

考虑非理想表面的精密滑阀零位内泄漏特性仿真分析研究



张泽鹏,唐文斌,闫彤

西安工程大学, 陕西 西安 710048

摘要:精密滑阀在航空航天领域中广泛应用,其内泄漏特性直接影响系统性能和能效,准确预测滑阀内泄漏对于优化设计和提高产品质量至关重要。针对目前对于精密滑阀内泄漏研究大多基于理想光滑表面,忽略了由加工误差造成的装配界面几何形状变化,导致精密滑阀内泄漏的预测精度低的问题,本文提出考虑非理想表面的精密滑阀零位内泄漏特性仿真分析方法。首先,以切比雪夫/傅里叶模型作为基函数,构造了滑阀配合表面的典型偏差形式,包括锥形、沙漏形、桶形、香蕉形和花瓣形;然后,利用逆向建模方法建立了具有非理想表面的滑阀实体,提取了油液泄漏的非理想几何流道,并通过计算流体力学(CFD)方法分析了偏差形式的配合表面对滑阀内泄漏的影响;最后,建立了各种因素与滑阀内泄漏量的映射关系的Kriging代理模型。结果表明,沙漏形状对滑阀内泄漏量的影响最小,桶形状对滑阀内泄漏量的影响最大,配合表面微观形貌对滑阀内泄漏量的影响不容忽视;构建的代理模型对滑阀内泄漏的预测精度较高,预测效率提升。

关键词:精密滑阀;内泄漏;逆向建模;CFD;Kriging

中图分类号:V229+.5

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2025.03.007

在航空航天领域,电液伺服控制系统的性能与可靠性至关重要,直接影响飞行器的安全性、机动性和任务成功率。精密滑阀作为该系统的核心元件,其设计和制造精度决定液压控制系统的整体表现,如图1所示。由于滑阀之间存在相对运动,必然会产生配合间隙,当间隙两端存在压差或组成间隙的壁面相对运动时,间隙内的油液便会流动,导致泄漏现象发生。这不仅降低了滑阀的控制精度,还会导致频响特性不稳定^[1],从而对航空器的控制和性能产生严重影响。

目前对精密滑阀的内泄漏研究大多是基于理想光滑表面,忽视了因加工误差等因素造成装配界面几何形状变化,导致泄漏预测精度不足,无法满足航空航天系统对高精度和高可靠性的要求。针对这一问题,本文提出一种考虑非理想表面的精密滑阀零位内泄漏仿真分析方法,通过构造典型偏差形式,深入研究不同配合表面对滑阀内泄漏的影响,提高滑阀内泄漏的预测精度,为航空航天领域的精密滑

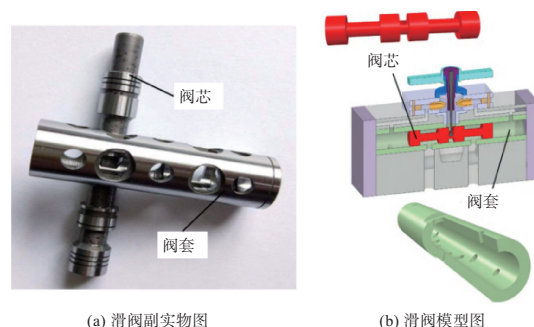


图1 精密滑阀示意图

Fig.1 Schematic diagram of the precision slide valve

阀设计提供理论支持。

国内外学者针对滑阀副内泄漏开展了大量的研究。在滑阀内泄漏影响因素分析方面:何毓明等^[2]利用某仿真软件搭建了精密滑阀内泄漏故障仿真平台,综合考虑了液压系统压力、滑阀副间隙高度、遮盖量、流体黏度、阀芯直径和偏心率对内泄漏量和系统性能的影响,得到了中位状态下

收稿日期: 2024-08-06; 退修日期: 2024-11-05; 录用日期: 2025-01-06

基金项目: 国家自然科学基金(52105559);航空科学基金(2022Z050111001);西安市科技计划项目(23GXFW0022)

引用格式: Zhang Zepeng, Tang Wenbin, Yan Tong. Simulation and analysis of zero position internal leakage characteristics of precision slide valves considering non-Ideal surfaces[J]. Aeronautical Science & Technology, 2025, 36(03): 54-62. 张泽鹏,唐文斌,闫彤. 考虑非理想表面的精密滑阀零位内泄漏特性仿真分析研究[J]. 航空科学技术, 2025, 36(03): 54-62.

内泄漏量的主要影响因素。宋飞等^[3]基于滑阀内泄漏模拟实验台,对不同阀芯直径的滑阀正常间隙和过大间隙下的泄漏规律进行试验,得到了径向间隙、密封长度、压差和阀芯直径对泄漏量的影响规律。周梓荣等^[4]分析了轴向的倾斜、移动、旋转以及温度和压力的变化对泄漏量的影响。在滑阀内泄漏计算方法方面,赵海峰等^[5]对滑阀副偏心环隙的微元体进行受力分析,并基于牛顿内摩擦定律建立了偏微分方程,得出的公式广泛适用于不同间隙高度和偏心程度的环状流动。Gordić等^[6]基于阀门的几何形状和工作流体的性质,提出了几种计算滑阀副内泄漏量的数学模型,为预测滑阀在零位状态下的性能提供了良好的依据。刘冀民等^[7]针对三位液压换向阀,研究了对中误差与内泄漏量的关系,提出了按间隙划分对中误差的要求。薛晓虎^[8]通过对液压系统各类缝隙内流体泄漏的分析,提出了综合考虑系统的工作压力、温度及混入空气量影响时的缝隙内流体泄漏量的数学模型。在滑阀内泄漏优化方面,Goharrizi等^[9]基于小波变换分析了液压执行器的外泄漏和内泄漏,该方法无须对执行器和泄漏类型建模,即可识别和隔离内泄漏和外泄漏。Eryilmaz等^[10]根据试验泄漏量数据,将泄漏量和节流口流量结合起来,简化了改进的伺服阀模型,组合模型也可以很容易地使用现有的制造商数据参数化。

归纳上述研究,工业和学术界在滑阀泄漏方面开展了一定程度的研究,得到了泄漏量的解析解和数值解,为滑阀的配合性能分析提供了一定程度的参考,但其计算模型都是基于阀芯和阀套是理想光滑圆柱面的假设。由于加工误差的存在,阀芯和阀套之间的装配界面并不是理想的光滑表面,而是具有随机的、不规则的几何形貌特征以及粗糙度、波纹度和形位误差等多种误差成分,统称为形貌误差^[11],这些微观几何结构对滑阀内泄漏的影响不容忽视。为此,本文构建了精密滑阀的非理想表面模型;基于此模型,采用计算流体力学(CFD)方法分析不同的阀芯形状和各种误差因素对滑阀内泄漏的影响,建立滑阀内泄漏量预测模型,能够为精密滑阀质量提升提供指导。

1 精密滑阀非理想表面建模

1.1 柱体表面形貌误差分析

通常情况下,电液伺服阀阀芯与阀套的装配界面为圆柱面,要研究各种形貌因素对滑阀内泄漏的影响,首先要对柱体表面的形貌误差组成进行分析。研究表明,在十几种具体的公差分类中,对滑阀内泄漏影响最大的三个因素分别为直径公差、长度公差和圆柱度公差。前两种因素属

于尺寸公差类别,如图2(a)和图2(b)所示,它们分别影响滑阀的配合间隙高度和配合长度从而影响内泄漏量;圆柱度公差属于形状公差类别,它规定了实际圆柱面相对于理想圆柱面允许的最大变动量,如图2(c)所示,是衡量圆柱体截面形状偏离理想形状程度的重要指标,综合考虑了圆柱体正截面和纵截面的形状误差,它的存在会改变油液泄漏时的运动速度和运动方向,从而影响内泄漏量。

在滑阀的实际加工生产中,上述各种误差因素相互叠加导致阀芯配合表面产生复杂的几何形状,根据经验,可以从宏观上将其归类为与理想圆柱体的典型偏差形式,包括锥形、沙漏形、桶形、香蕉形和花瓣形5种形状^[12],对于这些复杂的柱体表面形状,可以将其分解为名义特征和微小的校正函数。因此,实际的圆柱表面特征可以表示为理想圆柱体加上对半径的微小修正,其中,修正函数可以由沿极轴 z 和极角 θ 的位置函数给出 $F(z, \theta) = a_1 f_1(z, \theta) + a_2 f_2(z, \theta) + a_3 f_3(z, \theta) + \dots + a_n f_n(z, \theta)$ 。

为了尽可能反应形状误差的更多细节特征,可以采用更多的微小校正函数项来表征。通过对权重系数 $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ 的不同选择,表征零件的几何误差也会不同。因此,实际表面的形状误差可以表示为一组基函数的线性组合,如式(1)所示

$$W = \mathbf{GA} = [f_1, f_2, f_3, \dots, f_n] \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, W 为重构表面; $\mathbf{G}$ 为基函数矩阵; $\mathbf{A}$ 为权重系数矩阵; $f_i (i=1 \sim n)$ 为第 i 个基函数; $a_i (i=1 \sim n)$ 表示第 i 个基函数的系数。

1.2 基集选择

一旦基函数被确定,系数矢量 $\mathbf{A}$ 就可以唯一确定重构表面。Henke等^[12]提出了一种以切比雪夫/傅里叶模型为基础的基函数集合,该模型可以用较少的基函数来表达不同的圆柱表面形貌,其具体思想如下。

实际圆柱体的表面形貌可以由式(2)来表示

$$r(z, \theta) = R + \sum_{i=0}^{\text{ord}_z} T_i \left(\frac{2(z - z_{\min})}{(z_{\max} - z_{\min})} - 1 \right) \times \left[\sum_{j=0}^{\text{ord}_\theta} a_{ij} \cos(j\theta) + \sum_{j=1}^{\text{ord}_\theta} b_{ij} \sin(j\theta) \right] \quad (2)$$

式中, r 为实际曲面的解析模型; R 可以是理想圆柱体的标称半径,也可以是理想圆柱体与采样数据的最佳拟合半径,要求 R 与 r 的偏差远小于 R ; $T_i(\zeta)$ 是 i 阶的第二类切比雪夫

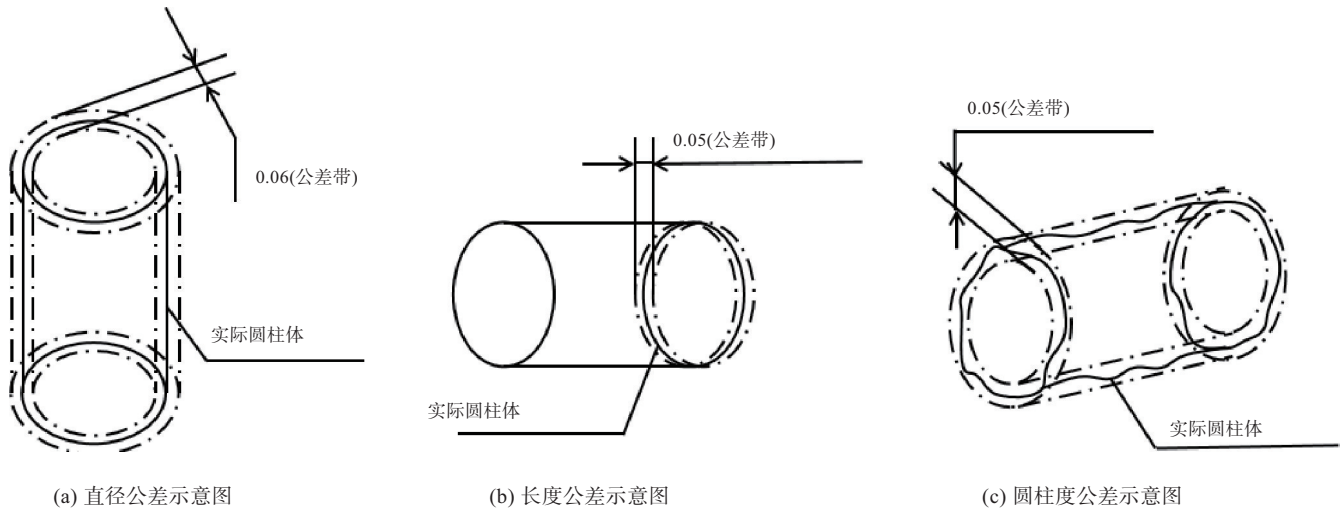


图2 圆柱体的形貌误差分类

Fig.2 The morphology error classification of the cylinders

多项式; a_{ij} 和 b_{ij} 表示实际圆柱体的偏差系数。

式(2)可以简化为

$$R(z, \theta) = R + \mathbf{F}(z, \theta)' \mathbf{a} \quad (3)$$

式中, $\mathbf{F}(z, \theta)$ 是 z 和 θ 的函数的行矢量乘以系数 $\mathbf{a}$ 的列矢量; $\mathbf{F}$ 的元素是 T_i 和 $\cos(j\theta)$ 或 $\sin(j\theta)$ 的单独乘积。

式(3)中的5个函数可以用来表示圆柱体的大小、位置和方向上的微小变化:函数 $T_0 \cos(0 \times \theta)$ 即常数1, 它的系数表示实际圆柱体的半径与理想圆柱体半径的偏差;函数 $T_0 \cos(\theta) = \cos(\theta)$, 它的系数表示圆柱体在 x 方向上的微小位移;函数 $T_0 \sin(\theta) = \sin(\theta)$, 它的系数表示圆柱体在 y 方向上的微小位移;如果圆柱体绕其中心倾斜, 函数 $T_1 \cos(\theta)$ 的系数表示圆柱体顶部在 x 方向和底部在 $-x$ 方向上同时发生的位移量;同样, 函数 $T_1 \sin(\theta)$ 的系数表示圆柱体顶部在 y 方向和底部在 $-y$ 方向上同时发生的位移量。如果这5个函数用矢量 $\mathbf{F}_c(z, \theta)$ 表示, 它们的系数用 $\mathbf{a}_c$ 表示, 那么在柱坐标系中理想圆柱体可以用式(4)表示

$$r(z, \theta) = R + \mathbf{F}_c(z, \theta) \mathbf{a}_c \quad (4)$$

式中, $\mathbf{F}_c$ 可以表示为

$$\mathbf{F}_c(z, \theta) = \begin{pmatrix} 1 \\ \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \\ T_1(\zeta) \cos(\theta) \\ T_1(\zeta) \sin(\theta) \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中, $\zeta = \frac{2(z - z_{\min})}{(z_{\max} - z_{\min})} - 1$ 为归一化的 z 的坐标值, 用作 T 的参数。

1.3 非理想表面构建

基函数确定之后, 通过调整对圆柱体半径的修正项可以生成各种形式的非理想圆柱表面, 通过调整系数矩阵来控制实际表面与理想表面的偏离程度^[12]。不同的修正项所对应的柱体形式见表1, 在软件中对这5种非理想表面进行了仿真, 结果如图3所示。

表1 不同修正项对应的柱体形式

Table1 The column forms corresponding to the different correction terms

修正项	非理想柱体形式
$T_1(\zeta)$	锥形
$ T_2(\zeta) $	沙漏形
$- T_2(\zeta) $	桶形
$T_2(\zeta) \cos(\theta), T_2(\zeta) \sin(\theta)$	香蕉形
$T_0(\zeta) \cos(n\theta), T_0(\zeta) \sin(n\theta)$	花瓣形

2 精密滑阀零位内泄漏仿真分析

2.1 仿真流程

首先, 以精密滑阀结构/工艺设计模型为基础, 从微观尺度提取滑阀设计公差信息, 依据上一节中提到的数学方法, 采用切比雪夫/傅里叶模型作为基函数集合, 根据约束信息确定基函数的系数矩阵, 建立伺服阀数学模型; 其次, 采用曲面细分方法, 对该模型作离散化处理, 提取实际滑阀装配界面的点云信息, 再利用逆向建模^[13]的方法实现伺服阀实体的数字化表达; 再次, 以三维实体模型为基础, 通过布尔运算提取伺服阀油液泄漏的几何流道; 最后, 利用CFD方法开展几何量-物理量融合的滑阀油液泄漏量仿真分析。

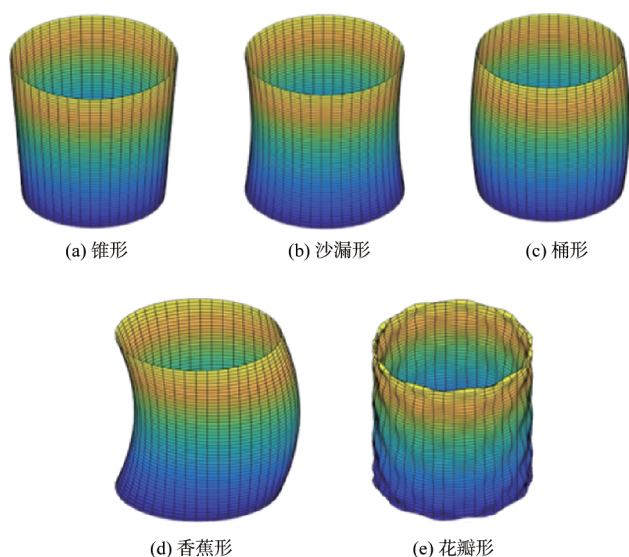


图3 圆柱体的形状误差类别

Fig.3 Shape error category of the cylinder

通过以上仿真流程,可以模拟出精密滑阀在不同表面形貌下对应的零位内泄漏量的值,但是单次模拟需要数十分钟才能完成,在工程实际应用中直接对原模型求解是不现实的。为此,有研究者提出采用代理模型来模拟高精度试验,代理模型采用数据驱动、自下而上的方法建立,主要包括 Kriging 模型^[14]和径向基函数模型^[15]等。一般假定原模型模拟过程的内部精确处理过程未知,但是该模型的输入-输出行为已知。通过在仔细选择的有限个点计算原模型的响应或获取试验值,从而建立代理模型。其计算结果与原模型非常接近,但是求解计算量远远小于原模型或试验,其具体思想如图4所示。

因此,在进行油液泄漏分析之后,利用仿真数据,构建设计参数-滑阀内泄漏量的代理模型,以此为基础,进行设计参数的优化,完整的仿真流程如图5所示。

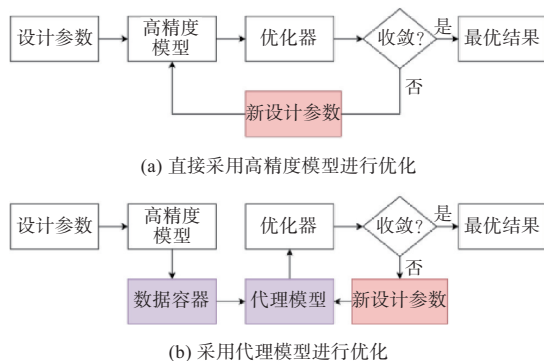


图4 基于代理模型的优化方法

Fig.4 Optimization method based on the agent model

2.2 不同阀芯形状对滑阀内泄漏的影响

在该试验中控制阀套为理想模型,通过改变阀芯表面形貌来研究非理想表面对滑阀内泄漏的影响。从精密滑阀的加工图样中提取到的参数如下:阀芯的直径 $d=10\text{mm}$,阀芯和阀套的配合间隙 $h=0.005\text{mm}$,阀芯的圆柱度公差为 0.004mm 。以锥形误差为例,由表1得出该柱体形式对应的修正项为 $T_1(\zeta)$,调整误差系数为 0.001 时,模拟圆柱体的圆柱度误差为 0.004mm ,数学建模及离散化处理结果如图6所示。

将离散化的点云模型导入逆向建模软件中,依据“点一线一面一体”的逆向建模原则^[13]对阀芯实体进行数字化重构,建模过程及滑阀实体如图7所示。

在逆向建模软件中对滑阀实体模型进行布尔运算,提取滑阀的非理想几何流道,建立流道实体模型如图8(a)所示,对流道模型进行网格划分,网格数量为 870108 ,划分结果如图8(b)所示。

设定求解器类型为压力-速度耦合求解器,工作环境设置为:黏性模型“ k -epsilon—Realizable—标准壁面函数(RWF)”；油液密度为 900kg/m^3 ；流体温度为 20°C ；在此温度下的油液黏度为 $0.0245\text{kg/(m}\cdot\text{s)}$ ；指定压力入口为 2MPa ,压力出口为 0 ；在此条件下,预测滑阀的内泄漏量为 $9.313 \times 10^{-8}\text{m}^3/\text{s}$ 。

基于上述仿真流程,对5种不同柱体形式控制的阀芯与阀套的配合间隙进行内泄漏分析,结果如图9所示。由图9可知,沙漏形状对滑阀内泄漏量的影响最小,桶形状对滑阀内泄漏量的影响最大。

2.3 公差和环境因素对内泄漏的影响

上述试验分析了不同形状的阀芯与理想阀套配合时对精密滑阀零位内泄漏量的影响,现在考虑当阀芯形状保持不变时,控制滑阀副配合偏离程度的尺寸公差和圆柱度公差对内泄漏的影响。该试验仍然保持阀套为理想模型,基于前一节的仿真流程,通过调整阀芯的尺寸公差和圆柱度公差来研究形貌对内泄漏的影响。在滑阀两侧压差为 2MPa ,环境温度为 20°C 时的仿真结果如图10所示。

从图10可以看出,滑阀内泄漏量随尺寸公差的增大而增大,当给阀芯表面添加不同的圆柱度公差,即改变阀芯的表面形貌之后,虽然滑阀内泄漏量整体还是呈增大的趋势,但是泄漏总量发生了明显的变化,说明不同形貌对滑阀内泄漏的影响不容忽视。

此外,进行了一系列的仿真试验,分析了各参数对滑阀

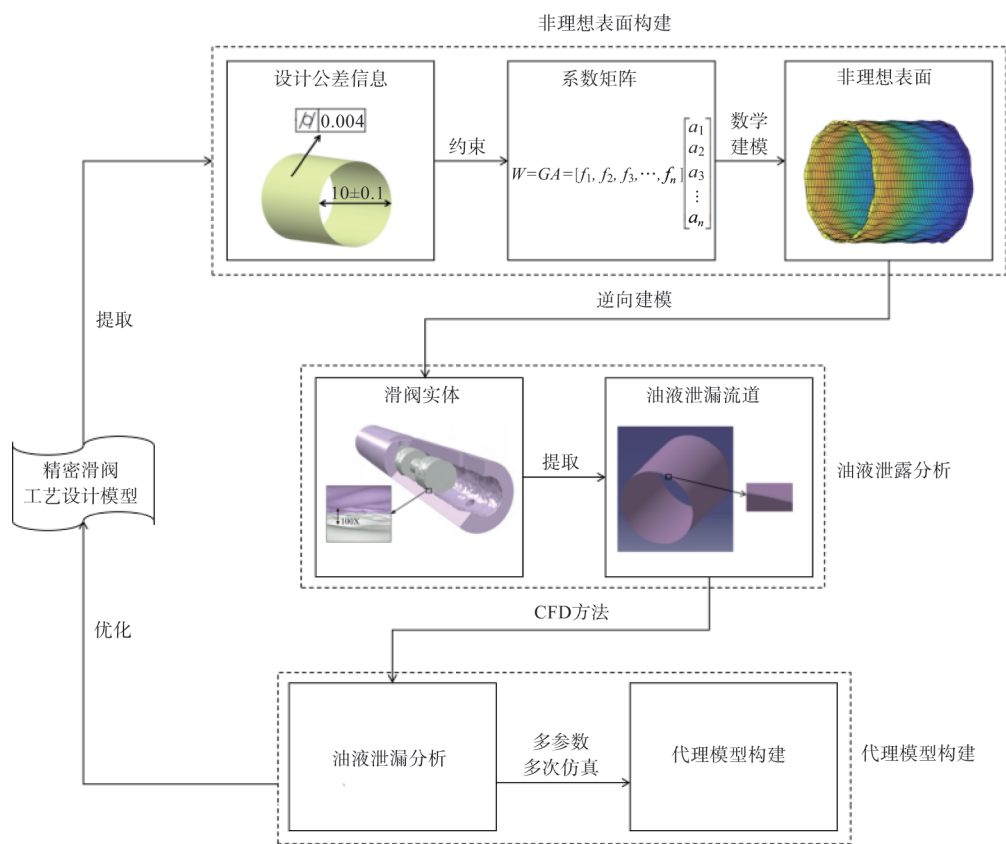


图5 仿真流程

Fig.5 Simulation process

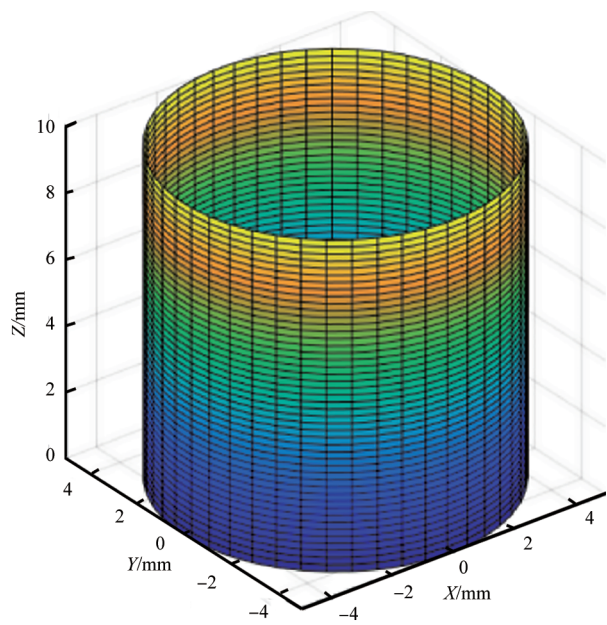


图6 锥形误差圆柱表面的仿真结果

Fig.6 Simulation results of cone-shaped error cylinder surfaces

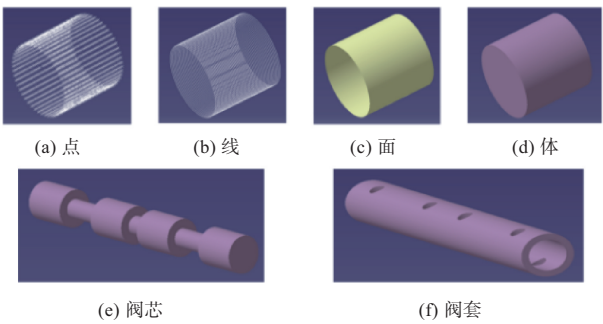


图7 滑阀实体的逆向建模流程

Fig.7 Reverse modeling flow of the sliding valve entity

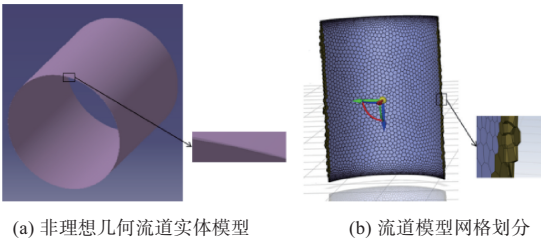


图8 流道模型前处理流程

Fig.8 Pre-processing process of the flow channel model

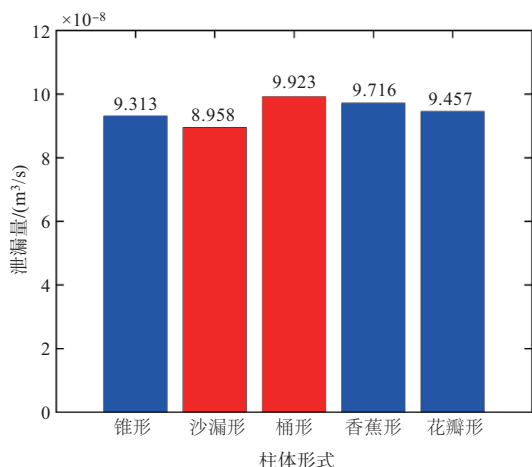


图9 不同柱体形式下滑阀零位内泄漏量

Fig.9 Internal leakage of slide valve zero under different column forms

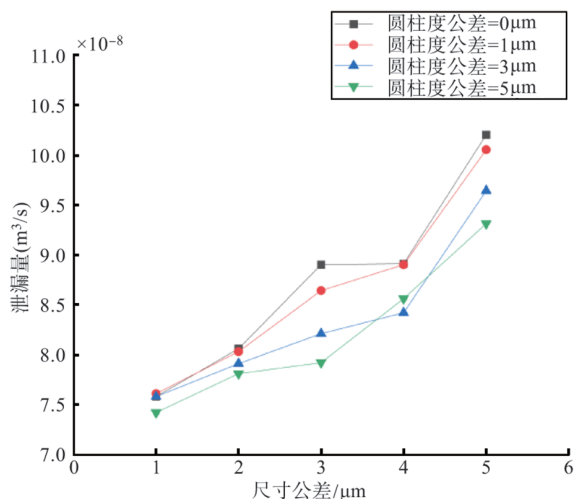


图10 不同形貌对滑阀内泄漏的影响

Fig.10 Effect of different morphology on the leakage in the slide valve

泄漏量的影响,包括滑阀副的配合长度、滑阀两侧的压差和流体温度。图11(a)是压差为2MPa、流体温度为20℃时滑阀副的配合长度对内泄漏的影响图;图11(b)是流体温度为20℃时,滑阀的泄漏量随压差1~5MPa的变化曲线;图11(c)是压差为2MPa时,滑阀的内泄漏量随流体温度从20~80℃的变化曲线。

综合上述分析,可以给出以下精密滑阀设计优化准则:

(1) 阀芯阀套形状优化

根据试验结果,沙漏形阀芯在内泄漏控制方面表现最佳,设计时应优先考虑该形状;另外,在滑阀副配合时阀芯阀套根据偏差形状互补配合也会降低滑阀的内泄漏量。

(2) 设计参数优化

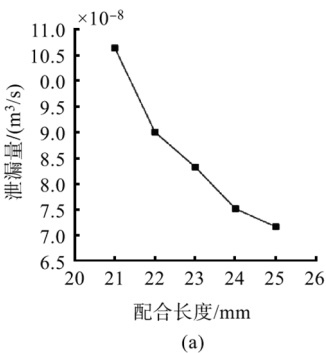
阀芯阀套的尺寸公差和圆柱度公差对内泄漏的影响显著,优化设计时在保证合理的配合间隙下应严格控制公差,确保配合精度,从而减少泄漏量;此外,适当增加滑阀副的配合长度可以有效降低内泄漏。

(3) 工况影响

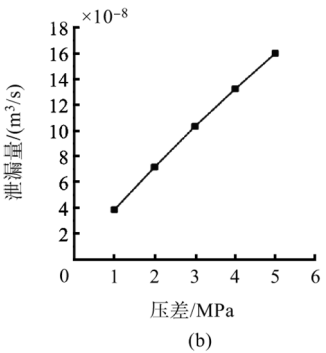
在考虑工作环境时,需评估温度和压差对滑阀性能的影响,选择合适的材料以适应可能的温度变化,保证稳定性。

2.4 基于代理模型的滑阀内泄漏预测

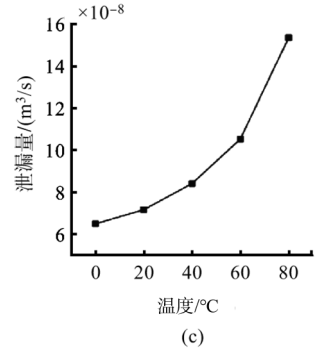
为解决单次仿真时间长,对滑阀内泄漏预测效率低的问题,本文选用Kriging模型^[16]来建立精密滑阀不同设计参数和内泄漏量的映射关系。当滑阀副中阀芯的尺寸公差和



(a)



(b)



(c)

图11 各参数对滑阀泄漏量的影响

Fig.11 Effect of each parameter on sliding valve leakage

圆柱度公差、阀芯和阀套的配合长度以及滑阀两侧的压差和流体温度发生变化时,精密滑阀零位内泄漏量随其变化而改变。式(6)表示了它们之间的函数关系

$$Y=f(s, c, l, p, t) \quad (6)$$

式中, s 为阀芯的尺寸公差; c 为阀芯的圆柱度公差; l 为配合长度; p 为压差; t 为流体温度。

根据上述分析,本文定义精密滑阀零位内漏量的Kriging代理模型的输入变量 $(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5)=(s, c, l, p, t)$,相应得到的Kriging代理模型的输出变量为 Y 。其中,代理模型的输入变量 $X_i(i=1\sim 5)$ 的取值范围见表2。

2.5 代理模型计算精度验证

根据拉丁超立方采样(lhsnorm)规则,从所建立的滑阀副零位内泄漏量中采集50组样本,根据仿真流程分别计算前45组样本在这些工艺参数控制下的滑阀零位内泄漏量的值,以此数据作为训练集建立精密滑阀零位内泄漏量与上述影响因素的映射关系的Kriging代理模型,再利用剩余5组数据作为测试集来检验该代理模型的预测精度与预测效率。

为检验上述代理模型的预测精度,本文选用了复相关系数 R^2 作为评估指标。式(7)为复相关系数的数学表达式

表2 Kriging代理模型输入变量取值范围

Table 2 Value range of input variables in Kriging surrogate model

变量	含义	变化范围
$X_1/\mu\text{m}$	阀芯的尺寸公差	1~5
$X_2/\mu\text{m}$	阀芯的圆柱度公差	1~5
$X_3/\mu\text{m}$	配合长度	21~25
X_4/MPa	压差	1~5
$X_5/^\circ\text{C}$	流体温度	0~80

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (7)$$

式中, $\hat{y}_i$ 为第 i 个测试点的预测值; y_i 为第 i 个测试点的仿真值; $\bar{y}$ 为泄漏量的平均值; n 为测试点的数量。

复相关系数 R^2 的取值范围为 $[0,1]$,数值越大,表明要素或者变量之间的线性相关程度越高,模型的拟合效果越好。一般在工程上认为,当 $R^2 > 0.9$ 时能满足精度要求。图12为测试集的预测结果,可以求得零位内泄漏量 Y 的Kriging模型的复相关系数 R^2 为0.919;测试集5组数据的预测时间为12s,一次仿真流程所需时间为30min。表明文本所建立的Kriging代理模型具有较高的预测精度与预

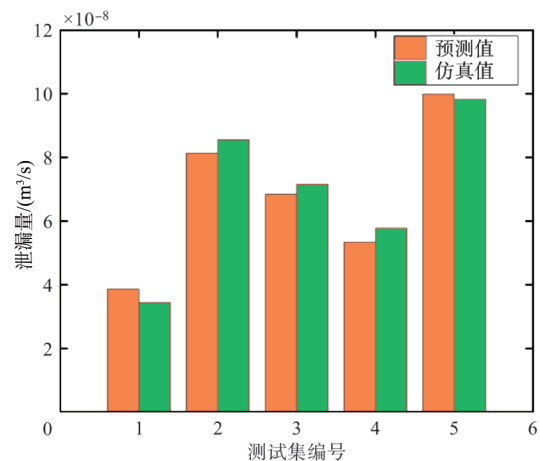


图12 代理模型计算精度验证

Fig.12 Proxy model calculation accuracy validation

测效率。

3 结论

通过研究,可以得出以下结论:

(1) 建立了精密滑阀的非理想几何模型,在宏观层面上描述了配合面的规则形状特征,主要包括锥形、沙漏形、桶形、香蕉形和花瓣形5种误差形式。非理想表面模型综合考虑了精密滑阀在加工过程中由于加工误差所引起的尺寸误差和圆柱度误差的参数摄动,并为后续性能预测提供几何基础。

(2) 利用CFD仿真流程分别模拟了阀芯在不同偏差形式下对滑阀零位内泄漏量的影响。结果表明,沙漏形柱体与理想阀套配合的内泄漏量最少,桶形柱体与理想阀套配合的内泄漏量最大;此外,在阀芯形状保持不变时,分别分析了各种因素对滑阀内泄漏的影响,包括尺寸误差、圆柱度误差、配合长度、压差和流体温度,得到了内泄漏量与上述因素的影响关系图,表明滑阀配合表面的形貌对内泄漏的影响不容忽视。

(3) 基于Kriging代理模型建立了滑阀副零位内泄漏量与各种参数的映射关系,采用复相关系数 R^2 检验代理模型的预测精度,结果表明泄漏量 Y 的Kriging代理模型复相关系数为0.919;比较了代理模型与仿真流程的预测时长,表明所建立的Kriging代理模型具有较高的预测精度与预测效率,可体现出滑阀副零位内泄漏量在实际加工条件下的分布特性,可用于指导实际工程应用中旨在减小滑阀副泄漏量的加工工艺参数优化设计。

参考文献

- [1] Qiu Chan, Liu Zhenyu, Peng Xiang, et al. A non-ideal geometry based prediction approach of fitting performance and leakage characteristic of precision couplings[J]. IEEE Access, 2018, 6 (58):204-212.
- [2] 何毓明, 彭利坤, 宋飞. 基于 AMESim 的液压滑阀中位内泄漏仿真研究[J]. 液压与气动, 2018, 7(5):74-80.
He Yuming, Peng Likun, Song Fei. Simulation study on internal leakage of hydraulic slip valve based on AMESim[J]. Hydraulics & Pneumatics, 2018, 7(5): 74-80.(in Chinese)
- [3] 宋飞, 陈佳, 彭利坤, 等. 液压滑阀内泄漏试验研究[J]. 流体机械, 2021, 49(7): 1-6, 28.
Song Fei, Chen Jia, Peng Likun, et al. Experimental study on internal leakage of hydraulic spool valves [J]. Fluid Machinery, 2021, 49(7): 1-6, 28.(in Chinese)
- [4] 周梓荣, 彭浩舸, 曾曙林. 环形间隙中泄漏流量的影响因素研究[J]. 润滑与密封, 2005, 18(1): 7-9, 19.
Zhou Zirong, Peng Haoge, Zeng Shulin. Study on influencing factors of leakage flow in annular gaps [J]. Lubrication Engineering, 2005, 18(1): 7-9, 19.(in Chinese)
- [5] 赵海峰, 侯友夫. 微元体分析法在偏心环状缝隙流动公式推导中的应用[J]. 液压与气动, 2005, 9(11): 49-52.
Zhao Haifeng, Hou Youfu. Application of finite element analysis method in derivation of flow formula for eccentric annular gap [J]. Hydraulics & Pneumatics, 2005, 9(11): 49-52. (in Chinese)
- [6] Gordić D, Babić M, Milovanović D, et al. Spool valve leakage behaviour[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2011, 11(4): 859-866.
- [7] 刘冀民, 孙松林, 刘启定, 等. 三位液压换向滑阀对中性对其内泄漏量的影响[J]. 农业机械学报, 2001, 14(5):72-74.
Liu Jimin, Sun Songlin, Liu Qiding, et al. Influence of three hydraulic directional control valves on neutral position internal leakage [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 14(5): 72-74.(in Chinese)
- [8] 薛晓虎. 液压系统缝隙内流体泄漏特性的分析[J]. 机械工程学报, 2004, 21(6):75-80.
Xue Xiaohu. Analysis of fluid leakage characteristics in hydraulic system gaps [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2004, 21(6): 75-80.(in Chinese)
- [9] Goharrizi A Y, Sepehri N. A wavelet-based approach for external leakage detection and isolation from internal leakage in valve-controlled hydraulic actuators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 58(9):4374-4384.
- [10] Eryilmaz B, Wilson B H. Combining leakage and orifice flows in a hydraulic servovalve model [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2000, 122(3):201-209.
- [11] Qiu Chan, Liu Zhenyu, Bu Wei, et al. Hybrid dimension based modeling of part surface topography and identification of its characteristic parameters[J]. Applied Surface Science, 2012, 258(18):7082-7093.
- [12] Henke R P, Summerhays K D, Baldwin J M, et al. Methods for evaluation of systematic geometric deviations in machined parts and their relationships to process variables[J]. Precision Engineering, 1999, 23(4): 273-292.
- [13] 顾文文. 基于逆向工程的船舶曲面数字化设计方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
Gu Wenwen. Research on ship surface digital design method based on reverse engineering [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.(in Chinese)
- [14] 许瑞飞, 段卓毅, 钱瑞战. 基于 Kriging 代理模型的高升力构型优化设计[J]. 航空科学技术, 2023, 34(3): 58-63.
Xu Ruifei, Duan Zhuoyi, Qian Ruizhan. Optimization design of high-lift configurations based on the Kriging surrogate model[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(3): 58-63.(in Chinese)
- [15] 江嘉伟, 程起有, 刘正江, 等. 基于多项式响应面 MDOE 的低速风洞试验方法研究[J]. 航空科学技术, 2024, 35(6):114-120.
Jiang Jiawei, Cheng Qiyu, Liu Zhengjiang, et al. Study on low-speed wind tunnel test method based on polynomial response surface MDOE[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(6):114-120.(in Chinese)
- [16] Krige D G. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 1951, 52(6): 119-139.

Simulation and Analysis of Zero Position Internal Leakage Characteristics of Precision Slide Valves Considering Non-ideal Surfaces

Zhang Zepeng, Tang Wenbin, Yan Tong

Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China

Abstract: Precision slide valve is widely used in the field of aerospace industry, and its internal leakage characteristics directly affect the system performance and energy efficiency. Accurate prediction of the sliding valve leakage is crucial to optimize the design and improve the product quality. At present, most of the studies of precision slide valve leakage are based on the ideal smooth surface, which ignores the change of assembly interface geometry caused by the machining error, resulting in the low prediction accuracy of the leakage of precision slide valve. This paper proposes the simulation analysis method of the internal leakage characteristics of precision sliding valve considering the non-ideal surface. First, using the Chebyshev/Fourier model as the base function, this study constructed the typical deviation form, including cone shape, barrel shape, banana shape and petal shape; then, it established the slide valve entity with non-ideal surface, extracted the nonideal geometric channel of oil leakage, and analyzed the influence of the deviation coordination surface on the leakage by calculating fluid dynamics (CFD) method; finally, the Kriging agent model of various factors and the leakage in the slide valve is established. The results show that the hourglass shape has the least impact on the leakage in the slide valve, and the barrel shape has the greatest impact on the leakage; the agent model predicts the leakage and improves the prediction efficiency.

Key Words: precision slide valve; internal leakage; reverse modeling; CFD; Kriging

Received: 2024-08-06; **Revised:** 2024-11-05; **Accepted:** 2025-01-06

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(52105559); Aeronautical Science Foundation of China (2022Z050111001); Xi'an Science and Technology Plan Project(23GXFW0022)