

机场道面外来物撞击航空发动机转子叶片速度估算

张忠平, 张晶, 柴桥, 李春旺, 武晓亮

(空军工程大学理学院, 西安, 710051)

摘要 针对机场道面外来物对航空发动机转子叶片的撞击损伤规律进行研究。以试验结果为基础,研究了空气旋流使外来物从地面加速运动至飞机进气道口的速度,然后利用动量定理推导了外来物从飞机进气道口至发动机转子叶片的速度方程;以叶片为参考系,建立了外来物撞击速度及撞击角度的表达式。最后,以某型飞机及其发动机为例,研究了外来物到达发动机一级转子叶片的速度变化规律,实验结果发现:外来物的运动速度不仅与外来物的材质、形状、大小有关,而且与飞机进气道距地面高度、进气道长度、发动机工作状态密切相关;外来物撞击叶片的方向与叶片表面不垂直。

关键词 航空发动机叶片;撞击速度;外来物损伤

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.06.002

中图分类号 V232.4 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)06-0007-04

Velocity Estimation for the Impact of Foreign Object against the Aero-engine Blade

ZHANG Zhongping, ZHANG Jing, CHAI Qiao, LI Chunwang, WU Xiaoliang
(Science College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: In order to overcome the defect that the impact velocity is assumed between blades and foreign object in present method, and to deeply search the law for an aero-engine blade impacted by the foreign object from the runway, the impact velocity of foreign object against the aero-engine blade is estimated in the paper. Firstly, taking the tested results as a basis, velocity induced by the air vortex from the runway surface to the inlet port is studied. Then, velocity equation from the inlet port to the blade is deduced by using the momentum theorem. Taking a blade as a reference, expressions of both the impact velocity and the impact direction relative to the blade are found. At last, a certain type of the airplane and its aero-engine are taken as example, the change rule of the motion velocity in inlet channel is studied. The results show that the foreign object motion velocity relates not only with the foreign object shape, dimension and material, but also with the aero-engine working state, the height and the length of the inlet port. The impact direction is out of vertical to the blade surface.

Key words: blade, impact velocity, foreign object damage

关于外来物对发动机叶片的撞击损伤研究目前 主要集中于撞击过程中叶片的瞬态响应^[1-3]以及撞

收稿日期:2014-10-27

基金项目:陕西省自然科学基金资助项目(2015JM5240);国家自然科学基金资助项目(51575524)

作者简介:张忠平(1962—),男,陕西澄城人,教授,博士生导师,主要从事航空金属材料及结构的振动、强度与疲劳寿命研究

通信作者:张晶(1991—),女,硕士生,主要从事航空金属材料力学行为的计算与仿真,E-mail:zjkiwi216@126.com

引用格式:张忠平,张晶,柴桥,等. 机场道面外来物撞击航空发动机转子叶片速度估算[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(6):7-10. ZHANG Zhongping, ZHANG Jing, CHAI Qiao, et al. Velocity Estimation for the Impact of Foreign Object against the Aero-engine Blade [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(6): 7-10.

击后叶片的残余应力^[4-6]及疲劳强度的降低程度^[7-11],研究中都是假设外来物以一定速度垂直撞击模拟静止叶片表面^[12-15],至于撞击速度与外来物的材质、形状、大小及与飞机进气道距离地面高度、进气道长度及发动机工作状态的关系尚则未见文献研究。

本文推导了外来物从进气道口至发动机转子叶片的速度方程,以叶片为参考系,建立外来物撞击叶片的速度表达式。

1 外来物进入进气道的初速度

机场道面外来物进入飞机进气道的根本原因是发动机起动及飞机滑跑产生的空气旋流。对3种型号飞机的试验结果表明^[9],发动机大转速下空气旋流对地面产生的平均吸力是4 900 N/m²。设外来物的特征迎风面积为 S ,则外来物所受吸力为:

$$f = 4\ 900S \quad (1)$$

如果吸力不随高度变化且进气道距离地面高度为 h ,外来物质量是 m 但忽略重力,则外来物到达进气道口时的初速度见式(2),此后,在气流的推动下,外来物在进气道内加速运动:

$$v_0 = \sqrt{\frac{9\ 800hS}{m}} \quad (2)$$

2 外来物在进气道内的运动速度

图1显示了气流与外来物的作用过程,在进气道内的某一位置,假设气流密度是 ρ 、速度是 V ,1个横截面积为 S 、质量为 m_0 的气流微元从接触到刚绕过外来物期间,速度由 V 减为外来物运动速度 v ,如果过程的持续时间是 Δt ,此过程中气流微元受力为 F ,则对气流微元应用动量定理可得:

$$F\Delta t = (v - V)m_0 = \rho SV\Delta t(v - V) \quad (3)$$

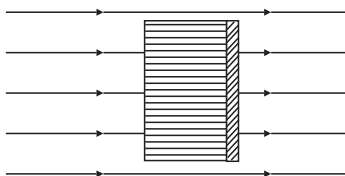


图1 气体与外来物的作用过程

Fig.1 The action between flow and foreign object

根据牛顿第三定律,气流受力 F 其实就是气流对外来物的作用力,如果进一步考虑到牛顿第二定律,则外来物运动的加速度是:

$$a = \frac{\rho SV}{m}(V - v) \quad (4)$$

对式(4)变形可得:

$$a = \frac{\rho SV}{m}(V - v) = \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dl} \frac{dl}{dt} = v \frac{dv}{dl}$$

或者写成:

$$dl = \frac{m}{\rho SV} \frac{v}{V - v} dv \quad (5)$$

式(5)反映了外来物速度增量 dv 与运动距离增量 dl 的关系。严格来说,由于飞机进气道尺寸的变化,式(5)中的气流速度 V 随气流进入进气道的深度而变化,此时,式(5)无法实现变量分离。鉴于本文的目的仅在于估算撞击速度且气流速度 V 随气流进入进气道深度的变化不大,为简单起见,取气流速度 V 的平均值,并假设进气道口到发动机转子叶片的距离是 L ,对式(5)进行变量分离并积分,得到外来物在飞机进气道内的运动速度表达式:

$$L = \frac{m}{\rho SV} \left[v_0 - v + V \ln \frac{V - v_0}{V - v} \right] \quad (6)$$

气流密度 ρ 的估算公式为^[16]:

$$\rho^* = \rho \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right)^{\frac{1}{\gamma - 1}} \quad (7)$$

式中: ρ^* 为包含速度影响的气流总密度^[9]; $\gamma = 1.4$ 为绝热指数; M 为气流马赫数。显然,运动速度不仅取决于外来物的形状、大小、质量,还取决于飞机进气道距离地面的高度、进气道长度、发动机的工作状态等。

3 外来物撞击叶片的速度

以文献[6~7]的集合模型为对象,令 x 轴与发动机轴重合, x 轴正方向指向气流方向,同时也是外来物运动方向。撞击发生前,外来物以速度 v 沿 x 轴正向运动,叶片既与飞机一起沿 x 轴负向以速度 v' 平动,又绕 x 轴以角速度 ω 转动,假设撞击点位置是 y ,则在叶片参考系中,撞击速度 V_x 、 V_z 及撞击方向与 x 轴的夹角 θ 见式(8),撞击方向不与叶片表面垂直:

$$V_x = v + v', V_z = \omega y, \theta = \cot \frac{V_z}{V_x} \quad (8)$$

4 算例

为直观显示外来物运动速度的变化规律,以某型飞机及其发动机为例^[16-17],研究外来物运动至发动机一级转子叶片时的速度随外来物形状及大小的变化规律。进气道距离地面高度 h 约为1.2 m,进气道口到发动机进气口及压气机一级转子叶片的距

离分别约为 4 m 和 4.3 m,飞机滑跑过程中、发动机大转速下,气流总密度 $\rho^* = 1.225 \text{ kg/m}^3$,气流从进气道口到发动机进气口,再到一级转子叶片,速度 V 从 200 m/s 逐步下降到 160 m/s,又逐步增大至 180 m/s。为估算外来物运动速度,取整个路径上的平均值 180 m/s,对应的 $M = 0.53$,代入式(7),可得 $\rho = 1.07 \text{ kg/m}^3$,式(6)可变为:

$$4.3 = \frac{m}{193S} \left[v_0 - v + 180 \ln \frac{180 - v_0}{180 - v} \right] \quad (9)$$

如果假设式(9)对应的飞机发动机大转速下,空气旋流对地面产生的平均吸力也是 $4\ 900 \text{ N/m}^2$,则式(9)中 v_0 的表达式就是式(2)。

4.1 砂石

如果将砂石的形状简化成球形,并考虑到其质量密度 ρ 为 $2\ 800 \text{ kg/m}^3$,由于:

$$m = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho = \frac{11\ 200}{3} \pi r^3, S = \pi r^2$$

则式(2)、(9)成为:

$$v_0 = \sqrt{\frac{9\ 800hS}{m}} = \sqrt{\frac{441}{140r}} \quad (10)$$

$$4.3 = \frac{11\ 200r}{579} \left[v_0 - v + 180 \ln \frac{180 - v_0}{180 - v} \right] \quad (11)$$

方程(10)~(11)表明,砂石的速度是半径的函数,当联立求解方程(10)、(11)时,得到不同砂石半径对应的速度见表 1,函数拟合表 1 的数据,得:

表 1 砂石和钢珠运动速度随半径的变化

Tab.1 Sand and teel sphere velocity change with the radius

	$r/(10^{-3}\text{m})$	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
砂石	$v_0/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	79.4	56.1	45.8	39.7	35.5	32.4	30.0	28.1	26.5	25.1
	$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	175.0	159.7	146.3	135.6	126.9	119.8	113.8	108.7	104.3	100.3
钢珠	$v_0/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	46.5	32.9	26.8	23.2	20.8	19.0	17.6	16.4	15.5	14.7
	$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	147.3	120.9	105.3	94.7	86.9	80.8	75.9	71.8	68.4	65.4

表 2 螺钉(螺帽)运动速度随长度的变化

Tab.2 Bolt(nut) velocity change with the radius

	$l/(10^{-3}\text{m})$	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$v_0/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$		26.8	19.0	15.5	13.4	12.0	11.0	10.1	9.5	8.9	8.5
$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$		105.3	80.8	68.4	60.5	54.9	50.6	47.2	44.5	42.2	40.2

5 结语

本文首次基于试验结果及动量定理,研究了外来物撞击发动机叶片的速度。就本文所举例的飞机及其发动机而言,在发动机大转速下,外来物速度 v 随其形状、大小及材质变化,随着外来物尺寸变大,运动速度减小。同时,外来物撞击叶片的速度方向不与叶片表面垂直。这可以为研究机场道面外来物对航空发动机转子叶片撞击损伤规律提供基础。

$$v = -713.2r^{0.2803} + 260.8 \quad (12)$$

4.2 钢珠

考虑到钢珠的质量密度为 $8\ 170 \text{ kg/m}^3$,由于:

$$m = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho = \frac{32\ 680}{3} \pi r^3, S = \pi r^2$$

则公式(2)、(9)成为:

$$v_0 = \sqrt{\frac{11\ 760S}{m}} = \sqrt{\frac{882}{817r}} \quad (13)$$

$$4.3 = \frac{32\ 680r}{579} \left[v_0 - v + 180 \ln \frac{180 - v_0}{180 - v} \right] \quad (14)$$

联立求解方程(13)、(14),得到不同半径对应的速度见表 1,函数拟合表 1 的数据,得:

$$v = 121.6r^{-0.1285} - 175.3 \quad (15)$$

4.3 螺钉(螺帽)

将螺钉(螺帽)的形状简化成长度为 l 的圆柱,并考虑到其质量密度为 $8\ 170 \text{ kg/m}^3$,由于:

$$m = lS\rho = 8\ 170lS$$

则式(2)、(9)成为:

$$v_0 = \sqrt{\frac{11\ 760S}{m}} = \sqrt{\frac{1\ 176}{817l}} \quad (16)$$

$$4.3 = \frac{8\ 170l}{193} \left[v_0 - v + 180 \ln \frac{180 - v_0}{180 - v} \right] \quad (17)$$

联立求解方程(16)、(17),得到不同长度对应的速度见表 2,函数拟合表 2 的数据,得到:

$$v = 18.1l^{-0.3137} - 21.74 \quad (18)$$

参考文献(References):

[1] Xi Chen, John W. Hutchinson, Particle Impact on Metal Substrates with Application to Foreign Object Damage to Air Craft Engines[J].Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2002, 50(12): 2669-2690.
 [2] 尹冬梅,钱林方,徐亚栋,等.叶片砂石撞击损伤的数值模拟与分析[J].南京理工大学学报:自然科学版, 2008, 32(5): 536-539.
 YIN Dongme, QIAN Linfang, XU Yadong, et al.

- Simulation and Analysis of Blades Damaged by Sandston[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science, 2008, 32(5): 536-539. (in Chinese)
- [4] Boyce B L, Chen X, Hutchinson J W. The Residual Stress State Due to a Spherical Hard-Body Impact [J]. Mechanics of Materials, 2001, 3: 441-454.
- [5] Boyce B L, Chen X, Peters J O, et al. Mechanical Relaxation of Localized Residual Stresses Associated with Foreign Object Damage [J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 349(1-2): 48-58.
- [6] P Duo, J Liu, D Dini. Evaluation and Analysis of Residual Stresses Due to Foreign Object Damage [J]. Mechanics of Materials, 2007(39): 199-211.
- [7] Nowell D Duó P, Stewart I F. Prediction of Fatigue Performance in Gas Turbine Blades after Foreign Object Damage [J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25: 963-969.
- [8] Thompson S R, Ruschau J J, Nicholas T. Influence of Residual Stresses on High Cycle Fatigue Strength of Ti-6Al-4V Subjected to Foreign Object Damage [J]. International Journal of Fatigue, 2001, 23: 405-412.
- [9] Joseph L H. II, BS, M S. Effects of Foreign Object Damage from Small Hard Particles on the High Cycle Fatigue Life of Ti-6Al-4V [R]. AFIT/DS/ENY/99-02. 1999
- [10] Xi Chen. Foreign Object Damage on the Leading Edge of a Thin Blade [J]. Mechanics of Materials, 2005, 37, 447-457.
- [11] Janardhan P, Mahendra N.C. Effects of Foreign Object Damage on Fatigue Life of Compressor Blades in A gas Turbine Engine [J]. SAS Tech, 2008, 7(1): 66-73.
- [12] 李均盛, 柴桥, 杨百愚, 等. 钢珠对某型发动机压气机一级转子叶片撞击损伤研究 [J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2013, 14(6): 5-8.
- LI Junsheng, CHAI Qiao, YANG Baiyu, et al. Impact Damage on One Kind of Aero-Engine Compressor Blade from Steel Sphere [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2013, 14(6): 5-8. (in Chinese)
- [13] 柴桥, 李均盛, 杨百愚, 等. 外来物形状对航空发动机压气机转子叶片撞击损伤的影响 [J]. 应用力学学报, 2014, 31(6): 5-8.
- CHAI Qiao, LI Junsheng, YANG Baiyu, et al. Effects of Foreign Object Shape to the Aero-Engine Compressor Blade Impacted Damage [J]. Journal of Applied Mechanics, 2014, 31(6): 5-8. (in Chinese)
- [14] S. Spanrad, J. Tong. Characterisation of Foreign Object Damage (FOD) and Early Fatigue Crack Growth in Laser Shock Peened Ti-6Al-4V Aerofoil Specimens [J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 2128-2136.
- [15] Mirco D. Chapetti Application of a Threshold Curve Model to High - cycle Fatigue Behavior of Small Cracks Induced by Foreign Object Damage in Ti-6Al-4V [J]. Journal of Fatigue, 2005, 27: 493-501.
- [16] 李军, 华建国. 飞机推进系统原理 [M]. 西安: 空军工程大学, 1999.
- LI Jun, HUA Jianguo. Fundamental of Airplane Propelling System [M]. Xi'an: Air Force Engineering University, 1999. (in Chinese)
- [17] 李军. 进气压力畸变对涡喷、涡扇发动机稳定性影响的试验研究 [R]. 西安: 空军工程学院航空与宇航工程博士后科研流动站工作报告, 1999.
- LI Jun. Test Study of The Effects of Inlet Pressure Distortion to the Jet/Fan Engine Stability [R]. Xi'an: Post-doctoral Report of Aviation & Space Navigation Engineering of Air Force Engineering University, 1999.

(编辑: 徐敏)