第25卷 第1期 核电子学与探测技术 Vol. 25 No. 1
2005年 1月 Nuclear Electronics & Detection Technology Jan. 2005

核聚变装置EAST高可靠性辐射防护控制系统

柴竹新[1]，吴宜灿[1]，刘伯学[2]

（1 中国科学院等离子体物理研究所，安徽合肥 230031；2 防化研究院，北京 1044 信箱 200 102205）

摘要：以环境辐射监测网、门禁系统、核聚变运行控制系统、屏蔽门拖动系统、厅内γ探测系统等设施为测控和通讯对象，研制了以单片机为核心的系统硬件、软件（菜单）和状态机，确保人在任何情况下都不会误入高辐射区，并实时制止其他辐射泄漏的发生。设计了一种硬件三冗余容错方法，在一块电路板故障时，无须诊断电路，系统输出变量仍正确或至少是安全的。

关键词：辐射安全；单片机；状态机；硬件三冗余

中图分类号： TL811 **文献标识码**： A **文章编号**： 0258-0934(2005)01-0028-04

EAST（原名 HT-7U）托卡马克是中国科学院等离子体物理研究所正在设计和建造的一个核聚变实验装置[1]，它在D-D放电时所产生的主要放射性是中子和由它诱导的γ射线[2]，其辐射的屏蔽层是厚1.5m，长30m×宽25m的混凝土大厅，辐射对厅外环境与工作场所的影响主要通过以下多种途径：穿过屏蔽墙、管道、隧道、门缝以及天空反散射。辐射场的特点是仅在EAST放电时有强中子和γ射线，在EAST关机后没有中子只有γ射线；EAST连续放电的典型设计脉冲和最大设计脉冲是200和1000s，相应于1000s的堆运行期间最大辐射剂量率随厅内位置不同，约在27～398μSv/h[3]，一次放电足以致人重伤或死亡。即使停堆后γ的停堆剂量率仍很高，最高达884μSv/h，而只有经过一段时间后才会衰减到本底水平；在通常达几个星期的实验期间这种放电反复进行多次，其间有频繁的工作人员进出，因此，EAST最可能发生的辐射事故是在EAST正开机时或刚关机时工作人员意外闯入厅内高辐射区，或是在工作人员还没离开屏蔽大厅或厅门还没关闭时EAST就开机运行造成的；另外为防止潜在的辐射事故对厅外人员和公众造成危害，有必要对环境和工作场所的辐射剂量进行监测。为确保工作人员在任何情况下都不会误入高辐射区，及时制止各种可能事故的发生、我们设计了一个辐射防护控制系统。这一系统只依赖于对人行为的严密逻辑控制（状态机），而不依赖于人遵守制度的自觉性，并采取多种逻辑冗余和硬件冗余措施保证人的生命安全，其中提出了硬件三冗余容错方法，这一方法无需传统的故障诊断电路，有一块电路板故障时，系统输出变量仍正确或至少是安全的。

1 系统概述

辐射防护控制系统由辐射防护控制器RPC、屏蔽厅外中子和γ辐射监测网、门禁管理系统、EAST运行控制系统、屏蔽厅内停机γ剂量率探测器、屏蔽门电力拖动系统、各种开关和传感器等辅助器件组成，见图1。其中屏蔽厅外中子和γ辐射监测网是CAN总线组成的环境和工作场所辐射监测局域网，RPC通过它的一个网上工控机节点由串口接入，二者之间的交换信息是EAST运行时环境辐射剂量率超标与否（变量设为A，下同）和RPC的运行状态数据包（M），后者用于信息在网上的显示与报警。门禁管理系统安装在屏蔽厅门之外，通过两个进出IC卡读写器和一次只能进出一人的十字

收稿日期：2003-11-11

基金项目：国家大科学工程EAST项目支持（U1070010）

作者简介：柴竹新（1962－），男，中国科学院等离子体物理研究所博士生、从事核聚变反应堆辐射安全及电子工程等方面的研究

旋转门识别进出人数[4]，并向 RPC 提供厅内是否有人信息(Z)，同时接受来自 RPC 的输出变量——厅内是否允许进入(Y)。EAST 运行控制系统是 EAST 的总控系统，EAST 安全巡检与开关机控制是其任务之一，它向 RPC 提供准备开机信息(S)和模拟量 EAST 的放电电流(P′)，后者供 RPC 判断 EAST 是否正在放电(P)；同时 RPC 向 EAST 运行控制系统提供输出变量辐射安全信息(D)和切断启动电源命令(Q)，其中 D 用于运行控制系统判断 EAST 是否应当关机，Q 用于强制性不允许开机。屏蔽厅内停机 γ 剂量率监测系统向 RPC 提供 EAST 刚停机后一段时间厅内 γ 剂量率(B′)[5]，以及供 RPC 判断停机剂量率是否衰减到了允许值(B)。屏蔽门电力拖动系统是一个功率电机驱动的速度和位置伺服系统，用于拖动在双轨上平行移动的质量约几 t 的屏蔽门，RPC 给它的是屏蔽门开关命令(U)。厅内设置 5 个相同的开关门按钮或紧急按钮(K)；厅外设置一个锁控开关(W)用于从厅外开关门控制[6]，钥匙只能在锁上时才能拔下，厅内外部都能发出开关门信号，但最终由 RPC 综合决定。厅内还设 4 个跟踪检查按钮安装在四处，在 EAST 启动前，管理员必须进入厅内四处检查无人后并逐个按下按钮(C)，这是 EAST 启动的必要条件之一。屏蔽门外和门禁管理系统之间还设置一个紧急出口，此门只能从内部打开，紧急出口和屏蔽门上都安装门磁以供 RPC 监测双门的开闭(E 和 X)。另外为防火灾在屏蔽门附近安装温度(T′)传感器以监测屏蔽门温度是否超标(T)。

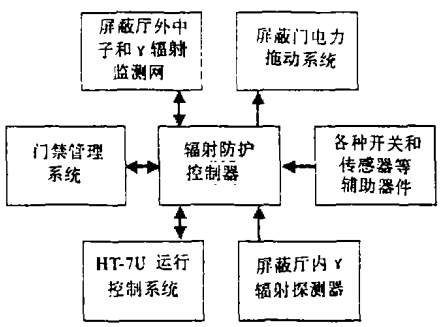

图 1　辐射防护控制系统结构图

RPC 的输入输出变量：

系统输入变量

运行时环境辐射剂量率超标 A=1

开机后厅内辐射剂量率超标 B=1

跟踪检查按钮按下 C=1

厅内开门按钮或紧急按钮按下 K=1

停机安全参考延时到 N=1

厅内有人 Z=1

紧急出口门开 E=1

厅外屏蔽门锁开 W=1

人工密码复位 R=1

屏蔽门开 X=1

HT-7U 在运行 P=1

有准备开机信号 S=1

开机延时准备时间到 G=1

屏蔽门附近温度超标 T=1

系统输出变量

厅内不允许进入 Y=1

辐射防护不安全 D=1

切断启动电源 Q=1

屏蔽门关门命令 U=1

2　RPC 硬件设计

RPC 的硬件结构如图 2 所示，其核心 C8051F020 单片机是完全集成的 100 脚高速混合信号系统级芯片。具有内置 64k FLASH 程序存储器和 4k XRAM、8 路 12 位 A/D、2 个 UARTs、SPL、SMBus/I2C、5 个 16 位定时器、可编程计数器阵列(PCA)、比较器、电压基准等，同时具有通过 JTAG 接口进行非侵入式全速在系统调试的能力。以它为核心组成的 RPC 具有集成度高、接口简洁、高可靠性、调试方便等优点。液晶模块 LCM12864 用于显示系统菜单。另设计 1 个 7 按键键盘，功能为菜单、增加、减少、左移、右移、确定、返回等 7 键。C8051F020 的串口经光电隔离后由 MAM233 芯片接入环境辐射监测网。时钟芯片 DS1302 为系统提供电池备份的不掉电时钟。所有系统输入变量都经过光电隔离及调理后接入 C8051F020，其中模拟量 P′由霍尔元件线性电压隔离模块 LV28-P 隔离，P′和 T′由 C8051F020 内部的 12 位 A/D 转换器采集。厅内 γ 剂量率监测仪[7]发出的是 20mA 电流环信号，这个脉冲量 B′由 C8051F020 内部的高速计数器采集。系统 4 个输出变量(Y、D、Q、U)经 7407 驱动后由 5 路继电器和指示灯输出和指示，其中 U 变量是两路冗余输出。

3　RPC 的菜单及状态机设计

3.1　菜单设计

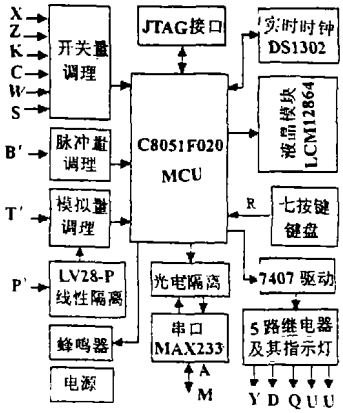

图 2　RPC 硬件结构图

为方便管理员的管理和操作，RPC 通过液晶模块设置了一个三级菜单：一级菜单为工作状态、参数设置、事件记录、实时时钟；二级菜单中工作状态项包括了所有输入输出变量显示，参数设置项包括参数设置密码、辐射阈值设置、系统是否复位、停机安全延时设置等项，事件记录项包括系统锁死原因、按钮事件、状态转移事件等，实时时钟项包括时钟的显示与修改等项；三级菜单由于烦琐，这里不再赘述。

3.2　状态机设计

状态机是整个辐射防护控制的核心软件。RPC 的工作状态共分为 4 类：EAST 运行态、正常停机态、准备启动态和系统锁定态。其中又细分为停机态 3 种，准备态 4 种和锁定态 2 种，见图 3。在 EAST 正常停机后系统处在停机态 1 位置，此时厅门闭合，不允许进人，只有事先在 RPC 菜单中设置的停机安全参考延时时间到了以后(N＝1)，并且厅内停机辐射剂量率衰减到了安全值(B＝0)，同时 EAST 不再准备启动(S＝0)，这时状态才转移到停机状态 2，门仍闭合。此时门禁系统允许打卡进人，若厅内外有人开门，状态则转移到停机态 3，屏蔽门开启。人进入厅内后，只有厅内有人，厅外锁控开关则不起作用，即他人无法从厅外关门除非厅内无人，或厅内人自己从里边关门，这时状态才可返回到停机态 2。在停机态 3 时，若运行控制系统通知 RPC："EAST 准备启动"，则状态转移到准备态 1，此时管理员拔下钥匙可进入大厅。当管理员检查厅内无人时，必须至少按下安装在四处的跟踪检查按钮各一次，并且准备启动信号仍然存在，状态才能转移到准备态 2。这个过程实质上是强迫管理员必须亲临现场检查确保无人的过程。在准备态 2，管理员出大厅，在门口用钥匙将锁控开关闭合，并且自己打卡出门禁系统，同时还要满足厅内开关门按钮或紧急按钮自从准备态以来没被按过，屏蔽门附近温度没有超标，紧急出口门闭合，准备启动信号仍然存在，厅内无人等这几项条件，状态才转移到准备态 3，这时，屏蔽门关闭。在准备态 1～3 状态，只要准备启动信号撤消，状态仍返回到停机

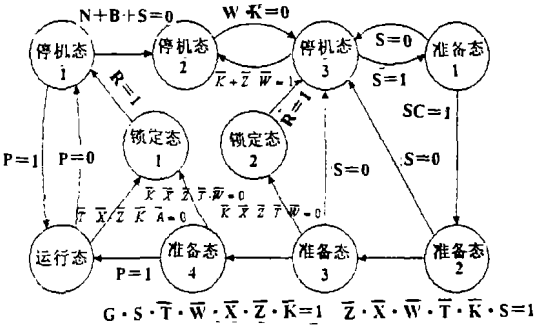

图 3　状态机图

态 3。在准备态 3。系统开始进行启动前的延时等待，这期间如果有任何意外不安全事件发生，如厅内紧急按钮被按下，屏蔽门附近温度超标，厅内有人，厅外锁控开关被打开，屏蔽门打开等，则状态立即转移到锁定态 2，此时启动电源切断，运行控制系统被通知不安全，屏蔽门处于开态，等待人工检查，只有当管理员现场逐个排除所有不安全因素后，才可通过 RPC 输入密码后将系统复位，此时系统返回到停机态 3。若在准备态 3 的延时等待期间没有任何意外不安全事件发生，且延时等待时间到(G)，则状态转移到准备态 4。此时启动电源被接通，运行控制系统被通知可以运行，RPC 若检测到有等离子体电流，则状态转移到运行态。

在准备态 4 和运行态期间，若有任何意外不安全事件发生，其中包括运行期间环境辐射剂量率超标，则状态都转移到锁定态 1。此时运行控制系统被通知不安全，但是否停机由运行控制系统决定。锁定态 1 的人工复位检查过程和锁定态 2 相同，只是复位后的状态是停机态 1。运行态和停机态 1 的互相切换由是否检测到等离子体电流决定，这是为 EAST 两次放电间隔较短，人不开启屏蔽门进入大厅而设计的。在停机态 3、准备态 1、2 和锁定态 2，屏蔽门开启，其他态则都是闭合的。各状态期间的系统输出变量值见表 1。

表 1 系统状态输出变量表

输出	运行态	停机态			准备态				锁定态	
		1	2	3	1	2	3	4	1	2
Y	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0
D	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1
U	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0
Q	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1

4 RPC 的高可靠性设计

为将辐射事故降到最低，RPC 的设计除了逻辑上的冗余和严密外，还必须有硬件的高度可靠性。为此，在 RPC 的设计上采用通常所有的可靠性措施，这包括看家狗、软件陷阱、数模电源分开并一点接地、MCU 电气隔离、大面积覆地、器件空脚上下拉、I/O 口保护、继电器灭弧和系统电磁屏蔽等。除此之外，还特别采取系统板级的硬件三冗余设计，见图 4。

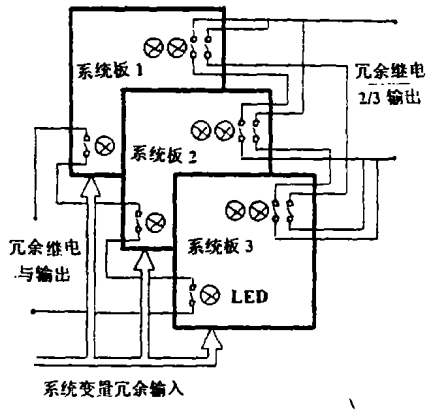

图 4 硬件三冗余及其继电器输出逻辑

RPC 由 3 个相同的系统板组成，设计成当任意一个系统板出现故障时，系统的输出变量不受影响或至少是安全的，事后管理员更换故障的系统板即可。而故障的实时判断不是由第 4 方电路完成的，而是 3 个系统板本身继电逻辑输出的结果，之所以这样是因为传统的故障判断电路本身仍有可能出现故障。原理是：系统的输入变量同时输入 3 个系统板，而每个系统板的 4 个输出变量(Y、D、Q、U)分别通过冗余继电逻辑与输出以及冗余继电 2/3 函数输出，其中 Y、D、Q 三变量根据失效保护原则为继电器常开态有效，分别采用继电逻辑与输出。当任意一个系统板故障时，输出变量仍正确或输出有效(逻辑 1)，而开关门信号 U 的 0、1 态具有同等安全意义，因而采用冗余继电 2/3 函数输出，函数为

$$U = U_{21} + U_{22}U_{31} + U_{32}U_{12}$$

其中 U_{ij} 的 i 表示 3 个系统板，j 表示同一系统板 U 变量的两冗余输出。这个函数意味着 3 个系统板中的任何一个故障，输出变量 U 仍正确。由于继电输出逻辑仅通过连线实现而无需集成门电路，不存在故障判断电路发生故障的可能性。每一路继电器输出都对应一个指示灯，根据一个变量的 3 个指示灯(U 变量有 6 个指示灯)的不一致性即可判断出故障的系统板。另外，3 个系统板的 3 个串口都接入屏蔽厅外中子和 γ 辐射监测网上的一个工控机节点，它们向网上传输变量 M(RPC 的运行状态数据包)由这个工控机节点根据 2/3 多数原则用软件决定。

5 总结

基于核聚变装置 EAST 的工程需要，设计的高可靠性辐射防护控制系统可确保人在任何情况下都不会误入高辐射区，同时可实时制止对环境潜在的辐射泄漏事故的发生。系统的辐射防护不依赖人遵守制服的自觉性，而只依赖严密的逻辑控制和系统的高可靠性。以高性能 C8051F020 为核心组成工业测控系统，同时采取各种可靠性措施尤其是系统板的三冗余，可确保系统安全运行。系统采用 KELL C 语言编程，程序容量达 15k。系统运行正常。

参考文献：

[1]Weng PD,et al. The engineering design of the HT-7U Tokamak[J]. Fusion Eng & Des, 2001, 58/59:827.

[2]黄群英. HT-7U 核聚变实验装置屏蔽设计[J]. 核科学与工程,2001,21(1):79.

[3]Huang Qunying, et al. Analysis of the radiation shield of HT-7U Tokamak[C]. Proc of the Seventh China-Japan Symposium on Materials for Advanced Energy Systems and Fission & Fusion Eng, Lanzhou, July 2002.

[4]Kawano T. Development of an access control system for the LHD experimental hall[C]. Proc of IRPA 10, Hiroshima, May 2000, P-6a-315.

[5]Akiyama I. Radiation protection in the large Tokamak device (JT-60) facility[C]. Proc of IRPA 10, Hiroshima, May 2000, P-6a-314.

[6]李裕熊,等. 合肥国家同步辐射实验室人员辐射安全联锁系统[J]. 辐射防护,1992,12(1):25.

[7]Li Jian-ping, et al. Intelligent environmental neutron and gamma monitoring system[J]. Chinese Physics, 9(2):

(下转第 43 页,Continued on page 43)

都有待于进一步的研究。

参考文献：

[1]康耀红，等. 数据融合理论与应用[M]. 西安：西安电子科技大学出版社，1997

[2]刘同明，等. 数据融合技术及其应用[M]. 北京：国防工业出版社，1998

[3]Waltz E，et al. Mutisensor Data Fusion[M]. New York：Artech House，INC.，1990.

[4]Varma H ，et al. Confusion in data fusion[J]. INT J Remote Sensing，2003，24(4)：627.

[5]Klein Lawrence A. Sensor and Data Fusion Concepts and Applications[C]. SPIE-The International Society for Optical Engineering，1999.

[6]Brooks RR，et al. Multi-Sensor Fusion：Fundamentals and Applications with Software[M]. Prentice Hall PTR，1997.

[7]Hall DL，et al. An Introduction to Multisensor Data Fusion[J]. Proceedings of the IEEE，1997，85(1)：6.

[8]Ramachandran RP，et al. Speaker Recognition——general classifier approaches and data fusion methods. Pattern Recognition 35 ，2002，2801.

[9]Majumder S，et al. Multisensor data fusion for underwater nagvigation[J]. Robotics and Systems，2001，35：97.

[10]IDC Documentation，IDC Processing of Seismic，Hydroacoustic，and Intrasonic Data，March 1999 IDC-5. 2. 2

Data fusion for CTBT verification

TANG Heng-zhuan[1,2]，REN Ming-qiang[2]，LI Zhen-fu[2]

(1 Department of Engineering Physics of Tsinghua University，Beijing 100084，China；
2 Northwest Institute of Nuclear Technology，Xi'an of Shaanxi Prov. 710024，China)

Abstract The aim of data fusion is to cooperate with and fusion multi-sensor or multi-information that draws a nicety and believable conclusion. The paper describes a generic progress of data fusion，and the definition and structure model is presented. Then the three level's principle and the algorithm are summarized. Based on the background of CTBT verification，the concept，theory and content of data fusion for CTBT verification are discussed.

Key words：data fusion；multi-information fusion；CTBT；CTBT verification

---

(上接第 31 页，Continued from page 31)

High reliability radiation protection control system for fusion device EAST

CHAI Zhu-xin[1]，WU Yi-can[1]，LIU Bo-xue[2]

(1 Institute of Plasma Physics，CAS，P. O. Box 1126，Hefei of Anhui Prov. 230031，China；
2 Research Institute of Chemical Defense，P. O. Box 1044-200，Beijing 102205，China)

Abstract Three-system-boards redundancy hardware，menu and status machine were developed，to ensure anyone can not enter the area of high radiation in any case，and to stop the potential radiation leakage in time. The measured and controlled objects of the system are environment radiation monitoring network，access control system，fusion operation control system，shielding door pull system，gamma monitor in shield building as well as other facilities. A fault tolerance way of three-system-boards redundancy hardware was designed. The system output variables are still right or at least safety，even if without fault diagnostic circuit，should a fault occur in one system board.

Key words：radiation safety；micro controller unit；Three-system-boards redundancy；status machine