

# 基于量子框架的喷气织机控制系统设计与开发

蔡盛盛<sup>1</sup>, 陈天丰<sup>2</sup>, 周祥清<sup>1,3</sup>, 董辉<sup>1</sup>, 吴祥<sup>1</sup>, 曹金瑞<sup>2</sup>

(1. 浙江工业大学 信息工程学院, 杭州 310023;

2. 浙江禾川科技股份有限公司, 浙江 衢州 324400;

3. 杭州展晖科技有限公司, 杭州 311400)

**摘要:** 纺织行业作为我国国民经济与社会发展的重要支柱产业, 需要实现进一步的智能化发展, 喷气织机作为纺织行业的关键织造设备, 在其中扮演着不可或缺的角色; 喷气织机控制系统作为其核心组成部分, 对织机的性能和智能化程度起着决定性的作用; 针对喷气织机工艺流程复杂和软件模块高耦合度的问题, 提出了一种基于量子框架的控制系统开发方案; 该方案结合了事件驱动型量子编程框架和面向活动对象的概念, 实现了喷气织机控制系统软件部分的分层设计, 解决了功能模块之间的耦合问题, 并降低了开发复杂度; 设计了 ARM+FPGA 双核控制器的控制系统软硬件架构, 开发了参数优化、安全监测等智能化功能, 搭建了实验平台, 对主要功能模块进行了测试, 实现了引纬电磁阀 10 ms 高压打开及 150 ms 低压保持, 验证了系统设计的可行性; 该系统具有良好的市场应用前景, 同时为喷气织机控制系统的设计与开发提供了有价值的参考。

**关键词:** 喷气织机; 控制系统; ARM; 量子框架; 事件驱动型编程; 活动对象

## Design and Development of Air-Jet Loom Control System Based on Quantum Framework

CAI Shengsheng<sup>1</sup>, CHEN Tianfeng<sup>2</sup>, ZHOU Xiangqing<sup>1,3</sup>, DONG Hui<sup>1</sup>,  
WU Xiang<sup>1</sup>, CAO Jinrui<sup>2</sup>

(1. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

2. Zhejiang Hechuan Technology Co., Ltd., Quzhou 324400, China;

3. Hangzhou Zhanhui Technology Co., Ltd., Hangzhou 311400, China)

**Abstract:** As a pivotal industry supporting China's national economy and social development, the textile industry requires further intelligent advancement. Air-jet looms, as crucial weaving equipment in the textile industry, play an indispensable role. As a core component, the control system of the air-jet loom has a decisive impact on its performance and level of intelligence. To address the challenges of complex air-jet loom processes and high coupling of software modules, a control system development approach based on a quantum framework is proposed. This approach combines the event-driven quantum programming framework and the concept of activity-oriented objects, achieves the layered design of the air-jet loom control system software, resolves the coupling issues between functional modules, and reduces development complexity. This paper designs the software and hardware architectures of the dual core control system with ARM and field-programmable gate array (FPGA), develops intelligent functionalities such as parameter optimization and safety monitoring, builds an experimental platform, tests major functional modules, achieves features such as 10 milliseconds of high-voltage opening and 150 milliseconds of low-voltage holding for electromagnetic valves, and verifies the feasibility of the system design. This system has a

收稿日期: 2024-04-19; 修回日期: 2024-05-26。

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB3301501)。

作者简介: 蔡盛盛(1998-), 男, 硕士研究生。

通讯作者: 周祥清(1994-), 男, 硕士研究生。

引用格式: 蔡盛盛, 陈天丰, 周祥清, 等. 基于量子框架的喷气织机控制系统设计与开发[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(6): 127

good application prospect of markets and provides valuable references for the design and development of air-jet loom control systems.

**Keywords:** air-jet loom; control system; ARM; quantum framework; event-driven programming; activity-oriented object

## 0 引言

纺织行业作为我国国民经济和社会发展的支柱产业<sup>[1]</sup>,在推动我国经济快速发展方面发挥了重要的作用。喷气织机以其高效和多样化的生产特点成为纺织行业中活跃且重要的织机设备之一。喷气织机控制系统作为喷气织机的核心组成部分,直接影响着喷气织机的智能化水平<sup>[2]</sup>。近年来,国外推出的新型织机控制系统采用了全新的硬件和软件系统,而非对原有系统进行改进<sup>[3]</sup>。相比之下,国内的喷气织机控制系统存在一定差距,还缺乏能耗分析和工艺参数的自动修正等智能化功能<sup>[4]</sup>。此外,作为嵌入式系统,喷气织机控制系统在开发过程中通常采用“超级循环+中断”的方式来控制各个任务模块,当系统功能模块增多时,控制系统的维护变得更加复杂。同时,使用常见的嵌入式操作系统通常需要较大的内存空间,这可能增加开发成本和人力成本负担。因此,开发一款易维护、智能化的喷气织机控制系统,具有较好的应用价值。

在国外,德国道尼尔采用 FT 总线设计了一套全新的织机控制系统,该系统能够快速、可靠且实时地传输大量设备数据,实现了对织机关键生产参数的控制和监测<sup>[5]</sup>。比利时必佳乐设计的喷气织机控制系统具有电子控制独立布边装置和自动修纬系统等功能,织机在纬停后能自动修复并重启,无须人工干预<sup>[6]</sup>。文献 [7] 采用了外设接口控制器 (PIC) 作为主控制器,设计了织机自动化控制方案,实现了对经纱和纬纱错误的自动检测,并能够进行自动纬纱补偿。目前,国内对喷气织机控制系统在这些功能方面的研究较少,文献 [8] 采用了 STM32+CPLD 控制方案,在软件编程中运用了原理图和硬件描述语言完成复杂数字逻辑电路设计,缩短了喷气织机控制系统的设计开发周期。文献 [9] 采用了 ARM+FPGA 控制方案,利用了 FreeRTOS 任务调度机制,提高了系统实时响应能力和品种适应性。文献 [10] 采用了 PLC 控制方案,设计了以 PLC 为核心的分布式控制系统,提升了织机的工作稳定性。文献 [11] 采用了 ARM+PLC 控制方案,以 STM32 为主控芯片,配合 PLC 协同工作,实现了对喷气织机引纬控制系统的高速、稳定控制。分析喷气织机控制系统的国内外研究现状可知,国外的研究更加注重系统整体性能的提升,国内则注重于硬件架构的搭建和基本软件功能的实现。

量子框架是基于事件驱动型的嵌入式系统框架,负

责嵌入式系统资源分配、任务调度以及控制、协调并发活动。在国外,摩托罗拉、东芝和 NASA 等众多企业和机构已将量子框架应用于自身的嵌入式系统开发<sup>[12]</sup>。在国内,文献 [13] 基于量子框架提出了一种数控齿轮倒角机控制系统的设计方法,提高了齿轮倒角过程的自动化程度和软件框架结构的复用率。文献 [14] 提出了一种基于量子编程框架的星载控制软件在轨动态重构方法,解决了星载控制软件可在轨动态重构问题,证明了所提出的在轨重构方法系统占用内存小、平台依赖性弱、代码可复用性强。文献 [15] 针对机器人控制系统内部行为状态的转换,提出了基于量子框架的六自由度机器人控制系统的软件开发,证明了该方法能有效地降低了机器人控制系统软件的设计难度,提高了系统可靠性和可重构性。此外,量子框架仅需占用约 8 kB 的 ROM 和约 1 kB 的 RAM 空间,降低了传统嵌入式系统的资源需求,解决当前嵌入式系统开发过程中常见的资源瓶颈问题。

综合前述对喷气织机控制系统国内外发展现状的调研分析及嵌入式系统开发中所面临的问题,本文提出了一种基于量子框架的喷气织机控制系统。首先,设计了 ARM+FPGA 双核微处理器的控制系统总体架构,利用 FPGA 出色的并行处理能力,将引纬电磁阀控制设计在 FPGA 端,实现对喷气织机的精确控制。其次,结合面向活动对象的概念,采用基于事件驱动型软件结构,设计了基于量子框架的控制系统软件体系结构,使得控制任务以模块化、高内聚、低耦合的方式运行,有效解决了模块之间耦合的问题,提高了系统的可靠性和易维护程度。最后,对控制系统软件功能进行设计,开发了安全检测、智能 8 色选纬和引纬工艺参数优化等智能功能,并进行测试验证,证明该控制系统方案具有较高的应用价值。

## 1 控制系统总体架构

设计喷气织机控制系统的总体架构时,主要涉及两个方面:硬件架构设计和软件架构设计。

1) 硬件架构设计方面,需要考虑控制器的选型、I/O 模块、电磁阀和电源等布局因素,以确保控制系统具备足够的计算性能和扩展性,满足织机复杂工艺流程的要求。同时,还需要针对织机各关键部件的实时监测和精确控制,设计相应的传感器接口和执行机构驱动电路。

2) 软件架构设计方面,需要根据织机工艺流程的

特点, 采用合理的任务调度机制和数据通信机制, 合理规划软件功能模块, 降低模块间的耦合度, 提高系统的可维护性。

### 1.1 硬件架构设计

喷气织机硬件架构设计主要包括两个部分: ARM + FPGA。前者基于 ST 公司的 STM32F407 微处理器进行设计开发, 后者基于 Efinix 公司的 Trion T20 微处理器进行设计开发, 两者通过 FSMC 总线进行数据传输。ARM 部分包含有数据存储、探纬、I/O 信号输入输出、人机交互、伺服系统、编码器、电源转换等模块; FPGA 包含有电源模块、编码器模块、电磁阀模块等模块。控制系统硬件方案设计如图 1 所示。

I/O 接口模块的硬件功能为实现面板按钮、传感器报警等信号的输入接收, 以及刹车控制信号、灯塔信号等控制信号的输出。通过级联 6 片 74HC165 芯片将多个并行输入信号转换为串行输入信号。同时, 级联 2 片 74HC595 芯片并行输出控制信号。ARM 与各移位寄存器的通讯采用硬件 SPI 协议, 此设计方式有效地减少主控芯片的引脚数量, 节约 I/O 资源, 高效地完成输入信号的处理和输出信号的控制。

电磁阀模块共包含 48 组电磁阀及电磁阀驱动电路。利用 FPGA 的高集成度和可编程特性实现各组电磁阀紧密配合, 完成高质量的引纬过程。电磁阀驱动输入信号分成两路, 分别经过 N/PMOS 管。其中一路驱动信号导通时电压达到 51 V, 控制电磁阀打开。另一路驱动信号导通时电压达到 12 V, 控制电磁阀保持开启状态, 实现电磁阀的高压打开和低压保持, 确保纬纱顺利通过引纬通道。主控系统以此准确地控制引纬运动, 提高工作效率。

伺服系统用于控制织机电机送经和电子卷曲功能。为了提高信号传输的稳定性和抗干扰能力, 在 ARM 微控制器输出端和伺服系统之间增加 AM26C31INSR 差分线驱动器芯片。该芯片将逻辑电平的信号转换为差分信号, 有效减少信号传输过程中的噪声和失真, 确保芯

片的稳定工作和安全性能。此外, 为避免主控部分软硬件系统受到伺服驱动器产生的电磁干扰, 在芯片输出端增加一路共模电感, 同时设计 RC 低通滤波电路, 滤除毛刺信号。

人机交互模块用于显示和设置织机工作过程中的各类参数, 记录相关报表数据。通过 RS-485 通信标准与主控模块进行实时通信。

电源模块中的电源转换部分采用 SCT2430STER 同步降压 DCDC 转换器。该芯片输入电压范围为 3.8~40 V, 并且具备充足的耐压余量。其负载电流可达 3.5 A, 后级负载最大为 1 A。

### 1.2 软件架构设计

喷气织机在开口、引纬、打纬、送经、卷取 5 大运动的配合下进行织造工作, 喷气织机控制系统软件架构设计如图 2 所示, 主要由电子送经电子卷曲模块(张力传感信号、电子送经卷曲信号)、引纬模块(编码器信号、引纬电磁阀)、探纬模块(探纬信号)、传感器信号输入模块(按钮信号、故障信号)、控制信号输出模块(刹车信号、电机控制信号)等组成。其中 ARM 部分负责协调五大运动以保证制造过程的连续性, 并负责输入输出信号采集处理工作、探纬模块信号采集、电子送经电子卷曲模块的控制, 以及 HMI (Human Machine Interface) 人机交互接口界面通讯存储和实时故障的处理等任务。FPGA 部分负责引纬模块中引纬电磁阀的开关及角度检测等。二者之间通过 FSMC 总线进行数据传输。主控芯片在量子框架下建立织机事件任务调度的基础上, 进行实时任务处理, 保证了织机五大运动的协调性和实时性。

传感信号输入与控制信号输出模块以硬件 I/O 接口模块设计为基础, 实现 48 路并入串出的输入信号检测功能和 16 路串入并出的控制信号输出功能, ARM 端与控制芯片之间通过 SPI 通讯协议通讯, 以此提高系统的实时性, 确保了信号输入和控制信号输出的时效。

电子送经卷曲模块由 ARM 端依据工艺文件结合张

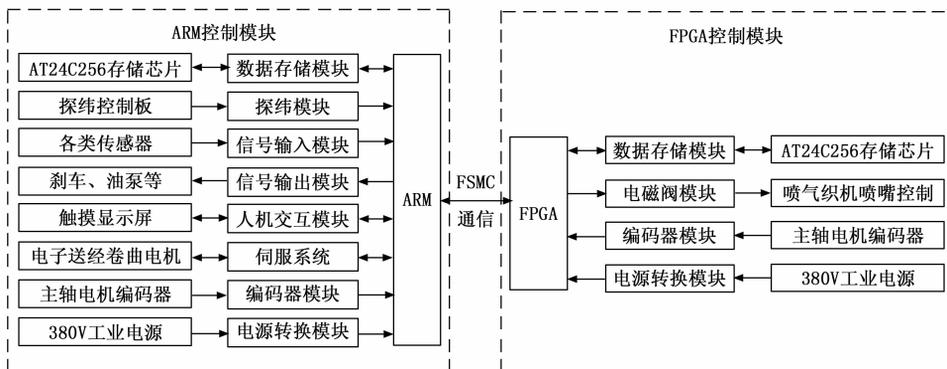


图 1 控制系统硬件架构

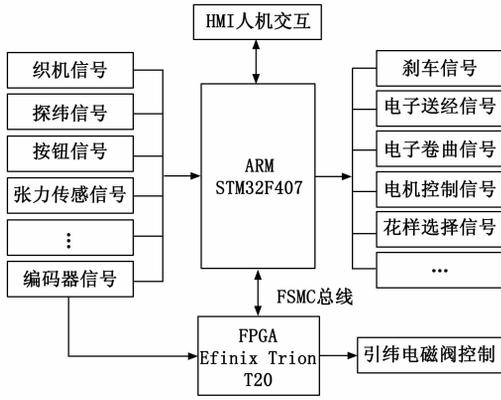


图 2 控制系统软件架构

力传感器组的监测反馈数据，确定送经量和卷曲量，转换成相应的脉冲量控制电子送经和电子卷曲伺服系统，实现电子送经和电子卷曲控制。脉冲输出模块发送六路 PWM 波以控制伺服系统，三路输出电机方向控制信号，其余三路输出脉冲数量信号。伺服电机功率为 0.74 kW，PWM 波脉冲频率为 200 kHz。

引纬电磁阀模块通过 HMI 设置引纬相关参数，ARM 端接收参数经处理后发送到 FPGA 端，由 FPGA 接收对比编码器信号并执行电磁阀开闭动作。探纬模块采用 56 kHz 方波驱动，实现 ARM 端接收探纬板脉冲输入信号并做纬线采样统计和采样异常报警停机动作。

编码器信号用于实时计算主轴角度数据，主控部分读取编码器角度数据协调处理织机五大运动。设计编码器 A、B 相与 FPGA 端连接，FPGA 读取当前角度数据后与根据用户设定参数对比控制电磁阀开闭，并通过 FSMC 总线将角度信息发送到 ARM 端。ARM 根据接收到的角度信息处理织机动作逻辑。编码器 Z 相与 ARM 端连接，ARM 使用外部中断方式接收 Z 信号并记录圈数信息，用于记录主轴电机三角接法/星形接法空启动圈数等。HMI 人机交互记录相关报表数据，用户能够对每部分功能模块进行单独设置参数。

## 2 基于量子框架的软件体系结构设计

量子框架来源于量子平台 (QP, quantum platform)，QP 由一系列轻量级的、开源的、基于状态机和事件驱动的框架所组成的，专门地服务于实时嵌入式 (RTE, real-time embedded) 系统<sup>[16]</sup>。量子平台由 4 个部分组成：符合统一建模语言 (UML, unified modeling language) 规范<sup>[17]</sup>的量子事件处理器 (QEP, quantum event processor)、可移植的实时量子框架 (QF, quantum framework)、微小的运行一结束 (RTC, run-to-completion)、量子内核 (QK, quantum Kernel) 和量子软件跟踪辅助工具 (QS, quantum spy)。

### 2.1 QF 量子框架结构

量子框架是一种可重用的基础结构，专为嵌入式实

时系统领域而设计，用于执行并发状态机。它由一组相互协作的类组成，完整地捕捉了在实时嵌入式环境中执行多个并发的状态机所需的所有结构。图 3 为量子框架的主要结构。在量子框架内织机不同活动对象以及不同执行事件分别派生自 QActive 基类和 QEvent 基类。其中，QActive 基类继承于 QP 定义的状态机基类 QHsm，QHsm 为活动对象提供了单独的执行线程和事件队列<sup>[18]</sup>。

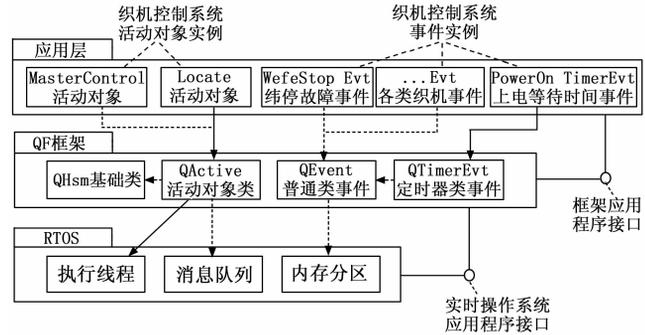


图 3 量子框架结构

基于量子框架的喷气织机控制系统应用程序通过构建 QActive 的子类 (主控活动对象 AO\_MasterControl 和主轴定位活动对象 AO\_Locate)，以及 QEvent 的子类 (各类织机动作事件、故障事件以及时间事件等) 以完成预先设定的功能。

量子框架具有以下特点：1) 量子框架具有较出色的可移植性，还能够直接代替传统的 RTOS，直接以裸芯片的方式在目标 CPU 上运行<sup>[19]</sup>；2) 量子框架具有良好的可伸缩性，其空间仅需使用约 8 kB 的 ROM，数据存储空间仅使用约 1 kB 的 RAM；3) 量子框架具备低功耗架构，在事件驱动型系统中，很轻易地就能够检测到系统何时处于无需处理事件的空闲状态。

### 2.2 QF 量子框架事件派发机制

在开发量子框架事件驱动型嵌入式程序时可创建多个活动对象和消息事件，事件被放入事件池中，执行时通过 QF 独有的消息事件分发机制，分发到对应的活动对象中。

QF 支持两种事件派送机制如图 4 所示。分别为简单的直接发送 (Direct Post) 事件给主动对象机制，和更高级的以便把事件产生者和消费者分开的“发行一订阅” (Post-Subscribe) 机制。在“发行一订阅”机制里，主动对象通过框架订阅事件。事件生产者发行事件给框架。对每一个发行请求，框架发送事件给所有已订阅这个事件的主动对象。

在喷气织机控制系统中，创建的两个活动对象 AO\_MasterControl 与 AO\_Locate 通过“发行一订阅”机制相互通信，读取主轴编码器角度数据，确保数据传输

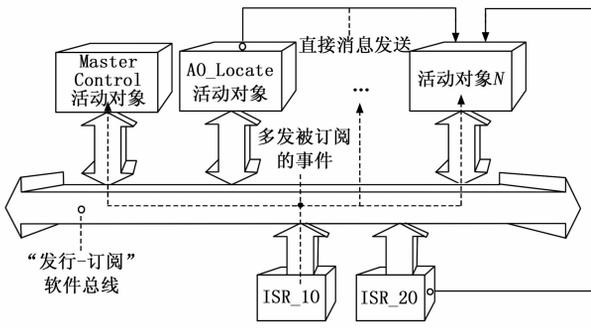


图 4 事件派发机制图

的稳定性和可靠性; 而活动对象内部消息派发使用直接发送机制, 提高了消息派发的效率和系统实时性。

### 2.3 控制系统软件体系结构设计

在控制系统中, 低耦合度的功能程序设计使得一个功能模块的实现不依赖于另一个功能模块。此外, 高度内聚的功能模块具有明确的功能, 模块的功能非常清晰<sup>[20]</sup>。

喷气织机控制软件系统是一种典型的反应式系统, 其目标是根据车间工人的操作意图和织机当前状态来联合控制织机的运动。为了满足纺织行业对成品质量的高要求, 喷气织机控制系统必须具备高内聚和松耦合的特性, 减小模块间的相互影响, 降低故障率。在对喷气织机控制系统进行研究和分析的基础上, 采用了基于量子框架的轻量级事件驱动型框架来设计喷气织机控制系统的体系结构。这种设计方案具备高度内聚和低耦合的特性, 有助于提高系统的可修改性、可维护性和可靠性, 并能够满足对布匹成品质量的高要求。根据以上需求, 设计基于量子框架的喷气织机控制系统体系结构, 如图 5 所示。该体系结构采用了多层次的设计, 主要由 4 层组成, 下面对其进行详细描述。

1) 织机控制系统应用层: 应用层是喷气织机控制系统体系结构中的顶层, 负责实现各种特定需求的定制功能。该层的组成元素单元为不同的活动对象 AO 和控制系统软件控制功能。喷气织机控制系统中的活动对象包括 AO\_MasterControl 系统主控活动对象和 AO\_Locate 主轴定位活动对象。应用层能够体现不同类型的织机功能。在后期维护时, 程序开发者也能缩短维护时间。

2) QF 框架层: 量子框架位于整个喷气织机控制系统体系结构中的第二层, 它与第三层的实时管理层进行双向通信。通过使用操作系统提供的 API, 量子框架能够实现一些特别的软件功能, 例如临界区、事件队列和事件池等。量子框架还为顶层应用软件提供所需的所有服务, 并规定顶层嵌入式软件的应用结构形式。它要求应用软件的基本元素模块, 即活动对象, 必须派生自

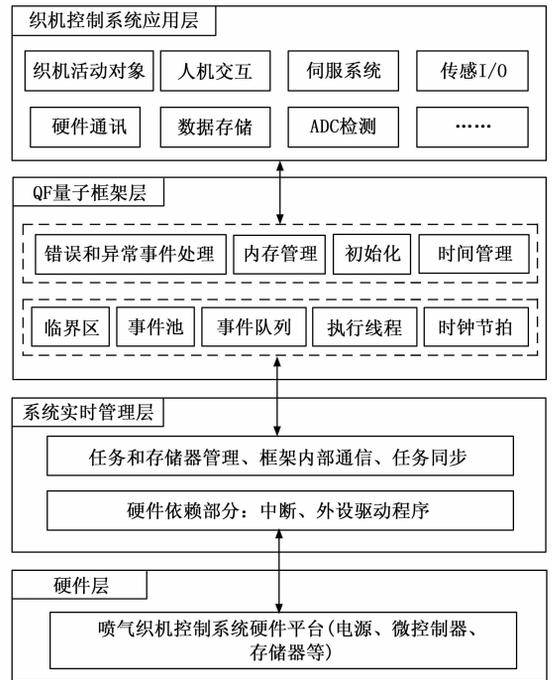


图 5 喷气织机控制系统体系结构

量子框架提供的基类。

3) 系统实时管理层: 第三层的系统实时管理层类似于实时操作系统, 用户可以根据实时性要求和系统图形用户界面 GUI 的质量等特征选取适合的操作系统。另外, 用户也可以选择使用量子框架提供的各种服务。通过这些选择, 用户能够根据具体需求来配置系统实时管理层, 以满足其对实时性和用户界面的要求。

4) 硬件层: 根据控制系统的具体硬件开发需求, 定制喷气织机控制系统软件体系的硬件平台。它包括了一系列组件, 如 ARM+ FPGA 架构的微控制器、伺服电机、传感器、电源、人机交互屏幕、ADC 采样电路等。根据控制系统的开发要求, 这些硬件组件按照一定规则进行组合, 从而构成喷气织机控制系统的硬件平台。

## 3 基于量子框架的控制系统软件详细设计

### 3.1 工艺圆时序配合分析

织机的工作过程都是在工艺圆的控制下进行的。工艺圆是指将电机每转动 360° 作为一个循环, 将每一个循环分成  $n$  份, 分别从 0° 开始增加到 360°, 每一个固定的角度都可以在软件的控制下执行不同的动作, 例如开主辅喷嘴、关闭喷嘴等。织机工艺时序如图 6 所示, 织机五大运动分别按照各自的时序运动, 送经和卷曲运动需要在整个工艺周期内连续运动, 使得经纱张力稳定, 打纬运动由上一圈的 315° 运动到此圈的 315°, 开口运动同理。引纬喷嘴在梭口满开之前, 提前开始运动。

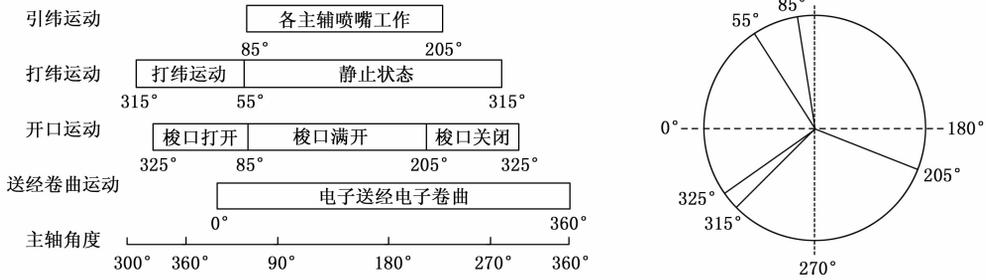


图 6 喷气织机工艺时序图

所有角度控制参数均可通过 HMI 界面更改, ARM 端与 FPGA 端均可由编码器读取角度, 根据读取到的角度信息, 控制织机进行五大运动。

### 3.2 织机软件任务流程设计

QF 框架下的喷气织机控制任务以模块化、高内聚、低耦合的原则进行划分。图 7 为织机软件任务流程图, 在喷气织机工艺流程中, 用一个全局变量来表示织机现有状态。上电后, 全局变量为上电状态, 在此状态下织机主控系统进行软件版本的读取和掉电存储参数的读取, 而后进入待机状态, 当按钮信号输入时, 织机根据不同的按钮, 进行对应的操作, 同时代表织机状态的全局变量值随之改变。信号采集模块将输入的传感器信号和主控设定的传感器阈值对比, 判断是否出现传感器故障等报警。在收到报警信号后, 做出经停、纬停动作, 等待故障信号消除后, 织机主轴停车并显示当前织机状态。等待用户下一步操作指令。

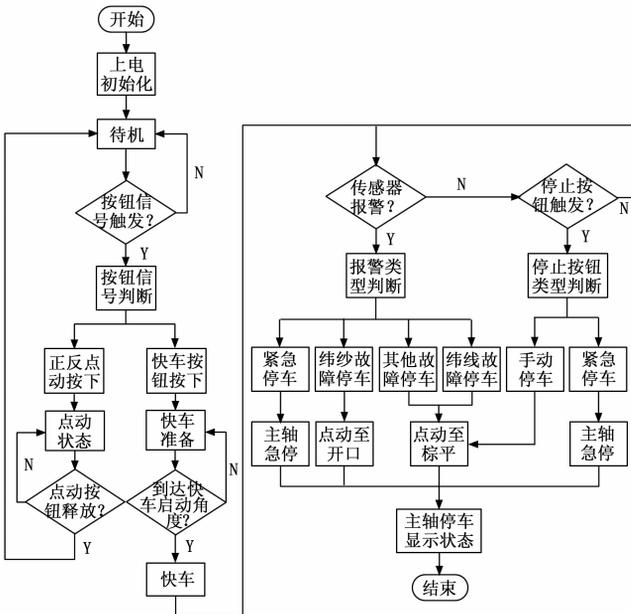


图 7 织机软件任务流程图

机制与传统单片机有所不同。QF 框架将中断划分为“内核知情”(“Kernel-Aware”)和“内核不知情”(“Kernel-Unaware”)两类<sup>[21]</sup>。为避免临界区访问中断引发的数据竞争问题, QF 框架需要对中断进行适当管理。在非单片机环境下, QF 选择完全禁用中断; 而在单片机环境下, QF 则采用不同的控制策略。以本系统所采用的 ARM Cortex-M4 内核单片机为例, 该内核内置有中断优先级管理机制。因此, QF 框架在访问临界区时不会全面禁用中断, 而是采用 BASEPRI 寄存器有选择地屏蔽部分中断。仅允许“内核知情”中断直接使用其服务。依据控制系统软件开发方案, 结合 QF 框架的中断管理机制及单片机的中断分配特点, 设计了图 8 所示的喷气织机控制系统优先级分配方案。该方案采用 NVIC 的逆向优先级编号策略。其中系统时钟中断作为 QF 框架的时钟基准, 设置为内核知情中断最高优先级, 其次为电子送经电子卷曲功能的张力 ADC 采样中断, 保证了电子送经卷曲系统运转的实时性, 而后依次为编码器信号中断、串口中断以及定时器中断, 对控制系统软件优先级的合理分配, 有助于软件功能紧密配合, 提高控制系统可靠性。在内核知情中断内核枚举各功能模块优先级后, 通过调用相关函数来分配优先级。

中断类型	中断优先级位	软件中断优先级
内核-不知情中断	0000 0000	0
内核-不知情中断	0001 0000	1 永远禁用
内核-不知情中断	0010 0000	2
<hr/>		
内核-知情中断: 系统时钟中断	0011 0000	3=QF框架内核知情中断最高优先级
内核-知情中断: ADC中断	0100 0000	4
内核-知情中断: 编码器中断	0101 0000	5
内核-知情中断: 串口中断	0110 0000	6
内核-知情中断: 定时器中断	0111 0000	7 在临界区禁用
.....	.....	...
内核-知情中断: IIC中断	1101 0000	13
内核-知情中断: .....	1110 0000	14
Quantum Kernel任务切换中断	1111 0000	15 不应用于规则中断

图 8 喷气织机控制系统任务优先级分配图

### 3.3 量子框架任务优先级分配

在织机任务优先级分配方面, QF 框架的中断管理

### 3.4 基于 QF 的织机状态转换设计

设计喷气织机主控程序框架时采用了 QF 嵌入式系

统框架, 并将其移植到 STM32 微控制器上。在熟悉了 QF 框架在 STM32 上的编程方法后, 根据织机的工艺流程对具体的控制代码、通讯协议和相关变量参数进行定义配置。软件控制流程为: 织机上电后, 系统进行量子框架、板支持包 BSP 和变量参数的初始化, 而后读取存储芯片中存储的相关工艺参数, 包括角度设定、花色图案参数和引纬参数等。数据参数读取完成后, 运行 Modbus 模块函数和输出信号检测等各类控制函数。根据收到的按钮信号, QF 生成消息事件并将其发送到事件队列进行分发和状态迁移。若输入信号检测到传感器报警, QF 生成报警事件并分发到相应的模块, 报警模块控制织机停车并在 HMI 上显示报警代码。

结合喷气织机状态机和整体软件设计方案, 根据软件优先级划分, 建立基于 QF 的控制系统状态转换流程。如图 9 所示, 织机状态在 QF 中被划分为上电初始化状态、紧急停车状态、正常停车待机状态、正反点动状态、快车前预备状态、快车状态和经纬停以及报警状态。利用模块化思想将系统划分为多个独立的状态和事件, 当需要添加新的功能或进行系统升级时, 只需针对特定的状态或事件进行修改, 而无需对整个系统进行重构。在出现故障问题时, 开发人员查看人机交互屏幕故障代码, 并可在相应的状态中查找故障, 提高故障解决

在程序在各类状态之间跳转的过程中, 软硬件通信程序和信号输入输出控制程序会正常运行, 并能够实时响应织机收到的传感器信号。织机在上电初始化后会进入停车待机状态, 此时各类通信协议同步实时执行。当程序收到按钮信号时, QF 框架生成按钮事件, 并跳转到对应的按钮事件处理状态, 执行相应的工艺流程。如果收到报警信号或手动停车信号, 程序会从快车状态跳转到经纬停或急停状态, 控制马达停车、刹车制动, 并显示报警原因。本款喷气织机控制系统相较于传统喷气织机控制系统在灵活性、精确性和安全性方面都有明显优势。如设计了变频超启动功能, 可以实现变车速织造, 从而提高织造效率以适应不同的生产需求。其次, 控制系统能够通过实时调整送经量和卷曲轴转速, 根据张力传感器结果进行精确控制。这样可以确保织机在送经和卷曲过程中的稳定性和均匀性。本款控制系统还具备全面的安全保障功能, 红外监测功能则能够防止工人在织机生产状态下将手伸入织机内部, 提高安全性。同时提供强大的生产数据统计和分析功能, 能够提高织机的效率和生产管理水平。

#### 4 系统测试

织机主控系统设计硬件电路板为 4 层 PCB 板, 各类输入输出接口都设计在电路板边沿, 方便进行接线,

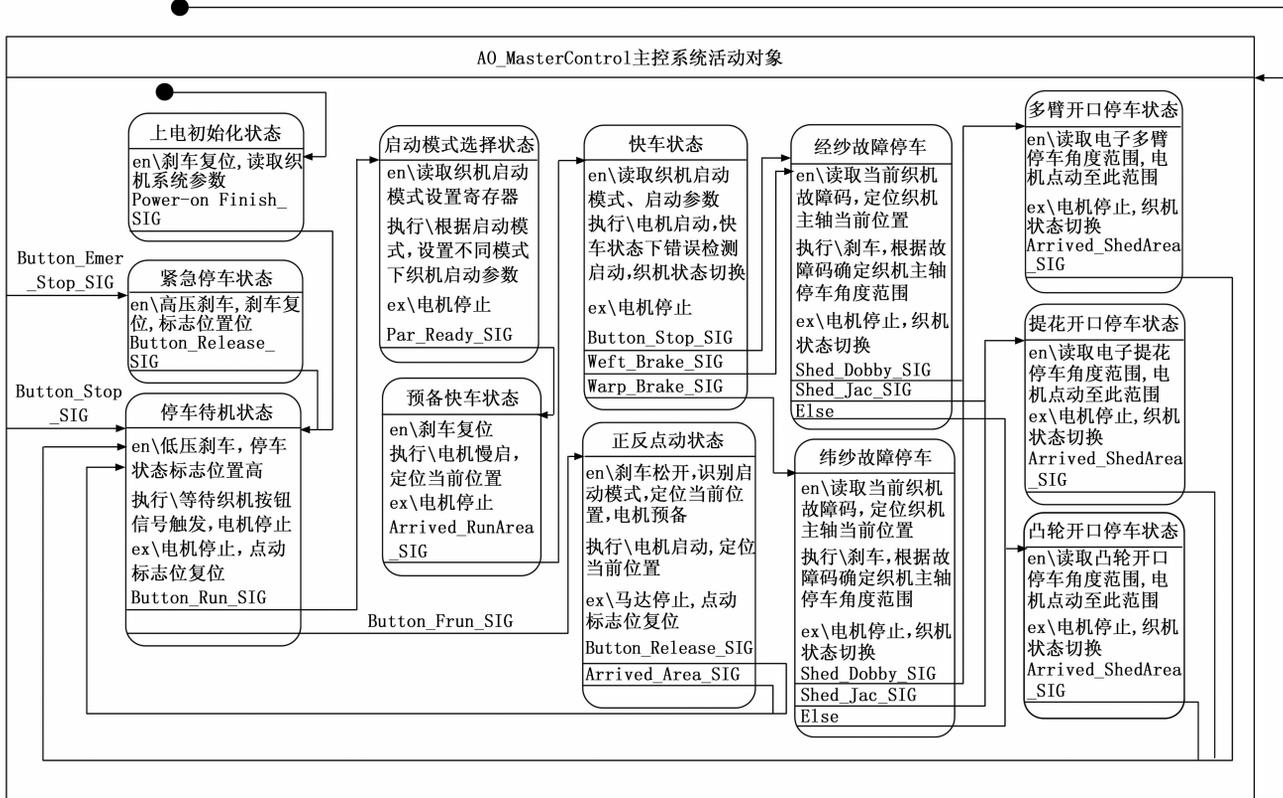


图 9 活动对象状态转换图

并在丝印层对其进行了详细的标注说明。同时，在各个电路关键点均设置了测试点，方便开发人员进行信号的抓取和测量。

测试平台能够实现织机完整动作逻辑控制流程，并且实现了包括电子送经电子卷曲功能、模拟引纬功能、引纬采样功能、报警输入功能、灯塔油泵功能、高低压刹车功能等。

#### 4.1 电磁阀测试

电磁阀工作流程如图 10 所示。在喷气织机开始工作之前，用户设定喷嘴开闭角度。由于电磁阀需要一定的励磁时间，ARM 在收到引纬工艺参数后，根据式 (1) 计算出电磁阀提前开启的角度，并将计算得到的角度数据通过 FSMC 发送到 FPGA 端。

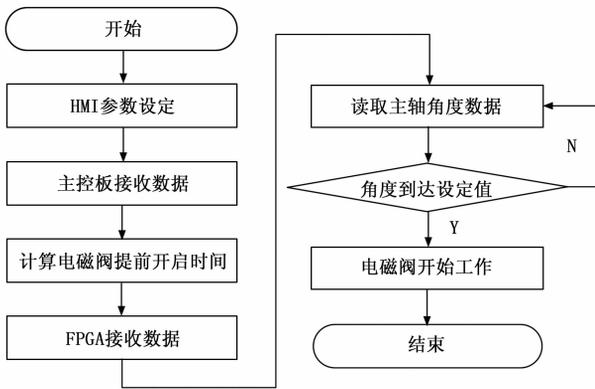


图 10 电磁阀工作流程图

$$r = 0.006TV \quad (1)$$

式中， $T$  为人工调节电磁阀预先开启时间 (ms)， $V$  为织机快车速度。

FPGA 端接收数据后，实时读取主轴编码器角度并进行比较，当编码器角度达到设定角度时，FPGA 会控制织机喷嘴开始工作。在试验平台上对电磁阀进行测试，使用逻辑分析仪抓取 FPGA 控制信号输出端波形和硬件控制端波形，得到结果如图 11 所示。测试结果符合硬件和软件设计要求，电磁阀分为高压打开波形和低压保持波形，高压打开电磁阀时长 10 ms，低压保持电磁阀打开状态时长为 150 ms。

#### 4.2 输入输出测试

控制信号输出功能部分的测试涉涉及机灯塔功能的验证。用户可以通过人机交互屏幕对灯塔的闪烁状态进行设置。为了增强电气隔离和抗干扰能力，在灯塔信号输出的后端增加了光电耦合器。该光电耦合器能够有效地隔离输入和输出电路，防止电路之间的相互干扰，并稳定地传输信号。图 12 为光电耦合器前后端的波形图。经过测试，控制信号输出的前端与后端之间的延迟约为  $2 \mu s$ ，符合设计要求。

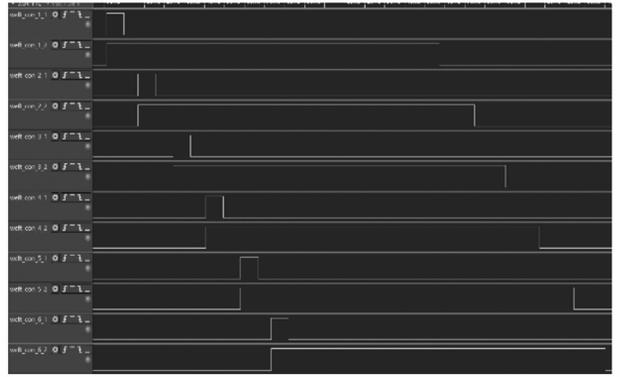


图 11 电磁阀测试结果

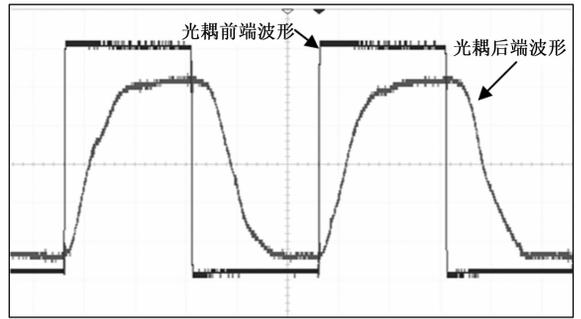


图 12 光电耦合器前后端波形图

在实验平台上，报警输入功能采用旋钮开关来模拟报警信号的输入。默认情况下，当系统处于正常无报警状态时，报警输入为高电平状态。当旋钮开关接通时，电平会被拉低，系统会检测到报警信号。根据设定的不同报警类型，系统会相应地控制刹车和主轴执行相应的动作。例如，在主马达过热、制动器过热、左右绞边断纱等故障状态下，系统会控制主轴在经停范围内停车，并进行高压制动刹车，低压保持。在编码器报警状态下，系统会立即停止主轴，并且停车角度不固定。经过测试，所有报警信号输入后，织机能够按照设定的程序可靠地执行相应的停车动作，证明其具备可靠的报警功能。

#### 4.3 刹车功能测试

喷气织机主轴刹车盘进行测试，刹车盘为 5 线刹车盘，常态下刹车导通，织机主轴不动作。在刹车盘内部内置温度传感器，刹车盘温度过高时断开刹车并报警。测试前将示波器高压探头置于公共端和高压端处，按下织机快车按钮后刹车，使用示波器抓取刹车波形。图 13 为刹车电路波形图。刹车盘工作的 3 个阶段分别为：织机进入快车状态，刹车盘不工作，波形曲线平滑；当急停按钮按下时，刹车盘进入高压制动状态，持续时间为 100 ms，平均电流为 10.8 A，频率为 10 ms，此时主

轴停止转动,高压制动结束;刹车盘进入低压保持状态,持续时间为400 ms,初始电压峰值为120 V,随后在一个波形周期内下降至104 V。测试结果符合设计要求。

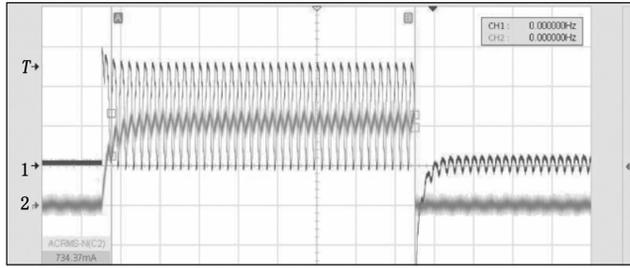


图13 刹车电路波形图

## 5 结束语

为了提高国产喷气织机控制系统的智能化程度,解决系统模块间的耦合问题。本文通过采用量子框架作为实时嵌入式框架,并结合ARM+FPGA微控制器,设计了一套控制系统。该系统采用了STM32F407和Trion T20控制器,利用QF轻量化实时嵌入式框架构建了喷气织机软件系统。通过以事件为触发信号,实现对整体工艺流程的精确控制。此外,利用FPGA的并行运行能力,提高了织机控制的实时性和系统稳定性。通过实验测试,本文所设计的控制系统在适应高速生产需求的同时,达到了高可靠性和实时性的要求。

然而,该喷气织机控制系统在提高智能化程度等方面取得了显著进展,但仍然存在一些需要完善和解决的技术问题。首先,需要进一步优化控制算法。喷气织机作为复杂的工业设备,其控制涉及多个参数和状态的协同调度。因此,如何设计高效的控制算法和灵活的调度策略,以满足不同织造要求和工艺条件下的控制需求,仍然是一个挑战。其次,对于喷气织机的节能问题,也可以进一步地探索和提升。

### 参考文献:

- [1] 刘亚非. 中国纺织工业联合会发布《建设纺织现代化产业体系行动纲要(2022-2035年)》[J]. 东方企业文化, 2023, 23(5): 7-10.
- [2] ELNASHAR E A. Applications of mechatronics opportunities in textiles [J]. Inter. Rob. &. Autom. Jour, 2022, 8(1): 9-16.
- [3] 洪海沧, 李雪清. 近期国内外织造技术的进步与发展趋势(下)[J]. 纺织导报, 2019, 19(9): 59-60.
- [4] 祝成炎, 田伟, 李艳清, 等. 喷气织造技术现状与发展[J]. 棉纺织技术, 2023, 51(10): 97-104.
- [5] 张振鹏. 织机机载状态监测方法研究[D]. 天津: 河北工

业大学, 2023.

- [6] 刘凯琳, 张涛. 织造装备的技术现状及发展趋势——ITMA2023展会亮点产品评析[J]. 纺织导报, 2023, 23(4): 16-26.
- [7] PRIYA J P. PIC based power loom automation for weaving in textile industries [C] //2020 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT). Bangalore: IEEE, 2020: 1-6.
- [8] 郭张军, 奚永新, 石佳洋, 等. CPLD技术在喷气织机控制系统中的应用[J]. 自动化应用, 2023, 64(20): 81-83.
- [9] 倪庆, 何勇. 基于ARM+FPGA的宽幅喷气织机控制系统设计[J]. 制造业自动化, 2023, 45(4): 107-111.
- [10] 张良模, 杨涛, 张有信. 基于OMRON CS1 PLC的宽幅织机电气控制系统设计[J]. 纺织器材, 2018, 45(6): 4-7.
- [11] 吴岱玮, 范延滨. 基于ARM的喷气织机引纬控制系统设计[J]. 工业控制计算机, 2018, 31(11): 148-149.
- [12] 李丹慧. 基于QP框架的两轮自平衡小车的研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2019.
- [13] 张亚斌, 洪荣晶, 张奥敏. 基于量子框架的齿轮倒角机控制系统设计与研究[J]. 航空制造技术, 2020, 63(5): 41-45.
- [14] 李亚辉, 陆钊. 星载控制软件在轨动态重构技术研究[J]. 遥测遥控, 2023, 44(3): 24-30.
- [15] 董伯麟, 鞠毅. 基于量子框架的六自由度机器人控制系统研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015, 15(12): 85-89.
- [16] BATSIS J A, BOATENG G G, SEO L M, et al. Development and usability assessment of a connected resistance exercise band application for strength-monitoring [J]. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2019, 13(5): 340-340.
- [17] BORK D, KARAGIANNIS D, PITTL B. A survey of modeling language specification techniques [J]. Information Systems, 2020, 87(1): 101425-101425.
- [18] 戴文明. 基于量子框架的开放式数控系统的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2008.
- [19] 殷冰磊. 基于量子框架的机器人控制软件系统研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- [20] SINHA K, SUH E S. Pareto-optimization of complex system architecture for structural complexity and modularity [J]. Research in Engineering Design, 2018, 29(1): 123-141.
- [21] SAMEK M. QP and ARM Cortex-M with GNU [M]. Burlington: Newnes, 2008: 169-184.