

doi:10.3788/gzxb20154407.0712005

空间滤波转速遥测中基于功率谱的旋转方向辨识

朱志雄, 曾祥楷, 刘全顺, 陈阳

(重庆理工大学 光电信息学院, 重庆 400054)

摘 要:为了准确识别空间滤波转速遥测中的被测体旋转方向,提出了一种基于功率谱密度分析的旋转方向辨识方法.该辨识方法是将占空比为 0.5 的两个光电池线阵列错位半个栅距而形成两个差分空间滤波器,用两个差分空间滤波器相距一定距离平行排列构成一个双差分空间滤波传感器;根据差分空间滤波信号的功率谱密度互为共轭的特性,用双差分空间滤波传感器输出的四路信号计算出两个线速度方向系数 D_1 和 D_2 , D_1 和 D_2 的符号代表了两个差分空间滤波器处的线速度方向;用 D_1 和 D_2 的符号、两个差分空间滤波信号的中心频率 f_1 和 f_2 的相对大小,来判别被测体图像的旋转方向及中心. $D_1 > 0$ 、 $D_2 < 0$ 代表顺时针旋转, $D_1 < 0$ 、 $D_2 > 0$ 代表逆时针旋转; $D_1 D_2 > 0$ 时,旋转方向由 f_1 、 f_2 的相对大小和 D_1 的符号确定.该方法能有效辨识空间滤波转速遥测中的旋转方向,具有简单、适应性强和应用方便的特点.

关键词: 旋转方向辨识; 功率谱密度; 方向系数; 双差分空间滤波器; 转速遥测

中图分类号: O439; TP79

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)07-0712005-8

Power-spectrum-based Method of Identifying Rotational Direction in Remote Angular-velocity Measurement with Spatial Filtering Technique

ZHU Zhi-xiong, ZENG Xiang-kai, LIU Quan-shun, CHEN Yang

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

Abstract: In order to exactly identify the rotational direction of the measured body in the remote angular-velocity measurement with spatial filtering technique, an approach to estimating the rotational direction was proposed based on the analysis of power spectrum density. In the identification method of rotational direction, two identical photovoltaic-cell arrays with the duty ratio of 0.5 are arranged each other with the shift of a half spatial period, which leads to a differential spatial filter. Two parallel differential spatial filters are placed in a certain interval, and then construct a sensor with double differential spatial filters. The power spectrum densities of the two output signals from one differential spatial filter are conjugated each other, thus the direction coefficients D_1 and D_2 of the linear velocities on two differential spatial filters are calculated with four output signals of the sensor, and the signs of D_1 and D_2 represent the moving directions of the measured-body image on the differential spatial filters. The rotational direction and center of the measured-body image can be determined by the signs of D_1 and D_2 , together with the relation between the central frequencies f_1 and f_2 of two output signals from the differential spatial filters. $D_1 > 0$ and $D_2 < 0$ represent the clockwise rotation, and $D_1 < 0$ and $D_2 > 0$ represent the counter-clockwise one. For other cases as $D_1 D_2 > 0$, the rotational directions can be decided by the sign of D_1 and the relative relation between f_1 and f_2 . The proposed method can effectively identify the rotational direction in the remote angular-velocity measurement with spatial filtering technique, which has the features as being single and easy to operate, and having strong adaptability.

Key words: Rotational direction identification; Power spectrum density; Directional coefficient; Double differential spatial filters; Remote angular-velocity measurement

OCIS Codes: 120.4640; 120.7250; 280.7275; 200.3050

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(No. 2013TGS006)和重庆理工大学研究生创新基金(No. YCX2014220)资助

第一作者: 朱志雄(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光电信息获取与处理. Email: 746274090@qq.com

导师(通讯作者): 曾祥楷(1965-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为波导理论、光电传感及信息处理等. Email: zxkai@cqu.edu.cn

收稿日期: 2015-02-09; 录用日期: 2015-04-29

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

近年来,以激光多普勒测速(Laser Doppler Velocimetry, LDV)^[1-2]、粒子图像测速(Particle Image Velocimetry, PIV)^[3]及空间滤波测速(Spatial Filtering Velocimetry, SFV)^[4-5]为代表的测速法,因其不干扰被测物和精度高的特点,而越来越受到人们的青睐. LDV是根据运动粒子散射激光时的多普勒频移量确定粒子的运动线速度,具有精度高、线性度好、动态响应快、无需校正等特点.其不足是系统复杂、成本高、横向灵敏度较低,在测量气液态物时还需要合适的示踪粒子. PIV是在被测流场中散布示踪粒子并用脉冲激光照射,连续记录示踪粒子的图像,再用光学杨氏条纹法或自/互相关法获得速度信息. PIV可用于全息或层析成像,能测试二维及三维速度场,精度较高;其不足是难以测量瞬时速度,还要考虑示踪粒子的图像特性^[6],其数据处理较复杂. SFV法是将运动的随机分布图像信息通过空间滤波器和光电探测器转换为正弦电信号,用该信号的中心频率计算出被测体的线速度^[7-9].该方法装置简单、成本低、计算量小,主要用于线速度的测量^[10-11],而很少用于转速测量.其原因是在空间滤波测速中^[12],输出信号的中心频率只与线速度有关,测量转速时还需确定旋转半径,但在流场或固体物转速遥测中的旋转半径难以精确测量.为非接触或远距离地测量风机、涡轮片及其它各类大型旋转机械的转速,同时为避免旋转半径的测取,本文选用多个光电池构成两个平行的差分空间滤波器(Differential Spatial Filter, DSF),以形成双差分空间滤波传感器,使其兼有空间滤波和光电转换的功能,用于旋转体转速的遥测.

速度和位移^[13]都是有量值和方向信息的矢量.但在空间滤波测速法中,信号频率本身没有运动方向信息^[14],且空域和时域的信号都有一定的随机性,故需用特殊的方法来辨识运动方向.目前的线速度方向辨识法有频移法和相位差法,频移法是用有一定运动速度的光栅或电控移动液晶光栅作为空间滤波器,产生一定的时域频移量作为参考频率;被测体图像经空间滤波^[15]和光电转换后,信号频率由运动光栅和图像的相对速度决定.当运动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,由此判定运动方向^[16].相位差法是将两个相同的空间滤波器错位 $1/4$ 或 $1/2$ 个空间周期,输出相位差约为 $\pi/2$ 或 π 的两路正弦信号,再用莫尔光栅条纹辩向法^[17]或频谱分析法^[18]分辨运动方向.频移法需要运动光栅,其系统结构复杂,噪声多,稳定性差,对低速运动的方向识别度较低;当在同向运动中的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

将直接导致误判.因此频移法对低速和高速运动的辩向准确度都较低.相对而言,相位差法(含频谱分析)比较容易实现,且灵活性很高.

转速遥测也必须获取转速方向信息,而用空间滤波器遥测转速时存在信号频率无方向信息的问题.根据双差分空间滤波器(Double Differential Spatial Filters, DDSF)输出信号的相频谱特性,本文采用信号功率谱密度来分析判定空间滤波转速遥测中的旋转方向.在该判定法中,占空比为 $1/2$ 的差分空间滤波器输出功率谱密度互为共轭的两路信号,由该两路信号的功率谱密度计算差分空间滤波器处的线速度方向系数;用双差分空间滤波传感器输出的四路信号分别计算出两个差分空间滤波器处的线速度方向系数,根据这两个方向系数和差分空间滤波器的输出信号中心频率的相对大小来判别被测体的旋转方向.

1 空间滤波转速遥测基本原理

用多个光电池组成两个差分空间滤波器 DSF1 和 DSF2,将差分空间滤波器 DSF1 和 DSF2 平行排列并相距 L 而构成双差分空间滤波传感器(以下简称“传感器”),如图 1.

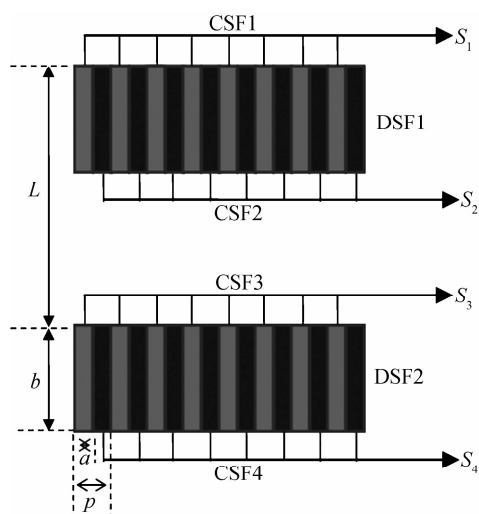


图1 双差分空间滤波传感器的结构

Fig. 1 Structure of the sensor with double differential spatial filters

每个差分空间滤波器是由两个完全相同的梳状空间滤波器(Comb-like Spatial Filter, CSF)交叉错位半个空间周期排列而成,即CSF1与CSF2错位半个栅距而构成了DSF1,CSF3与CSF4错位半个栅距构成了DSF2.每个CSF是由多个光电池相距 p 而组成的线阵列,各个光电池的阴极和阳极分别连接在一起;每个光电池的光敏面宽为 a 、长为 b ,占空比 a/p 为 0.5 .CSF1的输出信号 S_1 与CSF2的输出信号 S_2 有相同的中心频率 f_1 ,CSF3的输出信号 S_3 与CSF4的输

出信号 S_4 有相同的中心频率 f_2 。

用双差分空间滤波传感器构成的转速遥测系统如图 2,该系统主要由光学成像系统、双差分空间滤波传感器、数据采集与处理子系统三部分组成.该转速遥测系统的工作原理是:光源照射到以转速 ω 绕中心 O 旋转的被测体端面上,端面上的随机分布图像经放大倍数为 M 的光学系统成像到差分空间滤波器 DSF1 和 DSF2 上,DSF1 和 DSF2 输出四路时域正弦信号 S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_4 ;DSF1 输出的信号 S_1 和 S_2 相减得准正弦信号 I_1 ,DSF2 输出的信号 S_3 和 S_4 相减得准正弦信号 I_2 , I_1 和 I_2 已去除了直流分量^[19-20]; I_1 和 I_2 的中心频率分别与 S_1 和 S_3 的中心频率相同,用快速傅里叶变换或高频脉冲插补法可获得信号 I_1 和 I_2 的中心频率 f_1 和 f_2 ,用 f_1 和 f_2 计算被测体的转速 ω 。

由空间滤波线速度测量法^[20-21]知,中心频率 f_1 和 f_2 分别由 DSF1 和 DSF2 处被测体图像的线速度 v_1 和 v_2 决定, $v_1 = pf_1$ 、 $v_2 = pf_2$.线速度 v_1 、 v_2 与转速 ω 的关系是 $v_1 = \omega r_1$ 、 $v_2 = \omega r_2$,式中, r_1 、 r_2 分别是旋转中心成像点 O' 到 DSF1、DSF2 的中心线距离.因此,转速 ω 与中心频率 f_1 、 f_2 的关系为

$$\begin{cases} \omega r_1 = pf_1 \\ \omega r_2 = pf_2 \end{cases} \quad (1)$$

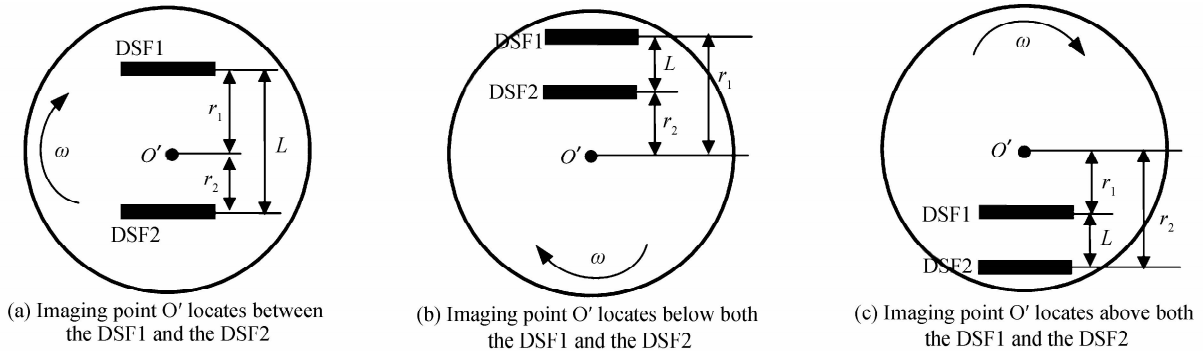


图 3 旋转中心成像点与 DDSF 的位置关系

Fig. 3 The location relationships between the imaging point of the rotation center and the DDSF

当旋转中心成像点 O' 在 DSF1 和 DSF2 之间时,有关系式 $r_1 + r_2 = L$,由式(1)可得转速 $\omega = (f_1 + f_2)p/L$;当 O' 在 DSF1 和 DSF2 的下同侧或上同侧区域时,有关系式 $|r_1 - r_2| = L$,则由式(1)可得转速 $\omega = (f_1 - f_2)p/L$, $\omega > 0$ 表示 O' 在 DSF1 和 DSF2 的下同侧,反之,表示 O' 在上同侧.故转速测量值 ω 为

$$\omega = \frac{p}{L}(f_1 \pm f_2) \quad (2)$$

式中的 p 和 L 均为传感器的结构常数,这表明在传感器制定后的转速测量值仅与传感器输出信号的中心频率有关.故该转速测量值是被测体的纯转动速度,与偏心和安装误差无关,且误差源少。

由于 r_1 和 r_2 是像平面上旋转中心到 DSF1 和 DSF2 的中心线距离,已包含了光学放大倍数 M ,故式(1)不再包含 M 参数。

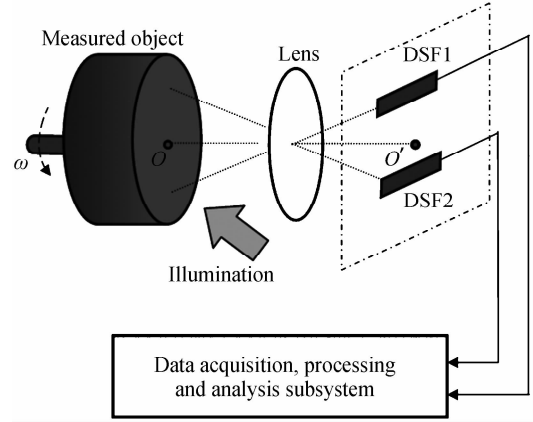


图 2 基于双差分空间滤波传感器的转速遥测系统
Fig. 2 Schematic diagram of remote angular-velocity measurement system with double differential spatial filters

旋转中心成像点 O' 的位置区域有三种:一是成像点 O' 在 DSF1 和 DSF2 之间或其延长线之间(如图 3(a)),二是 O' 在 DSF1 和 DSF2 的下同侧或其延长线的下同侧(如图 3(b)),三是 O' 在 DSF1 和 DSF2 的上同侧或其延长线的上同侧(如图 3(c))。

2 旋转方向判别方法

上述转速遥测法可测量被测旋转体的纯角速度的量值大小,但无法直接判别出被测体的旋转方向.为此,根据双差分空间滤波传感器输出的四路信号的相位特性,利用它们的功率谱密度来辨识旋转方向。

每个差分空间滤波器中的两个梳状空间滤波器在空间上错位半个栅距而放置的,其输出信号的相位差约为 180° ,其功率谱密度函数互为共轭^[22].即在图 1 中,输出信号 S_1 和 S_2 的功率谱密度互为共轭, S_3 和 S_4 的功率谱密度互为共轭.设 S_1 的空间功率谱密度为 $C_1(u_1) = a_1(u_1) + jb_1(u_1)$,式中 $u_1 = f_1/v_1$ 是空间频

率, a_1 和 b_1 分别为实部和虚部, 则 S_2 的功率谱密度为 $C_2(u_1) = a_1(u_1) - jb_1(u_1)$. 同样地, 设 S_3 的功率谱密度为 $C_3(u_2) = a_2(u_2) + jb_2(u_2)$, 式中 $u_2 = f_2/v_2$ 是空间频率, a_2 和 b_2 分别为实部和虚部, 则 S_4 的功率谱密度为 $C_4(u_2) = a_2(u_2) - jb_2(u_2)$. 利用共轭函数虚部符号相反的特点, 可得 DSF1 和 DSF2 处图像的线速度方向系数 D_1 和 D_2 分别为^[22]

$$D_1(u_1) = a_1(u_1)b_1(u_1) \cdot \text{Im} \left[\frac{\text{FFT}(S_1)}{\text{FFT}(S_2)} - \frac{\text{FFT}(S_2)}{\text{FFT}(S_1)} \right] \quad (3)$$

$$D_2(u_2) = a_2(u_2)b_2(u_2) \cdot \text{Im} \left[\frac{\text{FFT}(S_3)}{\text{FFT}(S_4)} - \frac{\text{FFT}(S_4)}{\text{FFT}(S_3)} \right] \quad (4)$$

式中, $\text{FFT}(\ast)$ 表示对括号中的信号进行傅里叶变换, $\text{Im}(\ast)$ 表示取虚部. 在式(3)和(4)中, 当 DSF1 或 DSF2 处的被测体图像从左向右运动时, 方向系数 D_1 或 D_2 大于 0; 当 DSF1 或 DSF2 处的被测体图像从右向左运动时, 方向系数 D_1 或 D_2 小于 0.

根据 D_1 和 D_2 的符号、中心频率 f_1 与 f_2 的相对大小, 可判别被测体的旋转方向. 其具体方法是: 1) 当 $D_1 > 0, D_2 < 0$ 时, 被测体图像沿顺时针旋转, 旋转中心成像点在 DSF1 与 DSF2 之间. 2) 当 $D_1 < 0, D_2 > 0$ 时, 被测体图像沿逆时针旋转, 旋转中心成像点在 DSF1 与 DSF2 之间. 3) 当 $D_1 > 0, D_2 > 0$ 时, 若 $f_1 > f_2$, 则被测体图像沿顺时针旋转, 旋转中心成像点在 DSF1 与 DSF2 的下同侧; 若 $f_1 < f_2$, 则被测体图像沿逆时针旋转, 旋转中心成像点在 DSF1 与 DSF2 的上同侧. 4) 当 $D_1 < 0, D_2 < 0$ 时, 若 $f_1 > f_2$, 则被测体图像沿逆时针旋转, 旋转中心成像点在 DSF1 与 DSF2 的下同侧; 若 $f_1 < f_2$, 则被测体图像沿顺时针旋转, 旋转中心在 DSF1 与 DSF2 的上同侧. 上述方向系数 D_1 和 D_2 、 f_1 与 f_2 的相对大小与旋转方向的关系如表 1.

表 1 旋转方向与方向系数 D_1 、 D_2 的关系

Table 1 The relations of rotational direction with the directional coefficients D_1 and D_2

Directional coefficients D_1 and D_2	Relation between f_1 and f_2	Location of the rotational center	Rotational direction
$D_1 > 0$ $D_2 < 0$	—	Between DSF1 and DSF2	Clockwise
$D_1 < 0$ $D_2 > 0$	—	Between DSF1 and DSF2	Counter clockwise
$D_1 > 0$ $D_2 > 0$	$f_1 > f_2$	Below both DSF1 and DSF2	Clockwise
$D_1 > 0$ $D_2 > 0$	$f_1 < f_2$	Above both DSF1 and DSF2	Counter clockwise
$D_1 < 0$ $D_2 < 0$	$f_1 > f_2$	Below both DSF1 and DSF2	Counter clockwise
$D_1 < 0$ $D_2 < 0$	$f_1 < f_2$	Above both DSF1 and DSF2	Clockwise

3 分析验证

以旋转的圆盘为对象, 分析验证本文所述的旋转方向辨识方法的正确性. 所用圆盘由硬纸板制作, 硬纸板表面的图像分布具有很强的随机性. 该圆盘的表面图像如图 4, 圆盘直径为 220mm, 两个小矩形框是 DSF1 和 DSF2 在物平面上的对应位置; 每个差分空间滤波器的光伏电池数为 18 个, 单个梳状空间滤波器的光伏电池数为 9 个, 每个光伏电池的光敏面宽 $a = 1$ mm、长 $b = 5$ mm, DSF1 和 DSF2 间的距离 $L = 50$ mm, 光学系统的放大倍数 $M = 1$, DDSF 输出信号的采样频率为 10 kHz.

设定圆盘旋转中心的像点在 DSF1 和 DSF2 的上同侧, 旋转中心的像点到最近的差分空间滤波器的距离为 45 mm, 圆盘以 14 rad/s 的转速按顺时针旋转, DDSF 输出的四路信号 S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_4 分别如图 5(a)、(b)、(e)和(f)所示.

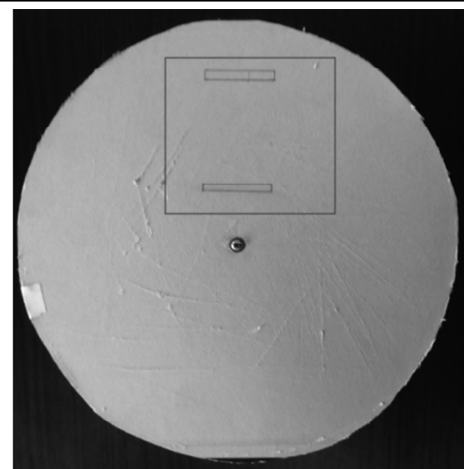


图 4 圆盘的表面图像

Fig. 4 Surface image of the rotating disk

信号 S_1 和 S_2 相减得信号 I_1 , 信号 S_3 和 S_4 相减得信号 I_2 . I_1 和 I_2 的归一化后的频谱分布分别如图 5 (c)和(g), 由该频谱图可得 I_1 和 I_2 的中心频率分别为

$f_1=327.5\text{ Hz}$ 和 $f_2=691.5\text{ Hz}$,这两个中心频率的关系是 $f_1 < f_2$.将采样后的信号 S_1 、 S_2 和 S_3 、 S_4 分别代入式(3)和(4),计算得到两个方向系数 D_1 和 D_2 ,分别如图 5(d)和(h). D_1 和 D_2 归一化后的累加值分别是 $\sum D_1 = -1.1709$ 、 $\sum D_2 = -1.0842$,且 D_1 和 D_2 主峰值所在的位置分别与 I_1 和 I_2 的中心频率相对应.从图

5(d)和(h)及计算的方向系数数值可知, $D_1 < 0$ 、 $D_2 < 0$ 且 $f_1 < f_2$,由此根据表 1 可判定该圆盘图像是沿顺时针方向旋转的,且旋转中心在 DSF1 和 DSF2 的上同侧.此旋转方向和旋转中心的判定结果与所设定的旋转方向和旋转中心是一致的.

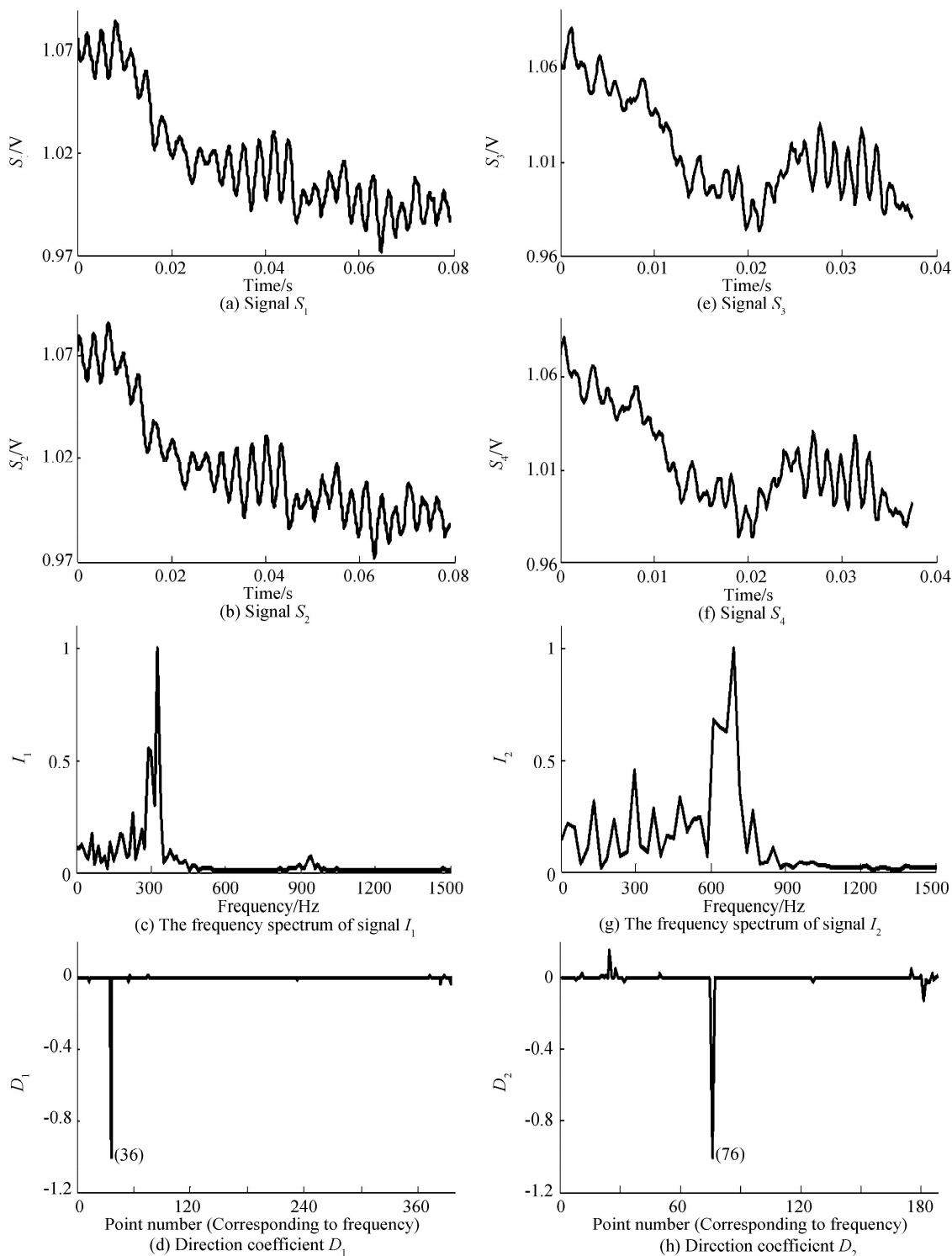


图 5 顺时针旋转且旋转中心在上同侧时,DDSDF 的输出信号、 I_1 和 I_2 的频谱及方向系数 D_1 与 D_2
 Fig. 5 The output signals of DDSDF, the frequency spectrums of I_1 and I_2 , and the direction coefficients D_1 and D_2 in the cases of clockwise rotation and rotational center above both DSF1 and DSF2.

类似地,设定旋转中心的像点在 DSF1 和 DSF2 之间,旋转中心的像点到最近的差分空间滤波器的距离为 20 mm,圆盘以 25 rad/s 的转速按逆时针旋转, DDSF 输出的四路信号 S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_4 分别如图 6(a)、(b)、(e)和(f)所示. 信号 S_1 和 S_2 相减得信号 I_1 ,信号

S_3 和 S_4 相减得信号 I_2 ; I_1 和 I_2 的归一化后的频谱分布分别如图 6(c)和(g),由该频谱图可得 I_1 和 I_2 的中心频率分别为 $f_1=375.4$ Hz 和 $f_2=250$ Hz,这两个中心频率的关系是 $f_1>f_2$. 将 DDSF 的输出信号 S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_4 代入式(3)和(4),再次计算得到方向系数 D_1

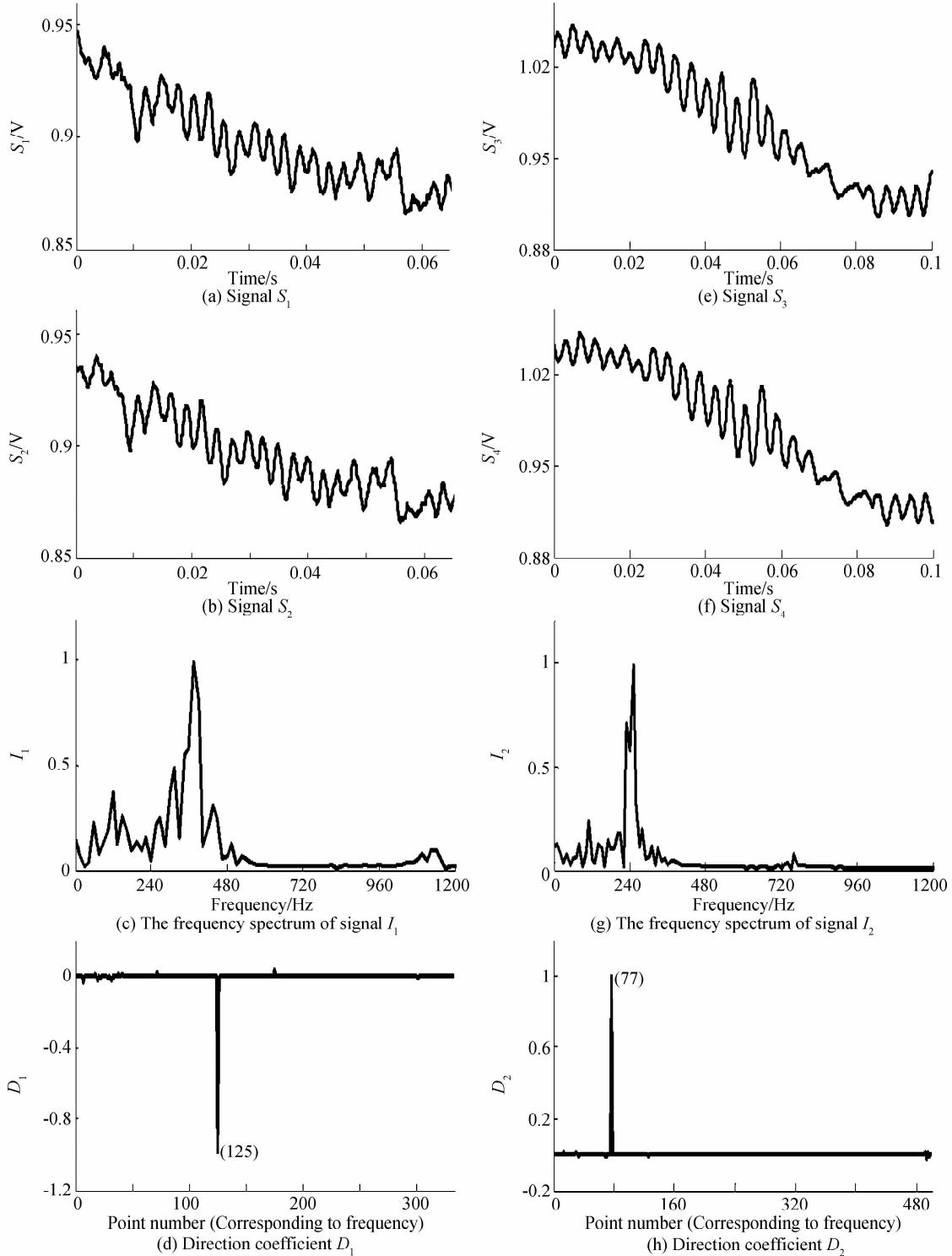


图 6 逆时针旋转且旋转中心在中间时, DDSF 的输出信号、 I_1 和 I_2 的频谱及方向系数 D_1 与 D_2
 Fig. 6 The output signals of DDSF, the frequency spectrums of I_1 and I_2 , and the direction coefficients D_1 and D_2 in the cases of counter-clockwise rotation and rotational center between DSF1 and DSF2.

和 D_2 , 分别如图 6(d) 和 (h). D_1 和 D_2 归一化后的累加值分别为 $\sum D_1 = -0.9569$ 、 $\sum D_2 = 0.9713$. 从图 6(d) 和 (h) 及计算的方向系数知, $D_1 < 0$ 、 $D_2 > 0$, 根据表 1 可判定圆盘图像是逆时针旋转的, 旋转中心在 DSF1 与 DSF2 之间. 该旋转方向和中心的判定结果与所设定的旋转方向和中心是一致的. 设定其它的旋转方向和旋转中心, 获取信号 S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_4 后, 经过上述相似的计算过程可得到方向系数 D_1 和 D_2 以及 f_1 与 f_2 的相对大小, 根据表 1 判定圆盘图像的旋转方向和中心, 其判定结果与设定结果一致.

上述分析验证实验表明, 用双差分空间滤波传感器输出信号的功率谱密度计算出方向系数后, 根据表 1 可以正确辨识被测旋转体图像的旋转方向, 也可判定其旋转中心的位置区域. 从图 5(d) 和 (h) 还可发现, 由信号 S_1 、 S_2 计算得到方向系数 D_1 的微小毛刺明显比用 S_3 、 S_4 计算的方向系数 D_2 的毛刺少很多. 这是由于 DSF1 所在位置的图像分布的随机性较强, DSF1 输出信号的正弦性较明显, 方向系数 D_1 与预期结果相异的毛刺也就很少. 类似的情形也出现在图 6(d) 和 (h) 中, 此时由信号 S_1 、 S_2 计算的方向系数 D_1 的毛刺与由 S_3 、 S_4 计算的方向系数 D_2 的毛刺相差无几, 这是由于 DSF1 输出信号的正弦性的强弱与 DSF2 输出信号的正弦性的强弱不分上下所致, D_1 、 D_2 中与预期结果相异的毛刺也就相接近. 为减少毛刺所带来的误判, 可将方向系数的计算值累加求和或求其平均值, 再根据方向系数的累加值或平均值的符号来判定旋转方向.

4 结论

通过计算双差分空间滤波传感器输出的四路信号的功率谱密度, 得到其两个差分空间滤波器处的线速度方向系数, 再根据两个差分空间滤波信号的中心频率 f_1 与 f_2 的相对大小, 判定被测旋转体的旋转方向, 并确定旋转中心像点的位置区域. 在该旋转方向辨识法中, 首先需要构建一个合适的双差分空间滤波传感器. 该传感器是由相距一定距离且平行排列的两个差分空间滤波器构成, 每个差分空间滤波器是由两个梳状空间滤波器错位半个栅距而形成, 每个梳状空间滤波器是由多个光伏电池组成, 光电池线阵列的占空比为 1/2. 该传感器输出信号的功率谱密度互为共轭, 据此计算出两个线速度方向系数 D_1 和 D_2 . 由 D_1 和 D_2 的符号可判断两个差分空间滤波器处的线速度方向, 再用线速度方向、 f_1 与 f_2 的相对大小辨识被测体的旋转方向, 同时能确定其旋转中心的位置区域. 分析验证实验结果表明, 该旋转方向判定法能有效地辨识空间滤波转速遥测中的旋转方向, 通用性强、计算量小、应用方便, 适用于气液体涡旋方向和固态物旋转方向的远距离或非接触式辨识.

参考文献

- [1] MYCHKOVSKY A G, CECCIO S L. LDV measurements and analysis of gas and particulate phase velocity profiles in a vertical jet plume in a 2D bubbling fluidized bed Part II: Mass and momentum transport[J]. *Powder Technology*, 2012, **220**(4): 47-54.
- [2] ZHOU J, LONG X. A novel mathematic model of LASER Doppler velocimeter for the velocity measurement of solid-state surface[J]. *Measurement*, 2012, **45**(1): 14-18.
- [3] SEGALINI A, BELLANI G, SARDINA G, et al. Corrections for one-and two-point statistics measured with coarse-resolution particle image velocimetry [J]. *Experiments in Fluids*, 2014, **55**(6): 1-12.
- [4] PAU S, DALLAS W J. Generalized spatial filtering velocimetry and accelerometry for uniform and nonuniform objects[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(24): 4713-4722.
- [5] ZHENG Li-na, ZHANG Tao, KUANG Hai-peng, 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): 101-107.
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*, 2013, **32**(11): 101-107.
- [6] DISCETTI S, NATALE A, ASTARITA T. Spatial filtering improved tomographic PIV[J]. *Experiments in Fluids*, 2013, **54**(4): 1-13.
- [7] AIZU Y, ASAKURA T. Principles and development of spatial filtering velocimetry[J]. *Applied Physics B*, 1987, **43**(4): 209-224.
- [8] HOSOKAWA S, TOMIYAMA A. Spatial filter velocimetry based on time-series particle images [J]. *Experiments in Fluids*, 2012, **52**(6): 1361-1372.
- [9] STAVIS G. Optical diffraction velocimeter (Optical diffraction velocimeter, using backscattered laser light to measure relative velocity between light source and surface)[J]. *Instruments and Control Systems*, 1966, **39**: 99-102.
- [10] HOSOKAWA S, MATSUMOTO T, TOMIYAMA A. Tomographic spatial filter velocimetry for three-dimensional measurement of fluid velocity[J]. *Experiments in Fluids*, 2013, **54**(9): 1-12.
- [11] HOSOKAWA S, MATSUMOTO T, TOMIYAMA A. Measurement of bubble velocity using spatial filter velocimetry[J]. *Experiments in Fluids*, 2013, **54**(6): 1-12.
- [12] JIN Ruo-nan, XU Zi-chao, SONG Xing-liang, et al. Calculation of coherent combination based on self-imaging confocal resonator [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(12): 3154-3159.
金若男, 徐子超, 宋兴亮, 等. 自成像共焦腔相干合成空间滤波器设计[J]. *光子学报*, 2009, **38**(12): 3154-3159.
- [13] HOU Hong-lu, ZHOU De-yun. Calibration of angular displacement sensor of vehicle rudders based-on vision measurement technology[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(2): 359-363.
侯宏录, 周德云. 基于视觉测量的飞行器舵面角位移传感器标定[J]. *光子学报*, 2007, **36**(2): 359-363.
- [14] MICHEL K, FIEDLER O, RICHTER A, et al. A novel spatial filtering velocimeter based on a photodetector array [C]. *Instrumentation and Measurement Technology Conference, IEEE*, 1997, **2**: 874-878.
- [15] CHEN Yin, HUANG Wen-da. Remote virtual experiment of optical spatial filtering based on labview[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(5): 1071-1076.

- 陈颖, 黄文达. 基于 Labview 的光学空间滤波远程虚拟实验 [J]. 光子学报, 2008, **37**(5): 1071-1076.
- [16] DURST F, ZARE M. Removal of pedestals and directional ambiguity of optical anemometer signals[J]. *Applied Optics*, 1974, **13**(11): 2562-2579.
- [17] AIZU Y, USHIZAKA T, ASAKURA T. Measurements of flow velocity in a microscopic region using a transmission grating; elimination of directional ambiguity [J]. *Applied Optics*, 1985, **24**(5): 636-640.
- [18] ZENG Shao-qun, XU Hai-feng, LIU Xian-de, *et al.* Spectrum analysis of the optical low-coherence reflectometry system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1997, **26**(2): 136-139.
曾绍群, 徐海峰, 刘贤德, 等. 光学弱相干反射测量系统频谱分析[J]. 光子学报, 1997, **26**(2): 136-139.
- [19] ZHENG Li-na, KUANG Hai-peng, LI Wen-ming, *et al.* Method of pedestal component elimination based on line CCD for spatial-filter velocimetry signal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(2): 78-83.
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): 78-83.
- [20] HE X, NIE X, ZHOU J, *et al.* Velocity measurement for moving surfaces using spatial filtering method based on area image sensor[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, **125**(24): 7136-7139.
- [21] AIZU Y, ASAKURA T. Spatial filtering velocimetry: Fundamentals and applications [M]. Springer Science & Business Media, 2006.
- [22] AMARI Y, MASUDA I. Velocity sense detection based on the spatial filter method [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1990, **39**(4): 649-652.