

应变片用于斯特林发动机活塞位移的动态测量^{*}

李 薇^{1,2} 牟 健^{1,2} 洪国同¹

(1. 中国科学院理化技术研究所 北京, 100190) (2. 中国科学院大学 北京, 100049)

摘要 结合自由活塞斯特林发动机的结构特点,提出了采用应变片响应板弹簧变形来动态测量活塞位移的方法。根据应变片的电阻应变效应与应变仪的电桥原理,建立了一套应变片测量位移的动态标定试验系统,将动态标定数据与静态标定数据进行了比较分析。试验结果表明,应变片测量位移的方法存在一定的正反向、动静态差异,应变片的粘贴位置也会直接影响测量准确性。基于应变片传感器体积小,与板弹簧结合粘贴无需占用专门的空间,通过标定校准和合理的安装位置,仍然是一种较好的位移测量传感器。

关键词 自由活塞斯特林发动机;动态位移测量;应变片;板弹簧

中图分类号 TH113.1; TP212.1

引 言

自由活塞斯特林发动机是斯特林发动机的一个重要分支,它取消了曲柄连杆机构,采用间隙密封、柔性支撑等技术,在空间电源、热电联产、船舶潜艇等领域有着越来越广泛的应用^[1-4]。自由活塞斯特林发动机有两个运动部件:配气活塞组件和动力活塞组件。这两活塞组件的运动情况直接关系到自由活塞斯特林发动机的运行性能,然而自由活塞斯特林发动机作为一种闭式循环、高紧凑度的发动机,由于其内部存在空间有限、承压、密封等问题,这就对两个活塞组件位移的测量带来了难度。

常见的位移测量装置有电感式线性差动位移传感器(linear variable differential transformer,简称LVDT)和电容式位移传感器。其工作原理都是将运动部件的位移信号经电感或电容器件转化为电信号输出^[5-6]。但这两种位移传感器的安装都需要较大的轴向安装空间,对自由活塞斯特林发动机的结构而言,无法提供足够的轴向空间。激光测量位移的方法近年来也得到了一定的应用,但该方法的使用需要在缸体侧面开启激光射入窗,不仅增加了装置复杂性,也增加了测量难度^[7-9]。霍尔片测量位移的方法也是一种高精度、高线性度的测量方法,但由于其也需要较大轴向安装空间,且不适用于有较强外磁场的环境中,所以也很难应用到自由活塞斯特

林发动机的位移测量中^[10]。

笔者结合自由活塞斯特林发动机的结构特点^[11-14],提出采用应变片作为位移传感器来测量自由活塞斯特林发动机的活塞位移的方法,建立应变片测量位移的数学模型,做试验研究应变-位移的静态和动态响应特性,对应变-位移试验数据及其误差进行分析。

1 应变片测量斯特林发动机活塞位移的数学模型

应变片粘贴在板弹簧的涡旋臂上,当与板弹簧连接的活塞运动时,板弹簧的涡旋臂会产生位移和变形,并由此产生应力和应变,电阻应变片又将应力与应变转换成电阻的变化,最终输出与活塞位移相对应的电信号,建起了应变片的应变与活塞位移间的对应关系,进而实现对活塞位移的测量。

当板弹簧发生形变时,在板弹簧的涡旋臂中存在扭转、拉伸、弯曲等复杂的应力状态。因应变片的尺寸非常小,且主要感受栅长方向的应变,所以可以将其简化为一条直线。这样就可忽略拉伸、扭转等产生的应力。

如图 1 所示,将板弹簧的涡旋臂等价于一端受到力矩的悬臂梁,图中的 x 相当于活塞运动产生的位移,如果施加在活塞上的力为 F ,板弹簧刚度为 k ,则活塞位移 x 可以表示为

$$x = F/k \quad (1)$$

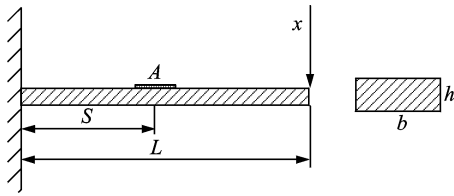


图 1 矩形等截面梁示意图

Fig. 1 Diagram of rectangle equivalent section beam

在板弹簧的表面上 A 点处贴一只应变片。悬臂梁的总长度为 L,应变片中点距离固定端的长度为 s。当作用在板弹簧时,板弹簧 A 处会产生弯矩 M,其表达式为

$$M = F(L - s) = kx(L - s) \quad (2)$$

若 A 处横截面积的长为 b,宽为 h,则 A 处的抗弯截面系数表达式为

$$W = bh^2/6 \quad (3)$$

所以,A 处的应力 σ_A 表达式为

$$\sigma_A = M/W = 6k(L - s)x/bh^2 \quad (4)$$

A 处的应变 ϵ_A 表达式为

$$\epsilon_A = \sigma_A/E = 6k(L - s)x/bh^2E \quad (5)$$

其中:E 为板弹簧的弹性模量。

式(5)就是应变片测量活塞位移的数学模型,从式(5)可以看出,只要板弹簧材料、结构尺寸、刚度确定,应变片的安装位置固定,则应变片中的应变值 ϵ_A 与活塞位移 x 成线性关系。

2 应变片的位移测量系统

2.1 静态位移测量系统

利用应变片静态测量活塞位移的测量系统如图 2 所示。活塞的静态标定需要的装置有应变仪和深度千分尺。实验中,板弹簧上应变片测量导线与应变仪相连,应变量通过显示器输出。深度千分尺作用在活塞上,给活塞不同的位移位置,可得到活塞的真实位移。

2.2 动态位移测量系统

利用应变片动态测量活塞位移的测量系统如图 3 所示。电机的运动线圈和板弹簧固定在活塞杆上,应变片粘贴在板弹簧的涡旋臂上。实验时,电机通过变频器和功率放大器给线圈输入交变电流,线圈在永磁场的电磁感应作用下开始做周期往复运

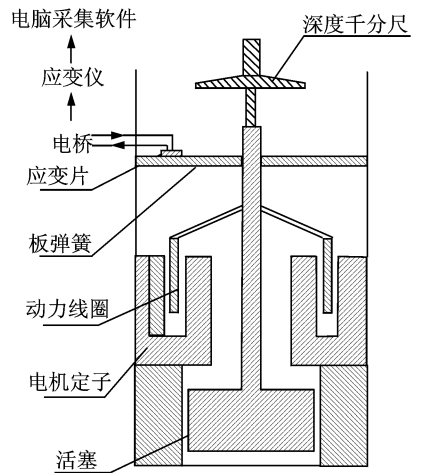


图 2 应变片静态测量活塞位移的测量系统

Fig. 2 Test system of strain gauge measure the displacement of piston statically

动,从而带动活塞做往复运动。当活塞产生位移时,板弹簧也随之产生位移,其涡旋臂会产生局部变形,贴在板弹簧涡旋臂上的应变片也会随之产生应变,其应变量通过应变仪处理后输出。活塞杆的末端连接了 LVDT 位移传感器,用于记录活塞的真实位移,建立应变量与活塞实际位移间的对应关系。LVDT 位移传感器的供电电源是 24 V 直流电,线性误差 $\leq \pm 0.25\%$,输出信号由电脑采集软件输出。

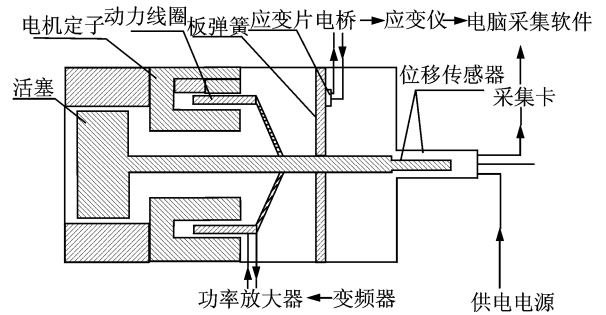


图 3 应变片动态测量活塞位移的测量系统

Fig. 3 Test system of strain gauge measure the displacement of piston dynamically

3 测试结果及分析

本实验分别对活塞进行了静态测量和动态测量。静态测量即给定活塞一个位移值,记录对应的应变片所采集的信号值。动态测量则是在自由活塞斯特林发动机一定的运行频率下,测量动力活塞的动态位移曲线,以更真实地反应自由活塞斯特林发动机正常运行时的动态位移。

3.1 位移测量试验结果

为了了解板弹簧涡旋臂不同位置的应变情况,分别在板弹簧涡旋臂的内部、中部和外部各贴了应变片,如图 4 所示,试验用板弹簧的外圆直径为 94 mm,厚度为 0.5 mm。

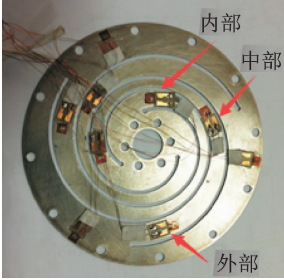


图 4 应变片在板弹簧涡旋臂上的粘贴位置

Fig. 4 The pastet position of strain gauge on the plate spring

图 5 给出了动力活塞静态位移与不同位置应变片应变标定曲线和不同位置应变片正负行程下的拟合曲线,图中的位置 1、位置 2、位置 3 分别对应图 4

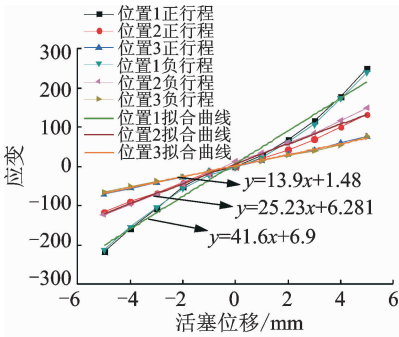


图 5 静态应变-位移标定曲线和拟合曲线

Fig. 5 Calibration curve and fitting curve of strain-displacement in the static case

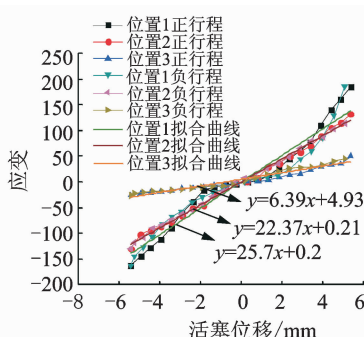


图 6 10 Hz 动态应变-位移标定曲线和拟合曲线

Fig. 6 Calibration curve and fitting curve of strain-displacement under the 10 Hz operation

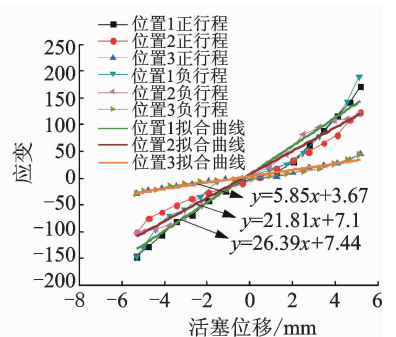


图 7 20 Hz 动态应变-位移标定曲线和拟合曲线

Fig. 7 Calibration curve and fitting curve of strain-displacement under the 20 Hz operation

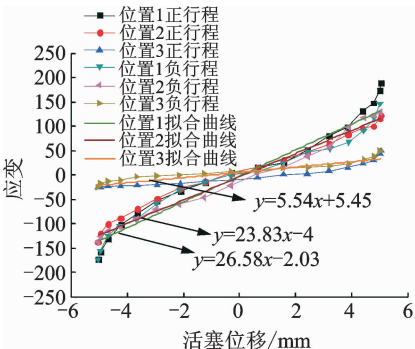


图 8 30 Hz 动态应变-位移标定曲线和拟合曲线

Fig. 8 Calibration curve and fitting curve of strain-displacement under the 30 Hz operation

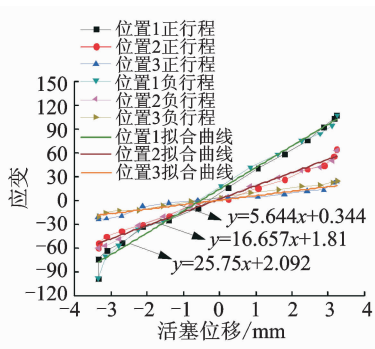


图 9 40 Hz 动态应变-位移标定曲线和拟合曲线

Fig. 9 Calibration curve and fitting curve of strain-displacement under the 40 Hz operation

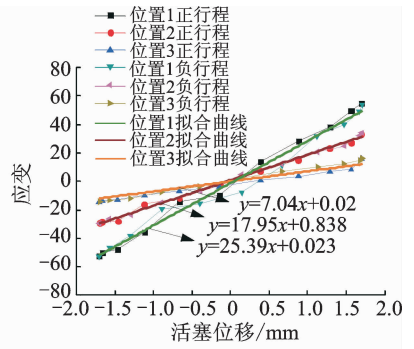


图 10 50 Hz 动态应变-位移标定曲线和拟合曲线

Fig. 10 Calibration curve and fitting curve of strain-displacement under the 50 Hz operation

中的内部、中部、外部。由图 5 中的测量数据可知,静态测量时发动机动力活塞的位移与其应变片的应变具有较好的线性关系,正反向位移的应变响应基本一致。但应变片粘贴的位置不同,应变片的应变响应大小不同,曲线的斜率不同。位置 1 处的应变片离动力活塞的距离最近,相同位移下应变最大;位置 3 处的应变片距离动力活塞中心的距离最远,相同位移下应变最小。由图 5 中的拟合曲线可知,位置 1 处拟合曲线的斜率最大,说明该位置的灵敏系数最高;位置 3 处的拟合曲线斜率最小,灵敏系数也最低;位置 2 介于两者之间。

图 6~10 为不同频率下动力活塞位移与应变片应变的关系曲线。由测量结果可知,动态测量的位移与应变的线性度较差,正负行程的重合度也较差,相同活塞位移下动态响应幅值均小于静态响应值。但不同频率同一活塞位移的动态应变响应幅值基本相同。由拟合曲线可知,不同频率下,同一位置的拟合曲线斜率相差不大,但均小于静态值的拟合曲线斜率。

3.2 数据分析

为了了解两种测量方法的准确性,在此对静态测量与动态测量进行了误差分析。图 11 为不同位置应变片静态位移测量时的相对误差值。图 12~16 为不同频率时不同位置应变片动态位移测量的相对误差值。

由图 11 可知,应变片静态测量位移的相对误差曲线稳定,活塞位移的相对误差值在 5% 以内。由

图 12~16 可以看出,应变片动态测量位移的相对误差曲线稳定性较差,活塞位移相对误差的最大值也达到了 20% 左右。同时,在不同的频率下,应变片粘贴在中间位置时的相对误差值最小。

通常认为,应变片的允许工作频率在远高于整机的允许频率时,用静态标定可以满足动态的测量要求。但实际上板弹簧动态工作过程会产生扭转及侧向颤颤等原因,导致应变片动态测量与静态测量的数据有差别。

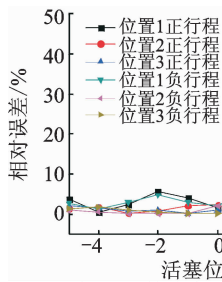


图 11 应变片静态标定位移的相对误差值

Fig. 11 Relative error of strain gauge measure the displacement of piston statically

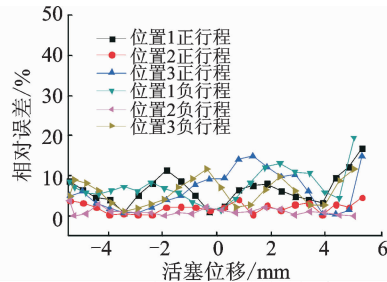


图 12 10 Hz 应变片动态标定位移的相对误差值

Fig. 12 Relative error of strain gauge measure the displacement of piston under the 10 Hz operation

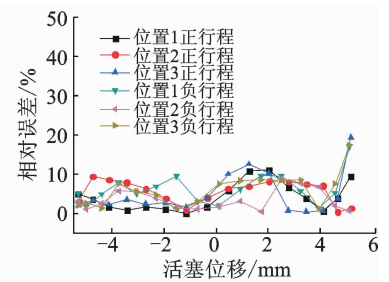


图 13 20 Hz 应变片动态标定位移的相对误差值

Fig. 13 Relative error of strain gauge measure the displacement of piston under the 20 Hz operation

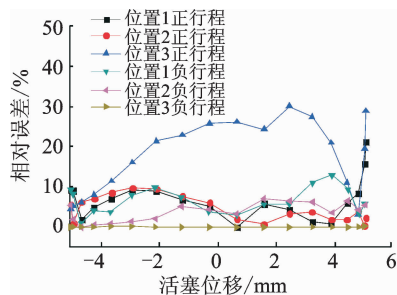


图 14 30 Hz 应变片动态标定位移的相对误差值

Fig. 14 Relative error of strain gauge measure the displacement of piston under the 30 Hz operation

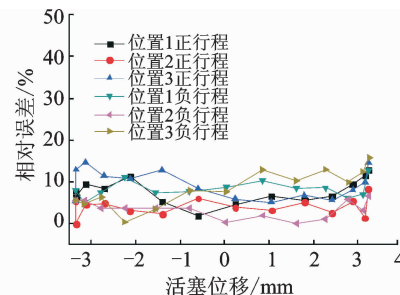


图 15 40 Hz 应变片动态标定位移的相对误差值

Fig. 15 Relative error of strain gauge measure the displacement of piston under the 40 Hz operation

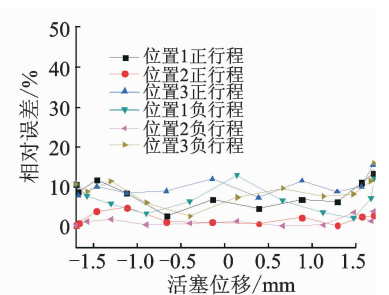


图 16 50 Hz 应变片动态标定位移的相对误差值

Fig. 16 Relative error of strain gauge measure the displacement of piston under the 50 Hz operation

为了了解应变片粘贴在板弹簧涡旋臂的什么位置更合适,现将不同位置的静态位移测量曲线与某一频率的动态位移测量曲线做误差比较分析,得到板弹簧涡旋臂不同位置用静态测量位移值代替动态测量位移的相对误差曲线,结果如图 17 所示。

从图 17 可以看出,位置 2 处的应变片的相对误差最小(最大值为 7.2%),也就是说,应变片粘贴在涡旋臂的中间位置时,动态测量与静态测量的误差最小。如果动态测量的结果是活塞位移的真实值,那么位置 2 处可以用静态标定代替动态标定。虽然位置 1 和位置 3 也可以用静态标定,但标定出的数

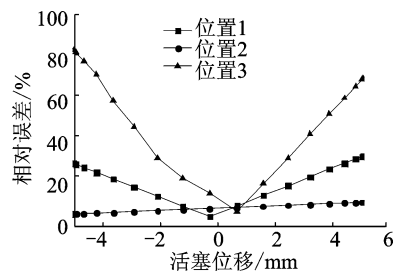


图 17 不同位置应变片动态测量与静态测量的相对误差
Fig. 17 Relative error of strain gauge of different positions measure displacement of piston in the static and dynamic case

值与活塞实际运行时的数值差别较大(最大值分别为30%,82.5%)。所以,如果采用应变片测量活塞位移,应将应变片粘贴在板弹簧的中部,即位置2处,采用静态标定数据用于动态测量产生的误差最小,精度最高。

4 结 论

1) 静态测量时活塞的位移与应变片的应变具有较好的线性关系,正反向位移的应变响应基本一致;应变片粘贴的位置不同,应变片的应变响应大小不同,拟合曲线的斜率不同。

2) 动态测量时位移与应变的线性度较差,正负行程的重合度也较差,并且动态与静态测量的响应幅值差别也很大,相同活塞位移下动态响应幅值均小于静态响应值。

3) 应变片静态测量位移的相对误差曲线稳定,活塞位移的相对误差值在5%内。动态测量位移的相对误差曲线稳定性较差,活塞位移相对误差的最大值达到了20%。

4) 应变片粘贴在涡旋臂的中间位置时,动态测量与静态测量的相对误差最小,最大仅为7.2%。如果动态测量的结果是活塞运行的真实值,那么位置2处可以用静态标定代替动态标定。

5) 本研究实现了应变片动态测量活塞位移的可行性,但从长期运行来看,应变片的测量精度会随着活塞的长期运行而逐渐下降,今后还需要对应变片的使用寿命和可靠性进行深入研究。

参 考 文 献

[1] Pongsakorn K, Maung M W, Sombat T, et al. Development of a new solar thermal engine system for circulating water for aeration [J]. *Solar Energy*, 2005, 78(4): 518-527.

[2] Li Yaqi, He Yaling, Wang Weiwei. Optimization of solar-powered stirling heat engine with finite-time thermodynamics [J]. *Renewable Energy*, 2011, 36(1): 421-427.

[3] Huth J, Collins J. Diesel fuel-to-electric energy conversion using compact, portable, stirling Engine-Based Systems[C]//13th International Stirling Engine Conference. Tokyo, Japan: Society of Mechanical Engineers, 2007.

[4] Wood J G, Carroll C, Penswick L B. Advanced 80 We stirling convertor development progress [C]//Space Technology and Applications International Forum. New Mexico: American Institute of Physics, 2005.

[5] Park S J, Hong Y J, Kim H B, et al. An experimental study on the phase shift between piston and displacer in the Stirling cryocooler [J]. *Current Applied Physics*, 2003, 3(5): 449-455.

[6] Reed J S. A capacitance based axial position sensor for cryocoolers [J]. *Cryogenics*, 2005, 45(3): 225-230.

[7] Yang Y P, Huang B J, Chen F M, et al. New techniques for the non-contact measurement of displacer motion of a miniature split-Stirling cryocooler [J]. *Cryogenics*, 1996, 36(8): 573-578.

[8] 秦宁,陈厚磊,蔡京辉. 测量线性压缩机活塞位移和PV功的新方法[J]. *低温工程*, 2012(2): 5-10.
Qin Ning, Chen Houlei, Cai Jinghui. New method for piston displacement and PV power measurements of linear compressor [J]. *Cryogenics*, 2012(2): 5-10. (in Chinese)

[9] 郑光亮,陈怀海,何旭东. 激光测振方法在振动试验中的应用[J]. *振动、测试与诊断*, 2015, 35(S1): 45-47.
Zheng Guangliang, Chen Huaihai, He Xudong. Application of laser vibrometer in vibration test [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2015, 33(S1): 45-47. (in Chinese)

[10] 关明杰,江建民,刘义,等. 基于自跟随的霍尔位移测量范围扩展的研究[J]. *控制工程*, 2002, 9(6): 94-96.
Guan Mingjie, Jiang Jianmin, Liu Yi, et al. Application of auto-tracking system in extending the measurement range of hore Sensors [J]. *Control Engineering of China*, 2002, 9(6): 94-96. (in Chinese)

[11] 郑秀媛,谢大吉. 应力应变电测技术[M]. 北京:国防工业出版社, 1985: 3-18.

[12] 吉林工业大学农机系与第一机械工业部农机机械科学研究院编. 应变片电测技术[M]. 北京:机械工业出版社, 1978: 53-60.

[13] 陈曦. 大冷量整体式中温区自由活塞斯特林制冷机的理论与实验研究[D]. 北京:中国科学院, 2006.

[14] 张建伟,李正宇,李青. 应变片测量直线发电机活塞位移的疲劳分析[J]. *电子测量技术*, 2012, 35(11): 100-103.
Zhang Jianwei, Li Zhengyu, Li Qing. Fatigue analysis of displacement-strain sensor used in linear alternator [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2012, 35(11): 100-103. (in Chinese)



第一作者简介:李薇,女,1984年2月生,博士生。主要研究方向为自由活塞斯特林发动机动力学。曾发表《Gas effect of free piston Stirling engine》(《Conversion and Management》2016, Vol. 110, No. 2)等论文。
E-mail:liweitipc@163.com

