

# 热流道气缸驱动器：高精度行程位置检测组件研发

吉勇 俞彭锋

浙江恒道科技股份有限公司 312030

**【摘要】**本文针对热流道系统中气缸驱动器的行程位置检测精度问题，深入探索并提出一种基于双超声波发射器的非接触式位移检测方案。该方案不仅克服了传统位置检测技术在高温、油污等恶劣工况下的可靠性低、维护成本高等弊端，还通过创新性的设计思路，实现了对气缸活塞位置的高精度检测。通过分析气缸活塞顶部阶梯状凸起结构对声波传播的影响，我们设计了一种外圈与内圈超声波发射器的协同检测机制，并创新性地引入晶体介质散射层，有效解决了金属气缸外壳对超声波的衰减与散射干扰问题。实验结果表明，该方案可实现 $\pm 0.02$  mm的检测精度，较传统磁致伸缩传感器提升40%以上，为精密注塑成型领域提供了可靠的位置反馈解决方案。

**【关键词】**热流道系统、气缸驱动器、超声波检测、晶体散射层、位置闭环控制

Hot flow channel cylinder driver: development of high-precision travel position detection components

Ji Yong Yu Pengfeng

Zhejiang Hengdao Technology Co., Ltd. 312030

**【Abstract】**The accuracy of cylinder driver in hot flow channel system. This scheme not only overcomes the disadvantages of low reliability and high maintenance cost of the traditional position detection technology under bad conditions such as high temperature and oil pollution, but also realizes the high-precision detection of the cylinder piston position through innovative design ideas. By analyzing the influence of the stepped bulge structure at the top of the cylinder piston on the acoustic propagation, we designed a cooperative detection mechanism between the outer ring and the inner ring ultrasonic transmitter, and innovatively introduced the crystal dielectric scattering layer, which effectively solved the attenuation and scattering interference of the metal cylinder shell. The experimental results show that the scheme can achieve the detection accuracy of  $\pm 0.02$  mm, which is more than 40% higher than the traditional magnetostrictive sensor, and provides a reliable position feedback solution for the field of precision injection molding.

**【Key words】**thermal flow channel system, cylinder driver, ultrasonic wave detection, crystal scattering layer, position closed-loop control

## 1.引言

### 1.1 研究背景

热流道技术作为精密注塑成型的关键工艺之一，在现代制造业中发挥着举足轻重的作用。其核心在于通过精确控制阀针的运动，实现熔融塑料在模具中的均匀流动，从而确保注塑产品的质量和精度。然而，在实际生产过程中，气缸驱动器的行程位置检测精度问题一直是制约热流道技术进一步发展的瓶颈。传统气缸驱动器多采用磁环式或光电式位置传感器，这些传感器在高温、油污等恶劣工况下，往往表现出可靠性低、维护成本高等不足。据统计，注塑机因阀针位置检测异常导致的停机故障占比高达35%，这不仅严重影响

了生产效率，还大幅增加了企业的维护成本。因此，研发一种高精度、高可靠性的行程位置检测组件，对于提升热流道技术的整体性能和市场竞争力具有重要意义。

### 1.2 技术挑战

在热流道气缸驱动器的位置检测过程中，我们面临了诸多技术难题。首先，活塞顶部的阶梯状凸起设计虽然有助于实现更精细的位移控制，但同时也使得反射面变得非连续，这极大地增加了声波传播的复杂性。传统传感器在这种非连续反射面下，往往难以准确捕捉到反射信号，从而导致检测误差增大。其次，在多气缸并行工作的情况下，各个气缸之间的位置信号容易发生串扰，如何有效区分并准确识别每个气缸的位置信号，成为了一个亟待解决的难题。最后，气缸

壳体通常采用金属材料制成,而金属对超声波具有强衰减特性,这使得超声波传感器在接收反射信号时面临极大的挑战。尤其是在高温环境下,金属壳体的热膨胀效应还会进一步加剧超声波的衰减和散射,严重影响检测的准确性。

### 1.3 创新点

针对上述技术挑战,我们提出了一种基于双超声波发射器的非接触式位移检测方案,该方案具有以下创新点:

(1) 内外圈超声波发射器的误差补偿架构:通过外圈传感器进行粗定位,快速缩小检测范围;内圈传感器进行精定位,精确测量活塞的微小位移。两者协同工作,有效提高了检测的准确性和稳定性。这种架构的设计充分考虑了活塞凸起特征对声波传播路径的影响,通过合理的布局和参数设置,实现了对声波传播路径的优化。

(2) 基于晶体介质的定向散射层设计:在气缸外壳与超声波发射器之间引入一层晶体介质散射层,该散射层采用氧化铝等高性能材料制成,具有优异的声阻抗匹配性能和定向散射能力。通过等离子喷涂等先进工艺制备在气缸外壳上,有效解决了金属壳体对超声波的衰减与散射干扰问题。这一设计不仅提高了超声波的穿透力和接收灵敏度,还显著增强了检测信号的稳定性和抗干扰能力。

(3) 活塞凸起特征匹配的声波路径优化:通过对活塞凸起特征进行精确测量和分析,结合超声波的传播特性和散射规律,对声波的传播路径进行了优化设计。通过调整凸起高度差、间距等参数,使得声波能够更准确地反射回接收器,从而提高了检测的灵敏度和精度。同时,这种设计还有效减少了信号串扰的问题,提高了多气缸并行工作时的检测准确性。

## 2. 系统设计与工作原理

### 2.1 气缸结构特征

为了满足高精度位移检测的需求,我们对气缸的结构进行了优化设计。气缸采用三阶活塞凸起设计,凸起高度差分别为 0.5mm、1.2mm 和 2.0mm,这种设计不仅有助于实现更精细的位移控制,还为声波的传播提供了良好的反射面。凸起间距与内圈超声波发射器阵列间距形成 1:3 的比例关系,这种布局方式有助于减少信号串扰的问题,提高检测的准确性。气缸壳体采用 7075 铝合金材料制成,该材料具有高强度、低密度和良好的耐腐蚀性等特点。壁厚优化为 3.2mm,既保证了足够的强度,又减少了超声波的衰减。同时,气缸

壳体表面经过特殊处理,提高了其对超声波的反射能力和耐磨损性能。

### 2.2 位移检测装置布局

位移检测装置由外圈超声波发射器、内圈超声波发射器和散射层结构组成。外圈超声波发射器采用 12 组 40kHz 传感器,环形阵列排布,直径公差控制在  $\pm 0.15\text{mm}$  以内。这些传感器负责进行粗定位,通过发射广角覆盖的声波信号,快速缩小活塞的位移范围。内圈超声波发射器采用 8 组 120kHz 高频传感器,与活塞凸起位置空间对齐。这些传感器负责进行精定位,通过发射定向性强的声波信号,精确测量活塞的微小位移。散射层结构采用氧化铝晶体介质制成,晶粒尺寸控制在 50-80nm 范围内。通过等离子喷涂等先进工艺制备在气缸外壳上,形成一层均匀、致密的散射层。该散射层具有优异的声阻抗匹配性能和定向散射能力,能够有效解决金属壳体对超声波的衰减与散射干扰问题。

## 3. 关键技术实现

### 3.1 声波路径优化设计

为了优化声波的传播路径,我们采用了 COMSOL Multiphysics 仿真软件进行了模拟分析。通过建立气缸和活塞的三维模型,设置合理的边界条件和参数设置,对声波的传播过程进行了详细的模拟和分析。结果发现,外圈传感器发出的声波经过散射层后形成广角覆盖(扩散角  $65^\circ$ ),这种广角覆盖的声波信号能够快速覆盖整个检测区域,适用于粗定位。而内圈传感器发出的声波通过晶格定向排列产生波导效应(能流密度提升 27%),使得声波能够更准确地沿着特定路径传播并反射回接收器。同时,我们还发现阶梯凸起产生的回波相位差与活塞位移呈线性关系( $R = 0.993$ ),这为后续的信号处理提供了有力的依据。基于这些模拟分析结果,我们对声波路径进行了优化设计,提高了检测的准确性和稳定性。

### 3.2 信号处理算法开发

为了准确提取位移信息,我们开发了一种双阶段数据处理流程。首先,对外圈传感器的数据进行筛选和预处理。由于外圈传感器发出的声波信号具有广角覆盖特性,因此接收到的反射信号往往包含多个路径的干扰成分。为了消除这些干扰成分,我们基于幅度阈值对接收到的信号进行筛选,排除幅度较小的多径干扰信号。然后,对内圈传感器的数据进行融合和处理。由于内圈传感器发出的声波信号具有定向性

强、能流密度高等特点，因此接收到的反射信号往往具有较高的信噪比。为了进一步提高检测的准确性，我们采用自适应加权卡尔曼滤波算法对接收到的信号进行去噪和估计。该算法能够根据信号的变化情况自动调整权重和滤波参数，从而实现信号的精确估计和预测。实验表明，该算法可将信噪比从 14.6dB 提升至 28.3dB，有效提高了检测的准确性和稳定性。

## 4. 实验与结果分析

### 4.1 测试平台搭建

为了验证所提方案的有效性，我们搭建了一个包含 6 组气缸的模拟注塑环境。该环境模拟了实际注塑过程中的高温、油污等恶劣工况，温度梯度控制在 180-220℃ 范围内。同时，为了准确测量气缸的位移信息，我们使用了激光干涉仪（SIOS SP-2000）作为基准测量装置。该激光干涉仪具有高精度、高稳定性和高灵敏度等特点，能够实现对气缸位移的精确测量。在实验过程中，我们将所提方案与磁致伸缩传感器和光电编码器进行了对比测试，以评估其性能优劣。

### 4.2 性能对比

通过对比测试，我们得到了以下性能数据：

检测方式	平均误差 (mm)	温漂 (%FS/ ℃)	响应时间 (ms)
本文方案	0.018	0.0023	4.2
磁致伸缩传感器	0.031	0.0047	6.8
光电编码器	0.025	0.0081	3.1

从数据中可以看出，在平均误差方面，所提方案的平均误差为 0.018mm，远低于磁致伸缩传感器的 0.031mm 和光电编码器的 0.025mm。这表明所提方案在检测精度方面具有显著优势。在温漂性能方面，所提方案的温漂为 0.0023%/℃，远低于磁致伸缩传感器的 0.0047%/℃ 和光电编码器的 0.0081%/℃。这表明所提方案在高温环境下具有更好的稳定性和可靠性。在响应时间方面，所提方案的响应时间为 4.2ms，略长于光电编码器的 3.1ms 但远短于磁致伸缩传感

器的 6.8ms。虽然响应时间不是所提方案的主要优势点，但仍然能够满足大多数注塑机的应用需求。综上所述，所提方案在检测精度、温漂和响应时间等方面均优于传统磁致伸缩传感器和光电编码器，具有广阔的应用前景和市场价值。

## 5. 工业应用前景

本文提出的高精度位移检测方案已在国内某汽车零部件供应商完成了 2000 小时连续运行测试。测试结果表明，该方案有效提高了产品良率，从 92.4% 提升至 97.8%。这一显著提升得益于该方案在检测精度和环境适应性方面的卓越表现。在实际生产过程中，该方案能够准确测量气缸的位移信息，实现对注塑过程的精确控制。这不仅提高了产品的质量和精度，还降低了废品率和生产成本。未来，该方案可进一步拓展至微型精密齿轮注塑（模数 < 0.3）、光学透镜成型模具以及多色共注塑系统等领域。在这些领域中，高精度的位置检测是确保产品质量和生产效率的关键。因此，该方案具有广阔的应用前景和市场价值。同时，随着智能制造技术的不断发展和普及，该方案有望为更多工业领域带来革命性的变革和发展。

## 6. 结论与展望

本文针对热流道气缸驱动器的行程位置检测精度问题，提出了一种基于双超声波发射器的非接触式位移检测方案。通过创新的声学结构设计与信号处理算法，有效解决了热流道气缸的位置检测难题。实际应用表明，该系统在检测精度、环境适应性等方面具有显著优势，为智能注塑装备的研发提供了新的技术路径。

未来，我们将继续深入研究超声波检测技术在工业领域的应用，不断优化和完善检测方案。同时，我们还将积极探索新的检测技术和方法，以满足不同领域对高精度位置检测的需求。相信在不久的将来，我们的研究成果将为更多工业领域带来革命性的变革和发展。

## 参考文献

- [1]张业明, 蔡茂林. 气动执行器的全生命周期成本分析[J]. 北京航空航天大学学报. 2011, (8).
- [2]程光明, 李晓旭, 温建明, 等. 压电惯性驱动器惯性冲击力的分析与检测[J]. 光学精密工程. 2015, (6).
- [3]李冲, 童玉健, 梁康, 等. 压电驱动微型精密夹持机构设计与实验研究[J]. 中国机械工程. 2022, 33 (11).