



·粒子束及加速器技术·

高能光源束流位置探测器支撑架结构优化设计*

王安鑫^{1,2}, 王梓豪¹, 麻惠洲¹, 李春华^{1,3}, 聂小军^{1,2}, 陈佳鑫^{1,2}, 朱东辉^{1,2}, 余洁冰^{1,2},
贺华艳^{1,2}, 王广源^{1,2}, 于永积^{1,2}, 刘仁洪^{1,2}, 张俊嵩^{1,2}, 邱瑞阳^{1,2}, 刘磊^{1,2}, 康玲^{1,2}

(1. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049; 2. 散裂中子源科学中心, 广东 东莞 523803; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 从热稳定性和振动稳定性两个角度出发, 优化设计得到了超高稳定的刚性支撑架结构; 通过 ANSYS 有限元模态分析, 验证了结构的热膨胀变化量和特征频率; 采用混凝土二次灌浆方法对支撑架进行地面固定和特征频率测试, 结果表明, 支撑架结构的特征频率达到 61.9 Hz、振动幅值小于 30 nm, 均满足设计要求。最后采用动态刚度测试方法, 得到混凝土二次灌浆层的主要刚度值, 进一步验证支撑架结构优化结果的准确性。

关键词: 高能光源; BPM 支撑架; 结构优化; 结构稳定性; 模态测试; 动态刚度
中图分类号: TL503 **文献标志码:** A **doi:** 10.11884/HPLPB202133.200297

Structural optimization design for beam position monitor support of High Energy Photon Source

Wang Anxin^{1,2}, Wang Zihao¹, Ma Huizhou¹, Li Chunhua^{1,3}, Nie Xiaojun^{1,2}, Chen Jiaxin^{1,2}, Zhu Donghui^{1,2},
Yu Jiebing^{1,2}, He Huayan^{1,2}, Wang Guangyuan^{1,2}, Yu Yongji^{1,2}, Liu Renhong^{1,2},
Zhang Junsong^{1,2}, Qiu Ruiyang^{1,2}, Liu Lei^{1,2}, Kang Ling^{1,2}

(1. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
2. Spallation Neutron Source Science Center, Dongguan 523803, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on thermal stability and vibration stability, an ultra stability structure of rigid support is designed and optimized. Through the finite element modal analysis of ANSYS, the thermal expansion variation and the characteristic frequency of the support is verified. The support is fixated to the ground by using the method of concrete grouting and then the characteristic frequency is tested. The test results show that the characteristic frequency of the support reaches up to 61.9 Hz and the vibration amplitude is less than 30 nm, both of which meet the design requirements. Finally, the method of dynamic stiffness testing is adopted to obtain the stiffness value of the concrete grouting, and the accuracy of the optimization results of the support is further verified.

Key words: High Energy Photon Source; beam position monitor support; structure optimization; structural stability; modal testing; dynamic stiffness

高能光源(HEPS)作为第四代同步辐射光源,具有高能量、低发射度的特点,对束流轨道稳定性提出了非常高的要求^[1]。束流位置探测器(BPM)作为束流位置和轨道测量的仪器,要求分辨率达到 0.1 μm ,机械稳定性达到 100 nm。环境中的噪声振动(约 100 nm)和周边加速器设备振动,以及温度变化(± 0.1 $^{\circ}\text{C}$)均会影响束流轨道的稳定性,因此 BPM 必须采用特殊设计的独立支撑结构^[2-4]。

常用的高稳定性支撑架主要有主动隔振支撑架、被动隔振支撑架和纯刚度支撑架。HEPS 储存环地面振动水平总体情况良好,主要振动集中在低频部分,而且 BPM 支撑架受到空间限制,结合支撑系统的特点,选择以纯刚度支撑架结构进行设计^[5]。在支撑架结构设计过程中,应同时考虑影响结构的热稳定性和振动稳定性因素。该结构要求因外界温度变化引起的高度变化量优于 100 nm,束流截面方向振动幅值小于 100 nm,最低阶特征频率好于 50 Hz。

* 收稿日期:2020-10-29; 修订日期:2021-02-03

基金项目:国家自然科学基金项目(11805220)

作者简介:王安鑫(1983—),男,浙江绍兴人,高级工程师,硕士,机械设计及理论专业; wanganxin@ihep.ac.cn。

本文从热稳定性和振动稳定性两个角度出发,优化设计得到了超高稳定的刚性支撑架结构。

1 BPM 支撑架结构设计

1.1 振动稳定性的影响因素

将 BPM 支撑架结构等效为无阻尼、质量-刚度模型^[6-7],如图 1 所示。可得到如等式(1)所示的系统方程

$$M\ddot{X} - KX = 0 \quad (1)$$

式中: M 为质量矩阵, K 为刚度矩阵, \ddot{X} 为加速度向量, X 为位移向量。

通过设置不同的参数值,可得到图 2 所示的变化曲线,从图中不难发现:支撑架特征频率随着支撑架的质量、质心高度的减少而提高,随着刚度的增加而提高。因此,支撑架结构设计应遵循降低质量、降低质心高度的原则,同时选用高弹性模量的材料,且采用高刚度的结构和固定方式,以满足支撑架振动稳定性的设计要求。

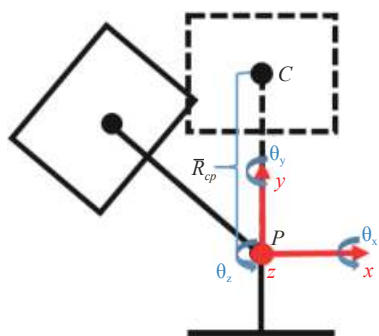


Fig. 1 Mass-stiffness model

图 1 质量-刚度模型

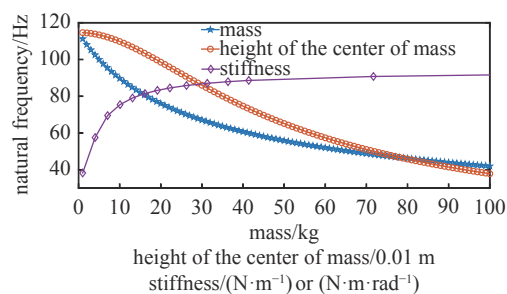


Fig. 2 The graph of relationship between parameters and characteristic frequency

图 2 影响特征频率的参数曲线

1.2 热稳定性的影响因素

外界环境温度变化会引起结构相应的尺寸变化,变化量由结构尺寸和材料属性共同决定。根据束流高度, BPM 独立支撑架在高程方向的尺寸定为 1.2 m。即使是好的实验环境,仍存在 ± 0.1 °C 的温度变化,为使高度方向线性变化量尽量小,选用热膨胀系数仅为 0.63×10^{-6} °C⁻¹, 优于普通结构钢 10 倍的超因瓦合金 (Invar 4J32), 作为独立支撑架的主要结构材料。

1.3 主支撑体结构设计

除温度影响的热稳定性外,支撑架结构设计还必须考虑提高结构的振动稳定性。特征频率是衡量结构振动性能的重要指标之一,在结构设计中,以最低两阶弹性体频率作为主要衡量标准。BPM 支撑架受安装位置的空间限制,支撑架的外形尺寸束流方向不得超过 108 mm,高程即垂直方向不超过 1200 mm,与束流垂直的水平方向不受限制,但不应超过 500 mm。

BPM 支撑架主要包括主支撑体和调节支撑架两部分,而调节支撑架部分参数基本固定,可优化余地很小,因此首先以主支撑体部分进行结构优化。参考前文的分析结论,设计过程如图 3 所示。具体步骤如下所述:(1)以结构型材为主体,得到初始主支撑体三维模型,优化尺寸、壁厚和质量;(2)进一步优化筋板尺寸及数量,提高结构稳定性;(3)结构拓扑优化^[8];(4)优化完善整体结构、质量。

遵循上述流程,得到拓扑优化后的最终结果,有效降低了主支撑体质量至 46.6 kg、质心高度至 0.64 mm,同时无约束特征频率提高至 598 Hz。考虑具体加工工艺和制造成本,最终的主支撑体样机的结构如图 4 所示,材料选择牌号为 4J32 的超因瓦合金,类似 6 筋板结构,垂直方向共排布四组焊接结构,每组结构由四个等距的矩形钢型材组成,相互间隙通过筋板焊接加强,矩形钢和筋板自底向上厚度均分别为 5 mm、4 mm、3 mm 和 2 mm。主支撑体上下各焊有一块支撑板,提供调节和固定接口。

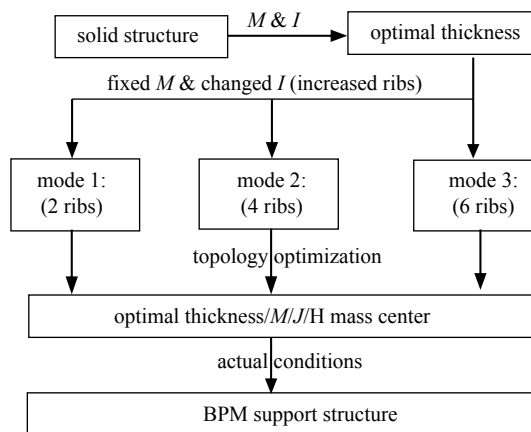


Fig. 3 The design flow chart of BPM support prototype

图 3 BPM 主支撑体样机设计流程图

2 仿真分析

对设计完成的主支撑体模型进行有限元仿真,以验证结构设计的合理性,仿真过程中材料参数如表1所示,支撑架结构中,直角支撑筋、挡块、螺栓固定侧板采用不锈钢304材料,其余零件均采用超因瓦4J32材料,灌浆层采用混凝土材料。

2.1 热稳定性分析

在BPM支撑架模型外表面添加环境温度为 $(25 \pm 0.1)^\circ\text{C}$ 正弦变化的温度载荷,设置4J32的材料属性,有限元仿真结果如图5所示^[9]。支撑架的高度变化量随着温度变化而呈现相对应的正弦变化, $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 的温度波动,对应BPM支撑架高程变化量为85~90 nm。实际上,由于材料本身的比热容的存在,其温度变化存在时间上的滞后性,同时束流脉冲时间(慢轨道10 Hz,即0.1 s)远小于温度变化时间,因此高程变化量只可能更小,对轨道稳定性的影响也肯定小于90 nm。

表1 材料参数

Table 1 Material parameters

material	coefficient of thermal expansion / $^\circ\text{C}^{-1}$	Poisson's ratio	modulus of elasticity / GPa	density / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
Invar 4J32	0.63×10^{-6}	0.23	145	8140
SUS 304	1.7×10^{-5}	0.31	193	7750
concrete	1.4×10^{-5}	0.18	30	2300

2.2 振动稳定性分析

主支撑体结构自身的刚度以及地面的连接刚度共同决定了工作状态的振动特性^[10-11],要求其最低阶特征频率优于50 Hz。前文的设计过程已经保证主支撑体拥有足够的自身刚度,而地面的连接刚度则由连接方式决定,需要进一步的比较验证。按照是否二次灌浆以及二次灌浆料包裹主支撑体底板的程度不同,确定了三种不同连接方式,分别为地脚螺栓连接、部分混凝土二次灌浆连接、全部混凝土二次灌浆连接,如图6所示。

将三种不同连接方式的主支撑体模型,分别带入有限元软件进行模态分析,结果如表2所示。底板全部混凝土二次灌浆的连接方式拥有最好的模态性能,前两阶特征频率分别为66.7 Hz和135.9 Hz,对应的振型分别为束流方向的摆动和横向的摆动,如图7所示。

根据主支撑体的仿真结果可见:(1)加速器运行阶段,其自身设备也会引入一些振动源,参考其它光源和高能

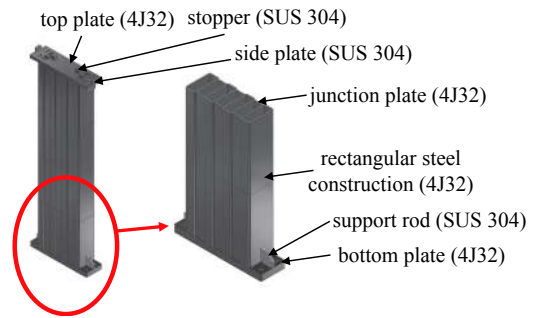


Fig. 4 BPM support prototype model

图4 BPM支撑架样机模型

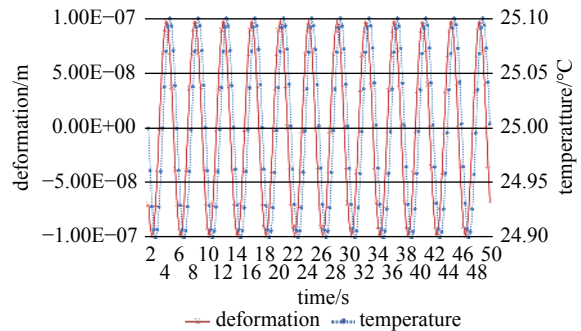


Fig. 5 The curve graph of vertical variation of BPM support with temperature

图5 BPM支撑架垂向变化量随温度变化的曲线图

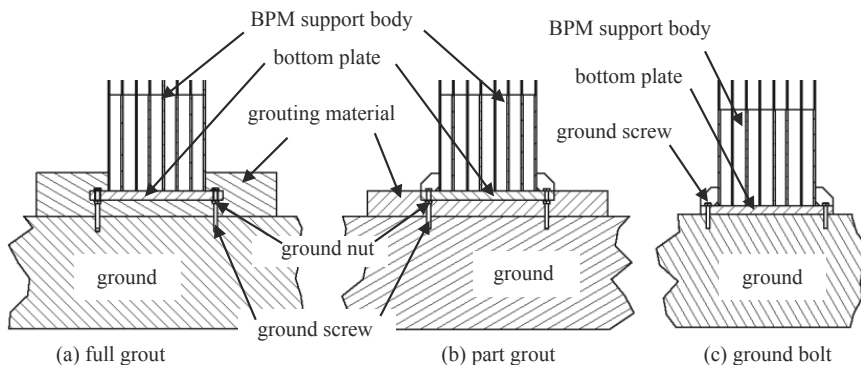


Fig. 6 Schematic diagram of connection modes of BPM support

图6 主支撑体与地面连接方式示意图

表 2 主支撑体不同固定方式的仿真结果

Table 2 Simulation results of different fixed modes of BPM support

	simulation natural frequency / Hz	
	1 st (longitudinal)	2 nd (lateral)
ground bolt	38.7	107.4
part grout	63.8	132.5
full grout	66.7	135.9

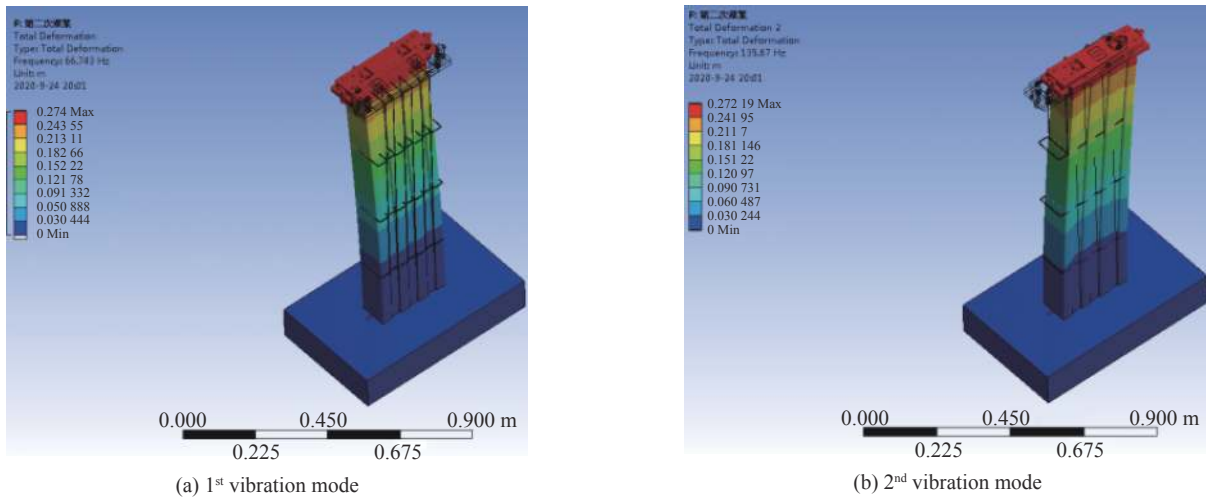


Fig. 7 Modal simulation results of BPM support

图 7 主支撑体模态仿真结果

光源对地基振动的测量情况, 振动源峰值小于 50 Hz。仿真得到的一阶特征频率结果为 66.7 Hz, 超过 50 Hz 的频率要求 32%, 因此足以避免与地基产生共振, 防止振幅显著放大的情况发生; (2) 束流稳定性的要求根据频率可以分为轨道低频慢漂 (10 s 至 7 d) 和中频振动 (0.1~100 Hz)。低频慢漂主要是环境温度的缓慢变化导致主支撑体形变引起的; 中频振动主要是基建地面的振动在主支撑体上的传递放大。超过 100 Hz 的高频干扰, 其干扰源的幅值较小, 且在束线中难以观测到, 故不在考虑范围内。二阶特征频率 (135.9 Hz) 结果远大于 100 Hz, 能够有效避免束流截面水平横向的振动幅值放大。

主支撑体结构一阶特征频率优于 50 Hz, 二阶特征频率优于 100 Hz, 同时环境温度波动 ($\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$) 引起的支撑架高程方向变化小于 90 nm, 能够满足实际使用要求。

3 BPM 支撑架样机的实验测试

对主支撑体样机进行模态测试、随机振动响应测试、动态刚度测试, 验证振动稳定性指标, 获取二次灌浆层的刚度, 便于后续支撑架结构的准确优化。

3.1 模态测试

采用锤击法对主支撑体样机进行模态测试, 单方向的测点排布如图 8 所示。选用的压电加速度计灵敏度 500 mV/g、量程 $\pm 10\text{ g}$ 、频率范围 0.2~3000 Hz、分辨率有效值 0.1 mg、质量 37 g, 选用的 SIRIUS 高密度采集模块每通道独立 24 位 ADC、单通道采样频率最高 200 KHz、动态范围 135 dB。

按照前文所述的连接方案, 依次对主支撑体样机进行了三种不同的固定方式, 分别进行了模态测试, 结果如表 3、图 9 所示。从测试结果发现: (1) 各固定方式下的主支撑体模态测试与仿真结果均差异较大, 混凝土浇筑固定连接方式远优于螺栓固定连接方式, 原因应该是螺栓连接方式工况下, 地面平面度极差, 导致主支撑体底面与地面无法紧密贴合, 接触面积小, 接触刚度低; 混凝土浇筑固定连接方式工况下, 混凝土填充了底面与地面间隙, 接触面积大, 接触刚度大, 导致混凝土浇筑固定连接方式远优于螺栓固定连接方式; (2) 混凝土浇筑固定测试结果均满足设计指标, 全浇筑连接方式的第一阶和第二阶特征频率均优于半浇筑连接方式, 原因应该是全浇筑连接方式混凝土二次灌浆高度比半浇筑连接方式高, 降低了支撑架的重心高度, 导致混凝土全浇筑连接方式优于半浇筑连接方式。

测点的响应是否由激励所引起, 可以通过相干性判定, 相干函数接近 1, 说明相干性好, 反之说明相干性差, 响

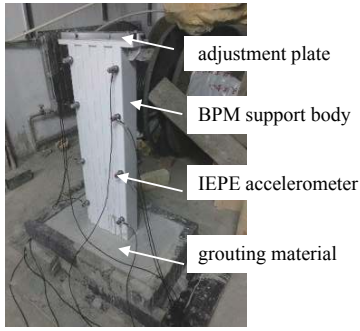


Fig. 8 BPM support modal test
图 8 主支撑体模态测试

表 3 主支撑体模态测试结果与仿真误差
Table 3 Modal test results and simulation error of BPM support

fixation mode	experimental natural frequency / Hz		simulation error/%	
	1 st (longitudinal)	2 nd (lateral)	1 st (longitudinal)	2 nd (lateral)
ground bolt	16.9	48.4	129	122
part grout	55.5	104	15	27
full grout	61.8	107	8	27

应并非全部由激励所引起,受环境噪声影响大,结果不可靠。由图 10 可以看出,受环境噪声、传感器自身低频噪声等影响,低频的相干性较差,但并不影响频响函数峰值位置的相干性,即相干函数接近 1,相干性好,测试结果可靠。

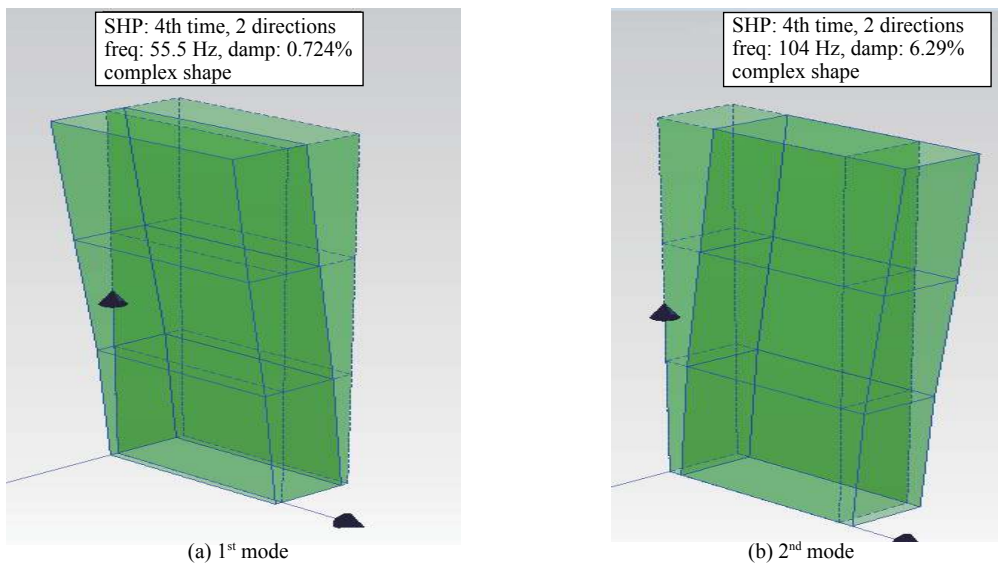


Fig. 9 Modal test results of BPM support
图 9 模态测试结果

3.2 动态刚度测试

主支撑体样机的模态测试与仿真结果差别较大,这主要是由于主支撑体与地面连接部分的实际情况不可避免地出现如孔洞、夹渣、疏松、裂纹等缺陷,难以通过现有的软件约束方式实现匹配,从而造成模态仿真结果远好于测试结果的问题。为了能够使主支撑体样机的测试与仿真结果匹配,本文从多自由度系统运动方程出发,推导出式(2)所示的与 BPM 支撑架结构等效的刚度矩阵方程,通过搭建测试平台及信号采集系统,以自由端敲击的方式获取各测点的实时响应信号,频域求解矩阵方程,可得主支撑体与地面接触部分的刚度矩阵。最后通过有限元软件中的接触刚度矩阵的设置功能,得到更精确的主支撑体仿真结果。

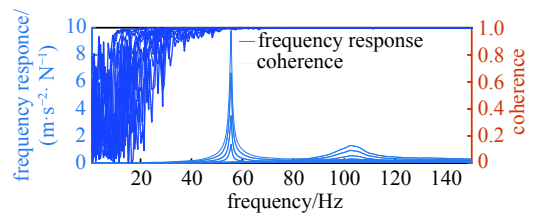


Fig. 10 Frequency response curve and coherence curve of each measuring point
图 10 各测点频响曲线、相干曲线

$$\begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mR_{CP_z} & -mR_{CP_y} \\ 0 & m & 0 & -mR_{CP_z} & 0 & mR_{CP_x} \\ 0 & 0 & m & mR_{CP_y} & -mR_{CP_x} & 0 \\ 0 & -mR_{CP_z} & mR_{CP_y} & I_{xx_p} & 0 & 0 \\ mR_{CP_z} & 0 & -mR_{CP_x} & 0 & I_{yy_p} & 0 \\ -mR_{CP_y} & mR_{CP_x} & 0 & 0 & 0 & I_{zz_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_p \\ \ddot{y}_p \\ \ddot{z}_p \\ \ddot{\theta}_x \\ \ddot{\theta}_y \\ \ddot{\theta}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{xx} & & & & & \\ & K_{yy} & & & & \\ & & K_{zz} & & & \\ & & & K_{\theta_x} & & \\ & & & & K_{\theta_y} & \\ & & & & & K_{\theta_z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \\ \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: m 为支撑架的质量, R_{CP} 为支撑架质心到转点 P 的距离向量, I 为支撑架的转动惯量, K 为支撑架底部固定位

置的刚度矩阵, \mathbf{X} 为位移列向量, $\mathbf{\ddot{X}}$ 为加速度列向量。

敲击点的位置以及测点布置如图 11 所示, 根据前文所述方法, 采用 Matlab 软件对测点响应数据进行分析, 得到不同固定方式下的前两阶模态对应的刚度值, 如表 4 所示。将刚度值带入有限元模态仿真模块, 仿真与实测结果误差 $< 1\%$, 匹配良好, 证明二者结果准确无误。

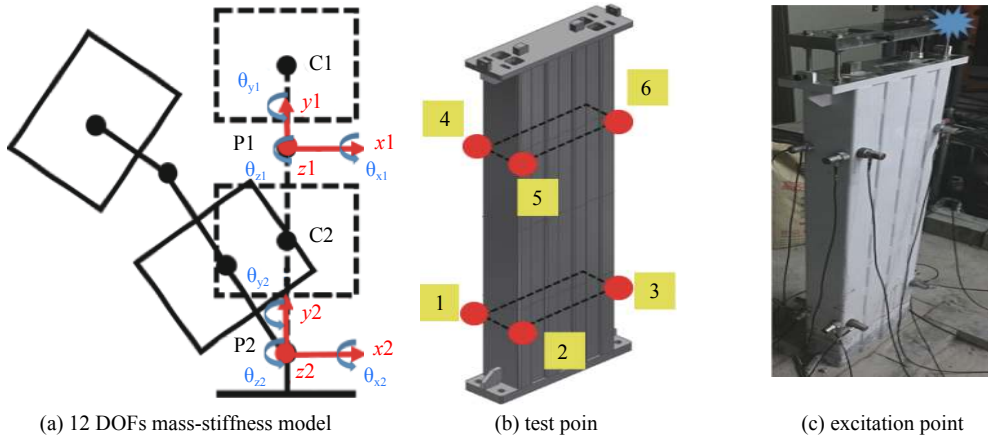


Fig. 11 Dynamic stiffness test

图 11 动态刚度测试

表 4 测试与仿真结果

Table 4 Test and simulation results

	stiffness / $\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$		simulation natural frequency / Hz		simulation error/%	
	1 st (longitudinal)	2 nd (lateral)	1 st (longitudinal)	2 nd (lateral)	1 st (longitudinal)	2 nd (lateral)
ground bolt	2.3×10^5	2.2×10^6	16.8	48.5	0.6	0.2
part grout	9×10^6	2.1×10^7	55.5	103.5	0	0.5
full grout	3.4×10^7	2.5×10^7	61.9	107.1	0.2	0.1

3.3 振动响应测试

HEPS 要求安装完成后的储存环 BPM 独立支撑架上部振动幅值好于 50 nm。影响振动幅值的主要因素包括地脉动幅值大小以及 BPM 支撑架自身的振动传递率。选用 941B 型无源伺服式低频振动传感器分别对主支撑体样机测试地面及其上部振动信号进行监测, 排布方式如图 12 所示。941B 型拾振器的灵敏度 $23 (\text{V} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$ 、量程 $\pm 0.125 \text{ m/s}$ 、频带宽 $1 \sim 100 \text{ Hz}$ 、分辨率 $4 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ 、质量 0.75 kg 。

如图 13、14 所示, 为主支撑体底板部分及全灌浆情况下, 纵向和横向的位移 PSD 谱、传递函数、随机振动仿真曲线。PSD 谱的分析频段为 $1 \sim 100 \text{ Hz}$, 采样频率 1000 Hz , 频率分辨率 0.1 Hz , 单次分析量为 1 min 数据, 重叠 50% , 总分析量为 10 min 数据。

从图 13(a)、13(b)、14(a)、14(b)中可以看出, 响应峰值频率与模态测试频率一致, 相互验证了测试结果的准确性。从图 13(c)、13(d)、14(c)、14(d)中可以看出, 选用动态刚度测试得到的刚度矩阵模型进行随机振动响应分析, 在相同地脉动信号输入的情况下, 主支撑体上部的随机振动响应仿真与测试结果具有较好的一致性。

表 5 为两种不同固定方式情况下的主支撑体及地面振动测试结果的位移 PSD 有效值。仿真选用的输入信号为测量得到的地脉动信号, 在 1 Hz 频率分辨率的处理条件下的位移 PSD 谱。从测试结果看, 主支撑体样机底板全浇筑连接方式具有更好的动态稳定性, 在 $1 \sim 100 \text{ Hz}$ 频段内, 主支撑体上部对地面的振动放大倍数, 横向为 1.24, 纵向为 3.22, 垂向振幅放大不明显, 与地基振动接近一致。对比测试与仿真的位移有效值结果, 均体现出全浇筑连接

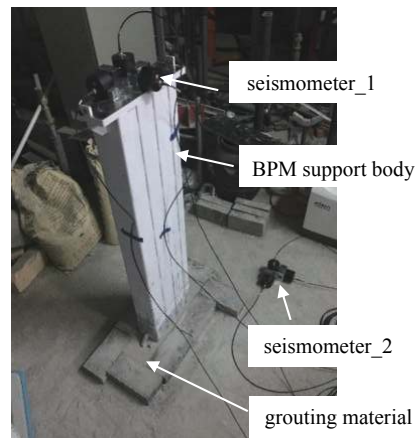


Fig. 12 BPM support vibration response test

图 12 地脉动主支撑体响应测试

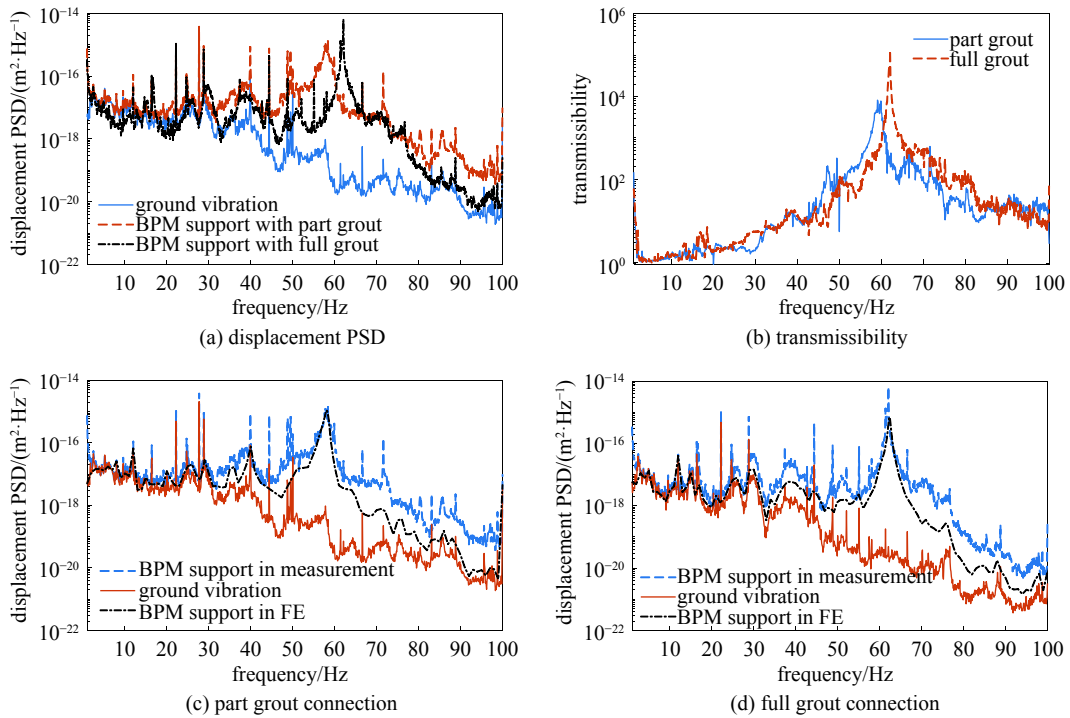


Fig. 13 BPM support longitudinal vibration response curves

图 13 主支撑体纵向振动响应曲线

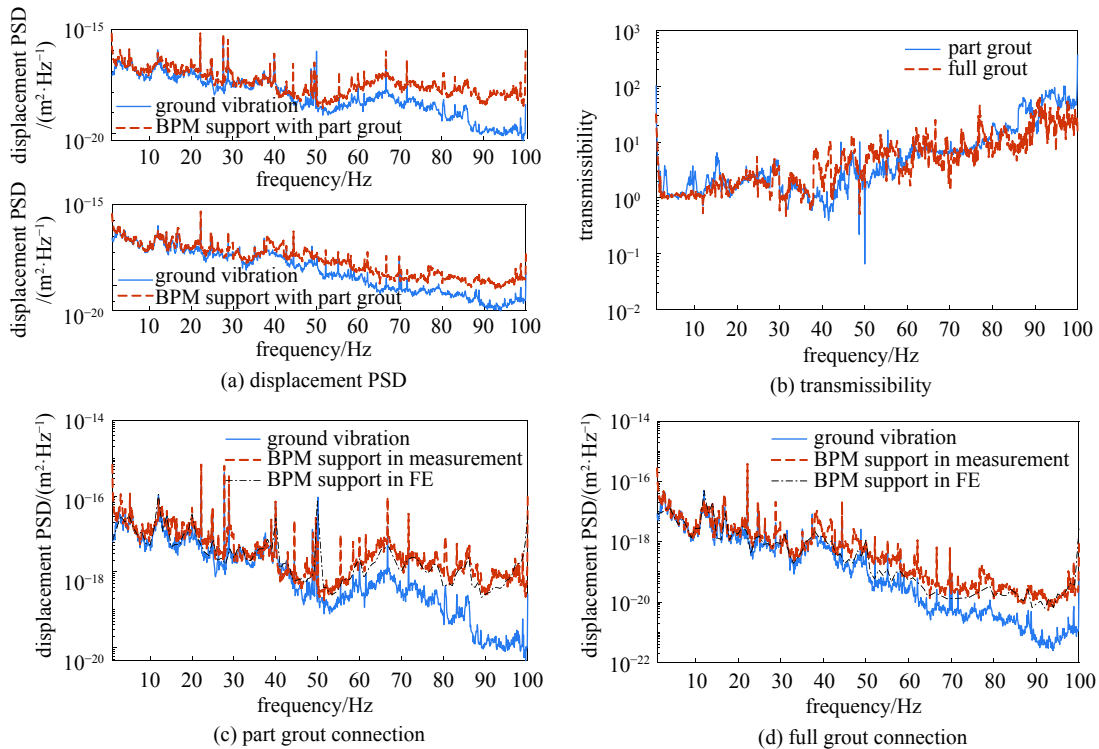


Fig. 14 BPM support transverse vibration response curves

图 14 主支撑体横向振动响应曲线

方式具有更低的振动放大率,从这个方面说明本文所述的响应仿真方法具有一定的可靠性。

4 结构优化

根据前文的结构优化和测试结构,进一步采用降低主支撑体结构的质量以及重心的方法,对模型进行优化,得到更高的特征频率。通过分析发现,主支撑体上板的质量对于整体特征频率的影响极大,通过降低上板厚度对结

表 5 主支撑体振动响应测试结果 (RMS 1~100 Hz)
Table 5 BPM support vibration response test (RMS 1~100 Hz)

	measurement						simulation					
	longitudinal			lateral			longitudinal			lateral		
	ground/ nm	BPM support/nm	ratio	ground/ nm	BPM support/nm	ratio	ground/ nm	BPM support/nm	ratio	ground/ nm	BPM support/nm	ratio
full grout	19.5	62.8	3.22	23.7	29.4	1.24	19.5	47.6	2.44	23.7	27.3	1.15
part grout	22.6	82.49	3.65	23.3	29.6	1.27	22.6	59.4	2.63	23.3	27.3	1.17

构进行优化。如图 15 所示,随着上板厚度增加,第一阶和第二阶特征频率均逐渐减小。考虑到上板的焊接、加工精度,以及与三维调节支撑架连接的刚度,且第一阶特征频率超过设计值 72%(50 Hz)、第二阶特征频率超过 78%(100 Hz),能够满足使用要求。因此,将优化后的上板厚度定为 8 mm。

三维调节支撑架结构的可变化参数范围较小,遵循主支撑体结构设计原则,对其进行优化和减重,并与主支撑体组成完整 BPM 独立支撑架。对其进行模态仿真,如图 16 所示,得到一阶特征频率 72.2 Hz (> 50 Hz),二阶特征频率 150.6 Hz (> 100 Hz),满足 BPM 支撑架对振动稳定性的指标要求,并保有足够的设计余量。

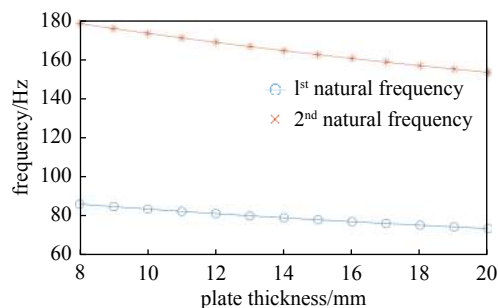


Fig. 15 The relation diagram of characteristic frequency and upper plate thickness

图 15 主支撑体特征频率与上板厚度的关系

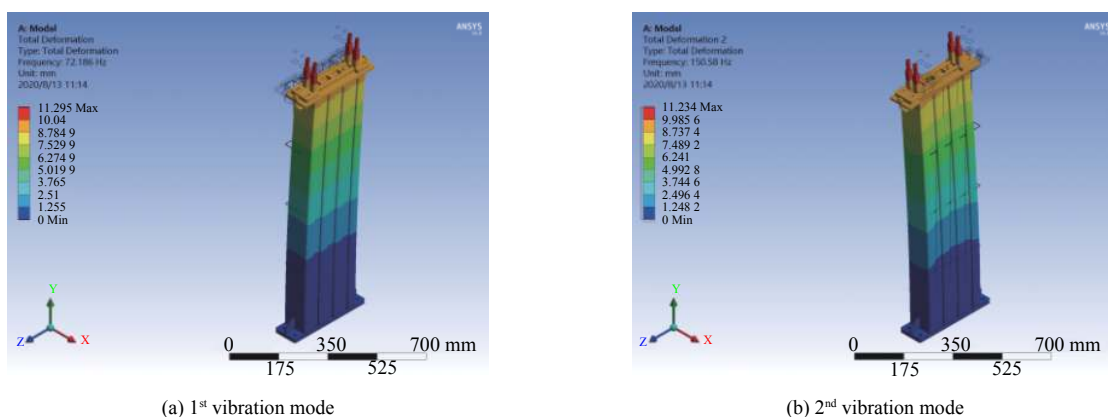


Fig. 16 Modal simulation results of optimized BPM support

图 16 主支撑体模态优化仿真结果

5 结 论

BPM 独立支撑架对热稳定性和振动稳定性要求非常高,但设备的空间限制,达到设计指标极为困难。本文采用降低质量、重心的方法,结合拓扑优化手段,设计了主支撑体样机结构;通过有限元仿真方法,验证了该结构设计的合理性;采用模态测试、振动响应测试方法,对不同固定方式的主支撑体进行测试,确定混凝土全浇筑为最优固定方式。本文提供了一种基于动态刚度校准后的模态仿真模型,结合随机振动仿真,较为准确的获取振动响应信号的方法,并通过实验验证了其可靠性。本文最后对主支撑体结构进行了优化,并引入三维调节支撑结构进行校核,说明了其振动性能具有提高的潜力。

参考文献:

- [1] Jiang Xiaoming, Wang Jiuqing, Qin Qing, et al. Chinese high energy photon source and the test facility[J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2014, 10: 1075-1094.
- [2] Bialowons W, Amirikas R, Bertolini A, et al. Measurement of ground motion in various sites[C]//10th European Particle Accelerator Conference. 2006: 147-153.
- [3] Seryi A, Hendrickson L, Raimondi P, et al. Simulation studies of the NLC with improved ground motion models[C]//20th International Linac Conference. 2000: 1423-1429.
- [4] Amirikas R, Ehrlichmann H, Bialowons W, et al. Ground motion and comparison of various sites[R]. EUROTeV-023-1, 2005.

- [5] 王之琢, 曹建社, 王梓豪, 等. 高能光源BPMS独立支架系统设计[J]. *强激光与粒子束*, 2019, 31: 095101. (Wang Zhizhuo, Cao Jianshe, Wang Zhihao, et al. Independent support system for beam position monitors in HEPS[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 095101)
- [6] Liu Renhong, Qu Huamin, Kang Ling, et al. Modal analysis of AC quadrupole magnet system for CSNS/RCS[J]. *Chinese Physics C*, 2013, 37: 087002.
- [7] 王梓豪, 李春华, 王之琢, 等. 基于模态匹配法的接触刚度[J]. *强激光与粒子束*, 2019, 31: 085101. (Wang Zihao, Li Chunhua, Wang Zhizhuo, et al. Contact stiffness measurement based on modal matching method[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 085101)
- [8] Jankovics D, Gohari H, Tayefeh M, et al. Developing topology optimization with additive manufacturing constraints in ANSYS[J]. *IFAC Papers OnLine*, 2018, 51(11): 1359-1364.
- [9] 李国会, 徐宏来, 向汝建, 等. 金属和玻璃胶合体热膨胀仿真及实验验证[J]. *强激光与粒子束*, 2019, 31: 121002. (Li Guohui, Xu Honglai, Xiang Rujian, et al. Simulation and experimental verification of thermal expansion of metal and glass cementing bodies[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 121002)
- [10] 王柯颖, 范宣华, 陈学前, 等. 基于PANDA平台的光机部件随机振动响应分析[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 011021. (Wang Keying, Fan Xuanhua, Chen Xueqian, et al. Random vibration response analysis of Shengguang laser facility component based on PANDA platform[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 011021)
- [11] 陈学前, 沈展鹏, 鄂林仲阳, 等. 基于薄层单元与弹簧单元的滚动直线导轨副动力学建模[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 072001. (Chen Xueqian, Shen Zhanpeng, Elin Zhongyang, et al. Dynamic modeling on a linear rolling guide based on thin layer element and spring element[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 072001)