

DOI:10.16356/j.1005-2615.2022.01.007

空间机械臂运动控制的地面仿真验证技术

刘茜^{1,2}, 刘传凯^{1,2}, 朱安³, 谢珊珊⁴, 吴杰^{1,2}, 孙军^{1,2},
张楠⁵, 曾晓旭⁵, 张宽¹, 张济韬^{1,2}, 李立春¹

(1.北京航天飞行控制中心,北京 100094; 2.航天飞行动力学技术重点实验室,北京 100094; 3.福州大学机械工程及自动化学院,福州 350108; 4.航天系统部,北京 100080; 5.北京邮电大学现代邮政学院(自动化学院),北京 100876)

摘要:空间机械臂是在轨进行舱外巡检、航天员辅助出舱的关键活动机构,其在轨操作的运动过程需要在地面进行预先规划生成运动控制指令,再通过数字仿真与推演对运动控制指令进行验证,以确保机械臂操作全程的安全性和高效性。针对上述问题,本文主要从运动空间限制、运动速度限制和关节力矩限制等方面设计了地面仿真验证框架,提出了基于运动学与动力学建模、运动空间与碰撞关系分析的仿真验证策略,给出了关节运动、关节力矩和碰撞安全距离的计算方法以及超限检测与风险判断的准则,最后通过对关节超限检测、速度超限检测、力矩超限检测、碰撞检测与风险预估的仿真实验,证明了空间机械臂运动控制的地面仿真验证方法的有效性。

关键词:空间机械臂;地面遥操作;运动控制验证;超限检测;碰撞检测

中图分类号:TP241.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2022)01-0058-10

Ground Simulation and Verification Method for Motion Control of Space Manipulator

LIU Qian^{1,2}, LIU Chuankai^{1,2}, ZHU An³, XIE Shanshan⁴, WU Jie^{1,2}, SUN Jun^{1,2}, ZHANG Nan⁵,
ZENG Xiaoxu⁵, ZHANG Kuan¹, ZHANG Jitao^{1,2}, LI Lichun¹

(1. Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China; 2. Key Laboratory of Science and Technology on Aerospace Flight Dynamics, Beijing 100094, China; 3. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 4. Department of Space Systems, Beijing 100080, China; 5. School of Modern Post (School of Automation), Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: Space manipulator is a key mechanism for on-orbit inspection outside capsule and assisted astronaut extravehicular activities. In order to ensure the safety and efficiency of the whole process of manipulator operation, the motion process of on-orbit operation needs to be planned in advance on the ground to generate motion control commands, and then the motion control commands are verified by digital simulation and deduction. Because of such problems, this paper mainly designs the ground simulation verification framework from the motion space limitation, motion speed limitation and joint torque limitation, proposes a simulation verification strategy based on kinematics and dynamics modeling and analysis of the relationship between motion space and collision, and gives the calculation methods of joint motion, joint torque and contact safety distance, as well as the criteria of over limit detection and risk judgment. Finally, through joint position

基金项目:国家自然科学基金(61972020, 62003025);装备预研国防科技重点实验室基金(19KY1208, 6142210200307);航天装备研究(TJ20191A020030, TJ20191C080221)。

收稿日期:2022-01-04;**修订日期:**2022-01-13

通信作者:刘传凯,男,博士,E-mail:ckliu2005@126.com。

引用格式:刘茜,刘传凯,朱安,等.空间机械臂运动控制的地面仿真验证技术[J].南京航空航天大学学报,2022,54(1):58-67. LIU Qian, LIU Chuankai, ZHU An, et al. Ground simulation and verification method for motion control of space manipulator[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(1):58-67.

overrun detection, velocity overrun detection, torque overrun detection, contact detection and safety distance calculation, the control command of space manipulator is effectively verified by ground simulation experiment.

Key words: space manipulator; ground teleoperation; motion control verification; overrun detection; contact detection

空间机械臂是空间站建造和在轨运营过程中的最主要舱外活动部件,能够通过在地面程序控遥操作的方式实现在轨爬行、舱外巡检、舱段转位和辅助航天员出舱等任务。空间机械臂的操控模式多以地面程序控遥操作为主,该模式下需先在地面预先规划生成机械臂的运动控制指令,验证后再上注到机械臂中央控制器,实现对空间机械臂的运动控制,完成各类复杂操作任务。为了确保空间机械臂在轨操作过程的安全性,地面对各类运动控制指令的推演仿真与验证至关重要。

对机械臂控制的推演仿真与验证,主要包括对验证指标体系的综合设计和基于机械臂运动建模的推演仿真两个部分。通常情况下,前者主要考虑机械臂构型位置、速度、加速度、力矩等因素,后者主要解决机械臂控制量到运动过程的转换,实现对运动序列状态参数的求解,输出中间任意时刻的各项指标量。通过对推演过程中序列状态的分析,判定控制参数的正确性和有效性。

当前,对机械臂控制指令的地面验证主要通过数字和半物理两种方式进行,国内外学者在这些方面做了较多的工作。张大伟等^[1]为保障空间机械臂在轨安全、可靠地执行任务,提出了基于系统仿真、半物理试验和全物理试验相结合的机械臂任务地面验证方法,并以转位任务为例进行了说明,为大型空间机械臂的任务验证提供参考。胡玉茜等^[2]针对空间大型机械臂地面测试验证,提出了基于半物理仿真与物理验证相结合的测试验证系统,解决了单一测试验证不完全的问题。刘茜等^[3]针对空间机械臂在轨任务进行高保真地面仿真和验证的需求,搭建了空间机械臂操作任务验证平台系统,分析了微重力环境下空间机械臂的动力学特性,实现了对真实微重力环境下的空间机械臂在轨操作任务进行高保真的地面试验和验证。Ma等^[4-5]针对卫星对接操作,使用工业机器人开发了硬件在环模拟器,通过半物理对接仿真验证了阻抗控制的有效性。Martin等^[6]为解决国际空间机械臂 Dextre 因接触动态模型不准确而无法仅使用软件模拟器进行任务验证的问题,提出了硬件在环仿真方案。王学谦等^[7]针对空间机器人遥操作任务需求,建立了一套由天地通信模拟模块、空间机器人动力学模块、物理验证模块

及星载验证模块组成的遥操作地面验证子系统,通过地面实验模拟验证了通信延时条件下的遥操作过程。

为了实现操作过程的推演仿真验证,需要根据指标计算需求从运动学、动力学方面构建机械臂动作过程的高精度推演模型,以确保验证的有效性。考虑到空间机械臂为冗余度机械臂,运动控制模式包括关节空间控制和笛卡尔空间控制,在仿真验证中需要分别建模求解,针对笛卡尔空间运动控制的仿真推演需要构建冗余度机械臂的逆运动学模型,通过引入约束或者固定某个不变量,逆向计算关节空间的运动状态。常用的方法有关节参数化逆解法^[8]、臂形角逆解法^[9]、零空间约束的速度逆解法^[10]等。其次需要根据空间机械臂动力学模型计算空间机械臂在不同负载条件下操作的关节力矩承受情况,以确保每个关节留有充足的运动力学余量,避免关节受到损害。考虑到空间微重力环境特性和机械臂关节的结构,需要在机械臂刚性动力学建模的基础上,结合机械臂运动速度考虑关节柔性,以增加仿真推演的真实性。通常采用欧拉-凯恩动力学建模^[11]或者 Lagrange 动力学建模方法^[12],根据每个时刻机械臂的关节构型、角速度、角加速度等运动状态,计算输出机械臂关节力矩,验证关节的力矩超限情况。再次,引入有向包围盒 (Oriented bounding box, OBB)^[13]、矩形扫掠 (Rectangle swept sphere, RSS)^[14-15]等碰撞分析模型,计算每个运动状态的安全性和碰撞安全距离,以预估运行过程中机械臂的碰撞风险。

本文主要针对机械臂在轨安全控制要求以及机械臂运动控制指令的地面验证需求,提出了一种基于多指标综合验证框架的数字仿真验证方法,设计了包含关节构型、速度、力矩和碰撞关系的关键性指标及其仿真推演计算模型。对于各类指标的计算,本文设计了基于定界计算与余量估计的安全评估策略,主要包括:(1)针对力矩超限问题,通过动力学计算和误差定界模型,实现对力矩阈值上限的计算;(2)对于碰撞检测问题,不但能够检测碰撞关系,而且能够快速计算每个状态的最小安全距离和预警可能发生碰撞风险的部件。最后,通过实验验证各项指标的符合性以及机械臂安全性验证的有效性。

1 空间机械臂运动控制验证框架设计

空间机械臂在轨进行爬行、舱外巡检、舱段转位和辅助航天员出舱等任务,操作过程的安全性至关重要。地面操作系统预先规划生成机械臂操作的运动控制指令,通过仿真推演验证控制指令的有效性和操作过程的安全性。本节主要针对机械臂多种运动控制模式的验证要求,考虑影响七自由度冗余机械臂在轨安全性的各类因素,设计机械臂运动控制的仿真验证框架,为机械臂在轨安全操作提供支持。

空间机械臂运动控制模式主要包括单关节控制、多关节联合控制和笛卡尔直线控制多种运动控制模式,运动控制过程中需要保证机械臂关节位置、速度、加速度和力矩满足限定要求,同时机械臂运动过程中的各个构型状态不与舱段和各类部件发生碰撞。对机械臂运动控制的验证主要包括关节位置、速度、加速度、力矩和机械臂与舱段、部件的碰撞关系等两个主要方面。针对多种控制模式的运动控制验证框架如图1所示,其中单关节控制模式的验证完全可以通过多关节联合控制模式的验证加以实现。

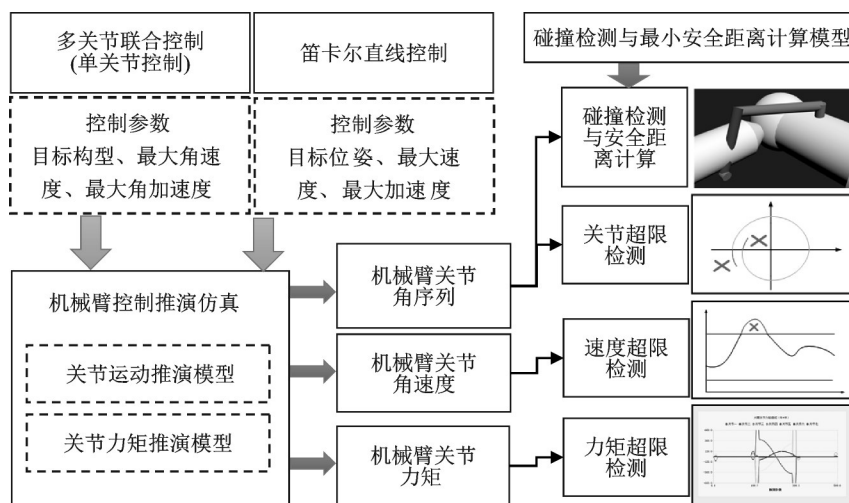


图1 机械臂多种运动控制模式的验证框架

Fig.1 Verification structure of multiple motion control modes for manipulator

由图1可知,多关节联动控制模式下,主要根据机械臂目标构型、最大角速度和最大角加速度进行各个关节的运动轨迹计算;笛卡尔直线控制模式下,主要根据机械臂目标位置、最大速度、最大加速度,通过运动学逆解算法进行各个关节的运动轨迹计算。再根据关节运动轨迹和机械臂构型状态计算每个时刻的机械臂构型状态、关节角速度和关节力矩等物理量,判定各物理量的超限情况;同时根据构型状态计算机械臂与各舱段、部件的碰撞关系和最小安全距离,判定可能存在的风险点。

根据上述框架,本文在第2节对机械臂的运动过程进行运动学和动力学建模,建立机械臂碰撞检测与安全距离计算模型,根据模型推演仿真机械臂的运动过程,验证机械臂控制指令的正确性和安全性。

2 空间冗余机械臂控制推演仿真模型

2.1 关节运动推演模型

空间机械臂的多关节联动控制与笛卡尔直线

控制模式中,给定初始关节构型和目标状态、运动时间或最大速度和最大加速度,推演计算机械臂关节运动角度、速度和加速度序列,从而得到全过程运动轨迹。多关节联动控制模式下,给定的目标状态是目标关节构型;笛卡尔直线控制模式下,给定的目标状态是末端位姿。前者直接采用关节空间梯形速度插值方法进行轨迹计算;后者先进行插值计算,再结合零空间约束速度逆解到关节空间中^[16]。

2.1.1 多关节联动控制模式下的关节运动推演

冗余机械臂关节空间的运动推演是求解机械臂从一组初始的关节角到达一组期望关节角的关节状态序列,7个关节同时运动,每个关节运动相对独立,没有关节间相互关系的约束。根据初始关节角度和期望关节角度,对每个关节运动采用梯形速度插值函数独立插值,将关节运动分为加速、匀速和减速3个阶段进行描述^[17-19],设总时间为 t_t ,加速和减速部分时间分别为 t_{sa} 和 t_{sd} ,第 i 个关节角的初始关节角度为 θ_{iint} ,终止关节角度为 θ_{iend} ,则该关

节角的最大运行速度 $\dot{\theta}_{im}$ 、加速段加速度 $\ddot{\theta}_{ia}$ 、减速段加速度 $\ddot{\theta}_{id}$ 为

$$\dot{\theta}_{im} = \frac{\theta_{iend} - \theta_{iint}}{t_f - (t_{sa} + t_{sd})/2}, \ddot{\theta}_{ia} = \frac{\dot{\theta}_{im}}{t_{sa}}, \ddot{\theta}_{id} = -\frac{\dot{\theta}_{im}}{t_{sd}} \quad (1)$$

则各关节角在 t 时刻的关节角速度为

$$\dot{\theta}_i = \begin{cases} \ddot{\theta}_{ia} t & t \leq t_{sa} \\ \dot{\theta}_{im} & t_{sa} < t \leq t_f - t_{sd} \\ \ddot{\theta}_{id} (t - t_f) & t > t_f - t_{sd} \end{cases} \quad (2)$$

根据关节角速度对关节速度进行积分,得出关节角度增量,再积分得到每一步关节角。

2.1.2 笛卡尔直线控制模式下的关节运动推演

冗余机械臂笛卡尔空间的运动推演是求解机械臂从给定的初始关节构型到达期望的终止位姿的关节状态序列,求解主要分为两个部分:末端位姿序列及对应动态物理量的计算、关节状态序列的计算,而前者又要对末端位置与速度、姿态与角速度进行分别计算。

设机械臂末端的位置为 $P_e = [x, y, z]^T$, 姿态为 $\psi_e = [\alpha, \beta, \gamma]^T$, 末端按如下轨迹变化

$$P_e = P_e(t), \quad \psi_e = \psi_e(t) \quad t_0 \leq t \leq t_f \quad (3)$$

通过式(3)可计算出首末端直线距离长度

$$d = \sqrt{\sum_{i=x,y,z} (P_{e,i}(t_0) - P_{e,i}(t_f))^2} \quad (4)$$

对末端角速度进行规划,机械臂初始以及终止时刻末端的旋转矩阵为

$$\begin{cases} A_{e0} = R_z(\alpha_{e0}) R_y(\beta_{e0}) R_x(\gamma_{e0}) = [\gamma_{e0}] \\ A_{ef} = R_z(\alpha_{ef}) R_y(\beta_{ef}) R_x(\gamma_{ef}) = [n_i, o_i, a_i] \end{cases} \quad (5)$$

则末端指向偏差为

$$e = \frac{1}{2} (n_0 \times n_f + o_0 \times o_f + a_0 \times a_f) = r \sin \phi \quad (6)$$

式中: r 为等效转轴; ϕ 为等效转角偏差。当 $|e| = 0$ 时则没有偏差,有 $r = 0_{3 \times 1}$ 和 $\phi = 0$;当 $|e| \neq 0$ 时,有 $r = e/|e|$ 和 $\phi = \arcsin(|e|)$,且对于偏差角度 ϕ 取 0° 到 90° 之间的值。

按梯形插值法计算其运行路径,设总时间为 t_f ,加速段和减速段时间分别为 t_{sa} 和 t_{sd} ,则末端最大线速度 v_{em} 与转角速度 ω_{em} 大小为

$$v_{em} = \frac{d}{t_f - (t_{sa} + t_{sd})/2}, \quad \omega_{em} = \frac{\phi}{t_f - (t_{sa} + t_{sd})/2} \quad (7)$$

同时可以计算出末端的线加速度 a 及转角加速度 α 大小为

$$a_{ea} = \frac{v_{em}}{t_{sa}}, a_{ed} = -\frac{v_{em}}{t_{sd}}, \alpha_{ea} = \frac{\omega_{em}}{t_{sa}}, \alpha_{ed} = -\frac{\omega_{em}}{t_{sd}} \quad (8)$$

在求解加速度的基础上可以计算末端线速度与转角速度,表达为

$$v_e = \begin{cases} a_{ea} t & t \leq t_{sa} \\ v_{em} & t_{sa} < t \leq t_f - t_{sd} \\ a_{ed} (t - t_f) & t > t_f - t_{sd} \end{cases} \quad (9)$$

$$\omega_e = \begin{cases} \alpha_{ea} t & t \leq t_{sa} \\ \omega_{em} & t_{sa} < t \leq t_f - t_{sd} \\ \alpha_{ed} (t - t_f) & t > t_f - t_{sd} \end{cases}$$

根据末端运动速度,用逆运动学方法求出关节角速度,机械臂的期望关节角速度 \dot{q}_θ 可通过雅可比矩阵的广义逆运算求得。进一步采用最小二范数法对机械臂的运动进行约束,即满足关节运动量最小的情况下使机械臂达到目标位姿^[20],可以求得唯一的 $\dot{q}_{\theta min}$ 。

$$\dot{q}_\theta = (J^*)^+ \begin{bmatrix} v_e \\ \omega_e \end{bmatrix} \Rightarrow \dot{q}_{\theta min} = \dot{\theta}_p - \left(\dot{\theta}_p^T \cdot \frac{\dot{\theta}_k}{\sqrt{\dot{\theta}_k^T \dot{q}_\theta}} \right) \frac{\dot{\theta}_k}{\sqrt{\dot{\theta}_k^T \dot{q}_\theta}} \quad (10)$$

式中: $\dot{\theta}_p$ 表示任意一组特解; $\dot{\theta}_k \in R^7$ 为齐次解; $\dot{\theta}_k / \sqrt{\dot{\theta}_k^T \dot{q}_\theta}$ 表示齐次解方向的单位方向向量。根据关节角速度 $\dot{q}_{\theta min}$ 对关节速度进行积分,得出关节角度增量,再积分得到每一步关节角,即可实现末端到达目标位姿的最小的关节行程求解。

2.2 关节力矩推演模型

根据2.1节的关节运动推演获得多关节联动和笛卡尔直线两种控制模式的机械臂关节构型、角速度和角加速度等运动状态信息。为了进一步验证关节力矩是否超限和运动过程的安全性,需根据机械臂各个时刻的运动状态(加速度、速度和角度等),通过逆向动力学求解得到机械臂的驱动力矩。

由于空间机械臂关节处装有谐波减速器、编码器等,导致其关节带有一定的柔性,关节柔性引起的柔性振动会导致任务精度的降低。本节在刚性运动的基础上考虑关节柔性对机械臂关节力矩的影响。

空间机械臂第 i 杆线速度及角速度为

$$\begin{cases} v_i = v_0 + \omega_0 \times r_{0i} + \sum_{k=1}^i [a_k \times (r_i - b_k)] \dot{\theta}_k \\ \omega_i = \omega_0 + \sum_{k=1}^i a_k \dot{\theta}_k \end{cases} \quad (11)$$

$$i = 1, 2, \dots, 7$$

式中: v_0, ω_0 为基座质心的线速度、角速度向量; $r_{0i} = r_i - r_0, r_i$ 为机械臂第 i 杆质心的位置向量, r_0 为基座质心的位置向量; a_i 为第 i 个关节旋转轴的单位向量, b_i 为第 i 个关节中心的位置向量。

通过式(11)可得机械臂系统的动能表达式为

$$\begin{aligned}
T_r = & \sum_{j=1}^7 \left(\frac{1}{2} I_{mj} \omega_{mj}^2 \right) + \sum_{i=0}^7 \left(\frac{1}{2} \omega_i^T I_i \omega_i + \frac{1}{2} m_i v_i^T v_i \right) = \\
& \sum_{j=1}^7 \left(\frac{1}{2} I_{mj} \omega_{mj}^2 \right) + \frac{1}{2} \sum_{i=0}^7 \left((\omega_0 + J_{Ai} \dot{q}_\theta)^T I_i (\omega_0 + J_{Ai} \dot{q}_\theta) + \right. \\
& \left. m_i \left([E_3 \quad r_{0i}^\times] \begin{bmatrix} v_0 \\ \omega_0 \end{bmatrix} + J_{Li} \dot{q}_\theta \right)^T \left([E_3 \quad r_{0i}^\times] \begin{bmatrix} v_0 \\ \omega_0 \end{bmatrix} + J_{Li} \dot{q}_\theta \right) \right) = \\
& \sum_{j=1}^7 \left(\frac{1}{2} I_{mj} \omega_{mj}^2 \right) + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_0^T & \dot{q}_\theta^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{r11} & M_{r12} \\ M_{r21} & M_{r22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_0 \\ \dot{q}_\theta \end{bmatrix}
\end{aligned} \quad (12)$$

式中: $\omega_{mj} = \dot{\theta}_{mj}$ ($j=1, 2, \dots, 7$) 为第 j 个电机转子转角速度; m_0, I_0 为基座的质量、转动惯量; m_i, I_i ($i=1, 2, \dots, 7$) 为机械臂的质量与转动惯量; I_{mi} ($i=1, 2, \dots, 7$) 为第 i 个电机转子的转动惯量; J_{Li} ($i=1, 2, \dots, 7$) 为机械臂的线速度雅克比矩阵; J_{Ai} ($i=1, 2, \dots, 7$) 为机械臂的角速度雅克比矩阵; $\dot{\varphi}_0 = [v_0^T, \omega_0^T]^T$; $\dot{q}_\theta = [\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dots, \dot{\theta}_7]^T$; $M_{r11}, M_{r12}, M_{r21}, M_{r22}$ 为包含系统参数的矩阵; r_{0i} ($i=1, 2, \dots, 7$) 为惯性系下基座到机械臂质心的位置矢量。对于任意向量 $r = [x, y, z]^T$, r^\times 表示叉乘算子, 具体定义如下

$$r^\times = \begin{bmatrix} 0 & -z & y \\ z & 0 & -x \\ -y & x & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

基于 Spong^[21] 的理论, 将柔性关节等效为弹簧。因此, 若忽略太空的微重力影响, 空间机器人系统的势能来源于等效弹簧, 故其势能表达式为

$$U_r = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^7 [k_{si} (\theta_{mi} - \theta_i)^2] \quad (14)$$

式中 k_{si} 为等效的弹簧刚度系数。

若取广义坐标为 $q = [\psi_0^T, q_\theta^T, q_m^T]^T$, 其中 $\psi_0 = [x_0, y_0, z_0, \alpha_0, \beta_0, \gamma_0]^T$ 表示基座位姿; $q_m = [\theta_{m1}, \theta_{m2}, \dots, \theta_{m7}]^T$ 表示电机转角, 采用 Lagrange 函数法进行动力学建模

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_r}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L_r}{\partial q} = Q \quad (15)$$

式中: $L_r = T_r - U_r$ 为 Lagrange 乘子; $Q = [\tau_B^T, \tau_\theta^T, \tau_m^T]^T$ 为系统广义力, τ_B 为基座受力/力矩列向量, $\tau_\theta = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_7]^T$ 为关节输入力矩列向量, $\tau_m = [\tau_{m1}, \tau_{m2}, \dots, \tau_{m7}]^T$ 为电机输出力矩列向量。

结合式(12~15)可得柔性关节空间机械臂系统动力学方程, 详细的推导过程参见文献[22], 这里给出推导结果为

$$\begin{cases} M_r(q_r) \ddot{q}_r + H_r(q, \dot{q}_r) \dot{q}_r = \tau_r \\ I_m \ddot{q}_m + \tau_\theta = \tau_m \\ K_s(q_m - q_\theta) = \tau_\theta \end{cases} \quad (16)$$

式中: $M_r(q_r)$ 为空间机器人系统对称、正定的惯量矩阵; $H_r(q, \dot{q}_r)$ 为包含科氏力、离心力的列向量; $\dot{q}_r = [v_0, \omega_0, \dot{q}_\theta^T]^T$ 为速度列向量; $\tau_r = [\tau_B^T, \tau_\theta^T]^T$ 为力矩向量; $I_m = \text{diag}(I_{m1}, I_{m2}, \dots, I_{m7})$ 为电机转子转动惯量矩阵; $K_s = \text{diag}(k_{s1}, k_{s2}, \dots, k_{s7})$ 为等效弹簧的刚度矩阵。

通过数值仿真时序推演的方式求解上述动力学方程, 根据空间机械臂运动过程进行关节力矩的推演。

2.3 碰撞检测与最小安全距离计算模型

碰撞检测与最小安全距离计算主要实现机械臂运动仿真推演过程中检测自身的碰撞、计算机械臂与舱段、部件的最小安全距离, 在检测到即将发生碰撞时运动停止, 发现安全距离小于一定阈值时提出警示。

为了获取其表面具体的拓扑参数以便进行下一步碰撞检测, 先将三维模型转化为 OBJ 格式, 实现将模型复杂曲面分割、离散化为一系列三角形面片的集合。基于 RSS 和 OBB 相结合的混合层次包围盒的快速精确碰撞检测算法, 充分利用 RSS 之间距离计算的快速性和 OBB 较好紧密性的特点, 提高了虚拟场景中碰撞检测的速度和精确度。

应用 OBB 算法首先建立包围盒, 计算模型在 3 个方向轴上的投影中点, 以此点为起点, 沿各坐标轴的正负方向引出 8 条射线, 将模型分为 8 个区域, 求出各个区域内沿各个坐标轴的最大点和最小点, 再求各个区域 6 个点在 3 个方向轴上的投影中点, 依次递归下去 (递归深度为 n), 递归结束, 模型被划分为 2^{3n} 个区域, 将区域内求得的最值点记录下来, 利用这些最值点建立 OBB 包围盒。

OBB 是包含该对象相对于坐标轴方向的任意最小立方体, 根据被包围对象的形状特点尽可能紧密地包围对象, 可以表征任意方向几何体, 其关键问题在于寻找最佳方向, 并确定在该方向上包围盒的最小尺寸。用上述得到的顶点子集, 通过一阶矩和二阶矩进行统计, 分别求得均值 μ 和协方差矩阵 C 。设第 i 个三角形的顶点矢量为 p^i, q^i, r^i , 则有

$$\mu = \frac{1}{3n} \sum_{i=0}^n (p^i + q^i + r^i) \quad (17)$$

$$C_{jk} = \frac{1}{3n} \sum_{i=0}^n (\bar{p}_j^i \bar{p}_k^i + \bar{q}_j^i \bar{q}_k^i + \bar{r}_j^i \bar{r}_k^i) \quad (18)$$

式中: n 为三角形个数; C_{jk} 为矩阵第 j 行第 k 列元素, $1 \leq j, k \leq 3$ 。计算协方差矩阵的特征值 λ_i 和特征向量 v_i , 以 v_i 的归一化向量轴向, 找到轴向的极值顶点, 根据这些顶点来确定 OBB 的大小。

RSS 将 OBB3 个轴中最短的轴作为矩形的法向量,另外的两个向量用于固定矩形的方向,并作为矩形的长和宽。以 OBB 的中心位置作为 RSS 的中心,最短轴的长度的一半作为 RSS 的半径,在立方体包围盒边界处进行圆化形成一个圆角盒子,新的包围盒可用矩形、中心点和半径来表示。计算碰撞安全距离时首先将矩形形状作为包围盒量计算立方体之间的距离,然后考虑包围盒边界的圆化影响,增加对应的偏移量,即得两包围盒之间的距离。假设 A 和 B 为需要两个对象的包围盒集,则最短距离计算为

$$d(A, B) = \min \{ \|x - y\| : x \in A, y \in B \} \quad (19)$$

3 空间机械臂运动控制验证实验

3.1 关节运动推演验证

3.1.1 关节角度超限检测

以多关节联动控制模式和笛卡尔直线控制模式的验证为例。设定关节超限检测的限值为 $\pm 260^\circ$,则 3 组运动过程的关节超限检测结果分别如图 2~4 所示。检测结果表明,各组运动的关节角度均满足关节超限检测限值的约束,运动过程没有发生关节超限且运动角度可控。

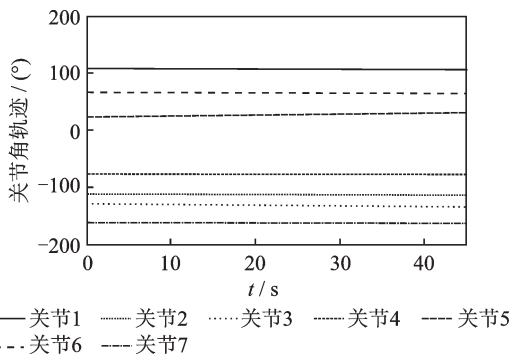


图 2 运动过程 1:笛卡尔直线规划模式下关节超限检测
Fig.2 Motion process 1—Joint position overrun detection in Cartesian linear planning mode

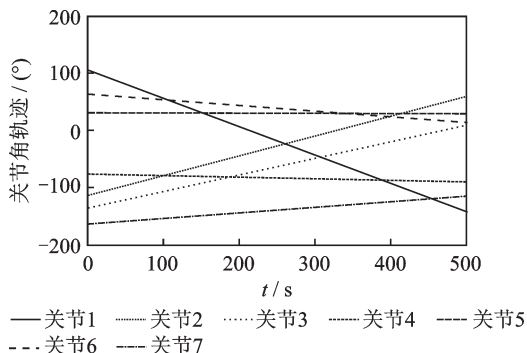


图 3 运动过程 2:多关节联动模式下关节超限检测
Fig.3 Motion process 2—Joint position overrun detection in multi-joint linkage mode

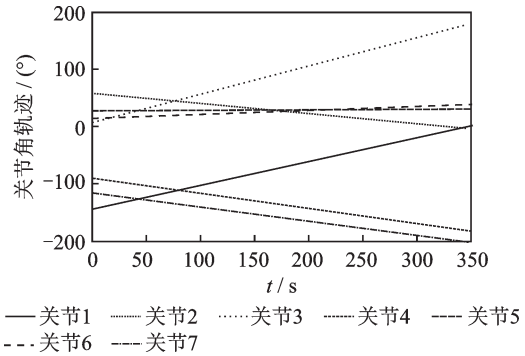


图 4 运动过程 3:多关节联动模式下关节超限检测
Fig.4 Motion process 3—Joint position overrun detection in multi-joint linkage mode

3.1.2 关节速度超限检测

设定关节速度超限检测的限值为 $\pm 1^\circ/s$,则 3 组运动过程的关节速度超限检测结果分别如图 5~7 所示

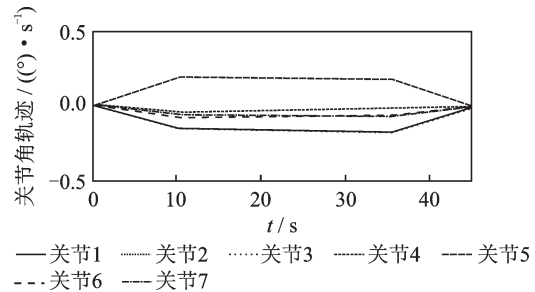


图 5 运动过程 1:笛卡尔直线规划模式下速度超限检测
Fig.5 Motion process 1—Joint velocity overrun detection in Cartesian linear planning mode

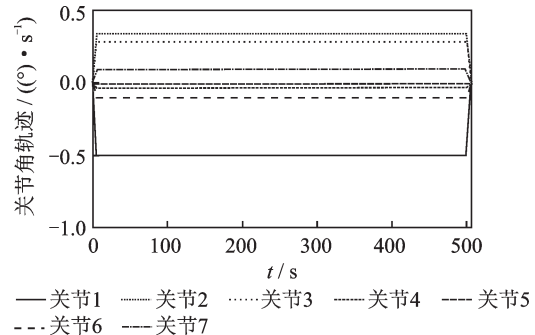


图 6 运动过程 2:多关节联动模式下速度超限检测
Fig.6 Motion process 2—Joint velocity overrun detection in multi-joint linkage mode

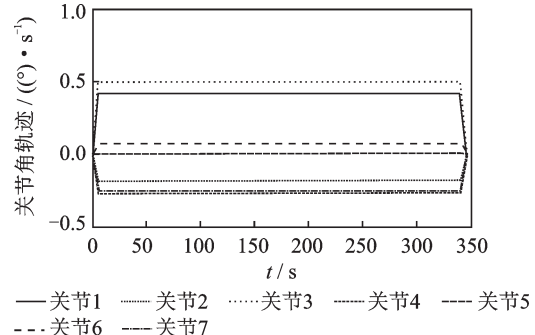


图 7 运动过程 3:多关节联动模式下速度超限检测
Fig.7 Motion process 3—Joint velocity overrun detection in multi-joint linkage mode

示。检测结果表明,各组运动的关节速度均满足关节速度超限检测限值的约束,运动过程没有发生关节速度超限且运动速度可控。

3.1.3 实验数据验证

通过关节运动推演得到的关节角度序列与实验数据比对的方法,对笛卡尔直线规划和多关节联动模式下的关节运动推演模型的准确性进行验证。比对结果分别如图8和图9所示。

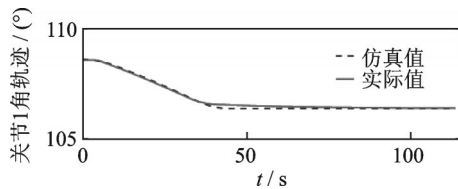


图8 运动过程1:笛卡尔直线规划模式下关节1角序列与实验数据对比

Fig.8 Motion process 1—Comparison between joint 1 position and measured data in Cartesian linear planning mode

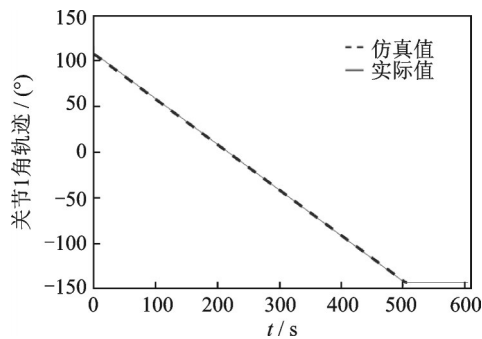


图9 运动过程2:关节联动模式下关节1角序列实验数据对比

Fig.9 Motion process 2—Comparison between joint 1 position and measured data in multi-joint linkage mode

综上,运动推演得到的关节角度序列与实验数据一致,表明空间机械臂运动推演模型的准确性。

3.2 关节力矩推演验证

3.2.1 力矩超限检测

关节力矩推演模型中仅考虑了空间机械臂的基本动力学模型及部分关节柔性因素,忽略了非线性柔性环节及其他复杂动力学因素带来的难以定量描述的部分,使得推演得到的关节力矩一定程度上体现了空间机械臂在轨运动状态,但不够准确。因此,本文采取在关节力矩推演的定量计算基础上考虑余量估计的安全评估策略,基于定界计算与余量估计的空间机械臂关节力矩推演及力矩超限检测。

对比考虑阈值的关节力矩下限值与力矩检测

下限值,运动过程的关节力矩最小值均大于力矩检测最小值;同时,对比考虑阈值的关节力矩上限值与力矩检测上限值,运动过程的关节力矩最大值均小于力矩检测最大值。以此证明力矩超限检测结果均为未超限,驱动空间机械臂执行运动过程所需关节力矩在关节力矩允许的范围。

3.2.2 实验数据验证

关节力矩推演得到的关节力矩与实验力矩数据比对结果如图10所示。由于空间机械臂动力学分析非常复杂,需要考虑非线性柔性环节以及各种扰动影响,现阶段搭建的关节力矩推演模型能够复现实测力矩数据的主要趋势,进一步引入的力矩阈值能起到对复杂动力学因素进行余量估计,证明了通过关节力矩推演验证空间机械臂关节力矩超限的有效性。

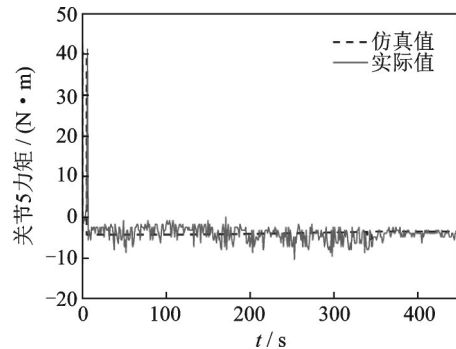


图10 运动过程3的关节5力矩比对结果

Fig.10 The fifth joint torque comparison of the third motion

3.3 碰撞检测与最小安全距离计算验证

为保证碰撞检测的有效性与最小安全距离计算结果的准确性,建立了以高保真空间机械臂三维模型为基础的碰撞检测模型。根据是否存在相对运动关系,空间机械臂模型拆分为独立的部件。其中舱段的部件包括舱体和两个太阳翼;机械臂的部件包括各个关节、臂杆和首末两个末端执行器。各个部件分别进行模型预处理并形成基于三角面片的碰撞检测模型,如图11所示。

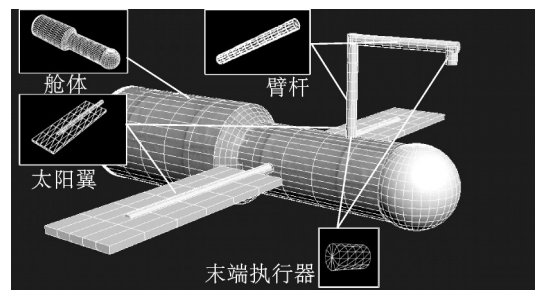


图11 空间机械臂碰撞模型示意图

Fig.11 Contact models of space manipulator

本文设计了3个运动过程对碰撞检测与最小

安全距离计算有效性开展验证分析,其中第一个运动过程开展机械臂与太阳翼间的碰撞检测与最小安全距离计算;第二个和第三个运动过程开展机械臂与舱体间的碰撞检测与最小安全距离计算。

对第一个运动过程开展机械臂与太阳翼间的碰撞检测与最小安全距离计算结果如图 12 和 13 所示。太阳翼角度为 -90° 时机械臂运动过程中与太阳翼的最小安全距离曲线如图 12 所示,在 60 s 时机械臂与太阳翼发生碰撞。调整太阳翼姿态太阳翼角度为 -45° ,最小安全距离曲线如图 13 所示。机械臂从初始位姿运动至目标位姿,与太阳翼之间没有发生碰撞。

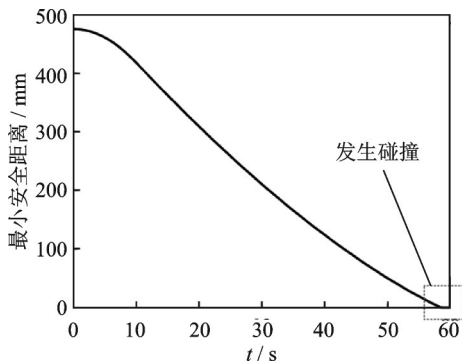


图 12 太阳翼 -90° 时运动过程 1 的碰撞检测及最小安全距离计算

Fig.12 Contact detection and minimum safe distance calculation of the first motion when solar angle is -90°

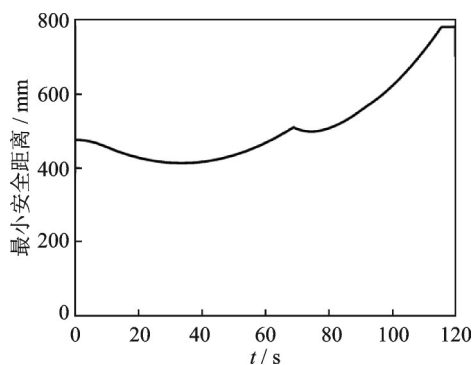


图 13 太阳翼 -45° 时运动过程 1 的碰撞检测及最小安全距离计算

Fig.13 Contact detection and minimum safe distance calculation of the first motion when solar angle is -45°

对第二个和第三个运动过程开展机械臂与舱体间的碰撞检测与最小安全距离计算结果分别如图 14 和 15 所示。第二个运动过程中,机械臂在 105 s 时与舱体发生碰撞。运动过程中的机械臂与舱体的最小安全距离曲线如图 14 所示。对机械臂目标位姿重新规划,调整目标构型进行第三次运动,机械臂从初始位姿运动至目标位姿均未与舱体

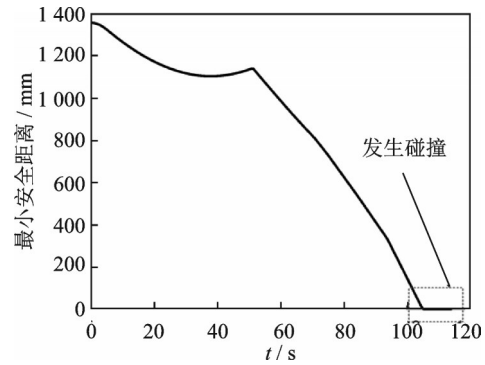


图 14 运动过程 2 的碰撞检测及最小安全距离计算

Fig.14 Contact detection and minimum safe distance calculation of the second motion

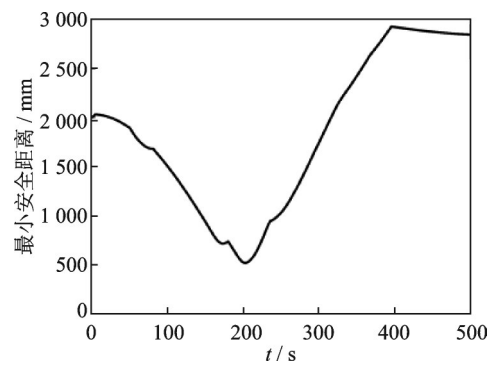


图 15 运动过程 3 的碰撞检测及最小安全距离计算

Fig.15 Contact detection and minimum safe distance calculation of the third motion

发生碰撞,运动过程中的机械臂与舱体的最小安全距离曲线如图 15 所示。

综上,通过碰撞检测和最小安全距离计算降低了空间机械臂运动过程与太阳翼及舱体的碰撞风险,有效保障了空间机械臂在轨安全运行。

4 结 论

本文围绕空间机械臂运动控制的地面仿真验证问题,提出了空间机械臂运动控制验证的架构和设计理念。首先,从运动学层面对机械臂的动作过程进行推演,通过梯形速度插值法对机械臂关节空间和笛卡尔空间的运动状态序列进行计算,推导了机械臂末端操作空间到关节空间的映射关系,建立了运动控制指令到运动状态序列的映射。其次,基于 Lagrange 法构建考虑关节柔性的机械臂动力学模型,实现了柔性关节机械臂的关节力矩推演计算。再次,基于 OBB 和 RSS 实现机械臂与舱段、部件的最小安全距离计算。最后,通过对关节超限检测、速度超限检测、力矩超限检测、碰撞检测与最小安全距离计算,有效地对空间机械臂程序控制进行了地面仿真验证。

参考文献:

- [1] 张大伟, 马欧, 李大明. 空间机械臂任务地面验证方法研究[C]//2015空间机构技术学术研讨会. 北京: [s.n.], 2015: 168-172.
ZHANG Dawei, MA Ou, LI Daming. Research on mission ground verification method of space manipulator[C]//Proceedings of 2015 Space Agency Technology Symposium. Beijing: [s.n.], 2015: 168-172.
- [2] 胡玉茜, 刘宾, 吴志红, 等. 空间大型机械臂地面测试验证方案设计与实现[J]. 航天器工程, 2021, 30(4): 151-158.
HU Yuqian, LIU Bin, WU Zhihong, et al. Design and implementation of ground testing and verification scheme for large space manipulator[J]. Spacecraft Engineering, 2021, 30(4): 151-158.
- [3] 刘茜, 肖轩, 程靖, 等. 面向空间机械臂任务验证的硬件在环半物理仿真系统研究[J]. 载人航天, 2019, 25(2): 227-235.
LIU Qian, XIAO Xuan, CHENG Jing, et al. Study on hardware-in-the-loop simulation facility for task verification of space manipulator[J]. Manned Spaceflight, 2019, 25(2): 227-235.
- [4] MA O, WANG J, MISRA S, et al. On the validation of SPDM task verification facility[J]. Journal of Robotic Systems, 2004, 21(5): 219-235.
- [5] MA O, ABAD A F, BOGE T. Use of industrial robots for hardware-in-the-loop simulation of satellite rendezvous and docking[J]. Acta Astronautica, 2012, 81(1): 335-347.
- [6] MARTIN É, DOYON M, GONTHIER Y, et al. Validation process of the STVF hardware-in-the-loop simulation facility[C]//Proceedings of the 8th International Symposium on Artificial Intelligence and Robotics & Automation in Space: i-SAIRAS. [S.l.]: [s.n.], 2005: 5-8.
- [7] 王学谦, 梁斌, 徐文福, 等. 空间机器人遥操作地面验证技术研究[J]. 机器人, 2009, 31(1): 8-14, 19.
WANG Xueqian, LIANG Bin, XU Wenfu, et al. Ground-based verification technology for teleoperation of space robot[J]. Robot, 2009, 31(1): 8-14, 19.
- [8] HUO X, LIU Y, LI J, et al. Inverse kinematic optimizations of 7R humanoid arms based on a joint parameterization[C]//Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). Tianjin, China: IEEE, 2014: 113-118.
- [9] 任子武, 朱秋国, 熊蓉. 冗余仿人臂避关节物理约束的一种逆运动学问题求解方法[J]. 机械工程学报, 2014, 50(19): 58-65.
REN Ziwu, ZHU Qiuguo, XIONG Rong. A joint physical constraints avoidance method for inverse kinematics problem of redundant humanoid manipulator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(19): 58-65.
- [10] 刘颖, 马建敏. 约束多体系统动力学分析的改进的离散零空间算法[J]. 计算力学学报, 2013, 30(4): 496-501.
LIU Ying, MA Jianmin. Improved discrete null space method for dynamics analysis constrained multibody systems[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2013, 30(4): 496-501.
- [11] BENATI M, MORRO A. Dynamical equations of constrained robotic devices[J]. Meccanica, 1988, 23(4): 243-249.
- [12] MAHIL S S. On the application of Lagrange's method to the description of dynamic systems[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics, 1982, 12(6): 877-889.
- [13] FARES C, HAMAM Y. Collision detection for rigid bodies: A state of the art review[C]//Proceedings of International Conference Graphicon 2005. Novosibirsk Akademgorodok, Russia: [s.n.], 2005.
- [14] LARSEN E, GOTTSCHALK S, LIN M C, et al. Fast proximity queries with swept sphere volumes: Technical Report TR99-018[R]. [S.l.]: Department of Computer Science, University of North Carolina, 1999.
- [15] 顾耀林, 李俊, 赵争鸣. 基于扫掠球量的快速距离计算[J]. 工程图学学报, 2007, 28(6): 102-106.
GU Yaolin, LI Jun, ZHAO Zhengming. Fast distance computation based on swept sphere volumes[J]. Journal of Engineering Graphics, 2007, 28(6): 102-106.
- [16] WAN J, WU H T, MA R, et al. A study on avoiding joint limits for inverse kinematics of redundant manipulators using improved clamping weighted least-norm method[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2018, 32(3): 1367-1378.
- [17] 郑金兴, 张铭钧. 梯形速度控制变插补周期的实时插

- 补算法研究[J]. 机床与液压, 2007, 35(1): 77-80, 133.
- ZHENG Jinxing, ZHANG Mingjun. Study of real-time interpolation algorithm with varying interpolation period based on trapezoidal velocity profile [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2007, 35 (1) : 77-80, 133.
- [18] 何波, 罗磊, 胡俊, 等. 高速数控加工轨迹拐角的速度平滑方法[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(1): 83-86.
- HE Bo, LUO Lei, HU Jun, et al. Smoothing algorithm for high speed machining at corner[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008, 42(1): 83-86.
- [19] HADDAD M, KHALIL W, LEHTIHET H E. Trajectory planning of unicycle mobile robots with a trapezoidal-velocity constraint[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2010, 26(5): 954-962.
- [20] 阳方平, 李洪谊, 王越超, 等. 一种求解冗余机械臂逆运动学的优化方法[J]. 机器人, 2012, 34(1): 17-21.
- YANG Fangping, LI Hongyi, WANG Yuechao, et al. An optimization method for solving the inverse kinematics of redundant manipulator[J]. Robot, 2012, 34(1): 17-21.
- [21] SPONG M W. Modeling and control of elastic joint robots[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1987, 109(4): 310-319.
- [22] SILVER W M. On the equivalence of Lagrangian and Newton-Euler dynamics for manipulators[J]. The International Journal of Robotics Research, 1982, 1 (2): 60-70.

(编辑: 胥橙庭)