

# 精密机械结构中微小间隙调整技术研究

章渭君<sup>1</sup> 张帅<sup>2</sup>

1.绍兴舜海智能装备有限公司; 2.杭州舜海光伏科技有限公司

DOI:10.12238/jpm.v6i4.7856

**[摘要]** 精密机械结构中微小间隙的精确调整对于确保设备性能和延长使用寿命至关重要。本文探讨了适用于高精度制造环境下的几种微小间隙调整技术,包括热膨胀法、激光干涉测量以及电致伸缩材料的应用。通过对比分析不同方法在实际应用中的优缺点,研究发现电致伸缩材料在微米级乃至纳米级间隙调整方面展现出独特优势。还讨论了这些技术在精密机械制造领域面临的挑战及可能的发展方向。合理选择与优化间隙调整技术可以显著提高机械结构的稳定性和可靠性。

**[关键词]** 精密机械; 微小间隙; 电致伸缩; 热膨胀; 激光干涉

## Research on Micro-gap Adjustment Technology in Precision Mechanical Structure

Zhang Weijun<sup>1</sup> Zhang Shuai<sup>2</sup>

1.Shaoxing Shunhai Intelligent Equipment Co., Ltd.;

2.Hangzhou Sunhai Photovoltaic Technology Co., Ltd.

**[Abstract]** The precise adjustment of small gaps in precision mechanical structures is crucial for ensuring equipment performance and extending its service life. This paper explores several techniques for adjusting small gaps suitable for high-precision manufacturing environments, including thermal expansion, laser interferometry, and the application of electrostrictive materials. By comparing the advantages and disadvantages of different methods in practical applications, the study found that electrostrictive materials exhibit unique advantages in adjusting gaps at the micrometer and even nanometer levels. The challenges and possible development directions of these technologies in the field of precision mechanical manufacturing are also discussed. The reasonable selection and optimization of gap adjustment technology can significantly improve the stability and reliability of mechanical structures.

**[Key words]** precision machinery; micro gap; electrostrictive; thermal expansion; laser interferometry

### 引言:

随着科技的进步,对机械设备精密度的要求越来越高,尤其是在航空航天、半导体制造等领域。精密机械结构中的微小间隙直接影响着设备的整体性能,如精度、效率以及耐用性等。传统的间隙调整方法往往难以满足现代高精度制造的需求。探索新型高效的微小间隙调整技术显得尤为重要。本论文旨在通过对当前主流技术的研究,提出一种更加精准有效的间隙调整方案,为精密机械设计提供理论依据和技术支持。

### 一、精密机械结构中微小间隙的重要性及其影响因素

精密机械结构中的微小间隙在确保设备的高性能和长寿命方面扮演着至关重要的角色。微小间隙的存在不仅影响到机械部件之间的接触状态,还直接关系到整个系统的动态特性和静态稳定性。在高精度加工设备中,如半导体制造设备或精密

测量仪器,微米甚至纳米级别的间隙变化都会对最终产品的质量产生显著影响。这种细微的变动可能源自材料本身的热膨胀系数差异、装配过程中的误差累积或是长期使用导致的磨损。理解和控制这些因素对于优化精密机械结构的设计与制造至关重要。材料的选择在很大程度上决定了机械组件在不同工作环境下的表现。某些合金和陶瓷材料由于其低热膨胀系数和高耐磨性,被广泛应用于需要极高标准稳定性的场合。

精密机械设计过程中,除了考虑材料属性外,还需关注如何通过精确调整微小间隙来提升系统性能。这涉及到多方面的考量,包括但不限于温度波动、外部载荷以及润滑条件等。温度的变化会引起材料尺寸的变化,从而导致间隙的改变,这对要求极高定位精度的设备尤为不利。为了应对这一挑战,工程师们常采用补偿机制,比如利用具有负热膨胀系数的材料来抵

消主要构件的膨胀效应，以维持稳定的间隙值。外部载荷也是影响间隙的一个重要因素，特别是在承受重载或高速运转的情况下。在这种环境下，适当的预加载荷可以有效减少因外力引起的变形，保证机械组件间保持理想的接触状态。润滑条件同样不可忽视，它不仅有助于降低摩擦损耗，还能起到缓冲作用，减少振动和冲击对间隙的影响，从而延长设备使用寿命。

探讨精密机械结构中微小间隙的重要性离不开对其实际应用效果的深入分析。在实践中，通过引入先进的检测技术和实时监控系統，可以实现对微小间隙变化的精准掌控。激光干涉仪能够提供亚微米级的测量精度，帮助工程师准确识别并调整关键部位的间隙大小。随着智能传感器和物联网技术的发展，越来越多的机械设备开始集成在线监测功能，使得操作人员可以在不影响生产流程的前提下，随时获取设备运行状态的信息，并及时采取措施进行维护和调整。这些进步为解决精密机械结构中微小间隙问题提供了强有力的技术支持，同时也推动了相关领域研究向更高层次发展。通过不断探索和创新，未来有望开发出更加高效可靠的微小间隙调整方法，进一步提升精密机械的整体性能。

## 二、传统微小间隙调整方法的局限性分析

在精密机械结构的设计与制造过程中，传统微小间隙调整方法虽然在过去发挥了重要作用，但随着技术的进步和对精度要求的不断提高，这些方法逐渐显现出其局限性。一种常见的传统方法是通过手工调整螺钉或垫片来改变组件间的间隙。这种方法依赖于操作人员的经验和技术水平，容易出现人为误差，并且在高精度要求下难以保证一致性。特别是在纳米级或亚微米级的精密调整中，手动调节不仅费时费力，而且很难达到所需的精度标准。由于这种调整通常是一次性的，若设备运行一段时间后需要重新校准，则可能需要重复整个复杂的过程，增加了维护成本和时间消耗。

另一个传统方法是利用热膨胀原理进行间隙调整。该方法通过加热特定部件使其膨胀以减小微小间隙，或者冷却以增大间隙。尽管这种方法在某些应用场景中表现出一定的灵活性，但它也存在显著的局限性。热膨胀系数的精确控制是一个挑战，尤其是在多材料组合的系统中，不同材料的热膨胀行为差异可能导致非预期的结果。其次，温度变化可能会引起其他部件的尺寸变化，进而影响整体系统的稳定性。在半导体制造设备中，任何细微的温度波动都可能影响到芯片的制造精度。虽然热膨胀法在理论上可行，但在实际应用中需要考虑诸多因素，如环境温度的稳定性、材料的选择以及加热/冷却过程中的均匀性等。这些因素限制了该方法在高精度领域的广泛应用。

除了上述方法外，还有一些基于机械装置的调整方式，如使用弹簧或弹性元件来补偿间隙变化。这类方法通过提供可调节的预紧力来维持组件间的接触状态，适用于承受动态载荷的

场合。弹簧或弹性元件的长期使用会导致疲劳失效，从而失去原有的补偿功能，甚至引发新的问题，如振动加剧和磨损增加。这类方法往往无法实现亚微米级别的精细调整，对于要求极高精度的应用场景显得力不从心。总体而言，传统微小间隙调整方法在面对现代精密机械日益增长的精度需求时，暴露出明显的不足。为了克服这些问题，研究人员正在探索新型材料和技术，如电致伸缩材料的应用和激光干涉测量技术，以期提供更加高效可靠的解决方案。

## 三、基于电致伸缩材料的微小间隙调整技术探究

基于电致伸缩材料的微小间隙调整技术为精密机械结构中的高精度调整提供了新的解决方案。电致伸缩材料在施加电场时能够发生可逆形变，这种特性使其成为一种理想的微调元件。与传统方法相比，电致伸缩材料能够在不依赖外部热源或机械装置的情况下实现亚微米甚至纳米级别的精确控制。在半导体制造设备中，利用电致伸缩材料可以动态调节关键部件之间的间隙，确保加工过程中的高精度定位。由于其响应速度快、可控性强，电致伸缩材料特别适用于需要实时监控和快速调整的应用场景。通过精确控制电场强度，操作人员可以轻松实现对间隙大小的细微调整，从而提升整个系统的稳定性和可靠性。

电致伸缩材料的独特性能不仅体现在其高精度调整能力上，还在于其优异的环境适应性。这些材料通常具有良好的耐温性能和化学稳定性，能够在较宽的工作温度范围内保持稳定的性能表现。这意味着即使在极端环境下，如高温或腐蚀性环境中，电致伸缩材料依然能够有效工作。在航空航天领域，精密仪器往往需要在严苛的条件下运行，电致伸缩材料凭借其卓越的环境适应性，能够在这些特殊环境中提供可靠的间隙调整功能。电致伸缩材料还具有较长的使用寿命和较低的维护需求，这使得它们在长期运行过程中表现出色，减少了设备停机时间和维护成本。

材料的选择和制备工艺直接影响到其性能表现。不同类型的电致伸缩材料具有不同的电致伸缩系数和响应特性，因此需要根据具体应用场景进行合理选择。电场的均匀性和稳定性是影响调整精度的关键因素之一。为了确保电致伸缩材料的有效工作，必须设计合理的电极结构和电源系统，以提供稳定且均匀的电场分布。电致伸缩材料在长期使用过程中可能会出现疲劳现象，导致其性能逐渐下降。研究人员正在探索新型材料配方和改进制造工艺，以提高材料的耐用性和抗疲劳性能。随着相关技术的不断进步，电致伸缩材料在精密机械领域的应用前景将更加广阔，有望为解决微小间隙调整问题提供更为高效可靠的方案。

## 四、不同间隙调整方法的效果比较

在精密机械结构中，不同间隙调整方法的效果各有千秋，具体选择取决于应用场景和精度要求。传统的手动调整方法依

赖于操作人员的经验和技术水平，虽然简单直接，但在高精度应用中往往难以满足需求。在半导体制造设备中，微米甚至纳米级别的间隙变化都会显著影响最终产品的质量。手动调整不仅耗时费力，而且很难保证每次调整的一致性和精确度。这种方法在长期使用过程中需要频繁重新校准，增加了维护成本和时间消耗。基于电致伸缩材料的调整技术能够在不依赖外部热源或机械装置的情况下实现亚微米甚至纳米级别的精确控制，响应速度快且可控性强，特别适用于需要实时监控和快速调整的应用场景。

另一种常见的传统方法是利用热膨胀原理进行间隙调整。通过加热或冷却特定部件来改变其尺寸，从而调整组件间的间隙。尽管这种方法在某些应用场景中表现出一定的灵活性，但其局限性也不可忽视。热膨胀系数的精确控制是一个挑战，特别是在多材料组合的系统中，不同材料的热膨胀行为差异可能导致非预期的结果。温度变化可能会引起其他部件的尺寸变化，进而影响整体系统的稳定性。在高精度测量仪器中，任何细微的温度波动都可能影响到测量结果的准确性。尽管热膨胀法在理论上可行，但在实际应用中需要考虑诸多因素，如环境温度的稳定性、材料的选择以及加热/冷却过程中的均匀性等。

除了上述方法外，还有一些基于机械装置的调整方式，如使用弹簧或弹性元件来补偿间隙变化。这类方法通过提供可调节的预紧力来维持组件间的接触状态，适用于承受动态载荷的场合。弹簧或弹性元件的长期使用会导致疲劳失效，从而失去原有的补偿功能，甚至引发新的问题，如振动加剧和磨损增加。这类方法往往无法实现亚微米级别的精细调整，对于要求极高精度的应用场景显得力不从心。相比之下，电致伸缩材料不仅具备更高的调整精度，还具有良好的耐久性和环境适应性。通过结合先进的传感器技术和智能控制系统，电致伸缩材料的应用范围得到了进一步扩展，实现了从单一组件到复杂系统的全方位优化。

## 五、精密机械中微小间隙调整技术的应用前景与挑战

精密机械中微小间隙调整技术的应用前景广阔，尤其在高精度制造和关键设备维护领域展现出巨大潜力。随着科技的进步和工业需求的提升，对机械结构稳定性和精度的要求日益增高。电致伸缩材料作为一种新型调整手段，凭借其高精度、快速响应和环境适应性，在半导体制造、航空航天以及医疗设备等行业中得到了初步应用。在半导体制造过程中，电致伸缩材料可以动态调节光刻机中的关键部件间隙，确保纳米级加工精度，从而提高芯片生产效率和质量。这类材料还能够集成到智能传感器系统中，实现对机械结构状态的实时监控与自动调整，进一步提升了系统的智能化水平和可靠性。

尽管电致伸缩材料在微小间隙调整方面展现出显著优势，但在实际应用中仍面临诸多挑战。首先是材料本身的性能优化问题。不同应用场景对电致伸缩材料的电致伸缩系数、响应速度和耐久性有不同的要求，因此需要开发出具有特定性能的新型材料。电场的均匀性和稳定性是影响调整精度的关键因素之一。为了确保电致伸缩材料的有效工作，必须设计合理的电极结构和电源系统，以提供稳定且均匀的电场分布。长期使用过程中可能会出现材料疲劳现象，导致其性能逐渐下降。研究人员正在探索改进材料配方和制造工艺的方法，以提高材料的耐用性和抗疲劳性能。

随着相关技术的不断进步和创新，基于电致伸缩材料的微小间隙调整技术有望在更多高精度制造领域发挥重要作用。通过结合先进的传感技术和智能控制系统，可以实现对机械结构状态的全面监测和精准调控，从而提升整体系统的稳定性和可靠性。随着新材料的研发和制造工艺的改进，电致伸缩材料的成本将进一步降低，使其在更广泛的工业应用中具备经济可行性。跨学科的合作研究也将为这一领域带来新的突破，例如通过借鉴生物材料的设计理念来改善电致伸缩材料的性能。虽然目前仍存在一些技术和应用上的挑战，但电致伸缩材料在精密机械中的应用前景依然十分光明，预计将在未来几年内取得重要进展，并为精密机械行业带来革命性的变化。

## 结语：

本文探讨了精密机械结构中微小间隙调整技术的研究现状及其应用前景，重点分析了几种主流的调整方法，并深入讨论了基于电致伸缩材料的新技术。通过对比传统方法和新技术的效果，发现电致伸缩材料在高精度、快速响应及环境适应性方面展现出显著优势。尽管面临一些技术和应用上的挑战，但随着新材料的研发和制造工艺的进步，基于电致伸缩材料的微小间隙调整技术有望在未来取得更大突破，为精密机械行业带来革命性的变化。

## [参考文献]

- [1]刘伟，陈明.精密机械结构中微小间隙调整技术研究进展[J].机械工程学报，2023，59（4）：123-130.
- [2]孙涛，高翔.电致伸缩材料在精密间隙调整中的应用与展望[J].材料科学与工程学报，2024，42（3）：215-222.
- [3]赵强，李娜.热膨胀法在精密机械间隙调整中的局限性分析[J].精密制造与自动化，2023，60（2）：89-95.
- [4]韩冰，王丽.新型智能传感器系统在精密机械中的应用[J].仪器仪表学报，2024，43（5）：310-317.
- [5]黄杰，周敏.高精度激光干涉测量技术及其在机械间隙调整中的应用[J].光学精密工程，2023，31（6）：167-174.