

# 高功率固体激光器中大口径光学器件波前误差的建模及控制方法

姚 超, 王 辉, 张 政, 刘天野

清华大学机械工程系, 北京 100084

**摘要** 从惯性约束聚变系统高功率固体激光驱动器中具有典型意义的大口径激光传输反射镜的装配结构及其面形精度特点出发, 对其波前误差进行了精细化建模分析, 分别研究了粗糙度、纹波度和轮廓度的波前误差模型。在此基础上, 进一步针对如何在装校过程中将装配应力产生的波前误差控制在合理范围内的问题, 提出了方均根梯度与峰谷值相结合的波前误差评价和控制方法, 并通过实验验证了其可行性, 以期为我国神光-III 主机装置大口径反射镜装校过程中波前误差控制提供科学指导方法。

**关键词** 激光器; 高功率固体激光器; 大口径反射镜; 波前误差; 精密装配; 均方根梯度

**中图分类号** TH161; TN242 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0714003

## Wavefront Error Modeling and Control Method for Large Aperture Optical Unit in High Power Solid-State Laser

Yao Chao, Wang Hui, Zhang Zheng, Liu Tianye

*Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*

**Abstract** The fine modeling analysis of wavefront error is carried out based on assembly structure and profile accuracy characteristic of typical large aperture laser transmission mirror in high power solid-state laser driver of inertial confinement fusion system. Wavefront error models of roughness, ripple and profile are studied. To control the wavefront error caused by mounting force in assembly process within a reasonable range, a method combined root-mean-square(RMS) gradient and peak-to-valley (PV) value is proposed. Experiments are carried out to verify the feasibility of the proposed method. The study provides scientific instruction for wavefront error control in assembly process of large aperture mirror in SG-III host device.

**Key words** lasers; high power solid-state laser; large aperture mirror; wavefront error; precision assembly; root-mean-square gradient

**OCIS codes** 140.3460; 220.4880

## 1 引 言

神光-III 装置主要用于研究惯性核聚变和高能量密度及高压下物质特性, 其核心部分是高功率固体激光系统, 整个激光系统包括 48 束长程光束。打靶精度是指激光的理论瞄准位置与实际打靶位置之间距离的均方根(RMS)值, 即不同打靶束次间距的统计分布。为了满足惯性核聚变的要求, 打靶精度为  $50 \mu\text{m}$ , 即 48 束激光在几十皮秒的时间内以 RMS 小于  $50 \mu\text{m}$  的位置偏差击中在直径为 6 m 的靶球中心的一个毫米量级的靶丸<sup>[1]</sup>。高功率激光系统对于波前的基本要求是可提供进入靶腔的足够的可聚焦能量和功率。由于

**收稿日期:** 2016-12-14; **收到修改稿日期:** 2017-03-06

**基金项目:** 国家自然科学基金(51575310)

**作者简介:** 姚 超(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事惯性约束聚变中大口径光学元件表面误差建模和控制方法方面的研究。E-mail: yaochao0614@163.com

**导师简介:** 王 辉(1977—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事精密制造与装配、误差形成机理与优化方面的研究。

E-mail: wanghuisx@tsinghua.edu.cn(通信联系人)

整个高功率激光系统的光程长、光机组件结构庞大且光机元件数量多,因此分配到每个光学元件的允许误差非常小,接近目前的工程极限。

位于靶区编组站的大口径传输反射镜单元是激光驱动器中最大的光学元件,主要用来执行高能激光束的引导与传输,其性能(尤其是波前精度)会直接影响最终激光束的打靶精度和质量。目前在激光装配大厅(OAB)的工程现场对反射镜进行装校时,主要依据峰-谷(PV)值来评价装校过程对波前精度产生的影响(即装校前后反射镜的PV值变化小于 $\lambda/3$ , $\lambda$ 为波长),但是这种评价方法存在以下几个问题。

1) 由于大口径光学元件尺寸大,其检测范围从几微米到百毫米,横跨数个量级,并且同时涉及到衍射光学和几何光学,而传统的机械波前误差评价方法比较单一,难以全面评价大口径激光元件的波前误差。

2) 大口径光学元件涉及到的光学评价指标较多,包括PV、RMS梯度、功率谱密度(PSD)和RMS等,并且每种评价指标控制的光学性能和波前误差的成因不尽相同,与装校过程相关的波前误差评价方法的研究依然存在盲点和难点。

3) 有关神光-III装置的装配过程对波前精度的影响和对光学器件波前误差的控制方法的研究并不成熟。

为了研究装配过程对波前精度的影响,对反射镜的波前进行精细化建模,分别研究了不同空间频率段的波前特点、误差评价方法及波前误差对整个反射镜光学性能的影响;分析装校过程对波前的影响,提出用RMS梯度补充目前评价装校过程对波前误差影响的方法,并进行现场实验验证和案例分析,以证明该方法的准确性和可行性。

## 2 大口径光学元件波前误差的精细化表征

### 2.1 波前误差的划分

波前误差对大口径光学元件光学性能的影响是复杂且系统性的。任何光学系统评价指标的确定是为了在提高光学系统性能的同时尽可能减小成本和损耗。为了达到这一目的并适应实际工程的需要,光学评价指标需要具备2个特性<sup>[2]</sup>:1)简单性,必须容易理解且容易被一线的工程师掌握;2)准确性,必须能够精确反映所关注的光学性能的变化。

惯性约束核聚变(ICF)光学系统与传统的光学系统有着很大区别,因此不能照搬传统光学系统的光学评价指标,主要区别表现在以下3个方面<sup>[3]</sup>:1)ICF中的光学元件口径大,口径范围在400~800 mm之间,因此误差尺度范围大,涵盖了从0.001 mm到1000 mm 6个数量级;2)ICF中的光学元件在制造过程中引入了非线性效应,导致功率放大,对光学元件本身产生很大的影响;3)ICF激光器一般为几十到几百米的长系统,导致系统菲涅耳长度的变化范围很大(0.001~10 mm),包括了几何光学和衍射光学的范围。

ICF中光学元件的光学性能会随着特征尺度和菲涅耳长度的变化在不同的空间频率范围内展现出不同的性质。为了对光学元件进行全空间频段的波前质量控制,需要对不同空间频率段的波前误差进行分析。

一束平面波可以被幅值和相位以正交的方式干扰<sup>[4]</sup>,幅值会影响光束的功率密度,相位会影响波前形状,并且两者都具有将光束衍射出主光束的能力。采用复振幅方程来描述一束波的复合扰动,即

$$A = A_0(1 + u) \exp(i\nu), \quad (1)$$

式中 $A$ 为所得振幅, $A_0$ 为未受扰动的振幅, $u$ 为相对幅值变化, $\nu$ 为相位变化。假设 $\nu$ 很小,则变量 $A$ 的一阶展开为

$$A = A_0(1 + u + i\nu) = A_0(1 + a), \quad a = u + i\nu, \quad (2)$$

式中 $u$ 和 $\nu$ 的组合被称为一种模式,其扰动项为 $u + i\nu$ ,即模式幅度 $u$ 和模式相位 $\nu$ 。

对于输入到一个光学系统的波面,一般需满足3个要求:1)限制衍射损耗,可用总模式功率 $u^2 + \nu^2$ 对限制衍射损耗进行表征;2)将功率调制保持在较低水平,这样可以限制对光学器件的损坏,通过模式幅度可对功率调制水平进行表征;3)将波前失真限制在较低空间频率,可以通过模式相位 $\nu$ 对波前失真进行表征。

图1所示为某大口径光学元件的总损耗、相位畸变和峰值3个函数的功率增益曲线,分别记为 $G_{VP}$ 、 $G_{VV}$ 和 $G_{VU}$ 。 $x$ 轴代表纹波大小, $y$ 轴代表功率增益, $x$ 和 $y$ 轴都是对数标度。

图1中A部分为空间波长大于33 mm的频段,该频段内的衍射效应小,光通过滤波小孔后落在目标范围内。可以看出,增益函数 $G_{VV}$ 在A部分几乎未表现出非线性效应。此外,该频段的菲涅耳衍射长度超过

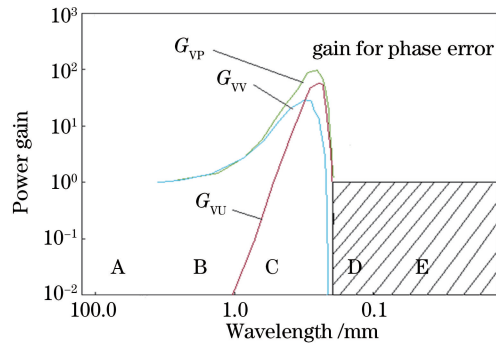


图 1 大口径光学元件的功率增益曲线

Fig. 1 Power gain curves of large aperture optical element

千米,用传统几何光学的规范是合理的。

图 1 中 B 部分为空间波长在 10~33 mm 之间的频段,该频段内的衍射效应依然较小,但是光通过滤波小孔后很可能无法落在目标角度范围内。增益函数  $G_{VV}$  小于 2,  $G_{VU}$  接近于 0,说明几乎无幅度调制。该频段内的菲涅耳衍射长度范围为 100~1000 m,与激光腔长在同一数量级。因此,使用几何光学理论还是衍射光学理论研究该频段应视具体情况而定。

图 1 中 C 部分为空间波长在 1~10 mm 之间的频段,该频段内的衍射效应不能忽略,增益函数  $G_{VP}$  和  $G_{VU}$  迅速增大至某一极大值,并且该频段内可能会产生很大的衍射损耗,进而对光学元件产生损害。

图 1 中 D 部分为空间波长在 0.1~1 mm 之间的频段,该频段内的增益函数变得混沌且出现振荡,这是因为其菲涅耳衍射长度迅速降至 1 m。

图 1 中 E 部分为空间波长小于 0.1 mm 的频段,该频段内的增益函数接近于 1,因此可认为该频段存在常规的散射损耗。

上述为大口径光学元件表面空间频率划分的理论基础,在实际工程中口径光学元件的表面空间频率一般分为高频段(粗糙度)、中频段(纹波度)和低频段(轮廓度)。

## 2.2 波前误差指标的精细化表征

由于不同空间频段对应的波前误差的形成机理、对光学性能的影响以及相应的控制方法不同,高频段、中频段和低频段波前误差的分析和表征方法有很大区别。一般地,高频段空间波长范围为 0.01~0.12 mm (相应的空间频率范围为  $8.3 \text{ mm}^{-1} < f < 100 \text{ mm}^{-1}$ ),又称粗糙度<sup>[5]</sup>。该频段内的波前误差有 2 个来源:1)材料本身的均匀性;2)加工过程中最后一道抛光工艺对晶体表面的影响。高频段误差一般需要采用小口径的相位干涉仪来测量,通常使用散射规范来控制。中频段空间波长范围为 0.12~33 mm (相应的空间频率范围为  $0.03 \text{ mm}^{-1} < f < 8.3 \text{ mm}^{-1}$ ),又称纹波度<sup>[6]</sup>。正如相关学者所描述的,任何波纹或周期性结构,无论是表现在激光的相位还是振幅上,都会对高峰值功率光学系统的性能造成一定的破坏,这是因为这类带有某些空间频率的周期性结构会引起 10~1000 倍的增益<sup>[7]</sup>。目前认为基于 PSD 的规范是控制中频段误差的有效方法<sup>[8]</sup>。低频段空间波长在 33 mm 以上(相应的空间频率  $f < 0.03 \text{ mm}^{-1}$ ),又称轮廓度。ICF 装置要求 48 束激光光束同时聚焦在靶丸上,为了保证目标靶丸的照度均匀性,每一束激光光束的光斑能量和大小都要相近。尽管衍射理论确定了理想光学表面的最小光斑,光路中所有光学元件的波前误差确定了最终聚焦光斑的大小<sup>[9]</sup>。典型的波前梯度分布为高斯分布,决定了激光基本焦斑的特征,焦斑附近的能量分布则由 PSD 函数控制。

大口径光学元件的波前误差受制造工艺、材料特性、装校过程和激光注入等的影响,并且在每个空间频段内受到的影响不同。对于装校过程而言,需要准确找出装配应力如何影响波前误差,从而确立合适的光学评价指标,使其既满足波前误差控制的要求,又具有工程可行性。

图 2 为基于空间频率分解的波前指标示意图。可以看出,波前的功率谱密度随着空间频率发生改变。根据功率谱密度的特征将图 2 划分为 3 个空间频率区域,分别对应上文的低频段、中频段和高频段,即轮廓度、纹波度和粗糙度,其中轮廓度的一个重要评价指标为 RMS 梯度,将在下文重点分析。根据测量方式的

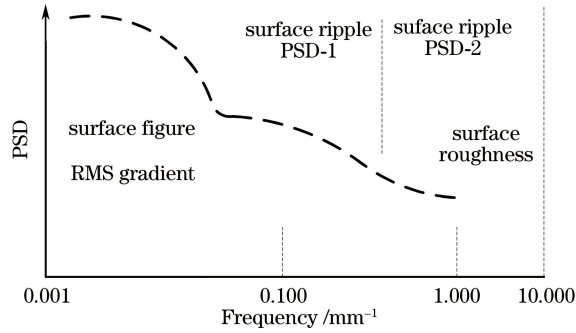


图 2 基于空间频率分解的波前指标示意图

Fig. 2 Diagram of wavefront index based on spatial frequency resolving

不同,可将纹波度细分为 PSD-1 段和 PSD-2 段。

### 3 装配应力对波前性能的影响

#### 3.1 大口径反射镜的波前误差分析

反射镜的安装分为离线装校和在线复位 2 个步骤,离线装校在激光装备大厅(OAB)中进行,将反射镜安装在线性可替换单元(LRU),将 LRU 送往主机装置进行在线复位。装校过程主要采用四周支撑的装配工艺,反射镜组件由镜体、镜框、压板、垫片、螺钉、球头组件和吊装块组成,如图 3(a)所示。镜体是通光口径为 610 mm×440 mm 的 K9 玻璃,镜框为铝制焊接件,镜框与反射镜侧面之间夹有一层厚度为 3 mm 的紫铜垫片,镜体上方用压板将其固定。这样的装配工艺主要是依靠分布在四周的 96 个螺钉向镜体施加预紧力<sup>[10]</sup>。如图 3(b)所示,反射镜单元的基本力学模型可简化为一个矩形弹性体,受重力影响,底部边缘固定,上部边缘承受均匀压力,四周承受紧固力的作用。

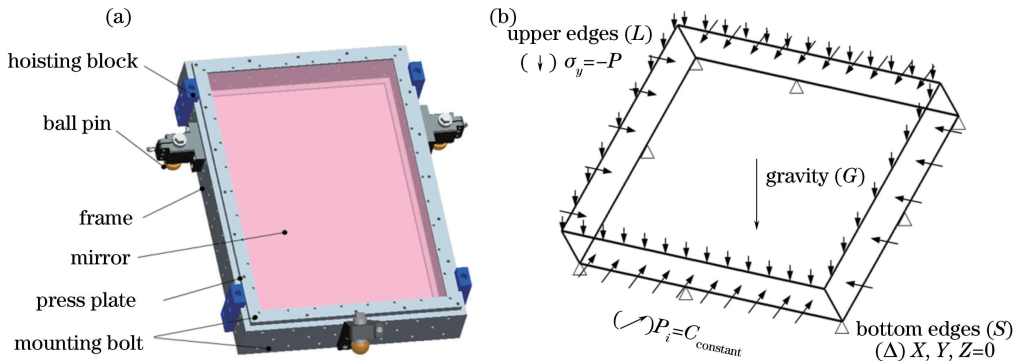


图 3 (a) TM1-6S1 型大口径激光传输反射镜组件结构;(b)反射镜单元的安装预紧力力学模型

Fig. 3 (a) Structure of TM1-6S1 large aperture laser transmission mirror; (b) mechanical model of mounted pre-tensioning force of mirror unit

上述模型的具体技术条件可以描述为:

- 1) 载荷边界条件,在上面四边(L)上存在一个均匀分布的压力  $\sigma_y = -P$  ( $P$  为压强); 在镜体周向四边上,每一个预紧螺钉的预紧载荷  $P_i$  为一常数,记为  $P_i = C_{\text{constant}}$ ,其中  $i = 1, 2 \dots$ 。
- 2) 位移边界条件,底部四边(S)的自由度为 0,3 个方向的位移  $X_s = 0, Y_s = 0, Z_s = 0$ 。
- 3) 重力作用,重力  $F = mg$  (其中  $m$  为质量,  $g$  为重力加速度), 镜体内任一点承受均匀体积力为

$$q = \rho g, \tag{3}$$

式中  $\rho$  为密度。考虑到此类矩形板在弹性小变形条件下的静力平衡问题应满足叠加原理,因此,对于基本力学模型,需考虑 3 个简单问题。

(a) 简支矩形板受重力作用的变形问题,其基本方程为<sup>[11]</sup>

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \left[ \frac{12(1-\nu^2)}{Eh^3} \right] \rho gh, \quad (4)$$

式中  $w$  为板面法向的位移,  $h$  为板的厚度,  $E$  为材料的弹性模量,  $\nu$  为泊松比。此处材料为 H-K9L 玻璃,  $\rho = 2520 \text{ kg/m}^3$ ,  $E = 79 \text{ GPa}$ ,  $\nu = 0.211$ 。

(b) 简支矩形板上沿受压变形问题。由于压力穿过了简支边, 因此压力对于镜面的实际弯曲作用很小, 可以忽略。

(c) 矩形板周向受均匀压力的变形问题, 其基本方程为

$$\frac{Eh^2}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) + \sigma_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \sigma_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0, \quad (5)$$

式中  $\sigma_x$  为  $x$  方向正应力,  $\sigma_y$  为  $y$  方向正应力。

反射镜受到重力和装配应力的作用产生形变, 从而导致反射镜表面波前发生改变, 加剧元件表面的波前畸变。

### 3.2 装配应力对轮廓度的影响

ICF 中激光系统的光学评价指标大部分是以系统的光学传播建模结果为基础得到的, 因此波前的模型与光学评价指标紧密相关。在波前误差建模分析过程中, 区分空间频率, 分别分析各个空间频率范围内的波前性能。为了分析波前误差, 将空间频率分为轮廓度区域(33 mm 以上)、纹波度区域(0.12~33 mm, 其中 PSD1 为 2.5~33 mm 的区域, PSD2 为 0.12~2.5 mm 的区域)和粗糙度区域(0.01~0.12 mm)3 个部分。轮廓度区域决定了焦斑的大小和能量分布; 纹波度区域的低频段对焦斑的边缘部分产生影响, 主要影响高强度的幅度调制, 并可能产生很强的衍射损耗, 从而对光学元件产生损害; 粗糙度一般被理解为常规的衍射损耗。事实上, 轮廓度部分的波前误差主要来自制造过程和装校过程, 会进一步影响焦斑的纵横比, 使焦斑上的功率密度变得不均匀。目前, 神光-III 主机装置中的传输反射镜的制造误差已被控制在  $\lambda/4$  以内, 若进一步减小制造误差, 难度和成本都会极大地增加。因此, 需要有效控制反射镜的装校过程中装配应力对轮廓度区域的影响, 从而提高焦斑的质量。

轮廓度区域的波前误差对光学元件聚焦能力有重要影响, 尽管衍射理论确定了理想光学表面的最小光斑, 但光学元件波前梯度的 RMS 值确定了光斑的放大程度, 即光学元件的聚焦能力。光学元件(如传输镜、反射镜等)的装校过程会在一个较长的空间范围内改变光学表面的局部斜率, 从而影响光学元件的聚焦能力, 但并不会改变表面粗糙度和测量的 PSD 值, 因此可认为 RMS 梯度是表征和控制装校过程中产生轮廓度误差的有效方法。在以往的研究工作和目前的工程现场中, 多使用波前 PV 值和 RMS 值来表征波前误差, PV 值被用来限制最大的表面偏差, RMS 值则是被测波面上各点相对于理想参考波面相应点间距的均方根, 这两种方法的制定来自实际工程中的经验准则, 难以准确表明轮廓度变化对波前性能的影响。RMS 梯度则是一种描述波前性能的统计学方法, 并且与光斑聚焦性能有着直接联系, 该方法涉及空域处理、频域滤波和梯度算法等关键技术。表 1 总结了大口径反射镜在不同空间频率的光学评价指标、测量方式和波前误差。

表 1 大口径反射镜在不同频率区间的光学评价指标、测量方式和波前误差

Table 1 Optical evaluation index, measurement mode and wavefront error of large aperture mirror at different frequency ranges

Specification	Spatial frequency / mm	Wavefront error	Wavefront error induced by mount	Measurement
Roughness	0.01-0.12	< 0.4 nm	-	Micro PMI
PSD2	0.12-2.5	NTE line	-	Micro PMI
PSD1	2.5-33	Not to exceed line	-	Phase measurement Interferometry (PMI)
RMS gradient	>33	< $\frac{\lambda}{75} \text{ cm}^{-1}$	< $\frac{\lambda}{75} \text{ cm}^{-1}$	PMI
PV	>33	< $\lambda/3$	< $\lambda/4$	PMI

## 4 RMS 梯度与波前误差

### 4.1 RMS 梯度与光斑聚焦的关系

在使用 RMS 梯度对波前进行分析前,首先给出 2 个假设:1)波阵面通过光学系统时,波阵面最终的斜率值是每个单独的光学元件相关的斜率误差不相关叠加的结果;2)在一定频率范围内,梯度的分布近似为高斯分布。最终波阵面  $x$ 、 $y$  方向的斜率为

$$\alpha_{x, \text{final}}(x, y) = \sum_{i=1}^{N_e} \alpha_{x, i}(x, y), \quad \alpha_{y, \text{final}}(x, y) = \sum_{i=1}^{N_e} \alpha_{y, i}(x, y), \quad (6)$$

式中  $N_e$  为光束通过路径上所有光学元件的数量。根据不相关叠加的假设 1)以及每个独立元件的  $x$ 、 $y$  方向的斜率方差相等,得到最终  $x$ 、 $y$  方向上的斜率方差为

$$\sigma_{\alpha_{x, \text{final}}}^2 = N_e \sigma_{x, y}^2, \quad \sigma_{\alpha_{y, \text{final}}}^2 = N_e \sigma_{x, y}^2, \quad (7)$$

式中  $\sigma_{x, y}$  为单个光学元件  $x$ 、 $y$  方向上的斜率方差。由(6)式可知,最终波阵面  $x$ 、 $y$  方向的斜率  $\alpha_{x, \text{final}}(x, y)$  和  $\alpha_{y, \text{final}}(x, y)$  是均值为 0 的高斯随机变量,其方差由(7)式给出。与前面的分析相同,可以得到最终波阵面斜率大小的分布为

$$f_{|\alpha|_{\text{final}}}(|\alpha|_{\text{final}}) = \frac{|\alpha|_{\text{final}}}{N_e \sigma_{x, y}^2} \exp\left(\frac{-|\alpha|_{\text{final}}^2}{2N_e \sigma_{x, y}^2}\right). \quad (8)$$

给  $|\alpha|_{\text{final}}$  定义一个规范,最终波阵面斜率值的 80% 必须落在预期散度  $\Omega$  内。最终波阵面上点  $(x, y)$  的斜率小于等于  $\Omega$  的概率为

$$\text{prob}\{|\alpha(x, y)|_{\text{final}} \leq \Omega\} = \int_0^{\Omega} f_{|\alpha|_{\text{final}}}(|\alpha|_{\text{final}}) d|\alpha|_{\text{final}}, \quad (9)$$

因此要求

$$\frac{1}{N_e \sigma_{x, y}^2} \int_0^{\Omega} |\alpha|_{\text{final}} \exp\left(\frac{-|\alpha|_{\text{final}}^2}{2N_e \sigma_{x, y}^2}\right) d|\alpha|_{\text{final}} \geq 0.80, \quad (10)$$

求解积分得到

$$1 - \exp\left(\frac{-\Omega^2}{2N_e \sigma_{x, y}^2}\right) \geq 0.80, \quad (11)$$

最终有

$$\sigma_{x, y} \leq \frac{\Omega}{\sqrt{-2N_e \ln 0.2}}. \quad (12)$$

由(12)式可以看出,通过光学元件数目  $N_e$  和预期散度  $\Omega$  可以倒推出波前 RMS 梯度要求<sup>[12]</sup>。神光-III 主机装置激光束打靶的聚焦光斑的波前斜率许可上限约为 60  $\mu\text{rad}$ ,因此可以反推出光路中各主要光学元件平均波前 RMS 梯度约为  $\lambda/40 \text{ cm}^{-1}$ 。

### 4.2 RMS 梯度验证的特殊考虑

第 4.1 节的推导中假设波前符合高斯分布,而实际上波前一般包含两种统计分布。在低空间频率(空间波长大于 33 mm)为近似高斯分布,在高空间频率则基本符合指数定律。因此,为了对波前畸变的高斯部分进行建模分析,需要对波前测量的结果进行低通滤波,从而计算出滤波后的 RMS 梯度。在实际的工程现场中,由于测量仪器采样频率的限制,得到的波前数据只包括中低空间频段。

## 5 波前误差建模的实验验证

### 5.1 波前梯度的计算

关于梯度的计算,在 Matlab 的计算程序中采用的是标准五点法<sup>[13]</sup>,原理如图 4 所示。

用标准五点法计算梯度时,对非边缘点和边缘点采用了不同的处理方法。非边缘点和边缘点梯度的计算式分别为

$$\nabla_x \phi(x, y) = \frac{y_{-2} - y_2 + 8y_1 - 8y_{-1}}{3(x_2 - x_{-2})}, \quad \nabla_x \phi'(x, y) = \frac{-25y_0 + 48y_1 - 36y_2 + 16y_3 - 3y_4}{3(x_4 - x_0)}, \quad (13)$$

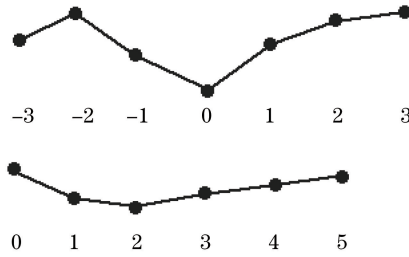


图 4 非边缘点和边缘点示意图

Fig. 4 Diagram of non-edge points and edge points

式中 $\nabla_x \phi$  和 $\nabla_x \phi'$ 为  $x$  方向的波前梯度;  $(x_a, y_b)$  为各个点对应的坐标, 其中  $a, b$  为各个点对应的数字。同理, 可以根据(13)式求出  $y$  方向的波前梯度 $\nabla_y \phi(x, y)$ , 则总的波前梯度为

$$\nabla \phi(x, y) = \sqrt{\nabla_x \phi(x, y)^2 + \nabla_y \phi(x, y)^2}。 \quad (14)$$

RMS 梯度为

$$\nabla \phi_{\text{RMS}} = \sqrt{\left\{ \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n [\nabla \phi(x, y)_{i,j} - \overline{\nabla \phi(x, y)}]^2 \right\} / [(n-1)(m-1)]}, \quad (15)$$

式中 $\overline{\nabla \phi(x, y)}$ 为波前梯度的平均值,  $m, n$  为  $x, y$  方向离散点的总行数和总列数。

RMS 梯度控制在一定的空间波长范围内, 因此在验证中对重构的波前进行了低通空间滤波, 滤波的空间截止频率为 33 mm。同时, 为了减小伪影和有限采样点的影响, 实验中采用了加汉宁窗的方法<sup>[14]</sup>。

## 5.2 验证实验结果

实验中所用的镜体是位于靶区编组站的大口径传输反射镜单元, 结构尺寸为 610 mm × 410 mm × 85 mm, 玻璃型号为 K9。反射镜波前的测量在激光装配大厅完成, 使用大口径红外干涉仪, 测量口径为 600 mm, 分辨率为 1024 pixel × 1024 pixel, 测量波长为 632.8 nm, 在竖直方向进行测量。需要注意的是, 大口径远红外干涉仪在现场的有效测量口径为 400 mm, 因此对测量得到的波前中 400 mm × 400 mm 的有效通光口径进行分析。图 5 所示为大口径干涉仪测量现场。

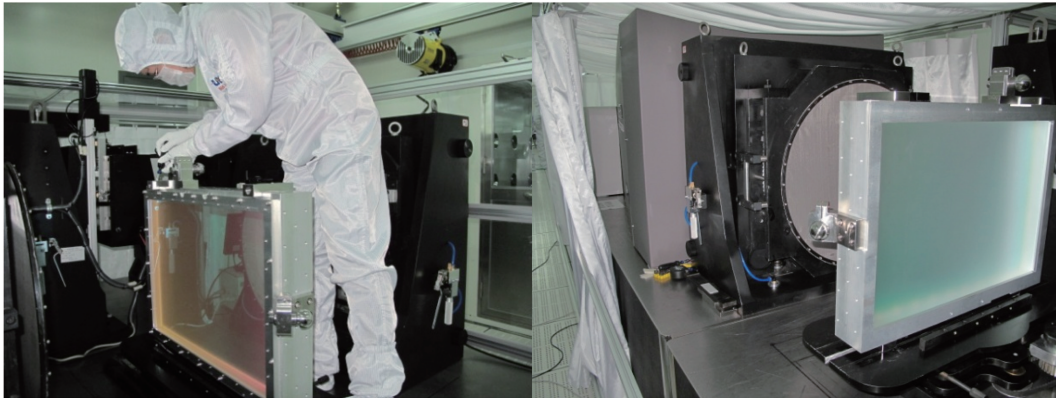


图 5 大口径干涉仪测量现场

Fig. 5 Measurement site of interferometer with large aperture

分别对受预紧力和不受预紧力的波前进行测量和分析, 并对波前进行低通滤波, 从而分离得到波前的轮廓度和纹波度。需要说明的是, 由于测量精度的限制, 干涉仪的分辨率不高, 无法测量到粗糙度部分, 因此这里只对轮廓度和纹波度中的中低频区域进行分离和分析。

比较图 6(a)~(f)可以得出, 装配应力使反射镜的波前发生了改变。在对波前的轮廓度和纹波度进行分离后, 分析发现装配应力对轮廓度产生了很大影响, 而对纹波度的影响较小, 符合第 3.2 节的理论分析。接下来分别对以上 6 种波前的 RMS 梯度和 PV 进行计算和分析。计算结果如表 2 所示, 表中 PV 用  $V_{\text{PV}}$  表示。

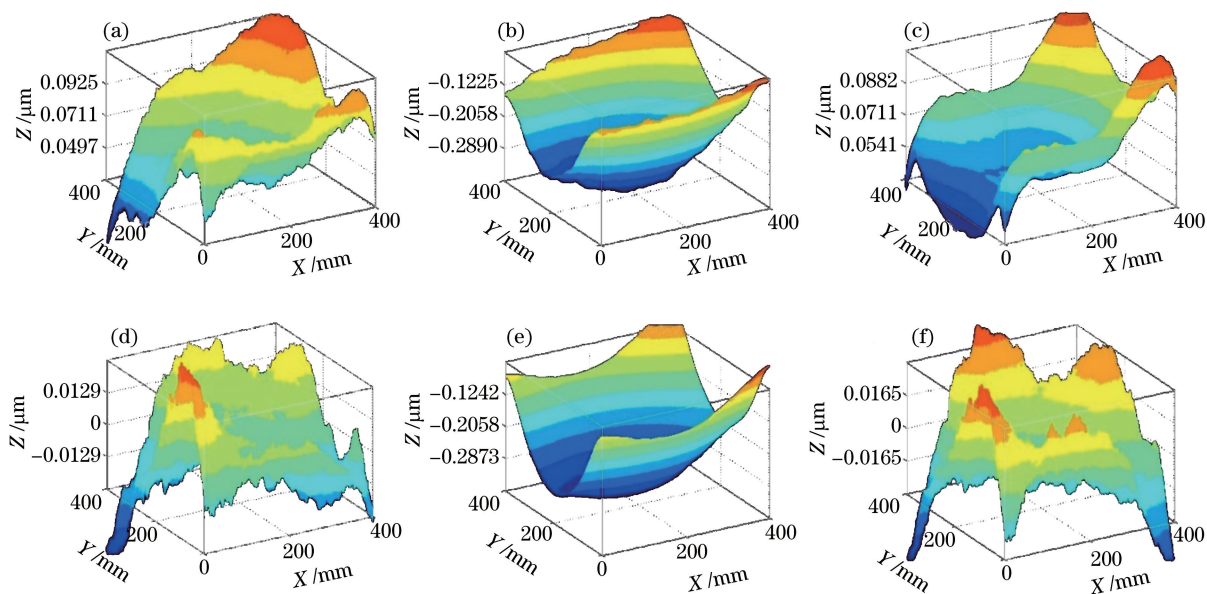


图 6 反射镜波前测量结果。(a)未受预紧力的裸镜波前;(b)受预紧力的裸镜波前;

(c)裸镜波前的轮廓度部分;(d)裸镜波前的纹波度部分;(e)受预紧力后的轮廓度部分;(f)受预紧力后的纹波度部分

Fig. 6 Measurement results of mirror wavefront. (a) Wavefront of naked mirror without pre-tensioning force;

(b) wavefront of naked mirror with pre-tensioning force;(c) profile part of naked mirror wavefront;

(d) ripple part of naked mirror wavefront;(e) profile part with pre-tensioning force;(f) ripple part with pre-tensioning force

表 2 反射镜波前测量结果

Table 2 Measurement results of mirror wavefront

Mirror type	Wavefront	$V_{PV}/\lambda$	RMS gradient / $\text{cm}^{-1}$
Unmounted mirror	Origin	0.23	$0.012\lambda$
	Figure	0.14	$0.007\lambda$
	Ripple	0.16	$0.011\lambda$
Mounted mirror	Origin	0.46	$0.017\lambda$
	Figure	0.41	$0.013\lambda$
	Ripple	0.14	$0.011\lambda$

装配应力对反射镜波前的 PV 和 RMS 梯度均产生了影响,分别如图 7、8 所示。裸镜的 PV 和 RMS 梯度分别为  $0.23\lambda$  和  $0.012\lambda\text{cm}^{-1}$ ,而施加预紧力后变为  $0.46\lambda$  和  $0.017\lambda\text{cm}^{-1}$ 。对波前进行低通滤波后得到的轮廓度的 PV 和 RMS 梯度则分别从  $0.14\lambda$  和  $0.007\lambda\text{cm}^{-1}$ 变为  $0.41\lambda$  和  $0.013\lambda\text{cm}^{-1}$ ,而高频部分的 PV 和 RMS 梯度则基本保持不变。可以看出,装配应力对波前产生了影响,这种影响主要集中在低频部分,即轮廓度部分。这种影响可以通过 RMS 梯度来度量,RMS 梯度在施加预紧力后由  $0.012\lambda\text{cm}^{-1}$ 变为  $0.017\lambda\text{cm}^{-1}$ ,并且

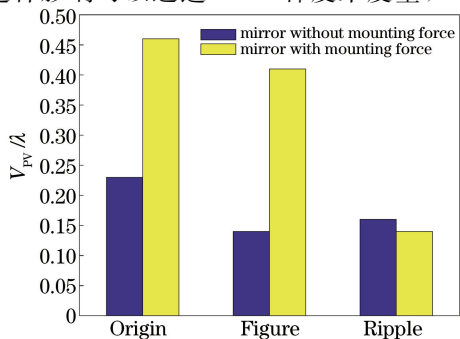


图 7 受装配力后不同频段 PV 的变化

Fig. 7 Variation in PV affected by mounting force at difference frequency bands

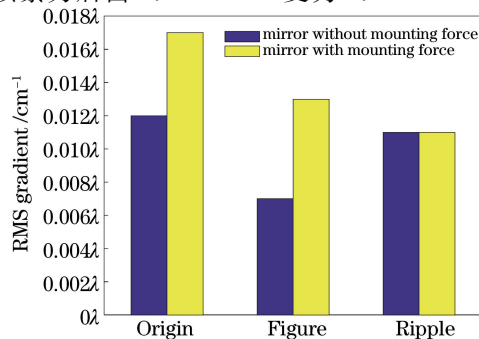


图 8 受装配力后不同频段 RMS 梯度的变化

Fig. 8 Variation in RMS gradient affected by mounting force at difference frequency bands



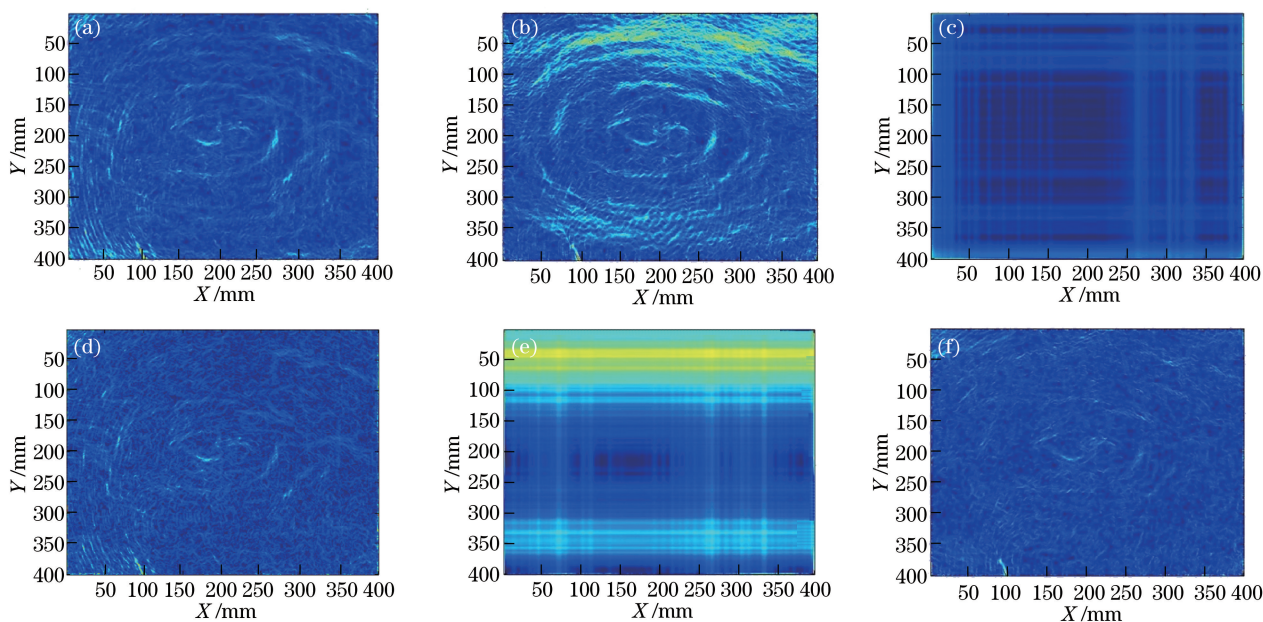


图 9 反射镜波前梯度分布。(a)未受预紧力的波前梯度分布;(b)受预紧力的波前梯度分布;(c)裸镜的轮廓度波前梯度分布;(d)裸镜的纹波度波前梯度分布;(e)受预紧力后的轮廓度波前梯度分布;(f)受预紧力后的纹波度波前梯度分布

Fig. 9 Wavefront gradient distributions of mirror . (a) Wavefront gradient distribution without pre-tensioning force; (b) wavefront gradient distribution with pre-tensioning force; (c) profile wavefront gradient distribution of naked mirror; (d) ripple wavefront gradient distribution of naked mirror; (e) profile wavefront gradient distribution with pre-tensioning force; (f) ripple wavefront gradient distribution with pre-tensioning force

空间滤波对 RMS 梯度的影响很明显,RMS 梯度在低频段变化明显,而在高频段则几乎保持不变,符合第 4 节的理论分析。

为了更清楚地看到波前梯度分布,图 10 为选取的镜面中某条线的梯度变化( $y = 200 \text{ mm}$ ),可以看到装配应力使波前梯度产生了明显变化,尤其从图 10(c)、(e)中可清楚看出装配应力对轮廓度部分波前梯度的影响。对图 10 中选取的波前进行波前梯度处理,分别得到轮廓度和纹波度的波前梯度,如图 11 所示。可以看出,纹波度的波前梯度呈随机分布的状态且在受力前后变化较小;而轮廓度的波前梯度则在受力之后有明显的跃升,与上文中整体面形的波前梯度变化趋势一致。

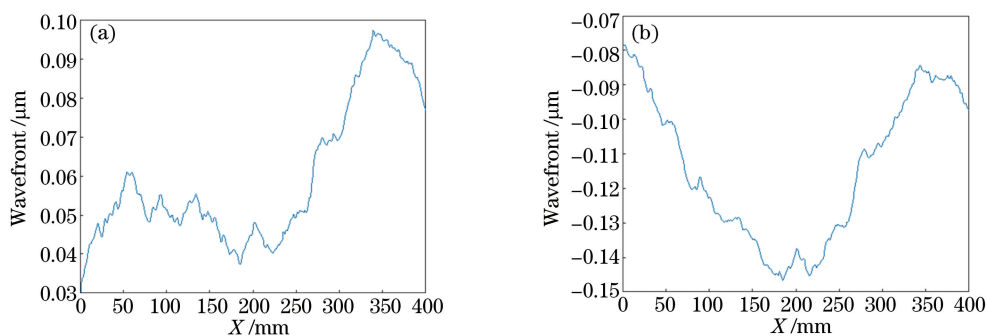


图 10 波前曲线( $y = 200 \text{ mm}$ )。(a)未受预紧力时的波前;(b)受预紧力时的波前

Fig. 10 Wavefront curves ( $y = 200 \text{ mm}$ ). (a) Wavefront without pre-tensioning force; (b) wavefront with pre-tensioning force

## 6 结 论

目前,在我国神光-III 装置激光装配大厅(OAB)的工程现场对反射镜进行装校时,主要依据 PV 值来评价装校过程中装配应力对波前精度产生的影响,这种评价方法依赖工程经验,难以系统评价波前误差。为了

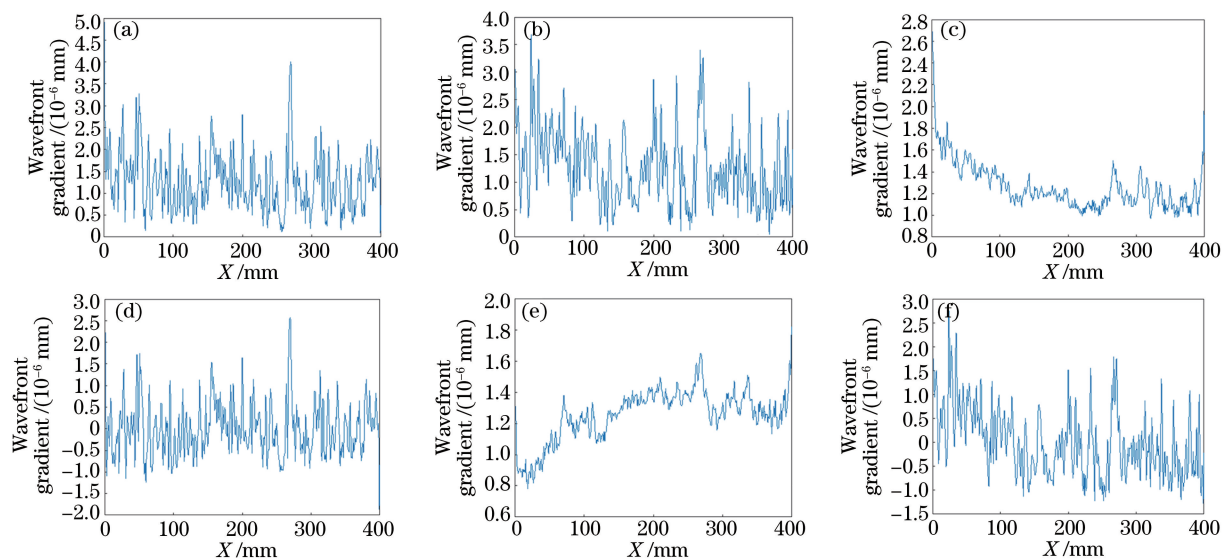


图 11 镜面中某条线( $y=200$  mm)的波前梯度分布。(a)未受预紧力的波前梯度分布;(b)受预紧力的波前梯度分布;(c)裸镜的轮廓度波前梯度分布;(d)裸镜的纹波度波前梯度分布;(e)受预紧力后的轮廓度波前梯度分布;(f)受预紧力后的纹波度波前梯度分布

Fig. 11 Wavefront gradient distributions of a line on mirror surface ( $y=200$  mm). (a) Wavefront gradient distribution without pre-tensioning force; (b) wavefront gradient distribution with pre-tensioning force; (c) profile wavefront gradient distribution of naked mirror; (d) ripple wavefront gradient distribution of naked mirror; (e) profile wavefront gradient distribution with pre-tensioning force; (f) ripple wavefront gradient distribution with pre-tensioning force

更系统全面地表征和控制装配过程中产生的波前误差,以反射镜为例,对大口径光学元件的波前误差进行了精细化建模分析,分别讨论了轮廓度、纹波度和粗糙度的影响因素以及波前指标对光机组件光学性能的影响。通过理论分析和实验发现,装配过程中的装配应力对轮廓度( $f < 0.03 \text{ mm}^{-1}$ )有很大影响,而对波前的中高频部分( $0.03 \text{ mm}^{-1} < f < 100 \text{ mm}^{-1}$ )则几乎没有影响。轮廓度部分的RMS梯度受装校力作用明显,可以有效地表征装配过程中产生的波前误差和评价波前的聚焦性能。因此,提出采用RMS梯度对现有装校过程所使用的评价方法进行改进,以期为我国新一代的主机装置装校过程提供更加系统的工艺方案。

## 参 考 文 献

- [1] Zheng Wanguo, Deng Ying, Zhou Wei, *et al.* Development of laser technology in Research Center of Laser Fusion[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(12): 3082-3090.  
郑万国, 邓颖, 周维, 等. 激光聚变研究中心激光技术研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(12): 3082-3090.
- [2] Lawson J K, Aikens D M, English R E, *et al.* Surface figure and roughness tolerances for NIF optics and the interpretation of the gradient, P-V wavefront, and RMS specifications[C]. SPIE, 1999, 3782: 510-517.
- [3] Aikens D M. Origin and evolution of the optics specification for the National Ignition Facility[C]. SPIE, 1995, 2536: 2-12.
- [4] Yu Daoyin, Tan Hengying. Optical engineering[M]. 2<sup>nd</sup> ed. Beijing: China Machine Press, 2006.  
郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 第2版. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [5] Hunt J B, Manes K R, Renard P A. Hot images from obscurations[J]. Applied Optics, 1993, 32(30): 5973-5982.
- [6] Walsh C J, Leistner A J, Oreb B F. Power spectral density analysis of optical substrates for gravitational-wave interferometry[J]. Applied Optics, 1999, 38(22): 4790-4801.
- [7] Elson J M, Bennett J M. Calculation of the power spectral density from surface profile data[J]. Applied Optics, 1995, 34(1): 201-208.
- [8] Aikens D M, Wolfe C R, Lawson J K. Use of power spectral density (PSD) functions in specifying optics for the National Ignition Facility[C]. SPIE, 1995, 2576: 281-292.
- [9] Lawson J K, Auerbach J M, Edward R E, Jr, *et al.* NIF optical specification - the importance of the RMS gradient

- specification[C]. SPIE, 1998, 3492: 336-343.
- [10] Li Guihua, Wang Hui, Xiong Zhao, *et al.* Surface error analysis of large reflecting mirror under assembly fastening forces[J]. *China Mechanical Engineering*, 2015(9): 1173-1178.  
李桂华, 王 辉, 熊 召, 等. 大口径传输反射镜在装配紧固力下的面形误差分析[J]. *中国机械工程*, 2015(9): 1173-1178.
- [11] Wang Hui, Li Qin, Xiong Zhao, *et al.* Assembly error analysis for large aperture transport mirror in high power solid-state laser system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 0922004.  
王 辉, 黎 沁, 熊 召, 等. 高功率固体激光器的大口径反射镜装配误差分析[J]. *光学学报*, 2015, 35(9): 0922004.
- [12] Haynam C A, Wegner P J, Auerbach J M, *et al.* National Ignition Facility laser performance status[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(16): 3276-3303.
- [13] Chen Yuanhua, Zheng Wanguo, Chen Wenjing, *et al.* Phase RMS gradient of the distorted wavefront for high power optical components[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(3): 403-408.  
陈源画, 郑万国, 陈文静, 等. 高功率光学元件畸变波前位相均方根梯度计算[J]. *强激光与粒子束*, 2005, 17(3): 403-408.
- [14] Wang Boxiong, Wang Xue, Chen Feifan. *Engineering measurement technology* [M]. 2<sup>nd</sup> ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.  
王伯雄, 王 雪, 陈非凡. *工程测试技术* [M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2012.