

# 飞行试验多源 iNET 数据精密分析技术研究

王建军, 彭国金, 陈惠君

(中国飞行试验研究院, 西安 710089)

**摘要:**为了解决飞行试验测试系统跨代升级, 网络化测试系统采集记录的多源 iNET 试飞数据的精密分析难题, 针对新形势下的网络化测试系统应用于飞行试验所特有的多源数据测试技术架构, 分析了该测试技术架构的特点, 以及精密分析对试飞工程师验证测试系统同步采集及数据同步分析算法的重要性, 提出了基于数据流 StreamID 的测试参数 iNET 精密分析方法及实现技术, 实现了多源 iNET 试验数据的精密分析; 最后在采用了网络化测试系统的某试验机的飞行试验中对多源 iNET 数据进行了精密分析, 试验表明使用这些算法的数据处理软件满足飞行试验 iNET 精密分析的需求。

**关键词:**同步采集; 精密分析; 飞行试验; 多源

## Research on the Precision Analysis Technology of the Flight Test Multi-source iNET Data

Wang Jianjun, Peng Guojin, Chen Huijun

(Chinese Flight Establishment of AVIC, Xi'an 710089, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of sophisticated analytical caused by flight test system of inter-generationl upgrade and network test systems collect and record multiple sources iNET flight data, introduce traditional methods, the network for the new situation test system applied to flight test the special test multiple source data technology architecture. analyzes the characteristics of the testing technology architecture and the importance of sophisticated analysis to the flight test engineer verification correct of system synchronization acquisition and data synchronization algorithm. proposed INET sophisticated analytical method and implementation technique based on data flow StreamID test parameters and achieve a precise analysis of multi-source inet test data. meet the modern flight test system of multi-source data precision. in the end, the precision analysis of the multi source data is carried out in the flight test of a certain test machine with the network test. and the test results show that the data processing satisfy the requirement of precision analysis.

**Keywords:** synchronization acquisition; precision analyse; flight test; multi-source

## 0 引言

在飞行试验中, 网络化测试系统架构正逐渐取代传统的 PCM 构架<sup>[1-3]</sup>, 预计会成为未来飞行试验测试系统构架技术的主流。和传统的 PCM 架构截然不同, 网络化测试系统采用了多级网络交换模式, 相对于传统的 PCM 测试系统只有一条数据流, 全新架构的网络化测试系统会产生数百条数据流, 这无论是对设计完成的测试系统的同步采集功能还是数据处理软件的同步分析功能, 在应用于科研试飞之前都需要进行验证和鉴定, 以确保新型网络化测试系统试验数据从采集到处理整个过程都是正确的。

在飞行试验过程中, 精密分析即对试验数据以最少的分析过程进行原始数据包的处理, 特别地, 这一过程要求不进行通常的试飞数据同步分析, 即不对测试采集的多源数据进行时间同步处理, 同时不对采集的多源数据<sup>[4]</sup>进行采样率同步处理, 不产生数据分析步骤带来的数据误差, 以此真实反映试验机的测试系统参数采集状态, 这样可对飞行试验数据处理同步处理软件及算法验证其正确性, 更重要的是以便试飞工程师对试验

机网络化测试系统的同步采集功能是否符合试验要求进行鉴定提供数据依据。

飞行试验试验后的数据分析过程一般包括两部分内容, 即针对试验机测试系统的验证数据分析和针对试验机试飞科目的性能、功能等设计指标的鉴定数据分析, 随着网络化测试系统应用于现代飞行试验, 同时针对试飞科目数据同步处理采用了多项新技术, 验证试飞科目同步处理算法及处理结果的正确性, 以及对网络化测试系统的多源 iNET 试验数据进行验证数据分析, 以确定测试系统的同步采集功能的可靠性、正确性, 即对网络化测试系统多源 iNET 试飞数据进行精密分析就成为了飞行试验数据分析的一项重要内容。

## 1 飞行试验测试系统

### 1.1 传统 PCM 测试系统

我国飞行试验长期以来普遍使用的是符合 IRIG106 遥测标准的 KAM500 机载测试系统, 其测试结果形成标准的 PCM 数据流传输和记录。飞行试验 KAM500 机载测试系统可以采用一台采集机箱(采集器)实现独立测试, 也可以有多台采集机箱以主辅耦合方式进行分布式采集测试, 通常我们在实际的飞行试验工程中采用星形进行主辅采集机箱的连接, 其典型结构如图 1 所示, 一个主采集器通过两块 DEC/003 板卡连接了三台辅采集器构架了一个典型的主辅耦合方式的分布式采集测试。

收稿日期:2016-03-10; 修回日期:2016-03-30。

基金项目:国防基础科研项目(A0520132031)。

作者简介:王建军(1971-), 男, 陕西杨陵人, 硕士, 研究员, 主要从事飞行试验测试与数据处理技术研究。

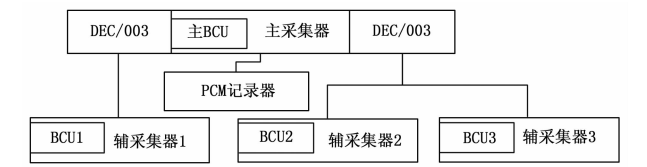


图 1 飞行试验典型 PCM 测试系统

在主辅耦合的分布式 PCM 测试系统中，各级辅采集器采集的参数都包含在主采集器的 PCM 帧结构中，主辅采集器均按照配置信息采集参数，最终在主采集器的主控模块 BCU 中打上时标等信息生成一条 PCM 数据流发出去，被测试系统的记录器记录下来。

1.2 新型网络化测试系统

美国试验中心和项目评估投资机构为解决试验中空地网络化、遥测带宽、多系统信息融合分析等问题，开发了相关的增强遥测综合网 iNET 项目并制定了相关的标准。

随着 iNET 协议标准的成熟，以及我国飞行试验测试技术的发展，我们在飞行试验中采用了 iNET 网络化测试系统架构取代传统的 PCM 测试系统架构。飞行试验 iNET 网络化测试系统采用一台核心交换机连接多台子网络交换机的模式，其典型结构如图 2 所示。

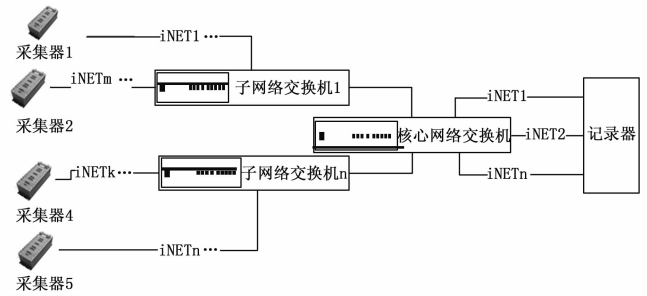


图 2 飞行试验典型 iNET 测试系统

在飞行试验 iNET 网络化测试系统中，核心交换机连接了  $n$  台子网络交换机，每台子网络交换机可以连接多台采集机箱（采集器）。每台子网络交换机可以连接多台采集机箱，每个采集机箱都有一个主控模块 BCU，可以管理并按工程应用产生多条 iNET 数据流，采集机箱产生的多条 iNET 数据流经过子交换机传输到核心交换机，并被连接到核心交换机的记录器记录下来，这样测试系统采集记录的就是多条 iNET 数据流，每个 iNET 数据流都有自己的时间。

与传统的 PCM 架构截然不同，网络化测试系统采用了多级交换的网络模式，按工程应用的需求可以搭载数十甚至上百台的采集机箱，每个采集端机箱均有一个主控模块 BCU，每个 BCU 按试飞工程参数采样率、参数源特性及参数采集板卡等特点可以管理若干个数据流，每个数据流都有自己的采集时间，即网络化测试系统会存在数百甚至上千的数据流，每个数据流都有自己独立的测试采集时间，即多条测试时间流。而在传统的 PCM 架构中，试验机的 PCM 测试系统一般仅一台主采集机箱，其主控模块 BCU 仅可管理一条 PCM 数据流，按 PCM 长周、短周的特性，一条 PCM 数据流仅有一个采集时间流。

2 飞行试验测试数据精密分析

在飞行试验中，全新的技术构架应用于试飞测试系统，测试系统和试验机子系统的互联，加装的测试传感器和试验环境的互联，机载测试环境较为复杂，网络化测试系统中的多台采集机箱同步采集功能尤为重要，特别是在测试系统研制过程中，必须验证该功能的正确、完善，精密分析就必不可少，同时对事后试飞工程师进行多源 iNET 进行同步分析来说，也需要验证其算法的正确性，精密分析也必不可少。

2.1 传统 PCM 数据精密分析

在传统的 PCM 构架技术的飞行试验测试系统中，由 1.1 小节的分析我们知道飞行试验采集记录的 PCM 数据流仅有一条，其结构如图 3 所示，该 PCM 数据流有一组固定结构的长周组成，每个长周包含多个短周，采集的参数按照 PCM 协议放置在相应的短周内。

4Bytes	2Bytes	2Bytes	N Bytes	2Bytes	M Bytes
PCM Synchro	Para W1	Para W2	.....WN	Para W2	.....WM

图 3 PCM 数据结构

无论是对测试系统的验证数据分析，还是对试飞数据鉴定分析，因为采集的参数都放置在一个固定的长周内，不需要进行同步分析，所以不会产生因数据分析而带来的数据误差，故可以直接对记录的数据进行分析，即可满足测试系统的验证数据分析和试飞数据鉴定分析的需求。

2.2 新形势下 iNET 数据精密分析

在飞行试验采用了 iNET 网络化测试系统之后，采集记录的 iNET 数据结构较为复杂，相对于传统 PCM 测试系统采集记录的只有一个 PCM 数据流，通过 1.2 小节的分析我们知道 iNET 网络化测试系统采集记录的有多个 iNET 数据流，在实际试飞工程应用中，以高达数百个 iNET 数据流。iNET 数据包的结构如图 4 所示。

2Words	2Words	2Words	2Words	4Words	2Words	0 to 65490 Bytes	2Words
Control Field	Stream ID	Sequence Number	Packet Length	PTP Times	Payload Info	iNet Payload	END Field

图 4 iNET 网络数据结构

在 iNET 测试系统中，采集记录的是多流 iNET 数据<sup>[5]</sup>，无论是对测试系统同步采集功能的验证，还是对试飞数据同步处理算法的鉴定，我们都需要对多流 iNET 数据进行精密分析，以验证测试系统同步采集和数据处理同步算法的正确性，满足飞行试验网络化测试系统的工程应用的需求。

3 飞行试验 iNET 数据精密分析的关键技术

3.1 iNET 数据时间信息解析技术

网络化测试系统采集的 iNET 数据被记录器进行记录，每个 iNET 数据包在采集器主控模块 BCU 组包时，按照 iNET 标准协议，会将时间信息放到 iNET 数据包中的相应位置。我们知道时间信息是判断测试系统同步采集，数据处理软件同步分析，以及试飞工程师判断试飞数据最重要的信息，如图 4 所示，数据包的时间信息有 4words，其解析算法如下：

(1) 打开采集记录的 iNET 数据文件，找到一个完整的

iNET 数据包;

(2) 按图 4 所示的 iNET 数据结构, 提取时间信息 4words;

(3) 假设该网络数据包的时间信息的 16 进制数据为: 0x4dfda3ab4fffa3da, 按照协议我们转成秒数, 即为 1325376427 秒;

(4) 计算年信息,  $\text{years} = 1325376427 / 31536000 = 42.027410800355149670218163368848$ , 起始时间是从 1970 年 0 点 0 分 0 秒开始计算的, 所以年  $\text{years} = 42 + 1972 = 2012$ ;

(5) 计算闰年,  $\text{leap year} = (2012 - 1972) / 4 = 10$ , 所以普通的年的秒数是  $\text{second1} = 32 * 31536000 = 1009152000$ , 闰年的秒数是  $\text{second2} = 10 * (31536000 + 86400) = 316224000$ 。

(6) 计算采集时间的月日, 当前年中的秒数为  $\text{second3} = 1325376427 - \text{second1} - \text{second2} = 427$ ,  $\text{Days} = 427 / 86400 = 0.00494212962962962962962962963 = 0 \text{ days}$ , 所以是 1 月 1 日;

(7) 计算采集时间的时分秒, 当前日信息中剩余的秒数为,  $\text{secondR} = 427 - (0 * 86400) = 427$ , 那么小时  $\text{Hours} = 427 / 3600 = 0.11861111111111111111 = 0 \text{ hours}$ , 分钟  $\text{Mins} = (427 - (0 * 3600)) / 60 = 7.116666666666667 = 7 \text{ mins}$ , 秒  $\text{Sec} = 427 - (7 * 60) = 7 \text{ seconds}$ ;

(8) 计算纳秒信息, 按照协议该数据包纳秒为 220000671, 毫秒  $\text{Milicecs} = 220.0000671$ ;

(9) 所以该数据包的时间信息为 2012 年 01 月 01 日 0:07:07:220.0000671。

所有的 iNET 数据时间包都可以按此算法进行解析, 得到 iNET 数据时间包的采集时间信息。

### 3.2 iNET 测试系统同步采集数据分析技术

网络化测试系统通过 IEEE1588 时钟进行同步采集, 我们知道, 在理论上每台采集器在系统的开始时刻都是进行第一个消息包的采集, 即在这个开始的绝对时刻, 测试系统上所有的采集器上的所有的 iNET 数据流的第一个数据包均有一个相同的绝对时刻, 但是每条 iNET 数据流的数据包采样率是可以不相同的。其中对于某一采集器来说, 每个采集周期的开始, 该采集器主控模块 BCU 管理的所有的 iNET 数据流的第一个数据包的采集开始绝对时刻应该是一样的, 在这之后, 每条 iNET 数据流按照数据包的采集率进行等间距采样并发送。

一般地, 我们在飞行试验机载测试系统中, 所有采集器的采样周期一般设置为一秒, 那么整个机载测试系统的大采样周期也就是一秒, 这样我们对 iNET 测试系统的同步采样分析算法如下:

(1) 打开试验记录的 iNET 原始数据, 读取 iNET 配置信息文件, 将所有数据包的相关信息读取到内存中;

(2) 开始分析 iNET 原始数据, 按 iNET 标准协议以及记录协议, 找到 iNET 数据中的关键 StreamID 值, 并按照 3.1 小节算法解析出该数据包的时间信息, 该时间信息作为时间包的绝对时刻, 判断该时刻是否为采样周期的开始, 即整秒;

(3) 如果该时刻不是整秒, 则继续分析下一个时刻, 直到数据包的时刻为整秒值, 并按一定格式输出该时刻, 以及该时刻数据包的关键 StreamID 值;

(4) 将每个数据包的整秒采集时刻都分析出来并进行输出, 直到原始数据文件结束。

最后, 我们分析该结果文件中的数据, 检查所有的数据包在采样周期的开始时刻是否进行了采集, 就可以判断 iNET 测试系统是否进行了同步采集。

### 3.3 基于标准 StreamID 的 iNET 数据同步算法检测分析技术

网络化测试系统采集的飞行试验 iNET 数据在记录器中记录成一个原始数文件, 通常试飞工程师在进行鉴定数据处理时, 会同时处理多个采集机箱中的多个数据包中的参数, 这个时候试飞数据分析软件需进行同步分析, 为了检测同步分析算法是否正确, 我们需进行精密分析。

按照 iNET 协议, 如图 4 所示, StreamID 作为网络数据包的标识信息, 即每个数据包均有独立的 StreamID 值, 同时 StreamID 和该数据包中的参数有关联关系, 这样我们通过 StreamID 的值来提取记录的同一个数据包中的参数, 最后将采用同一 StreamID 提取的参数和经过同步分析的参数进行比较分析, 来验证同步分析算法的正确性, 其算法如下:

(1) 打开试验记录原始数据, 读取相关的配置信息文件;

(2) 按试飞工程师的数据分析需求对某个 StreamID 的参数进行分析;

(3) 开始数据处理, 按 iNET 协议进行数据判断, 找到需处理的 StreamID 的数据包;

(4) 对照参数偏移量、分辨率、取位等配置信息, 不进行参数采样率处理, 直接提取该数据包中的对应参数并输出到结果文件中;

(5) 继续以上步骤进行数据分析, 直到原始数据文件结束。

最后, 我们分析该结果文件中的数据, 对同一参数对照同步分析的结果文件进行检查, 就可以判断 iNET 数据同步分析算法是否正确。

## 4 设计实现与测试

### 4.1 设计实现

使用 C++ 语言开发了 iNET 数据精密分析软件<sup>[6-7]</sup>, 分析软件实现界面如图 5 所示。

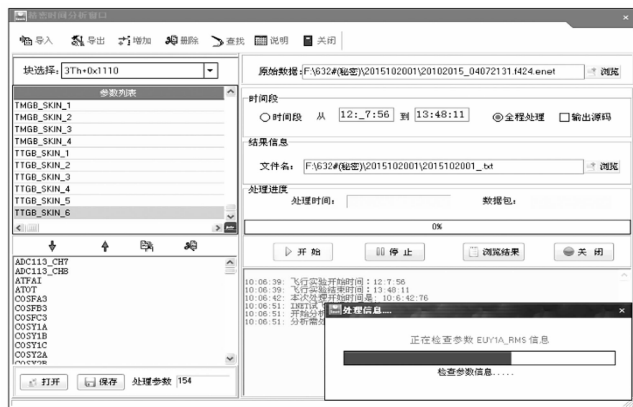


图 5 iNET 数据精密分析软件实现

### 4.2 iNET 测试系统同步采集数据分析测试

某试验机采用了网络化测试系统, 测试系统的网络构建采用了 iNET 技术, 以星形网络进行了连接, 同步时钟采用了 IEEE1588 时钟同步系统。

(下转第 314 页)

参考文献:

- [1] JPEG2000 图像压缩基础、标准和实践 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [2] JPEG2000 图像压缩算法研究 [D]. 重庆: 重庆大学学报, 2004.
- [3] 分形图像压缩算法研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
- [4] 自然图像处理理论和方法研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2005.
- [5] Dong J P. A Context-Adaptive Prediction Scheme for Parameter Estimation in H. 264/AVC Macroblock Layer Rate Control [J]. IEEE Trans Circuits System Video Technology, 2009, 19 (1):

1108-1117.

- [6] Liu Y. A novel rate control scheme for low delay video communication of H. 264/AVC standard [J]. IEEE Trans. Circuits System Video Technology, 2007, 17 (1): 68-78
- [7] Min Y. A Rate Control Scheme for H. 264 Video Under Low Bandwidth Channel [J]. Journal of Zhejiang University: Science, 2006: 990-995.
- [8] Li Z G. Adaptive basic unit layer rate control for JVT [A]. Presented at the 7th JVT Meeting [C]. Pattaya II, Thailand, 2003, JVT-G012-rl.

(上接第 250 页)

应用该软件对该试验机测试的 iNET 数据进行测试系统同步采集数据分析<sup>[8-10]</sup>, 我们随机选取了 StreamID1 的参数 ID1\_P1, StreamID2 的 ID2\_P1, StreamID3 的 ID3\_P1, StreamID4 的 ID4\_P1, StreamID5 的 ID5\_P1, StreamID6 的 ID6\_P1 等 6 个数据包的 6 个参数进行处理, 分别进行同步采集数据分析后, 再对该 6 个结果文件进行比对分析, 如图 6 所示, 该测试系统的采集器在测试采样周期的开始时刻该 6 个数据流均进行了参数数据采集。

iNET 测试系统同步采集数据分析测试结果表明: 该测试系统同步采集功能正常, 符合网络化测试系统飞行试验同步采集要求。

TIME	ID1_P1	ID2_P1	ID3_P1	ID3_P1	ID5_P1	ID6_P1
12:07:57:000	29.777	29.6877	32523.00	32763.000	32717.00	7274.000
12:07:58:000	29.806	29.7184	32521.00	32762.000	32716.00	7274.000
12:07:59:000	29.767	29.6705	32521.00	32762.000	32717.00	7275.000
12:08:00:000	29.747	29.6570	32521.00	32762.000	32717.00	7272.000
12:08:01:000	29.806	29.7165	32521.00	32762.000	32716.00	7275.000
12:08:02:000	29.769	29.6723	32521.00	32762.000	32717.00	7276.000
12:08:03:000	29.788	29.6969	32519.00	32763.000	32717.00	7276.000
12:08:04:000	29.765	29.6742	32522.00	32762.000	32716.00	7275.000
12:08:05:000	29.770	29.6815	32526.00	32763.000	32716.00	7275.000
12:08:06:000	29.783	29.6907	32524.00	32763.000	32717.00	7273.000
12:08:07:000	29.805	29.7141	32519.00	32763.000	32716.00	7277.000
12:08:08:000	29.804	29.7110	32519.00	32762.000	32716.00	7275.000
12:08:09:000	29.779	29.6877	32521.00	32762.000	32716.00	7273.000
12:08:10:000	29.804	29.7128	32524.00	32762.000	32717.00	7276.000
12:08:11:000	29.758	29.6638	32521.00	32762.000	32716.00	7274.000
12:08:12:000	29.793	29.7024	32521.00	32763.000	32716.00	7273.000

图 6 某试验机同步采集数据分析结果

### 4.3 iNET 数据同步算法分析测试

iNET 数据同步分析软件是飞行试验重要的数据处理接口软件, 直接为多个试验机提供数据处理服务, 结合精密分析我们对该软件核心算法, 同步处理算法进行分析测试。首先我们使用 iNET 数据同步分析软件对 iNET 数据进行同步处理, 其次我们对某个网络数据包进行精密处理, 最后我们将该数据包中的某个参数在两次处理结果文件中的数据进行比较。

选择试验机的气压高度参数进行同步算法分析测试, 通过比对处理结果数据, 两次不同方法处理的结果完全一致, 其计算结果如图 7 所示。

iNET 数据同步算法分析测试结果表明: iNET 同步分析软件算法正确, 数据结果处理准确。

## 5 结束语

本文介绍了飞行试验网络化测试系统下 iNET 数据精密分析的重要性和必要性, 分析了传统 PCM 测试系统的架构、iNET 数据流的特点, 设计了 iNET 数据时间信息解析技术、iNET 测试系统同步采集数据分析技术、基于标准 StreamID 的 iNET 数据同步算法检测分析技术, 解决了 iNET 数据精密分

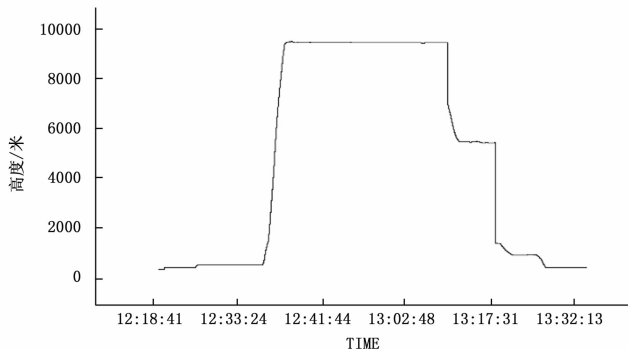


图 7 某试验机气压高度参数计算结果

析的关键问题, 并设计实现了 iNET 数据精密分析软件, 解决了现代飞行试验 iNET 数据的精密分析的难题, 为新型网络化测试系统应用于飞行试验提供了重要的技术支撑。经某试验机试飞实际验证, 该软件满足了试飞工程师的新型网络化测试系统的试验数据精密分析需求, 基于以上算法开发的飞行试验 iNET 试验数据精密分析软件已在多个试验机试验中推广使用。

参考文献:

- [1] iNET System Architecture (Version 2007) [Z].
- [2] Nikker. iNET-X Summary [EB/OL]. <http://www.acracontrol.com>. 2010.
- [3] Kam500 数据采集系统 [EB/OL]. <http://www.yorkinstrument.com>. 2005.
- [4] 刘明. 新一代试飞测试系统架构及其应用 [J]. 计算机测量与控制, 2014 (06).
- [5] 袁炳南, 霍朝晖, 白效贤. 飞行试验大数据技术发展及展望 [J]. 计算机测量与控制, 2015 (06): 1844-1847.
- [6] 彭国金, 等. 非结构化海量网络数据处理技术研究, 现代电子技术, 2011 (14).
- [7] 彭国金. 基于类 PCM 结构过程的试飞多科目 iNet 数据处理技术. 计算机测量与控制, 2015 (10): 3549-3551.
- [8] 彭国金, 刘嫚婷. 非结构化海量网络数据处理技术研究 [J]. 现代电子技术, 2011, 14.
- [9] 胡汇洋, 李扬, 许应康. 多试飞数据流文件的融合处理 [J]. 现代电子技术, 2015, 08.
- [10] 徐武军, 侯玉宏, 段亚. 序贯概率比检验法在导航精度试飞中的应用 [J]. 现代电子技术, 2014, 11.