第 39 卷 第 5 期
2 0 1 7 年 10 月
低 温 物 理 学 报
CHINESE JOURNAL OF LOW TEMPERATURE PHYSICS
Vol.39, No.5
Oct 2 0 1 7

轴对称高场超导磁体电磁应力有限元分析方法*

张红洁[1]　王秋良[2]　刘宏伟[3,4]　刘建东[1]　李　伟[1]

[1]北京石油化工学院,北京 102617;

[2]中国科学院 电工研究所,应用超导重点实验室,北京 100190;

[3]华北电力大学,新能源电力系统国家重点实验室,北京 102206;

[4]高电压技术与电磁兼容北京市重点实验室,北京 102206

收稿日期:2017-06-05;接收日期:2017-09-20

【摘要】 核磁共振成像和核磁共振谱仪是高场超导磁体的主要应用领域.高场超导磁体通常具有较高的磁场和运行电流,在运行过程中超导线会产生较高的电磁应力,其临界特性将发生退化,影响磁体的稳定性.开展高场超导磁体的电磁应力精确分析显得尤为必要.本文发展了一种快速有效的有限元分析方法,第一步,为整个超导磁体系统建立平均有限元模型,采用传统的电磁-结构耦合方法求解电磁应力,获得最大应力位置;第二步,对最大应力所在的超导线圈建立详细有限元模型,采用单积分-结构分析方法精确求解每一组分中电磁应力.基于该模型研究了 500 MHz NMR 超导磁体的电磁应力.该分析方法也可以用于超导磁体冷却过程中的热应力分析.为高场超导磁体设计和建造提供有益的理论依据.

关键词: 高场超导磁体;详细有限元模型;电磁应力;核磁共振谱仪

PACS: 7400

1 引　　言

强磁场作为科学研究的一种极端条件,是现代物理实验研究中最有效的工具之一,为发现新效应、产生新概念提供了更多的科学机遇.超导磁体作为产生强磁场的一种磁体形式,也在向着更高磁场方向发展.核磁共振(MRI)和核磁共振谱仪(NMR)是高场超导磁体的主要应用领域.为了获得更好的成像性能和更高的性价比,更高场强 MRI、NMR 成为研究的重点和发展趋势.9.4 T MRI 已于 2007 年研制成功并实际运行[1].目前正在研制的 MRI 中心场强高达 11.7 T[2].用于 NMR 的 32 T 全超导磁体系统正在研发[3].在国内,中科院电工所正在开展 9.4 T MRI 和 25 T 全超导磁体研制工作[4-5],中科院高能所开展了 9.4 T MRI 超导磁体的电磁结构设计工作[6].

高场超导磁体通常具有较高的磁场和运行电流.大规模的超导磁体主要由复合材料组成,在运行过程中超导线和复合支持结构内会产生较高的电磁应力,从而使超导磁体产生可观的应变.磁体设计时,精确地计算超导体中应力、应变分布将有利于设计者了解超导体的临界特性,制定合理的设计方案,并根据设计需要为超导体、超导磁体设计合理的支撑结构,以减小局部变形,充分发挥超导体性能,提高磁体稳定性.尤其对于高磁场(>15 T)、大口径(>150 mm)超导磁体,超导体可能出现塑性变形[7],其临界特性将发生严重退化,影响磁体的稳定性.开展高场超导磁体的电磁应力精确分析显得尤为必要.

常用的电磁应力计算方法有解析方法、平均或整体有限元方法和整体-局部有限元方法[8].采用解

* 北京市优秀人才培养资助项目(批准号:2012D005005000006);北京市教育委员会科技计划(批准号:KM201310017005);北京市高等学校青年英才计划项目(批准号:YETP1483)资助的课题.

析方法求解超导磁体电磁应力问题能够有效地反映磁体的应力随结构参数的变化规律，但所得的结果并不精确，特别是对于复杂结构的超导磁体，解析方法更是无能为力.对于有限元分析方法而言，平均或整体有限元模型方法，模型简单，求解速度快，可用于磁体设计初期快速估算，但不能获得局部分析结果.整体—局部分析方法适用于具有周期分布的结构，求解精度受整体分析结果和插值函数的影响，尤其对于由多种材料组成的复合结构，在不同边界处应力不连续为计算带来较大误差.在高场超导磁体设计中，需要关注对应力较敏感的超导体中的应力上限，如 Nb_3Sn 线材上的应力超导某一数值后，其临界电流会迅速下降.在获知整个磁体中平均的应力分布的同时，精确计算敏感的超导体或应力集中部位的应力值是提高整个磁体系统稳定性的关键.为了获得单一材料如超导线、环氧树脂等的电磁应力，发展了一种详细有限元模型[7,9]，直接为整个磁体的复合结构建立有限元模型方法，避免了材料等效处理及边界条件获取中带来的误差.对于大规模高场超导磁体本文将平均有限元模型与详细有限元模型结合，发展了本文发展了一种快速有效的有限元分析方法.

2 有限元模型和分析方法

2.1 平均有限元模型

在磁体设计初期，可以为磁体建立平均有限元模型，对磁体中的电磁应力分布进行快速求解.平均有限元模型方法是一种将组成超导磁体的复合材料的应力分布进行等效处理的近似求解方法.根据超导磁体基本结构，将由不同导线绕制或由同种导线绕制而占空比不同的绕组分别看作独立的求解区域.一般的将每个绕组看作一个独立求解区域.认为每个绕组是由与复合材料等效的某种连续材料组成，不考虑材料不连续对计算结果的影响，通过已知单一材料的特征参数，采用复合律获得复合材料的平均结构参数，然后运用电磁与结构耦合的方法进行应力分析.高场超导 MRI、NMR 的主磁体通常为轴对称的螺管形式，因此，可以采用二维轴对称有限元模型对其进行建模.对于大规模磁体，第一步，为整个超导磁体系统建立平均有限元模型，采用传统的电磁-结构耦合方法求解电磁应力，获得最大应力位置.

采用平均有限元模型求解复合材料的电磁应力问题，关键需要通过已知的单一材料参数，采用分析技术得到复合材料的等效材料参数.传统的复合律对于工程实际来说更实用，常被用来对超导磁体等效参数进行初步估算.

2.2 详细有限元模型

为了精确计算每种材料中电磁应力，发展了一种详细有限元模型，根据第一步的计算结果，对应力最大位置的线圈进行详细分析.

详细有限元模型为组成超导磁体的各组分材料单独建立模型，每个有限元单元中只包含某一种材料.单一材料具有各向同性，其材料参数可以通过实验准确测量.根据超导线截面形状，可分为圆线和矩形线(扁线).本文以圆线为例进行说明.在建立超导线有限元模型时，将超导体与基体材料看作一个整体处理.对于二维模型来说，由有限元原理可知，计算时需要将实体模型用三角形或四边形单元离散，因此，很难用圆面来模拟圆形超导线.在此，用正多边形来模拟圆形导线截面，正多边形边数越多越逼近于圆形.如图 1 是圆形超导线二维详细有限元模型[9].导线与导线间的环氧材料采用三角形模拟，并采用三角形有限元单元进行离散.导线层与层之间的玻璃丝布采用带状多边形模拟，对其采用三角形单元和四边形单元进行离散.

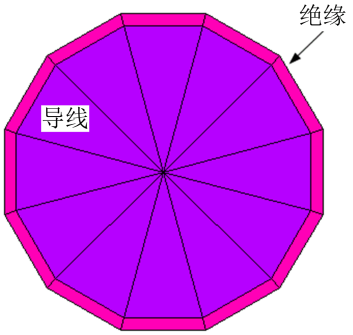

图 1　圆形导线二维详细有限元模型

2.3 电磁应力分析方法

建立详细有限元模型之后，并不采用电磁-结构耦合方法进行求解，而是首先采用单积分法求解超导线几何中心的电磁力；接着，建立结构场有限元模型，将求解的电磁力加载到结构模型对应节点上；最后，利用有限元方法进行结构分析.在进行电磁应力

分析时只需为超导磁体建立结构分析有限元模型，直接进行结构分析.采用有限元方法进行结构分析时，具有结构分析功能的商用软件均适用，本文选用了 ANSYS 有限元软件进行求解.将电磁场单积分法求解与结构场有限元求解结合的电磁应力求解方法避免采用传统的电磁结构耦合方法，在保证计算的精度前提下，大大降低了求解的计算量.也避免了整体-局部有限元方法中对边界条件的依赖.

3 计算结果与分析

本文以 500 MHz NMR 超导磁体[10]为例进行分析.

NMR 超导磁体几何结构和载荷关于轴对称，可以采用二维轴对称模型对磁体进行电磁应力分析.500 MHz NMR 超导磁体的电磁结构二维结构示意图如图 2 所示.超导磁体由 18 个螺管线圈组成，包括主线圈和屏蔽线圈.线圈 1～15 是主线圈，线圈 16～18 为屏蔽线圈.磁体运行时，屏蔽线圈中的电流方向与主线圈电流方向相反.主线圈与屏蔽线圈采用串联运行方式，运行电流为 117 A，磁场稳定度为 10^{-8}/h.磁体通电运行时，在磁体中心产生 11.75 T 的轴向磁场.线圈 1、2 由 Nb_3Sn 超导线绕制而成，线圈 3～18 均由 NbTi 超导线绕制而成.

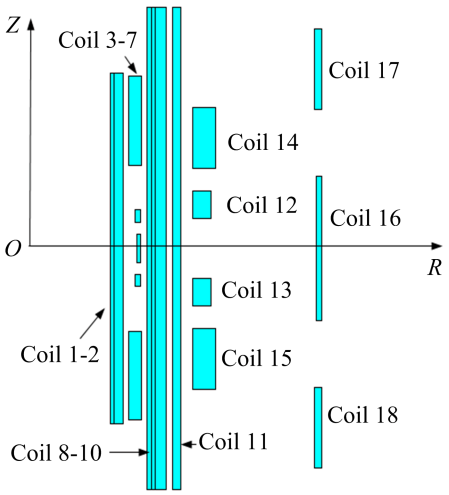

图 2 500 MHz NMR 磁体电磁结构示意图

超导磁体通电运行时，在磁体中心产生 11.75 T 的轴向均匀磁场.在磁体中心直径为 50 mm 的球形区域磁场的均匀度可得达到 2 ppm.如此高的磁场必然在磁体内产生巨大的电磁应力，引起磁体变形.为了能准确得到超导线中电磁应力分布，需要采用详细有限元模型进行分析.整个磁体系统包含的线圈个数较多，如果为每个线圈建立详细有限元模型，计算量非常大.平均有限元模型的方法，由于简化了计算模型，计算速度快，在磁体设计初期可用来对磁体设计方案进行初步估算.本文首先采用平均有限元模型的方法，为整个磁体系统包含的所有线圈建立平均有限元模型，确定磁体中承受最大电磁应力的线圈位置，然后对该位置的线圈采用详细有限元模型方法进行分析，从而可以得到超导线承受的最大电磁应力.

3.1 平均有限元模型分析结果

磁体的平均有限元模型如图 3 所示.采用平均有限元模型为超导线圈建立有限元模型时，将每个线圈看成一个整体，采用等效的材料参数来代替超导线圈复合材料的参数.每个线圈的等效材料参数如表 1 所示.

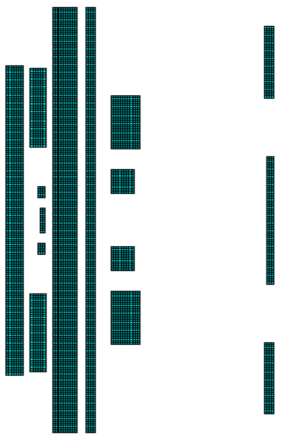

图 3 NMR 磁体平均有限元模型

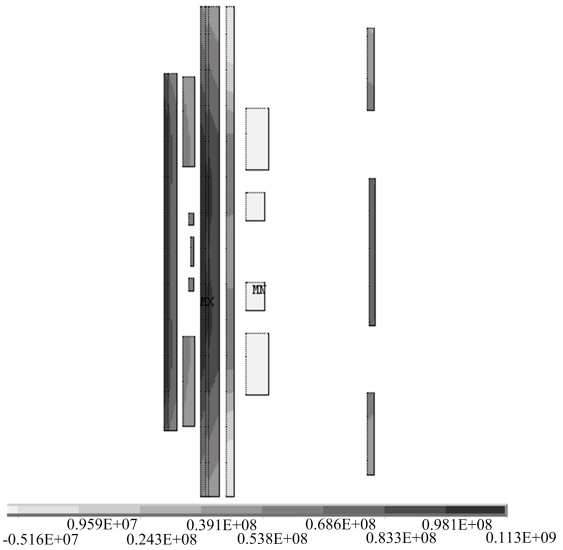

图 4 NMR 磁体中环向电磁应力分布(Pa)

图 4 示出了采用平均有限元模型计算的超导磁体中环向电磁应力分布.最大的环向电磁应力为 113 MPa，产生在线圈 8 中.最小环向电磁应力为 19.9 MPa，产生在线圈 3 中.最大的等效电磁应力为 144 MPa，产生在线圈 8 中.最小的等效电磁应力为 6.5 MPa，产生在线圈 11 中.最大的环向应变为 0.131%，产生在线圈 8 中.由上述计算可知，500 MHz NMR 超导磁体中的最大环向应力、应变均产生在线圈 8 中，因此，线圈 8 即为磁体中最大电磁应力、应变所在位置.由于线圈 9、10 和线圈 8 是紧密绕在一起的，中间没有缝隙，因此，取线圈 8、9、10 作为一个整体进行分析.

表 1　NMR 磁体各个线圈的平均材料参数

NO.	ER	EZ	ETHE	NRZ	NZTHE	NRTHE	GRZ	GZTHE	GRTHE
C1	22.424	22.424	98.087	0.337	0.343	0.343	8.387	16.186	16.186
C2	19.212	19.212	90.331	0.329	0.339	0.339	7.229	14.158	14.158
C3	34.125	34.125	104.338	0.331	0.340	0.340	12.821	22.021	22.021
C4	34.125	34.125	104.338	0.331	0.340	0.340	12.821	22.021	22.021
C5	32.412	32.412	102.874	0.329	0.340	0.340	12.195	21.196	21.196
C6	32.412	32.412	102.874	0.329	0.340	0.340	12.195	21.196	21.196
C7	29.367	29.367	99.846	0.325	0.339	0.339	11.079	19.666	19.666
C8	27.975	27.975	98.245	0.343	0.325	0.338	10.556	18.936	18.936
C9	23.662	23.662	92.082	0.322	0.336	0.336	8.951	16.550	16.550
C10	27.766	27.766	97.990	0.329	0.339	0.339	10.449	18.817	18.817
C11	29.258	29.258	99.726	0.331	0.340	0.340	10.992	19.599	19.599
C12	29.158	29.158	99.616	0.335	0.348	0.348	10.924	19.54	19.54
C13	29.158	29.158	99.616	0.335	0.348	0.348	10.924	19.54	19.54
C14	29.513	29.513	100.007	0.33	0.34	0.34	11.099	19.734	19.734
C15	29.513	29.513	100.007	0.33	0.34	0.34	11.099	19.734	19.734
C16	28.223	28.223	98.542	0.333	0.340	0.340	10.586	19.052	19.052
C17	28.609	28.609	98.995	0.334	0.341	0.341	10.726	19.255	19.255
C18	28.609	28.609	98.995	0.334	0.341	0.341	10.726	19.255	19.255

3.2 详细有限元模型分析结果

在上述分析基础之上，为线圈 8、9、10 建立详细的有限元模型，如图 5 所示.正多边形区域代表超导线，正多边形环代表超导线绝缘，三角形区域代表导线之间的环氧填充材料.详细的有限元模型中，每一个有限元单元中仅包含一种材料，从而可以给定准确的材料参数，计算出每一种材料中的真实应力分布，从而对材料性能进行正确的预测，为磁体设计和磁体的正常运行提供更加准确的理论依据.在为超导线建立详细有限元模型时，将稳定基体与超导体看作一个整体.超导线的材料参数如表 2 所示.

采用单积分-结构分析方法计算线圈 8、9、10 中的电磁应力.图 6 示出了导线中环向电磁应力分布，最大的环向电磁应力为 154.126 MPa，最小的环向电磁应力为 50.45 MPa.环氧填充材料中的最大环向应力为 12.011 MPa，最小的环向应力为 1.105 MPa，如图 7 所示.线圈中最大的环向应力为 154.126 MPa，产生在超导线里.超导线中最大环向应力是环氧填充材料中最大环向应力的 13 倍.因此，下面主要以超导线中的电磁应力、应变作为分析研究对象.

表 2　超导磁体组成材料结构参数

参数	超导线	绝缘	环氧填充	不锈钢丝
环向杨氏模量/GPa	124.30	15.0	7.6	205
径向杨氏模量/GPa	121.99	15.0	7.6	205
环、径向泊松比	0.337	0.3	0.3	0.286

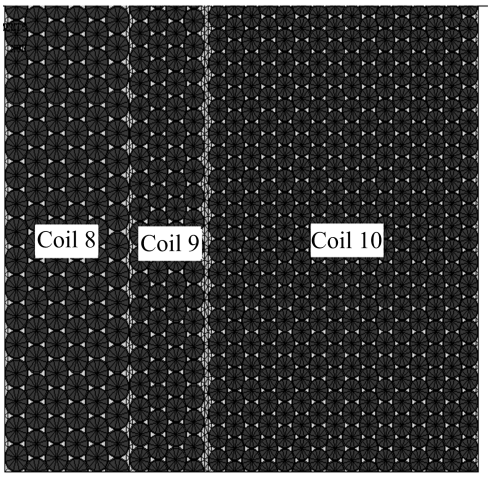

图 5 线圈 8～10 的二维轴对称详细有限元模型

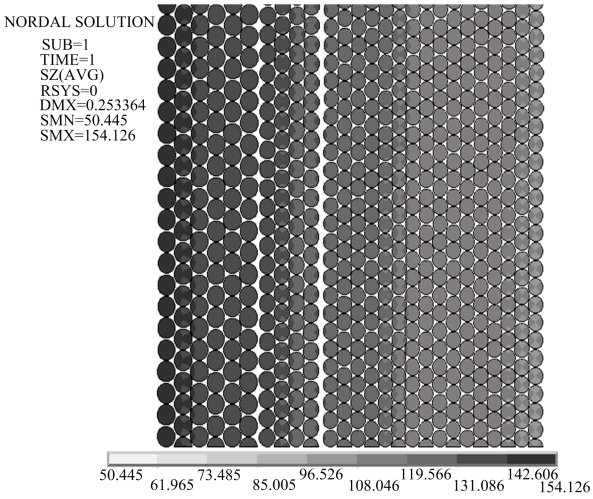

图 6 线圈 8～10 导线中环向电磁应力分布(MPa)

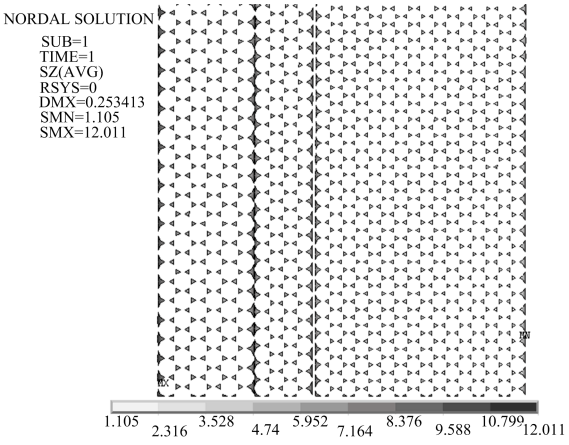

图 7 线圈 8～10 中填充材料里环向应力分布(MPa)

超导线中的等效电磁应力分布,最大的等效电磁应力为 181.322 MPa,最小的等效电磁应力为 50.685 MPa.超导线中最大的环向应变为 0.184%,最大的环向应变为 0.056%.因篇幅限制,部分图片没有展示.

线圈 8～10 由 NbTi 超导线绕制而成,NbTi 超导线的许用拉伸应力约为 250 MPa.而 500 MHz NMR 超导磁体的最大等效应力为 181.322 MPa,小于超导线屈服应力.并且超导线的环向应变为 0.184%,小于屈服应变 0.2%,因此可以认为超导线工作在稳定范围内,磁体是稳定的.对比平均有限元模型的计算结果可以发现,平均有限元模型计算得到的电磁应力、应变是组成超导磁体各种材料承受电磁应力平均之后的结果,最大电磁应力为 113 MPa;详细有限元模型分析能够获得组成超导磁体的各种材料中应力分布,能得到磁体中最大电磁应力的准确值,并确定超导磁体中最大电磁应力位置.计算结果表明,磁体中最大电磁应力产生在超导线中,大小等于 154.126 MPa,比平均有限元模型求得的最大应力值增加了 36.39%.超导线与环氧填充材料中的电磁应力相差一个数量级.在高场超导磁体电磁应力分析中,超导线一般要承受很大的电磁应力,因此,很有必要采用详细有限元模型对大口径、高场超导磁体进行电磁应力分析.

4 结 论

针对高场超导磁体的多线圈结构,本文发展了一种用于求解电磁应力的快速有效的有限元分析方法,给出了平均有限元模型、详细有限元模型建立方法,特别是用于详细有限元模型电磁应力分析的单积分与结构分析相结合的方法.该方法综合了平均有限元模型快速和详细有限元模型精细化的特点,尤其适用于多线圈的轴对称结构.基于该方法研究了 500 MHz NMR 超导磁体的电磁应力.首先通过平均有限元模型方法确定了超导磁体中最大应力产生在线圈 8 中,然后采用详细有限元模型方法分析了线圈 8 的应力应变,计算结果表明,磁体中最大电磁应力产生在超导线中,大小等于 154.126 MPa,比平均有限元模型求得的最大应力值增加了 36.39%.超导线与环氧填充材料中的电磁应力相差一个数量级.环氧树脂中的准确应力值可以作为树脂是否发生破裂的参考.通过计算可以证明上述方法是有效可行的.该分析方法也可以用于超导磁体冷却过程

中的热应力分析.为高场超导磁体设计和建造提供有益的理论依据.

参 考 文 献

[1] Available: http://www. Health imaging. com/ index. php? option=com_ar-ticles&view =article&id=8998.

[2] P. Vedrine, G. Aubert, F. Beaudet, J. Belorgey, C. Berriaud, P. Bredy, A. Donati, o. Dubois, G. Gilgrass, F. P. Juster, C. Meuris, F. Molinie, F. Nunio, A. Payn, T. Schild, L. Scola, and A. Sinanna. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **3** (2010): 696.

[3] W. Denis Markiewicz, David C. Larbalestier, Hubertus W. Weijers, Adam J. Voran, Ken W. Pickard, William R. Sheppard, Jan Jaroszynski, Aixia Xu, Robert P. Walsh, Jun Lu, Andrew V. Gavrilin, and Patrick D. Noyes. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **3**(2012): 4300704.

[4] Q.Wang, Y.Dai, B.Zhao, S.Song, C.Wang, L.Li, J.Cheng, S. Chen, H. ang, Z.Ni, Y.Li, C.Cui, X. Hu, H. Wang, Y. Lei, K. Chan, L. Yan, C. Wen, G.Hui, W. Yang, F. Liu, Y. Zhuo, X. Zhou, Z. Yan, J. Chen, T. Xu. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **3**(2012): 4400905.

[5] Q. L. Wang, Y. M. Dai, Z. P. Ni, S. Z. Cheng, G. Q. Wen, X. N. Hu, H. Wang, B. Z. Zhao, C. Y. Cui, J. S. Cheng, G. Zhu, H. S. Wang, Y. Li, K. Chang, L.K. Li, J. H. Liu, S.S. Song, and L. G. Yan. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **3** (2013): 4300905.

[6] G. Q. Zhang, Z. Zhu, L. Zhao, Z. L. Hou, F. P. Ning and W. C. Yao. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **3**(2014): 4401803.

[7] 王秋良. 高磁场超导磁体科学[M].(科学出版社，北京，2008),198.

[8] J. B. Ransom and N. F. Knight, *Comput. Struct.*, **37** (1990): 375.

[9] 张红洁. 超导磁体的机电效应的有限元分析与光纤测量技术[D]. 中国科学院电工研究所博士论文,2010 年.(保密)

[10] H. C. Huang, J. S. Cheng, Y. Li, H. J Zhang, Z. R. Dong and J. H. Wang. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **3**(2010): 748.

Finite Element Analysis Method for Electromagnetic Stress of Axisymmetric High Field Superconducting Magnet

ZHANG Hongjie[1]　WANG Qiuliang[2]　LIU Hongwei[3,4]　LIU Jiandong[1]　LI Wei[1]

[1] *Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing* 102617, *China*;

[2] *Key Laboratory of Applied Superconductivity, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Science, Beijing* 100190, *China*;

[3] *State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing* 102206, *China*;

[4] *Key Laboratory of HV and EMC, Beijing* 102206, *China*

Received date: 2017-06-05; accepted date: 2017-09-20

【Abstract】 Nuclear magnetic resonance Spectrometer and nuclear magnetic resonance imaging are the main applications of high field superconducting magnets. Because the high-field superconducting magnets usually have a high magnetic field and operating current, the superconducting wire will withstand higher electromagnetic stress during the operation. So that the critical characteristics of wire will be degraded, the stability of the magnet will be affected. It is necessary to carry out the precise analysis of the electromagnetic stress of the high field superconducting magnet. In this paper, a fast and effective finite element analysis method is developed. The first step is to establish the average finite element model for the whole superconducting magnet system. The traditional

* Project supported by Training Program Foundation for the Talents of Beijing(Grant No. 2012D005005000006), Science and Technology Program of the Beijing Education Commission (Grant No. KM201310017005), Program for the Youth Talents of Beijing College(Grant No. YETP1483).

electromagnetic-structural coupling method is used to solve the electromagnetic stress and obtain the maximum stress position. In the second step, a detailed finite element model is established for the superconducting coil where the maximum stress is located. The single integral-structure analysis method is used to accurately solve the electromagnetic stress in each component. Based on this model, the electromagnetic stress of 500 MHz NMR superconducting magnet was studied. The analytical method can also be used for thermal stress analysis of superconducting magnets during cooling which can provide useful theoretical suggestions for the design and construction of high field superconducting magnets.

Keywords: high-field superconducting magnet, the detailed finite element model, electromagnetic stress, NMR
PACS: 7400