



·粒子束及加速器技术·

空间环境地面模拟装置扫描磁铁振动*

喻九维^{1,2}, 杨雅清^{1,2}, 吕明邦¹, 陈文军¹, 郑亚军¹, 许小伟¹, 陆海娇¹, 潘永祥¹

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000; 2. 中国科学院大学核科学与技术学院, 怀柔 101400)

摘 要: 研究了近代物理研究所为哈尔滨工业大学(HIT)空间环境地面模拟装置(SESRI)研制的扫描磁铁的振动,通过试验,使用激光位移传感器采集扫描磁铁上关键点的振幅,对比振幅分析影响振动的因素。试验数据显示,当电流为 450 A、频率小于 140 Hz 时,振动平缓;磁铁整体振动随输入电流频率升高与电流增大而增强,电流频率为磁铁振动的主要影响因素;磁铁内带阻尼性材料部分的振幅明显小于其他部分。同时哈尔滨工业大学扫描磁铁采用的线圈铁芯浇筑一体结构设计,振动明显减小。结论证明磁铁机构与工艺的合理设计能有效减振。

关键词: 振动; 振幅; 激光位移传感器; 一体结构; 扫描磁铁

中图分类号: O329

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202133.200311

Vibration of scanning magnet for space environment simulation and research infrastructure

Yu Jiwei^{1,2}, Yang Yaqing^{1,2}, Lü Minbang¹, Cheng Wenjun¹, Zheng Yajun¹,
Xu Xiaowei¹, Lu Haijiao¹, Pan Yongxiang¹

(1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101400, China)

Abstract: This article presents, the research about the vibration of the space environment simulation and research infrastructure (SESRI) scanning magnet for Harbin Institute of Technology (HIT), which uses laser displacement sensors to measure the amplitudes at the key test points. The purpose of the test is to analyze the factors that influence the vibration and the way to block or absorb vibration. The collected data show that when $I=450$ A, $f<140$ Hz, the magnet has no obvious vibration. Current and its frequency, especially frequency, are the main factors affecting the vibration. The scanning magnet for SESRI is resin casted with coil and iron core designed to be integrated. Compared with the previous design, the vibration is obviously reduced. As the conclusion, the rational design inside the magnet can block vibration, which can provide a reference for designing new magnets.

Key words: vibration; amplitude; laser displacement sensor; integral structure; scanning magnet

SESRI^[1]是由哈尔滨工业大学牵头的国家重大科技基础设施项目,中国科学院近代物理研究所承担其中粒子加速器部分的设计建设工作。SESRI完成后将承担航空、材料、生物等多学科研究,复杂的研究背景对加速器性能提出了更高的要求,振动、噪声等因素随着电流与频率升高而被放大,严重时危害到加速器束流位置精度与加速器使用寿命。加速器元件通常会基于多种因素(地面固有振动、水冷循环振动、附近电源与其他元件振动、磁铁自激励振动、硅钢片磁致伸缩等)产生剧烈振动与噪音,严重时影响束流品质,降低装置使用寿命,同时终端设备振动还会产生噪声污染,影响到实验人员的身体健康。所有设备中终端扫描磁铁^[2]是振动最剧烈部分,试验时输入电流大小与频率最高达到 450 A 与 200 Hz,振动剧烈,噪声大,对设备正常工作有一定影响。

目前国内外各大研究所针对加速器振动问题展开多方向研究,涵盖地面振动与磁铁振动计算^[3-4]、支撑减振理论与试验结果误差分析^[5]、被动减振设计^[6-10]与主动减振设计^[11-13]以及振动测试方法研究^[14]等,覆盖理论设计、试

* 收稿日期:2020-11-16; 修订日期:2021-01-21

基金项目:国家十二五重大科技基础设施-空间环境地面模拟装置(SESRI)

作者简介:喻九维(1993—),男,硕士,主要从事机械设计与振动噪声方面研究。

验到试验方法研究多领域。其中减振研究集中在对于磁铁支撑的设计,针对磁铁整体,采用弹性阻尼元件固定磁铁,实现减振隔振。本文对扫描磁铁上不同点进行振幅采集,研究磁铁内部振动传递削弱的可能性,相应可以提高振动源线圈的工作稳定性与安全性。通过试验对比,证明哈工大扫描磁铁振源主要是磁铁线圈。电流频率是影响振动的主要原因,电流大小是次要原因。

1 传感器与试验方案

交变电流通过线圈产生交变磁场,同时对线圈自身产生一个交变力的作用,及产生振动,示意如图1。

1.1 测试工具

振动测试使用激光位移传感器记录振幅变化。激光位移传感器是一种通过光学反射测量距离的一种测距传感器,一般分为镜面反射型和漫反射型两种,其中镜面反射型可以达到更高的精度,而漫反射型泛用性更好,这里采用东方量仪标准型 LDS-S 激光位移传感器,测试起点为 42 mm。量程 20 mm,分辨力为 1 μm 。图2(a)是激光位移传感器,(b)是数据转发器,(c)是电脑端数据显示界面。

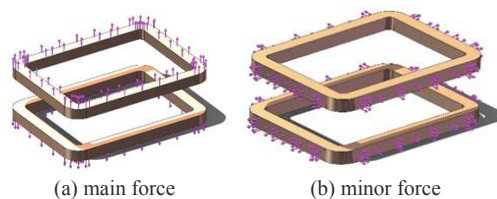


Fig. 1 Directions of coils' self-excited force

图1 线圈自激励力方向示意

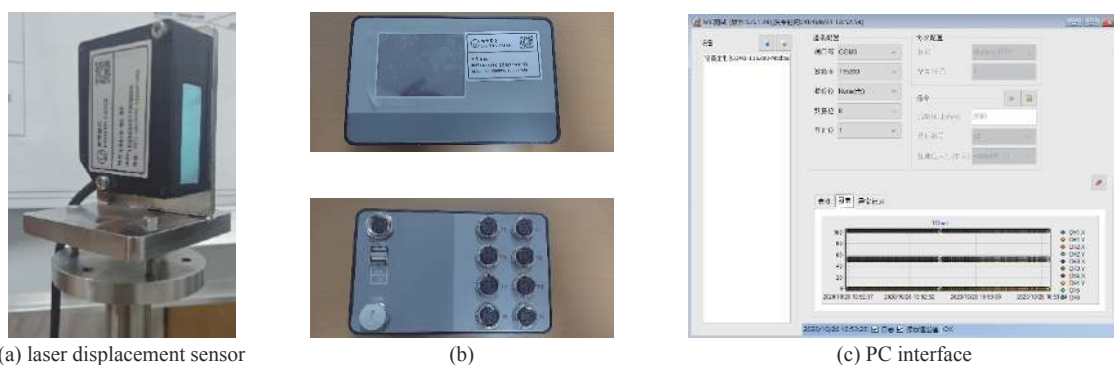


Fig. 2 Interface diagrams of test instrument and data acquisition

图2 测试仪器与数据采集界面示意

1.2 试验方案

基于反射原理测量传感器与磁铁间位移 μm 级变化,改变电流大小与频率,观察并读取振幅数值变化。试验步骤:①测试点选择,选择具有代表性位置,扫描磁铁铁芯相邻 A/B 面、线圈以及线圈压块,其中测试点 2 为线圈,是磁铁振源部分,测试点 1 处角钢和测试点 4 处 G10^[15] 材料压紧块分别位于线圈上下,直接固定线圈,线圈振动时,此两处向外传递振动,其中 G10 材料有阻尼性能,比较两者可以分析磁铁内部结构阻尼的效果,测试点 3 为铁芯外侧,此处振动作用到支架,可为外部减振设计提供参考。如图3所示。②测试并记录断电、通电下振幅,通电情况下改变电流大小与频率分别记录数据。测试从 14 点到 19 点,保持磁铁持续通电状态,每次改变电流或者频率后,状态保持约 10 min,取同时测量的磁铁温升变化稳定(温度曲线线性上升时)后 3 min 数据,传感器采集约 1400 组数据,图4为测试过程磁铁各处位移结果,图5为未通电情况下磁铁振动情况,图6~9为每组数据取标准差结果。③采用 Origin 处理数据绘图对比并做出分析。

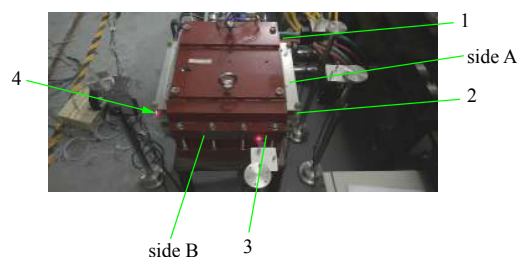


Fig. 3 Test point diagram (1-angle iron in front of core; 2-the coils side; 3-outer side of the core; 4-coils briquetting)

图3 测试点示意图

2 时域采样与分析

2.1 试验记录位移折线

测试相邻 A, B (如图3) 两面 4.5 h 位移总量,测试点 1 为固定线圈角钢(不锈钢), A 面;测试点 2 为线圈外侧面, A 面;测试点 3 为铁芯侧面, B 面。

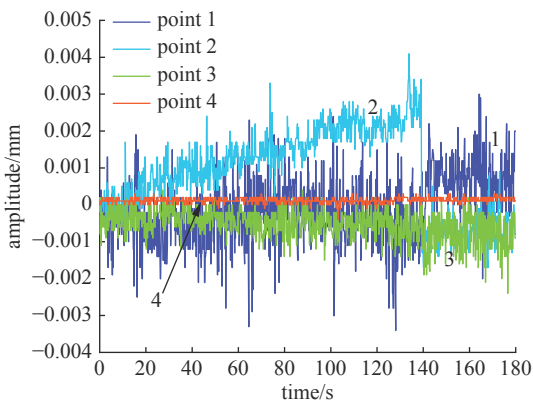
扫描磁铁平放在试验平台上,水平方向未加约束,自然放置,因为测试时持续振动产生位移持续变化,总体位移越来越大。图4为此次试验整个过程中的总位移变化,表明磁铁水平方向若无约束,扫描磁铁振动冲击会造成磁铁持续位移。实际磁铁运行时,水平固定结构会承受持续振动冲击,造成固定螺栓松动等问题的发生。

测试点1,2折线差别较大,表明磁铁内部结构振动位移值不相同,原因主要在于磁铁加工存在误差,角钢与G10压紧块通过螺栓连接压紧线圈,其中螺栓连接存在间隙。

2.2 振动影响因素分析

2.2.1 环境因素影响

图5为未通电情况下磁铁各部分振幅情况取标准差与随时间变化折线,振源主要来自加速器环内环境(地面振动、其他设备振动、噪声)与冷却水循环影响。



(a) amplitude varies with time before power on

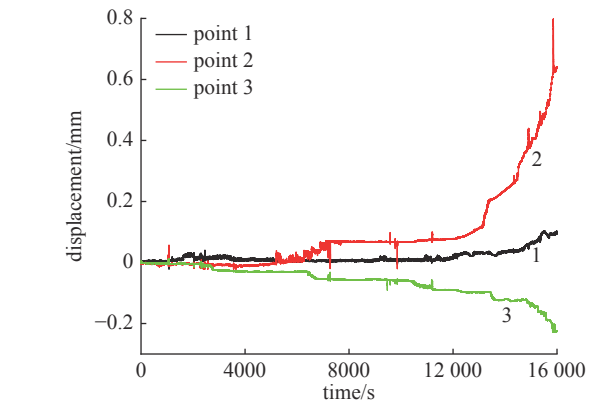
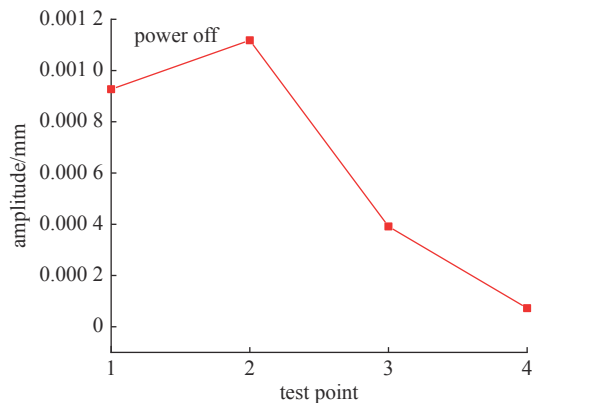


Fig. 4 Broken lines for the total displacement variation of adjacent surfaces

图4 相邻A,B面总体位移变化折线



(b) amplitude standard deviation of test points before power on

Fig. 5 Broken line diagrams of amplitude without electrification

图5 未通电时振幅折线图

测试磁铁未通电时,磁铁各部分振动振幅不同,测试点2线圈振动最大,在数据采集开始后130s时室内有其他设备电源关闭,线圈振动发生突变并减小,表明线圈弹性固定,更容易受到环境因素影响;测试点4线圈压紧块(一种玻璃纤维与树脂碾压复合材料-G10^[15])比测试点3铁芯振幅小,说明G10削弱振动传递效果较好,能起到磁铁内部减振的作用。测试点1线圈固定角钢与测试点4G10分别在线圈上下,两者振幅相差较大,说明磁铁内部阻尼材料能有效吸收振动能量,减小振幅。

2.2.2 单因素影响-电流/频率

1~9组测试,电流频率100 Hz恒定,电流取50, 100, ..., 450 A,如图6所示。刚性材料阻尼性能较弱,测试点1线圈振幅大部分高于其他测试点;在频率保持100 Hz时,电流大小变化只能影响到振动冲击力的变化,在频率周期内,振动能量积累,不能有效通过阻尼吸收,振动叠加,因此在150 A和350 A时振幅明显增大,其中350 Hz时测试点3振动骤增。

9~15组测试,电流不变,只改变电流频率,如图7所示。从140 Hz开始振幅发生较大增加,对比图6可知,电流频率对扫描磁铁振动的影响大于电流大小,线圈是受电流变化的直接影响部分,通电时上下线圈会有互斥的作用力,同时单独线圈会有呈现扩张的作用力,对外表现为振动。是最大振源。

图6,7是测试分组,图5数据作为未通电时的测试对照组,图6测试保持频率100 Hz不变,电流由50 A逐步上升到450 A,图7测试保持电流最高450 A不变,频率由100 Hz上升到最高200 Hz,比较传感器测量得到的振幅值变化在图6、7、8、9展示。450 A和200 Hz是实验室能提供的最高电流和频率。

2.2.3 电流/频率对振动影响对比

将电流大小与频率因素统一考虑,可以得到折线图8,对比测试点在电流大小频率改变下的波动,可以得到以

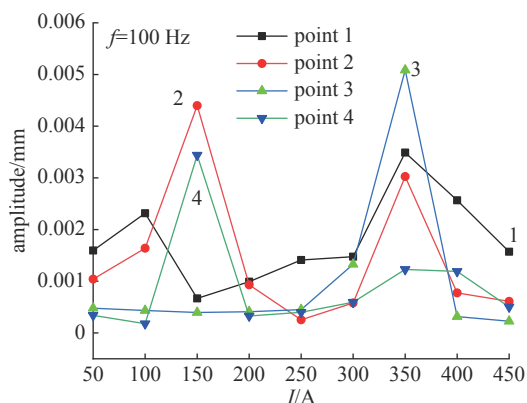


Fig. 6 Comparison of current changes in groups 1~9
图 6 1~9 组电流变化对比

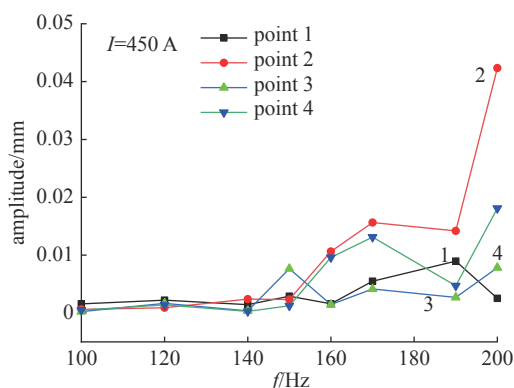


Fig. 7 Comparison of frequencies in groups 9~16
图 7 9~15 组频率变化对比

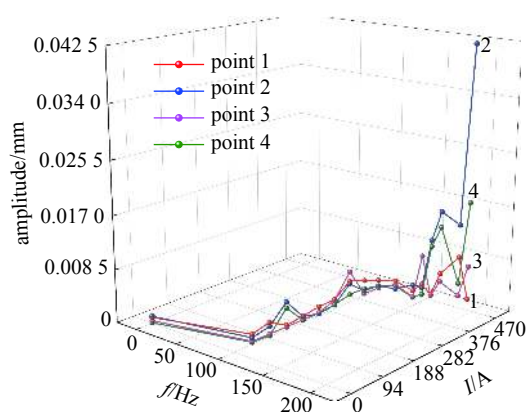


Fig. 8 Contrast of test points 1~4 in standard deviation
图 8 测试点 1~4 振幅标准差对比

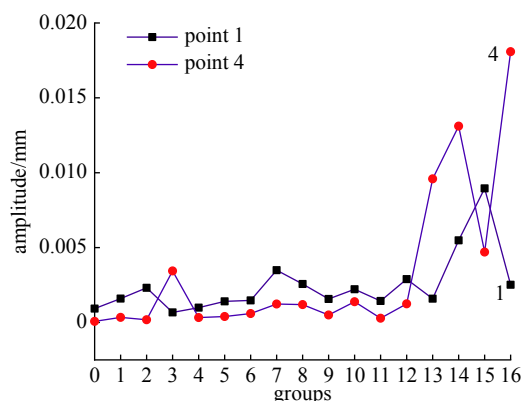


Fig. 9 Contrast between test point 1 and test point 4 in standard deviation
图 9 测试点 1 和测试点 4 振幅标准差对比

下四个结论:

- (1) 1~9 组电流频率不变, 电流从 50 A 逐步上升到 450 A, 振幅整体较为平稳, 说明电流大小变化对振动影响小。
- (2) 9~16 组电流大小不变, 电流频率从 100 Hz 逐步上升到 200 Hz, 频率上升到 140 Hz 时, 振幅开始上升较快, 测试点 2 线圈变化最为剧烈, 说明频率变化对振动影响较大。
- (3) 对比图 8 测试点 1, 4, 3, 扫描磁铁振幅由内到外的振幅变化成递减趋势, 表明振动能量损失在磁铁内, 磁铁内部阻尼性能材料能有效削弱振动对外传递。

(4) 图 9 截取测试点 1 与测试点 4, 分别为线圈固定角钢与线圈固定块; 第 0 组为对照组, 未通电。450 A 电流时, 频率低于 140 Hz, 扫描磁铁工作较为稳定, 测试点 4 振幅一般情况下小于测试点 1, 线圈采用阻尼性能材料固定能有效减振。

140 Hz 后, 对比图 8 测试点 2 处振幅变化的折线, 线圈振幅变化, 开始大幅度升高, 线圈下固定块振幅变化趋势与线圈相同, 而线圈上固定角钢振幅相对减弱, 接近铁芯, 表明复合材料 G10 在振动时与线圈贴合更好, 而角钢与铁芯连接更牢固。

3 结 论

本文采用对比试验的方法, 通过对扫描磁铁上关键点振动参数的比较, 分析了 SESRI 扫描磁铁振动的主要来源与影响振动的主要因素, 验证了线圈铁芯一体浇注结构对于减振的作用, 以及在磁铁内部减振的可能性。结果显示: 在 4.5 h 振动测试中, 位置未固定的 SESRI 扫描磁铁发生明显位移, 其中铁芯最大位移 0.4 mm, 相邻面线圈最大位移 0.8 mm, 线圈上锁紧角钢最大位移 0.2 mm, 表明振动不平衡, 磁铁整体产生对外的冲击较大; 输入电流频率对扫描磁铁振动的影响远高于电流大小, 是影响振动的主要因素; 振动与噪声主要来源为线圈, 将线圈铁芯浇筑一体化和使用阻尼性能材料固定线圈能有效削弱振动。

参考文献：

- [1] Jiang H P, Liu J L, Hao H F, et al. SESRI 300 MeV proton and heavy ion accelerator[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1350: 012081.
- [2] 苏以蕴. 扫描磁铁的研制[J]. *核技术*, 2000, 23(9): 665-667. (Su Yiyun. The structural design and production of the scanning magnet[J]. *Nuclear Techniques*, 2000, 23(9): 665-667)
- [3] 刘建波, 李洪, 陈楠, 等. 地基振动对大型加速器对中影响[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(4): 817-820. (Liu Jianbo, Li Hong, Chen Nan, et al. Alignment for large-scale accelerator after ground vibration[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(4): 817-820)
- [4] 卞文龙, 袁平, 马力祯, 等. CR超导二极磁铁线圈受力分析[J]. *中国物理C*, 2008, 32(s1): 11-14. (Bian Wenlong, Yuan Ping, Ma Lizhen, et al. Stress analysis of CR superferric magnet[J]. *Chinese Physics C*, 2008, 32(s1): 11-14)
- [5] Al Shehab M, Jordan A, Lakovakis E, et al. Vibration measurement & simulation of magnet & girder in sesame[C]//*Mechanical Engineering Design of Synchrotron Radiation Equipment and Instrumentation*. 2018: 111-113.
- [6] Trombik P, Fleischer P, Vassiliou M F. Vibration isolation measures due to the high sensitive linear accelerator at the Paul Scherrer Institute[J]. *MATEC Web of Conferences*, 2015, 24: 06006.
- [7] Turner J L, Adolphsen C, Bowden G B, et al. Vibration studies of the Stanford Linear Accelerator[C]//*Proceedings Particle Accelerator Conference*. 1995: 665-667.
- [8] Liu Renhong, Zhang Junsong, Qu Huamin, et al. Vibration research of the AC dipole-girder system for CSNS/RCS[J]. *Chinese Physics C*, 2014, 38(6): 97-102.
- [9] 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)
- [10] Bu Lingshan, Zhao Zhentang, Yin Lixin, et al. Vibration damping of magnet girder assembly of Shanghai synchrotron radiation facility's storage ring[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(1): 127-130.
- [11] Le Breton R, Deleglise G, Allibe J, et al. Nanometer scale active ground motion isolator[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 204: 97-106.
- [12] Riddone G, Schulte D, Mainaud-Durand H, et al. Technical specification for the CLIC two-beam module[C]//*Proceedings of EPAC08*. 2008: 607-609.
- [13] Montag C. Active stabilization of mechanical quadrupole vibrations for linear colliders[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1996, 378(3): 369-375.
- [14] Fan Y, Tao F, Li Z, et al. Vibrational stability of a cryocooled double crystal monochromator at SSRF[C]//*Mechanical Engineering Design of Synchrotron Radiation Equipment and Instrumentation*. Paris: JACoW Publishing, 2018: 220-222.
- [15] 郑莉芳, 纪全, 王立, 等. 辐照对BESⅢ束流管支撑法兰材料断纹剪切性能影响的研究[J]. *核电子学与探测技术*, 2007, 27(2): 219-222. (Zheng Lifang, Ji Quan, Wang Li, et al. Irradiation effects on the shear property of supporting flange material of beam pipe in BESIII[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2007, 27(2): 219-222)