

# 喷嘴挡板伺服阀力矩马达振动特性的谐响应分析\*

张 亮, 彭敬辉, 李松晶\*

(哈尔滨工业大学 流体控制及自动化系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 针对伺服阀自激噪声产生机理的问题,对伺服阀力矩马达的振动特性进行了研究,给出了一种双喷嘴挡板伺服阀力矩马达的结构及工作原理。基于结构力学基本原理,建立了该双喷嘴挡板伺服阀力矩马达衔铁挡板组件的振动特性有限元分析数学模型;采用有限元分析方法,对伺服阀力矩马达衔铁挡板组件进行了模态分析,计算了前7阶振型下衔铁挡板组件的固有频率,并通过谐响应分析得到了衔铁挡板组件在电磁力作用下的响应曲线。研究表明:衔铁和反馈杆是伺服阀力矩马达产生振动的关键部位,其在工作平面内的振动对伺服阀的工作性能影响最大,同时衔铁挡板组件的谐振峰值主要集中在低频范围内;通过谐响应分析给出了一种计算谐振振幅的方法,为伺服阀的性能改善及结构的优化提供了理论参考。

**关键词:** 双喷嘴挡板式; 伺服阀; 力矩马达; 振动特性; 谐响应特性; 有限元

**中图分类号:** TH137.51; TH137.52; TH122      **文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-4551(2012)12-1435-04

## Harmonic response characteristics of a hydraulic servo-valve torque motor

ZHANG Liang, PENG Jing-hui, LI Song-jing

(Department of Fluid Control and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Aiming at the mechanism of self-excited noise in servo valves, vibration characteristics of servo valve torque motors was studied. The structure and working principle of a double-nozzle-flapper servo valve torque motor was introduced. By using the finite element analysis method and model analysis, the corresponding natural vibration frequencies of the first seven-order vibration modes were calculated. The harmonic response curves under the electromagnetic force were given. The results indicate that the armature and feedback rod is the key parts which may cause vibration in the servo-valve. The vibration of them in the working plane makes the greatest impact on the performance of the servo valve. The resonant peak of the armature and nozzle flapper group is concentrated in the low frequency and a calculation method of the amplitude is given by the harmonic response analysis. Then a theory reference for improving the performance and the optimization of the structure of the servo valve is presented.

**Key words:** double-nozzle-flapper; servo valve; torque motor; vibration characteristics; harmonic response characteristics; finite element

## 0 引 言

伺服阀是液压控制系统中必不可少的元件,其工作特性对液压伺服系统的性能具有十分重要的影响<sup>[1]</sup>。由于液压伺服阀多采用射流元件作为前置级,例如喷嘴挡板伺服阀的喷嘴-挡板,而在射流流场中很容易产生气穴和剪切层振荡。因而如采用射流元件作为前置级的伺服阀,在尺寸设计不合理时,易产生自激

振荡和噪声,使伺服阀及整个伺服控制系统失稳,无法达到预期的控制效果<sup>[2]</sup>。

力矩马达是伺服阀的电-机械转换部件,用于驱动伺服阀前置级的挡板或射流管动作<sup>[3-4]</sup>。力矩马达的结构参数设计不合理,往往会导致伺服阀非线性的增加、工作不稳定、出现自激噪声等现象,作为驱动部件,力矩马达工作特性的改善是保证伺服阀正常工作 and 性能提高的关键之一<sup>[5-8]</sup>。卢长耿、宋新波等人通过

收稿日期: 2012-07-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50875055)

作者简介: 张 亮(1988-),男,河北泊头人,主要从事流体控制及自动化方面的研究. E-mail: caotijing02@163.com

通信联系人: 李松晶,女,博士,教授,博士生导师. E-mail: lisongjing@hit.edu.cn

理论分析给出了力矩马达的动、静态特征方程,分析了力矩马达的动、静态特性,并强调力矩马达的特性将直接影响伺服阀的性能<sup>[9-10]</sup>。因此,力矩马达振动特性的研究对伺服阀性能的改善及结构优化具有重要意义。

此前,已有研究者对射流管阀进行了模态分析,对其振动特性进行了研究。本研究将对喷嘴挡板伺服阀力矩马达进行模态分析,并进一步对其进行谐响应分析,求出对伺服阀性能影响最大的振型的振幅,从而为伺服阀的性能改善与结构优化提供理论参考。

### 1 结构及工作原理

双喷嘴挡板式伺服阀的结构原理如图1所示。

该伺服阀是一种力反馈式两级电液伺服阀,第1级液压放大器为双喷嘴挡板阀,第2级功率放大器为滑阀。

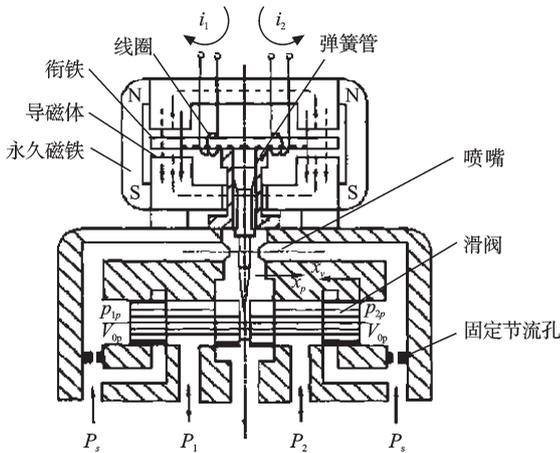


图1 双喷嘴挡板伺服阀的结构简图

图1中,当力矩马达线圈中有输入电流信号时,会在衔铁上产生电磁力矩,使衔铁挡板组件发生偏转,该电磁力矩的大小与方向决定于信号电流大小及方向。挡板的偏移将使一侧喷嘴挡板可变节流口减小,液流阻力增大,喷嘴的背压升高;而另一侧的可变节流口增大,液流阻力减小,喷嘴背压降低。这样可得到与挡板位置变化相对应的喷嘴背压,该背压加到与喷嘴腔相通的阀芯端部,推动阀芯移动。阀芯的移动又推动反馈端部的小球,产生反馈力矩作用在衔铁挡板组件上。当作用在衔铁挡板组件上的磁力矩、弹簧管反力矩、喷嘴对挡板反力矩、反馈杆反力矩达到平衡时,滑阀阀芯停止运动,其阀芯位移与输入信号电流成比例。

### 2 基于 ANSYS 的模态分析过程

(1) 建立几何模型。本研究利用CATIA 软件来建立衔铁挡板组件三维实体模型,所建模型如图2所示。

(2) 单元类型及材料属性参数设置。本研究对衔

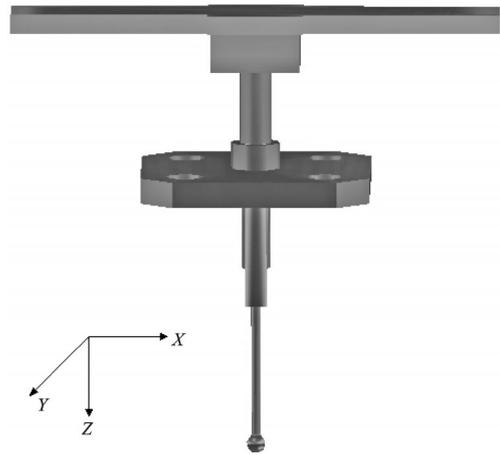


图2 三维实体模型

铁挡板组件划分单元时,采用十节点四面体单元Solid92。衔铁的材料为45#钢,弹簧管和法兰的材料为铍青铜,反馈杆的材料为3J1合金。

模型所选材料属性如表1所示。

表1 模型所选材料属性

	45#钢	铍青铜	3J1弹性合金
密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7 800	8 230	8 000
弹性模量 $E / (\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	$2 \times 10^{11}$	$1.33 \times 10^{11}$	$1.9 \times 10^{11}$
泊松比 $\mu$	0.3	0.35	0.3

(3) 网格划分。在进行网格划分时,由于各组成部分复杂程度不一,如采用标准统一的整体网格划分法不利于计算精度和计算速度的优化,故需采用对应的网格划分标准对各实体部分独立进行网格划分。本研究采用Mesh Tool工具进行自由网格划分,对于反馈杆和薄壁结构弹簧管做网格细化处理,网格形状均为四面体。

(4) 建立边界条件。当力矩马达衔铁组件上的反馈杆末端不安装到伺服阀主阀芯上的安装位置时,不考虑阀芯质量及其带来的位移约束的影响。因此,根据这一工况,力矩马达衔铁组件有限元模型的边界条件可简化为法兰固支,其余部位自由的边界条件。

衔铁组件的有限元模型及边界条件如图3所示。

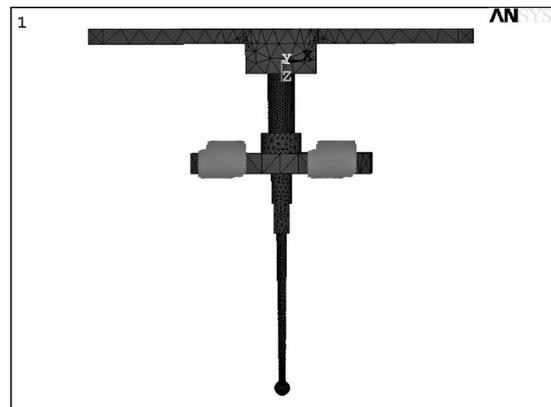


图3 有限元模型及边界条件

### 3 模态分析结果

本研究利用 ANSYS 软件对衔铁组件模型采用自由模态处理后,得到其前七阶固有频率,如表2所示。

表2 衔铁组件前7阶固有频率

阶数	频率/Hz	振型描述
1	649.99	XZ 平面衔铁、反馈杆摆动
2	732.44	XY 平面衔铁摆动
3	950.71	YZ 平面衔铁、反馈杆摆动
4	1 838.1	XZ 平面反馈杆弯曲
5	1 889.8	YZ 平面反馈杆弯曲
6	2 867.4	XZ 平面衔铁摆动、反馈杆弯曲
7	3 757.6	YZ 平面反馈杆弯曲

模态分析的结果表明:衔铁组件的振型主要集中在衔铁的摆动和反馈杆的弯曲变形,而且不同的固有频率对应不同的模态振型。其中,第1、4、6阶振型为 XZ 平面内的摆动与弯曲运动,第2阶振型为 XY 平面内衔铁的摆动,第3、5、7阶振型为 YZ 平面内的摆动与弯曲运动。考虑到实际工况中,衔铁组件主要在 XZ 平面内运动,故这个平面的振动将对伺服阀的性能产生较大影响。

从以上模态分析可知,衔铁一端、反馈杆中部及反馈杆末端振动较大,且具有代表性。以下笔者对第1、4、6阶振型进行谐响应分析,观察这3个关键点的振动位移。

### 4 谐响应分析

持续的周期载荷作用于结构或者部件上将产生持续的周期响应。谐响应分析用于确定线性结构在简谐周期载荷作用下的稳态响应,从而得到结构部件的响应随频率变化的规律。对于谐响应分析,峰值响应发生在工作频率与固有频率相等时,可以通过谐响应来分析结构的持续动力特性。

(1) 力矩马达受力数学模型。在电磁力矩  $T_d$  的

作用下,衔铁挡板组件的运动方程为:

$$T_d = J_\alpha \frac{d^2\theta}{dt^2} + B_\alpha \frac{d\theta}{dt} + K_\alpha \theta + T_L \quad (1)$$

式中:  $J_\alpha$ —运动部件的转动惯量,  $B_\alpha$ —粘性阻尼系数,  $K_\alpha$ —力矩马达的总刚度,  $T_L$ —力矩马达的负载力矩。

为简化问题分析,通常  $T_d$  可以线性化为:

$$T_d = K_\alpha \Delta i + K_m \theta = 2F_d a \quad (2)$$

式中:  $F_d$ —衔铁一端所受电磁力,  $a$ —电磁力矩的力臂长度,  $K_\alpha$ —力矩马达力矩常数,  $K_m$ —力矩马达磁弹簧刚度。

(2) 谐响应分析建模。谐响应分析的建模及单元、网格的划分过程与模态分析一致。ANSYS 谐响应分析有3种方法:完全法、缩减法和模态叠加法。本研究将采用完全法进行计算。

(3) 电磁力下振动特性的分析。谐响应分析中电磁力的计算所涉及参数如表3所示。

表3 电磁力计算参数

参数	数值
电磁力矩的力臂长度 $a$ /mm	20
力矩马达力矩常数 $K^\circ$ /( $N \cdot m \cdot A^{-1}$ )	0.37
力矩马达磁弹簧刚度 $K_m$ /( $N \cdot m \cdot rad^{-1}$ )	0.4
线圈输入电流 $\Delta i$ /A	0.005
衔铁偏转角度 $\theta$ /rad	$3.8e^{-4}$

由式(2)计算电磁力矩,折算为电磁力为  $F_d = 0.05$  N。本研究在衔铁两端分别施加 XZ 平面内、Z 方向的幅值为 0.05 N、方向相反的正弦力,频率变化范围为 0~4 kHz,用 ANSYS 软件进行谐响应分析,观察衔铁受力一端节点(686)、反馈杆中间节点(43 886)、反馈杆末端节点(38 759)在 X、Y、Z 方向位移随频率变化的规律,可得到衔铁挡板组件的谐响应曲线,如图4所示。

由图4可以看出,在电磁力作用时,衔铁挡板组件的谐振峰值主要集中在 0~3 000 Hz 的低频段,其中最大谐振峰值出现在 650 Hz 处。由于电磁力加在 XZ 平

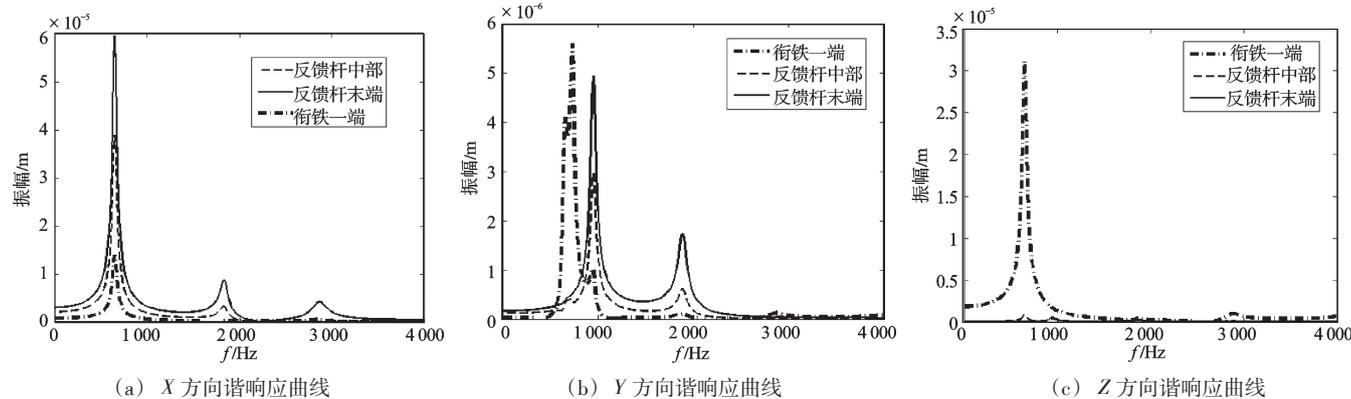


图4 衔铁挡板组件的谐响应曲线

面内,在第1、4、6阶振型处的峰值响应振动位移相对其他振型处的振动位移较大,相差一个数量级;同样由图4可以看到,第1阵型处的振动幅值最大,其幅值在 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  3个方向上的投影可以从谐响应曲线得出。

## 5 结束语

本研究通过对伺服阀力矩马达中的衔铁组件进行模态分析,得到了其各阶固有频率及相应的模态振型。其各模态振型分别对应衔铁与反馈杆在不同平面内的摆动和弯曲,其中 $XZ$ 平面的振动对伺服阀性能影响最大。

由衔铁组件模态分析的各阶振型可知,衔铁和反馈杆是伺服阀力矩马达产生振动的关键部位,为避免其振动引起伺服阀工作不稳定、产生自激噪声等现象,研究者应针对两者采取相应抑制振动的措施。

通过对伺服阀力矩马达中的衔铁组件进行谐响应分析,本研究得到了在反馈杆没有安装到主阀阀芯上这一工况下的位移响应,并可以计算衔铁一端与反馈杆在最大振动处的振幅;提供了一种计算衔铁马达组件在最差模态下振幅的计算方法,为后续的研究及伺服阀的性能改善和结构优化提供参考。

当衔铁挡板组件没有安装到主阀阀芯时,衔铁挡板组件的谐振峰值主要集中在 $0\sim 3\ 000$  Hz,以低频振动为主。这为进一步研究衔铁组件在其他工况下的振动特性提供了理论参考。

## 参考文献(References):

- [1] 李其朋,丁 凡. 电液伺服阀技术研究现状及发展趋势[J]. 工程机械,2003,34(6):28-32.
- [2] 李松晶,鲍 文. 磁流体对伺服阀力矩马达动态特性的影响[J]. 机械工程学报,2008,44(12):137-142.
- [3] 李松晶,方振刚,吴振顺. 采用磁流体的伺服阀力矩马达二维有限元分析[J]. 中国矿业大学学报,2006,35(2):178-180.
- [4] 李 楠,高英杰. 喷嘴挡板伺服阀性能参数的研究[J]. 液压与气动,2008(10):69-70.
- [5] 李松晶,彭敬辉,张 亮. 伺服阀力矩马达衔铁组件振动特性分析[J]. 兰州理工大学学报,2010,36(6):38-41.
- [6] LAZARUS A, PRABEL B, CONBESCURE D. A 3D Finite Element model for the vibration analysis of asymmetric rotating machines [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2010,329(18):3780-3797.
- [7] KUMAR V, GREESH R, SUJATHA C. Force vibration analysis of Wind Turbine Rotor Blade [J]. *Journal of Advances in Vibration Engineering*, 2010(9):285-296.
- [8] KUO C H, JENG W I. Lock-on characteristics of a cavity shear layer [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2003(18):715-728.
- [9] 卢长耿. 力马达与力矩马达静态及动态特性分析[J]. 武汉钢铁学院学报,1989,14(3):52-63.
- [10] 宋新波,姚晓先,林玉光. 力矩马达静特性研究[J]. 战术导弹控制技术,2004,21(2):39-42.

[编辑:罗向阳]

(上接第1430页)

## 参考文献(References):

- [1] 李加恒. BJ2020N 齿轮箱齿轮传动系统故障诊断[D]. 昆明:西南林业大学理学院,2007.
- [2] [日]丰田利夫. 设备现场诊断的开展方法[M]. 李敏,译. 北京:机械工业出版社,1985.
- [3] 张金良,方宗德,曹雪梅,等. 弧齿锥齿轮齿面接触应力分析[J]. 机械科学与技术,2007,26(10):1268-1272.
- [4] CHEN Y C, TSAY C P. Stress analysis of a helical gear set with localized bearing contact [J]. *Finite Element Analysis and Design*, 2002,38(1):707-723.
- [5] ZHANG Y C, FANG Z. Analysis of tooth contact and load distribution of helical gears with crossed axes [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 1998,34(1):41-57.
- [6] 王延忠. 面齿轮齿面方程及其轮齿接触分析[J]. 机床与液压,2007,35(12):7-9.
- [7] 王延忠,龚 康,吴灿辉. 航空面齿轮传动接触应力计算方法研究[J]. 机床与液压,2011,39(21):1-4.
- [8] WANG J, HOWARD I. The torsion stiffness of involute spur gears [J]. *Mechanical Engineering Science*, 2004,218(1):1-12.
- [9] 黄亚玲,秦大同,罗同云,等. 基于ANSYS的斜齿轮接触非线性有限元分析[J]. 理论与探索,2006,4(4):31-39.
- [10] 康一坡. 基于多零件接触的重型汽车变速器壳体强度分析[D]. 长春:吉林大学机械科学与工程学院,2008.
- [11] 凡增辉,赵熙雍,晏红文. 基于ANSYS的斜齿轮接触有限元分析[J]. 机械传动,2010,34(4):68-70.
- [12] 朱才朝,黄 琪,唐 倩. 风力发电升速齿轮箱传动系统接触齿轮及载荷分配[J]. 农业机械学报,2006,37(7):86-89.
- [13] 王文杰. 风机增速器斜齿轮啮合载荷及齿向修形的研究[D]. 大连:大连理工大学机械工程学院,2007.
- [14] 萨本佶. 高速齿轮传动设计[M]. 北京:机械工业出版社,1986.

[编辑:张 翔]