

压电微动伺服机构

潘仲明 王世民 王浩凡 李圣怡

(精密机械与仪器系)

摘要 本文详尽论述了作为精密车床直线运动误差检测, 补偿系统中的微动伺服机构的工作原理、伺服机构结构参数的优化设计以及为提高伺服机构的频响而设计的“有源高压放电电路”。最后, 建立了压电微动伺服机构的静、动态特性的数学模型。

关键词 压电微动伺服机构

1. 概 述

现代机械制造业的发展趋势是不断建立和发展高效率、高精度和高可靠性的自动化生产系统。在自动加工系统中, 单配备高性能的电子计算机是不够的, 还要有响应快、精度高、可靠性好的检测元件和伺服机构。而后者一直是人们感到棘手的问题, 尤其是在超精密自动加工系统中, 这个问题更加突出, 亟待解决。本文介绍了高精度、高频响的微动伺服机构的研制成果。该机构已经成功地应用在精密车床运动误差检测、补偿系统中。

2. 微动伺服机构的结构参数的优化设计

1. 微位移原理的选择

作为精密车床关键部件的运动误差的检测与补偿系统中的伺服机构在选择其工作原理时必须注意如下重点:

- (1) 必须具有足够的刚度来承受切削过程的抗力;
- (2) 必须具有适当的调节范围($\pm 5\mu\text{m}$)和较高的重复精度($\pm 0.1\mu\text{m}$);
- (3) 必须具有良好的频响特性;
- (4) 结构紧凑、体积小, 能方便地装入车床已有的空间而不影响车床的通用性。

目前可供选择的微位移工作原理有六大类。可概括为机械传动、弹性变形、受热变形、液压驱动和磁致伸缩以及电致伸缩等六类。

普通的机械传动方式有导致发生爬行的摩擦力、间隙和传动误差以及分辨率不易做得很高等原因,很难获得稳定的微米级调节精度。磁致伸缩由于镍、铝铁合金一类材料在磁场作用下,除了产生磁致伸缩外,还伴有发热伸长。加热伸长方式会给机床带来新的热源。所以,这两种方式的效果也不理想。弹性变形方式主要优点是无间隙、不需要润滑、无爬行现象、无轴承噪音、易于实现很高的位移分辨率,在低频变形时几乎没有内热产生。但是,要使弹性体发生变形需要有外加驱动力。常见的驱动方式有螺杆驱动、气动、液动和电致伸缩驱动等方式。螺杆驱动由于不易于遥控、气动和液动分别需要供气或供油装置,且能耗大、噪声高、体积小,且需要良好的防漏措施。因此,这三种驱动方式亦不理想。压电陶瓷具有灵敏度高、性能稳定、体积小和易于控制等优点,被公认为是理想的微位移驱动器。

综上所述,我认为用电致伸缩陶瓷作为微位移驱动器以使弹性体变形而实现微量调节的方案最佳。电致伸缩陶瓷的变形量与其激励电压(V)成正比,从而通过控制电压的变化,便可达成控制微位移驱动器的伸缩量之目的。

2. 电致伸缩微位移驱动器的特性

电致伸缩陶瓷(弛豫铁电体)微位移驱动器是一种新型的机—电转换功能器件。与一般铁电陶瓷(PZT)的性能相比,它具有滞后作用小、经时稳定性好等优点。

电致伸缩效应一般表达式为:

$$s = H \cdot E^2 \quad (1)$$

式中: s 为应变; E 为电场强度(V/m); H 为电致伸缩系数(m^2/V^2)。

一个由若干个陶瓷片组成的叠层结构所产生的总位移 d 为:

$$d = n \cdot s \cdot t \quad (m) \quad (2)$$

式中: t 为陶瓷片厚度(m); n 为陶瓷片个数。

3. 结构参数的优化设计

压电驱动伺服机构的结构如图1所示。当在微位移驱动器(陶瓷片叠层体)②上施加电压,弹性体①部(非固定)将发生位移。电感测微仪③用于监测①部的实际位移量,以保证精确的微量调节。

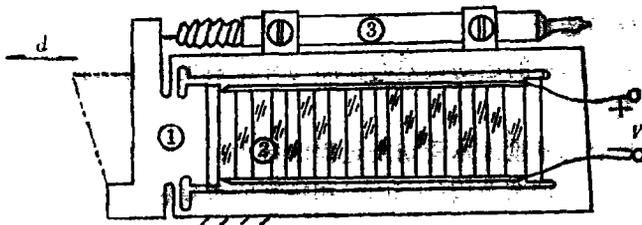


图 1

机械结构的力学模型可简化为如图2(a)所示的形式。由于 $h \gg f$, 所以, 可把中部的长方块($a \cdot b \cdot h$)视为刚体。即长方块在分布力 q_{max} 作用下, 只发生平动而不发生弯曲。故该力学模型可进一步简化为图2(b)所示的计算模型。

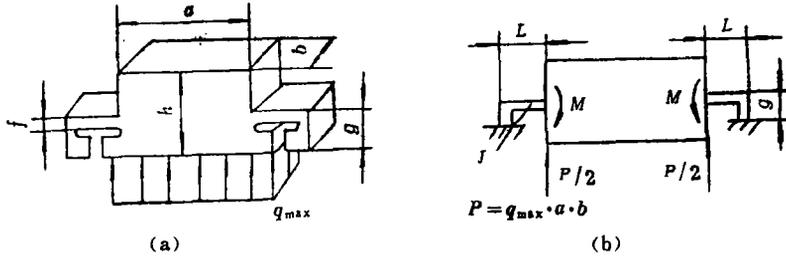


图 2

图中： P 为装配预紧力与最大驱动力之和； J 为弹性薄板（片簧）惯性矩； M 为弯矩。
经推导，得到优化设计模型：

$$\max: \delta = \frac{PL^2}{2Ebf^3} (L + 6g);$$

$$\text{sub: } L = \frac{0.24\delta_b \cdot b}{P} f^2;$$

$$L_{\min} \leq L \leq L_{\max};$$

$$b_{\min} \leq b \leq b_{\max};$$

$$f = f_k \quad k = 1, 2, \dots, n;$$

$$g = g_{k_1} \quad k_1 = 1, 2, \dots, n_1.$$

上式中： δ 为弹性体的变形量。

在此选用机械性能较好的弹簧钢60Si₂Mn作为弹性体的材料，查材料手册得：

$$\delta_b = 800\text{N/mm}^2; E = 2 \times 10^5\text{N/mm}^2.$$

抽样试验表明在0~53kg的荷重下，对481AQI微位移驱动器施加300V电压，其伸长量几乎不变。为此取：

$$P = 650\text{N}$$

为使机构的结构紧凑、体积小，选取：

$$L_{\min} = 4\text{mm}; L_{\max} = 7\text{mm}$$

$$b_{\min} = 18\text{mm}; b_{\max} = 22\text{mm}$$

$$f_k = 0.5 \sim 1.6\text{mm} \quad \text{Step(步长)} = 0.1\text{mm}$$

$$g_{k_1} = 1 \sim 2.5\text{mm} \quad \text{Step} = 0.5\text{mm}$$

参数优化结果为：

$$\delta_{\max} = 118\mu\text{m}; L_{\text{opt}} = 7\text{mm};$$

$$f_{\text{opt}} = 1.1\text{mm}; b_{\text{opt}} = 19\text{mm}; g_{\text{opt}} = 2\text{mm}.$$

如果要求微动伺服机构的最大行程为20 μm ，那么，将481AQI镶在弹性体内，其装配过盈量不宜超过98 μm 。否则，将损坏片簧。

机构的临界频率为：

$$\omega_{kp} = \sqrt{K^2 + \frac{P'}{me}} \quad (3)$$

式中：

$$K = \sqrt{C_s/m} \tag{4}$$

在此， K 为机构的固有频率； P' 为预紧力； m 为弹性体活动部分的质量； C_s 为片簧的刚度； e 为活动部分的位移振幅（令 $e = \pm 5\mu\text{m}$ ）。

将参数优化结果代入式(3)、式(4)中，计算得：

$$\omega_{kp} \approx 54900 \text{ rad/sec}$$

当伺服机构的最大工作频率 ω_{max} 小于 ω_{kp} 时，在一定的位移幅度下，481AQI器件将始终与弹性体保持紧配合，从而使该机构能正常工作。

3. 481AQI激励电源的设计

根据481AQI微位移驱动器的特性和检测、补偿系统的要求，对激励电源提出如下指标和要求：

- (1) 输出电压：0~500V
- (2) 输出电流：0~100mA
- (3) 稳定度：0.04%
- (4) 增益：40dB
- (5) 保护形式：自动限流保护
- (6) 控制方式：微机控制或手动调节
- (7) 输出指示：手动调节时，由表头显示
- (8) 供电： $\sim 220\text{V} \pm 10\%$

2. 电路设计

放大电路原理有两种：一种是调制放大原理，另一种是直接放大原理。前者由于高频变压器的输出功率较小，而481AQI陶瓷是激励电源的容性负载（约 $2\mu\text{F}$ ），没有大功率的激励源，很难提高其频响。所以，在此采用直接放大式电路，并巧妙设计了“有源放电回路”来取代必须与481AQI并联的放电电阻，以提高电路在容性负载下的频响。其详细电路如图3所示。

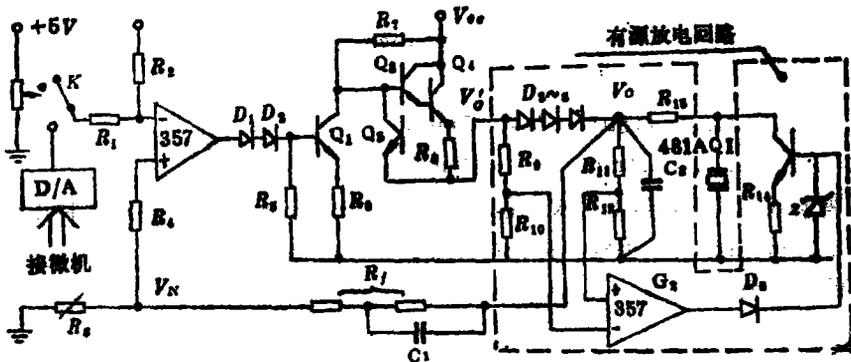


图 3

本电路由两个性能较好的运算放大器和五个高压大功率晶体管及其它电子元件组成。

在有源放电回路中， D_6 的作用是禁止 G_2 的负相输出电压施加在 Q_5 的基极上，以防 Q_5 击穿。 z 管起限幅作用。回路中要求：

$$R_9/R_{10} = R_{11}/R_{12} \tag{5}$$

当电源对481AQI充电时，在 D_3 上约有1.8V电压降。这时， G_2 的负输入端的电位高于正输入端， G_2 的输出电压为负，被 D_6 阻截， Q_5 不导通而呈高阻状态。当施加在481AQI上的电压被降低时（即 V_0' 低于 V_0 ）， G_2 的正相输出使 Q_5 导通。481AQI就通过 Q_5 和 R_{14} 迅速放电，直至 V_0 重新低于 V_0' ， Q_5 又呈高阻状态。

4. 机构的静、动态特性的测试及其辨识

1. 位移——电压特性的测试及其辨识

将微动伺服机构上的电极联接激励电源的输出端，应用分辨率为 $0.01\mu\text{m}$ 的millitron电感测微仪（西德）监测机构的位移量。表1给出了位移——电压的对应值。经多次测量，重复精度优于 $\pm 0.1\mu\text{m}$ 。

表 1

激励电压(V)	0	50	75	100	125	150	175	200	225	250
位移(μm)	0	0.25	0.45	0.80	1.20	1.85	2.45	3.25	4.10	5.10
激励电压(V)	275	300	325	350	375	400	425	450	475	500
位移(μm)	6.20	7.35	8.70	10.10	11.60	13.20	14.85	16.60	18.40	20.10

其位移——电压特性曲线如图4所示。显然，位移——电压的关系可用下式来逼近：

$$d = a \cdot V + b \cdot V^2 \tag{6}$$

式中： d 为位移量； V 为激励电压； a 、 b 为待定参数。

式6所示的数学模型是非线性的。在此运用单纯形搜索法估计待定参数。搜索目标函数是：

$$J(\beta) = \sum_{k=1}^N (d_k - aV_k - bV_k^2)^2 \tag{7}$$

式中： d_k 、 V_k 分别为实测的位移、电压值； β 为参数向量 $(a, b)^T$ 。

参数估计值为：

$$(a, b)^T = (1.3164, 0.0785)^T$$

于是：

$$d = 1.3164V + 0.0785V^2 \tag{8}$$

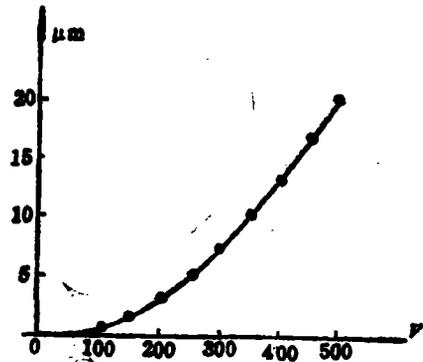


图 4

2. 动态特性的测试及其辨识

在此用B&K公司的动态测试仪进行测试,测试方法如图5所示。测量仪器的频带大大宽于微动伺服机构的频带,因此,可以不考虑仪器所带来的影响。

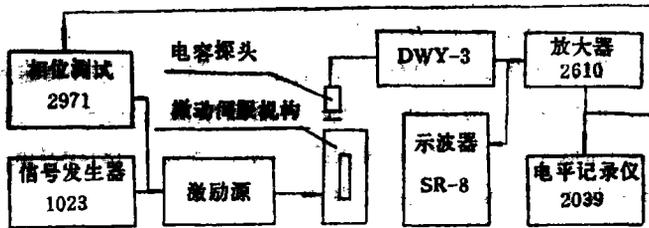


图 5

图6是微动伺服机构的幅频特性。其中虚线部分是用XFD-8A型超低频信号发生器和SR-8示波器观察并记录的低频特性(20Hz以下),以填补电平记录仪和信号发生器(1023)20Hz以下的低频空白段。微动伺服机构的相频特性基本上与惯性环节的相吻合。因此,可以用式(9)来描述微动伺服机构的频率特性:

$$G(j\omega) = K / (1 + j\omega T) \quad (9)$$

式中: K 为机—电转换常数; 时间常数 T 为 0.7×10^{-3} sec.

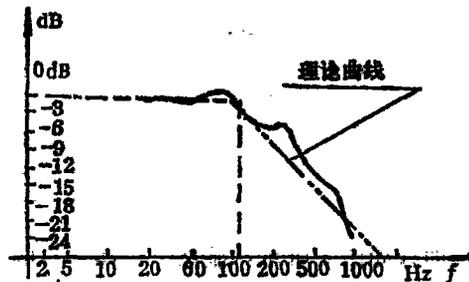


图 6

5. 结 论

实验结果证实压电微动伺服机构达到如下指标:

- (1) 行程: $20\mu\text{m}$
- (2) 分辨率: $0.1\mu\text{m}$
- (3) 重复精度: $\pm 0.1\mu\text{m}$
- (4) 最高频响: 100Hz (激励电压 $400 \pm 100\text{V}$)

本机构既可作为微进给机构(静态使用),又可作为精密车床加工误差检测。补偿系统中的微动伺服机构及其它各种有关精密定位、微量调节等方面的随动机构。

参 考 文 献

- [1] J. Bryan, Piezoelectric-Supported Thrust Bearing for the Tool Slide of a Diamond Turning Machine, *Annals of CIRP* Vol.24, 1 1975
- [2] 津田展宏等, 一体化の构造のX-Y方向微小变位、微小角度设定装置, (日)《精密机械》Vol.44, 1978.1

Piezoelectric Servomechanism for Micro-displacement

Pan Zhongming Wang Shiming Wang Haofan Li Shengyi

Abstract

This paper discusses in detail the working principles of the micro-servomechanism for the system of measurement and compensation for the linear moving error of a precise lathe. The parameters of the micro-servomechanism by optimal design are also presented in it.

An active circuit for high-voltage discharge in the electrical driving source has been designed to accelerate the electrostrictive ceramic 481AQI's discharge for improving the system's frequency response. Finally, the static and dynamic mathematical model of the system is established in this paper.

KEY WORDS Piezoelectric, Microfeed, Mechanism