

◇ 汪承灏院士八十生辰学术论文 ◇

变厚度多边形蜂窝结构的超声 C 扫描检测方法

周正干^{1,2†} 胡逸雯¹ 章宽爽¹

(1 北京航空航天大学机械工程及自动化学院 北京 100083)

(2 先进航空发动机协同创新中心 北京 100083)

摘要 为了解决变厚度多边形蜂窝结构超声波检测难和检测效率低的问题,采用了灵敏度补偿和多边形扫描路径规划相结合的超声 C 扫描方法进行检测。在扫描检测过程中,一是根据构件厚度变化进行灵敏度补偿,消除因厚度变化而引起的超声信号衰减对检测结果的影响;二是根据构件几何形状对此类构件进行多边形扫描路径规划,减少探头的空扫描范围,提高检测效率。试验结果表明:该检测方法能准确、高效地检出变厚度多边形蜂窝结构中的缺陷。

关键词 超声检测, 蜂窝结构, 灵敏度补偿, 多边形扫描路径规划

中图法分类号: TB553

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2018)01-0028-06

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2018.01.005

Ultrasonic C-scan method of variable thickness polygonal honeycomb structure

ZHOU Zhenggan^{1,2} HU Yiwen¹ ZHANG Kuanshuang¹

(1 School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

(2 The Collaboration Innovation Center for Advanced Aero-Engine CICAEE, Beijing 100083, China)

Abstract In order to solve the problem of ultrasonic detection of polygonal honeycomb structure and low detection efficiency, an ultrasonic C-scanning method combining sensitivity compensation and polygonal scanning path planning is adopted. Firstly, sensitivity compensation is made according to the thickness variation of the components to eliminate the influence of ultrasonic signal attenuation caused by thickness change during the test. Secondly, polygonal scanning path planning method is carried out according to the geometrical shape of the component, which can reduce invalid scan area of the probe and improve the efficiency. The results show that this method can accurately and efficiently detect the defects in variable thickness polygonal honeycomb structure.

Key words Ultrasonic testing, Honeycomb structure, Sensitivity compensation, Polygonal scanning path planning method

2017-10-30 收稿; 2017-12-01 定稿

作者简介: 周正干 (1967-), 男, 湖南湘潭人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 超声检测技术。

† 通讯作者 E-mail: zzhenggan@buaa.edu.cn

1 引言

目前,变厚度多边形蜂窝结构常用于航空部件的结构设计中^[1-2]。为保证飞行器能可靠地工作,必须开展变厚度多边形蜂窝结构的超声C扫描检测方法研究。吴思源等^[3]采用超声波测厚获取工件厚度值的方法来引导检测程序确定缺陷的识别区域,解决了变厚度航空锻件的C扫描检测技术难点。江健等^[4]利用超声探头测距和仿形方法获得零件CAD模型,并实现了基于零件CAD模型的实时灵敏度补偿方法。周正干等^[5]将超声信号的衰减按点位进行补偿,用一种基于超声波C扫描的增益补偿方法解决了变厚度铝板超声检测难的问题。然而,国外波音和GE公司先进的超声波C扫描设备已经能够对一些变厚度零件进行精确的C扫描检测^[6-7]。但针对变厚度多边形蜂窝结构的超声C扫描,传统的C扫描方法一般只能对被检测工件进行矩形区域扫查,而矩形扫查路径规划方法将会增大空扫描范围,使检测效率降低。

针对变厚度多边形蜂窝结构的超声C扫描检测,本文提出了一种基于灵敏度补偿和多边形扫查路径规划相结合的方法,主要研究在保证检测准确度的基础上,如何准确地补偿因厚度变化而引起的超声波信号衰减及如何高效地进行多边形构件的

超声C扫描检测。

2 变厚度蜂窝结构超声穿透法检测原理及灵敏度补偿方法

2.1 变厚度蜂窝结构超声穿透法检测原理

由于变厚度蜂窝结构对超声波衰减严重,且用同一灵敏度进行超声检测时,由厚度变化引起的超声信号衰减与由缺陷引起的超声信号衰减无法区别,会引起对缺陷的误判。因此,在喷水穿透法检测过程中,需要进行灵敏度自动补偿。在穿透法超声检测中,超声波的声强 I 、声压 P 、探伤仪软件界面显示的穿透波幅值 H 之间,存在如下关系:

$$I \propto P^2 \propto H^2, \tag{1}$$

即穿透波幅值反映了超声波的声强和声压大小。因此,利用超声波穿透法进行探伤的本质就是依据被检试样的穿透波能量衰减变化来判断缺陷情况^[8]。

用喷水穿透法检测变厚度蜂窝结构的原理如图1所示,图1(a)、(b)、(c)中1和2分别表示超声波发射探头和接收探头,图1(d)、(e)、(f)分别对应表示图1(a)、(b)、(c)中2号探头接收到的穿透波幅值,横轴 x 表示两个探头间的距离。当检测厚度为 p 且构件内部无缺陷时,穿透波幅值为 h_1 ; 当检测厚度为 p 且构件内部有缺陷时,穿透波幅值为 h_2 ($h_2 < h_1$);

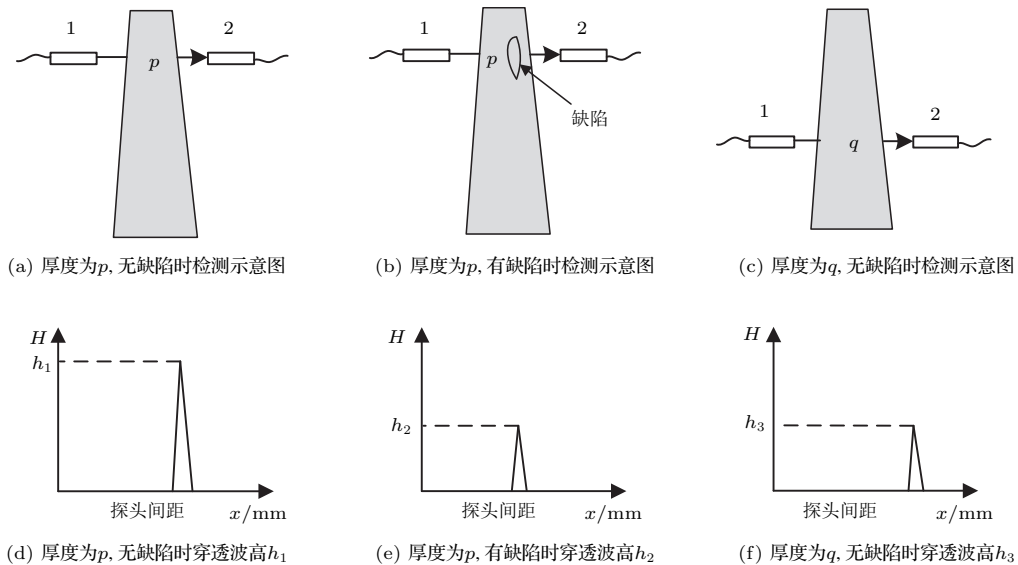


图1 变厚度蜂窝结构检测原理图

Fig. 1 Inspection principle diagram of variable thickness honeycomb structure

当检测厚度为 q ($q > p$) 且构件内部无缺陷时, 穿透波幅值为 h_3 ($h_3 < h_1$); 当 h_2 与 h_3 相近时, 就可能将图1(c)内部判断为有缺陷。这是因为厚度的增加导致了声衰减的增加, 从而产生了与缺陷衰减相同的效果。因此, 需要采用合适的补偿方法来避免对缺陷的误判。

2.2 灵敏度补偿方法

为解决构件厚度变化影响超声信号的问题, 采用灵敏度补偿法对超声信号进行补偿。灵敏度补偿是指: 在检测过程中, 通过调整增益, 改变接收信号的幅值, 对因厚度造成的衰减进行补偿^[5]。本文介绍的补偿方法是指在软件中进行自动补偿, 即不调整探伤仪的增益值, 以穿透波幅值作为补偿基准, 对试样变厚度区域的信号幅值进行补偿, 从而影响C型图像显示结果。

设 P_0 表示超声波在水与材料交界面处的声压, P_x 表示超声波在材料中传播距离 x 后的声压, 则

$$P_x = P_0 \cdot e^{-\alpha_0 x}, \quad (2)$$

式(2)中 α_0 为衰减系数。在实际检测中, 常用分贝(dB)衰减量表示超声波声压从 P_0 到 P_x 的衰减量^[9]:

$$\Delta \text{dB} = 20 \lg(P_0/P_x) = 20\alpha_0 \lg e \cdot x = kx, \quad (3)$$

即在理想情况下, 超声波衰减量的变化与超声波在材料中传播距离成线性关系。设检测厚度为 p 时超声波透射声压为 P_1 , 对应穿透波幅值为 H_1 , 检测厚度为 q ($q > p$) 时超声波透射声压为 P_2 , 对应穿透波幅值为 H_2 , 根据式(1)和式(3), 超声波衰减量的变化量 ΔdB 与穿透波幅值有如下关系:

$$\Delta \text{dB} = 20 \lg(H_1/H_2), \quad (4)$$

即灵敏度补偿值与补偿前后位置的穿透波幅值比值的对数成正比。由式(4)可得

$$H_1 = H_2 \times 10^{\Delta \text{dB}/20}. \quad (5)$$

在进行灵敏度补偿时, 确定一个初始位置(通常选择试样厚度最小且内部完好的位置)作为补偿参考点, 调整探伤仪增益, 使穿透波幅值 H_1 达到探伤仪满屏的80%, 并以 H_1 作为该次检测基准; 以能检测到检测标准要求发现的最小缺陷确定一个穿透波幅值 H_2 , 当幅值小于 H_2 时, 调整探伤仪增

益, 使幅值达到 H_1 , 此时的增益变化值 ΔdB 即为补偿值。

对截面为不规则变厚度构件, 当试样在 z 方向上的曲率变化不大时, 相邻两补偿点之间的厚度可视为线性变化, 因此采用线性插值法计算构件上相邻两补偿点间各点的灵敏度补偿值。设相邻两点为 n 和 $n+1$, P 为两点间任一点, 如图2所示, 其对应灵敏度补偿值为 ΔdB_n 、 ΔdB_{n+1} 、 ΔdB_p , 对应 z 方向坐标分别为 z_n 、 z_{n+1} 和 z_p , 则

$$\Delta \text{dB}_p = \Delta \text{dB}_n + \frac{\Delta \text{dB}_{n+1} - \Delta \text{dB}_n}{z_{n+1} - z_n} (z_p - z_n). \quad (6)$$

由于C型成像是将闸门内A波峰值以颜色映射的方式表现出来, 因此在检测软件中按式(5)的方式进行补偿计算, 以颜色映射的方式呈现补偿后的C型图像。

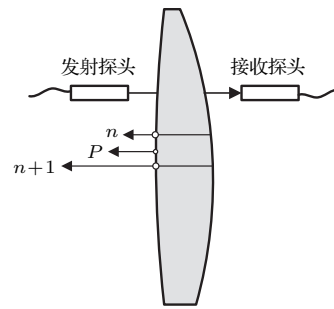


图2 截面变厚度构件灵敏度补偿示意图

Fig. 2 Sensitivity compensation diagram of component with variable thickness

3 多边形蜂窝结构超声C扫描检测路径规划方法

对于多边形蜂窝结构, 需要针对其特殊几何形状进行多边形扫描路径规划。在进行多边形扫描路径规划时, 需要利用顶点信息来构建多边形^[10], 通常采用多边形扫描线算法进行轨迹计算。

在实际扫描中, 设 x 轴为扫描轴, z 轴为步进轴。扫描线算法的基本思想是: 设扫描间距为 s , 根据顶点中 z 方向上的最小值 z_{\min} 和最大值 z_{\max} 确定扫描范围(z_{\min} , z_{\max}), 则总扫描行数为 $[(z_{\max} - z_{\min})/s] + 1$; 在待扫描区域按 z 方向进行顺序扫描, 并依次计算扫描线与多边形的相交区间; 当多边形所包括的所有扫描线都扫描完成后, 多边形填充完成, 也就完成了多边形的扫描路径规划。

扫描线算法首先需求出扫描线与多边形每一条边的交点,然后将交点进行配对,以获得该行有效的填充空间;再对该空间进行逐点赋值,以确定探头的运动点位;为保证超声信号传输的完整和稳定,对发射探头和接收探头在 z 轴方向上进行对齐。依次对每条扫描线都进行上述处理,填充完成整个多边形区域,即实现了多边形扫描路径规划。例如,对图3所示的三角形扫描区域,设间距 $s = 1$,则对应区域的总扫描行数为7;然后按照从 $z = 1$ 至 $z = 7$ 的顺序进行扫描并求交,例扫描线 $z = 3$ 与三角形交点依次为 P 和 Q ,则该行探头运动的区域为线段 PQ ;所有扫描线都扫描完成后,即完成多边形扫描路径规划。

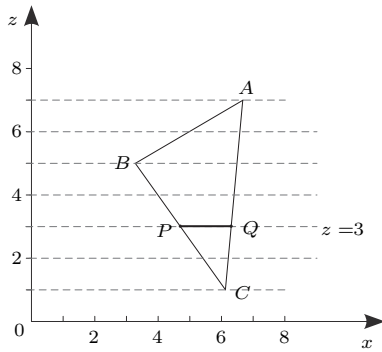


图3 多边形扫描线算法例图

Fig. 3 Example of polygon scan line algorithm

在进行求交运算时,观察多边形与扫描线的交点,可以发现:相邻的扫描线与同一条边的交点存在步进关系。设多边形某条边所在直线方程是 $ax + bz + c = 0$,直线的斜率为 $k = -a/b$,扫描线 z_i 和下一条扫描线 z_{i+1} 与该边的两个交点分别是 (x_i, z_i) 和 (x_{i+1}, z_{i+1}) ,则

$$ax_i + bz_i + c = 0, \quad (7)$$

$$ax_{i+1} + bz_{i+1} + c = 0. \quad (8)$$

由式(7)和式(8)可得

$$x_{i+1} - x_i = -b(z_{i+1} - z_i)/a. \quad (9)$$

设当前扫描间距为 s (s 为常数),则扫描线有如下关系:

$$z_{i+1} - z_i = s. \quad (10)$$

由式(9)和式(10)可得 $x_{i+1} - x_i = -s \times (b/a)$,即 $\Delta x = s/k$,从而得出结论:设当前扫描线 z_i 与多

边形的某一边界的交点已经通过求交计算得出,交点坐标为 (x_i, z_i) ,则扫描线 z_{i+1} 与该边界交点坐标为 $(x_i + \Delta x, z_i + s)$ 。利用了边的连续性特点,在求交过程中,避免了反复的逐边判断和计算过程,减小了程序的计算量。

4 变厚度多边形蜂窝结构超声C扫描检测试验

试验所用的五轴大型喷水超声C扫描系统由机械系统、电气控制系统、超声系统、喷水系统和软件系统构成。机械系统总体构成如图4所示, x 轴为扫描轴, z 轴为步进轴, y 轴用来调整发射和接收探头间的距离, z_1, z_2 轴底端的连接 A/B 轴用来调整发射和接收探头的位置和姿态。

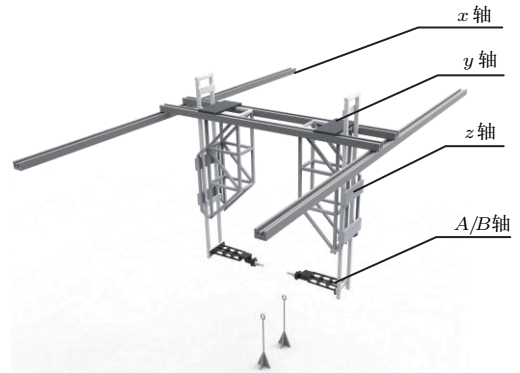


图4 机械系统总体构成示意图

Fig. 4 Composition of mechanical system

在检测系统C扫描软件中增加上述灵敏度补偿功能和多边形扫描路径规划功能,然后对某变厚度多边形蜂窝夹层结构的零件进行检测。该试样结构示意图如图5所示,试样为一个不规则五边形,由上下表面蒙皮和蜂窝芯构成,表面有一个预埋缺陷。对截面变厚度的试样进行检测时,两个灵敏度补偿点之间距离越短,其区间厚度变化越接近线性,补偿结果也越精确。由于该试样截面曲率变化不大,可选取 a 点作为补偿参考点,对 b, c 两个厚度变化点进行灵敏度补偿。

检测开始前,将机械系统回零以保证每次检测的零位一致;将试样放置在发射探头和接收探头之间,并调整水距使接收信号质量最佳。根据试样的几何形状特点,首先用上文提到的多边形扫描路径规划法进行扫描路径规划。然后进行灵敏度补偿:

将探头移动到试样完好且厚度最薄处(a 点),调整探伤仪增益,使 a 点穿透波幅值 H_1 达到满屏的80%左右;移动探头至 b 点,由于 b 点厚度增加,穿透波幅值下降,因此调整增益,使 b 点穿透波幅值达到 H_1 ,记录下此时 b 点与 a 点增益差值,并将差值记录到C扫描软件中;同理,对 c 点做上述处理,但 c 点相对于 b 点厚度减小,因此增益差值为负;由于截面曲率变

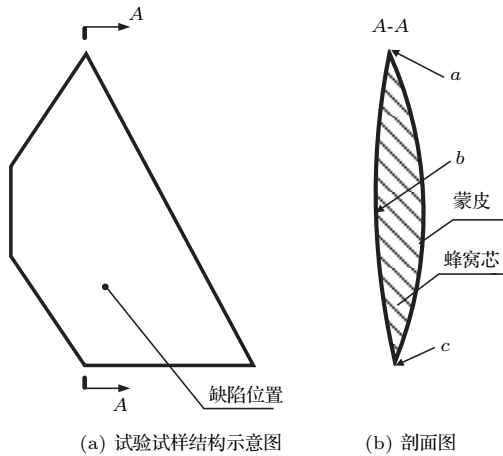


图5 变厚度蜂窝结构示意图

Fig. 5 Honeycomb structure of sample with variable thickness

化不大,其上每相邻两个补偿点之间所有点的灵敏度补偿值可由线性插值法得出。最后根据检测要求与试样特点,设置激励参数和扫描参数。具体检测流程如图6所示。

试样的C扫描检测结果如图7所示。红色方框中显示的是预埋缺陷,缺陷大小为 $\phi 11$ mm,可以看出缺陷的识别度较高,厚度变化没有对缺陷的判别造成影响。经过试验比较,在200 mm/s的扫描速度下,如果对该多边形试样用包络矩形进行扫描需要约130 min,而使用多边形扫描路径规划方法,扫描时间仅约为60 min,检测效率提高了一倍。由此看来,进行多边形扫描路径规划方法研究对提高多边形零件的检测效率,有着实际意义。

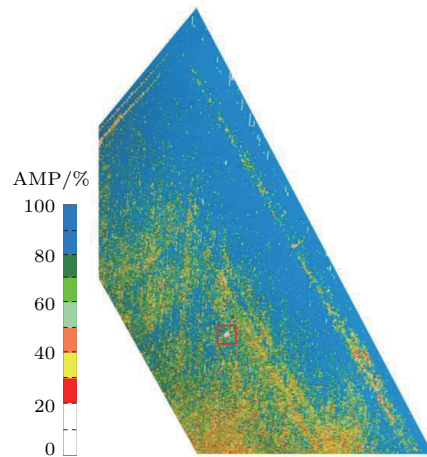


图7 试样C扫描图

Fig. 7 C-scan results of the sample

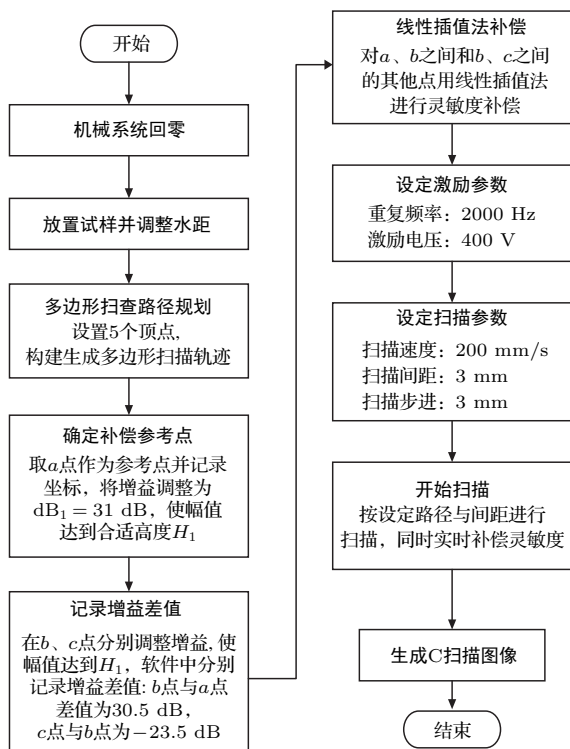


图6 检测过程流程图

Fig. 6 Flow chart of detection process

5 结论

(1) 具有灵敏度补偿和多边形扫描路径规划的超声C扫描方法适用于变厚度多边形蜂窝结构的检测,检测结果准确可靠,检测方法易于实现。

(2) 该灵敏度补偿方法能在不需要零件CAD模型的情况下,在检测过程中用线性插值法进行实时灵敏度补偿;对截面曲率变化不大的变厚度蜂窝结构检测结果准确可靠,而针对截面曲率变化较大的构件,还需要研究其他合适的灵敏度补偿方法。

(3) 经实际测试,该多边形扫描路径规划方法相比传统的矩形扫描路径规划方法,检测效率有显著提高;对某些扫描区域形状近似三角形的大型变厚度多边形零件,效率可提高一倍以上。

参 考 文 献

- [1] 史俊伟, 刘松平, 程文礼. 复合材料蜂窝夹层结构制件的超声可视化无损检测[J]. 无损检测, 2015, 37(3): 39-43, 46.
Shi Junwei, Liu Songping, Cheng Wenli. Visible ultrasonic nondestructive testing methods for composite honeycomb sandwich structure[J]. Nondestructive Testing, 2015, 37(3): 39-43, 46.
- [2] Haase W, Maurer A. Latest developments on industrial ultrasonic testing of aircraft components[C]. Proceedings of the World Conference on Non-Destructive Testing, 2004.
- [3] 吴思源, 周晓军, 李雄兵, 等. 变厚度航空锻件超声C扫描技术研究[J]. 传感技术学报, 2006, 19(4): 1052-1055.
Wu Siyuan, Zhou Xiaojun, Li Xiongbing, et al. Study on ultrasonic C-scan technique for variation thickness aviation forged piece[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2006, 19(4): 1052-1055.
- [4] 江健, 周晓军, 杜兴吉, 等. 变厚度构件超声透射法检测中的灵敏度自动补偿技术研究[J]. 传感技术学报, 2005, 18(4): 841-844.
Jiang Jian, Zhou Xiaojun, Du Xingji, et al. Research on automatic sensitivity compensation technology on ultrasonic transmission method of variable thickness part[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2005, 18(4): 841-844.
- [5] 周正干, 王鑫, 章宽爽, 等. 基于超声C扫描的变厚度构件扫查路径规划和增益补偿检测法[J]. 无损检测, 2015, 37(6): 15-18.
Zhou Zhenggan, Wang Xin, Zhang Kuanshuang, et al. Trajectory planning and gain compensation method for ultrasonic C scan of variable thickness parts[J]. Nondestructive Testing, 2015, 37(6): 15-18.
- [6] Rutten J. Mufti Aix automated ultrasonic inspection systems for new AIRBUS A380 composite glare panels[C]. Proceedings of Aerospace Testing Hamburg, 2004.
- [7] Matec Instrument Companies. Large gantry system[EB/OL]. [2017-10-25]. <http://www.matec.com>.
- [8] 黄志刚, 白基成, 周正干, 等. 超声波C扫描系统研制及其关键技术[J]. 军民两用技术与产品, 2007(12): 40-42.
Huang Zhigang, Bai Jicheng, Zhou Zhenggan, et al. The establishment of ultrasonic C scan system and program development[J]. Dual Use Technologies & Products, 2007(12): 40-42.
- [9] 《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材》编审委员会. 超声检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [10] 张玉芳, 刘君, 彭燕. 一种改进的扫描线多边形填充算法[J]. 计算机科学, 2005, 32(6): 164-166.
Zhang Yufang, Liu Jun, Peng Yan. An improved scan line polygon filling algorithm[J]. Computer Science, 2005, 32(6): 164-166.