

高分辨宽能段软 X 射线光束线热负载影响与修正

石应波^{1,2} 王 勇² 邰仁忠² 丁 洪¹

¹中国科学院物理研究所, 北京 100190

²中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800

摘要 正在建设中的上海光源梦之线(Dreamline)是一条宽能段、超高能量分辨率的软 X 射线光束线。如此高指标的光束线在建设过程中有许多难点需要克服,其中光学元件的热变形是达到数万分辨能力的主要障碍。梦之线采用的 5 m 长的波荡器会产生很高的热辐射从而使各光学元件,特别是第一块平面镜(M1)和第二块平面镜(M2)发生热形变进而影响整个光束线的性能。因此本文计算了 Dreamline 各光学元件的热功率密度分布,在此基础上对各光学元件进行了稳态热分析,得到 M1、M2 达到热平衡时的温度,热变形和面形误差分布,进而利用热变形结果对光束线进行了追迹,并且设计了一套热修正装置指导单色仪自身的聚集调节从而消除镜面热变形对光束线性能的影响。结果表明,即使在镜面热变形最高的情况下,通过对各光学元件进行有效的冷却并通过单色仪自身的聚集调节能消除镜面热形变对光束线性能的影响。

关键词 X 射线光学; 热形变修正; 面形误差; 有限元分析; 光束线追迹

中图分类号 TB24 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.073401

Analysis and Correction of Heating Effect on High Resolution and Wide Range Soft X-Ray Beamline

Shi Yingbo^{1,2} Wang Yong² Tai Renzhong² Ding Hong¹

¹*Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*

²*Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*

Abstract The under building Dreamline at Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF) is a wide range and high resolution soft X-ray beamline. There are many difficulties to overcome for building a beamline with such high target. Especially, the thermal deformation of optical elements is one of the main obstacles. Based on the focal parameters of SSRF, the thermal power density distribution absorbed by optical elements is calculated. Finite element analysis is utilized to perform the thermo-mechanical analysis of M1 and M2 to obtain the temperature gradient distribution, the surface displacements and the slope errors of these optical elements, and then ray tracing simulation is done. In addition, a thermal deformation correction device is designed to cancel the deleterious effects of these deformations. According to the result, even under the worst-case thermal deformation of the optical element surfaces, effective cooling and appropriate focusing corrections are able to cancel the deleterious effects of these deformation.

Key words X-ray optics; thermal deformation correction; slope error; finite element analysis; ray tracing

OCIS codes 340.6720; 340.7470; 340.7480

1 引言

近年来,随着以大流强和高电子能量为特征的第三代同步辐射装置的相继建成,高热载光学元件的损伤和热变形已成为限制光束线性能进一步提高的瓶颈之一^[1]。由于各个同步辐射装置具有不同的光谱分布以及使用的插入件类型和参数不同,同一个同步辐射装置上不同光束线的光谱分布也相差甚远。因此在光

收稿日期: 2013-11-30; 收到修改稿日期: 2013-12-05; 网络出版日期: 2014-06-12

基金项目: 国家自然科学基金(11005146)

作者简介: 石应波(1982—),男,博士研究生,主要从事同步辐射光束线关键技术方面的研究。

E-mail: ybshi517@aphy.iphy.ac.cn

导师简介: 丁 洪(1968—),男,研究员,博士生导师,主要从事光电子能谱方面的研究。

E-mail: dingh@aphy.iphy.ac.cn(通信联系人)

束线设计和光学元件的研制过程中,需要根据实际情况,采取不同的冷却方案^[2](直接或间接水冷),选取不同的冷却剂^[3](去离子水或液氮)及不同的材料^[4-5]来尽量减小热变形对光束线性能的影响。

本文针对梦之线光源和光束线光学特性给出了冷却方案,讨论了在该方案下光学元件热形变对光束线性能的影响,并设计了一套热修正装置来修正这些影响,为光束线工程设计和实际操作提供了强有力的依据。

2 光束线描述

由于能量范围太宽,因此梦之线光源采用两台5 m可变椭圆极化波荡器^[6]。低能波荡器周期长度148 mm,周期数32,光子能量覆盖范围为20~200 eV。高能波荡器的周期长度为58 mm,周期数86,光子能量覆盖范围为200~2000 eV。

当高能波荡器的间隙调到最小,产生的光子能量为200 eV时,波荡器辐射的功率密度最高。根据上海光源(SSRF)电子束的参数^[7]和光子尺寸^[8],计算出200 eV时光源中心光锥的尺寸和发散角,如表1所示。

表1 200 eV时光源中心光锥的尺寸和发散角(均方根)

Table 1 Root mean square (RMS) size and divergence of the central cone at 200 eV

$\Sigma x / \mu\text{m}$	155.8
$\Sigma y / \mu\text{m}$	21.9
$\Sigma x' / \mu\text{rad}$	41.3
$\Sigma y' / \mu\text{rad}$	25.5

光束线光学布局如图1所示。

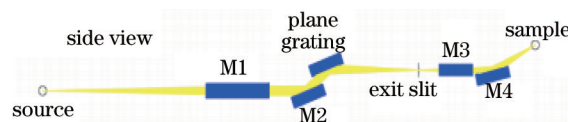


图1 梦之线光学布局示意图

Fig.1 Schematic of dreamline

表2列出了200 eV下使用高分辨率变线距光栅^[9](光栅中心处线密度为 1200 mm^{-1})时各光学部件离光源的距离、入射角度和偏转方向等参数。

表2 200 eV下使用高分辨率光栅时各光学部件离光源的距离、入射角度和偏转方向

Table 2 Distance from the source, angle of incidence, and deflection of the optical components when the monochromator is tuned to 200 eV using the high resolution grating

Element	Distance /mm	Angle /($^{\circ}$)	Deflection
M1: Plane	22000	88.8	Horizontal
M2: Plane	26901	84.3	Vertical
Gr: Grating	27000	86.4	Vertical
Slit	45000		
M3: Plane elliptical	46200	88.5	Horizontal
M4: Plane elliptical	46700	88.75	Vertical
Sample	47700		

平面镜M1使入射光水平偏转 2.4° ,主要用于降低下游热负载同时高频滤波。单色仪采用SX700型平面光栅单色仪^[10],主要光学元件包括平面镜M2和变线距平面光栅。平面镜M2可以反射光束,改变变线距平面光栅的衍射角,另外还能去除高次谐波。变线距平面光栅色散入射的同步辐射复合光,同时将以分离的单色光聚集到出光狭缝。

后置聚焦采用KB成像系统^[11]将光束线聚焦到样品点。第一面柱面镜M3用于水平方向聚集,缩放比为31。第一面柱面镜M4用于垂直方向聚集,缩放比为1.7。

3 光学元件热功率密度计算及冷却方案选取

针对SSRF储存环参数,当波荡器的间隙调到最小,产生水平偏振的光子能量为200 eV时,波荡器辐射的总功率为6.97 kW。此时,光源中心光锥的尺寸和发散角如表1所示。计算功率密度时,光束线白光狭缝

的开度选为 $6 \Sigma x'(y')$, 在此范围内利用了大部分的光子, 并且偏振保持一致。由于各次谐波功率的角度分布不一样, 并且光学元件对各次谐波的吸收率各异, 在计算 M1 功率密度时, 先用 SPECTRA 9.0^[12] 计算出各次谐波在白光狭缝开度范围内垂直接收时的角度分布, 再分别乘上 M1 在当前入射角下对各次谐波的吸收率, 最后将乘了吸收率的功率密度加总并按 M1 反射面和光线的夹角分布展览到 M1 的反射面上。M2 和光栅的功率密度分布也按这种方法计算, 但计算时要去掉上游光学元件对功率的吸收。

选择 200 eV 进行分析是因为同时考虑到光源辐射功率最高和 M2 的入射角最小(对光子吸收率最高)。因此, 在这种情况下 M1 和 M2 的热载荷同时达到最高, 即 M1 和 M2 热变形最严重的情况。

M1 的热功率密度分布如图 2 所示。M1 的最大功率密度为 1.25 W/mm^2 。从图 2 可以看出, 由于高能光子竖直方向张角小, 因此功率密度分布梯度在沿 M1 弧矢方向变化较大。M2 的热功率密度分布如图 3 所示。M2 的最大功率密度为 0.36 W/mm^2 。由于大部分功率被 M1, M2 吸收, 光栅上的功率密度很小(小于 5 mW/mm^2)。根据功率密度的不同对各光学元件采用不同的冷却方案。M1, M2 采用内部直接水冷, 光栅采用外部间接水冷。

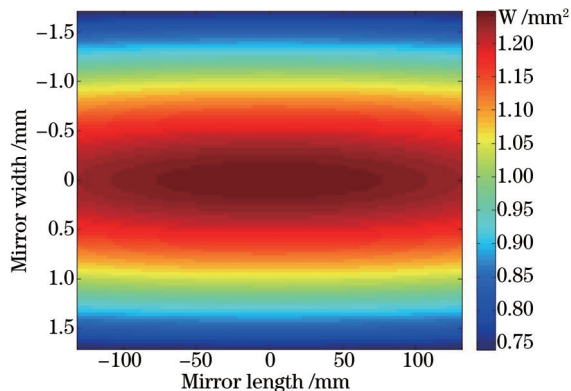


图2 平面镜M1吸收热功率密度分布
Fig.2 Power density absorbed in M1

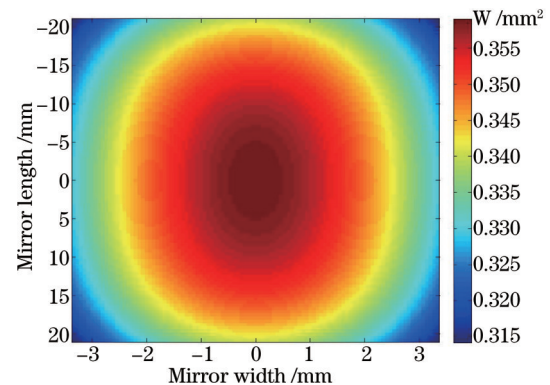


图3 平面镜M2吸收热功率密度分布
Fig.3 Power density absorbed in M2

4 热形变有限元分析

为了深入地研究热载荷对 M1, M2 光学性能的影响及确认所采取的方案是否合理, 采用有限元分析软件 ANSYS 分别对 M1, M2 进行了热形变分析。热形变分析分为两步: 1) 采用 ANSYS 稳态热分析^[13] 求解技术, 将上面计算得到的热功率密度数据用表格技术施加到镜子表面来表征镜子的热负载, 并根据 M1, M2 的冷却方案, 计算达到热平衡时镜子的温度分布, 2) 将热分析的温度分布数据作为结构分析的单元负载施加到相应的节点上并用 ANSYS 静态结构分析技术求解纯热应力所产生的热变形。在实际的分析过程中, 采用了一些简化的模型, 如忽略了冷却剂自身的温度升高, 重力和镜子夹具对镜子产生的形变, 另外镜子的基底材料的杨氏模量被认为是各项同性的常数。

平面镜 M1 采用单晶硅为基底。基底的外形尺寸为 $500 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 。基底的冷却结构由 11 根贯穿整个基底的平行冷却槽所构成, 平行槽的截面为 $1 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的矩形, 平行槽上表面离镜面距离为 1 mm 。平面镜 M2 同样采用单晶硅为基底。基底的外形尺寸为 $430 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 。基底的冷却结构由 13 根贯穿整个基底的平行冷却槽所构成, 平行槽的截面为 $1 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的矩形, 平行槽上表面离镜面距离为 1 mm 。由于 M2 表面分为 2 个镀层区域, 分别是 Ni 和 Au 镀层, 同时根据 SX700 单色仪的机械原理^[14], M2 需要绕以镜面外某点为圆心转动, 因此光斑的中心并不在 M2 的中心。用于有限元分析 (FEA) 的镜子基底的材料参数如表 3 所示。由 ANSYS 热分析得到 M1, M2 表面的最高温度与最低温度之间的温差分别为 23.1 K 和 10.6 K 。

由热载荷引起的 M1 热变形分布如图 4 所示。从图中可以看出, 除了整体的热形变外, 在热载荷吸收区域有一个隆起。沿 M1 子午方向通过形变最高点的形变和面形误差如图 5 所示。最大的面形误差在镜子的两端, 这是由于在镜面上从热负载区域过度到非热负载区域温度梯度比较大引起的。但是这已超出了 200 eV 时一次谐波的中心光锥的范围, 因此不会影响光斑的水平尺寸。这里可以看出白光狭缝开度大于中心光锥尺寸是有其优势的。沿 M1 弧矢方向通过形变最高点的形变和面形误差如图 6 所示。这个方向的热变形将

影响单色仪的分辨率。

表3 用于有限元分析的材料参数

Table 3 Parameters used in the FEA

Density $/(g/mm^3)$	2.33×10^{-3}
Young modulus $/(N/mm^2)$	1.3×10^5
Poisson's ratio	0.28
Expansion coefficient $/(10^{-6} K^{-1})$	Temperature dependent 1.406~3.25 over 200~400 K
Conductivity $/[W/(mm \cdot K)]$	Temperature dependent 0.266~0.105 over 200~400 K
Water bulk temp $/^{\circ}C$	20
Convection coefficient $/[W/(mm \cdot ^{\circ}C)]$	0.01

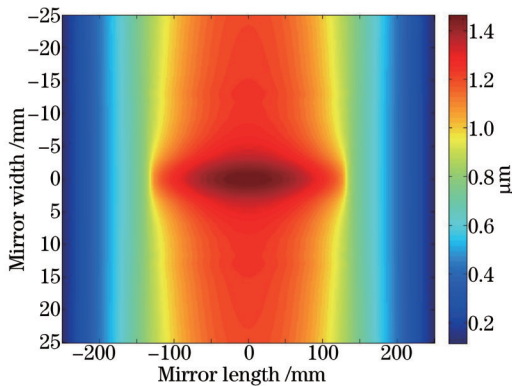


图4 M1 镜面热变形分布

Fig.4 Surface displacement distribution of M1

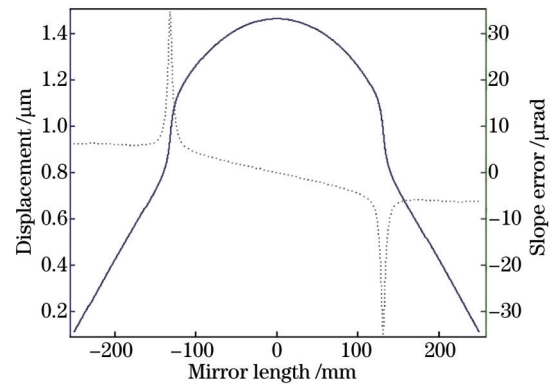


图5 M1 沿 X 射线入射方向在热载荷纵向中心线上的热变形和面形误差

Fig.5 Displacement and slope error of M1 along along X-ray incident direction at the vertical central of heat load

M2 热变形分布如图 7 所示。正如前面提到的光斑中心不在镜面中心,因此热形变最大值不在镜面中心。沿 M2 子午方向和弧矢方向通过形变最高点的形变和面形误差分别如图 8、9 所示。子午方向的热形变将影响分辨率而弧矢方向的热形变将影响光斑的水平尺寸。

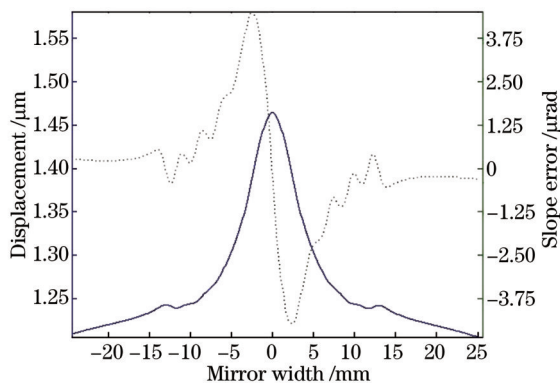


图6 M1 上沿 X 射线入射方向在热载荷横向中心线上的热变形和面形误差

Fig.6 Displacements and slope error of M1 along along X-ray incident direction at the horizontal central of heat load

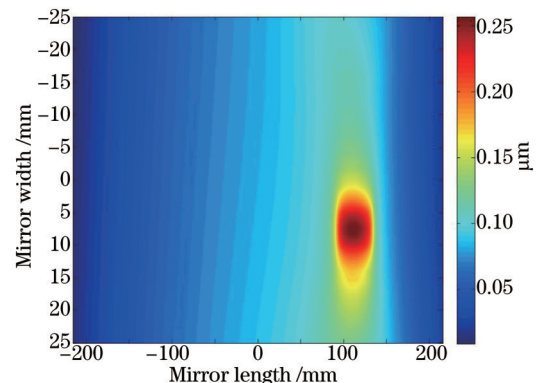


图7 M2 镜面热变形分布

Fig.7 Surface displacement distribution of M2

5 光束线的光学追迹

将镜面热形变结果输入光线追迹程序 SHADOW^[15],对光束线光学系统做精确的成像模拟,从而得出热形变对单色仪的光谱分辨率、光学元件的成像像差的影响并通过调整单色仪的固定聚点常数^[10](Cfr)验证是否能消除这些影响。

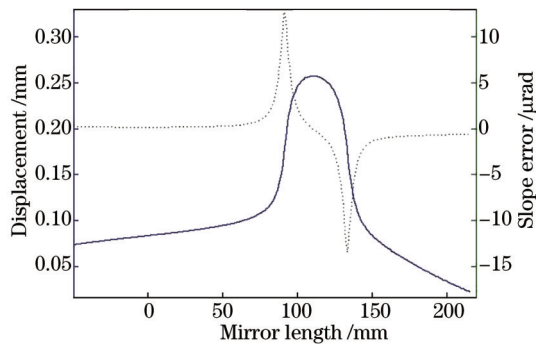


图8 M2上沿X射线入射方向在热载荷纵向中心线上的热变形和面形误差

Fig. 8 Displacement and slope error of M2 along along X-ray incident direction at the vertical central of heat load

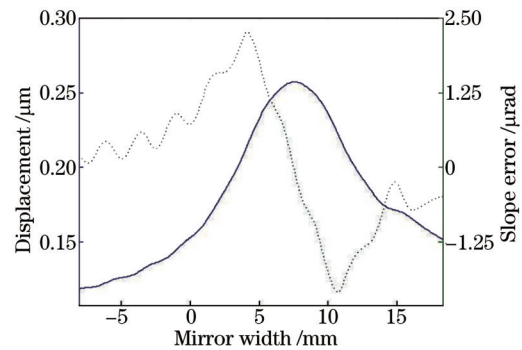


图9 M2上沿X射线入射方向在热载荷横向中心线上的热变形和面形误差

Fig.9 Displacement and slope error of M2 along along X-ray incident direction at the horizontal central of heat load

图10给出了200 eV、200.01 eV两条谱线在单色仪出缝平面的分光光谱。从图10(a)可以看出在没有热变形情况下,两谱线已完全分开。如果将热形变加载到镜面上进行模拟,将得到图10(b)。从图中可以看出,两条谱线混合在一起。事实上,在光锥中心范围内镜子的热变形接近一个突起的圆弧,这相当于加长了光源到光栅的距离,因此可以通过调整单色仪内光学元件姿态将光斑重新聚集到单色仪出缝平面上来。通过将单色仪的Cff值从2.187调整到2.216,得到调整后光谱分布如图10(c)所示。可以看出,经调整后单色仪仍然能达到20000的分辨率。

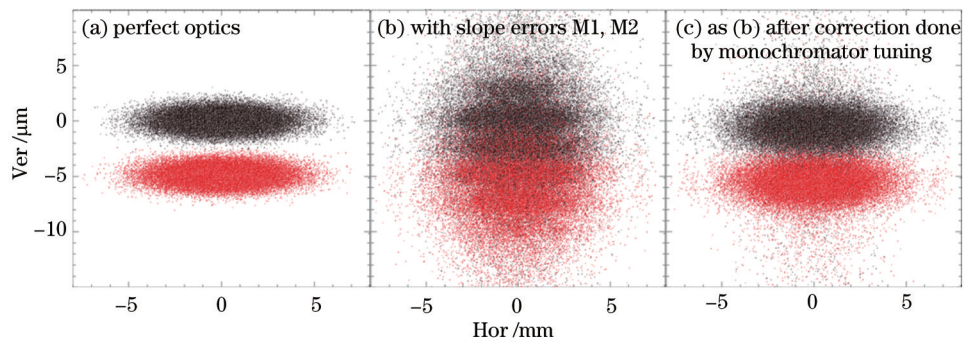


图10 200 eV、200.01 eV两条谱线在单色仪出缝平面的分光光谱

Fig.10 Dispersing pattern of 200 eV and 200.01 eV at the exit slit position

图11给出当单色仪出光狭缝开启30 μm情况下,光束经KB成像系统在样品处形成的像。图11(a)为理想情况下的光斑。高斯光斑的半峰全宽为15 μm×10 μm。光子损失率为4%。图11(b)为考虑镜面热变形的情况。正如上面提到的,由于在光锥范围内M1子午方向的面形误差不大,另外由于M2弧矢方向的面形误差很小,光斑在水平变化不大。但由于M1弧矢方向和M2子午方向的面形误差的作用,光斑垂直方向变化很大。因而,经过单色仪出光狭缝后,光子损失达60%。经过单色仪调整后,如图11(c)所示,光子损失为24%。

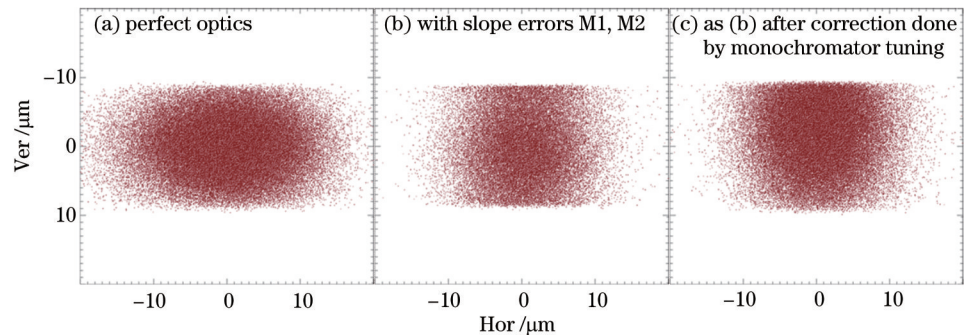


图11 样品位置上的光斑图样

Fig.11 Spot patterns at the sample position

6 热修正装置

根据以上的分析,由于M1、M2的热形变使得光源到光栅的距离加长而导致光斑焦点偏离出光狭缝,这可以通过调节单色仪Cff值将其修正。然而,由于经过单色仪分光后的一级光在出光狭缝处的竖直方向上是连续的,因而热变形对一级光的影响不能直接测量。但是可以通过零级尺寸变化推测出由光学元件热形变引起的光源到光栅距离的变化。

在低束流(10 mA)情况下,200 eV时波荡器辐射的功率为0.232 kW,假设这时光学元件没有热形变,通过束流位置探测器(BPM)可以测得这时零级光的尺寸。当束流升至300 mA,波荡器辐射的功率上升到6.973 kW,测量这时零级光的尺寸。通过比较两次测量的零级光尺寸可以推测出光源距离的变化从而调节单色仪Cff使其满足新的聚焦条件。

由于零级光光轴随着光子能量变化而改变,因而限制了BPM的位置和扫描范围。设计中,BPM在光栅下游950 mm处,经过计算在200~2000 eV能量范围内BPM位置上零级光和一级光都能被很好地分开。图12为热修正装置示意图。工作中采用多平行丝BPM扫描光斑竖直尺寸以确保零级光被完全扫到,BPM的精度为1 μm 。在200 eV情况下,根据计算在BPM位置300 mA光斑竖直尺寸比10 mA变大了20 μm ,因而被BPM测出一个新的Cff值。由于测量误差此Cff值不会非常精准,可以通过能量分辨率的测量对Cff进一步进行精调。

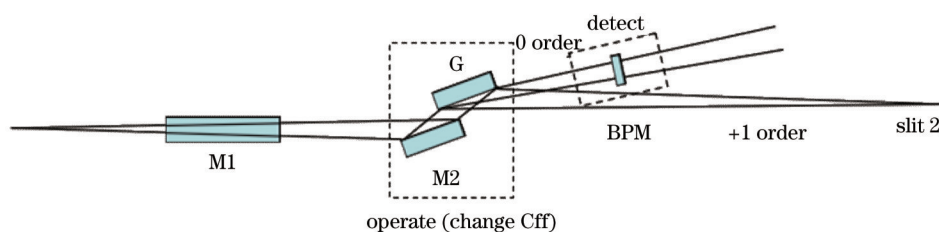


图12 热修正装置示意图

Fig.12 Schematic of the thermal deformation evaluating system

7 结 论

研究了高分辨宽能段软X射线光束线的热载性能,运用有限元分析软件ANSYS对M1、M2进行了热结构分析,得到M1、M2达到热平衡时的温度分布及由此产生的热变形和面形误差;进而将热变形数据作为参数输入光束线设计程序SHADOW中对整条光束线的性能进行了模拟;并且设计一套热修正装置协助单色仪自身补偿。研究表明,在最高的热功率密度下,通过对各光学元件进行有效地冷却并通过单色仪自身的聚集调节能消除镜面热形变对光束线性能的影响。

参 考 文 献

- 1 D H Bilderback, A K Freund, G S Knapp, *et al.*. The historical development of cryogenically cooled monochromators for third-generation synchrotron radiation sources[J]. *J Synchrotron Radiation*, 2000, 7(2): 53-60.
- 2 Gao Sasa, Lu Qipeng, Peng Zhongqi, *et al.*. Analysis of heating effect on XIL deflection focus system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1234001.
高飒飒, 卢启鹏, 彭忠琦, 等. X射线干涉光刻偏转聚焦系统热载影响与分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1234001.
- 3 Wang Naxiu, Zhu Yi, Fu Yuan. Simulation of thermal distortion of DCM crystal indirectly cooled by LN2[J]. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2006, 30(8): 802-805.
王纳秀, 朱毅, 傅远. 液氮间接冷却晶体单色器第一块晶体热形变模拟计算[J]. *高能物理与核物理*. 2006, 30(8): 802-805.
- 4 Zhang Yingcong, Shen Hua, Zhu Rihong. Three-dimensional temperature field of material irradiated by continuous wave laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(8): 0806002.
张英聪, 沈华, 朱日宏. 连续激光辐照材料的三维温度场[J]. *中国激光*, 2013, 40(8): 0806002.
- 5 Chen Jianfa, Wang Helong, Liu Xin, *et al.*. A thermalization design of dual-field-of-view long wavelength infrared optical system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(6): 062203.

- 陈建发, 王合龙, 刘欣, 等. 双视场长波红外光学系统无热化设计[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(6): 062203.
- 6 Shigemi Sasaki, Koji Miyata, Takeo Takada. A new undulator for generating variably polarized radiation[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1992, 31: 1794-1796.
- 7 Parameters of Shanghai Synchrotron Radiation Facility[OL]. <http://ssrf.sinap.ac.cn/1/jishu.htm>, 2005-04.
- 8 H Onuki, P Elleaume. Undulators, Wigglers and their Applications[M]. London: Taylor & Francis, 2003. 77-79.
- 9 M Itou, T Harada, T Kita. Soft X-ray monochromator with a varied-space plane grating for synchrotron radiation: design and evaluation[J]. Appl Opt, 1989, 28(1): 146-153.
- 10 H Petersen, C Jung, C Hellwig. Review of plane grating focusing for soft X-ray monochromators[J]. Rev Sci Instrument, 1995, 66(1): 1-14.
- 11 P Kirkpatrick, A V Baez. Formation of optical images by X-rays[J]. J Opt Soc Am, 1948, 38(9): 766-774.
- 12 T Tanaka, H Kitamura. SPECTRA: a synchrotron radiation calculation code[J]. J Synchrotron Radiation, 2001, 8(6): 1221-1228.
- 13 Zhang Jianfeng, Wang Cuiling, Wu Yuping. Application of ANSYS in heat analysis[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2004, 23(9): 9-12.
- 张建峰, 王翠玲, 吴玉萍. ANSYS有限元分析软件在热分析中的应用[J]. 冶金能源, 2004, 23(9): 9-12.
- 14 F Riemer, R Torge. Bessy SX 700 UHV monochromator: design features and kinematic concept[J]. Nuclear Instrument and Methods in Physics Research, 1983, 208(1-3): 313-314.
- 15 C Welna, G Chen, F Cerrina. SHADOW: a synchrotron radiation and X-ray optics simulation tool[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 1994, 347(1-3): 344-347.