



·粒子束及加速器技术·

1.5 T 磁感应强度水冷式螺线管线圈 结构设计及仿真研究*

叶 毅, 龙全红, 廖树清, 刘云龙, 李铭玮

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 介绍 T 量级水冷式螺线管线圈的结构设计及仿真研究工作。采用多层水冷结构设计, 对不同温升导致的变形量进行计算并校验, 最后利用 POISSON 程序对线圈磁场进行仿真计算。计算表明: 最大温升 60 °C 时, 整个结构变形量小于 0.07 mm, 即探头相对位置变化量可小于 0.1 mm; 96.6 A 电流加载时, 中心区最大磁感应强度为 1.5 T; 0.01% 精度轴向磁场宽度为 40 mm, 0.1% 精度轴向磁场宽度为 140 mm。从仿真结果来看, 设计的水冷式螺线管线圈可满足磁场探头校准测量要求。

关键词: 水冷式; 螺线管线圈; 探头校准

中图分类号: TL53

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220016

Structure design and simulation research for the water-cooled solenoid with 1.5 T magnetic field

Ye Yi, Long Quanhong, Liao Shuqing, Liu Yunlong, Li Mingwei

(Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: The structure design and simulation research for the water-cooled solenoid with magnetic field on the order of T are presented in this paper. The multi-layer water-cooled structure design is used for the solenoid. The solenoid structure malformation caused by different temperature rise is simulated and checked. Finally the magnetic field is calculated by POISSON code. The structure deformation is less than 0.07 mm with 60 °C temperature rise and the magnetic field is 1.5 T with 96.6 A current. The axial magnetic field region is 40 mm on the order of 0.01% precision and is 140 mm on the order of 0.1% precision. The results show that the water-cooled solenoid is good enough for the magnetic field calibration measurement.

Key words: water-cooled, solenoid, calibration

在依靠各种磁铁进行束流传输的加速器中, 磁铁的磁参数特性决定了束流品质。在对磁铁进行的各种测试中, 测量精度磁测往往决定于探头精度。磁场测量设备的霍尔电压探头标准测试需要各种量程的标准轴向磁场, 特别是标准的螺线管磁场^[1]。

目前比较常用的霍尔探头量程可以达到 3 T 左右, 但是用于校准此量级磁感应强度的普通螺线管线圈, 都比较复杂、峰值磁场值较小^[2], 其轴向尺寸也较小, 对于探头位置的定位精度较低。为了解决这些问题, 并且区别于超导设计技术^[3], 本文采用一种阵列式绕线分布及内外套筒水冷设计方法, 完成了 T 量级水冷式螺线管线圈绕制, 在较大温升范围内实现了对变形量的控制, 满足了大范围探头校准测量对位置精度的需求^[4]。此螺线管的用途主要是产生标准轴向磁场, 即在中心轴线上产生随电流线性变化的轴向磁场, 可用于磁场探头校准测量, 使用时要给出室温条件下, 励磁电流与标准磁场的对应曲线, 峰值磁场分布的均匀性是设计的主要考虑因素。本文将从线圈结构设计、热致变形控制及仿真计算^[5]等方面介绍设计螺线管线圈各项参数。

* 收稿日期: 2022-01-22; 修订日期: 2022-09-14

基金项目: 国家专项工程

联系方式: 叶 毅, trq151@163.com。

通信作者: 廖树清, liaoshuqing@mail.tsinghua.org.cn。

1 线圈结构设计及参数计算

所设计螺线管线圈的基本结构如图 1 所示:由前挡板、后挡板和带齿内筒组成骨架;在带齿内筒的凹槽内缠绕带状的磁性材料(如金属玻璃带或软磁带等)作为匀场环;在前后挡板内以一定的工艺绕制一定尺寸规格的表面绝缘的导线形成绕线区;各个绕制线圈之间为水冷区;外层用 DT4 纯铁形成铁芯区。

制作线圈骨架必须选择无磁性的金属或非金属材料,为了达到抗线圈绕组挤压防止变形的目的采用铝板,并进行喷塑、阳极化等绝缘处理,以加强线圈骨架与线圈绕组之间的绝缘性能。而带齿内筒为了防止出现形变一般采用锻压的铝、铜等金属材料,内筒的壁厚在考察线圈长度、自重等因素后确定。影响线圈磁场性能的主要因素在于匀场环的规格、绕线工艺及 DT4 纯铁(饱和磁场 2.5 T)铁芯设计等。特别需要考虑的是线圈工作时的温升效应^[6-7],因此在绕线区采用水冷设计,在螺线管线圈前后铁芯区及骨架上开进出水路孔。

采用一种高磁导率的软磁带,等间隔、等厚度地缠绕在带齿内筒的定位槽中形成匀场环。它的采用使线圈磁场的性质发生极大改变:径向上是磁导率为 μ 的软磁与磁导率约为 1 的内筒并联,轴向上则是软磁片与衬筒串联,其横向磁导率 μ_T 和轴向磁导率 μ_z 分别为

$$\begin{aligned} \mu_T &= 1 + k(\mu - 1) \\ \mu_z &= [1 + k(1/\mu - 1)]^{-1} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $k = W/L$, 为软磁片的占空系数, W 为软磁有效宽度, L 线圈有效长度, 通常取 $1/2 \sim 1/3$; μ 为软磁材料磁导率(远大于 1)。

所以轴向磁导率 μ_z 约等于 1, 而横向磁导率 μ_T 远远大于轴向磁导率

$$\mu_T \gg \mu_z \approx 1 \quad (2)$$

由电磁学磁导分析可知:在满足公式(2)的情况下,处于匀场环外的径向磁场很难穿透匀场环进入束流输运区域,同时对轴向磁场的影响则不大,即匀场环的引入将起到磁校正器作用,从而减小线圈绕组或外部杂散径向磁场的影响,从而提高中心区的轴向磁场均匀性。

设计的螺线管为轴对称结构,采用通用的 2 维模拟计算程序 POISSON 就可准确计算得到磁场分布,具有轴对称分布特性。以通常使用的美国贝尔高斯计为例,探头敏感区精度为 0.05 mm 左右,并且激光跟踪仪通常的标定精度约 ± 0.03 mm, 因此从位置测试精度来看,校准的位置敏感度在 0.05 mm 是可行的。

2 线圈温升变形控制及电参数计算

为了避免线圈工作时温升效应导致的结构变形。在绕线区采用套筒阵列式水冷设计,在线圈前后铁芯区及骨架上开进出水路孔,其关键是控制温升导致的水冷结构变形量,线圈三维结构图 2 所示。

因整个冷却水压较大,为避免不锈钢筒水路孔处由于水压局部较强而引起机械变形,从而导致水路漏水。水路孔处采用激光焊接技术(优点是热影响区金相变化范围小,且因热传导所导致的变形亦最低),焊接直径为 $\varnothing 10$ mm 的短直管。短直管处配装活接头,活接头之间采用 316L 弯管连接,便于拆装(图 3 所示)。

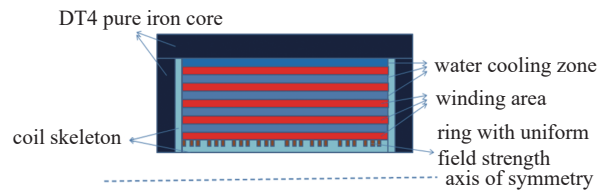


Fig. 1 Structure view of solenoid

图 1 线圈结构示意图

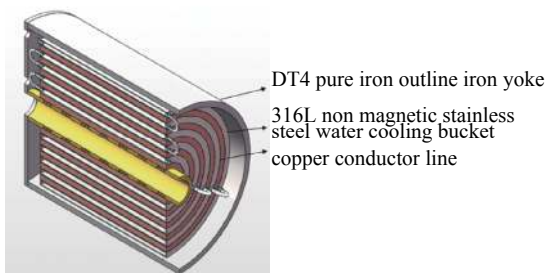


Fig. 2 Three-dimensional shape of the water-cool array coiling solenoid

图 2 阵列绕线水冷式螺线管线圈三维结构

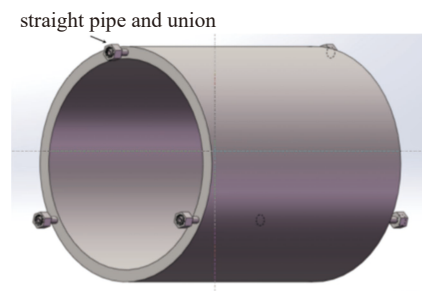


Fig. 3 Three-dimensional shape of stainless tube with flexible junctor

图 3 带活接头不锈钢筒三维结构图

初步设计的线圈尺寸为内半径为 30 mm, 外半径为 450 mm, 高度为 500 mm。绕制线选用 3 mm×4 mm 的扁平漆包铜导线, 每个绕线区绕制匝数为单层 100 匝, 共 10 层, 每个绕线区的总匝数为 1000 匝。总共 5 个绕线区, 所有绕线总匝数为 5000 匝。绕线区之间为内外径差为 35 mm 的筒状水冷区, 以实现绕线区的冷却, 共 5 个水冷不锈钢筒。

计算时设定水冷温度梯度为 10 °C, 每 10 °C 温升得到相应变形量, 对冷却水温升 60 °C 以内的线圈结构变形进行仿真分析^[8]。计算得到了按 10 °C 阶梯统计线圈最大外径处, 不锈钢水冷筒及线圈整体结构的最大变形量(采用 SolidWorks 机械设计程序计算, 考虑了实际横向热传导及热平衡)。具体数值表 1 所示。

最接近室温温度 20 °C 的线圈机构变形量最小, 低于或高于室温线圈变形量逐渐增大。计算结果表明: 最大外径处的不锈钢水冷筒, 其最大变形不超过 0.086 mm(图 4 所示); 综合考虑绕线及不锈钢水冷筒一体变形时, 整个线圈结构中最大变形不超过 0.07 mm(图 5 所示), 满足使用要求。具体来说, 通常对探头位置进行标定时采用激光跟踪仪来测量, 其定位精度为±0.03 mm, 因此要求结构变形不超过 0.06 mm, 加上水路冷却后, 整体结构变化小于定位精度即可。

表 1 冷却水温升 60 °C 以内的线圈结构变形仿真结果

Table 1 Simulation results of coil structure deformation with cooling water temperature rise within 60 °C

cooling water temperature rise/°C	maximum deformation of stainless steel water cooling cylinder at the maximum outer diameter/10 ⁻² mm	maximum deformation of the overall structure of the coil/10 ⁻² mm
10	4.688	3.194
20	4.282	3.042
30	4.879	4.561
40	5.945	5.343
50	7.240	6.135
60	8.559	6.973

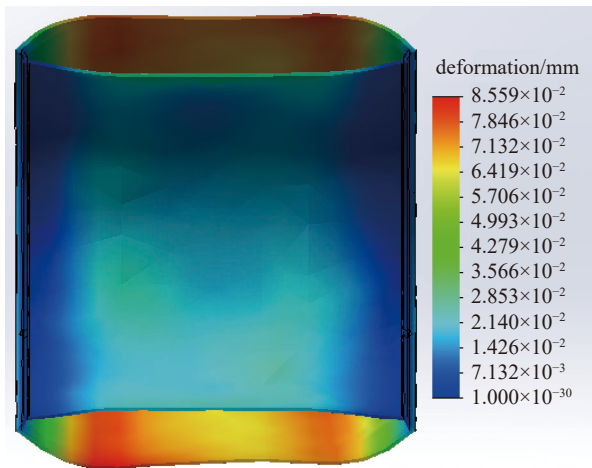


Fig. 4 Simulated stainless tube shape when the temperature rise is 60 °C

图 4 60 °C 温升, 线圈不锈钢水冷筒变形仿真分析结果

如图 6 所示, 按 0.3 MPa 的压力对焊接处进行受力仿真计算, 结果表明焊接处受力变形小于 0.03 mm, 可以满足使用要求。

以 90 A 线圈电流为例, 在冷却水流量充分使其温度保持室温时, 对线圈进行电参数简要计算, 可以得到每个绕线区的长度、电阻、功率和最大电压等以下结果, 具体见表 2。从表 2 可以看出, 90 A 加载线圈电流时, 所配置的恒流源总功率为 70.5 kW, 最大绕线区耐压为 276.3 V, 这样的参数是可行的。

3 POISSON 程序仿真计算

以 90 A 加载线圈电流, 每个绕线区 1000 匝线圈, 其安匝数为 90000, 由 POISSON 通用磁场计算程序, 可以计算得到如图 7 给出的轴向磁场分布曲线。

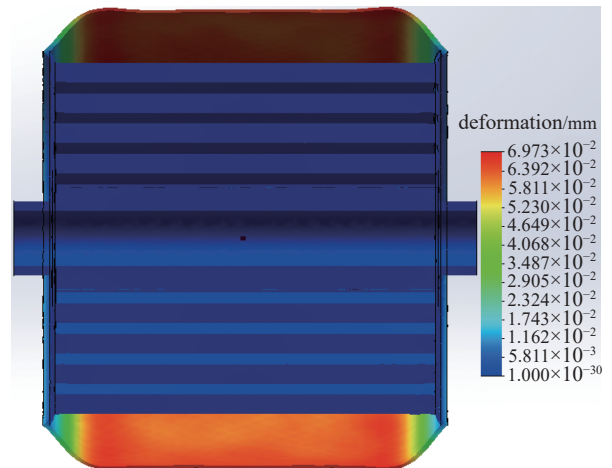


Fig. 5 Simulated whole structure for coiling when the temperature rise is 60 °C

图 5 60 °C 温升, 线圈整体结构变形仿真分析结果

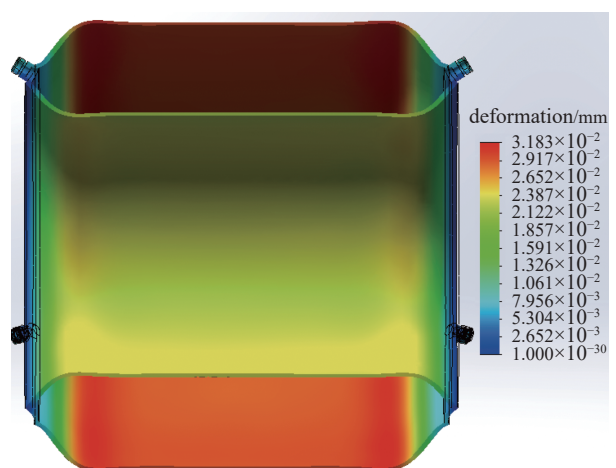


Fig. 6 Simulated stress for waterpipe

图 6 水路孔处仿真受力结果

表 2 90A 线圈加载电流计算结果
Table 2 Calculation results of 90A coil loading current

winding area number	turns	length/m	resistance/ Ω	power/kW	voltage/V
1	1000	300	0.46	3.73	41.4
2	1000	676	1.04	8.42	93.6
3	1000	1122	1.72	13.93	154.8
4	1000	1563	2.40	19.44	216
5	1000	2004	3.07	24.87	276.3

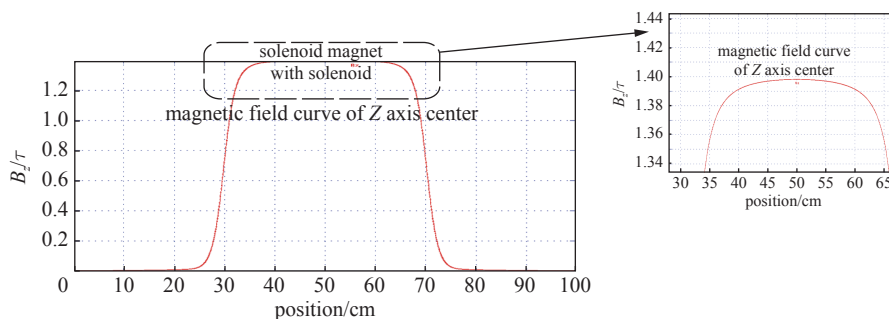


Fig. 7 Magnetic field curve of Z axis

图 7 轴向磁场分布曲线

将中心区放大,可以得到中心区的轴向磁场分布(图 7 所示)。从图 7 中看出,当加载的励磁电流为 90A 时,设计的线圈轴线上最大磁感应强度为 1.3980 T,其 0.01% 精度轴向磁感应强度变化范围为 40 mm(从横坐标 48~52 cm 处),0.1% 精度轴向磁场强度变化范围为 100 mm(从横向坐标 45~55 cm 处)。

根据磁场线性叠加原理(纯铁 DT4 铁芯未饱和时,其饱和值为 2.5T),增加电流为 $90 \times (15000/13980) = 96.6$ A 时,可以得到 1.5 T 的峰值磁场,其 0.01% 精度轴向磁场宽度同样为 40 mm(从横坐标 48~52 cm 处),0.1% 精度轴向磁场宽度为 140 mm(从横向坐标 43.5~57.5 cm 处)。设计的基于水冷式 1.5 T 磁感应强度常温螺线管与超导螺线管线圈 3 T 磁感应强度相比^[9]略有不足,但已可满足大部分常规磁铁磁场测试对探头测量校准要求。图 8 给出励磁电流为 96.6A 时线圈二维仿真计算结果。由图可以看出,磁感应强度从中心沿径向是逐步变小的。

设计的螺线管线圈加入导磁环主要作用是减小螺线管两端漏磁,使得好场区长度变长。图 9 给出了最终设计的带磁环螺线管线圈 1.5 T 峰值磁感应强度仿真结果(励磁电流为 96.6 A),图中横坐标为轴线位置,纵坐标为磁感应强度。

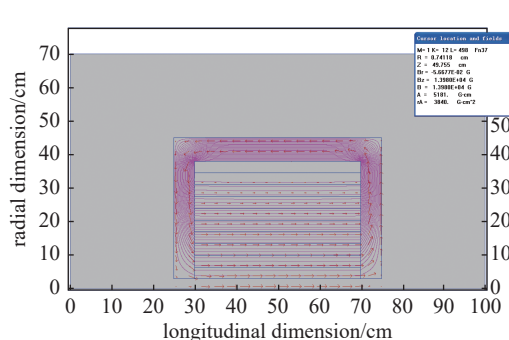


Fig. 8 Two-dimension simulation of coiling

图 8 线圈二维仿真图

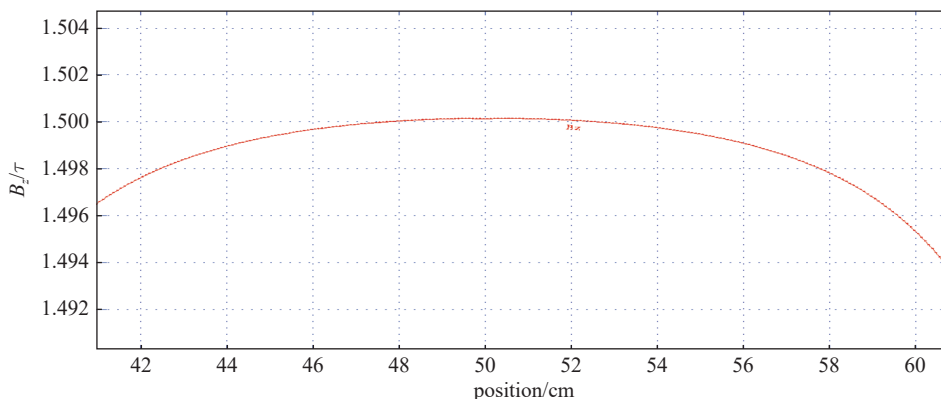


Fig. 9 Magnetic field curve of Z axis center on 1.5 T

图 9 1.5T 磁场中心区轴向磁场分布

对比图7和图9可知:未加磁环时仿真计算获得1.5 T峰值磁感应强度,其0.1%好场区(磁感应强度大于1.4985 T)为100 mm(图7所示);而当螺线管线圈加入磁环并且导磁环的位置沿轴线上均匀分布时,其0.1%好场区为140 mm(图9所示),比未加磁环增加40 mm。

4 结 论

本文设计了磁感应强度大于1 T的水冷式螺线管线圈。主要是对励磁电流加载时温升导致的结构变形进行了校核计算,计算结果表明温升60 ℃时的线圈最大结构变形小于0.1 mm(最大值为0.086 mm),满足线圈测量时激光跟踪仪定位精度对结构变形的要求;并且进行了线圈磁感应强度二维分布仿真计算,当励磁电流为96.6 A时,线圈轴线磁感应强度可达到1.5 T,可满足用于大部分常规线圈测试的磁场探头校准测量需求。

参考文献:

- [1] 陈继忠, 张一鸣, 肖继军. 低场核磁共振螺线管线圈的设计[J]. 分析仪器, 2007(2): 21-25. (Chen Jizhong, Zhang Yiming, Xiao Jijun. Design of solenoid coil for low field NMR[J]. *Analytical Instrumentation*, 2007(2): 21-25)
- [2] 荆晓兵, 陈楠, 李勤. 宽平顶低横向场分量螺线管线圈设计[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(3): 591-594. (Jing Xiaobing, Chen Nan, Li Qin. Design of wide flat-topped low transverse field solenoid magnet[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(3): 591-594)
- [3] 梁羽, 马力祯, 吴巍. 等. 2.0T斜螺线管型超导二极磁体设计[J]. 低温与超导, 2017, 45(8): 51-56. (Liang Yu, Ma Lizhen, Wu Wei, et al. Design of a 2.0T superconducting dipole magnet based on tilted solenoids[J]. *Cryogenics & Superconductivity*, 2017, 45(8): 51-56)
- [4] 臧宗阳, 龙全红, 荆晓兵, 等. 基于激光跟踪仪测量方法的磁测探头空间位置测量[J]. 机械工程师, 2019(4): 124-125. (Zang Zongyang, Long Quanhong, Jing Xiaobing, et al. Space position measurement of magnetic probe based on laser tracker measurement method[J]. *Mechanical Engineer*, 2019(4): 124-125)
- [5] 熊娟, 魏薇, 王芳, 等. 螺线管磁场设计的简易仿真分析方法[J]. 大学物理实验, 2021, 34(2): 33-36. (Xiong Juan, Wei Wei, Wang Fang, et al. Simple simulation analysis method for solenoid magnetic field design[J]. *Physical Experiment of College*, 2021, 34(2): 33-36)
- [6] 牟凡, 董攀, 代志勇. 铁氧体加速腔螺线管线圈温度测量[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(4): 825-828. (Mu Fan, Dong Pan, Dai Zhiyong. Temperature measurement of accelerator cell solenoid loop[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(4): 825-828)
- [7] 牟凡, 董攀, 代志勇. 直线感应加速腔螺线管线圈温升效应研究[J]. 高能密度物理, 2010(1): 9-11,34. (Mu Fan, Dong Pan, Dai Zhiyong. Research for temperature effect of accelerator cell solenoid[J]. *High Energy Density Physics*, 2010(1): 9-11,34)
- [8] 张华辉. CFETR中心螺线管模型线圈应变和位移实验设计与分析[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017. (Zhang Huahui. Experimental design and analysis of strain and displacement of CFETR CSMC[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017)
- [9] 彭楠, 熊联友, 刘立强, 等. 3T超导螺线管标准磁铁的研制[C]//第八届全国低温工程大会暨中国航天低温专业信息网2007年度学术交流会论文集. 2017. (Peng Nan, Xiong Lianyou, Liu Liqiang, et al. The research of standard ferromagnet for 3T superconductive solenoid[C]. 2017)