

# 基于树莓派的空化检测设备研制及控制系统优化

吴华杰, 陈文刚, 王海军, 陈龙, 尹红泽, 井培尧, 王雨豪

(西南林业大学 机械与交通学院, 昆明 650224)

**摘要:** 为研究表面织物的形状、大小、位置、排列与空化现象发生的关系, 结合流体动力学和摩擦学等理论, 拟设计以活塞裙部-缸套为模型建立检测表面织物在摩擦时发生空化现象的装置; 由于空化泡发生的瞬时性, 设计一种基于 Raspberry Pi 树莓派微型计算机的空化设备控制系统, 降低系统的延时性, 准确地采集到数据进而分析得出结论; 采用 TLC549CP A/D 数据采集器、膜盒式传感器、OSG030-815UM 超高速工业摄像机组成检测系统, 分别对温度、压力、图像的输出参数进行采集; 通过 Java 语言开发的空化参数采集平台对空化现象发生参数进行实时计算并显示; 与树莓派原系统相比, 优化后的系统可以准确地采集到空化发生时的参数, 并且有低延时性和优异的稳定性, 能够降低延时到 1.73 ms, 降低了约 81%。

**关键词:** 空化检测设备; Raspberry Pi; 减摩抗磨; 表面织物; Java 语言; 系统优化

## Development of Cavitation Detection Equipment and Optimization of Control System Based on Raspberry Pi

WU Huajie, CHEN Wengang, WANG Haijun, CHEN Long, YIN Hongze, JING Peiyao, WANG Yuhao  
(College of Machinery and Communication, Southwest Forestry University, Yunnan 650224, China)

**Abstract:** In order to study the relationships of the shape, size, position, arrangement of surface texture and the occurrence of cavitation, combined with theories of fluid dynamics and tribology, it is proposed to design a device to detect the cavitation phenomenon of surface texture during friction by using the piston skirt-cylinder liner as a model; Due to the instantaneous nature of cavitation bubbles, a cavitation equipment control system based on Raspberry Pi microcomputer is designed to reduce the delay of the system, accurately collect the data and then analyze and draw the conclusions; The detection system is composed of TLC549CP A/D data collector, capsule sensor, OSG030-815UM ultra-high-speed industrial camera, and the output parameters of temperature, pressure and image are collected respectively; The parameters of cavitation phenomenon are calculated and displayed on the cavitation parameter collection platform developed by Java language in real time; Compared with the original system of the Raspberry Pi, the optimized system can accurately collect the parameters when the cavitation occurs, and has low latency and excellent stability, which can reduce the delay time of 1.73 ms and is reduced by about 81%.

**Keywords:** cavitation detection equipment; raspberry pi; anti-friction and anti-wear; surface texture; java language; system optimization

## 0 引言

表面织物技术已被证明是改善摩擦副摩擦学性能的有效手段。其在摩擦表面加工出具有一定尺寸参数、几何形貌、排列方式的规则织物, 当摩擦副相对运动时, 由于表面织物的楔形效应使相对运动表面间产生附加流体动压力, 从而产生流体动压润滑效应, 流体之间的动压效果会引发空穴现象<sup>[1-3]</sup>。因此, 研究表面织物中发生的空化现象, 实质上就是在研究物体间的流速和压强的变化关系, 其对于提升缸套表面承载力、产生抗磨减摩的作用有着重要意义<sup>[4-5]</sup>。

近些年来, 随着科学技术的进步以及对空化的深入研

究。陈银银<sup>[6]</sup>等人将空化设备分成超声、水利、涡流、突体等并逐一阐明不同设备的工作原理。吕福炜<sup>[7]</sup>等采用 CFD 方法对文丘里管的空化流体动力学特性和稳流特性进行了研究, 并得出结论, 空化现象的出现是文丘里管稳流作用的必要条件。Gogate 等<sup>[8]</sup>利用空化现象进行物理和化学转化, 分析了水力空化相对于声空化在基本机理、气泡动力学、最佳参数等方面的优势。Martin 等<sup>[9]</sup>通过透明文丘管截面的表面上发现了空化现象, 同时使用两台高速摄像机同时记录空化结构和载体表面状态, 分析结果表明, 空化云和坍塌时离壁面的距离有关, 同时也发现了空蚀现象。

收稿日期: 2022-05-05; 修回日期: 2022-06-07。

基金项目: 国家自然科学基金(51865053)。

作者简介: 吴华杰(1995-), 男, 江苏盐城人, 硕士, 主要从事机械摩擦磨损及控制方向的研究。

通讯作者: 陈文刚(1973-), 男, 辽宁人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事机械摩擦磨损机理及控制、材料表面复合改性、微米尺度机械摩擦磨损特性研究等方向的研究。

引用格式: 吴华杰, 陈文刚, 王海军, 等. 基于树莓派的空化检测设备研制及控制系统优化[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(9): 113-118, 234.

然而现有的空化设备都不能精确的观测空化在复杂结构中的发生过程及行为轨迹，也无法研究其中产生的摩擦机理和流体力学现象。鉴于此，研制出能够观测空化发生过程的设备对于相关研究变得更为重要。

## 1 空化理论及模型建立

### 1.1 空化理论

空化的本质是相变，是固体和液体之间的相变<sup>[10-11]</sup>。其中固体是活塞与缸套，液体是存在于其中间的润滑油，微小空化泡的发生是由于固体与液体之间产生了位移所导致的。空化现象是液体流动中非常重要的现象。微凹坑产生微小空化泡形成空化群，空化群形成空穴，空穴的产生会提升油膜承载力，油压在空化区变化升高，如图 1 所示，结构磨痕区域，沿着流体流动方向，区域一处的磨痕明显比区域二处的深并且划痕更多，这就是空化带来的流体动压润滑效应。

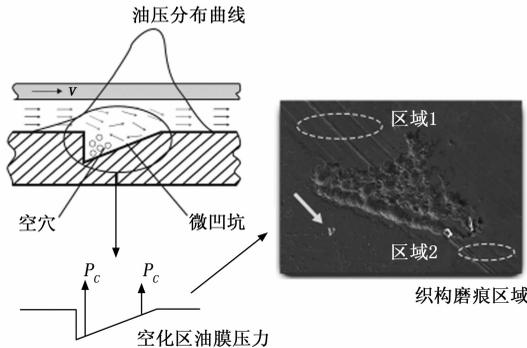


图 1 流体动压润滑效应原理及承载力提升效果微观图

近些年，在空化现象分析中引入相变模型，包括修正后的 N-S 模型，都是为了更加贴近于空化现象的物理机制。Li 等<sup>[12]</sup>以油膜轴承为例，油膜轴承会发生空化现象，主要原因是滑动轴承中使用的润滑油饱和蒸气压发生变化，其值总是远远低于空化区的测量压力。例如 ISOVG22 润滑油在 20℃ 时的绝对蒸气压约为  $3 \times 10^{-6}$  Pa，在 100℃ 时仅为 0.4 Pa。本文认为活塞裙部与气缸套的摩擦主要是由溶解的机油与汽油燃烧时的固体颗粒物和未排放出去的废气再次参与其中结合形成的内部空气进行混合摩擦，从而在活塞裙部一缸套表面产生空化反应。因此需要测定润滑油不同时期的饱和蒸气压压强以及测量空化区的压力，为了对是否发生结果进行验证，将 N-S 模型和 JFO 质量守恒定律模型引入到活塞裙部一缸套的空化模型中，如图 2 所示。将 N-S 模型能够计算薄膜区的压力变化，JFO 模型的引入是为了将薄膜区的压力结果代入计算求解出空化区的压力变化，从而探究活塞裙部与缸套相互摩擦形成的空化形式。

### 1.2 空化模型建立

基于 N-S 模型的雷诺方程。提出对活塞裙部一轴套润滑输出模型的假设：考虑密度和粘度的空化，柱坐标系中的 Navier-Stocks 模型（如图 1 所示表面织构润滑油模型）可以简化为式 (1) 所示。

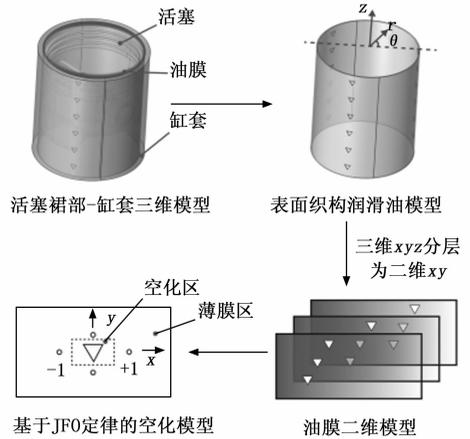


图 2 基于 JFO 理论的活塞裙部一缸套空化模型

$$\frac{\partial p}{r \partial \theta} = \frac{\partial}{\partial r} \left( \mu \frac{\partial u_{\theta}}{\partial r} \right)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial r} \left( \mu \frac{\partial u_z}{\partial r} \right)$$

$$\frac{\partial (\rho u_{\theta})}{r \partial \theta} + \frac{\partial (\rho u_r)}{\partial r} + \frac{\partial (\rho u_z)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

然后，可以得到相应的雷诺方程为式 (2) 所示。

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{\rho h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\rho h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = \frac{\omega}{2} \frac{\partial (\rho h)}{\partial \theta} + \frac{\partial (\rho h)}{\partial t} \quad (2)$$

其中： $p$  表示为压强， $\rho$  表示为油膜密度， $\mu$  表示为动态粘度取决于局部压强， $r$  为油膜半径， $u$  为流体流速， $\theta$  为油膜间隙， $z$  为控制区域的节点坐标， $h$  为润滑油膜厚度， $t$  为流体运动所用时间。

基于 JFO 理论的活塞裙部一缸套空化模型<sup>[13]</sup>。根据 Elrod 和 Pawlus 等<sup>[14]</sup>所研究一种空化迭代算法研究基础上优化为活塞裙部一缸套的空化模型。JFO 边界条件是在薄膜区和空化区交界处运用质量守恒定律，考虑膜破裂等情况，目的是在整个润滑区域建立以  $\theta$  的线性方程组，由于  $\theta$  在薄膜区和空化区都适用，使在薄膜区和空化区得到连续性方程，从而得出空化区域对整个薄膜区域面积的比值，即空化比。运用 JFO 空化理论可以将活塞裙部一缸套的空化模型简化为二维质量守恒问题，更便于计算和分析。

在活塞裙部与缸套摩擦接触时，假设空气在进入缸套之前完全溶解在润滑剂环境中。如果油膜压力降低，溶解空气的溶解度和排放会发生变化，由于溶解度降低所以从油中溶解的空气所排放的空气比标准体积 ( $T_0 = 273.16$  K,  $P_0 = 101.325$  kPa) 小。设空化区的压力为  $p_c$ ，在整个润滑区域内，由于压力的变化，流体密度也会发生变化。由于润滑油会轻微压缩，油膜的质量将超过压力为  $p_c$  时的质量，相应的薄膜压力为式 (3) 所示：

$$p = p_c + \beta(\theta - 1) \quad (3)$$

其中： $\beta$  表示润滑剂的压缩性为变量， $1 - \theta$  的值等于空腔率。

在薄膜区和空化区之间的流体处于对流状态，由于空

化区的质量最终要与周围的网格中的质量趋于平衡状态, 所以以空化区为中心上下左右四个点建立模型, 模型上建立二维  $x$ 、 $y$  轴坐标系 (如图 1 所示 JFO 定律的空化模型), 当膜厚度  $h$ , 流体表面速度  $iU+jV$ , 部分膜间隙  $\theta$  已知时, 代表膜间隙  $\theta$  定义的空化指数  $g$  方程为:

$$g = 0; \theta < 1$$

$$g = 1; \theta \geq 1$$
(4)

空化指数  $g$  在空化区内数值为 0, 在薄膜区其他地方数值为 1, 例如位于 -1 点空化指数  $g_{-1}=0$ 。为了计算出空化区的质量变化, 因此提出空化区质量守恒方程的算法, 主要针对压力梯度变化对油膜质量的定义, 从而得到式 (5) (以  $x$  方向为例,  $U>0$ ):

$$(m'_x)_{\text{pressure}} = \left( \frac{h^3}{12\mu} \right)_{\text{av}} \beta \rho_c \left\{ \frac{g_{-1}(\theta_{-1}-1) - g_0(\theta_0-1)}{\Delta x} \right\}$$
(5)

其中:  $\Delta x$  控制区域  $x$  轴上的变化量,  $g_{-1}$ 、 $g_0$  为润滑区域 -1、0 点的空化值,  $\theta_{-1}$ 、 $\theta_0$  为润滑区域 -1、0 点的薄膜值,  $\rho_c$  为空化区的油膜密度。

方程式 (3) 已经对油膜压力进行求解, 压力梯度的变化在薄膜区也都是有效的, 然而在空化区时值将会变成 0, 此时需要对膜破裂处进行插值计算, 公式 (4) 和 (5) 之和可以得出总质量分量  $\dot{m}_x$ , 同样表达式也适用于  $y$  方向。当油膜质量的净流出量等同于质量的下降量时, 将会得到一个微分方程如式 (6) 所示:

$$\Delta y \Delta m'_x + \Delta x \Delta m'_y = (\Delta x \Delta y) \partial \left( \frac{\rho_c h \theta}{\partial t} \right)$$
(6)

其中:  $\Delta x$  控制区域  $x$  轴上的变化量,  $\Delta y$  控制区域  $y$  轴上的变化量,  $\rho_c$  为空化区油膜密度, 是  $\Delta m'_x$  沿流体流动  $x$  方向上质量的微分,  $\Delta m'_y$  为沿流体流动  $y$  方向上质量的微分。

JFO 边界条件在薄膜区内, 方程就变为雷诺方程, 方程形状呈椭圆形。在空化区内, 它就变成抛物线方程, 除了空化指数之外使线条产生连续性, 方程结果呈线性表示。如果对公式 (6) 进行时间求解, 找到相容  $\theta_{i,j}$  和  $g_{i,j}$  的解, 将会求出活塞裙部一缸套模型的空化值的解, 从而计算出空化比, 对判断是否发生空化现象以及空穴的大小起重要作用。

## 2 表面织构空化发生检测设备

### 2.1 设备结构设计

表面织构空化发生检测装置所用上试样带有表面织构, 通过电机驱动装置驱动电机与下试样在高硼硅油槽中进行旋转式摩擦, 模拟发动机活塞裙部一缸套的实际摩擦形态和工作状态。温度调节装置设置了实验温度, 通过控制环形加热器调节实验的温度, 并模拟了活塞在气缸内往复运动时的高温环境。在下试样的底部和高硼硅油槽之间设置两个膜盒式压力传感器, 用于测量和采集试样上试样旋转时的冲击压力。载荷槽会增大上试样的法向压力, 试验可以在不同的负荷条件下进行比较, 最大承受载荷为 200 N。

在此基础上, 通过手动添加润滑油的方式对其进行单独控制, 采集不同时期的油样, 并进行了油样的测试, 设备的基本组成和功能原理图如图 3 所示。

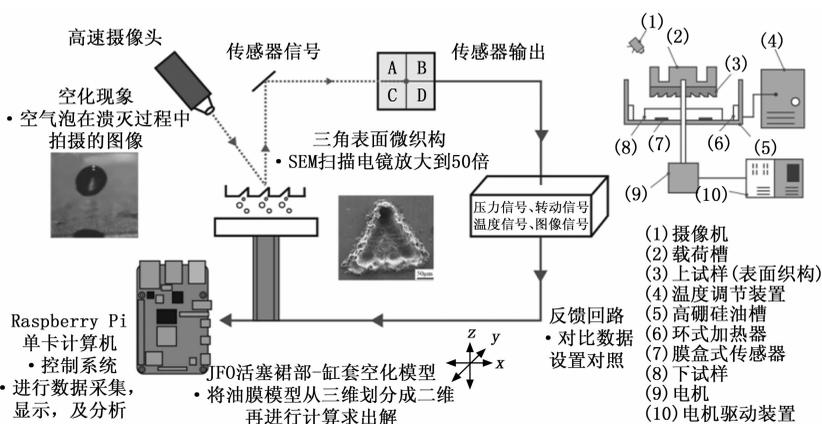


图 3 空化检测设备的基本组成及功能

### 2.2 基于 Raspberry Pi 树莓派微型计算机的空化设备控制系统

空化设备控制系统主要有数据运算装置、电机控制装置、压力测量装置、温度测量调节装置、图像采集装置及模数信号转换装置对空化参数进行采集, 并在空化采集平台上显示, 设备的系统总体结构框图如图 4 所示。

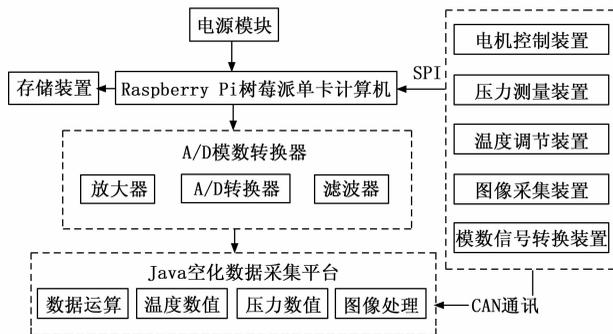


图 4 空化检测设备系统总体架构

在空化设备控制系统中, 模数信号转换器将采集到的电机、压力、温度、图像等信号传送到树莓派中, 由树莓派对空化发生参数进行运算, 并在雷诺方程和 JFO 活塞裙部一缸套的空化模型方程中进行联立求解, 利用高速摄像机获取空化发生时的空化图像和记录气泡的运动规律, 从而判定表面织构发生的空化现象。

1) 数据运算装置。树莓派将收集的数据信号显示并进行处理, 使用 Raspberry Pi 树莓派单卡计算机进行数据运算<sup>[15]</sup>。树莓派主要功能包括 Broadcom BCM2711 主控芯片、供电电路、显示电路、视频输入电路、POE 供电电路、工作状态显示电路、复位电路等组成。

2) 电机控制装置。采用 A1SVD-15A 变频器, 对伺服电机进行变速控制, 可实现 0~3 000 r/min 范围内的无级可调<sup>[16]</sup>。电机驱动装置带动上试样和载荷槽旋转, 记录转

动时的扭矩和功率损耗情况,测定上试样旋转的速度大小,针对旋转时电机输出的功率损耗情况可以为空化泡的发生、生长、溃灭的瞬间能量损耗情况进行间接判断,判断电机消耗的功率是否与空化泡损耗的能量成正比。

3) 压力测量装置。实验中在下试样底部装有膜盒式测力传感器,在上下试样转动过程中,上试样通过与下试件的摩擦作用,使下试件所模拟的活塞裙部与缸套产生相对运动,上试样所受的负荷在 0~200 N 之间,试件之间的压力通过膜盒式传感器测量。

4) 温度调节装置。由电热棒加热管加热,在 25~300 ℃ 的温度范围内,利用与气缸套相接触的电热偶<sup>[17]</sup>获得温度信号,并用 XMT 型智能温控器对其进行控制和显示。

5) 图像采集装置。Tanabe 等<sup>[18]</sup>开发出以间隔的高速激光频闪摄像系统,对激光诱导的空化气泡动力学进行成像分析,发现气泡坍塌时,经过多次脉冲辐照,气泡的气相与周围液体发生混合形成阴影,阴影在 10 μs 内消失,单个气泡发生坍塌的范围为 3 mm×3 mm。从 Dular 等<sup>[19]</sup>研究发现可以看到空化泡发生的时间仅有 2~3。采用 OSG030-790UMTZ 型工业超高速摄像机搭配红外摄像头,对上下两个试样在摩擦过程中的空化泡的发生、生长、溃灭的过程进行拍摄采集,并对图像的清晰度及图像配准进行后处理<sup>[20]</sup>。图像采集装置对空化发生过程进行拍摄,主要是记录空化现象发生的准确时间和空化发生图像。

6) 模数信号转换系统。模数信号转换装置包括 A/D 转换器和数字信号处理器,A/D 转换器主要为温度、压力等传感器放大信号。数字信号处理器主要将收集的频率和声音时域信号进行快速傅里叶变换转换成频域信号。采用 TLC549CP A/D 数据采集器,主要目的是从压力、摄像、温度及电机装置将数据转换到数据运算系统中。

### 3 基于 Java 语言开发的空化参数采集平台

对于 JFO 活塞裙部—缸套空化模型中的饱和蒸气压和空化率的数值研究,需要采集流体膜厚、空隙率、空泡释放压力、流体流速、流体流经时间、实际温度等值并代入雷诺方程计算,空化参数采集平台主要对空化发生参数进行采集并在程序中显示。

#### 3.1 空化参数采集平台流程设计及程序

空化参数采集平台采集空化发生参数集成在基于 JAVA 的空化采集平台上。在空化设备控制系统中,由设备中的温度、压力、转速传感器进行采样,再把差值转化为信号,经过 RS485 通讯装置将模拟电路传回树莓派中,其向电路中发出特定的信号,经过连接 GPIO 接口发送到传感器中。空化参数采集平台的流程如图 5 所示。程序中显示温度指示、压力传感器信号、空化泡图像以及设备的转速和功耗等信息。

#### 3.2 装置连接测试

空化检测装置主要是通过收集空化泡形成过程中的压力、温度、图像等参数。当空化泡溃灭时会产生冲击并且

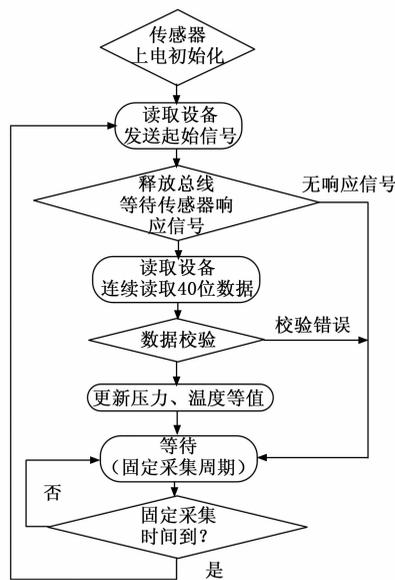


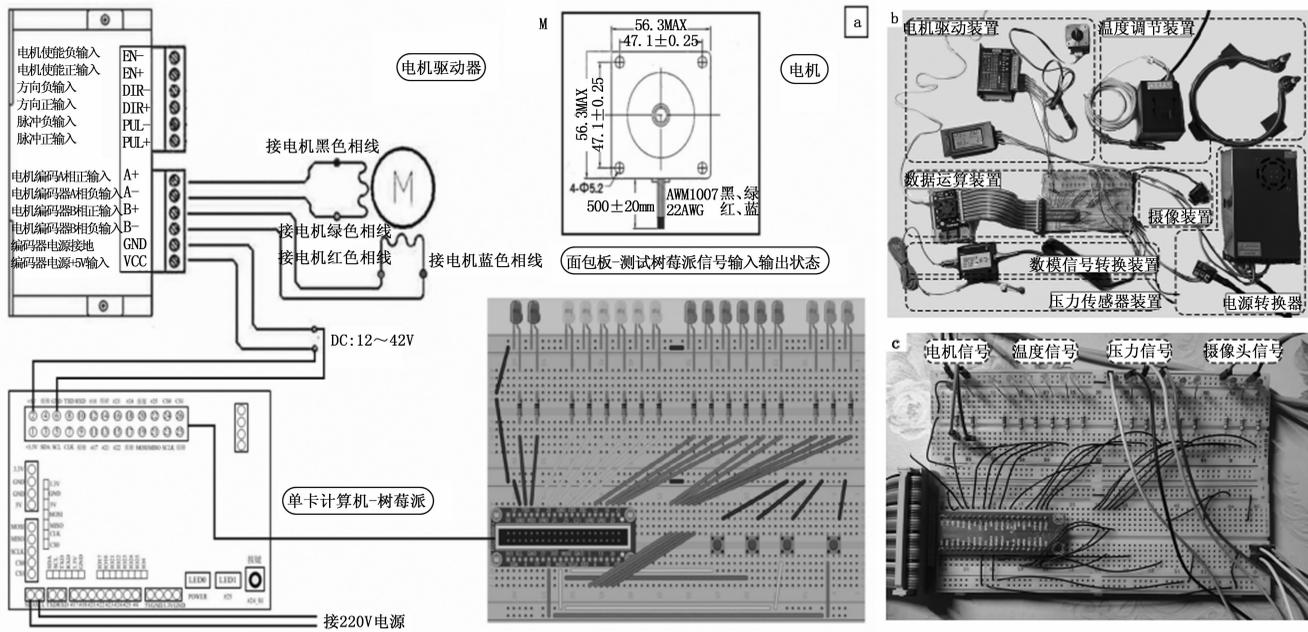
图 5 空化参数采集平台运行流程图

在表面织构上形成凹坑,压力和温度数值都会发生变化。连接测试主要收集空载时的电机扭矩、图像清晰度等参数,为后续试验样本提供参数对照。为确保设备在整机装备前各功能工作正常,以及可靠性测试,测试阶段将外置面包板连接 LED 灯和金属膜电阻测试,符合正常连接时的流程并达到正常运转。对压力传感器、摄像、温度传感器及电机等装置进行了连接测试,以 LED 灯的闪烁状态作为判断是否正常传输数据以及传输数据快慢的标准,如图 6 (c) 所示。树莓派作为电机的脉动信号输入装置,控制电机驱动器的电流,带动电机转动。面包板上的 LED 灯指示电机状态,接收到信号灯闪烁,从而判断电机运行的情况,电机通过其四根输入输出相线,达到运转的目的。其中树莓派连接面包板,给面包板 3.3 V 的驱动电压,面包板连接电机驱动器,给驱动器 5 V 的电压,电机驱动器驱动电机转动,经过测试记录 10 组,每组运行 2 小时的电机消耗功率、压力变化曲线、温度变化曲线、以及摄像清晰度等均值,接线实物图为图 6 (a)。温度传感器、压力传感器、摄像头装置与电机装置的连接方式类似,如图 6 (b)。

#### 3.3 系统优化测试

针对空化现象发生时气泡生成的速度快、时间短的特点,当延时性偏高时系统无法准确地采集到空化泡发生过程中的相关数值,原系统在延时性和稳定性上无法满足,需要对控制系统进行优化。系统优化测试中主要对 Raspberry Pi 控制系统进行优化。以 Debian 作为底层系统架构,基于 JAVA 语言进行程序设计,使用 ext4 文件系统,修改系统源为清华源,支持 Web 可视化管理、QEMU-KVM 虚拟化、Docker 容器等系统特性。

对系统的延时性及稳定性进行了如下的测试,基于 Linux 操作系统对原系统和优化后的系统从 CPU 性能、磁



(a) 装置连接测试示意图

(b) 装置连接测试实物图

(c) 测试信号连接

图 6 装置进行连接测试

盘 I/O 性能、内存分配及传输速度进行总共 40 次连接测试。CPU 处理速度响应时间对比测试 10 组共 20 次, 3G 文件读取写入对比测试 5 组共 10 次, 测试 8 K 顺序 & 随机分配对比测试 5 组共 10 次。测试方法为在 Linux 上安装 Sysbench 软件, 设置 CPU 事件数、线程及文件大小进行测试。对连接的设备 CPU 性能对比实验得出, 测试 Raspberry Pi 系统 10 组的读取 20 000 个事件数平均时间为 46.304 7 s, 优化后的系统平均读取时间 10.001 45 s, 提升了约 3.63 倍, CPU 性能的执行测试时间及性能如表 1 所示。对连接的设备 CPU 延时性能对比实验得出, 测试 Raspberry Pi 系统 10 组的平均延时为 9.259 ms, 而获取经过程序设计的程序进过相同的操作得到 10 组延时数据的平均数为 1.731 ms, 降低了约 81%, CPU 执行测试延时性能如表 2 所示。

对 3 GB 文件大小读取和写入时间进行 5 组对比测试, 从而能看出优化后系统的读取时间平均值为 10.13 s, 未优化的系统读取时间平均值为 16.97 s, 提升了 40.3%, 说明

优化后系统的磁盘 I/O 读取速度有较大的提升, 系统磁盘 I/O 性能对比如图 7 (a) 所示。在从内存分配的 8 K 顺序和随机分配对比, 优化系统传输 10 240 MB 传输量为 17 725.11 MiB 的执行时间为 0.57 s、平均延时为 0.02 ms、最大延时 22.44 ms, 原系统传输 2 048 MB 传输量为 6 273.80 MiB 的执行时间为 0.33 s、平均延时为 0.00 ms、最大延时 19.15 ms, 从对比结果来看在传输量相差 4 倍时, 内存分配及传输速度的延时相差不大, 如图 7 (b) 所示, 从而能够看出优化后的系统对空化设备控制系统在传输和处理数据方面的提升都较为明显。

## 4 结束语

### 4.1 结论

1) 对发动机活塞裙部一缸套之间的摩擦形式进行研究, 活塞裙部和表面织构化缸套与润滑油之间的摩擦会引发空化现象, 引起流体动压润滑效应, 由于空化现象较为复杂, 需要对其测定润滑油不同时期的饱和蒸气压压强、空

表 1 CPU 系统综合性能优化前后对比

CPU 性能/平均值	CPU 速度/MHz	统计数据		线性公平	
		总时间/s	事件总数	事件(平均/标准偏差)	执行时间/s(平均/标准偏差)
Debian 优化系统	2 310.454	10.001 45	23 118	5 779.5/31.395	9.996 89/0.00
Raspberry Pi 系统	1 003.25	46.304 7	20 000	5 000/21.08	46.296 18/0.00

表 2 CPU 系统延时性能优化前后对比

CPU 性能/平均值	延时/ms				
	最小	平均	最大	第 95 个百分点	共计
Debian 优化系统	1.7	1.731	13.31	1.73	39 987.514
Raspberry Pi 系统	9.069	9.259	41.508	9.301	183 765.422

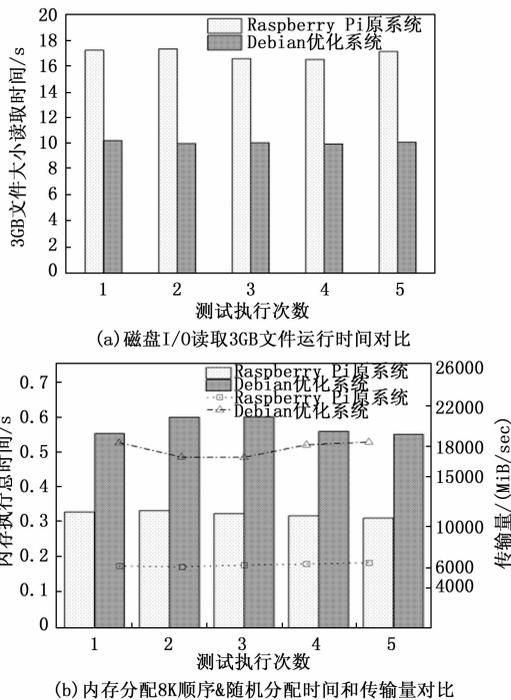


图 7 控制系统优化前后传输和处理数据对比

化区压力等相关数值，因此引入 N-S 模型和 JFO 模型对其摩擦形式及发生空化现象的空化发生参数进行数值求解，判断是否发生空化以及空化区的大小。

2) 空化检测设备采集系统主要由数据运算系统、电机转速控制系统、压力测量系统、温度控制测量系统、图像采集系统以及模数信号转换系统组成，模数信号转换器将采集数据转换到树莓派中进行运算并求解，利用高速高倍摄像机拍摄空化发生时的图像和记录气泡的运动规律，基于 Java 语言的空化采集平台对转速、温度、压力等信号数据进行采集，并在空化采集平台上显示以及图像后期处理。

3) 对空化设备控制系统进行优化。在 CPU 的读取性能方面，优化后的系统比 Raspberry Pi 系统在读取速度上提升了约 3.63 倍，延时性从 9.26 ms 降到 1.73 ms，降低了约 81%；在磁盘 I/O 性能方面，3 GB 文件写入优化后系统的读取时间平均值为 10.13 s，未优化的系统读取时间平均值为 16.97 s，提升了 40.3%；在内存 8 K 顺序分配和随机分配方面，优化后的系统传输 10 GB 大小文件的平均延时与原系统传输 2 GB 大小文件的很接近，以上测试说明优化后的系统在稳定性、延时性上比原系统都有了较大提升，对于检测空化现象快速发生时能够及时捕捉到空化泡形成过程，对分析表面织构的减摩抗磨机理提供较大的帮助。

#### 4.2 展望

空化检测设备对表面织构在摩擦过程中发生的空化现象起重要作用，其检测结果能为空化机理和流体动力学理论提供依据，对其国内外学者的相关观点具有补充说明作用，目前国内外对表面织构上的空化理论的研究尚处于理论阶段，空化检测设备能够填补其在空化研究领域内

相关检测设备的空白。

目前设备处于整机测试阶段，对于空化泡发生的瞬时性、拍摄空化发生过程的内容存储量大等特点，需要设计空化图像后处理软件，将空化泡发生过程中的图像进行加强显示，冗余部分进行清除；由于图像拍摄的清晰程度的不一致性及可能存在低分辨率的情况，需要在软件内置灰度处理系统，可以对图像的分辨率和视频的帧率小幅提升。

#### 参考文献:

- [1] ANDREAS ROSENKRANZ, HENARA L. COSTA, MEHMET Z. BAYKARA, et al. Synergetic effects of surface texturing and solid lubricants to tailor friction and wear-A review [J]. Tribology International, 2021, 155: 1-21.
- [2] 孙鹏飞, 周正权, 陈 祎, 等. 基于 CFD 的自激振动空化射流喷嘴结构参数影响研究 [J]. 流体机械, 2019, 47 (10): 8.
- [3] 黄丰云, 杨晓兵, 朱继伟, 等. 表面织构分布参数对流体动压润滑的影响及其数值优化 [J]. 润滑与密封, 2021, 46 (4): 18-25.
- [4] 陈文刚, 冯少盛. 表面微织构钛合金在不同对摩角度下的减摩抗磨特性 [J]. 功能材料, 2015, 46 (22): 22080-22084.
- [5] ZHANG J, MENG Y. Direct Observation of Cavitation Phenomenon and Hydrodynamic Lubrication Analysis of Textured Surfaces [J]. Tribology Letters, 2012, 46 (2): 147-158.
- [6] 陈银银, 李育敏, 高海燕, 等. 空化设备的研究进展 [J]. 化工时刊, 2013, 27 (11): 27-31.
- [7] 吕福炜, 宗丹丹, 孙 静, 等. 空化文丘里管稳流特性研究 [J]. 流体机械, 2020, 48 (3): 7.
- [8] PARAG R. GOGATE. Application of cavitation reactors for water disinfection: Current status and path forward [J]. Journal of Environmental Management, 2007, 85 (4): 801-815.
- [9] MARTIN PETKOVSEK, MATEVZ DULAR. Simultaneous observation of cavitation structures and cavitation erosion [J]. Wear, 2013, 300 (1-2): 55-64.
- [10] LIN Q, WEI Z, WANG N, et al. Effect of large-area texture/slip surface on journal bearing considering cavitation [J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2015, 65 (3): 216-226.
- [11] 贾惠芹, 杨 晓. 基于 Fluent 的气井放喷时气液两相流流场仿真研究 [J]. 国外电子测量技术, 2019, 38 (1): 4.
- [12] LI X S, SONG Y, HAO Z R, et al. Cavitation Mechanism of Oil-Film Bearing and Development of a New Gaseous Cavitation Model Based on Air Solubility [J]. Journal of Tribology-transactions of the asme, 2012, 134 (3): 1-7.
- [13] 张圣彤, 张继忠, 赵 梅, 等. 内燃式水平对动空气压缩机的多工况动态特性分析 [J]. 流体机械, 2015, 43 (10): 5.
- [14] PAWLUS P, REIZER R, WIECZOROWSKI M, et al. Functional importance of surface texture parameters [J]. Materials, 2021, 14 (18): 5326.
- [15] 郭 亮, 叶爱民, 林 涛, 等. 基于树莓派和 Java 语言的温湿度远程实时测量系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (6): 6.

(下转第 234 页)