



# (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 116679244 B

(45) 授权公告日 2023.10.17

(21) 申请号 202310927759.3  
 (22) 申请日 2023.07.27  
 (65) 同一申请的已公布的文献号  
 申请公布号 CN 116679244 A  
 (43) 申请公布日 2023.09.01  
 (73) 专利权人 中国科学院上海高等研究院  
 地址 201210 上海市浦东新区海科路99号  
 (72) 发明人 雷阳阳 袁启兵 王锐萍 童金  
 (74) 专利代理机构 上海智信专利代理有限公司  
 31002  
 专利代理师 杨怡清  
 (51) Int. Cl.  
 G01R 33/10 (2006.01)  
 (56) 对比文件  
 CN 115616298 A, 2023.01.17  
 US 2008111548 A1, 2008.05.15  
 JP 2002156430 A, 2002.05.31  
 US 2006033498 A1, 2006.02.16

CN 116466271 A, 2023.07.21  
 JP H10311857 A, 1998.11.24  
 CN 116148728 A, 2023.05.23  
 CN 108196207 A, 2018.06.22  
 JP 2000121683 A, 2000.04.28  
 CN 105717466 A, 2016.06.29  
 CN 102288925 A, 2011.12.21  
 CN 214539979 U, 2021.10.29  
 CN 203720340 U, 2014.07.16  
 CN 112229904 A, 2021.01.15  
 李振华. 脉冲强磁场测量技术研究. 高压电  
 器. 2019, 第55卷(第12期), 68-76.  
 Tong Jin. Magnetic Field Measurement  
 and Analysis of Thin Septum for  
 Diffraction Limited Storage Ring. 2022  
 International Applied Computational  
 Electromagnetics Society Symposium (ACES-  
 China). 2022, 1-3.

审查员 宋春丽

权利要求书2页 说明书8页 附图3页

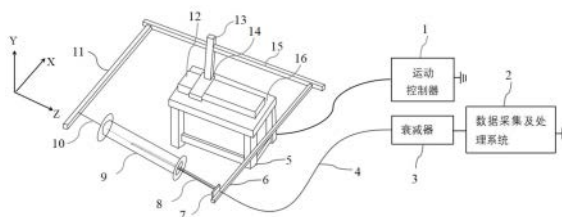
## (54) 发明名称

一种快脉冲磁场自动测量装置及方法

## (57) 摘要

本发明提供一种快脉冲磁场自动测量装置，包括磁测运动平台、与所述磁测运动平台电连接的运动控制器、可拆卸地安装于磁测运动平台上的线圈探头、以及与所述运动控制器和线圈探头均连接的数据采集及处理系统，其中，所述线圈探头为可彼此切换的点线圈探头和长线圈探头，所述数据采集及处理系统具有一数字积分函数模块；待测的脉冲磁铁套设于所述线圈探头上，并且脉冲磁铁通过螺钉固定在磁测运动平台上。

本发明的快脉冲磁场自动测量装置主要用于采集及分析脉冲磁铁的磁场分布及中心场磁场分布情况，用于评估脉冲磁铁磁场分布是否满足设计指标。



1. 一种快脉冲磁场自动测量装置,其特征在于,包括磁测运动平台、与所述磁测运动平台电连接的运动控制器、可拆卸地安装于磁测运动平台上的线圈探头、以及与所述运动控制器和线圈探头均连接的数据采集及处理系统,其中,所述线圈探头为可彼此切换的点线圈探头和长线圈探头,所述数据采集及处理系统具有一数字积分函数模块;待测的脉冲磁铁套设于所述线圈探头上,并且脉冲磁铁通过螺钉固定在磁测运动平台上;

所述的点线圈探头包括多层的PCB板、设于PCB板的一端的一个点线圈、设于PCB板的另一端的多个接插孔和多个固定孔、以及连接所述点线圈和其中一个接插孔的点线圈直连导线,连接所述点线圈的接插孔和电压信号线电缆连接,其余接插孔均接地;每一层PCB板上都设有一个半径为 $r$ 的近似整圆的单层线圈,单层线圈采用铜线制作,单层线圈之间依次通过过孔走铜线连接以形成所述的点线圈;

所述的长线圈探头包括多层的PCB板、沿着PCB板的长度方向延伸的一个长线圈、设于PCB板的一端的多个接插孔和多个固定孔、以及连接所述长线圈和其中一个接插孔的长线圈直连导线,连接所述长线圈的接插孔和电压信号线电缆连接,其余接插孔均接地。

2. 根据权利要求1所述的快脉冲磁场自动测量装置,其特征在于,所述数据采集及处理系统设置为采集所述线圈探头的感应电动势信号,数据采集及处理系统的采样带宽为100MHz;所述数字积分函数模块设置为对数据采集及处理系统接收的信号进行数字积分以得到积分信号,所述数据采集及处理系统设置为获取积分信号的峰值并除以线圈面积及匝数,得到磁场峰值时的单位线圈面积的平均磁感应强度。

3. 根据权利要求1所述的快脉冲磁场自动测量装置,其特征在于,所述磁测运动平台设置为使得安装于其上的线圈探头能够沿X方向平移运动、沿Y方向平移运动、沿Z方向平移运动、以及绕着Z方向旋转运动。

4. 根据权利要求3所述的快脉冲磁场自动测量装置,其特征在于,所述的磁测运动平台包括磁测平台底座、依次安装在磁测平台底座上的Z方向移动组件、X方向移动组件和Y方向移动组件、以及与Y方向移动组件的两端分别通过螺钉连接的两个连接杆,两个连接杆的远离所述磁测运动平台的部分之间通过串联的尼龙线和线圈探头连接,其中,线圈探头固定在旋转模块上并且通过该旋转模块与其中一个连接杆固定连接,所述串联的尼龙线和线圈探头沿着Z方向延伸并与两个连接杆垂直。

5. 根据权利要求4所述的快脉冲磁场自动测量装置,其特征在于,两个连接杆分别为左连接杆和右连接杆,左连接杆与尼龙线绷紧连接,右连接杆与所述线圈探头通过旋转模块连接。

6. 根据权利要求4所述的快脉冲磁场自动测量装置,其特征在于,所述Y方向移动组件通过竖直连接杆安装于X方向移动组件上。

7. 根据权利要求4所述的快脉冲磁场自动测量装置,其特征在于,所述运动控制器同时与所述磁测运动平台的旋转模块、所述Z方向移动组件、X方向移动组件和Y方向移动组件电连接。

8. 根据权利要求1所述的快脉冲磁场自动测量装置,其特征在于,所述线圈探头通过电压信号电缆与衰减器连接,从而通过衰减器与所述数据采集及处理系统连接。

9. 一种快脉冲磁场自动测量方法,其特征在于,包括:

步骤S0:提供权利要求1-8之一所述的快脉冲磁场自动测量装置,并将待测的脉冲磁铁

安装于其上；

步骤S1：启动所述的快脉冲磁场自动测量装置，并利用点线圈探头和长线圈探头分别进行待测的脉冲磁铁的磁场分布的多维测量。

## 一种快脉冲磁场自动测量装置及方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于磁场测量领域,尤其涉及快脉冲磁场自动测量装置及方法,主要用于粒子加速器中脉冲磁铁的磁场测量。

### 背景技术

[0002] 脉冲磁铁是粒子加速器的注入引出系统的关键部件,其中包括切割磁铁、冲击磁铁、凸轨磁铁。脉冲磁铁的磁场误差将直接扰动注入引出束流和储存束流,从而影响注入效率。随着加速器性能的不断提高,粒子加速器的注入引出对脉冲磁铁的设计指标提出了越来越高的要求,而检验研制的脉冲磁铁是否达到了设计指标,需要使用脉冲磁场测量技术。

[0003] 现有脉冲磁场测量技术一般分为“点”测线圈脉冲磁场测量和长线圈脉冲磁场测量。脉冲磁场测量首先通过积分器将线圈获得的感应电动势信号转换为磁场信号,而积分器一般由无源RC电路或者直接使用示波器的积分函数完成,然后使用示波器来完成脉冲磁场的获取与处理。

[0004] “点”测线圈探头的位置分辨率高,可以反映脉冲磁铁局部的磁场信号,但是感应电动势信号小、信噪比低。

[0005] 长线圈探头的感应电动势信号大、信噪比高,但是位置分辨率低,同时会有磁场的非均匀误差。

[0006] 此外,“点”测线圈探头的感应线圈和长线圈探头的感应线圈都加工在细长矩形PCB里面,所以“点”测线圈探头的感应线圈和长线圈探头安装在磁测电动平台上会弯曲变形,出现磁感应面与磁场方向不垂直,会造成输出感应电压无法真实反映实际场强的大小。

[0007] 随着对粒子加速器中的脉冲磁铁的要求提升,研制一种快脉冲磁场自动测量装置对检验研制的脉冲磁铁是否满足技术要求具有重要意义。

### 发明内容

[0008] 本发明的目的是提供一种快脉冲磁场自动测量装置主要用于采集及分析脉冲磁铁的磁场分布及中心场磁场分布情况,用于评估脉冲磁铁磁场分布是否满足设计指标。

[0009] 为了实现上述目的,本发明提供一种快脉冲磁场自动测量装置,包括磁测运动平台、与所述磁测运动平台电连接的运动控制器、可拆卸地安装于磁测运动平台上的线圈探头、以及与所述运动控制器和线圈探头均连接的数据采集及处理系统,其中,所述线圈探头为可彼此切换的点线圈探头和长线圈探头,所述数据采集及处理系统具有一数字积分函数模块;待测的脉冲磁铁套设于所述线圈探头上,并且脉冲磁铁通过螺钉固定在磁测运动平台上。

[0010] 所述数据采集及处理系统设置为采集所述线圈探头的感应电动势信号;所述数字积分函数模块设置为对数据采集及处理系统接收的信号进行数字积分以得到积分信号,所述数据采集及处理系统设置为获取积分信号的峰值并除以线圈面积及匝数,得到磁场峰值时的单位线圈面积的平均磁感应强度。

[0011] 所述磁测运动平台设置为使得安装于其上的线圈探头能够沿X方向平移运动、沿Y方向平移运动、沿Z方向平移运动、以及绕着Z方向旋转运动。

[0012] 所述的磁测运动平台包括磁测平台底座、依次安装在磁测平台底座上的Z方向移动组件、X方向移动组件和Y方向移动组件、以及与Y方向移动组件的两端分别通过螺钉连接的两个连接杆,两个连接杆的远离所述磁测运动平台的部分之间通过串联的尼龙线和线圈探头连接,其中,线圈探头固定在旋转模块上并且通过该旋转模块与其中一个连接杆固定连接,所述串联的尼龙线和线圈探头沿着Z方向延伸并与两个连接杆垂直。

[0013] 两个连接杆分别为左连接杆和右连接杆,左连接杆与尼龙线绷紧连接,右连接杆与所述线圈探头通过旋转模块连接。

[0014] 所述Y方向移动组件通过竖直连接杆安装于X方向移动组件上。

[0015] 所述运动控制器同时与所述磁测运动平台的旋转模块、所述Z方向移动组件、X方向移动组件和Y方向移动组件电连接。

[0016] 所述线圈探头通过电压信号电缆与衰减器连接,从而通过衰减器与所述数据采集及处理系统连接。

[0017] 所述的点线圈探头包括多层的PCB板、设于PCB板的一端的一个点线圈、设于PCB板的另一端的多个接插孔和多个固定孔、以及连接所述点线圈和其中一个接插孔的点线圈直连导线,连接所述点线圈的接插孔和电压信号线电缆连接,其余接插孔均接地;每一层PCB板上都设有一个半径为r的近似整圆的单层线圈,单层线圈采用铜线制作,单层线圈之间依次通过过孔走铜线连接以形成所述的点线圈;

[0018] 所述的长线圈探头包括多层的PCB板、沿着PCB板的长度方向延伸的一个长线圈、设于PCB板的一端的多个接插孔和多个固定孔、以及连接所述长线圈和其中一个接插孔的长线圈直连导线,连接所述长线圈的接插孔和电压信号线电缆连接,其余接插孔均接地。

[0019] 另一方面,本发明提供一种快脉冲磁场自动测量方法,包括:

[0020] S0:提供上文所述的快脉冲磁场自动测量装置,并将待测的脉冲磁铁安装于其上;

[0021] S1:启动所述的快脉冲磁场自动测量装置,并利用点线圈探头和长线圈探头分别进行待测的脉冲磁铁的磁场分布的多维测量。

[0022] 本发明的快脉冲磁场自动测量装置解决脉冲磁场的高精度自动测量问题,主要用于采集及分析脉冲磁铁的磁场分布及中心场磁场分布情况,用于评估脉冲磁铁磁场分布是否满足设计指标,既可以测量近似零场的区域(零场区),同时也可测量出沿X( $X=0$ )方向的整个范围( $X_{\min}$ ,  $X_{\max}$ )的BY分布曲线,得到精确的峰值场位值,这个就是脉冲磁铁的横向场分布,即二维分布( $X=X_{\min} \sim X_{\max}$ , BY)。还可测量在Z方向间距 $\Delta Z$ (常采用10mm)的所有横向场分布(三维分布, $Z=0 \sim Z_{\max}$ ,  $X=X_{\min} \sim X_{\max}$ , BY)。

[0023] 本发明的快脉冲磁场自动测量装置既可使用“点”线圈测量脉冲磁铁的磁场,又可以使用“点”线圈测量测量脉冲磁铁的磁场,解决“点”线圈测量和长线圈测量各自的不足问题。

[0024] 本发明的快脉冲磁场自动测量装置解决“点”测线圈探头的感应线圈和长线圈探头安装在磁测电动平台上会弯曲变形,出现磁感应面与磁场方向不垂直问题。

[0025] 本发明的快脉冲磁场自动测量装置可解决脉冲宽度小于 $1\mu\text{s}$ 的非线性脉冲磁场测量问题,因为数据采集及处理系统的采样带宽100MHz所以外部输入 $1\mu\text{s}$ 脉冲宽度时,所以可

以采集100个数据点,并不是采样带宽越大越好,因为采样带宽越高,会降低分辨率,故采样带宽100MHz,采样分辨率14bits,对外部输入小于1 $\mu$ s脉冲宽度时的非线性脉冲磁场也可测量。

### 附图说明

[0026] 图1是快脉冲磁场测量装置的结构示意图。

[0027] 图2是快脉冲磁场测量装置的快脉冲磁场测量原理框图。

[0028] 图3是快脉冲磁场测量装置的脉冲磁铁示意图。

[0029] 图4和图5是点线圈探头的结构示意图,其中图4是主视图,图5是俯视图。

[0030] 图6和图7是长线圈探头的结构示意图,其中图6是主视图,图7是俯视图。

[0031] 图8是感应电动势信号的信号示意图。

[0032] 图9是磁通量的信号示意图。

[0033] 图10是磁场BY实测与仿真对比图。

[0034] 图11是三维磁场分布图。

[0035] 附图标记:

[0036] 1-运动控制器,2-数据采集及处理系统,21-数字积分函数模块,3-衰减器,4-电压信号电缆,5-磁测平台底座,6-右连接杆,7-旋转模块,8-线圈探头,9-脉冲磁铁,10-尼龙线,11-左连接杆,12-Z方向移动组件,13-竖直连接杆,14-X方向移动组件,15-Y方向移动组件,16-磁测运动平台,81-点线圈探头,811-点线圈,812-点线圈直连导线,82-长线圈探头,821-长线圈,822-长线圈直连导线。

### 具体实施方式

[0037] 下面结合附图,给出本发明的较佳实施例,并予以详细描述。

[0038] 本发明的快脉冲磁场自动测量装置主要基于以下原理:

[0039] 根据法拉第电磁感应原理,当穿过回路的磁通量发生变化时,回路中会产生感应电动势 $\varepsilon$ ,其大小和穿过回路磁通量 $\Phi$ 的变化率成正比,即

$$[0040] \quad \varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -NS \frac{dB}{dt}$$

[0041] 其中,对于测量磁场的磁探针来说,N 为线圈匝数,S 为单匝线圈的有效面积,B 为平行于线圈法线的轴向磁感应强度。

[0042] 因此,通过积分器就可将线圈获得的感应电动势信号转换为磁场信号,简单推导过程如下:

$$[0043] \quad dB = -\frac{\varepsilon}{NS} dt$$

$$[0044] \quad \int_0^B dB = -\frac{1}{NS} \int_0^t \varepsilon dt$$

[0045] 其中,B 为平行于线圈法线的轴向磁感应强度,N 为线圈匝数,S 为单匝线圈的有效面积, $\varepsilon$ 为感应电动势。

[0046] 本发明的快脉冲磁场自动测量装置的测量原理如图1和图2所示,在磁场测量的探头位置到达后,在触发同步信号的作用下,首先数据采集及处理系统2采集到探头的A、B两

端之间的感应电动势信号,即感应的电压信号(如图4-图7所示其中A、C、D三端接地,B端为信号端),然后对该感应电动势信号进行数字积分,积分后的信号就是变化的磁通量。测得积分后的信号的峰值,然后除以线圈面积及匝数就得到磁场峰值时的单位线圈面积的平均磁感应强度。

[0047] 因此,如图1和图2所示为根据本发明的一个实施例的快脉冲磁场自动测量装置,其包括磁测运动平台16、与所述磁测运动平台16电连接的运动控制器1、可拆卸地安装于磁测运动平台16上的线圈探头、以及与所述运动控制器1和线圈探头8均连接的数据采集及处理系统2,其中,所述数据采集及处理系统2具有一数字积分函数模块21。

[0048] 所述数字积分函数模块21设置为对数据采集及处理系统2接收的信号进行数字积分以得到积分信号,所述数据采集及处理系统2设置为获取积分信号的峰值并除以线圈面积及匝数,得到磁场峰值时的单位线圈面积的平均磁感应强度。

[0049] 其中,所述磁测运动平台16设置为使得安装于其上的线圈探头能够沿X方向(即纵轴)平移运动、沿Y方向(即竖直轴)平移运动、沿Z方向(即横轴,也即线圈探头8的长度延伸方向)平移运动、绕着Z方向旋转运动。

[0050] 在本实施例中,磁测运动平台16的运动参数如下:

[0051] X方向平移:±100mm(水平方向);

[0052] Y方向平移:±100mm(高度方向);

[0053] Z方向平移:±500mm(束流方向),Z方向运动满量程线性度±5μm;

[0054] 绕着Z方向的旋转角度:±180度,分辨率0.1度;

[0055] 位置定位精度为:±3μm,分辨率0.1μm。

[0056] 其中,所述的磁测运动平台16包括磁测平台底座5、依次安装在磁测平台底座5上的Z方向移动组件12、X方向移动组件14和Y方向移动组件15、以及与Y方向移动组件15的两端分别通过螺钉连接的两个连接杆,两个连接杆的远离所述磁测运动平台16的部分之间通过串联的尼龙线10和线圈探头8连接,其中,线圈探头8通过4个螺钉孔固定在旋转模块7上并且通过该旋转模块7与其中一个连接杆固定连接。所述串联的尼龙线10和线圈探头8沿着Z方向延伸并与两个连接杆垂直。

[0057] 其中,Y方向移动组件15通过竖直连接杆13安装于X方向移动组件14上,竖直连接杆13用于Y方向移动组件15沿Y的导向。

[0058] 所述Y方向移动组件15沿Z方向(即图1中的左右方向)延伸,且两个连接杆与所述Y方向移动组件15垂直连接,因此两个连接杆分别为左连接杆11和右连接杆6,左连接杆11与尼龙线10绷紧连接,右连接杆6与所述线圈探头通过旋转模块7连接。尼龙线10用于拉紧线圈探头,防止线圈探头抖动或弯曲变形。

[0059] 如图3所示,待测的脉冲磁铁9套设于所述线圈探头8上,并且脉冲磁铁9通过螺钉固定在磁测运动平台16上。脉冲磁铁9是本发明的测量对象,脉冲磁铁9在探头平移和绕着Z方向旋转时均固定不动。

[0060] 磁测平台底座5用于支撑所有运动组件。

[0061] 所述运动控制器1同时与所述磁测运动平台16的旋转模块7、所述Z方向移动组件12、X方向移动组件14和Y方向移动组件15电连接。其中,旋转模块7包括电机和电机连接件,电机通过电机连接件来与其中一个连接杆(即右连接杆6)连接,旋转模块7设置为通过

PLC控制器1控制其内部的电机转动来实现线圈探头绕Z轴的转动。Z方向移动组件12用于实现左连接杆11、右连接杆6及Y方向移动组件15在Z方向的移动,从而带动线圈探头在Z方向移动。X方向移动组件14用于实现左连接杆11、右连接杆6及Y方向移动组件15在X方向的移动,从而带动线圈探头在X方向移动。

[0062] 由此,所述运动控制器1设置为控制所述线圈探头相对于磁测运动平台16沿X方向平移运动、沿Y方向平移运动、沿Z方向平移运动、绕着Z方向旋转运动的方向上的位置。所述运动控制器1优选为PLC运动控制器。

[0063] 所述线圈探头8通过电压信号电缆4与衰减器3连接,从而通过衰减器3与所述数据采集及处理系统2连接。

[0064] 如图4-图7所示,所述线圈探头8为可彼此切换的点线圈探头81和长线圈探头82,其设置为将脉冲磁铁的脉冲磁场信号转化为感应电动势信号,即测量图4-图7中的点线圈探头81和长线圈探头82的AB两端电压信号。点线圈探头81和长线圈探头82均采用PCB板制作得到,该PCB板的材料优选为FR-4(环氧玻纤布基板)。PCB板的尺寸结合脉冲磁铁的孔径而定,具体来说,PCB板的尺寸小于脉冲磁铁的孔径,保证线圈探头8在脉冲磁铁9的孔中运动即可。脉冲磁铁9本发明的测量对象,通脉冲电流后产生脉冲磁场。

[0065] 由此,本发明快脉冲磁场自动测量装置可以通过更换线圈探头8实现点线圈测量或长线圈测量。

[0066] 如图4和图5所示,所述的点线圈探头81包括多层的PCB板、设于PCB板的一端的一个点线圈811、设于PCB板的另一端的多个接插孔A、B、C、D和多个固定孔E、F、G、H、以及连接所述点线圈811和其中一个接插孔B的点线圈直连导线812,连接所述点线圈811的接插孔B和电压信号线电缆4连接,其余接插孔A、C、D均接地(即连接参考零电动势)。如图4、图5所示,接插孔B连接感应电动势信号可以走线更短,就近选择接插孔A接地以连接参考零电动势,为了更好屏蔽接插孔C、D也接地。PCB板的层数优选为10层。点线圈的半径 $r$ 尽可能小,使得圆线圈近似为“点”,每一层PCB板上都设有一个半径为 $r$ 的近似整圆的单层线圈,单层线圈采用铜线制作,单层线圈之间依次通过过孔走铜线连接以形成所述的点线圈,过孔走铜线的宽度为5mil。固定孔E、F、G、H的数量为4个,点线圈探头81通过固定孔E、F、G、H和螺钉固定在旋转模块7上。

[0067] 如图6和图7所示,所述的长线圈探头82包括多层的PCB板、沿着PCB板的长度方向延伸的一个长线圈821、设于PCB板的一端的多个接插孔A、B、C、D和多个固定孔E、F、G、H、以及连接所述长线圈821和其中一个接插孔B的长线圈直连导线822,连接所述长线圈821的接插孔B和电压信号线电缆4连接,其余接插孔A、C、D均接地。PCB板的层数优选为2层。长线圈采用铜线制作,线圈的长度和宽度根据脉冲磁铁9的孔径而定,铜线宽度为5mil。固定孔E、F、G、H的数量为4个,长线圈探头82通过固定孔E、F、G、H和螺钉固定在旋转模块7上。

[0068] 进一步地,点线圈探头81和长线圈探头82的远离其固定孔的一端设有一个尼龙线固定孔I,所述的尼龙线10一端连接所述尼龙线固定孔I,另一端与所述左连接杆11连接。由此,通过尼龙线10拉紧线圈探头8,防止线圈探头8抖动或弯曲变形,保证线圈探头8的磁感应面与磁场方向垂直。

[0069] 电压信号电缆4用于将脉冲感应电动势信号传递给衰减器3。衰减器3设置为将感应电动势信号处理为数据采集及处理系统能够使用的信号。AB端感应电动势信号幅值较大

一般会超出数据采集及处理系统 $\pm 10V$ 范围,所以需要AB端感应电动势信号需要经过衰减器处理为 $\pm 10V$ 范围内的信号,才能供数据采集及处理系统接收。其中,衰减器3通过BNC接头分别和电压信号电缆4、所述数据采集及处理系统2连接。在其他一些实施例中,衰减器3可以替换成其他将感应电动势信号处理为数据采集及处理系统能够使用的信号的信号处理器模块。

[0070] 数据采集及处理系统2设置为采集经过转化的所述线圈探头的感应电动势信号。所述的基于数据采集及处理系统主要用于采集及分析“点”线圈探头或长线圈探头的感应电动势信号,然后将采集的感应电动势信号经过LabVIEW的数字积分函数模块21转化为脉冲磁场信号。

[0071] 所述数据采集及处理系统2优选为PXIe数据采集及处理系统,其主要包括PXI机箱(PXIe-1071)、安装于PXI机箱内部的CPU(PXIe8840)和示波器模块(PXIe-5122),其中,PXI机箱(PXIe-1071)是数据采集及处理系统2的外壳机箱的型号,里面有卡槽可用来安装CPU(PXIe8840)以及示波器模块(PXIe-5122),不同型号的机箱尺寸不一样,安装的配置可能不一样;CPU(PXIe8840)是数据采集及处理系统2的中央处理器,是运算核心和控制核心,用来处理指令、执行操作、要求进行动作、控制时间、处理数据。软件LabVIEW安装在PXI机箱里面的CPU上,由此利用LabVIEW二次开发软件实现了运动位置调节命令及位置信息获取,磁场数据获取、磁场分布成图及数据存储。

[0072] 所述数据采集及处理系统2的数据采集参数包括:

[0073] 采样带宽:100MHz;

[0074] 采样分辨率:14bits。

[0075] 采样范围: $\pm 10V$ (1M欧姆输入阻抗)。

[0076] 由于所述的数据采集及处理系统2的采样带宽为100MHz,故可满足脉冲宽度小于1 $\mu s$ 感应脉冲电压信号的采集。

[0077] 进一步地,所述的运动控制器1与所述的数据采集及处理系统2的PXI机箱ADS通信,以实现相关参数设置及状态读取。由此,所述的数据采集及处理系统2设置为实现:(1)线圈探头8的运动位置调节及位置信息获取;(2)采集经过转化的所述线圈探头的感应电动势信号以进行磁场数据获取、磁场分布成图及数据存储。

[0078] 下面以具体的非线性Kicker脉冲磁铁的磁场测量为例,以示例性说明本发明的快脉冲磁场自动测量方法的流程。

[0079] 基于上文所述的快脉冲磁场自动测量装置,所实现的快脉冲磁场自动测量方法包括:

[0080] 步骤S0:提供上文所述的快脉冲磁场自动测量装置,并将待测的脉冲磁铁9安装于其上;

[0081] 在本实施例中,待测的脉冲磁铁9为非线性Kicker脉冲磁铁,其相关参数如下:

[0082] 1)励磁电流:3335A,800Gauss;

[0083] 2)线圈位置:第一象限,电流流入(7 mm,7 mm);电流流出(10mm,10mm);

[0084] 3)真空外,四个线圈在陶瓷真空盒外对称布置,形成顶部和底部两个磁半区;

[0085] 4)磁场位置:(6 mm,400.08 Gauss)。

[0086] 脉冲磁铁9的磁场测量要求如下:

[0087] 测量出近似零场的区域(零场区),同时也要测量出沿X( $X=0$ )方向的整个范围( $\pm 16\text{mm}$ )的Y方向的磁场BY的分布曲线,得到精确的峰值场位值,这个就是脉冲磁铁的横向场分布(二维分布, $X=-16\text{mm} \sim 16\text{mm}$ ,BY磁场),间距 $0.05\text{mm}$ (1000个点)。

[0088] 测量Z方向间距 $Z_{\text{Step}}=10\text{mm}$ 的所有横向场分布(三维分布, $Z=0 \sim 400\text{mm}$ , $X=-16\text{mm} \sim 16\text{mm}$ ,BY磁场)。

[0089] 步骤S1:启动所述的快脉冲磁场自动测量装置,并利用点线圈探头81和长线圈探头82分别进行待测的脉冲磁铁9的磁场分布的多维测量。

[0090] 其中,在利用点线圈探头81进行待测的脉冲磁铁9的磁场分布的多维测量之前,还包括:将线圈探头8切换为点线圈探头81,利用点线圈探头81确定点线圈探头81在Z方向上的测量范围,并通过初步扫描确定点线圈探头81的X坐标零点;

[0091] 在利用长线圈探头82进行待测的脉冲磁铁9的磁场分布的三维测量之前,还包括:将线圈探头8切换为长线圈探头82,利用长线圈探头82确定长线圈探头82在Z方向上的测量范围,并通过初步扫描确定长线圈探头82的X坐标零点。

[0092] 其中,点线圈探头81通过是否场信号判断来确定点线圈探头81在Z方向上的测量范围,给脉冲磁铁加载信号,如果采集及数据处理系统没有探头脉冲感应电动势信号,就说明没有脉冲磁场信号,超出点线圈探头81在Z方向上的测量范围。通过初步扫描确定点线圈探头81的X坐标零点是指,扫描得到磁场在X坐标范围的曲线,可以通过脉冲磁铁的磁场在X坐标范围的曲线的中点确定X的零点大概位置,通过初步扫描一个磁场曲线,Y方向磁场 $BY=0$ 的X位置就是X的零点精确位置。长线圈探头82通过移动Z的位置,看长线圈信号的变化来判断,也可以通过实际的位置,也就是线圈的位置来判断来确定点线圈探头81在Z方向上的测量范围。

[0093] 在所述步骤S1中,启动所述快脉冲磁场自动测量装置后,所述快脉冲磁场自动测量装置自动从线圈探头8的坐标在起始点 $Z=0\text{mm}$ , $X=X_{\text{min}}$ , $Y=0\text{mm}$ 处开始测量,随后线圈探头8的X坐标每隔第一测量间隔就测量一个点,Z方向每隔第二测量间隔就测量一个点。由此,通过线圈探头8沿X方向平移运动、沿Z方向平移运动实现磁场分布的三维测量。在本实施例中,第一测量间隔为 $0.05\text{mm}$ ,第二测量间隔为 $10\text{mm}$ 。

[0094] 所述步骤S1具体包括:

[0095] 步骤S11:二维测量:首先利用运动控制器1驱动运动到线圈探头8起始点( $Z=0\text{mm}$ , $X=X_{\text{min}}$ , $Y=0\text{mm}$ ),在定位到达后运动控制器1给出定位到达信号,数据采集及处理系统2得到定位到达信号后延迟3秒,在同步信号作用下采集4个信号峰值作平均;完成测量后返回一个测量完成信号到运动控制器1,以使运动控制器1移动到下个测量点,直到垂直于Z方向的同一平面上的所有测量点均测量完成。

[0096] 其中,脉冲电流频率是 $2\text{Hz}$ ,采样单个信号峰值的时长是 $10\text{ns}$ 。

[0097] 采集4个信号峰值作平均,具体包括:在LabVIEW软件数组中,然后通过数组最大值函数找到最大值的索引, $a[i]=BY_i$ ,随后将该索引(序号)所对应的积分值读取4次作平均值,作为当前的测量点的测量结果。

[0098] 由此可见,运动控制器1也有两个模式,一个是手动模式,一个是自动模式,具体模式可以在数据监测控制界面上设置。一个测量点的测量时间为 $3+4 \times 0.5=5$ 秒。 $X=-16\text{mm} \sim 16\text{mm}$ ,一个点的测量时间 $5\text{s}$ ,需要测量1000个点。因此,实际测量一个二维横向分布的时间

是 $5000/3600=1.39$ 小时。

[0099] 步骤S12:三维测量:切换到下一个Z坐标并重复二维测量过程,其中Z方向移动的第三测量间隔为10mm。

[0100] 在本实施例中,由于Y方向是磁场方向,这里为了尽可能测量脉冲峰值磁场( $Y=0$ ),所以不移动Y方向,先按照步骤S11测量( $Z=0\text{mm}, X=-16\text{mm} \sim 16\text{mm}, Y=0\text{mm}$ )的二维BY磁场,再按照步骤S12测量Z方向间距 $Z_{\text{Step}}=10\text{mm}$ 的所有横向场分布(三维分布, $Z=0 \sim 400\text{mm}, X=-16\text{mm} \sim 16\text{mm}, \text{BY}$ 磁场)。由此,重复40次完成整个脉冲磁铁磁场分布的三维测量( $40 \times 1.39=55.6$ 小时),三个维度分别是X、Z、BY。实际测量中,可以进一步加大测量间距来缩短测量时间。

[0101] 在一个实施例中,所述步骤S1和步骤S2通过LabVIEW程序实现,其包括:

[0102] 1) LabVIEW自动命令为1启动自动测量,首先将目标位置运动到 $X=-16.0\text{mm}, Z=0\text{mm}$ 处,并判断位置是否到达,否则等待,到达启动后续流程。

[0103] 2) 判断当前 $Z+Z_{\text{Step}}$ (即当前Z坐标进一步)是否大于 $Z_{\text{End}}$ (即Z方向的测量终止位置),若大于,则停止整个测量过程,否则启动下一流程;

[0104] 3) 判断当前X(即当前X坐标)是否大于等 $X_{\text{End}}$ (即X方向的测量终止位置),若大于,则停止当前测量,

[0105] 4) 测量当前位置的BY磁场数据,读取平均4次的结果。

[0106] 其中,在首次执行步骤4)时,首先测量 $X=-16.0$ 处的场。

[0107] 5) 设置 $+X_{\text{Step}}$ (即当前X坐标进一步);

[0108] 6)  $\text{START}=1$ ,延迟100ms;

[0109] 由于数据采集及处理系统2的LabVIEW软件界面发送命令到运动控制器1的时间在ms级别,为了保证运动控制器1得到START命令,经过多次调试使用100ms较合适。

[0110] 7)  $\text{START}=0$ ,延迟1500ms(用于定位到达且线圈稳定)。

[0111] 8) 将步骤4)测得的数据写入到数组。

[0112] 即,按照步骤S11测量( $Z=0\text{mm}, X=-16\text{mm} \sim 16\text{mm}, Y=0\text{mm}$ )的二维BY磁场数据。

[0113] 9) 重复步骤2)-6),直到X位置到达 $X_{\text{End}}$ (即X方向的测量终止位置),读取一条曲线结果,写入到一个文件。

[0114] 10) 将Z走到 $0+Z_{\text{Step}}$ (即当前Z坐标进一步),重复2)-7),直到Z位置到达 $Z_{\text{End}}$ (即Z方向的测量终止位置),结束测量过程。

[0115] 按照上工作流程要求,脉冲磁场自动测量就是启动测量后,程序自动开始测量 $Z=0$ 处,X从-16mm每隔0.05mm运动测量一个点,最后测得感应电动势信号如图8所示、磁通量如图9所示,磁场BY实测和仿真的结果基本一致如图10所示,三维磁场分布测量结果如图11所示。

[0116] 以上所述的,仅为本发明的较佳实施例,并非用以限定本发明的范围,本发明的上述实施还可以做出各种变化。即凡是依据本发明申请的权利要求书及说明书内容所作的简单、等效变化与修饰,皆落入本发明专利的权利要求保护范围。本发明未详尽描述的均为常规技术内容。

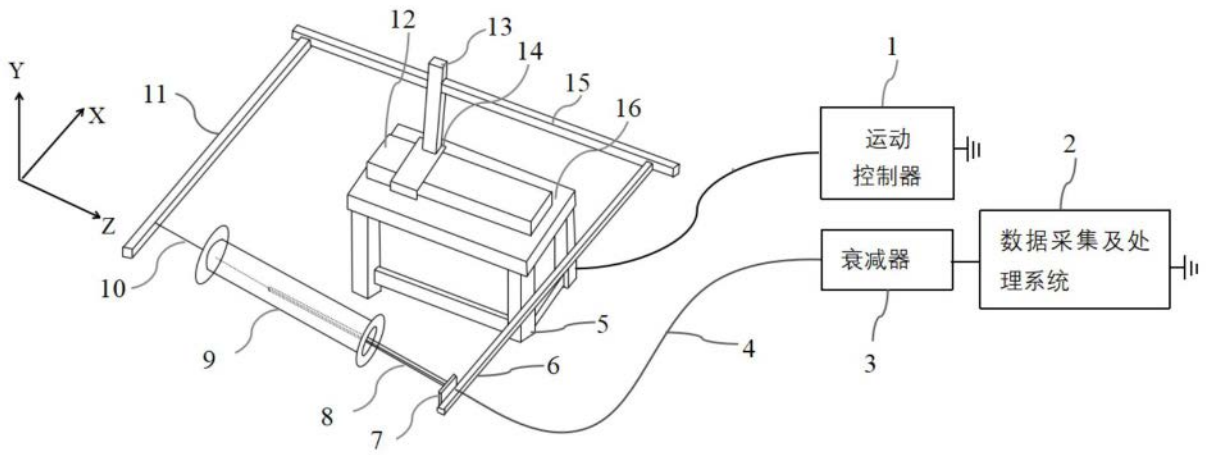


图1

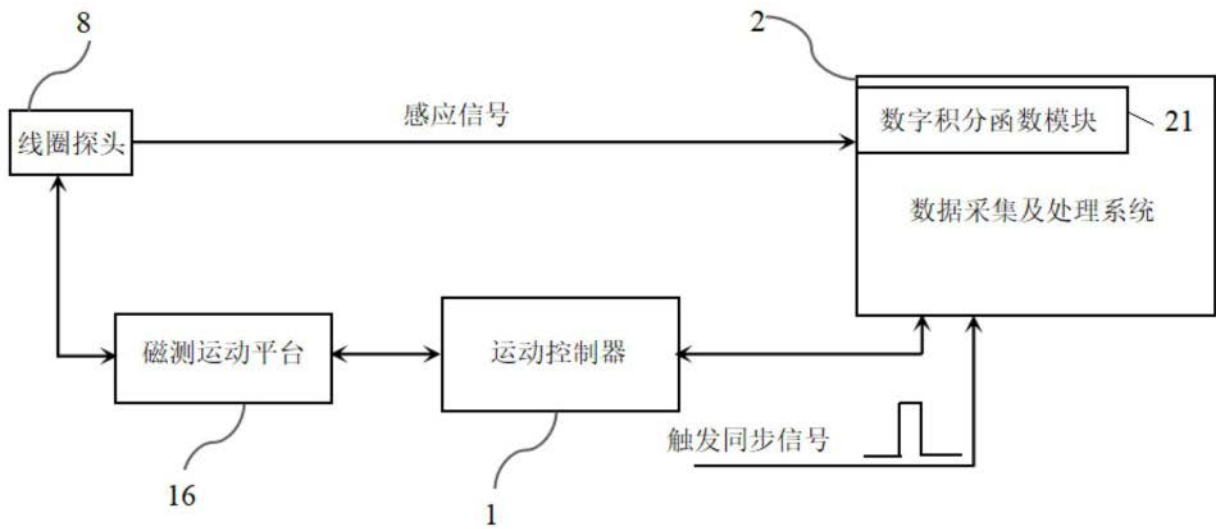


图2

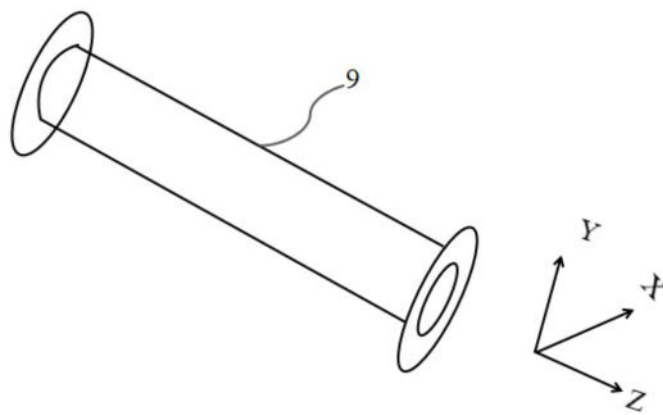


图3

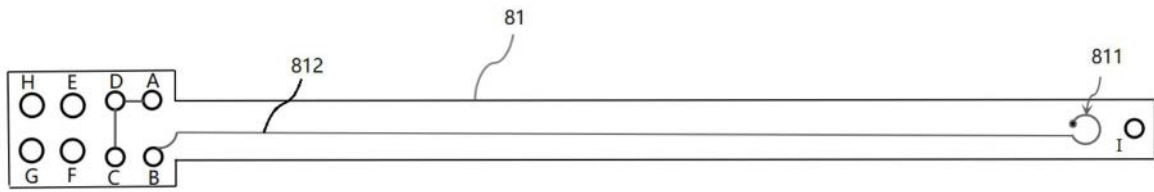


图4

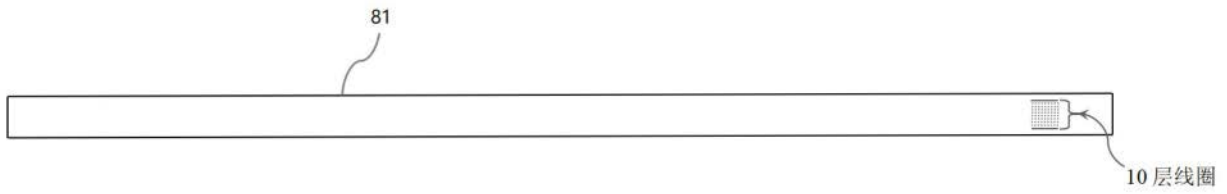


图5

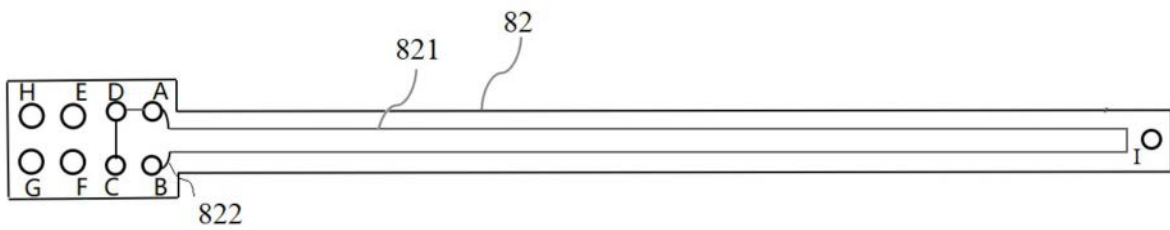


图6

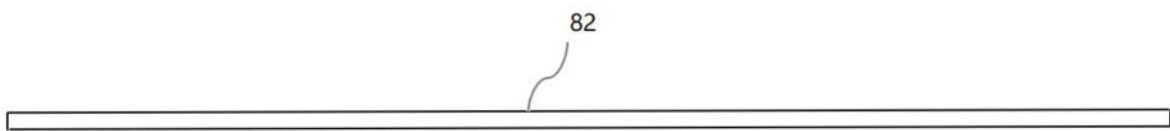


图7

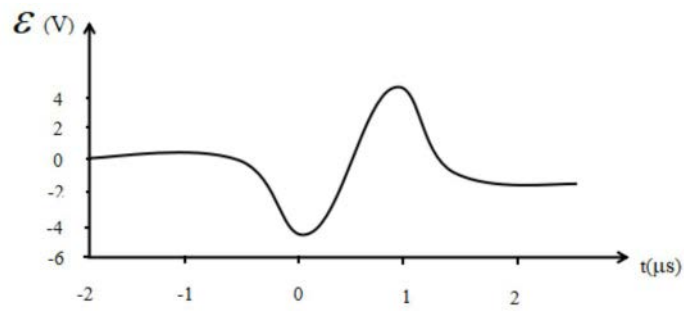


图8

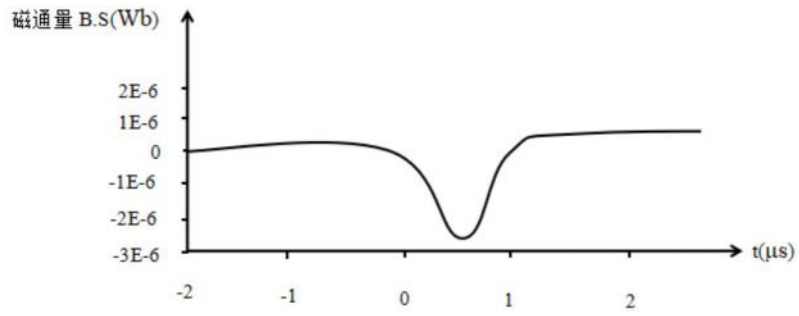


图9

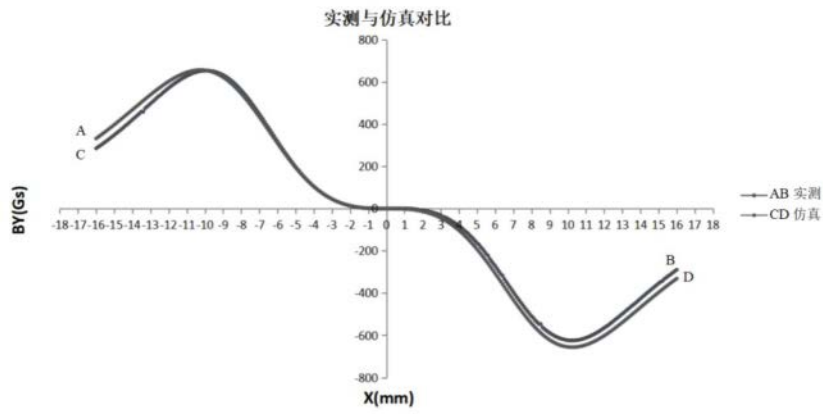


图10

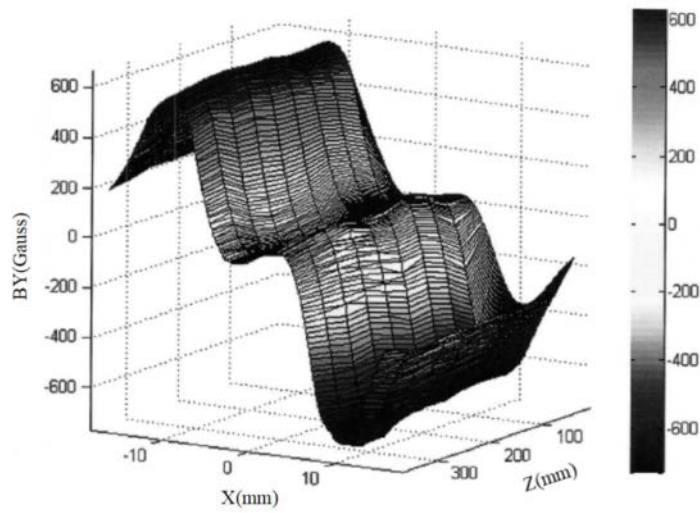


图11