

运载火箭一体化综合测控技术研究

汪东军¹, 罗亚锋²

(1. 北京交通大学 机械与电子控制工程学院, 北京 100044;

2. 火箭军驻燕山电子设备厂 军代室, 北京 100076)

摘要: 新一代运载火箭对测发控系统的自动化、智能化, 以及未来产品化的测试数据管理和批量并行测试需求提出了更高的要求, 以运载火箭地面测控一体化及信息综合管理系统为背景, 对火箭的组件、部段级批量并行测试及整箭测发控技术进行了研究, 提出了分布式实时综合测控技术, 将动力、测量、控制等多个分系统以及部段测试统一到本系统中, 对系统数据传输的实时性和可靠性进行了研究; 搭建了基于上述新型测发模式的联动试验系统, 包括前端分布式节点系统、后端统一测发系统及远端云服务支持管理系统等, 对一体化综合测控技术进行了验证。

关键词: 一体化测控; 分布式系统; 火箭部段级测试; 系统数据传输

Research on Integrated Measurement and Control Technology for Launch Vehicle

Wang Dongjun¹, Luo Yafeng²

(1. Department of mechanical and electronic control engineering, Beijing Jiao Tong University, Beijing 100044, China;

2. Beijing Aerospace System Engineering Institute, Beijing 100076, China)

Abstract: In order to realize the joint demonstration and verification of the new type of measurement and control system for ground leveling and control system, including front-end unattended, back-end unified measurement and rear remote support, based on the integration of ground measurement and control and information management system. Introduced the compatibility of the rocket test and the parallel test simulation. The distributed ground integrated measurement and control technology was proposed. The power, measurement, control and other subsystems and segment tests were unified into the system and based on Distributed measurement and control technology studies the real-time and reliability of system data transmission.

Keywords: ground measurement and control system; distributed measurement and control technology; rocket section test; system data transmission

0 引言

随着火箭规模的不断发展, 以及对快速、智能以及无人值守等测试要求的不断提高, 原有的专用型、集中型测控系统架构将被一体化多信息综合的测控系统取代。依托于先进实时总线和网络, 以及更加灵活的网络组合方式, 把分布在不同地理位置的具有独立功能的测控单元连接起来, 以达到测控资源管理、协同工作、分散操作、集中管理、测量过程监控和设备诊断等目的。在该架构下, 测控系统的信息流控制以及综合信息应用方式将直接影响测控系统的实际工作。地面测控一体化系统演示验证试验将结合地面测控一体化设计及信息综合应用系统, 对测控系统的控制、监测、信息交互以及故障诊断等信息应用方式进行研究验证, 并完成原理性验证试验, 为后续型号应用提供理论依据。

考虑到原有型号地面测控系统划分为动力、测量、控

制等多个分系统, 每个系统自成一体系, 并且在测试的不同阶段, 由于被测对象的需求不同、地点各异, 采用不同的测试系统和测试软件, 这造成了极大的硬件设备重复投入和人员浪费, 并且由于各个分系统之间、系统内部各个测试阶段的数据无法做到互联互通, 也使得数据资源利用率极低。为了改进这些缺点, 提出了分布式测控技术, 并对其进行研究。

1 地面综合测控系统

为实现高效而精确地模拟、检测飞行器产生的信号, 并提高系统数据采集、分析、记录、评估的自动化、智能化程度^[1], 提出了一种基于软件模拟以及实验验证的地面综合测控系统。

地面测控一体化技术主要有地面测控系统节点远程控制, 应对地面测控系统的节点设备进行配置及控制、并对节点设备的状态进行采集, 完成对节点间的信息交互与协同配合, 并采用多网融合技术构建测控网络, 对地面测控网络进行配置管理的功能, 可针对地面测控系统应用特点^[2], 以及测试数据管理特点, 完成数据流规划以及数据分析管理工作, 可对火箭部段级进行测试。

收稿日期: 2019-01-15; 修回日期: 2019-02-25。

基金项目: 国家自然科学基金项目(M17GY500160)。

作者简介: 汪东军(1996-), 男, 甘肃省天水市人, 硕士研究生, 主要从事机电控制方向的研究。

对地面综合测控系统进行了研究,提出了分布式综合测控技术,并对信息交互的实时性进行研究,在测试过程中提出了火箭部段级的单独测试与并行测试的兼容,并且进行了软件模拟与试验验证。

2 分布式综合测控技术的应用

2.1 地面综合测控技术的分布式控制

针对原有型号飞行器集中式控制的缺点,本课题提出了分布式地面综合测控技术研究,因此对飞行器地面综合测控技术进行研究和验证,将动力、测量、控制等多个分系统以及分布于全国各地的组件和部段测试系统都统一到本系统中,实现地面综合测控系统从体系到硬件、软件的一体化设计。采用大数据云服务方式构建分布式地面综合测控系统。分布式地面综合测控系统如图 1 所示。

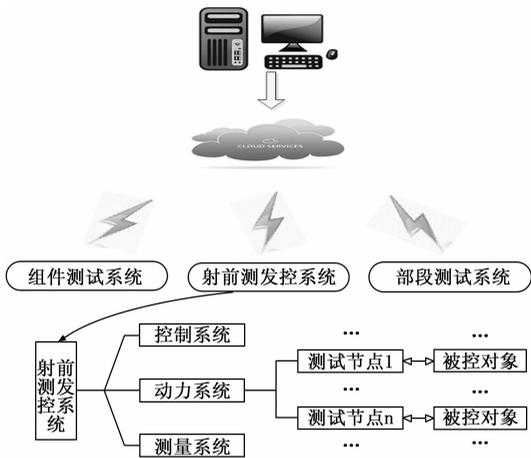


图 1 分布式地面综合测控系统

与原有型号的集中式地面综合测控技术相比,采用分布式地面综合测控技术可节省硬件资源,在对分布式地面综合测控技术做研究时,节点与主控系统实时性要强,以及各节点之间系统时间同步作为本课题攻克的难点以及创新点,节点之间数据传输的实时性为本课题分布式地面综合测控技术的关键部分。

2.2 公用数据的实时性提高

为了提高各节点与主控系统之间数据传输的实时性^[3],采用了合理地进行子系统分割这种方法,采用递阶控制结构^[4-5],把地面综合测控系统分为主控系统和若干个节点子系统。

从图 2 可以看出各节点协调工作框架图。

设地面综合测控系统的状态方程^[5]为:

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU & X(t_0) = X_0 \\ Y = CX \end{cases} \quad (1)$$

其中: $X(t)$ 为状态向量, U 为控制向量, Y 为输出向量, A 、 B 、 C 为常数。

设地面综合测控系统的总目标函数为 J :

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_1} [Y^T Q Y + U^T R U] dt \quad (2)$$

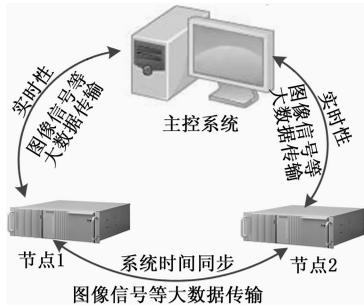


图 2 各节点协调工作框架图

$$= \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_1} [X^T C^T Q C X + U^T R U] dt \quad (3)$$

假定除 A 阵之外,其它矩阵: B 、 C 、 Q 、 R 均为对角阵。则可把地面一体化系统分解为若干节点子系统,各节点子系统只通过状态变量相互关联。

$$\begin{cases} \dot{X}_i = A_{ii} X_i + B_i U_i + \sum_{j \neq i}^N A_{ij} Y_j & (i, j = 1, 2, \dots, N) \\ Y_i = C_i X_i \end{cases} \quad (4)$$

其中: A_{ii} 为 A 阵的对角子矩阵, A_{ij} 为 A 阵的非对角子矩阵, B_i 为 B 阵的子矩阵, C_i 为 C 阵的子矩阵, 而 $\sum_{j \neq i}^N A_{ij} Y_j$ 为状态关联量。

通过设置主控系统的状态方程,把主控系统的目标函数 J 分解为 i 个子目标函数:

$$J = \sum_{i=1}^N J_i \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (5)$$

$$J_i = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_1} [X_i^T C_i^T Q_i C_i X_i + U_i^T U_i R_i] dt \quad (6)$$

Q_i 为 Q 阵的子矩阵, R_i 为 R 阵的子矩阵。如果状态关联量 $\sum_{j \neq i}^N A_{ij} X_j = 0$,则表示各子系统完全独立。这时使各子系统实现 $J_i \rightarrow \min$ 并不能保证 $J \rightarrow \min$,严重时甚至连主控系统的稳定性无法保证。为此,采用了分解—协调控制,采用递接控制结构^[6],各节点子系统分别由局部控制器进行控制,各局部控制器之上由上位机进行协调。最终可提高主控系统与节点设备之间的实时性。

3 部段级测试的模拟

3.1 部段级流程单独测试与并行测试的实现

地面测控系统的新型测发模式就是以火箭待发段的模拟测发流程为主线,对正常情况下整个地面测控系统进行联动演示,包括前端无人值守、后端统一测发及后方远程支持等。综合利用后方软硬件资源,实现对部段级的单独测试以及并行测试模式的兼容是最关键的部分。

在进行部段级测试时,如何实现流程可配置性是实现单独测试和并行测试的首要解决问题,在此基础上,提出了结构化描述性语言,可实现测试流程的可配置性,最终能够完成部段级流程的单独测试与并行测试。

随着分布式技术的逐步成熟,已知如何提高地面综合测控技术的协同性、可扩展性以及信息完整性是部段级测试面对的重大挑战^[7-9],为了实现单独测试和并行测试这两个目标,必须要将测试数据信息描述格式进行标准化,实

现测试数据的交换和共享, 以此为基准, 提出了结构化描述性语言。采用树形结构描述测试信息, 将整个地面综合测试平台作为根节点, 该测试平台包含 n 个子节点, 每个子节点包含有测试环境、测试平台、测试过程、测试环境、测试结果, 将节点作为标记语言的基本元素, 根据节点之间的隶属关系定义语法体系, 可以遵循一定规律定义一个测试项的配置文件。图 3 为结构化描述性语言的框架。

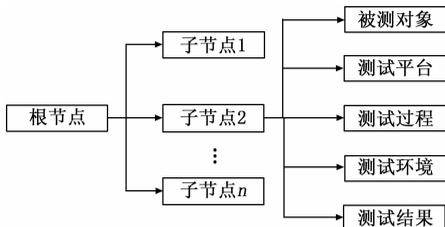


图 3 结构化描述性语言框架

如图 4 所示, 为测试项进行标准化之后的语言, 可包含所测试的信息, 将该信息转化成我们所需求的语言, 通过该标准进行标准化之后, 可在测试系统里面直接配置该信息, 实现测试项的可配置。

```
<testProcedure id="Ram1" describe="液氮加注" Index="1">
  <testCase describe="打开液氮加注活门, 开始液氮大流量加注" Index="0">
    <testStep class="CWait" Index="0">
      <name>Event1</name>
    </testStep>
    <testStep class="CCurFlow" Index="1">
      <index>2</index>
      <key>testing</key>
    </testStep>
    <testStep class="CSleep" Index="4">
      <timeout>500</timeout>
    </testStep>
  </testCase>
  <testCase describe="液氮大流量加注好后, 关闭液氮加注活门, 停止液氮大流量加注" Index="1">
    <testStep class="CWait" Index="0">
      <timeout>500</timeout>
    </testStep>
    <testStep class="CCurFlow" Index="1">
      <index>2</index>
      <key>testover</key>
    </testStep>
    <testStep class="CWakeUp" Index="2">
      <name>Event2</name>
    </testStep>
  </testCase>
</testProcedure>
```

图 4 测试项标准化

通过结构化描述性语言^[10]的提出, 可实现部段级测试流程的可配置性, 能够通过配置测试项实现部段级测试的单独测试和并行测试。通过配置标准测试项文件, 可实现全箭和部段级的单独测试以及并行测试^[11]。

3.2 部段级测试过程中的流程动态配置

在已有型号的各个分系统中, 大部分测试系统已经能实现一定程度的自动化测试, 但系统的硬件结构、通信协议、软件测试流程和结果判读方式都是固化的, 一旦测试系统部署后很难进行改变, 也无法在紧急情况下调整测试流程。

采用基于结构化描述的测发控系统动态配置技术, 将测试系统硬件平台、通信接口、测试流程、判读方式等信息均采用结构化描述的方式进行配置, 底层采用标准化语言方式描述, 确保各分系统之间的信息无缝交换。

为了方便对标准化描述语句的编辑, 本课题另外开发了测试信息配置工具, 该工具可以以图形化拖拽方式对

标准化描述语言字段进行编辑, 以此实现对测试信息的图形化配置。可事先通过模板编辑模式将常用的硬件描述、测试项目、测试流程、判读方式、应急测试流程等信息编辑保存, 在需要更改测试信息时可通过拖拽组合迅速生成新的测试系统或测试流程。

如图 5 可知, 通过此动态配置方式可获得如下优势:

- 1) 快速配置一套测试系统或应急测试流程, 很大程度上提高了开发和使用效率;
- 2) 无需手动修改代码, 使工作人员精力集中于系统功能和流程的正确性上, 降低了对系统开发和使用人员的要求;
- 3) 采用图形化拖拽方式编辑, 避免因直接写代码造成的程序缺陷或人为失误。



图 5 测试项动态配置

4 软件设计

4.1 模拟软件的设计

该模拟软件主要有指挥控制服务器、数据服务器、指挥控制客户端、实时交换机、基础级外系统各测控危机、射前质量监测服务器、前端等效接口设备等 7 个部分组成。如图 6 所示, 数据服务器主要用于存储部段级测试数据表, 基础级外系统各测控微机主要用于模拟测试流程, 实时交换机用于与主控软件与节点设备数据传输与通信, 并且控制前端等效设备。所有测试数据都通过质量健康监测软件进行数据监测。

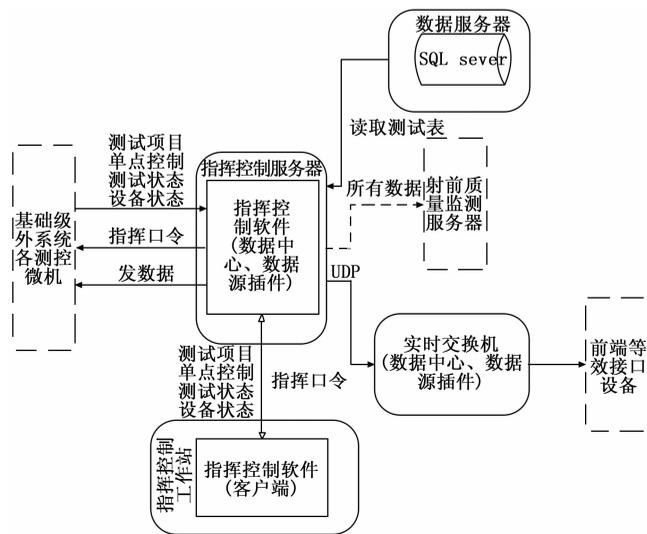


图 6 指挥控制软件结构图

4.2 软件实现

如图 7 所示，工作人员先进行管理员登录进入指挥控制软件，该 UI 有导航面板和部段级测试和全箭测试，导航面板有测试状态、设备状态和单点控制，点击测试状态按钮可模拟火箭部段级测试和全箭测试，进行全箭测试时，先采用流程配置工具进行测试项的流程配置，配置完成之后进入测试 UI。

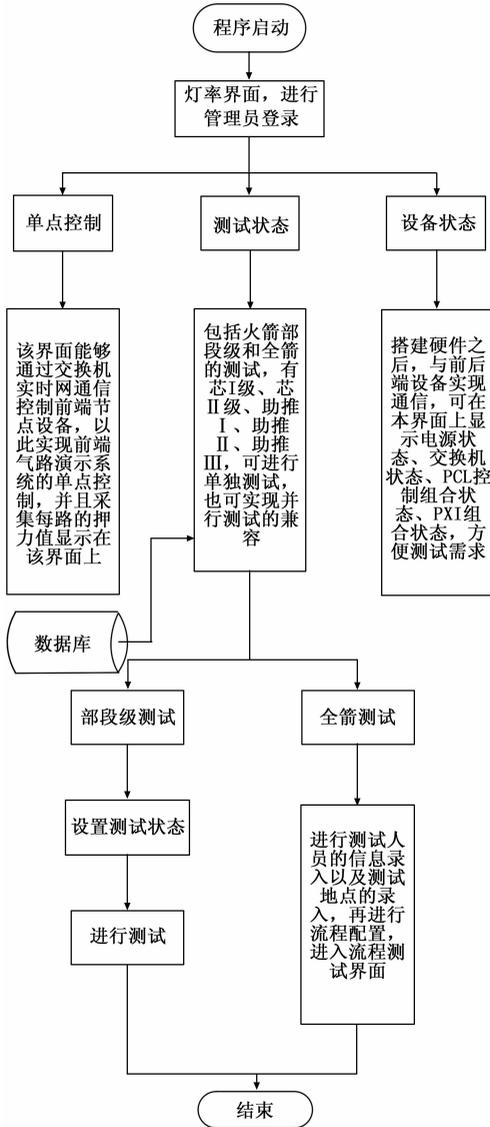


图 7 软件实现流程图

测试主要包括火箭的部段级测试以及全箭的测试，在测试过程当中，可对部段级以及全箭的测试项进行配置，可根据需求进行相应的测试，在测试过程中，服务器端存储采用 MySQL 数据库，将测试信息保存在数据库中^[12]，包括有全箭和部段级测试信息，测试信息如表 1 所示。

配置好测试信息之后，配置好测试信息之后，可双击未测试的测试项，进入基本信息录入界面，进行测试时间、测试地点、测试名称的录入，录入好信息之后，进行相应的流程配置，点击流程配置可进入组态软件，根据已配好的测试

项可进行拖拽式配置测试流程，测试人员可灵活更改。

表 1 部件级数据库表

测试名称	测试时间	测试次数	测试部段	测试状态
箭地接口匹配测试	2018-12-08 13:34	2	CZ-9A 芯一级	未测试
能源功能测试	2018-12-08 14:34	1	CZ-9A 芯二级	未测试
电气网络通信功能测试	2018-12-28 15:34	3	CZ-9A 助推一	未测试
控制功能测试	2018-12-28 16:34	5	CZ-9A 助推一	未测试
测量功能测试	2018-12-28 17:34	7	CZ-9A 助推二	未测试
故检与数管功能测试	2018-12-28 18:34	1	CZ-9A 助推一	未测试

当进行芯一级等部段级或者全箭测试时，选择所要测试的部段级或全箭，可进入配置界面，可以认为进行相应的测试配置，如可配置测试时间、测试次数、测试状态是未通过还是已测试，这样避免了繁琐的测试程序，一些不需要测试的测试项可以人为的将它取消。在测试过程当中，可以通过配置测试表，进行火箭部段级和全箭的单独测试或者并行测试。测试流程如图 8 所示。

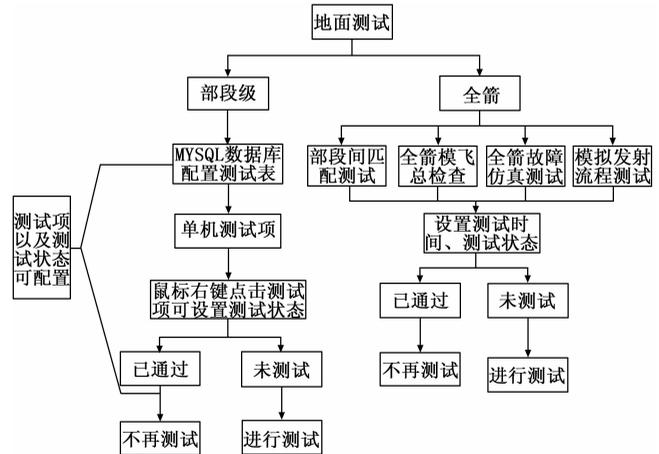


图 8 火箭部段级测试流程

5 仿真与验证

对部段级测试进行了研究，编写了地面综合测控软件，通过软件进行多次模拟。

全箭进行实时分布式测试^[13]由部段级测试系统（客户端）、服务器、实时网络、无线网络、节点设备、气路系统等组成，为节省资源提高效率系统采用 B/S 架构，各客户端对各部段级及全箭进行测试，测试完成后将测试结果上传至服务器中，同时各客户端可查看各部段级和全箭测试进度及测试状态，实时分布系统如图 9 所示。

由图 9 可知，测试系统由测试人员、测试系统、实时

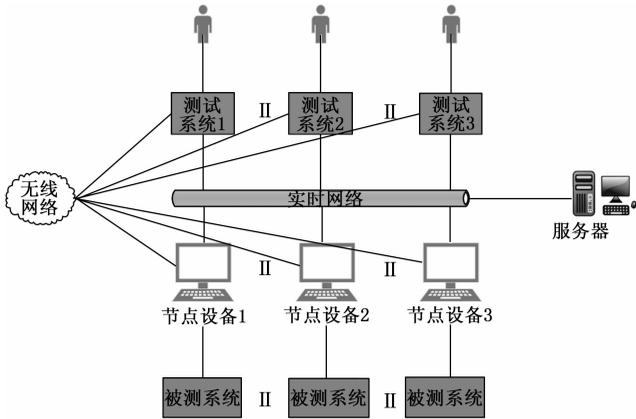


图 9 实时分布式系统

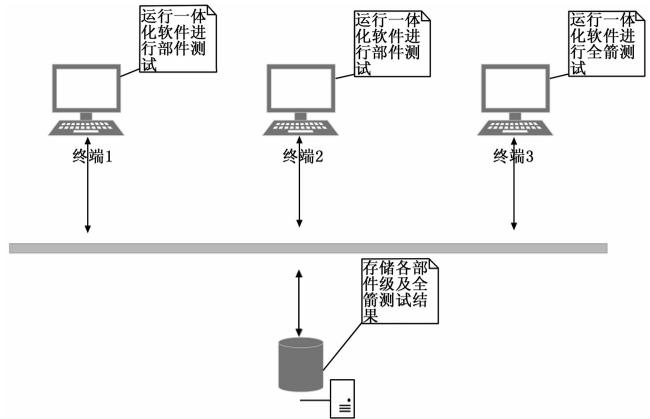


图 11 测试状态上报及统计原理图

网络无线网络、节点设备、服务器、被测系统等组成。

服务器端存储采用 MySQL 数据库, 各客户端测试流程及测试结果更新和统计流程如图 10 所示。

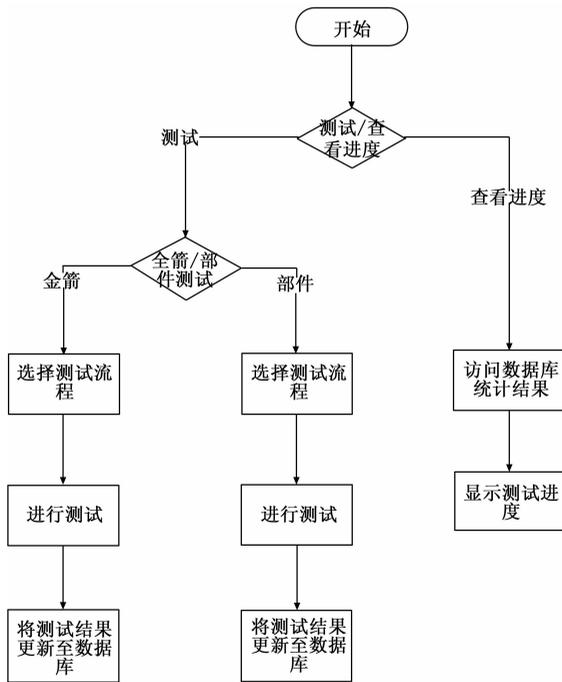


图 10 分布式测试流程

各测试系统完成相应测试后将测试结果上传至数据库中, 同时各系统均可查看各测试项的进度及测试结果。如图 11 所示, 在测试过程中测试状态可进行上报及统计结果。

该模拟软件可实现地面测控系统的分布式控制。能够对测试信息进行实时地采集, 并且能够提高准确性, 由图 12 可知, 可对测试数据进行采集, 并且能够实现曲线的绘制, 进行趋势分析。通过结构化描述性语言的提出, 通过软件模拟, 语言可进行配置, 通过配置测试项, 能够实现部件级的单独测试和并行测试。

综上, 针对原有型号火箭的控制缺点, 提出了地面一体化综合测控技术, 该技术主要包括有针对地面综合测控系统的分布式控制, 以及在控制过程当中公用数据的实时

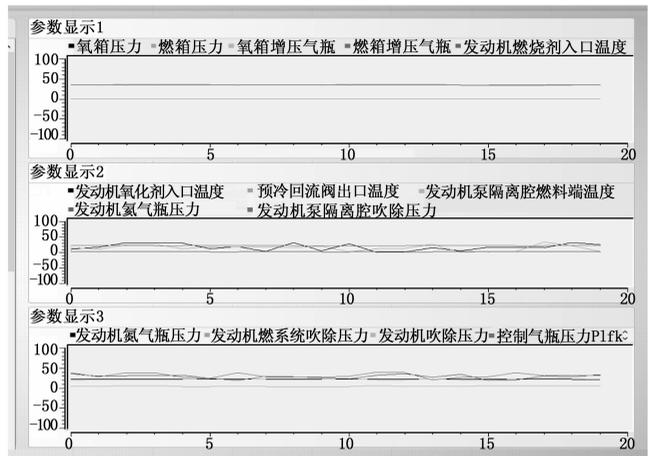


图 12 测试数据显示

性以及准确性的提高, 还实现了飞行器部段级测试过程当中的测试流程的并行测试和单独测试, 以此提出了结构化描述性语言, 实现了测试项的标准化以及测试项的可配置性, 通过软件的模拟和实验的验证, 该技术能够实现上述功能, 并且能够进行模拟采集综合测控系统当中的数据进行曲线绘制和趋势分析, 能够实现火箭的一体化测试。

参考文献:

[1] 童 钊, 秦守敬. 多级分布式计算机控制系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.

[2] Zhao Y. On-chip transformer design and modeling for fully integrated isolated DC/DC converters [J]. Dissertations & Theses - Gradworks, 2014.

[3] 崔小武, 盛翊智, 瞿 坦. 分布式控制管理系统实时性与可靠性的研究 [J]. 微型机与应用, 1990 (1): 20-21.

[4] 张小林, 池 久, 周军涛. 某型无人机地面综合测试系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (10): 2244-2246.

[5] Gorr C, Seavey M. Current ATML standards status [A]. IEEE Autotestcon 2007 Systems Readiness Technology Conference [C]. 2007: 276-279.