余度捷联惯导系统连续自动标定技术

芦佳振 张春熹 祝露峰

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院,北京 100191)

摘 要:以余度捷联惯导系统为研究对象,提出了一种新的连续自动标定技术.从惯导系统误差模型出发,推导了这种连续自动标定技术的原理方程,指出在特殊旋转路径下由系统导航解算输出的速度误差将包含惯性器件误差的相关信息.依据惯性器件误差逐级分离的观点,设计了标定旋转路径.在设计的转台连续旋转轨迹下,利用卡尔曼滤波器可以获得全部常值误差项的精确估计.通过构建余度捷联系统标定仿真平台验证了这种技术的有效性.仿真结果表明,与传统的多位置翻滚标定方法相比,该技术标定精度高,操作简单易行,具有较好的工程应用价值.

关 键 词:捷联惯导系统;标定;余度;卡尔曼滤波器;误差模型

中图分类号:V 249.3

文献标识码:A **文 章 编 号**:1001-5965(2009)03-0366-05

Technique of continuous auto-calibration of redundant strapdown inertial system

Lu Jiazhen Zhang Chunxi Zhu Lufeng

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A novel continuous auto-calibration technique was presented for redundant strapdown inertial navigation systems. Principles of the proposed technique were based on strapdown system error models, which indicated that velocity errors from the system could contain information related to inertial sensor errors when rotated along a predefined trajectory. A novel calibration trajectory was designed. All deterministic errors could be accurately estimated through Kalman filtering techniques. Simulation platform for redundant strapdown system was designed to validate efficiency of this technique. Results show that the novel calibration technique outperforms conventional multi-position technique considering its simplicity and precision, which is of great importance for practical applications.

Key words: strapdown inertial navigation system; calibration; redundancy; Kalman filter; error model

余度技术通常是提高系统可靠性的重要方法,而余度捷联惯导通过增加惯性传感器的个数来达到提高系统可靠性的目的.余度捷联惯性传感器在使用前必须进行标定,以确定各惯性器件的零偏、标度因数以及失准角等误差量.由于余度捷联惯性传感器特殊的组成特点和结构安装形式,它的标定方法有别于其他器件.研究余度捷联惯性传感器标定相关技术成为提高惯性器件实际使用精度的关键技术之一.

惯性器件测试与标定的传统方法大都使用多位置翻滚法[1-4].这种方法利用多位置对消原理,通过采集惯性器件原始数据解析计算各误差项,受原理的限制,各种误差系数对惯性器件总误差的贡献并不能清晰地分离,此外各惯性器件的噪声会污染解析用原始测量数据,这些原因导致误差系数的可观测性较弱,实际标定精度并不高.目

收稿日期:2008-03-26

作者简介:芦佳振(1982—),男,江苏泰兴人,博士生,ljzh100@aspe.buaa.edu.cn.

前传统标定方法的研究已趋成熟;而一种系统级标定方法[5-6]正在成为标定技术研究的热点,这种方法通过观测导航系统误差来推算惯性器件误差,具有标定精度高、可观测性强等优势.但文献[5]存在没有将陀螺误差和加速度计误差区别考虑的缺点,文献[6]中推导的方法各项误差项仍存在交叉耦合,计算公式也比较复杂.本文将这种系统级标定技术推广至余度系统,并且提出依据陀螺、加速度计误差项逐级分离的观点设计旋转路径,得到一种新的余度捷联惯导系统连续自动标定技术.仿真结果验证了这种连续自动标定技术的有效性.

1　误差模型

1.1　原理概述

惯性导航的误差来源有初始误差以及惯性器件误差,表现为位置、速度、姿态的发散.当初始误差可以忽略并且工作时间较短时,惯导的系统误差可以描述为有关惯性器件误差项的线性函数.进一步,假设惯导只作角运动而不存在线运动时,这种线性函数还可以得到简化.通过推导这种线性函数的输入输出对应关系并对它进行反演变换,便能依据惯导的系统误差推算惯性器件误差.

1.2　惯导误差模型

本文使用北东地当地水平系 $Oxyz$ 作为导航坐标系(简称 n 系).忽略惯导初始误差并且假定系统无线运动,可得到简化的惯导误差模型[5]:

$$\left.\begin{aligned}
&\delta\dot{v}_x=\delta f_x+g\phi_y\\
&\delta\dot{v}_y=\delta f_y-g\phi_x\\
&\delta\dot{v}_z=\delta f_z\\
&\dot{\phi}_x=\Omega_z\phi_y-\Omega_y\phi_z+\varepsilon_x\\
&\dot{\phi}_y=\Omega_x\phi_z-\Omega_z\phi_x+\varepsilon_y\\
&\dot{\phi}_z=\varepsilon_z
\end{aligned}\right\}\tag{1}$$

式(1)中,g 为当地重力加速度;Ω 为地球速率;$\delta\boldsymbol{v}$ 为速度误差;$\boldsymbol{\phi}$ 为姿态误差;$\delta\boldsymbol{f}$ 为加速度计误差,$\boldsymbol{\varepsilon}$ 为陀螺误差.所有的下标代表各物理量在导航坐标系下的分量.

1.3　器件误差模型

假设陀螺的敏感轴为 $g_1,g_2,\cdots,g_f$;加表的敏感轴为 $a_1,a_2,\cdots,a_e$.对于余度系统来说,$f,e\geqslant 4$.分别选取陀螺的 g_i,g_j,g_k(简称陀螺 g 系,g_i,g_j,g_k 两两不重合)和加表的 a_m,a_n,a_p(简称加速度计 a 系,a_m,a_n,a_p 两两不重合)构建捷联系统,由于安装误差等因素,实际器件敏感轴为 g'_i,g'_j,g'_k 和 a'_m,a'_n,a'_p.而系统本体的参考正交坐标系记为 $O_bx_by_bz_b$(简称 b 系).

现令 b 系下的角速度、比力测量向量分别为

$$\boldsymbol{\omega}^b=[\omega_x^b\quad\omega_y^b\quad\omega_z^b]^{\mathrm{T}}\tag{2}$$

$$\boldsymbol{f}^b=[f_x^b\quad f_y^b\quad f_z^b]^{\mathrm{T}}\tag{3}$$

则反映到惯性器件参考轴的输出为

$$\begin{bmatrix}\omega_i^g\\ \omega_j^g\\ \omega_k^g\end{bmatrix}=\boldsymbol{\omega}^g=\boldsymbol{H}_b^g\boldsymbol{\omega}^b=\begin{bmatrix}C_{ix}&C_{iy}&C_{iz}\\ C_{ix}&C_{iy}&C_{jz}\\ C_{kx}&C_{ky}&C_{kz}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\omega_x^b\\ \omega_y^b\\ \omega_z^b\end{bmatrix}\tag{4}$$

$$\begin{bmatrix}f_m^a\\ f_n^a\\ f_p^a\end{bmatrix}=\boldsymbol{f}^a=\boldsymbol{H}_b^a\boldsymbol{f}^b=\begin{bmatrix}C_{mx}&C_{my}&C_{mz}\\ C_{nx}&C_{ny}&C_{nz}\\ C_{px}&C_{py}&C_{pz}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}f_x^b\\ f_y^b\\ f_z^b\end{bmatrix}\tag{5}$$

其中矩阵 $\boldsymbol{H}_b^g,\boldsymbol{H}_b^a$ 分别为陀螺、加速度计的测量矩阵,可根据余度系统的配置方案得到,矩阵中的任一元素 C_{ij} 代表轴 i 和 j 之间夹角的余弦.

由于惯性器件参考轴和实际轴之间并不重合,反映到各参考轴下的惯性器件误差输出为

$$\boldsymbol{\varepsilon}^g=\boldsymbol{b}_g^g+\boldsymbol{M}_g\boldsymbol{\omega}^g\tag{6}$$

$$\delta\boldsymbol{f}^a=\boldsymbol{b}_a^g+\boldsymbol{M}_a\boldsymbol{f}^a\tag{7}$$

写出式(6)和式(7)的分量形式为

$$\begin{bmatrix}\varepsilon_i\\ \varepsilon_j\\ \varepsilon_k\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}b_i\\ b_j\\ b_k\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}s_i&m_{ij}&m_{ik}\\ m_{ji}&s_j&m_{jk}\\ m_{ki}&m_{kj}&s_k\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\omega_i^g\\ \omega_i^g\\ \omega_k^g\end{bmatrix}\tag{8}$$

$$\begin{bmatrix}\delta f_m\\ \delta f_n\\ \delta f_p\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}b_m\\ b_n\\ b_p\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}s_m&m_{mn}&m_{mp}\\ m_{nm}&s_n&m_{np}\\ m_{pm}&m_{pn}&s_p\end{bmatrix}\begin{bmatrix}f_m^a\\ f_n^a\\ f_p^a\end{bmatrix}\tag{9}$$

将式(8)和式(9)投影到 b 系下并将式(4)、式(5)代入得到

$$\boldsymbol{\varepsilon}^b=\boldsymbol{H}_g^b\boldsymbol{\varepsilon}^g=(\boldsymbol{H}_b^g)^{-1}(\boldsymbol{b}_g^g+\boldsymbol{M}_g\boldsymbol{H}_b^g\boldsymbol{\omega}^b)\tag{10}$$

$$\delta\boldsymbol{f}^b=\boldsymbol{H}_a^b\delta\boldsymbol{f}^a=(\boldsymbol{H}_b^a)^{-1}(\boldsymbol{b}_a^a+\boldsymbol{M}_a\boldsymbol{H}_b^a\boldsymbol{f}^b)\tag{11}$$

式(10)和式(11)即为惯性器件的误差模型.其中 $\boldsymbol{b}_g$ 和 $\boldsymbol{a}_g$ 分别表示陀螺、加速度计的零偏误差项,$\boldsymbol{M}_g$ 和 $\boldsymbol{M}_a$ 称为误差矩阵,对角线元素为标度因数误差,其他为失准角误差.

1.4　关于误差模型的几点讨论

1) 假定陀螺的零偏误差为 1(°)/h,标度误差为 1×10^{-3},那么从式(10)中可见,当敏感轴输入为 30(°)/s,器件输出由标度产生的误差 $30\times3600\times0.001$(°)/h$\gg$1(°)/h,此外由失准角误差造成的影响和标度误差类似,所以陀螺的零偏误差项应在测试陀螺其他常值误差项前预先测得;

2) 观察式(1)中的姿态误差方程,陀螺误差和姿态误差的函数关系为线性关系,速度误差方

程表明速度误差可以描述为陀螺和加速度计误差项的线性函数；

3）由于标定过程无线运动，所以系统的速度理论值为0，在这种情况下，对应任何时刻，系统导航解算得到的速度即为速度误差叠加系统噪声，而计算系统瞬时的姿态误差相对复杂，选取速度误差作为观测量，可以建立卡尔曼滤波跟踪估计系统速度误差及其一阶导数的变化；

4）对于式(8)中的陀螺失准角误差，由于使用陀螺轴向定义系统轴向，可令 $m_{ij}=m_{ji}$，$m_{ik}=m_{ki}$，$m_{jk}=m_{kj}$，矩阵 $\boldsymbol{M}_g$ 成为对称阵，误差项减少3项，可简化标定计算过程.

2 标定算法与卡尔曼滤波

2.1 系统误差与器件误差的函数关系

对应时间段 $t=0\sim T$ 内，求取速度误差变化率的变化量，可以得到[5-6]

$$\left.\begin{aligned}\delta\dot{v}_x(T)-\delta\dot{v}_x(0)&=\Delta\delta f_x+g\Delta\phi_y\\ \delta\dot{v}_y(T)-\delta\dot{v}_y(0)&=\Delta\delta f_y-g\Delta\phi_x\end{aligned}\right\}\tag{12}$$

其中

$$\Delta\delta\boldsymbol{f}=\boldsymbol{C}_b^n(T)\delta\boldsymbol{f}^b(T)-\boldsymbol{C}_b^n(0)\delta\boldsymbol{f}^b(0)\tag{13}$$

$$\Delta\boldsymbol{\phi}=\int_0^T\boldsymbol{C}_b^n(t)\boldsymbol{\varepsilon}^b\mathrm{d}t\tag{14}$$

$\boldsymbol{C}_b^n(t)$ 为 t 时刻从 b 系到 n 系的瞬时捷联矩阵.

联立式(10)～式(14)可以得到各惯性器件误差和系统速度误差变化率的函数关系.

2.2 滤波算法

已知观测量为水平速度误差，现在需要在线估计速度误差变化率，合理设计卡尔曼滤波器可以实现这个要求.

滤波器的状态方程为[5-8]

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\begin{bmatrix}\delta v_x\\ \delta v_y\\ \delta\dot{v}_x\\ \delta\dot{v}_y\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0&0&1&0\\0&0&0&1\\0&0&0&0\\0&0&0&0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\delta v_x\\ \delta v_y\\ \delta\dot{v}_x\\ \delta\dot{v}_y\end{bmatrix}+\boldsymbol{Q}\tag{15}$$

其中 $\boldsymbol{Q}$ 为系统噪声.

量测方程为

$$\boldsymbol{Z}=\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\end{bmatrix}\boldsymbol{X}+\boldsymbol{R}\tag{16}$$

其中 $\boldsymbol{X}=[\delta v_x\quad\delta v_y\quad\delta\dot{v}_x\quad\delta\dot{v}_y]^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{R}$ 为量测噪声.

使用标准卡尔曼滤波算法对状态变量进行估计，量测更新周期设定为1 s.

3 旋转路径设计

3.1 设计思想

2.1节的讨论已经得到了标定算法. 系统旋转路径的合理设计可以使得标定算法更简洁，并且适于工程应用.

从式(13)可以看出加速度计误差的变化量只和旋转初始位置、终末位置有关；从式(14)可以看出由陀螺误差导致的姿态误差变化量和旋转路径的整个阶段都有关联. 旋转路径的设计并不唯一，本文结合实际工程经验设计了4个旋转序列用于陀螺的标定以及6个旋转序列用于加速度计的标定. 依据陀螺、加速度计误差项逐级分离的观点设计旋转路径，主要过程如下：

1）首先标定陀螺零偏误差项，设计旋转序列使陀螺敏感轴分别朝向东向，转台保持位置锁定状态下系统开始导航，通过观测速度误差推算姿态误差进而计算出陀螺零偏误差；

2）然后设计闭合路径标定陀螺标度误差以及失准角误差，这样可以屏蔽加速度计误差量造成的影响；

3）对加速度计进行标定时，应使用陀螺标定结果对陀螺原始数据进行补偿，这样可以忽略陀螺误差造成的影响.

3.2 实例推导

本文后面以较复杂的6传感器系统构成的余度系统说明相关推导过程. 6个单自由度陀螺仪构成的余度系统的典型配置是6个陀螺的敏感轴分别沿正12面体的6个平面的法线方向配置. 这种配置具有几何上的对称性[9-10]. 所有的陀螺敏感轴彼此相距一个空间角 $2\alpha=63°26'5.8''$. 图1为这种配置方式的简图.

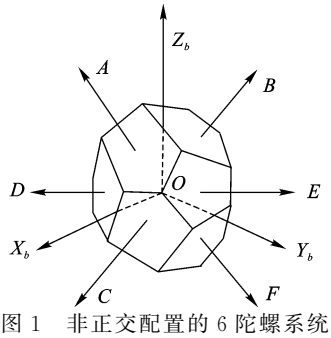

图1 非正交配置的6陀螺系统

根据图1的配置方式，可以得到本系统的测量方程为

$$\begin{bmatrix}\omega_a\\ \omega_b\\ \omega_c\\ \omega_d\\ \omega_e\\ \omega_f\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\sin\alpha & 0 & \cos\alpha\\ -\sin\alpha & 0 & \cos\alpha\\ \cos\alpha & \sin\alpha & 0\\ \cos\alpha & -\sin\alpha & 0\\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha\\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\omega_x^b\\ \omega_y^b\\ \omega_z^b\end{bmatrix} \tag{17}$$

现选取陀螺 A,E,F 构建捷联系统的陀螺部分,此时有

$$\boldsymbol{H}_b^g=\begin{bmatrix}\sin\alpha & 0 & \cos\alpha\\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha\\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha\end{bmatrix} \tag{18}$$

那么忽略陀螺的零偏误差项后可以得到

$$\boldsymbol{\varepsilon}^b=\boldsymbol{H}_g^b\boldsymbol{\varepsilon}^g=(\boldsymbol{H}_b^g)^{-1}\boldsymbol{M}_g\boldsymbol{H}_b^g\boldsymbol{\omega}^b \tag{19}$$

其中

$$\boldsymbol{M}_g=\begin{bmatrix}s_a & m_{ab} & m_{ac}\\ m_{ba} & s_b & m_{bc}\\ m_{ca} & m_{cb} & s_c\end{bmatrix} \tag{20}$$

考察系统如图 2 所示的转动,从位置 1 开始绕 b 系下 X 轴正向以转速 ω_x 转动 π 角到位置 2. 计算从位置 1 到位置 2 的姿态误差角增量为

$$\Delta\boldsymbol{\phi}=\int_0^T\boldsymbol{C}_b^n(t)\boldsymbol{\varepsilon}^b\mathrm{d}t=$$
$$\int_0^T\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & \cos(\omega_x t) & -\sin(\omega_x t)\\ 0 & \sin(\omega_x t) & \cos(\omega_x t)\end{bmatrix}\cdot$$
$$(\boldsymbol{H}_b^g)^{-1}\boldsymbol{M}_g\boldsymbol{H}_b^g\begin{bmatrix}\omega_x\\ 0\\ 0\end{bmatrix}\mathrm{d}t \tag{21}$$

将式(21)化简可以得到

$$\Delta\boldsymbol{\phi}=\begin{bmatrix}\pi\cdot s_a\\ m_{ac}-\cos\alpha\cdot s_a-\tan\alpha\cdot m_{ab}\\ m_{ac}-\cos\alpha\cdot s_a+2\tan\alpha\cdot m_{ab}\end{bmatrix} \tag{22}$$

由式(22)容易看出,系统从位置 1 转到位置 2 造成的姿态角误差是关于 s_a,m_{ac},m_{ab} 的线性函数. 设计一组合理的闭合路径,便可推算得到各陀螺误差项. 此外关于加速度计误差的推导相对简单,本文省略.

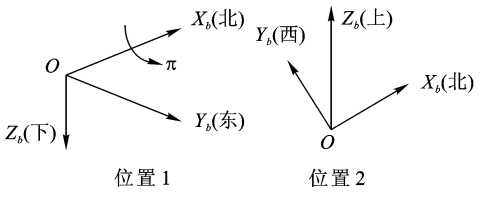

图 2　绕 b 系 X 轴的 π 角转动

4　余度系统标定仿真

4.1　标定仿真平台设计

标定仿真平台可以评价旋转序列设计方案并对标定精度作出预估. 通过模拟转台转动序列并结合余度捷联惯性传感器误差模型可以获得标定过程中敏感元件的输出量;使用这些敏感元件仿真数据进行导航解算,利用第 2 节中的标定算法可以推算出各惯性器件误差项的大小. 这里对图 1 所示的 6 陀螺余度系统进行标定仿真计算. 选择陀螺组合(A,B,C)和(D,E,F)分别进行标定仿真计算,(B,E,F)作为标定结果检验.

4.2　仿真条件

不考虑加速度计误差,系统误差源设定为陀螺标度因数误差以及失准角误差,陀螺组合(A,B,C)和(D,E,F)的误差矩阵(主对角线为标度因数误差,单位为 10^{-6};其余为失准角误差,单位为 μrad),分别用 $\boldsymbol{M}_1,\boldsymbol{M}_2$ 表示:

$$\boldsymbol{M}_1=\begin{bmatrix}1\,000 & 800 & 700\\ 800 & 900 & 500\\ 700 & 500 & 1\,200\end{bmatrix}$$
$$\boldsymbol{M}_2=\begin{bmatrix}700 & 550 & 650\\ 550 & 800 & 800\\ 650 & 800 & 1\,100\end{bmatrix}$$

4.3　仿真结果

对陀螺组合(A,B,C)和(D,E,F)进行标定仿真,结果为

$$\boldsymbol{M}'_1=\begin{bmatrix}1\,010 & 786 & 775\\ 786 & 887 & 505\\ 775 & 505 & 1\,183\end{bmatrix}$$
$$\boldsymbol{M}'_2=\begin{bmatrix}735 & 578 & 664\\ 578 & 839 & 757\\ 664 & 757 & 1\,106\end{bmatrix}$$

取上面的标定结果补偿仿真陀螺输出,并对陀螺组合(B,E,F)进行再标定,其检验结果为

$$\boldsymbol{M}'=\begin{bmatrix}13 & -78 & 53\\ -78 & 18 & -20\\ 53 & -20 & 32\end{bmatrix}$$

检验结果表明对陀螺进行的标定及误差补偿切实有效.

5　结 束 语

余度系统连续标定技术是基于连续旋转序列激励惯性器件的误差系数,进而通过观测系统导航输出速度误差计算各误差项;此外利用余度惯性器件的冗余信息还可以对标定结果进行校验. 和多位置翻滚法相比,该技术标定精度高,操作简单,所需时间少. 仿真结果表明了这种技术的有效

性.

参考文献（References）

[1] 任大海，顾启泰，毛刚，等. 微型惯性测量组合标定技术[J]. 清华大学学报：自然科学版，2001，41(8)：21－24
Ren Dahai，Gu Qitai，Mao Gang，et al. Calibration techniques for micro inertial measurement uints[J]. Tsinghua Univ：Sci & Tech，2001，41(8)：21－24(in Chinese)

[2] 杨华波，蔡洪，张士峰，等. 高精度惯性平台连续自动标定自对准技术[J]. 宇航学报，2006，27(4)：600－604
Yang Huabo，Cai Hong，Zhang shifeng，et al. Continuous calibration and alignment techniques for a high precision inertial platform[J]. Journal of Astronautics，2006，27(4)：600－604(in Chinese)

[3] Mu Shuzhi，Bu Xiongzhu，Li Yongxin. Optimization design and calibration of installation error coefficients for gyroscope-free strapdown inertial measurement unit[C]// Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Luoyang：IEEE，2006：238－242

[4] Wang Jiandong，Liu Yunhui，Fan Weihong. Design and calibration for a smart inertial measurement unit for autonomous helicopters using MEMS sensors[C]// Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Luoyang：IEEE，2006：956－961

[5] Rogers R M. Applied mathematics in integrated navigation systems[M]. 2nd ed. Reston：AIAA，2003：173－183

[6] 杨晓霞，黄一. 激光捷联惯导系统的一种系统级标定方法[J]. 中国惯性技术学报，2008，16(1)：1－7
Yang Xiaoxia，Huang Yi. Systematic calibration method for laser gyro SINS[J]. Journal of Chinese Inertial Technology，2008，16(1)：1－7(in Chinese)

[7] Grewal M S. Application of Kalman filtering to the calibration and alignment of inertial navigation systems[J]. IEEE，1991，36(1)：4－12

[8] Mirzaeri F M，Roumeliotis S I. A Kalman filter-based algorithm for IMU-camera calibration[C]//Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. San Digeo：IEEE，2007：2427－2434

[9] 陈哲. 捷联惯导系统原理[M]. 北京：宇航出版社，1986：186－188
Chen Zhe. The principle of strapdown inertial system[M]. Beijing：Space Navigation Press，1986：186－188(in Chinese)

[10] Titterton D H，Weston J L. Strapdown inertial navigation technology[M]. England：Lavenham Press，1997

（责任编辑：吴　琼）

（上接第303页）

设备虚拟化技术（VT-d[10]，Virtualization Technologies for directed I/O）和扩展页表（EPT，Extended page tables）[11]技术，降低实现难度；②以处理器一致性模型取代顺序一致性模型，进一步提高性能；③动态监测机群物理资源变化，支持节点数随需增减；④增加资源管理和作业调度功能，支持多个运行域.

参考文献（References）

[1] Culler D E，Singh J P，Gupta A. Parallel computer architecture-a hardware/software approach[M]. Beijing：China Machine Press，1999：20－37

[2] Smith J，Nair R. Virtual machines：versatile platforms for systems and processes[M]. Beijing：Publishing House of Electronics Industry，2006：3－13

[3] VMware. Understanding full virtualization，paravirtualization，and hardware assist[EB /OL]. 2007[2008－04－09]. http://www.vmware.com/files/pdf/VMware_paravirtualization.pdf

[4] LeVasseur J，Uhlig V，Chapman M，et al. Pre-virtualization：slashing the cost of virtualization[EB/OL]. 2005[2008－04－09]. http://l4ka.org/publications/2005/previrtualization-tech-report.pdf

[5] Intel. Intel 64 and IA-32 architectures software developer's manual[EB/OL]. 2007[2008－04－09]. http://www.intel.com/products/processor/manuals/

[6] Kaneda K，Oyama Y，Yonezawa A. A virtual machine monitor for providing a single system Image [C]//In Proceedings of the 17th IPSJ Computer System Symposium (ComSys'05). Tokyo：Su-Tokyo，2005：3－12

[7] Chapman N，Heiser G. Implementing transparent shared memory on clusters using virtual machines[C]//In USENIX Annual Technical Conference. Anaheim，2005：1－4

[8] Vmware. EXS server[EB/OL]. 2006[2008－04－09]. http://www.vmware.com/pdf/esx_datasheet.pdf

[9] Barham P，Dragovic B，Fraser K，et al. Xen and the art of virtualization[C]//In Proceedings of the 19th ACM SOSP，2003：164－177

[10] Intel. Intel® Virtualization technology for directed I/O [EB/OL]. 2006[2008－04－09]. http://www.intel.com/technology/itj/2006/v10i3/2－io/7－conclusion.htm

[11] Gil Neiger. Intel virtualization technology：hardware support for efficient processor virtualization [J]. Intel Technology Journal，3(10)，2006：167－178

（责任编辑：吴　琼）