

# ITER 纵场磁体过渡馈线结构力学分析

王志滨, 宋云涛, 李长春, 王忠伟, 王成昊, 戴翔

(中国科学院等离子体物理研究所, 安徽合肥 230031)

**摘要:** 运用数值方法计算了不同等离子体运行时刻纵场磁体过渡馈线(CFT)超导母线上的电磁载荷, 并确定了磁感应强度最大的时刻, 采用增量有限元法对过渡馈线进行非线性力学分析, 得到不同工况下结构上的应力分布及变形情况。分析结果表明, 带有万向节的过渡馈线结构具有足够的强度来承受运行过程中的各种载荷, 从而证明了结构设计的合理性。

**关键词:** 国际热核聚变实验堆; 过渡馈线; 万向节; 电磁载荷; 力学分析

中图分类号: TL631.24

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2011)04-0436-07

## Mechanical Analysis of Cryostat Feed-Through for ITER TF Magnet

WANG Zhi-bin, SONG Yun-tao, LI Chang-chun, WANG Zhong-wei,

WANG Cheng-hao, JI Xiang

(*Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*)

**Abstract:** By means of numerical method, the magnetic field strength on cryostat feed-through (CFT) busbars for TF magnet at different plasma scenarios was calculated, in order to get the maximum electromagnetic loads. Finite element mechanical analysis was performed to know the stress and deformation of CFT under different working conditions. The results show that the proposed CFT structure with gimbals is properly designed, which can withstand all the electromagnetic, thermal and mechanical loads expected during operation.

**Key words:** ITER; cryostat feed-through; gimbal; electromagnetic loads; mechanical analysis

国际热核聚变实验堆(ITER)共有9套纵场磁体馈线系统,位于托卡马克装置底部区域的B2水平面上,用来向18个纵场磁体线圈(TF)传输电流、冷却液和数据信号等。根据相对于装置杜瓦的位置不同,又将每套纵场磁体馈线系统分为内馈线、过渡馈线、S弯盒、线圈终端盒及干盒等子系统<sup>[1]</sup>。内馈线位于装置外

杜瓦的内部,其一端与磁体线圈相连,另一端与过渡馈线相连,可防止超导母线产生的电弧对杜瓦内的部件造成破坏;S弯盒和线圈终端盒作为一个独立的结构单元,固定于装置大厅地面上,其内部放置的各种控制阀门和高温超导电流引线需工作在低磁场和低辐射环境下,将它们设计在远离磁体的位置处;过渡馈线用于

收稿日期:2010-03-15;修回日期:2010-04-24

基金项目:国家重点基础研究发展计划资助项目(2008CB717900); ITER计划专项资助项目(2008GB102000)

作者简介:王志滨(1985—),男,山东聊城人,硕士研究生,从事电物理装置结构设计与分析研究

连接内馈线和 S 弯盒,它穿过装置的外杜瓦壁和生物屏蔽层,总长约 11 m,是整个馈线结构中跨度最长的一部分,为内部的超导母线、冷却管、测量诊断线提供导向和支撑作用。

过渡馈线内的超导母线工作时通有 68 kA 的电流,在磁体线圈产生的磁场作用下会受到强大的电磁力载荷;过渡馈线各部件均工作在低温状态下,由于材料收缩受到限制会引起很大的热应力<sup>[2]</sup>。另外,过渡馈线还受到 1 t/m 左右的自重及纵场磁体线圈位移的作用。因此,过渡馈线必须有足够的强度来承受这些载

荷,同时也要有一定的柔度以吸收结构在降温过程中发生的热收缩和磁体线圈的位移。本文运用增量法有限单元计算程序,对过渡馈线在各种载荷下的力学响应进行分析。

## 1 过渡馈线结构设计

由于空间上的限制,将过渡馈线设计为一高度集成的结构,主要包括内管、隔板、超导母线支撑、冷却管支撑、外支撑(图 1)及内部的超导母线、冷却管、测量诊断线等结构。

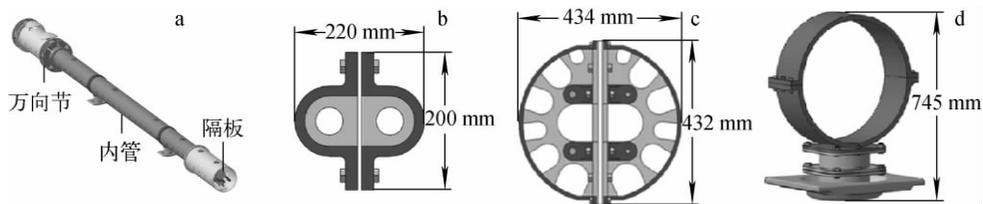


图 1 纵场磁体过渡馈线结构

Fig. 1 Structure of TF magnet CFT

a——内管、隔板;b——超导母线支撑;c——冷却管支撑;d——外支撑

内管是超导母线、冷却管道及测量诊断线进入装置内部的通道,也可容纳被超导母线电弧熔化的金属液,其外径为 476 mm、厚度为 10 mm。为便于装配和维护,将内管设计成上下两部分,并通过螺栓进行连接;内管的外部设计有不锈钢外管和辐射冷屏,为内部结构提供机械保护并减少低温部件的热负荷。隔板的厚度为 10 mm,固定在内管顶部和底部的凹槽中,为超导母线和冷却管提供支撑和固定作用,同时也可减少超导母线间的电弧。内管和隔板均由高强度且焊接性能良好的 316L 不锈钢加工而成。过渡馈线内的超导母线通过两端的超导接头分别与内馈线和 S 弯盒部分的超导母线相连,接头处的内管直径为 660 mm、厚度为 12 mm。另外,过渡馈线与内馈线连接处设计有两个万向节,用于吸收加工装配误差及磁体线圈位移。

过渡馈线共设计有 3 种类型的支撑结构,以减小结构在自重及电磁力作用下的变形;超导母线支撑(图 1b)和冷却管支撑(图 1c)位于内管里面,它们分别将超导母线和冷却管固定在隔板上,支撑的主体部分为 G10,外缘为

316L 不锈钢,这种设计可降低结构的热负荷,同时又能保证机械强度的要求;外支撑(图 1d)用于承受整个过渡馈线结构的重量,其上部的不锈钢圈与内管焊在一起,以抵抗扭矩的作用,中间部件为 G10 圆筒,为降低结构的热负荷,底部的不锈钢基座放在燕尾槽导轨中,使整个过渡馈线只能沿轴向运动。过渡馈线内共有 12 个超导母线支撑,其中,4 个支撑分布在两端的超导接头上,其余 8 个支撑的分布位置同超导母线上的电磁力分布相适应,即电磁力越大的位置上支撑间距越小;由于过渡馈线内的冷却管所收载荷是均匀分布的,所以 4 个冷却管支撑的位置也是均匀分布的;过渡馈线内管外共有 2 个外支撑,由于两端的超导接头所占比重很大,所以 2 个外支撑分布在靠近超导接头的位置上。

## 2 电磁载荷分析

ITER 装置运行期间,超导磁体线圈中的电流会在装置大厅内激发出很强的磁场。由于在 1 个放电循环周期内,18 个 TF 中的电流是恒定的,而 6 个极向场磁体线圈(PF)和 6 个中

心螺管磁体线圈(CS)中的电流是随时间变化的(表1)<sup>[3]</sup>,所以,在不同等离子体放电时刻,超导母线上的磁感应强度及电磁力分布是不同

的。因此,需首先确定超导母线上磁感应强度最大的时刻,然后再以此时刻的电磁力作为过渡馈线力学分析的载荷。

表1 ITER磁体线圈中电流随时间的变化  
Table 1 Current variation with time in ITER magnet coils

时间/ s	电流变化/MA											
	PF1	PF2	PF3	PF4	PF5	PF6	CS3U	CS2U	CS1U	CS1L	CS2L	CS3L
0	40	10	0.07	3.49	-4.35	27.378	40	40	38.04	38.04	40	34.85
3.5	26.623	2.05	0.41	-0.83	-6.62	24.51	30.32	33.01	27.28	27.28	29.8	27.936
11.5	35.632	-9.19	-1.51	-6.75	-11.874	26.13	18.87	25.39	14.716	14.71	24.14	25.354
80.1	20.409	-30.56	-28.611	-28.964	-38.751	38.307	7.253	-29.135	-42.456	-42.456	-22.311	7.78
300	10.184	-4.75	-43.703	-25.316	-45.36	39.874	-10.456	-36.185	-44.711	-44.711	-34.744	5.96
440	16.143	-14.649	-26.092	-9.67	-46.324	35.564	-16.527	-8.85	-32.281	-32.281	-22.493	5.99
544	9.03	-7.46	-16.185	10.78	-22.781	7.02	-31.479	-13.341	-17.466	-17.466	-33.741	-4.25
820	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

考虑到超导母线上的磁场仅是由稳恒电流源产生的(忽略涡流的影响),且区域内无铁磁物质存在,所以直接对 Biot-Savart 公式  $d\mathbf{B} = \mu_0 I d\mathbf{l} \times \mathbf{r} / (4\pi r^3)$  进行数值积分便可求出超导母线上的磁场分布,通过这种方法可大幅减少计算时间。然后再由安培力公式  $d\mathbf{F} = I d\mathbf{l} \times \mathbf{B}$  计算出超导母线所受到的电磁载荷<sup>[4]</sup>。

经分析发现,纵场磁体超导母线上的磁场峰值受 PF6 线圈和 CS3L 线圈中电流的影响最大,在等离子体的平顶状态开始( $t = 100$  s)时超导母线上的磁感应强度达到最大值 1.65 T (图 2)。另外,两根超导母线上的磁感应强度差异是由过渡馈线相对于装置径向的偏置所引起的。

图 3 示出  $t = 100$  s 时超导母线所受电磁力的  $x$  方向和  $z$  方向分量。可看出,过渡馈线内的两根超导母线所受电磁力大小相近,方向相反,且随着到内馈线距离的增大,电磁力迅速衰减;另外,超导母线上所受电磁力主要为  $x$  方向,峰值为 52.5 kN/m。其中, $x$  方向的电磁力主要是由 PF 和 CS 产生的磁场引起的, $z$  方向的电磁力是由 TF 引起的,由于 TF 在杜瓦外部空间上产生的磁场很小,所以  $z$  方向的电磁力也很小。同理,两根超导母线上的电磁力差异也是由过渡馈线相对于装置径向的偏置所引起的。

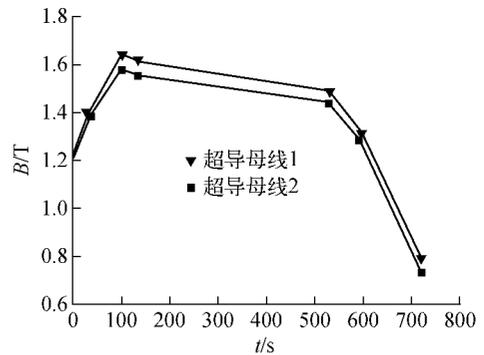


图2 磁场峰值随时间的变化(包括自场)  
Fig. 2 Variation of peak magnetic field with time on busbar (including self-field)

### 3 过渡馈线力学分析

#### 3.1 分析方法

由于过渡馈线结构上存在着大变形和摩擦等各种非线性行为,因此不能直接用线性方程组来预测结构的响应。一种近似的非线性求解方法是将载荷分成一系列的载荷增量,在几个载荷步内或在 1 个载荷步的几个子步内施加载荷增量,并对每个载荷增量使用有限单元法进行迭代求解,具体过程<sup>[5]</sup>如下。

1) 将结构上总节点载荷  $\{P\}$  分成一系列载荷段  $\{P^1\}$ ,  $\{P^2\}$ ,  $\{P^3\}$ ,  $\{P^4\}$ ,  $\{P^5\}$ , ...,  $\{P^n\}$ 。

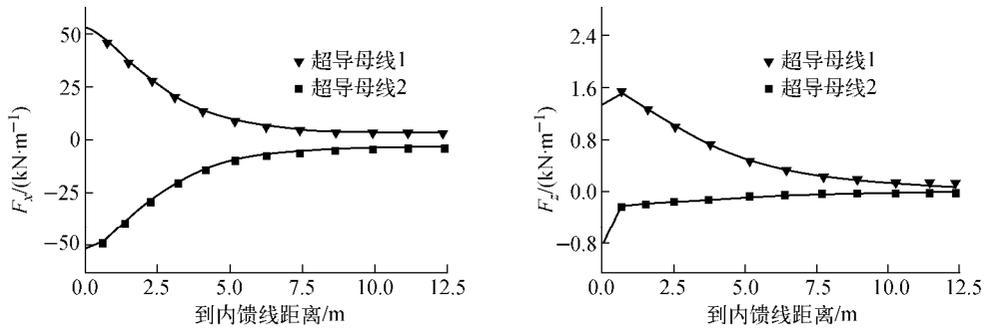


图 3  $t=100$  s 时过渡馈线超导母线上的电磁力分布  
Fig. 3 Electromagnetic force distributions on CFT busbar at 100 s

2) 对于第  $k$  载荷段, 先把上一载荷段  $\{P^{k-1}\}$  及对应的累积位移量  $\{u^{k-1}\}$  作为该载荷段的初始载荷  $\{P^k\}_0$  和初始位移  $\{u^k\}_0$ , 并求出增量理论的刚度切线矩阵  $[K_T](\{u^k\}_0) = \Sigma \int_{\Omega_e} \{B^e\}^T [D] (\{u^k\}_0) \{B^e\} d\Omega$  ( $[K_T]$  和  $[B^e]$  分别为结构的整体刚度切线矩阵和单元的应变矩阵, 它们均随节点位移的改变而发生变化;  $[D]$  为弹性矩阵, 由材料的杨氏模量和泊松比确定)。在结构上施加外载荷增量  $\{\Delta P^k\}_0 = \{P^k\} - \{P^k\}_0$ , 并根据增量法有限元方程  $[K_T](\{u^k\}_0) \{\Delta u^k\}_1 = \{\Delta P^k\}_0$  求出位移增量  $\{\Delta u^k\}_1$ , 便得到新累积位移量  $\{u^k\}_1 = \{u^k\}_0 + \{\Delta u^k\}_1$  及对应刚度切线矩阵  $[K_T](\{u^k\}_1)$  和外载荷矩阵  $\{P^k\}_1 = [K_T](\{u^k\}_1) \{u^k\}_1$ ; 然后施加外载荷增量  $\{\Delta P^k\}_1 = \{P^k\} - \{P^k\}_1$ , 再由增量法有限元方程求出位移增量  $\{\Delta u^k\}_2$ , 迭代计算过程如图 4 所示。

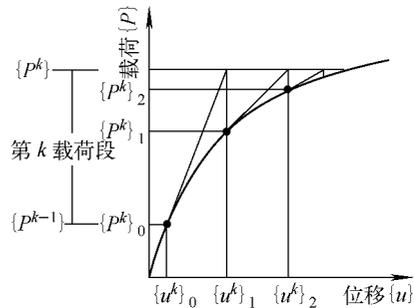


图 4 第  $k$  载荷段迭代计算示意图  
Fig. 4 Scheme of iteration in load step  $k$

如果第  $i$  次迭代求出的位移解  $\{\Delta u^k\}_i$  满足  $\|\{\Delta u^k\}_i\| \leq \epsilon_R$  ( $\epsilon_R$  为收敛误差), 则认为求出了第  $k$  载荷段  $\{P^k\}$  对应的位移  $\{u^k\} = \{u^k\}_i = \{u^k\}_{i-1} + \{\Delta u^k\}_i$ 。

### 3.2 载荷工况

ITER 装置启动时, 首先通过液氮对磁体线圈和馈线内的超导母线等结构进行冷却, 冷却过程中磁体线圈会发生径向和竖向的收缩, 收缩位移通过内馈线传递到过渡馈线并带动外支撑在燕尾槽中滑动, 使结构受到了摩擦力的作用, 另外, 冷却过程中过渡馈线自身也会发生很大的热收缩; 当各部分结构冷却到规定温度后便开始通电, 超导母线中的电流与磁体线圈激发的磁场相互作用会产生很大的电磁力载荷, 这是馈线系统受到的最主要载荷之一, 同时磁体线圈自身也会受到电磁力的作用并发生环向位移。根据过渡馈线实际运行情况和功能要求, 选择出对结构有较大影响的几种载荷, 并对这些载荷按实际工况进行组合来建立合理的力学模型。整个运行过程中过渡馈线受到的主要载荷有以下几种。

3) 对于所有载荷段, 进行 2) 中的循环迭代, 直到求出最后 1 个载荷段  $\{P^n\}$  对应的位移解  $\{u^n\}$ 。

采用增量法有限元计算程序对过渡馈线进行力学分析, 可考虑到大变形和摩擦等非线性行为对结构的影响, 使计算结果更加接近真实值; 还可得到加载过程各阶段的中间结果, 便于研究结构的位移和应力随载荷的变化情况。但为了保证结果的收敛性, 需将载荷段分得足够小, 这样就需更多的计算时间和存储空间。

- 1) 静载荷: 过渡馈线各部件的自重, 约 1 t/m。
- 2) 热应力: 超导母线在工作时使用超临界液氮冷却到 4.5 K; 冷却管内通有 4.5 K 的超临界液氮对纵场磁体进行冷却; 另外, 内管外的

冷屏结构,使内管、隔板及内外支撑处于 30~50 K 的温区。因而,过渡馈线各部件内均会存在一定的热应力<sup>[6-8]</sup>。

3) 电磁力:过渡馈线超导母线内通有 68 kA 的电流,在磁体线圈激发的磁场的作用下会受到强大的电磁载荷,同时相邻的超导母线也会造成一定的电磁力<sup>[9]</sup>。

4) 磁体位移 A:纵场磁体冷却时有一定的收缩,在与馈线系统连接处发生 -25 mm 的径向位移、3.2 mm 的垂直位移。

5) 磁体位移 B:纵场磁体线圈通电时,会受到很大的电磁力并导致其发生变形,在与馈线系统连接处有 9.8 mm 的环向位移。

6) 摩擦力:当过渡馈线发生径向位移时,外支撑基座与燕尾槽导轨之间会存在摩擦力。

为了更准确地模拟过渡馈线的实际加载过程,并获得一些典型工况下结构上的应力分布和变形情况,以检验结构的可靠性和安全性,在运用增量有限单元法进行力学分析时将作用在过渡馈线上的载荷按以下 3 种工况进行组合:

1) 停机状态时,过渡馈线只受重力作用;2) 冷却状态时,各部件首先要冷却到工作温度,过渡馈线除了受到重力载荷外,还会受到热应力、磁体位移 A 及摩擦力的作用;3) 工作状态时,过渡馈线内的超导母线及磁体线圈中都会通过电流,于是过渡馈线会受到重力、热应力、磁体位移 A、磁体位移 B 及电磁力的作用。

### 3.3 分析结果

过渡馈线的内管和隔板的厚度分别为 10 mm 和 8 mm,而它们沿装置径向的长度有约 11 m,因此,在进行有限元分析时采用薄壳单元对它们进行网格划分,可避免产生边长比过大的实体单元,这种单元会降低求解的精度甚至可能导致非线性求解的不收敛;超导母线和冷却管的外径分别为 49 mm 和 60 mm,远小于其沿轴线方向的尺寸,故在分析中使用梁单元对它们进行网格划分,大幅减少了模型中单元和节点数量。另外,文中所述力学分析的主要目的是得到超导母线、冷却管及馈线的外部结构在各种载荷作用下的应力和变形情况,所以,分析模型中将超导母线支撑和冷却管支撑简化为刚性梁单元,其一端与隔板固连,另一端通过点-点接触单元与超导母线和冷却管连接。这

样不仅可准确模拟馈线的外部结构与内部的超导母线和冷却管之间的载荷传递,保证了分析结果具有工程指导意义,而且也提高了非线性计算的收敛速度。

首先对未设计柔性机构的过渡馈线进行力学分析,这时内馈线与内管之间是通过焊接进行刚性连接的。以下给出 3 种工况下的力学分析结果。

#### 1) 工况 1(停机状态)

停机状态时过渡馈线只受重力作用,结构上的最大应力为 98.7 MPa,出现在外支撑的不锈钢圈上,如图 5a 所示。由于超导母线两端的超导接头在结构中所占比重很大,且超导母线的 S 弯形式使结构局部的刚度大幅降低,导致内管靠近 S 弯盒的一端发生竖直向下的变形,最大值为 6.1 mm,但在另一端内馈线对内管起到了支撑的作用,所以这一端的变形很小。另外,超导母线和冷却管上的应力峰值分别为 27.8 MPa 和 20.1 MPa,它们的变形情况和内管相似,均为靠近 S 弯盒的一端发生向下的变形,最大变形分别为 4.4 mm 和 4.3 mm。

#### 2) 工况 2(冷却状态)

温度降低导致的热收缩和磁体位移是过渡馈线受到的主要载荷。由于外支撑底座可在燕尾槽内沿装置径向自由滑动,因此径向的磁体位移对过渡馈线造成的影响很小;但竖直方向的磁体位移会在过渡馈线上引起很大的应力集中,应力峰值达到了 222 MPa,发生在内管与内馈线的刚性连接处,如图 5b 所示。此时,过渡馈线上的主要变形趋势为沿径向的收缩,最大值为 57.4 mm,出现在内管的 S 弯盒一端。另外,超导母线和冷却管由于收缩时位移受到限制,结构中产生了很大的热应力,应力的最大值分别为 101.4 MPa 和 89.5 MPa。

#### 3) 工况 3(工作状态)

电磁力导致的环向磁体位移也会在内管与内馈线的连接处造成一定的应力集中,应力峰值为 235 MPa,如图 5c 所示。超导母线受到的电磁力与自身的轴线垂直,在结构上引起了很大的弯曲应力,峰值为 282 MPa,但由于两根超导母线所受的电磁力通过内支撑以内力的形式相互抵消,所以电磁力对过渡馈线其它结构的影响很小。

过渡馈线外部结构和冷却管的材料是 316L 不锈钢,它在 50 K 低温下的许用应力为 193 MPa;超导母线的材料是 316LN 不锈钢,它在 4.5 K 低温下的许用应力为 461 MPa。从

分析结果可知,冷却状态和工作状态时过渡馈线外部结构上的最大应力已超过了 316L 许用应力,因此,必须对过渡馈线结构进行优化和改进,以消除结构上的应力集中。

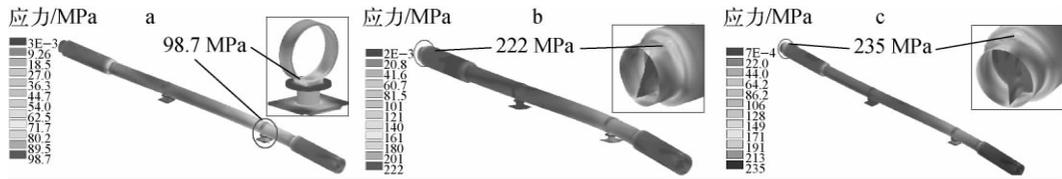


图 5 刚性连接时过渡馈线上的 Tresca 应力分布

Fig. 5 Tresca stress distributions on CFT with rigid connection

### 3.4 结构优化

考虑到过渡馈线结构上的应力集中是由磁体位移引起的,故在内馈线与内管的连接处设计了由两个万向节串联而成的柔性位移补偿机构,以吸收沿环向和竖向的磁体位移,同时还能保证内管不会发生角度的转动,其工作原理如图 6 所示。

对带有柔性位移补偿机构的过渡馈线进行

力学分析,得到 3 种不同工况下结构上的应力分布和变形情况(表 2 和图 7)。可看出,3 种工况下过渡馈线结构上的最大应力为 114 MPa,远低于刚性连接的情况(235 MPa),且处于材料的许用范围内。其中,内管上的最大应力为 86.9 MPa,出现在 S 弯盒一侧的超导接头处,这是由内管的几何形状变化引起的局部应力集中;万向节上的最大应力为 41.5 MPa,出现在中间的平衡板上,如图 8 所示。另外,超导母线和冷却管上的应力与刚性连接时相近。从而可判定,由两个万向节串联而成的位移补偿机构可有效吸收降温和电磁力造成的磁体位移,大幅降低了结构上的应力峰值,证明过渡馈线结构设计是合理、可靠的。

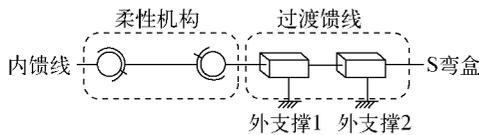


图 6 位移补偿机构示意图

Fig. 6 Scheme of displacement compensation structure

表 2 不同工况下过渡馈线各部件上的 Tresca 应力和位移峰值

Table 2 Tresca stress and displacement on CFT under different load cases

部件	应力/MPa			位移/mm		
	停机状态	冷却状态	工作状态	停机状态	冷却状态	工作状态
内管	66.4	86.9	85.1	7.23	59.6	60.6
隔板	47.4	61.0	61.3	7.18	59.5	61.4
万向节	18.1	29.7	41.5	4.79	33.1	34.6
外支撑	92.7	105	114	2.60	50.0	51.8
超导母线	30.9	93.5	283	4.47	62.8	61.3
冷却管	21.8	88.5	86.3	4.46	50.9	49.1

## 4 结论

通过数值方法计算了不同时刻过渡馈线超导母线上的磁场分布,在  $t=100$  s 时超导母线

上的磁感应强度达到最大值 1.65 T,此时超导母线上的电磁力峰值为 52.5 kN/m,主要为水平分量且方向相反,出现在过渡馈线与内馈线



图7 设计有万向节的过渡馈线上的 Tresca 应力分布  
Fig.7 Tresca stress distributions on CFT with gimbals  
a——停机状态；b——冷却状态；c——工作状态

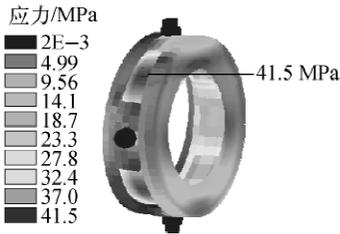


图8 工作状态时万向节上的 Tresca 应力分布  
Fig.8 Tresca stress distribution on gimbal  
under working condition

接头处；然后，运用增量有限元法对过渡馈线进行了力学分析，得到了3种不同工况下结构的应力分布及变形情况，并根据分析结果对过渡馈线结构进行优化改进。从分析结果可知，带有由两个万向节串联而成的柔性位移补偿机构的过渡馈线结构在3种工况下的最大应力为114 MPa，处于许用范围之内，且有很大的安全裕度，证明过渡馈线结构设计是合理、可靠的。

#### 参考文献：

- [1] BAUER P, SAHU A K, SATO N. The ITER magnet feeder systems functional specification and interface document [R]. Cadarache: ITER Organization, 2009.
- [2] 王建青, 刘利斌, 武松涛, 等. ITER 过渡馈线辅助支撑结构设计及传热计算[J]. 原子能科学技术, 2009, 43(8): 716-719.  
WANG Jianqing, LIU Libin, WU Songtao, et al. Structural design and heat transfer calculation of cryostat feed through auxiliary supports for ITER [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2009, 43(8): 716-719(in Chinese).
- [3] 王志滨, 宋云涛. ITER 纵场磁体超导母线设计与电磁分析[J]. 低温与超导, 2009, 43(增刊): 307-311.  
WANG Zhibin, SONG Yuntao. Design and elec-
- [4] 张三慧. 电磁学[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 1999: 244-267.
- [5] 王勖成, 邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 1997: 483-491.
- [6] 宋云涛, 姚达毛, 武松涛. HT-7U 超导托卡马克装置真空室结构数值分析[J]. 机械工程学报, 2003, 39(7): 68-73.  
SONG Yuntao, YAO Damao, WU Songtao. Numerical structural analysis for the vacuum vessel of HT-7U superconducting Tokamak device [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(7): 68-73(in Chinese).
- [7] 梁尚明, 闫喜江, 黄宇峰, 等. 基于 ANSYS 的 ITER 重力支撑系统的热应力分析[J]. 原子能科学技术, 2009, 43(3): 284-288.  
LIANG Shangming, YAN Xijiang, HUANG Yufeng, et al. Thermal stress analysis of gravity support system for ITER based on ANSYS [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2009, 43(3): 284-288(in Chinese).
- [8] 王开松, 赵韩, 宋云涛, 等. ITER 过渡馈线直线段管的优化设计与屈曲分析[J]. 核聚变与等离子体物理, 2008, 28(2): 146-149.  
WANG Kaisong, ZHAO Han, SONG Yuntao, et al. Optimization design and buckling analysis of the straight-line duct for ITER feeder [J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2008, 28(2): 146-149(in Chinese).
- [9] 曾文彬, 吴维越. ITER 校正场线圈的结构分析[J]. 核聚变与等离子体物理, 2009, 29(2): 150-155.  
ZENG Wenbin, WU Weiyue. Structure analysis of correction coils for ITER [J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2009, 29(2): 150-155(in Chinese).