

灌装机械手运动与动力特性分析

赵加洋, 石秀东, 薛兵财, 张丹静, 梁小龙

(江南大学, 无锡 214122)

摘要: 首先利用平面几何关系,建立了灌装机械手的运动学方程,再通过 MATLAB 计算了各关节的位移曲线、速度曲线以及加速度曲线,在此基础上进行了动力学仿真,得到了各关节的扭矩曲线。结果表明:各关节运动较平稳,所选的电机的额定扭矩大于所需的最大扭矩,满足使用要求,为灌装机械手的设计提供了理论依据。

关键词: 灌装; 机械手; 运动学仿真; 动力学仿真

中图分类号: TB486⁺.02 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2013)03-0059-04

Dynamic and Kinematical Analysis of Filling Manipulator

ZHAO Jia-yang, SHI Xiu-dong, XUE Bing-cai, ZHANG Dan-jing, LIANG Xiao-long

(Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Kinematical equation of filling manipulator was established based on planar geometric relationship. Each joint's displacement curve, speed curve, and acceleration curve was calculated by MATLAB. Dynamic simulation was carried out to get each joint's torque curve. The results showed that each joint movement is smooth and the motor rated torque is greater than the maximum needed torque; the motors meet the requirements. The purpose was to provide a theoretical basis for design of filling manipulator.

Key words: filling; manipulator; kinematical simulation; dynamic simulation

直线式灌装机广泛应用于食品、医药和化工等领域。目前直线式灌装机大多为间歇式灌装方式,灌装线不能连续灌装,生产效率低。由于间歇运动,生产线频繁加减速。为了克服以上缺点,在医药等少数领域出现了少量机械式连续直线灌装机,大部分采用凸轮传动机构实现连续灌装过程,还有部分是采用伺服电机驱动,两者均采用直角坐标机械手结构,但这种机械机构形式复杂,灌装头的运动精度难以保证。由于结构原因,上述灌装机构达不到无菌灌装的理想环境。笔者研究的是一种应用于直线式灌装机的自动跟踪灌装机构,灌装机械手由伺服电机驱动,属于新型的灌装机械手。机械手的运动和动力特性直接影响灌装头运动精度、电机功率消耗、负载特性以及使用寿命,因此,对灌装机械手进行运动和动力特性分析显得尤为重要^[1-4]。

研究的灌装机械手属于三自由度机械手,对于三自由度机械手,国内外学者都进行了一定的研究。张家耕、洪林采用数学解析的方法,对基于 3R 杆组构型

的机构运动学分析方法进行了研究^[5]。刘一宏、余跃庆以含有一个自由关节的 3R 欠驱动机械手为研究对象,对其轨迹跟踪进行了实验研究^[6]。徐文福、李立涛等人对空间 3R 机器人工作空间分析进行了研究^[7]。施文瑜、郭为忠在 3R 平面开链机械手上引入虚拟杆,利用机构分析方法,探讨了 3R 平面开链机械手特征图各区域上的灵活度,分析了机械手在不同工作空间区域上的奇异位置^[8]。笔者以三自由度关节型灌装机械手为对象,先后建立运动学和动力学方程,求解其位移、速度、加速度曲线,并进行动力学仿真,得到各关节扭矩曲线,从而证明选择的电机符合要求。

1 运动特性研究

1.1 运动学反解方法

灌装机械手的机构示意图见图 1,该机构主要包括基座、大臂、小臂、灌装头、电机 1(位于关节 1 处)、

收稿日期: 2012-10-15

作者简介: 赵加洋(1987-),男,江苏宿迁人,江南大学硕士生,主攻装备动态设计。

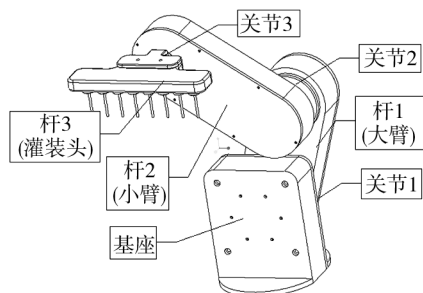


图1 灌装机构三维模型

Fig. 1 Three-dimensional model of filling machine

电机2(位于关节2处)以及电机3(位于关节3处)。该结构皆是由电机直接驱动,中间无减速结构,灌装头的运动轨迹由3个电机协调运动所决定。已知灌装头运动轨迹时,可以通过机械手运动反解,得到各关节的运动学曲线。

机械手运动学反解的方法有2类:封闭解法和数值解法。在进行反解时,总是力求得到封闭解^[9]。机械手的运动学封闭解可通过2种途径获得:代数解和几何解,机械手自由度较少时,几何解法显得更为便利。利用平面几何关系求出运动学反解,机械手的简化图见图2。

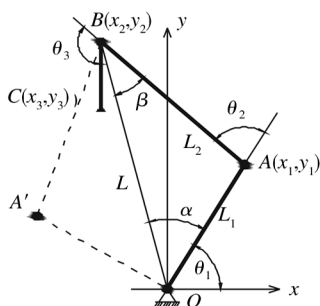


图2 3R平面机械手

Fig. 2 3R planar manipulator

图2中, L_1 为杆1的长度, L_2 为杆2的长度,点 $B(x_2, y_2)$ 为杆2末端的坐标值, L 为杆2末端到固定端的距离, θ_1 为杆1与水平面的夹角, θ_2 为杆2与杆1的夹角, θ_3 为杆3与杆2的夹角, φ 为杆3与水平面的夹角。执行端与杆3固定在一起,并且杆3一直保持与水平方向垂直,方向向下,即 φ 恒等于 270° 。由余弦定理可得:

$$\cos \alpha = \frac{L^2 + L_1^2 - L_2^2}{2LL_1} \quad (1)$$

$$\cos \beta = \frac{L^2 + L_2^2 - L_1^2}{2LL_2} \quad (2)$$

在存在解的前提下,可能存在2组解(分别用粗、细实线表示):

$$\alpha' = -\alpha, \beta' = -\beta \quad (3)$$

取实线表示的初始状态进行计算:

$$\tan(\alpha + \theta_1) = \frac{y_2}{x_2} \quad (4)$$

当 $x_2 \leq 0$ 时, $\alpha + \theta_1 = \arctan \frac{y_2}{x_2} + 180^\circ$;当 $x_2 > 0$ 时,

$\alpha + \theta_1 = \arctan \frac{y_2}{x_2}$ 。由此可解出 θ_1 ,再由下式:

$$\theta_2 = \alpha + \beta \quad (5)$$

可解出 θ_2 。杆3的方位角 φ 由3个关节角度之和确定,即:

$$\varphi = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \quad (6)$$

由此解出关节角 θ_3 。

灌装头末端的运动轨迹见图3。其中,第1阶段,

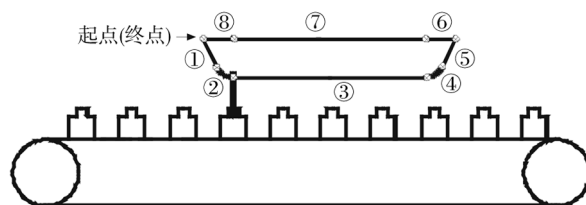


图3 灌装头行走轨迹

Fig. 3 Movement path of filling needle

水平方向由静止加速至与传输带等速,即灌装头与输送带同步,垂直方向由静止加速向下运动;第2阶段,水平方向匀速,垂直方向减速至静止,为灌装头插入瓶子的过程;第3阶段,水平方向匀速,垂直方向静止,为灌装过程;第4阶段,水平方向匀速,垂直方向由静止加速上升,为灌装头拔出瓶子的过程;第5阶段,水平方向减速至静止,垂直方向减速至静止,为灌装头上升过程;第6阶段至第8阶段,为灌装头返回过程,垂直方向始终静止,水平方向经历加速阶段、匀速阶段以及减速阶段。灌装头从起点到终点的过程构成了一个循环。

1.2 运动学仿真计算

Simulink 是用于 MATLAB 下建立系统框图和仿真的环境。它可以把一系列模块连接起来,构成复杂的系统模块,用于计算机仿真。在 Simulink 中建立的系统模型很直观,且不容易出错,这使它成为仿真领域首选的计算机环境。

根据式(1)~(6),在 Simulink 中建立系统的仿真

模型,见图4。其中,杆1、杆2及杆3的长度分别为280,250,95 mm,点B的初始值为(-160,400),由此

求得点A的值为(75.9,269.5)。

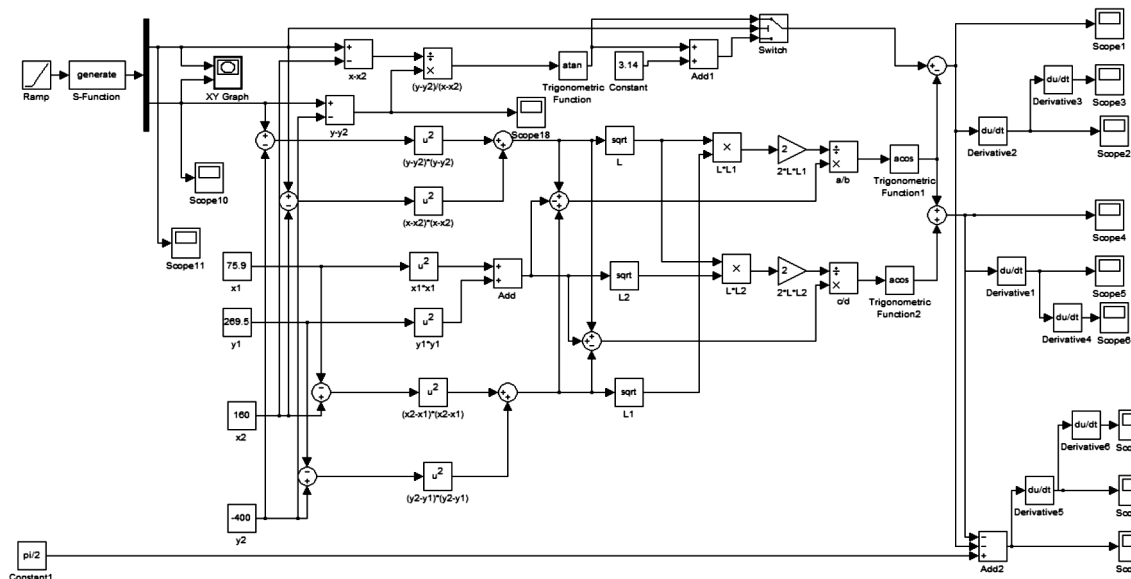


图4 3R平面机械手的Simulink模型

Fig.4 Simulink model of 3R planar manipulator

其中,使用S-Function模块将图3中的轨迹转化为:水平方向 x_2 关于 t 的函数和垂直方向 y_2 关于 t 的函数。在仿真过程中,首先计算 $B(x_2, y_2)$ 的坐标,再根据点 $B(x_2, y_2)$ 的坐标求解各个关节的角位移,最

后由角位移求一次导数、二次导数得到角速度和角加速度。在Simulink仿真完成后,可得到各关节的角位移、角速度、角加速度曲线,见图5。

从图5可知,各关节的位移曲线变化范围较小,

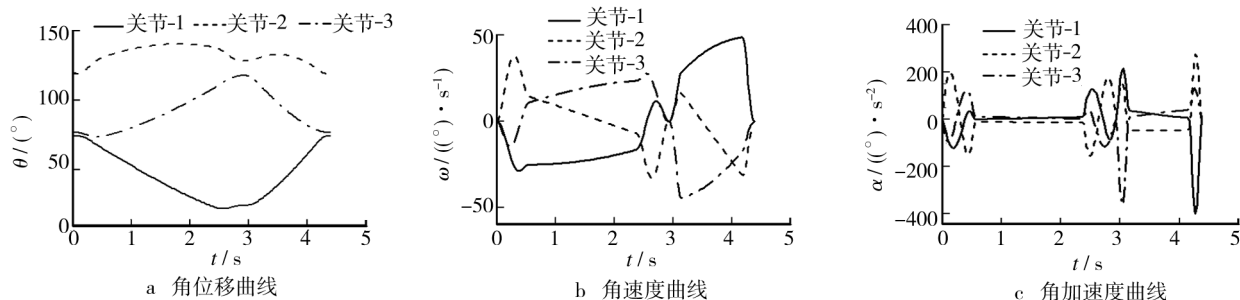


图5 运动学分析结果

Fig.5 Kinematics analysis results

即电机一个周期内的转动角度较小;各关节的瞬时速度皆小于 $60(^{\circ})/s$ (即 10 r/min),速度较低,选择的电机满足转速要求;虽然角加速度曲线变化较大,但数值变化是连续的,这样可以保证所需的驱动力矩是连续变化的,也即是保证运动是可实现的。

机械手逆运动学分析非常重要,机械手的控制器将根据逆运动学求解的数值来控制电机的运动,以此使机械手达到期望的位置。在得到每个关节的运动

学数据之后,可进行后续的动力学仿真分析。

2 动力特性研究

应用仿真软件实现机电系统的建模和仿真分析通常有2种方法:基于数学模型的建模仿真分析和基于机构的建模仿真分析^[10-12]。数学建模的方法是用微分方程或者传递函数来描述的,这种描述相对比较

抽象,要求具有一定的基础理论知识,而基于机构(实体)的建模方法相对比较具体,更适合人的思维,同时该方法的仿真结果具有权威性。应用多体动力学仿真软件 ADAMS 对该机构进行仿真分析。选择的电机参数见表 1。

表 1 电机参数
Tab.1 Motor parameters

项目	电机 1	电机 2	电机 3
额定功率/W	400	250	100
最大扭矩/(N·m)	80	30	0.95
额定扭矩/(N·m)	40	15	0.32
质量/kg	15	9	0.56
转速/(r·min ⁻¹)	250	250	3000

根据电机外型尺寸,采用 Pro/E 建模软件完成了灌装机械手的三维模型,由于对外形失真度要求不高,可以通过公共格式 x_t 导入 ADAMS 中。

在 ADAMS/View 中添加各运动副,设置相应的属性和参数,并将上面求得的位移曲线作为个关节的驱动函数,设置完成后的模型见图 6。动力学仿真完成

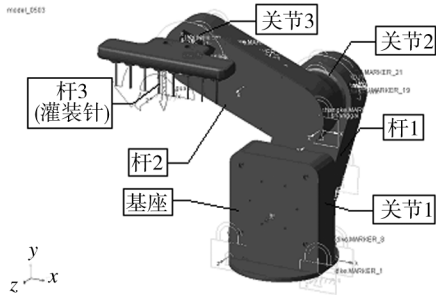


图 6 灌装机构的虚拟样机
Fig. 6 Virtual prototype of the filling machine

后,在后处理模块(Post-process 模块)得到各关节所需的驱动力矩,然后通过绘图软件绘出各个关节的力矩曲线,结果见图 7。

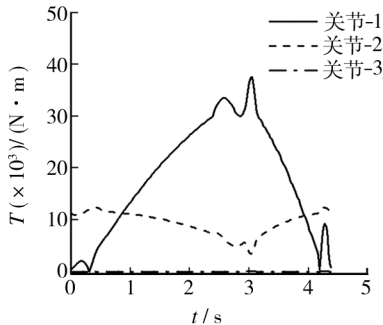


图 7 动力学分析结果
Fig. 7 Dynamics analysis results

由图 7 可知各关节所需的最大扭矩,见表 2。

表 2 各关节扭矩
Tab.2 Each joint's torque

	关节 1	关节 2	关节 3
最大扭矩	37.537	12.476	0.079

由表 1 和表 2 知,每个电机的额定扭矩都大于相应关节所需的驱动扭矩。关节 3 所需的驱动力矩非常小,原因是:此关节无需提供主动驱动力矩,只需保持灌装头的水平状态即可,而灌装头是左右对称结构,因此需要的力矩很小。可知,所选的电机均满足使用要求。

3 结论

利用几何关系,建立了 3R 平面机械手的运动学方程,计算结果表明:每个关节的角速度变化较为平缓,运动学特性较好。各关节所选的驱动电机额定扭矩皆大于运动过程中所需的最大扭矩,即所选的电机满足使用的要求。研究结果对机械手设计具有一定的参考意义。

参考文献:

[1] 吴同喜,仲梁维,黄一晴,等. 基于 ADAMS 模切机新型间歇机构的性能分析[J]. 包装工程,2012,33(7):101-104.
WU Tong-xi, ZHONG Liang-wei, HUANG Yi-qing, et al. Performance Analysis of New Intermittent Mechanism of Die-cutting Machine Based on ADAMS[J]. Packaging Engineering,2012,33(7):101-104.

[2] 贺兵. 基于虚拟样机技术的包装机械系统仿真研究[J]. 包装工程,2008,29(2):47-49.
HE Bing. Simulation Study of Packaging Machine Based on Virtual Prototyping[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(2):47-49.

[3] 安江波,于富强,王龙. 三自由度水下机械手研制[J]. 现代机械,2008(6):32-34.
AN Jiang-bo, YU Fu-qiang, WANG Long. Research on Underwater Manipulator with Three DOF[J]. Modern Machinery,2008(6):32-34.

[4] 刘会杰,焦志刚,陈伟. 三杆式驱动机械手的设计与分析[J]. 沈阳理工大学学报,2008,27(1):61-65.
LIU Hui-jie, JIAO Zhi-gang, CHEN Wei. Design and Analysis of Three-rod Drive Manipulator[J]. Transactions of Shenyang Ligong University,2008,27(1):61-65.

参考文献:

- [1] 周广亮. UV 油墨在丝网印刷中的应用[J]. 网印工业, 2012(1):30-32.
ZHOU Guang-liang. Application of UV Curable Ink[J]. Screen Printing Industry, 2012(1):30-32.
 - [2] 张文杰, 闫富安, 王建成. 紫外光固化玻璃涂膜附着力的研究[J]. 涂料工业, 2006(12):49-50.
ZHANG Wen-jie, YAN Fu-an, WANG Jian-cheng. Study of Adhesion of UV-curing Coatings on Glass[J]. Coatings Industry, 2006(12):49-50.
 - [3] 王德海, 江根. 紫外光固化材料——理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001:226-227.
WANG De-hai, JIANG Ling. UV Curable Materials—Theory and Application[M]. Beijing: Science Press, 2001:226-227.
 - [4] 李会录, 惠卫东, 李东辉. 免打底紫外光固化上光油的研制[J]. 包装工程, 2010, 31(11):70-73.
LI Hui-lu, HUI Wei-dong, LI Dong-hui. Development of the Ultraviolet Cured Lustering Oil without Precoat[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(11):70-73.
 - [5] 周震, 武兵. 印刷油墨的配方设计与生产工艺[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003:20-34.
ZHOU Zhen, WU Bing. Design and Production Process of Printing Ink Formula[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003:20-34.
 - [6] 周震. 印刷油墨[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006:30-32.
 - [7] 韩亚东, 宗大超. UV 油墨的现状与发展趋势[J]. 印刷杂志, 2012(1):55-57.
HAN Ya-dong, ZONG Da-chao. Present Satuation and the Development Trend of UV Ink[J]. Printing Field, 2012(1):55-57.
 - [8] 黄蓓青, 李智勇. 丝印 UV 油墨光引发剂与颜料的匹配及用量研究[J]. 北京印刷学院学报, 2001, 9(1):11-18.
HUANG Bei-qing, LI Zhi-yong. A Research into the Matching and Dosage of Photoinitiator and Pigment for Screen Printing UV Inks[J]. Journal of Beijing Institute of Printing, 2001, 9(1):11-18.
 - [9] 黄蓓青, 王连芝, 金养智. 复合光引发剂对 UV 油墨固化速度影响的研究[J]. 热固性树脂, 2001, 16(6):35-36.
HUANG Bei-qing, WANG Lian-zhi, JIN Yang-zhi. Study on the Effect of Complex Photoinitiator on Curing Rate of UV-curing Ink[J]. Hermoseting Resin, 2001, 16(6):35-36.
 - [10] 凌云, 薛生连. 油墨技术手册[K]. 北京: 印刷工业出版社, 2009:190-192.
LING Xing-yun, XUE Sheng-lian. Technical Manual of Ink[K]. Beijing: Printing Industry Press, 2009:190-192.
 - [11] 贾彦金. 紫外光固化油墨浅析[J]. 广东印刷, 2008(4):42.
JIA Yan-jin. Analyses of UV Curable Ink[J]. Guangdong Printing, 2008(4):42.
-
- (上接第 62 页)
- [5] 张家耕, 洪林. 基于 3R 杆组构型的机构运动学分析方法研究[J]. 天津理工大学学报, 2009(5):26-27.
ZHANG Jia-geng, HONG Lin. Research on the Kinematic Analysis Based on 3R Bar-group[J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2009(5):26-27.
 - [6] 刘一宏, 余跃庆. 3R 欠驱动机械臂轨迹跟踪实验研究[J]. 航空精密制造技术, 2011(6):47-49.
LIU Yi-hong, YU Yao-qing. Experimental Study on the Trajectory Tracking of a 3R Underactuated Manipulator[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2011(6):47-49.
 - [7] 徐文福, 李立涛, 梁斌, 等. 空间 3R 机器人工作空间分析[J]. 宇航学报, 2007(5):1389-1394.
XU Wen-fu, LI Li-tao, LIANG Bin, et al. Workspace Analysis of Space 3R Robot[J]. Journal of Astronautics, 2007(5):1389-1394.
 - [8] 施文瑜, 郭为忠. 3R 平面开链机械手灵活度分析[J]. 上海交通大学学报, 2009(1):143-147.
SHI Wen-yu, GUO Wei-zhong. Analysis of Manipulation Dexterity for 3R-Type Planar Manipulators[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2009(1):143-147.
 - [9] GASPARETTO A, ZANOTTO V. A Technique for Time-jerk Optimal Planning of Robot Trajectories[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2008, 24:415-426.
 - [10] VANDERPLAATS Garret N. Numerical Optimization. VMA Engineering 1767S. 8th Street, Suite M-200 Colorado Springs, CO. (余不详)
 - [11] GASPARETTO A, ZANOTTO V. A New Method for Smooth Trajectory Planning of Robot Manipulators. Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Gestionale e Meccanica, Università Degli Studi di Udine, Via Delle Scienze, 208-33100 Udine, Italy. (余不详)
 - [12] 张立勋. 机电系统建模与仿真[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2010:57-59.
ZHANG Li-xun. Modeling and Simulation of Mechatronics System[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2010:57-58.