

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.XXXX.XX.01

往复式活塞流量计运动特性及间隙控制技术研究

于小丽*, 张永胜, 刘彦军, 张雷

(中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 为解决国内往复式活塞流量计在宽量程、高准确度与运转平稳性协同设计方面的技术难题, 本文建立基于曲柄滑块机构的四活塞联动运动学模型, 系统分析活塞的运动规律与动态特性; 利用间隙优化控制技术, 研究运动副间隙对活塞阻力与泄漏量的影响机理, 突破高准确度工况下间隙匹配与动态密封的关键技术难点, 最终实现了四活塞联动式活塞流量计的结构优化设计。试验结果显示: 研制样机的流量测量范围达到 5 ~ 10 000 mL/min, 在 200:1 量程比内, 误差不超过 $\pm 0.54\%$, 能够有效满足工业现场对宽量程、高准确度流量测量的技术要求, 具备良好的工程适用性。

关键词: 往复式活塞流量计; 宽量程; 高准确度; 运动特性; 间隙控制; 活塞阻力; 泄漏量; 流量测量

中图分类号: TB938; TH814 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795(XXXX)XX-0001-07

Research on the motion characteristics and clearance control technology of reciprocating piston flowmeters

YU Xiaoli*, ZHANG Yongsheng, LIU Yanjun, ZHANG Lei

(AVIC Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: To solve the technical difficulties in the collaborative design of wide range, high accuracy, and smooth operation of domestic reciprocating piston flowmeters, this paper establishes a four piston linkage kinematic model based on crank slider mechanism, and analyzes the piston motion law and dynamic characteristics systematically. By utilizing gap optimization control technology, it studies the influence mechanism of motion pair clearance on piston resistance and leakage, breaking through the key technical difficulties of gap matching and dynamic sealing under high-precision working conditions, and ultimately achieves the structural optimization design of a four piston linkage piston flowmeter. Experimental results show that the flow measurement range of the developed prototype can reach 5 ~ 10 000 mL/min, and the error does not exceed $\pm 0.54\%$ over a 200:1 turndown ratio. This study can effectively meet the technical requirements of industrial sites for wide range and high-precision flow measurement, and has good engineering applicability.

Key words: reciprocating piston flowmeter; wide range; high accuracy; motion characteristics; clearance control; piston resistance; leakage; flow measurement

收稿日期: 2025-10-22; 修回日期: 2026-01-30

基金项目: 国家“十四五”计量技术基础研究项目(2009ZCHF0009)

引用格式: 于小丽, 张永胜, 刘彦军, 等. 往复式活塞流量计运动特性及间隙控制技术研究[J]. 计测技术, XXXX, XX(X): 1-7.

Citation: YU X L, ZHANG Y S, LIU Y J, et al. Research on the motion characteristics and clearance control technology of reciprocating piston flowmeters [J]. Metrology & Measurement Technology, XXXX, XX (X): 1-7.



0 引言

流量测量仪表的种类很多^[1-2]。往复式活塞流量计具有量程宽、准确度高、对流体黏度不敏感等特点，非常适合不同黏度介质的小流量测量，其可作为现场校准用标准器或直接用于油品流量测试^[3]。

对于活塞流量计的研究最早可以追溯到19世纪末期，NASH L H发明了摆动式活塞流量计^[4]。此后，英国剑桥大学工程系制造研究所的MORTON C E等人开展理论分析和试验，对活塞流量计的受力情况、运动特性、泄漏和压力损失等进行了系统研究，为活塞流量计的成熟发展奠定了基础^[5-8]。然而，国内在该领域的技术研发相对滞后，现有研究虽在结构优化^[9]、测量方法创新^[10]、动态性能提升^[11]及特定部件仿真^[12-13]等方面取得了一定进展，但多侧重于局部改进和验证，未能建立多活塞联动系统的整体运动学模型，也未能定量揭示间隙与综合性能(阻力、泄漏等)的耦合关系，直接制约了高性能国产活塞流量计的工程实现，导致成熟的高准确度、宽量程比产品稀缺。现有国产活塞流量计普遍存在口径较大(DN15以上)、流量下限高(0.8 L/min)、量程比有限(最大16:1)等问题，难以满足微小流量、宽量程测量的高端应用需求。

为填补上述研究空白，推动国产化高性能产品的研制，本研究团队基于曲柄滑块机构建立活塞流量计运动学模型，对四活塞联动的运动规律进行分析，研制具有四活塞联动结构的HS系列往复式活塞流量计。分别以RP-3航空煤油、4050#润滑油作为工作介质进行试验，研究活塞流量计运动间隙对活塞运动阻力、间隙泄漏量的影响规律。通过优化设计参数，实现宽量程、高准确度的往复式活塞流量计研发。

1 流量计工作原理及结构设计

1.1 工作原理

活塞流量计属于一种容积式流量计，它主要由固定的腔体和内部联动活塞构成^[1]。从入口侧流入的流体推动活塞运动并充满测量腔室，之后连

续从出口侧排出，通过测量活塞的运动频率，即可计算出瞬时流量和累积流量。

往复式活塞流量计不同于传统的活塞流量计，它采用缸壁上的孔替代传统阀门，孔的开启和关闭通过活塞的移动控制。对于往复式活塞流量计，单活塞流量脉动极强，输出半波正弦脉冲，有50%的时间理论流量为零。为了平滑流量，一般在驱动轴上设置 N 个均匀分布的活塞，相邻活塞的相位差 $\Delta\theta = 2\pi / N$ 。当活塞个数为偶数时，活塞两两成对，产生的惯性力可以形成平衡的力偶，显著减小驱动轴的径向载荷和振动。当活塞个数为2个时，一个活塞在排出行程结束时，另一个活塞刚好开始排出行程，但两个活塞的流量正弦波在交接处存在“谷底”叠加，脉动仍然非常显著。四活塞对称相位布局设计能有效实现活塞运动的周期性互补，保证在任何时刻都有2个活塞处于吸液和排液的状态，将单活塞流量计固有的间歇性流体脉动转化为近似连续的稳定输出^[14-19]。同时，相较更多活塞(如六活塞、八活塞)方案，四活塞方案在实现优异脉动控制和动力学平衡的同时，机械结构(曲轴、流道、密封)最为简单、紧凑、可靠。综上，本文研究的往复式活塞流量计采用四活塞联动结构，其工作原理如图1所示^[20]。

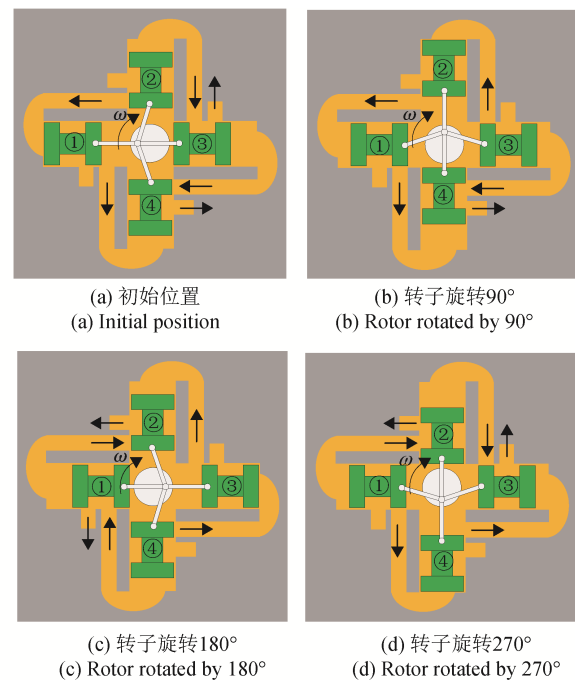


图1 往复式活塞流量计工作原理^[20]

Fig.1 Working principle of reciprocating piston flowmeter^[20]

本文研发的流量计的进口端与实测部分的中央连通，四缸壁上出口孔汇总于流量计的出口端。图1(a)中，缸①将液体从缸②的孔吸入，缸③则将液体通过流道经缸④的壁孔排出。曲轴旋转一周，虹吸液、排液各一次，理论排量等于缸数乘以每缸的排出量^[21]。

1.2 流量计结构设计

往复式活塞流量计采用分体式设计，包括流量计主体和线性化仪两部分，可配合通用的显示仪表进行体积瞬时流量和体积累计流量的显示输出。活塞流量计主体由底座、测量腔体、活塞组件、曲轴组件等组成，其构造如图2所示。

本文所研制的HS010型活塞流量计设计流量为5~10 000 mL/min，流量计排量设置为10.7 mL/r。为了提升轴承使用寿命，控制流量计最高转速为

935 r/min。活塞的基本尺寸参数如图3所示，连杆有效长度为24 mm，曲轴偏心距为4.8 mm，腔体尺寸为75 mm×75 mm×40 mm。此外，活塞外侧设有油槽，起到润滑作用，使得活塞在测量腔室内能够顺滑运动。

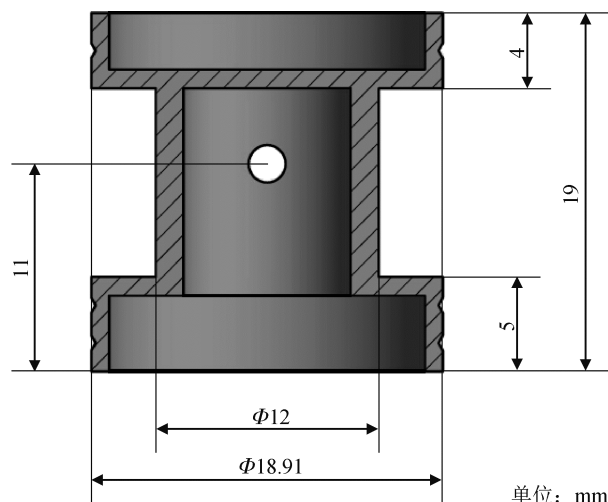
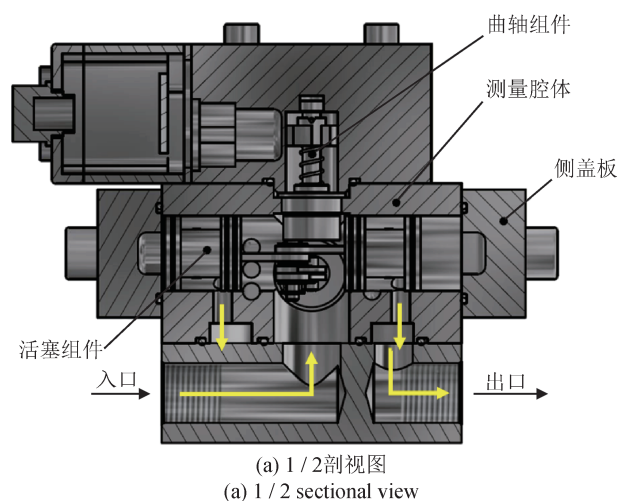
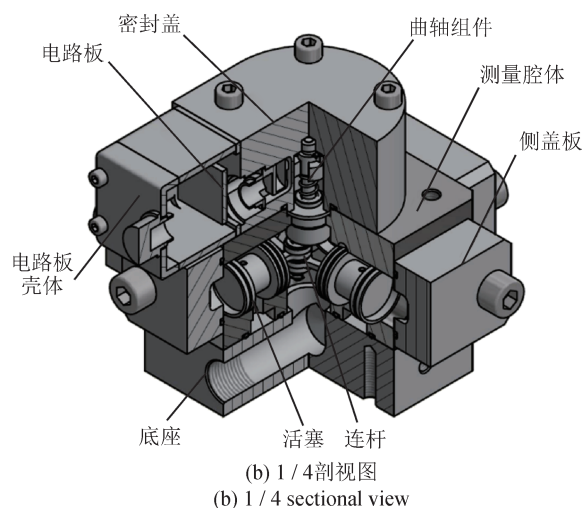


图3 活塞尺寸

Fig.3 Piston size



(a) 1/2剖视图
(a) 1/2 sectional view



(b) 1/4剖视图
(b) 1/4 sectional view

图2 往复式活塞流量计结构组成

Fig.2 Structural composition of reciprocating piston flowmeter

2 流量计运动特性分析

在稳定工况下，四个联动活塞的运动可以简化为相位差为90°的曲柄滑块运动^[22]。通过对活塞的位移、运动速度和曲轴转速进行分析，获得流量计运动特性和运动规律^[23]。

经分析，活塞流量计曲轴转速 ω 为

$$\omega = \frac{q}{S} \left(e \sin \theta + e \cos \theta - \frac{e^2 \sin \theta \cos \theta}{\sqrt{L^2 - e^2 \sin^2 \theta}} + \frac{e^2 \sin \theta \cos \theta}{\sqrt{L^2 - e^2 \cos^2 \theta}} \right) \quad (1)$$

式中： q 为此时流经流量计的液体流量， S 为活塞截面积， e 为曲轴偏心距， θ 为曲轴转动角度， L 为连杆有效长度。

当 $q=5$ L/min，活塞流量计曲轴转过一圈时，转速脉动情况如图4所示， ω 在44.2~62.5 rad/s波动，转速脉动率控制在 $\pm 17\%$ 。

3 流量计间隙控制技术

活塞外圆和腔体内孔之间的间隙值影响运动

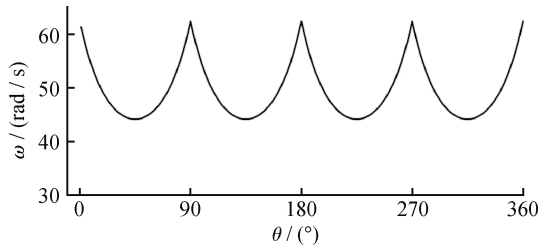


图4 活塞流量计曲轴转速脉动
Fig.4 Crankshaft speed pulsation of piston flowmeter

过程中活塞所受黏滞摩擦阻力的大小和噪声^[24]，从而影响流量计的测量范围和准确度。间隙值越大，运动过程中所受黏滞摩擦阻力越小，有助于活塞运动，但也会导致内泄漏量增大，降低流量计的测量准确度；间隙值越小，内泄漏量也越小，可提高流量计测量准确度，但会增大活塞运动摩擦阻力，增加流体流过流量计的压力损失^[25]。

如图5所示，活塞与腔体做相对运动，活塞上的流体速度为 v ，腔孔处的速度为零，活塞运动过程中受到压差的推动力为 F_d ，黏滞摩擦阻力为 F 。根据物理学基本原理和流体力学经验公式，活塞受到的摩擦阻力始终与活塞运动方向相反，其所受黏滞摩擦阻力 F 计算公式为

$$F = \pi dl\tau = \pi dl\mu \frac{v}{\delta} \quad (2)$$

式中： d 为活塞外圆直径； l 为活塞长度； τ 为内摩擦阻力； μ 为流体动力粘度； δ 为活塞外圆和腔体内孔之间的间隙值， $\delta = (D - d) / 2$ ， D 为腔体内孔直径。

对于圆环形缝隙流动，其雷诺数 R_{Re} 为

$$R_{Re} = \frac{\rho(D - d)}{\mu} v \quad (3)$$

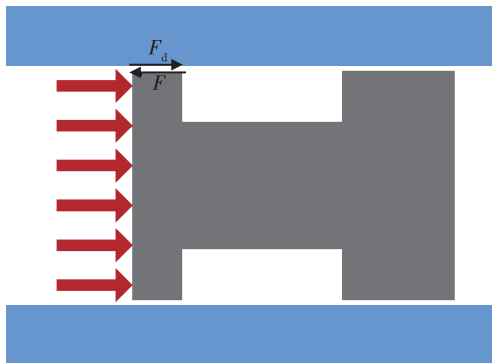


图5 活塞运动受力示意图
Fig.5 Schematic diagram of piston motion force

式中： ρ 为流体密度。对于同心环形缝隙，临界雷诺数取1 100^[26]。

估算不同工况下的流体雷诺数均远小于1 100，通过间隙的泄漏量 q_v 按层流模型计算^[27]，即

$$q_v = \pi d \frac{\Delta p}{2\mu l} \int_0^\delta (\delta - y)y dy = \frac{\pi d \delta^3 \Delta p}{12\mu l} \quad (4)$$

式中： Δp 为活塞前后压差， y 为间隙厚度方向坐标， l 为活塞长度。

以HS010型活塞流量计在RP-3航空煤油介质和4050#润滑油介质下的测量为例，研究最大设计流量(10 L/min)时运动间隙对活塞运动阻力、内泄漏分数的影响规律，结果如图6所示。

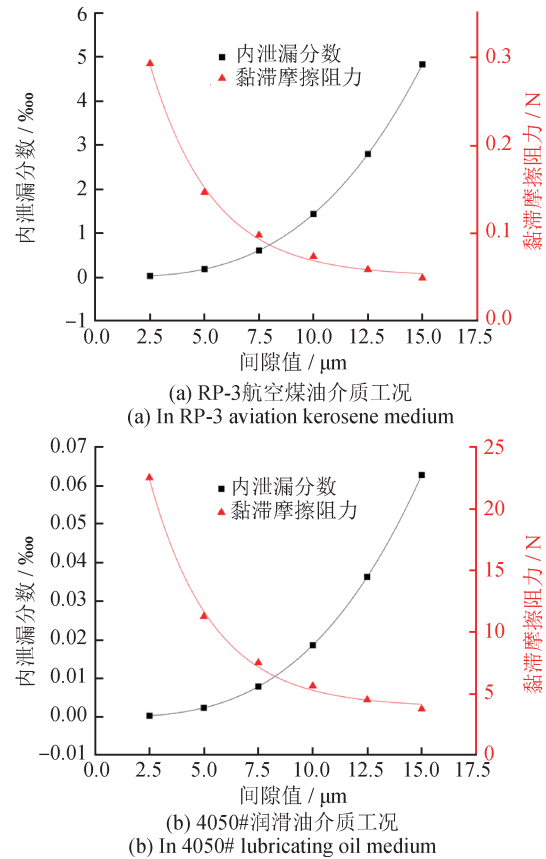


图6 活塞内泄漏分数和所受黏滞摩擦阻力曲线
Fig.6 Curves of internal leakage fraction and viscous friction resistance of the piston

分析图6可知：随着间隙值增大，黏滞摩擦阻力降低，而内泄漏量随着间隙值增大而增大。因此，需要综合考虑间隙值对内泄漏量和黏滞摩擦阻力的影响。一方面，流量计内泄漏分数要远小于流量计准确度要求(本文要求内泄漏分数不超过 $\pm 0.02\%$)，根据图6可以看出，间隙值控制在

10 μm 以下时满足要求；另一方面，当间隙值小于 5 μm 时，黏滞摩擦阻力陡增。同时，根据摩擦学原理，当配合公差要求进入微米级，表面接触机理从弹流润滑转向边界润滑甚至干摩擦，摩擦阻力会非线性陡增，进而对润滑和材料提出极端要求。综上考虑，活塞外圆和腔体内孔间间隙值控制在 5 ~ 10 μm ，接触表面粗糙度 R_a 不大于 0.4 μm 。

4 试验与分析

依据 JJG 667-2025 《液体容积式流量计检定规程》^[28]，分别在 RP-3 航空煤油和 4050# 润滑油介质条件下开展 HS010 型活塞流量计校准试验，采用的标准器分别为燃油流量校准装置(流量范围：50 mL/min ~ 40 L/min，扩展不确定度：0.05%， $k=2$)和润滑油流量标准装置(流量范围：50 mL/min ~ 300 L/min，扩展不确定度：0.05%， $k=2$)。HS010 型流量计在 RP-3 航空煤油介质下的实流校

准试验结果如表 1 所示，在 4050# 润滑油介质下的实流校准试验结果如表 2 所示。根据试验结果可知：研制的 HS010 型活塞流量计能够在 200 : 1 的量程内达到较优的准确度(测量误差不超过 $\pm 0.54\%$)，重复性优于 0.06%，可配合线性化仪的修正功能将测量准确度进一步提高。HS010 型活塞流量计适用于不同黏度、小流量、宽范围的液体流量测量，且它的压损很小，在流量上限时其差压值小于 0.1 MPa，远小于同类型产品(例如圆柱齿轮流量计在流量上限时差压值一般为 0.4 ~ 0.8 MPa)，这是由于研制的流量计活塞外圆和腔体内孔经工艺手段均达到了较优的圆柱度和粗糙度，且活塞外圆设置的环形油槽也使得活塞在腔体内能够顺畅地进行往复运动，很大程度上降低了影响压差值的机械摩擦等阻力。结合上述描述，流量计内泄漏量与活塞前后压差成正比，较低的压损也对提高流量计准确度、小流量响应能力起到关键作用。

表 1 HS010 型流量计在 RP-3 航空煤油介质下的实流校准试验结果

Tab.1 Flow calibration test results of HS010 flowmeter in RP-3 aviation kerosene medium

设定流量 q_0 / (L/min)	标准流量 q_{vs} / (L/min)	被校频率 f / Hz	仪表系数 K / L ⁻¹	重复性 E_r / %
10	10.015 170	61.633	369.24	0.02
7.5	7.471 543	46.086	370.09	0.02
5	5.006 340	30.971	371.18	0.02
2.5	2.497 903	15.477	371.75	0.05
0.05	0.049 970	0.308	369.50	0.06

表 2 HS010 型流量计在 4050# 润滑油介质下的实流校准试验结果

Tab.2 Flow calibration test results of HS010 flowmeter in 4050# lubricating oil medium

设定流量 q_0 / (L/min)	标准流量 q_{vs} / (L/min)	被校频率 f / Hz	仪表系数 K / L ⁻¹	重复性 E_r / %
10	10.009 750	61.745	370.11	0.02
7.5	7.508 160	46.471	371.37	0.05
5	5.004 880	31.053	372.27	0.00
2.5	2.503 513	15.572	373.19	0.05
0.05	0.051 140	0.319	374.12	0.06

5 结论

本文系统研究了四活塞联动式往复活塞流量计的关键技术问题，得出以下结论：基于曲柄滑块机构建立的活塞运动学模型表明，四活塞对称

相位布局通过周期性互补运动，可使转速脉动不超过 $\pm 17\%$ ，验证了该结构在实现平稳流量输出方面的优势；通过研究运动间隙对活塞阻力及泄漏量的影响机理，确定了最佳间隙范围(5 ~ 10 μm)；优化设计后的样机在 0.05 ~ 10 L/min 流量条件下

示值误差不超过 $\pm 0.54\%$, 实现了宽量程与高准确度, 其主要技术指标已达到国际同类产品先进水平。未来将重点开展极端工况下的适应性测试, 建立高温高压环境下的性能数据库, 开发集成在线自诊断与实时补偿功能的智能化系统, 为高性能活塞流量计设计提供理论指导。

参考文献

- [1] 王池. 流量测量技术全书[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
WANG C. Flow measurement technique handbook [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012. (in Chinese)
- [2] 康滨. 二维(2D)双联式活塞流量计的设计与实验研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2019.
KANG B. Design and experimental study of parallel two dimensional (2D) piston flowmeter [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [3] 陈豪奇. 二维活塞式流量计的动态特性研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2023.
CHEN H Q. Research on the dynamic characteristics of two-dimensional piston flowmeter [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [4] NASH L H. Oscillating meter: USA, 300625 [P]. 1884-06-17.
- [5] MORTON C E, HUTCHINGS I M, BAKER R C. Theoretical analysis of the oscillating circular piston positive displacement flowmeter: II numerical solution of equations of motion and comparison with experimental data [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2018, 63: 47-61.
- [6] MORTON C E, BAKER R C, HUTCHINGS I M. Experimental investigation of an oscillating circular piston positive displacement flowmeter: II — leakage flows and wear tests [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2014, 36: 57-63.
- [7] MORTON C E, HUTCHINGS I M, BAKER R C. Experimental investigation of an oscillating circular piston positive displacement flowmeter: I — piston movement and pressure losses [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2014, 36: 47-56.
- [8] MORTON C E, HUTCHINGS I M, WILLIAMS J A, et al. Theoretical analysis of the oscillating circular piston positive displacement flowmeter: I — modeling the forces acting on the piston [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2018, 60: 1-16.
- [9] 张悦, 冯燕, 黄玺榕, 等. 一种高精度活塞流量计: CN118500495B [P]. 2024-10-29.
ZHANG Y, FENG Y, HUANG X R, et al. A high-precision piston flowmeter: CN118500495B [P]. 2024-10-29. (in Chinese)
- [10] 徐旷宇, 殷璋珺, 李宁. 一种新型活塞式流量计的设计 [J]. 计量与测试技术, 2025, 51(7): 40-42.
XU K Y, YIN Z J, LI N. Design of a new type of piston flowmeter [J]. Metrology & Measurement Technique, 2025, 51(7): 40-42. (in Chinese)
- [11] 丁川, 张东东, 高鹏辉, 等. 集成变磁通式速度传感器的活塞式动态流量计: CN117053887A [P]. 2023-11-14.
DING C, ZHANG D D, GAO P H, et al. Piston dynamic flowmeter with integrated variable magnetic flux velocity sensor: CN117053887A [P]. 2023-11-14. (in Chinese)
- [12] QIAN J Y, ZHANG J H, ZHANG H Y, et al. Structural design of a cross wobble plate driving axial piston pump based on ADAMS and AMESim Co-simulation [C]// 2019 IEEE 8th International Conference on Fluid Power and Mechatronics (FPM), IEEE, 2020: 470-477.
- [13] 柴红强, 杨国来, 谢松林, 等. MJ-120型流量计动态特性分析研究 [J]. 液压气动与密封, 2015, 35(4): 36-38.
CHAI H Q, YANG G L, XIE S L, et al. Research of MJ-120 type flowmeter modeling and flow characteristics based on AMESim [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2015, 35(4): 36-38. (in Chinese)
- [14] DING C, ZHU Y H, LIU L, et al. Research on a novel flowmeter with parallel two-dimensional pistons as its metering units [J]. IEEE Access, 2019, 7: 110912-110927.
- [15] 张东东, 陈豪奇, 夏宁, 等. 二维活塞式动态流量计的仿真分析与优化 [J]. 液压与气动, 2023, 47(11): 67-74.
ZHANG D D, CHEN H Q, XIA N, et al. Simulation analysis and optimization of a two-dimensional piston dynamic flowmeter [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2023, 47(11): 67-74. (in Chinese)
- [16] 申屠胜男. 电动二维活塞(2D)燃油泵的流量特性研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2020.
SHENTU S N. Research on flow characteristics of electric two-dimensional piston (2D) fuel pump [D]. Hangzhou:

- Zhejiang University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [17] XU B, HU M, ZHANG J H. Impact of typical steady-state conditions and transient conditions on flow ripple and its test accuracy for axial piston pump[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2015, 28(5): 1012-1022.
- [18] XU Y Z, WANG Y, XING T. Pressure and flow characteristics of two dimensional (2D) piston water hydraulic pump[C]// 2019 IEEE 8th International Conference on Fluid Power and Mechatronics (FPM), IEEE, 2020: 379-386.
- [19] XING T, HUANG Y, GAO C, et al. Research on the output characteristic of a new water hydraulic electrohydraulic motor[J]. IEEE Access, 2023, 11: 48868-48880.
- [20] BAKER R C. 流量测量手册[M]. 张小章, 白宇杰译. 北京: 清华大学出版社, 2020.
- BAKER R C. Flow measurement handbook[M]. Translated by ZHANG X Z, BAI Y J. Beijing: Tsinghua University Press, 2020. (in Chinese)
- [21] 苏彦勋, 杨有涛. 流量检测技术[M]. 北京: 中国质检出版社, 2012.
- SU Y X, YANG Y T. Flow detection technology[M]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2012. (in Chinese)
- [22] 黄晨华, 李湘勤, 毛桂生. 曲柄滑块机构最大速度位置求解法及运动分析[J]. 机械工程与自动化, 2022, 51(6): 19-21.
- HUANG C H, LI X Q, MAO G S. Calculation method of maximum speed position and motion analysis of crank slider mechanism[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2022, 51(6): 19-21. (in Chinese)
- [23] 王智森, 朱领兄. 发动机活塞曲柄连杆机构运动特性研究[J]. 南方农机, 2021, 52(17): 30-32.
- WANG Z S, ZHU L X. Research on motion characteristics of engine piston-crank-connecting rod mechanism[J]. China Southern Agricultural Machinery, 2021, 52(17): 30-32. (in Chinese)
- [24] 陈嘉铭. 空气压缩机活塞二阶运动及润滑分析[D]. 抚州: 东华理工大学, 2024.
- CHEN J M. Analysis of secondary motion and lubrication of air compressor piston[D]. Fuzhou: East China Institute of Technology, 2024. (in Chinese)
- [25] RIZZO G, MASSAROTTI G P, BONANNO A, et al. Axial piston pumps slippers with nanocoated surfaces to reduce friction[J]. International Journal of Fluid Power, 2015: 1-10.
- [26] 鄢勇. 液压缸间隙密封流场仿真分析[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2011.
- YAN Y. Simulation and analysis on flow field of hydraulic cylinder gap seal[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- [27] 丁显忠. 间隙密封液压缸异质环活塞密封结构设计研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2021.
- DING X Z. Research on the design of hetero ring piston seal structure for gap sealing hydraulic cylinder[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [28] 国家市场监督管理总局. 液体容积式流量计检定规程: JJG 667-2025[S]. 北京: 中国质量标准化出版传媒有限公司, 2025.
- State Administration for Market Regulation. Verification regulation of liquid positive displacement flowmeters: JJG 667-2025[S]. Beijing: China Quality and Standards Publishing & Media Co., Ltd., 2025. (in Chinese)

(本文编辑: 刘圣晨 李成成)



第一/通信作者: 于小丽(1995—), 女, 工程师, 硕士研究生, 主要研究方向为流量测量校准技术。