

航天器用内螺纹的气体湍流激光多普勒式检测

王 涛^{1,3,4}, 咎占华^{1,4}, 张翠亭^{1,2}, 姚建铨³, 马俊杰¹, 蔡 军², 李玉翔²

(1. 河北工业大学 机械工程学院, 天津 300130;

2. 天津工业大学 机电学院, 天津 300387;

3. 天津大学 精密仪器与光电子工程学院, 天津 300192;

4. 南京津涵涵电力科技有限公司, 江苏 南京 211316)

摘要: 为了解决航天器操纵旋转套筒内螺纹的自动检测问题, 特别是在内螺纹件表面有油污与锈蚀时, 单纯地利用光学图像检测的方法很难更好地解决问题, 利用平流气体吹向内螺纹, 从而形成了映射着内螺纹形貌的湍流输出, 然后利用多普勒激光测量内螺纹的湍流特性。研究了内螺纹气体湍流的拉伸与压缩过程的数据特性, 利用箱线图的方法处理内螺纹湍流数据, 建立了内螺纹湍流箱线图的标准样板库, 将检测数据与标准样板对比检测, 结果表明: 当异常值阈值设为 7% 时, 检测准确率为 99.3%。气体湍流激光多普勒式检测内螺纹方法可行, 克服了表面油污等难点, 完全满足检测的要求。

关键词: 内螺纹检测; 湍流边界层; 激光多普勒技术; 流场测量; 数据箱线图

中图分类号: TN247; TN249; TB96; O354.9 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0406006

Detection of internal thread for spacecraft with gas turbulence laser Doppler

Wang Tao^{1,3,4}, Zan Zhanhua^{1,4}, Zhang Cuiting^{1,2}, Yao Jianquan³, Ma Junjie¹, Cai Jun², Li Yuxiang²

(1. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

2. School of Mechanical Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;

3. School of Precision Instrument & Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300192, China;

4. Nanjing Jinriam Power Technology CO., LTD, Nanjing 211316, China)

Abstract: To solve the problem of the automatic inspection of the internal threads of a rotating sleeve operated by an aerospace vehicle, especially when the surface of the internal thread has oil pollution and rust, simply using optical image detection method was difficult to solve. The flat gas was blew inward internal thread to form the turbulence output mapping the appearance of the internal thread, and then the turbulence characteristics of internal thread was detected by Doppler laser. The data characteristics were investigated in the stretching process and compression process of internal thread gas turbulence. The gas turbulence data was dealt with box line chart method. A standard template database of the box line chart of internal thread turbulent was established. The detection data was compared with the standard template.

收稿日期: 2017-11-10; 修订日期: 2017-12-20

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51775166); 天津市应用基础与前沿技术研究计划一般项目(14JCYBJC19600)

作者简介: 王涛(1963-), 男, 教授, 博士, 主要从事激光与光机电一体化技术方面的研究。Email: wtao_1@163.com

通讯作者: 咎占华(1988-), 男, 硕士生, 主要从事激光与光机电一体化技术方面的研究。Email: 516337476@qq.com

The result shows that when the threshold value of outliers is set to be 7%, the detection accuracy is 99.3%. Gas turbulent laser Doppler method for detecting internal threads is feasible, and overcomes the surface oil pollution and other difficulties, meets test requirements totally.

Key words: detection of internal thread; turbulence boundary layer; laser Doppler technology; flow field; data box line graph

0 引言

在螺纹检测技术中, 航空航天器操纵旋转套筒的内螺纹的自动检测是一个难点, 通常都是人工检测, 参考文献[1]介绍了机械式的采用通规和止规的方法, 利用轮廓法测量螺纹, 它属于接触式的, 不适合于自动检测, 效率低、人工成本高, 并且还容易错判, 造成损失, 参考文献[2-3]介绍了光学与图像分析法, 利用光学图像或光反射方法识别螺纹, 然而, 对于内螺纹加工后常留有的油污或锈蚀, 光学与图像检测方法往往难以处理。为了解决油污或锈蚀的影响, 实现准确的自动化检测, 文中提出了利用气体介质湍流激光多普勒方法检测内螺纹, 目前还没有相关的研究及报道。

文中提出利用气体介质湍流激光多普勒检测内螺纹的原理与方法, 使用激光多普勒测量系统测量气体介质湍流经过内螺纹牙槽的边界层流向速度分布数据。对于内螺纹牙槽, 在牙槽附近区域流速数值增大, 同时湍流度降低, 利用动量原理计算动量变化, 得出内螺纹牙槽的减阻量有较大增加, 利用这一湍流特性对内螺纹进行检测。

在内螺纹气体介质湍流动态中存在着相干结构状态, 它体现在气体介质在内螺纹上的射流、尾流、剪切流、混合层和边界层中, 存在着影射内螺纹形貌的湍流相干结构, 简称内螺纹相干结构, 这个相干结构的形态具有规律性、普遍性和可重复性, 称之为拟序结构, 内螺纹湍流脉动可以分解为不同尺度的涡流结构的运动的迭加, 它具有多结构、多层次、多尺度的特征, 把这一变化过程分解为从柯尔莫戈洛夫(Kolmogorov) 耗散尺度变化到积分尺度的过程, 它包含着内螺纹的不同尺度湍流特征信息, 这一特征信息足够丰富, 利用它可对内螺纹结构进行测量。

采用 TS1 激光多普勒测量系统^[4], 它包括三部分, 即光路系统、信号处理系统、数据处理软件包与

显示系统; 使用 TS1 激光多普勒的数据处理软件包(IFA550)与流动信息显示软件包(FIND), 可以直接进行干涉数据采集、计算与统计分析, 直接计算出速度与能量图, 实时显示测量曲线, 参考文献[4]给出了激光多普勒风速仪直接获得湍流的速度与能量的过程与实验数据。

1 气体湍流激光多普勒式内螺纹检测器结构

气体介质激光多普勒式内螺纹检测器结构如图1所示, 图中, 1 为喷气嘴, 2 为平流气流束, 3 为内螺纹套, 4 为位置传感器, 5 为激光发射器, 6 为挡料杆, 7 为湍流气流, 8 为内螺纹, 9 为 V 型滑道, 10 为推料气缸, 11 为多普勒信号处理器, 12 为控制中心, 13 为气泵, 14 为多普勒信号接收器。

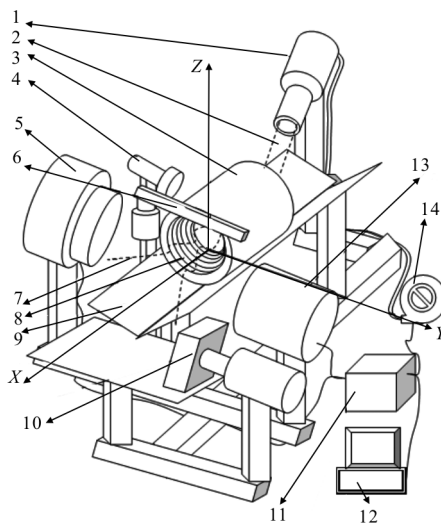


图 1 气体湍流激光多普勒式内螺纹检测系统结构图
Fig.1 Structure diagram of spection system of gas turbulent laser Doppler internal thread

设置 V 型滑道, 内螺纹套滑到传感器位置时, 被挡料杆挡住, 喷气嘴喷出一束平稳气流束, 倾斜一定角度吹向内螺纹牙槽, 经内螺纹对气流束的反射

形成湍流气流, 这个湍流气流携带着内螺纹牙槽的形貌信息, 称为内螺纹湍流, 利用激光多普勒测量系统测量提取内螺纹湍流的信息, 预先进行示教、标定, 形成数据库, 由控制中心控制检测与分拣, 为提高测量精度, 气流束中加入固体微粒^[4], 它采用可回收环保型 BBC 材料。

空间坐标的建立: 在内螺纹进入测量位置时, 以内螺纹的端部底面的内螺纹根部为空间坐标的零点, 沿着内螺纹纵向为 X 轴, 沿着内螺纹横向为 Y 轴, 与 X-Y 轴垂直向上为 Z 轴, 坐标单位为 mm。

2 内螺纹的气体湍流特性分析

平流气体倾斜吹向内螺纹, 在内螺纹上反射, 形成映射着内螺纹牙槽形貌的内螺纹湍流输出, 在内螺纹牙槽面附近的流体的平均速度沿着法向空间坐标向上, 平均速度变化剧烈, 即速度变化梯度大, 内螺纹湍流边界层大幅度地增加了牙槽面摩擦阻力, 这个流动结构映射着内螺纹的几何形状信息。为此, 建立内螺纹湍流数学物理方程, 描述内螺纹湍流结构的相对运动的数理状态^[5], 内螺纹湍流的局部平均速度的函数定义为:

$$\delta u(b,a) = \overline{u(b+x)} - \overline{u(b-x)} \quad x \in [0,a] \quad (1)$$

公式(1)为内螺纹湍流的一段流体中分成前后两段的流体质点速度的局部平均的差值 $\delta u(b,a)$, 它表征了内螺纹湍流状态时前后两段的流体的平均相对运动速度。

$\delta u(b,a) > 0$ 表示中心为 $b+a/2$ 的前一段流体的平均流速快, 中心为 $b-a/2$ 的后一段流体的平均流速慢, 前后相邻两段的流体发生了拉伸效应, 出现了减速的现象, 在内螺纹动态相干结构中, 称之为拉伸状态。

$\delta u(b,a) < 0$ 表示中心为 $b+a/2$ 的前一段流体的平均流速慢, 中心为 $b-a/2$ 的后一段流体的平均流速快, 前后相邻两段流体发生了压缩效应, 出现了加速的现象, 在结构相干动态中, 称之为压缩状态。

P 阶局部平均形态分布函数^[5]定义为:

$$\langle |\delta u(b,a)|^p \rangle_b = \langle \left| \overline{u(x)}_{x \in [b,b+a]} - \overline{u(x)}_{x \in [b-a,b]} \right|^p \rangle_b \quad (2)$$

式中: $\langle |\delta u(b,a)|^p \rangle_b$ 为坐标 b 位置的系统平均值, 特别地, $p=2$ 时:

$$\langle |\delta u(b,a)|^2 \rangle_b = \langle \left| \overline{u(x)}_{x \in [b,b+a]} - \overline{u(x)}_{x \in [b-a,b]} \right|^2 \rangle_b \quad (3)$$

那么, 表示一个坐标范围为 2a 的内螺纹湍流结构的能量变化, 为:

$$E(a) = \langle |\delta u(a,b)|^p \rangle_b = \langle \left| \overline{u(x)}_{x \in [b,b+a]} - \overline{u(x)}_{x \in [b-a,b]} \right|^p \rangle_b \quad (4)$$

为了描述这个内螺纹湍流结构的相对强度, 这里采用接续的两段平均变形能量的比值来表示, $P=4$ 时:

$$FF(a) = \frac{\langle \delta u(b,a) \rangle_b^4}{\langle \delta u(b,a) \rangle_b^2} \quad (5)$$

式中: $FF(a)$ 为平坦因子; (b,a) 属于随机变量。使用 (b,a) 的幅值作为样本, 统计 (b,a) 的四阶统计矩作为分子, 统计 (b,a) 的幅值的均方值作为分母, 它的比值表述了平坦特性, $FF(a)$ 值大, 表示平坦特性差, 反之平坦特性好。

内螺纹湍流场平坦因子 $FF(a)$ 与瞬时强度因子 $I(b,a)$ 数学表达式为^[5]:

$$FF(a) = \langle I(a,b)^2 \rangle \quad (6)$$

公式(6)为平坦因子与瞬时强度因子为正相关的关系, 即同升同降的关系, 即: $I(a,b)$ 的数值大, 同时 $FF(a)$ 数值增大, 它表征了内螺纹湍流场的相干结构的拉伸或压缩量值增大。

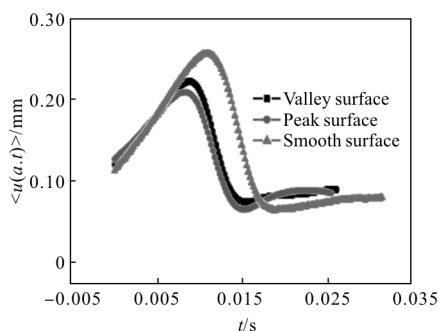
内螺纹气体湍流场具有间歇性, 这是内螺纹气体湍流场区别于平流随机场的本质特征, 为此, 建立对于一维内螺纹气体湍流信号 $u(x)$ 的连续 Harr 子波变换:

$$\begin{aligned} W_H(a,b) &= \langle u(x), H_{a,b}(x) \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} u(x) H_{a,b}(x) dx = \\ &= \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} u(x) H\left(\frac{x-b}{a}\right) dx = \\ &= \frac{1}{\sqrt{a}} \int_b^{a+b} u(x) dx - \int_{-a+b}^b u(x) dx \quad (7) \end{aligned}$$

Harr 子波函数属于分段常数的阶梯函数^[5], 包括 Harr 子波子函数, 它们表述了内螺纹气体湍流局部结构, 表征了内螺纹湍流分布的坐标范围, 映射了内螺纹的结构尺寸。

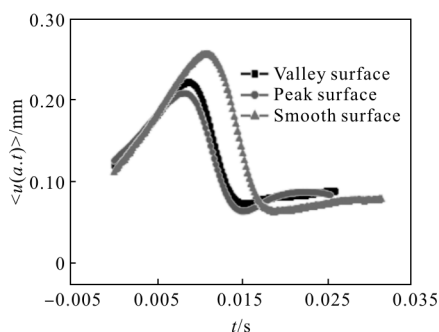
以公称直径 22 的内螺纹为例, 内螺纹牙槽面湍流流向速度分量条件相位平均波形如图 2 所示, 图 2(a)~(b) 分别给出了内螺纹牙槽面湍流边界层附

近的法向方向上的两个位置的两个湍流相干结构的特征曲线,一个是湍流流向速度分量曲线,另一个是湍流流向速度相位曲线,湍流从拉伸区流到到压缩区域,再流到拉伸区域,呈现周期变化^[5],内螺纹牙高和螺距的尺寸与这个周期变化尺度相对应,它映射出内螺纹的结构尺寸。



(a) 第一位置拉伸过程

(a) First position stretching process



(b) 第二位置压缩过程

(b) Second position compression process

图 2 内螺纹牙槽面湍流速度分量平均波形图

Fig.2 Mean velocity wave form of turbulent velocity component of internal thread tooth surface

利用 TSI-LDV 多普勒激光测量系统^[4]测量提取内螺纹牙槽面的湍流流场信息,激光器输出双频激光,分别为参考信号频率 f_{D1} 与测量信号频率 f_{D2} ,方程如下^[4]:

$$f_s = \Delta V \cdot 2u/c \quad (8)$$

由公式(8)得出, f_{D1} 和 f_{D2} 的频率差 f_s 与速度 u 成正比,测量 f_s 的值,即可得出湍流粒子速度 u ,调整双频激光的频率可以提高精度。

3 综合实验与分析

对湍流激光多普勒式内螺纹检测系统进行综合实验,采用通过示教的方法^[6],先进行合格的内螺纹

的湍流信息采集^[7],标定合格的内螺纹的湍流信息的箱线图形,建立计算机样板箱线图数据库^[8],将检测到的信息与样板箱线图数据库数据比较进行。

以公称直径 22 的内螺纹为例,图 3(a)、(b)为激光多普勒测量系统的数据处理软件包直接生成的内螺纹牙测量曲线,以此为判据制作内螺纹数据箱线图^[6],包括:最小值、第一四分位数、中位数、第三四分位数与最大值,共五个数据量,它涵盖了内螺纹的形貌数据,包括:普通螺纹牙型角 $\alpha=2\beta=60^\circ$,大径 D 、 d ,中径 $D2$ 、 $d2$,小径 $D1$ 、 $d1$,螺距 P 和导程 L 等统计信息。

对内螺纹湍流数据组中的异常值进行检测,异常值的阈值定义为小于 $Q1-1.5I_{QR}$ 或大于 $Q3+1.5I_{QR}$ 的值^[6],把它作为箱线图识别异常值的一个标准,内螺纹异常阈值设定为 0.7%,当异常值超阈值时^[9],即可认定为超差的内螺纹。

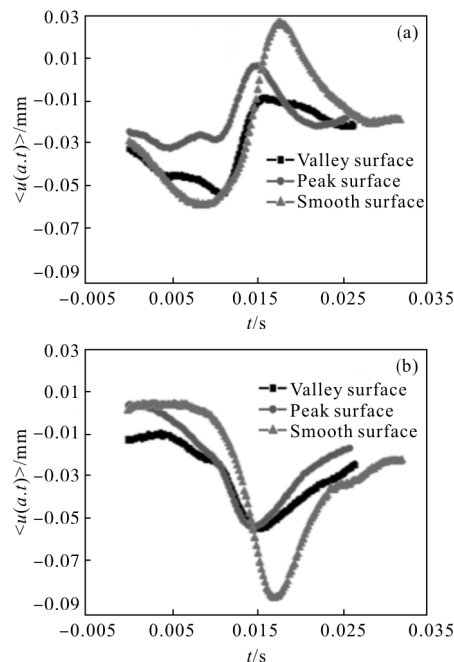


图 3 内螺纹牙槽面及光滑面脉动速度分量平均波形

Fig.3 Mean velocity waveform of the fluctuating velocity component of tooth surface and smooth surfaces of the internal thread

内螺纹标准样板数据箱线图是在一批合格的内螺纹管样品中,以 64 个合格样品为一组,重复采集^[9],去掉异常值,建立标准样板数据箱线图,公称直径 22 的内螺纹湍流数据箱线图如图 4 所示,异常值阈值为 0.7%时,废品检出的准确率为 99.3%。

检测精度指标:尺寸检测精度 0.08 mm,角度检测精度 0.33°, 螺纹形状公差检测精度为<7%,完全满足检测要求;量程指标:直径 20~120 mm,长度 8~60 mm,检测速度:1 200 件/h。

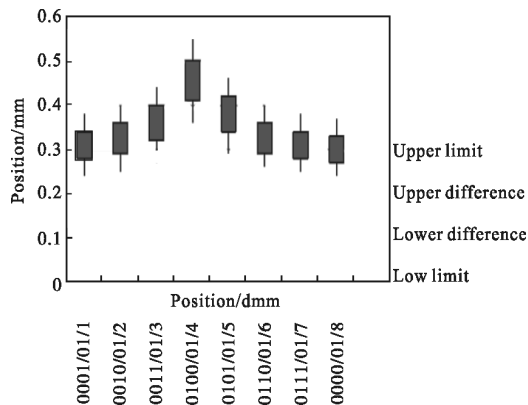


图 4 公称直径 22 的内螺纹湍流数据箱线图

Fig.4 Internal thread turbulent data box line chart of nominal diameter 22

4 结论

利用湍流激光多普勒式系统对航空航天器操纵旋转套筒用的内螺纹气体湍流信息进行识别检测,理论与方法可行,内螺纹湍流映射着内螺纹牙槽的形貌,建立了内螺纹湍流的局部平均速度的 *Harr* 子波函数,得出了内螺纹牙槽面及光滑面脉动速度分量平均波形,以此为判据,利用测得合格内螺纹的数据建立内螺纹合格样板箱线图。检测到内螺纹件的实测数据与标准样板数据箱线图进行对比,异常值个数阈值设定为总数 0.7%时,内螺纹检测的准确率为 99.3%,已经达到航空航天器操纵旋转套筒用内螺纹的检测需要。湍流激光多普勒式检测是非接触式的,不受工件表面污迹变色的影响,检测精度符合要求,综合性能的优势明显。

参考文献:

[1] Cang Peng, Zhang Wei, Wang Xiaodong. An automatic internal thread test platform for liquefied oil cylinder valve [J]. *Journal of Changchun University of Technology*, 2015, 36(6): 111-115. (in Chinese)
 苍鹏, 张伟, 王晓东. 液化石油气瓶阀内螺纹自动检测台[J]. 长春工业大学学报(自然科学版), 2015, 36(6): 111-115.
 [2] Wang Peng, Shi Ruize, Zhong Xiaofeng, et al. 3D scanning measurement system based on double-line projection and the

line-plane [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(4): 0427001. (in Chinese)
 王鹏, 史瑞泽, 钟小峰, 等. 基于双线投影与线面约束的 3D 扫描测量系统研究 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(4): 0427001.
 [3] Li Yanna, Tang Litie, Xie Xiangyun, et al. Measuring far-field instantaneous facula intensity space-time distribution of solid-state laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(8): 0817002. (in Chinese)
 李艳娜, 唐力铁, 谢翔云, 等. 固体激光远场瞬时光斑时空分布测量技术[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(8): 0817002.
 [4] Liu Jianzhong, Yao Qiang. Measurement of turbulent flow field in concentrated burner using laser Doppler velocimetry [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 1999, 36(5): 33-37. (in Chinese)
 刘建忠, 姚强. 激光多普勒测速技术应用于浓缩燃烧器湍流流场的测量[J]. 激光与光电子学进展, 1999, 36(5): 33-37.
 [5] Liu Wei. Experimental study of the effects of periodic perturbations on multi-scale coherent structures in wall turbulence[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009. (in Chinese)
 刘薇. 周期性扰动对壁湍流多尺度相干结构影响的实验研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
 [6] Wang Huailiang. The function of box graph in identifying outliers of statistical data and implementation of R language [J]. *Economy*, 2011(5): 1009-1013. (in Chinese)
 王怀亮. 箱线图在识别统计数据异常值中的作用及 R 语言实现[J]. 商业经济, 2011(5): 1009-1013.
 [7] Miao Shaofeng, Li Chenxu, Gao Miao, et al. Design of laser power stabilization system based on acousto-optic modulation for the transmissivity and reflectivity measurement of optical devices [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2016, 9(2): 263-269. (in Chinese)
 苗少峰, 李晨旭, 高苗, 等. 面向光学器件透反射率测量的声光调制型激光功率稳定系统设计[J]. 中国光学, 2016, 9(2): 263-269.
 [8] Wei Su, Xiao Jun, Wei Xiudong, et al. Evaluation of flux density measurement for solar irradiance[J]. *Chinese Journal of Optics*, 2016, 9(2): 255-262. (in Chinese)
 魏素, 肖君, 魏秀东, 等. 太阳能聚焦光斑能流密度测量方法评估[J]. 中国光学, 2016, 9(2): 255-262.
 [9] Zhuang Xuxia, Ruan Ningjuan, Zhao Sisi, et al. Characterization techniques of space objects based on point target information [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(S1): S126001. (in Chinese)
 庄绪霞, 阮宁娟, 赵思思, 等. 基于点目标测量的空间目标特性识别技术[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(S1): S126001.