

第三代同步辐射光源储存环支撑组件振动控制研究*

卜令山^{1,2} 赵振堂^{1,1)} 殷立新¹ 杜涵文¹

1(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2(中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 第三代同步辐射光源对束流轨道稳定性要求很高,上海光源是一台在建的第三代光源,束流位置稳定度要求达到微米乃至亚微米级.地基振动会使储存环磁聚焦结构中的各种元件发生机械振动引起随时间变化的束流闭合轨道畸变,影响束流轨道稳定性.上海光源场地振动幅值大,需要研究措施控制机械组件的振动.阻尼减振是一种有效的振动控制方法,针对上海光源储存环机械组件,作者设计了一种阻尼减振方案.试验结果表明,该方案能有效地控制机械组件的振动.这对于保证上海光源的束流稳定性要求有积极意义.

关键词 第三代同步辐射光源 储存环 机械组件 振动控制

1 引言

由于第三代同步辐射光源发射度低、束斑尺寸小、光亮度高,所以其束流轨道稳定性就成为影响机器性能的关键指标.一方面,束流轨道稳定性会影响储存环的动力学性能;另一方面,同步辐射光源点处束流轨道的变化会使得束流等效发射度增长,造成实验站上光斑位置及光通量的波动.

储存环磁聚焦结构的各种机械元件(磁铁、支架和支撑调节机构等)组成的机械组件的振动是影响束流轨道稳定性的重要因素,其中,地基振动是造成机械组件振动的直接原因.

在储存环地基中,来自于近场和远场振动源的地基振动以波的形式传播.当储存环机械组件感受到地基振动激励后,根据其自身动力学性能的不同,会产生不同幅值的振动,由此影响到束流轨道稳定性,其振幅越大,对束流轨道稳定性的影响也就越大^[1].

上海光源是一台在建的第三代同步辐射光源,对束流轨道稳定性的要求很高^[2, 3].由于其建设场地位于张江高科技园区,此处地质条件属于典型的上海深厚软土地基,对地基微振动具有放大效应;且该区域位于市区,周边环境振动较大,导致其地基振动幅度高于国际上同类型装置.在这种条件下,由此引发的机械组件的振幅也较大,为达到束流轨道稳定性要求,必须研究如何降低储存环机械组件的振动幅值.

阻尼振动控制方法是一种有效的减振方法,具有性能可靠,经济实用的特点,在土木工程、航空航天、机械、家电、体育器材等诸多领域均有广泛应用.利用阻尼减振原理,为上海光源储存环机械组件设计了一种振动控制方案.本文详述了该方案的分析,设计,测试过程和结果.

2 分析

2.1 上海光源储存环机械组件

上海光源储存环由20个DBA标准单元组成,每个单元包括十块四极磁铁,七块六极磁铁和两块二极磁铁,这些磁铁和其它元件分别支撑在三个钢结构支架和两个混凝土支架上,组成五个机械组件.选择其中最重的A3支架机械组件为对象,研究机械组件的动力学性能.该机械组件由一个4.5m长的钢结构支架,三组支撑调节机构,磁铁和真空元器件等组成,总重约为11t.

图1是往储存环隧道内吊装前,已完成组装并预准直的A3支架机械组件的图片.

在A3支架组件的设计阶段,就采用了动力学仿真分析的方法对其动力学性能进行了分析,为设计提供了指导.在批量生产前,又建造了A3支架机械组件样机,在其上进行了大量的动力学测试和试验^[4].由于在样机建造期间,磁铁组装仍未完成,故采用同等质

2008 - 01 - 07 收稿

* 上海光源工程资助

1) E-mail: zhaozt@ssrc.ac.cn

量的铁块替代,同时样机上亦未安装真空室和离子泵。所以,在各个机械元件制造完成后,为真实反映在实际元件和实际场地条件下,A3组件的动力学性能,在已安装完毕的储存环隧道内C10单元A3组件上进行了测试。测试结果显示,A3组件的最低共振频率约为23Hz(见图2)。

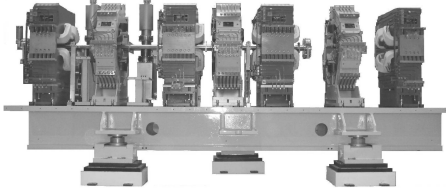


图1 上海光源储存环A3支架机械组件图

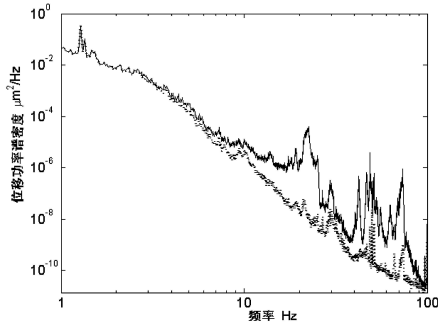


图2 A3支架机械组件的径向位移功率谱密度曲线虚线:地基振动曲线;实线:磁铁振动曲线

其最低共振频率处的频响函数幅值(Q值)为45左右,而根据由地基振动幅值计算得来的设计指标,此值应尽量控制在10以下。因此,需要研究一套合适的振动控制方案来降低组件的振动。

2.2 组件振动控制方案

阻尼减振通过利用阻尼材料的高阻尼性能来增加结构的阻尼,耗散输入的振动能量,从而减小结构的振动反应。粘弹性材料是一类最常用的阻尼材料。它是一种高分子聚合物,其长链分子相互缠绕组成网状,在交变应力(如振动)作用下,这一网状结构的压缩、错动和松弛会导致滞回变形,从而产生阻尼。其力学性能常用储能模量 G 和损耗因子 η 来描述,这两个参数与材料的使用温度和频率有密切关系。

利用粘弹性材料的这一特性,针对储存环机械组件的结构和使用特点,设计了以下振动控制方案:在支撑调节机构的底部和地面之间安装一种夹层约束阻尼结构来降低组件的振动幅值,该结构由粘弹性阻尼材料和不锈钢板层叠粘结而成。类似结构曾在美国APS光源和法国ESRF光源中应用^[5, 6]。此设计中选择的材料是3M 468MP材料,这是一种双面涂有粘结剂的材料,使用方便,性能稳定,其具体参数为:在25°C和20Hz的条件下, G 为0.4MPa, η 为0.6^[7]。

当储存环机械组件在地基振动激励下产生振动响应时,会在阻尼结构的粘弹性材料层中产生交变的剪切应力,从而会发挥阻尼作用,耗散振动能量,降低组件的振动幅值。

3 设计方案试验

机械结构物在弹性阶段均有自己固有的动力特性,当外振源的振动频率与结构物的自振频率相接近时,会产生共振效应,结构物振动幅值显著增大。通过利用灵敏度较高、频带较宽的仪器分别对结构和振源进行测量,可分别获得结构和振源的振动情况,分析可得到结构的固有特性。在此,利用这一方法对A3组件进行测试,了解其在加阻尼结构前后的动力学特性,可以反映阻尼结构的减振性能。

3.1 测试方案

测试系统由941B型拾振器(灵敏度:23V·m⁻¹·s,通频带:1—100Hz),DH5920数据采集系统(A/D转换精度:16位,共16通道)等设备组成。

两个测点布置在支撑点附近地面处和A3支架边缘磁铁Q07顶部,分别测试地基振动和组件振动情况。测试前对所有仪器进行了统一标定,采样频率设置为256 Hz。

测试分为安装阻尼结构和不安装阻尼结构两种情况。

3.2 数据处理

地基振动和组件振动信号属于非平稳随机振动,对其进行功率谱密度分析,并求出组件和地基间的频响函数,就可以得到组件的动力学特性。测试得到的原始数据为时域速度信号,量纲为mm/s,将其导出按下面步骤分析:

1) 求功率谱密度谱(PSD)

采用分段平均周期图法(PWELCH法)求得位移功率谱密度谱,量纲为μm²/Hz,公式为:

$$G(f) = \frac{N\Delta t^3}{2\pi^2 k^2} \left| \sum_{n=1}^n v(n)e^{-i2\pi kn/N} \right|^2, \quad (1)$$

其中 $v(n)$ 是速度信号, N 是FFT分析点数,取4096, Δt 是采样时间间隔。

2) 求频响函数

采用H1估计法求组件和地基间的频响函数,无量纲,公式为:

$$H(f) = \frac{\langle G_{xy}(f) \rangle}{\langle G_{xx}(f) \rangle}, \quad (2)$$

其中 $\langle G_{xy}(f) \rangle$ 是地面振动和磁铁振动的互功率谱密度函数平均值, $\langle G_{xx}(f) \rangle$ 是地面振动自功率谱密度函数平均值。

3.3 试验结果

由测试结果可看出, 此方案在 A3 组件上应用后,

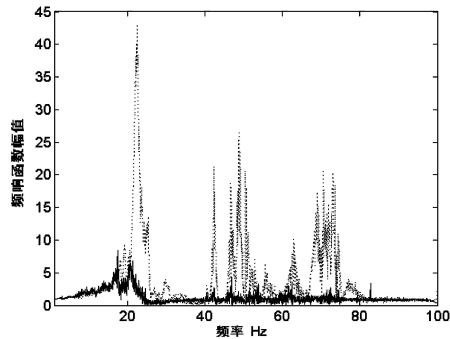


图 3 磁铁和地基振动间的频响函数曲线 (径向)

组件的动力学性能有了大幅度提高(图3). 图3中虚线与图2是相同测试情况下的结果, 都反映了A3支架组件在未做振动控制方案前的动力学性能. 而在应用减振结构后, A3组件的 Q 值降到了10以下. 并且, 组件在40Hz以上的高阶振动也被抑制.

4 结论

第三代同步辐射光源储存环机械组件的振动控制在国内是一个新的研究课题. 本文利用阻尼减振原理, 为上海光源设计了一套阻尼减振方案, 试验表明, 该方案能有效地降低机械组件的振动幅值. 同时, 这一方案具有节省空间, 安装方便的优点. 其应用对于保证上海光源的束流稳定性要求会有积极意义.

参考文献(References)

- 1 DAI Zhi-Min, LIU Gui-Min, HUANG Nan. Nuclear Science and Techniques, 2003, **14**(3): 157
- 2 LIU Gui-Min, DAI Zhi-Min, LI Hao-Hu et al. HEP & NP, 2006, **30**(s1): 144 (in Chinese)
(刘桂民等. 高能物理与核物理, 2006, **30**(s1): 144)
- 3 JIANG Bo-Cheng, LIU Gui-Min, ZHAO Zhen-Tang. HEP & NP, 2007, **31**(10): 956 (in Chinese)
(姜伯承, 刘桂民, 赵振堂. 高能物理与核物理, 2007, **31**(10): 956)
- 4 BU Ling-Shan, ZHAO Zhen-Tang, YIN Li-Xin et al. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2007, **27**(3): 121 (in Chinese)
(卜令山, 赵振堂, 殷立新等. 振动、测试与诊断. 2007, **27**(3): 121)
- 5 Mangra D, Sharma S, Jendrzejczyk J. Review of Scientific Instruments, 1996, **67**(9): 3374
- 6 ZHANG Lin, Lewis T M, Michael C. Proc. ISMA23, 1998. 1481
- 7 Nashif A D, Jones I G D, Henderson P J. Vibration Damping. New York: John Wiley & Sons, 1985. 416

Vibration Control Research for the 3rd Generation Synchrotron Light Source Storage Ring Mechanical Components^{*}

BU Ling-Shan^{1,2} ZHAO Zhen-Tang^{1;1)} YIN Li-Xin¹ DU Han-Wen¹

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

2 (Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The 3rd generation synchrotron light source requires high level of electron beam orbit stability. Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF) is a 3rd generation light source under construction; its orbit stability requirement is up to micro or sub-micro range. The storage ring mechanical components vibration caused by the ground motion would influence the orbit stability. The ground motion of SSRF is severe. It is essential to control the vibration of the mechanical components. Vibration damping is an effective method to control the vibration. The author designed a vibration damping structure for the SSRF mechanical components. The test results show that it can effectively control the mechanical vibration.

Key words 3rd generation synchrotron light source, storage ring, mechanical components, vibration control

Received 7 January 2008

* Supported by SSRF Project

1) E-mail: zhaozt@ssrc.ac.cn