

航空机载谐振膜式密度传感器的研究

Research on Airborne Resonant Diaphragm Density Sensor

北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院 郑德智 张欲晓 樊尚春

[摘要] 针对飞机飞行中燃油量的在线实时测量需求,设计了基于谐振原理的新型谐振膜式液体密度传感器。对谐振膜片进行了数学模型分析,并设计了基于数字闭环方法的谐振膜式密度传感器整体结构。试验结果表明,该传感器测量精度较高,稳定性较好,结构简单,便于加工,能满足航空煤油在线实时测量的需求。

关键词: 飞机燃油量测量 密度传感器 谐振膜片 闭环控制

[ABSTRACT] A new resonant diaphragm liquid density sensor based on resonance principle is designed due to the need of the real-time online measurement for fuel quantity during aircraft flight. On basis of analyzing the mathematical models of resonant diaphragm, a integral structure of resonant diaphragm density sensor is designed based on the method of digital closed-loop. Experiment results show that the sensor has high precision, good stability, simple structure, easy processing and can meet the demand of real-time online measurement for aircraft kerosene.

Keywords: Aircraft fuel quantity measurement Density sensor Resonant diaphragm Closed-loop control

燃油量是决定飞机续航能力的基本因素,也是飞机飞行中需要实时监测的重要参数之一。由于燃油密度随飞机飞行高度、大气压力以及各部位油箱(主油箱、辅助油箱)燃油温度的变化而改变,因此,传统的燃油测量方法不能满足精确测量和控制的要求^[1]。

谐振式燃油密度传感器是一种高精度在线实时测量液体密度的传感器。这种传感器具有测量精度高、稳定性好、工作温度范围宽、功耗低、耐冲击、可靠性高、频率输出易与计算机连接等特点,是飞机燃油密度测量的理想传感器。目前国际上已研制生产出多种形式的谐振式密度测量传感器,如英国 Solartron Mobrey 公司、奥地利 ANTON PAAR 公司以及美国 Calibron 公司、Burton 公司的密度计。我国从 20 世纪

90 年代后才开始进行关注相关研究,但尚未用于飞机燃油系统的测量^[1]。

本课题基于谐振原理设计了一种新型谐振膜式密度传感器,采用易于加工的圆形谐振膜片为敏感单元,实现了液体密度的实时在线测量。这种谐振膜式密度传感器具有测量精度高、重复性好、结构简单、便于实现等优点。

1 谐振膜式液体密度传感器的结构和工作原理

1.1 结构

谐振膜式液体密度传感器由谐振膜、膜片支座、激励压电陶瓷、拾振压电陶瓷和信号检测电路组成。其结构如图 1 所示。

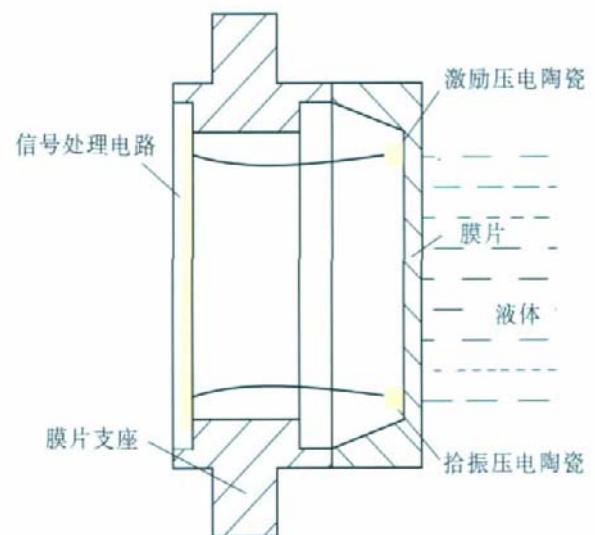


图 1 谐振膜式密度传感器结构
Fig.1 Structure diagram of resonant diaphragm density sensor

振动膜片设计成周边固支的圆膜片形式,用压电陶瓷片作为膜片的激励单元和拾振单元。工作时,信号处理电路的闭环控制单元向激励压电陶瓷片施加交变的正弦信号,使其产生交变力,进而迫使谐振膜片振动。拾振压电陶瓷片拾取膜片振动信号,反馈给

闭环控制单元,实现闭环自激振荡条件,使膜片稳定工作在其一阶固有频率附近。信号处理电路根据闭环控制单元的频率计算被测液体的密度,并通过温度补偿算法实现密度的温度补偿。

1.2 工作原理

传感器的工作原理如图2所示。

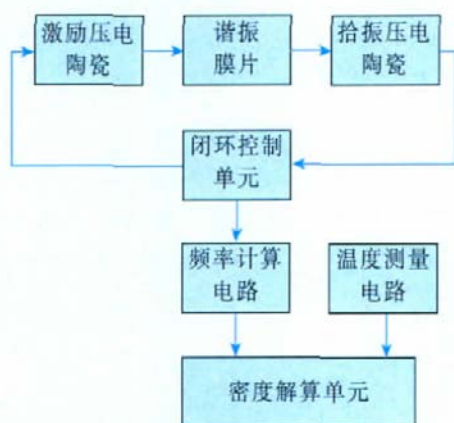


图2 谐振膜式密度传感器工作原理

Fig.2 Working principle diagram of resonant diaphragm density sensor

谐振膜式密度传感器是一个典型的闭环自激振荡控制系统,谐振膜片在闭环控制单元的控制下,在一阶固有频率附近工作。当谐振膜片和液体接触时,被测液体将随振动膜片一起振动,使膜片和液体组成的整个系统的等效质量发生变化,从而其固有频率也随之变化。通过检测谐振膜片的频率及其变化量即可测量待测液体的密度。

通常,膜片未接触液体时的固有频率可以由下式计算:

$$f = \frac{K_n}{2\pi} \sqrt{\frac{Et^3}{12mr^4(1-\mu^2)}}, \quad (1)$$

式中, t 为圆膜片的厚度; E 为圆膜片的弹性模量; m 为单位面积膜片的质量; r 为圆膜片的半径; μ 为圆膜片的泊松比; K_n 为取决于振型的系数,不同的振型有不同的振型系数,振型系数与圆膜片振动所产生的波节圆的个数以及波节直径有关。

膜片侵入液体后,其固有频率变为

$$f_1 = \frac{K_n}{2\pi} \sqrt{\frac{Et^3}{12mr^4(1-\mu^2)(1+\eta)}}, \quad (2)$$

式中, $\eta=0.6689 \frac{\rho_1 r}{\rho t}$ 。 ρ_1 为待测液体密度; ρ 为膜片的

密度;0.6689是液体和膜片耦合作用时产生的附加质量系数,不同的振型附加质量系数不同。

式(1)除以式(2),可得

$$\frac{f}{f_1} = \sqrt{1+\eta} = \sqrt{1+0.6689 \frac{\rho_1 r}{\rho t}}, \quad (3)$$

由式(3)可解出液体密度

$$\rho_1 = \frac{1}{0.6689} \left[\left(\frac{f}{f_1} \right)^2 - 1 \right] \frac{t \cdot \rho}{r}. \quad (4)$$

1.3 闭环自激条件分析

为达到实际需求的测量精度和抗干扰、抗扰动能力,不仅要实现自激振荡,还必须保持稳定的幅度和适度的非线性。因此设计中采用了比通常的 $\phi < \pi/2$ 和 $A \geq 1$ 更为严格的闭环自激的相位和幅度条件:

$$\phi = \phi_S + \phi_F \approx 0, \quad (5)$$

$$A \approx A_S \cdot A_F \approx 1 + \varepsilon, \quad (6)$$

式中, ϕ_S, A_S, ϕ_F, A_F 分别为谐振膜片和闭环控制单元的相移和增益; ε 是一个很小的数(误差项),其物理意义为:稳态自激时(不涉及动态过程),闭环回路应处于相移和非线性都足够小的状态。

谐振膜片为受介质密度 ρ 、介质阻尼 ζ 和环境温度 T 控制的非线性时变系统,只有当振幅足够小,且 ρ, ζ, T 相对稳定时才可近似为线性时不变系统,并用传递函数 $G_S(s)$ 描述。闭环控制单元也是复杂的非线性时变系统,尤其是数字式系统。因此,两者都难以建立准确的数学模型,其相移特性和增益特性都主要采用定性分析与试验相结合的方法获得。

闭环控制单元的主要任务是时刻保证系统状态满足式(5)、(6)的关系,从而维持稳定的弱非线性自激振荡。为此,反馈控制单元必须实时检测参数(ϕ_S, A_S)并相应调整(ϕ_F, A_F),使之满足:

$$\phi_F \approx -\phi_S, \quad (7)$$

$$A_F \approx (1 + \varepsilon) / A_S. \quad (8)$$

对于通常的谐振式敏感结构, A_S 主要由 ρ, ζ 决定,而 ρ, ζ 与介质属性、温度流等因素关系密切,因而 A_S 为不可预知的复杂变因。而 ϕ_S 主要由激励和拾振原理决定,在通常条件下相对稳定。

由此可见,维持闭环自激条件的关键在于控制 A_F ,实现式(8),从而维持幅度条件(6)。

1.4 基于输入型自动增益控制(IAGC)的闭环系统模型

前置放大环节负责输入信号的放大。鉴于拾振压电陶瓷输出信号幅度较大(100mV量级),该环节无需

复杂的信号处理措施,只需简单的线性放大器和必要的抗干扰滤波器即可。驱动电路负责功率放大和负载阻抗匹配,从信号角度讲也是简单的线性放大器。相位控制环节负责控制 ϕ_F ,以实现式(7),从而维持相位条件(5)。既然 ϕ_S 基本稳定,该环节采用固定移相器即可。由此可见,上述3个环节都是简单的线性时不变环节。

自动增益控制(AGC)环节是一个相对复杂的非线性时变环节,其作用正是控制 A_F ,实现式(8)。

综合上述说明可知,闭环系统设计的关键在于 AGC。

为简化问题,不妨将3个线性时不变环节归入谐振膜片,成为一个频率特性曲线相似,只是经过“平移”的“等效敏感单元”。同时,反馈通道被简化为 AGC。从而得到由等效谐振膜片和 AGC 组成的闭环系统简化模型,如图3所示。其中 U_s 为拾振信号, U_x 为激振信号, U_p 为峰值检测器检测的信号峰值, U_R 为设定的信号幅值, U_e 为设定幅值与信号峰值的误差。

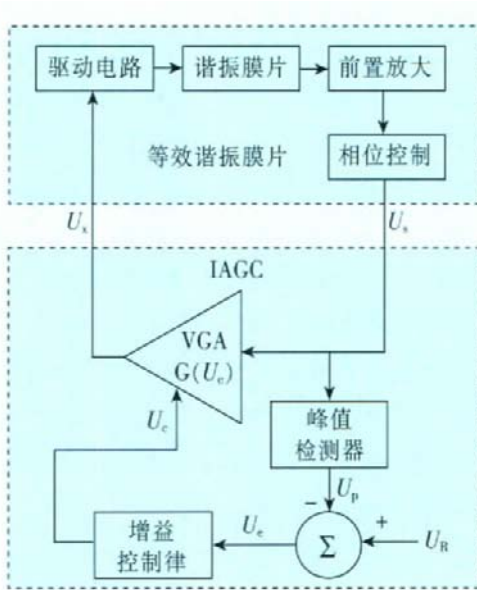


图3 基于 IAGC 的闭环系统模型
Fig.3 Model of closed loop system based on IAGC

通常意义的 AGC^[2-4]以其自身输出信号为稳定对象,不妨称之为输出型 AGC(OAGC);本课题的 AGC 则以自身输入信号(拾振信号 U_s)为稳定对象,不妨称之为输入型 AGC (IAGC)。IAGC 并非独立的反馈回路,而是与正反馈结构的主回路(图3中由等效谐振

膜片和压控增益放大器 VGA 构成的回路)紧耦合构成“双回路”结构。尽管结构形式不同,但 OAGC 的现有理论和经验对 IAGC 的设计仍有借鉴意义。

1.5 数字闭环控制单元方案

谐振膜片的谐振频率一般设计为 2~8kHz,依据采样定律,系统采样时钟至少大于 16kHz,对系统运算速度要求较高,因此提出基于 DSP (TMS320F28335) 的系统方案。为充分发挥数字技术和模拟技术的各有优势,采用了参照模拟闭环系统原理,只对适当环节进行数字化的实现思路。

根据图3中各模型环节的特点,只对峰值检测器、幅度比较器和回路滤波器等环节进行数字化,而VGA和一些辅助的信号变换、信号滤波仍主要依赖模拟技术。得到的数字式 IAGC 方案如图4所示。

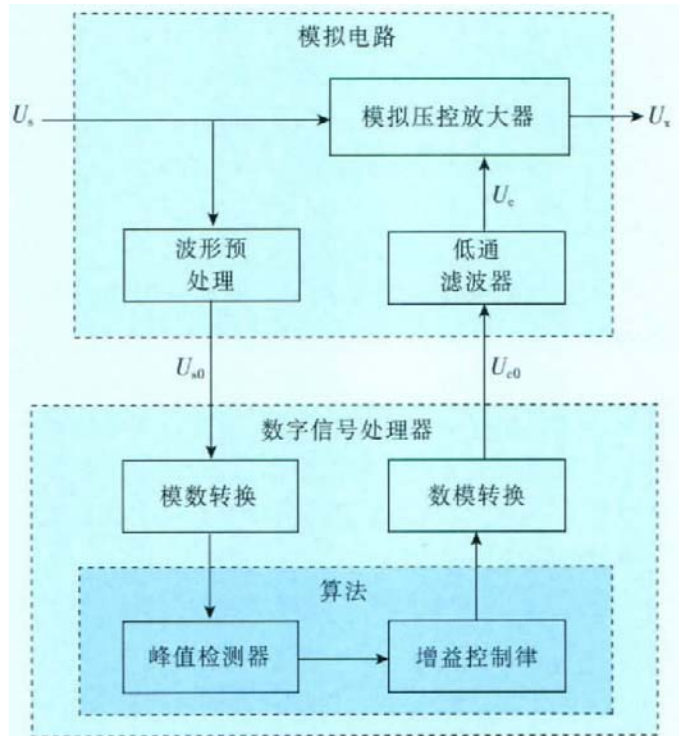


图4 数字式 IAGC 方案
Fig.4 Scheme of digital IAGC

图4系统各模块的功能分别为:

- (1) 波形预处理电路:对输入信号 U_s 进行滤波,并将其变换成便于采集的形式(U_{s0});
- (2) 峰值检测器:处理分析 U_{s0} 以计算 U_s 的幅度(包络线);
- (3) 增益控制律:根据 U_s 幅度计算相应幅度控制电压 U_{c0} ,这是数字闭环的核心环节;

(4)低通滤波器:滤除 U_{c0} 上叠加的数字噪声以提高系统稳定性;

(5)模拟压控放大器:压控增益控制。

图 4 各模块与图 3 各环节对应关系如表 1 所示。

表 1 系统模块与模型环节的对应关系

模型环节	系统模块
压控增益放大量	模拟压控放大器
峰值检测器	波形预处理,模数转换和峰值检测
模拟误差运算	增益控制律,数模转换和低通滤波

2 传感器参数设计

为保证设计出来的传感器满足给定的指标要求,进行了理论分析和数学模型的仿真,并通过有限元法进行验证。根据现有加工工艺要求,最初的结构设计中,选择膜的厚度为 0.5mm,直径为 30mm。

在实际的谐振膜式密度传感器设计中还需要考虑以下影响因素^[5]:

(1)温度。温度变化会引起材料的几何参数、弹性模量、密度以及工作介质的变化,从而引起振动周期变化。为减少温度误差,谐振膜片应选择温度影响系数较小的材料。

(2)外界压力。外界压力变化会使谐振膜发生形变,影响振动筒振动频率。为减少对振动筒振动频率的影响,采取的措施是选择对压力变化不敏感的振型,将谐振膜片浸入被测液体中,使其内外压力相抵消。

(3)黏度。由于摩擦力的作用,使得谐振膜片表面受到剪切力,从而影响谐振膜片的振动频率;黏度的变化还会影响谐振膜片的振幅,上文选择数字闭环控制方法就是用来解决黏度增大、振动困难等问题的。

综合考虑上述影响因素后,谐振膜片的材料选为镍铬恒弹合金 3J53,其弹性模量为 1.95×10^{11} Pa,密度为 7.9×10^3 kg/m³,泊松比为 0.3。

设计圆膜片作为谐振膜片,其不同的振动模式对应着不同的振动频率,振动模式用波节圆 p 和波节直径 q 表示。振动过程中,这些波节圆和波节直径处的位移为零。经过理论计算和实验测试,波节圆 $p=1$ 和波节直径 $q=0$ 适合膜片测量液体的密度。其他模式下的振型虽然也可以测量密度,但是在膜片和液体接触后,不能准确地控制膜片的振型模式,不利于形成闭

环系统,并且需要更大的能量激振膜片^[6-7]。

3 试验测试与结果分析

在室温条件下,测量不同液体的密度,用 DE51 型密度传感器作为参考,DE51 型传感器的测量范围 0~3 000kg/m³,精度为 0.01kg/m³。目前国内根据《JJG370-2007 在线振动管液体密度计检定规程》所规定的测试方法进行检定,以 3σ 值代替测量精度,测试结果如表 2 所示。

表 2 实际测量结果及误差

序号	温度 $t/$ °C	$\rho_{测}/$ (kg·m ⁻³)	$\rho_{标准}/$ (kg·m ⁻³)	测量误差 ($\rho_{测}-\rho_{标准}$)	$3\sigma/$ (kg·m ⁻³)
1	19.8	776.54	776.58	-0.04	0.20
	19.9	776.50		-0.08	
	19.8	776.55		-0.03	
2	20.2	800.32	800.30	0.02	0.30
	20.5	800.44		0.14	
	20.4	800.29		-0.01	
3	20.3	856.39	856.45	-0.06	0.19
	20.4	856.44		-0.01	
	20.3	856.38		-0.07	
4	20.0	897.74	897.63	0.11	0.27
	19.8	897.69		0.06	
	20.2	897.60		-0.03	
5	19.5	912.84	912.90	-0.06	0.25
	19.8	912.88		-0.02	
	19.9	912.80		-0.1	

从表 2 可以看出,谐振膜式密度传感器测量误差最大为 0.14kg/m³, 3σ 测量精度最大为 0.3kg/m³。

4 结束语

在对谐振膜片进行数学模型分析的基础上,设计了基于数字闭环方法的谐振膜式密度传感器整体结构,在参数设计中将温度、压力、黏度等因素影响降至最小。采用谐振圆膜片的设计结构便于加工;试验结果表明,该传感器具有较高的测量精度,绝对测量误差最大不超过 0.2kg/m³, 3σ 测量精度最大不超过 0.3kg/m³,稳定性较好,并且满足了航空煤油在线实时测量的需求。(下转第 97 页)

第四步:将问题最终所得的解,即针对风险因子所需采取的应对措施,输出给用户,完成应对措施的选择。

大量的测试和应用表明,系统有效解决了项目运行过程的动态监控与跟踪,提高了项目计划和项目运行的效率,减少了项目运行过程中可能发生的资源协调冲突,对项目执行过程中可能出现的风险进行了有效的预测与应对,提高了设计效率、有效地减少了设计返工,在该项目管理中取得了良好的应用效果。

此复杂产品系统的风险管理实现过程如图3所示。

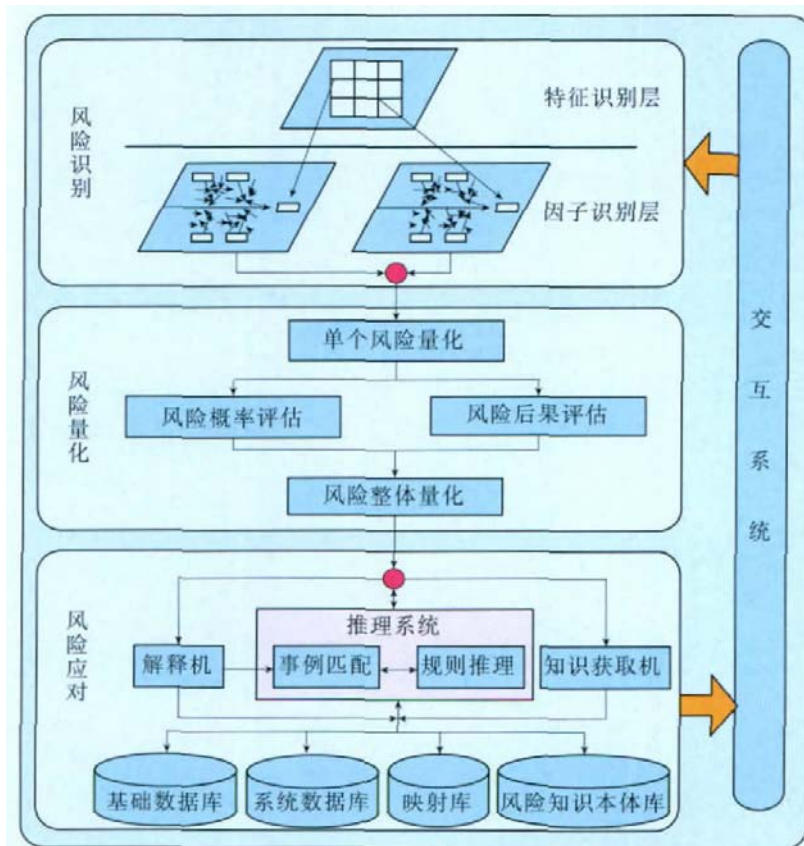


图3 风险管理实现过程

Fig.3 Realization of risk management

4 结束语

本课题提出了针对复杂产品系统研制的整体风险控制机制,包括风险识别、风险量化和风险应对。在对复杂产品系统进行风险识别的基础上,对其风险数量特征进行了分析,结合复杂产品研制、跨单位合作等特性,将风险控制贯穿至整个生产过程;同时将知识管理寓于其中,使其具有一定的智能化。该种风险管理方法可推广应用于航空复杂产品研制项目的项

目管理中,不仅对其它类复杂产品系统研制具有指导意义,而且对技术创新风险管理理论研究的发展,也具有现实意义。

参 考 文 献

[1] Hansen K, Rush H. Hotspots in Complex Product Systems: Emerging Issues in Innovation Management. Technovation, 1998, 18(9):555-561.

[2] Hobday M. Product complexity, innovation and industrial organization. Research policy, 1998, 26(6): 689-710.

[3] 刘学强. 现代施工企业风险管理. 合作经济与科技, 2006(10X):16-17.

[4] 景劲松. 复杂产品系统创新项目风险识别、评估、动态模拟与调控研究. 浙江:浙江大学, 2004.

[5] 沈建明. 国防高科技项目管理概论. 北京:机械工业出版社, 2004.

[6] 张进春, 吴超, 侯锦秀. 基于压力-状态-响应的项目风险辨识方法研究——以某油气长输管线建设项目风险辨识为例. 中国安全科学学报, 2006, 16(12): 40-44.

[7] 曲晓慧, 安钢. 数据融合方法综述及展望. 船舶电子工程, 2003, 2(2): 2-9.

(责编 侧卫)

(上接第91页)

参 考 文 献

[1] 孙建红, 杨璐. 谐振式燃油密度传感器振动筒的设计与分析. 南京航空航天大学学报, 2008, 40(1): 60-64.

[2] Chow H C, Wang I H. High performance automatic gain control circuits using a S/H peak detector for ASK receiver. IEEE International Conference on Electronics Circuits and Systems, 2002, 9(2): 429-432.

[3] Ohlson J E. Exact dynamics of automatic gain control. IEEE Trans Communications, 1974(1): 72-75.

[4] Khoury J E. On the design of constant settling time AGC circuits. IEEE Trans Circuits and Systems- : Analog and Digital Signal Processing, 1998, 3(45): 283-294.

[5] 樊玉铭, 张莹, 李杏华, 等. 谐振筒式液体密度传感器的设计. 纳米技术与精密工程, 2007, 5(2): 134-138.

[6] Blevins R O. Formulas for Natural Frequency and Mode Shape. New York: Von Nostrand Reinhold Company, 1995.

[7] 何祚镛, 赵玉芳. 声学理论基础. 北京:国防工业出版社, 1981.

(责编 蔚蓝)