

# 基于斜螺线管型超导 Gantry 二极磁体设计

梁羽<sup>1,2</sup>, 马力祯<sup>1</sup>, 吴巍<sup>1</sup>, 吴北民<sup>1</sup>, 施建军<sup>3</sup>, 陈玉泉<sup>1</sup>, 梅恩铭<sup>1</sup>

(1. 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

(2. 中国科学院大学, 北京 100049)

(3. 兰州科近泰基新技术有限责任公司, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 为了解决当前 Gantry 治疗装置面临的难题—磁体质量庞大, 运行成本昂贵, 提出了一种新型的斜螺线管型线圈结构。目前, 已经完成了一台 2.5 T 用于重离子 Gantry 的 NbTi 超导磁体样机设计, 与质子 Gantry 相比, 其有效缩减了磁体的尺寸和质量。该磁体由 10 层斜螺线管线圈组成, 工作电流为 1000 A。线圈孔径为 176 mm, 其中好场区达到孔径的 2/3。由于线圈形状的特殊性, 其端部结构无需优化, 各高阶谐波量沿轴向积分为零。磁体采用传导冷却的方式, 保证其在旋转的情况下安全稳定运行。从斜螺线管线圈的概念出发, 详细介绍斜螺线管型超导二极磁体的磁场设计, 借助于 ANSYS 有限元分析软件, 仿真了超导磁体和冷屏的空间温度场, 得到磁体低温系统的热分布, 最后简要介绍磁体的加工情况。

**关键词:** 旋转机架; 斜螺线管; NbTi; 传导冷却; 热分析

**中图分类号:** TG132.2<sup>+</sup>6

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2018)11-3444-07

作为 21 世纪最理想的放疗射线, 离子束在治疗肿瘤领域已经变得越来越普遍。治疗装置中的旋转机架 (Gantry), 能够实现对放射性束流的 360° 旋转, 结合对病人的水平旋转, 能够实现  $4\pi$  全立体角供束, 是最为理想的治疗终端<sup>[1]</sup>。相对于常规的水平垂直治疗终端, Gantry 能够提供更好和更可靠的治疗方案, 最大程度地减少对健康敏感器官的辐射剂量<sup>[2]</sup>。

现有的 Gantry 治疗装置不论采用常规或超导磁体结构, 其系统体积庞大、造价昂贵、运行和维护成本高, 成为制约离子束治癌推广的重大难题。近年来, 超导磁体技术发展迅速, 斜螺线管型线圈作为一种新型结构, 开始应用于加速器磁体和医用治疗装置领域。在这些应用领域中, 节能小型化成为未来发展非常关键的因素。

相对于传统的跑道型线圈, 斜螺线管型线圈结构新颖轻巧, 磁场品质优越, 机械性能突出, 绕制工艺简单, 对线材弯折少, 适合于现有的各种实用化超导线材。目前, Bi 系和 Y 系超导带材由于其材料和工艺的限制, 价格较为昂贵, 主要应用于高场内插磁体、储能磁体的研制。Nb<sub>3</sub>Sn 超导体主要应用于核磁共振仪 (NMR)、磁约束核聚变以及高能物理的高场磁体领域, 不适用于中低磁场的医用加速器 (小于 5 T)。MgB<sub>2</sub> 超导材料在低场 (1~2 T) 以及 10~20 K 制冷机

工作温度下较其他超导材料有着明显的性能和成本优势, 温度裕度高, 磁体稳定性强, 主要应用在磁共振成像仪 (MRI) 领域。但是, 受限于应用市场小, 成品线价格偏高, 线材长期运行的可靠性和稳定性仍需要实验探究。之所以高温超导材料得不到大规模应用, 主要是因为高温超导线材经热处理后变为脆性材料, 其性能对应变非常敏感, 在高磁场下很容易出现载流能力退化的现象, 这给超导材料的生产加工及应用造成极大的不便。突破常规的线圈构造范畴, 本研究提出了一种新型的斜螺线管型线圈结构, 它很好地解决了上述高温超导材料应用遇到的难题, 也为高温超导磁体设计提供了一个新的方向。考虑 Gantry 装置低磁场的要求, 选用了西部超导生产的 NbTi 超导线, 凭借其价格低廉、制备工艺成熟和机械性能稳定等优势, 探索斜螺线管型磁体应用在医用加速器的可行性。

## 1 磁体设计

### 1.1 斜螺线管型线圈概念

斜螺线管型线圈是由多对交替倾斜的螺线管绕组组成, 如图 1 所示, 两层线圈倾角方向相反, 电流方向如图中指示。当线圈励磁时, 其横向场分量 ( $B_y$ ) 相互叠加, 轴向螺线管磁场分量 ( $B_z$ ) 相互抵消, 线圈横截面电流密度满足 cosine-theta 分布, 从而产生了一

收稿日期: 2017-11-10

作者简介: 梁羽, 男, 1988 年生, 博士, 中国科学院近代物理研究所磁场机械技术室, 甘肃 兰州 730000, 电话: 0931-4969951, E-mail: liangyu@impcas.ac.cn

个纯二极或多极磁场。该线圈结构与传统的 cosine-theta 线圈相比，具有场均匀度高、好场区范围大、结构紧凑和易加工绕制等优点，适用于各种孔径大小的磁体设计。同时，利用该结构也可以设计组合型功能磁体，获得需要的各高阶磁场分量组合<sup>[3-11]</sup>。

斜螺线管型线圈主要是通过控制导线路径来获得设计所需要的磁场，线圈的参数方程如下：

$$x=R\cos\theta \tag{1}$$

$$y=R\cos\theta \tag{2}$$

$$z = R \sin \theta \cot \alpha + \frac{\theta w}{2\pi} \tag{3}$$

式中， $R$  为线圈半径， $\theta$  是方位角， $w$  代表线圈匝间距， $\alpha$  为线圈与中平面的夹角。在线圈设计中，这些参数直接决定了其形状和磁场分布。其中，2 个设计参数对磁场的影响最大：倾斜角  $\alpha$  和匝间距  $w$ 。斜螺线管型线圈各参数见图 2，由于单层斜螺线管型线圈产生了一个不需要的螺线管分量，线圈匝间距又导致其电流密度减小，等同于损失了一部分线圈安匝数。同时，倾斜角的大小直接关系到超导线的用量，考虑成本问题，它也是磁体设计必须考虑的因素。为保证磁体励磁效率最佳，成本最低，后期将对线圈参数进行优化设计。

螺线管磁场计算公式如下<sup>[12]</sup>：

$$B_{\text{Sol}} = JaF(\alpha, \beta) \tag{4}$$

式中， $F$  为形状函数， $\alpha$  为线圈外半径与内半径的比值， $\beta$  线圈半长度与内半径的比值， $a$  为线圈半径， $J$  为电流密度。由于螺线管磁场大小与线圈半径有关，任意 2 层线圈半径不可能相等，导致了线圈整体产生的螺线管磁场不能够完全抵消。在线圈层数一致的情况下，为了最小化螺线管分量，设计了 2 种线圈绕组形式(见图 3)，一种为 2 层交替方式，另一种为 4 层交替方式<sup>[13]</sup>。通过计算比较了 2 种绕组方式下螺线管场数值的大小，发现 4 层排布方式产生的磁场比 2 层排布低 1 个数量级。并且，线圈层数越多，螺线管磁场抵消效果越明显，

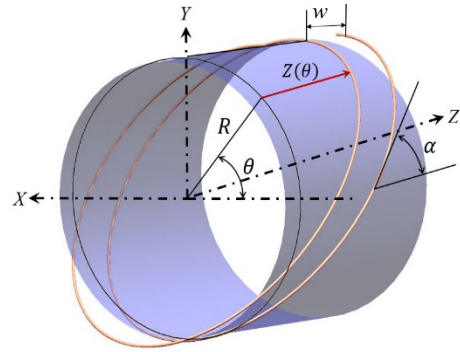


图 2 斜螺线管型线圈各参数示意图  
Fig.2 Diagram of the parameters of tilted solenoids coil

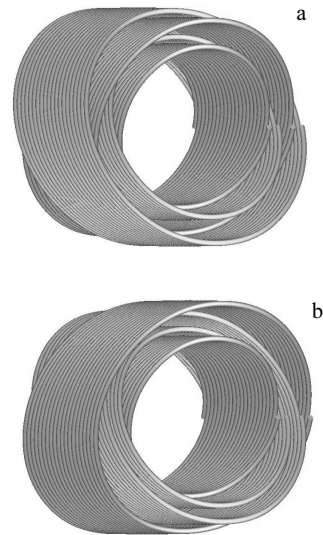


图 3 斜螺线管型线圈绕组的 2 种形式  
Fig.3 Two types of tilted solenoids windings: (a) double layers and (b) quadruple layers

横向场质量越好，最终选用 4 层交替方式来绕制磁体。

### 1.2 磁场设计

针对现有的医用治疗装置面临的问题，节能小型化将成为未来 Gantry 装置发展的趋势。研制了一台 2.5 T 斜螺线管型超导二极磁体样机。考虑线圈模型的复杂性，采用 OPERA 和 RADIA 2 种电磁设计软件对磁体进行电磁分析。通过比较线圈线电流模型与实际体电流模型产生的磁场分布，发现 2 种模型的计算结果差异很小（5 Gauss 之内）。首先采用 RADIA 线电流模型，确定斜螺线管型超导二极磁体基本设计参数。再使用专业的电磁分析软件 OPERA，完成对磁体的电磁设计，节约设计时间，并验证设计的合理性和一致性。磁体设计参数见表 1。

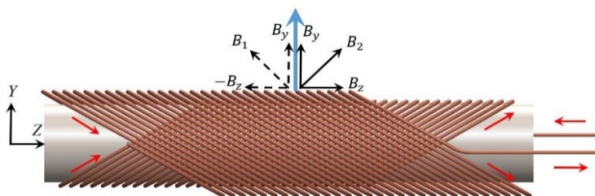


图 1 2 层斜螺线管型线圈产生一个纯二极磁场原理图  
Fig.1 Schematic of two layers of tilted solenoids producing a pure dipole field

表 1 磁体设计参数

Table 1 Design parameters of the tilted solenoids magnet

Parameter	Value
Central field/T	2.5
Operating current/A	1000
Coil aperture/mm	100
Skew angle/(°)	42
Layers	10
Turns per layer	262
Pitch/mm	3
Stored energy/MJ	0.14

斜螺线管型超导二极磁体由 10 层线圈组成, 线圈采用 4 层交替方式绕制, 磁体轴向长度为 1300 mm。超导线材选用了西部超导生产的 Monolith 矩形截面导线, 主要参数见表 2。选用单股线作为导体有 2 个优势: (1) 相比超导电缆更容易弯折; (2) 工作电流低, 减小电流引线给低温系统带来的热负荷。外杜瓦选用碳钢材料, 除屏蔽线圈漏场外, 还保证了制冷机冷头正常工作所要求的磁场范围 (水平方向磁场 < 0.3 T, 垂直方向磁场 < 0.08 T), 其 TOSCA 磁场计算模型见图 4。线圈上最高磁场出现在第 1 层线圈内侧, 最高磁场为 2.77 T。图 5 绘制了线圈 2/3 孔径横向场的等高线云图, 其磁场对称分布, 场均匀度为  $\pm 4 \times 10^{-4}$ 。其中, 中心区域的等高线分布更接近椭圆, 椭圆区域内的场质量更高, 该特性直接满足了重离子治疗装置对椭圆孔径好场区的需求。

为了更直观表征线圈产生的磁场分布情况, 分别计算了每层线圈沿轴向从 -650~650 mm 的磁场值。图 6 显示了磁体沿轴向的磁场分布, 蓝色曲线代表了单层线圈产生的磁场, 红色曲线为所有线圈产生的合磁场。图中直观地显示了每层线圈产生磁场的大小, 单层线圈产生的横向场为 0.25 T, 轴向螺线管场为 0.4 T (或 -0.4 T, 正负号与电流流向有关), 磁体最终只剩下 1 个横向场, 螺线管场分量基本完全抵消。在磁体设计时, 发现场分布情况完全由线圈形状决定。如图 7 所示, 直线段长度对应磁场的平顶区域, 磁长度为

表 2 NbTi/Cu 超导线参数

Table 2 Parameters of the NbTi/Cu strand

Superconducting wire	Parameter
Wire type	Monolith
Insulating material	Formvar
Bare dimensions/mm	1.70×1.10
Insulated dimensions/mm	1.80×1.20
Cu:Sc	1.3:1
RRR (293 K/10 K)	≥ 100
$I_c$ (5 T, 4.2 K)/A	≥ 2000

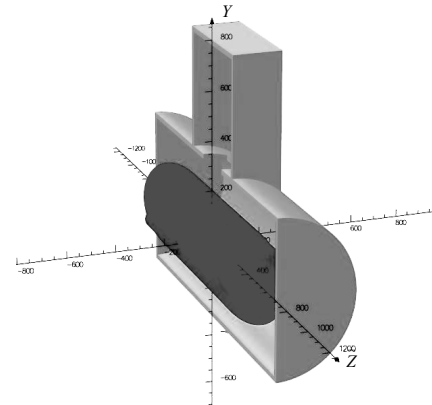


图 4 斜螺线管型二极磁体 OPERA 三维模型

Fig.4 Tilted solenoids dipole model in 3D by OPERA

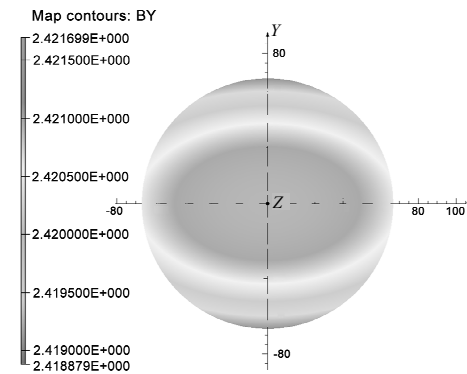


图 5 线圈 2/3 孔径横向场云图

Fig.5 Contour map of the transverse field at 2/3 of the clear bore

磁场变化最快位置之间的距离, 即线圈交叉点位置, 其值为  $L_m = wN = 786 \text{ mm}$ ,  $N$  为线圈匝数,  $w$  为匝间距。在磁体长度一定的情况下, 设计该类型磁体时, 更倾向于线圈平顶区域长一些, 端部尺寸短一些。

对于常规的超导线圈, 为消除高阶谐波对束流产生的负面影响往往需要对线圈端部结构进行优化, 尽量减少除主场外的其他高阶谐波分量。斜螺线管型线圈具有独特的端部结构, 该线圈沿束流方向(轴向  $z$ ) 各高阶谐波量积分为零, 对束流品质影响基本为零。如图 8 所示, 在线圈中平面( $y=0$ )上, 使用 OPERA3D 计算了参考半径  $R_{ref} = 66.7 \text{ mm}$  处的各高阶谐波分量。表 3 列出了具体的计算结果。从表中可以看出, 斜螺线管型线圈具有很好的场质量, 场误差小于 4unit (万分之一)。图 9 为 b3、b5 高阶谐波量沿轴向的分布。

### 1.3 磁体结构设计及热分析

斜螺线管型超导二极磁体骨架选用壁厚 5 mm 的铝合金圆柱筒, 采用数控机床在筒体表面加工矩形线

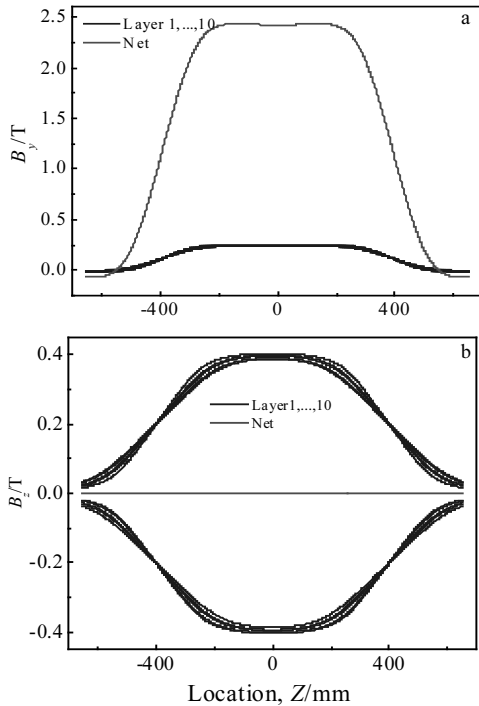


图 6 二极场、螺线管磁场沿轴向磁场分布

Fig.6 Dipole field (a) and solenoidal field (b) along the axial direction

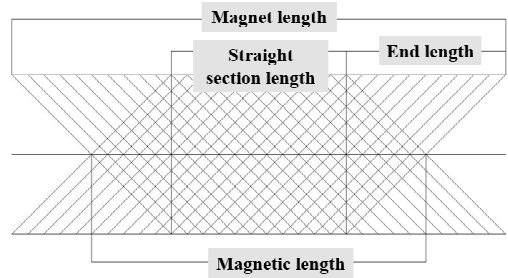


图 7 线圈区域概念图

Fig.7 Concept of the coil zoning

槽，线槽宽度为 1.5 mm，深度为 2.0 mm。通过线槽定位，线圈采用低温环氧湿绕工艺绕制。骨架之间通过热套工艺组装，避免了骨架装配带来的误差，最终通过端板连接成一体，保证了整个骨架的同轴度。不同于常规的螺线管超导磁体，每层线圈匝与匝之间被线槽隔开，有效地阻断了电磁力的累积，避免磁体出现应力集中，导致线材性能退化甚至损坏线圈。除了定位超导线位置外，每层骨架还提供 1 个支撑作用，

表 3 计算线圈中平面  $R_{ref}=66.7\text{ mm}$  处各高阶谐波量(2/3 孔径)

Table 3 Computed harmonics at the mid-plane at  $R_{ref}=66.7\text{ mm}$  (2/3 of coil aperture)

b2	b3	b4	b5	b6	b7	b8	b9
$-2.50 \times 10^{-3}$	3.67	$2.15 \times 10^{-5}$	$-7.16 \times 10^{-3}$	$4.19 \times 10^{-7}$	$4.19 \times 10^{-7}$	$-9.59 \times 10^{-8}$	$1.13 \times 10^{-5}$

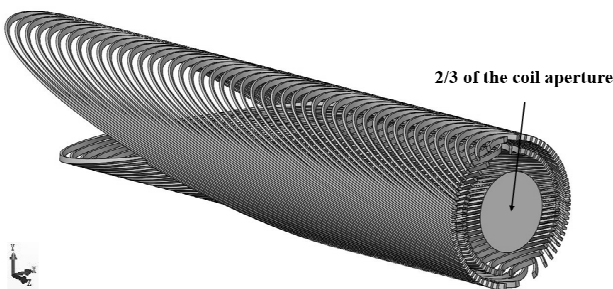


图 8 线圈 1/2 模型示意图

Fig.8 Half of coil model

克服磁体运行时产生的洛仑兹力。同时，线圈最内层为 1 个不锈钢支撑筒，保证了线圈的整体强度。线圈最外层包有 1 层铜皮，除给磁体提供一定压应力外，与制冷机二极冷头相连，保证磁体的低温运行环境。磁体系统的总质量大约为 1.5 t，质量远小于常规 Gantry 磁体，优势明显。整个磁体系统的三维结构设计见图 10。

图 11 为线圈截面示意图，线圈轴向长度为 1150 mm，内外径尺寸分别为 176 mm 和 312 mm。中间灰色部分为骨架，黄色部分为超导线，最内层为 1 个不锈钢筒，骨架最外层加了 1 层导热铜皮，靠热桥和卡箍固定。在铜皮外表面靠近二极冷头导热铜柱的位置，放置超导接头和失超保护组件，保证冷却效果最佳。考虑纯线圈骨架质量较轻，磁体冷质量支撑系统采用 8 根斜拉式拉杆固定（磁体两端各 4 根）。表 4 为 10 层线圈用线量情况。

当低温系统处于稳态时，杜瓦内真空达到  $10^{-4} \sim 10^{-5}\text{ Pa}$ ，超导磁体与冷屏温度不再发生变化，系统的漏热与制冷机的制冷功率达到平衡态。此时，系统热负载主要包括：传导热、辐射漏热和电流引线接头及超导线接头焦耳热。通过对低温系统热负荷计算（见表 5），一台制冷机的一级冷量远不能满足要求。斜螺线管型超导二极磁体采用一台  $1.5\text{ W}@4.2\text{ K}$  的 GM 制冷机和一台  $54\text{ W}@40\text{ K}$  的单极制冷机来冷却整个磁体系统。此时，一级冷头可在 50 K 时提供 130 W 的

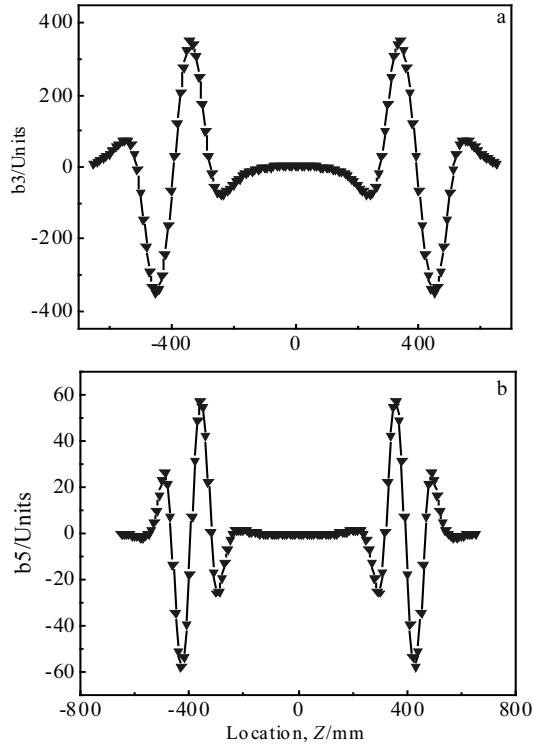


图 9 六极量 (b3)、十极量 (b5) 沿轴向分布

Fig.9 Sextupole (b3) (a) and dodecapole (b5) (b) harmonics along the axial direction

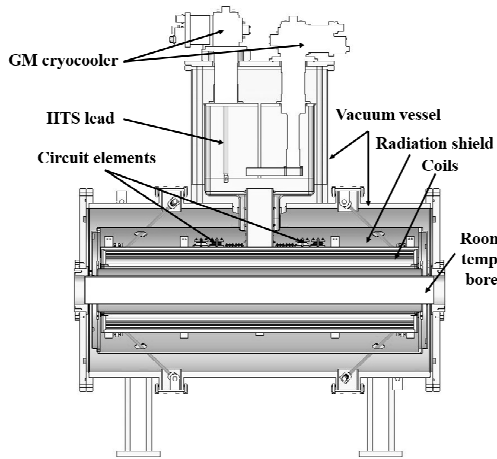


图 10 斜螺线管型超导磁体系统

Fig.10 Schematic for the tilted solenoids superconducting magnet system

冷量，二极冷头通过铜编织带与超导磁体、高温电流引线连接，在 4.2 K 温度下提供 1.5 W 的冷量。利用 ANSYS 有限元热分析模块<sup>[13]</sup>对超导磁体系统进行热分析计算，模拟了磁体骨架及冷屏的温度分布。图 12 是磁体骨架的温度分布云图。可以看出，越是远离冷

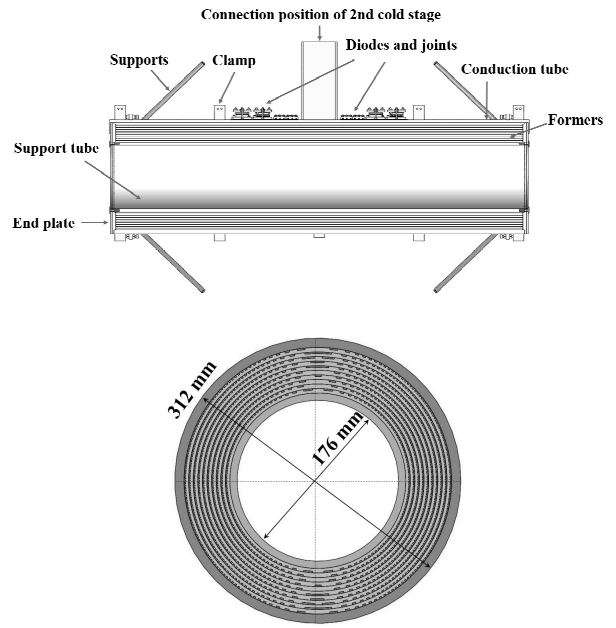


图 11 10 层斜螺线管型线圈截面图

Fig.11 Section of 10 layers of tilted solenoids coil

表 4 线圈导体使用情况

Table 4 Usage of coil conductor

Layers	Turn	Length per turn/ mm	Length per layer/ m
1	262	792	207.50
2	262	831	217.72
3	262	871	228.20
4	262	910	238.42
5	262	950	248.90
6	262	989	259.12
7	262	1029	269.60
8	262	1068	279.82
9	262	1108	290.30
10	262	1148	300.78
Total		2540.36 m	

头的区域，温度越高，骨架的最大温差为 0.03 K，热点区域主要为拉杆连接处。在实际低温系统设计时，还应尽量减小连接处的接触热阻，进一步减小温差。图 13 为冷屏的温度分布云图。冷屏上的温度分布非常不均匀，冷屏最远端与一级冷头的温差为 3.3 K，主要是因为传热路径导致。利用模拟的分析结果，优化磁体导冷路径，确保超导磁体低温环境下稳定运行。

表 5 低温系统热负荷计算

**Table 5 Calculation of the heat loads of cryogenic system**

Parameters	SC magnet	Radiation shield
Temperature zone/K	4.2~60	60~300
Radiation/W	0.5	12
Supports/W	0.06	1.72
Current Leads/W	0.52	67(92.4)
Joints/W	0.01	-
Total/W	1.09	80.72 (106.12)

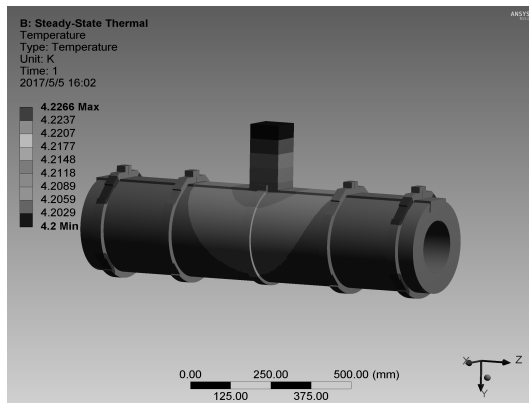


图 12 线圈温度分布云图

Fig.12 Temperature profiles for the magnet

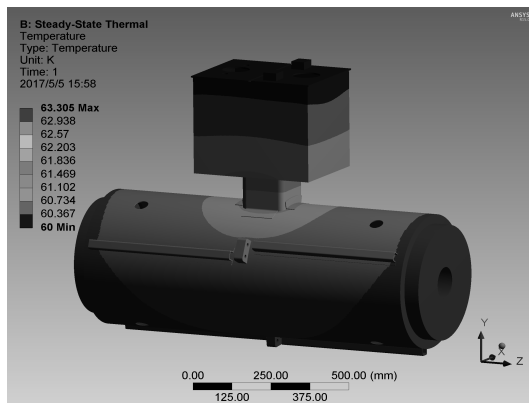


图 13 冷屏温度分布云图

Fig.13 Temperature profiles for the cooling shield

## 2 磁体加工进展

不同于传统的绕制方法，斜螺线管型线圈是将超导导线直接绕在开有线槽的铝合金筒子上，线槽通过数控机床加工。目前，斜螺线管型超导二极磁体已完成整体设计，由兰州科近泰基公司负责加工，骨架现已投入生产。图 14 展示了骨架第 1 层第 1 段具体加工过



图 14 采用数控机床加工一段铝合金骨架

Fig.14 CNC machining of a section of aluminum alloy skeleton: (a) skeleton rough machining, (b) set into mandrel to support skeleton, (c) process tilted solenoids geometry grooves, and (d) complete the section

程。由于骨架层数多，装配过程复杂，导体位置的偏差直接影响磁场的分布。通过前期试验，已经摸索出一套可行的加工工艺流程，确定了骨架装配方法，保证最终磁体的绕线及装配精度。

## 3 结 论

1) 通过 RADIA 和 OPERA 2 种电磁设计软件对磁体进行电磁分析，设计了一台 2.5 T 斜螺线管型超导磁体样机，场均匀度达到了  $\pm 4 \times 10^{-4}$ ，各高阶谐波量沿束流方向积分为零。

2) 磁体选用 4 层交替方式绕制，冷却方式为传导冷却，保证磁体在旋转方式下稳定运行。同时，仿真

了磁体及冷屏上的温度分布，为低温系统的设计提供依据。

3) 通过一套完整的超导磁体样机系统的设计，掌握基于斜螺线管型线圈的关键技术和工艺路线，为未来弯曲型斜螺线管超导二极磁体在 Gantry 治疗装置领域的应用提供宝贵的参考价值。

#### 参考文献 References

- [1] Weinrich U. *Proceedings of EPAC 2006*[C]. Edinburgh: European Physical Society Accelerator Group, 2006
- [2] Fuchs R, Weinrich U, Emde P. *Proceedings of EPAC 2004*[C]. Tsukuba: European Physical Society Accelerator Group, 2004
- [3] Meyer D I, Flasck R. *Nuclear Instruments and Methods*[J], 1970, 80: 339
- [4] Meinke R, Ball M, Goodzeit C. *Proceedings of PAC 2003*[C]. Portland: IEEE, 2003
- [5] Goodzeit C, Ball M, Meinke R. *IEEE Trans Appl Supercond*[J], 2003, 13(2): 1365
- [6] Meinke R, Goodzeit C, Ball M. *IEEE Trans Appl Supercond*[J], 2003, 13(2): 1369
- [7] Goodzeit C, Meinke R, Ball M. *Proceedings of PAC 2007*[C]. Albuquerque: IEEE, 2007
- [8] Caspi S, Dietderich D R, Ferracin P *et al. IEEE Trans Appl Supercond*[J], 2007, 17(2): 2266
- [9] Witte H, Yokoi T, Sheehy S L *et al. IEEE Trans Appl Supercond*[J], 2012, 22(2): 4 100 110
- [10] Hafalia A, Caspi S, Felice H *et al. IEEE Trans Appl Supercond*[J], 2014, 24(3): 4 001 904
- [11] Caspi S, Brouwer L N, Lipton T *et al. IEEE Trans Appl Supercond*[J], 2015, 25(3): 4 002 304
- [12] Montgomery D B, Weggel R J. *Solenoid Magnet Design*[M]. New York: Wiley-Interscience, 1969
- [13] Gavrilin A V, Bird M D, Keilin V E *et al. IEEE Trans Appl Supercond*[J], 2003, 13(2): 1213

## Design of a Superconducting Gantry Dipole Magnet Based on Tilted Solenoids

Liang Yu<sup>1,2</sup>, Ma Lizhen<sup>1</sup>, Wu Wei<sup>1</sup>, Wu Beimin<sup>1</sup>, Shi Jianjun<sup>3</sup>, Chen Yuquan<sup>1</sup>, Mei Enming<sup>1</sup>

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

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

(3. Lanzhou Kejin Taji Corporation, Ltd, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** To solve the problems of huge magnet weight and expensive operation of Gantry therapy device, this paper proposes a new type of coil structure based on tilted solenoids. We have completed a 2.5 T NbTi superconducting magnet prototype design for heavy ion Gantry, which effectively reduces the gantry's size and weight of the magnet compared to the proton therapy. The magnet consists of 10 layers of tilted solenoids with operating current of 1000 A. The coil clear bore is 176 mm in diameter and the good field region can be up to 2/3 of the aperture. Because of the magnet's special shape, it doesn't require optimization and higher order harmonics naturally integrate to zero through the ends. To ensure safe and stable operation of the magnet in the case of rotation, it uses the conduction cooling form. Starting from the concept of tilted solenoid coil, the magnetic field design is reported in detail. Based on ANSYS thermal FEM software, we simulate the temperature profiles inside the magnet and the thermal shield and obtain the thermal distribution of magnet cryogenic system. Finally, we give a brief introduction about the magnet processing.

**Key words:** Gantry; tilted solenoids; NbTi; conduction-cooled; thermal analysis

Corresponding author: Ma Lizhen, Ph. D., Professor, Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, P. R. China, Tel: 0086-931-4969616, E-mail: malz@impcas.ac.cn