

# 基于 FSM 的紧凑型回旋加速器控制系统研究

胡 啸<sup>a</sup>, 秦 斌<sup>a</sup>, 李 冬<sup>a</sup>, 胡桐宁<sup>b</sup>

(华中科技大学 a. 电气与电子工程学院; b. 电子与信息工程系, 武汉 430074)

**摘要:** 针对 CYCHU-10 紧凑型低能强流回旋加速器的实际运行需求, 基于有限状态机理论, 提出一种层次化的加速器控制系统设计方法, 在 Simulink 环境下利用 Stateflow 完成系统建模和仿真。仿真结果表明, 该设计能全面反映加速器中的动态逻辑关系, 可用性 & 可靠性较强。

**关键词:** 有限状态机; CYCHU-10 回旋加速器; 控制系统; Stateflow 工具; 系统建模

## Research on Control System of Compact Cyclotron Based on Finite State Machine

HU Xiao<sup>a</sup>, QIN Bin<sup>a</sup>, LI Dong<sup>a</sup>, HU Tong-ning<sup>b</sup>

(a. College of Electronic and Electric Engineering; b. Department of Electronics and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**【Abstract】** Aiming at the actual operation requirements of CYCHU-10 cyclotron, based on Finite State Machine(FSM) theory, this paper proposes a hierarchic design method for cyclotron control system, models and simulates the system with Stateflow under Simulink environment. Simulation result indicates that it is easy to reflect the dynamic logic of a complex system with the method, and it has strong usability and reliability.

**【Key words】** Finite State Machine(FSM); CYCHU-10 cyclotron; control system; Stateflow tool; system modeling

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2011.14.085

### 1 概述

在回旋加速器控制系统设计过程中, 核心问题是如何保证控制系统的高可用性(High Availability, HA), 包括系统设计的 HA 研究、保证可靠运行的 HA 研究以及失效模型分析、失效检测算法和避免冲突策略的研究<sup>[1]</sup>。有限状态机(Finite State Machine, FSM)作为一种基于状态转换和事件驱动建模仿真方法, 能够简单直观地描述系统状态间的关系以及动态特性, 在回旋加速器实时控制系统设计研究中得到了广泛的应用<sup>[2]</sup>。德国 TESLA Test Facility 直线加速器的分布式面向对象控制系统中集成的 FSM 工具对简化加速器的自动化操作起到了重要的作用<sup>[3]</sup>。欧洲核子研究中心也采用 FSM 结构对 ALICE 探测器各子系统进行了有效的设计和集成<sup>[4]</sup>。

本文在利用 Stateflow 对 CYCHU-10 紧凑型低能强流回旋加速器各子系统及其相关设备建立有限状态机<sup>[5-6]</sup>模型的基础上进行了控制系统设计, 并通过系统级仿真, 分析验证了控制逻辑的可用性和可靠性, 为实际控制系统的实现奠定了基础。

### 2 CYCHU-10 回旋加速器控制逻辑系统建模

#### 2.1 系统建模方法

一个典型的回旋加速器子系统有限状态机模型包括 6 个状态, 逻辑关系如图 1 所示, 在实际建模中只需根据具体情况做相应改动。CYCHU-10 回旋加速器控制逻辑是通过各子系统的正确运转来体现的, 所以, 需要运用层次化的建模方法在对加速器各子系统准确描述的基础上将整个有限状态系统分为若干模型片段, 分别建立 Stateflow 模型。首先定义子系统的各种状态, 其次设计数据接口并穷举系统运行中可能发生的事件, 最后将事件、数据以及状态通过逻辑语言和符

号联系起来。各子控制系统模型建立完毕后, 就具备了总控系统实现的条件, 需要重新回归到系统层面设计总体逻辑并验证子系统间的协调运行。

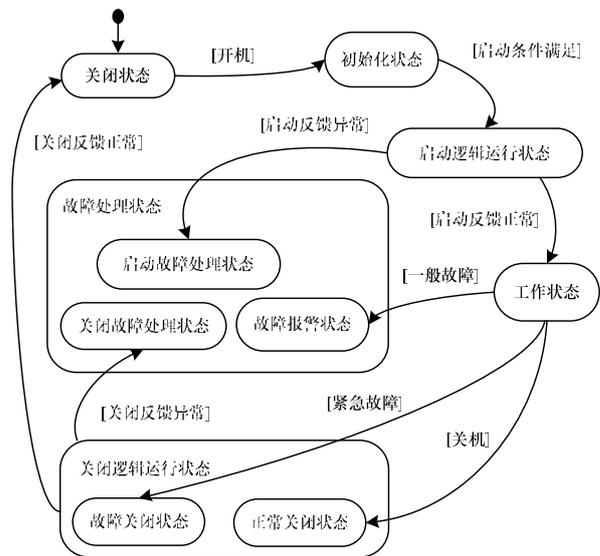


图 1 加速器子系统 Stateflow 原理图

#### 2.2 控制逻辑需求

加速器控制逻辑需要实现以下功能:

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(10905025)

**作者简介:** 胡 啸(1986—), 男, 硕士, 主研方向: 回旋加速器控制系统设计; 秦 斌, 讲师、博士; 李 冬、胡桐宁, 博士研究生

**收稿日期:** 2010-12-20 **E-mail:** huxiao\_hust@163.com

- (1)在满足安全联锁条件下的一键自动化运行;
- (2)保持加速器运行在正常状态;
- (3)针对各种要求调整设备,使加速器达到最佳状态;
- (4)通过束流诊断和设备调整确保高亮度、高稳定性、长寿命的束流产生;
- (5)能够对各种异常情况做出适当的反应。

根据上述需求,主控逻辑分解为面向操作人员的自动运行逻辑以及面向工程人员的手动维护逻辑两部分,前者完成回旋加速器的自启动,具体流程如图2所示;后者屏蔽自动模式,允许手动操作。这2类逻辑又是建立在子系统互锁和子系统错误报警逻辑基础之上的,前者用于验证子系统各设备启动是否满足前提条件(表1),避免错误动作;后者用于正确处理设备运行中的故障,保证安全运行。

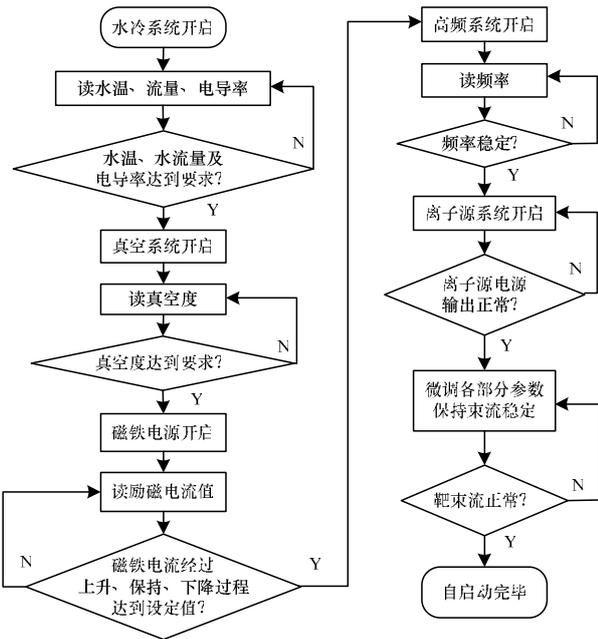


图2 加速器自启动流程

表1 加速器子系统互锁逻辑

子系统	启动联锁
真空系统	腔体关闭,扩散泵温度正常
磁铁系统	磁铁门关闭,水冷启动,水温正常
高频系统	与水冷、真空、磁铁、离子源进行系统互锁
离子源系统	与水冷、真空、磁铁、高频进行系统互锁

### 2.3 控制系统 FSM 模型

CYCHU-10 回旋加速器控制系统有限状态机模型对真空、水冷、磁铁电源等7个子系统实行并行控制,通过条件、事件和动作的逻辑组合,实时执行子系统不同状态之间的转换,完成子系统各自控制逻辑在总控系统层面的整合。控制系统 FSM 模型如图3所示,其中包含4个并行的状态,manual\_mode 状态通过数据接口响应 Simulink 中的手动指令,同时包括了对子系统不同运行状态的描述,从中可以观察每个子系统的运行状况;auto\_mode 状态屏蔽手动指令,将预定的顺序控制逻辑通过事件广播,完成对各子系统状态的自动控制;subsystem\_interlock 状态设置了子系统间的互锁,由一系列限制条件组成,在 Stateflow 中,这些条件既可以通过用于转移决策的逻辑判断语句来实现,也可运用真值表来简化逻辑系统的设计,特别是简化系统中根据若干条件进行决策判断的分支结构,比如可以通过离子源电源通电状态的真值表来描述离子源电源在自动和手动2种模式下不同

的开启条件; subsystem\_error 状态描述了每个子系统运行中可能出现的故障,通过触发过零信号模拟故障的发生,以便验证控制逻辑的响应情况。

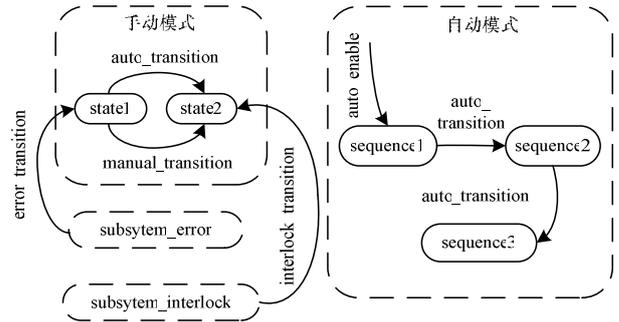


图3 控制系统 FSM 模型

### 3 系统仿真方法和结果

利用 Stateflow 对各子系统建立有限状态机模型的过程实质上是利用自然语言以及逻辑表达式将回旋加速器控制逻辑表述为一种事件响应系统的过程,目的是使其能够通过 Simulink 提供的外部事件和数据接口进行灵活的系统级仿真,验证控制逻辑设计的有效性。图4是 Simulink 仿真界面的一部分,主要由 Stateflow 图块、包含图块的封装子系统以及过零信号发生器组成,核心部分是系统主逻辑状态框图,其中建立了加速器系统自动和手动的完整逻辑关系,除了磁铁电源外所有子系统的正常状态都并行运行在此主框图内,是仿真结果的主要输出窗口。在仿真界面中,主逻辑框图周围主要分布了各种联锁和错误检测的封装子系统,可以模拟各种联锁和错误的产生,相应的信号会输入主逻辑进行判断。磁铁电源的运行状态图位于主逻辑外部,仅仅通过数据接口相连,这与 CYCHU-10 加速器磁铁电源仅通过 RS232 接口与主控系统进行数据交换的实际结构是一致的。

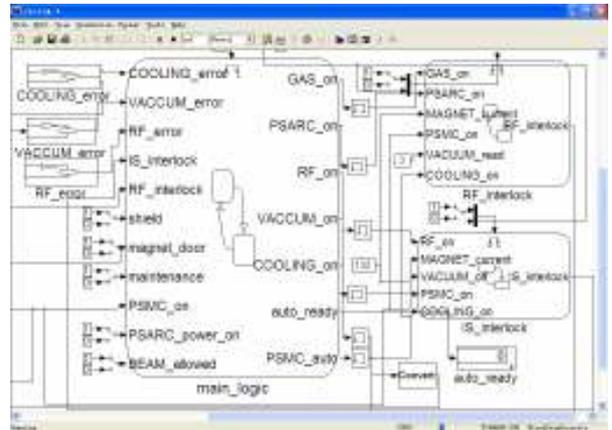


图4 Simulink 仿真界面

由于系统复杂、控件较多,为了全面验证控制逻辑的可用性,在自动和手动维护2种模式下分别验证系统的顺序联锁和故障处理这2个最关键的逻辑功能。

#### 3.1 顺序联锁

在实际正常运行中,系统在开启后往往进入自动模式,无需人工干预就可以完成全部子系统的顺序启动与关闭,因此,需要通过仿真首先确保自动逻辑的正确性。仿真前设置停止时间为无穷大,使用定步长离散求解器,仿真开始后在 Simulink 中触发 auto\_on 事件开启自动模式,各系统开始按照既定顺序完成自动动作,只有前提子系统启动成功,后续子系统的启动状态才能被激活。auto\_mode 子状态图中显示

了自动逻辑的执行情况,而在主逻辑其他子状态图中可以观察到各子系统的运行状态。仿真结果表明,自启动逻辑完成后(进入 auto\_OK 状态),在其控制下,加速器各子系统都能进入正常运行状态,满足加速器控制系统需求。

在控制系统设计阶段,手动维护逻辑的设计和仿真更关键,因为此种模式的可控性更强,能够充分验证系统每个流程的正确性,而自动运行逻辑可以在手动维护状态的基础上加以实现。将 maintenance 数据接口置 1,系统进入手动维护模式,所有系统设备需要在仿真面板上人工开启。在仿真过程中,按照正确的启动步骤操作时,各子系统才会给予响应,并通过数据接口显示启动状态信息。为了验证顺序连锁的效果,模拟了一些典型的非法操作,比如,在没有打开水冷冷的情况下试图开启磁铁电源,在系统正常运行时试图关闭水冷,在没有关闭真空腔时试图打开真空泵,在屏蔽门开启时试图打开离子源电源。另外,在维护模式中,高频系统和离子源系统处于互锁状态,仿真时还特别检验了 2 个子系统是否可能同时开启。仿真结果表明,系统可以屏蔽错误指令,保证设备的正确启动。

### 3.2 故障处理

评判一个过程控制系统是否安全可靠,主要是评价这个系统能否在出现故障时及时采取正确的措施。加速器满足顺序连锁后会进入正常运行状态,但在运行中可能遇到各种故障,建模时已经对各系统的典型故障进行了归纳,并且主要通过 Simulink 仿真界面上的 COOLING\_error、VACCUM\_error 和 RF\_error 3 个封装子系统来控制,因为这 3 个子系统相比磁铁电源和离子源,错误类型比较复杂。封装子系统主要包括 4 个部分:由 Stateflow 描述的故障处理控制器,不同故障的触发开关,关键信号输出接口以及触发时钟。仿真过程中先将各系统顺序开启,在系统稳定运行后以手动开关模拟各种错误的发生,观察控制系统的响应。控制系统相关响应信号通过多窗口示波器实时反映。比如对于水冷系统,触发一个磁铁电源水流量低的事件,通过示波器模块观察各信号波形,其中,触发时钟信号选用周期 20 s、占空比 50% 的方波,而故障事件的发生是通过逻辑值 0 到 1 的上升沿跳变来反映的,该故障事件在将相关信号置 0、传递到仿真界面中的磁铁电源模块并使磁铁电源进入水流报警状态的同时,通过广播机制激活水冷错误总信号,使其逻辑值置 1,使主

逻辑模块中的水冷系统进入报警状态,等待工作人员干预,若能解决故障,可以通过 RESET 逻辑值上升沿事件使系统返回正常状态,若没有采取补救措施或子系统复位后故障事件仍然发生,则在延时后广播 EMERGENCY 事件,确保高频及离子源这 2 个重要系统关闭。在对真空和高频故障处理系统的仿真中,分别模拟扩散泵温度开关断开和栅极供电故障,结果表明,控制系统能有效执行相应的处理流程。

### 4 结束语

本文将有限状态机理论应用于 CYCHU-10 回旋加速器控制系统的设计中,探讨了适用于此类大规模复杂逻辑系统建模的一般性方法,并采用 Stateflow 工具箱实现了系统的构建,在此模型框架下通过仿真验证了控制系统在各种可能情况下的有效性,得到以下结论:(1)基于有限状态机的控制系统模型在自动和手动模式下均能保证对 CYCHU-10 回旋加速器的有效控制。(2)Stateflow 图形化的建模和仿真环境具有澄清和反映复杂系统动态逻辑关系的能力,对于构建类似回旋加速器这样复杂集成设备的逻辑控制系统很有帮助。

#### 参考文献

- [1] 赵籍九. 加速器控制系统及其进展[J]. 中国物理 C, 2008, 32(增刊): 139-141.
- [2] Cichalewski W, Koseda B, Napieralski A, et al. The Finite State Machine for Klystron Operation for VUV-FEL and European X-FEL Linear Accelerator[C]//Proc. of 2004 International Linear Accelerator Conference. Lübeck, Germany: [s. n.], 2004: 510-512.
- [3] Ayvazyan K V, Rehlich S, Simrock N, et al. Finite State Machine Implementation to Automate RF Operation at the TESLA Test Facility[C]//Proc. of 2001 Particle Accelerator Conference. Chicago, USA: [s. n.], 2001: 286-288.
- [4] de Giacinto C, Augustinus A, Boccioli M, et al. Finite State Machines for Integration and Control in ALICE[C]//Proc. of International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems. Knoxville, USA: [s. n.], 2007: 650-652.
- [5] 张合生, 金玉红, 李 杰, 等. 基于 FSM 与事件驱动的卫星管理软件设计[J]. 计算机工程, 2009, 35(21): 280-282.
- [6] Harel D. Statecharts: A Visual Formalism for Complex System[J]. Science of Computer Programming, 1987, 8(3): 231-274.

编辑 张 帆

(上接第 250 页)

#### 参考文献

- [1] 童 赜, 边计年. 片上系统设计中事务级建模技术综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2007, 19(11): 1365-1371.
- [2] The Open SystemC Initiative. OSCI TLM-2.0 User Manual[EB/OL]. (2008-06-01). <http://www.systemc.org>.
- [3] SPARC International Inc.. The SPARC Architecture Manual Version 8[EB/OL]. (1992-10-07). <http://www.sparc.org>.
- [4] Cai Lukai, Gajski D. Transaction Level Modeling: An Overview[C]//Proc. of the 1st IEEE/ACM/IFIP International Conference on Hardware/Software Codesign and System Synthesis. Newport Beach, USA: [s. n.], 2003: 19-24.

- [5] Nohl A, Braun G, Schliebusch O, et al. A Universal Technique for Fast and Flexible Instruction-set Architecture Simulation[C]//Proc. of the 39th Annual Design Automation Conference. New York, USA: [s. n.], 2002: 22-27.
- [6] Reshadi M, Mishra P, Dutt N. Instruction Set Compiled Simulation: A Technique for Fast and Flexible Instruction Set Simulation[C]//Proc. of the 40th Annual Design Automation Conference. New York, USA: [s. n.], 2003: 758-763.
- [7] 蔡嵩松, 刘 奇, 王 剑, 等. 基于龙芯处理器的二进制翻译器优化[J]. 计算机工程, 2009, 35(7): 280-282.

编辑 任吉慧