文章编号:1673-5005(2006)03-0085-04

微细电火花加工机床微进给机构的分析

甘真玮, 李文卓, 李玉坤

(中国石油大学 机电工程学院,山东 东营 257061)

摘要:微进给机构是微细电火花机床最重要的组成部分之一。运用直接耦合的方法,在ANSYS软件环境下,对微细电火花机床的微伺服系统中的高频响微进给机构进行了结构的静态分析和模态分析,得到该压电微进给机构的固有频率和振型以及在电压激励下的最大变形量,并据此设计加工出微进给机构。结果表明,所设计的微进给机构具有很高的固有频率,可以实现高精度、高频响进给,满足了微细电火花加工的要求。采用所设计的微进给机构进行的微细电火花加工获得了非常好的效果,加工效率大大提高,加工质量明显改善。

关键词:微细电火花加工; 微进给机构; 有限元分析; 直接耦合场

中图分类号:TG 661;TG 502 **文献标识码**:A

Analysis of micro-servo mechanism of micro electronic discharge machining machine tool

GAN Zhen-wei, LI Wen-zhuo, LI Yu-kun

(*College of Mechanical and Electronic Engineering in China University of Petroleum, Dongying* 257061, *Shandong Province, China*)

Abstract: The micro-servo mechanism is one of the most important parts of micro electronic discharge machining (micro-EDM) machine tool. The high frequency responsibility micro-servo mechanism of micro-EDM activated by piezoceramics was analyzed by direct coupled method in ANSYS system. The analyses included structural static analysis and modal analysis, from which its natural frequency, mode shapes and the maximum deflection was gotten when it is activated by an applied voltage. The micro-servo mechanism was designed. The results indicate that the micro-servo mechanism has high natural frequency and high precise, which can meet the need of micro-EDM. Using the designed mechanism, the good effect of micro-EDM can be gotten while the efficiency and quality are markedly improved.

Key words: microelectronic discharge machining; micro-servo mechanism; finite element analysis; direct coupled-field

目前,微细电火花加工技术已广泛应用在航空航天、医学、模具、微电子器件等方面[1-3]。在微细电火花加工中,由于其加工对象的微小,因此要求放电间隙控制在1 μm以内。在这样小的放电间隙中,为防止拉弧和短路现象的发生,就要求机床的伺服控制系统具有很高的分辨率和高频响应能力。传统的伺服控制系统如电液伺服进给系统很难达到这样高的分辨率,而步进电机驱动的伺服进给系统虽然可以满足微步距的要求,但因其传动链长,有反向间隙和惯性的存在,使得其回退响应不灵敏。采用压电元件和柔性铰链机构的压电微进给机构因其位移控制精度高、响应速度快、驱动力较大等优点,被广泛应用于扫描探测显微镜、超精密加工等领域[4-5]。柔性铰链机构设计常常是采用经验法或实验法,设计出的柔性铰链机构通常达不到最佳的尺寸组合,且费时费力。而采用有限元法则可以从理论角度分析出机构性能指标和机构主要尺寸的定量关系。ANSYS软件具有强大的前后处理模块及结构分析模块,是对机械结构进行有限元分析的有效工具[6]。因此,笔者采用ANSYS软件对微进给机构进行结构分析。

收稿日期:2005-10-10

基金项目:中国石油大学(华东)科研基金资助项目(Y030314)

作者简介:甘真玮(1982-),男(汉族),四川广安人,硕士研究生,主要研究方向为微细电火花加工技术和机电一体化技术。

万方数据

1 压电微进给机构

电致伸缩材料具有位移控制精度高、响应速度快、驱动力较大、功耗低、可控性较强等优点,已经被广泛应用于各种高精度要求的微位移机构。而柔性铰链是一种利用刚性极低的柔性结构产生有限角位移的铰链,最常用的是中间细窄的杆结构,细窄处相对于其他部分特别薄,受力时仅该处发生弹性变形,而产生有限角位移,其他杆件可视为刚体,该细窄处则在机械结构中起到铰链的作用。它与一般铰链的区别是没有机械结构上的间隙,并且有弹性回复力,因而消除了运动中的摩擦和回退空程[7]。

本文中所采用的压电微进给机构见图 1。上端与机床床身相连,下端连接电极。在电压载荷的驱动下,压电陶瓷伸长,电极实现进给;如遇到短路、拉弧等不正常放电现象,压电陶瓷缩回,电极回退。

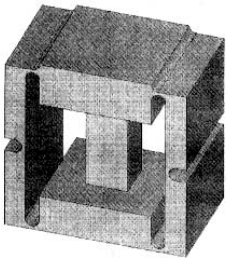

图 1 压电微进给机构模型

柔性铰链的主要性能参数包括刚度和精度,其中刚度对其变形量、振动频率和精度有直接影响,因此柔性铰链的设计也是从结构的刚度出发进行的。由于柔性铰链机构中除细窄切口处外可以视为刚体,且柔性铰链的厚度变化不大,因此其厚度的影响可暂不考虑。所以,对柔性铰链的设计重点是机构切口尺寸和柔性铰链材料的选取(这里的切口尺寸是指机构切口除去切除部分的厚度)。本文中选用合金钢和铝合金两种材料,并各自取两种典型的切口尺寸进行结构分析,比较这 4 个模型的分析结果。

2 结构有限元分析

用 ANSYS 软件进行有限元分析主要包括建立有限元模型(前处理)、加载求解和结果评估(后处理)3 个步骤。

2.1 前处理

ANSYS 软件的前处理模块主要实现 3 种功能:参数定义、实体建模和网格划分。对于本文中所分析的压电微进给机构,关键的问题就是压电陶瓷材料的单元类型和材料属性的定义。

压电分析涉及到电场和结构场的耦合,是一个典型的直接耦合分析。直接耦合分析使用包括多场自由度的耦合单元,通过计算全部所需物理量的单元矩阵或载荷向量进行耦合。对压电陶瓷,本文中选用的是六面体耦合单元 Solid5,在单元选项中选择自由度 UX, UY, UZ 和 $VOLT$。对柔性铰链机构,不涉及耦合场分析的内容,可采用四面体单元 Solid92 或六面体单元 Solid95[8]。

由于常用的压电陶瓷材料手册所提供的材料参数和 ANSYS 软件所需要的材料属性参数不一致,所以,在计算前,必须把手册里的材料参数转换为 ANSYS 所需要的材料属性参数。

手册或各种出版物里提供的压电参数关系为

$$\{S\}=[S^E]\{T\}+[d]\{E\}, \tag{1}$$

$$\{D\}=[d]^{\mathrm{T}}\{T\}+[\varepsilon^t]\{E\}. \tag{2}$$

而 ANSYS 所需要的压电参数关系为

$$\{T\}=[C^E]\{S\}-[e]\{E\}, \tag{3}$$

$$\{D\}=[e]^{\mathrm{T}}\{S\}+[\varepsilon^s]\{E\}. \tag{4}$$

式中,$\{T\}$,$\{S\}$分别为结构的应力矩阵和应变矩阵;$\{D\}$为电势或电场密度;$\{E\}$为电场强度矩阵;$[S^E]$和$[C^E]$为结构的顺性矩阵和刚度矩阵;$[d]$,$[e]$分别为压电陶瓷电/应变、电/应力关系矩阵;$[\varepsilon^t]$和$[\varepsilon^s]$分别为在常应力和常应变条件下的介电常数。

把式(1)改为基于应力的形式,即

$$\{T\}=[S^E]^{-1}\{S\}-[S^E]^{-1}[d]\{E\}. \tag{5}$$

将式(5)代入式(2)中,得

$$\{D\}=[d]^{\mathrm{T}}[S^E]^{-1}\{S\}+([\varepsilon^t]-[d]^{\mathrm{T}}[S^E]^{-1}[d])\{E\}. \tag{6}$$

将式(5),(6)和式(3),(4)比较,则可得出压电陶瓷各材料参数的转换公式为

$$[C^E]=[S^E]^{-1}, \tag{7}$$

$$[\varepsilon^s]=[\varepsilon^t]-[d]^{\mathrm{T}}[S^E]^{-1}[d], \tag{8}$$

$$[e]^{\mathrm{T}}=[d]^{\mathrm{T}}[S^E]^{-1}=[S^E]^{-1}[d]. \tag{9}$$

在划分网格的时候,由于柔性铰链结构的不规则性,不可能用映射方法划分网格。另外,为减少计算机工作量,在柔性铰链中间部分采用较稀疏的网格密度,而在切口处采用较密的网格,因此应该采用智能网格划分对柔性铰链进行分网。而压电陶瓷部分为规则的长方体,可以采用映射方法划分,以得到规则的六面体结构。另外需要注意的是,在网格划分之前,需要对重合的节点进行 VGLUE(体结合)

万方数据

操作，合并重合的节点，使压电陶瓷和柔性铰链之间产生力和位移的传递以及位移自由度的耦合。网格划分结果如图 2 所示。

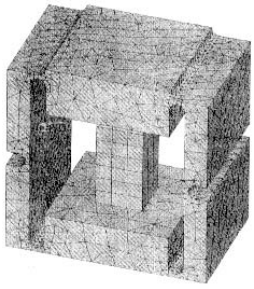

图 2　模型的网格划分

2.2　结构静态分析

根据压电元件驱动机构的工作方式，在其进给时，即柔性铰链结构伸长时，固定上表面。所以，在上表面施加所有自由度约束。根据压电陶瓷手册，它所能承受的最大驱动电压为 100 V，因此在压电陶瓷两端施加 100 V 的电势差，求解后其结果即是该驱动机构的最大进给量。

求解后保存结果，然后修改柔性铰链的材料属性和切口尺寸，用相同步骤求解其余 3 个模型。

2.3　观察静态分析结果

进入通用后处理——POST1 阶段，可观察到变形图和节点求解、单元求解的云图。压电微进给机构的变形图如图 3 所示。当切口尺寸为 0.5 mm 时，合金钢和铝合金模型的最大进给量分别为 3.8，7.57 μm；当切口尺寸为 1.0 mm 时，二者的最大进给量则分别为 2.28，5.18 μm。

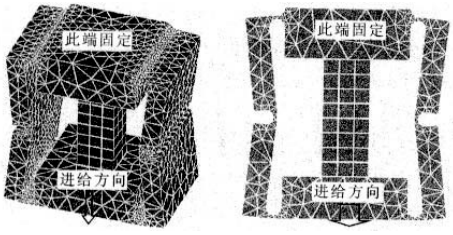

图 3　压电微进给机构的变形

2.4　模态分析

在外力的激励下，结构本身各部位将围绕其平衡位置振动。对于大部分结构系统来说，都不希望有振动的发生，因为振动会造成结构的共振或结构疲劳破坏。因此，了解结构的固有频率和振型，进而避免外部激励频率和结构固有频率相同或接近，对避免共振是非常重要的。另外，模态分析也是其他动力学分析如谐响应与瞬态动力学分析等的起点。

简单来说，模态分析就是用加速度传感器来测出结构各个部位的振动信号，用快速傅里叶变换器(FFT)，将其变换为一系列具有单一频率的简谐振动的组合，并进一步获得对应于各个单一振动频率振型的方法。ANSYS 软件为用户提供了 6 种模态提取方法：Subspace 法、Block Lanczos 法、PowerDynamics 法、Reduced (Householder) 法、Unsymmetric 法和 Damped 法。其中，Unsymmetric 法和 Damped 法只在满足其条件的特殊情况下使用。另外 4 种方法中，Block Lanczos 法所耗系统资源最多，但求解过程方便，结果最准确；Reduced 法求解速度快、耗资少，对对称模型的求解和扩展也很方便，但结果略粗，通常被一般用户采用。对于本文中所涉及的柔性铰链机构，其结构比较简单，所以采用 Block Lanczos 法，以获得更高的精度。

进入求解器，建立新的分析模型，选择模态分析，在分析选项中选择 Block Lanczos 法，提取 5 个模态。求解后进入通用后处理，观察振型和固有频率。

由于共振只发生在振动方向与载荷方向相同、频率与载荷频率相近的振型上，以合金钢(切口厚度 0.5 mm)的模型为例，其前三阶振型如图 4 所示。可以看出，对该模型，第三阶振型在与第三阶固有频率相近的动载荷下会发生共振，造成 Y 方向变形出现异常，表 1 即是 4 种模型各自可能发生共振的振型阶次和固有频率。另外，压电陶瓷驱动机构在工作时还要受电场的影响，所以该机构在开路和断路两种情况下固有频率略有不同。

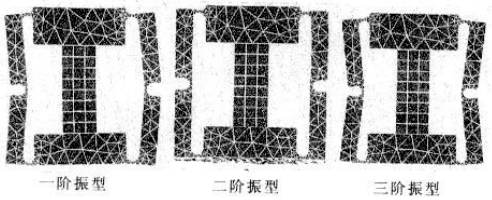

图 4　合金钢/切口厚度 0.5 mm 模型的前三阶振型

表 1　4 种模型的模态分析结果

材料	切口厚度 h/mm	断路		开路	
		振型阶次 n	固有频率 f/Hz	振型阶次 n	固有频率 f/Hz
铝合金	0.5	3	3210	3	3981
铝合金	1.0	3	5998	5	7653
合金钢	0.5	3	5042	4	6894
合金钢	1.0	3	9672	5	13088

万方数据

3 实际应用

在最终的实际应用中,采用合金钢材料,取切口厚度为 0.5 mm。该尺寸的微驱动机构具有合适的固有频率和最大进给量。图 5 为按如上设计所加工出的微进给机构的实物照片。

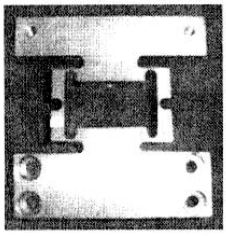

图 5 微进给机构实物照片

在实际加工中,采用了宏观、微观同时驱动电极的方案,用步进电机作宏观驱动,用该微进给机构作微观驱动,并实时检测放电间隙状态,采用半闭环控制方法驱动电极,既保证了进给速度,又极大地提高了进给精度。图 6 为采用该微进给机构加工的直径为 25 μm,厚度为 0.1 mm 的微小孔。从图片中可以看出,微孔的边缘轮廓加工质量很好,且其加工时间也比以前大大缩短。仅采用步进电机做伺服驱动时,加工一个这样的小孔需要 300 s 左右,而采用本文中所研制的压电陶瓷微进给机构仅需要 26 s。这反映出该进给机构能很好地满足微细电火花加工的伺服要求。

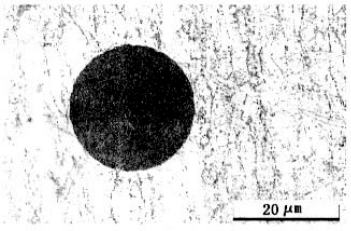

图 6 用微进给机构加工的 Φ25 μm 微小孔

4 结束语

根据对柔性铰链的静力分析和模态分析可以看出,合金钢材料的机构具有更高的固有频率,切口尺寸更薄的柔性铰链具有更大的进给量。本文中所选用的合金钢材料、切口尺寸为 0.5 mm 的机构可以获得较高的固有频率和最大进给量,能够满足微细电火花加工的微进给要求。采用所设计的微进给机构进行的微细电火花加工获得了非常好的效果,成功地加工出了 Φ25 μm 微小孔,且加工效率大大提高,加工质量明显改善。

参考文献:

[1] MASUZAWZ T. State of the art of micromachining[J]. Annals of the CIRP, 2000,49(2):473-488.

[2] KATSUSHI Furutani, MITSUNORI Urushibata, NAOTAKE Mohri. Condition monitoring of stacked piezoelectric actuator using induced charge[C]//Proceedings of 13th Annual Meeting—the American Society for Precision Engineering. New York: ASPE, c1998.

[3] LIU Yung-tien, TOSHIRO Higuchi, FUNG Rong-Fong. A novel positioning table utilizing a spring-mounted piezoelectric actuator-part I: experimental design and results[J]. Precision Engineering, 2003,27(1):14-21.

[4] 李文卓. 微细电火花加工系统及其相关技术的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学机电工程学院,2002.

[5] 李文卓,赵万生,于云霞. 微细电火花加工的关键技术分析[J]. 石油大学学报:自然科学版, 2002,26(3):65-68.
LI Wen-zhuo, ZHAO Wan-sheng, YU Yun-xia. Several key technologies of microelectronic discharge machining [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2002,26(3):65-68.

[6] 曹坚,周庆华,严供标,等. 基于压电陶瓷的二维微动工作台有限元分析[J]. 机床与液压,2003(2):39-40.
CAO Jian, ZHOU Qing-hua, YAN Gong-biao, et al. Finite element analysis of two dimensions micro-positioner[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2003(2):39-40.

[7] 熊本炎,李雪丽. 微定位器中柔性铰链结构的有限元分析及改进[J]. 陕西工学院学报,2004,20(1):22-24.
XIONG Ben-yan, LI Xue-li. Analysis and improvements on the structure of flexure hinge in micropositioner by using finite element[J]. Journal of Shaanxi Institute of Technology,2004,20(1):22-24.

[8] IMAOKA S. ANSYS tip of the week: conversion of piezoelectric material data[M]. CSI Inc, 1999.

(编辑 沈玉英)

万方数据