

基于守恒性增强 RBF 的航空燃油齿轮泵 流固耦合分析

刘显为^{1,2}, 蒋智宇¹, 符江锋^{1,2,3}, 郭超⁴, 钱渗¹

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710129;

2. 中国航发四川燃气涡轮研究院 高空模拟技术重点实验室, 四川 绵阳 621000;

3. 四川天府新区西北工业大学先进动力研究院, 成都 610213;

4. 中国航空发动机研究院, 北京 101304)

摘 要: 针对航空燃油齿轮泵流固耦合模拟中, 径向缩放齿轮以连通无间隙齿顶及啮合区流场引起的流固域几何失配问题, 以及经典径向基函数(RBF)映射算法忽略物理守恒性导致载荷传递失准风险, 在源域与目标域间引入力与力矩守恒约束, 采用最小范数法修正目标场网格压力, 提出一种守恒性增强的先进 RBF 数据重构算法, 并结合网格分析与试验验证开展某型航空燃油齿轮泵流固耦合仿真。测试算例结果表明先进 RBF 算法消除了总力和力矩偏差, 映射平均误差为 0.001 5%。应用先进守恒 RBF 加载齿轮泵流场载荷于固体网格节点, 静态最大等效应力为 31.61 MPa, 动态啮合应力峰值为 192.18 MPa, 流场压力对固体应力和应变的贡献率达到 34.38% 与 29.84%, 证明了流固耦合模拟对评估航空燃油齿轮泵实际服役状态的必要性。

关 键 词: 航空燃油齿轮泵; 径向基函数; 守恒约束; 数据映射; 流固耦合

中图分类号: V233.2

文献标志码: A

Fluid-structure interaction analysis of aviation gear pumps based on conservation-enhanced RBF

LIU Xianwei^{1,2}, JIANG Zhiyu¹, FU Jiangfeng^{1,2,3}, GUO Chao⁴, QIAN Shen¹

(1. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China;

2. Science and Technology on Altitude Simulation Laboratory,

Sichuan Gas Turbine Establishment,

Aero Engine Corporation of China, Mianyang Sichuan 621000, China;

3. Advanced Power Research Institute of Northwestern Polytechnical University,

Chengdu 610213, China;

4. Aero Engine Academy of China, Aero Engine Corporation of China, Beijing 101304, China)

Abstract: In fluid-structure interaction simulations of aviation gear pumps, two key issues: the distinct geometric mismatch between fluid and solid domains resulting from radially scaling gears to connect gapless tooth tip and meshing zone flow fields; and the notable risk of inaccurate load transfer due to the classical radial basis function (RBF) mapping algorithm neglecting fundamental physical conservation principles, were addressed in this research. To solve these critical problems, force and

收稿日期: 2025-07-09

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52372396); 国家重大科技项目(JSZL2023213S001); 中央高校基本科研业务(D5000240299)

作者简介: 刘显为(1992—), 男, 副教授, 博士, 研究领域为航空发动机燃油泵设计与仿真。E-mail: lxw@mail.nwpu.edu.cn

通信作者: 符江锋(1984—), 男, 研究员, 博士, 研究领域为航空发动机燃油控制系统性能及可靠性一体化设计。E-mail: fjf@nwpu.edu.cn

引用格式: 刘显为, 蒋智宇, 符江锋, 等. 基于守恒性增强 RBF 的航空燃油齿轮泵流固耦合分析[J]. 航空动力学报, 2026, 41(9): 20250321. LIU Xianwei, JIANG Zhiyu, FU Jiangfeng, et al. Fluid-structure interaction analysis of aviation gear pumps based on conservation-enhanced RBF[J]. Journal of Aerospace Power, 2026, 41(9): 20250321.

moment conservation constraints were carefully introduced between the source and target domains. The minimum norm method was effectively employed to correct the target field grid pressure, and an advanced RBF data reconstruction algorithm with significantly enhanced conservation properties was successfully proposed. Combined with detailed grid analysis and rigorous experimental verification, comprehensive fluid-structure interaction simulations were conducted for a specific type of aviation gear pump. Test results showed that the advanced RBF algorithm effectively eliminated total force and moment deviations, with an average mapping error as low as 0.001 5%. When loading flow field loads onto solid grid nodes by the advanced RBF algorithm, the static maximum equivalent stress was measured at 31.61 MPa, and the dynamic meshing stress peak reached 192.18 MPa. The flow field pressure contributed 34.38% to solid stress and 29.84% to strain, respectively. These important findings clearly demonstrate that fluid-structure interaction simulation is highly necessary for accurately evaluating the actual service status of aviation gear pumps in practical operational environments.

Keywords: aviation fuel gear pump; radial basis function; conservation constraint; data mapping; fluid-structure interaction

燃油齿轮泵是航空发动机燃油控制系统的核心部件^[1],其通过航空燃油的精准输送与压力、流量等多参数协同调控,保障燃烧室、涡轮等关键部件在复杂工况下的高效稳定运行。在新型航空动力装置向高推质比、宽包线域发展的技术趋势下,燃油齿轮泵面临着高负荷承载能力、轻量化结构及长使用寿命的多重性能指标约束,这对传统设计理念提出了严峻挑战^[2-3]。

航空燃油齿轮泵为典型的高速高压泵,泵内环境十分复杂,液体或气体在泵中高速流动会引起湍流、空化等现象,进而导致流动不稳定与泵损伤。此外,齿轮等部件在高速旋转时会产生摩擦磨损,极大影响着泵的寿命与性能。随着计算流体动力学^[4-5](computational fluid dynamics, CFD)与有限元分析^[6-7](finite element analysis, FEA)的快速发展,燃油齿轮泵的流场仿真^[8-10]与有限元仿真^[11-13]技术也十分成熟。而流固耦合(fluid-structure interaction, FSI)分析作为揭示流体动力载荷与齿轮结构动态响应相互作用机理的关键技术手段^[14],已成为齿轮泵仿真研究领域的重要方向。周群起等^[15]通过实时数据传递建立双圆弧斜齿齿轮泵单向流固耦合模型,得到流场压力特性和压力载荷作用下双圆弧斜齿齿轮泵的力学性能。Dhar 等^[16]提出了一种流-固相互作用模型用于研究外啮合齿轮机与侧衬套之间润滑间隙的建模,并探讨了弹性流体动力学模拟的约束方法。Shen 等^[17]构建了单向流固耦合模型以获取齿面的接触应力,并采用名义应力法和 Miner 累积损伤理论计算接触疲劳寿命。目前流固耦合分析多采用

顺序耦合方法,即通过分步求解流体域和固体域的控制方程,并在交界面进行参数迭代传递。然而,燃油齿轮泵模型设计阶段通常将齿顶间隙与啮合间隙设为零,致使提取流体域时普遍存在连通性缺失的问题。为此,研究者通常对齿轮副进行整体缩放操作,以构建物理连通的流体域。但该方法不可避免地引发流固界面的几何失配,造成交界面网格无法精确对应,从而限制了界面数据传递精度。

近年来,随着计算力学与数值仿真技术的深度融合,基于数据驱动的映射重构方法为复杂界面参数传递提供了新的解决思路。其中,径向基函数(radial basis function, RBF)插值技术因其在非结构化网格间构建高精度映射关系的独特优势^[18-20]已在飞行器气动弹性分析、结构力学与电磁学仿真等领域展现出显著的应用潜力。杨超等^[21]总结了 RBF 动网格技术的基本理论,并阐述了其在气动弹性计算领域的优越性,可以满足气动力的求解需求。Toja-Silva 等^[22]提出了一种基于 RBF 框架的浸没边界方法,并允许施加 Dirichlet 和 Neumann 边界条件,该方法使得 CFD 求解更加简单实用。Skala^[23]探讨了 RBF 插值在大数据集和大跨度几何坐标下的特性以及计算的数值稳定性。Kedward 等^[24]提出了一种高效的 RBF 网格变形方法,其使用所有表面点以确保展示出精确的表面,但仅需构建一个简单的插值。Cuomo 等^[25]采用 Gaussian RBF 构建了隐式曲线/曲面重建的框架,并在大数据集下得到了相应的试验结果。该方法通过建立全局或局部的插值核函数,

能够有效克服传统插值映射方法在几何适配性、数据保真度方面的缺陷。特别值得关注的是, RBF 插值映射对网格拓扑结构的低依赖性特征, 为解决齿轮泵放大间隙模型中流固交界面几何失配问题提供了理论可行性。然而, 现有 RBF 映射方法主要聚焦于空间几何量的插值精度, 而对力/力矩等物理量传递的守恒性约束重视不足, 导致映射后载荷难以保证全局力/力矩平衡, 破坏了物理场传递的等效性, 进而影响结果的物理真实性。

本文针对经典 RBF 方法未考虑物理守恒性以及燃油齿轮泵流固耦合仿真中普遍存在的流道不连通问题, 提出了一种守恒 RBF 映射方法, 构建了基于守恒 RBF 数据重构的齿轮泵流固耦合模型。该模型通过耦合 CFD 与 FEA 方法, 充分利用 RBF 映射对几何结构与网格拓扑的低依赖性优势, 可以有效弥补缩放模型造成的交界面失配问题, 实现流固界面参数的高精度传递; 另一方面, 加入力/力矩守恒约束条件, 可以保证映射前后物理场传递的等效性, 更符合流固耦合的真实物理机制。该方法为满足齿轮泵交界面高精度、高保真映射需求提供了新思路, 有力支撑了高可靠性的齿轮泵流固耦合仿真。

1 问题描述

1.1 研究对象

本文的研究对象是某型航空燃油齿轮泵, 如图 1 所示。该泵由主动齿轮、从动齿轮、壳体、传动轴与轴承组成。进口区域, 低压油进入并填充齿间的空间, 传动轴带动主动齿轮按图中所示的逆时针方向转动, 随着齿轮旋转, 油液被带至出口区域泵出。

齿轮的设计参数与工作参数如表 1 所示。设计转速为 8 000 r/min, 出口压力为 5 MPa, 高速高

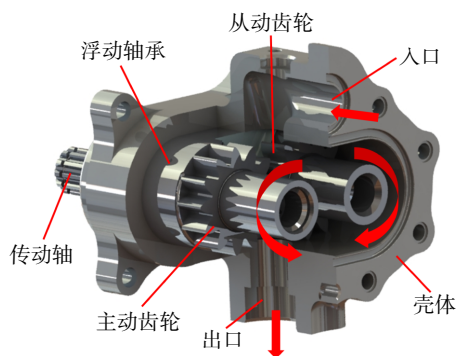


图 1 航空燃油齿轮泵三维模型

Fig. 1 3D model of aviation fuel gear pump

表 1 齿轮泵设计参数与工作参数

Table 1 Design and operating parameters of gear pump

参数		数值
设计	模数/mm	2
	齿数	13
	压力角/(°)	28
	中心距/mm	26
	齿宽/mm	9.3
工作	进口压力/MPa	0.1
	出口压力/MPa	5
	转速/(r/min)	8 000
	工作压力/Pa	101 325
	工作温度/K	298.15

压使得泵内环境十分复杂, 流固耦合仿真可以很好地模拟分析多物理场特性。

1.2 流场不连通问题

齿轮泵作为航空发动机的关键动力元件, 其内部流动特性对系统性能与效率至关重要。然而, 基于理想几何假设的设计模型在流体域提取时存在连通性缺失问题: 在实际应用的齿轮泵中, 受制造与装配公差等因素影响, 齿轮齿顶与泵壳内壁间必然存在齿顶间隙, 然而, 在齿轮泵的设计建模阶段, 通常将齿顶与壳体假设为贴合状态, 即设定齿顶间隙为零; 同时, 依据渐开线齿轮啮合原理, 啮合状态下齿轮副在啮合线上应实现无间隙的瞬时线接触, 即啮合间隙为零。上述齿顶与啮合间隙为零的建模设定导致局部流道不连通, 从而无法在该模型上构建可计算的流体域。为解决流体域不连通问题, 必须在严格保持齿轮关键几何参数不变的前提下, 对齿轮副实施整体缩放操作, 旨在构建物理连通的等效流体域模型, 为后续开展有效的 CFD 仿真分析提供几何基础。

1.3 RBF 不守恒问题

在流体-结构相互作用等涉及跨域数据传递的耦合仿真中, 传统的 RBF 映射方法主要关注空间几何量的插值精度, 但对力、力矩等物理量的映射守恒性重视不足。这种对守恒性约束的忽视, 导致映射后的载荷在目标网格上无法满足全局力与力矩的平衡条件。这种不平衡在耦合界面上表现为虚假的能量输入或耗散, 从而破坏了整个耦合系统的能量守恒。其直接后果是仿真结果的物理可信度显著下降。尤其在处理高速旋转机械、大尺度变形或强非线性等复杂耦合问题时, 这种能量误差会不断累积或放大, 极易引发计算结果

振荡发散、迭代求解难以收敛等数值稳定性问题。因此,发展并应用严格满足力/力矩守恒约束的 RBF 映射方法,对于提升跨尺度、强非线性多物理场耦合仿真的数值鲁棒性和结果精度具有重要意义。

2 守恒 RBF 映射方法

RBF 插值映射方法仅依赖于数据点之间的欧几里得(Euclid)距离,天然适应高维空间,能够有效避免传统插值方法中因维度增加而导致的“维数灾难”问题。此外,RBF 插值映射无需结构化网格,能够灵活处理散乱数据分布,既能精确捕捉局部细节,又能有效拟合全局趋势,从而在复杂函数逼近中表现出色,逼近效率较传统方法更高。

2.1 RBF 插值映射原理

在 D 维 Euclid 空间中给定一组位置两两不同的点 $\mathbf{X} = \{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N\} \subseteq \mathbf{R}^D$, 以及在这些点上的标量值 $g_1, g_2, \dots, g_N$, 根据这些点确定一个连续函数使函数经过这些点。当函数为如下形式时,该函数称为 RBF 插值函数:

$$s(\mathbf{x}) = p(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^N [\lambda_i \phi(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|)] \quad (1)$$

其中 $s(\mathbf{x})$ 为 $\mathbf{x}$ 点处的未知函数值; $\mathbf{x}$ 为未知点的坐标; λ_i 是待求解的权重系数; $\phi(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|)$ 为基于两点 Euclid 距离的函数,称为 RBF 基函数; $p(\mathbf{x})$ 为低阶 D 维多项式^[18]。

插值条件要求插值函数在数据点上精确匹配已知值:

$$s(\mathbf{x}_i) = f_i \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

当不包含多项式时,系数 λ_i 通过解如下线性方程组确定:

$$\begin{bmatrix} \phi(\|\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_1\|) & \cdots & \phi(\|\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_N\|) \\ \vdots & & \vdots \\ \phi(\|\mathbf{x}_N - \mathbf{x}_1\|) & \cdots & \phi(\|\mathbf{x}_N - \mathbf{x}_N\|) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_N \end{bmatrix} \quad (3)$$

记该矩阵为 $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{N \times N}$, 其中 $A_{ij} = \phi(\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|)$ 。

对于条件正定基函数,需要添加多项式项:

$$p(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^M [\beta_k \pi_k(\mathbf{x})] \quad (4)$$

其中 $\{\pi_k\}$ 为多项式基; β_k 为多项式项的系数; M 为

基函数的数量,取决于多项式的阶数和空间的维度。

最终的定解矩阵为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{P} \\ \mathbf{P}^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda} \\ \boldsymbol{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中 $\mathbf{P}$ 的元素为 $P_{ik} = \pi_k(\mathbf{x}_i)$ 。

2.2 守恒 RBF 方法

经典 RBF 方法通过结合插值条件、多项式约束可以实现高精度的节点数据传递,然而其忽略了全局力/力矩守恒,使得源物理场与目标物理场非等效。本文提出了一种守恒 RBF 方法,在经典 RBF 的基础上增加守恒约束,并开展二次修正,核心理论如下。

2.2.1 经典 RBF 方法求解目标域物理场

假设源网格界面存在 n_f 个节点,目标网格界面存在 n_s 个节点,物理量分别表示为 $\mathbf{H}_f$ 和 $\mathbf{H}_s$, 需要建立目标函数 $\mathbf{H}_s = \psi(\mathbf{H}_f)$, 因此式(1)变为:

$$H_{sj} = \sum_{i=1}^{n_f} [\lambda_i \phi(\|\mathbf{x}_{sj} - \mathbf{x}_{fi}\|)] + p(\mathbf{x}_{sj}) \quad (6)$$

$j = 1, 2, \dots, n_s$

其中 $p(\mathbf{x})$ 的形式定义为三维线性多项式,以保证计算的稳定性与解的唯一性:

$$p(\mathbf{x}) = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 y + \beta_3 z \quad (7)$$

进而利用如下定解条件求解待定系数:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n_f} [\lambda_i \phi(\|\mathbf{x}_{tm} - \mathbf{x}_{fi}\|)] + p(\mathbf{x}_{tm}) = H_{tm} \\ m = 1, 2, \dots, n_f \\ \sum_{i=1}^{n_f} [\lambda_i \pi_k(\mathbf{x}_{fi})] = 0, \quad k = 0, 1, \dots, t-1 \end{cases} \quad (8)$$

其中 $\{\pi_k\}$ 为线性基 $\{1, x, y, z\}$, t 为 4。

因此,径向基插值函数变为如下形式:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{H}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{Z}_f^T \\ \mathbf{Z}_f^T & \mathbf{T}_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\beta} \\ \boldsymbol{\lambda} \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中 $\mathbf{Z}_f$ 为源网格坐标矩阵; $\mathbf{T}_{ff}$ 为源网格与源网格之间的基函数矩阵。

同理,目标域传递给源域的系数矩阵为:

$$\mathbf{H}_s = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_s^T & \mathbf{T}_{sf} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\beta} \\ \boldsymbol{\lambda} \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中 $\mathbf{Z}_s$ 为目标网格坐标矩阵; $\mathbf{T}_{sf}$ 为目标网格与源网格之间的基函数矩阵。

将式(9)代入式(10),得到目标域初始物理场为:

$$\mathbf{H}_s = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_s^T & \mathbf{T}_{sf} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{Z}_f^T \\ \mathbf{Z}_f^T & \mathbf{T}_{ff} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{H}_f \end{bmatrix} \quad (11)$$

2.2.2 守恒约束构建

经典 RBF 重构过程仅保证点值的连续性, 未嵌入物理守恒条件, 导致目标物理场与源物理场非等效, 即:

$$\mathbf{F}_f \neq \mathbf{F}_s \quad \mathbf{M}_f \neq \mathbf{M}_s \quad (12)$$

其中 $\mathbf{F}_f$ 、 $\mathbf{M}_f$ 分别为源域的总力和总力矩; $\mathbf{F}_s$ 、 $\mathbf{M}_s$ 分别为第(1)步求解后目标域的总力与总力矩。

因此, 需要在第(1)步求解结果的基础上进行二次修正, 以保证全局物理场力与力矩的守恒。以压力场为例, 二次修正的思路为: 在 $\mathbf{H}_s$ 的基础上叠加一个很小的修正场 $\delta\mathbf{H}$, 使得:

$$\mathbf{F}_f = \mathbf{F}_s^{\text{new}} \quad \mathbf{M}_f = \mathbf{M}_s^{\text{new}} \quad (13)$$

同时令 $\|\delta\mathbf{H}\|$ 尽可能地更小。

设节点面力矢量为:

$$\mathbf{e}_i = p_i \mathbf{n}_i A_i \quad (14)$$

其中 p_i 为节点压力; $\mathbf{n}_i$ 为节点单位外法向量; A_i 为节点控制面积。

则总力与总力矩分别为:

$$\mathbf{F} = \sum_{i=1}^N \mathbf{e}_i \quad \mathbf{M} = \sum_{i=1}^N (\mathbf{r}_i \times \mathbf{e}_i) \quad (15)$$

其中 $\mathbf{r}_i = \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{\text{ref}}$; $\mathbf{x}_{\text{ref}}$ 为参考点, 一般取几何重心。令:

$$\begin{aligned} \Delta\mathbf{F} &= \mathbf{F}_f - \mathbf{F}_s \\ \Delta\mathbf{M} &= \mathbf{M}_f - \mathbf{M}_s \end{aligned} \quad (16)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} n_{x,1}A_1 & \cdots & n_{x,n_s}A_{n_s} \\ n_{y,1}A_1 & \cdots & n_{y,n_s}A_{n_s} \\ n_{z,1}A_1 & \cdots & n_{z,n_s}A_{n_s} \\ (\mathbf{r}_1 \times \mathbf{n}_1)_x A_1 & \cdots & (\mathbf{r}_{n_s} \times \mathbf{n}_{n_s})_x A_{n_s} \\ (\mathbf{r}_1 \times \mathbf{n}_1)_y A_1 & \cdots & (\mathbf{r}_{n_s} \times \mathbf{n}_{n_s})_y A_{n_s} \\ (\mathbf{r}_1 \times \mathbf{n}_1)_z A_1 & \cdots & (\mathbf{r}_{n_s} \times \mathbf{n}_{n_s})_z A_{n_s} \end{bmatrix} \quad (17)$$

其中 $\mathbf{B}$ 为力/力矩雅可比矩阵。

进而得到:

$$\begin{bmatrix} \Delta\mathbf{F} \\ \Delta\mathbf{M} \end{bmatrix} = \mathbf{B}\delta\mathbf{H} \quad (18)$$

2.2.3 最小范数修正

求解使得总力/力矩守恒的最小 $\delta\mathbf{H}$:

$$\min_{\delta\mathbf{H}} \|\delta\mathbf{H}\|_2 \quad \text{s.t.} \quad \mathbf{B}\delta\mathbf{H} = \mathbf{A}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{F} \\ \Delta\mathbf{M} \end{bmatrix} \quad (19)$$

得到解析解为:

$$\delta\mathbf{H} = \mathbf{B}^T (\mathbf{B}\mathbf{B}^T)^{-1} \mathbf{A} \quad (20)$$

若矩阵病态, 需要进行 Tikhonov 正则化处理:

$$\delta\mathbf{H} = \mathbf{B}^T (\mathbf{B}\mathbf{B}^T + \epsilon \mathbf{I})^{-1} \mathbf{A} \quad (21)$$

其中 $\mathbf{I}$ 为单位矩阵, ϵ 为 Tikhonov 阻尼, 用于平衡方程残差与解的平滑度。本文采用广义交叉验证法确定 ϵ , 即通过最小化以下准则函数自动选取最优参数:

$$V(\epsilon) = \frac{\|\mathbf{B}\delta\mathbf{H}(\epsilon) - \mathbf{A}\|_2^2}{\{\text{trace}[\mathbf{I} - \mathbf{B}\mathbf{B}^T (\mathbf{B}\mathbf{B}^T + \epsilon \mathbf{I})^{-1}]\}^2} \quad (22)$$

其中 $\text{trace}(\cdot)$ 表示矩阵的迹。

当 $V(\epsilon)$ 取最小值时, 对应的 ϵ 即为最优正则化参数。

最终, 得到修正后的目标域物理场为:

$$\mathbf{H}_s^{\text{new}} = \mathbf{H}_s + \delta\mathbf{H} \quad (23)$$

2.3 主要计算步骤

本文所提守恒 RBF 算法的主要步骤如下, 其流程图如图 2 所示。

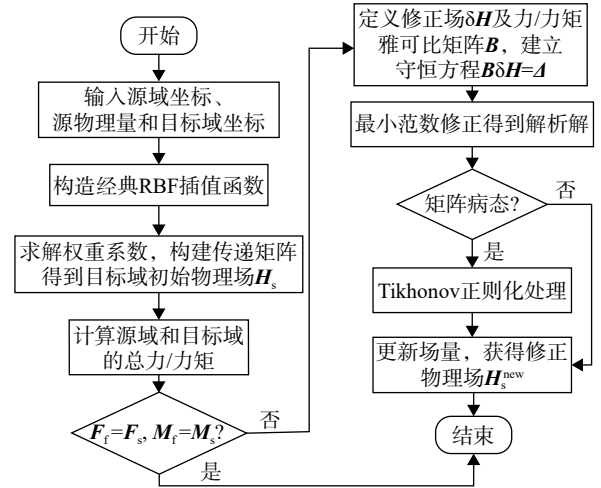


图 2 守恒 RBF 算法流程图

Fig. 2 Flowchart of conservative RBF algorithm

步骤 1 输入源网格节点坐标、源物理量以及目标网格节点坐标, 结合线性多项式 $p(\mathbf{x})$ 构造经典 RBF 插值函数。

步骤 2 依据定解条件求解权重系数, 构建传递矩阵得到目标网格初始物理量 $\mathbf{H}_s$ 。

步骤 3 计算源域和目标域的总力/力矩, 判断两者是否相等。如果不相等, 转到步骤 4; 否则终止计算, 采用 $\mathbf{H}_s$ 作为最终物理场。

步骤 4 定义修正场 $\delta\mathbf{H}$, 构建力/力矩雅可比

矩阵 B , 并建立守恒方程 $B\delta H = A$ 。

步骤 5 应用最小范数修正, 求 $\min \|\delta H\|_2$ 得到解析解, 若矩阵病态, 则进行 Tikhonov 正则化处理。

步骤 6 更新场量, 获得修正物理场 H_s^{new} 。

3 改进流固耦合方法

基于守恒 RBF 映射的齿轮泵流固耦合仿真流程如图 3 所示。首先, 基于 CFD 方法对流体域进行仿真计算, 获取内流场交界面上的压力数据及其对应的网格坐标信息。随后, 结合有限元设置得到的固体域交界面网格坐标信息, 利用 RBF 映射技术对交界面物理量进行数据重构, 以解决齿轮副缩放导致的几何失配与网格非对应问题, 并严格满足数据映射过程中的守恒性约束, 确保前后物理场的等效性与真实性。将重构后的压力场数据作为边界条件施加到齿轮模型上, 开展流

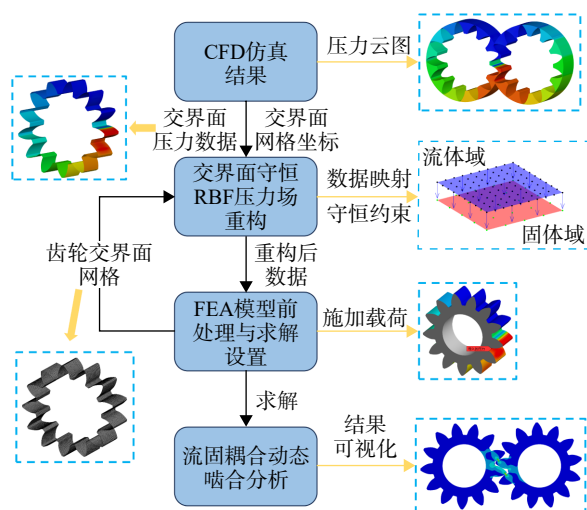


图 3 齿轮泵流固耦合仿真流程

Fig. 3 Flowchart of fluid-structure interaction simulation for gear pump

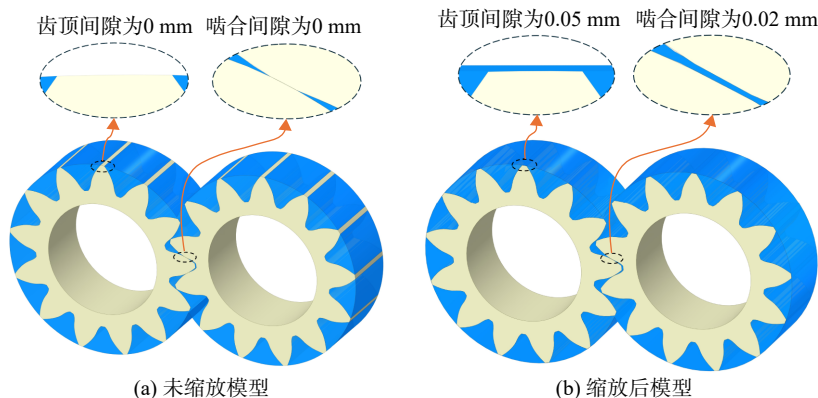


图 4 缩放前后模型对比

Fig. 4 Comparison of models before and after scaling

体载荷耦合动态啮合仿真分析。最后, 对结果进行可视化处理, 完成整个耦合仿真分析过程。该方法有效实现了流体载荷向固体结构的精确、守恒传递, 其中守恒性约束的满足是确保耦合仿真结果物理真实性与可信度的核心基础。

3.1 内流场仿真

在燃油齿轮泵设计建模过程中, 基于其结构和工作原理, 通常将齿顶间隙与啮合间隙理想化, 如图 4(a) 所示。然而, 该设定会导致局部流道不连通, 致使 CFD 流场仿真无法进行。为解决流场连通性问题, 需对齿轮副进行缩放操作。缩放原则为: 仅调整径向尺寸, 保持轴向尺寸不变。本研究所涉及的燃油齿轮泵在运行中受制造精度、装配公差及运行偏差影响, 齿轮与壳体间需保持适当齿顶间隙。该间隙综合考虑侧板与壳体配合、轴承与齿轮轴装配及防干涉要求, 最终确定控制标准不大于 0.05 mm。因此, 本文将齿轮副缩放至齿顶间隙为 0.05 mm, 如图 4(b) 所示。缩放后, 测得啮合间隙为 0.02 mm, 后续将通过试验验证缩放后模型的仿真精度。

图 5 为抽取的齿轮泵流体域模型, 由进口域、出口域、齿轮域和卸荷槽这 4 个部分组成。进一步生成齿轮泵流体域网格, 其中进出口区域和卸荷槽使用非结构化网格划分, 而齿轮区域采用结构化层状网格, 最终划分好的网格结果如图 6 所示。

为优化仿真计算效率, 需要对网格开展无关性验证。本研究选取的网格数方案 1~方案 4 分别为 91 万、119 万、145 万、171 万, 分别在 8000 r/min 下进行仿真计算, 监测 4 个方案出口面的最大、最小和平均质量流量, 结果如图 7 所示。可以观察到, 随着网格数增加, 出口质量流量逐渐上升并趋于稳定, 为保证计算精度并节约计算成本, 本文选择网格数为 1 453 579 的齿轮泵网格开

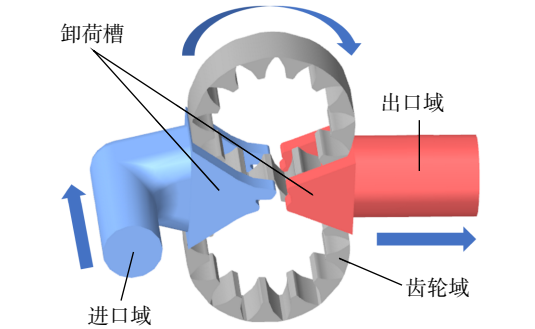


图 5 齿轮泵流体域
Fig. 5 Fluid domain of gear pump

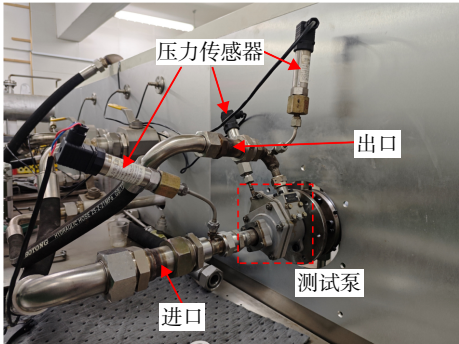


图 8 燃油齿轮泵测试平台
Fig. 8 Test platform of fuel gear pump

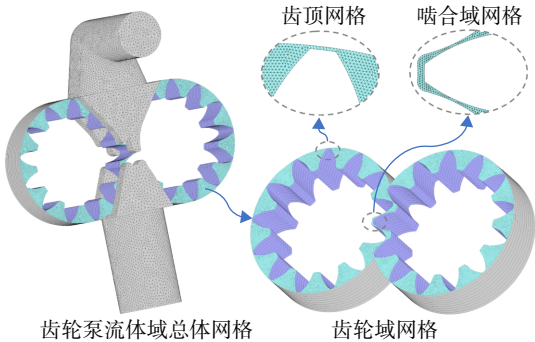


图 6 齿轮泵流体域网格
Fig. 6 Fluid domain grid of gear pump

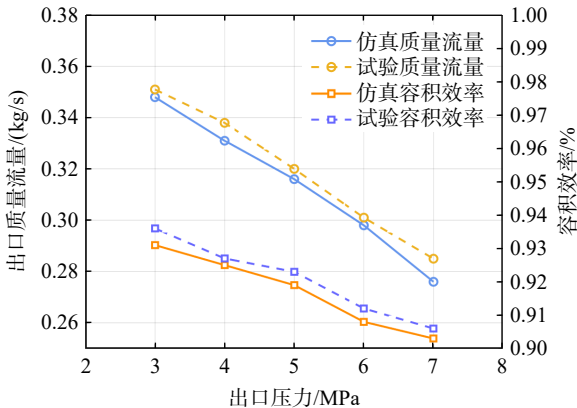


图 9 仿真与试验对比
Fig. 9 Comparison of simulation and experiment

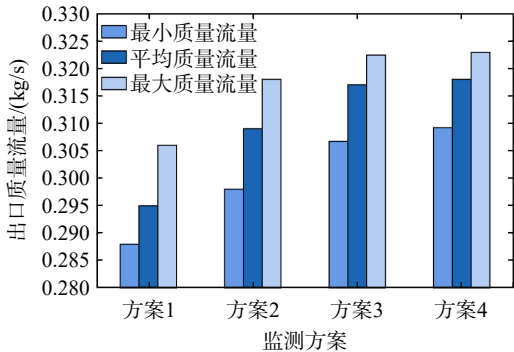


图 7 流体域网格无关性验证
Fig. 7 Grid independence verification of fluid domain

展流体域仿真分析。

图 8 为航空燃油齿轮泵试验平台,测试泵为本文所研究的某型齿轮泵。驱动传动轴运行的电动机负载功率为 55 kW,主轴最大转速为 15 000 r/min。采用精度 $\pm 0.5\%$ FS(full scale)的涡轮流量计测试出口体积流量,测试范围为 8~200 L/min。为实时监测该燃油齿轮泵的工作压力,在进出口区域的管路上布置测量精度 $\pm 1\%$ FS 的压力传感器,其测试范围分别为 0~1 MPa 和 0~15 MPa。

为确保仿真结果的精度,基于该试验平台研究不同出口压力下齿轮泵的出口流量和容积效率,并与相应的仿真结果进行对比,如图 9 所示。可

以看出,基于该仿真模型的结果与试验结果相对误差较小,仿真精度较高,可以采用该仿真模型开展本文的研究。

仿真设置如表 2 所示。本文的仿真计算采用 2.5D 动网格来描述网格更新,网格方法选取光顺和重构网格。创建动网格区域时,将主动与从动齿轮面设为刚体(rigid body),将齿轮区域前后端面设为变形(deforming)。

表 2 内流场仿真设置
Table 2 Simulation setup of interior flow field

设置项	具体设置
湍流模型	realizable $k-\epsilon$
多相流方法	混合模型
动网格方法	2.5D
求解方法	耦合算法
时间步长/ 10^{-7} s	7.5
计算步数	10 000

3.2 流固耦合仿真

3.2.1 有限元仿真设置

如图 10 所示为主从动齿轮模型及网格。由

于传动轴对齿轮啮合有限元仿真影响较小,因此将其剔除以简化仿真。整体网格采用结构化层状网格,面网格为全三角网格。不同于流体域仿真,齿轮有限元仿真可以在零间隙下收敛计算,因此在齿轮泵流固耦合分析中,需要进行流固交界面的数据传递,进而开展齿轮有限元强度仿真。

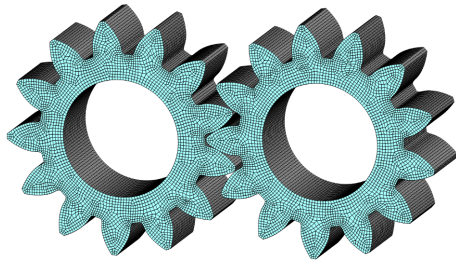


图 10 齿轮固体网格
Fig. 10 Grid of gear solid

为降低仿真计算时间成本,需对齿轮网格开展无关性验证。选取网格数量分别为 18 万、36 万、55 万、75 万这 4 个网格方案,在转速为 8 000 r/min、扭矩为 30 N·m 下开展齿轮动态啮合仿真,获取不同网格下的最大等效应力/应变,结果如图 11 所示。由图可知,随着网格的细化,最大等效应力/应变先增大后趋于稳定,综合计算精度与时间成本,选用 55 万的齿轮网格方案开展后续的流固耦合仿真。

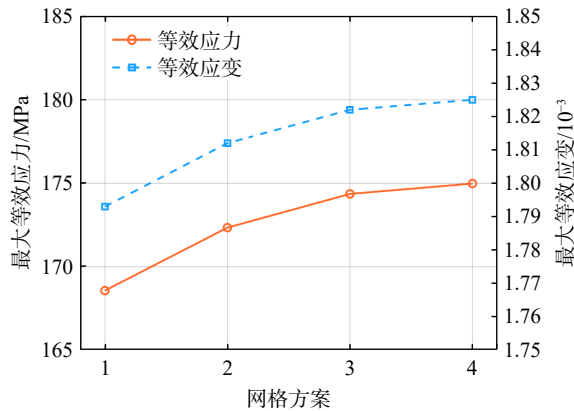


图 11 固体域网格无关性验证
Fig. 11 Grid independence verification of solid domain

仿真具体设置如表 3 所示,其中给主动齿轮施加转速条件,给从动齿轮施加扭矩条件。

3.2.2 流固交界面数据映射

以轮齿为例,图 12 展示了齿轮泵交界面基于守恒 RBF 的数据映射方法。采用经典 RBF 方法将流体侧数据映射至固体侧,进而通过守恒约束条件(力/力矩守恒)对映射场进行二次修正,最终

表 3 有限元仿真设置
Table 3 Finite element simulation setup

设置项	具体设置
接触方法	摩擦
摩擦因数	0.1
转速/(r/min)	8 000
扭矩/(N·m)	30
时间步长/ 10^{-7} s	7.5
计算步数	10 000

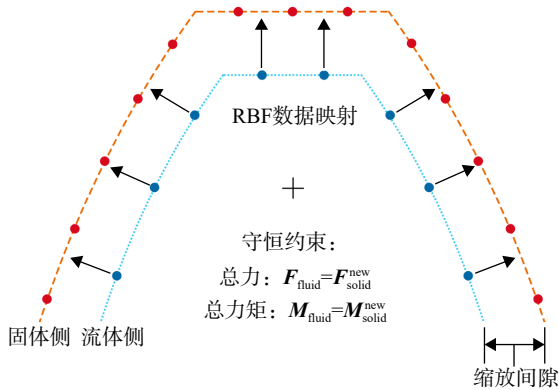


图 12 守恒 RBF 数据映射示意图
Fig. 12 Schematic diagram of conservative RBF data mapping

获得严格满足守恒条件的精确物理场。

齿轮泵交界面数据传递及载荷加载过程如图 13 所示。首先提取内流场交界面处的压力场数据,随后通过守恒 RBF 程序将该点集数据重构映射至齿轮交界面网格节点,最后将重构后的分布压力载荷作为边界条件加载至有限元模型的对应该接触面上,从而为后续的流固耦合仿真提供了精确的流场载荷边界条件。

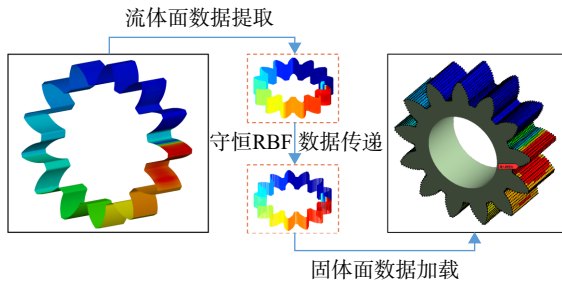


图 13 交界面数据传递及载荷加载
Fig. 13 Interface data transfer and load application

4 结果与分析

4.1 守恒 RBF 验证

4.1.1 优选基函数

RBF 映射提供了多样化的基函数选择,优选

基函数可以在计算效率与映射精度之间实现最优平衡,从而达到接近机器精度的高保真逼近效果。

RBF 主要分为全域 RBF 与紧支 RBF。全域 RBF 需要利用所有的数据点进行插值,其精度很高,但是大规模数据计算的时间成本较高。紧支 RBF 仅利用局部点,即排除较远点对插值点的影响,但精度相对较低。本文选择全域 RBF 进行插值,以保证插值映射精度。常用的全域 RBF 如表 4 所示。其中, r 为 Euclid 距离,对于三维空间, $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$; c 为形状参数,需要根据具体模型选择相应的参数值。

应用测试算例开展不同基函数传递精度的分

表 4 常用全域 RBF	
Table 4 Commonly used global RBF	
全域 RBF 类型	表达式
Gauss 基函数	$\phi(r) = e^{-c^2 r^2}$
Inverse quadratic(IQ) 基函数	$\phi(r) = \frac{1}{1 + (cr)^2}$
Thin-plate spline(TPS) 基函数	$\phi(r) = r^2 \ln r$
Multiquadric(MQ) 基函数	$\phi(r) = \sqrt{r^2 + c^2}$

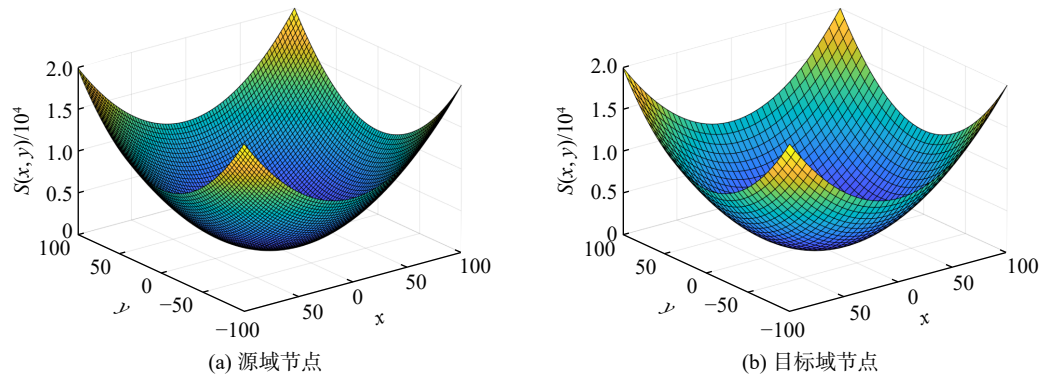
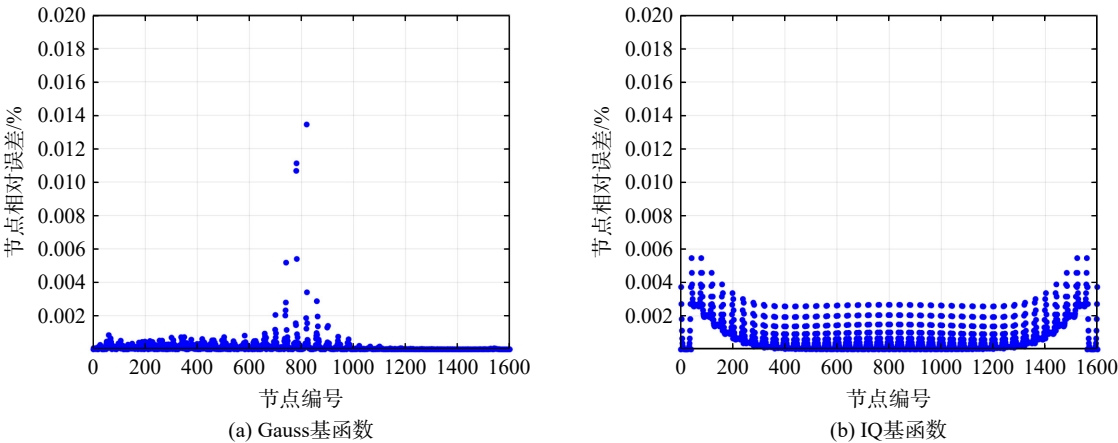


图 14 测试算例网格节点
Fig. 14 Grid nodes of experimental case



析比较。假定标准测试函数为:

$$S(x,y) = x^2 + y^2 \quad -100 \leq x,y \leq 100 \quad (24)$$

其中源域节点设置为 6 400 个,目标域节点为 1 600 个,如图 14 所示。

分别应用 4 个 RBF 开展映射精度分析,并选用相同的形状参数,对比映射结果与固体域节点的精确解,节点数据传递的相对误差如图 15 所示,具体数据如表 5 所示。分析误差结果及计算耗时可以得出,TPS 基函数的表现最好,映射精度高且计算成本低,平均相对误差仅为 9.8839×10^{-7} 。因此本文的研究将选取 TPS 基函数作为 RBF 对齿轮泵交界面开展数据映射。

4.1.2 算例验证

为验证守恒 RBF 重构方法的优越性,应用测试算例揭示经典 RBF 映射后力/力矩的非守恒现象,并分析评估守恒 RBF 的映射精度水平。

选取的几何测试模型为圆面,绘制两套网格,其中流体域节点数为 2 506、固体域节点数为 1 183,如图 16(a)、图 16(b)所示。网格节点压力数据采用如下的简单函数表示,其精确值云图如图 16(c)、

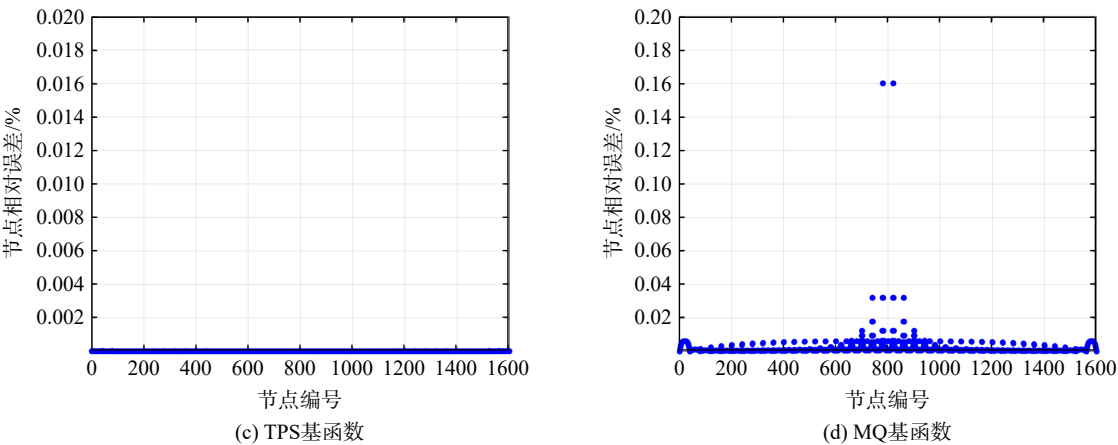


图 15 不同 RBF 的映射相对误差
Fig. 15 Mapping relative error of different RBF

表 5 不同 RBF 的耗时与映射误差

Table 5 Time consumption and mapping error of different RBF

基函数类型	映射时间/s	平均相对误差/%	最大相对误差/%
Gauss	63.054	$1.384\,6\times10^{-4}$	0.013 4
IQ	84.704	$8.331\,3\times10^{-4}$	0.005 5
TPS	35.518	$9.883\,9\times10^{-7}$	$2.344\,5\times10^{-5}$
MQ	64.341	1.9×10^{-3}	0.160 2

图 16(d)所示。

$$P(x,y)=x^2+y^2+xy$$

$x\in[-25,25],\quad y\in[-25,25]\text{ (mm)}$

(25)

应用经典 RBF 方法对测试算例进行流体域至固体域的数据传递,所得流体域及传递后固体域的总力与总力矩结果如表 6 所示。分析表明,传递后固体域的总力与流体域原始总力显著不符,相对误差达 8.83%。总力矩方面,由于该算例几

表 6 应用经典 RBF 的流固界面力/力矩数值

Table 6 Numerical calculation of fluid-structure interface force/moment applying classic RBF

物理量	流体域	固体域
总力/N	0.559 45	0.613 60
总力矩/ 10^{-6} (N·m)	8.230 2	91.286

何绕 $y=\pm x$ 对称且法向量规定为 $(0,0,1)$,理论总力矩应为零。然而,受限于计算网格的离散特性,模型并非完全理想对称,导致流体域计算结果存在微小的非零力矩,这是由数值仿真特性导致的。值得注意的是,传递至固体域的总力矩相较于流体域原始值增大了约 11 倍。上述物理量的对比结果清晰地表明:经典 RBF 方法在传递节点载荷后,固体域所受总力/力矩与原流体域之间存在显著偏差,破坏了物理场的等效性。这一关键的不守恒现象,凸显了对经典 RBF 方法进行守恒性改进的必要性。

为进一步保证数据传递后固体域物理场与源流体域物理场的等效性,在经典 RBF 方法中引入式(13)的强守恒约束条件,应用二次修正以保证 $\boldsymbol{F}_f=\boldsymbol{F}_s^{\text{new}},\boldsymbol{M}_f=\boldsymbol{M}_s^{\text{new}}$,使得流体域及守恒 RBF 传递后固体域的力/力矩保持一致。然而,施加守恒约束不可避免地会与局部最优插值精度产生矛盾,致使在一定程度上降低了节点的数值精度。但物

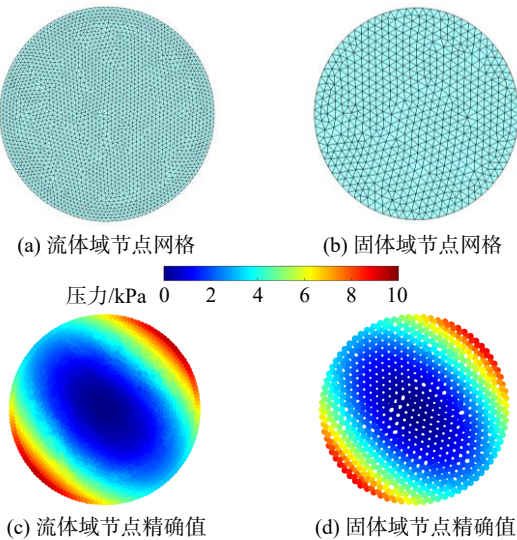


图 16 不同节点数的网格与节点精确值
Fig. 16 Grid and grid value of different node number

理守恒性作为流固耦合的核心要求,其必然优于纯粹的局部节点精度,同时必须维持精度在可接受水平。因此,需要评估守恒 RBF 方法在传递数据后的精度是否满足要求。图 17 展示了分别使用经典 RBF 与守恒 RBF 方法对测试算例进行数据映射后的节点相对误差分布。表 7 则提供了

详细的相对误差统计数据。分析表明,相较于经典 RBF 方法,守恒 RBF 方法的节点数值精度虽略有下降,但平均相对误差也仅为 0.001 5%,误差水平仍在可接受范围内。更为关键的是,守恒 RBF 方法可以确保传递后力/力矩的严格守恒以及物理场的保真度。

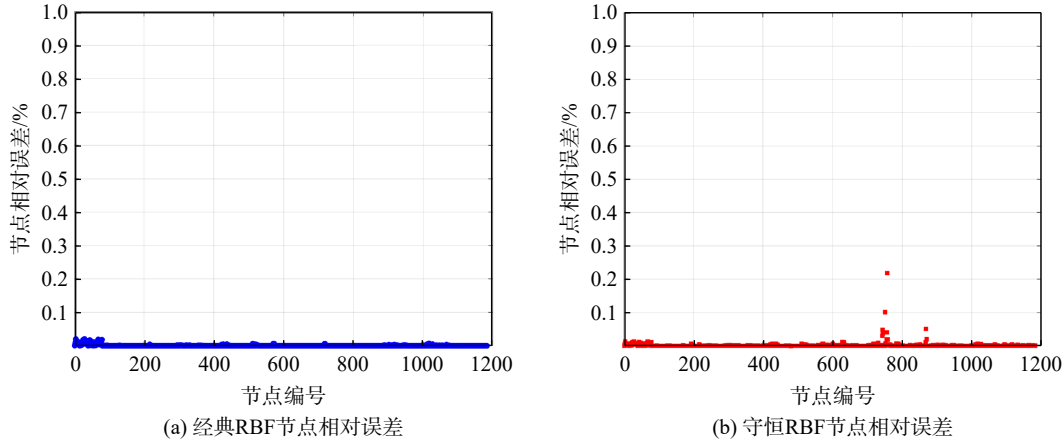


图 17 经典 RBF 与守恒 RBF 精度对比

Fig. 17 Accuracy comparison between classic RBF and conservative RBF

表 7 经典 RBF 与守恒 RBF 相对误差比较

Table 7 Comparison of relative errors between classic RBF and conservative RBF

重构方法	最小相对误差	平均相对误差/%	最大相对误差/%
经典 RBF	0	0.000 7	0.020 7
守恒 RBF	0	0.001 5	0.219 3

4.2 仿真结果

4.2.1 内流场仿真结果

如图 18 所示为一个啮合周期(T_n)内齿轮泵啮合区域压力变化。可以观察到,从啮合开始到啮合结束,随着啮合点位置的不断变化,吸油腔与压油腔的容积发生改变,进而引起压力场的逐步演化,反映了啮合过程中压力的传递规律。吸油腔在容积增大时吸入油液,而压油腔在容积减小时压缩油液,确保油液能够吸入。此外,图中部分区域是小于泵进口压力(0.1 MPa)的,这是由于齿轮泵在吸油过程中要形成负压以保证吸油过程顺利进行。表 8 为一个啮合周期内最大压力的变化趋势,由图可知,泵内最大压力随着啮合的进行而上下波动,其最大值为 5.48 MPa,超出泵出口设定压力(5 MPa)9.6%。

4.2.2 流固耦合仿真结果

应用守恒 RBF 重构流体域交界面压力场数据,进而将该分布压力载荷加载至齿轮交界面,

求解得到某时间步下齿轮固体的等效应力云图如图 19 所示。可以看出,等效应力的分布情况与源压力场分布大致相同,齿根处普遍承受较大应力。最大应力值为 31.61 MPa,最大应变值为 4.61×10^{-4} mm/mm,均出现在即将进入啮合的轮齿齿根处。

进一步开展流场压力载荷传递耦合齿轮动态啮合仿真,观察一个啮合周期内等效应力/应变的变化规律。

图 20 为一个啮合周期内啮合区域等效应力的变化云图。可以观察到,在不同啮合状态下,其等效应力的分布也不同。齿轮啮合周期主要分为双齿-单齿-双齿啮合,无论是单齿还是双齿啮合状态,其等效应力均为先增大后减小。整体来看,双齿啮合下的等效应力小于单齿啮合,这是由于双齿啮合时存在载荷分配,应力被分配至不同的齿,因此双齿啮合的等效应力较小。加入动态啮合仿真后,等效应力显著增加,尤其是啮合

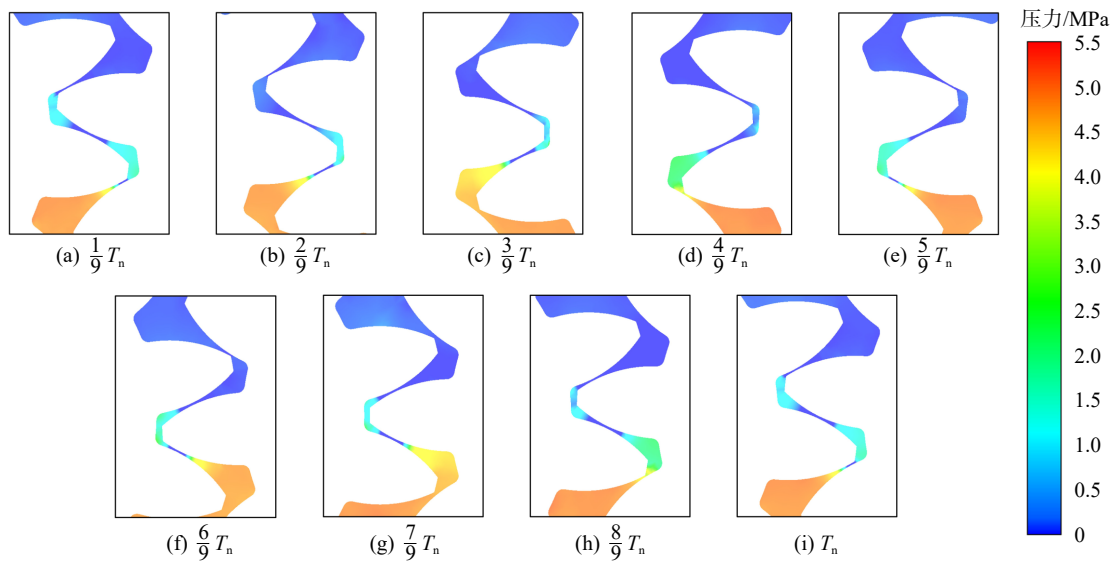


图 18 一个啮合周期内压力云图

Fig. 18 Pressure contour map within one meshing cycle

表 8 一个啮合周期内最大压力变化趋势

Table 8 Variation trend of the maximum pressure within one meshing cycle

啮合时间	最大压力/MPa	啮合时间	最大压力/MPa
$\frac{1}{9}T_n$	5.31	$\frac{6}{9}T_n$	5.38
$\frac{2}{9}T_n$	5.47	$\frac{7}{9}T_n$	5.48
$\frac{3}{9}T_n$	5.30	$\frac{8}{9}T_n$	5.28
$\frac{4}{9}T_n$	5.48	T_n	5.27
$\frac{5}{9}T_n$	5.32		

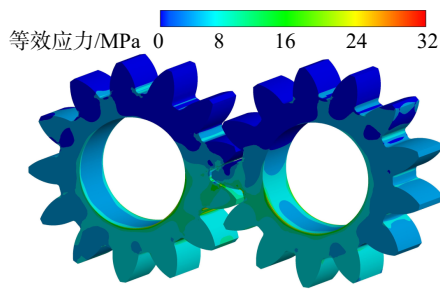


图 19 施加流体压力载荷的齿轮等效应力云图

Fig. 19 Equivalent stress contour map of gears with fluid pressure load applied

处接触摩擦所产生的高接触应力,最大等效应力为 192.18 MPa,发生在单齿啮合点处。除啮合点外,啮合齿的齿根及端面处也存在较大的等效应力。等效应变的变化规律与应力云图保持一致,最大等效应变为 1.99×10^{-3} mm/mm。

表 9 为一个啮合周期内某时间步下仅施加

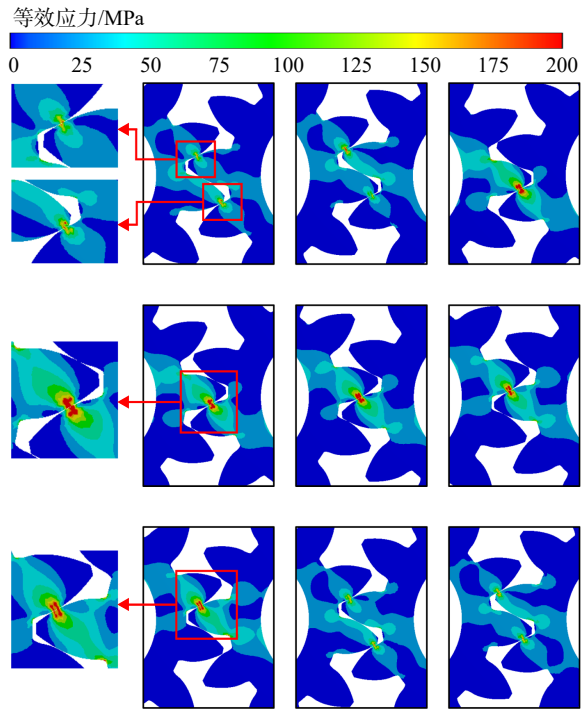


图 20 一个啮合周期内等效应力云图

Fig. 20 Equivalent stress contour map within one meshing cycle

流体压力载荷与加入动态啮合仿真的平均等效应力/应变数值对比。可以看出,虽然最大应力/应变相差较大,但就平均值而言,流体域压力场对齿轮强度的影响是不容忽视的,等效应力与应变的数值占比分别为 34.38%与 29.84%,这也说明了开展齿轮泵流固耦合仿真分析的重要性。

表9 一个啮合周期内仅施加流体载荷与加入啮合仿真的
平均等效应力/应变对比

Table 9 Comparison of average equivalent stress/strain
between only applying fluid loads and incorporating
meshing simulation within one meshing cycle

强度参数	仅施加流体域 压力载荷	流体域压力载荷 + 动态啮合仿真
平均等效应力/MPa	1.43	4.16
平均等效应变/ 10^{-5}	2.05	6.87

5 结 论

本文基于守恒 RBF 映射方法, 实现了燃油齿轮泵流固失配交界面的高精度与强守恒场量传递, 并开展了流固耦合仿真分析。主要研究结论如下:

1) 通过测试函数优选 RBF, 对比 4 种基函数在进行数据映射时的误差, 发现 TPS 基函数的映射精度最优, 且计算耗时最低。

2) 通过测试算例对比经典 RBF 映射前后力/力矩的差异, 发现存在 8.83% 的总力误差与 11 倍的总力矩偏差, 而守恒 RBF 方法可以成功消除这些误差。进一步评估守恒 RBF 的传递精度, 发现相较于经典 RBF 略有下降, 但也仅为 0.001 5%, 仍可保持高保真映射。

3) 内流场仿真分析表明, 随着啮合点位置变化, 压力场逐步演化, 部分区域的压力低于泵进口压力, 形成负压以确保油液顺利吸入。泵内最大压力值为 5.48 MPa, 超出泵出口设定压力 9.6%。

4) 应用守恒 RBF 加载流场交界面压力载荷, 其最大等效应力为 31.61 MPa, 位于轮齿齿根处。进一步开展流场压力载荷耦合齿轮动态啮合仿真, 啮合应力峰值为 192.18 MPa, 发生在单齿啮合处。对比仅施加流体压力载荷与加入动态啮合仿真的结果, 流体域压力场对于等效应力/应变的数值贡献分别为 34.38% 与 29.84%, 说明了开展齿轮泵流固耦合仿真的重要性。

参考文献:

- [1] 安理会, 罗康, 符江锋, 等. 航空燃油齿轮泵加速寿命试验与加速退化试验研究进展及展望[J]. *燃气涡轮试验与研究*, 2025, 38(1): 41-55.
AN Lihui, LUO Kang, FU Jiangfeng, et al. Research progress and prospects of accelerated life testing and accelerated degradation testing for aviation fuel gear pump[J]. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2025, 38(1): 41-55. (in Chinese)
- [2] 符江锋, 王建礼, 李文霞, 等. 航空发动机长寿命、高可靠燃油齿轮泵关键技术研究综述[J]. *推进技术*, 2024, 45(12): 2312088.
FU Jiangfeng, WANG Jianli, LI Wenxia, et al. Review of key

- technologies for long life and high reliability fuel gear pumps in aeroengine[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2024, 45(12): 2312088. (in Chinese)
- [3] 严如强, 许文纲, 王志颖, 等. 航空发动机燃油控制系统故障诊断技术研究进展与挑战[J]. *机械工程学报*, 2024, 60(4): 3-31.
YAN Ruqiang, XU Wengang, WANG Zhiying, et al. Research status and challenges on fault diagnosis methodology for fuel control system of aero-engine[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(4): 3-31. (in Chinese)
 - [4] ZHAO Zhijie, LIU Xianwei, ZHENG Xuebo, et al. An advanced Polynomial Chaos Expansion method for sensitivity analysis of aero-engine fuel gear pumps[J]. *Physics of Fluids*, 2024, 36(7): 077114.
 - [5] LIU Xianwei, FU Jiangfeng, YANG Junjie, et al. Numerical simulation research on multiphase flow of aviation centrifugal pump based on OpenFOAM[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2024, 37(4): 256-275.
 - [6] 罗杰, 何旭, 李彬, 等. 考虑大变形的涡轮叶片热应力有限元算法研究[J]. *航空动力学报*, 2024, 39(9): 20220915.
LUO Jie, HE Xu, LI Bin, et al. Study on finite element algorithm of thermal stress of turbine blade considering large deformation[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2024, 39(9): 20220915. (in Chinese)
 - [7] CHEN Kangkang, MA Hui, CHE Linyang, et al. Comparison of meshing characteristics of helical gears with spalling fault using analytical and finite-element methods[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 121: 279-298.
 - [8] 符江锋, 赵志杰, 刘显为, 等. 基于运动法的航空发动机高速燃油齿轮泵卸荷槽设计与验证[J]. *推进技术*, 2024, 45(5): 2302047.
FU Jiangfeng, ZHAO Zhijie, LIU Xianwei, et al. Design and verification of unloading groove of high-speed fuel gear pump of aero-engine based on motion method[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2024, 45(5): 2302047. (in Chinese)
 - [9] MITHUN M G, KOUKOUVINIS P, KARATHANASSIS I K, et al. Numerical simulation of three-phase flow in an external gear pump using immersed boundary approach[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2019, 72: 682-699.
 - [10] 邢毅真, 黎义斌, 张生福, 等. 航空圆弧齿轮泵多齿腔内流量脉动特性研究[J]. *航空动力学报*, 2025, 40(2): 20230131.
XING Yizhen, LI Yibin, ZHANG Shengfu, et al. Flow pulsation characteristics in multi-tooth cavity of arc aero gear pump[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2025, 40(2): 20230131. (in Chinese)
 - [11] 潘铮, 王友仁, 刘维团. 多工况下的直齿轮接触疲劳寿命仿真研究[J]. *机械制造与自动化*, 2024, 53(1): 123-127.
PAN Zheng, WANG Youren, LIU Weituan. Simulation study of spur gear contact fatigue life under multiple working conditions[J]. *Machine Building & Automation*, 2024, 53(1): 123-127. (in Chinese)
 - [12] WANG Qibin, CHEN Kangkang, ZHAO Bo, et al. An analytical-finite-element method for calculating mesh stiffness of spur gear pairs with complicated foundation and crack[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2018, 94: 339-353.
 - [13] 谯禹娟, 彭帅, 汪海涛, 等. 点接触直齿轮副的构建及接触分析[J]. *航空动力学报*, 2025, 40(4): 20240759.
QIAO Yujuan, PENG Shuai, WANG Haitao, et al. Construction and contact analysis of point-contact spur gear pairs[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2025, 40(4): 20240759. (in Chinese)
 - [14] BUNGARTZ H J, SCHÄFER M. Fluid-structure interaction: mod-

- elling, simulation, optimisation[M]. Berlin: Springer, 2006.
- [15] 周群起, 董庆伟, 李阁强, 等. 流固耦合影响下双圆弧斜齿齿轮泵转子力学特性研究[J]. *机械设计与制造*, 2023(8): 195-199.
- ZHOU Qunqi, DONG Qingwei, LI Geqiang, et al. Research on the mechanical characteristics of the rotor of the double arc helical gear pump under the influence of fluid-structure coupling[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2023(8): 195-199. (in Chinese)
- [16] DHAR S, VACCA A. A fluid structure interaction: EHD model of the lubricating gaps in external gear machines: Formulation and validation[J]. *Tribology International*, 2013, 62: 78-90.
- [17] SHEN Haidong, LI Zhiqiang, QI Lele, et al. A method for gear fatigue life prediction considering the internal flow field of the gear pump[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 99: 921-929.
- [18] BUHMANN M D. Radial basis functions[J]. *Acta Numerica*, 2000, 9: 1-38.
- [19] LIU Yilang, ZHANG Weiwei, JIANG Yuewen, et al. A high-order finite volume method on unstructured grids using RBF reconstruction[J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 2016, 72(4): 1096-1117.
- [20] 周强, 李东风, 陈刚, 等. 基于 CFD 和 CSM 耦合的通用静气弹分析方法[J]. *航空动力学报*, 2018, 33(2): 355-363.
- ZHOU Qiang, LI Dongfeng, CHEN Gang, et al. General static aeroelasticity analysis method based on CFD/CSM coupling[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2018, 33(2): 355-363. (in Chinese)
- [21] 杨超, 邹志诚, 谢长川, 等. RBF 动网格技术研究进展及其气动弹性应用[J]. *航空学报*, 2025, 46(5): 530945.
- YANG Chao, ZOU Zhicheng, XIE Changchuan, et al. Research progress of RBF dynamic mesh technology and its application in aeroelasticity[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2025, 46(5): 530945. (in Chinese)
- [22] TOJA-SILVA F, FAVIER J, PINELLI A. Radial basis function (RBF)-based interpolation and spreading for the immersed boundary method[J]. *Computers & Fluids*, 2014, 105: 66-75.
- [23] SKALA V. RBF interpolation with CSRBF of large data sets[J]. *Procedia Computer Science*, 2017, 108: 2433-2437.
- [24] KEDWARD L, ALLEN C B, RENDALL T C S. Efficient and exact mesh deformation using multiscale RBF interpolation[J]. *Journal of Computational Physics*, 2017, 345: 732-751.
- [25] CUOMO S, GALLETTI A, GIUNTA G, et al. Reconstruction of implicit curves and surfaces via RBF interpolation[J]. *Applied Numerical Mathematics*, 2017, 116: 157-171.

(编辑: 陈 越)