

# 双圈同轴光纤束传感器三维空间输出特性研究<sup>\*</sup>

谢思莹<sup>1</sup>, 张小栋<sup>1,2</sup>

(1. 西安交通大学机械工程学院 西安, 710049)

(2. 西安交通大学现代设计及转子轴承系统教育部重点实验室 西安, 710049)

**摘要** 针对航空发动机的实际故障特点, 首先, 分析了对航空发动机涡轮叶片三维叶尖间隙、包括叶尖表面径向间隙、轴向与周向倾角三维参数的变化信息进行光纤传感检测的需求; 然后, 针对拟采用的光纤传感器形式——双圈同轴光纤束传感器在反射面相对传感器端面存在径向间隙、空间倾角的情况下建立了三维空间输出调制函数模型, 设计了接收光纤虚像端面与入射光斑的交叠面积补偿算法以及接收光纤虚像端面的平均光强修正算法; 其次, 对建立的传感器输出特性数学模型在反射面平行、仅存在轴向倾角、轴向周向均存在倾角这 3 种情况下分别进行了仿真计算, 并与相同探头参数下的实验结果进行了对比分析; 最后, 对不同光纤传感器参数下的输出特性进行了仿真。结果表明, 新建立的双圈同轴光纤束传感器三维空间输出特性数学模型不仅从理论角度还原出了传感器在反射面三维空间参数变化下的输出特性, 还能指导不同三维空间位移测量应用下的光纤传感探头设计工作。

**关键词** 三维叶尖间隙; 光纤位移传感器; 双圈同轴光纤束; 三维空间位移检测; 光强补偿

**中图分类号** TN25; TH133

## 引 言

在航空发动机涡轮机以及其他动力设备的透平机中, 转子系统的健康状态都直接决定了整个设备能否正常运行。以往对转子系统的健康状态监测包括振动监测以及转子叶片叶尖间隙监测等, 其主要手段都是检测径向叶尖间隙<sup>[1-3]</sup>, 而导致实际叶片故障(如疲劳断裂)的动力学行为是三维空间内的复杂行为。早期国内外学者对涡轮叶片寿命预测的研究表明, 共同作用在叶片上的不同方向应力满足一定条件时会导致叶片受迫振动从而引起故障<sup>[4]</sup>。Maktouf 等<sup>[5]</sup>通过有限元手段对涡轮叶片进行了分析, 得到了疲劳故障早期阶段涡轮叶片在离心力、弯曲应力等载荷作用下产生的应变特征。若有一种方法能检测到三维空间下叶尖表面位移动态变化信息, 则可间接获取更全面的转子系统故障信息。

航空发动机涡轮叶片的工作环境常处于高温高压状态下, 因而以双圈同轴(或衍生的三圈同轴)反射式光纤位移传感原理为代表的光纤传感器凭借其小体积、抗高温及电磁干扰能力等优势得到了国内外学者广泛研究。García 等<sup>[6-7]</sup>成功将双圈同轴光纤束传感器用于航空发动机地面风洞实验中的涡轮

叶尖间隙检测中。文献[8-11]以其为研究对象展开了在航空发动机径向叶尖间隙检测应用中的输出特性实验研究。杨亮等<sup>[12]</sup>建立了双圈同轴光纤束传感器在一维径向间隙调制下的输出特性数学模型并进行了初步仿真。但目前所有相关研究中, 对双圈同轴光纤束位移传感器在反射面相对于传感器端面同时存在径向间隙  $z_0$ 、轴向偏转角  $\alpha$  与周向滑移角  $\beta$  的三维叶尖间隙(叶尖表面三维空间位移)调制下, 如何组建新的三维叶尖间隙测量用光纤传感器缺少相应的理论建模与仿真研究, 只能依靠单一参数探头的标定实验得到反射面在个别离散倾角下的传感器输出比值, 无法验证不同传感器参数(如光源参数、纤芯半径和入射光纤孔径角等)影响下的传感器三维空间输出特性。

笔者针对双圈同轴光纤束传感器在反射面相对于传感器端面同时存在径向间隙、轴向倾角与周向倾角的情况下对传感器输出特性进行理论建模与仿真研究。

## 1 航空发动机三维叶尖间隙光纤检测

由于航空发动机涡轮叶片的不规则几何外形, 在施加动应力达到一定条件下叶片产生振动、进而

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(51575436)  
收稿日期: 2016-03-31; 修回日期: 2016-06-01

演变为故障,主要振型包含弯曲和扭转<sup>[13]</sup>。叶片在弯曲和扭转下的叶尖表面径向间隙变化  $z_0$ 。同时耦合有其他两维方向的位移变化信息,如图 1 所示,包括叶尖表面的轴向偏转角  $\alpha$  和周向滑移角  $\beta$ 。对三维叶尖间隙的实时检测可以间接获取叶片的早期动态应变特征,先于振动信号获取到故障早期信息。

航空发动机涡轮工作转速通常在 10 kr/min 以上,工作温度高于 1 300℃<sup>[9]</sup>,叶尖间隙径向值正常范围在 2~3mm 区间<sup>[6]</sup>。文献[12]的研究表明,双圈同轴光纤束传感器中的比除环节可以消除大部分由于叶尖表面反射率变化、输入光源功率波动和光纤制造工艺等问题引入的非线性干扰。García 等在航空发动机涡轮的风洞实验中采用了双圈同轴光纤束传感器对径向叶尖间隙进行测量,并证实其工作温度可达到 350℃,可通过设计蓝宝石窗和探头冷却等隔热措施使其有效在涡轮环境下工作。文献[9]中给出设计的传感器调理模块光电转换带宽为 14 kHz,可满足涡轮转速条件。基于此,笔者拟以双圈同轴光纤束传感器为对象展开其在航空发动机三维叶尖间隙检测下的输出特性研究。

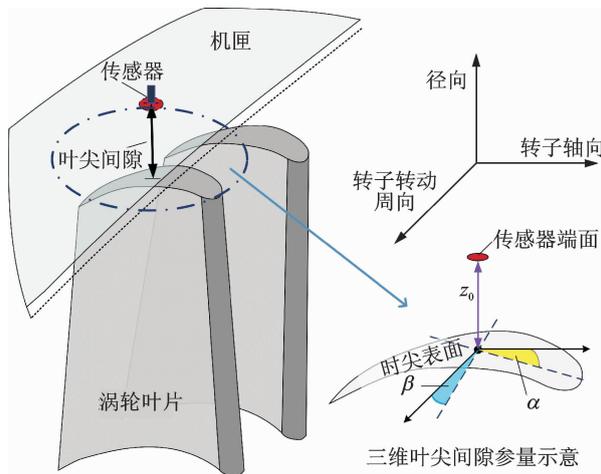


图 1 航空发动机涡轮叶片三维叶尖间隙示意图  
Fig.1 Diagrammatic sketch of three-dimensional tip-clearance of blade inside turbine of aero-engine

## 2 双圈同轴光纤束传感器的三维空间输出特性数学模型

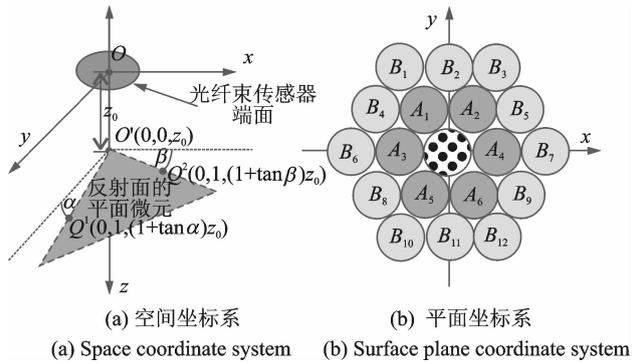
### 2.1 三维叶尖间隙检测空间及传感器端面建模

将传感器正对的叶尖表面区域近似处理为一个具有平面特征的微元(后文中统称反射面),建立如图 2(a)所示的三维空间坐标系。令入射光纤中点为原点  $O$ ,其在反射面的投影点为  $O'$ ,反射面到入射光纤中点径向距离(即  $O'O$  长度)为  $z_0$ ,根据三维叶尖间隙定义及空间几何关系,反射面必通过点

$O'(0,0,z_0)$ ,  $Q_1(0,1,(1+\tan\alpha)z_0)$ ,  $Q_2(1,0,(1+\tan\beta)z_0)$ ,如图 2(a)所示。由空间几何相关算式得到反射面方程为

$$\tan\alpha x + \tan\beta y + z - z_0 = 0 \quad (1)$$

依照图 2(a)所示的空间坐标系,在双圈同轴光纤束传感器端面上建立如图 2(b)所示的平面坐标系。内圈接收光纤记作 A 组光纤、外圈接收光纤记作 B 组光纤。



(a) Space coordinate system (b) Surface plane coordinate system

图 2 双圈同轴光纤束传感器检测空间及传感器端面坐标系

Fig.2 Measurement space coordinate system and surface plane coordinate system of two-circle coaxial fiber bundles sensor

记传感器端面两个相邻光纤中点的间距为  $d$ ,则每一支独立光纤中点的坐标都可记作  $d$  的参数形式,如  $A_1$  中点  $(-d/2, \sqrt{3}d/2, 0)$ 。为了计算所有光纤的虚像位置,依次求取  $A_1 \sim A_6, B_1 \sim B_{12}$  共 18 支光纤的中点关于式(1)所表示反射面的对称点记  $Q_i(x_i, y_i, z_i)$  ( $i=1,2,\dots,18$ ),则  $Q_i$  为受三维叶尖间隙  $(z_0, \alpha, \beta)$  调制的参量。依据反射定律及镜面成虚像的原理(忽略反射面反射率影响),求接收光纤接收的光强等同于求入射光耦合进接受光纤虚像面的光强。光纤束传感器虚像面即传感器端面关于式(1)所表示反射面的对称面,根据图 2(a)的空间坐标系,由  $Q_i$  可求出虚像面方程为

$$\tan 2\alpha x + \tan 2\beta y + z - h = 0 \quad (2)$$

其中:  $h$  为入射光纤中点到传感器虚像面投影点的高度。

$$h = 2z_0 \frac{1 + \tan\alpha \tan 2\alpha + \tan\beta \tan 2\beta}{1 + \tan^2\alpha + \tan^2\beta} \quad (3)$$

### 2.2 三维空间下双圈同轴光纤束传感器输出特性建模

由相关研究文献可知,入射光为高斯光束和均匀光束的混合<sup>[2,9,12]</sup>,纤端光场场强分布为

$$\varphi(r, z) = \frac{K_0 I_0}{\pi R^2(z)} \exp[-r^2/R^2(z)] \quad (4)$$

其中:  $K_0$  为光波在入射光纤中的损耗;  $I_0$  为光源耦合进入射光纤中的光强;  $r$  为纤端光场中某点到入射光锥轴的半径, 在图 2(a) 坐标系中  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ ;  $R(z)$  为纤端光场在高度  $z$  处的光斑等效半径函数。

$$R(z) = a_0 + \zeta \tan \theta_c z^{3/2} \quad (5)$$

其中:  $a_0$  为光纤束中每支光纤的纤芯半径;  $\theta_c$  为光纤最大入射角;  $\zeta$  为无量纲调合参数。

根据纤端光场场强分布假设, 第  $i$  支接收光纤 ( $i=1, 2, \dots, 18$ ) 虚像端面的接收光强为

$$I_i(r, z) = \rho \iint_{S_i} K \varphi(r, z) \exp(-\sum_i \eta_i r_i) ds \quad (6)$$

其中:  $\rho$  为镜面反射率;  $K$  为接收光纤光功率损耗系数;  $\exp(-\sum_i \eta_i r_i)$  为接收光纤附加弯曲损耗;  $S_i$  为第  $i$  支光纤虚像面的光斑覆盖有效面积。

为了提高运算效率, 将式(6)简化为

$$I_i(r, z) = \rho K S_i \varphi_{si}(r, z) \exp(-\sum_i \eta_i r_i) \quad (7)$$

其中:  $\varphi_{si}(r, z)$  为第  $i$  支光纤虚像面接收平均光强, 它与  $S_i$  都是受三维叶尖间隙参数 ( $z_0, \alpha, \beta$ ) 共同调制的变量。

双圈同轴光纤束传感器的输出信号为外圈接收光纤与内圈接收光纤的光强比值, 三维空间下的双圈同轴光纤束传感器输出调制函数可表示为

$$M(z_0, \alpha, \beta) = \frac{I_{r2}}{I_{r1}} = \frac{\sum_{i=7}^{12} \rho K \exp(-\sum_i \eta_i r_i) S_i \varphi_{si}(r, z)}{\sum_{i=1}^6 \rho K \exp(-\sum_i \eta_i r_i) S_i \varphi_{si}(r, z)} \quad (8)$$

由于双圈同轴光纤束传感器中的每一根光纤的制造工艺相同, 式(8)化简为

$$M(z_0, \alpha, \beta) = \frac{I_{r2}}{I_{r1}} = \frac{\sum_{i=7}^{12} S_i \varphi_{si}(r, z)}{\sum_{i=1}^6 S_i \varphi_{si}(r, z)} \quad (9)$$

至此, 得到三维叶尖间隙检测应用下的双圈同轴光纤束传感器三维空间输出调制函数计算方法。

### 2.3 传感器接收光纤虚像有效接收光面积 $S_i$ 计算方法

文献[9, 12]将所有接收光纤虚像面有效受光面积看作端面面积  $S$  项并约去处理。当入射光斑和某接收光纤虚像面部分交叠时, 光纤虚像面的有效光

斑覆盖面积  $S_i$  实际值小于  $S$ 。对此, 笔者提出一种补偿算法, 通过光斑半径与第  $i$  根接收光纤的空间位置参数得到用于计算交叠面积  $S_i$  的补偿系数  $\sigma_i$ 。这里引入光纤近轴半径和远轴半径的概念, 连接光纤虚像中点与入射光纤投影点并做延长线, 其与接收光纤虚像圆周有两个交点, 近轴半径为距离入射光轴距离较小的交点到光纤虚像中点的半径, 记为  $d_N$ ; 远轴半径为距离入射光轴距离较大的交点到光纤虚像中点的半径, 记为  $d_F$ , 如图 3(a) 所示。 $\omega_r$  为某一高度下的纤端光场等效半径  $R(z)$  的数值。第  $i$  支光纤的  $d_{Ni}$ ,  $d_{Fi}$ ,  $\omega_{ri}$  都可以通过接收光纤虚像中心坐标  $Q_i$  求出。

引入  $dis$  以表征入射光斑和光纤虚像端面的相对空间位置关系, 并约定  $dis = d_F - \omega_r$ 。由图 3(b) 所示, 从①~④依次为入射光斑与接收光纤虚像端面完全重叠、恰好完全重叠、部分重叠、不重叠 4 种情况, 可总结为 3 类位置, 对于  $dis$  有下列关系

$$\begin{cases} dis \leq 0 & \text{完全重叠} \\ 0 < dis < 2a_0 & \text{部分重叠} \\ dis \geq 2a_0 & \text{不重叠} \end{cases} \quad (10)$$

通过数值积分仿真入射光斑半径  $\omega_r = a_0$ ,  $\omega_r = 4a_0$ ,  $\omega_r = \infty$  (以  $a_0 = 1 \text{ mm}$  为例) 时的  $dis$  与光斑-光纤虚像面交叠面积大小的关系, 如图 3(c) 的所示。结果显示, 交叠面积与  $dis$  的关系可以近似线性化处理, 记第  $i$  支接收光纤虚像与光斑中心的空间距离为  $dis$ , 因此对于第  $i$  支接收光纤虚像的补偿系数  $\sigma_i$  为

$$\begin{cases} \sigma_i = 1 & (dis_i \leq 0) \\ \sigma_i = 1 - dis_i/2a_0 & (0 < dis_i < 2a_0) \\ \sigma_i = 0 & (dis_i \geq 2a_0) \end{cases} \quad (11)$$

对于每一支独立接收光纤虚像, 有

$$S_i = \sigma_i S \quad (12)$$

传感器三维空间内输出调制函数为

$$M(z_0, \alpha, \beta) = \frac{I_{r2}}{I_{r1}} = \frac{\sum_{i=7}^{12} \sigma_i \varphi_{si}(r, z)}{\sum_{i=1}^6 \sigma_i \varphi_{si}(r, z)} \quad (13)$$

至此, 所有问题归结到对第  $i$  支接收光纤的虚像有效光斑区域内平均光强  $\varphi_{si}(r, z)$  的求解。

### 2.4 接收光纤虚像平均接收光强修正算法

以往研究工作中, 均是光纤端面的中点处光强作为整个光纤端面接收光强平均值进行后续的计算处理<sup>[9, 12]</sup>, 但实际的纤端光场场强分布函数为纤端光场某点高度  $z$  和该点到光锥轴距离  $r$  的非线性

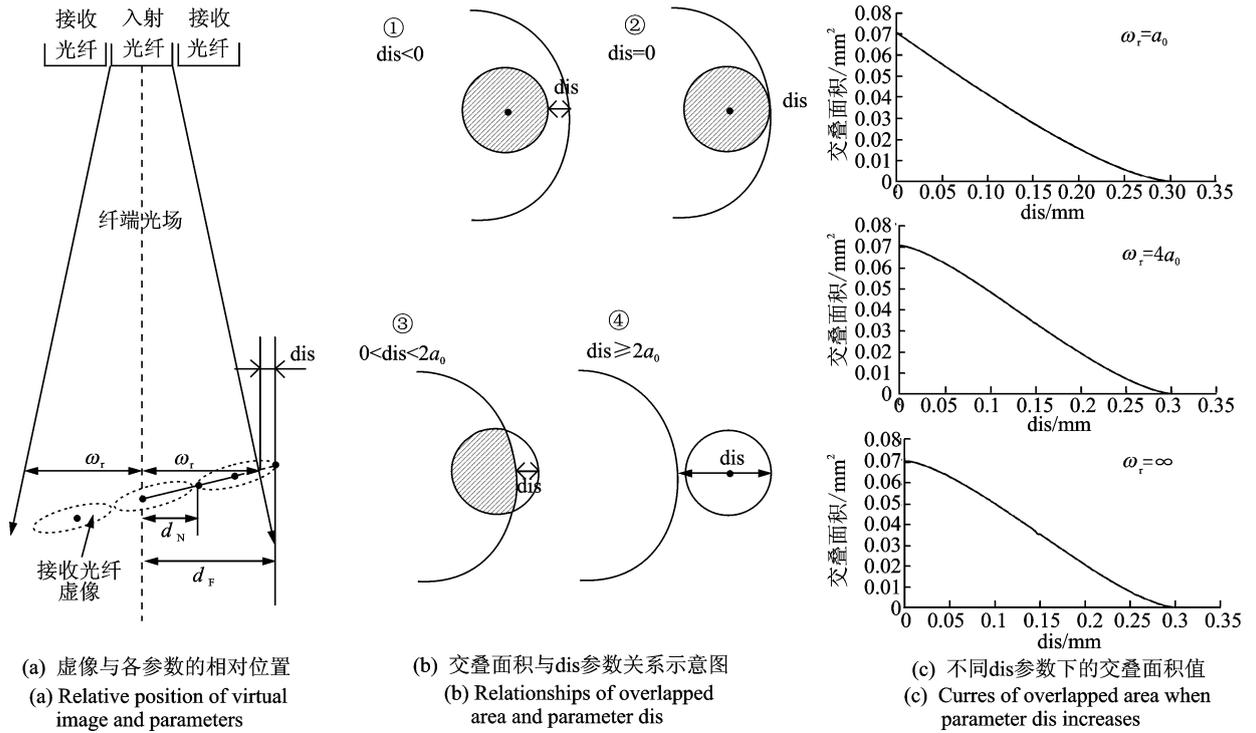


图 3 接收光纤虚像的相关空间参数及接收光纤虚像-入射光光斑相对位置示意、交叠面积大小与 dis 参数关系曲线  
Fig. 3 Several parameters and diagrammatic sketch of relative position between the virtual image of receiving fiber and light spot, together with relationships between overlapped area and dis

超越函数,不能通过一个固定点处的光强来精确代表整个光纤虚像面平均光强。因此,借鉴微积分思想,将接收光纤虚像面有效受光区域按照从近轴端到远轴端的方向划分为  $n$  份等宽的光带区域,每一份光带又可被分为  $m$  份等高的微元,如图 4 所示。

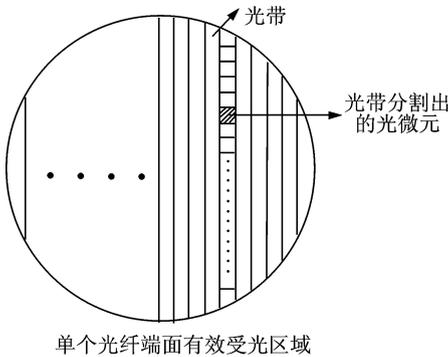


图 4 接收光纤虚像面上的光带和光微元示意图

Fig. 4 Diagrammatic sketch of mini-unit and rectangular zone on the surface of receiving fiber's virtual image

通过计算光带上光微元的光强值可求得每条光带的平均接收光强  $I'_{rj}$  ( $j=1, 2, \dots, n$ ), 其中,  $I'_{rj}$  利用式(4), (5)求得,再以光带长度  $y_{mj}$  为权值(由空间几何算式求出)对  $I'_{rj}$  进行加权平均运算,得到

$$\varphi_{si}(r, z) = \frac{\sum_{j=1}^n y_{mj} I'_{rj}}{\sum_{j=1}^n y_{mj}} \quad (14)$$

以上算法通过 Matlab 编程语言实现,该算法计算出的  $\varphi_{si}(r, z)$  十分接近实际光纤接收光强平均值,使仿真结果精确度进一步提高。

### 3 仿真运算与结果分析

根据建立的数学模型,笔者将针对反射面相对于传感器端面平行、只有单个方向倾角、两个方向都有倾角 3 种反射面情况进行输出特性模型仿真分析。对光源参数及光纤传感探头设计参数改变下的输出特性模型也进行仿真分析。为了验证研究的传感器输出特性模型是否可靠,本仿真分析中的探头参数选取了文献[9]中反射面相对传感器端面平行、单个方向有倾角这两组实验中的探头和反射面参数,用来将仿真结果和同等探头、光源、反射面参数下的实验结果对照以说明模型可靠性,其中:  $a_0=0.15 \text{ mm}$ ,  $d=0.33 \text{ mm}$ ; 入射光纤  $\theta_c = \arcsin(0.22)$ ; 接收光纤  $\theta_c = \arcsin(0.37)$ ;  $\zeta \approx 0.15$ 。由于双圈同轴光纤束输出可在一定范围内消除反射面反射率影响,故本仿真暂不考虑反射率因素。

#### 3.1 反射面平行时传感器输出特性仿真运算以及与实验结果对比

在反射面相对于光纤传感探头端面平行的情况

下,对传感器输出特性进行仿真运算。文献[9,12]简化建模方法的仿真结果如图5(a)所示,笔者研究得到模型的仿真结果如图5(b)所示,文献[9]中反射面与传感探头端面平行时的实验结果如图5(c)所示。其中:实验结果曲线中横坐标起点为1.0 mm,两组仿真曲线横坐标起点都为0 mm。

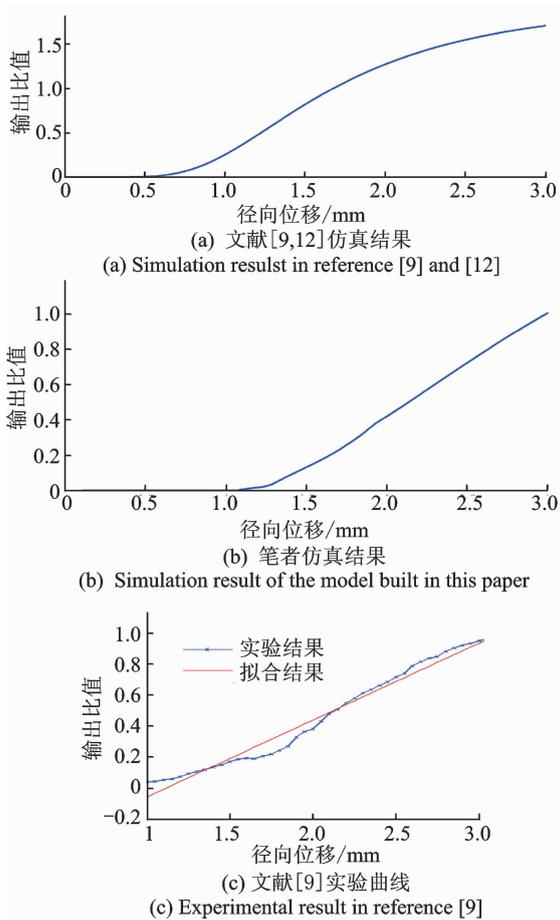


图5 反射面无倾角下的输出特性仿真结果与实验结果对比

Fig. 5 Comparison between simulation results and experimental result of the output characteristic curve when reflector surface is in parallel with the surface of sensor

结果显示,反射面与传感器端面平行时,笔者建模仿真结果基本符合实验结果,而以往的简化建模方法的仿真结果与实验结果相比误差很大。

### 3.2 反射面平行、存在轴向倾角以及轴向周向同时存在倾角时传感器输出特性仿真结果

对反射面不存在周向倾角,轴向倾角分别为 $0^\circ$ 、 $4^\circ$ 和 $8^\circ$ 的3种情况进行仿真运算,结果如图6(a)所示,文献[9]给出的实验结果曲线如图6(b)所示。可见,反射面轴向倾角为 $0^\circ$ 和 $4^\circ$ 时的仿真结果与实验结果一致,但倾角为 $8^\circ$ 时的仿真结果曲线在 $z_0 =$

1 mm 右开始偏离实验结果曲线。分析原因,建模采用入射光为理想的高斯+均匀分布光束,而实验中LED光入射光斑在边缘处有一定的光强发散衰减(如图6(c)照片圈出的区域),当反射面存在倾角时,接收光纤虚像会随着 $z_0$ 增大逐渐偏离入射光中心,倾角越大越会提前到达光强发散区,而传感器输出结果为内外圈光强比值,致使实验曲线后半段有很大程度下降。

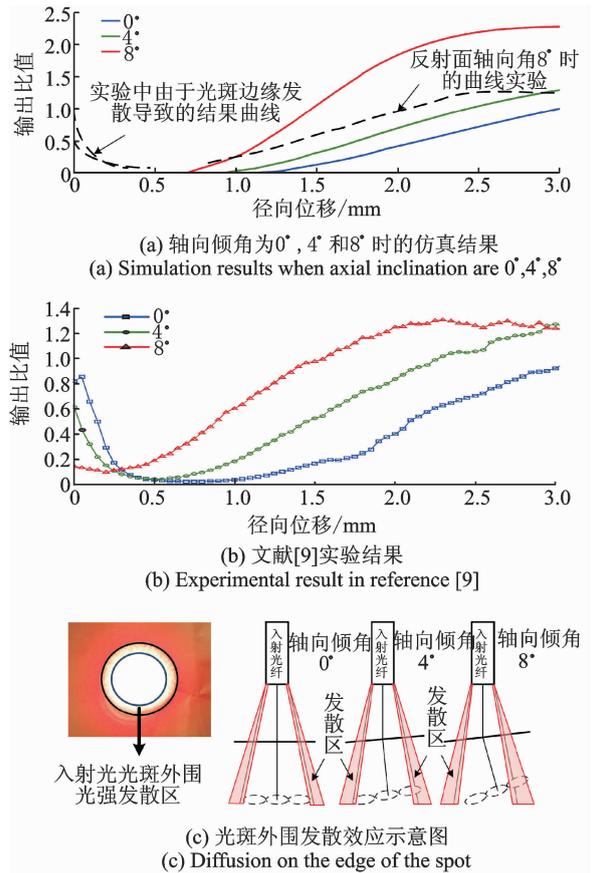


图6 反射面存在倾角下的输出特性仿真结果与实验结果对比

Fig. 6 Comparison between simulation results and experimental result of the output characteristic curve when the reflector surface is inclined

对反射面与传感单元端面平行、呈轴向倾角 $4^\circ$ ,以及轴向、周向均有 $4^\circ$ 倾角3种情况的仿真结果

如图 6(d)所示,随着倾斜程度加大,输出特性曲线逐渐上移。

### 3.3 入射光源参数不同时传感器输出特性仿真

对不同光纤传感器参数下传感器的输出特性做仿真研究。首先,改变光纤传感器入射光源参数,即式(5)中  $\zeta$ 。如图 7 所示,通过仿真得到 4 组不同  $\zeta$  下反射面与传感单元端面平行、呈轴向  $4^\circ$  及轴向  $8^\circ$  三种空间位置下仿真曲线。结果显示, $\zeta$  越小(即入射光斑光强集中性能越好),反射面以轴向小角度  $0^\circ, 4^\circ$  倾斜时输出特性曲线后移且线性度变好反射面轴向  $8^\circ$  时输出特性曲线随着  $\zeta$  减小、斜率逐渐变大。这也从理论角度印证了实验中反射面呈  $8^\circ$  轴向倾角时受光斑边缘发散影响的输出特性曲线后半段下降现象(光斑边缘  $\zeta$  大于光斑中心  $\zeta$ )。

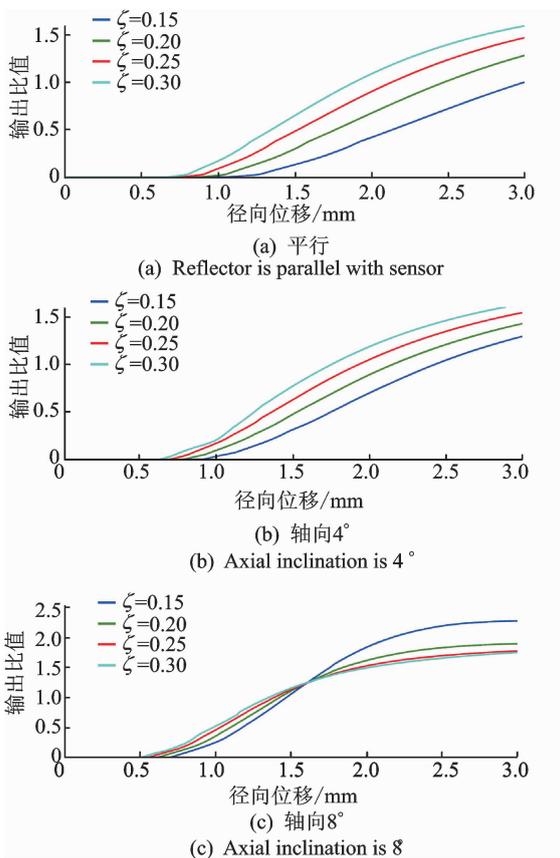


图 7 不同调合参数  $\zeta$  下传感器输出特性仿真曲线  
Fig. 7 Output characteristic curve of simulation results with different parameter  $\zeta$

### 3.4 探头设计参数不同时传感器输出特性仿真

通过仿真研究改变双圈同轴光纤束传感器探头设计参数(如纤芯半径  $a_0$ 、入射光纤孔径角  $\theta_c$ )对传感器输出特性的影响,仿真结果如图 8 所示。其中:

实线代表原有传感探头参数 ( $\zeta = 0.15, a_0 = 0.15 \text{ mm}, \theta_c = \arcsin(0.22)$ ) 下的输出特性仿真结果;“○”划线表示了改变传感探头参数  $a_0, \theta_c$  后的输出特性仿真结果。由图 8(a) 可以看到,随着  $a_0$  减小,  $0^\circ, 4^\circ$  倾角下输出特性曲线斜率减小,分辨率降低;  $8^\circ$  倾角时的曲线斜率增大,分辨率增加。由图 8(b) 可以看到,随着  $\theta_c$  减小,在  $0^\circ, 4^\circ$  倾角下输出特性曲线斜率减小,分辨率降低;  $8^\circ$  倾角时曲线斜率增大,分辨率增加。因此笔者建立的输出特性数学模型可以指导各种三维空间位移测量需求下的光纤传感探头参数最优设计方案,具备较高的工程应用价值。

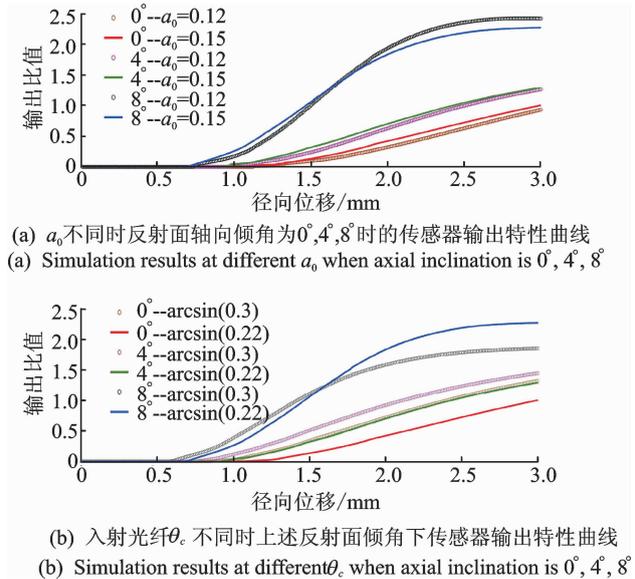


图 8 不同光纤设计参数下传感器输出特性仿真曲线  
Fig. 8 Output characteristic curve of simulation results with different design parameters of measuring unit

## 4 结束语

基于航空发动机的三维叶尖间隙检测应用需求,采用一种双圈同轴光纤束传感器作为研究对象,建立了其在三维空间下的输出特性数学模型。经过相同探头及反射面参数下的仿真与实验结果对比,证明了建立模型的可靠性。通过仿真研究了不同光源参数及不同传感探头设计参数对传感器输出特性的影响规律,结果表明,笔者建立的三维空间输出调制函数模型不仅可以较精确地还原出实际双圈同轴光纤束传感器的输出特性,还可用于指导后续的航空发动机三维叶尖间隙传感系统设计工作,能通过调整模型中探头参数来扩展传感器的检测量程和分

辨率等,用于指导不同检测工程需求下的三维空间位移光纤传感探头及系统设计工作,具有一定的理论及工程应用价值。

### 参 考 文 献

- [1] Madhavan S, Jain R, Sujatha C. Vibration based damage detection of rotor blades in a gas turbine engine [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2014, 46: 26-39.
- [2] Jia Binghui, Zhang Xiaodong. An optical fiber blade tip clearance sensor for active clearance control applications [J]. *Procedia Engineering*, 2011, 15: 984-988.
- [3] 张承,周雷,胡伟. 航空发动机用光纤叶片振动传感探头的研制 [J]. *中国电子科学研究院学报*, 2011, 6(2): 217-220.  
Zhang Cheng, Zhou Lei, Hu Wei. Development of the optical fiber blade vibration sensing probe for aero-engine [J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2011, 6(2): 217-220. (in Chinese)
- [4] Vyas N S, Sidharth, Rao J S. Dynamics stress analysis and a fracture mechanics approach to life prediction of turbine blades [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 1997, 32(4): 511-527.
- [5] Maktouf W, Saï K. An investigation of premature fatigue failures of gas turbine blade [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2015, 47: 89-101.
- [6] García I, Beloki J, Zubia J, et al. An optical fiber bundle sensor for tip clearance and tip timing measurements in a turbine rig [J]. *Sensors*, 2013, 13(6): 7385-7398.
- [7] García I, Beloki J, Berganza A, et al. Different configurations of a reflective intensity-modulated optical sensor to avoid modal noise in tip-clearance measurements [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(12): 2663-2669.
- [8] 张小栋,谢思莹,牛杭,等. 光纤动态检测技术的研究与进展 [J]. *振动、测试与诊断*, 2015, 35(3): 409-416.  
Zhang Xiaodong, Xie Siying, Niu Hang, et al. Research on dynamic measurement technology of fiber optic sensors and their developments [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2015, 35(3): 409-416. (in Chinese)
- [9] 贾丙辉. 涡轮叶尖间隙光纤测量与主动控制技术研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2013.
- [10] 贾丙辉,冯勇,贾文华. 双圈同轴式光纤传感器在叶尖间隙测量中的应用 [J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(10): 100603-1-100603-7.  
Jia Binghui, Feng Yong, Jia Wenhua. Application of optical sensor with two-circle reflective coaxial fiber in tip clearance measurement [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2015, 52(10): 100603-1-100603-7. (in Chinese)
- [11] 马玉真,段发阶,王仲,等. 光纤传感器在叶尖间隙测量中的应用 [J]. *传感技术学报*, 2007, 20(12): 2724-2727.  
Ma Yuzhen, Duan Fajie, Wang Zhong, et al. Application of optical fiber sensor in tip clearance measurement [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007, 20(12): 2724-2727. (in Chinese)
- [12] 杨亮,张小栋. 双圈同轴光纤束位移传感器研究 [J]. *振动、测试与诊断*, 2009, 29(2): 192-196.  
Yang Liang, Zhang Xiaodong. Research on displacement sensor of two-circle reflective coaxial fiber bundle [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2009, 29(2): 192-196. (in Chinese)
- [13] Hou J, Wicks B, Antoniou R. An investigation of fatigue failures of turbine blades in a gas turbine engine by mechanical analysis [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2002, 9: 201-211.



**第一作者简介:** 谢思莹,女,1988年1月生,博士生。主要研究方向为航空发动机叶尖间隙光纤动态检测技术与转子叶片健康监控技术。曾发表《光纤动态检测技术的研究与进展》(《振动、测试与诊断》2015年第35卷第3期)等论文。  
E-mail: majorxie@stu.xjtu.edu.cn

