

航天伺服电位计式位移传感器阻值影响分析

李梦雪, 孙楠, 徐佳佳

(北京精密机电控制设备研究所, 北京 100076)

摘要: 航天伺服电位计式位移传感器是一种广泛应用在军工、航空航天等领域的传感元件, 主要用于伺服系统的信号测量和反馈, 其性能直接影响伺服系统控制精度; 随着航天技术的日益发现, 箭弹总体对于伺服系统的控制精度的要求越来越高; 为了提高电位计式位移传感器的输出精度, 对电位计式位移传感器的自身各项阻值指标线性度; 不对称电阻和引出电阻进行数学建模, 得出了传感器各项阻值定义之间的关系; 通过对传感器各阻值指标指标, 外界环境条件以及传感器结构, 材料对传感器的输出精度造成误差影响分析, 给出工程应用建议, 提高了传感器的工作可靠性, 对伺服推力矢量系统的发展具有重要意义。

关键词: 伺服; 电位计; 阻值; 影响

Resistance Impact Analysis of Aerospace Servo Potentiometer Type Displacement Sensor

Li Mengxue, Sun Nan, Xu Jiajia

(Beijing Research Institute of Precise Mechanical and Electronic Control Equipment, Beijing 100076, China)

Abstract: The aerospace servo system potentiometer displacement sensor is a kind of sensor widely used in military, aerospace and other fields. It is mainly used for signal measurement and feedback of servo system, the performance of sensor affects the control precision of the servo system directly. With the development of aerospace technology, the requirement of control precision for servo system of rockets and missiles is higher and higher. In order to improve the output precision of potentiometer displacement sensor, the mathematical models of the linearity, asymmetric resistance and induced resistance of the potentiometer displacement sensor are established, and the relationship between the definitions of the resistance values of the sensor is obtained. Through the analysis of the influence of resistance index, external environment condition, sensor structure and material on the output accuracy of the sensor, the engineering application suggestions are given to improve the reliability of the sensor, which is of great significance to the development of servo thrust vector system.

Keywords: servo; potentiometer; resistance; impact

0 引言

航天伺服电位计式位移传感器是目前国内外广泛使用的一种位移传感器, 在航空航天领域作为核心元件其性能好坏直接影响控制精度^[1]。电位计式传感器采用电阻分压的原理。它具有机械结构牢固简单, 不受电磁场环境影响, 分辨率高, 使用方便等优点, 其测量范围为 8 ~ 1 000 mm, 线性度可达 0.3%, 方便采用冗余结构, 但其电阻值易受温、湿度影响等特点。电位计式电阻体是树脂和石墨的混合物, 树脂和石墨按一定配方加入混合溶剂成为符合要求的导电液, 然后采用喷涂法, 模压法、印刷法和沉积法等方法制备在绝缘材料做成的骨架上, 经干燥和聚合等工序, 制成电阻体^[2]。

制备好的电阻体其初线性一般在 1% ~ 1.5% 左右, 但为了满足系统高精度的使用要求, 就必须通过线性修刻的方法, 使非线性阻值分布的电阻片阻值分布更加均匀, 线性精度更好, 修刻一般采用恒流源法或电桥法。通过对电

阻膜逐点进行修刻, 低于标准值就减少该点的导电截面积, 从而增加阻值。使每点的电阻值更趋近于标准电阻值, 实现电阻膜电位输出随传感器电刷位移距离量呈线性函数变化, 从而使传感器线性误差精度控制在 0.3% 以内, 满足产品使用精度要求^[3]。

由于其电阻分压的工作原理决定其自身总电阻值、分电阻值、不对称电阻值、引出电阻值为主要阻值特征参数, 长期以来, 对电位计式位移传感器阻值变化影响认知存在盲区, 下文对其逐一分析, 给出工程建议。

1 基本理论分析

1.1 电位计基本原理分析

电位计式位移传感器采用电阻分压原理, 以下是一种带中心抽头的位移传感器为例进行分析。该类位移传感器输出点的位置决定输出电压的高低, 其基本原理如图 1、2 所示。

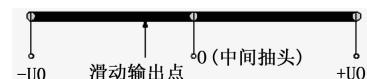


图 1 电位计功能原理图

收稿日期:2019-02-16; 修回日期:2019-03-21。

作者简介: 李梦雪(1989-), 女, 内蒙古赤峰人, 硕士, 工程师, 主要从事特种传感器设计方向的研究。

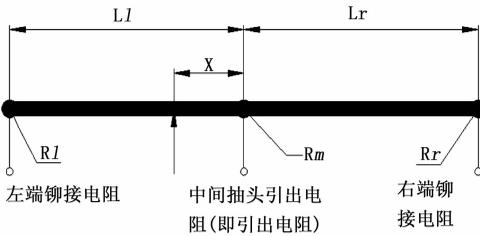


图 2 电位计基本参数示意图

如图 1、2 所示，电位计具有左右两个电阻膜，在两个端点处施加一个对称的正负电势，同时在两个电阻膜连接处的中间抽头处施加零电势。

定义 1：如图 1、2 所示，定义 L_l 表示电位计左电阻膜长度 (mm)； L_r 表示电位计右电阻膜长度 (mm)； R_l 表示电位计左电阻膜阻值 (Ω)； R_r 表示电位计右电阻膜阻值，(Ω)； X_0 表示电位计位置输出值 (mm)； R_0 表示对应 X_0 位置的电位计输出阻值 (Ω)； U_0 表示对应 X_0 位置的电位计输出电压 (V)； U 表示电位计电源电压 (V)； K_i 表示电位计灵敏度系数 (mm/V)。

理论推导输出电压与电阻值、输入电压之间的关系式如下^[4]：

$$\begin{cases} L_l = L_r = L \\ R_l = R_r = R \\ X_0 = \frac{R_0}{R}L = \frac{U_0}{U}L \\ K_i = \frac{L}{U} \\ U_0 = \frac{R_0}{R}U \end{cases} \quad (1)$$

1.2 线性度初步分析

线性度是描述传感器静态热性的一个重要指标，在被测输入量处于稳定状态的前提情况下。在规定条件状态下，传感器输出校准曲线与拟合直线间的最大偏差与满量程输出的百分比，称为线性度。线性度的值越小，表明线性度越好。线性度的好坏受到单位长度电阻体阻值大小的影响，以及温度和湿度的影响。线性度是传感器的重要指标之一，直接关系到传感器的输出精度，影响伺服系统的控制精度。

定义 2：假定电阻膜是由无数个阻值、长度完全一致的微电阻的集合，则：

$$R = \sum_0^{m=\infty} \Delta R_i \quad (2)$$

$$L = \sum_0^{m=\infty} \Delta L_i \quad (3)$$

式中， ΔR_i 为每个假设中的微电阻阻值 (Ω)； ΔL_i 为每个假设中的微电阻长度 (mm)。

则对应输出部位，长度为 L_0 处的电位计输出值有如下公式：

$$\begin{cases} n = \frac{L_0}{\Delta L_i} \\ U_0 = \frac{n\Delta R_i}{R}U \\ U_0 = \frac{\Delta R_i}{\Delta L_i}L_0 \frac{U}{R} \\ \frac{\Delta R_i}{R} = \frac{1}{m} \\ L = m\Delta L_i \end{cases} \quad (4)$$

由此可知，该种类型电位计输出值只与其所在位置和施加的电压大小相关，而与阻值大小无关，但输出的精度取决于传感器电阻片阻片均匀程度（即线性度）。

1.3 引出电阻、不对称电阻定义

由图 1、2 可知，两个电阻膜的分阻值分别通过左右两端引出部位焊接在铆钉上的引出线与焊接在中间抽头引出部位铆钉的引出线测得，总阻值则通过电阻膜全长左右两端焊接在铆钉上的引出线测出，于是有如下公式^[4]：

$$\begin{cases} R_{lf} = R_l + R_{mm} \\ R_{rf} = R_r + R_{mm} \\ R_z = R_l + R_r + 2R_{mm} \end{cases} \quad (5)$$

式中， R_{lf} 为左电阻膜实际电阻值 (Ω)； R_{mm} 为中间抽头铆钉接触电阻值，即引出电阻 (Ω)； R_{rf} 为右电阻膜实际电阻值 (Ω)； R_z 为示电阻膜总阻值 (Ω)。

定义 3：引出电阻定义为：

$$R_{mm} = \left| \frac{R_{lf} + R_{rf} - R_z}{2} \right| \quad (6)$$

工程定义：引出电阻等于两个分阻之和减去总电阻后除以二的电阻值。

定义 4：由图 1、2 知电位计不对称电阻的定义为：

$$\Delta R = |R_l - R_r| \quad (7)$$

其中： R_l 表示电位计左电阻膜阻值 (Ω)； R_r 表示电位计右电阻膜阻值 (Ω)。

2 阻值变化影响分析

2.1 阻值变化对线性度的影响分析

线性度是电位计对应全行程范围的位置输出值和实际位置的对应关系。

仍以位置 L_0 处的电位计输出为例，其理论输出值 U_0 为：

$$U_0 = \frac{L_0}{L_i}U = \frac{R_{l0}}{R_l}U \quad (8)$$

而实际输出值 U'_0 为：

$$U'_0 = \frac{R_{l0} + R_{mm}}{R_{ml} + R_{lf}}U \quad (9)$$

式中， R_{ml} 为左电阻膜端头的引出阻值 (Ω)； R_{l0} 为对应位置 L_0 处的电位计阻值 (Ω)。

则产品的线性度 a 为：

$$a = \frac{U'_0 - U_0}{U_0} \quad (10)$$

则将 U_0 、 U'_0 代入式 (10)：

$$a = \frac{R_{l0} + R_{mm} - R_{l0}}{R_{ml} + R_{lf} - R_{lf}} = \frac{R_{l0}}{R_{lf}}$$

$$\frac{R_{l0}R_{lf} + R_{mm}R_{lf}}{R_{ml}R_{l0} + R_{lf}R_{l0}} - 1 = \frac{R_{lf} + \frac{R_{mm}R_{lf}}{R_{l0}}}{R_{ml} + R_{lf}} - 1 \quad (11)$$

可知, 在阻值呈线性变化的前提下, 产品线性度不变。

2.2 引出电阻变化影响分析

根据电位计的工作原理, 中间抽头的引出电阻是参与输出的环节, 即在实际工程中对应 L_0 处的电位计输出值应有如下公式:

$$U_0 = \frac{R_{l0} + R_{mm}}{R_{ml} + R_{lf}}U \quad (12)$$

设定如下两个系数:

$$K_1 = \frac{R_{ml}}{R_{lf}} \quad (13)$$

$$K_2 = \frac{R_{mm}}{R_{lf}} \quad (14)$$

在阻值稳定的情况下, 两个系数均为常值, 且很明显:

$$R_{l0} = \frac{L_0}{L_l}R_{lf} \quad (15)$$

则代入式 (14), 可得:

$$U_0 = \frac{R_{l0} + R_{mm}}{R_{ml} + R_{lf}}U = \frac{\frac{L_0}{L_l}R_{lf} + K_2R_{lf}}{K_1R_{lf} + R_{lf}}U = \left(\frac{L_0}{L_l} + K_2 \right) \frac{R_{lf}}{K_1 + 1}U \quad (16)$$

很明显, 在 K_1 、 K_2 均保持不变的条件下, 即电气输出铆接部位引出电阻与电位计电阻膜阻值呈等比线性变化时, 阻值的变化不会影响电位计的输出。

2.3 引出电阻对零位输出电压的影响

由于电气输出铆接部位接触不良造成中心抽头处局部接触电阻增加, 从而造成电位计总阻值不变, 分电阻值由于串联一个电阻 r , 使分电阻值同时出现增长, 接触电阻显著变化的异常现象^[5], 其故障模式如图 3 所示。由于电阻组件的不对称度误差在中心抽头处存在接触电阻时引起的电位计零位变化的电路原理图如图 4。

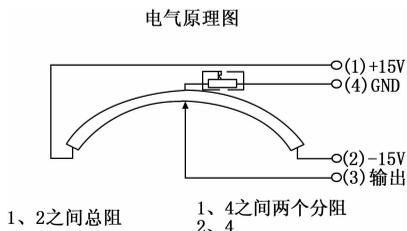


图 3 电位计分阻异常故障模式示意图

设两个分电阻为 $R_l = R$ 、 $R_r = R + \Delta R$ ($r=0$ 时), ΔR 为不对称电阻, R_{mm} 为中心抽头处的引出电阻、电源电压为 $+V$ 、 $-V$, 通过数学推倒可以求出零位输出电压为:

$$V_0 = \frac{\Delta R \times R_{mm}}{R^2 + 2R \times R_{mm} + \Delta R \times R + \Delta R \times R_{mm}}V \quad (17)$$

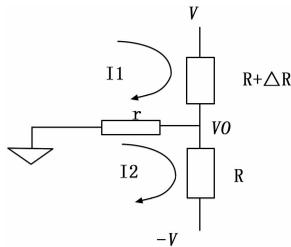


图 4 电位计分阻异常电路原理图 (图中 $r=R_{mm}$)

计算可知, 当引出电阻达到 300 Ω 以上时, 造成零位有 20 mV 的偏差。

工程实际中电位计位移传感器只测试产品的总阻值, 由公式 (17) 可知, 在电位计中间抽头部位出现问题引出阻值变化时, 测量电位计总阻无法正确对失效部位进行反映, 由于中心抽头与铆钉接触不良产生引出电阻, 会对电位计相对零位输出电压产生影响, 使整机零位电压输出异常, 极端情况下由于零位偏置正常使用中会超出电位计使用行程。

2.4 不对称电阻对线性度的影响分析

电位计不对称电阻的定义为: $\Delta R = |R_l - R_r|$

R_l 表示电位计左电阻膜阻值 (Ω); R_r 表示电位计右电阻膜阻值 (Ω);

当电位计电阻膜一端出现失效, 铆钉部位出现接触电阻后, 通过观察电位计不对称电阻即可发现其异常, 下面用电路仿真软件 Multisim 对电位计电阻膜一端出现接触电阻变化对电位计的影响进行仿真计算, 其仿真计算模型^[6]简图如图 5, 分别对接触电阻进行 1 k Ω 、2 k Ω 、3 M Ω 的定义, 则三类独立输出变化如图 6 所示。

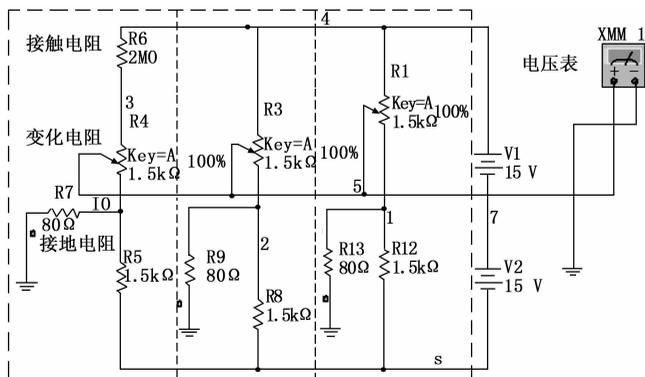


图 5 仿真计算模型简图

可见随着引出电阻的增加, 产品的不对称电阻势必出现明显变化, 产品线性度逐渐变差。

3 环境影响分析

3.1 温度对阻值的影响

理论上讲, 随着温度的升高, 导体内的电子活跃程度升高, 会造成阻值上升^[7]。

温度影响后的阻值进行了修正, 修正公式如下:

$$R_{20} = \frac{1}{1 + \alpha(t - 20)}R_{测} \quad (18)$$

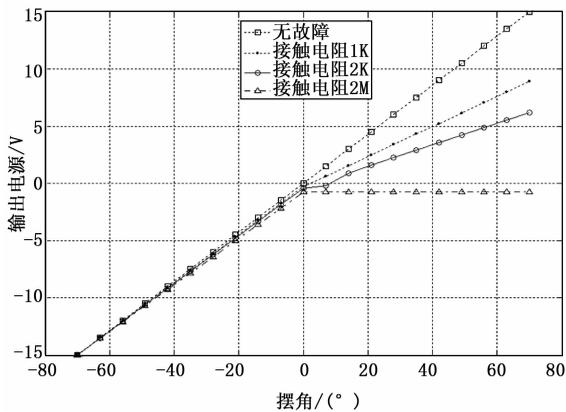


图 6 接触电阻对通道输出影响的仿真分析图

式中, R_{20} 为折算至温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时阻值; $R_{\text{测}}$ 为在测量温度下阻值的实测值; t 为测量时的温度 ($^{\circ}\text{C}$); α 为温度系数; $\alpha = 0.003\ 931 / ^{\circ}\text{C}$ 。

鉴于温度升高对各处的阻值影响几乎一致, 因此由式(7)可知, 温度变化不会影响到电位计的输

3.2 湿度对阻值的影响

电位计式位移传感器的关键是电阻体, 产品使用精度、使用效果均通过电阻体的质量体现。电阻体是胶体石墨粉剂、石英粉、树脂溶液、混合溶剂按一定比例配方混合, 经过 120 小时球磨后成为符合要求的电阻液。然后用喷涂的方法在非金属做成的基体上, 经多次 (13~15) 喷涂、干燥、聚合等工序制成, 为了使电阻体的性能稳定, 还要经过电、热老练等工序, 以提高其自身实用性能及稳定性。电阻体的电性能主要通过胶体石墨实现, 为典型碳掺杂型导电体系, 属于渗流作用为主、隧道效应为辅的导电机理。小尺寸、高微观结构和高比面积的胶体石墨之间彼此相互接触构成链状导电通道, 使电荷自由定向移动成为可能, 从而使复合体系具有良好的导电性。然而, 胶体石墨本身为多孔、高比面积的亲水材料, 在潮湿环境中极易与水发生吸附现象, 导电粒子 (胶体石墨) 表面被一层薄薄的水膜包覆, 导电粒子之间极易被水膜分隔, 载流子需要越过界面层形成的势垒而跃迁到相邻导电粒子上形成隧道电流, 此时材料体系属于隧道效应为主的导电机理。随着时间的延长, 水分子在石墨表面的吸附逐渐饱和, 水分子在电阻膜逐层渗入, 使电位计电阻膜总阻值同步均匀增大最终达到饱和。阻值随湿度增加而增加; 在湿度饱和时可使电位计阻值在原阻值的基础上增加约 13% 左右; 湿度变化导致的阻值同步均匀增大变化是一种线性变化, 不会影响反馈电位计线性度, 也不会影响产品的正常使用^[8]。

如在外界电场、热作用下, 水分子膜被击穿或解吸附, 界面势垒逐渐降低, 进而电阻降低, 可恢复到原来状态。

4 其他影响分析

电刷在电阻膜和导电条上运动的同时在导电条上等比

例的拾取电压输出的功能, 用于伺服系统机电作动器线位移测量并参与伺服系统闭环控制反馈, 电阻膜与电刷在一定压力下进行接触, 电阻膜与电刷之间会产生磨削多余物, 磨削多余物主要包含: 电刷刷丝上的金属氧化物、电阻膜上的石墨颗粒和电阻片骨架基体上的绝缘填充物, 磨削多余物的导电性能较差, 这些物质会吸附在电刷刷丝和电阻膜表面上产生较高的接触电阻, 导致位移传感器的引出电阻增大^[9]。在工作中, 磨削多余物产生的多少则与刷丝材料、结构和电阻膜与骨架基体的匹配关系有关。

为了减少电阻膜与电刷工作过程中磨削产生的多余物, 对电刷结构进行设计, 电刷应具有良好的导电性和导热性, 低而稳定的接触电阻、高的耐磨损性、抗熔焊性、良好的化学稳定性和一定的机械强度^[10]。我们选用了厚度为 0.25 PdIr18 合金片材, 同时通过计算试验分析确定合适的电刷丝与丝之间的间隙, 便于线切割后抛光打尽毛刺; 并通过正交试验找出了最佳电刷压缩量 (即最佳弹力), 从而降低刷丝在工作中的磨损情况。

电阻膜与骨架基体的匹配关系主要是指电阻膜印制在骨架表面后性能是否稳定, 为满足电位计产品使用环境条件要求, 电位计产品骨架材料应具备以下特点:

- 1) 骨架材料表面不允许有凹坑、杂质和其它明显缺陷;
- 2) 骨架材料与电阻膜和导电条的匹配性好, 能够使电阻膜和导电条紧密牢固地附着在骨架表面, 并保持稳定的状态;
- 3) 骨架材料能够耐高温, 在高温下不易变形;
- 4) 骨架材料应具有良好的机械加工性, 在加工过程中不分层、起皮或开裂;
- 5) 骨架材料应具有良好的绝缘性能, 并且不易吸潮;
- 6) 对于覆铜箔的骨架材料, 其铜箔的抗剥强度应较高。

结合以上几项要求, 骨架材料选用聚酰亚胺层压覆铜板, 是一种新型的芳杂环高聚物, 机械强度高, 介电强度高, 耐高低温, 耐辐射, 是由多层浸有树脂的纤维经叠合、热压而结合成的整体。从热环境、力学环境、使用寿命、贮存性等多个方面验证可以满足航天伺服系统的高精度高可靠使用要求。

5 小结

为适应新型导弹武器对伺服系统日益增长的性能需求, 迫切推进新一代伺服系统的发展。新型导弹武器要求伺服系统的控制精度更准, 工作可靠性更高。航天伺服电位计式位移传感器是伺服系统的重要组成部分, 其性能直接影响伺服系统的控制精度。本文在阐述电位计式位移传感器的工作原理以及传感器自身各项指标定义的基础上, 分析影响传感器测量精度的因素, 提出了如何提高传感器测量精度的几种途径: