

# 大型空间环境模拟设备试验数据管理研究

宁娟, 顾苗, 詹海洋

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

**摘要:** 针对国内外空间环境模拟设备试验系统数据管理模式, 从试验数据采集、试验数据处理、试验数据存储归档以及试验数据移交利用这 4 个方面进行对比分析, 提出国内空间环境模拟设备试验系统在增强试验数据处理能力、建立卫星故障模式分析和危险分析系统 (FMECA) 以及局部试验数据应用模式向远程同步试验数据应用模式发展的建议。

**关键词:** 试验数据管理; 空间环境模拟器; 故障模式分析和危险分析; 数据采集

## Research on the Test Data Management System of Large Space Environment Simulator

Ning Juan, Gu Miao, Zhan Haiyang

(Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Based on the test data management mode of domestic and international space environment simulator, the paper compares and analyses the detail in the aspects of data acquisition, data processing, data storing and data handover of test data management system for simulator. Some considerations on the improving of the data processing ability, establishing the FMECA and the mode transferring from part to remote and synchro data application of space environment simulation test facility are advised.

**Keywords:** test data management; space environment simulator; FMECA; data acquisition

### 0 引言

空间环境模拟设备试验系统数据管理作为整个试验系统的数据服务平台, 主要任务是将各试验设备的运行参数、状态、试验数据集中统一管理, 整合各分系统所产生的数据信息, 并通过数据管理软件实现数据的存储、归档、显示等功能, 同时通过网络进行数据发布, 供用户在远程客户端浏览、查询。作为一个完善的试验系统数据管理系统, 其工作流程可以划分为以下几个主要部分: 试验数据采集过程、试验数据处理过程、试验数据存储归档过程和试验数据移交利用过程<sup>[1-2]</sup>。本文旨在系统地介绍空间环境模拟设备试验系统数据管理国内外在此方面的发展现状并针对国内空间环境模拟设备试验系统数据管理提出相应的建议。

### 1 国外典型空间环境模拟设备试验系统数据管理

#### 1.1 美国鲍尔宇航技术公司“Brutus”空间环模设备试验系统数据管理

2011年, 美国鲍尔宇航技术公司的“Brutus”热真空空间环模设备对国家极地轨道运行环境卫星系统 (national polar-orbiting operational environmental satellite system, NPOESS) 进行了一系列的试验, 这颗卫星命名为 NPP (NPOESS preparatory project)。

NPP 航天器空间环境模拟试验的数据流系统结构图如下图 1 所示, 所有试验数据及相关资料最终可通过国家海洋和大气管理局 NOAA 合作网站“CasaNOSA”进行查询、分析及下载。

收稿日期: 2014-09-25; 修回日期: 2015-01-09。

作者简介: 宁娟 (1984-), 女, 硕士, 测控工程师, 主要从事空间环境模拟器测控系统软件设计方向的研究。

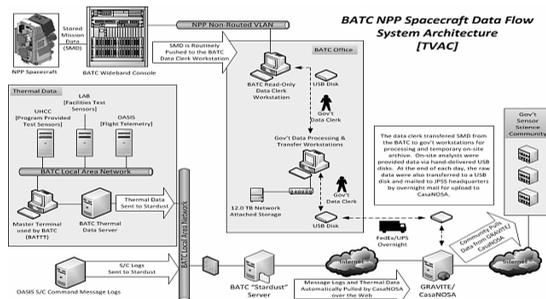


图 1 NPP 航天器空间环境模拟试验的数据流系统结构图

#### 1.1.1 “Brutus”试验数据采集过程

在航天器级环境测试期间, NPP 人造卫星需要进行临界动力学、电磁干扰 EMI 以及热真空试验的测试数据采集。通过在航天器以及周围测试环境中布置大量的传感器, 测量仪器采集传感器的测得数据, 进行本地保存, 并确保远程安全传输、存储测试数据及相关文档资料。

#### 1.1.2 “Brutus”试验数据处理过程

传感器测得的大量发射前空间环境模拟试验数据并行传输整合到 NPP 校准和验证系统中心, 用于算法验证、独立测试和评估。将航天器测试数据, 遥感测量以及地面支持设备信息进行采集和整理, 显示出测试过程的详细信息、以及操作日志、数据分析、图表曲线、和数据报表等测试内容。通过 45 000 GB 的归档数据将会比较容易的归纳出 NPP 发射前预先观测到的在轨操作特征。

#### 1.1.3 “Brutus”试验数据存储归档

在进行试验期间, 鲍尔宇航技术公司的测试工程师每隔一个在轨时间间隔 (102 分钟) 就会进行一次航天器固态记录存储, 存储一个文件约 43 GB 大小。数据管理人员会从鲍尔宇航

技术公司提供的只读的工作站中重新接收这些文件, 通过移动硬盘传输原始数据并对打包数据进行处理, 这些数据用于本地和异地分析, 然后经以太网加载到 NASA 总部的 CasaNOSA 网站上, 数据包括试验热数据, 航天器操作命令日志, 以及其它地面支持及辅助数据和文献。

所有试验过程中的操作日志、测试报告以及分类的测试数据都收集整理在管理部门的存档系统中, 这样便于查找试验数据。试验的测试数据存档表单如图 2 所示。

Item ID	13	14		hardware assembly for changes to the software made after the initial software install.	
ETP-641: Flight Software Load and RAMP for Version for 0x400F (Pre-TVAC)	2009-04-03	2009-04-05	Pre-TVAC	ETP	Complete
SI-4 Part 2: Limited	2009-04-07	2009-04-07	Pre-TVAC	Sensor Integration	Complete & Populated
SI-5 Part 1.1: Electronics Self Test (A and B side, Pre-TV)	2009-04-07	2009-04-07	Pre-TVAC	Sensor Integration	Complete
SI-6 Parts 1.1, 1.3 and 2: Noise Test (A and B side)	2009-04-07	2009-04-09	Pre-TVAC	Sensor Integration	Complete

Purpose of Test:	The objectives of this test are to verify the following: SRV0029 - Verify functionality of data acquisition path from Readout Integrated Circuits (ROIC) to Digital Number (DN) output (detector's disconnected) and measure response & noise with several self-test input settings (ramp base and step waves). Health check- Repeatability of result to same self-test input after baseline established. Demonstrate adaptability of Direct current (DC) Restore algorithm/process. Measure electronic read noise (detector disconnected and self-test off). Measure response to self-test input ramp that will test the detector channel into saturation. Demonstrate functionality of Self-Test Subtest Mode for long Wave Infrared (LWIR) focal plane assembly (FPA). Demonstrate capability to determine and subtract detector current in amount approx. equal to dark current and photon current present when viewing spaceview.		
Start Date and Time:	2009-04-07 at 19:00	Test Status:	Complete
End Date and Time:	2009-04-07 at 22:37	Test Type:	Sensor Integration
Instrument and Test Phase:	FU1 - Pre-TVAC	Shift Report(s):	6401 Yiu_FU1_Shift_Log_2009_04_07_2nd.doc
Data Manual(s):	6401 SI-5_2009-04-09_Datamanual.pdf	Raytheon Test Report and ETR(s):	6401
Test Log(s):	6401 SI-5_2009_04_09_TestLog.xls	Reference Document(s):	6401 sp15460-244_SIS_Electronics_Self_Test.pdf
RAID(s):	6401	Number of Collects, Scans per Collect	
	RAID		
	01101173	308 Collects, 120 Scans Per Collect	
	01101174	308 Collects, 120 Scans Per Collect	

图 2 试验的测试数据存档表单

### 1.1.4 “Brutus” 试验数据的移交利用

空间数据系统咨询委员会 CCSDS (consultative committee for space data system) 将传感器测量的原始数据的打包, 通过以下 3 种方法进行移交利用:

- 1) 现场传感器分析人员可通过一个本地安全局域网分析访问数据, 并能立即开展研究工作。
- 2) 数据管理人员用 USB 移动硬盘来转移传感器测量的数据, 并将前一天晚上的数据拷贝至数据服务器, 用于异地分析。
- 3) 数据通过专用数据信号线路 (DS3) 自动传输到 NOAA 总部。在 NOAA 总部可在 CasaNOSA 网站进行分析, NOAA 的测试数据库存储的数据可提供给 NPP 传感器研制团队以及校准和验证团队进行研究<sup>[3]</sup>。

## 1.2 欧洲空间研究与技术中心 (ESTEC) 的空间环境设备

欧洲空间研究与技术中心 ESTEC (european space research and technology centre) 的大型空间模拟器 LSS 以及一些小型测试设备 (如 HBF-3、Corona 等) 上采用的 STAMP (system for thermal analysts, measurement, and power supply control) 是一种具有高性能实时数据采集系统, STAMP 凭借其强大的功能, 成功完成了 ISS Glovebox、Smart-1、Helios-2、MetOp PLM/EM 等多个航天器热试验, 并得到了满意效果<sup>[4]</sup>。

STAMP 试验系统网络架构图如图 3 所示。STAMP 具有 2 个数据库: 测量数据库和配置数据库, 其中测量数据库负责存储所有采集到的测量数据, 配置数据库负责存储测试所需进行的所有配置信息。工作站主要负责数据采集和处理、配置以及系统信息监控。客户端之间的运行彼此互不干涉, 具备高度

的独立性, 同时也保证了系统高度的可靠性。工作站可以随时根据用户指令进行具体操作。在欧洲空间研究与技术中心的服务器是两台 HP-UX 机器, 两台机器互为热备。在正常情况下 STAMP 只使用一台服务器, 另一台是在使用的工作站发生故障的时候投入使用。这样, 出现类似问题时 STAMP 可以自动重新配置, 无需中断即可马上继续运行。

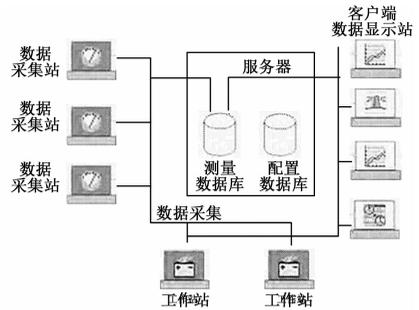


图 3 STAMP 试验系统网络架构图

### 1.2.1 “LSS” 试验数据采集过程

STAMP 系统支持任意类型的传感器, 包括热电偶, 热电阻等; 支持数百种电源的控制; 支持有效载荷以及航天器硬件设备接口; 满足热测试配置并具有高度的灵活性。STAMP 的通讯协议为 TCP/IP, 实现各设备之间的通信。STAMP 支持多种测量仪器进行数据采集, 例如 HP34970A、HP3497A、TempDAS、PLC。每台测量仪器都需要连接一个专用的采集客户端, 所有的采集客户端会把采集到的数据发送到测量数据库。

### 1.2.2 “LSS” 试验数据处理过程

STAMP 为用户提供了许多监视和分析采集数据的工具, 将数据信息显示在屏幕上, 也可以将数据输出到其他的系统中。STAMP 可以在界面显示系统配置, 传感器测量值, 以及保存和加载显示存储图形等功能。

STAMP 支持用户定义任意复杂公式计算, 例如在获取传感器测量值后, 需要将传感器原始数据转换成工程指定单位的数据, 用户可以自行进行公式定义计算, 这在工程应用中有着很高的实用性。

### 1.2.3 “LSS” 试验数据存储归档

STAMP 采集到的数据存储存储在测量数据库中, 该数据库存储了大量的数据文件。每个采集客户端在服务器上安装一个采集助手软件, 建立握手协议把数据输入到相应的数据文件中, 每天生成一个数据文件, 这样可以避免在传输数据或者服务器当机的情况下造成数据丢失。

为了确保数据存储的安全性, 对数据文件还要进行物理转存, 将数据文件备份到硬盘备份阵列 RAID-1 (redundant array of inexpensive disks) 中, 这样可以避免在服务器硬盘出现问题的情况下数据丢失问题的发生。

如果出现服务器死机或者网络通信失败的情况, 此时采集系统仍可以保持正常运行, 但是数据无法存入服务器的数据库中, 对于这种情况, 客户端会在服务器恢复运行后, 将全部数据从本地临时存储数据库拷贝到服务器的测量数据库中, 确保了数据不会丢失, 提高了系统的安全性与稳定性。

### 1.2.4 “LSS” 试验数据移交利用

ESTEC 得到试验数据后将所有测试数据以及相关辅助资

料保存到系统中，可以适时去评估卫星的有效数据并能了解卫星的测试过程，并且分类保存卫星测量数据和文档资料，并建立存档目录，用以解决在卫星异常情况下能够了解其在轨仪器的工作特性，借助于先前数据分析出问题原因，并建立故障模式分析和危险分析系统 FMECA (failure mode effects and criticality analysis)，如图 4 所示。

VTC 1.5 TCU			Operational Mode: LN2			
Item	Tag	Function	Failure Mode/Cause		Failure effect	Detection means Observable symptoms
			Mode	Cause		
1	FV54	Z valve controlling LN2 flow to shrouds	1) Does not open	1) Electric power break-down	Under filling of shrouds	1) End switches status test available by PLC; 2) Filling too long; 3) Visual inspection shows leakage.
			2) Does not close	2) Mechanical seizing		
			3) Blocked open	3) Ageing		
			4) Blocked close			
			5) Internal leakage			
2	FV49	Z valve closing the GN <sub>2</sub> circuit	1) Does not open	1) Electric power break-down	1) LN <sub>2</sub> flowing to the GN <sub>2</sub> circuit; 2) Blower damage	1) End switches status test available by PLC; 2) Filling too long; 3) Monitor temperature T17
			2) Does not close	2) Mechanical seizing		
			3) Blocked open	3) Ageing		
			4) Blocked close			
			5) Internal leakage			
3	FV34	Modulation valve controlling LN2 flow to stator shroud	1) Does not open	1) Electric power break-down	Under/over filling of stator shroud	1) Monitor temperature T14
			2) Does not close	2) Mechanical seizing		
			3) Blocked open	3) Ageing		
			4) Blocked close			
			5) External leakage			

图 4 ESTEC 故障模式分析和危险分析系统 FMECA

## 2 国内空间环境模拟设备试验系统数据管理

国内空间环境模拟试验测控系统数据管理一般分为数据采集系统和红外热流模拟控制系统。试验流程测控系统网络架构图如图 5 所示，试验系统两台总交换机接入环形以太网，两台总交换机负责连接测量仪器和程控电源的 LAN 接口，以及试验测控系统客户端计算机及主备试验测控服务器。环形以太网可以实现客户端计算机和 iHistorian 数据服务器、WebSpace 服务器、主试验测控服务器以及备试验测控服务器的数据通讯，并增强了系统的可靠性。

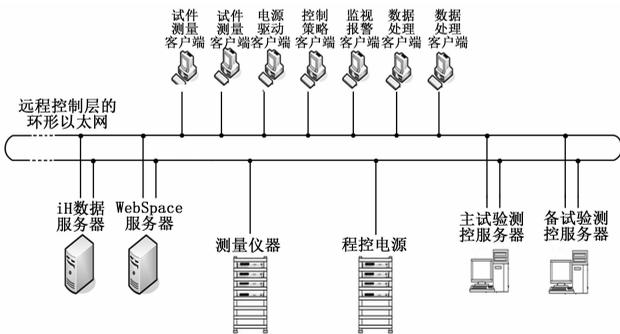


图 5 试验系统网络架构图

### 2.1 国内空间环境模拟设备试验数据采集过程

数据采集系统信号类型为热电偶、热敏电阻及热电阻，测量信号从真空容器内经过穿墙插头引出到室外，通过分线箱接入测量仪器，然后再通过工业以太网将数据传送到总控间计算机进行数据的转换处理、显示、存储等操作。

红外热流模拟控制系统是热试验不可缺少的关键系统，常用热流模拟装置有红外加热笼、红外灯阵、薄膜电阻加热片，红外热流模拟的数据为航天器模型的理论计算提供修正依据<sup>[5]</sup>。系统由计算机、通讯网络接口、程控电源、电缆网等组成，系统的控制精度指标要求高，其核心是程控电源。

### 2.2 国内空间环境模拟设备试验数据处理过程

数据采集软件负责对试件温度进行测量，通过读取铂电阻、热电偶及热流计多种信号的测量通道的电压或电阻值，经过拟合公式计算出各测量点的温度值，温度数据实时显示并存储。数据以表格的方式显示在软件界面上，并保存在本地计算机和服务器中<sup>[5]</sup>。

热流控制软件负责完成电源的驱动、监视和管理任务，每一个周期完成一次电流输出和状态检查。程序通过以太网接口与程控电源进行通讯，读取电源的输出电流并控制电源输出，同时对电源的工作状态进行监视。发现电源不受控，输出超差等异常情况时，程序界面给出报警信息。

WebSpace 发布服务器从试验测量客户端、电源驱动客户端和控制策略客户端获取实时试验数据，从 iHistorian 数据服务器获取历史试验数据，将试验测控系统监控画面、历史实时数据曲线、报警记录等进行网络发布。

### 2.3 国内空间环境模拟设备试验数据存储归档

试验测量客户端、电源驱动客户端和控制策略客户端中将试验数据发送到 iHistorian 服务器进行数据存储，iHistorian 数据库作为整个试验测控系统的数据服务平台整合各分系统所产生的数据信息，并通过数据库软件实现数据存储、归档功能。

两台试验测控服务器（一用一备）用以保存备份试验文档和数据采集软件以及红外热流模拟控制软件产生的文本数据。试验测控系统产生的数据进行了三方备份，分别在试验测控客户端计算机、iHistorian 数据服务器、主/备试验测控服务器上对试验数据进行存储。

### 2.4 国内空间环境模拟设备试验数据移交利用

国内空间环境模拟设备试验数据的移交利用相对于国外而言还有一定差距，还没建立一套完善的故障分析系统，试验数据移交利用的方式主要是研究人员通过测得的试验数据进行分析，然后对卫星已有或潜在问题进行处理，开展研究工作。

## 3 国内空间环境模拟试验系统数据管理存在的问题

1) 试验数据的处理和分析能力：空间环模试验的参数多、数据量大，尤其是大型空间环模设备，测量仪器产生的上千通道试验数据需要进行处理和分析，会给试验工作带来很大难度，增强试验数据的处理能力和分析能力是一个很重要的发展方向。

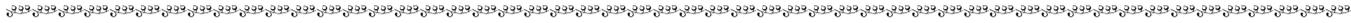
2) 试验数据的移交利用：通过与国外空间环境模拟设备进行对比发现，在试验数据的移交利用上我国还有较大的差距，通过集中存储归档所有测试数据，建立卫星故障模式分析和危险分析系统 FMECA<sup>[2]</sup>，借助于先前数据分析出问题原因，对一个成熟的试验数据管理平台而言是非常重要的。

3) 试验数据管理的网络建设：网络建设对于试验数据管理而言有着决定性的意义，局部试验数据应用模式应向远程同步试验数据应用模式发展。举例而言，美国鲍尔宇航公司的 NPP 卫星的交叉跟踪红外探测的试验在印第安纳州的韦恩堡的 ITT 公司进行，臭氧映射分析器的试验在科罗拉多州的博尔德的鲍尔宇航技术公司进行，所有试验的测试数据数据最终都会传输到管理服务器，整合到 CasaNOSA，每天传输一次新采集到的数据，测试数据和文档分类加载到 CasaNOSA 的系

统中, 分析人员可以立即下载进行分析处理并将前一晚的数据传输给 NOAA 总部以及其他的异地分析人员。我国在试验数据管理网络建设的远程同步试验数据应用模式上还很不完善。

### 4 总结

随着空间环境模拟设备试验数据管理要求的不断增高, 以及 IT 技术的发展, 新的测试技术和测试方法的不断涌现, 空间环境模拟设备试验数据管理必将朝着数字化、网络化、综合化方向发展<sup>[1]</sup>, 从解决大量试验数据、试验文档的保存和检索问题转变为对试验计划内容、参数数据、相关文档、试验报告、测试人员和设备信息等一系列相关数据的管理。本文提出的一些建议, 为空间环境模拟器试验系统数据管理提供借鉴与参考。



(上接第 2477 页)

表 1 串行和并行运行时比较

数据总量/G	处理节点个数/个	Map /s	Sort /s	Reduce /s	串行时间 /s	文中方法 /s
0.2	10	0.04	0.01	0.02	0.02	0.09
1.6	15	0.25	0.07	0.13	0.2	0.45
2.9	20	1.34	0.15	0.45	0.43	3.56
4	25	2.56	0.53	2.14	1.13	5.64
6.4	32	5.32	0.74	3.35	3.53	8.75
16.7	61	5.93	0.85	4.13	9.35	9.13
26.2	83	6.43	0.94	4.24	14.53	10.34
45.2	94	7.32	1.45	5.03	25.25	15.59
81.3	104	7.93	2.53	5.34	46.32	16.52
105.2	117	8.47	3.24	6.27	64.32	20.05
156.4	127	14.43	3.57	9.60	153.59	29.61
210.3	143	17.73	3.86	15.42	253.25	39.10
302.1	158	26.35	6.43	24	454.38	58.56
345.1	210	37.26	7.64	31.56	590.67	74.25
421.4	240	73.24	8.54	61.35	934.29	157.34
531.3	250	125.33	9.43	115.43	1 345.24	264.22
612.3	250	167.35	11.34	156.35	超出内存	345.22
724.2	250	185.24	13.20	164.63		407.43
843.7	250	201.53	15.64	178.33		426.34
943.5	250	232.53	17.53	187.64		562.06

从表 1 中可以看出, 文中方法在算法处理数据的过程中, 具有很好的自适应性, 在数据量小于 16.7 之前, 文中方法虽然落后于传统的串行方法, 但是在随着数据量的进一步增加, 文中方法在处理的大数据方面的并行性能的优势逐渐显现出来, 而串行的执行方式虽然在初期具有较少的加密或解密时间, 但是在数量大于 16.7G 后, 并行方法所需时间较文中方法显著增大, 且在数据量为 612.3 时发生了溢出。而文中并行

### 参考文献:

[1] 王素丽. 基于 Web 技术的试验数据管理系统的研究与应用 [D]. 洛阳: 河南科技大学, 2008.

[2] Duprat, Raymond; Mouton, Andre. INTESPACE's new thermal - vacuum test facility: SIMMER, NASA/N93-15613 [R].

[3] <http://www.ipo.nasa.gov.NPP> Pre-Launch Test Data Collection and Archive [EB/OL].

[4] Guijt H, Popovitch A. STAMP: A new data acquisition system for ESA'S large space simulator [A]. Proceedings of the 5th International Symposium on Environmental Testing for Space Programmes [C]. 2004.

[5] 李娜, 刘劲松, 顾苗. 基于吉时利 3706 的真空热试验数据采集系统 [A]. 空间环境与材料科学论坛论文集 [C]. 2009.

算法增幅较缓慢, 在所有数据均已加密执行完毕时花费的总时间也仅为 562.06 s。

### 5 结论

为了提高云计算数据中心中大数据的安全和并行处理能力, 利用云计算 Hadoop 平台提供的 Map-Reduce 模型, 实现大数据加密的并行化。设计了改进的 Logistic 映射和 Tent 映射, 通过初始化迭代来寻求加密密钥和解密密钥, 将双混沌加密系统分解为 Map 函数、Sort 函数和 Reduce 函数, 从而实现了大数据的并行加密和解密。仿真实验证明文中设计的基于并行框架的加密和解密算法是一种高效, 可靠和通用的模型。

### 参考文献:

[1] 刘智慧, 张泉灵. 大数据技术研究综述 [J]. 浙江大学学报, 2014, 6 (48): 957-970.

[2] Goldston D. Big data: data wrangling [J/OL]. Nature, 2008, 455: 15.

[3] 宫夏屹, 李伯虎, 柴旭东, 等. 大数据平台技术综述 [J]. 系统仿真学报, 2014, 3 (26): 489-496.

[4] Executive Office of the president. Designing a future: Federally funded research and development in network and information technology [R]. New York: Executive Office of the President, 2010, 10.

[5] 涂新莉, 刘波, 林伟伟. 大数据研究综述 [J]. 计算机应用研究, 2014, 6 (31): 1612-1623.

[6] Lu Lin, Liang Yi-wen, Yang He, et al. Danger theory: a new approach in big data analysis [A]. Proc of International conference on automatic control and artificial intelligence [C]. 2012: 739-742.

[7] Hsinchun Chen, Roger H L Chiang, Veda C Storey. Business intelligence and analytics: From big data to big impact [J]. MIS Quarterly, 2012, 36 (11): 1-24.

[8] 郭其标, 吕春峰. 基于云计算 Hadoop 异构集群的并行作业调度算法 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (6): 1846-1849.

[9] 王小龙, 赵庶旭. 基于分段线性混沌映射的算术编码与加密 [J]. 计算机研究与发展, 2014, 5 (31): 14811487.

[10] 郎讯, 魏立线, 王绪安, 等. 基于代理重加密的云存储密文访问控制方案 [J]. 计算机应用, 2014, 34 (3): 724-727.