

精密光学元件先进测量与评价

程灏波 著



科学出版社

精密光学元件先进 测量与评价

程灏波 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书结合光学测量技术的最新发展,针对目前光学领域中先进光学测量技术进行了详细的探讨,主要涉及技术起源与发展、原理、优缺点、具体的测量设备,以及相关的测量方法和精度。

全书分为6章,第1章归纳了光学元件质量表述和评价方式,阐述了光学干涉测量技术的基本知识与原理;第2~5章分别介绍了子孔径拼接轮廓测量、接触式轮廓测量、结构光轮廓测量和亚表面损伤检测;第6章介绍了其他相关的光学测量方法。

本书可作为高等院校光学工程等专业高年级本科生和研究生的教材,也可供相关领域的科研人员和工程人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

精密光学元件先进测量与评价/程灏波著. —北京:科学出版社,2014

ISBN 978-7-03-041717-6

I. ①精… II. ①程… III. ①精密光学元件—测量②精密光学元件—评价
IV. ①TH74

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第193731号

责任编辑:王哲 / 责任校对:胡小洁
责任印制:王哲 / 封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年3月第一版 开本:720×1 000 1/16

2015年3月第一次印刷 印张:18

字数:360 000

定价:85.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

现代科学技术的不断发展直接推动着信息、光电子、航空航天等领域尖端科学仪器与系统的创新，进而促进系统中光学元件的多元化和精密化。对于高质量光学元件的检测与评价，不仅要符合传统成像光学系统的精密像质要求，还要体现出其应用于高功率密度条件下的运行特点，评价指标涉及表内和表面，包括均方根、峰谷值、粗糙度、亚表面损伤和波前的空间周期性划分；其检测参数除了普通形式的顶点曲率和二次曲面系数，针对离轴元件还包括离轴量和离轴角测量，对于复杂形状的自由型面元件也要充分考虑梯度和梯度变化率。近年来，在现代光电仪器中广泛应用的精密光学元件已经成为决定系统性能的关键元件之一，其测量评价结果直接影响着元件制造策略和系统装调环节。

本书内容结合作者科研团队多年来在精密光学检测评价领域的研究成果和学术积累，对精密光学元件先进测量与评价原理、方法和技术进行阐述，参考了大量的文献并融入了新的学术见解。本书以精密光学元件先进测量与评价为中心，全面地介绍了光学测量与评价的基础理论和测量原理，进而详细阐述测量方法和技术特点，同时融入了面形评价技术与方法。全书不仅注重基本概念和基本原理的描述，同时注重理论与应用的紧密结合，深入浅出地讲述近年来光学测量技术上的最新科研成果和相关领域发展态势。全书共分 6 章，第 1 章归纳了光学元件质量表述和评价方式，阐述了光学干涉测量技术涉及的基本知识与原理；第 2 章介绍了子孔径拼接轮廓测量；第 3 章描述了接触式轮廓测量；第 4 章对结构光轮廓测量方法进行了详尽的描述；第 5 章介绍了亚表面损伤检测；第 6 章介绍了其他相关的光学测量方法，例如，移相干涉测量技术、动态干涉测量技术、剪切干涉、点衍射干涉、白光干涉测量技术、外差干涉测量技术、补偿法检测非球面和计算全息法检测非球面。

在本书撰写过程中，香港城市大学的 Yuen 教授提出了宝贵的学术见解，从而完善了关联的制造工艺技术；本书的研究内容得到国家自然科学基金的资助，作者的研究生做了大量的资料整理工作，在此一并表示衷心的感谢！本书适用于

航空航天、天文和信息技术等领域从事光学制造检测工作的工程技术人员和科研人员，以及高等院校相关专业的学生。

由于作者水平有限，诚恳希望读者对本书的不足之处提出意见、建议和指正。

程灏波

2014 年 10 月于北京

目 录

前言

第 1 章	绪论	1
1.1	概述	1
1.2	光学元件质量评价	3
1.2.1	表面质量评价	3
1.2.2	亚表面质量评价	11
1.3	干涉测量基础知识	14
1.3.1	干涉原理	14
1.3.2	典型干涉测量结构	17
第 2 章	子孔径拼接轮廓测量	22
2.1	概述	22
2.2	圆形子孔径拼接	26
2.2.1	拼接原理	26
2.2.2	拼接算法	27
2.3	环形子孔径拼接	29
2.3.1	孔径划分	29
2.3.2	拼接原理	32
2.3.3	拼接算法	33
2.4	广义子孔径拼接	38
2.4.1	广义环形子孔径拼接算法	38
2.4.2	计算机模拟	42
2.5	子孔径拼接优化算法	44
2.5.1	调整误差分量及其波像差	44
2.5.2	环形子孔径拼接优化模型	47
2.5.3	仿真研究	49
2.6	测量系统	55
2.6.1	SSI-300 子孔径检测平台	56
2.6.2	实验研究	61
2.7	超大口径拼接检测	67
2.7.1	方案设计	67

2.7.2 拼接算法	74
2.8 小结	77
参考文献	77
第3章 接触式轮廓测量	82
3.1 概述	82
3.2 测量理论基础	82
3.2.1 测量原理	82
3.2.2 坐标系和坐标变换	88
3.2.3 检测路径	91
3.2.4 二次曲面系数研究	94
3.2.5 离轴镜测量模型	95
3.3 测量系统	98
3.3.1 测头系统	98
3.3.2 系统设计	109
3.4 误差分析	115
3.4.1 误差源分类	115
3.4.2 固有误差	117
3.4.3 随机调整误差	120
3.4.4 接触力诱导误差	130
3.4.5 高阶像差误差分析	131
3.5 小结	133
参考文献	133
第4章 结构光轮廓测量	137
4.1 概述	137
4.2 基于结构光原理的测量方法	139
4.2.1 傅里叶变换轮廓术	139
4.2.2 相位测量轮廓术	144
4.2.3 莫尔测量轮廓术	151
4.2.4 卷积解调法	152
4.2.5 调制度测量轮廓术	153
4.3 测量系统及其标定	155
4.3.1 结构光三维测量系统	155
4.3.2 系统参数标定	156
4.3.3 快速标定方法	162
4.4 位相展开算法	165

4.4.1	位相展开的基本原理	165
4.4.2	空间位相展开方法	167
4.4.3	时间位相展开方法	173
4.4.4	光栅图像采集与预处理	173
4.5	测量误差分析	176
4.5.1	光栅图像非正弦化过程与误差分析	176
4.5.2	非线性误差矫正方法	178
4.6	小结	187
	参考文献	187
第 5 章	亚表面损伤检测	190
5.1	概述	190
5.2	亚表面损伤产生机理与表征	193
5.2.1	产生机理	193
5.2.2	表征方法	199
5.3	亚表面损伤检测技术	201
5.3.1	破坏性检测	201
5.3.2	非破坏性检测	203
5.4	工艺试验	207
5.4.1	亚表面损伤的测量	207
5.4.2	亚表面损伤和工艺参数的关联	212
5.4.3	损伤抑制策略	217
5.5	小结	218
	参考文献	218
第 6 章	其他测量技术	222
6.1	移相干涉测量技术	222
6.2	动态干涉测量技术	228
6.3	剪切干涉	234
6.4	点衍射干涉	240
6.5	白光干涉测量技术	241
6.6	外差干涉测量技术	246
6.7	补偿法检测非球面	248
6.8	计算全息法检测非球面	256
	参考文献	272

第1章 绪 论

1.1 概 述

随着科技的不断进步，现代光学系统越来越复杂，传统的光学零件（平面镜和球面镜）已经很难满足需求，或者会使系统变得复杂。由于非球面光学元件具有矫正像差、改善像质、扩大视场的优点，同时还能够使光学系统简化、重量减轻，所以在现代光学系统中得到了越来越广泛的应用，成为决定装备性能的关键元件。在天体观察、高能激光武器、激光核聚变和空间望远镜等诸多领域中，广泛使用大口径非球面镜，可以起到球面无法替代的作用。

现代大型望远镜已经成为国家综合国力和科技进步水平的标志之一。根据瑞利（Rayleigh）判据，望远镜的角分辨率 $\beta = 1.22\lambda / D$ ，因此传统光学系统角分辨率受波长和系统孔径的限制。而对于特定的工作波段，若要提高系统的角分辨率，其根本途径则是增大望远镜的口径。空间光学、侦察卫星上的光学有效载荷要求0.4~4m口径的大型高性能光学系统；地基空间目标监测需要1~4m以上大型望远镜系统，才能满足高分辨率的要求。自20世纪80年代以来，世界各国在研制望远镜、空间相机和激光发射系统时，都尽可能地增大主镜的口径。例如，具有大型天文望远镜实例的美国Keck I和Keck II望远镜，其中主镜为双曲面，由36个六边形的子镜组成，每个子镜的直径达到1.83m；美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration, NASA）在1990年成功发射了著名的哈勃空间望远镜（Hubble Space Telescope, HST），其主镜口径为2.4m；NASA在2012年发射的James Webb天文望远镜（James Webb Space Telescope, JWST），其主反射镜的口径达到6.5m，由18块1.32m大小的六边形子镜拼接而成，主镜分割成18块六角形的镜片，每个镜面的抛光误差不得超过10nm（图1.1(a)）；美国与澳大利亚合作研发了直径为24.5m的“大麦哲伦望远镜”（The Giant Magellan Telescope, GMT）项目，由7块口径为8.4m的子镜拼接而成（图1.1(b)）；而预计2018年投入使用的“The European Extremely Large Telescope, E-ELT”，主镜直径将达到42m，它由五块镜子组成，建成后既可以用于普通可视观测，也可以用于红外线观测。由上述可知，大型非球面光学元件在空间光学中占有极大的比重。而在口径相同的情况下，通常大口径光学系统的相对口径要求比较大，以期降低系统复杂性，减轻系统重量，从而缩减成本，同时还可以提高成像质量和增加系

统的亮度。人们预测，21世纪大型反射式望远镜主镜的相对口径将大致分布在1：1.5和1：1内，这对光学检测能力提出了更高的要求。

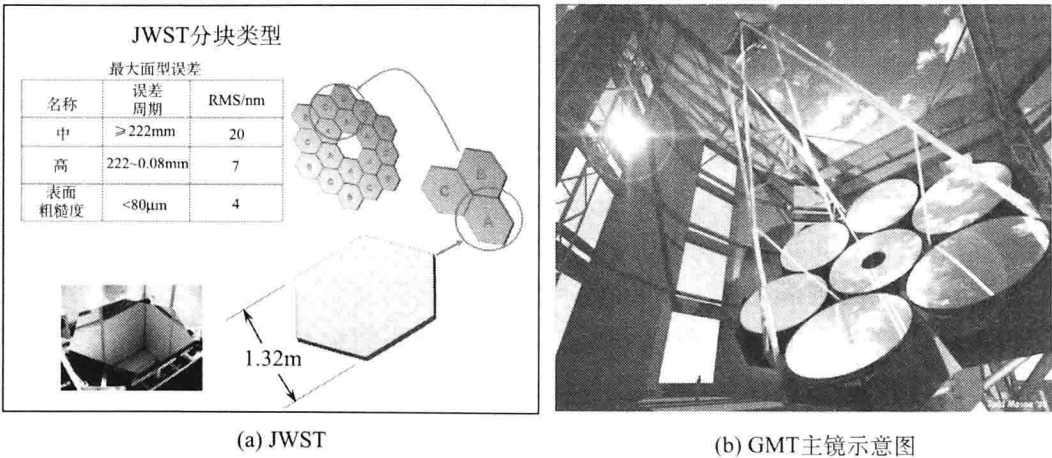


图 1.1 大型望远镜

惯性约束聚变（Inertial Confinement Fusion, ICF）工程是一个国家能源发展进步的标志。美国作为惯性约束聚变领域研究工作的代表，研制了当今世界上最大的高功率固体激光器——“国家点火装置”（National Ignition Facility, NIF），该装置的光学系统需要7000多件的大口径光学元件（口径大于400mm×400mm）。我国的神光 III 原型装置也大约需要500件各类大口径光学零件，其中最大光学零件几何尺寸达到330mm×610mm。

上述光学系统对大型光学元件的需求，尤其是大口径非球面镜的需求迅速增加。然而长期以来，非球面的检测一直是制约其广泛应用的难题，尤其是大口径、大相对口径非球面光学零件全口径面形测量问题。虽然 Shack-Hartmann 传感器测量法可以获得相对较高精度的面形信息，但是丢失了中高频面形信息。以英国 Taylor Hobson 公司制造的 Form Talysurf PGI 系列为代表的轮廓测量系统可实现非球面面形的测量，然而其目前只适用于中小口径（最大为200mm 口径）的非球面测量。由于干涉检测具有高分辨、高精度、重复性好等优点，所以成为目前检测高精度光学面形的主要手段。而普通商用移相式干涉仪可以方便地以曲率中心检验球面，但是以曲率中心检验非球面度比较大的非球面光学元件时，返回波前的角误差可能非常大，以致一些光线不能回到干涉仪孔径内，即使所有的光线都进入干涉仪孔径内，参考波前和非球面表面之间大的斜率差也将导致高的条纹密度。由采样定理可知，当干涉条纹的空间频率大于探测器的分辨率时，将出现频谱混叠现象，不能准确地探测条纹，甚至不能采样数据。例如，口径 $D=400\text{mm}$ 、相对口径 $A=1：1.4$ 的抛物面镜，按照近似公式 $\delta = DA^3 / 4096$ 估算，得到的非球

面度为 $35.6\mu\text{m}$ ，超出了普通商用标准干涉仪的垂直测量范围。辅以补偿器的干涉测量方法是检测非球面光学元件的主流方法，可以完成大相对口径非球面镜的检测。遗憾的是，在检测过程中，补偿器本身也会引入制造、检测和装调误差等问题。

1.2 光学元件质量评价

1.2.1 表面质量评价

1. 非球面表达方式

对于轴对称非球面，用它的子午截线方程表示曲面方程。在实际应用中，经常用三种形式的方程式来表达。设光轴为 X 轴，即非球面的对称轴，坐标原点取在顶点。

第一种非球面子午截线方程式为

$$y^2 = a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + \cdots \quad (1.1)$$

式中， $a_1, a_2, a_3, a_4, \cdots$ 为方程系数。如果非球面是二次曲面，则式(1.1)为

$$y^2 = 2R_0x + (e^2 - 1)x^2 \quad (1.2)$$

这是二次曲面的通用方程式。式中， R_0 为曲面近轴曲率半径； e^2 为曲面偏心率的平方。

第二种非球面子午截线方程式为

$$x = A_1y^2 + A_2y^4 + A_3y^6 + A_4y^8 + \cdots \quad (1.3)$$

式中，第一项系数和非球面近轴曲率半径有关，即 $A_1 = 0.5R_0$ 。

第三种方程式为

$$x = \frac{cy^2}{1 + \sqrt{1 - (K+1)c^2y^2}} + B_1y^4 + B_2y^6 + B_3y^8 + \cdots \quad (1.4)$$

式中， c 为近轴曲率半径， $c = 1/R_0$ ； K 为二次曲面偏心率函数， $K = -e^2$ ； $B_1, B_2, B_3, \cdots$ 为系数。

在光学设计和工程运用中，式(1.1)、式(1.3)和式(1.4)往往互相交叉使用，它们之间存在一定的系数关系。

在实际使用中，二次曲面应用最为广泛。通常取式(1.4)右边的第一项表示二次曲面。通过转换可得到二次曲面求 x 的另一个有用的表达式为

$$x = \frac{R_0 - \sqrt{R_0^2 - (1 - e^2)y^2}}{1 - e^2} \quad (1.5)$$

当 K 或 e^2 取不同的值时，代表着不同的曲面，如图1.2所示。

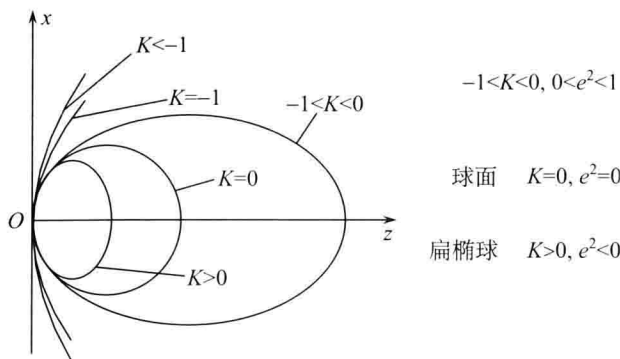


图 1.2 二次曲面

离轴非球面是同轴非球面母镜的一部分。如图1.3所示，虚线为同轴非球面母镜，矩形为要求的离轴非球面。通常仍用同轴非球面镜方程来表示离轴非球面，为表示离轴非球面偏离母镜的程度，用S（离轴非球面的几何中心到光轴的距离）表示离轴量的大小。

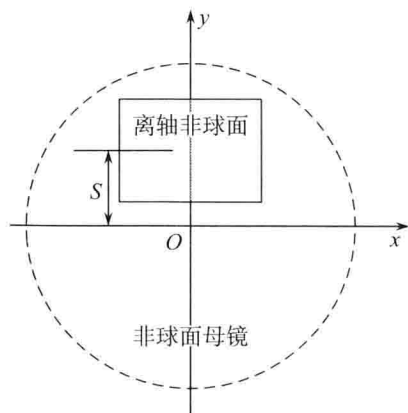


图 1.3 离轴非球面示意图

2. 表面质量评价标准

传统光学元件加工面形质量的评价指标主要是反射（或透射波前）的峰谷值或均方根值，这些指标所包含的元件表面误差信息是相当有限的。现代精密光学系统（如短波长紫外光学系统、惯性约束聚变激光驱动器系统等）对光学元件的质量评价提出了新的要求，即要求对波前误差的频谱分布进行评价和控制，从而引入粗糙度功率谱密度（Power Spectral Density, PSD），其意义在于：当光学元件表面粗糙度误差是表面散射现象的主要贡献源时，基于标量衍射理论和傅里叶线性系统理论，可以通过计算表面粗糙度的PSD函数来获得表面的散射函数（Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF）。因此，粗糙度PSD指标

特别适用于光滑光学表面的质量评价，它给出了元件表面粗糙度各个空间频率误差对表面散射特性影响的精确量度。

美国劳伦斯-利弗莫尔国家实验室（Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL）在“国家点火装置”的研制过程中，根据光学元件的口径、自适应光学校正技术和空间滤波器的设计原则，按照空间频段的不同将光学元件的制造误差具体分为三段：空间波长 $\lambda > 33\text{mm}$ ，称为面形偏差；空间波长 $0.12\text{mm} < \lambda < 33\text{mm}$ ，称为波纹差；空间波长 $\lambda < 0.12\text{mm}$ ，称为粗糙度。

Barakat 和 Harvey 等认为各个空间频段的波前误差从以下几个方面降低了系统的性能：①低频分量扰动（主要是面形误差）对应着光束的小角度散射。将系统光束能量从图像中心移到前几级衍射环，因此系统的 Strehl 比或峰值强度降低，但系统的会聚光斑尺寸并未明显展宽。②高频分量的扰动（如表面粗糙度等）对应着大角度的散射，成为系统的杂散光。这种扰动将光束能量从图像中心散射到很宽的晕带，降低了图像的对比度或信噪比。由于扰动尺度很小，同样未明显展宽图像核心部分的尺寸。③介于低频和高频之间的扰动产生了小角度散射，使光束无法达到焦平面，在降低峰值强度的同时，显著地增大了光斑的尺寸，使图像变得模糊。这种频段的扰动严重地影响了短波长光学系统的成像质量。

1) 面形评价

面形评价基本上包括以下三个评价标准：峰谷（Peak-to-Valley, PV）值，均方根（Root-Mean-Square, RMS）值和离焦量（Power）。

PV是指测量范围内面形最高值和最低值的差，如图1.4所示。

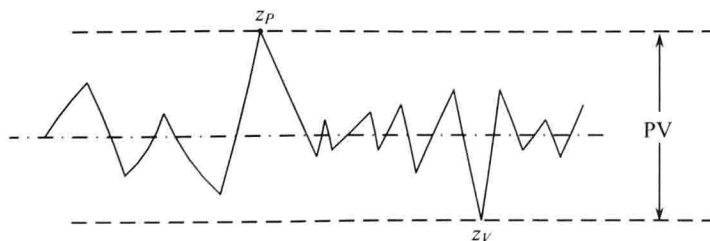


图 1.4 峰谷值表示方式

$$PV = z_p - z_v \quad (1.6)$$

RMS 是指被测波前偏离期望波前的程度，如图 1.5 所示。

$$RMS = \sqrt{\frac{(z(x_1, y_1) - z_E)^2 + (z(x_2, y_2) - z_E)^2 + \cdots + (z(x_N, y_N) - z_E)^2}{N}} \quad (1.7)$$

一般来说

$$z_E = \frac{z(x_1, y_1) + z(x_2, y_2) + \cdots + z(x_N, y_N)}{N}$$

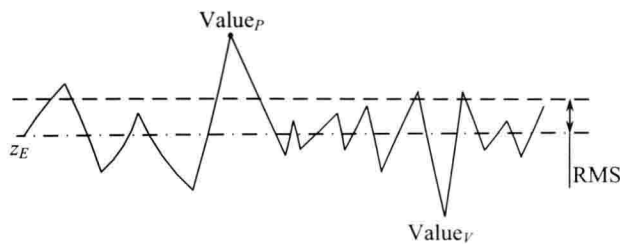


图 1.5 均方根表示方式

Power 是指被测波前上的一条测量曲线，是中心和边界的高度差。当测量波前为凹面时为正值，当测量波前为凸面时为负值，如图 1.6 所示。假如测量面形可以表示为

$$Z(x, y) = C_0 + C_1x + C_2y + C_3(x^2 + y^2)$$

则 Power 可以表示为

$$\text{Power} = C_3R^2 \tag{1.8}$$

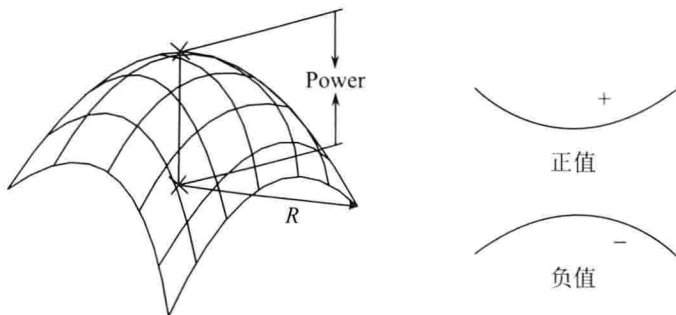


图 1.6 离焦量表示方式

2) 波纹度评价

测量波前误差频谱分布的需求日益迫切，导致了人们对波前功率谱密度测量和评价技术的关注。

考虑一般意义上PSD函数的定义。令 $u(t)$ 是一已知的函数，如果 $u(t)$ 是不可以进行傅里叶变换的，但是具有有限的平均功率，则

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} u^2(t) dt < \infty \tag{1.9}$$

这样，截断后的函数

$$u_T(t) = \begin{cases} u(t), & -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1.10)$$

是可以进行傅里叶变换的，其频域表示为 $|u_T(\nu)|^2$ ，代表截断后 $u_T(t)$ 的能量随频率的分布，则 $u_T(t)$ 的归一化能谱密度为

$$\text{PSD}_T(\nu) = \frac{|u_T(\nu)|^2}{T} \quad (1.11)$$

式(1.11)具有单位频段上功率的量纲，因此，从逻辑上可以定义 $u(t)$ 的功率谱密度为

$$\text{PSD}(\nu) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|u_T(\nu)|^2}{T} \quad (1.12)$$

光学元件 PSD 的分析方法最早引入对元件表面粗糙度的量度。这个标准包含四个参数：比例系数 A 、幂指数 B 、最小空间频率 C 和最大空间频率 D ，其表达式为

$$\text{PSD}(f) = \frac{A}{\nu^B}, C \leq \nu \leq D \quad (1.13)$$

式中， B 的取值范围为 $1 \sim 3$ 。 $0.12\text{mm} < A < 33\text{mm}$ 的中频段，对应着小尺度非线性增长最严重的误差部分。NIF 对光学元件这种频段的制造误差评价，采用了波前 PSD 的描述方法，其具体的评价指标为

$$\text{PSD}(\nu) \leq A\nu^{-B} \quad (1.14)$$

式中， $A=1.05$ ； $B=1.55$ 。

根据 PSD 的基本定义，波前 PSD 定义为波前各频率分量傅里叶频谱振幅的平方，其一维的定义形式为

$$\text{PSD}(\nu_i) = \frac{[A(\nu_i)]^2}{\Delta \nu} \quad (1.15)$$

式中， ν_i 为空间频率； $\Delta \nu$ 为频率间隔。 $A(\nu_i)$ 波前函数 $W(x)$ 关于频率 ν_i 的傅里叶振幅为

$$A(\nu) = \int_0^L W(x) e^{-i\nu x} dx \quad (1.16)$$

式中， $W(x)$ 为一维方向的波前畸变相位值； L 为采样长度。一维 PSD 的量纲为长度单位的三次方。

如果波前相位信息是各向异性的，那么还必须进行二维分析。二维波前 PSD 的定义为

$$\text{PSD}(v_x, v_y) = \frac{[A(v_x, v_y)]^2}{\Delta v_x \Delta v_y} \quad (1.17)$$

其中

$$A(v_x, v_y) = \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} W(x, y) e^{-i(v_x x + v_y y)} dx dy \quad (1.18)$$

波前PSD是一种描述波前信息的新方法，而不是新的物理量。传统光学系统广泛采用波前峰谷值、均方根值或Zernike多项式来评价光学质量，波前峰谷值和均方根值均不包含误差的频率分布信息，而Zernike多项式是定义在单位圆内部的正交多项式集，不适于分析非圆孔径，且主要分析低频像差，中频和低频误差只以高阶残差的形式表征。因此，这些传统的评价指标缺乏定量化的频谱描述功能，难以提供丰富的波前误差信息（特别是空间波长在毫米量级的中频误差信息）用于评价在强光效应下光学元件对系统的调制影响。

PSD本质是傅里叶频谱分析，分析时不受元件孔径的限制，便于对不规则外形的元件进行各种频率分量的分析。采用PSD描述方法，通过傅里叶变换，可以定量给出光学元件波前误差的空间频率分布，从而确定各个频率分量的影响。

此外，从傅里叶变换的实质，可以将PSD同其他物理评价指标联系起来。根据Parseval定理，波前误差的RMS与PSD的关系为

$$\text{RMS}^2 = \Delta x \cdot \sum_v [\text{PSD}(v)]^2 \quad (1.19)$$

波前误差的RMS值直接对应焦点的强度分布。因此，波前PSD实际上以波前散射角的形式供述了散射光的强度和方向。

一维PSD的计算公式：光学面形轮廓函数 $z(x)$ 的一维傅里叶变换为

$$Z(k) = \int_0^L z(x) \exp(-jkx) dx \quad (1.20)$$

将式(1.20)离散化为

$$Z(m) = \sum_{n=0}^{N-1} z(n) \exp\left(-\frac{j2\pi mn}{N}\right) \Delta x \quad (1.21)$$

式中， $k = 2\pi f_m$ ， $f_m = \frac{m}{N} \Delta x$ ，为表面粗糙度的空间频率； $-N/2 \leq m \leq N/2$ 可从表面轮廓数据直接得到，其一维PSD的计算公式为

$$\text{PSD} = \frac{|Z(m)|^2}{L} = \frac{1}{L} \left| \sum_{n=0}^{N-1} z(n) \exp(-j2\pi f_m n) \right|^2 \quad (1.22)$$

另外，二维PSD的计算公式为

$$\text{PSD}(f_m, f_n) = \frac{D^2}{MN} \left| \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} z(k, j) \exp[-j2\pi(f_m + f_n)] \right|^2 \quad (1.23)$$

式中, f_m 、 f_n 为空间频率; D 为空间采样频率; M 、 N 为采样点数。

3) 粗糙度

表面粗糙度是指加工表面具有的较小间距和微小峰谷不平度。其两波峰或两波谷之间的距离(波距)很小(在1mm以下), 用肉眼是难以区别的, 因此它属于微观几何形状误差。表面粗糙度越小, 则表面越光滑。主要包括轮廓的算术平均偏差 R_a 和轮廓的最大高度 R_z 。

轮廓的算术平均偏差 R_a 是在一个取样长度 l 内, 纵坐标值 $Z(x)$ 绝对值的计算平均值, 如图 1.7 所示。 R_a 可表示为

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (1.24)$$

离散形式为

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z_i|$$

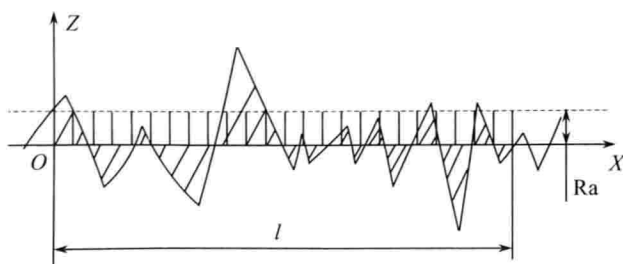


图 1.7 轮廓的算术平均偏差

轮廓的最大高度 R_z 是在取样长度 l 内, 最大轮廓峰高 R_p (在一个取样长度内最大的 Z_p) 和最大的轮廓谷深 R_v (在一个取样长度内最大的 Z_v) 之和的高度, 如图 1.8 所示。

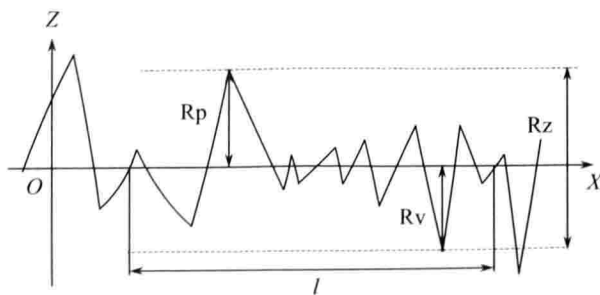


图 1.8 轮廓的最大高度