

基于动力学研究的 5 自由度机械手杆长优化设计^①

李 鹏^{②**} 赵新华^{* **} 杨玉维^{* **} 黄伟明^{**} 葛为民^{* **} 李 彬^{* **}

(* 天津理工大学天津市复杂系统控制理论及应用重点实验室 天津 300384)

(** 天津理工大学机械工程学院 天津 300384)

摘 要 系统地进行了 5 自由度轮式悬架移动机械手的动力学研究,在此基础上,考虑到悬架的引入会对移动机械手末端执行器的运动学和动力学特性造成较大影响,综合运用拉格朗日方程以及牛顿-欧拉方程,建立了 5 自由度轮式悬架移动机械手系统的完整正、逆动力学模型。基于该动力学模型,以能量消耗最少为目标函数,对这类机械手的杆长进行了优化设计,并对优化结果进行了仿真分析。

关键词 移动机械手,轮式悬架,优化设计,5 自由度(DOF),动力学模型

0 引言

机械手是对人手臂形状和功能的模仿。为了扩大机械手的活动范围,越来越多的国内外研究者投入了对带有移动载体的轮式悬架机械手的研究。研究表明,为了强化机械手的功能,使其精确地完成各种任务,有必要对机械手进行运动学、动力学分析,建立精确的动力学模型。移动机械手由机械手和移动载体构成,一般移动载体选用带有线弹性-阻尼悬架的载体,以起到减缓系统振动和冲击、提高机械手运动的平顺性、加速衰减系统的部分振动的作用。但是悬架系统的引入,将大大影响移动机械手末端执行器运动学和动力学特性,从而大大增加了推导求解其运动学方程、动力学方程的难度。所以,某些研究者建立的移动机械手动力学模型,通常没有考虑悬架的影响。这样,移动载体的自由度被完全加到机械手上,这样的机械手被称为冗余度机械手。

为了提高精度,现在必须重新考虑在过去分析中忽略的因素^[1]。由于强耦合性、高冗余度和非完整性的存在,使得机械动力学模型的建立分析变得异常复杂,因此,模型的建立涉及到多体系统动力学^[2]。多体系统动力学早期的研究成果主要集中在多刚体系统上。多刚体系统动力学已经形成了许多各具特色的建模原理,如 Newton-Euler 方法、Lagrange 方法、Kane 方法、Huston 方法等^[3]。本文采用了较为普遍的 Lagrange 方法建立动力学模型,采用 Newton-Euler 方法推导驱动力。建立模型技巧可以采用先分别建立机械手和移动载体的子模型然后进行整体分析建立统一模型的方法^[4,6]。文献[7]根据机器人的结构特点提出了一种基于空间几何反解的方法,大大简化了计算过程。建立动力学模型进行分析也可以借助一些软件,例如 Matlab 的机器人工具箱^[8]、Solidworks 等三维软件的动力学分析模块^[9]、ADAMS^[10-12]、Matlab 的 Simulink 分析模块^[13]以及 SAMCEF 软件^[14]等。文献[15]基于罗德里格公式

① 国家自然科学基金(51275353,51205289)和天津市应用基础及前沿技术研究计划(自然科学基金一般项目)(12JCYBJC12200,13JCYBJC17700)资助项目。

② 男,1990 年生,硕士;研究方向:机械手动力学建模;E-mail:285115967@qq.com
(收稿日期:2014-09-22)

与变换矩阵,结合拉格朗日函数建立了一种 3 自由度工业机械手动力学模型,并基于此模型运用基于线性迭代方法的轨迹优化算法对负载轨迹进行了优化。本文综合考虑了移动载体的线弹性-阻尼悬架和不平路面工况,基于拉格朗日原理建立了 5 自由度(DOF)移动机械手的完整(正、逆)动力学方程,其中 5 自由度包括线弹性-阻尼悬架系统的 2 自由度和机械手的 3 自由度。在此动力学模型基础上,对机械手的杆长做了适当的优化设计。

1 动力学模型的建立

机械手动力学模型的建立涉及的主要内容有机械手约束方程描述、拉格朗日方程的建立、驱动力的求解。

机械手的简单构型如图 1 所示由 4 杆组成,各杆通过转动关节相连接,然后连接到含有阻尼悬架的移动载体上。

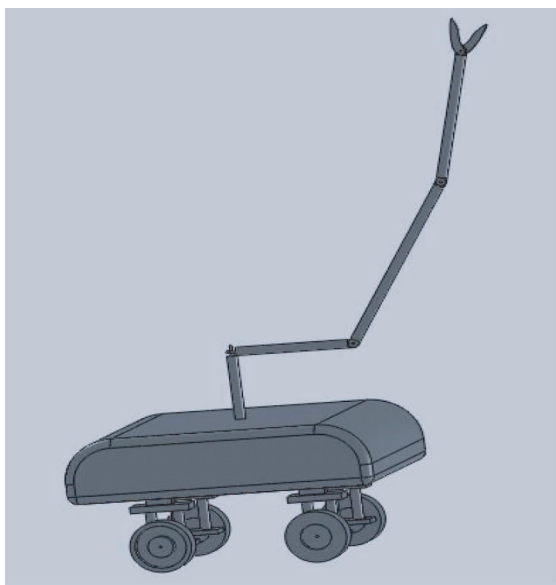


图 1 机械手简图

1.1 机械手约束方程描述

约束的描述一般采用坐标变换法来建立方程。为了简化质量矩阵的求解,在建立局部坐标系时采

用了将局部坐标系固结于构件质心的方法。

局部坐标系 $O - x_i y_i z_i$ (其中 $i = 1, 2, 3, 4$) 的建立如图 2 所示,除构件 1 的局部坐标系建立在其与移动载体连接处以外,其余局部坐标系均建立在各构件的质心上(假设杆为匀质,则质心也为形心)。

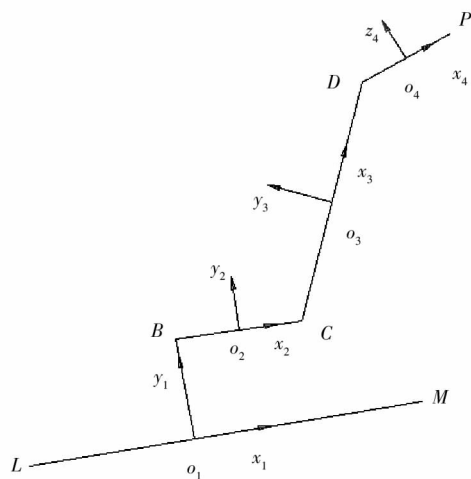


图 2 机械手坐标系简图

根据坐标变换原理^[16],构件 i 上任意一点位置矢量描述为

$$\mathbf{r}_i = \mathbf{R}_i + \mathbf{A}_i \mathbf{u}_i \quad (1)$$

其中: $\mathbf{R}_i = [r_i^1, r_i^2, r_i^3]^T$, 为局部坐标系 i 原点在全局坐标系中的位置矢量; \mathbf{A}_i 为构件 i 局部坐标系相对于全局坐标系的转动矩阵,可由坐标变换法^[11]得到; \mathbf{u}_i 为构件 i 上任意点度量于其局部坐标系的位置矢量。

该移动机械手约束包括两种:完整约束与非完整约束。轮子与地面约束属于非完整约束,而各个转动关节的约束为完整约束。

由完整约束建立的各个关节的约束方程为

$$\mathbf{C}(q, t) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_4 + \mathbf{A}_4 \mathbf{u}_{d4} - \mathbf{R}_3 - \mathbf{A}_3 \mathbf{u}_{d3} \\ \mathbf{R}_3 + \mathbf{A}_3 \mathbf{u}_{c3} - \mathbf{R}_2 - \mathbf{A}_2 \mathbf{u}_{c2} \\ \mathbf{R}_2 + \mathbf{A}_2 \mathbf{u}_{b2} - \mathbf{R}_1 - \mathbf{A}_1 \mathbf{u}_{b1} \\ r_1^1 + \frac{t^3}{240} - \frac{1}{20} t^2 - c_0 \end{bmatrix} = \mathbf{0}_{10 \times 1} \quad (2)$$

非完整约束方程即路面函数表示为如下正弦函数:

$$\begin{cases} H_{Ly} = H_0 \sin\left(\frac{2\pi\left(\frac{t^2}{20} - \frac{t^3}{240}\right)}{\lambda} + \pi\right) + H_0 \\ H_{My} = H_0 \sin\left(\frac{2\pi\left(\frac{t^2}{20} - \frac{t^3}{240}\right)}{\lambda} + \frac{2\pi d}{\lambda} + \pi\right) + H_0 \end{cases} \quad (3)$$

机械手在执行任务时有一定的轨迹要求,因此将其执行器末端轨迹约束为一条空间直线。

该直线方程如下:

$$\begin{cases} r_{py}^4 = \tan\gamma \cdot r_{px}^4 + b_0 \\ r_{pz}^4 = \tan\gamma \cdot r_{px}^4 + d_0 \end{cases} \quad (4)$$

其中 $\gamma = 5^\circ$, b_0 、 d_0 为给定常数。

由于约束方程中变量众多,因此我们使用关联坐标与独立坐标^[17]分离法推导化简。

定义关联坐标为 $\mathbf{q}_d = [\mathbf{r}_1^1 \quad \mathbf{R}^{2T} \quad \mathbf{R}^{3T} \quad \mathbf{R}^{4T}]^T$, 独立坐标为 $\mathbf{q}_i = [\mathbf{r}_1^2 \quad \mathbf{r}_1^3 \quad \theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3 \quad \theta_4]^T$, 然后分离关联坐标与独立坐标来达到消元目的。

同样,独立坐标与关联坐标速度、加速度也可分离如下^[13,14]:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{q}}_d = -(\mathbf{C}_{qd})^{-1} \mathbf{C}_{qi} \dot{\mathbf{q}}_i - (\mathbf{C}_{qd})^{-1} \mathbf{C}_t \\ \ddot{\mathbf{q}}_d = -(\mathbf{C}_{qd})^{-1} \mathbf{C}_{qi} \ddot{\mathbf{q}}_i + (\mathbf{C}_{qd})^{-1} \mathbf{Q}_c - (\mathbf{C}_{qd})^{-1} \mathbf{C}_u \\ \mathbf{Q}_c = (\mathbf{C}_q \dot{\mathbf{q}})_q \dot{\mathbf{q}} \end{cases} \quad (5)$$

其中:

$$\mathbf{C}_{qd} = \frac{\partial \mathbf{C}(\mathbf{q}_r, t)}{\partial \mathbf{q}_d}$$

$$\mathbf{C}_{qi} = \frac{\partial \mathbf{C}(\mathbf{q}_r, t)}{\partial \mathbf{q}_i}$$

$$\mathbf{C}_t = \frac{\partial \mathbf{C}(\mathbf{q}_r, t)}{\partial t}$$

$$(\mathbf{C}_q \dot{\mathbf{q}})_q = \frac{\partial \mathbf{C}_q \dot{\mathbf{q}}}{\partial \mathbf{q}}$$

$$\mathbf{q} = [\mathbf{q}_i^T \mathbf{q}_d^T]^T$$

机械手的正解推导完毕。

结合末端轨迹方程(式(4))和约束方程(式(2),(3))得到的正解,再次利用分离独立坐标和关联坐标法,可将方程进一步化简为只有 $\theta_2, \theta_3, \theta_4$ 三个独立坐标变量,从而完成了逆动力学的推导。

1.2 拉格朗日方程的推导、化简

拉格朗日基本方程为

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \mathbf{T}_i}{\partial \dot{\mathbf{q}}_r} \right]^T - \left[\frac{\partial \mathbf{T}_i}{\partial \mathbf{q}_r} \right]^T + \mathbf{C}_{q_i}^T \lambda = \mathbf{Q}_e^i \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (6)$$

其中, λ 为拉格朗日乘子, \mathbf{T}_i 为构件 i 的动能, \mathbf{Q}_e^i ^[18] 为 i 的广义力。

下面给出构件的广义质量矩阵即惯性张量推导过程的描述。

以构件 2 为例。构件 2 上任意一点的速度矢量推导如下:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{r}}^2 &= \dot{\mathbf{R}}^2 + \mathbf{A}_{\theta_2}^2 \mathbf{u}^2 \dot{\theta}_2 + \mathbf{A}_{\theta_1}^2 \mathbf{u}^2 \dot{\theta}_1 \\ &= \left[\frac{1}{2} \mathbf{I}^2 \quad \mathbf{A}_{\theta_2}^1 \mathbf{u}^2 \right] \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{R}}^2 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix}^T \\ &\quad + \left[\frac{1}{2} \mathbf{I}^2 \quad \mathbf{A}_{\theta_1}^1 \mathbf{u}^2 \right] \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{R}}^2 \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $\mathbf{A}_{\theta_1}^1$ 为 \mathbf{A}^1 对 θ_1 的导数。则构件 2 的动能推导化简如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{T}^2 &= \frac{1}{2} \int_{V_2} \dot{\mathbf{r}}^{2T} \dot{\mathbf{r}}^2 \rho^2 dV_2 \\ &= \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}_r^{2T} \begin{bmatrix} \mathbf{m}_{rr}^2 \\ \mathbf{m}_{\theta\theta}^2 \end{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_r^2 + \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}_r^{1T} \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{m}_{\theta\theta}^{21} \end{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_r^1 \end{aligned} \quad (8)$$

鉴于最后要求的是能量总和,因此为了简化计算不妨将后半部分加入构件 1 的广义质量中。这样依次可计算出各构件的惯性质量 M^1, M^2, M^3, M^4 。

系统总的惯性张量为:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}^1 & & & \\ & \mathbf{M}^2 & & \\ & & \mathbf{M}^3 & \\ & & & \mathbf{M}^4 \end{bmatrix} \quad (9)$$

以构件 4 为例,推导其广义力步骤。其末端 P 点位置矢量为

$$\mathbf{r}_p^4 = \mathbf{R}_4 + \mathbf{A}_4 \mathbf{u}_p^4 \quad (10)$$

依据变分原理有

$$\delta \mathbf{r}_p^4 = [\mathbf{I}_4 \quad \mathbf{A}_{\theta 4}^4 \mathbf{u}_p^4] \delta \mathbf{q}_r^4 + [0 \quad \mathbf{A}_{\theta 2}^4 \mathbf{u}_p^4] \delta \mathbf{q}_r^2 \quad (11)$$

其中, $\mathbf{q}_r^4 = [\mathbf{R}_4 \quad \theta_4]^T$; $\mathbf{q}_r^2 = [\mathbf{R}_2 \theta_2]^T$ 。

负载对应的广义力为

$$\mathbf{Q}_1^{4T} = [\mathbf{F}_p^T \mathbf{I}_4 \quad \mathbf{F}_p^T \mathbf{A}_{\theta 4}^4 \mathbf{u}_p^4] + [0 \quad \mathbf{F}_p^T \mathbf{A}_{\theta 2}^4 \mathbf{u}_p^4] \quad (12)$$

依次可计算出所有构件的广义力。

将广义质量、广义力代入拉格朗日方程,可将式

(6)化简为

$$\mathbf{M} [\ddot{\mathbf{q}}_r^1 \quad \ddot{\mathbf{q}}_r^2 \quad \ddot{\mathbf{q}}_r^3 \quad \ddot{\mathbf{q}}_r^4]^T = [\mathbf{Q}_e^1 \quad \mathbf{Q}_e^2 \quad \mathbf{Q}_e^3 \quad \mathbf{Q}_e^4]^T \quad (13)$$

最后,将所有坐标用独立坐标表示,化简方程为

$$\mathbf{M}_{ii} \mathbf{q}_i = \mathbf{Q}_i \quad (14)$$

1.3 驱动力的推导

各个关节的驱动力的获得,是利用牛顿欧拉法迭代来实现的。从末端构件一直到第一个构件,对每个构件做受力分析,求解出构件之间的内力。例如,对构件 4 的受力分析,末端负载与自身重力已知,其运动状态已知,可由此求解出构件 3 对构件 4 的内力。同样弄清了构件 4 对构件 3 的内力。对构件 3 来说,构件 4 对它的内力就相当于负载,以此可求解出构件 2 对构件 3 的内力。依此类推可得到驱动力。构件 1 的外力涉及到阻尼悬架对移动载体的作用力的推导,推导过程可参照文献[1]。

2 杆长的优化设计

为了便于利用 Matlab 求解^[19],将上述微分方程所表达的动力学模型用状态空间法重新描述。首先定义状态向量为

$$\mathbf{y} = [\theta_2 \quad \theta_3 \quad \theta_4 \quad \dot{\theta}_2 \quad \dot{\theta}_3 \quad \dot{\theta}_4]^T$$

$$\dot{\mathbf{y}} = [\dot{\theta}_2 \quad \dot{\theta}_3 \quad \dot{\theta}_4 \quad \ddot{\theta}_2 \quad \ddot{\theta}_3 \quad \ddot{\theta}_4]^T$$

然后利用此定义将动力学模型重新描述,得到二阶

常微分方程。

鉴于本优化设计的目的在于对杆长进行重新选择,故设计变量为各杆长度。机械手系统中有 4 杆,故优化设计的维数为 4 维。本次优化设计是基于机械手系统的动力学方程,所以优化设计的约束条件即为该动力学方程。从实际问题出发,将优化设计的目标函数定义为在仿真时间内的驱动各电机所消耗的能量。

优化设计中要考虑的问题有:(1)约束方程的处理问题 约束方程为机械手系统的动力学方程,方程形式为多元微分方程,且所含参数较多,形式较为复杂。(2)4 维空间的复杂性 设计变量数目为 4 个,因此设计空间为 4 维,程序的计算效率有待考虑。(3)可行域的确定 4 维空间中并非所有的点均能满足约束方程的条件,因此需要从设计空间中确定可行域的大小。

针对问题的解决方案如下:(1)对约束方程的处理问题,采用将轨迹离散为点的方法来计算^[20-21]。事实上,这也是 Matlab 软件求解微分方程的方法:根据初始条件计算出第一个点的广义坐标及其一阶导数值,然后基于第一个点的广义坐标及其一阶导数值计算第二个点的广义坐标,依次类推。鉴于约束方程的复杂性,带参数推导计算比较困难,因此采用将参数全部赋值,只计算具体数值的方法。(2)依次对 4 维空间的扫描会大大增加计算难度,降低计算效率。因此,采用将 4 维空间拆分为两个二维空间来计算。(3)可行域则采用求解系统动力学微分方程来确定。求解方程结果若收敛则该点属于可行域,反之则位于非可行域。

首先将 L_1, L_2, L_3, L_4 分为两组, L_1 和 L_3 为一组, L_2 和 L_4 为一组。先选取一组作为变量,另一组作为已知量,然后确定解空间。以 L_1 和 L_3 一组为变量的解空间的确定如图 3 所示。

然后将解空间的解逐个代入动力学模型中计算得到对应于各个时间段的机械手位姿,最后将计算得到的各个时间段的机械手位姿对应的目标函数值

累计求和,比较其值的大小,取其最小值。目标函数拟合曲三维面如图4所示。

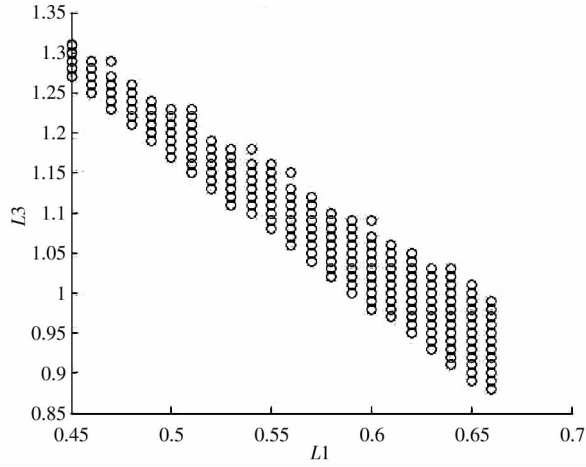


图3 L_1 和 L_3 的解空间

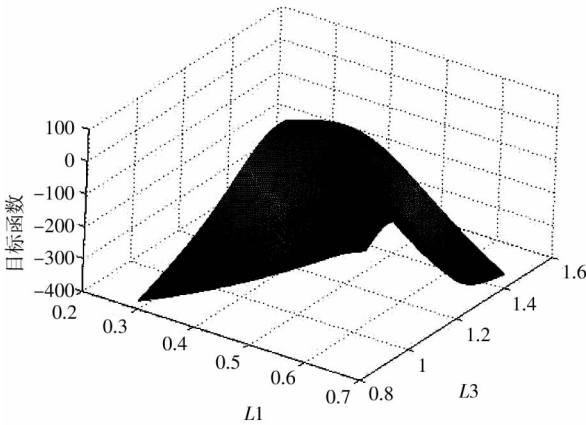


图4 L_1, L_3 对应目标函数拟合的三维曲面图

通过计算比较可知, $L_1 = 0.61, L_3 = 0.97$ 时目标函数最优。

至此第一个二维空间优化计算完毕。第二个二维空间计算过程与此相同。

L_2 和 L_4 确定的解空间以及目标函数拟合的三维曲面分别如图5和图6所示。

通过计算比较可知, $L_2 = 0.1, L_4 = 0.4$ 时目标函数最优。

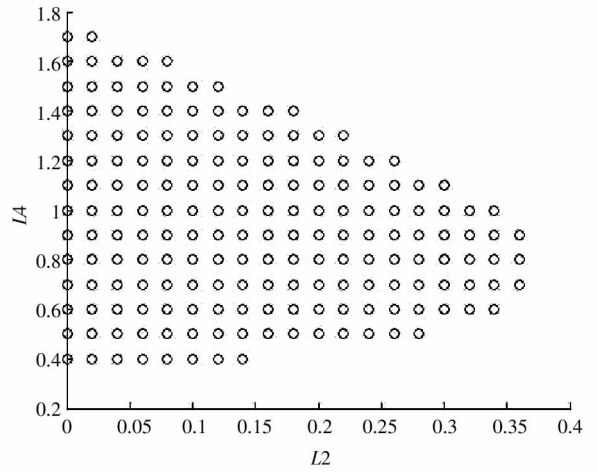


图5 L_2 和 L_4 的解空间

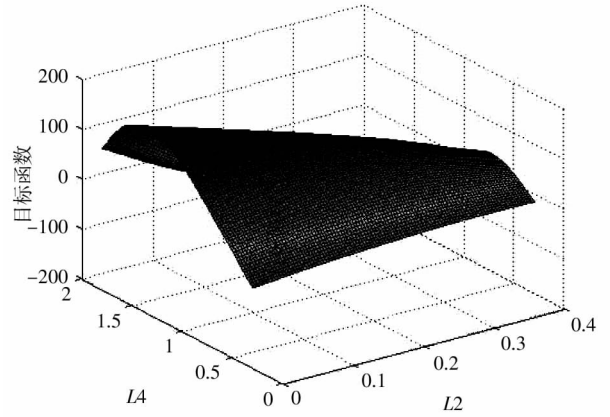


图6 L_2, L_4 对应目标函数拟合的三维曲面图

综上所述,优化设计的结果为: $L_1 = 0.61, L_3 = 0.97, L_2 = 0.1, L_4 = 0.4$ 。基于上述优化结果的部分动力学模型仿真结果如图7和图8所示。

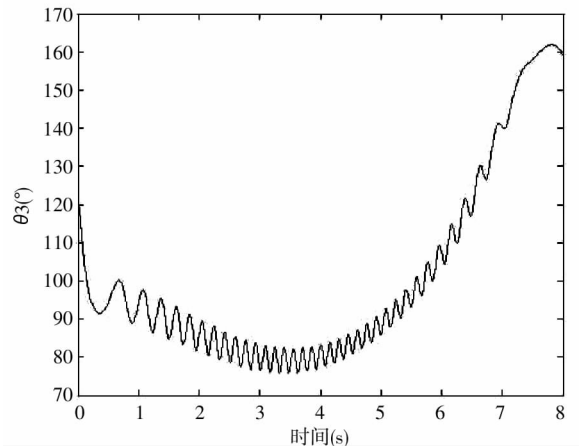


图7 θ_3 数据仿真

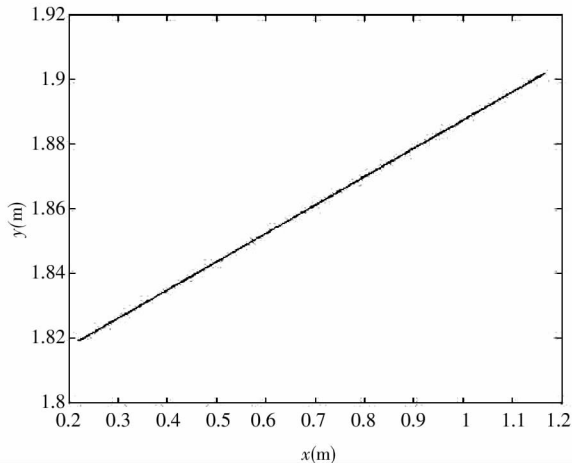


图 8 末端 x, y 轴坐标数据仿真

3 结论

在考虑动力学模型的通用性、完备性的基础上,系统地构建了轮式悬架机械手的完整正、逆动力学模型,并以此为基础,以最小耗能为目标,对机械手的杆长做了优化设计。由于将 4 维空间分拆为两个二维空间过程中忽略了两个二维空间之间的关联性,从而导致上述结果仅仅为局部最优化,距离真实的最优解存在一定的误差,但是可以采用多次迭代以及细化空间的方法,来逼近真实的最优解。

参考文献

[1] 杨玉维,张明路,崔峰. 4 自由度轮式悬架移动机械手动力学研究与仿真. 机械设计,2009,26(04):35-41

[2] 洪嘉振,刘铸永. 刚柔耦合动力学的建模方法. 上海交通大学学报,2008,42(11):1922-1926

[3] 何勇. 柔性多体系统动力学研究进展与建模方法. 陕西理工学院学报(自然科学版),2010,26(4):9-12

[4] 胡松. 5 自由度移动机器人的建模与仿真:[硕士学位论文]. 曲阜:曲阜师范大学工学院,2009. 70

[5] 赵山杉. 移动机械手运动学和动力学分析及仿真:[硕士学位论文]. 河北:河北工业大学机械学院,2006. 63

[6] 师名林. 移动机械手动力学建模及其仿真研究:[硕士学位论文]. 天津:天津理工大学机械学院,2007. 76

[7] 张普行,严军辉,贾秋玲. 六自由度机械手的运动学分析. 制造业自动化,2011,33(10):68-71

[8] 宁祎,陈志苓. 基于 Matlab 的七自由度机械手逆运动学分析及仿真. 科学技术与工程,2012,12(07):1522-1525

[9] 程远. 5 自由度机械手动力学分析与仿真. 科技通报,2012,28(08):123-125

[10] 陈雷. 五自由度机械手的运动学和动力学分析:[硕士学位论文]. 河北:河北工业大学机械学院,2006:72

[11] 郑显华. 基于 Adams 的仿人机械灵巧手动力学仿真分析研究. 制造业自动化,2013,35(7):147-149

[12] 蔡汉明,夏金芳,刘承昆. 基于 ADAMS 六自由度机械手的动力学分析与仿真. 机械研究与应用,2013,26(124):42-44

[13] 张建华,刘宇鹏,张明路. 基于 Matlab 的轮式悬架移动平台动力学建模与仿真. 制造业自动化,2012,34(8):118-122

[14] 陈落根. 基于 SAMCEF 的四自由度并联机器人动力学建模与仿真. 机械设计与研究,2013,29(06):12-15

[15] 杨玉维,赵新华. 机械手动力学建模与负载轨迹优化研究. 高技术通讯,2013,23(8):833-839

[16] 张春林. 高等机构学. 北京:北京理工大学出版社,2006. 30-46

[17] 杨玉维,张明路. 轮式移动单杆柔性机械手逆动力学研究与仿真. 机械工程学报,2010,46(21):76-81

[18] 刘延柱. 高等动力学. 北京:高等教育出版社,2001. 28-45

[19] 张志涌. 精通 MATLAB6. 5 版. 北京:北京航空航天大学出版社,2003. 76-85

[20] Wang L T, Ravani B. Dynamic load carrying capacity of mechanical manipulators-Part I :Problem formulation. *Dynamic Systems, Measurement and Control*, 1988, 110(1):46-52.

[21] Wang LT, Ravani B. Dynamic load carrying capacity of mechanical manipulators-Part II :Problem formulation. *Dynamic Systems, Measurement and Control*, 1988, 110(1):53-61.

Optimization design of the lever length of 5 DOF manipulators based on dynamic modeling research

Li Peng^{**}, Zhao Xinhua^{* **}, Yang Yuwei^{* **}, Huang Weiming^{**}, Ge Weimin^{* **}, Li Bin^{*}

(^{*} Tianjin Key Laboratory for Control Theory & Applications in Complicated Systems,
Tianjin University of Technology, Tianjin 300384)

(^{**} School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384)

Abstract

A dynamics study on a 5 DOF wheeled suspension mobile manipulator was conducted systematically, and the problem that the use of wheeled suspension has a great influence on the dynamic properties of the manipulator's end-executor was paid attention. Based on this, a complete dynamics model of the manipulator system was established by synthetic use of the Lagrange theory and the Newton-Euler equation. According to the dynamic model, an optimization design of the manipulator's lever length was made with the aim to realize the the minimum energy consumption, and the optimization results were analyzed by simulation.

Key words: mobile manipulator, wheeled suspension optimization design, 5 degrees of freedom(DOF), dynamic model