DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2025.05.009
CSTR: 32220.14.gk202505009

月球土壤水分子分析仪地面检测系统软件的设计

唐 晨[1], 王 煜[1*], 林 方[2,3], 刘国华[1]

(1 安徽大学物质科学与信息技术研究院, 安徽 合肥 230601;
2 中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 中国科学院环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;
3 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026)

摘 要: 月壤水分子分析仪是中国拟发射的“嫦娥七号”搭载的飞跃探测器的一个有效载荷。在月壤水分子分析仪研制过程中，需要配套的地面检测系统模仿飞跃器测试和调试该分析仪。该地面检测系统由软硬件构成，软件部分主要包括实现水分子分析仪的通讯接口、模拟数据发生、实现人机交互界面等功能。为了确保数据的完整性，分析仪与飞跃器之间的通讯要求执行一种纠错重发的通信协议，其中分析仪端协议的实现由现场可编程门阵列 (FPGA) 完成。为了验证FPGA的设计，地面检测系统要求在通讯过程中的指定字节的指定位置，能够产生不同方式的错误，包括奇偶位、校验和等问题。本文详细介绍了该软件系统的设计和实现过程。最终设计的软件具有造错功能，能够在通信过程中在指定的数据包中以不同的比特位生成错误代码。基于此功能，分析仪通信端口的设计错误都可以被发现，该机制可以更方便地实现对通讯接口的完备测试。

关 键 词: 地面检测系统; 通讯协议; 通信造错; 数据完整性
中 图 分 类 号 : TP319 **文 献 标 识 码 :** A **文章编号:** 1673-6141(2025)05-666-010

Design of a software applied in ground-test-system for lunar soil moisture analyzer

TANG Chen[1], *WANG Yu*[1*], *LIN Fang*[2,3], *LIU Guohua*[1]

(1 Institutes of Physical Science and Information Technology, Anhui University, Hefei 230601, China;
2 Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, HFIPS, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
3 University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: The lunar soil moisture analyzer is a payload of the flying probe carried by Chang'e-7, which will be launched to the moon by China. In the development process of the lunar soil water molecule analyzer, a ground-test-system is required to simulate the flying probe to test and debug the lunar soil moisture analyzer. The ground-test-system consists of hardware and software, and the software part is responsible for

基金项目: 安徽省自然科学基金 (2108085QF283)
作者简介: 唐 晨 (1997-), 安徽六安人, 硕士研究生, 主要从事航天载荷地面检测系统的软件实现方面的研究。Email: 945430971@qq.com
导师简介: 王 煜 (1971-), 北京人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事航天电子学方面的研究。Email: yuwang@aiofm.ac.cn
收稿日期: 2022-11-11; **修改日期:** 2022-12-12
*通信作者。

communicating with the analyzer, feeding data to the analyzer, and building a human-machine-interface. To ensure the integrity of the transimitted data, a communication protocol with correction and repeat mechanism is required to be implemented in the communication between the analyzer and the probe. In analyzer side, the protocol is fulfilled by a field programmable gate array (FPGA). To verify the design of the FPGA, the ground-test-system is required to generate different types of errors, including parity bit and checksum and so on, in different positions and different modes during communication. This article descripts the design and implementation of the software of the ground-test-system. It is shown that the final designed software has error making function, which is capable of generating error codes at different bits in a specified data package during communication. With this function, any design faults in the communication port of the analyzer can be detected, which greatly faciliates the complete testing of the communication interface.

Key words: ground-test-system; communication protocol; error code generator; integration of data

0　引　言

“嫦娥七号”拟于2026年前后实现在月球南极着陆，开展月球极区环境与资源勘察，为后续极区采样返回和科研站基本型建设奠定基础。“嫦娥七号”由着陆器、轨道器、中继星、勘察巡视器、飞跃探测器等部分组成。其中，着陆器、飞跃探测器及飞跃探测器平台 (以下简称飞跃器平台) 所搭载的有效载荷“月壤水分子分析仪”将在月球表面进行着陆探测。飞跃探测器平台是一款用于深空探测的飞行器平台，常见的飞行器平台还包括卫星平台、空间站、飞船等，这些平台上所安装的仪器称为有效载荷，“月壤水分子分析仪” (以下简称水分子分析仪) 为飞跃器平台所搭载的有效载荷之一。

着陆器在月球表面着陆后，释放出飞跃探测器，其结构如图 1 所示。飞跃探测器通过自带动力飞往月球南极永久阴影区底部，着陆后，其机械臂取样足量月壤，如月壤中含有水分子成分，加热后形成气体，由

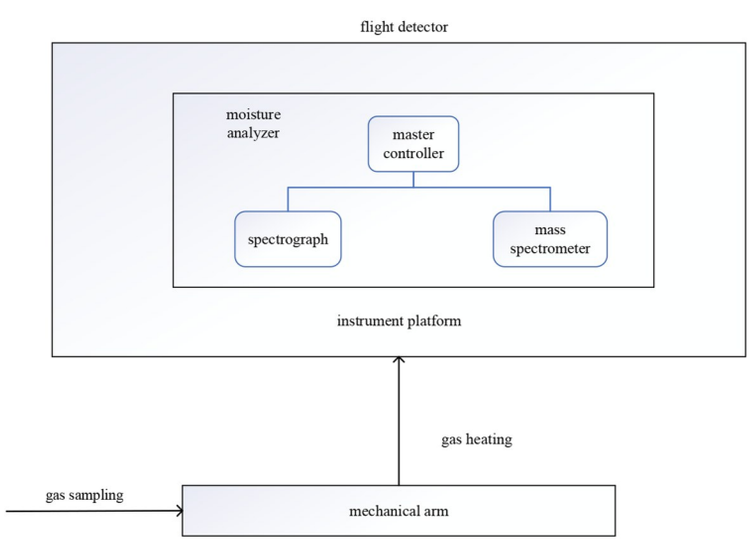

图 1　飞跃探测器工作示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the flight probe

水分子分析仪中的光谱仪和质谱仪共同去探测月壤水分子成分。其中，光谱仪使用可调谐半导体激光吸收光谱 (TDLAS) 技术对月壤中的气体进行分析，判断水冰资源是否存在及其来源。TDLAS 技术，是一种通过改变激光器的波长，令激光器的波长扫描待测气体分子的吸收谱线，使气体分子对特定波长的激光进行吸收，从而根据对应波长上的光强衰减，反演气体分子浓度的技术，在气体探测领域被广泛使用[1]。水分子分析仪载荷使用 2.731 μm 激光器，检测月球土壤中的水分子成分，该研制任务由中国科学院安徽光学精密研究所承担。

飞行器的有效载荷在研制过程中，需要地面检测系统的配合。地面检测系统模拟飞行器平台向载荷提供电源、指令、通讯等接口，并完成载荷工作状态的检测。地面检测系统同时需要实现对通讯数据的显示、记录、分析等功能。通常情况下，一颗新研载荷在研制之初，需要设计一套地面检测系统，根据载荷的功能、工作流程等，制定地面检测系统的软硬件设计任务书。本文述及的水分子分析仪即一颗新研空间载荷，因此需要配套研制一款地面检测系统，保障载荷设备的调试和测试，并在载荷研制过程中，模拟飞行器平台向载荷提供控制信号和仿真数据[2,3]。

水分子分析仪和飞跃器平台的接口包括：电源、数管、数传、直接遥测及直接指令接口。其中，各个接口的功能如下：电源接口为水分子分析仪供电；数管接口又称数据管理接口，是一种测控接口，通常为平台和载荷间的双向慢速通讯口，平台通过该接口向载荷发送命令，设置和修改载荷的工作参数，接收载荷的工作状态和运行参数；数传接口也叫数据传输接口，通常为高速单向接口，用于载荷设备向平台传送该设备获取的探测数据，如光谱图像；直接遥测接口是将水分子分析仪的关键电压传到飞跃器平台；直接指令接口是将操作水分子分析仪的关键指令 (如开关机指令) 通过信号线传输到水分子分析仪[4]。

地面检测系统将仿真上述飞跃器接口，与水分子分析仪进行连接，如图 2 所示。地面检测系统由一台直流电源和一台地检工控机组成，直流电源与水分子分析仪电源接口连接，负责供电；工控机内包括数管通讯、数传通讯、直接遥测和直接指令模块，依次连接水分子分析仪的数管、数传、直接遥测和直接指令接口。其中，数管通讯模块由数管通讯软件和通讯线缆组成，其余各模块也分别由对应软件及相应功能的采集卡组成。

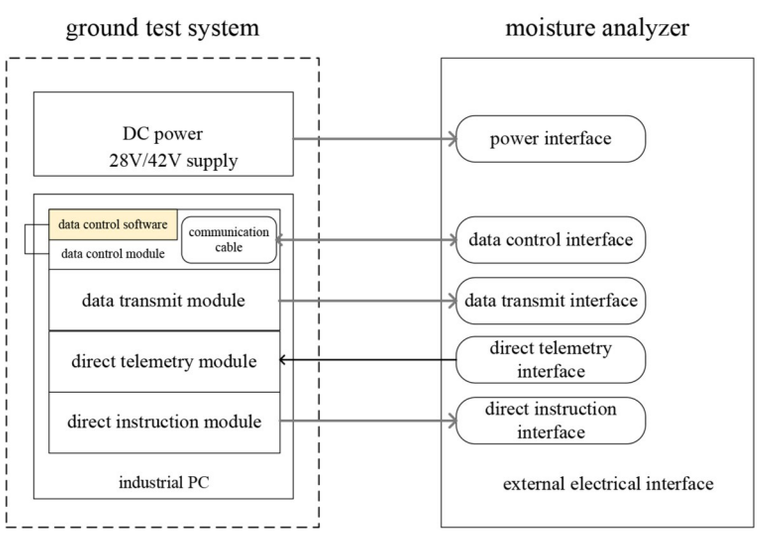

图 2 地面检测系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of ground detection system

本文针对水分子分析仪的测试需求设计了地面检测系统的数管通讯软件部分，该系统具有测试效率高、稳定性强、可视化等特点[5]，可充分测试水分子分析仪的各项功能。其中，根据载荷数管通讯的特点，设计了一种串口通讯造错功能，该功能有效解决了以往串口通讯中，测试纠检错功能时，效率低下、覆盖不全的问题。

1　软件设计

1.1　软件功能

数管通讯软件主要实现载荷指令通讯、载荷数据存储与分析功能。载荷指令通讯功能即依据通信协议与水分子分析仪通信，通过指令的收发控制水分子分析仪开机、设置水分子分析仪参数、统计正确与错误指令的数量、实现串口指令的造错等；载荷数据存储与分析功能指软件在接收到水分子分析仪的数据后，可将数据信息存储至日志文件，生成数据坐标并绘图分析。

1.2　通讯协议概述

在工作状态下，地面检测系统通过数管接口向水分子分析仪发送两种指令：查询指令和注数指令。查询指令每秒发送一次，载荷正确接收查询指令后，向平台回复自己当前的状态信息，如：温度、压力、工作模式等，所回复的信息也可称为间接遥测；注数指令为非定时发送，飞跃器根据地面命令或自身需要向载荷发送参数设置、主备切换、电源开关等指令信息。

因为查询指令定时循环发送，所以载荷数据始终处于定时更新状态，即使某次查询未能实现，也不影响后续载荷数据的刷新。查询指令不具有重发机制，当载荷收到校验失败的查询指令数据包时，不做任何回复。

与查询指令不同的是，注数指令是单次事件。例如：当地面控制人员指定载荷启动某一动作或调整某一参数，飞跃器平台接收到地面指令后，会向载荷转发该指令，如果在这一通讯过程中，由于干扰或其他原因出现误码，则指令将不被执行，但是这条指令必须送达，直到载荷能够正确接收并执行，为此数管通讯协议设计了检错重发机制。在该机制下，当载荷收到平台发来的一包指令数据时，如果校验正确，将回复平台一个正确应答，否则不做应答。平台在一个设定时间内没有收到载荷的应答数据包，则向载荷再次发送该指令，重复3次依然没有收到正确应答则放弃该条指令，并向地面报告通讯线路故障。因为数管通讯是低速的有线通讯，抗干扰能力很强，连续3次发生误码的概率几乎为0，通过这套检错重发机制，能够保证数据的完整性。该协议的检错机制为每字节做奇偶校验，同时整个数据包按双字节做累加和校验，通讯的收发双方都执行这一检错策略[6]。

水分子分析仪在收到正确查询指令后，需要进行回复，回复内容包括水分子分析仪的当前实际运行参数以及指令错误统计，错误统计包括：错误总计数、奇偶位错误计数、校验和错误计数等等；水分子分析仪在收到注数指令后，将会回复注数指令的应答帧，该应答指令较为简短，作用为确认注数指令已经成功接收。查询指令和注数指令格式如图3所示。

数管接口采用满足RS-422电平规范的串口协议进行通讯，串口协议是一种异步串行通信协议，通常以字节为单位进行发送。串口协议每帧数据由起始位、数据位、校验位、停止位组成，如图4所示，本协议中使用一位奇校验，波特率设置为115200 bps。

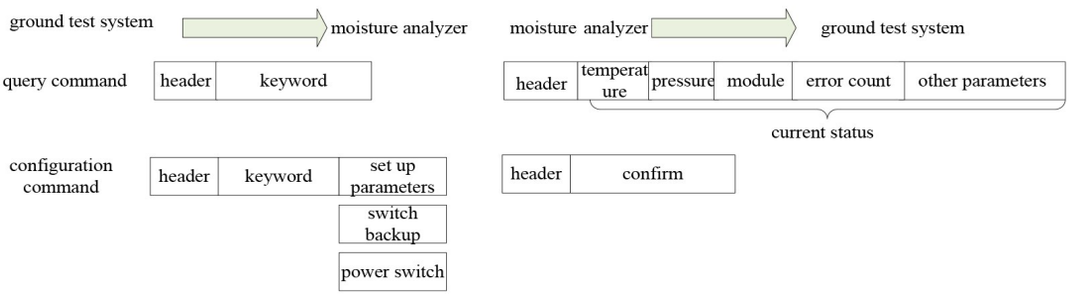

图 3 指令格式示意图

Fig. 3 Schematic diagram of command format

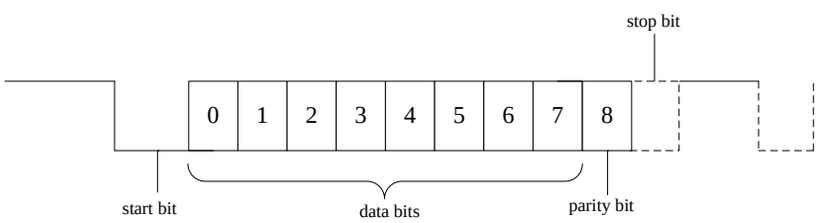

图 4 串口协议示意图

Fig. 4 Schematic diagram of serial protocol

1.3 通讯协议实现

软件通讯功能的流程如图5所示，在程序设计中，设置一个秒计数器，每当秒计数器发生变化时，就向水分子分析仪发送一次查询指令。软件发送查询指令后，开60 ms定时器，若收到应答帧并且定时器未超时，在软件界面更新实时通讯状态；若定时器超时，则记录为一次通信超时。注数指令发送前需先将注数指令写入待发送队列，当秒计数器没有发生变化时，软件查询待发送队列是否为空，若不为空，则出队列发注数指令至水分子分析仪。软件发送注数指令后，开60 ms定时器，若定时器超时，软件将向水分子分析仪重发注数指令，重发最多进行3次，若3次定时器全部超时，软件记录通讯错误，若在3次以内收到指令应答帧，则在软件界面更新实时通讯状态。

1.4 数据完整性实现

如上文所述，水分子分析仪在接收到查询指令和注数指令时，会校验指令是否正确，若正确接收，则根据指令返回对应回复，否则不做回复引发地面检测系统的超时。其中，水分子分析仪进行校验的错误包括：校验位错误、校验和错误。如图6所示，校验位错误指单个字节的奇偶校验位错误；数据采用双字节异或的方式设置校验和，校验和错误即指令中校验和与实际计算得出的校验和不同。

在数据传输过程中，可能出现错误，以误码率表征出现错误的概率，误码率定义为

$$P_{\mathrm{e}}=\frac{N_{\mathrm{e}}}{N}, \tag{1}$$

式中P_{e}表示误码率，N_{e}表示错误的码元总数，N表示传输的二进制码元总数。实际工程中，根据数据传输环境的不同，误码率也会存在区别，低速有线通讯中，可以认为误码率为10^{-12}。

图6中，将校验位看作是横向误码检测，校验和看作是纵向误码检测，当仅出现1 bit错误时，无论横向

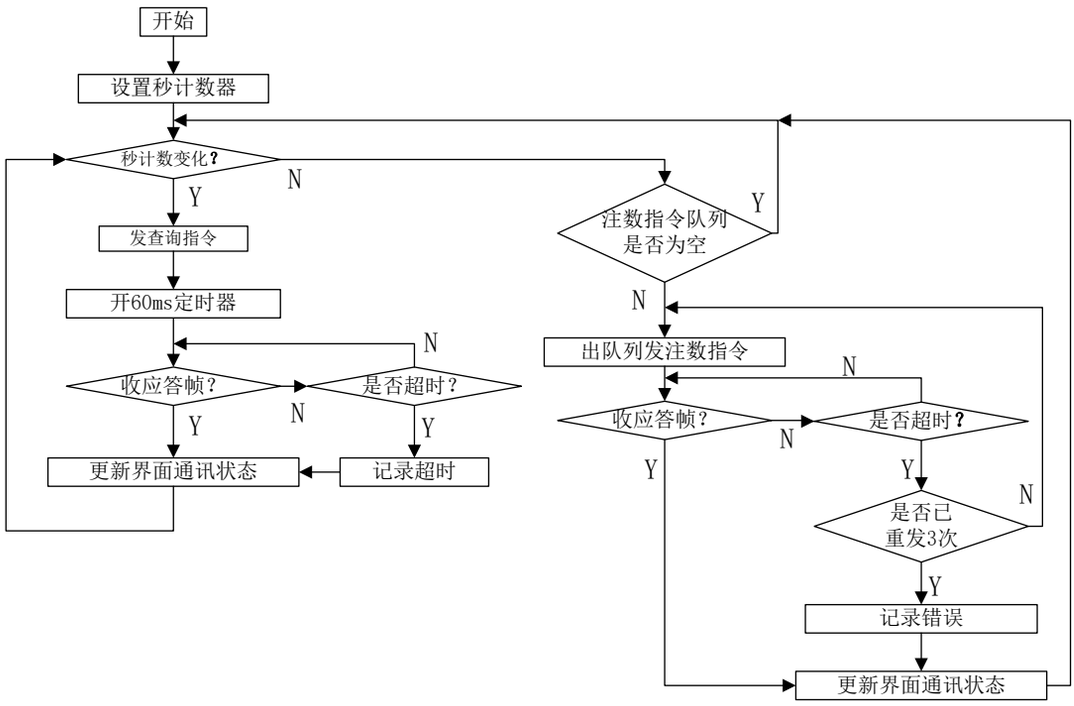

图 5　软件流程示意图

Fig. 5　Schematic diagram of Software process

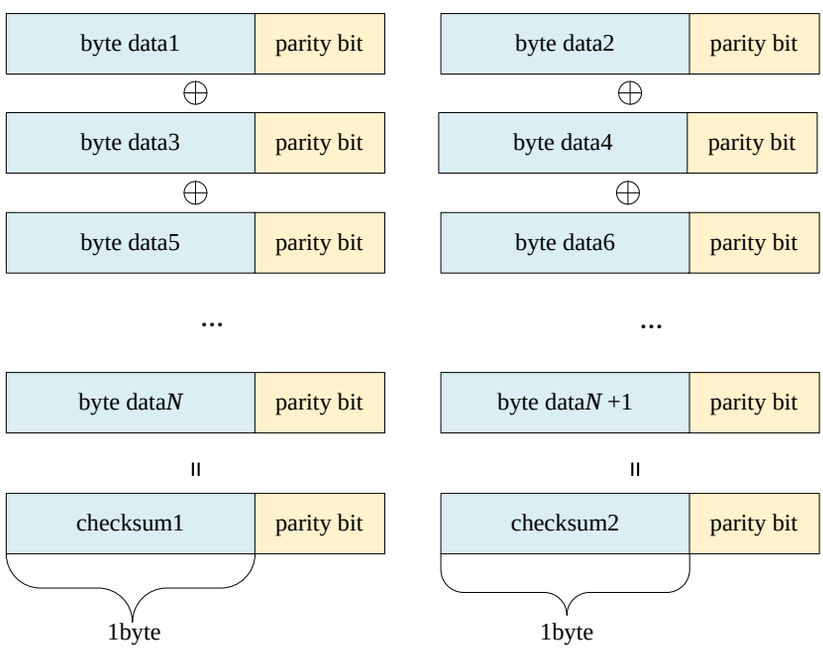

图 6　数据位校验示意图

Fig. 6　Schematic diagram of data bit check

纵向都能检测出错误；当出现 2 bit 错误时，若 2 bit 在同一字节内，则横向检测失灵，但纵向检测依然可以检出，若 2 bit 在不同字节的同一位置，则纵向检测可能失灵，但横向检测依然可以检出。以此类推，仅出现 4i bit 错误的情况下，即至少出现 4 bit 错误，才会出现载荷无法检出的情况，使用公式表示为

$$p_{N}=\sum_{i=1}^{T}p_{4i}\,, \tag{2}$$

式中P_N表示无法检出的概率，P_{4i}表示出现4i bit (即4 bit、8 bit) 错误无法检出的概率，T的计算方式为

$$T=\frac{8L}{4}\,, \tag{3}$$

式中L为数据包长度，8表示一个字节，4表示4 bit错误，即极端情况下，所有位都出现错误。使用条件概率模型表示P_4，公式为

$$P_4=P(A_4\cap B_4)=P(A_4|B_4)P(B_4)\,, \tag{4}$$

式中B_4表示指令中出现4 bit错误的概率，A_4表示4 bit错误无法检出的概率，将每位数据看作伯努利试验，其中

$$P(B_4)=P_{\mathrm{e}}{}^4(1-P_{\mathrm{e}})^{(8-4)L}C_{8L}^4\,, \tag{5}$$

$$P(A_4|B_4)=\frac{C_{16}^1C_{L/2}^2C_7^1}{C_{8L}^4}\,, \tag{6}$$

式中C为组合数公式，取误码率P_{e}为10^{-12}，注数指令的长度为60字节，查询指令的长度为8，经过计算，无法检出注数指令中4 bit的概率P_N约为：4.87×10^{-44}，无法检出查询指令中4 bit的概率P_N约为：6.72×10^{-46}。因为出现大于8 bit错误无法检出的概率远低于4 bit无法检出的概率，所以可用4 bit无法检出的概率近似代替总体无法检出的概率。

假设数管通讯持续进行，波特率为115200，则每天能够发送的比特数为9.95×10^9，则注数指令每9.91×10^{35}天出现一次无法检出的情况，查询指令每7.18×10^{37}天出现一次无法检出的情况，因为水分子分析仪要求的工作时间为2天，故在工作期间出现无法检出错误的概率分别为2.02×10^{-34}和2.79×10^{-36}，满足设计要求。

1.5 地面检测系统造错功能

数据通讯在飞跃器平台和水分子分析仪之间进行，水分子分析仪的通讯接口和通讯协议由现场可编程阵列 (FPGA) 执行，在地面调试过程中，地检软件模拟飞跃器平台与水分子分析仪进行通讯，对于水分子分析仪的FPGA设计来说，正常通讯的逻辑并不复杂，完成纠检错及重发功能的部分更为复杂，需要对其进行全面测试。由于正常环境下通讯发生误码的概率极低，但作为地面检测系统，必须有能力发现载荷设计上的错误，验证其是否正确。因此，地检系统不仅需要产生正确的通讯数据，还要能够发生错误的通讯数据，以检测载荷是否对其做出相应的响应。通常人为产生误码的方法有硬件加扰和软件加扰。硬件加扰的方式包括使用电火花设备产生强烈的空间干扰，考察通讯设备是否能够发现数据误码，并在之后恢复正常通讯；软件加扰是指通过检测系统发送有错误的数据。硬件加扰存在错误的位置和类型不可控的缺点，为此本地面检测系统使用软件加扰方式，设计出一套在界面上可操作的造错功能，具有快捷、安全性高、交互性强等特点。

地面检测系统的造错设计可选择性的指定造错类型，这是以往的地面检测系统所不具备的，这种软件造错功能是本文的创新之处。地面检测系统造错的目的是制造通讯错误以此验证水分子分析仪的FPGA能否识别错误。水分子分析仪在识别到错误后须将错误信息记录，并在查询指令的应答指令中反馈给地面检

测系统，地面检测系统收到应答指令后可在软件界面中实时更新错误信息。若在地面检测系统发出错误的指令后，应答指令里的错误信息没有更新，则考虑可能水分子分析仪的内部硬件、软件发生错误。

在造错设计中，分别设置了校验位造错、校验和造错、字节造错。校验位造错即在指令发送过程中，修改串口发送的参数配置，令其中某个字节的校验位为偶校验；校验和造错的实现为在指令构造完成后，将指令最后的两个校验和字节某位取反[7]；字节造错为在指令构造完成后，在其中某位置插入或删除字节，字节错误通常会反应成校验和错误。

1.6　软件实施

软件使用微软公司开发的WPF框架，以C#语言在Visual Studio 2017环境下进行开发，其界面如图7所示。共分为光谱参数、质谱指令、间接指令、遥测参数、通讯测试和参数图像6个页面。其中，光谱参数、质谱指令和间接指令页面为水分子分析仪中相关的参数设置；遥测参数和参数图像页面用于水分子分析仪的状态信息的显示；通讯测试页面用于测试通讯和造错功能。

图 7　软件界面图

Fig. 7　Software design image

2　实验运行结果

连接水分子分析仪对软件进行通讯测试，因为水分子分析仪研制尚未完成，部分参数状态尚不能获取。如图8所示，在对查询指令的回复中，这部分参数的状态会填充固定累加数。图8 (a) 中界面为设置页面，软件将激光器1温度由8000设为7000 (31.78 ℃)，其软件设定系数值是250 μA恒流源经过热敏电阻后产生的电压，由5 V满量程的14为AD转换出的数值，8000对应实际温度为26.06 ℃，7000对应实际温度为31.78 ℃；图8 (b) 中界面为遥测页面，水分子分析仪返回的温度设置为7000，同时因为算法原因实际温度值在31.78 ℃上下有轻微震荡，进样炉温度、进样测力状态等参数为固定数，与水分子分析仪中设置值一致。

如图9所示，纵坐标表征激光器的工作温度，横坐标表征时间，每一个数字代表200 ms。在时间为110 s的时刻，软件将温度从26.06 ℃调整到31.78 ℃，可以看出，激光器工作系统在约10 s后达到稳定，因激光器设计为欠阻尼状态，在此调整过程中，出现减幅振荡。

分别发送多次不同种类的造错指令，结果如图10所示。造错发送计数和造错接收计数一致，如图所示。奇偶位造错的发送计数为2，水分子分析仪返回的奇偶位错误计数也为2；校验和造错和字节造错的发

图 8 软件测试界面图

Fig. 8 Software test diagram

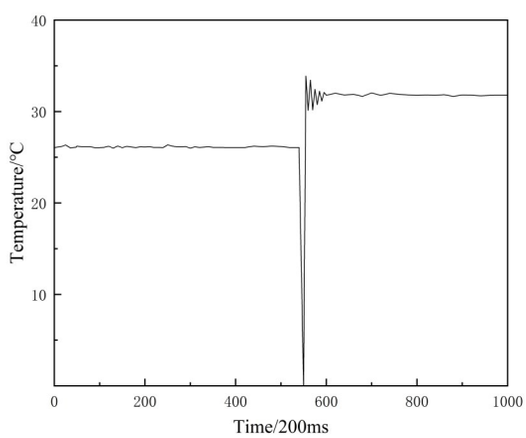

图 9 激光器工作温度曲线

Fig. 9 Temperature profile of the laser during operation

送计数分别为3/4/5，水分子分析仪返回的校验和错误为12 (0xC)，与造错的发送计数之和相等，表示其造错功能工作正常。

图 10 软件造错界面

Fig. 10 Schematic diagram of the error code generator

3　结　论

本文针对水分子分析仪的特点设计了地面检测系统及其数管通讯软件，介绍了水分子分析仪地面检测系统主要组成部分及其功能，在使用数管通讯软件与模拟载荷通信中，结果表明数管通讯软件能实时接收模拟载荷回复的参数值，当数管通讯软件向模拟载荷发送造错指令，结果显示模拟载荷回复的错误指令计数与造错发送计数相等。可视化软件造错功能是本设计的创新和特点，该功能通过定时定位的发生通讯误码，来检测通讯系统中另一方的纠检错功能是否完整。通过该功能，确保了通讯测试环节用例覆盖的完整性，提高了检测效率。该地面检测系统已在载荷温控功能的测试中使用，使用结果显示检测系统软硬件功能完善，使用方便，达到了预期的设计目标。

其中软件设计中的造错部分的源代码已例化成为通用的串行接口通讯造错模块，为将来同类型软件设计提供方便。

参考文献:

[1] Dou H X, Wang Y. Studying of *in situ* gas monitoring system based on TDLAS [J]. *Modern Instruments & Medical Treatment*, 2007, 13(6): 52-54.
窦贺鑫, 汪 曦. 基于TDLAS技术的在线气体检测系统评介 [J]. 现代仪器, 2007, 13(6): 52-54.

[2] Zhang F, Hao X J, Qi W, *et al*. Design and implementation of ground inspection system for magnetometer carried by satellite [J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2018, 38(3): 394-399.
张 飞, 郝新军, 齐 伟, 等. 星载磁强计地面检测系统构建 [J]. 核电子学与探测技术, 2018, 38(3): 394-399.

[3] Yu Q, Wang X Q, Geng B M, *et al*. Universal testing system for space science experimental facilities [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2016, 36(4): 577-583.
于 强, 王小庆, 耿宝明, 等. 空间科学实验通用地面检测系统研制 [J]. 空间科学学报, 2016, 36(4): 577-583.

[4] Yan M, Zhang T. Design of generous ground inspector for space science experiment instrument [J]. *Computer Engineering*, 2011, 37(21): 228-231.
闫 梅, 张 涛. 空间科学实验仪器通用地面检测仪设计 [J]. 计算机工程, 2011, 37(21): 228-231.

[5] Li C, Liu W Y, Zhao S Q, *et al*. Design and implementation of ground inspection system for QKD device carried by satellite [J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2014, 34(2): 239-242.
李 宠, 刘尉悦, 赵双强, 等. 星载量子通信设备地面检测系统设计与实现 [J]. 核电子学与探测术2014, 34(2): 239-242.

[6] Li L. Design of high-reliability serial communication protocol [J]. *Modern Navigation*, 2019, 10(4): 308-312.
李 林. 一种高可靠性串口通信协议的设计 [J]. 现代导航, 2019, 10(4): 308-312.

[7] Jiang T, Zhang J P. Design and implement for user-control software of data acquisition system based on C# [J]. *Electronic Test*, 2009(9): 58-61.
姜 拓, 张剑平. 基于C#的数据采集系统上位机软件设计与实现 [J]. 电子测试, 2009(9): 58-61.