

轨/姿控发动机脉冲后效冲量 快速算法的研究及应用

张 伟, 陈 锋, 马军强, 刘 帅

(北京航天试验技术研究所, 北京 100074)

摘 要: 轨/姿控发动机脉冲性能需在地面高空模拟试验中进行考核, 试验数据需即时提供, 针对脉冲后效冲量的计算, 当前方法不能兼顾速率和统计偏差。简述了后效冲量计算要求、高模试验特点、Pacific6000 原理及数据文件结构。在分析当前计算方法优缺点基础上, 将网络脚本语言的设计思想引入试验数据处理过程, 提出了实现数据快速处理的数据流式算法, 基于此算法开发了工程应用软件, 在实际试验中应用, 取得了良好效果。

关键词: 轨/姿控发动机; 高空模拟试验; 脉冲工作模式; 后效冲量; 快速计算

中图分类号: V430-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2012) 01-0051-06

Research and application of fast algorithm for pulse residual impulse of divert and attitude control engine

ZHANG Wei, CHEN Feng, MA Jun-qiang, LIU Shuai

(Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing 100074, China)

Abstract: Performance of divert and attitude control engine with pulse work mode must be checked in the altitude simulation test on the ground. The test data should be provided immediately. As for the calculation of the pulse residual impulse, the current way cannot keep balance in velocity and statistic deviation. The requirements of pulse residual impulse calculation, characteristics of altitude simulation test, principle and data file format of Pacific6000 are illustrated. On the basis of analyzing the advantages and disadvantages of the current algorithm, a data flow algorithm for data fast processing is proposed by introducing the network script language design idea into the testing data processing. The engineering application software was developed based on the algorithm and applied in the real tests successfully. This algorithm has an important reference significance for similar calculation and mass data processing.

Keywords: divert and attitude control engine; altitude simulation test; pulse operation mode; pulse residual impulse; fast algorithm

收稿日期: 2011-10-13; 修回日期: 2011-12-06

作者简介: 张伟 (1982—), 男, 工程师, 研究领域为液体火箭发动机试验测量技术

0 引言

轨/姿控发动机常用于星、箭等航天器或导弹的精确飞行弹道控制、轨道修正、姿态控制及机动目的。脉冲工作模式是实现精确轨道修正或精确姿态的基本方法。后效冲量是从发出关机指令开始,到燃烧室压力(简称燃压)或推力下降到零这段时间内产生的冲量(分别称为燃压后效冲量和推力后效冲量)。脉冲工作模式下的后效冲量值直接影响导弹的命中精度或卫星的入轨精度。快速而准确地计算出地面高空模拟试验中各种脉冲宽度下的后效冲量值及散布,对于评价轨/姿控发动机脉冲工作性能和设计空中点火程序具有重要意义。

轨/姿控发动机高空模拟试验是发动机研制和鉴定过程中不可缺少的工作环节,它为评估发动机性能提供大量可靠数据。目前液体火箭发动机试验通常采用 Pacific6000 数据采集系统用于试验参数测量。由于轨/姿控试验的特殊性,一次试验将产生 4~20 GB 的二进制原始试验数据,处理时间很长。虽然国内引进多套 Pacific6000 用于火箭发动机试验,但对大量脉冲数据如何快速连续按条件分段计算的研究未见报道。本文以后效冲量的连续计算过程为研究对象,将网络脚本语言的解释执行思想引入处理过程,提出了数据流式算法,能够快速准确地实现一个脉冲程序中所有脉冲后效冲量的计算和统计,并开发了相应的工程软件在试验中使用,时效性能显著。随着液体火箭发动机试验技术的发展,各类试验的数据量将逐渐增长,此快速技术具有良好的工程应用意义。

1 后效冲量计算要求

算法过程以燃压后效冲量的计算为例进行说明。燃压后效冲量定义为燃压对时间的积分历程。控制系统发出关机指令后,发动机按照程序关机,由于各种因素,推进剂主阀关闭后,燃压和推力要经过一段时间后才下降到零,此过程中燃压的衰减特性如示意图 1 所示。

万方数据

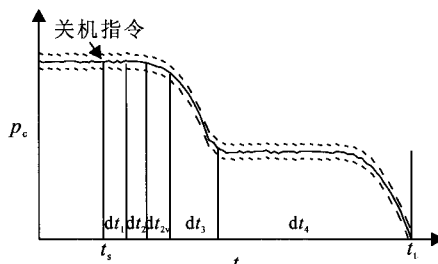


图 1 关机过程燃压衰减特性示意图

Fig. 1 Attenuation curve of p_c during shutdown process

燃压后效冲量的解析表达式:

$$I_{\text{aft}} = A_t \int_{t_s}^{t_1} p_c(t) dt \quad (1)$$

式中: I_{aft} 为冲量, $\text{N}\cdot\text{s}$; t_s 为关机指令发出时刻, s ; t_1 为燃压为零时刻, s ; A_t 为发动机喉部面积, m^2 ; p_c 为燃烧室压强, MPa 。

燃压后效冲量计算的基本要求: 运用公式 (1) 计算一个脉冲程序中所有脉冲点火对应的燃压后效冲量, 并给出同等脉冲宽度下燃压后效冲量的数学期望及方差。积分时间起点为关机指令发出时刻; 积分终点为燃压降至为零时刻, 当燃压尚未降为零而后续脉冲点火已经开始时, 积分终点为后续脉冲开机时刻; 定义开机时刻为阀电流上升到额定值 70% 的时刻, 定义关机时刻为阀电流降低到额定值 70% 的时刻。

2 高空模拟试验特点及 Pacific6000 简介

2.1 轨/姿控发动机高空模拟试验特点

为考核轨/姿控发动机的脉冲工作性能和得到各种脉冲工况下的后效冲量, 需要进行高空模拟试验。高空模拟试验技术非常复杂, 除具有一般液体火箭发动机试验的特点外 (过程不可逆, 成本费用高, 具高度危险性, 测量参数多且精度高等), 还具有其独有特点, 如工艺系统复杂, 试验工况复杂, 发动机启动及关闭频繁, 数据量大, 数据处理要求多, 复杂度高且工作量大等。

2.2 Pacific6000 原理及数据文件结构

Pacific6000 数据采集系统在设计和制造上有

独到之处, 它抗干扰能力强、精度高且可灵活组装和扩展, 适合于远距离小信号测量, 已作为一种标准仪器被广泛使用。其数据采集原理如下: 不同类型传感器的输出信号被送入模拟量 (数字量) 通道模板后, 被放大、滤波、采样/保持, 在经过 A/D 转换为数字信号, 数字信号被送入数字化数据选择器 (Digital Data Selector, DDS), 经 DDS 选择后存入两个并行缓存器 FIFO 和 RING, 再经高速 IEEE-488.2 (PCI-GPIB) 接口送入计算机, 进行显示、处理和存储等。

理解原始数据文件结构是进行正确解码的前提条件。Pacific6000 单通道最高采样率 10 kS/s, 通过软件设置可以使不同通道以同样或不同采样率进行采样, 配置每一个扫描通道设置 (增益、滤波、采样率、激励及公式等) 的表格称为扫描表。Pacific6000 按扫描表配置进行通道数据的扫描、A/D 转换和数据传输。最终数据以 Raw 格式的二进制文件形式存入计算机磁盘。

Raw 格式文件由多个数据帧次序组成。每个数据帧包括一个 16 bit 的头部和一组数据块, 数据帧的头部保护 Pacific6000 的数据同步、报警和系统屏蔽位等信息。帧中的数据块是扫描表中的通道在同一物理时刻的数字采样值。帧中数据块的内容和扫描表的设置直接相关。如果扫描表中所有通道的采样速率设置都相同, 如表 1 所示, 则 Raw 文件所有数据帧中文件块的格式类似 $S_{97}S_{98}S_{99}S_{100}$ (S_n 代表通道 n 在某个物理时刻的数字采样值); 如果各个通道的采样速率不同, 则帧中数据块的内容和采样时刻相关。表 1、表 2 和图 2 为示例说明。

表 1 扫描表配置例 1

Tab. 1 Scan list setup (demo 1)

序号	扫描通道	采样速率/(kS·s ⁻¹)	其他设置
1	Channel97	1
2	Channel98	1
3	Channel99	1
4	Channel100	1

表 2 扫描表配置例 2

Tab. 2 Scan list setup (demo 2)

序号	扫描通道	采样速率/(kS·s ⁻¹)	其他设置
1	Channel97	2
2	Channel98	2
3	Channel99	1
4	Channel100	1

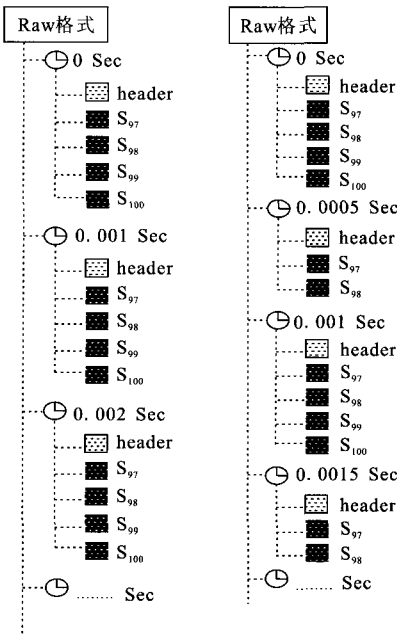


图 2 按表 1 和表 2 生成的 Raw 文件格式

Fig. 2 Raw file format generated according to Tab. 1 and Tab. 2

3 当前计算方式及优缺点

由脉冲高模试验特点可知, 在一个脉冲工作程序中, 同宽度脉冲可能有数千个, 总脉冲个数可能会有数万个 (某些轨/姿控发动机脉冲寿命可达 30 多万次), 而且此脉冲工作程序对应的测量数据是可达数千兆字节的二进制原始数据。当前常用的数据处理技术主要有两种方式: ①将原始数据文件一次性调入物理内存, 然后直接对内存中的数据进行解码、D/A 转换、工程值计算及误差修正等操作 (这种方法在时间上非常高效, 但

太依赖物理内存大小,只适合于原始数据文件较小的情况);②使用小缓存或不使用缓存,直接对硬盘上的文件进行 I/O 操作,计算在 CPU 中完成(此方式不依赖物理内存大小,但 I/O 操作频繁,且依赖于 CPU 的处理速率,适合于大文件操作但效率不高)。

为快速实现脉冲后效冲量的计算,当前计算手段为:取脉冲前段、中段和后段的若干个脉冲进行逐个积分,然后再计算这些样本点的数学期望与方差。此方法选取样本点少,但是处理过程中人工参与较多,仍相对费时费力。从统计角度

来看,以牺牲样本点个数和统计精度来换取较快的统计速度,统计精度和统计速度之间的平衡难以把握,存在较大的处理方法缺陷。

4 数据流式处理算法

4.1 算法设计思想和流程

数据流式处理算法的设计灵感来源于网络脚本语言的设计思路。脚本语言的设计理念是边解释边执行,解释完毕即执行完毕,而不是传统的类似 C 和 Java 等高级语言先解释编译最后执行。

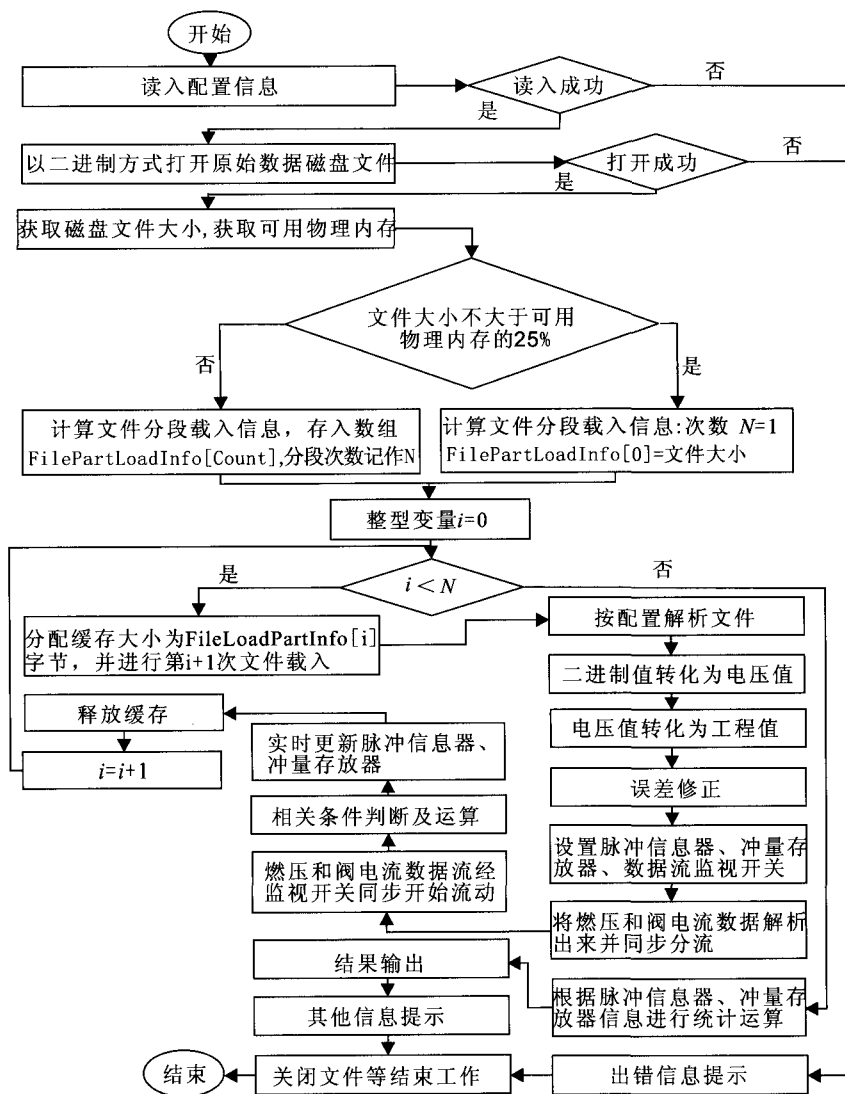


图3 脉冲程序燃压后效冲量快速算法主流程

Fig. 3 Main flow chart of fast algorithm for calculating pulse residual impulse in pulse working mode

数据流式处理算法的核心思想是将阀电流数据和燃压数据作为同步流失的两个数据流, 两个数据流从硬盘上经内存经 CPU 同步流失, 流失完毕即同步处理完毕。为加快流失速率, 使用页面置换算法和大缓冲技术。为在流失的同时进行处理, 设置两类标志开关、脉冲信息器和冲量存放器。一类开关用于监视阀电流数据, 另一类开关用于监视燃压数据; 脉冲信息器记录脉冲宽度及个数等信息; 冲量存放器用于存放各脉冲对应冲量积分结果。该算法充分结合了常用数据处理技术的优点, 又同时避免了它们的缺陷。算法主流程如图 3 所示。

算法的主要步骤是进行一系列初始化工作后, 将文件按合适大小 (依据内存情况) 分段载入内存。

针对文件的一维操作转化为针对文件分段 (又称页面) 的二维操作; 针对页面进行基本处理操作后将阀电流数据和燃压数据形成单独的两个同步数据流 (可用下标一致的两个数组实现), 当阀电流开机时, 触发脉冲信息器 (脉冲信息器记录脉宽及同脉宽的个数信息), 当阀电流关机时, 一个脉冲信息统计完成, 更新脉冲信息器, 同时开始一个冲量存放器的积分工作, 当阀电流再次开机或燃压为零时, 该次脉冲积分终止, 更新冲量存放器。按上述过程不断流失, 数据全部流失完毕后, 全部脉冲信息存放在脉冲信息器中, 全部脉冲对应的冲量信息存放在冲量存放器中, 将文件及内存全部释放后, 针对脉冲信息器和冲量存放器中的数据进行同类型脉冲的数学期望及方差计算, 最后将结果打印输出。

4.2 算法的时间复杂性分析

该算法充分体现了以空间换时间的思想, 将针对磁盘文件的一维操作转为针对磁盘和内存的二维操作, 并充分利用计算机硬件计算特性, 形成流式处理, 算法优化了大数据文件的 I/O 操作效率, 技巧性地运用监视开关实现后效冲量计算。从算法主流程图中可以看出, 算法的时间复杂性主要体现在对磁盘文件分段的 I/O 操作上。假设原始数据文件为 2 GB, 当前可用物理内存为 1 GB。如果直接进行磁盘操作, 那么磁盘 I/O

万方数据

和内存 I/O 的次数各是 $2 \times 1\,024 \times 1\,024 \times 1\,024 \times 1\,024$ 次, 而本算法则需要进行 8 次磁盘 I/O, 每次磁盘 I/O 对应的内存 I/O 为 $256 \times 1\,024 \times 1\,024 \times 1\,024$; 磁盘 I/O 花费的时间主要是寻址时间, 数据读写时间相对于寻址时间可忽略不计, 假设每次磁盘 I/O 时间为 $1\,\mu\text{s}$, 每次内存 I/O 时间为 $0.05\,\mu\text{s}$, 则单纯进行一维磁盘 I/O 操作时间为 $2\,210\,\text{s}$, 而本算法的主要 I/O 操作时间为 $0.3\,\text{s}$; 综合考虑算法的 CPU 逻辑运算时间及其他操作时间, 本方法约为原方法的 $1/23$ 。算法的时间效能明显。

4.3 算法的软件设计

在该算法具体实现时, 需要合理配置文件分段信息, 需要在物理内存分配和 CPU 处理速率之间有个平衡, 把可用物理内存全部利用起来并不一定能提高软件效率, 一般而言, 分段文件大小为可用物理内存的 $1/4$ 时, 软件效率比较理想。因算法中有内存分配和磁盘一次性读写大量数据的操作要求, 相应的算法实现语言必须提供这些操作的支持, 典型语言有 C、C++ 及 Java 等, 在 VC++6.0 环境下, 软件主体设计流程见图 4。

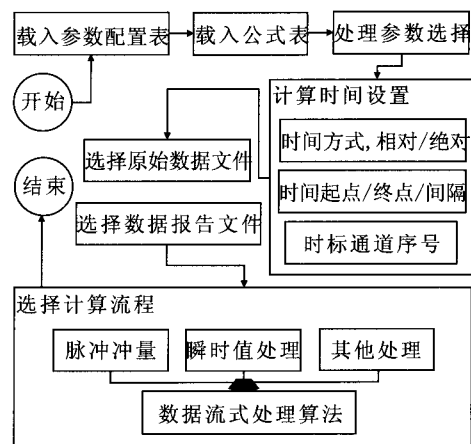


图 4 软件主体架构

Fig. 4 Main architecture of software

4.4 应用效果

该算法及软件经评审论证后, 被用于轨/姿控发动机高空模拟试验中脉冲后效冲量的计算, 经多次试验实践, 发现该流式处理算法相较于旧有的处理手段, 数据处理的时间性能有了很大提

升, 同台计算机上同一操作员处理 100 个 7 ms 脉宽的脉冲, 平均处理时间可由约 36 min 缩短到 0.8 min, 时效性能显著。

5 结论

轨/姿控发动机脉冲工作程序下后效冲量的数据流式处理算法和相应的工程软件, 在高空模拟试验中使用, 表现出良好的效果, 满足了数据处理的时效性要求, 为及时分析和评价发动机脉冲工作性能提供了大量数据。

参考文献:

- [1] 刘国球, 任汉芬, 朱宁昌, 等. 液体火箭发动机原理[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005.

- [2] [美]萨顿 G P, 比布拉兹 O. 火箭发动机基础[M]. 洪鑫, 张宝炯, 译. 北京: 科学出版社, 2003.
- [3] 张迎新, 雷道振, 陈胜, 等. 非电量测量技术基础[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002.
- [4] 美国太平洋公司. Pacific Instrument[M]. 美国: 太平洋公司, 2000.
- [5] 杨思锋, 刘鲁, 陈锋. 基于数据挖掘技术的液体火箭发动机试验数据分析和处理[J]. 宇航计测技术, 2010, 30(6): 57-61.
- [6] 清汉工作室. Visual C++ 6.0 数据库与网络开发实例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [7] 常增坡, 唐柏森. 离子束溅射薄膜压力传感器的动态特性[J]. 传感器技术, 2001, 20(6): 15-17.
- [8] 吴文斗, 周兵, 张丽莲, 等. 计算机测控系统中的可靠性技术[J]. 云南大学学报: 2006, 28(S2): 132-135.
- [9] 李正军. 计算机测控系统的设计与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

(编辑: 陈红霞)

(上接第 30 页)

将仿真计算结果与液流试验计算结果进行对比, 见表 2。计算数据与液流试验数据基本吻合, 误差在-8.3%~1.9%。

4 结论

采用 AMEsim 软件对蒸发器路单向阀进行仿真分析, 结果表明通过减小阀芯行程和阀芯小孔直径可以防止阀芯打开后出现颤振。改进后单向阀产品在进行液流试验合格后, 参加了发动机热试车考核, 试车过程中单向阀工作正常, 说明蒸发器路单向阀改进措施合理有效。

参考文献:

- [1] G P 萨顿. 火箭发动机基础[M]. 洪鑫, 张宝炯, 译. 北京: 科学出版社, 2003.
- [2] IMAGINE. AMEsim user manual [M/OL]. [2011-03-03]. www.cadfamily.com/downinfo/304437.html.
- [3] 付永领. AMEsim 系统建模和仿真[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.
- [4] 冯晓迪. 液压阀动态特性试验回路仿真研究[J]. 流体传动与控制, 2009, 35(4): 12-14.
- [5] 赵双龙. 调节阀特性研究[J]. 火箭推进, 2010, 36(2): 40-42, 52.
- [6] 王定军, 袁洪滨, 董苑. 贮箱充填过程仿真和分析[J]. 火箭推进, 2008, 34(1): 23-25.

(编辑: 马杰)