

文章编号: 1672-8785(2013)02-0016-06

基于红外热图像的故障 诊断方法综述

戴文远

(东北大学机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110004)

摘 要: 作为一门新兴的无损检测技术, 红外故障诊断技术近几年得到了飞速发展。与传统的故障诊断相比, 红外故障诊断具有非接触、灵敏度高等一系列优点, 所以它在故障诊断中的应用日益广泛。对于缺陷故障的定量检测问题, 人们已提出了各种方法, 建立了待测缺陷大小与其在红外热图像中亮度高低关系的理论模型。每种方法都有缺点及局限性。对于不同缺陷的定量检测, 至今仍没有一个通用的理论模型。

关键词: 故障诊断; 红外热成像; 无损检测技术

中图分类号: TG115 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2013.02.03

Review of Fault Diagnosis Methods Based on Infrared Thermal Images

DAI Wen-yuan

(College of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: As an emerging non-destructive detection technology, infrared fault diagnosis is developed rapidly in recent years. Compared with the traditional methods, infrared fault diagnosis has a series of advantages such as noncontact and high sensitivity. It is being widely used in the field of fault diagnosis. For the quantitative detection of defects, people has proposed many different methods and established the theoretical model for determining the relation of the defect size to its brightness in infrared thermal images. Each method has its shortcomings and limitation. There is still no a common theoretical model for the quantitative detection of different defects so far.

Key words: fault diagnosis ; infrared imaging ; non-destructive detection technology

0 引言

故障诊断就是在机械设备不解体的情况下, 对设备完成规定工作的能力和影响因素进行判断和预测。故障诊断技术有很多种, 如振动诊断技术、声发射诊断技术、逻辑诊断技术、故障树分析技术以及近几年新兴的红外故障诊断技术等。二战期间, 红外热图技术得到了空前的

发展。上世纪 60 年代, 随着红外热成像技术的迅速发展, 人们开始通过用红外热成像仪探测物体表面温度分布来判断设备的工作状况。于是红外热成像技术逐渐发展成一种新兴的无损检测技术。所谓无损检测技术就是在不破坏或不改变被检测物体 (形状、结构、技术状态及其使用性能) 的前提下, 利用声、电、光、磁等方法检测物体表面有无缺陷以及缺陷类型、大小、位

收稿日期: 2013-01-02

作者简介: 戴文远 (1988-), 男, 辽宁辽阳人, 硕士研究生, 主要从事基于红外热图像的故障诊断研究。

E-mail: 15640398847@163.com

置等的技术手段。红外热成像无损检测技术具有无需耦合、快速实时、检测面积大、检测距离远^[1]、灵敏精确、成像直观、信息丰富和简便经济^[2]等特点。特别是对于高温、高压、带电、高速运转的测试目标,红外热成像无损检测技术可远距离获得待测目标整个表面的温度场图像,取得物体热辐射量的热图像-热谱图。因此红外检测技术受到国内外学者的普遍关注,是分析设备状态、查明故障原因、判断故障部位和预测维修的一种非常有效的技术手段。与其他的无损检测相比,红外检测效率更高,尤其是对于一些新材料(如复合材料)^[3]。

1 缺陷的识别与定量

缺陷的检测方法分为有源检测和无源检测两种。无源红外检测利用待测试件本身的热辐射分布来定位缺陷,无需任何外加热源;有源红外检测利用可控热源对待测试件进行加热,通过观察试件表面热辐射分布来检测缺陷。就目前的理论来看,有源检测法与无源检测法的差别就在于是否给试件加热。与无源检测方法相比,有源检测能够有效减少周围环境温度场变化等因素的影响,从而能够获得良好的检测精度。因此现有的温度高低与缺陷大小之间的理论模型大都建立在有源检测的基础上。而无源检测则主要通过试件在热图像中表现的差异对缺陷进行定性分析,缺陷的大小与其在热图像中的亮度高低之间并没有建立起理论模型。

缺陷的检测主要有:类型检测(当缺陷的导热率小于平板本身的导热率时,可以将缺陷看作是在热流中放置的一个阻碍热流传递的热阻,此类缺陷可以称为热阻型缺陷,与热阻型缺陷相对的是热容型缺陷^[4]);位置检测;大小检测(包括缺陷的深度、面积等参数检测)。

有源检测中的源可分为瞬态源和非瞬态源。瞬态源即非周期性激励源。在瞬态源激励的作用下,试件承受的加热温度较高。非瞬态源采用按正弦曲线规律调制的卤素灯对试件进行周期性加热,所以这种技术又叫做锁相技术^[5]。

由于激励源采用的频率很低,可避免损伤试件,因而非瞬态源检测被广泛应用于受热易损伤的试件检测^[6-8]。与瞬态源检测相比,锁相技术的优点在文献[9,10]中有详细介绍。锁相技术由于采用很低的频率所以测试时间很长。对于不同厚度的待测试件,为了能对待测测试件中的所有缺陷进行全面的检测,激励源必须选择一个恰当的频率。经C. Wallbrink验证,对于10 mm厚的钢板试件,0.02 Hz 是进行缺陷检测的最佳激励频率^[11]。

1.1 缺陷的位置、类型检测

利用温度变化梯度曲线进行缺陷检测^[12],采用函数变换、双精度浮点数转换、滤波、微分对获得的热图像数值矩阵进行一系列处理。根据温度变化梯度曲线的突变情况判断缺陷位置;也可以利用比较图像法,对由红外热像仪得到的待测试件温度场或温度变化曲线与无缺陷试件的温度场或温度变化曲线进行比较。根据比较结果判断缺陷存在的位置,这种方法又称为差动检测法^[13,14]。王艳武提出了根据温度分布曲线数值模拟二维温度场的方法,即由模拟的温度场确定材料内部的缺陷类型^[15]。

1.2 缺陷的大小检测

缺陷大小的检测理论都是利用圆柱体或长方体等规则几何形状对缺陷进行模拟后提出然后通过验证得出的。

1.2.1 瞬态源检测

(1) 纵横比趋于1的缺陷检测

(a) 面积检测

对圆柱体缺陷的面积检测等同于对模拟缺陷孔径的检测。孔径的大小可由得到的红外热图像通过实测得到^[16]。随着孔径尺寸的增大,测量误差会减小。但当设计尺寸为20 mm时,测量误差可高达10%。王艳武通过数值模拟温度场的方法^[17]测量长方体缺陷的长和宽,获得了更好的精度,可准确测量1 mm的长度。上述两种方法中孔径尺寸的测量都是在坐标图像上通过实测得到的,因此有较大的测量误差。Wysocka-Fotek Olga^[18]根据温度对时间的导数确定了缺陷的直径,目前该方法只用于表面缺陷的检测。

(b) 深度检测

目前,人们主要根据能量随时间变化的关系来建立缺陷的深度与温度之间关系的理论模型的。

梅辉等人^[16]对试件加热后,基于缺陷处热辐射强度会发生变化^[19]理论,利用红外热像仪得到各孔缺陷处热辐射强度随时间变化的曲线(见图1)。由图1可知,热辐射强度与孔的深度成反比,而与面积成正比。以某一缺陷为基准,根据其他缺陷的相对热辐射强度峰值的出现时间建立起峰值时间与缺陷深度间的关系(图2)。由于热辐射强度主要反映为温度效应,因此也可采用比较温度法即温差峰值时间测量法^[20]测量缺陷深度。温差峰值时间测量法通过将缺陷处温度场随时间变化的关系式与无缺陷区域温度场随时间变化的关系式相减,求出最大值对应的时间,该特征时间恰是缺陷深度的函数。上述两种方法本质上都是通过能量随时间变化的曲线建立理论模型的。但是对于直径相同的盲孔,孔越深,热辐射强度越低,因而能量随时间变化的时间短;对于深度相同的盲孔,直径越大,热辐射强度越高,因而能量随时间变化较长。因此随着孔深度的增加,测量误差会增加;随着孔的直径增大,测量误差会减小。由于上述两种检测方法的测量精度均会受缺陷尺寸的影响,于是又有了对数温度偏离时间测量方法^[20]。

对数温度偏离时间测量方法就是对温差峰值测量法中的温度场关系式取对数。在对数坐标系内,无缺陷区域在脉冲激励后表面温度随时间成线性变化,线性斜率为 -0.5 。缺陷处会发生偏差,通过比较有缺陷处与无缺陷处的图像,可得出发生偏离的特征时间(该特征时间是孔缺陷深度的函数),从而求得深度。由于这种测量方法是比较斜率的变化,所以检测精度不受缺陷尺寸大小的影响。由于其与温差峰值时间测量法一样,都要以无缺陷区域作为参考区域,选择的参考区域会影响测量结果,增加随机误差。作为二者的改进型,不用选取参考区域。表面温度的对数二阶微分峰值时间测量方法^[20],通过对温度分布函数在对数坐标下求二阶导数和和对

间求一阶、二阶导数得到峰值时间(该特征时间是孔缺陷深度的函数)。因此,表面温度的对数二阶微分峰值时间测量方法有良好的重复性,适用于工程化检测。在已知被检测试件的热扩散系数的条件下,可根据特征时间来计算缺陷深度。但在实际检测中,由于复合材料及其制作工艺的复杂性,特征时间函数中的热扩散系数不易获得,这时可采用单点标定法^[20]或最小二乘拟合法^[21]建立特征时间与深度的关系式。所谓单点标注法就是选择某一已知缺陷作为基准,利用特征时间与深度之间的比例关系得出要测量孔的深度。单点标定法有两大主要误差^[20]:一是选择某一已知缺陷的特征时间作为参考,随机性大,随机误差会直接影响测量的准确性;二是缺陷深度与特征时间有比例关系是建立在一维热传导模型的基础上的,而实际被检测的试件不可避免地会受到三维热扩散的影响,因而就不会严格遵守原有的比例关系。故人们常采用最小二乘拟合法建立特征时间与缺陷深度之间的关系^[21]。上述的温差峰值时间测量法、对数温度偏离时间测量方法和表面温度的对数二阶微分峰值时间测量方法,只分析了试件与缺陷之间是空气界面的情况。Zing Zeng 和 Li Chunguang 通过在模拟缺陷孔中塞入不同种类的材料对各种不同的界面进行了模拟。经研究发现,温差峰值时间测量法的精度受界面变化影响较大,不适用于非空气界面条件下的缺陷检测,而另外两种方法则受界面变化影响不大^[22]。

实际的工程中,需要检测的缺陷都是不规则的^[23]。Zhi Zeng 通过平底楔形缺陷模拟建立了较为贴合实际的缺陷深度检测理论模型^[24],提出了检测缺陷深度的新方法。该方法无需参考区域,从而避免了随机性误差;无需通过求导求峰值,故避免了峰值所带来的检测误差。然而仅仅检测深度大小满足不了工程上的需要,还需要知道倾斜角度等参数。只有建立起缺陷的三维空间数学模型,才是真正意义上的检测^[25]。于是 Abidin IZ 基于插槽模拟缺陷,提出了检测缺陷孔倾斜角度的方法^[26]。该方法的不同之处在于加热过程中观察缺陷处的温度变化梯度,不像其它方法在加热后进行试验。

Abidin IZ 通过实验证明在缺陷孔径一定的情况下, 缺陷处的温度变化梯度与缺陷深度无关, 只与倾斜的角度有关。倾斜角度越大, 温度变化梯度就越大。在温度与时间图像中反映为曲线的斜率大。利用此正比关系可对角度进行测定。

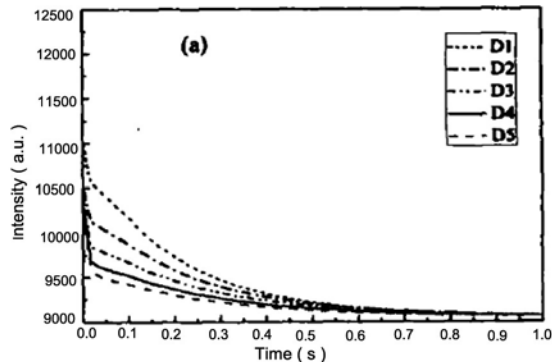


图1 5种不同深度孔缺陷的辐射强度随时间变化的曲线

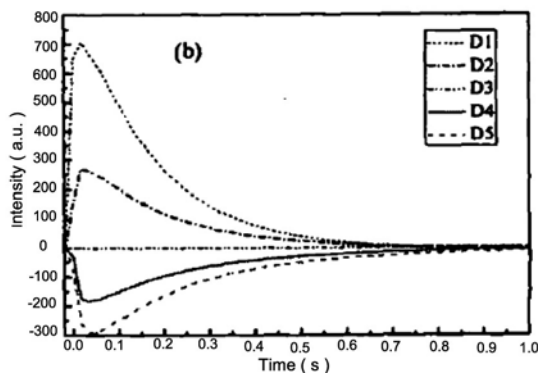


图2 相对强度随时间变化的曲线

(2) 大纵横比缺陷的大小检测

上述缺陷的检测理论都建立在模拟缺陷的纵横比趋于1的情况下, 激励源常采用闪光灯。而经研究发现^[5], 对于给定的深度, 探测大而窄的缺陷要难于探测小而宽的缺陷。因而对于纵横方向尺寸相差较大的模拟缺陷, 需采用涡流脉冲对试件进行加热^[27,28]。

对于长而窄的裂纹, 纵横比很大, 所以检测通常采用涡电流作为激励源对试件进行加热。有缺陷的部位会改变电流的传播方向, 使得裂纹处的热量变化在热图像中反映出来。这种方

法检测时间短, 而且灵敏度极高^[27]。因此, 涡电流激励源检测方法被广泛应用于探测试件表面及内部的裂缝缺陷。经 Yang Suixian 等人验证, 当产生涡电流的感应器与待测裂缝垂直时, 涡电流激励法的检测结果更加精确^[29]。在此理论上, Liang Cheng 等人根据加热后缺陷处的能量随时间变化的曲线定量分析了碳纤维材料表面模拟裂纹缺陷的深度和宽度^[28]。对于铁磁和非铁磁材料, 非铁磁材料中电流产生的热变化对裂缝几何形状更加敏感^[30]。

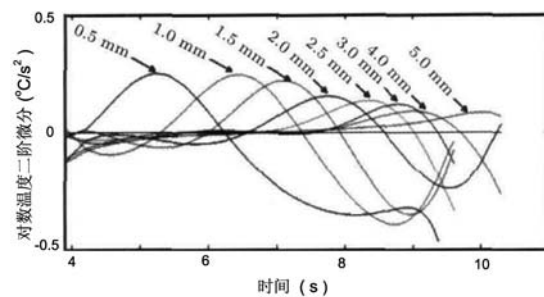


图3 不同深度缺陷的对数温度二阶微分峰值时间曲线

1.2.2 非瞬态源检测

当热波遇到缺陷时, 会发生反射。反射的热波与表面温度叠加使温度上升, 从而被热像仪捕捉。锁相技术在热稳定的情况下进行缺陷检测, 加热不均不会影响检测结果。Kim Ghiseok^[31]等人首先提出将锁相技术用于探测缺陷, 而后 Roberto Montanini^[32]在试件加热温度达到稳定时, 基于相位的数学模型建立温度与加热时间、缺陷深度之间的关系, 利用相位图获得信息, 从而检测出缺陷的孔径大小。由于检测孔径小时没有利用缺陷处的辐射能, 因此孔径的测量精度不受材料表面辐射系数变化的影响。但随着缺陷距试件上表面距离的增大, 检测误差会明显增大。这是因为锁相技术中只有当缺陷孔半径与深度比远大于1时缺陷才容易被发现^[33], 故该方法不适用于检测距表面超过3 mm的缺陷。

检测长而窄的表面缺陷时, 缺陷处的热量会因热扩散效应被削弱, 比热源在其它点上直

接产生的热量小很多,以至于很难分辨该热量的微弱变化。于是有人采用了尾部加热法^[34],即传导模式。检测材料内部缺陷时,利用热传导模式也可以得到更加精确的结果^[5]。

1.3 检测模式

有源红外检测分为反射模式和传导模式两种。反射模式是加热和检测都在试件的一侧进行。由于只需试件的一面就可检测,反射模式被广泛应用。传导模式是在试件的一侧加热,在另一侧观察获取数据。由于实际检测的试件不是各向同性的均质体,热传导模式可避免三维热扩散所带来的影响。因此当试件的两面都可进行检测时,应优先选用传导模式。

有源红外缺陷检测中,为了消除加热不均效应及提高缺陷探测能力,可采用奇异值分解法^[35]对得到的红外热图像进行处理^[36]。

2 总结

在现有理论条件下,人们只进行了缺陷检测的正问题研究,即通过缺陷模拟建立起缺陷与温度之间的理论模型。缺陷的纵横比对缺陷检测有极大的影响^[5],当纵横比趋于1时,检测能力会得到提高。故人们大多采用圆柱形进行缺陷模拟。但该影响因素的研究一直处于空白。实际工程中,需检测缺陷的形状通常是不规则的,在这种通过规则柱形模拟缺陷建立的热图像中,缺陷处亮度的高低与缺陷大小关系的理论模型是否成立仍值得商榷。根据表面温度测量结果准确识别缺陷尺寸的理论模型尚需进一步研究。

参考文献

- [1] 姜长胜. 红外热波无损检测序列图像的增强方法[J]. *无损检测*, 2007, **29**(8): 440-442.
- [2] Jadin M S, Soib T. Recent Progress in Diagnosing the Reliability of Electrical Equipment by Using Infrared Thermography[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2012, **55**(4): 236-245.
- [3] Hung Y Y, Chen Y S. Review and Comparison of Shearography and Active Thermography for Non-destructive Evaluation[J]. *Materials Science and Engineering R-Reports*, 2009, **64**(5-6): 73-112.
- [4] Sahnoun S, Belattar S. Thermal Non-destructive Testing Study of a Circular Defect in Plane Structure[J]. *British Journal of NDT*, 2003, **8**(8): 115-121.
- [5] Montanini R, Freni F. Non-destructive Evaluation of Thick Glass Fiber-reinforced Composites by Means of Optically Excited Lock-in Thermography[J]. *Composites Part A-Applied Science and Manufacturing*, 2012, **43**(11): 2075-2082.
- [6] Wu D T, Busse G. Lock-in Thermography for Non-destructive Evaluation of Materials[J]. *Revue Generale De Thermique*, 1998, **37**(8): 693-703.
- [7] Meola C, Carlomagno G M. Non-destructive Control of Industrial Materials by Means of Lock-in Thermography[J]. *Measurement Science and Technology*, 2002, **13**(10): 1583-1590.
- [8] Meola C, Carlomagno G M, Giorleo L. The Use of Infrared Thermography for Materials Characterization[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, **155**: 1132-1137.
- [9] Maldague X, Marinetti S. Pulse Phase Infrared Thermography[J]. *Journal of Applied Physics*, 1996, **79**(5): 2694-2698.
- [10] Maldague X, Galmiche F, Ziadi A. Advances in Pulsed Phase Thermography[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2002, **43**(3-5): 175-181.
- [11] Wallbrink C, Wade S A, Jones R. The Effect of Size on the Quantitative Estimation of Defect Depth in Steel Structures Using Lock-in Thermography[J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, **101**(10): 1-8.
- [12] 项安, 徐雪松, 贾剑平. 焊接温度场热图像的 MATLAB 软件分析技巧[J]. *南昌航空工业学院学报*, 1999, **13**(3): 17-19.
- [13] 王福权, 陈伟民. LED 隧道灯的红外热图像故障诊断法[J]. *照明工程学报*, 2011, **22**(6): 110-114.
- [14] 刘陶, 李运祯, 龚镇. 基于红外热图像的电路板故障检测[J]. *电子技术*, 2008, **4**: 65-67.
- [15] 王艳武, 杨立, 孙丰瑞. 材料内部热阻热容型缺陷的红外检测模拟研究[J]. *激光与红外*, 2006, **3**(8): 658-660.
- [16] 梅辉, 成来飞等. 材料表面下缺陷的红外热波成像检测[C]. 中国力学学会. 第十五届全国复合材料学术论文(下册), 2008: 910-913.
- [17] 王艳武, 杨立, 孙丰瑞. 材料内部热阻热容型缺陷的红外检测模拟研究[J]. *激光与红外*, 2006, **3**(8): 658-660.
- [18] Wysocka-Fotek O, Oliferuk W, Maj M. Reconstruction of Size and Depth of Simulated Defects in Austenitic Steel Plate Using Pulsed Infrared Thermography[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2012, **55**(4): 363-367.

- [19] Gryns S. Analysis of Temperature-rise of the Material Surface over Hidden Defect Thermally Stimulated in Active Thermography[J].*Przeglad Elektrotechniczny*, 2012, **88**(9A): 235–238.
- [20] 霍雁, 张存林. 碳纤维复合材料内部缺陷深度的定量红外检测 [J].*北京航空航天大学学报*, 2012, **61**(14): 1–6.
- [21] Sun J G. Analysis of Pulsed Thermography Methods for Defect Depth Prediction [J].*Journal of Heat Transfer-transactions of the Asme*, 2006, **128**(4): 329–338.
- [22] Zeng Zhi, Li Chunguang. Depth Prediction of Non-air Interface Defect Using Pulsed Thermography[J].*NDT and Einternational*, 2012, **48**: 39–45.
- [23] Wally G, Oswald-Tranta B. The Influence of Crack Shapes and Geometries on the Result of the Thermomagnetic Crack Detection[C].*Conference on Thermosense XXIX. Orlando FL, SPIE-INT SOC Optical Engineering*, 2007: 54111–54111.
- [24] Zhi Zeng, Ning Tao. Specified Value Based Defect Depth Prediction Using Pulsed Thermography[J].*Journal of Applied Physics*, 2012, **112**(2): 1–6.
- [25] Mukriz I, Tian G Y, Li Yong. 3D Transient Magnetic Field Mapping for Angular Slots in Aluminium[J].*Insight*, 2009, **51**(1): 21–24.
- [26] Abidin I Z. Quantitative Evaluation of Angular Defects by Pulsed Eddy Current Thermography[J].*NDT and Einternational*, 2010, **43**(7): 537–546.
- [27] Zenzinger G, Bamberg J, Dumm M. Crack Detection Using EddyTherm[J]. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2005, **760**: 1646–1653.
- [28] Cheng Liang, Tian Guiyun. Surface Crack Detection for Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) Materials Using Pulsed Eddy Current Thermography[J].*IEEE Sensors Journal*, 2011, **11**(12): 3261–3268.
- [29] Yang Suixian, Tian Guiyun, Abidin I Z. Simulation of Edge Cracks Using Pulsed Eddy Current Stimulated Thermography[J]. *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-Transactions of the Asme*, 2011, **133**(1): 1–6.
- [30] Kostson E, Weekes B, Almond D P. Crack Detection Using Pulsed Eddy Current Stimulated Thermography [J].*Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2011, **1335**: 415–422.
- [31] Kim G, Hong S. Evaluation of Subsurface Defects in Fiber Glass Composite Plate using Lock-in Technique[J].*International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2012, **13**(4): 465–470.
- [32] Montanini R. Quantitative Determination of Subsurface Defects in a Reference Specimen Made of Plexiglas by Means of Lock-in and Pulse Phase Infrared Thermography[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2010, **53**(5): 363–371.
- [33] Lahiri B B, Bagavathiappan S. Quantification of Defects in Composites and Rubber Materials Using Active Thermography[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2012, **55**(2-3): 191–199.
- [34] Meola C. Nondestructive Evaluation of Materials with Rear Heating Lock-in Thermography[J].*IEEE Sensors Journal*, 2007, **7**(9-10): 1388–1389.
- [35] Andrews H C, Patterson C L. Singular Value Decompositions and Digital Image Processing[J]. *IEEE Trans Aoust Speech Signal Process*, 1976, **ASSP-24** (1): 26–53.
- [36] 郭兴旺, 高功臣, 吕珍霞. 基于奇异值分解的红外热图像序列处理 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2006, **32**(8): 937–940.

新闻动态 News

以色列 Elbit 系统公司成功完成 C-MUSIC 系统飞行测试

据 www.asdnews.com 网站报道, 以色列 Elbit 系统公司最近在一架波音 707 飞机上成功地对其研制的商用多光谱红外对抗 (C-MUSIC) 系统进行了一系列飞行测试。结果表明, 用于保护大型喷气式飞机免受肩射式导弹 (MANPADS)

袭击的 C-MUSIC 系统顺利达到预期效果。



□ 岳桢干