

基于 DSP 的陀螺加速度计数字伺服回路研究

严小军 张 乐

(航天时代仪器公司,北京,100854)

摘要 陀螺加速度计是战略导弹平台系统中的核心器件,其正常工作时必须要有相应的伺服回路来保证仪表具有足够的静态和动态性能,本文对比了模拟伺服回路和数字伺服回路的特点,阐述了陀螺加速度计的工作原理,重点探讨了基于 DSP(数字信号处理)的数字伺服回路的具体实现方案并给出了测试曲线,得出了数字伺服回路可用来替代常规的模拟伺服回路的结论,并指出数字伺服回路是陀螺加速度计伺服回路技术发展的一个重要方向。

关键词 陀螺加速度计,战略导弹,数字控制。

A Research on PIGA's Digital Servo Loop Based on DSP

Yan Xiaojun Zhang Le

(Aerospace Times Instrument Corporation, Beijing, 100854)

Abstract PIGA (Pendulous Integrating Gyro Accelerometer) is one of the most important instruments in inertial platform system. To achieve great performance, a servo loop is necessary. In this paper, the advantages and disadvantages are compared between analog servo loop and digital servo loop, and the operating principle of PIGA is also expounded. However, the realization of digital servo loop based on DSP is the paper's emphasis. A conclusion is drawn that the digital servo loop can be used to replace analog servo loop.

Key Words PIGA, Strategic missile, Digital Control.

1 引言

陀螺加速度计是加速度计的一种,是战略导弹和运载火箭导航系统中的核心器件,其作用是敏感载体的加速度,从而得到载体导航所必须的加速度、速度和位置等信息,控制系统根据这些参数就可以调节载体的飞行速度和控制发动机关机^[1]。目前,世界上各个掌握和拥有战略核武器、载人航天器的航天大国,如美国、俄罗斯、法国等,无一例外地在弹道导弹和运载火箭的导航系统中采用了陀螺加速度计,

如美国的 MX 导弹、俄罗斯的白杨-M 导弹等。这是由于陀螺加速度计具有其它种类的加速度计所不具有的特点——精度高(一般惯导级的陀螺加速度计能达到 $10^{-4} \sim 10^{-6} g_0$)、量程宽($20 \sim 40 g_0$);虽然它同时具有结构复杂、成本高的缺点。

陀螺加速度计正常工作时必须要有相应的伺服回路来保证仪表具有足够的静态和动态性能,目前常用的伺服回路是用模拟电路实现的,这种常规的控制方式具有精度较高、技术成熟、易于实现等优

收稿日期:2002-04-02

严小军:男,30岁,博士研究生,主要从事惯性导航、自动控制方面的研究

点,但其缺点也很明显:

a) 组成校正环节的电阻电容等元器件的特性易受环境条件影响、难以实现复杂的控制规律等。对于陀螺加速度计这样高精度的仪表来说,其性能在很大程度上依赖于伺服回路。因此,一旦由于电阻、电容值的漂移引起校正环节参数的变化,将会直接影响到整个仪表的性能。

b) 另外,陀螺加速度计在导弹(火箭)的整个飞行过程中,其工作环境是复杂多变的,常规的控制方案有时难以满足其性能的要求,随着近年来各种现代控制理论的日渐成熟以及微电子技术的飞速发展,在陀螺加速度计上采用数字控制以实现复杂控制规律成为了可能。

自 20 世纪 80 年代初的 DSP 芯片诞生以来,在十多年的时间里得到了飞速的发展,目前在通信与信息系统、信号与信息处理、自动控制、雷达、航空航天等许多领域得到广泛的应用^[2]。

DSP 芯片即数字信号处理器,是一种具有特殊结构的微处理器,其内部采用程序和数据分开的哈佛结构,具有专门的硬件乘法器,广泛采用流水线操作,提供特殊的 DSP 指令,可用来快速实现各种复杂的数字信号处理算法。

2 陀螺加速度计的基本原理

2.1 陀螺加速度计的基本组成

从功能组成的角度来说,陀螺加速度计主要由 3 部分组成:表头结构部分、伺服控制回路以及输出装置。其中,表头结构包括了仪表内环、外环支承方式;伺服控制回路广义上包括内环的角度传感器、控制电路以及外环的力矩电机等;输出装置包括变磁阻传感器、输出变换电路等。

2.2 陀螺加速度计的运动方程

图 1 所示为陀螺加速度计的几个坐标系,其中, $X_0Y_0Z_0$ 为与基座固联的坐标系, $X_1Y_1Z_1$ 为与外环固联的坐标系, $X_2Y_2Z_2$ 为与内环固联的坐标系, XYZ 为与转子固联的坐标系。由此,可以得到以下运动方程:

内环方程:

$$I_y \ddot{\beta} + C_y \dot{\beta} - H\dot{\alpha} = -mla_{x1} + M_y \quad (1)$$

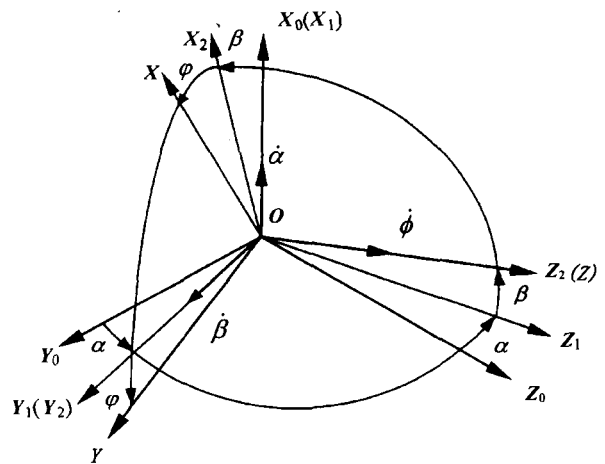


图 1 陀螺加速度计中的坐标系

外环方程:

$$I_{x1} \ddot{\alpha} + C_{x1} \dot{\alpha} + H\dot{\beta} = M_D + M_{x1} \quad (2)$$

$$M_D = K_t(u - E)/R \quad (3)$$

$$E = K_e \dot{\alpha} \quad (4)$$

$$u = -K_s K_a G(S)\beta \quad (5)$$

- 式中 M_D —— 力矩电机的力矩;
 K_s —— 信号传感器的比例系数;
 K_t —— 力矩电机的力矩系数;
 K_a —— 放大器的等效增益;
 R —— 力矩电机绕组的电阻;
 K_e —— 反电动势系数;
 $G(S)$ —— 校正网络传递函数。

由式(1)~(5)可得出陀螺加速度计的简化系统框图,见图 2。

2.3 陀螺加速度计的工作原理

当外环轴方向有视加速度 a_{x1} 时,在内环轴上将产生惯性力矩 mla_{x1} ,在理想状态下,即内环、外环没有干扰力矩时,按陀螺进动原理,转子将带动内、外框架一起进动,从而产生陀螺反作用力矩 $H\dot{\alpha}$,稳态时,惯性力矩将精确地被陀螺力矩所平衡,即:

$$H\dot{\alpha} = mla_{x1} \quad (6)$$

上述中, $\dot{\alpha}$ 是外环的转动角速度,可以直接测得,从而也就得到了加速度。通过积分还可以得出速度和

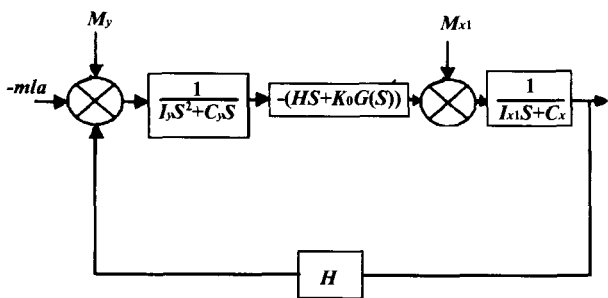


图2 陀螺加速度计系统框图

$K_0 = K_a K_s K_r / R$ 为电子线路部分的总增益

位移。

然而,仪表在实际的工作过程中,当外环存在干扰力矩 M_{x1} 时,角动量 H 将向 M_{x1} 方向进动,使得 β 角逐渐增大,当 H 和 M_{x1} 重合时,仪表因失去一个自由度而不能正常工作。因此,陀螺加速度计必须要有由角度传感器、控制电路和力矩电机组成的伺服回路来保证 H 和外环轴之间的垂直,同时给整个加速度计系统提供足够的静态和动态特性。

3 基于 DSP 的数字伺服回路设计

数字伺服回路的设计可分为两个方面:一是电路硬件方面的设计;二是控制算法(软件)方面的设计。

3.1 数字控制的硬件设计

3.1.1 数字控制 CPU 的选择

从原理上讲,任何具备数字信号处理能力的微处理器都可以作为数字控制的 CPU,如 X86 微处理器、单片机、DSP 等,其中 X86 系列微处理器运算能力强,但需要复杂的外部设备配合才能正常工作,在对体积要求较高的嵌入式控制系统中应用较少;单片机在一个芯片内集成了包括输入、输出、存储器、算术处理单元等模块,只需很少的外设即可组合最小系统,但其缺点是运算速度较慢,浮点处理能力弱(必须通过转换程序才能实现浮点加法和乘法,需要大量的指令周期,难以满足对实时性要求高的场合);而 DSP 有专门的浮点型 DSP 芯片,片内集成有常用的模块,组成最小系统所需的外设较少,最重

要的是 DSP 芯片不仅运算速度快、效率高(在单指令周期内就能完成一次浮点乘法和一次浮点加法),而且提供了特别适合于数字信号处理的指令系统。考虑到数字控制系统实现的复杂程度和软件编制的高效性,在本系统中采用 TI 公司的第 3 代 DSP 产品——TMS320C32,其主要特点有(TMS320C32-50)^[32]:

- a) 指令周期为 40 ns,运算能力为 275MOPS (百万次操作/s),50MFLOPS(百万次浮点操作/s),25MIPS(百万条指令/s);
- b) 32 位高性能 CPU,16/32 位整数运算,32/40 位浮点数运算;
- c) 微处理器/微计算机方式可选;
- d) 寻址空间达 16M(32 位字);
- e) 一个串行口,两个 32 位定时器,两个通道的 DMA;
- f) 丰富高效的指令系统。

3.1.2 数字控制的硬件组成(见图 3)

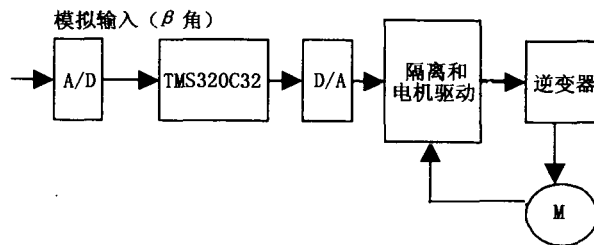


图3 数字控制的硬件组成

由第 2 节陀螺加速度计的工作原理可知,伺服回路的最重要作用就是根据内环偏角 β 角信号产生相应的力矩,从而使得 β 角保持在一个非常小的状态,同时赋予仪表足够的动、静态性能。

a) A/D 和 D/A。

1) 分辨率。

仪表内环角信号经前置变换放大器(完成交流放大、解调、低通滤波等功能)放大后输出至 A/D 转换,根据整个仪表工作特性的要求,内环偏角 β 要求小于 $2''$,如果采用数字控制对 β 角的分辨率应该在 $2''$ 之内。设 $\Delta\beta = 2''$,经前放后输出为

$$u_0 = \frac{2}{3600} \times 200 \times 25 = 2.78 \text{ (mV)} \quad (7)$$

β 角信号对应电信号为 $200 \text{ mV}/(^{\circ})$, 前放放大系数一般在 $20 \sim 30$ 之间, 考虑到 A/D 器件的输入信号范围为 $\pm 5 \text{ V}$, 此时 12 位的 A/D 和 D/A 转换器的分辨率为 2.5 mV , 满足仪表的要求。

2) 转换速度。

整个加速度计系统的闭环带宽一般低于 100 Hz , 根据香农采样定理, 只要采样周期 $T \leq 5 \text{ ms}$ 即可, 工程上一般采样频率取系统截止频率的 $10 \sim 20$ 倍, 考虑到算法运行时间和 D/A 转换时间, 取转换速度在 $200 \mu\text{s}$ 之内的 A/D 转换器, 就可以满足系统实时性的要求, 而 D/A 转换的速度一般均在几微秒至几十微秒之间。因此只需选择输出信号范围在 $\pm 5 \text{ V}$ 之间的通用型器件即可。

根据上述两个原则, 本系统中采用了 AD 公司的高速 12 位 A/D 转换器 AD674B, 其典型转换时间为 $15 \mu\text{s}$, 而 D/A 器件则选用了 AD7845, 典型转换时间为 $8 \mu\text{s}$ 。实验结果表明, 这两种高速器件能保证加速度计数字控制系统具有良好的实时性。

b) TMS320C32。

该 DSP 芯片是整个数字控制的核心, 其主要职能为:

- 1) 读取 AD 转换结果;
- 2) 数字信号处理(完成模拟校正环节的功能, 并且可以很容易实现各种现代控制方案);
- 3) 将数字处理完毕的信号转换成模拟信号, 提供给下一级驱动电路。

c) 隔离和电机驱动。

将数字电路、电机驱动电路和后级功率电路隔离, 并且根据给定信号去驱动无刷力矩电机工作; 有

$$G(s) = \frac{6.830\ 903\ 8e - 6s^3 + 7.122\ 448\ 9e - 4s^2 + 0.428\ 571\ 43s + 1}{4.086\ 419\ 8e - 7s^3 + 4.345\ 679\ 0e - 4s^2 + 0.351\ 333\ 333s + 1} \quad (8)$$

采样周期 $T_s = 200 \mu\text{s}$

采用 Tustin 变换对其离散化:

$$G(z) = \frac{15.158\ 508\ 3z^3 - 45.125\ 232\ 4z^2 + 44.818\ 125\ 92z - 14.845\ 850\ 5}{z^3 - 2.778\ 380\ 14z^2 + 2.587\ 631\ 49z - 0.809\ 233\ 8} \quad (9)$$

TMS320C32 实现上述算法的过程类似于普通的 IIR 滤波器, 可采用以下标准形式:

$$G(z) = \frac{a_0 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + a_3z^{-3}}{1 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + b_3z^{-3}} \quad (10)$$

关无刷力矩电机控制和驱动的详细方案可参阅考虑文献^[4]。

d) 逆变器。

电机的功率电路部分, 本系统中采用无刷力矩电机作为执行元件, 其结构形式为三相六对极, 因此逆变器采用三相逆变桥结构, 桥臂的功率管可采用晶体管或场效应管。

3.2 数字控制的软件设计

a) 数字控制的总体流程。

根据加速度计系统的带宽(小于 100 Hz)要求, 以及 A/D 和 D/A 的转换速度, 数字控制系统的采样周期取为 $T_s = 200 \mu\text{s}$, 在一个采样周期的时间间隔之内, 将完成 A/D 转换、数字信号处理、D/A 输出等功能, 其流程图见图 4。

b) 数字信号处理算法。

设计数字伺服系统时, 一般有两种方法:

1) 方案一是将原来的模拟校正环节通过双线性变换方法离散化, 这种方案的好处是可以直接利用原有模拟系统的研究成果, 但缺点是这种数字控制系统在性能上不可能超越原来的模拟系统^[5]。

2) 方案二是根据系统性能要求, 直接在离散域内设计数字控制器, 这样能够充分利用近年来已经成熟的现代控制理论——最优控制、自适应控制、鲁棒控制等来进行设计, 可以对系统进行复杂的动态补偿。

本文分别采用了上述两种方法, 设计了两个不同的数字控制器, 其中在原有模拟系统基础上通过离散化得到数字控制器的方法是验证数字伺服系统是否正常工作的一个简单而又重要的手段。设模拟校正环节的传递函数为

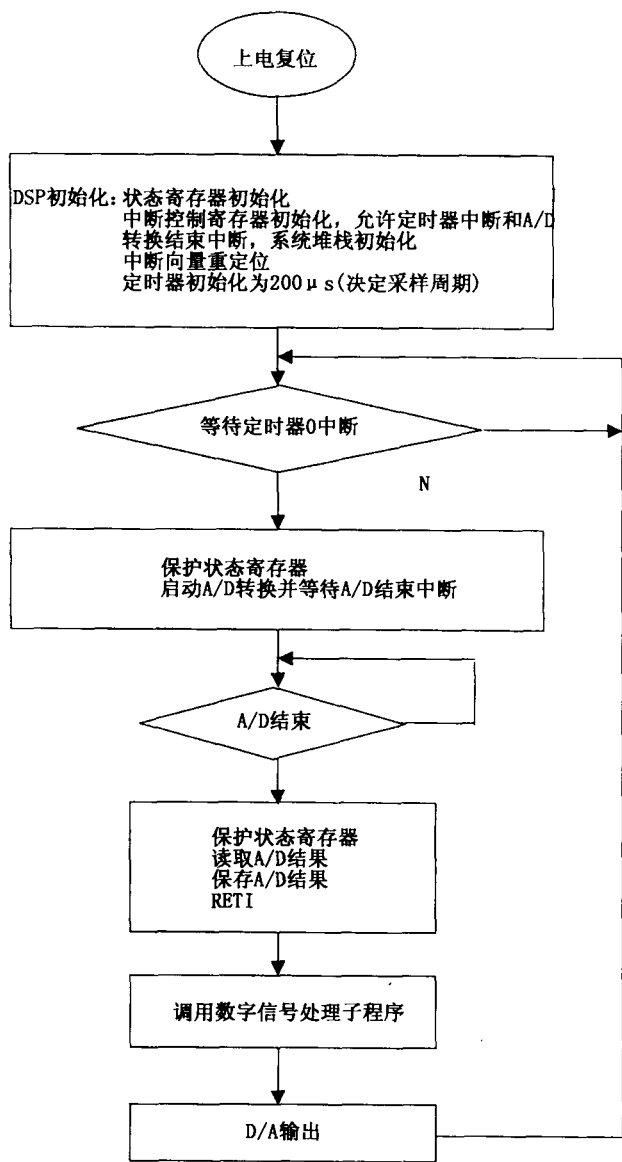


图4 数字控制的总体流程图

其结构形式如图5所示。

在软件编制时充分利用了 TMS320C32 指令系统的两种特性:乘法/累加并行指令和循环寻址。前者允许在单个周期内完成一次浮点乘法和一次浮点加法,后者使用一个有限长度的缓冲存储器(对于本系统来说为3个内部存储器单元)循环存放中间延时节点值 $W[k]$ 。

实际测试时通过监控程序测得上述三阶节的算

法单次运行仅耗时 $6 \mu s$ 左右(DSP 的晶振频率为 40 MHz),而同样算法如果采用单片机 80C196 系列来实现的话,其耗时将在 5 ms 左右,由此可以明显看出 DSP 在处理复杂算法时的高效性。

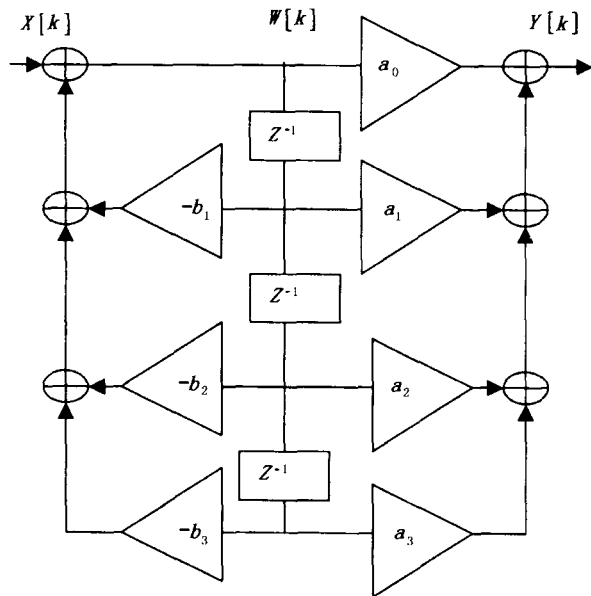


图5 三阶节的标准实现形式

图6为模拟校正环节和数字校正网络的频率响应曲线对比,显然两者的幅频特性是一致的,而相频特性方面数字校正网络在高频处要滞后于模拟环节,这主要是由零阶保持器引起的。

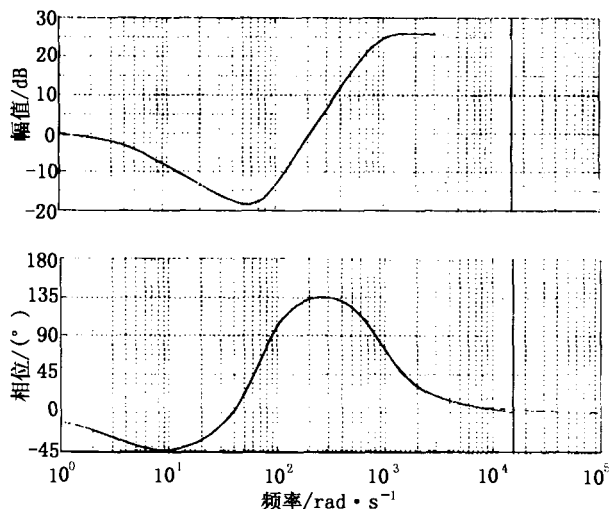


图6 模拟校正环节和数字校正网络的波特图对比

图 7 为采用模拟校正环节和 DSP 数字控制器的陀螺加速度计系统的实测阶跃响应曲线,显然这两种控制方式的效果是一致的,调节时间为 101 ms,超调量为 42%;图 8 为采用自适应控制算法的系统阶跃响应曲线,可以看出,系统的调节时间比普通的数字控制方案要快(74 ms),而且超调量减少了 1/4 左右(31%)。

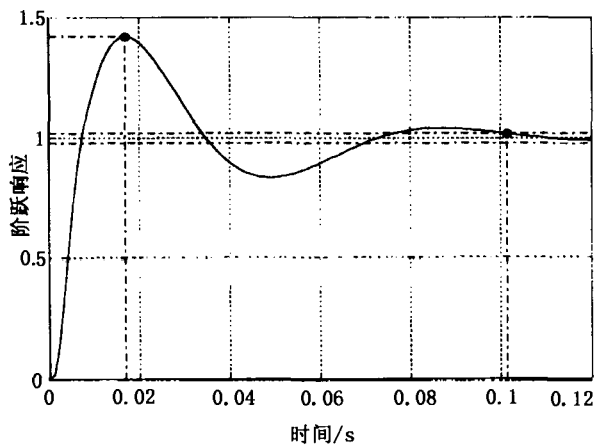


图 7 采用模拟校正环节和直接数字控制器时系统的阶跃响应

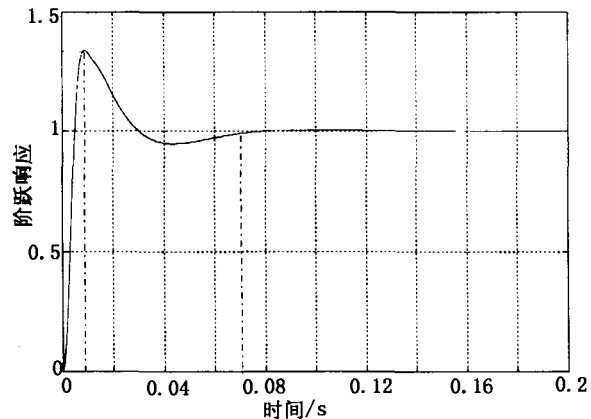


图 8 采用自适应算法时系统的阶跃响应

4 结 论

从以上试验结果可以看出,采用基于 DSP 技术实现的陀螺加速度计数字伺服回路在性能上要优于常规的模拟控制方式,并且具有参数一致性好、可实现复杂控制规律等显著特点,可用来替代常规的模拟伺服回路,是陀螺加速度计伺服回路控制技术发展的重要方向。

参 考 文 献

- 1 陆元九等. 惯性器件(下). 北京:宇航出版社,1993.
- 2 张雄伟等. DSP 芯片的原理与开发应用(第 2 版). 北京:电子工业出版社,2000.
- 3 TMS320C3x User's Guide. Texas Instruments, 1997.
- 4 严小军等. 无刷力矩电机在陀螺加速度表上的应用. 导弹与航天运载技术, 2002(1).
- 5 王福瑞等. 单片微机测控系统设计大全. 北京:北京航空航天大学出版社,1998.

日本政府大幅削减国际空间站项目支出

继美国政府削减国际空间站项目支出后,日本政府也决定在其年度预算中削减国际空间站项目支出,削减比例达到三分之一,实际拨款额为 400 亿日元。

今年年初,美国国家航空航天局决定取消空间站的一个居住舱和乘员返回运载器(CRV)建设项目。这将意味着空间站建成后任何时候部署在空间站上的宇航员都只能保持在 3

人,而原计划要为 7 名宇航员提供生活空间。由于计划改变,日本宇宙开发事业团将不能象预期的那样经常向空间站运送宇航员,而且经费削减还会对日本的各项空间试验计划产生重大影响。日本宇宙开发事业团曾希望每周可以使用空间站设备进行 15.4 h 的试验,但现在试验时间只有 2.6 h。

(赵颖 供稿)