doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.04.027

弹性材料后屈曲形变参数和弹性模量测定仪*

姜　松[1]　姜奕奕[2]　施小燕[1]　曾昕鑫[1]　管国强[1]
(1.江苏大学食品与生物工程学院,镇江 212013;2.江苏大学京江学院,镇江 212013)

摘要:弹性材料后屈曲形变参数和弹性模量是表征材料力学特性的重要参数。为了提高弹性材料后屈曲形变参数测定精度和自动化程度以及与弹性模量同时测定,并实现测定仪微型化,综合人机交互技术、PLC 控制技术、直线步进电动机驱动技术、扫描技术、力测量技术和计算机图像处理技术,开发了弹性材料后屈曲形变参数和弹性模量综合测定仪,实现了基于图像处理技术的弹性材料后屈曲形变参数与弹性模量同时测定,也适用于干制直条型食品抗弯能力的评价。考核性实验表明开发的测定仪是可行、可靠的。

关键词:测定仪　弹性材料　压杆后屈曲　弹性模量　形变参数　图像处理
中图分类号:TB302.3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2013)04-0152-05

Detectors for Post-buckling Deformation Parameters and Elastic Modulus of Elastic Materials

Jiang Song[1]　Jiang Yiyi[2]　Shi Xiaoyan[1]　Zeng Xinxin[1]　Guan Guoqiang[1]
(1. *School of Food and Biological Engineering*, *Jiangsu University*, *Zhenjiang* 212013, *China*
2. *Jingjiang College*, *Jiangsu University*, *Zhenjiang* 212013, *China*)

Abstract: The post-buckling deformation parameters and elastic modulus of elastic materials are important parameters for the characterization of materials' mechanical properties. In order to improve the measuring accuracy and the degree of automation of post-buckling deformation parameters and simultaneous determination of elastic modulus of elastic materials, and to achieve the miniaturization of the testers, human-computer interaction technology, PLC control technology, linear pulse motor drive technology, scanning technology, force measurement technology, computer image processing technology, and other modern technology were integrated together to develop comprehensive detectors for post-buckling deformation parameters and elastic modulus of elastic materials. Meanwhile, determination of post-buckling deformation parameters of elastic materials based on the image processing technology and simultaneous determination of elastic modulus were achieved. Also, it also applied to the evaluation of the flexural capacity of dried straight-type food. And it proved to be feasible and reliable according to results of evaluation experiments.

Key words: Detectors　Elastic materials　Compressive rod post-buckling　Elastic modulus　Deformation parameters　Image processing

引言

压杆后屈曲大挠度力学特性分析计算是工程上研制某些特殊部件过程和品质评价中的关键技术,越来越得到国内外学者的重视。在细长压杆几何非线性分析中,在一定的假设条件下可以使得模型简化,分析结果能很好地满足实际要求,为工程设计和产品评价提供了理论支撑[1]。如高压输送线相间

收稿日期:2012-08-25　修回日期:2012-10-21
*江苏省高校优势学科建设工程资助项目
作者简介:姜松,教授,博士,主要从事农产品加工装备研究,E-mail:jszhl@ujs.edu.cn

合成绝缘间隔棒设计、微电子机械系统(MEMS)柔性结构大挠度双稳态跳跃分析、微创介入手术主动导管设计、挂面和米线抗弯能力的评价[2~8]。材料的弹性模量是描述弹性材料力学性能的指标，是表征材料力学特性的重要参数之一[9]。静态法测量金属材料弹性模量有拉伸法(GB/T 228—2010)和压缩法(GB/T 7314—2005)，虽然方法简便，但是压缩、拉伸载荷大，加载速度慢，拉伸法对试样外形规格也有特定的要求，测量设备庞大复杂，并且影响拉伸性能测量误差的因素很多[10~11]；塑料弯曲性能测定(GB/T 9341—2008)中使用的方法是三点弯曲法，操作不易控制，精度低[12]。弹性材料后屈曲形变参数测定装置，仅有利用标尺通过目测手段的简易测定仪或利用大型设备通过有接触方式测量装置[13~15]；弹性材料后屈曲弹性模量测定装置，仅有利用砝码加载方式的测定仪或利用通用仪器测量方法[7~8,16~17]。目前，弹性材料后屈曲形变参数和弹性模量同时测量的专用小型测定仪未见文献报道。

本文采用图像处理法设计弹性材料压杆后屈曲形变参数和弹性模量的测定仪。

1　测定仪结构设计

测定仪为箱体结构，由人机交互系统、控制系统、驱动系统、试样支撑系统、压力测定系统、图像获取系统和后屈曲形变参数测定系统等 7 个子系统组成，如图 1 所示。

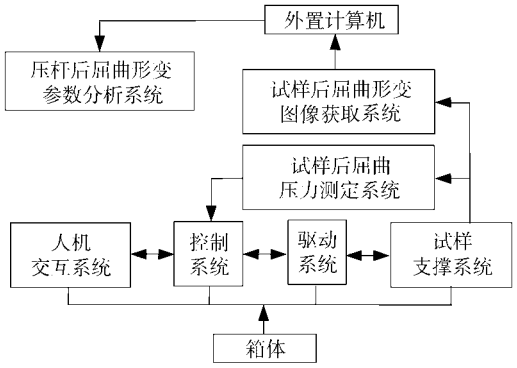

图 1　测定仪组成示意图

Fig. 1　Sketch map of detector system

(1)人机交互系统

采用 DOP－B07S515 触摸屏，屏幕尺寸大，有利于交互界面操作功能的合理布局。操作者通过触摸屏可进行多种测试功能的选择、测试条件参数的输入以及系统参数预设和调整，并实现测试结果的实时显示和保存。

(2)控制系统

采用 DVP－14SS 型 PLC 控制器。该系统的主要作用是接受操作人员输入的测试条件信息，并对输入的信息进行判定，生成相应的控制信号，然后输出脉冲信号到测试仪的驱动系统；同时对测力系统输入的载荷信号进行处理，计算试样的弹性模量，实现信息集中处理与转换。

(3)驱动系统

包括驱动模块、直线步进电动机和动支撑挡板，分别采用 DCM4010 驱动器和 43F4(P)－05－450 混合式直线步进电动机。驱动器接受 PLC 控制器输出的脉冲信号，控制直线步进电动机位移，实现测试过程中对支撑系统动支撑挡板的驱动任务，使试样产生后屈曲变形。

(4)试样支撑系统

包括静支撑挡板和动支撑挡板，静支撑挡板与力传感器受力端固定联接，动支撑挡板与直线步进电动机输出轴固定联接，并与扫描仪工作面形成滑动联接，实现对试样的支撑。

(5)压力测定系统

包括 NS－TH5 系列压力传感器和信号放大器及 DVP－04AD－S 模数转换块。动支撑挡板对试样施加的载荷通过力传感器经信号放大器和模数转换块传输给 PLC 控制器，由 PLC 控制器计算试样的弹性模量，实现对试样弹性模量的测定。

(6)图像获取系统

包括 Epson Perfection V33 扫描仪和计算机，该扫描仪分辨率高，当扫描分辨率为 600 dpi 时，试样的图像分辨率高于 0.05 mm/像素，满足测试要求。该系统可实现通过计算机软件控制扫描仪适时获取试样后屈曲形变图像，并传回到计算机。

(7)压杆后屈曲形变参数测定系统

包括计算机和专用图像处理软件，根据扫描仪获取试样后屈曲形变的图像，由专用图像处理软件对图像进行处理和特征参数提取及计算，实现对试样后屈曲形变曲线的弦长、中点挠度和端部转角的解析。

测定仪结构示意图如图 2 所示。

2　测定方法

2.1　后屈曲形变参数

通过扫描仪采集试样后屈曲形变的图像，用专用图像处理分析软件对试样后屈曲形变图像进行中值滤波去噪、阈值化和细线化处理，得到试样后屈曲形变图像骨架(图 3)，再通过图像处理分析软件从图像骨架上找到最左侧像素点和最右侧像素点等计算所需的像素坐标，为后屈曲形变特征参数的计算和提取提供依据。

2.1.1　弦长 l

在试样后屈曲形变图像骨架上确定最左侧像素

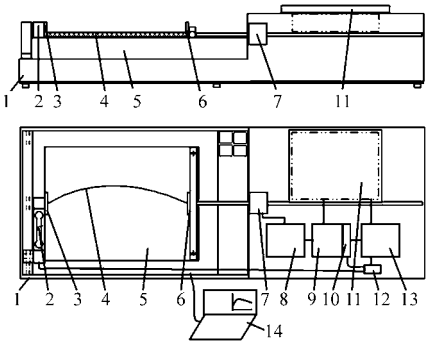

图 2 弹性材料后屈曲形变参数和弹性模量测定仪结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of detectors for post-buckling deformation parameters and elastic modulus

1. 底座 2. 力传感器 3. 静支撑挡板 4. 试样 5. 扫描仪 6. 动支撑挡板 7. 直线步进电动机 8. 驱动器 9. PLC 控制器 10. 模数转换块 11. 触摸屏系统 12. 信号放大器 13. 电源 14. 计算机

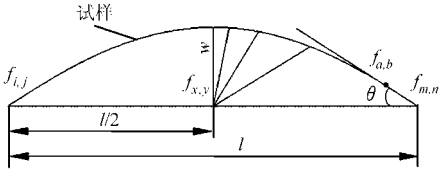

图 3 后屈曲形变图像骨架及特征参数示意图

Fig. 3 Sketch map of post-buckling deformation image skeleton and feature points parameters

点(试样左端点)的坐标 $f_{i,j}$ 和最右侧像素点(试样右端点)的坐标 $f_{m,n}$(图 3),根据欧几里得距离公式计算弦长 l 为

$$l(f_{i,j},f_{m,n}) = k\sqrt{(m-i)^2+(n-j)^2} \quad (1)$$

式中,k 为像素值换算成实际长度的系数(mm/像素),当扫描仪扫描分辨率设置为 300 dpi,则一个像素点的长度约为 0.084 7 mm,因此 k 为 0.084 7 mm/像素。

2.1.2 弦长 l 中点坐标

根据几何关系计算弦长 l 中点坐标 $f_{x,y}$,计算公式为

$$\begin{cases} x = \dfrac{i+m}{2} \\ y = \dfrac{j+n}{2} \end{cases} \quad (2)$$

2.1.3 中点挠度 w

根据弦长 l 中点坐标 $f_{x,y}$,计算弦长中点 $f_{x,y}$ 到试样后屈曲形变图像骨架上各点像素点的距离,其中最短距离 $d_{e\min}$ 为中点挠度 w,计算公式为

$$w = k\min(d_e(f_{x,y},f_{i,j}),\cdots,d_e(f_{x,y},f_{m,n})) \quad (3)$$

2.1.4 端部转角 θ

根据试样后屈曲形变图像骨架上的两端(最左端点和最右端点)内侧一定像素点范围内的像素点连线呈近似直线,该近似直线与最左侧点和最右侧点的连线之间的夹角即为端部转角。设从试样后屈曲形变图像骨架上最右侧点开始第 H 个像素点为 $f_{a,b}$,则 $f_{a,b}$ 和最右侧点 $f_{m,n}$ 的连线与最左侧点和最右侧点的连线之间的夹角即为端部转角 θ,计算公式为

$$\theta = \frac{180}{\pi}\arctan\left(\frac{|n-b|}{|m-a|}\right) \quad (4)$$

2.2 弹性模量

在扫描仪采集试样后屈曲形变图像的同时,通过测力系统测量使试样产生后屈曲形变的载荷 P,经力传感器、信号放大器、模数转换块传输到 PLC 控制器,再根据试样的基本参数和设定的端部轴向位移量参数(图 4),经 PLC 控制器计算得出该端部轴向位移量处的弹性模量。弹性模量计算公式为

$$E = \frac{PL^2}{4\left(F\left(a,\dfrac{\pi}{2}\right)\right)^2 I} \quad (5)$$

其中 $$a = \sin\frac{\theta}{2}$$

式中 E——试样弹性模量,N/mm^2

P——端部轴向压力,N

L——试样的长度,mm

I——试样惯性矩,mm^4

$F\left(a,\dfrac{\pi}{2}\right)$——与端部转角有关的椭圆积分值

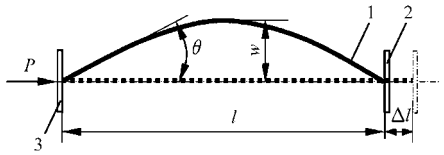

图 4 后屈曲形变几何参数和所受的载荷示意图

Fig. 4 Sketch map of geometric parameter relation of post-buckling deformation and loads suffered

1. 试样 2. 动支撑挡板 3. 静支撑挡板

3 测定仪工作原理与测定实例

3.1 工作原理

弹性材料后屈曲形变参数和弹性模量测定仪的测试流程图如图 5 所示。

随机抽取一定根数截成规定的长度试样。启动测定仪,并对其进行初始化与校对,通过触摸屏输入试样名称、厚度(或直径)、宽度、端部转角、长度和速度等基本参数和运行参数,以及根据试样长度确定的轴向位移和与轴向位移对应的 $F(a,\pi/2)$ 等设定参数(图 6)。根据试样长度对动支撑挡板进行定位。取一根试样放入测定仪的静支撑挡板和动支撑挡板之间,启动测试系统,直线步进电动机开始工作,通过直线步进电动机的螺杆以 0.10 mm/s 速度

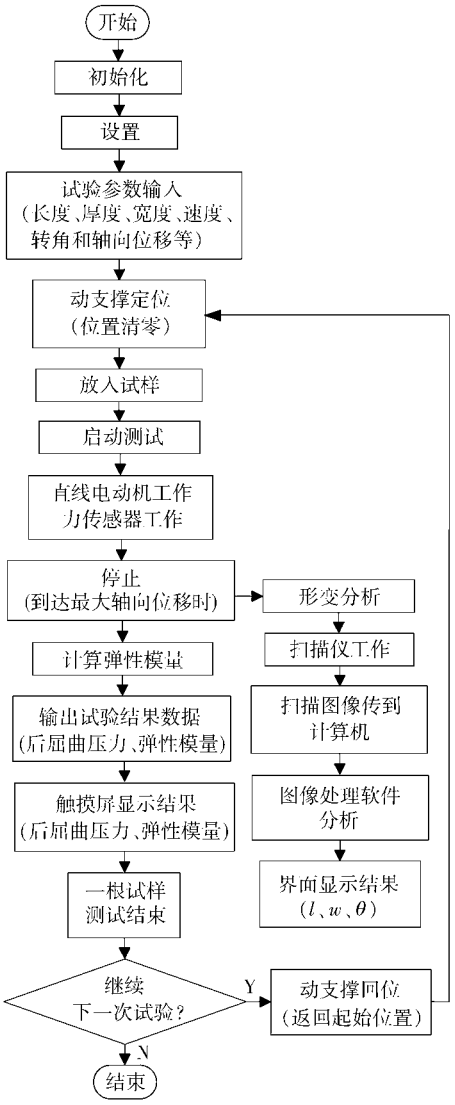

图 5　测定仪工作流程图

Fig. 5　Working flow chart of detector

推动动支撑挡板使试样产生后屈曲形变，当动支撑挡板到达端部轴向位移规定值时直线步进电动机自动停止。此时启动扫描仪，对此时的试样后屈曲形变进行扫描获取试样后屈曲形变图像并传输到计算机，然后用计算机专用图像处理软件分析，提取试样后屈曲形变的中点挠度和端部转角，再由专用图像处理软件显示测试结果和与理论值相比的误差，并保存测试和计算结果(图 7)。与此同时施加的载荷由力传感器经信号放大器、模数转换块传输到 PLC 控制器，再根据试样的基本参数和试验的设定参数及测力系统采集的施加载荷，由 PLC 控制器计算得出试样的弹性模量，并由触摸屏显示(图 6)。一根测试结束后，根据重复试验要求的次数进行再次试验。

3.2　测定实例

(1)65Mn 钢片压杆后屈曲形变参数与弹性模量测定

随机抽取 3 根截成长度 180 mm 的试样。输入

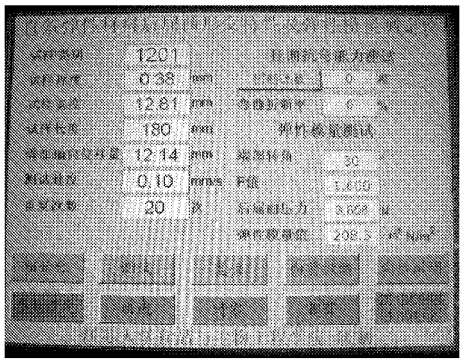

图 6　人机交互系统主界面

Fig. 6　Main interface of human-computer interaction systems

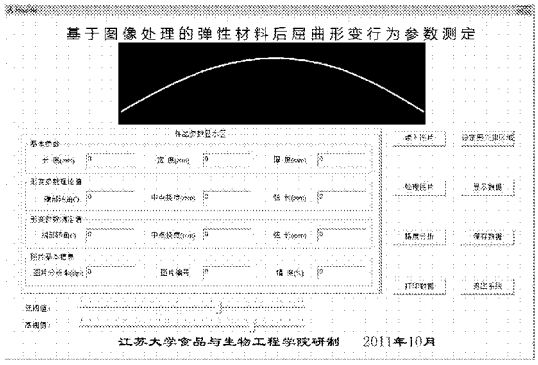

图 7　图像处理软件主界面

Fig. 7　Main interface of image processing software

试样名称为 65Mn 钢片、厚度为 0.3 mm、宽度为 12.5 mm、长度为 180 mm 和速度为 0.1 mm/s 等基本参数和运行参数，以及根据试样长度 180 mm 确定的弹性模量测定所对应的轴向位移为 12.14 mm 和与轴向位移对应的 $F(a,\pi/2)$ 为 1.598 1 等设定参数。测定结果为：弦长 167.81 mm、中点挠度 29.35 mm、端部转角 30.3°、弹性模量为 208.2×10^9 N/m^2，与 TA－XT2i 物性仪的弹性模量测定结果吻合。

(2)挂面压杆后屈曲形变参数与弹性模量测定

随机抽取 3 根截成长度 150 mm 的试样。输入试样名称为挂面、厚度为 0.840 mm、宽度为 3.813 mm、长度为 150 mm 和速度 0.1 mm/s 等基本参数和运行参数，以及根据试样长度 150 mm 确定的弹性模量测定所对应的轴向位移为 7.09 mm 和与轴向位移对应的 $F(a,\pi/2)$ 为 1.589 8 等设定参数。测定结果为：弦长 142.92 mm、中点挠度 20.32 mm、端部转角 24.7°、弹性模量 2.954×10^9 N/m^2，与 TA－XT2i 物性仪的弹性模量测定结果吻合。

4　技术指标和性能检测

(1)技术指标

静支撑挡板和动支撑挡板间距为 0～250 mm，

螺杆运动范围为 0 ~ 300 mm,测量精度为 0.01 mm;动支撑挡板移动速度为 0.01 ~ 1.0 mm/s;试样长度为 30 ~ 250 mm,宽度、厚度不限,加载压力为 20 N 或 50 N;测定仪外形尺寸(长 × 宽 × 高)为 810 mm × 300 mm × 145 mm。

(2)性能检测

图 8 为弹性材料后屈曲形变参数和弹性模量测定仪。根据设计的技术要求,对测定仪的主要功能进行了考核性试验。经检测,动支撑挡板的定位误差小于 0.1%,轴向位移的误差小于 0.1%。经 24 h 连续运行,性能稳定可靠。

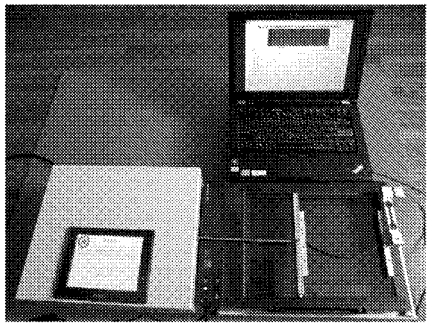

图 8 弹性材料后屈曲形变参数和弹性模量测定仪

Fig. 8 Detector for post-buckling deformation parameters and elastic modulus

5 结论

(1)综合运用人机交互技术、PLC 技术、扫描技术、力测量技术、计算机图像处理技术和直线步进电动机驱动技术,设计了弹性材料后屈曲形变参数及弹性模量测定仪,实现了测定仪的自动化、智能化、微型化。

(2)弹性材料后屈曲形变参数及弹性模量测定仪适用于各种等截面细长直型和薄长直型金属材料、非金属材料、复合材料等弹性材料,也适用于干制的直条型食品的力学质地评价。

(3)测定仪经考核性试验验证是可行、可靠的。

参 考 文 献

1 吴明德. 弹性杆件稳定理论[M]. 北京:高等教育出版社,1989:31 ~ 39.

2 王黎明,范钦珊,薛家麒,等. 相间合成绝缘间隔棒大挠度屈曲研究及应用[J]. 清华大学学报:自然科学版,1997,37(1):9 ~ 12.
Wang Liming, Fan Qinshan, Xue Jiaqi, et al. Research and application of the large deflection of the phase to phase composite spacer [J]. Journal of Tsinghua University: Sci. & Tech., 1997,37(1):9 ~ 12. (in Chinese)

3 王黎明,范钦珊,薛家麒. 相间合成绝缘间隔棒后屈曲性态研究[J]. 清华大学学报:自然科学版,1996,36(9):70 ~ 76.
Wang Liming, Fan Qinshan, Xue Jiaqi. Study of the post buckling behaviours for the phase to phase composite spacer[J]. Journal of Tsinghua University: Sci. & Tech.,1996,36(9):70 ~ 76. (in Chinese)

4 赵剑. 基于双稳态特性的加速度开关研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2008.
Zhao Jian. A study on threshold acceleration switch based on bistable characteristics[D]. Xi'an: Xidian University, 2008. (in Chinese)

5 王树国,刘浩,付宜利,等. 基于大挠度理论的微创介入手术主动导管研究[J]. 生物医学工程学杂志,2008,25(2):393 ~ 397.
Wang Shuguo, Liu Hao, Fu Yili, et al. Study on active catheter for minimally invasive surgery based on large deflection theory [J]. Journal of Biomedical Engineering,2008,25(2):393 ~ 397. (in Chinese)

6 姜松,刘瑞霞,陈章耀,等. 基于压杆屈曲大挠度理论的挂面弯曲折断分析与验证[J]. 中国粮油学报,2010,25(8): 117 ~ 122,128.

7 姜松,黄广凤,刘瑞霞,等. 压杆后屈曲法测定直条米线弹性模量[J]. 农业工程学报,2011,27(1):360 ~ 364.
Jiang Song, Huang Guangfeng, Liu Ruixia, et al. Compressive rod post-buckling method for straight rice vermicelli elastic modulus determination[J]. Transactions of Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011,27(1):360 ~ 364. (in Chinese)

8 姜松,贾瑜,程红霞,等. 基于压杆大挠度理论的挂面弹性模量测定方法[J]. 中国粮油学报,2010,25(7):106 ~ 109.
Jiang Song, Jia Yu, Cheng Hongxia, et al. A determination method of dry noodle elastic modulus based on theory of compressive rod large deflection[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2010,25(7):106 ~ 109. (in Chinese)

9 宋文远,王文明,潘复生,等. 金属基复合材料弹性模量的研究现状[J]. 材料导报,2006,20(6):416 ~ 419.
Song Wenyuan, Wang Wenming, Pan Fusheng, et al. Current study on the elastic modulus of metal matrix composites[J]. Materials Review, 2006,20(6):416 ~ 419. (in Chinese)

10 GB/T 22315—2008 金属材料 弹性模量和泊松比试验方法[S]. 2008.

11 郭天葵. 拉伸法测弹性模量实验结果的误差分析[J]. 中国现代教育设备,2009(15):82 ~ 83.

12 GB/T 9341—2008 塑料 弯曲性能测定[S]. 2008.

13 梁军. 挂面弯曲断条检测仪[J]. 食品科技,1991(1):28.

14 范钦珊,王琪. 工程力学(1)[M]. 北京:高等教育出版社,2002:340 ~ 341.

15 姜松,管国强,刘瑞霞,等. 基于压弯轴向位移值的挂面弯曲折断率测定仪的研制[J]. 中国粮油学报,2010,25(9):115 ~ 118.

16 Ohtsuki A. A new method of measuring Young's modulus using postbuckling behavior[C]// Proceedings of the 2006 SEM Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics, 2006.

17 Ohtsuki A. An innovative method for measuring Young's modulus of multi-layered materials using postbuckling behavior [C]// 11th International Conference on the Mechanical Behavior of Materials, 2011: 1 041 ~ 1 046.