

25 T 超导磁体优化中线圈数量影响分析

朱光 刘建华 程军胜 冯忠奎 戴银明 王秋良

Effects of different coil combinations on the optimal design of a 25 T superconducting magnet

Zhu Guang Liu Jian-Hua Cheng Jun-Sheng Feng Zhong-Kui Dai Yin-Min Wang Qiu-Liang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 058401 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.058401

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.058401>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I5>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

超导磁悬浮支承系统干扰力矩及漂移误差分析

[Analysis of magnetic disturbance torque and drift error in a superconducting suspension system](#)

物理学报.2015, 64(1): 018403 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.018403>

结合振动控制的柱面纵向梯度线圈目标场设计方法

[A target field method for designing cylindrical z-gradient coil combined with vibration control](#)

物理学报.2014, 63(1): 018301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.018301>

超椭圆柱面梯度线圈设计

[Design of gradient coils on super-elliptical cylindrical surfaces](#)

物理学报.2014, 63(23): 238301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.238301>

动态聚焦中小焦斑的波前判据

[Wavefront criterion of small focal spot in optical zooming](#)

物理学报.2013, 62(20): 205206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.205206>

25 T超导磁体优化中线圈数量影响分析*

朱光 刘建华 程军胜 冯忠奎 戴银明 王秋良†

(中国科学院电工研究所, 北京 100190)

(2015年11月18日收到; 2015年12月21日收到修改稿)

20 T以上强磁场在高场科学工程中有不可替代的作用. 电工研究所正在研制一个25 T全超导磁体系统, 包括15 T背景磁场和10 T高温超导内插磁体. 在磁体的设计和优化中, 线圈的数量和种类对于最终优化结果十分关键. 为了研究磁体数量和磁体相关参数的关系, 计算了20组不同的线圈组合下磁体的优化结果. 优化中除了考虑必要的限制条件以外, 还采用了一种结合局部优化算法和全局优化算法的方法. 通过对比分析发现, 线圈数量和磁体造价之间, 存在一个“V”形的关系. 更进一步地, 本文分析了不同超导体在磁体中应该贡献的最佳磁场, 以及背景磁体统一供电给优化结果带来的影响.

关键词: 超导磁体, 优化设计, 线圈数量, 应力分布

PACS: 84.71.Ba, 83.85.Fg, 52.57.Bc

DOI: 10.7498/aps.65.058401

1 引言

20 T以上的强磁场在900 MHz以上频率核磁共振成像系统、 μ 介子束冷却、大型粒子对撞机等高能物理实验领域有着迫切的需求^[1-3]. 近年来高温超导体(HTS)带材的发展, 使得20 T以上高场磁体的研制成为可能. HTS带材具有各向异性的特点, 其在4.2 K下的多角度临界性能的测试数据已经逐渐丰富^[4,5]. 基于这些研究, 美国国家高场实验室(NHMFL)、费米实验室、麻省理工大学等单位正在开发23.5—32 T的全超导磁体系统^[2,6,7]; 中国科学院电工研究所也于近期成功研发了19.4 T全超导磁体系统(成果尚未发表). 为了节省成本, 这些磁体由低温超导体(LTS)线材绕制的背景磁体和HTS带材绕制的高场内插磁体共同构成. 例如NHMFL已完成的1 GHz(约23.5 T)全超导磁体由600 MHz(约14.1 T)的LTS背景磁体和400 MHz(约9.4 T) HTS内插磁体构成. 这些研究的结果显示, 当背景磁体和高场内插磁体设计合理时, 磁体设计的限制条件, 例如线材特性限制、磁

体安全限制等, 可以同时得到满足, 20 T以上超导磁体的研制是可行的. 为进一步研究高场磁体技术, 以及满足高场科学工程需要, 电工所正在研发25 T(4.2 K), 52 mm口径冷孔的全超导磁体系统.

在超高场磁体的设计中, 对电磁结构进行研究和优化设计显得十分必要. 国际上对高场磁体优化的研究较为广泛^[8-10]. 在这些研究中, 限制条件包括HTS带材的各向异性、磁体安全性、交流损耗等等. 然而, 超导磁体中每种超导体的线圈数量, 也是磁体优化中的重要影响因素. 线圈数量过多或者过少, 都会导致超导线带材的严重浪费. 因此研究超导磁体中的线圈数量十分重要, 而目前对线圈数量和线圈优化之间关系的研究较为缺乏.

为了更合理地确定磁体的电磁结构, 优化磁体造价和可靠性, 我们对线圈数量和线圈设计之间的关系进行了研究. 本文计算了在20种不同的线圈组合下磁体的优化结果, 优化中加大了计算量以增加计算的可靠性. 计算结果显示, 线圈数量和线圈造价之间存在一个“V”形的关系, 并且线圈数量对其他一些参数也有影响. 经过优化, 初版设计方案如图1所示.

* 国家自然科学基金(批准号: 51307163, 51477167)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: qiuliang@mail.iee.ac.cn

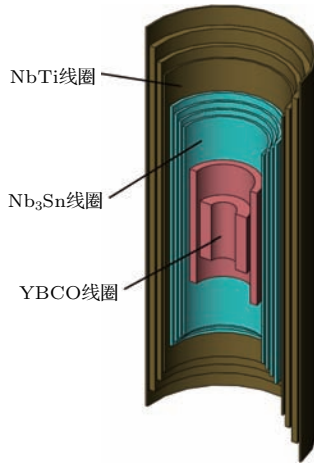


图1 (网刊彩色) 25 T磁体电磁设计方案示意图

Fig. 1. (color online) Cross-section of the 25 T magnet.

2 磁体优化与设计

25 T磁体系统被设计为由15 T LTS背景磁体和10 T HTS内插磁体组成, 因为HTS的临界磁场较高, 在25 T下仍有较好的载流能力, 但是价格较为昂贵; 而LTS的临界磁场较低, 其中NbTi线材在9 T以上磁场下载流能力严重降低, Nb₃Sn线材在15 T以上磁场下载流能力也会大幅下降. HTS内插磁体由YBCO带材以双饼方式绕制, 而LTS背景磁体则由Nb₃Sn线材和NbTi线材以层绕方式绕制. 为了减少径向磁场, HTS内插磁体被设计为由两个线圈组成^[2]. 考虑到失超保护、磁体加固, 相同超导体线圈之间留4 mm的空隙, YBCO线圈之间为7.5 mm; 不同超导体之间留10 mm的空隙以安装骨架. 磁体的保护设计将单独进行, 本文不进行讨论.

磁体的优化设计方法是研究线圈数量和磁体参数关系的基础, 下文将对此进行介绍.

2.1 目标函数

优化的目标是线圈的总造价最小化, 而线圈的总造价和线圈的体积正相关, 因此优化的目标函数应当和总体积正相关. 然而, 各种超导体的价格也是不相同的, 根据估算, Nb₃Sn线材的价格约为\$5/kAmp-m, 而NbTi线材价格约为\$1/kAmp-m, 而YBCO的价格和带材的长度等相关, 价格变动较大, 这里大致认为, YBCO带材价格是NbTi线材的40倍. 这样, 我们可以定义目标函数如下:

$$C = V_{\text{NbTi}} + 5V_{\text{Nb}_3\text{Sn}} + 40V_{\text{YBCO}},$$

其中 C 为总价格, V 是相应超导体线圈的体积.

2.2 优化限制条件

磁体的优化受到如下限制条件制约:

$$\begin{cases} B_{z0} = 25 \text{ T}, \\ B_{r \max} < B_{rc}, \\ 0.8 < sf(\text{Nb}_3\text{Sn}) < 0.82, \\ 0.8 < sf(\text{NbTi}) < 0.85, \\ \sigma_\theta(\text{Nb}_3\text{Sn}) < \sigma_c, \\ \sigma_\theta(\text{YBCO}) < C_1, \\ \sigma_\theta(\text{NbTi}) < C_2, \end{cases}$$

其中, B_{z0} 是中心磁场, $B_{r \max}$ 是YBCO线圈承受的最大径向磁场, B_{rc} 是YBCO带材的临界垂直磁场, sf 是安全因子, 其定义为 I/I_c , I 是运行电流而 I_c 是临界电流, C_1 和 C_2 分别是YBCO和NbTi的临界应力, σ_θ 则是相应线圈中产生的环向应力计算值. 最后, 优化中的限制条件也包括各种线带材的临界电流-磁场特性.

2.3 YBCO特性

HTS带材具有各向异性, 因此对于25 T磁体的YBCO线圈来说, 限制其临界电流的可能不是最大磁场, 而是最大径向磁场. 前者可能出现在线圈内壁, 后者可能出现在线圈端部. 根据对YBCO带材性能的调研, 我们决定采用SCS4050带材进行设计. 在轴向磁场下, SCS4050在25 T下的临界电流为440 A, 此时其临界垂直磁场强度为2.85 T (4.2 K). 优化中可以使用另一种数值拟合方法, 根据费米实验室的数据, YBCO带材的临界电流和磁场、磁场方向之间的关系可以用以下模型进行拟合^[11-13]:

$$I_c(B, \theta) = \frac{k(B)}{\sqrt{\sin^2 \theta + \frac{\cos^2 \theta}{\varepsilon^2 B}}} + a(B) \sin^2 \theta, \quad (1)$$

式中的 $k(B)$, $a(B)$, 和 $\varepsilon(B)$ 是带材在不同角度和强度的磁场下一些曲线特性的拟合函数(例如分别根据文献[11]中的图1—图3进行拟合), 其本身并不具有实际物理意义. 通过(1)式进行拟合, 可以计算YBCO带材在不同强度、角度的磁场下的临界性能, 作为优化的限制条件. 然而为了确保设计的安全, 在优化中我们将运行电流取到临界电流的一半.

2.4 线圈应力

超导体的临界特性会不同程度受到应力的影响, 因此在设计中需要考虑应力. YBCO 带材和 NbTi 线材对于应力并不敏感, 许用应力较高. 例如, SCS4050 的许用拉伸应力约为 700 MPa [4], 而 NbTi 线材的许用拉伸应力约为 250 MPa. 只要线圈中产生的应力小于许用应力, 设计就是安全的.

然而 Nb₃Sn 线材则对于应力较为敏感. 当 Nb₃Sn 线材上的应力超过某一数值后, 其临界电流就会快速下降. 对于牛津仪器公司的 RRP 导线来说, 这一数值约为 100 MPa [14]. 可以采用曲线拟和方法来模拟 Nb₃Sn 线材的临界电流-应力特性.

磁体在工作时的应力情况相当复杂, 除了拉伸方向的电磁应力, 磁体在低温下还会承受热应力 [15], 其方向为压缩方向, 因此按照电磁应力来计算实际应力是安全的. 应力计算中还应当考虑到线圈的不锈钢绑扎加固. 包括不锈钢绑扎层的 Nb₃Sn 线圈中的环向应力可以采用 (2) 式来计算 [16], 并进一步计算出在该应力下 Nb₃Sn 线材的临界电流.

$$\sigma_{\theta}(\rho) = \sigma_{\theta m} \left(k c_0 \rho k^{-1} + \frac{k^2 + 2\nu_{r\theta} b_0 \rho}{k^2 - 4} \frac{k^2 + 3\nu_{r\theta} b_1 \rho^2}{k^2 - 9} \right), \quad (2)$$

其中, b_0 , b_1 和 c_0 为线圈绑扎加固层的特征参数函数, 可表达为

$$\begin{aligned} b_0 &= \frac{\alpha - n}{\alpha - 1} \approx \frac{\alpha}{\alpha - 1}, \quad b_1 = -\frac{1 - n}{\alpha - 1}, \\ c_0 &= \frac{f_1 (1 - \lambda(k + \nu_{r\theta})) \alpha^k - \alpha^2 (f_3 + \lambda f_2 (k^2 + \nu_{r\theta}^2))}{(1 + \lambda(k - \nu_{r\theta})) \alpha^k - \alpha^{-k} (1 - \lambda f_2 (k^2 + \nu_{r\theta}^2))}, \\ f_1 &= \frac{2 + \nu_{r\theta}}{k^2 - 4} b_0 + \frac{3 + \nu_{r\theta}}{k^2 - 9} b_1, \\ f_2 &= \frac{1}{k^2 - 4} b_0 + \frac{\alpha}{k^2 - 9} b_1, \\ f_3 &= \frac{2 + \nu_{r\theta}}{k^2 - 4} b_0 + \frac{3 + \nu_{r\theta}}{k^2 - 9} b_1 \alpha, \\ \lambda &= \frac{t_s E_{EM}}{a_2 E_{\theta}}, \quad k = \sqrt{E_{\theta} / E_r}, \end{aligned}$$

式中, $\rho = r/a_1$, $\alpha = a_2/a_1$, a_1 为线圈内半径, a_2 为线圈外半径, r 为目标点半径, $\sigma_{\theta m} = a_1 JB$, E_{θ} 为线圈的环向杨氏弹性模量, E_r 为径向杨氏弹性模量, $\nu_{r\theta}$ 为线圈的泊松比, E_{EM} 和 t_s 分别为加固层的弹性模量和厚度, n 为线圈内外侧在运行电流下磁场轴向分量之比.

采用上述的解析方法可以计算出线圈中的应力, 并在优化中作为限制条件加入, 保证优化时 Nb₃Sn 的应力不超过临界值. 然而为了进一步确保设计的安全, 我们采用 ANSYS 有限元软件对图 1 所示的最终电磁设计结果进行了校验. 我们建立了磁体中所有 10 个线圈的轴对称半高模型, 并对其中的应力分布进行了模拟, 如图 2 所示. 结果显示, 在所有的 4 个 Nb₃Sn 线圈中, 最大应力值不超过 150 MPa, 和 (2) 式得到的计算值相符, 因此设计是安全的. 计算中只有 Nb₃Sn 线圈考虑了 4 mm 的不锈钢绑扎, 因此计算出的 YBCO 线圈和 NbTi 线圈的应力高于实际值.

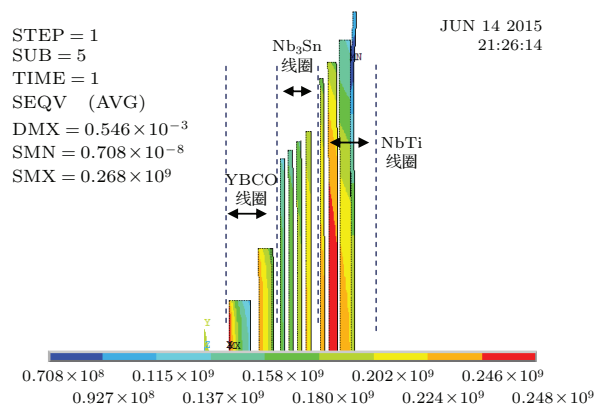


图 2 (网刊彩色) 25 T 磁体设计中环向应力分布, 下方标签为应力值对照标签

Fig. 2. (color online) Hoop stress distribution of our first-cut design.

2.5 优化方法

为了准确地研究线圈数量和目标函数之间的关系, 需要能够准确计算给定线圈组合的最优解, 计算出的目标函数越接近最优值, 研究结果就越可靠. 然而, 需要优化的参数多达 21—31 个, 直接得到最优的目标函数值较为困难. 众多的非线性约束更是增加了计算的难度. 全局优化算法如基因算法, 随机性大, 优化结果不可靠; 而局部优化算法对于初值十分敏感, 初值不同时结果变化很大.

为了提高优化结果的可靠性, 本文采用了全局优化和局部优化相结合的方法. 首先使用遗传算法在整个可行域内寻找初步优化结果, 然后再使用所得结果作为局部优化算法的初值进行迭代, 从而获得最优解的候选. 对于每组线圈组合进行 30 次, 选择其中最优结果作为当前线圈组合下线圈最优解. 这种方法的缺陷是计算量相对较大, 我们改进了相

关的计算程序的效率,使得总计算时间降低到可以接受的程度.

2.6 线圈数量选择

磁体内侧的磁场较高,会限制线材的临界电流,因此,为了节约线材,磁体需要分为多层.总的线圈层数 N 可用下式表示:

$$N = N_{\text{YBCO}} + N_{\text{Nb}_3\text{Sn}} + N_{\text{NbTi}}.$$

在内插磁体的设计中,尽管只采用一种规格 YBCO 带材,但是为了降低垂直磁场的影响,需要采用两个不同高度的线圈.因此这里 $N_{\text{YBCO}} = 2$.

背景磁体由 NbTi 线圈和 Nb₃Sn 线圈组成.在 9 T 下, NbTi 的性能退化严重,因此 NbTi 用于产生 9 T 以下的磁场,其余磁场应由 Nb₃Sn 线圈产生.在计算中,我们采用牛津仪器公司 (OST) 的商业线材的参数.在 0—9 T 下,可用的 NbTi 线材规格有 7 种,9—15 T 下可用的 Nb₃Sn 线材有 6 种.

$N_{\text{Nb}_3\text{Sn}}$ 和 N_{NbTi} 明显需要大于 2,因此总线圈数 N 的取值范围在 $8(2+3+3)$ 和 $15(2+7+6)$ 之间,一共有 20 种.为这里采用穷举法,计算了全部 20 种可能的线圈组合.其中 $N = 10(2+4+4)$ 下的优化结果最佳,被我们选做初版电磁设计,其参数如表 1 所示.

表 1 25 T 磁体电磁设计参数
Table 1. Parameters of the first-cut design.

参数名称	参数值
总磁场/T	25
内插磁体磁场/T	10
磁体内径/mm	52
磁体外径/mm	333
高温内插磁体高度/mm	236
磁体总高度/mm	798
背景磁体运行电流/A	205.1
内插磁体运行电流/A	167.2

3 线圈数量对磁体设计的影响

3.1 线圈数量和价格

线圈数量和造价之间的关系如图 3 所示.结果显示,线圈数量和造价之间,有一个“V”形的关系,

或近似的“V”形的关系(第二类),也就是说,目标函数值在两端达到最大值,而在中间达到最小值.对于我们的 25 T 磁体来说,最佳的目标函数值为 0.0646,对应的最佳线圈数为 10,包括 2 个 YBCO 线圈,4 个 Nb₃Sn 线圈和 4 个 NbTi 线圈.

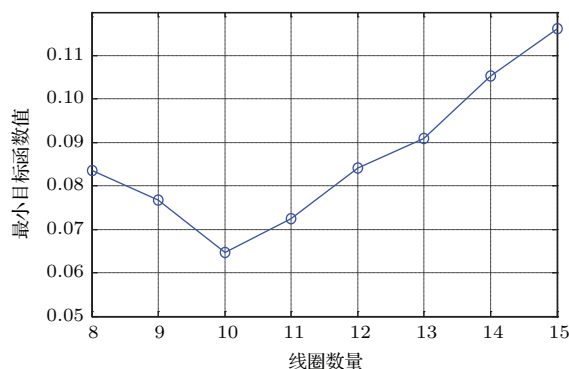


图 3 (网刊彩色) 线圈数量和目标函数之间的关系
Fig. 3. (color online) Relationship between objective function value and number of coils.

这个结果符合定性的分析.当线圈数量过少时,相应每个线圈的厚度较大,导致线圈内外两侧的磁场值相差较大,按照内侧的磁场来确定线圈工作电流的话,就会造成外侧的导线得不到充分利用,因此造成线材的浪费和成本的增加.而线圈数量过多时,有两个因素会导致目标函数增大: 1) 线圈之间有缝隙,线圈数量增加时,缝隙数量也会增加,则线圈体积会变大; 2) 线圈数量过多时,内外侧导线线径可能相差过大,临界电流也相差过大,当内外侧磁场差不能与之匹配时,会导致导线性能的浪费,从而导致体积增大.

3.2 不同超导体的磁场贡献

在本项目中,背景磁场为 15 T,因此 Nb₃Sn 线圈和 NbTi 线圈一共产生 15 T 的中心磁场.我们的目标是探索合适的磁场分配.

根据计算,当目标函数值最小时, Nb₃Sn 线圈贡献了 6.7 T 的磁场.实际上,在目标函数值较小的结果中, Nb₃Sn 线圈产生的磁场都在 6—7 T,而 NbTi 线圈产生的磁场则为 8—9 T.若将所有线圈组合分为两类, $N_{\text{Nb}_3\text{Sn}}$ 大于 N_{NbTi} 为第一类, $N_{\text{Nb}_3\text{Sn}}$ 小于 N_{NbTi} 为第二类,则可以发现第二类组合中两种超导体的磁场贡献更容易符合这个范围,第二类线圈组合比第一类更为合理.这一现象可定性解释: NbTi 在 9 T 以上磁场中性能较差,因

此磁场贡献不宜超过 9 T; 而 NbTi 的价格较为便宜, 因此应该尽可能多地贡献磁场, 因此磁场贡献应该接近 9 T. 而在第一类线圈组合中, Nb₃Sn 线圈较多, 容易拉高 Nb₃Sn 线圈的磁场贡献率, 恶化目标函数.

3.3 减少一组电源的影响

在前述的优化中, 为了取得最好的优化结果, 我们假设 NbTi 线圈和 Nb₃Sn 线圈分别供电. 然而实际上, 为了减少漏热, NbTi 线圈和 Nb₃Sn 线圈一般采用一组电源进行供电. 我们对这种情况也进行了计算, 计算的部分结果如图 4 所示. 对比的结果显示, 在最好的情况下 ($N = 10$), 减少一组电源带来的影响很小. 然而, 当 $N_{\text{Nb}_3\text{Sn}}$ 和 N_{NbTi} 增加时, 影响变得越来越明显. 在一些情况, 例如 $N = 2 + 5 + 3$ 时, 甚至没有可行结果. 这可能是因为, Nb₃Sn 线圈的临界电流相对较高, 线圈数量较多时, 难以找到一个合适的电流同时满足 NbTi 线圈和 Nb₃Sn 线圈.

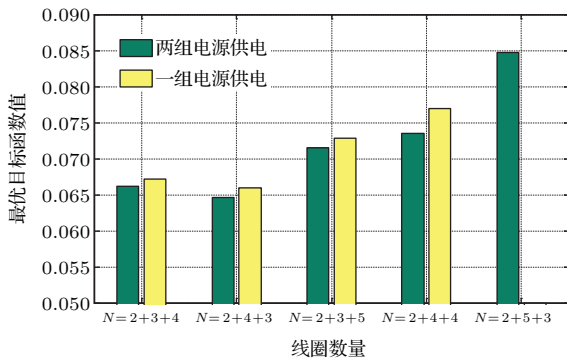


图 4 (网刊彩色) 不同线圈数量下 LTS 线圈统一供电时目标函数的变化

Fig. 4. (color online) The effect of reducing a power supply under different coil combinations.

4 结 论

线圈数量优化在用于高场物理实验的 20 T 以上强磁场磁体系统中十分重要. 为了研究线圈数量和磁体设计的关系, 本文计算了 20 组不同的线圈组合下的磁体的最优目标函数值. 通过对结果进行分析, 得到了以下结论:

- 1) 线圈数量和磁体造价呈“V”形曲线. 线圈数量为 10 时对应的目标函数值最小;
- 2) 最优的磁场贡献范围: Nb₃Sn 线圈为 6—7 T, NbTi 线圈为 8—9 T;
- 3) 在线圈数量不多时, 背景磁体统一供电对于优化结果的影响不大.

参考文献

- [1] Wang Q L 2007 *High Magnetic Field Superconducting Magnet* (Beijing: Science Press) pp118–128 (in Chinese) [王秋良 2007 高磁场超导磁体科学 (北京: 科学出版社) 第 118—128 页]
- [2] Hahn S, Bascuñán J, Yao W, Iwasa Y 2010 *Physica C* **470** 1721
- [3] Bird M D, Bai H, Bole S 2009 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **19** 1612
- [4] Hazelton D W, Selvamanickam V, Duval J M 2009 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **19** 2218
- [5] Xu A, Jaroszynski J J, Kametani F, Chen Z, Larbalestier D C 2010 *Supercond. Sci. Technol.* **23** 014003
- [6] Lombardo V, Barzi E, Norcia G, Lamm M, Turrioni D, Van T, Raes A, Zlobin T 2010 *Advances in Cryogenic Engineering* **55** 246
- [7] Lee S Y, Kwak S Y, Seo J H, Park S H, Kim W S, Lee J K, Bae J H, Kim S H, Sim K D, Seong K C, Jung H K, Choi K, Hahn S 2009 *Physica C* **469** 1789
- [8] Noguchi S, Tsuda M 2011 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **21** 2279
- [9] Noguchi S, Yinaba Y, Igarashi H 2008 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **18** 762
- [10] Markiewicz W D, Larbalestier D C, Weijers H W, Voran A J, Pickard K W 2012 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **22** 4300704
- [11] Lombardo V, Barzi E, Norcia G, Lamm M, Turrioni D, van Raes T 2010 *Advances in Cryogenic Engineering* **55A** 246
- [12] Braccini V, Xu A, Jaroszynski J, Xin Y, Larbalestier D C 2011 *Supercond. Sci. Technol.* **24** 03500
- [13] Turrioni D, Barzi E, Lamm M, Lombardo V, Thieme C 2008 *Advances in Cryogenic Engineering* **54** 451
- [14] Yamada R, Kikuchi A, Barzi E, Chlachidze G, Rusy A 2010 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **20** 1399
- [15] Osamura K, Suzuki H, Sato M, Harjo S, Ochiai S 2013 *Supercond. Sci. Technol.* **26** 094001
- [16] Asano T, Takao T, Iwamura T, Minowa S, Sato H 2008 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **18** 583

Effects of different coil combinations on the optimal design of a 25 T superconducting magnet*

Zhu Guang Liu Jian-Hua Cheng Jun-Sheng Feng Zhong-Kui Dai Yin-Min
Wang Qiu-Liang[†]

(Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(Received 18 November 2015; revised manuscript received 21 December 2015)

Abstract

High field above 20 T is required in diverse physical programs and nuclear magnetic resonance (NMR) systems. For intended science program requirements, as a demonstration of the development in high field superconducting magnet technology, a 25 T (4.2 K) 52 mm cold-bore all-superconducting magnet consisting of a 10 T high-temperature superconducting insert magnet and a 15 T low-temperature superconducting background magnet, is being developed at the Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences. The development of such a magnet requires its optimization, and the choosing the number and type of coils is crucial to the final optimal design. However there are few researches focusing on the effect of coil combinations. To study the relationship between the number of coils and the magnet parameters, we first discuss the magnet optimization. The objective function of the optimization is defined as the weighted function of coil volume according to the costs of different superconductors, and the following constraint conditions are taken into considerations: center field, YBCO conductor characterization, hoop stress in Nb₃Sn coils, and the critical performances of these wires. All those constraint conditions are taken in the analytical form, and the magnetic field, stress results are verified with the finite element method. To guarantee the reliability of the optimal results, in addition to consider the constraint conditions, a method of combining global optimization and local optimization is adopted. 20 different coil combinations are selected according to the investigation of superconducting wires, and their optimal results are calculated. The following conclusions are drawn from the analyses of these results. Firstly, in the design of high field magnet, the number of coils and magnet cost demonstrate a “V”-shaped relationship, that is, there exist an optimal number of coils. Secondly, when the objective function demonstrates good values, Nb₃Sn coils generate fields in a range of 6–7 T, whereas NbTi coils generate fields in a range of 8–9 T. Finally, the objective functions under two different situations, i.e., Nb₃Sn coils and NbTi coils are powered together and separately, are calculated. From the comparisons we find that the effect of reducing one power supply is acceptable when the number of coils is not too big.

Keywords: high field superconducting magnet, optimal design, number of coils, stress distribution

PACS: 84.71.Ba, 83.85.Fg, 52.57.Bc

DOI: 10.7498/aps.65.058401

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51307163, 51477167).

† Corresponding author. E-mail: qiuliang@mail.iee.ac.cn