

# 温度对LVDT传感器性能指标影响分析

李韶璇 于 越 段晨鹏

航空工业北京长城计量测试技术研究所 北京 100095

**摘要:** LVDT传感器广泛应用于航空航天领域,其使用过程中会面临极端的温度变化,因此研究温度对LVDT传感器性能指标的影响具有重要意义。针对此问题,本文基于LVDT传感器工作原理,建立了理论模型,从理论上分析了温度对LVDT传感器性能指标的影响。在高低温位移传感器校准装置上进行了实验验证,实验结果表明,随着温度的改变,LVDT传感器的线性度、灵敏度等性能指标都发生了偏移。分析表明,常温环境下的校准数据不能反映传感器使用工况下的性能指标,这对研究高低温环境下LVDT传感器的校准具有重要意义。

**关键词:** LVDT传感器; 温度; 性能指标; 位移传感器校准

## 引言

LVDT (Linear Variable Differential Transformer) 传感器是一种用于测量线性位移的传感器<sup>[1]</sup>, LVDT传感器具有精度高、寿命长、可靠性高、线性性能好等优点,具有较强的抗干扰能力,同时能够在高温和高压环境下工作。

在航空领域<sup>[2]</sup>, LVDT传感器用于航空发动机内部的位移测量,航空发动机内工作环境恶劣、高温高压、条件相对复杂苛刻,因此通常使用耐高温高压的LVDT传感器。在不同温度影响下, LVDT传感器内部结构均会产生不同程度的形变,从而导致传感器工作点输出发生漂移,同时传感器灵敏度、线性度等性能指标发生改变。

依据JJF 1305《线位移传感器校准规范》, LVDT传感器的校准都是在常温环境下进行,常温环境下关于LVDT传感器的校准数据不能完全反映传感器使用时的性能指标。针对这一问题,本文通过理论分析和实验的方法研究了温度对LVDT传感器性能指标的影响。

## 1 LVDT 传感器原理

本文分析了三段式结构的LVDT传感器,包含一个初级线圈、两个次级线圈、铁芯、骨架和外壳等。理想情况下,位移传感器结构对称,线圈阻抗大小相等,空气间隙相等, LVDT结构模型如图1所示。

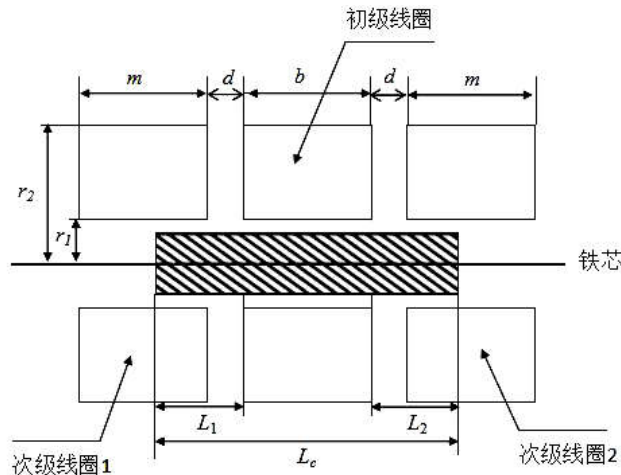


图1 LVDT结构模型图

<sup>[3]</sup>利用正弦交流电源对初级线圈进行激励,次级线圈1和次级线圈2两端会产生感应电压,感应电压分别为<sup>[4]</sup>:

$$U_1 = \frac{\mu_0 \pi f I_p n_p n_s L_1}{m L_c \ln(r_2 / r_1)} \cdot (2L_1 + 2d + b) \quad (1)$$

$$U_2 = \frac{\mu_0 \pi f I_p n_p n_s L_2}{m L_c \ln(r_2 / r_1)} \cdot (2L_2 + 2d + b)$$

LVDT传感器的差动输出为:

$$U = U_1 - U_2 = \frac{\mu_0 \pi f I_p n_p n_s}{m L_c \ln(r_2 / r_1)} \cdot [(2L_1 + 2d + b)L_1^2 - (2L_2 + 2d + b)L_2^2] \quad (2)$$

式中:  $U_1$ 为次级线圈1感应电压;  $U_2$ 为次级线圈2感应电压;  $U$ 为输出电压;  $I_p$ 为初级线圈电流;  $n_p$ 为初级线

圈匝数； $n_s$ 为次级线圈匝数； $f$ 为激励频率； $\mu_0$ 为真空磁导率， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ ； $L_1$ 为铁芯在次级线圈1中的长度； $L_2$ 为铁芯在次级线圈2中的长度； $L_c$ 为铁芯的长度； $b$ 为初级线圈长度； $d$ 为初级线圈与次级线圈之间的空隙； $r_2$ 为线圈外径； $r_1$ 为线圈内径。

其中

$$L_1 + L_2 + b + 2d = L_c \quad (3)$$

当铁芯移动 $\Delta x$ 位移时，

$$L_1 = \frac{L_c - b - 2d}{2} + \Delta x \quad (4)$$

$$L_2 = \frac{L_c - b - 2d}{2} - \Delta x \quad (5)$$

将式(4)和式(5)代入式(2)中，可得：

$$U = \frac{4\mu_0 \pi f I_p n_p n_s}{m L_c \ln(r_2 / r_1)} \Delta x \left(1 - \frac{4}{L_c^2 - (b + 2d)^2} (\Delta x)^2\right) \quad (6)$$

$$= \frac{16\pi^2 f I_p n_p n_s}{10^7 m L_c \ln(r_2 / r_1)} \Delta x \left(1 - \frac{4}{L_c^2 - (b + 2d)^2} (\Delta x)^2\right)$$

其中初级线圈中的电流由式(7)可得。

$$I_p = \frac{v_p}{R_p} \quad (7)$$

式中： $R_p$ 为初级线圈电阻， $v_p$ 为激励电压幅值。

## 2 温度对LVDT传感器性能指标的影响

理想情况下，LVDT传感器的性能指标是恒定的。但在实际测量过程中，随着温度变化，输出电压发生漂移，传感器性能指标发生变化，从而造成测量误差<sup>[11]</sup>。

温度对LVDT传感器的影响主要是其线圈电阻发生变化。LVDT传感器线圈随温度变化横截面积发生形变，导致其电阻值发生改变，铜的电阻值呈线性增加，铜电阻的电阻值与温度之间的关系公式如下：

$$R_{pt} = R_{p0} (1 + \alpha(t - t_0)) \quad (8)$$

式中， $R_{pt}$ 为 $t^\circ\text{C}$ 时的电阻值； $R_{p0}$ 为 $t_0^\circ\text{C}$ 时的电感值； $\alpha$ 为温度系数； $t$ 为铜电阻的温度； $t_0$ 为参考温度，通常为 $20^\circ\text{C}$ 。

其中 $20^\circ\text{C}$ 下铜的电阻率为 $1.72 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ ，根据电阻率和铜线尺寸计算初级线圈的铜线电阻。铜的温度系数为0.00393。

随着温度升高，线圈电阻增加，特定位置处输出电压减小，产生电压漂移。同时随温度升高，在输入值一定时，LVDT传感器输出量程减小，导致传感器灵敏度降低。

## 3 实验验证及分析

### 3.1 装置组成

高低温位移传感器校准装置由高低温箱、光栅式指示表检定仪、电源、传感器信号采集系统等设备组成。

校准装置组成设备的功能：高低温箱用于提供实验

所需的温度；光栅式指示表检定仪用于提供标准位移量，测量范围为(0~50)mm，最大允许误差为 $1\mu\text{m}$ ；电源用于提供频率为3kHz，幅值为3V的交流电压；传感器信号采集系统用于将传感器模拟量电压输出转化为数字量位移输出。

其中传感器放置于高低温箱中，光栅式指示表检定仪放置于高低温箱外部，通过零膨胀的连接杆将两者相连。光栅式指示表检定仪放置在常温环境中，其测量精度不受高低温箱温度变化的影响。连接杆一端在高低温箱内部，另一端在常温环境中，零膨胀系数的连接杆在不同温度下移动几乎不发生形变。上述设计保证了标准器精度不受温度影响。

### 3.2 性能指标分析

对LVDT传感器来说，其性能指标有线性度、灵敏度、重复性和温漂。通过上述装置验证温度LVDT传感器静态性能指标的影响。

#### 3.2.1 实验数据及结果

选取某厂商编号为2306097的高低温LVDT传感器，其工作量程为(-0.3~0.3)mm。将LVDT传感器放在高低温箱中，在每个温度点下选择11个测量点，实验过程为3次行程，分别为正行程1、正行程2和正行程3。选取 $0^\circ\text{C}$ 、 $20^\circ\text{C}$ 和 $40^\circ\text{C}$ 为本次实验的3个温度点。在3个温度点下LVDT传感器输入-输出特性曲线如图2所示。

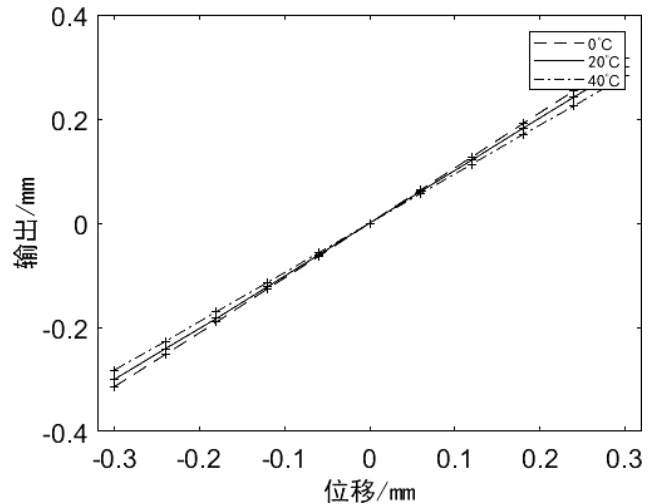


图2 输入-输出特性曲线

在传感器温漂特性测试实验中，将LVDT传感器放在高低温箱中，在常温环境下将传感器固定在0.300mm输出处，对传感器进行温控实验，控制温度在 $0^\circ\text{C}$ ~ $40^\circ\text{C}$ 范围内，每隔 $10^\circ\text{C}$ 升温一次，升温后在每个测试温度下稳定保持1个小时，连续采集30s内传感器的输出值，求得LVDT传感器在每个温度下输出的平均值，如图3所示。

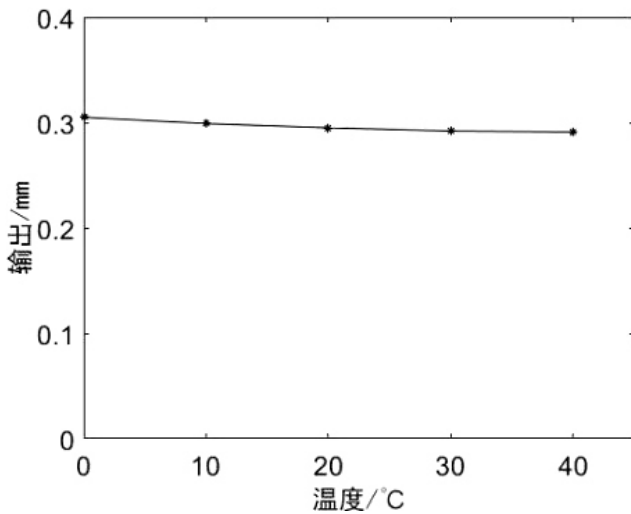


图3 温漂曲线

### 3.2.2 线性度分析

依据JJF 1305-2011《线位移传感器校准规范》，利用最小二乘法计算传感器参比直线方程。0°C、20°C、40°C下LVDT传感器线性度分别为0.24%，0.29%，0.20%。实验结果显示不同温度下的线性度不同，验证了LVDT传感器的线性特性随温度的改变而改变。

### 3.2.3 灵敏度分析

灵敏度反映了传感器输出信号对输入信号放大的能力。依据JJF 1305-2011《线位移传感器校准规范》由3.2.2中所拟合的参比曲线可以得出：0°C、20°C和40°C下LVDT传感器的灵敏度分别为1.0539mm/mm、1.0061mm/mm、0.9418mm/mm。由实验结果可知，LVDT传感器的灵敏度与温度呈负相关。由第1节中的LVDT传感器模型可知，温度的升高导致线圈阻值升高，输出电压降低，进而导致LVDT传感器的灵敏度降低。

### 3.2.4 重复性分析

重复性反映了传感器的输入输出关系的稳定程度。依据JJF 1305-2011《线位移传感器校准规范》，计算0°C、20°C、40°C下LVDT传感器的重复性分别是0.20%，0.20%，0.21%。由实验结果可知，传感器的重复性指标并未随温度的改变发生较大的变化，验证了温度对传感器的重复性影响较小。

### 3.2.5 温漂分析

在输入量不变的情况下，随着温度的变化，LVDT传感器输出值的漂移为温漂。随温度变化，LVDT传感器在0.300mm处的输出特性曲线如图4所示，由实验结果可知，传感器输出随温度升高而减小。温度升高时，传感器线圈阻值随之增大，输出值降低。

## 4 结束语

本文通过理论分析和实验验证的方法，研究了温度对LVDT传感器性能指标的影响。

<sup>[6]</sup>目前LVDT传感器的计量通常依据JJF 1305-2011《线位移传感器校准规范》，在常温环境下进行校准<sup>[5]</sup>。然而LVDT传感器通常应用在极端环境下，温度环境的改变对LVDT传感器的性能指标产生较大影响。针对应用在极端环境下的LVDT传感器，常温环境下的校准数据并不能完全反映传感器真实的性能指标，需要结合高低温环境下的校准数据综合评判LVDT传感器的性能指标。为保证计量结果的可靠性，高低温环境下LVDT传感器的计量将成为未来的发展趋势<sup>[7]</sup>。

## 参考文献

- [1]韩春慧,苑会娟.基于实验室用差动变压器式位移测量系统的设计[J].黑龙江大学学报(自然科学版),2015,32(4):555-560.
- [2]郁明辉.航空发动机用LVDT位移传感器的研究[D].江苏:南京航空航天大学,2020.
- [3]田野.LVDT测量系统及其信号调理电路的设计实现[D].黑龙江:哈尔滨理工大学,2023.
- [4]刘志才.LVDT位移传感器数字信号处理算法及电路研究[D].浙江:浙江大学,2012.
- [5]陈爽,彭希锋.基于激光干涉的位移传感器自动化校准装置[J].仪表技术与传感器,2021(4):28-33.
- [6]何涛,朱跃,杨天豪,等.高低温环境光栅线位移传感器校准装置精度设计[J].导弹与航天运载技术,2020(5):99-102.
- [7]阮健,朱兆良,李胜,等.LVDT校正技术研究[J].浙江工业大学,2016,44(2):184-188.DOI:10.3969.02.014.