

上海光源 EPU100 中横梁变形的分析与计算

何军勇 周巧根 钱珍梅 李 宇
(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

摘要 上海光源 EPU100 是一台 APPLE-II 型可变椭圆极化波荡器,其磁结构由四排磁排列组成,其中两排对角线上的磁排列可沿纵向移动,从而产生不同的磁场分布以满足各种极化模式的要求。随着磁排列在纵向上的相对移动,磁排列间的磁力大小和方向会发生变化,从而引起横梁不仅在垂直方向而且在水平方向产生不同的变形。本文通过对不同相位下不同磁力所引起滑动梁的变形进行分析研究,得到与实测变形一致的等效横梁力学模型。

关键词 上海光源,可变椭圆极化波荡器,横梁变形,有限元分析
中图分类号 TH122

上海光源工程首期七条光束线的五条采用插入件,其中软 X 射线扫描显微光束线站采用周长为 100 mm、周期数为 42 的 APPLE-II 型可变椭圆极化波荡器 EPU100。其磁结构由四排标准的 Halbach 型磁排列组成,分布在电子轨道的上下方,组成两对平行的永磁块排列。其中,一对对角线上的两排

永磁块排列固定,另一对对角线上的两排永磁块排列可独立的作纵向移动,从而产生不同的磁场分布以产生水平线极化、圆极化、垂直线极化及各种极化率的椭圆极化光^[1-3]。表 1 为 EPU100 的主要设计参数和指标。

表 1 EPU100 主要参数和技术指标
Table 1 Main parameters and specifications of EPU100

参数 Parameter	数值 Value	参数 Parameter	数值 Value
周期长度 Period	100 mm	垂直磁场峰值 Peak of the vertical field	0.6 T
周期数 Number of periods	42	水平磁场峰值 Peak of the horizontal field	0.3 T
总长度 Length	4.3 m	相位误差(RMS) RMS phase error	$\leq 5^\circ$
磁隙 Gap	33-100 mm	一次积分场误差 First field integral error	$\leq 5 \times 10^{-5} \text{ T} \cdot \text{m}$
		二次积分场误差 Second field integral error	$\leq 2.5 \times 10^{-4} \text{ T} \cdot \text{m}^2$

表中相位误差(RMS)和一、二次积分场误差,须在全间隙的各种极化模式下都得满足。而横梁在磁力作用下产生的变形是影响磁场误差的主要因素之一,因此对横梁变形进行研究十分重要。

1 EPU100 结构

EPU100 主体结构为 C 型(图 1),由支架、上下横梁、磁块组件和可调基座组成。EPU100 上下横梁则有背梁、固定梁和滑动梁各一根(图 2)。背梁为铝铸件,固定梁和滑动梁为锻铝材料。固定梁直接固定在背梁上,而上(下)滑动梁通过其上(下)面的宽导轨以及侧面的窄导轨和背梁及固定梁连接。

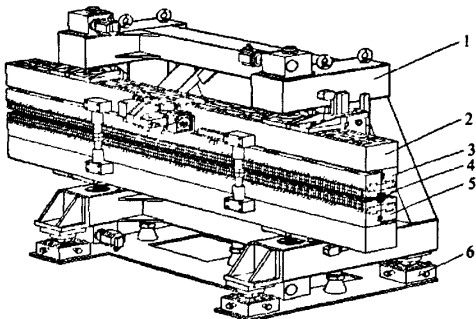


图 1 EPU100 的主体结构三维图
1.支架, 2.背梁, 3.固定梁, 4.磁块组件, 5.滑动梁, 6.基座
Fig.1 Main structure of the EPU100 undulator.
1.Carrier 2.Becking beam 3.Fixed array
4.Magnet block 5.Mobile array 6.Base

第一作者:何军勇,男,1983 年出生,2006 年毕业于清华大学,机械工程及其自动化专业
收稿日期:2009-03-13,修回日期:2009-04-27

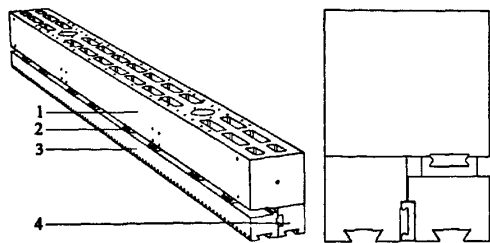


图 2 EPU100 上横梁三维图和横截面示意图

1.背梁,2.导轨,3.滑动梁,4.固定梁

Fig.2 Upper beam of EPU100 and its cross section.

1.Becking beam 2.Guide 3.Mobile array 4.Fixed array

2 EPU100 横梁模型

磁力计算公式：

$$\vec{F}_m = \frac{1}{\mu_0} \left[\int \vec{B}(\vec{B} \cdot d\vec{s}) - \int \frac{1}{2} |\vec{B}|^2 d\vec{s} \right]$$

式中， μ_0 为真空磁导率， B 为受力体表面处的磁场， ds 为受力体表面的面积元^[4]。

由此可计算气隙为 33 mm 时上滑动梁受力随相位的变化(图 3)。上滑动梁在不同相位时横向所受最大吸引力为 24000 N(相位为 50 mm)，最大斥力为 20000 N(相位为 0 mm)；纵向最大受力为 7000 N；垂直方向最大吸引力为 10000 N(相位为 0 mm)，最大斥力为 5000 N(相位为 50 mm)。

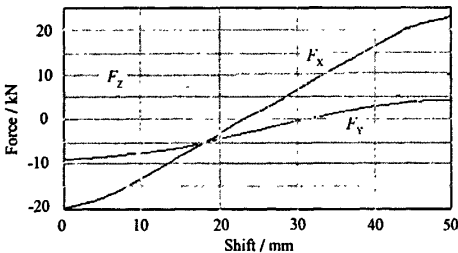


图 3 滑动梁所受磁力随相位的变化

Fig.3 Magnet forces of movable array vs. phase shift.

横梁变形分为垂直方向和水平方向。垂直方向上的变形由横梁自身重力和上下梁间的磁力共同作用产生，可通过选定支架支撑横梁的位置及优化横梁自身结构而减少由于重力和磁力作用产生的变形。我们建立了横梁的三维模型，计算了气隙为 33 mm、相位为 0 mm 时垂直方向上的变形(图 4，此时横梁受到垂直方向上 20000 N 的吸引力和 19000 N 重力的作用)。计算结果表明，气隙为 33 mm、相位为 0 mm 时，横梁在垂直方向上最大变形~6.83 μm 。

水平方向上，由于相邻两根梁上磁化块间会产

生磁力作用，也会使梁变形。我们建立了横梁的有限元模型，通过参数优化，使不同相位下滑动梁在水平方向磁力作用下的横向变形的计算结果与实测结果的方差最小，最终得到与实际相符的有限元模型。

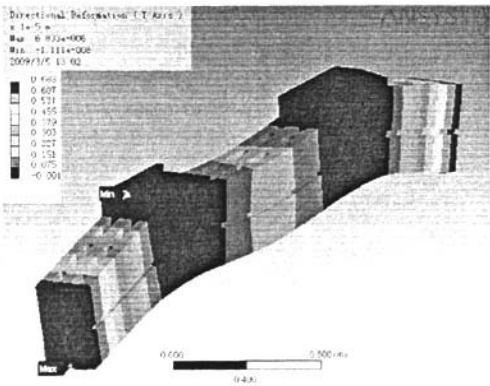


图 4 横梁在垂直方向上的磁力和自身重量作用下的变形计算

Fig.4 The displacement calculation of the beams under vertical magnet forces and its weight.

对横梁进行受力分析后，对滑动梁水平方向变形起作用的仅为磁化块所产生的磁力作用。每个磁化块所受磁力大小虽有所不同，但磁力沿纵向是按周期性变化的，变化周期为 100 mm(4 个磁块)，因此对于 4.3 m 长的整个滑动梁/固定梁而言，磁力可视为沿横梁纵向平均分布。由于沿纵向各部分情况相似，因此一个截面的情况就可反映出整体的情况。固定梁/滑动梁、磁块固定件和磁块底座这三个部分是固结在一起的，可将其看成一个整体。对于连接滑动梁与固定梁和背梁的导轨，主要有导轨和滑块两部分，这两部分之间的作用在不同的情况下会有不同的结果。在研究初期，我们只是简单地将导轨连接看成是固定连接，得到滑动梁水平方向的变形结果(气隙为 33 mm，相位为 0 mm，滑动梁受到 20000 N 的排斥力，导轨杨氏模量为 1.93×10^{11} Pa)如图 5。

此模型在其他相位下的变形结果与我们实测得到的滑动梁水平方向变形结果最大相差~ $\pm 13 \mu\text{m}$ (图 6)。故不能简单地将导轨连接看成是固结的，而须以其他结构来等效导轨连接。

图 7 为导轨结构，轨道与滑块间系球接触。而原先模型中假定轨道与滑块固结，即将轨道与滑块看成一体，并无相互作用，相对位置也保持不变。实际情况并非如此，由于轨道与滑块受磁力影响，

在不同的相位，由于磁力变化，轨道与滑块间时而而是压力作用，时而而是拉力作用，且作用点与作用方向也不断变化，轨道与滑块间的相对位置也相应的变化。为此，我们在建立有限元模型时，将每根导轨等效为两根弹簧，即是横梁的等效弹簧模型。



图 5 EPU100 横梁水平方向变形

Fig.5 Transverse displacements of the beams of EPU100.

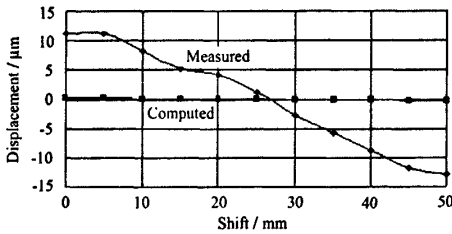


图 6 计算值与测量值比较

Fig.6 Computed and measured transverse displacement.

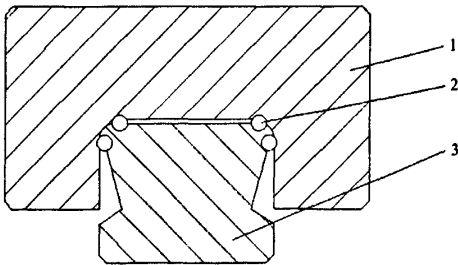


图 7 导轨横截面示意图

1.滑块, 2.球, 3.轨道

Fig.7 Cross section of the guide.

1.Slider 2.Ball 3.Track

气隙为 33 mm 时，为使计算结果与实测结果相吻合，需对等效弹簧的弹性系数进行优化。设模型中四根弹簧的弹性系数分别为 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 ，计算得到的滑动梁测量点的横向变形为 $\Delta x_i (i=1, 2, 3, \dots$

11)，测量得到的变形为 $\Delta x_i' (i=1, 2, 3, \dots, 11)$ ，则给定 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 就会解出 Δx ，即 $\Delta x = f(k_1, k_2, k_3, k_4)$ 。通过不同的 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 ，得到不同的 Δx ，使其与实测变形 $\Delta x_i'$ 的方差最小。等效弹簧弹性系数为 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 的模型，即为与实测数据最吻合的最优横梁等效模型。通过优化，我们得到 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 分别为： 4.80×10^{10} 、 5.63×10^{10} 、 1.04×10^9 、 2.05×10^9 N/m。图 8 为气隙 33 mm，相位 0 mm，滑动梁受到 20 kN 排斥力时横梁变形的计算结果，图 9(a)为 11 个相位下计算变形与实测变形对比。由图看出，此模型计算的变形量与实测量仅 2–3 μm 的误差。

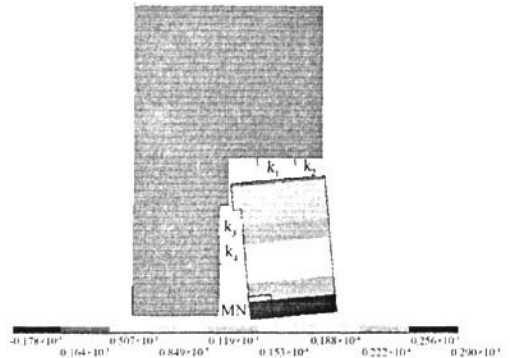


图 8 横梁水平方向变形

Fig.8 Transverse displacements.

利用优化得到的 k 值计算气隙为 58 mm(图 9b)和气隙为 83 mm(图 9c)时滑动梁的横向变形。在这两个气隙下，计算变形与实测变形最大也仅 3 μm 的误差。说明此 k 值也适用于气隙 58 mm 和 83 mm 时的情况。

3 结论

(1) 由于梁与梁间连接的导轨轨道与滑块是通过球接触的，将导轨连接部分看成是固定连接时，计算得到的横梁的横向变形与实测结果相差两个量级。因此，不能简单的将导轨连接看成是固结的。

(2) 等效弹簧模型将导轨等效成弹簧，使用等效弹簧等效导轨连接，既可起到连接作用，而且由于等效弹簧较好的灵活性，可以吻合导轨轨道与滑块实际的复杂情况。其计算结果与实测结果误差仅 3 μm 。

(3) 在计算使用同样导轨、连接方式相同的 EPU 横梁受到水平方向磁力所产生的横向变形时，可使用本文建立的横梁等效力学模型进行计算。

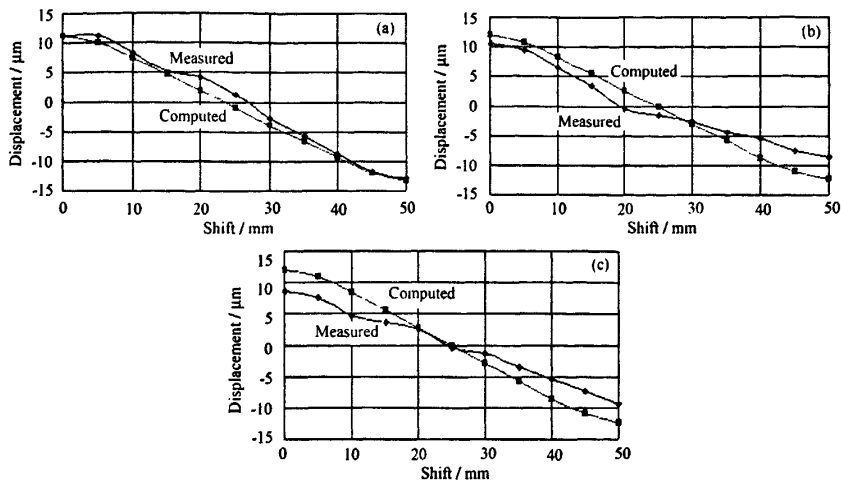


图 9 气隙为(a) 33 mm、(b)58 mm、(c)83 mm 计算变形与实测变形比较
Fig.9 Computed and measured transverse displacement at gaps of (a) 33 mm, (b) 58 mm and (c)83 mm.

参考文献

1 Civita D La, Diviacco B, Knapic C. *et al.* Development of the mechanical structure for FERMI@ELETTRA APPLE II undulators. Proceedings of the 2007 Particle Accel. Conf., Albuquerque, New Mexico, USA, 980–982

2 Lee H G, Kim D E, Park K H, *et al.* Analysis and design of backing beam for multipole wiggler (MPW14) at PLS. Proceedings of the 2005 Particle Accel. Conf., Knoxville, Tennessee, USA, 3940–3942

3 Brajuskovic B, Den Hartog P, Trakhtenberg E., Mechanical analysis of the prototype undulator for the Linac Coherent Light Source. Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conf. 2003, Portland, Oregon USA, 1017–1019

4 Richard P. Walker, Insertion Devices: Undulators and Wigglers, available at http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/e94/PDF/EPAC1994_0310.PDF

Analysis and calculation of backing beam for EPU100 at SSRF

HE Junyong ZHOU Qiaogen QIAN Zhenmei LI Yu

(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract EPU100 at SSRF is an APPLE-II type variable elliptically polarized undulator. The magnet structure consists of four magnet arrays with standard Halbach-type. Two arrays at one diagonal can move longitudinally on the rails so that different magnetic field distributions are shaped to meet the requirements of varieties of polarization modes. With the longitudinal moving of the magnet arrays, the magnitude and the direction of the magnetic forces changed and the distortions of the backing beams both in vertical and horizontal directions will be different. In this paper we analyze and calculate the horizontal displacement of the beams in different gaps and phase shifts to create an equivalent beam mechanical model which is consistent with the measured deformations.

Key words SSRF, EPU, Backing beam displacement, FEA

CLC TH122