

# 运载火箭一级加泄连接器自动控制技术研究

罗滨鸿<sup>1</sup>, 陈卓<sup>1</sup>, 向军<sup>1</sup>, 王东丰<sup>1</sup>, 张海波<sup>1</sup>, 徐昕<sup>1,2</sup>

(1. 上海航天电子技术研究所, 上海 201109; 2. 南京航空航天大学 航天学院, 南京 211106)

**摘要:** 运载火箭一级加泄连接器是实现一级贮箱推进剂加注与泄回的核心设备, 针对当前国内一级连接器主要采用人工对接的情况, 对气动驱动的加泄连接器的自动控制技术进行研究; 分析了连接器机构的结构与对接脱落的主要步骤, 设计采用 PLC 组合、直流电源、传感器供电组合等硬件系统对连接器配气台的传感器参数进行采集, 对电磁阀进行控制以驱动机构运动; 设计控制软件, 对基础数据进行分类构建, 并基于面向对象思想设计多粒度层次的流程步骤, 通过嵌套组合不同粒度的步骤实现复杂的控制逻辑, 采用 xml 文件描述流程步骤; 介绍了自动对接、脱落控制流程的流程图; 经测试自动对接流程与自动脱落流程所用时间分别为 133 s 与 97 s, 满足使用要求, 且已在某型号多次任务中进行了应用, 有力地支撑了型号任务的发展。

**关键词:** 运载火箭; 加泄连接器; 自动对接; 自动脱落; 控制流程

## Research on Automatic Control Technology of Launch Vehicle First-Stage Loading and Unloading Connector

LUO Binhong<sup>1</sup>, CHEN Zhuo<sup>1</sup>, XIANG Jun<sup>1</sup>, WANG Dongfeng<sup>1</sup>, ZHANG Haibo<sup>1</sup>, XU Xin<sup>1,2</sup>

(1. Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China;

2. College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** It is core equipment for first-stage loading and unloading fuel connector of launch vehicles to realize loading and unloading propellant in first-stage tank. In view of current situation where first-stage connector in China mainly adopts manual docking, the automatic control technology of the pneumatically driven connector is studied. This paper analyzes the structure of the connector mechanism and the main steps of docking and falling off. The hardware system is composed of the PLC combination, DC power supply and sensor power supply combination, it collects the sensor parameters of the connector gas distribution table, and controls the solenoid valve to drive the mechanism movement. The control software is designed to classify and construct the basic data, and the multi-granularity process is designed based on the object-oriented idea. The complex control logic can be realized by nesting and combining different granularity, and the process is described by the XML file. The automatic docking and falling off control process is introduced. The test results show that the time for automatic docking process and automatic falling off process is 133 s and 97 s respectively, which meets the usage requirements, it is applied in several tasks of a certain type, and strongly supports the development of model tasks.

**Keywords:** launch vehicle; loading and unloading connector; automatically docking; automatically falling off, control process

## 0 引言

随着我国新一代运载火箭迅速发展, 与之伴随的是运载火箭测试、发射流程的自动化、智能化, 通过对前端设备的远程自动控制, 实现前端无人值守, 可大幅减少人员工作量并提升应急处置效率<sup>[1-3]</sup>。一级加泄连接器是运载火箭一级推进剂的加注泄出关键设备, 目前国内基本采用人工对接, 效率与安全性低, 无法适应越来越密集的发射需求, 自动对接脱落技术可使连接器临射前自动脱落以及发射中止后自动对接, 因此研究连接器自动对接脱落控制具有重要意义。

分析各国运载火箭的一级连接器对接脱落形式可发现, 美国的各型号运载火箭主要采用组合式连接器, 将电、液、气各种介质管路集成到一个大型的组合面板连接器中<sup>[4]</sup>,

从而减少管路数量, 而该方式下连接器只有在连接方向上才能滑动、弹出或缩回, 在脱落后无法自动进行对接; 俄罗斯天顶号运载火箭一级组合连接器采用锥杆-伞式导向机构, 可实现自动对接与自动脱落<sup>[5]</sup>。而美国开展的“远程智能脐带系统”其目标为能在连接器实现六自由度的调整从而快速自动对接与脱落<sup>[6-8]</sup>。我国国内也有多家单位针对一级连接器的自动对接脱落进行研究<sup>[9-13]</sup>, 北京航天发射技术研究所针对未来重型运载火箭的自动对接设计了一种基于高速数字相机检测、交流伺服驱动系统控制的组合式连接器自动对接系统<sup>[14]</sup>。而上海宇航系统工程研究所则研究了一种以气动方式驱动的一级加泄连接器, 连接器位于两个分布于箭体两侧的服务塔中, 该连接器具有两个方向上的自由度, 并通过自适应导向技术对接<sup>[15]</sup>。

收稿日期: 2024-01-22; 修回日期: 2024-02-20。

作者简介: 罗滨鸿(1996-), 男, 硕士。

引用格式: 罗滨鸿, 陈卓, 向军, 等. 运载火箭一级加泄连接器自动控制技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(6): 166-172.

目前国内主要采用气动驱动的一级液体加泄连接器, 因此针对气动控制机构工作可靠性高但精度差、压力调整具有滞后性、控制流程复杂等问题, 对自动控制相关软硬件技术进行研究, 通过梳理自动控制流程、设计硬件检测控制系统与软件流程配置系统, 确定自动对接脱落控制技术方案, 为低温燃料加注后前端无人值守提供了技术支撑<sup>[16]</sup>。

## 1 一级连接器自动控制系统结构及原理

运载火箭一级加泄连接器位于发射台服务塔装置中, 在火箭吊装时会将加注口与连接器在火箭径向方向对齐, 两个服务塔装置根据要加注的推进剂种类分布在火箭两侧, 如图 1 所示, 因此连接器仅有横向与纵向两个方向上的自由度, 其中纵向方向用于将连接器调整至与加注口一致的高度, 横向方向则为连接器对接与脱落的运动方向。

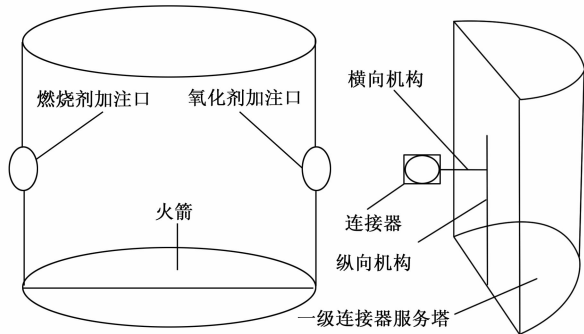


图 1 连接器与火箭简化示意图

连接器为气动装置, 通过连接器配气台驱动, 连接器配气台主要由减压阀、电磁阀、手动阀、压力传感器及管路等组成。连接器包含对接、解锁、平衡与防护 4 大模块, 其中对接模块负责连接器机构与火箭加注口的对接与脱落分离; 解锁模块负责连接器与火箭对接后的固定锁紧, 以及脱落前进行解锁; 平衡模块负责以合适的压力推动连接器在纵向位置进行调整; 防护模块则负责将连接器在推出服务塔时打开舱门, 以及收回服务塔内时关闭舱门。当对接时, 需要抬升连接器, 打开服务塔舱门, 然后调整连接器位置, 最后进行对接与锁紧; 而脱落时, 则解锁后脱落回缩, 然后抬升连接器位置, 收回连接器并关闭舱门进行防护。

一级加泄连接器自动对接脱落控制系统需要完成对连接器配气台参数的实时采集与电磁阀控制, 根据气动原理, 基于设备可实现的动作, 分析并分解对接与脱落的流程, 驱动气动机构进行运动, 以传感器信号作为反馈对实时状态进行判断, 从预设的操作中选择动作执行, 直至符合要求, 最终完成连接器的自动对接与脱落流程。

根据需求, 可将系统分为硬件与软件两部分, 硬件部分负责采集配气台传感器参数、通断电电磁阀、向远程传输数据; 软件部分根据气动机构原理, 设计多粒度层次的流程控制步骤, 实现可靠、可自由修改与配置的自动对接/脱落流程。

## 2 一级连接器自动控制系统硬件设计

### 2.1 原理设计

系统硬件集成在地面测发控系统前端动力测发机柜中, 由动力测控 PLC 组合、传感器供电组合、远程供电电组合、地面直流电源等组成, 大部分均为通用设备或货架产品, 可随时进行替换, 且所有设备均具备以太网接口, 可通过网络通信实现远程控制, 硬件原理如图 2 所示, 由动力测控 PLC 组合完成配气箱中数据采集与电磁阀控制, 进而控制连接器机构, 其他设备完成供电。以上硬件设备除完成对连接器机构的控制之外还可实现动力系统的其他功能。

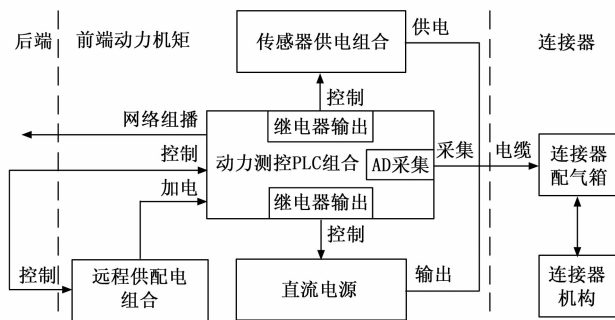


图 2 硬件原理图

### 2.2 主要硬件设计

1) 动力测控 PLC 组合: 主要组成部分有可编程逻辑控制器模块 (含有 CPU、以太网模块、AD 转换模块、数字量输出 DQ 模块、数字量输入 DI 模块等)、电源模块、触摸显示屏模块、辅助器件等。采用主备并联冗余方式工作。选用两线制的模拟量模块, 根据传感器类型进行 4~20 mA 电流与 0~10 V 电压的采样, 采样分辨率为 16 位, 采样通道共约 40 路; 采用 J520-B5N 继电器控制直流电源对电磁阀进行供电, 电磁阀相关继电器约 40 个; 通过网络模块与后端通讯软件进行 TCP 连接, 接收控制指令, 同时采用组播方式将模拟量数据与数字量状态以 10 Hz 的固定频率实时发送到当前局域网内。

2) 远程供电电组合: 采用型号通用产品, 由网络模块、IO 板卡、AD 数字采集卡、继电器、隔离模块等组成, 接收后端电源控制软件的 TCP 指令输出 24 V 为动力测控 PLC 组合供电。

3) 直流电源: 采用型号通用产品, 接收后端电源控制软件 TCP 指令输出恒定电压 24 V 为配气箱电磁阀供电, 并实时组播电源状态。

4) 传感器供电组合: 采用型号通用产品, 接受动力测控 PLC 组合的控制输出 15 V 与 24 V 电压为连接器配气箱中的传感器供电, 从而进行模拟量采集, 连接器配气箱中的传感器包括磁簧传感器、行程开关<sup>[17]</sup>、磁致伸缩位移传感器、霍尔传感器等, 用于采集压力、位置与状态等信息。

## 3 一级连接器自动控制系统软件设计

### 3.1 连接器控制软件设计

一级氧化剂与燃烧剂对应的连接器为两套设计相同

的机构，控制方式完全相同，且连接器在试验过程中需要进行大量测试，并根据环境与任务状态对控制流程进行修改与调整，因此要求连接器控制软件具有通用性与灵活性，连接器的控制逻辑、界面控件可重用，控制流程容易修改。

软件平台为 Windows 7 操作系统，使用 C# 语言与 WPF 框架基于 Visual Studio 2017 工具开发，开发环境为 .Net Framework 4.6.1，采用模型—视图—模型视图 (MVVM, model-view-view model) 的架构设计<sup>[18]</sup>，使模型、界面与功能解耦，视图层专注实现界面并根据约定预留人机交互接口，而模型视图层则实现软件功能的主体逻辑，模型层为最底层的数据接口层，描述基础的数据与动作。分离视图与模型设计配气台原理图的仿组态界面，便于专业人员整体把握当前系统状态。各功能采用模块化设计，模块之间通过接口进行通信，实现规范的功能调用，便于对复杂的控制流程进行设计与修改，软件架构如图 3 所示，核心是基于底层数据模型的基础功能实现，以及模型视图层的人机交互功能的逻辑实现。

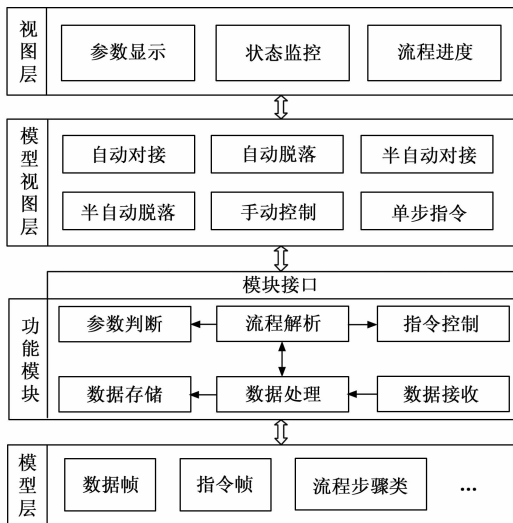


图 3 软件系统架构

### 3.2 基于关系模型的基础数据构建

对一级加泄连接器气动机构进行控制需要实时获取各气包压力、连接器纵向位置、电磁阀通断状态、回缩信号、推出信号、锁紧解锁信号、对接脱落信号、防护信号等信息，通过对这些信息的解析、处理获取连接器的实时状态，控制其进行一系列指定的动作，从而完成宏观上的对接、脱落流程。这些基础数据通过 PLC 实时采集并网络组播出来，根据其传感器特性可分为数字量信号、模拟量电压信号、模拟量电流信号等。

上述数据与整个连接器系统各类信息互相交织难以剥离，且其格式、用途、类型、计算方式并不统一，无法用于构建可重用、可配置的控制流程，因此基于关系模型对基础数据进行分类与构建。关系模型通过关系描述实体与实体之间的联系<sup>[19]</sup>， $D_1, D_2, \dots, D_n$ ，这  $n$  个域的笛卡尔积为：

$$D_1 \times D_2 \times \dots \times D_n = \{(d_1, d_2, \dots, d_n) \mid d_i \in D_i, i = 1, 2, \dots, n\} \quad (1)$$

定义  $R(D_1, D_2, \dots, D_n)$ ， $R$  为关系名， $D_n$  为具有某种语义的集合。对于连接器系统的数据可根据其不同维度的特性建立不同的集合，如数据类型集合 = {数字量，模拟量}，如数据计算公式集合 = {公式 1，公式 2，公式  $n$ ，...}，而关系则是  $D_1 \times D_2 \times \dots \times D_n$  的子集。

构建基础数据的目的是将系统涉及的复杂数据根据特性构建为不同维度的单一属性集合，各集合只需维护本集合数据，再以一张关系表通过描述“关系”引用其他集合从而生成各集合的子集，各集合与“关系子集”均映射到程序中，进而可以任意描述“关系子集”，这些集合与“关系子集”作为软件的基础数据。例如将网络数据与通信协议等系统信息分解为字段描述集合、数据类型集合、指令编码集合、网络地址集合、计算公式集合等等，要描述压力数据则建立“压力数据关系子集”，引用各压力参数的字段描述、所属网络地址、压力计算公式等，通过在引用链上进行递归计算，即可获取“压力数据关系子集”中元素的各项属性，同理还可生成“指令数据关系子集”“界面显示关系子集”“数据分析关系子集”等等。构建后的基础数据易于修改与配置、数据的解析与获取来自统一接口，可作为控制流程所使用的标准化数据。

### 3.3 面向对象的多粒度层次流程步骤设计

通过构建基于关系模型的基础数据，程序可以通过统一的数据接口获取各项基础数据，此时可以做到：信号的判断、压力数据的比较、电磁阀状态判断、电磁阀控制等简单操作。

而分析连接器气动机构，可得机构控制主要需求为：控制电磁阀通断进行充放气，实现机构动作；判断压力或信号是否符合条件，进行电磁阀通断；延时等待，查询传感器状态；指定时间内精确调整至指定压力或位置。

基于当前可完成操作去实现连接器控制流程，若直接“翻译”功能要求进行编程难点有：1) 机构的控制需求具体到实现动作可细化为许多种具体要求，如压力与目标值按比例比较、压力与目标值按绝对值比较、多个压力依次比较、多个压力循环比较，导致逻辑复杂难以理解；2) 测试流程无法随意拆分与拼接，连接器测试流程应能够自由组合并将其分为自动流程、半自动流程、手动调试流程、故障处理流程、等效器测试流程、单步指令等，方便适应各种情况的测试；3) 不便于修改，连接器机构需要进行大量的测试，对流程所设定的阈值、目标值等应能随时调整而不影响程序功能。

因此对于连接器控制流程的设计，采用一种自下而上、区分粒度层次、低耦合、能够自由组合拼接的方式，基于面向对象的继承和重载思想<sup>[20]</sup>，设计一套连接器控制流程配置方案，满足软件控制流程快速修改、大量复用、可配置的需求，其结构如图 4 所示。

首先定义最底层的基类层，设计类 Status，用该类作为

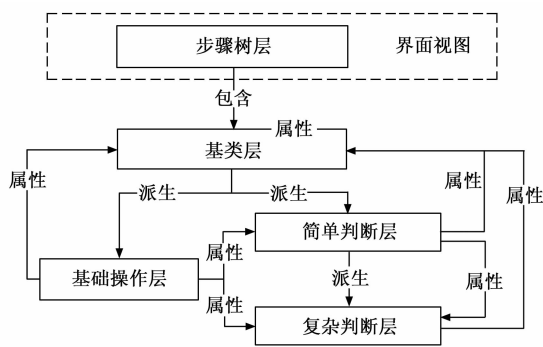


图4 多粒度层次配置结构

所有其他操作对象的基类,通过提供基础的虚函数供子类重载,可实现所有操作使用统一的重载函数接口对本类操作进行处理。此外,Status类将所有子类包括其自身均列为属性,因此可以组合各种步骤,通过该方式可以实现所有操作的任意多层嵌套,面对复杂的操作步骤,既可定义定制类完成,也可通过组合基础操作完成。

基类层之上为基础操作层,这一层均为基础的“动作”,无需进行逻辑上的判断,包括延时、电磁阀指令、弹窗、信息修改、参数判断、信息保存等。设计延时类,其属性值包括延时时间、时间单位;设计电磁阀指令类,其属性值包括编码值、功能号、控制设备、名称。设计弹窗类,其属性值包括弹窗类型,弹窗类型包括确认、选择、输入和跳转弹窗等,以及弹窗文本;设计信息修改类,其属性值包括修改类型、参数名称、输入值;设计参数判断类,其属性包括参数名称、实际值、上限值、下限值、是否为百分比模式、判断条件(即大于、小于或者区间)等、状态判断、提示信息等。其他操作类也包含其操作的具体细节。对于最基础的操作类,只需关注其提供的唯一的接口而无需在意内部实现细节。

再上一层为简单判断层。该层或是在继承基础操作层相关类后添加更多的属性,如设计Cmd类,用于处理指令操作,可执行多条电磁阀指令,并设置等待和延时时间,其属性包括指令名称、指令列表、执行前等待时间、回令等待时间、每条指令执行间隔时间等;或是MultiStatus类,其属性为Status对象列表,用于实现基础操作的依次执行或嵌套。或是作为继承自基类Status的条件判断类Condition,该类一方面实现了最基础的条件处理功能,其属性包括步骤名称、判断前延时时间、条件判断参数列表、判断合格处理、判断不合格处理、参数判断模式(需要满足一个或多个参数判断)、参数判断间隔等;另一方面Condition类也作为所有更复杂条件判断类的基类,与Status类一样,将所有更复杂条件判断类作为自己的属性,从而可以在配置文件中任意嵌套各种条件判断步骤。

更上一层为复杂判断层,用于实现各种难以通过组合简单步骤完成的复杂条件判断与控制,如子条件循环判断。当通断电磁阀使气路充放气,对于上升机构而言,充气可

使机构上升,而放气则使机构下降,若要将连接器加注口通过上升机构准确调整至某一高度,由于压力的变化为非线性,且压力调节具有滞后性,因此上升机构往往前期调整缓慢,然后迅速越过指定位置,简单的逻辑判断处理无法在有限时间内进行准确调节。因此定制子条件循环判断操作类,继承条件控制类,并添加子条件、条件列表、二次确认时间等属性,其调整过程如图5所示,将上升机构运动分为3个区间,低于指定高度则应充气上升,高于指定高度则应放气下降,在指定高度误差范围内则停止充放气,对应3个条件判断,每一轮依次执行3个条件判断,并在符合条件后延时一定时间重新执行以上判断,只有连续两轮判断中均达到指定高度范围才认为调整成功。

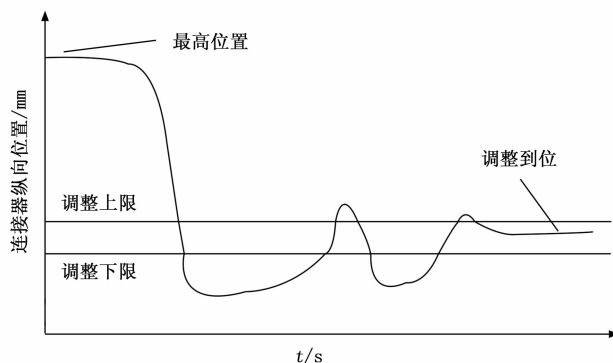


图5 纵向位置调整过程

最上层为步骤树层,将一系列的操作处理组合为流程步骤,流程步骤作为流程中的一个阶段,标志着某些状态是否满足,若干个流程步骤显示在界面上则为用户所看到的操作流程。如连接器自动对接流程的前两个步骤为:开始对接、对接气缸反向充气。对接气缸反向充气即为流程步骤,由一系列操作与判断组成,首先对若干电磁阀通断进行反向充气,延时若干秒后判断对应压力参数是否小于指定值,若小于则接通电磁阀停止充气,否则弹出错误弹窗提示异常。

### 3.4 流程设计

#### 3.4.1 流程介绍

根据一级加泄连接器的测试需求,其测试流程可分为6类:自动对接流程、自动脱落流程、半自动对接/脱落流程、手动调试流程、单步指令控制、等效器测试流程。半自动与手动流程可辅助岗位人员对连接器机构或部分测试步骤进行单独调试,等效器测试流程可在动力系统气检时对通路极性、参数解析等进行测试。而自动对接/脱落流程最为重要,自动脱落流程在动力系统发射流程中-10 min时由主控软件发出指挥指令,连接器控制软件接收指令并自动执行,其指令信息流如图6所示;而自动对接流程在脱落后且推迟发射时无需前端人员回来即可重新连接火箭加注口进行燃料泄回。

使用xml文件描述测试流程,xml文件以标签和属性描述实体,具有强大的扩展性,可完美映射多粒度的流程步

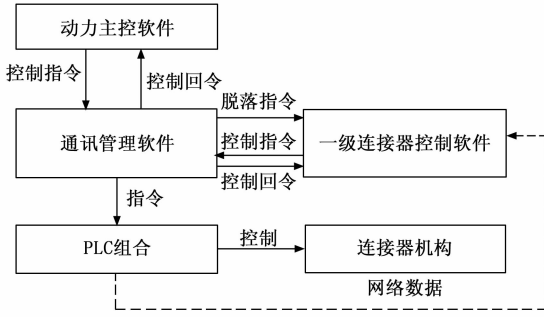


图 6 系统内指令信息流

骤类，通过标签的嵌套和组合，能描述各项流程与功能，并被程序轻松解析<sup>[21]</sup>。作为各项测试流程的配置文件，具有易读懂、解析与修改的优点。

### 3.4.2 自动对接流程

1) 对接状态准备：提前设置连接器目标高度与先导压力目标值；弹出对话框，提示确认指定压力符合条件；通断电磁阀，初始化系统状态；弹出对话框，提示确认手阀已打开；

2) 对接气缸反向充气：打开指定电磁阀，延时后检查指定压力是否足够，不够则打开其他电磁阀充气。

3) 连接器回缩：判断是否收到传感器回缩好信号，若未收到则延时后重新判断，仍未收到则转至异常处理，即：提示异常，询问是否继续或转至手动控制。

4) 先导气瓶充气至目标值：定时查询先导压力，判断与目标值是否相差 3% 以内，低于下限或高于上限分别通断不同的电磁阀以调整压力，直至满足要求，到最大调整时间仍未合格则转至异常处理。

5) 连接器升至最高位置：打开相关电磁阀，以一定压力推动连接器升高，定时查询纵向位置传感器信号是否达到目标高度，达到后则断开对应电磁阀，到最大调整时间仍未合格则转至异常处理。

6) 连接器推出：打开指定电磁阀，使气缸充气推出连接器，延时后查询是否收到传感器推出好信号，若未收到则延时后再次查询，仍未收到则转至异常处理。

7) 连接器纵向位置调整：查询纵向位置传感器信号，判断与目标值距离是否相差 5 mm 以内，低于、高于或处于范围内执行不同的电磁阀操作，若当前位置符合要求则延时后再次查询，若连续两次查询均符合要求则完成位置调整步骤，到最大调整时间仍未合格则转至异常处理。

8) 连接器解锁：打开解锁相关电磁阀，延时后分别判断压力 1 与压力 2、压力 3 差值是否大于 0.5 MPa，并通断不同电磁阀；查询是否收到传感器解锁信号，未收到则延时后再次查询，仍未收到则转至异常处理。

9) 连接器对接：通断相关电磁阀使气缸充气向前推出进行对接，延时后查询推出压力是否超过范围，若是则断开相应电磁阀；延时后查询是否收到传感器对接好信号，若未收到则延时后再次查询，仍未收到则转至异常处理。

10) 连接器锁紧：通断相关电磁阀使锁紧气缸充气，延时后查询是否收到传感器锁紧信号，未收到则延时后再次查询，仍未收到则转至异常处理。

11) 后处理与对接状态检查：通断电磁阀进行排气；检查各项压力、传感器信号是否满足要求，对不满足的在界面以醒目颜色显示。

### 3.4.3 自动脱落流程

1) 脱落状态准备：依次查询各项供气压力是否在设置范围内，任一个不满足则转至异常处理；记录当前传感器纵向位置，存储并设置为目标高度，用于下次对接流程使用。

2) 连接器解锁：打开相关电磁阀，使解锁气缸充气，延时后查询是否收到传感器解锁信号，若未收到则延时后重新判断，仍未收到则转至异常处理。

3) 对接气缸反向充气：与自动对接流程中相同步骤内容一致。

4) 连接器脱落回缩：延时后查询是否收到传感器脱落信号与回缩信号的至少一个，若未收到则延时后重新判断，仍未收到则延时后转至异常处理。

5) 连接器提升至最高位置：与自动对接流程中相同步骤内容一致。

6) 连接器防护：打开相关电磁阀，使尾部服务装置动作，延时后检查指定压力是否足够，不够则打开其他电磁阀，延时后查询是否收到互为冗余的两个传感器防护信号的至少一个，若未收到则延时后重新判断，仍未收到则延时后转至异常处理。

7) 纵向位置降至最低：通断相关电磁阀使气瓶排气，进而使连接器降低，定时查询气瓶压力是否低于设定值，若符合要求则断开开放气电磁阀；到最大查询时间仍不满足则断开开放气电磁阀。

8) 后处理与脱落状态检查：检查各项压力、传感器信号是否满足要求，对不满足的在界面以醒目颜色显示。

## 3.5 界面设计

软件主界面如图 7 所示，界面左侧为流程列表，软件启动后载入配置文件，点击不同的流程按钮即可切换执行不同的控制流程；右侧包括状态显示部分与功能切换部分，状态显示部分实时显示当前的压力、传感器参数信号，并

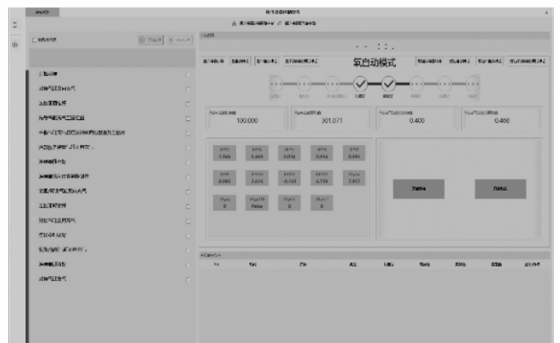


图 7 主界面

通过颜色表示是否符合要求, 功能切换部分可以切换到不同的连接器控制, 也可切换为自动、半自动或手动控制方式。右侧顶部的左右各有 4 个按钮, 左右区分两种推进剂连接器的控制, 4 个按钮分别用于切换自动控制、半自动控制、手动调试与后处理。底部则为指令发送与接收的显示控件, 可观察指令内容与结果。

顶部导航栏点击第二个标签即可切换到连接器配气台参数界面如图 8 所示, 针对岗位人员面对复杂气路下异常情况无法迅速进行判断的问题, 设计一个仿组态界面, 该界面保留配气台中的主要气路原理图, 并实时显示所有压力与电磁阀状态, 当电磁阀打开后界面中电磁阀标志显示为绿色, 断开则为灰色。通过该界面, 岗位人员可实时关注整个连接器控制系统的状态。

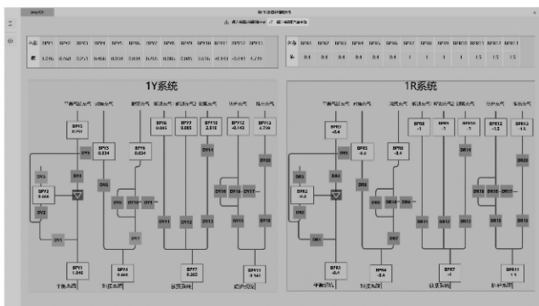


图 8 连接器配气台参数界面

### 4 一级连接器自动控制系统测试

本文所研究的一级加泄连接器自动控制系统相关技术在国内首次实现了芯一级液氧、煤油加泄连接器自动对接、自动脱落, 并在某型号运载火箭多次发射任务中得到验证, 相关软硬件均与地面测发控系统相融合, 供配电与自动脱落指令由动力发射流程统一控制, 除了脱落前的状态确认, 一级连接器控制岗位前后端均实现了无人值守。通过对实际环境下软硬件及连接器机构进行多次自动对接与自动脱落测试, 其结果如下。

#### 4.1 自动对接与自动脱落测试结果

自动控制相比传统的手动控制在效率与可靠性上提升巨大, 特别是手动对接方式需要前后端人员在每个动作前多次确认状态, 用时至少在 5 min 以上, 且无法满足应急自动泄回需求。

多次自动对接测试结果如表 1 所示, 从收到对接指令到完成后处理操作用时 133 s, 其中主要耗时在于先导气瓶充气至目标值, 该压力用于连接器纵向位置的控制。而另一个影响对接时间的是纵向位置调整, 其调整曲线如图 9 所示, 由于压力的调整具有滞后性, 导致纵向调整的速度非线性, 因此可能需要经过多次调整才能达到预定位置, 而该步骤所设置的最长调整时间为 3 min, 因此理论上自动对接最长用时约为 5 min。

多次自动脱落测试结果如表 2 所示, 部分流程步骤从自动对接流程复用, 从收到开始脱落指令到完成所有后处

表 1 自动对接信号时间点 s

信号节点	时间点	用时
对接指令	0	—
回缩好	8	8
充气至目标值	63	55
纵向升至最高	77	14
推出好	93	16
纵向调整到位	107	14
解锁好	117	10
对接好	128	11
锁紧好	133	5

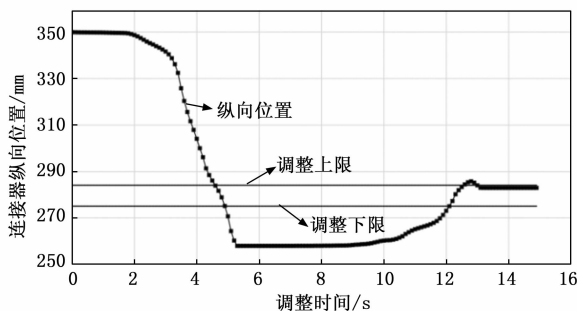


图 9 纵向位置随时间调整图

表 2 自动脱落信号时间点 s

信号节点	时间点	用时
脱落指令	0	—
解锁好	5	5
脱落好	20	15
纵向升至最高	36	16
防护好	59	23
降至最低	97	38

理操作所用时间为 97 s, 若只看连接器脱落收回, 则只用了 20 s。若所有信号在流程判断的最大允许时间才收到, 则理论最大脱落流程完成时间为 195 s, 脱落时间为 35 s。

#### 4.2 修改与可重用分析

基于关系模型构建出模拟量、数字量、指令信息等纯粹的基础数据, 相比传统采用实体类直接映射通信协议进行硬编码解析, 在通信协议变动时修改与测试所用时间减少了 80%。

通过将控制流程设计为多粒度层次的流程步骤后, 据此分析上文分解后的自动控制流程可知, 自动对接与自动脱落的流程步骤有 20% 以上可以直接重用, 如对接气缸反向充气、连接器提升至最高等, 而两种推进剂连接器之间的逻辑可重用性几乎 100%, 且自动控制、半自动控制、手动控制之间的流程步骤最高可重用 90%, 更基础的简单判断层步骤与复杂判断层步骤可实现数十次的复用。在连接器装置研制测试阶段需要进行数百次测试, 在对复用模块进行参数调整时, 直接对涉及的基础配置文件与流程配置

文件进行修改即可,且可方便编写修改脚本避免出错,相比传统软件设计方法,本文所设计系统减少了数十小时的软件修改与测试时间,而在软件试样完成后更极大减少了软件工程化更改所需时间。

## 5 结束语

本文设计了一种一级加泄连接器自动对接脱落控制方案,采用基于 PLC 测控组合、传感器供电组合、直流电源等的硬件系统对连接器实时参数进行采集并控制电磁阀驱动气动机构,并设计基于多粒度层次流程步骤的流程配置模块,梳理自动控制流程,以基于 MVVM 的上位机软件实现运载火箭一级加泄连接器快速、准确地自动对接脱落。本文所设计的控制系统具有通用性,在现有软硬件基础上修改基础配置与流程配置,即可对发射场多种气动系统机构进行自动控制。

## 参考文献:

- [1] MIAO L, LI J S, BIN W, et al. Research on unattended loading technologies of the new generation launch vehicles [J]. Aerospace China, 2022, 23 (2): 69-75.
- [2] 肖士利, 谢志丰, 潘忠文, 等. 运载火箭发射场无人值守加注发射技术研究 [J]. 宇航学报, 2019, 40 (4): 459-465.
- [3] 何家声. 航天发射地面支持技术 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2015.
- [4] 王爱伟, 刘忠明, 范虹, 等. 运载火箭连接器总体方案技术探讨 [J]. 导弹与航天运载技术, 2019, 44 (2): 79-83.
- [5] 白文龙, 李泳峰, 翟旺, 等. 运载火箭连接器自动对接技术应用分析 [J]. 导弹与航天运载技术, 2017, 44 (6): 65-71.
- [6] PRASAD G, TAJUDEEN E, SPENSER J. Autonomous docking system for space structures and satellites [C] //Bellingham: Proceedings of SPIE, 2005: 20-27.
- [7] GOSSELIN A M. Automated ground umbilical systems (AGUS) project [C] //Orlando: The Space Congress Proceedings, 2007: 67-77.
- [8] MANLEY W C, TAMASY G J, MALONEY P. Ares I linear mate umbilical plate and Collet [R]. Washington, D. C. : NASA, 2012.
- [9] 齐贤伟. 运载火箭自动对接脱落连接器随动技术研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- [10] 巴全坤, 戴维奇, 张振华, 等. 典型低温连接器自动对接对箭冲击载荷的研究 [J]. 导弹与航天运载技术, 2021, 7 (4): 21-26.
- [11] 黄小妮, 顿向明, 张育林, 等. 运载火箭推进剂加注自动对接与脱离机器人本体设计 [J]. 机器人, 2010, 32 (2): 145-149.
- [12] 郑国昆, 王小军, 李道平. 基于运载火箭加泄连接器自动对接系统的控制流程研究 [J]. 导弹与航天运载技术, 2015, 44 (1): 25-28.
- [13] 张鑫, 李志刚, 徐华, 等. 运载火箭自动对接连接器液压系统研究 [J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37 (3): 146-150.
- [14] 李泳峰, 吴新跃, 李道平, 等. 运载火箭气液组合连接器动态自动对接技术 [J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47 (9): 1774-1779.
- [15] 洪刚, 吴佳林, 张亮, 等. 一种运载火箭加泄连接器自动对接系统及方法 [P]. 中国: 202211295632, 2023-03-07.
- [16] 洪刚, 李红兵, 范鑫, 等. 新一代固液捆绑运载火箭研制及创新 [J]. 上海航天, 2022, 39 (5): 1-7.
- [17] 张振华, 王建秋, 刘照智, 等. 常规加泄连接器发讯性能试验分析 [J]. 导弹与航天运载技术, 2019, 44 (4): 98-102.
- [18] 刘立. MVVM 模式分析与应用 [J]. 微型电脑应用, 2012, 28 (12): 57-60.
- [19] MODI S, THAKKAR A, GANATRA A. A survey on approaches of multirelational classification based on relational database [J]. International Journal of Engineering and Advanced Technology, 2012, 1 (3): 77-81.
- [20] DEMEYER S, DUCASSE S, NIERSTASZ O. Object-oriented reengineering patterns [J]. The Journal of Object Technology, 2003, 2 (3): 151.
- [21] 李智. 基于 XML 描述的动态可扩展数据报文的模型构建方法 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (4): 191-195.
- [14] 石博文, 李明哲, 叶季蕾. 锂离子电池储能热管理技术应用现状分析 [J]. 电源技术, 2023, 47 (5): 562-569.
- [15] 朱世怀. 动力电池液冷系统的模型预测控制方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [16] 涂超, 黄清声, 王伟, 等. NCM 三元锂电池热失控研究 [J]. 佳木斯大学学报 (自然科学版), 2018, 36 (5): 811-814.
- [17] BERNARDI D, PAWLKOWSKI E, NEWMAN J. General energy balance for battery systems [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1985, 132 (1): 5-12.
- [18] LIANG J, GAN Y, LI Y. Investigation on the thermal performance of a battery thermal management system using heat

- pipe under different ambient temperatures [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 155: 1-9.
- [19] SAHEL D, AMEUR H, BENZEGUIR R, et al. Enhancement of heat transfer in a rectangular channel with perforated baffles [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 101: 156-164.
- [20] ZHU C, LU F, ZHANG H, et al. A real-time battery thermal management strategy for connected and automated hybrid electric vehicles (CAHEVs) based on iterative dynamic programming [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67 (9): 8077-8084.
- [21] KHANESAR M A. A novel direct model reference fuzzy control approach based on observer and its applications [J]. IFAC-Papers OnLine, 2016, 49 (13): 318-323.

(上接第 165 页)