

空间滤波转速遥测中旋转方向的辨识方法

曾祥楷 陈 阳* 朱志雄 刘全顺

重庆理工大学光电信息学院, 重庆 400054

摘要 基于微分差相关分析和旋转中心定位,提出了用于空间滤波转速遥测中旋转方向的辨识方法。该旋转方向辨识法是将差分空间滤波器中相邻两个光电池的输出信号经微分、相减、取绝对值后再积分计算得到微分差相关值,用其最小值处延时量的符号确定旋转体像在该两光电池处的线速度方向,再依据该线速度方向和旋转中心位置来判定旋转方向。其中的旋转中心位置是利用双差分空间滤波传感器输出信号的两个中心频率及其变化计算系数 k ,再由 k 值和较大中心频率对应的差分空间滤波器所在的位置来确定的。仿真分析实验验证了所提出的旋转方向辨识方法简单易实现。该方法对随机相位不敏感,有效地解决了空间滤波转速遥测中的旋转方向辨识难题。

关键词 测量; 旋转方向辨识; 微分差相关; 差分空间滤波; 转速遥测

中图分类号 TH74 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0612001

Identification Method of Rotational Direction in Remote Angular-Velocity Measurement with Spatial Filtering Technique

Zeng Xiangkai Chen Yang Zhu Zhixiong Liu Quanshun

School of Optoelectronic Information, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China

Abstract Based on differential subtraction correlation (DSC) and the position zones of the rotational center, an approach to identifying the rotational direction of the measured body in remote angular-velocity measurement with spatial filters is presented. The DSC is obtained by differentiating and subtracting the output signals of two adjacent photovoltaic cells in one differential spatial filter (DSF), and then integrating the absolute values of the differential subtraction signal. The sign of the temporal delay at the minimum DSC value indicates the displacement direction of the moving image on the photovoltaic cells. The rotational direction is distinguished by using both the displacement direction and the position zone of the rotational center. The position zone of the rotational center is determined by a coefficient k and the location of the DSF with a larger central frequency, where k is calculated with the two central frequencies and their variations of the quasi-sinusoidal output signals of a double-DSF sensor. Experiments and simulations are achieved to confirm the identification method, of which the results show that the identification method is correct and easy to be implemented. The proposed identification method is insensitive to random phase fluctuation, and has solved the difficult problem of identifying the rotational direction in remote angular measurement with spatial filtering technique.

Key words measurement; rotational direction identification; differential subtraction correlation; differential spatial filtering; remote angular-velocity measurement

OCIS codes 120.4640; 200.3050; 280.7250

1 引 言

空间滤波测速法是根据图像经空间滤波和光电转换后的时域信号频率与空域频率间的关系来测量运动物体的速度^[1-2],目前主要用于线速度的检测。该方法具有简单稳定、非接触、环境适应性强、使用方便等

收稿日期: 2015-01-04; 收到修改稿日期: 2015-02-02

基金项目: 重庆市时栅传感及先进检测技术重点实验室基金(2013TGS006)、重庆理工大学研究生科研创新基金(YCX2013103)

作者简介: 曾祥楷(1965—),男,博士,教授,主要从事波导理论、光电信息获取及处理等方面的研究。E-mail: zykai@cqut.edu.cn
通信联系人。E-mail: Chengangbisheng@163.com

优点,已用于飞行器、汽车、流体、微粒(含粉尘)等的线位移速度测试^[3-6]。但在涡旋流场、风机、涡轮叶片及其它各类大型旋转机械的监测控制中^[7-9],特别需要非接触或远距离地测量角位移或转速参量。为此,这里将多个光电池排列成两个平行的差分空间滤波器,构成双差分空间滤波传感器,同时完成空间滤波和光电转换的功能,用于运动物体转速量值的遥测。

速度矢量除了量值外还有运动方向的信息。但在空间滤波测速法中,频率本身难以分辨运动方向^[10],且空域和时域信号具有一定的随机性,故需一些特定的方法来辨识运动方向。目前的辨识方法主要用于线速度方向的辨识,包括频移法和相位差法。频移法是用有一定速度的运动光栅或电控移动液晶光栅作为空间滤波器,并产生一定的时域频移量作为参考频率;运动图像在经过空间滤波和光电转换后输出时域信号,该信号的频率由运动光栅和运动图像的相对速度决定。一般而言,当图像与光栅同向运动时,输出信号频率小于参考频率,否则信号频率大于参考频率,由此可判定运动方向^[11-12]。相位差法是将两个相同空间滤波器错位1/4或1/2栅距,输出相位差约为 $\pi/2$ 或 π 的两路准正弦信号,再用常见的叠栅条纹辨向法或相位频谱分析法分辨运动方向^[13-15]。频移法需要运动光栅,这增加了系统结构的复杂性,将导致噪声和不稳定性,还存在频率响应较低的不足^[16];对低速运动的辨向准确度较低,尤其当图像与光栅同向运动且图像速度大于光栅速度的2倍时,输出信号频率也将大于参考频率,这将直接导致错判。因此频移法对低速和高速运动的辨向准确度都较低。在相位差法中,被测体图像具有很强的随机性,空间滤波后的输出信号存在随机波动的相位,难以保证输出信号的相位差在 $\pi/2$ 或 π 附近,这也将导致运动方向的误判。

在转速测量中,旋转方向的辨识是必须的和非常重要的。用空间滤波技术遥测转速的研究较少,其旋转方向的辨识也比较困难,故对空间滤波转速测试中旋转方向辨识方法的研究结果鲜见报道。在用双差分空间滤波器遥测转速中,也需要辨识旋转方向,但也存在着信号有随机性、信号频率无旋转方向信息等问题。为此,本文提出了适于空间滤波转速遥测的旋转方向辨识方法。在该方法中,先用双差分空间滤波传感器输出信号的中心频率及其变化量来确定旋转中心位置;再用其中一个差分空间滤波器中的相邻两个光电池输出的随机信号,计算微分差相关值,由最小相关值处延时量的符号确定旋转图像在该光电池处的线速度方向;最后由该线速度方向和旋转中心的位置区域来判定旋转方向。

2 空间滤波转速遥测原理

用双差分空间滤波传感器遥测转速的原理如图1所示。在基于空间滤波的测速中,被测体图像须具有不均匀或随机的光强空间分布。因此对有光滑或均匀表面的被测体,需要在表面喷涂一层具有随机分布或非均匀图像的表层。当被测体以转速 ω 绕 O' 旋转时,旋转体端面的图像通过放大倍数为 M 的光学系统成像到双差分空间滤波传感器SF1和SF2上,像空间中图像的旋转中心 O 对应于物空间旋转中心 O' ;SF1和SF2分别输出准正弦信号 I_1 和 I_2 , I_1 和 I_2 经过信号处理后可分别获得其中心频率 f_1 和 f_2 ; f_1 和 f_2 分别与SF1和SF2处的旋转体图像线速度有关,由 f_1 和 f_2 可计算出被测旋转体的转速。其中的双差分空间滤波传感器是由多个光电池组成的两个光电探测器线阵列SF1和SF2平行排列并相距 L 构成,如图2(a)所示。在SF1中,相邻两

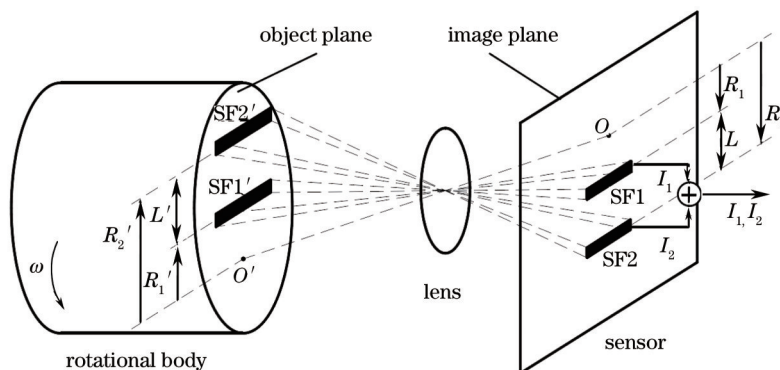


图1 空间滤波转速遥测原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of remote angular-velocity measurement with double differential spatial filters (DDSF)

个光电池 PD1 和 PD2 分别独立输出信号 S_1 和 S_2 , 用于辨识旋转体图像在 SF1 处的线速度方向; 在 SF1 余下的光电池中, 奇数和偶数序号的光电池信号分别连接在一起并再相减而得到 SF1 的输出信号 I_1 ; SF2 中的光电池按奇偶序号分组而得到奇数组和偶数组信号, 该两组信号再相减而得到 SF2 的输出信号 I_2 。这种结构的空
间滤波器同时兼有空滤波和光电转换的功能, 且其输出信号 I_1 和 I_2 均具有差分空滤波的性质。

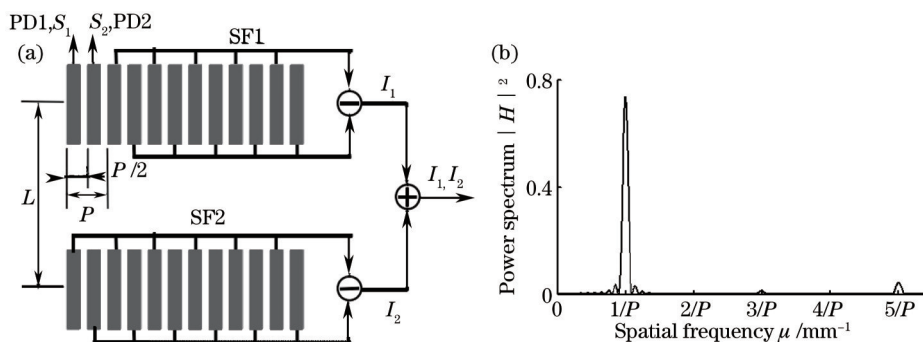


图 2 (a) 双差分空间滤波传感器的结构及 (b) 空间谱图

Fig.2 (a) Structure and (b) spatial spectrum of the optoelectronic sensor with double differential spatial filters

在空间滤波系统中, 随机分布图像的空间频谱类似于白噪声的频谱, 具有从直流到高频的宽空间频带; 成像系统具有低通滤波特性, 而空间滤波器具有带通滤波特性。随机分布图像经前述的成像系统和一维光电探测器线阵列滤波后的空间功率谱 $|H(\mu)|^2$ 主要由成像系统和光电探测器线阵列的传递函数决定, 也具有空间带通特性。由空间滤波理论可知^[17-18], 空间功率谱 $|H(\mu)|^2$ 为

$$|H(\mu)|^2 = 4 \left[\frac{\sin(\pi a \mu) \sin(\pi c \mu) \sin(\pi \mu P/2)}{\pi \mu \sin(\pi \mu P)} \right]^2, \quad (1)$$

式中 μ 是光电探测器阵列方向的空间频率, a 是空间滤波器的长度, P 是差分空间滤波器 SF1 或 SF2 的栅距, c 是每个光电探测器的光敏面宽。在 $a=10 \text{ mm}$ 、 $P=1 \text{ mm}$ 、 $c=0.3 \text{ mm}$ 时的归一化空间功率谱 $|H(\mu)|^2$ 如图 2(b) 所示, $1/P$ 是差分空间滤波器的空间基频。从(1)式和图 2(b)可知, 经差分空间滤波后的空间频谱主要是空间基频 $1/P$ 处的窄带谐波成分并在 $\mu=1/P$ 处取最大值, 而其偶次谐波成分已全被滤除了, 其 3 次及以上奇次谐波成分很小。当随机分布图像在光电探测器阵列方向以线速度 V 移动时, 光电探测器阵列的输出信号是随时间变化的正弦信号。因运动图像在光电探测器阵列方向的线位移 x 与时间变化 t 的关系为 $x=Vt$, 则时域频率 f 与空域频率 μ 的关系为 $\mu=f/V$, 在(1)式中用 f/V 代替 μ 可得该正弦信号的时域频谱 $|H_1(f)|^2 = |H(\mu)|^2|_{\mu=f/V}$ 。因此, 与空域基频 $1/P$ 对应的时域基频是时域信号的中心频率 f_0 , 由时间——空间频率关系 $f_0/V=1/P$ 可得光电探测器阵列方向的线速度 V 为

$$V = P f_0. \quad (2)$$

被测体端面上的旋转中心 O' 、区域 SF1' 和 SF2' 分别与像平面上的旋转中心 O 、差分空间滤波器 SF1 和 SF2 成共轭物象关系, 如图 1 所示。设 O' 到 SF1' 中心线和 SF2' 中心线的距离分别为 R'_1 和 R'_2 , SF1' 中心线到 SF2' 中心线的距离为 L' , O 到 SF1 中心线和 SF2 中心线的距离分别为 R_1 和 R_2 , 有关系式 $R_1 = MR'_1$ 、 $R_2 = MR'_2$ 、 $L = ML'$ 。在物平面及像平面上的角速度与线速度之间的关系分别如图 3(a) 和图 3(b) 所示。对差分空间滤波器 SF1 而言, SF1 中心线上的任意点 A 在 SF1' 上的共轭点为 A' , A' 到 O' 的距离为 R'_a 。在被测体以转速 ω 绕 O' 旋转时, A' 处的线速度为 $\omega R'_a$, A' 共轭成像点 A 处的线速度 $V_a = \omega MR'_a$, V_a 在 SF1 光电探测器阵列方向的分量 $V_1 = \omega MR'_a \cos \alpha$ (α 是 A' 或 A 处线速度与光电探测器阵列方向间的夹角)。利用关系式 $R'_a \cos \alpha = R'_1$ 和 $R_1 = MR'_1$ 可得, 在 SF1 上光电探测器阵列方向的线速度 $V_1 = \omega R_1$ 。类似地, 对差分空间滤波器 SF2 而言, SF2 中心线上的任意点 B 在 SF2' 上的共轭点为 B' , B' 到 O' 的距离为 R'_b , B' 处的线速度为 $\omega R'_b$, B' 共轭成像点 B 处的线速度 $V_b = \omega MR'_b$, V_b 在 SF2 光电探测器阵列方向的分量 $V_2 = \omega MR'_b \cos \beta$ (β 是 B' 或 B 处线速度与光电探测器阵列方向间的夹角)。利用关系式 $R'_b \cos \beta = R'_2$ 和 $R_2 = MR'_2$ 可得, 在 SF2 上光电探测器阵列方向的线速度 $V_2 = \omega R_2$ 。从 V_1 和 V_2 的表达式可知, 在光电探测器阵列方向上的线速度与旋转中心在探测器阵列方向的位置无关, 而仅与探测器阵列垂直方向的位置有关。

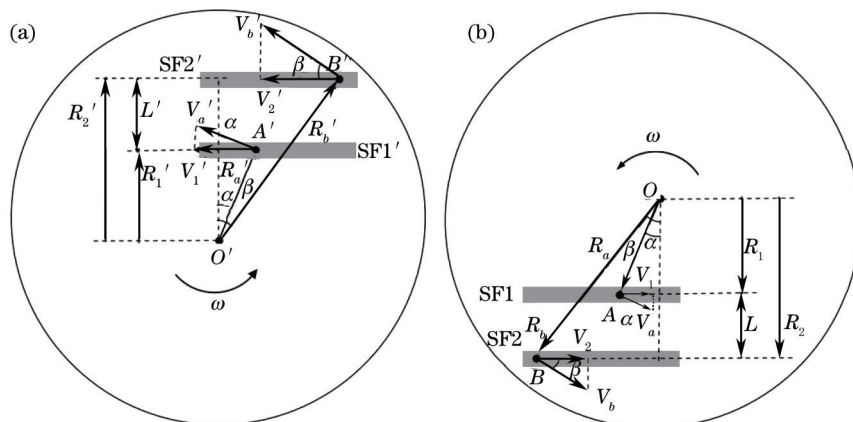


图3 在 (a) 物平面及 (b) 像平面上的角速度与线速度之间的关系

Fig.3 Relationship between angular velocity and linear velocity in (a) object plane and (b) image plane

从 V_1 、 V_2 及(2)式可得转速 ω 与 SF1 及 SF2 输出信号的中心频率 f_1 及 f_2 的关系为

$$\begin{cases} \omega R_1 = P f_1 \\ \omega R_2 = P f_2 \end{cases} \quad (3)$$

像空间图像旋转中心 O 所在的位置是由其在像平面上的二维坐标决定的,但从(3)式可知,空间滤波传感器输出信号的频率仅与 O 在光电池线阵列垂直方向的位置有关,而与 O 在光电池线阵列方向的位置没有太大关系。因此,仅需在光电池线阵列的垂直方向定位 O 的位置区域,影响转速计算的位置区域有三种:1) O 在 SF1 中心线与 SF2 中心线之间或其延长线之间[简称 SF1 和 SF2 之间,如图 4(a)所示];2) O 在 SF2 的中心线上或在 SF1 中心线与 SF2 中心线的下侧或其延长线的下侧[简称下侧,如图 4(b)所示];3) O 在 SF1 的中心线上或在 SF1 中心线与 SF2 中心线的上侧或其延长线的上侧[简称上侧,如图 4(c)所示]。从图 4 可知,当 O 在 SF1 和 SF2 之间时, $R_1 + R_2 = L$; 当 O 在 SF1 和 SF2 的下侧或上侧区域时, $|R_1 - R_2| = L$ 。因此,转速测量值 ω 为

$$\omega = |f_1 \pm f_2| P / L \quad (4)$$

当 O 在 SF1 和 SF2 之间时,(4)式中的“ \pm ”符号取“+”,否则取“-”。 P 和 L 是双差分空间滤波传感器的结构参数并可精确确定,故仅用两输出信号的中心频率即可实现瞬时转速量值 ω 的遥测。该转速测量值与光学放大倍数、旋转半径、偏心和安装误差等均无关,其误差源少,但仍然没有旋转方向信息。这里利用双差分空间滤波传感器的 S_1 、 S_2 、 f_1 和 f_2 ,将微分差相关分析与旋转中心位置相结合来判定被测体的旋转方向,以解决空间滤波转速遥测中的旋转方向辨识问题。

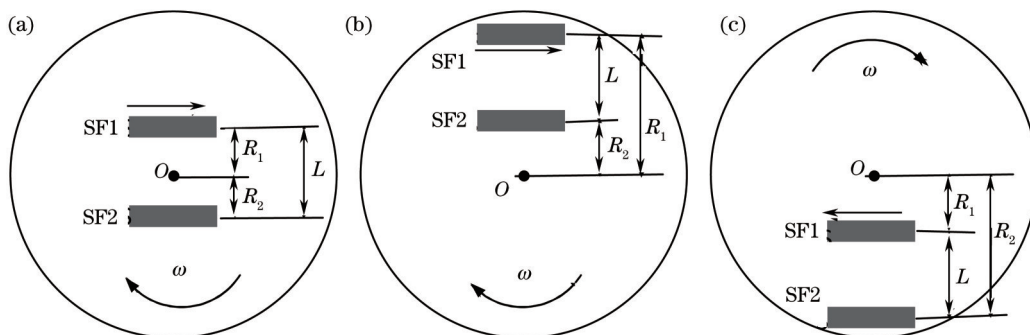


图4 像空间图像旋转中心在双差分空间滤波器上的位置区域

Fig.4 Position zones of image rotation center on the double differential spatial filters

3 旋转方向辨识方法

该旋转方向辨识法是先利用传感器输出信号的中心频率来确定像空间图像的旋转中心位置,再用随机信号的微分差相关确定旋转体图像在一个差分空间滤波器处的线速度方向,最后由该线速度方向和旋转中心位置来确定旋转方向。

3.1 旋转中心位置的判定

像空间图像旋转中心 O 的三种位置区域如图 4 所示,用中心频率 f_1, f_2 及其变化确定 O 所在位置区域的方法是:在被测体旋转过程中,首先由 SF1 和 SF2 输出的两路准正弦信号得到两个中心频率,比较两中心频率的大小,以较大的中心频率作为 f_1 ,以较小的中心频率作为 f_2 ;将双差分空间滤波传感器向 f_1 对应的差分空间滤波器方向平移 Δ ,要求 $0 < \Delta < Lf_2/(f_1 + f_2)$,以便平移后的 O 在原区域内(其中若 $f_2=0$,则 Δ 取大于 0 的任意值);平移传感器后,再由传感器输出的两路准正弦信号得到 f_1 和 f_2 对应的两个中心频率,分别记为 f_1' 和 f_2' ;用传感器平移前后的中心频率 f_1, f_2, f_1' 和 f_2' 可以得到系数 k :

$$k = \frac{(f_1 - f_2)(f_1' + f_2')}{(f_1 + f_2)(f_1' - f_2')} \quad (5)$$

由系数 k 判定 O 所在的位置区域。当 $k < 1$ 时, O 点在 SF1 和 SF2 之间;当 $k > 1$ 时,若 f_1 对应的差分空间滤波器是 SF1,则 O 点在 SF1 和 SF2 的下同侧,否则 O 点在上同侧。这样就可用 k 值、 f_1 对应的差分空间滤波器来判定 O 点的位置区域,如表 1 所示。

表 1 旋转中心位置与 k 值及 f_1 对应差分空间滤波器的关系

Table 1 Relationship of rotation center location with coefficient k and spatial filter with f_1

Coefficient k	Differential spatial filter with f_1	Location of rotational center
$k < 1$	—	Between SF1 and SF2
$k > 1$	SF1	Below both SF1 and SF2
	SF2	Above both SF1 and SF2

用 k 值判定 O 点位置区域的原理是:设 f_1 和 f_2 对应的旋转半径分别是 R_1 和 R_2 ,且 f_1 是较大的中心频率,则 $R_1 > R_2$;传感器向 f_1 对应的差分空间滤波器方向平移 $\Delta > 0$ 后, O 在 SF1 和 SF2 之间时系数 $k = 1 - 2\Delta/(R_1 - R_2 + 2\Delta) < 1$, O 点在 SF1 和 SF2 上同侧或下同侧时系数 $k = 1 + 2\Delta/(R_1 + R_2) > 1$ 。当 $k > 1$ 时,若 O 点在传感器的下同侧,则 f_1 对应的差分空间滤波器是 SF1;若 O 点在传感器的上同侧,则 f_1 对应的差分空间滤波器是 SF2。要求传感器平移量 $0 < \Delta < Lf_2/(f_1 + f_2)$ 可保证平移后的 O 在原区域,其原理是:当 O 点不在 SF1 或 SF2 的中心线上时, $f_2 \neq 0$,对平移量的要求 $0 < \Delta < \min(R_1, R_2)$ 可以保证平移后的 O 在原区域且不在 SF1 或 SF2 的中心线上;此时若 O 在 SF1 和 SF2 之间,则 $Lf_2/(f_1 + f_2) = R_2$,对传感器平移量的要求可使 $\Delta < \min(R_1, R_2)$;若 O 在 SF1 和 SF2 的上同侧或下同侧,则 $Lf_2/(f_1 + f_2) = LR_2/(L + 2R_2) < R_2$,对传感器平移量的要求也可使 $\Delta < \min(R_1, R_2)$;故此时 $0 < \Delta < Lf_2/(f_1 + f_2)$ 的要求可保证平移后的 O 在原区域内。当 O 点在 SF1(或 SF2)的中心线上时, f_1 对应的差分空间滤波器是 SF2(或 SF1), $f_2 = 0, Lf_2/(f_1 + f_2) = 0$,可视 O 点是在 SF1 和 SF2 的上同侧(或下同侧);此时再将双差分空间滤波传感器向 f_1 对应的差分空间滤波器方向平移大于 0 的任意距离 Δ (通常 $0 < \Delta < L$)后, O 点总是在 SF1 和 SF2 的上同侧(或下同侧),且不在 SF1(或 SF2)的中心线上,并总有 $k = (f_1' + f_2')/(f_1' - f_2') > 1$ 。因此无论 O 在何处, $0 < \Delta < Lf_2/(f_1 + f_2)$ 的要求都可保证平移后的 O 在原区域内,且用 k 判断 O 所在区域的方法都是适用的。

总之,沿着一定方向平移双差分空间滤波传感器,用平移前后的中心频率计算系数 k ,依据 k 值和 SF1 信号频率的相对大小,就可判定像空间图像旋转中心点的位置区域。

3.2 基于微分差相关的线速度方向判定法

通过对光电池 PD1 和 PD2 输出的随机时域信号 $S_1(t)$ 和 $S_2(t)$ 进行微分差相关计算,由最小微分差相关值处的时延符号可确定被测旋转体图像在 SF1 处的线速度方向。

对信号 $S_1(t)$ 和 $S_2(t)$,定义其微分差相关函数 $\gamma(\tau)$ 为

$$\gamma(\tau) = \int_{T_1}^{T_2} \left| \frac{dS_1(t - \tau)}{dt} - \frac{dS_2(t)}{dt} \right| dt, \quad (6)$$

式中 $T_1 \sim T_2$ 是相关积分区间, τ 是相关计算时的时延量。时域信号 $S_1(t)$ 和 $S_2(t)$ 经采样和模数转换(A/D)后分别转换为离散信号 $s_1(n)$ 和 $s_2(n)$,即 $s_1(n) = S_1(nT), s_2(n) = S_2(nT), n = 0, 1, \dots, N, T$ 为采样间隔,则 $\gamma(\tau)$ 离散化为 $\Gamma(m)$:

$$\Gamma(m) = \sum_{n=N_1}^{N_2-1} |s_1(n - m + 1) - s_1(n - m) - s_2(n + 1) + s_2(n)|, \quad (7)$$

式中 $N_1=T_1/T, N_2=T_2/T, m = \tau/T$, 且 m, N_1 和 N_2 都取整数。 $\Gamma(m)$ 只有加减而没有乘除运算, 其计算量小且简单, 这可提高分析效率。下面从信号 S_1 和 S_2 的特性分析 $\Gamma(m)$ 函数的取值特点, 以便建立 SF1 上线速度方向的辨识方法。

当被测旋转体的随机分布图像作圆弧运动并成像到 SF1 时, 对 S_1 和 S_2 有贡献的旋转体端面图像可分为三个圆弧区域 A、B 和 C, 如图 5 所示。区域 A 和 C 都相对较小, 区域 A 的光仅转换到 S_1 上, 区域 C 的光仅转换到 S_2 上。而区域 B 相对较大, 决定了 S_1 和 S_2 的主要组成部分。当 SF1 上的图像从左向右或从右向左移动时, S_1 中的 B 区信号在经过 $\tau_0 = P/(2wR_1)$ 的延迟或超前后必将出现在 S_2 中。因此, 在被测体旋转过程中, $S_2(t)$ 约是 $S_1(t)$ 延时或超前 τ_0 的信号, 即 $S_2(t) \approx S_1(t - \tau_0)$, 式中 $\tau_0 > 0$ 表示 SF1 区线速度从左向右, 而 $\tau_0 < 0$ 表示 SF1 区线速度从右向左。由 (6) 式和 (7) 式可知, 当 $S_2(t) \approx S_1(t - \tau_0)$ 时, 则在 $m \neq m_0 = \tau_0/T$ (取整) 处 $\Gamma(m) > 0$, 在 $m = m_0$ 处 $\Gamma(m_0)$ 是接近于 0 的最小值。因此, 用 S_1 和 S_2 计算微分差相关值 $\Gamma(m)$, 再搜索 $\Gamma(m)$ 最小值处的 m 即得 m_0 。 m_0 的符号就代表了旋转体图像在 SF1 上的运动方向, 即 $m_0 > 0$ 表示从左向右移动, $m_0 < 0$ 表示从右向左运动。

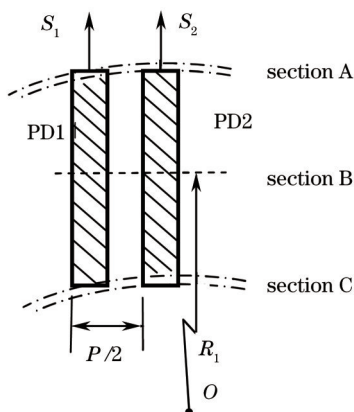


图 5 旋转物图像成像到 PD1 和 PD2 上的圆弧分区示意图

Fig.5 Schematic diagram of radial zones of rotational body imaged onto photovoltaic cells PD1 and PD2

在微分差相关函数 (7) 式中, 微分部分主要体现并放大了信号的变化特性。旋转图像的不均匀性越强, S_1 和 S_2 的不均匀性或随机性越强, S_1 或 S_2 在不同时刻的变化或差异性就愈大。而 S_2 近似为 S_1 平移 m_0 (对应于图像的空间位移 $P/2$) 后的信号, 即当 S_1 的平移量为 m_0 时, 在同一时刻 S_1 与 S_2 是近似相等的, 其微分差相关值接近于 0; 一旦平移量偏离 m_0 时, 同一时刻的 S_1 与 S_2 之间的差异性很大, 其微分差相关值迅速增大。这样, 信号 S_1 和 S_2 的随机性越强, 在 m_0 附近微分差相关值的变化特征就越明显, 越容易精确搜寻到 m_0 值, 有利于准确辨识旋转方向。

3.3 旋转方向的辨识方法

将前述的旋转中心定位法和线速度方向判定法相结合, 可判定被测旋转体图像的旋转方向。在倒立成像系统中, 从物空间向像空间方向观看被测体的旋转方向。若 SF1 处的图像是从左向右运动, 则像空间图像的旋转中心 O 在 SF1 和 SF2 之间、下同侧和上同侧的位置情况分别表示被测体沿顺时针、顺时针和逆时针方向旋转; 若 SF1 处的图像是从右向左运动, 则 O 在 SF1 和 SF2 之间、下同侧和上同侧的位置情况分别表示被测物沿逆时针、逆时针和顺时针方向旋转, 它们之间的关系如表 2 所示。根据该关系表, 用 k 值和 m_0 的符号可判定被测旋转体的旋转方向, 其方法是: 先依据第 3.1 节所述的方法用 k 值和 SF1 信号频率的相对大小, 确定 O 的位置区域, 该位置区域是相对稳定的; 再依据第 3.2 节所述的方法用 S_1 和 S_2 计算 Γ 值, 搜索得到最小 Γ 值处的 m_0 ; 最后根据表 2, 用 O 的位置区域和 m_0 符号判定被测旋转体的旋转方向。即当 $m_0 > 0$ 时, 由 O 在 SF1 和 SF2 之间、下同侧和上同侧, 可分别判定被测物沿顺时针、顺时针和逆时针方向旋转; 当 $m_0 < 0$ 时, 由 O 在 SF1 和 SF2 之间、下同侧和上同侧, 可分别判定被测物沿逆时针、逆时针和顺时针方向旋转。

表 2 旋转方向与 m_0 及旋转中心位置的关系

Table 2 Relationship of rotational direction with m_0 and the location of rotation center

Sign of m_0 (movement direction at SF1)	Location of rotational center (conditions)	Rotational direction
$m_0 > 0$ (from left to right)	Between SF1 and SF2 ($k < 1$)	Clockwise
	Below both SF1 and SF2 ($k > 1$ and SF1 with f_i)	Clockwise
	Above both SF1 and SF2 ($k > 1$ and SF2 with f_i)	Counter clockwise
$m_0 < 0$ (from right to left)	Between SF1 and SF2 ($k < 1$)	Counter clockwise
	Below both SF1 and SF2 ($k > 1$ and SF1 with f_i)	Counter clockwise
	Above both SF1 and SF2 ($k > 1$ and SF2 with f_i)	Clockwise

4 仿真分析实验

以表面粗糙的平面圆盘的旋转作为实验对象,用仿真分析实验验证所提出的旋转方向辨识方法。设双差分空间滤波传感器是由受光面积为 $0.3\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 的光电池构成的光电池阵列,其参数为 $P=1\text{ mm}$, $L=60\text{ mm}$, 光学成像系统的放大倍数 $M=2$,像空间旋转中心 O 到最近差分空间滤波器的距离为 10 mm ,圆盘以 $\omega=10\text{ rad/s}$ 的转速旋转;圆盘端面的随机空间分布图像经光学系统成像到双差分空间滤波传感器上,在 $S_1(t)$ 和 $S_2(t)$ 中由同一区域(B区)空间图像产生的随机性信号约占 80%,而由不同区域(A区和C区)空间图像产生的随机性信号约占 20%; $S_1(t)$ 和 $S_2(t)$ 经 10 kHz 的采样、A/D 转换和数据采集后,分别得到序列信号 $s_1(n)$ 和 $s_2(n)$ 。旋转方向辨识的仿真实验过程是:1) 设定旋转方向和旋转中心位置区域,以用高频脉冲插补测量准正弦信号周期的方法获取 SF1 和 SF2 输出信号的中心频率,以较大的频率为 f_1 ,较小的频率为 f_2 ;将传感器向 f_1 对应差分空间滤波器的方向平移 $\Delta=5\text{ mm}$ 后,圆盘以 $\omega'=13\text{ rad/s}$ 的转速旋转,再获取 f_1, f_2 对应的中心频率分别为 f'_1 和 f'_2 ,由 f_1, f_2, f'_1 和 f'_2 按(5)式计算系数 k ,然后用 k 值和 f_1 对应的差分空间滤波器确定 O 的位置区域。2) 再用 400 ms 时间内的 $s_1(n)$ 和 $s_2(n)$ 计算数值微分 $\Delta s_1(n)=s_1(n+1)-s_1(n)$ 和 $\Delta s_2(n)=s_2(n+1)-s_2(n)$,按照(7)式计算微分差相关函数 $\Gamma(m)$,搜索 $\Gamma(m)$ 中最小值处的序号 m_0 , m_0 的符号代表像空间图像在 SF1 处的线速度方向。3) 根据表 2,用第 1)步和第 2)步的结果判定旋转方向,比较该判定结果是否与设定的旋转方向一致。

当圆盘图像按顺时针方向旋转且其旋转中心在 SF1 和 SF2 之间时,计算得到系数 $k=0.8$;同时得到时域信号 $S_1(t)$ 和 $S_2(t)$ 如图 6(a)所示,其采样信号的数值微分 $\Delta s_1(n)$ 和 $\Delta s_2(n)$ 如图 6(b)所示,所计算的微分差相关函数 $\Gamma(m)$ 如图 6(c)所示。在 $\Gamma(m)$ 中搜索到最小值处的序号 $m_0=49>0$,且所得系数 $k<1$,由此根据表 2 可判定圆盘图像是顺时针方向旋转的。当圆盘图像按逆时针方向旋转且旋转中心在上同侧时,计算所得 $k\approx 1.12>1$,SF1 的信号频率(约 100 Hz)小于 SF2 的信号频率(约 700 Hz),即 f_1 对应的差分空间滤波器是 SF2,且在其 $\Gamma(m)$ 中搜索得 $m_0=50>0$,由此根据表 2 可判定圆盘图像是逆时针方向旋转的。同样地,当圆盘图像按顺时针方向旋转且其旋转中心在下同侧时,计算所得 $k=1.12>1$, f_1 对应的差分空间滤波器是 SF1,且 $m_0=7>0$,由此可判定该圆盘图像是顺时针方向旋转的。

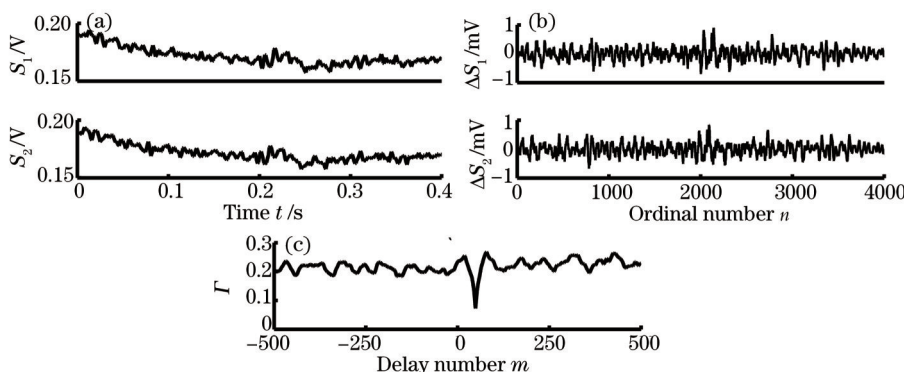


图 6 SF1 处图像从左向右运动时的微分差相关函数

Fig.6 Differential subtraction correlation in the case of moving rotational image from left to right on the SF1

类似地,当圆盘图像按逆时针方向旋转且其旋转中心在 SF1 和 SF2 之间时,计算所得系数 $k=0.8$;同时得到时域信号 $S_1(t)$ 和 $S_2(t)$ 如图 7(a)所示,其采样信号的数值微分 $\Delta s_1(n)$ 和 $\Delta s_2(n)$ 如图 7(b)所示,所计算的微分差相关函数 $\Gamma(m)$ 如图 7(c)所示。在 $\Gamma(m)$ 中搜索到最小值处的序号 $m_0=-51<0$,且所得系数 $k<1$,由此可判定该图像的旋转是逆时针方向的。当圆盘图像按顺时针方向旋转且其旋转中心在上同侧时,所得 $k=1.12>1$, f_1 对应的差分空间滤波器是 SF2,且 $m_0=-50<0$,由此可判定该图像旋转是顺时针方向的。同样地,当圆盘图像按逆时针方向旋转且旋转中心在下同侧时,所得 $k=1.12>1$, f_1 对应的差分空间滤波器是 SF1,且 $m_0=-7<0$,由此可判定该图像旋转是逆时针方向的。

上述 m_0 值及其符号、 k 值、SF1 信号频率的相对大小等计算值及判定结果如表 3 所示。由表 3 可知,根据 m_0 值符号、 k 值范围和 SF1 信号频率的相对大小,用所述方法判定的旋转方向与实际设定的旋转方向是一致的。这说明用所提出的旋转方向辨识方法可正确判定空间滤波转速遥测中的旋转方向,解决了转速遥测中旋转方向辨识的难题。

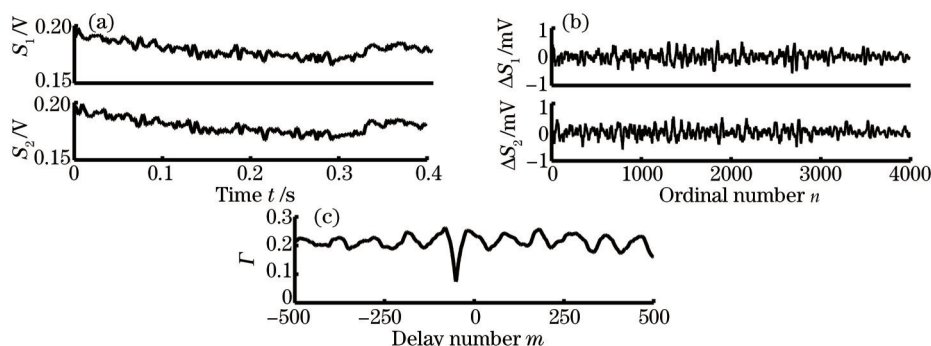


图 7 SF1 处图像从右向左运动时的微分差相关函数

Fig.7 Differential subtraction correlation in the case of moving the rotational image from right to left on the SF1

表 3 仿真实验中的计算值和判定结果

Table 3 Calculated values and determination results in experiments and simulations

Supposed conditions		Calculations			Judgments on
Rotational direction	Location of rotational center	Coefficient k	Spatial filter with f_i	Sign of m_0	rotational direction
Clockwise	Between SF1 and SF2	$k=0.8<1$	—	$m_0=49>0$	Clockwise
	Below both SF1 and SF2	$k=1.12>1$	SF1	$m_0=7>0$	Clockwise
	Above both SF1 and SF2	$k=1.12>1$	SF2	$m_0=-50<0$	Clockwise
Counter clockwise	Between SF1 and SF2	$k=0.8<1$	—	$m_0=-51<0$	Counter clockwise
	Below both SF1 and SF2	$k=1.12>1$	SF1	$m_0=-7<0$	Counter clockwise
	Above both SF1 and SF2	$k=1.12>1$	SF2	$m_0=50>0$	Counter clockwise

5 结 论

基于双差分空间滤波传感器及其转速遥测原理,提出了用旋转中心位置区域和微分差相关分析来判定空间滤波转速遥测中旋转方向的辨识方法,并对该方法进行了仿真分析实验验证。在该旋转方向辨识法中,首先利用双差分空间滤波传感器输出信号的两个中心频率及其变化计算系数 k ,由 k 值和较大中心频率对应的位置来确定像空间图像旋转中心点的位置区域;然后将一个差分空间滤波器中相邻两个光电池的输出信号经微分、延时相减、取绝对值和积分后得到微分差相关函数,由其最小相关值处时延量 m_0 的符号判定旋转图像在该光电池处的线速度方向;最后由该线速度方向和旋转中心所在区域来共同判定旋转方向。仿真分析实验结果表明,用该旋转方向判定法能够正确判定被测体的旋转方向。

本文解决了空间滤波转速遥测中必须要解决的旋转方向辨识难题,所提出的旋转方向辨识法的特点是:所需的各信号或数据均来源于双差分空间滤波传感器的输出信号,对传感器和系统没有其它的特别要求,其实现容易且应用方便;其中的微分差相关分析只需加减而无需乘除运算,其复杂度低,计算量小;在准确性方面优于传统的线速度辨向法,因它不受空间滤波信号的随机相位起伏、光源干扰、成像倍率变化、转速波动或高低速制约等的影响,而且传感器输出信号的随机性越强,其判断方向的准确性越高。该辨识方法特别适用于旋转物体瞬时转速方向、气液态物质涡旋速度方向等的远距离辨识(遥感),当然也可用于这些物质的直线速度的非接触式或远距离检测。

参 考 文 献

- 1 Martin Schaeper, Nils Damaschke. Velocity measurement for moving surfaces by using spatial filtering technique based on array detectors[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2011, 6752: 303-310.
- 2 Zheng Lina, Zhang Tao, Kuang Haipeng, et al.. Image motion velocity measurement technique based on spatial filtering effect of line CCD for aerial camera[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1112002.
郑丽娜,张涛,匡海鹏,等.基于线阵CCD空间滤波效应的航空相机像移速度测量方法[J].光学学报,2012,32(11):1112002.
- 3 Aizu Y, Asakura T. Spatial Filtering Velocimetry: Fundamentals and Applications[M]. Heidelberg: Springer, 2005.

- 4 Chuanlong Xu, Jian Li, Shimin Wang. A spatial filtering velocimeter for solid particle velocity measurement based on linear electrostatic sensor array[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2012, 26(10): 68–78.
- 5 Dong Zhengchao, Klaus Michel, Swen Bergeler, *et al.*. The application of CCD spatial filtering in the detection of particle velocity[J]. *Chinese J Scientific Instrument*, 2000, 21(2): 211–216.
董正超, Klaus Michel, Swen Bergeler, 等. CCD器件空间滤波在微粒运动速度检测上的应用[J]. *仪器仪表学报*, 2000, 21(2): 211–216.
- 6 Zheng Lina, Kuang Haipeng, Li Wenming, *et al.*. Method of pedestal component elimination based on line CCD for spatial-filter velocimetry signal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0211001.
郑丽娜, 匡海鹏, 李文明, 等. 基于线阵CCD的空间滤波测速信号基频消除方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0211001.
- 7 Wang Zichen, Dai Ming, Li Gang, *et al.*. Apparatus design for surveying relative angular translation of airborne optoelectronic platform[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(9): 0908007.
王子辰, 戴明, 李刚, 等. 机载光电平台相对角位移测量系统设计[J]. *中国激光*, 2013, 40(9): 0908007.
- 8 Wang Donghui, Liu Lin, Zheng Puchao, *et al.*. Resolution analysis of varied line-space grating angular displacement sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(6): 060501.
王东辉, 刘林, 郑普超, 等. 变栅距光栅角位移传感器分辨率分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(6): 060501.
- 9 Yang Zhiqiang, Wu Zhensen, Zhang Geng. Time correlation functions of dynamic speckle produced by rotating cone object[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(10): 1029001.
阳志强, 吴振森, 张耿. 旋转圆锥目标动态散斑的时间相关函数[J]. *光学学报*, 2013, 33(10): 1029001.
- 10 Michel K, Fiedler O, Richter A, *et al.*. A novel spatial filtering velocimeter based on a photodetector array[J]. *IEEE Trans on Instrum Meas*, 1998, 47(1): 299–303.
- 11 Durst F, Zaré M. Removal of pedestals and directional ambiguity of optical anemometer signals[J]. *Appl Opt*, 1974, 13(11): 2562–2579.
- 12 Gaster M. A new technique for the measurement of low fluid velocities[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1964, 20(2): 183–192.
- 13 Amari Y, Masuda I. Velocity sense detection based on the spatial filter method[J]. *IEEE Transactions on Instrum Meas*, 1990, 39(4): 649–652.
- 14 Aizu Y, Ushizaka T, Asakura T. Measurements of flow velocity in a microscopic region using a transmission grating: elimination of directional ambiguity[J]. *Appl Opt*, 1985, 24(5): 636–640.
- 15 He Anguo, Yu Honglin, Zhu Chuanxin, *et al.*. Subdivision and direction judgment of grating moire fringes[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(10): 45–49.
何安国, 喻洪麟, 朱传新, 等. 光栅莫尔条纹细分及辨向方法研究[J]. *光电工程*, 2007, 34(10): 45–49.
- 16 Itakura Y, Sugimura A, Tsutsumi S. Amplitude-modulated reticle constructed by a liquid crystal cell array[J]. *Appl Opt*, 1981, 20(16): 2819–2826.
- 17 Aizu Y, Asakura T. Principles and development of spatial filtering velocimetry[J]. *Appl Phys B*, 1987, 43(4): 209–224.
- 18 Christofori K, Michel K. Velocimetry with spatial filters based on sensor arrays[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 1996, 7(3): 265–272.

栏目编辑: 何卓铭