

文章编号 1004-924X(2008)10-2114-06

# 高精度测量光学玻璃折射率的新方法

孟庆华, 向阳

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 为准确测量光学玻璃的折射率, 提高光学系统成像质量, 介绍了现有光学玻璃折射率测试方法和国内外发展现状, 提出了一种利用测量棱镜 3 个顶角所对应的 3 个最小偏向角的折射率测量新方法。该方法充分利用了互补法或三像法定位的优势, 提高了折射率的测量精度, 其特点是测量精度随被测光学玻璃的折射率增大而提高。推导出了计算公式, 并对精度做了理论分析。结果表明: 同传统最小偏向角法相比, 测量精度提高 2 倍以上, 可满足高精度测量光学玻璃折射率的要求。

**关键词:** 光学玻璃; 折射率测量; 高精度测量; 最小偏向角

**中图分类号:** TQ171.734; TQ171.65 **文献标识码:** A

## Novel high accurate measurement method for refractive index of optical glass

MENG Qing-hua, XIANG Yang

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** In order to measure accurately the refractive index of optical glass to improve the imaging quality of optical systems, several measuring methods of refractive index for optical glass were analyzed and both foreign and domestic development situations for optical glass measurement were introduced. A new method to calculate refractive index by measuring the three least deflection angles of three vertex angles of a prism was presented. Proposed new method made full use of the orientation dominance of complementary method or three-image method improve the accuracy of refractive index measurement, and it was characterized by the accuracy improvement of refractive index measurement with refractive index increasing. The formula of new method was deduced, the measurement accuracy was analyzed in the theory. Result indicates that measurement accuracy has improved more than twice as compare with that of traditional least deflection angle method, which can meet the requirement of high accuracy measurement of refractive index.

**Key words:** optical glass; refractive index measurement; high accurate measurement; least deflection angle

收稿日期: 2008-05-30; 修订日期: 2008-09-09.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 60538020)

## 1 引言

航空、航天和天文学等领域的发展,加大了对光学设备的质量和精度的要求。为了保证光学系统成像质量,精确测量光学玻璃材料的折射率显得越来越重要<sup>[1]</sup>。尤其是新品种高质量光学玻璃材料的不断研制成功,精密测量新的光学玻璃材料折射率备受关注。

许多人对光学玻璃材料的折射率测量做了大量工作,提出了很多有意义的测量方法<sup>[2-11]</sup>,但测量精度偏低(低于 $1 \times 10^{-5}$ )。测量光学玻璃材料折射率的方法主要分测角法和干涉法两大类。测角法有最小偏向角法、直角照准法、自准直法和 V 棱镜折射仪法等;干涉法分为 F-P(法布里-珀罗干涉仪)干涉法和浸液法等。光学玻璃材料折射率测量精度达到 $10^{-6}$ 的是最小偏向角法、直角照准法和 F-P 干涉法。F-P 干涉法折射率测量精度可以达到 $1 \times 10^{-6}$ 。干涉仪两个内表面须精确到和理想几何平面偏差在 $1/20$ 到 $1/100$ 波长,两个内表面应严格平行,样品面形精度也要求较高。直角照准法在精度 $1''$ 的测角仪上可得到 $3 \times 10^{-6}$ 的测量精度,但对光管的光束平行性要求非常高,对折射率 $>1.86$ 的光学材料,因全反射而无法测量。由于最小偏向角法精度高<sup>[8]</sup>、波长范围广,且为绝对测量,国内外大多数高精度光学玻璃材料折射率测量仪器普遍采用最小偏向角法,通常折射率测量精度 $\Delta n$ 为 $10^{-5}$ ,若折射率测量精度要达到 $10^{-6}$ ,需在精度 $1''$ 的大型精密测角仪进行测量,并对温度和压力进行校正。目前国内外对折射率测量的新方法研究很少,主要靠提高测角仪的单项测量技术水平来提高折射率测量精度<sup>[12]</sup>。随着 CCD 技术的发展,在很多测角仪上都采用了 CCD 成像,用计算机屏幕观测瞄准代替目视瞄准,大大降低了操作者的劳动强度。由于 CCD 像元尺寸的限制,光电瞄准精度低于目视瞄准精度。为了提高光电瞄准精度,有采用 CCD 细分技术,通过计算谱线的线扩散函数的能量质心来提高光电瞄准精度,如香港顶尖公司生产的测角仪采用传统最小偏向角法,测角精度 $1''$ ,折射率精度 $5 \times 10^{-6}$ ,对谱线进行了 100 细分。由于受杂散光和像质等很多因素的影响,细分精度将受到很大限制。

我们研究的三最小偏向角法中,不再测量棱镜顶角,只测量棱镜 3 个顶角对应的 3 个最小偏向角来计算折射率,偏向角测量精度只取决于光电编码器测量精度,瞄准采用互补法或三像法定位后,其误差可忽略不计,从而提高折射率的测量精度。该方法已获国家发明专利(专利号 200410011195.6)。

## 2 三最小偏向角法原理和最小偏向角定位精度分析

### 2.1 三最小偏向角法原理

三最小偏向角法的基础是传统最小偏向角法,图 1 为传统最小偏向角法测量原理示意图<sup>[8]</sup>。

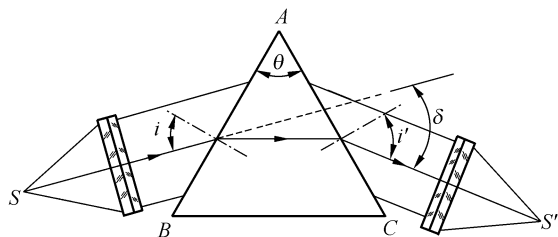


图 1 传统最小偏向角法测量原理

Fig. 1 Measuring principle of traditional least deflection angle method

由光源照明入射狭缝 S 发出的光,经透镜变成平行光,通过三棱镜后发生偏折,经透镜会聚后,会聚在出射狭缝上。在测角仪上,测量出棱镜顶角 A 和最小偏向角 $\delta_{\min}$ ,即可计算出折射率。顶角测量方法主要有自准直法和反射法。最小偏向角测量方法主要有单值法、两倍角法、互补法和三像法。

折射率计算公式:

$$n = \sin[(\theta + \delta_{\min})/2] / \sin(\theta/2), \quad (1)$$

式中, $\delta_{\min}$ 为最小偏向角; $\theta$ 为棱镜顶角; $n$ 为棱镜折射率。最小偏向角法测量所用时间较长,人眼容易疲劳,对谱线的瞄准精度有一定影响。用三像法和互补法比较容易确定最小偏向角位置,瞄准误差可忽略不计,偏向角测量精度只取决于光电编码器测量精度。三最小偏向角法是通过测量棱镜 3 个顶角对应的 3 个最小偏向角来计算折射

率,它充分利用了互补法或三像法定位的优势,从而提高了折射率的测量精度。

用棱镜的 3 个顶角  $A$ 、 $B$ 、 $C$  和对应的 3 个最小偏向角  $\delta_1$ 、 $\delta_2$ 、 $\delta_3$  取代式(1)中的  $\theta$  和  $\delta_{\min}$ ,则顶角  $A$ 、 $B$ 、 $C$  为:

$$A=2 \times \arctan(\sin(\delta_1/2)/(n-\cos(\delta_1/2))), \quad (2)$$

$$B=2 \times \arctan(\sin(\delta_2/2)/(n-\cos(\delta_2/2))), \quad (3)$$

$$C=2 \times \arctan(\sin(\delta_3/2)/(n-\cos(\delta_3/2))), \quad (4)$$

$$A+B+C=180^\circ, \quad (5)$$

由式(5)得到:

$$2 \times \arctan(\sin(\delta_1/2)/(n-\cos(\delta_1/2))) + 2 \times \arctan(\sin(\delta_2/2)/(n-\cos(\delta_2/2))) + 2 \times \arctan(\sin(\delta_3/2)/(n-\cos(\delta_3/2))) = 180^\circ, \quad (6)$$

测出 3 个顶角  $A$ 、 $B$ 、 $C$  对应的 3 个最小偏向角  $\delta_1$ 、 $\delta_2$ 、 $\delta_3$ ,即可由式(6)计算棱镜的折射率。

## 2.2 最小偏向角定位精度分析

最小偏向角测量通常是采用互补法和三像法进行定位。互补法是基于入射面的反射光线和处于最小偏向角位置的折射光线之间的夹角和互补的原理,采用逐步逼近的步骤,来提高偏向角的测量精度。三像法是一种较实用的测量方法,由于棱镜的 3 个顶角不可能严格相等,在视场中可看到折射像、内反射像和外反射像,内外反射像到折射像距离之比是折射率的函数,对一般光学玻璃比值取 2<sup>[8]</sup>。

通过光线折射定律和反射定律可计算出偏向角差、外反射角差和内反射角差。偏向角差为偏向角与最小偏向角之差,外反射角差为反射像与折射像角度差,内反射角差为内反射像与折射像角度差,入射角差为入射角与最小偏向角相对应的入射角之差。分析了不同折射率材料在最小偏向角处附近随着入射角的变化,偏向角和最小偏向角差值的变化,外反射像和折射像角度差值的变化以及内反射像和折射像角度差值的变化情况。计算结果见表 1 和表 2。表 1 为折射率  $n=1.5$ ,顶角  $A=60^\circ$ , $B=60^\circ-30''$ , $C=60^\circ+30''$ 时,内反射像、外反射像和折射像的相对位置关系;表 2 为  $n=1.8$ ,顶角  $A=60^\circ$ , $B=60^\circ-30''$ , $C=60^\circ+30''$ 时,内反射像、外反射像和折射像的相对位置关系。

表 1 折射率为 1.5 时,内反射像、外反射像和折射像的相对位置关系

Tab. 1 Relative position relationship among inner reflective image, outer reflective image and refractive image in refractive index of 1.5

入射角差 ( $''$ )	偏向角差 ( $10^{-2}''$ )	外反射角差 ( $''$ )	内反射角差 ( $''$ )
120	5.9	180	358
60	1.5	60	238
40	0.65	20	198
20	0.16	-20	158
0	0	-60	117
-20	0.16	-100	78
-40	0.65	-140	38
-60	1.5	-180	-2.2
-120	5.9	-300	-122

表 2 折射率为 1.8 时,内反射像、外反射像和折射像的相对位置关系

Tab. 2 Relative position relationship among inner reflective image, outer reflective image and refractive image in refractive index of 1.8

入射角差 ( $''$ )	偏向角差 ( $10^{-2}''$ )	外反射角差 ( $''$ )	内反射角差 ( $''$ )
120	13	180	455
60	3.3	60	335
40	1.5	20	295
20	0.37	-20	255
0	0	-60	215
-20	0.37	-100	175
-40	1.5	-140	134
-60	3.3	-180	95
-120	13	-300	-26

从表 1 和表 2 数据可以看出,内反射角差与外反射角差比值,在最小偏向角处,对于折射率 1.5 时为 1.95 左右,接近 2 倍;而对于折射率为 1.8 时为 3.5 左右。内反射角差与外反射角差比值还按 2 倍去瞄准将带来 0.033 的测量误差,瞄准误差可忽略不计。对常用玻璃可按照 2 倍去瞄准,对于折射率为 1.9 以上时,影响可能达到零点几秒,这时再按 2 倍去瞄准将对测量结果有影响,可按实际比值去瞄准。

最小偏向角位置对入射角不敏感,但内反射像和外反射像对入射角很敏感,有 2 倍放大作用,所以采用内反射像和外反射像确定的最小偏向角位置精度较高,最小偏向角测量精度只取决于编

码器测角系统的测角精度。对于某些吸收较大的玻璃材料,内反射像有时看的不是很清楚,可以采用互补法:即外反射像和折射像重合的办法来得出不错的结果。

### 3 三最小偏向角法精度分析

#### 3.1 精度分析

对(1)式两边微分,并化简:

$$\Delta\theta = 2 \times \frac{(\cos((\delta_{\min} + \theta)/2)/2) \times \Delta\delta_{\min} - \sin(\theta/2) \times \Delta n}{n \times \cos(\theta/2) - \cos((\delta_{\min} + \theta)/2)}, \quad (7)$$

用 A、B、C 代替式(7)中的  $\theta; \delta_1, \delta_2, \delta_3$  代替式(7)中的  $\delta_{\min}$ , 可求得  $\Delta A, \Delta B$  和  $\Delta C$ 。

对(5)式两边进行微分,将  $\Delta A, \Delta B$  和  $\Delta C$  代入并化简得到:

$$\begin{aligned} & \frac{(\cos((\delta_1 + A)/2)/2) \times \Delta\delta_1 - \sin(A/2) \times \Delta n}{n \times \cos(A/2) - \cos((\delta_1 + A)/2)} + \\ & \frac{(\cos((\delta_2 + B)/2)/2) \times \Delta\delta_2 - \sin(B/2) \times \Delta n}{n \times \cos(B/2) - \cos((\delta_2 + B)/2)} + \\ & \frac{(\cos((\delta_3 + C)/2)/2) \times \Delta\delta_3 - \sin(C/2) \times \Delta n}{n \times \cos(C/2) - \cos((\delta_3 + C)/2)} = 0, \end{aligned} \quad (8)$$

由此求出:

$$\begin{aligned} \Delta n &= \frac{(\cos((\delta_1 + A)/2)/2) \times (n \times \cos(B/2) - \cos((\delta_2 + B)/2)) \times (n \times \cos(C/2) - \cos((\delta_3 + C)/2))}{K} \times \\ \Delta\delta_1 &+ \frac{(\cos((\delta_2 + B)/2)/2) \times (n \times \cos(A/2) - \cos((\delta_1 + A)/2)) \times (n \times \cos(C/2) - \cos((\delta_3 + C)/2))}{K} \times \\ \Delta\delta_2 &+ \frac{(\cos((\delta_3 + C)/2)/2) \times (n \times \cos(A/2) - \cos((\delta_2 + A)/2)) \times (n \times \cos(B/2) - \cos((\delta_2 + C)/2))}{K} \times \Delta\delta_3, \end{aligned} \quad (9)$$

其中:

$$\begin{aligned} K &= \sin(C/2) \times (n \times \cos(A/2) - \cos((\delta_1 + A)/2)) \times (n \times \cos(B/2) - \cos((\delta_2 + B)/2)) + \\ & \sin(A/2) \times (n \times \cos(C/2) - \cos((\delta_3 + C)/2)) \times (n \times \cos(B/2) - \cos((\delta_2 + B)/2)) + \\ & \sin(B/2) \times (n \times \cos(A/2) - \cos((\delta_1 + A)/2)) \times (n \times \cos(C/2) - \cos((\delta_3 + C)/2)), \end{aligned} \quad (10)$$

因为顶角 A、B、C 相差很小用 A 代替,其对应的 3 个最小偏向角也相差很小,假设它们相等并用  $\delta_{\min}$  代替,同时  $\Delta\delta_1, \Delta\delta_2, \Delta\delta_3$  相等并用  $\Delta\delta_{\min}$  代替,进行简化得到:

$$\Delta n_s = \frac{\sqrt{3} \times \cos((\delta_{\min} + A)/2)}{6 \times \sin(A/2)} \times \Delta\delta_{\min}, \quad (11)$$

式中,  $\Delta n_s$  为折射率测量标准误差; A 为棱镜顶角;  $\delta_{\min}$  为最小偏向角;  $\Delta\delta_{\min}$  为最小偏向角测量误差。从式(11)可以看出,随着折射率增加,最小偏向角增加,而  $(\delta_{\min} + A)/2 \leq 90^\circ$ , 系数是余弦函数关系将下降,所以  $\Delta n_s$  也下降,测量精度提高。

设棱镜顶角取  $60^\circ$ , 折射率 n 分别取 1.5 和 1.8,  $\Delta\delta_{\min}$  分别取  $1''$ 、 $0.5''$  和  $0.2''$ , 计算结果见表 3。

表 3 三最小偏向角法在不同精度测角仪下的折射率测量精度

Tab. 3 Measurement accuracies of refractive indexes by different goniometers with three least deflection angle method

最小偏向角精度 (")	折射率精度 (n=1.5)	折射率精度 (n=1.8)
1	$1.85 \times 10^{-6}$	$1.22 \times 10^{-6}$
0.5	$9.25 \times 10^{-7}$	$6.1 \times 10^{-7}$
0.2	$3.7 \times 10^{-7}$	$2.4 \times 10^{-7}$

传统最小偏向角法折射率精度可按下面公式进行计算<sup>[8]</sup>:

$$\Delta n_s = \sqrt{\frac{1}{4} \times (\cos((\theta + \delta_{\min})/2) / \sin(\theta/2))^2 \times \Delta\delta_{\min}^2 + \frac{1}{4} \times (\sin(\delta_{\min}/2) / \sin^2(\theta/2))^2 \times \Delta\theta^2}, \quad (12)$$

式中,  $\Delta n_s$  为折射率测量标准误差;  $\theta$  为棱镜顶角;  $\delta_{\min}$  为最小偏向角;  $\Delta\theta$  为棱镜顶角测量误差  $\Delta\delta_{\min}$  为最小偏向角测量误差。

$\delta_{\min}$  为最小偏向角;  $\Delta\theta$  为棱镜顶角测量误差  $\Delta\delta_{\min}$  低一些的测角仪上使用传统最小偏向角法和三最

棱镜顶角测量误差为:

$$\Delta\theta = \sqrt{\Delta\theta_1^2 + 2 \times \Delta\theta_2^2}, \quad (13)$$

式中,  $\Delta\theta_1$  为编码器测量误差;  $\Delta\theta_2$  为瞄准误差; 最小偏向角测量误差:  $\Delta\delta_{\min} = \Delta\theta_1$ 。

从式(12)可以看出, 随着折射率的增加, 最小偏向角将增加, 而系数是正弦关系将上升, 所以  $\Delta n_e$  也增加, 测量精度降低。

设棱镜顶角  $\theta$  取  $60^\circ$ ,  $n$  取 1.5 和 1.8,  $\Delta\theta_1$  取  $0.2''$ 、 $0.5''$  和  $1''$ ,  $\Delta\theta_2$  取  $0.3''$ , 计算结果见表 4。

表 4 传统最小偏向角法在不同精度  
测角仪下的折射率测量精度

Tab. 4 Measurement accuracies of refractive indexes  
by different goniometers with traditional least  
deflection angle method

编码器精度 ( $''$ )	折射率精度 ( $n=1.5$ )	折射率精度 ( $n=1.8$ )
1	$4.7 \times 10^{-6}$	$6.3 \times 10^{-6}$
0.5	$2.6 \times 10^{-6}$	$3.75 \times 10^{-6}$
0.2	$1.6 \times 10^{-6}$	$2.63 \times 10^{-6}$

通过表 3 和表 4 的对比可以看出, 在同等测量条件下, 折射率测量精度三最小偏向角法优于传统最小偏向角法, 精度提高两倍以上, 尤其对于折射率较高的玻璃材料提高更加明显。随着折射率增加, 传统最小偏向角法折射率测量精度降低, 而三最小偏向角法折射率测量精度反而提高。

### 3.2 精度实验结果

进行精度实验要先在测量精度较高 ( $<1''$ ) 的折射率测试仪(测量精度为  $3 \times 10^{-6}$ ) 上对光学玻璃进行标定, 所测数据作为基准, 再在测量精度

小偏向角法测量其折射率, 然后对结果进行比对。

本文选用自行研制的测角仪, 编码器测角精度优于  $4''$ , 瞄准精度为  $0.3''$ , 对 K9 玻璃进行了测试, 部分结果见表 5。测汞灯 546.1 nm 谱线, 标准数据为 1.518 292。

表 5 折射率测量结果

Tab. 5 Measurement results of refractive indexes

测量次数	折射率	折射率
	(三最小偏向角法)	(传统最小偏向角法)
1	1.518 302 1	1.518 316 2
2	1.518 303 2	1.518 314 0
3	1.518 301 8	1.518 318 5

从表 5 可以看出, 三最小偏向角法测量精度为  $1 \times 10^{-5}$ , 而传统最小偏向角法测量精度为  $2.4 \times 10^{-5}$ , 三最小偏向角法测量精度优于传统最小偏向角法两倍以上。

## 4 结 论

三最小偏向角法同传统最小偏向角法相比测量精度提高两倍以上, 尤其对于高折射率玻璃精度提高更加明显, 测量精度随被测光学玻璃的折射率增加而提高, 同等测量精度下可降低硬件的制造成本。该方法由于测量精度高, 有较好的应用前景。

若瞄准采用光电探测器, 如面阵 CCD 等, 该方法可涵盖可见、紫外和红外波段, 由于互补法和三像法对像的位置要求不高, 不用对 CCD 采用细分即可满足定位要求。折射率  $>2$  的材料因为要产生全反射, 不能采用三最小偏向角法测量。

### 参考文献:

- [1] 米宝永. 光谱范围从 365~12 000 nm 的高精度光电自动折射仪[J]. 光学 精密工程, 1998, 6(3): 79-84.  
MI B Y. Photoelectric automatic refractometer with high precision in the wavelength range 365~12 000 nm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1998, 6(3): 79-84. (in Chinese)
- [2] DEBENHAM M. An improved recording refractometer for optical glasses in the wavelength range 300 to 2 600 nm [J]. *Optica Acta*, 1979, 26(12): 1487-1503.
- [3] WOOD L, FLEMING J W. Computerized refractive index measurement for bulk materials at UV, visible, and IR wavelengths[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1982, 53(1): 43-47.
- [4] BHATTACHARYA J C. Refractive index measurement[J]. *Optics and Laser Technology*, 1987, 19(1): 29-32.
- [5] KARNY Z, KAFRI O. Refractive index measurement by more deflectometry[J]. *Appl. Opt.*, 1982, 21(18): 3326-3328.

- [6] EDWIN R P, DUDERMEL M T, LAMARE M. Refractive index measurement of ten germanium samples[J]. *Appl. Opt.*, 1982, 21(5):878-881.
- [7] 邓文和. JC-1 型精密测角仪的研制[J]. *光电工程*, 1990, 17(1):35-48.  
DENG W H. The development of JC-1 precision goniometer[J]. *Opto-Electronic Eng.*, 1990, 17(1):35-48. (in Chinese)
- [8] 王之江. 光学技术手册(下册) [M]. 北京:机械工业出版社, 1994.  
WANG ZH J. *Optical Technology Handbook* [M]. Beijing: Mechanism Industry Press, 1994. (in Chinese)
- [9] 米宝永. 锗的红外折射率精密测量 [J]. *光学精密工程*, 1998, 6(4):123-126.  
MI B Y. Precision measurement of the infrared refractive index for germanium sample[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1998, 6(4):123-126. (in Chinese)
- [10] 宋克非. 高精度光电自动折射率仪的瞄准方法及其实现[J]. *光学精密工程*, 1999, 7(4):100-104.  
SONG K F. Collimating method and its realization for the photoelectric automatic refractometer with high precision [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7(4):100-104. (in Chinese)
- [11] 高亮. 压电陶瓷精密转动平台的转角精度测量[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(2):206-211.  
GAO L. Rotation-angle-accuracy measurement of piezo tilt platform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2):206-211. (in Chinese)
- [12] 宋克非, 米宝永. 计算机控制的高精度光电折射仪 [J]. *仪器仪表学报*, 2005, 26(11):1159-1162.  
SONG K F, MI B Y. Computerized photo-electric automatic refractometer with high accuracy[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2005, 26(11):1159-1162. (in Chinese)

作者简介:孟庆华(1963—),男,吉林长春人,研究员,主要研究方向为光学测量、光谱仪器和光电经纬仪设计和研究。E-mail:changguang suo@yahoo.com.cn

## ● 下期预告

# 表面弹性波 OPCM 传感器标定

骆 英, 刘红光, 赵国旗, 顾建祖  
(江苏大学 理学院, 江苏 镇江 212013)

标定了一种被称为正交异性压电复合材料(OPCM)的声发射(AE)传感器。首先,利用断铅信号作为声源,SR-15型AE传感器作为标准传感器,以比较法研究了OPCM的脉冲响应。然后,在玻璃纤维板上重点研究了OPCM的正交异性特性——陶瓷项数量的影响及响应规律的描述。实验结果表明:该传感器适于探测表面弹性波,陶瓷项数达到30,正交异性显著,能够很好地减小噪声、边界回弹波等信号对诊断信号的干扰,有助于板类结构健康监测。