

# 无人机综合仿真与测试平台技术研究

王文亮<sup>1</sup>, 马 磊<sup>2</sup>, 韩 蕾<sup>3</sup>

(1. 北京交通大学 机械与电子控制工程学院, 北京 100044;

2. 北京自动控制研究所, 北京 100854; 3. 中国民航大学, 天津 300300)

**摘要:** 固定翼无人机在军事, 国防, 民用上都具有非常广泛的应用; 无人机系统包括三大部分: 无人机机体, 无人机地面控制站以及无人机地面综合检测站; 详细介绍了当前已交付使用的一种适应于多种型号的无人机地面综合实验平台, 包括无人机地面飞行仿真和地面检测和故障诊断 3 个部分; 从整体设计方案出发, 从技术角度分析各个子系统的功能和设计方案; 提出了可以应用于无人机地面实验平台的基于专家系统的遥控-遥测知识对的知识库的建立和通过搜索知识库的故障诊断方法; 并以一个平台子系统为例介绍了以任务管理和数据流控制为核心的软硬件设计方案。

**关键词:** 无人机; 地面检测; 飞行仿真; 智能专家系统

## Design of an UAV Ground Comprehensive Experimental Platform

Wang Wenliang<sup>1</sup>, Ma Biao<sup>2</sup>, Han Lei<sup>3</sup>

(1. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Beijing Institute of Automatic Control, Beijing 100854, China;

3. China Civil Aviation University, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** Fixed-wing unmanned aerial vehicles (UAV) have a wide range of applications in military, defense, and civilian applications. The UAV system consists of three parts: the UAV body, the UAV ground control station and the UAV ground comprehensive testing station. An UAV ground comprehensive experimental platform adapted to various models is introduced in detail, including three parts: unmanned aerial flight simulation and ground testing and fault diagnosis. Starting from the overall design, the function and design of each subsystem are analyzed from a technical perspective. The knowledge base of the remote control-telemetry knowledge pair based on the expert system and the fault diagnosis method by searching the knowledge base is applied to the UAV ground experimental platform. Taking a platform subsystem as an example, the hardware and software design scheme with task management and data flow control as the core is introduced.

**Keywords:** UAV; ground testing; flight simulation; expert system

## 0 引言

固定翼无人机在军事, 国防, 民用上都具有非常广泛的应用。如今的无人机的发展正向着智能化, 信息化方向进行。而无人机上的众多敏感电子元器件, 如大量传感器, 控制电路是否正常运行以及无人机飞控计算机的逻辑是否正确, 决定着无人机的飞行的健康状况和可靠性。而无人机系统即包括三大部分: 无人机, 无人机地面控制站以及无人机地面检测站。因此, 在每次无人机放飞前的地面综合检测就显得尤为关键。一套对无人机的完善的地面综合测试将能确保无人机在起飞前得到快速的, 准确的, 完备的功能测试, 定位相应可能的故障, 是无人机飞行前的一道重要保障。目前各国都在通过标准化无人机地面检测流程, 模块化检测组件以达到在无人机快速更新换代的今天, 能够统一地对多机型, 多功能的无人机进行综合地面测试。我国在对固定翼无人机地面检测的数字化, 多机型匹配的研究过程中仍处于探索阶段, 相对于起步较早的西方国家, 有较多经验和技術上的差距。目前, 国内重点考虑无人机

机载设备及飞行功能的研制, 而忽视了无人机综合检测控制系统的研制, 使无人机综合检测控制系统处于相对落后的状态, 与较为先进的美国航空器测试技术相比, 其主要表现为检测控制自动化水平落后、通用性差, 可移植性差, 模块化不明显。

## 1 地面检测系统的整体结构及原理

地面综合检测设备系统应是严格模块化的, 可根据不同的检测要求, 接插不同的检测设备, 调用不同的软件。相应的物理接口需要统一设计并应用。

综合试验平台试验控制、地面指令模拟器、模拟器数据生成、数据获取、数据中心等, 与 XXX 模拟器、XXX 设备、XXX 等共同构成飞行器半物理仿真环境与测试平台。被测设备包括飞行器各路传感器, 子系统控制器, 各个模拟器对应的控制子系统, 飞行器管理计算机 (vehicle management computer, VMC) 以及机上电液流量匹配控制系统 (electrohydraulic flow matching control system, EFMC)。

由设计图可知, 数据中心与各个子系统均有数据交互, 这个支持多型号的设计来源于以元数据为基础的实验过程设置 (如参数结构表, 帧结构表, 飞行包帧结构表等), 通过 XML 格式 (机器友好) 或 EXCEL 格式 (人类友好) 的

收稿日期: 2019-03-15; 修回日期: 2019-03-29。

作者简介: 王文亮 (1995-), 北京人, 硕士, 主要从事航空航天自动控制 and 测试技术方向的研究。

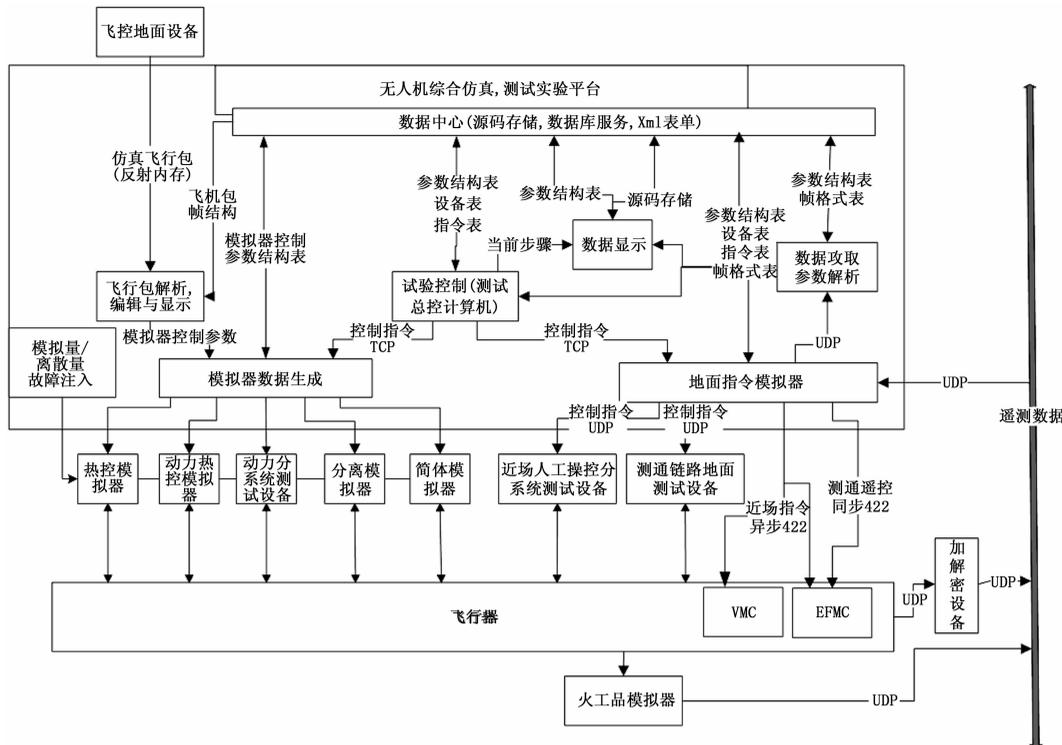


图 1 无人机地面综合检测系统整体设计

形式进行本地或初级配置，便于将相应的本地更改更新至全局数据库 (Microsoft SQL Server)，统一多个工控测试机的配置数据接口。

综合来看包括无人机地面飞行仿真以及模拟外界故障注入部分、无人机实时控制，数据采集检测以及智能故障诊断部分。以下分别介绍。

## 2 无人机地面飞行仿真以及模拟外界故障注入

无人机飞行仿真及故障注入系统由无人机地面综合实验平台中的飞控地面设备，飞行包解析，编辑和显示系统，故障注入系统，模拟器数据生成系统，XXX 模拟器、XXX 设备以及数据中心等构成。

为了真实的模拟无人机的飞行状况，模拟器数据生成设备进行无人机外部物理参数的飞行仿真，根据已有的仿真飞行包数据，通过高速互联的反射内存卡，计算产生相应的参数，输入给各个模拟器和测试设备。实际的物理仿真由过去在天上采集的各个传感器信号构成，将之前正常的遥测数据进行回放。通过此种方法，也可以便于检验之后的故障分析过程，同时为之后的可能的基于数据的故障检测方法提供思路。

故障注入转发系统软件主要实现对机载系统的故障注入，并对故障注入前后的数据进行显示与存储。同时，要求故障注入转发系统具有远程接口，可通过以太网接受上位机控制，并可通过网络实现数据的远程存储。故障注入系统由上位机与下位机组成。上位机使用 windows 7 操作系统负责人机交互、接收远程终端指令、对下位机控制。下

位机实现对硬件资源的操作完成故障注入转发，使用 RT 系统以满足实时性要求。故障注入转发系统设备组成框图如图 2 所示。

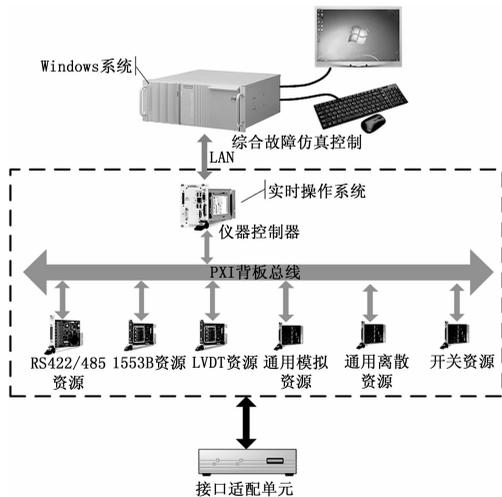


图 2 故障注入转发系统设备图

而模拟量/离散量注入则确保无人机在部分系统出现人为故障的情况下能做出相应调整，响应外界故障信息。为了提高故障注入的实时性和可靠性，本子系统采用基于实时操作系统的 LabWindows/CVI 下位机操作多种 PXI 板卡将开关量故障或模拟量故障注入仿真环境。

其中模拟量故障注入原理如图 3 所示。

开关量故障注入原理如下图 (以 28 V 为例)：

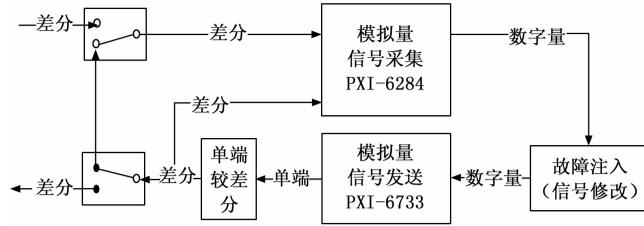


图 3 模拟量故障注入与转发框图

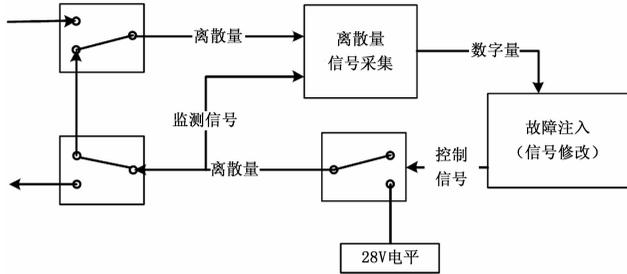


图 4 离散量 28 V 开关故障注入与转发框图

XXX 模拟器是最新的基于 VXI 虚拟仪器的机上设备模拟设备, 可使用统一的硬件接口支持不同的软件逻辑, 在多型号无人机检测中具有重要应用。每一个模拟器是外接机箱的大型计算平台, 根据输入量和状态参数计算提供相应的输出, 即遥测数据。

仿真部分与故障注入部分包括如下方面的技术研究:

- 1) 研究无人机运动学 & 动力学模型;
- 2) 研究模型数值方法;
- 3) 研究虚拟仪器控制技术;
- 4) 研究控制实时性技术。

### 3 地面检测系统对无人机进行实时控制, 数据采集检测

地面检测系统由综合试验平台中的试验控制系统, 地面指令模拟器系统, 数据获取系统, 数据中心系统, 数据显示系统等构成。

一个完整的检测设备包括四部分: 信息采集部分; 信息处理部分; 信息传输、记录或显示部分; 附加设备部分。在无人机综合试验平台中, 我们需要全面检测系统功能, 并完成数据采集与分发, 和保证有效的数据通信地面检测设备要保证遥测数据采集的实时性、准确性和可靠性。地面综合实验平台和飞控计算机以及各个分系统之间的数据通讯应当保持同步, 数据采用多个标准的帧格式, 确保准确可靠。

过程中的网络通信采用实时传输协议, 采用实时网络构成, 在各个网络节点连入硬件构成的网络时间检测控制器, 确保数据的实时性和同步性。

数据获取与数据中心是综合试验平台的组成部分, 主要接收数据源数据 (遥测数据) 并根据帧信息进行解析, 解析后的参数向数据获取、数据显示发送。由于不同的数据源具有不同的波特率, 因此在设计中, 数据获取采用固

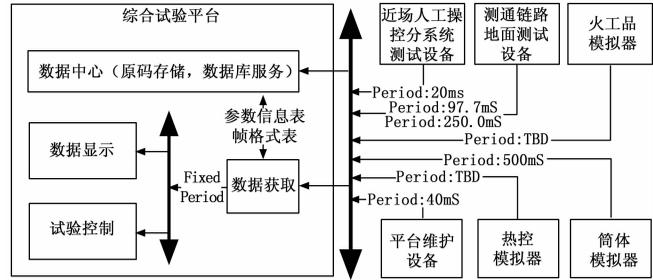


图 5 各个模拟设备的数据周期严格控制

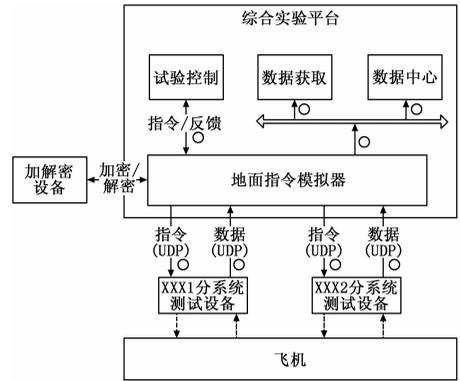


图 6 实时网络构建, 圆点为硬件实时检测设备节点

定频率方式, 将多个非同源数据进行规整后, 向 2 个输出出口 (试验控制和数据显示) 以固定频率发送。其实现原理如图 7 所示。

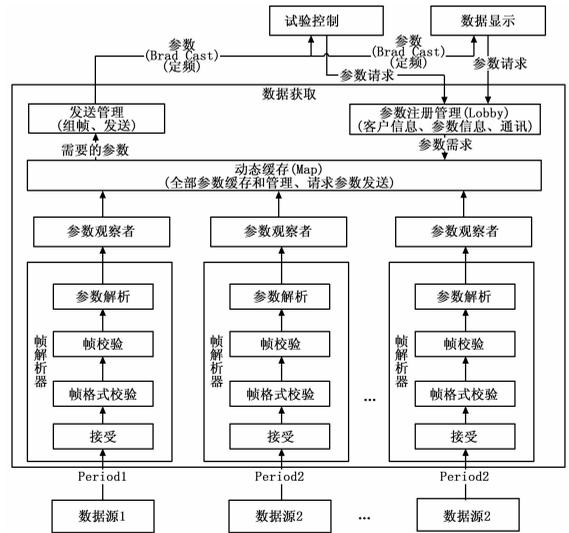


图 7 数据获取原理示意图

如图所示, 各参数解析器的解算结果都会存储在动态 MAP 中, 当收到客户端发送的参数请求后, 在 MAP 中索引该参数的当前最新值, 并以固定频率组播至客户端。

测试与检测部分包括如下技术研究:

- 1) 研究数据通信原理;
- 2) 研究网络通信和接口技术;
- 3) 研究关系型数据库处理技术。

### 4 无人机各系统的故障地面诊断

一般地说,故障诊断就是根据系统状态监测获得的信息,结合已知的诊断对象结构特性、参数、环境条件及运行历史,对系统可能发生的或已经发生的故障进行预报、分析和判断,确定故障的性质、类别、程度、原因及部位,指出故障发生和发展的趋势及后果,提出控制故障继续发展和消除故障的措施,并加以实施。诊断的实质是一种在诊断推理方法作用下,诊断信息从输入趋向诊断结论输出的过程。

根据机载设备的特点,该实验平台采用由基于事例推理子系统构成的主要的推理结构。该结构可以较好地模拟专家的故障诊断能力,并具有较强的适应性和综合性,可用于故障的预判和诊断。

该专家系统应用于图 1 中的试验控制部分,作为故障检测系统的“大脑”。它将发送时间序列相关的控制指令,接收的遥测回令内容形成的闭环控制进行综合分析。试验控制的遥控指令按测试流程归类,可分别测试不同子系统,测试流程按时间前后,逐个发出相应的控制指令,等待数据获取传回来的遥测回令完成逐个测试结果判断。

通过将相应的遥控—遥测对的逻辑值关系记录进入数据库。由于故障与控制时间相关,因此考虑将多个连续时间点一起构成故障知识序列,并用树形结构存储对应的知识表,构成这里的专家系统。在实验过程中,通过搜索知识库就可以对无人机飞行状况做出相应预判,达到提前“会诊”的要求。

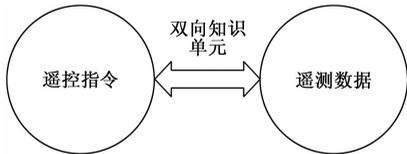


图 8 遥控—遥测知识对

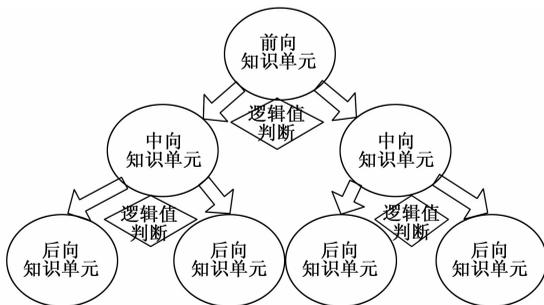


图 9 三层知识单元组成的故障知识序列

由多个知识序列组成的知识库,形成了一棵很大的判断树,该树的子节点个数,长度都是不固定的。应用相应的树形搜索可以快速定位所需知识的判断树的位置。而树形搜索方法,和不断扩大的知识库对知识单元——遥控—遥测对的数据结构和编码要求较高。本实验中采取了双向链表表示知识序列,便于知识树的正向和逆向搜索。

虽然单个知识单元的结构可以提供通用接口,来应对不同型号无人机的检测要求。但是,知识序列本身需要根据型号进行相应修改,其中涉及到大量位置搜索与插入、删除节点的操作。因此引入知识集合的概念,将通用的故障知识作为子集公用,而不同型号的差异由相应的集合的并集覆盖。最后得到一个存储和计算空间较优的知识库。该知识库可大量重用,部分修改完善,并增添新规则。

地面故障诊断部分包括如下技术研究:研究智能故障诊断技术。

### 5 基于核心任务与核心数据流的软硬件设计

无人机地面综合仿真,测试平台涉及众多软硬件。以图 1 中的地面指令模拟器为例,介绍相应的设计流程。地面指令模拟器是综合试验平台的组成部分,主要向飞行器发送地面模拟指令,并可接收试验控制设备的控制信息,依据试验流程进行指令发送动作。地面指令模拟器设备运行架构如图 10 所示。

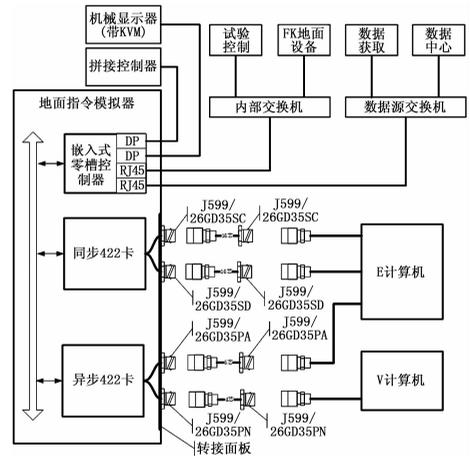


图 10 地面指令模拟器硬件联接关系图

该综合实验平台的软件设计中最重要的部分是建立核心任务与控制核心数据流。

软件从功能上分为 5 个模块:配置文件管理模块、设备管理模块、指令合成模块、任务管理模块、UI 模块。

如图 11 所示,各模块功能描述如下:

- 1) 配置文件管理模块负责解析脚本,将相关参数缓存至本地,供其它模块使用:
  - (1) 帧格式表:配置 C/S 帧格式;
  - (2) 设备表:配置网络、同步 422、异步 422 等相关参数;
  - (3) 指令参数基础表:配置指令/参数相关参数;
  - (4) 服务器配置表:配置服务器 IP 地址、用户名、密码、数据库名;
- 2) 设备管理模块负责初始化硬件相关资源,从配置文件管理模块中获取设备参数表进行初始化:
  - (1) TCP 服务器:初始化为 TCP 服务器,监听客户端请求;

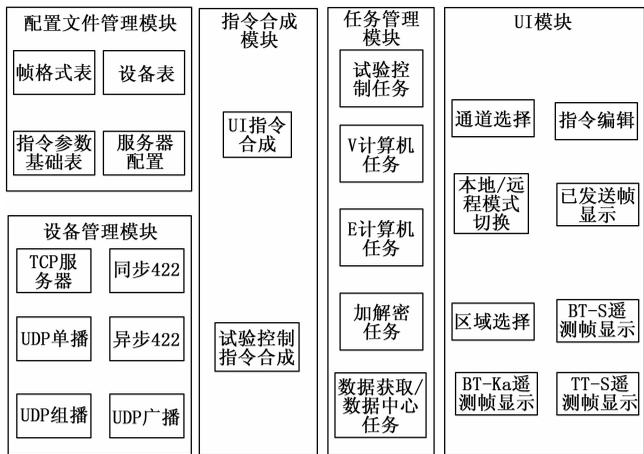


图 11 地面指令模拟器软件模块图

(2) UDP 单播: 初始化为 UDP 单播, 供其它模块进行收发操作;

(3) UDP 组播: 初始化为 UDP 组播, 供其它模块进行收发操作;

(4) UDP 广播: 初始化为 UDP 广播, 供其它模块进行收发操作;

(5) 同步 422: 对同步 422 板卡进行初始化, 供其它模块进行收发操作;

(6) 异步 422: 对异步 422 板卡进行初始化, 供其它模块进行收发操作;

3) 指令合成模块负责对其它模块将要设置的参数值, 收发次数等参数进行合并, 提供给其它模块使用;

(1) UI 指令合成: 接收 UI 传来的参数, 与其它参数合并供其它模块使用;

(2) 试验控制指令合成: 接收试验控制传来的参数, 与其它参数合并供其它模块使用;

4) 任务管理模块负责和系统中的其他模块按照通信协议的规定进行通信。任务管理模块的功能包括:

(1) 试验控制任务: 接收试验控制指令、解析参数、发送心跳、反馈状态等;

(2) VMC 计算机任务: 发送控制指令, 接收遥测数据等;

(3) EFMC 计算机任务: 发送控制指令, 接收遥测数据等;

(4) 加解密任务: 对遥控指令进行加密, 对遥测数据进行解密;

5) UI 模块负责进行用户交互, 提供简洁、美观、人性化的交互手段来完成各项功能。UI 层主要的模块包括:

- (1) 通道选择: 可选择不同通道;
- (2) 本地/远程模式切换: 可选择本地模式或远程模式;
- (3) 区域选择: 可选择不同指令区域供用户编辑;
- (4) 指令编辑: 编辑指令内容, 设置发送次数;
- (5) 已发送帧查看: 实时显示已发送帧;

(6) 遥测帧查看: 实时显示遥测帧。

核心数据流控制由指令合成模块进行, 核心任务由任务管理模块执行。

软件总体操作流程描述整个软件的总体操作过程, 指令编辑流程为部分构成核心数据流的关键流程。具体如下所示。

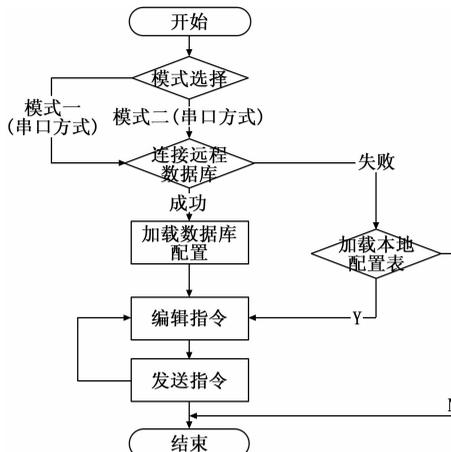


图 12 软件总体操作流程

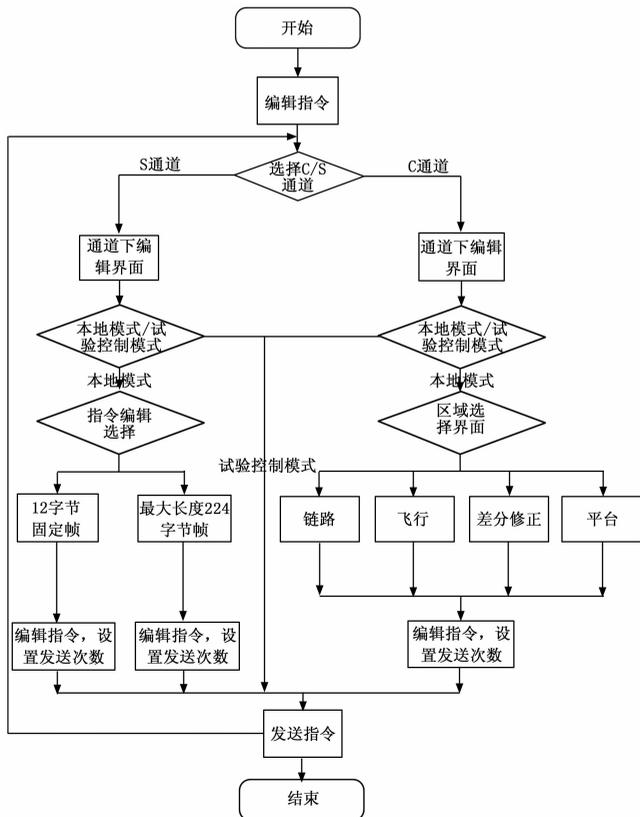


图 13 总体流程中指令编辑流程图

### 6 实验结果与分析

本课题所研究的无人机地面综合检测系统, 主要应用于无人机的飞控系统和多个分系统的地面检测, 实现对无人机的数据采集、分析和智能故障诊断。