

斜入射法检测平面反射镜的面形误差

马春桃 罗红心 王 劼 宋 丽

(中国科学院上海应用物理研究所, 上海光源, 上海 201204)

摘要 为实现用小口径面形干涉仪完成对大口径光学镜面面形的检测, 发展了斜入射检测方法, 增大投射到待测镜上光斑的尺寸, 从而增大干涉仪检测的镜面口径范围。推导了斜入射法检测平面反射镜面形的公式, 并考虑了此方法可能引入的误差。对尺寸为 $124\text{ mm} \times 42\text{ mm}$ 的平面反射镜分别在垂直和不同斜入射角条件下进行了测量, 垂直入射时测得镜子工作表面面形起伏高度均方根(RMS)和峰谷(PV)值分别为 16.3 nm 和 67.8 nm , 斜入射时测得镜子工作表面的面形起伏高度 RMS 和 PV 值分别为 16.8 nm 和 68.7 nm , 相对误差分别为 3% 和 0.9% , 可以满足第三代同步辐射光束线的要求。

关键词 测量; 镜面面形; 斜入射法; ZYGO 干涉仪; 斜率误差

中图分类号 TH741 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP48.071201

Surface Error Measurement of Plane Mirrors Based on Oblique Incidence

Ma Chuntao Luo Hongxin Wang Jie Song Li

(Shanghai Synchrotron Radiation Facility, Shanghai Institute of Applied Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China)

Abstract In order to measure the surface shape of large aperture plane mirrors by using smaller caliber laser interferometer, oblique incidence method is developed. Thus, the spot illuminated on the tested mirror is magnified, and the size range that the interferometer can measure is much bigger. The plane mirror surface shape expression based on oblique incidence is gained, and the errors that may be introduced are concerned. And a plane mirror with size of $124\text{ mm} \times 42\text{ mm}$ is measured using vertical incidence and oblique incidence with different incidence angles. The surface height root mean square (RMS) and peak-to-valley (PV) results of the test mirror are 16.3 nm and 67.8 nm based on vertical incidence and 16.8 nm and 68.7 nm based on oblique incidence. Compared with vertical incidence measurement results, the relative error value of RMS is 3% , and the relative error value of PV is 0.9% . The result can satisfy the requirement of the third generation synchrotron radiation beam lines.

Key words measurement; surface shape of mirror; oblique incidence; ZYGO interferometer; slope error

OCIS codes 120.6650; 120.3180; 260.3160; 110.3175; 240.6700

1 引言

在同步辐射光束线上的光学元件通常是横向窄而轴向长的矩形, 长度可以达到 1 m , 而宽度只有 10 cm 。这些光学元件的表面质量和形貌参数将直接影响聚焦或准直后的光束质量, 影响光束线的传输性能^[1,2]。为保证第三代同步辐射光源的优良性能, 通常要求反射镜在 1 m 长度范围内的面形误差不超过 $3\text{ }\mu\text{rad}$ [均方根值(RMS)]^[1], 因此精确测量反射镜的表面轮廓对于同步辐射光束线的整体质量非常重要。长程面形仪(LTP)适合检测较大的曲率半径^[3~5], 但由于 LTP 是单光束扫描的测量仪器^[6], 受到其光路和机械结构的限制, 它每次测量只能得到一维的数据, 而且对于待测镜的放置也有限制。面形干涉仪^[7~10]可以检测光学元件表面的斜率和曲率半径^[1], 但常规检测条件下难以获得口径达到 1 m 的设备。

收稿日期: 2011-02-24; 收到修改稿日期: 2011-03-02; 网络出版日期: 2011-05-07

作者简介: 马春桃(1985—), 女, 硕士研究生, 主要从事同步辐射光学镜面面形检测方面的研究。

E-mail: machuntao@sinap. an. cn

导师简介: 王 劼(1963—), 男, 博士, 研究员, 主要从事同步辐射应用和 X 射线光学工程等方面的研究。

E-mail: wangjie@sinap. ac. cn(通信联系人)

为了增大小口径面形干涉仪的检测范围,本文研究了斜入射测量镜面面形的方法,推导了斜入射法检测平面反射镜面形的公式,并与实验结果进行对比分析,并考虑了斜入射测量方法存在的误差。

2 测量原理

图 1 所示为斜入射测量光路图。由面形干涉仪发出的准直光束一部分经参考镜 1 反射作为参考光束。透射光进入测量光路,经待测镜反射到参考镜 2 上,原路返回后与参考光束进行干涉,因此测量光束所携带的信息既包含待测镜面形信息也包含了参考镜的面形信息。设入射角为 θ ,则掠入射为 α ($\alpha + \theta = \pi/2$), d 为待测镜镜面相对于待测镜的参考面(镜面高度平均值)的高度, l 为待测镜引起的光程差变化,光程差与实际镜面高度的关系为

$$l = 4d \cos \theta. \quad (1)$$

考虑到参考镜 2 的表面相对于其某个参考面的高度为 d_1 时,则总的光程差变化为

$$L = 4d \cos \theta + 2d_1,$$

即待测镜的实际面形高度为

$$d = \frac{L}{4 \cos \theta} - \frac{d_1}{2 \cos \theta}. \quad (2)$$

相比于正入射下镜面面形的测量,采用斜入射方法测量镜面面形时,可能引入以下几种误差:1)待测镜和参考镜 2 的面形引入的误差;2)数据处理所引入的误差;3)测量镜子尺寸产生的误差。下面分别讨论各误差的大小。

(1)式假定了待测镜的表面是一个严格的平面,任何高度的起伏是孤立的凸起,且凸起的表面平行于镜面,但实际上是不存在的。反射面的斜率会导致经光路反射回来的光线与没有斜率时出射光线的方向发生变化,可以用二者之间的横向位移来描述,如图 2 所示。横向位移的存在可能会使经光路反射回来的光线与出射光线不在一个像素范围内,导致测量结果出现误差。设待测镜表面和参考镜 2 表面的斜率分别为 a 和 a_1 ,两参考镜间距为 y_0 ,根据几何关系求得此间隔为

$$\Delta = 2l \tan[2(a + a_1)]. \quad (3)$$

斜入射时所得到的测量数据与真实的镜面面形之间存在缩放关系,为了还原待测镜的真实面形,所以需要测得数据进行插值展开,而进行插值时也会对测量精度产生影响^[11]。

设原始高度为 $h_1, h_2, h_3, \dots, h_n$,插值后高度为 $h_1, d_1, h_2, d_2, \dots, d_{n-1}, h_n$,采用最简单的中值插值法,即

$$d_i = \frac{h_i + h_{i+1}}{2} (i = 1, 2, \dots, n-1). \quad (4)$$

为考察插值与原始数据之间的不一致性,采用各数据组的均方根值作为对比,即比较原始数据的 RMS 值,

$$f_{\text{RMS}_1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n h_i^2}{n}}, \quad (5)$$

与插值后数据组的 RMS 值

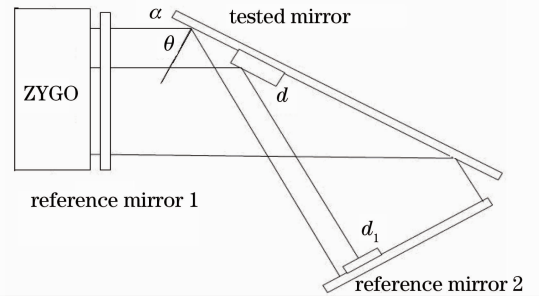


图 1 斜入射法测量平面反射镜光路图
Fig. 1 Optical setup for measurement of surface heights of a mirror using oblique incidence

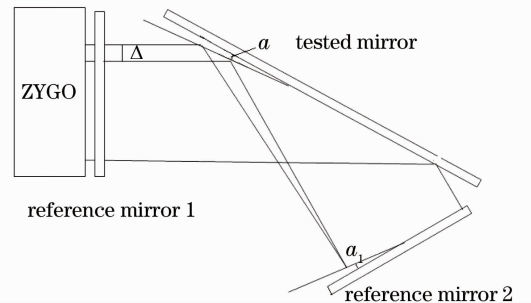


图 2 镜子的斜率引起光线横向移动
Fig. 2 Lateral offset caused by surface slopes of tested mirror and reference mirror

$$f_{\text{RMS}_2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n h_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} d_i^2}{2n-1}} \quad (6)$$

的变化。将(5)与(6)式相除并代入(4)式后得

$$\eta = \frac{f_{\text{RMS}_2}}{f_{\text{RMS}_1}} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \frac{\sum_{i=1}^{n-1} h_i h_{i+1}}{\sum_{i=1}^n h_i^2} - \frac{1}{4} \frac{h_1^2 + h_n^2}{\sum_{i=1}^n h_i^2} \quad (7)$$

(1)式中入射角 θ 是通过计算斜入射时测得镜子长度与镜子的实际长度的比值的反余弦值得来的,测量镜子长度时会有误差,需要计算此误差对测量结果的影响。设镜子的实际长度为 l_0 ,斜入射时测得的长度为 l_1 ,光程差为 L ,镜子的实际起伏高度为 h ,则有如下关系:

$$\cos \theta = \frac{l_1}{l_0}, \quad (8)$$

$$h = \frac{L}{4 \cos \theta}, \quad (9)$$

相对误差大小为

$$\gamma = \frac{\Delta h}{h} = \frac{\Delta l_0}{l_0} - \frac{\Delta l_1}{l_1} \quad (10)$$

3 实验结果与讨论

实验中使用的是 GPI™ XP/D ZYGO 面形干涉仪自带的采集软件 MetroPro。该干涉仪的 CCD 总像素数为 640 pixel × 480 pixel,每个像素为 370 μm × 370 μm,干涉仪的有效口径为 150 mm。待测镜尺寸为 124 mm × 42 mm 的单晶硅反射镜。因为待测镜的尺寸小于干涉仪的口径,因此可以以垂直入射方式测量待测镜面形和参考镜 2 面形,作为“标准”数据,用以检验斜入射法的精度。测量时,待测镜和参考镜 2 放置在一个多维调整台上,可以适当调整被测对象,使得干涉仪监视器屏幕上的干涉条纹为 0 条纹(或尽可能接近 0 条纹)。斜入射测量时,光路按照图 1 所示的排布,实测时选取 10 组不同的入射角,每组数据重复测量 10 次以消除随机误差。

GPI XP/D 输出的数据是以二进制的形式存储的,需要将其转换成可读的数据格式。利用 MetroPro 里的数据转换程序可以将镜面面形信息的二进制数据转换为十进制的波面相位信息。对于理想平面,当入射光完全垂直于镜面时,是探测不到干涉条纹的,只有当面形有高度的变化时才会探测到局部的干涉条纹。实际测量时,需要细致地调整待测镜的姿态,但也只能使待测镜面与入射光接近垂直。干涉仪对倾斜量十分敏感,必须消除测量结果中的倾斜因素^[12,13]。设反射镜的 x 和 y 方向的倾斜分别为 t_x 和 t_y ,考虑到其值很小,经过简单的几何推导可以得到

$$d = h_1 + [t_x(y_1 - y_0) - t_y(x_1 - x_0)], \quad (11)$$

式中 d 为实际镜面起伏, h_1 为干涉仪测得的原始镜面起伏高度, x_1 为某点行坐标, y_1 为某点列坐标, x_0 为起始行坐标, y_0 为起始列坐标, t_x, t_y 由软件 MetroPro 给出。

由于干涉仪导出的数据是不经过去倾斜的原始数据,所以需要利用(11)式去除倾斜因素。图 3 给出了原始数据和去倾斜后的数据,图中曲线 2 是原始数据,曲线 1 为消除倾斜因子后的结果。为验证(1)式的正确性,选取干涉仪显示图像中某一行的数据。由于干涉仪显示图

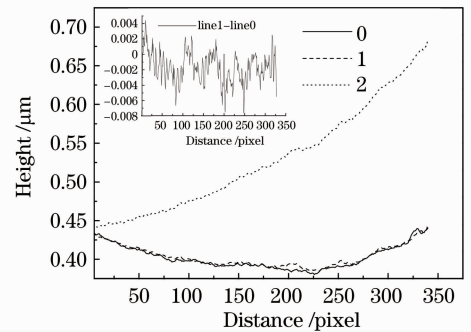


图 3 去倾斜结果对比(插图为曲线 1 与曲线 0 的差值)

Fig. 3 Contrast between the original surface shape and the result after removing tilt (the inset is the D-value of curve 1 and curve 0)

像是经过倾斜的,因此代表了“真实”的数据(曲线0)。可见经过(11)式处理的数据与“真实”的数据基本一致,这表明(11)式是正确可靠的。

图4(a)给出了以垂直入射方式测得的参考镜2的面形,为照片图。图4(b)为二维图上某一行的面形斜入射时测得镜子面形RMS、峰谷(PV)值和斜率RMS误差分别为16.8 nm,68.4 nm和1.85 μrad ,垂直入射时测得镜子面形RMS值、PV值和斜率RMS误差分别为16.3 nm,67.8 nm和1.91 μrad ,相对误差分别为3%,0.9%和3.1%,图5给出了斜入射时测得的待测镜面起伏与垂直入射时测得结果的对比,面形基本可以吻合。

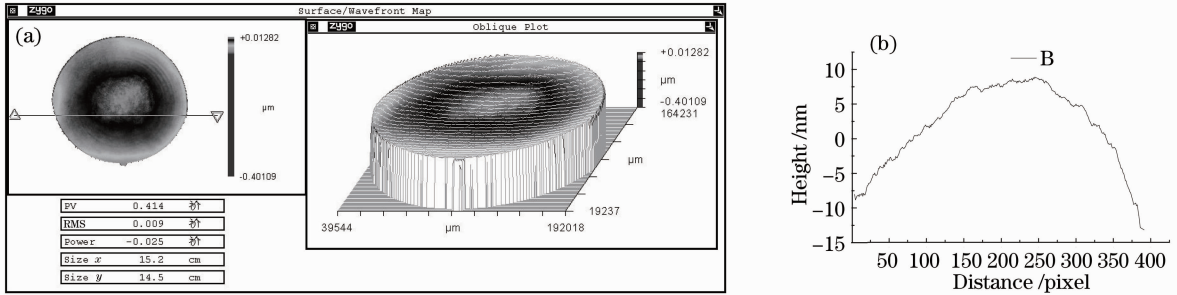


图4 (a)参考镜的二维面形图,(b)二维图上某一行的面形

Fig. 4 (a) 2D surface shape of the reference mirror, (b) shape of one line on the 2D surface shape of the reference mirror

为了在实验上确定入射角对测量结果的影响,随机选择了从 $45^\circ \sim 90^\circ$ 范围内的9个入射角,如表1所示。对斜入射测得的结果插值展开^[14]到镜子的实际尺寸,计算了这些入射角下镜子表面面形的RMS值、PV值和斜率RMS值,并与垂直入射时的数据对比。结果表明,不同斜入射下测得的面形的RMS值和PV与垂直测得结果相对误差均小于5%,实际应用时可以根据镜子的尺寸来设计入射角。

垂直时测得镜子表面斜率最大值为10 μrad ,两参考镜距离为1 m,由(3)式算得经光路反射回来的光线与出射光线之间存在横向间隔小于50 μm ,而CCD的像素尺寸为357 μm ,所以光线的横向移动给测量结果带来的影响可以忽略不计。

表2给出了对测量结果进行差值前后的面形起伏RMS值的比较,可以看出由差值引入的相对误差不到1%,所以由插值引起的误差可以忽略。

表1 不同入射角下镜子表面面形RMS值、PV值、斜率RMS值对比结果

Table 1 Contrast of the RMS,PV and slope error between different incidence angles

Incident angle / ($^\circ$)	0	46	48	54	59	63	68	71	77	80
RMS / nm	16.3	17.0	16.8	16.8	17.0	16.1	16.7	16.1	16.5	16.8
PV / nm	67.8	67.0	70.1	68.4	71.2	70.3	67.7	69.0	71.0	67.5
Slope error	1.85	1.93	1.88	1.91	1.86	1.78	1.75	1.78	1.93	1.79
RMS relative error / %	0	4.2	3	3	4.2	1.25	2.4	1.25	1.25	3
PV relative error / %	0	1.2	2.3	0.9	5	3.7	0.15	1.8	2.3	4.4

表2 插值引起的误差

Table 2 Error caused by interpolation

Incident angle / ($^\circ$)	46	48	54	59	63	68	71	77	80
RMS1 / nm	17.4	16.9	16.8	17.5	16.2	16.7	16.2	17.3	16.9
RMS2 / nm	17.3	16.8	16.8	17.5	16.1	16.7	16.1	17.2	16.8
Relative error / %	0.57	0.59	0	0	0.62	0	0.62	0.58	0.59

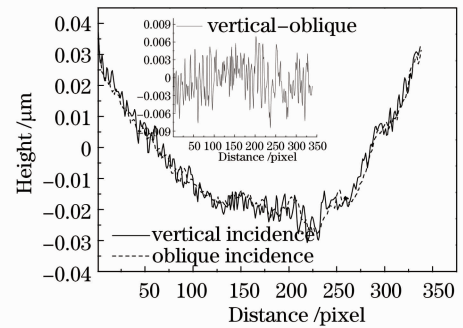


图5 斜入射时测得的待测镜面起伏与垂直入射时测得结果的对比(插图为两曲线差值)

Fig. 5 Surface shape contrast between the oblique incidence and the vertical incidence (the inset is the D-value of two curves)

本实验中待测镜长度 $l_0 = 124\text{mm}$, 根据入射角的不同 l 也不同, $\Delta l \approx \Delta l_0 = \pm 0.5\text{ mm}$, 由(11)式算得不同角度下由测量斜入射角大小时产生的误差对测量结果的影响如表 3 所示。

表 3 待测镜尺寸测量误差引起的误差

Table 3 Error caused by the measure error

Incident angle / ($^\circ$)	46	48	54	59	63	68	71	77	80
l / mm	86.9	83.5	73.7	63.4	55.6	46.7	39.5	29.2	21.5
Relative error / %	1.15	1.19	1.36	1.58	1.80	2.14	2.53	3.42	4.65

综上所述, 光线横移和插值所带来的误差对测量结果的影响都可以忽略不计, 测量镜子尺寸时所产生的误差是测量的主要误差来源, 可以通过多次测量取平均值来减小这种随机误差。

为了进一步验证本方法的可靠性, 采用斜入射方法对尺寸为 $450\text{ mm} \times 80\text{ mm}$ 的单晶硅平面反射镜进行了测量, 测得其斜率误差为 $0.45\ \mu\text{rad}$, Insync 公司用 ZYGO 干涉仪在垂直入射时测得斜率误差为 $0.23\ \mu\text{rad}$ 。实验室环境的改变如实验室空气流动、实验室温度改变等对测量结果有较大的影响。温度对测量结果的影响可分为两个方面, 1) 对 ZYGO 干涉仪的影响, 2) 对镜面斜率误差的影响。本实验室温度可控制在 $23\text{ }^\circ\text{C} \pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内, 而当实验室温度波动为 $\pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 就会给测量结果带来 $0.5\ \mu\text{rad}$ 的系统噪声^[15], 所以为了得到更加精确的测量结果, 实验室条件需要进一步改进。

4 结 论

对斜入射法检测平面反射镜面形的方法进行了研究, 理论上推导了斜入射法检测平面反射镜面形的公式以及斜入射方法可能引入的误差公式。实验上对尺寸为 $124\text{ mm} \times 42\text{ mm}$ 的单晶硅平面反射镜在不同斜入射角条件下进行了测量, 垂直入射时测得镜子工作表面面形起伏高度 RMS 和 PV 值分别为 16.3 nm 和 67.8 nm , 斜入射时测得镜子工作表面的面形起伏高度 RMS 和 PV 值分别为 16.8 nm 和 68.7 nm , 相对误差分别为 3% 和 0.9% 。实验结果表明, 斜入射测得的镜面面形能与垂直入射测得的结果很好地吻合, 可以满足第三代同步辐射光束线的要求, 为同步辐射光束线上使用的光学镜子提供了一种很好的测量方法。

参 考 文 献

- Luo Hongxin, Wang Jie, Xiao Tiqiao. Optical elements metrology in synchrotron radiation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s2): 134~139
罗红心, 王 劫, 肖体乔. 同步辐射用光学元件的检测 [J]. 中国激光, 2009, **36**(s2): 134~139
- Wang Yun, Xiao Tiqiao, Xu Hongjie. Effect of surface roughness of optical elements on spatial coherence of X-ray beams from the third generation synchrotron radiation sources[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(4): 553~559
王 云, 肖体乔, 徐洪杰. 光学元件表面粗糙度对第三代同步辐射光源空间相干性的影响[J]. 光学学报, 2000, **20**(4): 553~559
- Li Zhi, Zhao Yang, Li Dacheng. A diffractive long trace profiler for large aspherical optics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(10): 1224~1228
李 直, 赵 洋, 李达成. 衍射型长程大型非球面轮廓测量仪[J]. 光学学报, 2002, **22**(10): 1224~1228
- Zhi Li, Yang Zhao, Dacheng Li *et al.*. A novel long trace profiler for synchrotron radiation optics[J]. *Optical & Laser Technology*, 2005, **37**(5): 391~396
- T. Q. Xiao, S. J. Xia. A new long trace profiler for aspheric optical surface metrology[C]. *SPIE*, 2002, **4927**: 208~213
- Qian Shinan. Nanometer and nanoradian accuracy measurement of large scale plane and asphere [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(5): 16~25
钱石南. 大口径平面和非球面光学表面的纳米和纳弧度精度的测量 [J]. 激光与光电子学进展, 2008, **45**(5): 16~25
- Abhijit Patil, Pramod Rastogi. Approaches in generalized phase shifting interferometry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2005, **43**(3-5): 475~490
- Yu Yi. The Research of Zygo Interferometer and It's Application [D]. Tianjin: Tianjin University, 2005. 1~5
于 毅. ZYGO 干涉仪及其应用的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2005. 1~5
- Fang Jiguang. 3D Profile Based on Phase Shifting Interferometry[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. 20~33
方吉光. 三维微表面相移干涉术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006. 20~33

- 10 Wei Haoming, Xing Tingwen, Li Yuan *et al.*. Measurement errors in 632.8 nm high precision phase-shifting Fizeau interferometer[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(4): 041202
魏豪明, 邢廷文, 李云等. 632.8 nm 高精度移相菲佐干涉仪测量误差分析 [J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(4): 041202
- 11 Wang Haojing, Wang Jianli, Wang Minghao. Efficient image inpainting based on bilinear interpolation downscaling [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(5): 1234~1241
王昊京, 王建立, 王鸣浩. 采用双线性插值收缩的图像修复方法 [J]. 光学精密工程, 2010, **18**(5): 1234~1241
- 12 Zhang Mingyi, Li Xinnan. Influence of tilt in stitching interferometry and how to eliminate it [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(8): 117~122
张明意, 李新南. 子孔径拼接检验法中倾斜的影响及消除方法 [J]. 光电工程, 2006, **33**(8): 117~122
- 13 Tian Yi, Li Hongyu, Wang Yuezhu. Research on subaperture stitching interferometer method for measuring optical plane [J]. *Sciencepaper Online*, 2009, **2**(6): 633~639
田义, 李洪玉, 王月珠. 子孔径拼接干涉检测光学平面镜方法的研究 [J]. 中国科技论文在线, 2009, **2**(6): 633~639
- 14 Liu Baozhu, Su Yanhua, Zhang Honglin. Matlab Introduction and Mastered [M]. Beijing: Posts & Telecommunication Press, 2006. 403~406
刘保柱, 苏彦华, 张宏林. Matlab 从入门到精通 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006. 403~406
- 15 L. Assoufid, O. Hignette, M. Howells. Future metrology needs for synchrotron radiation grazing-incidence optics [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 2001, **467-468**(1): 267~270