

【武器装备】

压力仿真系统的大深度与高精度控制研究

胡 浩, 杜贻群

(中国人民解放军91872部队, 北京 102442)

摘要:设计了一种三级压力传感器反馈的水下航行器压力仿真系统方案,重点对压力仿真系统的大深度、高精度控制方法进行了研究。通过提高小量程压力传感器的抗过压能力和设计多压力传感器的自动切换模块,可以使系统具有大的仿真范围,在小深度处有很好的精度设计要求,又避免了压力跳动,保证了控制系统的稳定性。验证结果表明,系统设计满足控制精度要求。

关键词:压力仿真系统;压力传感器;半实物仿真

中图分类号:TP273

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2011)06-0018-03

Research on Large Depth and High Precision Control of Pressure Simulation System

HU Hao, DU Yi-qun

(91872 Unit of PLA, Beijing 102422, China)

Abstract: The paper designed a sort of pressure simulation system resolution for underwater aircraft with three level feed back of pressure sensors. It emphasized to research on the method large depth and high precision control for pressure simulation system. By means of enhancing anti-overpressure of small range sensors and designing auto-switch module of multi-pressure sensors, it could make system own the large simulation range, and own the good precision design demand at small depth. Therefore it avoided the pressure jump and ensured the stability of control system. The verification result shows that the system design satisfies the control precision demand.

Key words: pressure simulation system; pressure sensor; half-material object simulation

压力仿真系统是水下航行器控制系统半实物仿真系统的重要组成部分,用于在实验室条件下模拟水下航行器在不同深度航行时的水压。近年来,随着智能控制理论研究成果的大量出现,以及水下航行器控制要求的进一步提高,对压力仿真系统数字化、智能化的研究越来越被研究人员所重视。与此同时,压力仿真系统还要求实现大深度、高精度等高性能指标。其原因在于:水下航行器航行时深度通道是最主要的控制通道之一,其深度传感器依靠测量海水的动态压力来敏感航行深度。要实现水下航行器在大深度下的仿真试验,就需要有量程范围大,且在浅水深度时仿真精度足够高的压力仿真系统。

1 系统方案设计

本文设计的一种三量程水下航行器压力仿真系统方案,

其原理如图1所示。压力仿真系统主要由控制部件(PLC)、执行部件(电液伺服阀)、反馈部件(三级压力传感器)及辅助能源(油源)4部分组成。电液伺服阀是压力仿真系统的核心部件,也是控制系统的控制对象。控制系统采集压力传感器的反馈压力,根据控制模型产生压力输出控制信号,加载到电液伺服阀上,调节电液伺服阀的阀芯开度和液流方向,从而得到指定的输出压力。

此系统的主要特点是在反馈通道上设置了大、中、小量程不同的3个压力传感器,并通过PLC控制电磁阀的开关来实现不同量程之间的自动切换。由于压力传感器的量程及精度在很大程度上决定了压力仿真系统的量程和精度,所以,该压力仿真系统具有3个不同量程和相应精度,并且量程之间可以平稳切换,以满足连续仿真的要求。

要实现这种系统结构,需解决的主要问题有:①大、中、小量程压力传感器接在同一油管输出腔上,小量程压力传感

收稿日期:2011-04-17

作者简介:胡浩(1985—),男,硕士,工程师,主要从事武器系统与运用工程方面的研究。

器有可能承受高出其额定工作压力的过载,因此,需提高其耐高压过载的能力;② 3支压力传感器量程之间需能够自动切换,并且在切换点处需进行平滑处理,以保证压力测量的连续不间断,同时也避免压力跳动,提高测量的准确性。

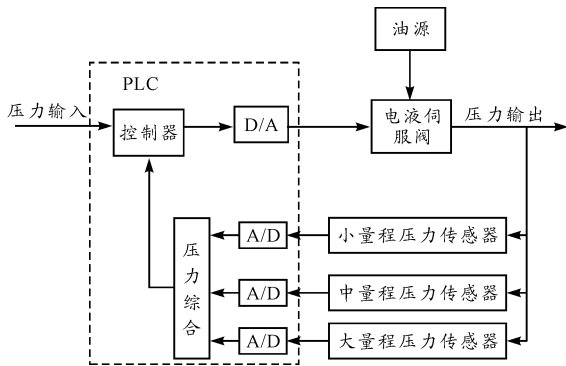


图1 压力仿真系统原理

2 小量程压力传感器耐高压过载研究

本系统采用的3支压力传感器将压力分成3段:0~1.0 MPa,1.0~4.0 MPa,4.0~8.0 MPa。系统最高输出压力为8.0 MPa,这就意味着小量程压力传感器可能会承受其额定压力近8倍的压力。一般压力传感器只能承受其最大量程20%~300%的压力^[1]。因此,对小量程压力传感器耐高压过载能力进行研究是必要的。

针对压力传感器类型的不同,提高其抗过压能力的方法有很多。例如,康凤举等^[2]设计了一种刚性中芯平膜片式压力传感器,在0~0.6 MPa量程内,最大耐载压力达到了6 MPa;林文琼等^[3]对E型碳化硅压力传感器的优化设计,提高了其过载能力;王徐坚^[4]设计的具有过载保护的硅压力传感器已申请专利。本节以圆平膜片压力传感器为例,首先对其圆平膜片受到的应力与应变进行了分析,通过改变膜片形状有效提高了压力传感器的抗过压能力。

压力传感器中使用最广泛的是圆膜式压力传感器,其弹性元件常用的是等厚圆板或硅圆板(最多的是硅杯)^[5],形状如图2所示。

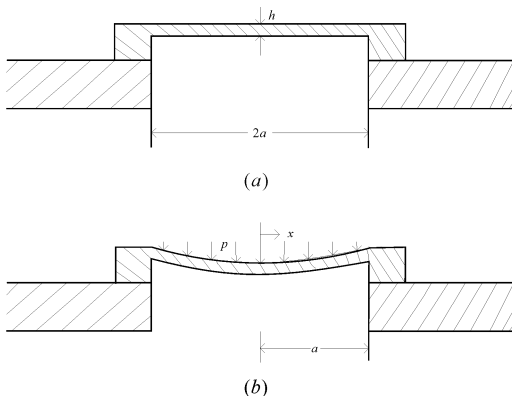


图2 圆膜弹性元件

面上有均匀分布的压力,平膜片将发生形变(设其处于小挠度状态)。由膜片形变理论可知,膜片上距中心 x 处的点的位移量为^[6]

$$\omega(x) = \frac{3p(1-\gamma^2)}{16Eh^3}(a^2-x^2)^2 \quad (1)$$

式中: p 为压力; γ 为材料的泊松比; E 为弹性模量; a 为硅膜的有效半径; h 为平圆膜片的厚度。

由式(1)可知,在膜片中心处的位移最大,即

$$\omega(0) = \omega_0 = \frac{3p(1-\gamma^2)}{16Eh^3}a^4 \quad (2)$$

因此,式(1)可写为

$$\omega(x) = \omega_0\left(1 - \frac{x^2}{a^2}\right)^2 \quad (3)$$

在此位移下,平圆膜片的弯曲必有应力作用其上。这时径向应力 σ_x 和切向应力 σ_t 别为:

$$\sigma_x = \frac{3pa^2}{8h^2}\left[(1+\gamma) - \frac{x^2}{a^2}(3+\gamma)\right] \quad (4)$$

$$\sigma_t = \frac{3pa^2}{8h^2}\left[(1+\gamma) - \frac{x^2}{a^2}(1+3\gamma)\right] \quad (5)$$

径向应变 ε_x 和切向应变 ε_t 分别为:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \gamma\sigma_t) \quad (6)$$

$$\varepsilon_t = \frac{1}{E}(\sigma_t - \gamma\sigma_x) \quad (7)$$

由式(4)至式(7)得:

$$\varepsilon_x = \frac{3(1-\gamma^2)(a^2-3x^2)}{8Eh^2} \quad (8)$$

$$\varepsilon_t = \frac{3(1-\gamma^2)(a^2-x^2)}{8Eh^2} \quad (9)$$

由式(8)和(9)可知:圆平膜片压力传感器的径向应变 ε_x 和切向应变 ε_t 在膜片中心处最大。当压力传感器所测压力超出其最大量程时,膜片中心处受到的应力最先达到或超过测量膜片所能承受的最高应力,导致测量膜片破裂,压力传感器损坏。因此,在膜片中心处,通过阻止或削弱外界过载压差 p 直接传递到测量膜片上,就能有效提高压力传感器的抗过压能力。

如图3所示,对测量膜片的形状做了改变,将原来的内凹平面改变成环状凹陷,中间保留一平台。经过这样的设计更改,随着压差 p 的增加,测量膜片发生位移,当 p 增大到一定的值后,底部平台与基础膜片接触贴合,阻止测量膜片的进一步位移,从而起到了保护的作用,其受压示意图如图4所示。经过对测量膜片的特殊设计,有效地提高了圆平膜片压力传感器的抗过压能力。

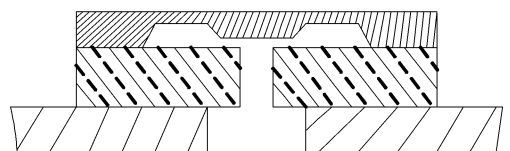


图3 带保护的结构

假如弹性圆膜周边是固定的(与支架连接很好),膜片底

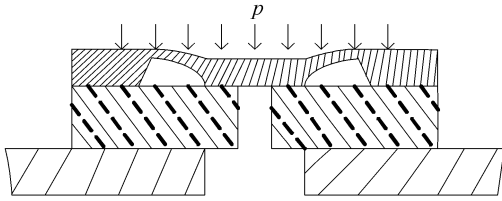


图4 带保护的膜片受压示意图

3 多压力传感器的自动切换

由于系统试验中对压力的测量精度要求很高,如果只使用1支大量程的压力传感器来计量,当压力很低时将很难计量准确。压力仿真系统采用大、中、小3种量程的压力传感器作为反馈元件,测压点接在高量程压力传感器一端,不同量程压力传感器之间接有电磁阀,电磁阀由PLC控制其开关来控制不同量程压力传感器之间的自动切换。小深度时使用小量程传感器,大深度时使用大量程传感器,以此来保证系统既具有大的仿真范围,又在小深度处有很好的精度。在3个传感器反馈切换点处进行平滑处理,避免压力跳动,可保证控制的稳定性。其中压力传感器自动切换部分原理如图5所示。

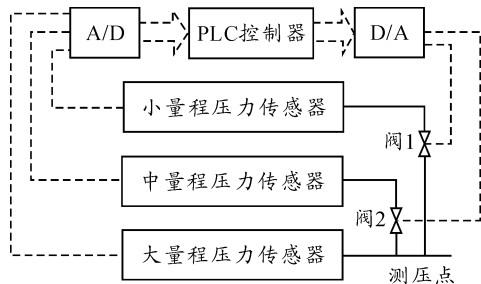


图5 压力计量自动切换原理

3支压力传感器指标为:小量程压力传感器量程0~1.0 MPa,极限压力8.5 MPa,可防止在高压时损坏;中量程压力传感器量程0~4.0 MPa,极限压力8.5 MPa;大量程压力传感器量程0~10.0 MPa。

开始时,先将电磁阀全部打开,PLC同时采集监控所有压力传感器。当压力值 $P < 0.8$ MPa时,程序选取小量程压力传感器的数值作为该点的实测压力值;当压力值 $1.0 \text{ MPa} < P < 3.2$ MPa时,PLC发出控制指令,关闭电磁阀1,保护好小量程压力传感器,程序选取中量程压力传感器的数值作为该点的实测压力值;当压力值 $P > 4.0$ MPa时,PLC发出控制指令,关闭2个电磁阀,保护好中小量程压力传感器,此时该压力点的压力值选取高量程压力传感器的数值。从而实现了不同量程压力传感器之间的自动切换,压力的测量可连续不间断,同时也可提高测量的准确性。

为避免压力跳动,在3个压力传感器反馈切换点处进行如下处理。

1) 当压力大于0.8 MPa而小于1.0 MPa时

$$P = P_1 \times \left[1 - \frac{1.0 - P_1}{1.0 - 0.8} \right] + P_2 \times \frac{1.0 - P_1}{1.0 - 0.8} \quad (10)$$

2) 当压力大于3.2 MPa而小于4.0 MPa时

$$P = P_2 \times \left[1 - \frac{4.0 - P_2}{4.0 - 3.2} \right] + P_3 \times \frac{4.0 - P_2}{4.0 - 3.2} \quad (11)$$

其中: P 为平滑后的压力值; P_1 为小量程传感器反馈值; P_2 为中量程传感器反馈值; P_3 为大量程传感器反馈值。

4 系统设计精度验证

控制系统的稳态误差是系统控制准确度(控制精度)的一种度量,通常称为稳态性能。由控制理论知道,影响稳态误差的因数是:系统型别、开环增益、输入信号的形式和幅值^[7]。

压力仿真系统采用的是PLC配装模拟量转换模块为控制核心的控制组件,包括高精度的A/D和D/A转换器。其中,A/D用于把压力传感器反馈回来的模拟压力信号及输入的模拟指令信号转换成数字量供PLC处理;D/A用于把PLC输出的控制信号转换成模拟量送给压力伺服控制回路,可实现高分辨率仿真。由于A/D转换能力是12位,其数字量个数为 $2^{12} = 4096$ 个,因此计算压力仿真系统的分辨率为:小深度时A/D转换对应水深的分辨率为 $100/4096 = 0.024$ m;中深度时A/D转换对应水深的分辨率为 $400/4096 = 0.098$ m;大深度时A/D转换对应水深的分辨率为 $800/4096 = 0.195$ m。

压力仿真器的分辨率,在100 m以下要求为0.1 m,100~400 m要求为0.2 m,400~800 m要求为1.0 m,因此能够满足设计要求。

在压力仿真系统中,影响控制系统静态精度的因素有很多,其中以D/A,A/D的分辨率和压力传感器的精度影响最大。

压力传感器输出信号精度为0.1%,对应8.0 MPa输出信号绝对误差上限=0.008 MPa,对应4.0 MPa输出信号绝对误差上限=0.004 MPa,对应1.0 MPa输出信号绝对误差上限=0.001 MPa。

A/D转换器转换精度12位,对应8.0 MPa转换误差上限=0.00195 MPa,对应4.0 MPa转换误差上限=0.00098 MPa,对应1.0 MPa转换误差上限=0.00024 MPa。

考虑A/D的分辨率和压力传感器的精度,对应高压工况系统合成误差上限=0.008+0.00195=0.00995 MPa,相对误差上限=0.00995/8=0.12%;对应中压工况合成误差上限=0.004+0.00098=0.00498 MPa,相对误差上限=0.00498/4=0.12%;对应低压工况系统合成误差上限=0.001+0.00024=0.00124 MPa,相对误差上限=0.00124/1=0.12%。以上系统设计可以满足控制精度要求。

5 结束语

设计了一种三量程水下航行器压力仿真系统方案,分析了要实现这种系统结构需解决的主要问题,重点对压力仿真系统的大深度、高精度控制方法进行了研究,在分析硅压力传感器圆平膜片应力与应变的基础上,通过改变膜片形状有效地提高了压力传感器的抗过压能力,通过设计多压力传感器的自动切换模块,并且在切换点处进行(下转第24页)