

超导磁共振仪无源匀场测试系统的设计与开发

余相泉, 朱建明

(中国计量大学 信息工程学院生物医学工程研究所, 杭州 310018)

摘要: 超导磁共振仪作为目前主流的医疗成像设备, 在临床诊断和患者检查方面作用突出, 其成像质量直接取决于主磁场中心球形成像区域(DSV)的均匀性; 匀场技术作为一种实现 DSV 磁场均匀化的技术就显得尤为重要; 针对磁共振成像系统 DSV 磁场测量的传统方法中探头位置移动不准确、数据记录繁琐、操作过程复杂等缺点, 设计了基于 LabVIEW 的新型 DSV 磁场测量系统: 通过设计 LabVIEW 控制程序对高斯计进行仪器控制, 划分 DSV 球形表面的测量点, 通过调节测量装置来精确移动探头位置, 编写串口通信、数据采集程序, 完善人机交互界面, 实现 DSV 表面测量点磁场数据的实时采集, 无需手动记录, 可通过导出数据到 TXT 文件的方式保存磁场数据至本地; 经工程实际应用, 操作便捷, 实测 DSV 均匀度为 416.0506ppm, 通过线性规划算法匀场后均匀度为: 16.0383ppm, 提升超过 96%。

关键词: 磁共振成像; 磁场均匀性; 数据采集; LabVIEW; 无源匀场

Design and Development of a Passive Shimming Control and Measurement System for Superconducting MRI

Yu Xiangquan, Zhu Jianming

(Department of Biomedical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: As the current mainstream medical imaging equipment, superconducting magnetic resonance apparatus plays an important role in clinical diagnosis and patient examination. The imaging quality of the superconducting magnetic resonance apparatus directly depends on the uniformity of the central spherical imaging area (DSV) of the main magnetic field. Shimming technology is particularly important as a technology to achieve uniform DSV magnetic field. Aiming at the shortcomings of inaccurate probe position movement, cumbersome data recording and complicated operation process in traditional methods of magnetic resonance imaging system (DSV) magnetic field measurement, a new DSV magnetic field measurement system based on LabVIEW was designed; Gaussmeter instrument control was designed by designing a LabVIEW control program. Divide the measurement points of the spherical surface of DSV, adjust the measurement device to accurately move the position of the probe, compile the serial communication and data acquisition program, improve the human-computer interaction interface, and realize the real-time collection of the magnetic field data of the DSV surface measurement point without manual recording. Exporting data to a TXT file saves the magnetic field data to the local. The actual application of the project, the operation is convenient, the measured DSV uniformity is 416.0506ppm, after the shimming uniformity by the linear programming algorithm: 16.0383ppm, increased by more than 96%.

Keywords: MRI; magnetic field homogeneity; data acquisition; LabVIEW; passive shimming

0 引言

近年来, 随着我国医疗行业的迅速发展, 医用超导磁共振凭借其高信噪比、无放射性等一系列优点, 已经成为临床诊断和患者检查方面的主流成像设备。主磁体做为磁共振仪最核心的结构, 其中心成像区域的磁场均匀性直接影响设备成像质量。相较于永磁型磁共振仪的开放式结构, 超导磁共振仪以圆筒型为主, 磁场强度大, 由于高场环境特殊, 测试点复杂, 电控技术可行性低, 磁场均匀性测试方式繁琐, 准确率低, 操作难度大。传统匀场有: 安置匀

场磁片的无源匀场、线性补偿的梯度匀场^[1]、设计专门矫正线圈的有源匀场^[2]等多种方式, 由于后两种有源匀场的方式受温度因素和生产成本的影响和制约, 无源匀场凭借其灵活的优势成为最基本的匀场方式。

美国国家仪器公司(NI)开发的图形化编程语言 LabVIEW 软件凭借丰富的图形化功能函数、高效的 G 语言编程方式、前面板和程序框图的“双显示”及应用、安装程序生成方式等特点, 在仪器控制和数据采集等方面有其独特的优势, 能有效实现采集数据的分析、处理和显示, 满足测量功能设计需求^[3]。LabVIEW 作为一种新型的图形化编程语言, 其程序运行方式为线程模式, 利用高亮执行模式可以直观查看程序运行的进度及数据的走向。

本系统根据圆筒型主磁体的特殊结构, 利用扫描实际有效空间结合线性规划模型建立一种新的无源匀场模型。经实验验证, 该模型大幅度提升磁场均匀度, 匀场显著。

收稿日期: 2017-07-31; 修回日期: 2018-04-05。

作者简介: 余相泉(1994-), 男, 浙江省衢州市人, 硕士研究生, 主要从事磁共振系统测试、图像重建方向的研究。

通讯作者: 朱建明(1963-), 男, 特聘教授, 博士研究生导师, 主要从事磁共振系统及医学物理的研究。

1 系统概述

根据霍尔探头测量法,设计了基于 LabVIEW 的磁共振用超导磁体中心球形成像空间磁场测量系统。针对中心球形区域表面的测量点划分,设计了一种由铝合金制成的可调节式磁场测量装置,该装置为伞状结构,霍尔探头固定于装置内部的探头固定处,通过测量装置对探头固定处位置的调节移动,分别测量各个采集点处的磁场数据,选择符合量程和精度要求并具备温度补偿功能的测量设备,采用 LabVIEW 驱动高斯计,编写串口通信程序、数据采集程序和与人机交互界面,实现 DSV 磁场的测量。测量得到的 DSV 磁场数据用于无源匀场模块的计算^[4]。

2 系统硬件

2.1 测量分布与装置

医用超导磁共振成像系统要求中心球形成像空间的磁场均匀性达到指定要求,以 GE 公司 LCC 的 1.5 T 超导磁体为例,其磁体中心 50 cm 直径的球形区域的实际工作磁场均匀度要低于 10 ppm,而最高可达到 0.5 ppm。本文测量用的是 1.5 T 圆筒型超导磁共振系统,中心球形成像区域直径为 50 cm。如图 1 (a) 所示,球形区域表面被 13 个平行平面沿着圆筒轴心线截得 13 个平行圆,13 个平行圆上的点和圆心的连线与轴心线夹角从前到后分别为:18°、30°、42°、54°、66°、78°、90°、102°、114°、126°、138°、150°、162°,并按照磁感应强度 (B₀) 方向依次以第一平面至第十三平面标号。每个圆上等角度设置 24 个采集点,角度间隔为 15°,如图 1 (b) 所示。这样一共就有 312 (24 × 13) 个位置需要采集磁场数据。

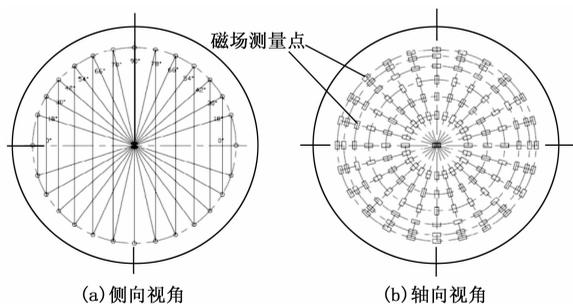


图 1 DSV 采集点分布

为了实现上述中心球形成像区域采集点的磁场测量,设计了一种伞结构的可调节式测量装置,如图 2 所示。测量装置由非磁性材料—铝合金加工制成,包括用于快速寻找圆筒型超导磁体轴心位置的伞状径向支撑部件、用于连接固定三端伞状径向支撑部件的轴向调节杆以及固定于轴向调节杆上的探头位置调节部件。霍尔探头取横向位置固定于探头调节部件,通过轴向调节杆、探头滑杆和角度刻度盘等部件联合作用,可对中心球形成像区域表面划分好的各个测试点进行磁场测量,并且定位的精确度高,很好的保证了测量过程的稳定性和测量结果的准确性。

2.2 高斯计

本文采用高斯计搭配霍尔探头测量磁场数据。DSV 磁

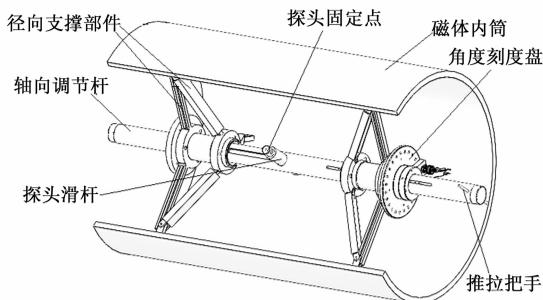


图 2 圆筒型超导磁共振中心区磁场测量装置

场测量要求数据采集精度高,温度补偿效果好,选择 Lakeshore475 高斯计。MODEL 475 高斯计的量程为:35 nT~35 T,自身内部的校零和信号处理技术都大大提高了 MODEL 475 高斯计的测量精度。在直流测量的模式下,MODEL 475 高斯计凭借前端的放大技术,使测量精度达到 ±0.04%。LabVIEW 软件可使用 visa,并通过串行 I/O 接口与 MODEL 475 高斯计进行串口通信。在直流测试模式下,MODEL 475 高斯计在一秒内数据更新的次数最高可达 1000 次,但是受到接口硬件的限制,数据更新率在测量分辨率为 5^{3/4} 时最大仅为 10 次/秒。

霍尔探头的灵敏度和偏移量会随着温度变化而产生微小的变化。探头受温度的影响可以在从测量磁场读数中被测量与扣除。高斯计可根据探头顶端的温度传感器提供的实时温度,做出补偿。选择具备温度补偿功能的霍尔探头:横向 HMNT-4E04-VF,其在直流测量下,温度系数为 0.002%/°C。

3 系统软件

磁场测量软件的设计流程:首先从 LabVIEW 的测试控制界面启动测量程序→开启串口通信→初始化 475 高斯计→设置 475 高斯计采集参数→采集磁场强度数据→磁场强度稳定→记录数据并显示于界面上的磁场强度图内→通过测量装置改变采集点位置→采集磁场强度数据并显示→直至测试点全部采集完成→保存磁场数据于 TXT 文件内,并导出→按“停止”功能按钮或“中止执行”按钮结束测量程序。在磁场数据采集过程中,程序采用连续运行方式,无需停止测试程序或者到高斯计前面板操作,就可更改显示单位、测量模式、测量分辨率、数据采样速率等采集参数,方便高效^[5]。主磁场在 DSV 表面的强度大小变化细微并且缓慢,测试程序针对该种磁场环境,设计的是针对直流测量的模式 (DC) 下的数据采集程序。

3.1 控制界面

磁场测量软件的控制界面如图 3 所示,包括:1) VISA 串口配置区,可对串口通信参数:VISA 资源名称、波特率、数据比特位、奇偶校验位和停止位进行编辑和修改;2) 高斯计测量参数设置区域,可对高斯计的量程、测量模式、显示单位、测量分辨率进行编辑和修改。高斯计数据采集速率固定不变;3) 磁场数据显示区域,对高斯计采集

得到磁场数据进行实时的显示, 同时针对记录下来的数据提供磁场最大值、最小值以及平均值查看的功能; 4) 磁场强度图绘制区域, 对记录下来的磁场强度数据进行横向排序并于“波形图”控件进行绘制, 图中白色曲线代表磁场强度曲线, 横坐标为测试点个数, 纵坐标为磁场强度, 单位为特斯拉 (T); 5) 数据采集点计数区, 对记录过磁场数据的测试点进行计数; 6) 功能按键区域, “数据记录”按键可对当前测试点磁场数据进行记录并显示于磁场强度图内; “数据导出”按键能将已完成数据采集的测试点的磁场强度数据进行导出, 并生成一个 TXT 文件; “启动”与“停止”按钮分别控制启动与停止数据采集程序。

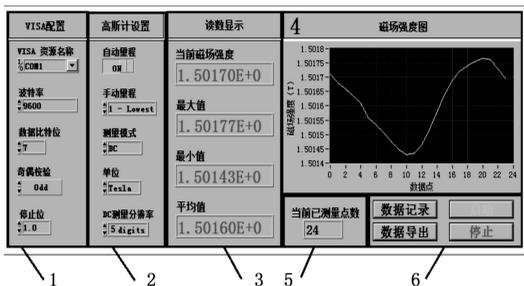


图 3 磁场测量软件控制界面

3.2 串口配置

Model475 高斯计通过后面板的 RS232 串口与 PC 机相连, 实现串口通信。“VISA 配置串口”作为一个串口参数配置的功能函数, 是串口通信能正常运行的前提和保障, 也为串口通信提供初始化的功能^[6]。配置的参数主要包括串口资源名称、比特率、数据比特位、奇偶校验和停止位。LabVIEW 前面板分别设置比特率为 9600 bit/s; 数据比特位为 7 位; 奇偶校验为奇校验 (odd); 停止位为 1 位; 串口资源名称通过高斯计连接的物理串口名称实际选取。

3.3 参数配置

参数配置程序如图 4 所示。按照量程、测量模式、测量分辨率、场强单位的顺序通过“VISA 写入”功能函数发送命令“RANGE 1; AUTO 1; RDGMODE 1, 3; UNIT 2 \r\n”至 Model475 高斯计, 其中, 各个参数配置命令之间需加上分号, 并以回车键常量 and 换行键常量结尾。配置过程中, 为高斯计进入设置模式保留 500 毫秒 (ms) 的等待时间, 确保配置和后续操作的成功率。图 4 中的“格式化值”函数具有将输入数字转换为格式字符串中指定的通用字符串, 并添加至初始字符串内的功能。

3.4 数据采集

读取磁场场强数据的控制程序框图, 如图 5 所示, 通过“VISA 写入”功能函数发送命令“RDGFIELD? \r\n”至下位机高斯计, 以回车键常量和换行键常量结尾; 由“VISA 读取”函数接收返回的数据“<field> \r\n”, 其中“field”为当前磁场读数, 其单位和分辨率由之前的配置参数决定。在该串口通信过程中, “VISA 读取”函数读取

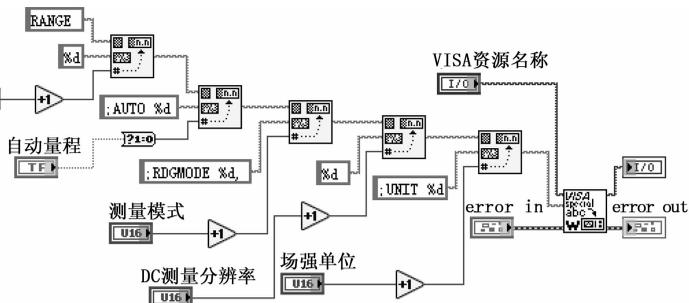


图 4 参数配置程序框图

的字节数量设置为 50, 并且保留 50 ms 的等待时间, 以确保在下一个命令被执行之前, 能从串口接收到数据。图 5 中的“匹配模式”函数具有将输入字符串按照搜索出的正则表达式位置分隔为三个子字符串的功能; 而“分数/指数字符串至数值转换”函数就是直接将字符串内的数字字符串转换为科学性的浮点数。

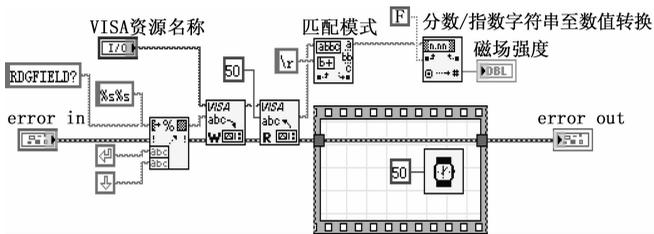


图 5 读取场强数据程序框图

3.5 测量结果

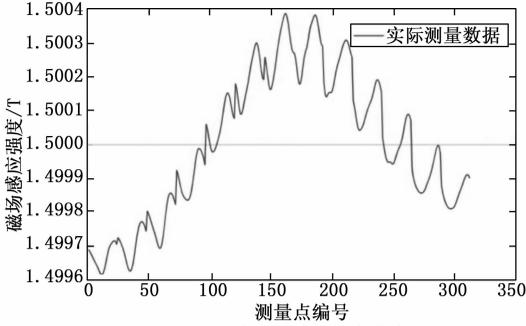
根据磁场测量的方式, 设计上述的 LabVIEW 控制程序, 实时读取当前模式下采集得到的磁感应强度。通过手动调节测量装置来改变探头位置, 逐一记录下划分好的各个 DSV 区域表面测量点的磁感应强度。运用于实际测量过程中, 主磁体为磁共振用 1.5 T 超导磁体, 圆筒内径为 70 厘米, DSV 球形区域的直径为 50 厘米, 轴向设置 13 个采集面, 每个采集面与 DSV 球形表面相交的圆上等分 24 个采集点, 一共 312 个采集点, 其磁感应强度曲线如图 6 (a) 所示, 其中测量点编号 (X 轴) 按照第一平面至第十三平面等方位角排序。图中磁感应强度曲线在 1.5 T 附近浮动, 变化幅度大, 整体在前半部分呈现上升趋势, 后半部分呈现下降趋势, 同时包含很多反趋势的上升或者下降, 总体呈现为一个峰型。DSV 的原始磁通密度图如图 6 (b) 所示, 计算得到主磁场 B₀ 在 DSV 内均匀度为 416.0506 ppm, 并未达到成像要求 (成像一般要求均匀度小于 10 ppm)。因此, 后期的匀场工作必不可少。

4 匀场模型

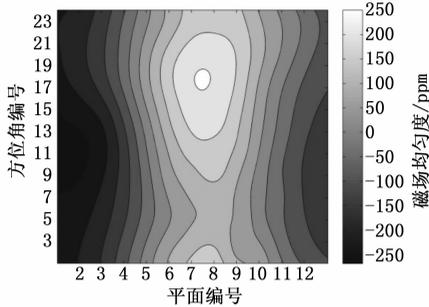
本文的磁场均匀度由 η 表示, 其计算公式为:

$$\eta = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\text{avg}}} \times 10^6 \quad (1)$$

其中: B_{\max} 和 B_{\min} 分别为中心球形成像区域最大和最小的磁通密度; B_{avg} 为平均磁通密度。并且由无源匀场原理可知, B_{\max} 和 B_{\min} 均在球形成像区域表面。



(a) DSV表面磁感应强度曲线



(b) DSV原始磁通密度图

图 6 测量结果

本文通过结合了实际有效空间^[7-8]和线性规划模型^[9-11]的新型无源匀场模型提高中心球形成像区域磁场均匀度。

第一步,对实际各个测量点的磁场强度数据进行卷积求解得到一定阶数(本文阶数取 1~12)、一定自由度(本文自由度取 0~4)的主要谐波分量。

第二步,将中心整个球形区域磁通密度规划分布到实际工作有效的区域中。因为实际工作中,球形区域一般大于成像部分,如人体表面之外的上半球形空间和人体表面之外的下半球形空间。因此,将上述空间按投射关系规划分布到实际工作空间内以提高匀场效果。

第三步,建立匀场片磁化分布模型:

$$dB_0(r, \theta, \varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \epsilon_m \frac{(n-m+2)!}{(n+m)!} P_{n+2}^m(\cos\alpha) \cdot \frac{\mu_0 M_s dV}{4\pi} \cdot \frac{r^n}{f^{n+3}} P_n^m(\cos\theta) \cos(m(\varphi - \varphi')) \quad (2)$$

其中: $dV = R \cdot t \cdot d\varphi' dz'$, R 为匀场磁片所在级面的离中心的距离, t 为匀场磁片的厚度; μ_0 为空气的磁导率; $P_n^m(\cos\theta)$ 为 m 和 n 的 Legendre functions; (r, θ, φ) 和 (r, θ, φ') 表示球坐标系中的三维坐标。由:

$$f = \sqrt{r^2 + z^2}; \cos\alpha = \frac{z}{f}; \epsilon_m = \begin{cases} 1, m = 0 \\ 2, m > 0 \end{cases} \quad (3)$$

可得到实际工作空间分布矩阵。

第四步,建立线性规划匀场模型,最终提高 DSV 均匀度,如式(4)所示:

$$\min \sum_{i=1}^{aI} \sum_{j=1}^{aJ} t(i, j) \quad st: \begin{cases} B_i - \frac{z}{2} < |B_z^3 + B_z^2| \leq B_i + \frac{z}{2} \\ |t(i, j)| \leq T \end{cases} \quad (4)$$

其中: aI 和 aJ 为垫片包在轴向的数目和方位角个数;

$t(i, j)$ 是按照敏感度矩阵排序的方式下在 (i, j) 坐标的垫片包内匀场片的厚度;单个垫片包内匀场片厚度范围为 $t \in [0, T]$; B_z^3 是 DSV 表面采集点的 Z 向原始磁场; B_z^2 是匀场片在采集点产生的 Z 向磁化磁场,故 $B_z^2 = S \cdot t$; S_i 是标准目标磁场; ϵ 为可接受的峰峰值; T 是匀场片在一个垫片包内的最大厚度数量。

第四步,求解线性规划算法模型(4),实际上是解决凸优化问题,本文利用 Matlab 的 linprog 函数来解这个线性规划问题,通过限制条件,最小化目标函数。linprog 函数具体格式如式(5)所示:

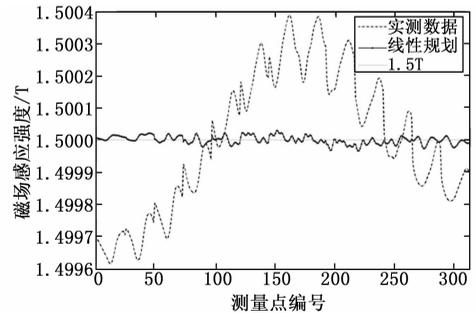
$$x = \text{linprog}(f, A, B, [], [], lb, ub) \quad (5)$$

其中: f 是目标函数的系数矩阵,为 576×1 大小的 1 矩阵;不等式约束为 $S \cdot t \leq (B_u - B_z^2)$ 和 $-S \cdot t \leq (B_l - B_z^2)$,其中 $B_u = B_i \cdot (1 + 0.5 \cdot \epsilon)$ 是误差磁场的上限, $B_l = B_i \cdot (1 - 0.5 \cdot \epsilon)$ 是误差磁场的下限; A 是不等式约束的系数矩阵,故 $A = [S; -S]$; B 是不等式约束的上下条件限制矩阵,故 $B = [B_u - B_z^2; B_z^2 - B_l]$; ub 和 lb 是匀场片厚度的上界和下界。

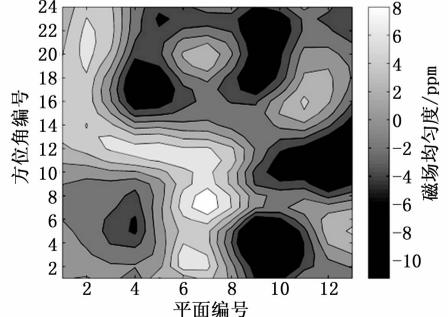
第五步,多次循环验证以不断提高磁场均匀度到最优水平。

5 结果分析

本系统实验对象为 1.5 T 超导磁体,中心球形成像区域半径为 25 cm,磁场数据采集点分布如 2.2 节所示,一共 312 个。圆筒底部到实际有效空间距离为 10 cm。匀场磁片大小为 $4 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 0.01 \text{ cm}$;规定匀场片最薄为 0.1 mm,最厚为 12 mm,匀场级面距中心球形成像区域 10 cm,轴向方向分 13 层,每层分 15 份,每份 24° ,共 195 个匀场磁片位置。利用 Matlab 求解并多次重复验证,图 7(a) 是匀场



(a) DSV表面磁感应强度曲线



(b) DSV原始磁通密度图

图 7 匀场结果