

# ITER 极向场内馈线的结构设计

程 旺<sup>1</sup>, 刘正士<sup>1</sup>, 宋云涛<sup>2</sup>, 刘素梅<sup>2</sup>

(1. 合肥工业大机械与汽车工程学院, 合肥 230009; 2. 中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

**摘 要:** 根据 ITER 装置对极向场内馈线系统的性能要求, 同时考虑该系统所处空间位置的复杂性和工作环境的特殊性, 利用三维建模软件 CATIA 对极向场内馈线结构进行概念设计, 为同类型超导磁体的馈线设计提供了有益的参考。

**关键词:** ITER; 内馈线系统; 结构设计

**中图分类号:** TL62<sup>+</sup>2

**文献标识码:** A

## 1 引言

国际热核聚变实验堆(ITER)主要对实际应用核聚变能所需的各种要素进行试验, 以验证热核聚变反应堆的工程可行性, 为将来建造一个可以自持燃烧的托卡马克核聚变堆奠定工程和物理基础, 最终实现核聚变能的商业化<sup>[1]</sup>。

内馈线系统(ICF)位于杜瓦内部, 与过渡馈线、S 弯盒、线圈终端盒、干盒等组成超导馈线系统, 对整个超导磁体提供冷却液、电源以及线路诊断等, 是 ITER 的重要组成部分。由于内馈线系统处于真空和低温环境, 且杜瓦内部磁场强度大, 安装空间也非常有限, 所以对内馈线系统的设计和安装要求比较高, 相关的结构设计也要给出一定的裕度, 以保证内馈线系统安全可靠地运行。本文在现有 ITER 馈线系统相关设计的基础上, 对极向场(PF)内馈线系统结构设计进行了详细的描述。

## 2 内馈线系统的结构设计

### 2.1 整体结构简介

为了避免 PF 内馈线与杜瓦内其余部件的干涉, 并且保证内馈线与终端接口和过渡馈线的连接, 6

条内馈线的形状(走向)各不相同。但是每条内馈线均包含有正负 2 根超导母线传递磁体所需电源, 3 根低温冷却管道传递磁体所需冷却液, 7 根磁体检测线传递磁体所需信号, 内壳保护、支撑、定位内部各种部件, 内外部支撑定位各种部件, 隔板隔开两根超导母线和冷却管、提供内支撑安装位置等。PF 内馈线的内外部结构情况如 1 和图 2 所示。

### 2.2 内壳与隔板设计

两超导母线之间需要安装接地钢板(314 不锈钢)进行分隔, 即隔板。此接地隔板能在两根超导母线形成屏蔽, 它能极大的减少了两根超导母线之间短路时产生电弧的可能性。超导母线、检测线、冷却管通过各种支撑固定在隔板上。

为了进一步防止母线短路时电弧击穿杜瓦内部其它部件, 超导母线和隔板周围还需要安装一个围护结构, 能够容纳发生电弧时产生的熔化的金属, 即内壳。根据内部构件所需的空间的大小, 在中间接头、终端接头、非接头部位分别采用外径为 650mm、630mm、480mm, 壁厚 10mm 的 314 不锈钢管。为了方便安装和拆卸, 内壳采用左右或上下 half 结构设计, 并设有飞边和法兰, 用螺栓进行固

收稿日期: 2010-11-05; 修订日期: 2011-01-22

基金项目: ITER 计划(项目名称: ITER 大型超磁体系统馈线研究 2008GB1002000)专项支持

作者简介: 程旺(1985-), 男, 安徽太和人, 硕士研究生, 主要从事机电产品绿色设计与制造方面工作。

连。计算表明,在 70kA 的电弧作用下,作为磁场系统的卸荷通道的内管需要大约 500s 才能熔化(绝热温升为  $2.5\text{K}\cdot\text{s}^{-1}$ ),能确保发生故障时磁场有充分时间卸荷<sup>[2]</sup>。

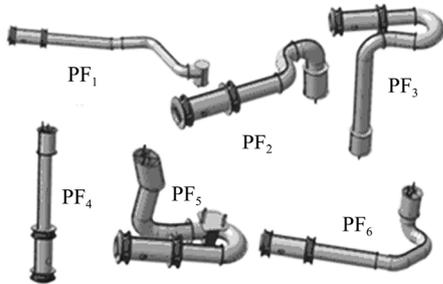


图 1 PF 内馈线外部构造

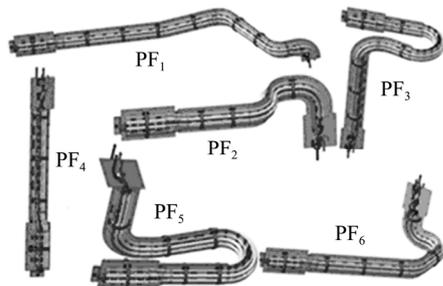


图 2 PF 内馈线内部构造

### 2.3 管线布局设计

由于内馈线中 12 根各种管线均分布在内管中有限的空间内,并且各种管线在终端接口处的位置已经确定,设计时需根据 ITER 设计相关要求对 12 根管线分布位置进行合理的布局<sup>[3]</sup>。例如 ITER 设计中要求两根超导母线尽量靠近,以减小磁场散射区,同时使来自线圈外部场对超导母线系统的洛伦兹力产生的转矩尽量最小;母线和冷却管应尽可能靠近馈线中心部位,以减少热量损失;管线布局应方便 S 弯盒与过渡馈线的设计等。

根据 ITER 设计要求,6 条 PF 内馈线的各种管路均采用图 3 所示的布局。但是由于 6 条内馈线整体走向的不同,导致终端接头区域冷却管为避开母线而产生一定幅度的扭曲,如图 4 所示。

从图 4 中可以看出,采用图 3 的管线布置设计,只有 PF<sub>3</sub> 终端接头冷却管能顺利与终端接头连接,

其余各根冷却管均有因避免与超导母线的干涉而产生一定程度的空间弯曲(PF<sub>4/5/6</sub> 的终端接头与 PF<sub>2</sub> 终端接头形状类似)。但使用同一种布局能极大的减少 PF 馈线中内馈线和 S 弯盒部分的设计工作量,此情况已被国际组认可。

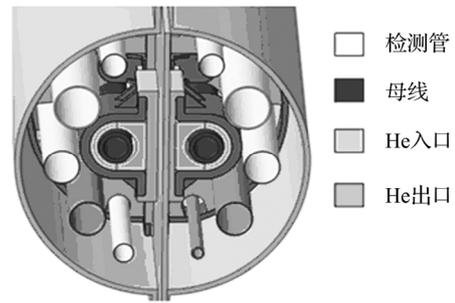


图 3 管线布局切面

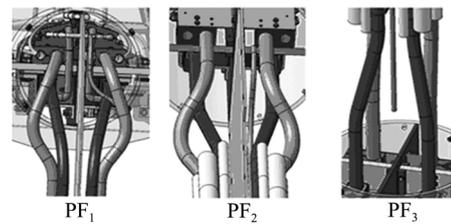


图 4 终端接头设计

### 2.4 主动冷却设计

PF 内馈线位于 80K 冷屏内部,由于处在真空环境,不存在对流,热负载主要由辐射产生。因此在馈线外管和杜瓦之间设置了杜瓦冷屏,用于降低辐射换热。为了进一步降低馈线系统的温度,在馈线内部的冷却回管上设置了主动冷却结构,以增加冷却效果。

主动冷却主要包括螺旋状的铜片、不锈钢板、G10 环和保护管。它利用螺旋状的铜片绕在冷却回管上,当冷却管道收缩时,能通过自身变形补偿与低温管道之间的相对位移,如图 5 所示。主动冷却装置利用黄铜良好的传热性,用铜片通过延伸部分将热能传导到隔板,能够有效地降低隔板温度,改善母线周围的温度环境。

### 2.5 内支撑设计

内支撑分为检测线和冷却管的花瓣支撑,以及

母线支撑两类类型。两类支撑均采用卡箍式设计(固定在中间隔板上),卡箍采用复合材料 G10 制成,以满足绝缘和降低热传导要求。考虑到隔板和管路间的相对移动,卡箍和管路之间设计成松配合,并在卡箍上附着低温润滑材料,以降低相对移动时的摩擦力。为提高支撑强度,卡箍外增设了 15mm 厚的不锈钢外壳。



图 5 主动冷却设计

工作中,检测线和冷却管只承受自身重力和冷却收缩力的作用,力相对较小。经过分析计算得出,两花瓣支撑最大间距为 1m,设计中两花瓣支撑间距在 1m 范围内选择合适位置放置。

超导母线不仅承受自身的重力和冷却收缩力,还要承受两超导母线间的电磁力( $10^3\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$  量级),以及工作磁场对超导母线作用的电磁力( $10^4\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$  量级)<sup>[4]</sup>。考虑到超导母线承受到的电磁力远大于别的力,支撑设计时只计算电磁力。经过分析磁场承受的磁场分布以及电磁力,结合计算公式:

$$L = \sqrt{\frac{4[\sigma]W}{q_{\max}}} \quad (1)$$

且,  $q_{\max} = F_{\max}/L_e$ ;  $M_{\max} = q_{\max}L^2/4$ ;  $\sigma_{\max} = M/W \leq [\sigma]$ 。其中,  $q_{\max}$  为最大载荷密度;  $F_{\max}$  为最大电磁力;  $L_e$  为单元长度;  $L$  为支撑间距;  $M_{\max}$  为最大弯矩;  $W$  为抗弯截面系数;  $\sigma_{\max}$  为最大应力;  $[\sigma]$  为最大许用应力。

母线间距计算值列于表 1 中。经过计算得出 6 条内馈线中,两母线支撑最小间距为 330mm。为了方便安装和增大安全系数,6 条 PF 内馈线母线支撑间距取相同值 300mm。图 6 为 PF<sub>2</sub> 内馈线的支撑种类和分布情况图,其余 5 条内馈线的内支撑种类和分布情况与 PF<sub>2</sub> 大致相同。

表 1 母线间距计算值

	工作电流/kA	最大电磁密度/T	最大载荷密度/ $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	支撑间距/m
PF <sub>1</sub>	68	1.78	57362.72	0.44
PF <sub>2</sub>	52	1.15	43985.28	0.51
PF <sub>3</sub>	52	0.91	34553.45	0.57
PF <sub>4</sub>	52	0.96	68434.99	0.40
PF <sub>5</sub>	52	1.71	76305.15	0.38
PF <sub>6</sub>	52	2.65	101458.53	0.33

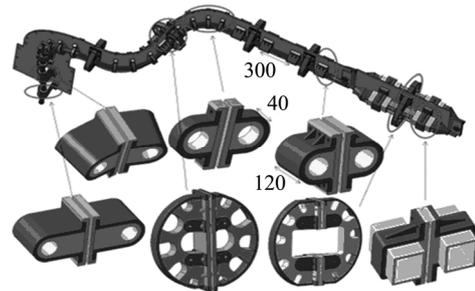


图 6 PF<sub>2</sub> 内支撑种类和分布情况

## 2.6 外支撑设计

由于每根 PF 内馈线除了两端接口处起到一定的固定作用外,其余部分均处于悬空位置。为了避免长达 6~11m 重约 1~4t 的内馈线破坏两端接口和自身的部件,需要对内馈线增设外支撑。由于在 ITER 工作中,随着磁体中电流和磁场的变化,终端接口会随着磁体线圈产生上下位移,中间接头会随着过渡馈线产生一定的径向位移,从而导致内馈线有一定的径向和轴向位移。设计外支撑时必须能够允许内馈线具有一定的轴向和径向位移。根据分析结果得出,PF<sub>1/5/6</sub> 内馈线需要外支撑。根据 PF 内馈线的空间分布,PF<sub>1</sub> 内馈线的支撑坐落在 PF<sub>2</sub> 磁体线圈上,PF<sub>5</sub> 内馈线外支撑悬挂在 TF 线圈上,PF<sub>6</sub> 内馈线外支撑悬挂在 PF<sub>6</sub> 磁体线圈上,支撑设计图形如图 7 所示。

## 2.7 中间接头设计

由于整条 PF 馈线长达 20m,为了方便运输和安装维修,每条馈线上设有 2 个中间接头,其中之一就是内馈线和过渡馈线的接头。接头处即为两部分的接口区域,包括超导母线、冷却管和检测线的接头,以及相应的隔板、内壳,支撑等。接头部分处于杜瓦内部,所以也称为内馈线接头。内馈线接头的安装比较复杂,需要所有部件运输到 ITER 装

置所在地并安装好内馈线才能进行。

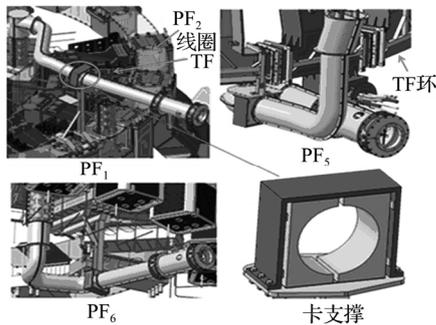


图7 外支撑设计

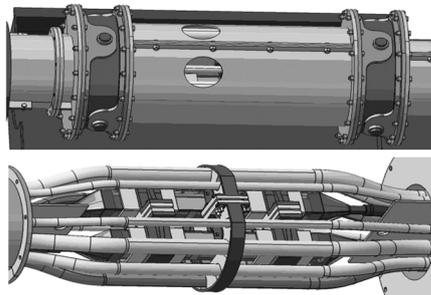


图8 中间接头内外部构造

图8为内馈线中间接头的构造情况。在接头两侧壳体上各开有1个排气孔,以在发生氦气泄露事故时,氦气能及时从排气孔排出,避免二次事故的发生。接头两端各安装一个万向节,接头处隔板也采用铰链结构,以补偿内馈线和过渡馈线的装配误差和ITER工作时产生的相对位移。

差和ITER工作时产生的相对位移。

总装时,把装配好的过渡馈线穿过生物屏蔽层,在中间接头对接完成后,用绝缘胶等把点焊后的超导母线接头上下盒体部分缠绕住,形成真空密封盒,然后再安装检测线、外壳等。

### 3 结束语

本文根据ITER装置对内馈线的技术要求,对PF内馈线的内壳、隔板、管线布局、内外部支撑、支撑间距、中间接头等进行了概念设计,为中心螺线管(CS)和校正线圈(CC)的内馈线和过渡馈线设计提供了一定的参考作用。

### 参考文献:

- [1] Aymar R. Status of ITER [J]. Fusion Engineering and Design, 2002, 61-62: 5-12.
- [2] 张远斌, 吴松涛, 宋云涛, 等. ITER 超导馈线系统的设计 [J]. 核聚变与等离子物理, 2005, 25(3): 195-199.
- [3] Bauer P, Sahu A K, Sato N. The ITER magnet feeder systems functional specification and interface document [R]. Cadarache: ITER Organization, 2009.
- [4] 张远斌, 吴松涛. ITER 极像场超导母线机械结构及支撑设计 [J]. 核聚变与等离子物理, 2007, 27(3): 208-211.
- [5] 刘素梅, 宋云涛, 武松涛, 等. ITER CTB 盒冷屏的支撑结构与传热耦合分析 [J]. 核聚变与等离子物理, 2009, 27(2): 166-170.
- [6] 王建青, 宋云涛. ITER 磁体过渡馈线的结构设计 with 优化 [J]. 核技术, 2006, 29(4): 272-275.

## Structure design of ITER PF in-cryostat-feeder

CHENG Wang, LIU Zheng-shi, SONG Yun-tao, LIU Su-mei

(School of mechanical and automotive engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009)

**Abstract:** According to the ITER performance requirement of poloidal field in-cryostat-feeder, and considering the complexity of the position and particularity working environment, the conceptual design of overall structure of the poloidal field in-cryostat feeder is processed with CATIA. Some important points are emphasized, such as the BUSBAR, cooling pipes, instrumentation pipes, the inside and outside supports. The conceptual design of PF ICF already has been approbated by ITER international group, and the paper is an important reference to the feeder design for other superconducting magnet system.

**Key words:** ITER; In-cryostat-feeder; Structure design