

文章编号:1001-5078(2007)07-0649-04

基于非线性回归分析的飞机隐藏腐蚀的热波检测

孙延春¹, 孙步胜^{1,2}, 马齐爽¹

(1. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京 100083; 2. 山东科技大学机械电子工程学院, 山东 青岛 266510)

摘要:通过对飞机隐藏结构腐蚀的导热机理研究,建立其一维瞬态热传导理论模型。通过对理论模型的分析,推导出了温差(腐蚀区域对应表面的温度与未腐蚀区域对应表面的温度之差)最大值出现的时间与腐蚀深度之间的关系。由于仪器设备的精度所限,很难直接从热图像序列获得达到最大温差的时间,因此提出通过非线性回归方程来拟合温差的变化曲线,进而求出最大温差对应的时间。经过对计算结果的分析,证实了该方法具有较高的可信度。

关键词:非线性回归;隐藏腐蚀;热波

中图分类号:TN219 **文献标识码:**A

Detection of Plane Hidden Corrosion by Thermal Wave Based on Nonlinear Regression Analysis

SUN Yan-chun¹, SUN Bu-sheng^{1,2}, MA Qi-shuang¹

(1. School of Automation Science and Electric Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China;
2. College of Mechanical and Electronic Engineering Shandong University Science and Technology, Qingdao 266510, China)

Abstract: This article established one dimension transient heat conduction model of plane hidden corrosion by researching its heat conduction mechanism. According to the model, it introduced the relation of the time of the most value of the difference temperature and the depth of corrosion. But the time was not exactly gained because of limited apparatus precision. The paper presented nonlinear regression equation to fit the change of difference in temperature, and solved the value of the time. The method which had verified by analyzing the result of calculation has higher reliability.

Key words: nonlinear regression; hidden corrosion; thermal wave

随着飞机日历年龄的增加,飞机的结构腐蚀问题逐渐显现。结构腐蚀是老龄飞机的主要损伤形式,可直接影响飞机的使用寿命和安全可靠性。我国的民航客机多由欧美生产,国内很难改变其设计结构的防腐体系。因此,解决结构腐蚀问题的关键之一就是腐蚀检测,如果能及时、有效地发现腐蚀并修理,就可以避免腐蚀发展到严重程度造成的巨大经济损失和安全隐患^[1]。

红外热波无损检测是近年来发展起来的一门新技术,它具有非接触、大面积、快速、实时等优点,非常适合于飞机的隐藏腐蚀检测^[2]。

1 引言

飞机蒙皮下表面隐藏腐蚀的结构示意图如图1

所示。将上述模型进行抽象,对问题进行提炼,得出其一维热传导理论模型。结构如图2所示,其中, x 代表蒙皮厚度的方向,单位为m; q 表示加载到蒙皮表面的热量,单位为J;飞机蒙皮厚度为 L ,腐蚀面距离蒙皮上表面的距离为 L_1 ,则腐蚀的厚度为 $(L - L_1)$ 。根据傅里叶定律和能量守恒定律得:

$$\frac{\partial T^2(x, t)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} \quad 0 < x < \infty, t > 0 \quad (1)$$

基金项目:国家自然科学基金(60572181)资助项目。

作者简介:孙延春(1978-),男,北京航空航天大学自动化与电气工程学院博士,研究方向为检测技术,智能仪表等。E-mail: ace9024@126.com

收稿日期:2006-12-14; **修订日期:**2007-01-28

$$T = F(x) \quad t = 0, \quad -\infty < x < \infty \quad (2)$$

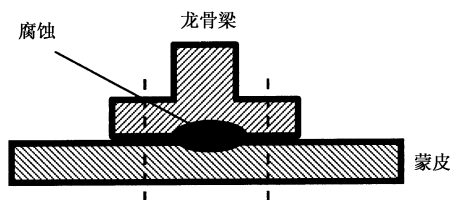


图1 飞机蒙皮腐蚀示意图

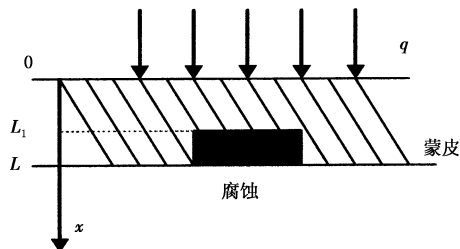


图2 蒙皮腐蚀结构图

其中, $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c}$ 为材料的热扩散系数, 单位为 m^2/s ; T 为瞬时温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$; ρ 为材料的密度, 单位为 kg/m^3 ; c 为材料的比热容, 单位为 $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$; λ 为材料的热传导系数, 单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

对上式通过分离变量法可以求得解析形式的解:

$$T(x, t) = \frac{T_0}{\sqrt{4\alpha\pi t}} e^{-\frac{x^2}{4\alpha t}} \quad (3)$$

由式(3)就可以得出热脉冲作用后蒙皮表面即 $x = 0$ 处的温度分布为:

$$T(0, t) = \frac{T_0}{\sqrt{4\alpha\pi t}} \quad (4)$$

同时, 飞机蒙皮表面吸收热能后, 热波就会在蒙皮内传播, 当传播到腐蚀区域后, 将受到阻碍并产生反射, 这样腐蚀区域对应的表面温度随时间的变化关系可以表示为 $T_c(0, t)^{[3]}$:

$$T_c(0, t) = \frac{T_0}{\sqrt{4\alpha\pi t}} (1 + R \cdot \exp(-\frac{(2L_1)^2}{4\alpha t})) \quad (5)$$

其中, R 为腐蚀界面的反射系数。由式(4)和式(5)可以得出腐蚀区域对应表面温度与未腐蚀区域对应表面温度之差:

$$\begin{aligned} \Delta T(0, t) &= T_c(0, t) - T(0, t) \\ &= \frac{RT_0}{\sqrt{4\alpha\pi t}} \exp(-\frac{(2L_1)^2}{4\alpha t}) \end{aligned} \quad (6)$$

对式(6)求导并令导数等于零, 即:

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta T(0, t)}{dt} &= \frac{RT_0}{2} (-\frac{1}{2}) (\pi\alpha t)^{-\frac{3}{2}} \pi\alpha \exp(-\frac{L_1^2}{\alpha t}) + \\ &\quad \frac{RT_0}{2} (\pi\alpha t)^{-\frac{1}{2}} \exp(-\frac{L_1^2}{\alpha t}) (\frac{L_1^2}{\alpha t^2}) = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

对式(7)化简, 得:

$$(-\frac{1}{2}) (\pi\alpha t)^{-1} \alpha\pi + (\frac{L_1^2}{\alpha t^2}) = 0 \quad (8)$$

$$\text{所以: } t_{\max} = \frac{2L_1^2}{\alpha} \quad (9)$$

式(9)是飞机蒙皮上表面距腐蚀面的深度与红外热波图像出现最大温差时的时间之间的关系式。要想定量分析腐蚀的深度, 必须准确知道温差峰值对应的时间。而对于被测材料来说, 温差峰值对应时间很难直接从红外图像时间序列获得, 主要是因为目前使用的红外热像仪的帧频较低, 采样间隔的时间较长, 不能准确获得温差峰值对应的时间, 这也使红外热波成像定量检测材料的腐蚀厚度成为一个难题, 本文从理论出发提出一个新的计算方法, 并通过实验验证了该方法的可行性。

2 理论分析

表1是从热图像序列中提取的有效数据, 考虑到非腐蚀区域的反射问题, 数据截止到未腐蚀区域反射波到达表面之前。从表中可以看出温差最大的采样点为3/60, 这只是所有采样点中温差最大的, 但不能就此认为整个传热过程中此点是最大的。为此, 本文从曲线拟合的角度出发, 采用多项式回归模型, 推导出温差与时间的多项式模型, 进而求出温差峰值对应的时间。

表1 实验数据

采样时间/s	0	1/60	2/60	3/60	4/60	5/60	6/60	7/60	8/60	9/60	10/60
温差值/K	2.142	3.394	3.632	3.786	3.678	3.608	3.58	3.468	3.368	3.254	3.07

设拟合曲线的回归方程为:

$$\Delta T = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \quad (10)$$

其中, a_0, a_1, a_2, a_3 为回归系数, 是未知参数。

为了确定回归系数可采用最小二乘法, 即令:

$$Q = \sum_{i=0}^{n-1} [\Delta T_i - (a_0 + a_1 t_i + a_2 t_i^2 + a_3 t_i^3)]^2 \quad (11)$$

根据最小二乘法原理, 可以分别求出对 a_0, a_1, a_2, a_3 的偏导数, 并令偏导数等于零^[4], 即:

$$\frac{\partial Q}{\partial a_0} = -2 \sum_{i=1}^n (\Delta T_i - (a_0 + a_1 t_i + a_2 t_i^2 + a_3 t_i^3)) = 0 \quad (12a)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial a_1} = -2 \sum_{i=1}^n t_i (\Delta T_i - (a_0 + a_1 t_i + a_2 t_i^2 + a_3 t_i^3)) = 0 \quad (12b)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial a_2} = -2 \sum_{i=1}^n t_i^2 (\Delta T_i - (a_0 + a_1 t_i + a_2 t_i^2 + a_3 t_i^3)) = 0 \quad (12c)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial a_3} = -2 \sum_{i=1}^n t_i^3 (\Delta T_i - (a_0 + a_1 t_i + a_2 t_i^2 + a_3 t_i^3)) = 0 \quad (12d)$$

进一步化简得:

$$\sum_{i=1}^n (a_0 + a_1 t_i + a_2 t_i^2 + a_3 t_i^3) = \sum_{i=1}^n \Delta T_i \quad (13a)$$

$$\sum_{i=1}^n (a_0 t_i + a_1 t_i^2 + a_2 t_i^3 + a_3 t_i^4) = \sum_{i=1}^n \Delta T_i t_i \quad (13b)$$

$$\sum_{i=1}^n (a_0 t_i^2 + a_1 t_i^3 + a_2 t_i^4 + a_3 t_i^5) = \sum_{i=1}^n \Delta T_i t_i^2 \quad (13c)$$

$$\sum_{i=1}^n (a_0 t_i^3 + a_1 t_i^4 + a_2 t_i^5 + a_3 t_i^6) = \sum_{i=1}^n \Delta T_i t_i^3 \quad (13d)$$

这是一个四元线性方程组,其中只有 a_0, a_1, a_2, a_3 是未知数,而其他均由实测数据及时间值组成,所以,通过上述方程组原则上可以把系数 a_0, a_1, a_2, a_3 解出来^[5]。把 a_0, a_1, a_2, a_3 代入式(10),就可以找出这个时间段上最大温差对应的时间。

3 结果分析

3.1 相对误差分析

实验中所用试件的参数如下:飞机铝合金蒙皮的厚度 L 为 0.002m,腐蚀直径 ϕ 为 0.015m,腐蚀深度 L_2 为 0.0008m,通过查找有关文献[6]:铝合金材料的密度为 2610kg/m³,比热容为 904J/(kg·℃),热传导系数为 107W/m·℃。由此得出铝合金材料的热扩散系数为 $\alpha = 4.53 \times 10^{-5}$ m²/s,从热像仪中提取的温差数据如表 1 所示,通过回归方程进行曲线拟合,解得回归方程的系数为: $a_0 = 2.3519, a_1 = 53.853, a_2 = -594.94, a_3 = 1811.5$ 。

拟合后的曲线图如图 3 所示。进而可以求得的最大温差对应的时间为 t 为 0.062s,求得的腐蚀面距蒙皮表面的距离为: $\bar{L}_1 = 1.1853$ mm。

腐蚀深度为: $\bar{L}_2 = L - \bar{L}_1 = 0.8147$ mm。

腐蚀深度的相对误差为:

$$Er = \frac{\bar{L}_2 - L_2}{L_2} = \frac{0.8147 - 0.8}{0.8} = 1.84\% \quad (16)$$

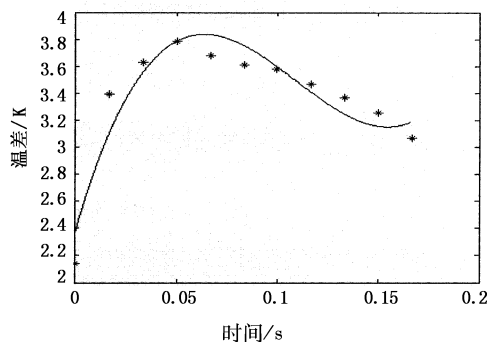


图3 拟合后的曲线图

如果直接根据采样得到的数据,则温差最大值

对应的时间为 0.05s,由此计算出来的腐蚀深度为 $\bar{L}_2' = 0.9358$ mm。腐蚀深度的相对误差为:

$$Er = \frac{\bar{L}_2' - L_2}{L_2} = \frac{0.9358 - 0.8}{0.8} = 16.97\% \quad (17)$$

通过对比可以看出,拟合后计算的腐蚀深度的准确度有了明显的提高。

3.2 方差分析

为了检验回归模型的稳定性和误差,对结果还要进行方差分析。以表 1 中的数据为实验结果真值 Y ,以表 1 中的时间值带入回归方程进行拟合运算,计算的数据为计算值 $\bar{Y}$,则可以计算出对应的均值:

$$A_Y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_{1i} = 3.3607 \quad A_{\bar{Y}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_{2i} = 3.3618 \quad (18)$$

对应的方差为:

$$S_Y^2 = 0.1871 \quad S_{\bar{Y}}^2 = 0.1664 \quad (19)$$

根据数理统计的方法进行正态双总体方差统计假设检验,设 $H_0: \sigma_Y = \sigma_{\bar{Y}}$,则有统计量:

$$F = \frac{S_Y^2}{S_{\bar{Y}}^2} = \frac{0.1664}{0.1871} = 0.8894 \quad (20)$$

当显著性水平为 5%,自由度为 11 时,通过查找正态双总体方差 F 分布表得:

$$F(d) = 3.53$$

$$\text{所以, } F(d) = 3.53 > F = 0.8894 \quad (21)$$

故在 5% 显著性水平下,接受 $H_0: \sigma_Y = \sigma_{\bar{Y}}$,这说明利用回归方程计算出来的温差的方差与实验测定的温差的方差无显著性差异。

3.3 均值分析

用正态双总体均值检验实验得出数据的均值和计算出数据的均值是否有显著性差异。设 $H_0: \mu_Y = \mu_{\bar{Y}}$,则有统计量:

$$t = \frac{|A_Y - A_{\bar{Y}}|}{\sqrt{\frac{1}{n_Y} + \frac{1}{n_{\bar{Y}}} \cdot S^*}} = \frac{|3.3607 - 3.3618|}{\sqrt{\frac{1}{11} + \frac{1}{11} \times 0.4205}} = 0.0061 \quad (22)$$

$$S^* = \sqrt{\frac{(n_Y - 1)S_Y^2 + (n_{\bar{Y}} - 1)S_{\bar{Y}}^2}{(n_Y + n_{\bar{Y}} - 2)}} = \sqrt{\frac{10 \times 0.1871 + 10 \times 0.1664}{20}} = 0.4205 \quad (23)$$

通过查找正态双总体均值 t 分布表临界值表,当显著性水平为 5%,自由度 $n_{Y_1} = 11, n_{Y_2} = 11$ 。通过查找 t 分布表可得出:

$$t_{0.025} = 2.0860$$

$$\text{所以, } t_{0.025} = 2.0860 > t = 0.1259 \quad (24)$$

故在显著性水平为5%时,接受 $H_0: \mu_Y = \mu_{\bar{Y}}$,说明采用回归方程计算出来的温差,从平均期望上来说,与实验结果无显著性差异,其可信度为99%。

4 结 论

本文提出将线性回归应用飞机隐藏腐蚀热波成像检测,实验证明,从该方法得出的计算值与实验值在显著性水平为5%的时候,完全可以认为二者的方差和均值都没有显著性差异。并且由计算值得出的腐蚀厚度与实际厚度的误差在可接受的范围内。

参考文献:

[1] 王云峰. 老龄飞机的适航维护与管理[J]. 航空安全,

2004,5;25-29.

[2] 薛书文,祖小涛,洪伟铭. 红外热成像无损检测中缺陷深度检测新方法[J]. 激光与红外,2005,35(3):175-176.

[3] Thomas R L, Favro L D, Kuo P K. Thermal wave imaging of hidden corrosion[R]. ADA343638, 1998. 4.

[4] 李晓峰,王建君. 基于非线性回归分析的棉纤维水分快速测量模型[J]. 数学的实践与认识,2004,34(11):64-70.

[5] 汪容鑫. 数理统计[M]. 西安:西安交通大学出版社,2003:174-212.

[6] 张洪济. 热传导[M]. 北京:高等教育出版社,1992:495-499.

强强联手, ILOPE2007 连接亚欧光电市场

ILOPE2007(第十二届中国国际激光光电子及光显示产品展览会),作为国务院批准,中国光学光电子行业协会主办的国际性光电行业展览会,将于2007年11月20-22日在北京中国国际展览中心举行。

为促进亚欧光电市场的共同发展,加快我国光电企业走向国际的脚步,经过长时间的友好商谈, ILOPE 主办方与欧盟亚洲投资促进组织(Asia-Invest)达成广泛的共识,在深入合作的基础上确立了长期的战略合作伙伴关系,并将于中国国际光电周暨第十二届中国国际激光光电子及光显示产品展览会期间共同举办亚欧光电企业投资洽谈会。(www.asiainvest-leap.com)

欧盟亚洲投资促进组织(Asia-Invest)于1997年启动,一直致力于促进和支持欧盟组织成员与亚洲企业的商业合作。举办亚欧光电企业投资洽谈会,是欧盟亚洲投资促进组织连接亚欧光电市场的一项重要活动。欧盟亚洲投资促进组织看重 ILOPE 较强的组织性、针对性、系统性以及在光电行业不可替代的影响力,最终选择与顶级光电产品综合展览会 ILOPE 强强联手,相信这将是亚欧光电行业的又一大盛事。

在欧盟组织的大力支持下,此次活动得到了各国内国外行业组织及中国光学光电子行业协会(COEMA)、法国国家光学光电子贸易商会(AFOP)、意大利商会(Consorzio Italiasia Industrial Relations)、爱沙尼亚工商业协会(ECCI)、立陶宛工业协会(LINPRA)、英国光电子行业协会(Photonics Cluster UK)、波兰光学机械工业协会(Poland Chapter of SPIE)的大力支持,主要合作方德国光学精密

机械协会(SPECTARIS)将组织由近40家欧盟光电企业组成的代表团,于展会期间与中国光电企业展开面对面的交流与洽谈。

较强的针对性和预选性,是此项目不同于任何其他光电经贸洽谈会的最大特点。主办单位将于展会前期汇总报名参会企业的需求与合作方向,并在此基础上与合作单位 Asia-Invest Leap 进行充分的沟通,针对中欧双方企业提出的合作需求,在充分筛选的基础上确定参会企业。作为交流洽谈的桥梁,主办方将向确定的参会公司提供与会其他公司的详细介绍、合作需求及合作意向,为参会企业预先选择洽谈对象提供详细充分的资料。这将大大提高本次光电企业洽谈会的效率,为参会企业在短时间内有针对性地接触更多有合作意向的欧盟光电企业打造更加便利的平台。

此次活动面向亚欧光电行业的中小企业,意在进一步加深已有的密切合作关系,更致力于发展中欧光电企业新的合作,共同促进中欧光电行业及领域的进步。相信 ILOPE2007 将在其一贯具有的权威性、强大市场影响力下,为国内外需要寻求外向客户的光电企业提供一个无可替代的商务投资平台。

敬请咨询:

北京华港展览有限公司 方芳小姐 李澍先生

电话:86-10-84600344/84600329

传真:86-10-84600325/84600346/84600755

电子邮件:Fangfang@ciec-expo.com

Lishu@ciec-expo.com

网 址:www.ilope-expo.com

www.asiainvest-leap.com