

ITER 超导母线结构设计与分析

张远斌 宋云涛 武松涛 王建青

(中国科学院等离子体物理研究所,合肥,230031)

摘要:国际热核试验堆(International Thermonuclear Experimental Reactor,简称 ITER)采用超导母线(Superconducting Busbar)连接磁体线圈和电流引线,传递整个磁体系统所需的电流。本文就ITER 超导母线的绝缘、固定以及结构设计进行阐述,并通过有限元分析法对结构进行分析,为最终结构的确定提供理论依据。

关键词:ITER,超导母线,双重绝缘,S弯

1 引言

国际热核聚变实验堆是正在进行的一项大型国际合作项目。作为世界上最大的核聚变反应堆,ITER 的目标是建造一个可自持燃烧的托卡马克聚变实验堆,以验证热核聚变反应堆的工程可行性,并对实际应用核聚变能时所需的要素进行试验^[1]。作为整个装置中最为重要的磁体系统,ITER 全部采用了超导磁体设计,并通过超导母线传递磁体系统所需电流^[2]。因此,Busbar 的稳定性对实验堆的稳定运行至关重要。

2 Busbar 的设计

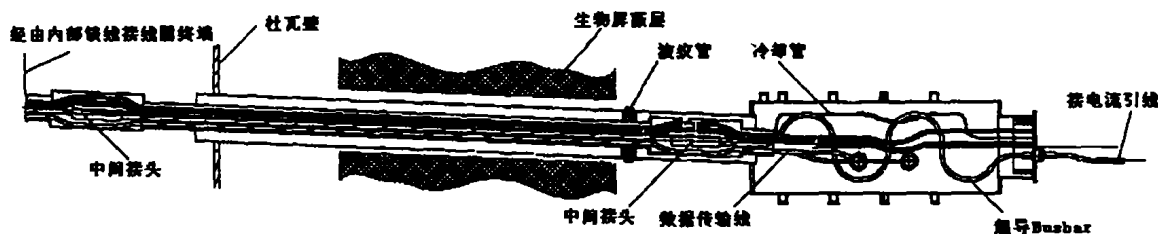


图1 超导 Busbar 的结构及位置

ITER 超导母线结构如图1所示,它位于馈线系统内(馈线系统为 Busbar 提供了一个真空、4K 低温环境),两端分别连接磁体线圈和电流引线,传递线圈所需电流。ITER 采用超导母线传递电流主要是基于以下几点考虑的:1)采用超导体传递电流,基本没有电压降,可有效降低电流供应系统的负载量;2)由于设置了 Busbar,电流引线可布置在远离磁体的部位,为磁体内其它部件节省出空间;3)当线圈发生失超时,Busbar 可作为磁体系统释放能量的通道,从而提高整个磁体系统运行的安全性^[3,4]。

2.1 超导材料选取

实用化的超导材料主要是NbTi 和Nb₃Sn 两大类。由于NbTi 合金具有优良的加工性能、超导性能和较低的成本,在小于9T 的磁场下被广泛地使用。而Nb₃Sn 导体,主要应用于磁场高于9T 的场合^[5]。根据 Busbar 周围磁场特点,同时考虑到成本及加工性能等因素,ITER 选用 NbTi 超导线制成的 CICC 导体(Cable in Conduit Conductor)制作 Busbar,其主要参数性能如表1 所示。对于给纵场线圈、极向场线圈、中心螺管线圈提供电流的 Busbar,设置了中心冷却管,采用超临界氮迫流内冷;对于给校正场线圈提供电流的 Busbar,因通过电流较小,没有设置中心迫流冷却。

表1 ITER 超导 Busbar 主要参数

超导材料	NbTi/Cu	NbTi/Cu
导体类型	CICC	CICC
中心冷却管	$\varnothing 8 \times 2$	0
铠装材料	316LN	316LN
工作电流	68kA	10kA
最高磁场	4T	4T
工作温度	5.0K	5.0K
铜超比	6.9	6.9
导体外径	47mm	47mm
股线直径	0.73mm	0.73mm

采用双重接地绝缘及屏蔽设计(图2),可及时探测接地及绝缘故障并同时触发系统停机,最大程度保护系统不受损害^[6,7]。Busbar 的内绝缘、外绝缘一起构成对地绝缘(绝缘层由玻璃纤维、聚酰亚胺半叠包构成),内、外绝缘层之间的接地金属内屏蔽层可有效控制涡流的影响,降低低温部件的热散逸;外屏蔽除了对 Busbar 提供机械保护外,同时也为 Busbar 提供放电通道外。限流电阻 R_f (50k Ω)可限制短路电流的大小,当电流超过额定值时,探测器可触发停机,保护系统不受损害。

2.3 电磁平衡结构设计

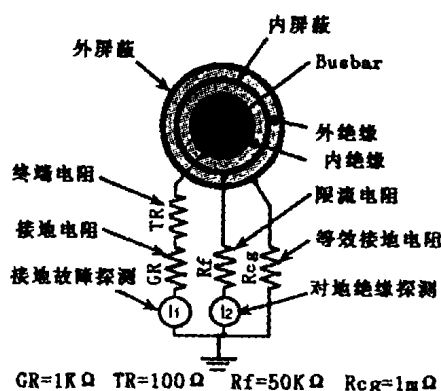


图2 Busbar 的双重绝缘与屏蔽

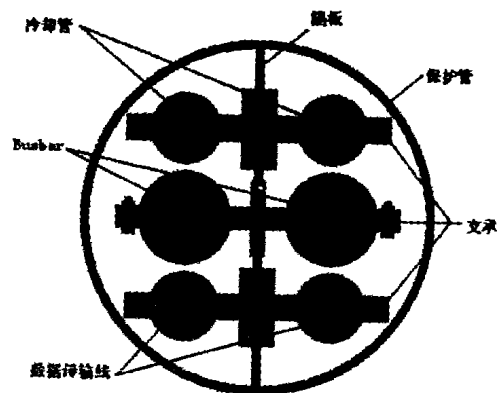


图3 典型截面图

磁场作用下, Busbar 的电磁力可高达 10^4N/m 。为平衡电磁力, Busbar 以正负成对的方式布置(图3),通过支撑将 Busbar 固定在不锈钢隔板两侧, Busbar 之间的电磁力以内力形式最大程度抵消。在支撑布置上,要求支撑的分布同磁场强度相适应。即,通过对 Busbar 周围磁场进行分析,输出 Busbar 的电磁力分布情况,然后根据电磁力分布情况,确定 Busbar 不同部位加设的支撑数。在磁场强度大的区域,因电磁力较大,支撑需密布;在远离磁体的区域,因磁场强度降低,电磁力相对较小,支撑则相应布置的稀疏一些。确定支撑位置的时候,还需考虑加设支撑的可行性问题。接地的中间隔板除了对 Busbar 起支撑作用外,还可有效防止 Busbar 之间产生电弧。外部的保护管将 Busbar 和杜瓦内部部件相隔离,可防止 Busbar 短路时产生的电弧击穿杜瓦内部部件。

2.4 补偿结构设计

Busbar 工作温度为 4K,由常温(300K)降至 4K, Busbar 将产生较大的热收缩,加上因线圈收缩等因素引起的 Busbar 附加位移,假如没有补偿结构, Busbar 的应力将高达 1000MPa 以上,远大于 Busbar 的许用应力(常温下约为 250MPa),因此需设计补偿结构,以降低应力。ITER 采用双 S 弯补偿设计,通过 S 弯的柔性吸收

2.2 绝缘、接地设计

Busbar 是能量输入输出杜瓦的通道,若 Bustar 出现故障,对整个设备有着非常严重的影响,因此 Busbar 在结构上要求能够承受整个磁体系统中最恶劣的情况,如失超、电弧等。当系统失超时, Busbar 承担起释放磁体能量的作用,即,当磁体失超切断电源后,线圈电流通过 Busbar 转移到外部并联电阻 GR(图2),经外部并联电阻释放能量,控制磁体温升和端电压。失超时,导体中的电流将转移到铜基体中流动,为确保有效卸荷,同磁体线圈超导体相比, Busbar 采用了更高的铜超比,失超保护时间 2 倍于线圈超导体,因此即使 Busbar 发生失超,线圈也可有效卸荷。为提高 Busbar 的稳定性, Busbar

整个超导 Busbar 因各种原因引起的相对位移。图 4 为 Busbar 在热应力作用下(室温降至 4K)的变形及应力分布情况,图 5 为 Busbar 在热应力及电磁力综合作用下的变形及应力分布情况。从结果可以看出,采用 S 弯补偿设计,虽然 Busbar 综合变形较大(约 70mm),但因 S 弯结构对变形的有效吸收,产生的应力并不是很大,

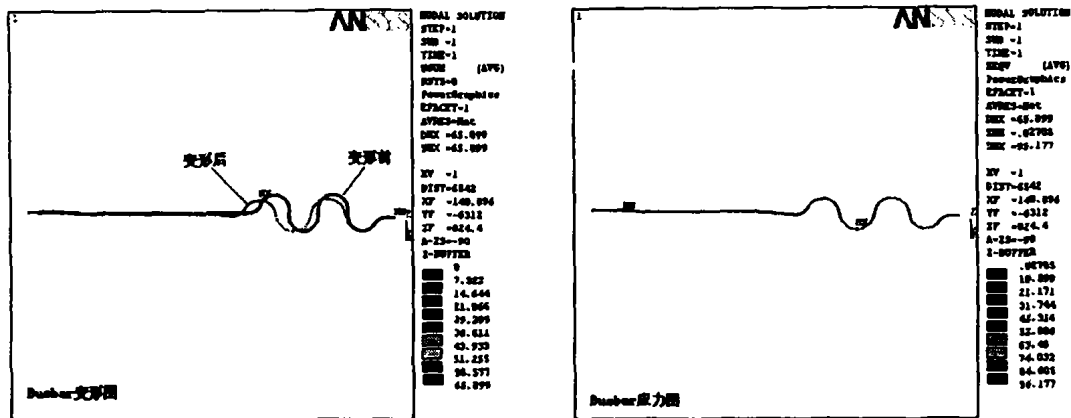


图4 Busbar 热分析

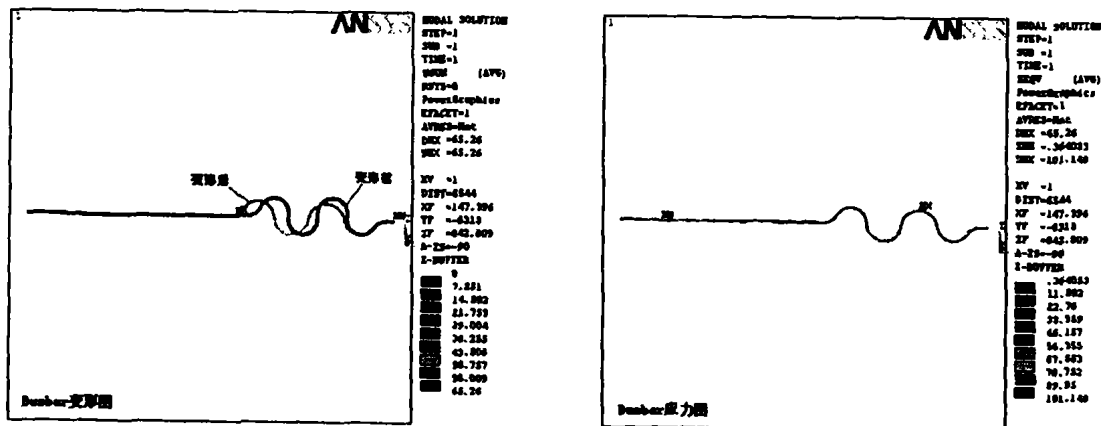


图5 Busbar 热、电磁分析

远低于 Busbar 的许用应力。图 4、图 5 对比可知,由于支承对电磁力的有效抵消,电磁力对 Busbar 的变形影响不大,但 Busbar 应力因电磁力的作用明显发生变化,无论是应力分布还是最大应力均有改变,直线段因为支承的影响,应力呈周期性波动。

2.5 支承结构设计

对于直线段采用卡箍式支承(支承固定在中间隔板上),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 Busbar 所受 10^4N/m 量级的电磁力,卡箍外增设了不锈钢外壳,以提高支承的强度。因隔板和 Busbar 之间存在着相对移动,卡箍和 Busbar 设计成松配合,同时在卡箍和 Busbar 之间附着低温润滑材料,以降低滑动时的摩擦力。S 弯补偿段支承设计较为复杂,要求在不限沿 Busbar 方向的自由伸缩的同时平衡水平方向的电磁力及垂直方向的重力。图 6 是 S 形补偿段支承的一种设计方案, Busbar 重力通过固定在中间隔板上的重力支承平衡,横板则可抵消大部分电磁力, S 形补偿可在横板之间一定范围内自由伸缩。

3 结束语

ITER 在超导母线设计上具有一定的代表性, Busbar 的双重绝缘及屏蔽设计,提高了系统的安全性;而双 S 弯补偿结构设计,解决了 Busbar 因热收缩、电磁力等因素造成的附加应力过大问题。分析结果表明, S 弯

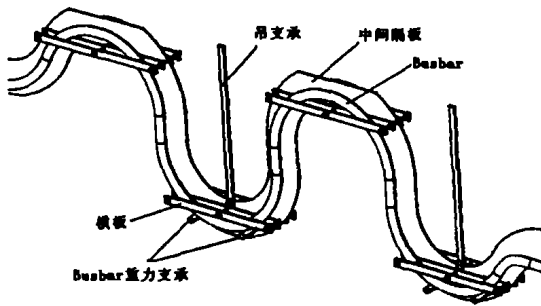


图 6 S 弯处支承设计

补偿结构设计是可行的。

参考文献:

- 1 Aymar R. Status of ITER. *Fusion Engineering and Design*, 2002, 61-62:5~12
- 2 Okuno K, et al. Key features of the ITER- FEAT magnet system. *Fusion Engineering and Design*, 2001, 58-59:153~157
- 3 Shuichi Yamada, Toshiyuki Mito, et al. Superconducting Current Feeder system for the Large Helical Device, *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, 1996, 32(4)
- 4 Park Y M, Lee Y J, et al. Development of SC Bus-Line for the KSTAR Superconducting Magnet, *Proceedings of LINAC 2002*, Gyeongju, Korea
- 5 李保增, 郭增基. CICC 超导体的设计及其稳定性. *低温与超导*, 1995, 23(3):17~22
- 6 ITER Design Documents, Detailed Description and Specifications of ITER Feeders, 2003
- 7 Yoshida K, Iida F, Gallix R, et al. Electrical Insulation Design and Monitoring of the ITER Magnet System, *Proceedings of the 20th Symposium on Fusion Technology*, 1998, 807-810

Structural Design and Analysis of ITER Superconducting Busbar

Zhang Yuanbin, Song Yuntao, Wu Songtao, Wang Jianqing
(Institute of Plasma Physics, Hefei 230031, China)

Abstract: Superconducting Busbar is used in International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) for the current transmission between magnet coils and current leads. This paper describe the insulation, fixing and structure design of the ITER Superconducting Busbar. The structure is analysis with the help of FEA technique, provide theoretical basis to the finally structure design.

Keywords: ITER; Superconducting Busbar; Double insulation; S-Bend

作者简介: 张远斌,男,1974 年出生,博士研究生,主要从事 ITER 超导馈线系统的设计与分析。

(上接第 38 页后)

The Numerical Model of Rocket Cryogenic Liquid Propellant Pressurization System

Zhang Chao¹, Lu Xuesheng², Tian Liting¹

(1. Department of Energy and Environment Engineering, Zhong Yuan Institute of Technology, Zhengzhou 450007, China)

(2. Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: A numerical model is made for the rocket cryogenic liquid propellant pressurization system, which want to obtain the regularity of pressure, temperature and gas mass in gas space of the propellant tank and the wall temperature of the tank. The comparison between the calculated and the flight results proves well the accuracy of the numerical model. The model can be used in different pressurization gas and combined pressurization gas conditions, and also be used in calculation in the parking period after the filling-up.

Keywords: Rocket, Cryogenic liquid, Propellant, Pressurization system, Numerical model

作者简介: 张超,男,1974 出年,博士,主要从事新型制冷技术、低温液体储运以及天然气、氢气吸附储存的研究。