基于 Lagrange 方法的失重人体建模与仿真

王 娟 庄达民

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083)

摘 要: 阐述了利用多刚体系统动力学进行航天员舱外活动仿真 EVA(Extra Vehicular Activity)的必要性. 给出了应用计算多刚体系统动力学建立的通用失重人体 4 关节反向运动学与反向动力学模型. 选取典型的实例,在对其进行适当简化的基础上,运用通用模型对其进行仿真计算,计算时为考虑失重对人体质量、惯量与力量等参数的影响,对通用模型进行了修正. 利用能量比较法对结果进行分析,得出当手部的运动轨迹半径与角速度减小、时间延长,髋关节做前驱运动时航天员工作最为节省能量. 通过能量比较法计算得到了人体运动时各关节作功最为节省能量的范围. 计算方法对航天员舱内外活动仿真及工效分析有一定的参考价值.

关 键 词: 失重; 反向运动学模型; 反向动力学模型; Lagrange 方法

中图分类号: V 527

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)03-0254-04

Human modeling and simulation based on Lagrangian method in weightlessness

Wang Juan Zhuang Damin

(School of Aeronautic Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The necessity of computational multi-body dynamics simulating the astronaut extra vehicular activity (EVA) was described. The 4 joints universal human body inverse kinematics model and inverse dynamics model in weightlessness utilizing computational multi-body dynamics were proposed. A typical EVA, an actual large-mass-handling EVA performed on STS-63, was chosen as the instance to simulate. Based on some simplifications, a typical EVA was simulated and calculated using universal human model. Considering the influence of weightlessness on human modeling, the universal model should be amended. The results were analyzed according to energy comparison method. The results showed when hand movement contrail radius and angle velocity minishing, movement time prolonging and hip joint flexion moving, accomplishing task retrenched energy. Human body joint movement comfortable scope could be achieved by energy comparison method. The calculational methods provided the reference value for the astronaut intra and extra vehicular activity simulation and ergonomic analysis.

Key words: weightlessness; inverse kinematics model; inverse dynamics model; Lagrangian method

为了确保出舱活动的顺利进行以及航天员的工作效率,必须对航天员将要完成的每一次任务进行计算机仿真,将多刚体系统动力学用于 EVA (Extra Vehicular Activity)仿真填充了用运动方程来定量分析航天员操纵物体以及多节段人体模型的空白. 它克服了用物理方法模拟微重力环境时存在这样或那样的缺点,如中性浮力水槽中水所固有的粘滞阻力给航天员训练运动带来了负面影

收稿日期: 2005-06-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30370355)

作者简介: 王 娟(1978-), 女, 陕西商洛人, 博士生, wangjuan1111@126.com.

响、气垫平台仅能提供 2 个自由度的模拟环境、失重飞机一次抛物线飞行能提供的失重时间短等. 为了克服这些物理模拟设施的缺点,美国 NASA,欧空局等机构进行了多方面的研究,直到 1997 年美国 NASA 才将多刚体动力学引入到对 EVA 任务的分析中. NASA 提出了许多方法,如 Newton-Euler 法, Kane 法, R/W 法, Lagrange 法等. Lagrange 法和 Kane 法是目前最普遍应用的. 本文就是用 Lagrange 方法建立了通用失重人体反向运动学与动力学模型的.

1　反向运动学模型

一般地,如果已知航天员末端节段在工作空间中的运动轨迹,来求解航天员各关节的运动学参数[1,2],便是反向运动学问题. 反向运动学问题可以看作是从工作空间到关节空间的一种非线性映射.

在航天员运动过程中,航天员末端节段,例如手部的运动速度 $\boldsymbol{\xi}$ 是一个 6 维向量. $\boldsymbol{\xi}$ 和描述航天员人体各关节速度的 N 维向量 $\dot{\boldsymbol{q}}$ 之间存在以下关系:

$$\boldsymbol{\xi} = \boldsymbol{J}\dot{\boldsymbol{q}} \tag{1}$$

式中,$\boldsymbol{q} \in \boldsymbol{R}^N$ 为系统的广义坐标;$\boldsymbol{J} \in \boldsymbol{R}^{6\times N}$ 为航天员人体的雅可比矩阵,可根据航天员人体的几何拓扑关系得到,用式(2)求解:

$$\left.\begin{aligned} \boldsymbol{J} &= [\boldsymbol{J}_{\mathrm{L}} \quad \boldsymbol{J}_{\mathrm{A}}]^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{J}_{\mathrm{L}j} &= \boldsymbol{b}_{j-1} \times \boldsymbol{r} \\ \boldsymbol{J}_{\mathrm{A}j} &= \boldsymbol{b}_{j-1} \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

式中,$\boldsymbol{J}_{\mathrm{L}} \in \boldsymbol{R}^{3\times N}$ 和 $\boldsymbol{J}_{\mathrm{A}} \in \boldsymbol{R}^{3\times N}$ 分别为线速度、角速度传递矩阵;j 表示矩阵的第 j 个列向量;r 为末端节段位置向量在基坐标系中的表示;$\boldsymbol{b}_{j-1}$ 为 $j-1$ 关节轴的单位向量. 如果已知末端节段的空间运动速度,那么求解式(1), 就可以得到关节速度 $\dot{\boldsymbol{q}}$,分别对其进行积分和微分,得到关节角度和关节角加速度.

在 Hanavan 人体节段模型的基础上[3],本文将 EVA 中的航天员人体简化为躯干、上臂、前臂和手部 4 个节段. 该航天员系统具有髋、肩、肘以及腕 4 个转动关节,所对应的关节角位移分别为 q_1, q_2, q_3 和 q_4, r 为手部运动轨迹半径. 通过以上分析,把问题简化为一个包含 4 个节段,具有 4 个自由度、2 个冗余度的有根开链系统,各节段之间通过平面转动关节连接. 以航天员踝部关节中心为坐标原点,航天员人体纵轴正向为 y 轴正方向,矢状轴正向为 x 轴正方向建立右手坐标系,如图 1 所示. 根据坐标变换,可以计算出航天员肩、肘、腕关节以及手部的空间位姿,根据式(2)以及计算出的空间位姿即可得到 $\boldsymbol{J}_{\mathrm{L1}}, \boldsymbol{J}_{\mathrm{L2}}, \boldsymbol{J}_{\mathrm{L3}}$ 与 $\boldsymbol{J}_{\mathrm{L4}}$ 的表达式. 从而,可得到此系统的雅可比矩阵. 在已知手部的 $\boldsymbol{\xi}$ 时,求解式(1),就可以得到关节角速度 $\dot{q}_i, i=1,\cdots,4$ 分别对其进行积分和微分,可得到关节角度 $q_i, i=1,\cdots,4$ 和关节角加速度 $\ddot{q}_i, i=1,\cdots,4$.

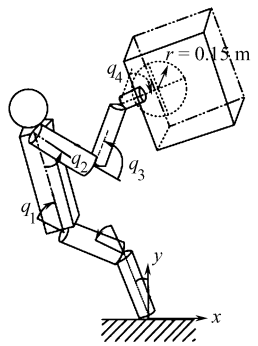


图 1　简化的航天员人体几何模型

2　反向动力学模型

拉格朗日函数 L 被定义为系统的动能 T 和势能 V 之差,即 $L=T-V$. 系统的拉格朗日方程如式(3)所示:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left[\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right] - \frac{\partial L}{\partial q_i} = F_i \quad i = 1,2,\cdots,n \tag{3}$$

式中,q_i 是系统的广义坐标;$\dot{q}_i$ 为广义坐标对时间的导数,称之为广义速度;F_i 是在关节 i 处作用于系统以驱动刚体 i 的广义力或广义力矩[4,5].

根据式(3)进行推导,又由于航天员处于失重状态,而且系统上所受外力为零,所以计算时要考虑到失重对人体性能的影响,主要表现为人体高度增加近 3%、身体的自然姿势改变为适应于失重特征的自然状态、体围变化、身体的总质量减少 3% ~4%、肌肉萎缩与人体力量的变化等,必须对其影响的参数加以修正. 为此推导出的简化航天员人体 4 节段 Lagrange 动力学方程如式(4)所示:

$$\sum_{j=1}^{4} H_{ij}\ddot{q}_j + \sum_{j=1}^{4}\sum_{k=1}^{4} h_{ijk}\dot{q}_j\dot{q}_k = \tau_i \qquad i = 1,\cdots,4 \tag{4}$$

式中,$h_{ijk} = \dfrac{\partial H_{ij}}{\partial q_k} - \dfrac{1}{2}\dfrac{\partial H_{jk}}{\partial q_i}$;$\tau_i$ 表示关节力矩,左端首项代表惯性力矩,次项代表向心力和哥氏力. $H_{ij}(j=i)$ 称为关节 i 的有效惯量,关节 i 的加速度 $\ddot{q}_i$ 将在关节 i 上产生一个等于 $H_{ij}\ddot{q}_i(j=i)$ 的惯性力;$H_{ij}(j\neq i)$ 称为关节 i 和 j 之间的耦合惯量,关节 j 的 $\ddot{q}_j$ 将在关节 i 上产生一个等于 $H_{ij}\ddot{q}_j$ 的惯性力;h_{ijk}

$\dot{q}_j^2(k=j)$项是由关节j的速度$\dot{q}_j$在关节i上产生的向心力;$h_{ijk}\dot{q}_j\dot{q}_k(k\neq j)$项是由关节$j$和$k$的$\dot{q}_j$和$\dot{q}_k$引起的作用于关节$i$的哥氏力.

3 着装关节最大作功值

为了研究人体能量的消耗,必须得到各个关节所作功,功由作用在绕定轴转动刚体上的力推导而出,绕关节点从角φ_1转到φ_2所作功用式(5)计算:

$$\boldsymbol{W}_{\max}=\int_{\varphi_1}^{\varphi_2}(1+\boldsymbol{\delta})\boldsymbol{\tau}_{0\max}\mathrm{d}\varphi \tag{5}$$

式中,$\boldsymbol{\tau}_{0\max}=a_0+a_1\boldsymbol{q}+a_2\boldsymbol{q}$为由试验结果拟合而成的求不着装航天员各主要关节最大力矩的公式;$\boldsymbol{\delta}=b_0+b_1\boldsymbol{q}+b_2\boldsymbol{q}^2$为由试验结果拟合而成的修正系数,以此推出着装航天员各关节最大力矩;a_0,a_1,a_2,b_0,b_1和b_2分别为最小二乘法的拟合系数. 根据文献[6],航天员在天上的力矩大概是地面的2/3,所以计算时应加以修正. 根据式(5)计算,失重状态下各关节最大作功值见表1.

表1 着装关节最大力矩作功值 J

肩关节	肘关节	腕关节
1 369.571	898.664	495.035

4 能量比较法

为了提高航天员操作的安全性和降低能量消耗程度,仿真航天员运动时需要考虑人体的工效学要求[6]. 本文运用设$W_{i\max}(i=1,\cdots,4)$为转动某一角度作功时最大能耗的方法对航天员舱外活动进行工效分析. 但是航天员操作过程中关节处作功大小并不能真正全面地代表人体的能量消耗程度,应该用能量比,即关节作功W_i和$W_{i\max}$的比值φ来描述. $W_{i\max}$可通过表1的数据得到,W通过仿真结果得到. 根据φ的定义可知$\varphi\in(0,1)$,当仿真结果$\varphi<1$时皆为合理. 当W_i接近$W_{i\max}$时,φ接近于1,此时表示人体完成既定动作最大消耗能量. 当φ接近于0时,表示人体完成动作较为节省能量. 文中取$\varphi=0.5$,认为当$\varphi<0.5$时各个关节处于最节省能量状态.

5 实例仿真

用以上介绍的模型,来研究一个具体的例子,该计算实例通过对Space Transfer System-63中的一次EVA任务进行简化而得到. 本次任务是航天员在脚部限制情况下搬运大质量载荷,该载荷几何尺寸为1.344 m^3×1.241 m^3×1.309 m^3,质量为1 201.4 kg. 选取该EVA为仿真研究对象[7].

本次EVA中,航天员身着航天服. 根据航天服各部分的质量参数,以及各自的几何形状和尺寸,计算出惯量参数,并将其增加到航天员人体几何模型相应的节段当中. 根据航天服的实际构造,得到其对航天员人体关节运动范围的约束. 假设航天员的下半身是固定的,所以把问题简化为一个包含了4个节段,具有4个自由度、2个冗余度的有根开链系统,各节段之间通过平面转动关节连接. 以航天员踝部关节中心为坐标原点,航天员人体纵轴正向为y轴正方向,矢状轴正向为x轴正方向,所建立的右手坐标系如图1所示. 仿真分为3种情况:①手部的预定运动轨迹为在10 s内匀速的沿逆时针方向完成半径为0.15 m的圆周运动(如图1所示),$\omega=\pi/5$ rad/s,髋关节保持一定的角度不动;②手部的预定运动轨迹为在20 s内匀速的沿逆时针方向完成半径为0.075 m的圆周运动,$\omega=\pi/10$ rad/s,髋关节作稍微的驱伸运动;③手部的预定运动轨迹为在40 s内匀速的沿逆时针方向完成半径为0.075 m的圆周运动,$\omega=\pi/20$ rad/s,髋关节作稍微的前驱运动. 设手部端点的初始位置为(x_0,y_0). 根据以上的分析,可得出手部端点的位置坐标为

$$\left.\begin{aligned}
\theta &= \pi+\omega t\\
x &= x_0+r(1+\cos\theta)\\
y &= y_0+r\sin\theta\\
\dot{x} &= -\omega r\sin\theta\\
\dot{y} &= \omega r\cos\theta\\
\ddot{x} &= -\omega^2 r\cos\theta\\
\ddot{y} &= -\omega^2 r\sin\theta
\end{aligned}\right\} \tag{6}$$

列出系统的反向运动学计算公式:

$$\left.\begin{aligned}
x &= \sum_{i=1}^{4} l_i\cos\left(\sum_{j=1}^{i} q_j\right)\\
y &= \sum_{i=1}^{4} l_i\sin\left(\sum_{j=1}^{i} q_j\right)\\
q_1+q_2+q_3+q_4 &= \pi+\omega t\\
\dot{x} &= -\sum_{i=1}^{4} l_i\sum_{j=1}^{i}\dot{q}_j\sin\left(\sum_{j=1}^{i} q_j\right)\\
\dot{y} &= \sum_{i=1}^{4} l_i\sum_{j=1}^{i}\dot{q}_j\cos\left(\sum_{j=1}^{i} q_j\right)\\
\omega &= \dot{q}_1+\dot{q}_2+\dot{q}_3+\dot{q}_4
\end{aligned}\right\} \tag{7}$$

联立式(6)与式(7),可以解出q_1,q_2,q_3和q_4,进而可得出一阶导数$\dot{\boldsymbol{q}}$以及二阶导数$\ddot{\boldsymbol{q}}$的关系式,求解这些关系式并将结果代入动力学方程式(4)即可求出关节力矩. 由式(5)可将关节力矩转换成关节所作的功,得到3种仿真结果. 仿真1的结果如图2所示,仿真2的结果如图3所示,仿真3

的结果见图 *4*. 从图 2 的数据可知,仿真结果 $\varphi>1$,所以仿真 1 不可取;从图 3 的数据可知,仿真结果 $\varphi<1$,所以仿真 2 结果合理;从图 4 的结果可知仿真 3 中当手部的预定运动轨迹为在 40 s 内匀速的沿逆时针方向完成半径为 0.075 m 的圆周运动,ω 为 $\pi/20$ rad/s,髋关节作稍微的前驱运动时,$\varphi<0.5$,所以仿真 3 是最为节省能量的.

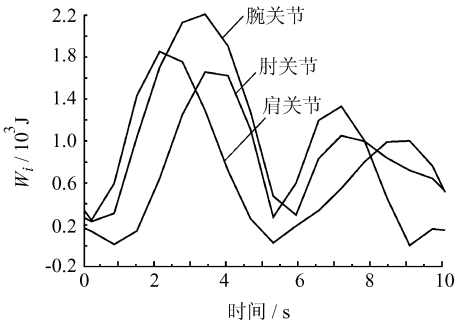


图 2　仿真 1 各关节 W_i 随时间变化曲线

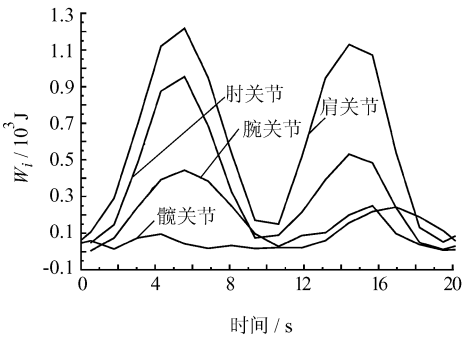


图 3　仿真 2 各关节 W_i 随时间变化曲线

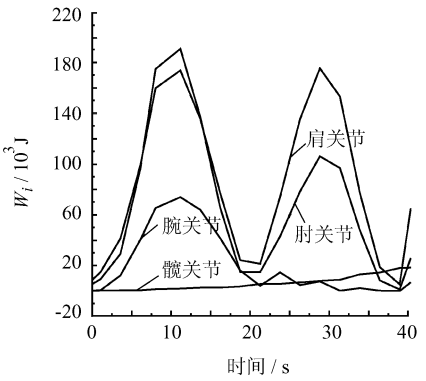


图 4　仿真 3 各关节 W_i 随时间变化曲线

6　结　论

利用多刚体系统动力学中的方法,建立了通用失重人体 4 关节反向运动学与动力学模型,同时从航天医学的角度考虑失重环境对人体的影响,计算时必须对人体的高度、体围、质量、质心位置、肌肉以及人体力量的变化加以修正,从而得到更真实的失重状态下的人体动力学模型. 利用此模型对典型实例进行仿真计算,并利用能量比较法对结果进行了分析得出当手部的运动轨迹半径与运动角速度减小、时间延长、髋关节做前驱运动时航天员工作最为节省能量. 而且利用能量比较法可以方便地了解到人体在任务操作过程中的任一时刻,某关节所作功接近于最大力矩所作功时,这个关节处于不舒服状态,需要及时加以调整. 同时通过能量比较法计算也得到了人体运动时各个关节最为节省能量的作功范围,因此仿真计算方法为航天员舱内外活动仿真以及工效分析提供了充分的理论依据.

参考文献 (**References**)

[1] 蔡自兴. 机器人学[M]. 北京:清华大学出版社, 2000
Cai Zixing. Robotics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000(in Chinese)

[2] 袁士杰, 吕哲琴. 多刚体系统动力学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1992
Yuan Shijie, Lü Zheqin. Multi-body dynamics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1992(in Chinese)

[3] Hanavan E P. A mathematical model of the human body[R]. AD608463, 1964. 1 ~ 79

[4] Pandya A K, Hasson S M, Aldridge A M, *et al*. Correlation and prediction of dynamic human isolated joint strength for an lean body mass[R]. N 92-26682, 1992. 1 ~ 42

[5] 杨　锋,袁修干,李银霞. 航天员舱外活动计算机仿真[J]. 系统仿真学报,2003,15(2):216 ~ 225
Yang Feng, Yuan Xiugan, Li Yinxia. Dynamic simulation of extra vehicular activity[J]. Journal of System Simulation, 2003, 15(2):216 ~ 225(in Chinese)

[6] 贾司光,梁　宏. 航天员舱外活动的工效学问题[J]. 中国航空航天医学杂志,2001,12(4):246 ~ 249
Jia Siguang, Liang Hong. On ergonomics of extra vehicular activity[J]. Chinese Journal of Aerospace Medicine, 2001, 12(4):246 ~ 249(in Chinese)

[7] NewmanD J, Schaffner G. Computational dynamic analysis of extravehicular activity (EVA): large mass handling[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1998, 35(2): 225 ~ 227