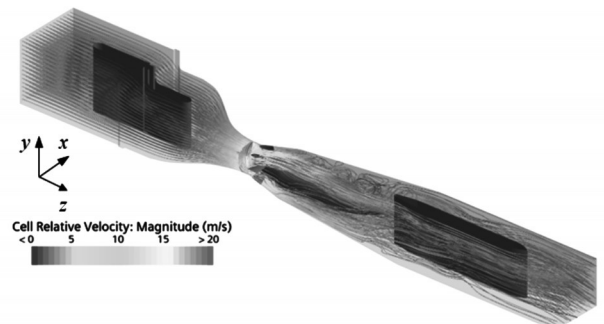


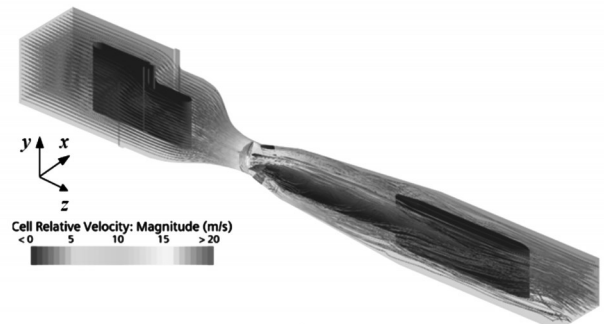
图8 优化前后流道损失统计

## 2.2 流场特性分析

图9展示了贯流泵流道的优化前后流线对比图,优化模型有效改善了流场分布。原始模型中,流线出现明显的流动分离现象,尤其在灯泡体尾部和流道过渡区域,流线混乱,产生明显的大尺度漩涡。优化后的流线更加平顺,流动分离现象大幅减弱。分布更加均匀,尤其在灯泡体尾部和下游区域,流体速度分布更加均匀。说明优化模型的速度梯度相比原始模型显著降低,流动更加顺畅,整体性能得到提升。



(a) 原始模型



(b) 优化模型

图9 优化前后流线对比

图10展示了贯流泵灯泡体尾部在优化前后的速度分布及矢量图对比。在原始模型中,流线和速度矢量显示出明显的流动分离现象,尤其在灯泡体尾部区域,此时流体的速度较大,而灯泡体尾部剧烈收缩,流体的惯性力增大,导致边界层发生分离,形成涡流和回流区。在灯泡体尾部,如果尾流区域的设计不当,会形成低压涡流区,导致流动分离。此外,尾流中存在的湍流和涡流也会进一步促使流动分离现象的发生。流体在通过狭窄区域后出现速度不均匀现象,在灯泡体尾部与导流墩位置有明显的漩涡与低速区产生。优化模型中,长径比的增加使得流道过渡更加均匀,使流动更为平稳,分离现象减少,流体沿流道的速度分布更加均匀。优化后的设计更好地引导了流体,减少了不必要的漩涡

和流动分离。

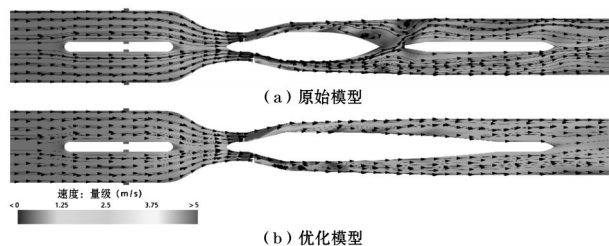


图10 优化前后速度分布及矢量图对比

图11展示了贯流泵中心轴面灯泡体尾部在优化前后的熵产分布对比。在原始模型中,灯泡体尾部及其后的区域显示出明显的高熵产现象,这是由于流动分离和不稳定流动所引发的湍流效应,这些高熵产区域表明了较大的能量损失。特别是在灯泡体尾部的过渡区域,熵产分布不均匀,存在多个局部高熵产区域。优化模型通过增加灯泡体尾部的长径比,有效降低了熵产,特别是在流动分离区域,显著减少了局部高熵产现象。这种优化设计显著提升了贯流泵的效率,减少了能量损失并提高了流场的稳定性。

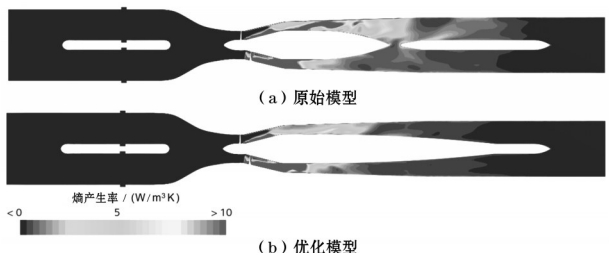


图11 优化前后熵产分布对比

湍动能可以反应湍流的强度和湍流中能量的分布,湍动能的增大会导致较大的黏性耗散,造成能量损失,同时会增加流体流动的阻力。图12为优化前后湍动能的分布云图,从图12可以发现高熵产的分布区域与高湍动能的分布区域高度一致。优化后的模型显著减少了泡体尾部的高湍动能区域,

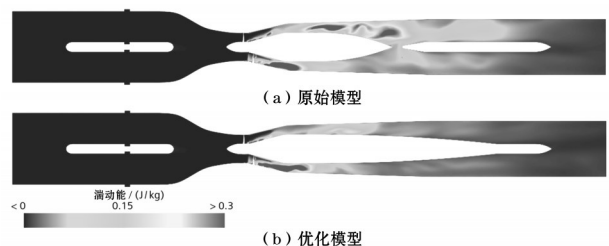


图12 优化前后湍动能分布对比

并且泡体尾部以及出水流道的湍动能分布更加均匀。

在大型贯流泵装置中,漩涡产生的涡脱可能引发噪声和振动问题,漩涡与结构之间的相互作用会引发诸如涡激振动等问题。图13为优化前后漩涡的分布云图,从图13可以看出,基于熵产最小化理论进行灯泡贯流泵尾部长径比的优化之后,漩涡的数量减少,强度变低,并且分布更加有规律。

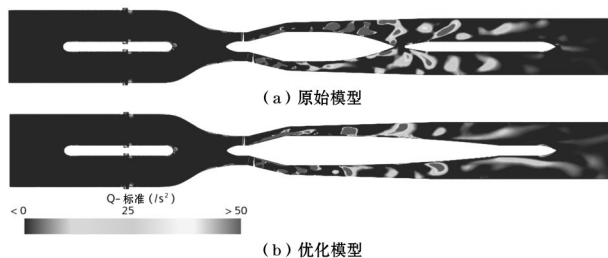


图13 优化前后漩涡分布对比

### 3 结 论

本文采用扫描优化与熵产最小化理论,对大型灯泡贯流泵装置的泡体尾部的长径比进行了优化,并对系统内部的水力性能与能量损失特性进行了详细的对比分析,主要研究结论如下:

(1)大型灯泡贯流泵的尾部易发生流动分离、漩涡、分离等不良流态现象,造成较大的水力损失与不稳定因素。本文通过优化灯泡体尾部长径比的数值,扬程提高了4.5%,效率提高了3%,泡体段的流动损失降低了21.7%,极大地改善了水力性能,保证系统稳定运行。

(2)大型贯流泵装置的尾锥段中,不同的长径比下,湍流熵产占总熵产的比例远远大于直接熵产与壁面熵产之比,是贯流泵中引起不可逆能量损失的主导因素。随着长径比的增大,系统湍流熵产逐渐降低,但当长径比过大时,壁面熵产也会增大,导致总熵产变大。

(3)灯泡体尾部的涡流区域通常是高熵产的集中区。在灯泡体尾部,流动分离导致了涡流区域的形成,涡流会显著增加湍流动能的强度。涡流在耗散过程中,会将流体的动能转化为热能和摩擦损耗,进而产生系统的不可逆损失。利用熵产理论可以更高地捕捉系统中高损失的部位,并且可以对损失的程

## 参考文献:

- [1] 刘艺平,袁素勤,卫仁娟,等. 竖井式贯流泵进出水流动优化CFD仿真计算[J]. 四川水利,2024,45(1):13-19,31.
- [2] 张仁田,朱红耕,卜舸,等. 南水北调东线一期工程灯泡贯流泵性能分析[J]. 排灌机械工程学报,2017,35(1):32-41.
- [3] 邵园园,薛海朋,吴皓明,等. 贯流泵压力脉动特性及叶片结构性能分析[J]. 江苏水利,2024(2):17-21,26.
- [4] 徐磊,李非凡,孙世宏,等. 前置竖井贯流泵出水流动设计参数对其水力性能的影响[J]. 灌溉排水学报,2021,40(11):73-78,97.
- [5] 李凌昊. 潜水贯流泵灯泡体结构优化及水动力特性研究[D]. 扬州:扬州大学,2022.
- [6] 阮黎,于定勇,李现琦,等. 振荡流下二维单椭圆柱体水动力特性研究[J]. 水动力学研究与进展A辑,2024,39(3):425-433.
- [7] 杨晓春. CFD在大型潜水贯流泵装置选型设计中的应用[J]. 江淮水利科技,2024(4):41-45,58.
- [8] 张辉,陈红勋,马峥. 灯泡贯流泵装置水力模型设计研究[J]. 水动力学研究与进展A辑,2023,38(6):926-933.
- [9] 陈群. 对流传递过程的不可逆性及其优化[D]. 北京:清华大学,2008.
- [10] 程雪涛,梁新刚. 熵产最小化理论在传热和热功转换优化中的应用探讨[J]. 物理学报,2016,65(18):239-245.
- [11] 金燕,刘超,汤方平. 灯泡贯流泵装置内部流动数值模拟[J]. 排灌机械工程学报,2010,28(2):155-159.
- [12] 张睿,谭舒翊,丁旭洁,等. 基于熵产理论的竖井贯流泵流动损失特性[J]. 水利水电科技进展,2022,42(2):6-12.
- [13] 潘强,孙龙月,丁威,等. 灯泡贯流泵局部熵产与能量损失特性研究[J]. 西安交通大学学报,2023,57(1):131-140.
- [14] HERWIG H, KOCK F. Direct and indirect methods of calculating entropy generation rates in turbulent convective heat transfer problems [J]. Heat Mass Transfer, 2007, 43(3):207-215.
- [15] KOCK F, HERWIG H. Local entropy production in turbulent shear flows: a high-Reynolds number model with wall functions [J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 2004, 47(10): 2205-2215.
- [16] 孙龙刚,郭鹏程,罗兴铨. 基于不同涡识别准则的水轮机尾水管涡带形态识别研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑),2019,34(6):779-787.
- (上接第10页)
- [2] 吴娟,朱跃龙,金松,等. 三种机器学习模型在太湖藻华面积预测中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(6):542-551.
- [3] 王寿兵,隗琪,陈浩,等. 水体高pH值对滇池生态修复的潜在影响[J]. 水资源保护,2023,39(4):26-31.
- [4] 温舒珂,彭凯,龚志军,等. 近40年来太湖梅梁湾底栖动物群落演变特征及驱动因素[J]. 湖泊科学,2023,35(2):599-611.
- [5] WANG Y, FENG L, HOU X. Algal blooms in lakes in China over the past two decades: patterns, trends, and drivers [J]. Water Resource Research, 2023, 59(10): e2022WR033340.
- [6] LUO C, CHEN C, XIAN X, et al. The secondary outbreak risk and mechanisms of *Microcystis aeruginosa* after  $H_2O_2$  treatment [J]. J Hazard Mater, 2024(470): 134196.
- [7] 焦岗伟,赵倩名,何培民,等. 基于化感原理的复合抑制剂研究进展[J]. 环境污染与防治,2023,45(9):1287-1293.
- [8] 王佳佳,倪利晓,蒋志云,等. 盐度对化感物质青蒿素胁迫下铜绿微囊藻生长及叶绿素荧光的影响[J]. 环境工程,2023,41(1):35-41.
- [9] 张铮惠,李霞,张建华,等. 青蒿素缓释微粒对铜绿微囊藻的抑制机理研究[J]. 环境科技,2023,36(3):30-34,41.
- [10] 刘笑天. 渤海和黄海水-沉积物体系磷的形态、转化和沉积过程[D]. 青岛:自然资源部第一海洋研究所,2023.
- [11] 倪茂飞,周慧,马永梅,等. 典型喀斯特城市湖库溶解性有机质成分特征及来源解析[J]. 环境科学,2022,43(7):3552-3561.