

# 机械臂重力平衡机构的设计与实验研究

刘会英 李微微 柴培林 梁 潇

(哈尔滨工业大学(威海)机械工程系 山东 威海 264209)

**摘 要** 传统无重力平衡机械臂因自重影响致使机械臂控制难度增大、动态特性变差,以被动重力平衡原理为基础,综合弹簧平衡机构和凸轮平衡机构进行机械臂重力平衡装置的设计。通过理论分析,推导出双关节机械臂的势能方程。建立机械臂三维模型并对其进行简化,简化后的模型导入 ADAMS 中进行动力学仿真。通过等比例缩小设计和制造双关节机械臂样机,搭建实验平台,对重力平衡装置进行实验验证。将仿真和实验结果导入 MATLAB 中进行数据处理。结果表明:该重力平衡装置能够有效实现机械臂的重力平衡。

**关键词** 机械臂;重力平衡;数学模型;动力学仿真

中图分类号:TH16 文献标识码:A 文章编号:1001-3997(2019)11-0044-03

DOI:10.19356/j.cnki.1001-3997.2019.11.012

## Design and Experimental Research of Mechanical Arm Gravity Balance Mechanism

LIU Hui-ying, LI Wei-wei, CHAI Pei-lin, LIANG Xiao

(Department of Mechanical Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, Shangdong Weihai 264209, China)

**Abstract** The traditional weightless balance mechanical arm can make the manipulator control more difficult and the dynamic characteristic worse. Based on the principle of passive gravity balance, the design of mechanical arm gravity balance device is carried out by integrating spring balance mechanism and CAM balancing mechanism. Through theoretical analysis, the potential energy equation of the double joint manipulator is derived. The 3d model of mechanical arm was established and simplified, and the simplified model was introduced into ADAMS for dynamic simulation. Through the equal scale reduction, the double joint manipulator was designed and manufactured, the experimental platform was built and the gravity balance device was experimentally verified. The simulation and experimental results are imported into MATLAB for data processing. The results show that the gravity balance device can realize the gravity balance of the manipulator.

**Key Words** Mechanical Arm; Gravity Balance; Mathematical Model; Dynamic Simulation

## 1 引言

随着机器人技术研究的不断深入,该技术已广泛应用于工业生产、医疗服务、航空军事等诸多领域,伴随而来的是对其控制精度要求的提高<sup>[1]</sup>。传统串联机械臂因自身重量不可忽略,运动过程中在关节处产生额外力矩,致使关节电机消耗大量能量用以克服自身重力。同时,随着关节电机负载的增大,机械臂运动控制难度提高,动态性能降低<sup>[2]</sup>。因此,机械臂在设计过程中,必须考虑其重力平衡问题,以减小驱动电机的负载,加快控制响应速度,提高操作精度和机械臂动态性能。

机械臂重力平衡方式主要分为主动式平衡和被动式平衡。所述主动式平衡是指在机械臂工作过程中,对其转动角度进行测量,并将信号输送至驱动器,驱动电机输出相反转矩,从而实现机械臂重力平衡,其缺点在于控制程序复杂<sup>[3]</sup>。所述被动式平衡是指采用机械结构进行自身重力平衡,在机械臂末端负载不变时,机

械臂无需电机提供转矩即可保持平衡,其控制难度低,应用广泛<sup>[4]</sup>。被动式重力平衡方式包括配重平衡机构、弹簧平衡机构、凸轮平衡机构<sup>[5-7]</sup>。配重平衡结构简单,但造成机械臂质量和惯性增加,动力学特性变坏,所需的驱动力矩增加。因此,配重平衡适用于重力矩小以及依靠调整元器件就能平衡的机械臂结构。弹簧平衡机构结构简单,重量轻,使用方便,工作可靠,平衡效果好,不会增加机器的负载与惯量,应用广泛,但在使用过程中弹簧长度无法调节,难以实现机械臂在不同载荷、不同位置下的重力平衡。凸轮平衡机构调整弹簧伸长方便,可有效实现重力平衡,且不会对惯性力产生太大影响,但其受到凸轮以及凸轮内部安装弹簧的限制,使得凸轮平衡机构承受载荷能力较小。因此,凸轮平衡机构多用于机械臂末端关节处,其分为拉伸弹簧式平衡、压缩弹簧式平衡和板簧式平衡三种<sup>[8-9]</sup>。

综合弹簧平衡机构和凸轮平衡机构进行机械臂重力平衡装

来稿日期 2019-05-04

作者简介 刘会英(1960-)女,山东威海人,硕士研究生,教授,主要研究方向:机械设计及理论、机器人技术;

李微微(1995-)男,安徽淮北人,硕士研究生,主要研究方向:机械设计及理论、机器人技术

置的设计 利用弹簧的拉力矩抵消大臂的重力矩 通过控制凸轮机构实现对板簧伸缩量的控制 以达到在任意位置均可以平衡小臂重力矩的目的。并对其进行 ADAMS 动力学仿真分析 验证重力平衡机构的正确性。最后 搭建实验平台 加工机械臂样机进行实验 完成对重力平衡机构平衡效果的验证。

## 2 机械臂数学模型

机械臂动力学特性是衡量机械臂性能的重要指标之一 通过分析未平衡机械臂与重力平衡机械臂间的动力学特性差异判断重力平衡对其动力学性能的影响。并将复杂机械臂模型简化为双关节杆件进行分析 未平衡杆件模型 如图 1(a)所示。忽略外界干扰因素 建立能量方程 图中  $l_1$  和  $l_2$ —大臂 1 和小臂 2 长度； $\theta_1$ —大臂 1 与竖直方向夹角  $\theta_2$ —大臂 1 与小臂 2 夹角  $l_{c1}$  和  $l_{c2}$ —大臂 1 和小臂 2 质心位置。

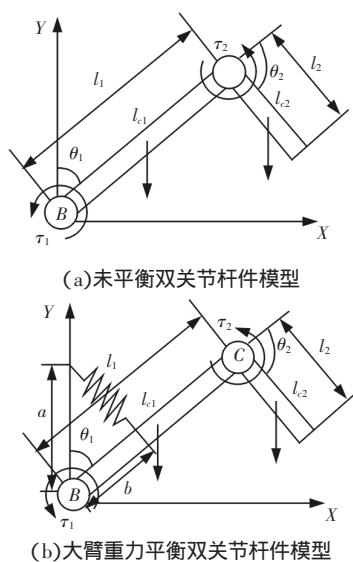


Fig.1 The Model of Double-Jointed Rod

由图 2(a)可知大臂 1 的质心坐标( $x_1$   $y_1$ )为：

$$\begin{cases} x_1 = l_{c1} \sin \theta_1 \\ y_1 = l_{c1} \cos \theta_1 \end{cases} \quad (1)$$

小臂 2 的质心坐标( $x_2$   $y_2$ )为：

$$\begin{cases} x_2 = l_1 \cos \theta_1 + l_{c2} \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ y_2 = l_1 \sin \theta_1 + l_{c2} \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{cases} \quad (2)$$

未平衡双关节杆件总势能为：

$$E_p = m_1 g l_{c1} \cos \theta_1 + m_2 g [l_1 \cos \theta_1 + l_{c2} \cos(\theta_1 + \theta_2)] \quad (3)$$

如图 1(b)为大臂重力平衡双关节杆件模型 其中 弹簧刚度为  $k_1$  弹簧连接点与关节 B 的距离分别用  $a$ 、 $b$  表示 与无重力平衡杆件相比 重力平衡双关节杆件机构的势能除重力势能外还增加了弹性势能：

$$E_{pk} = \frac{1}{2} k_1 (a^2 + b^2 - 2ab \cos \theta_1) \quad (4)$$

大臂重力平衡双关节杆件机构总势能为：

$$E = m_1 g l_{c1} \cos \theta_1 + m_2 g [l_1 \cos \theta_1 + l_{c2} \cos(\theta_1 + \theta_2)] + \frac{1}{2} k_1 (a^2 + b^2 - 2ab \cos \theta_1) \quad (5)$$

通过添加机械臂重力平衡机构而产生的弹性势能与机械臂自身重力相平衡 从而改善机械臂动力学特性 提升机械臂性能。

## 3 重力平衡机构动力学分析

### 3.1 模型建立

参照 ABB 公司的 IRB-6660 型重载机械臂 搭建本设计中机械臂的三维模型 对机械臂的大、小臂进行重力平衡设计。如图 2(b)所示 在大臂和驱动臂座间安装弹簧 在大臂垂直摆动过程中 驱动臂座通过弹簧施加给大臂一个弹性力 从而平衡掉机械臂自身的重力 图 2(b)中所述关节采用凸轮-板簧式结构 具体的如图 2(a)所示 小臂相对大臂转动过程中 与大臂通过螺钉装配的板簧发生变形 产生的弹性力通过滚子螺栓传递给凸轮 所述凸轮与小臂固联 板簧的弹性力最终传递给小臂一个转矩 转矩跟小臂自身的重力矩相平衡 实现其重力平衡。

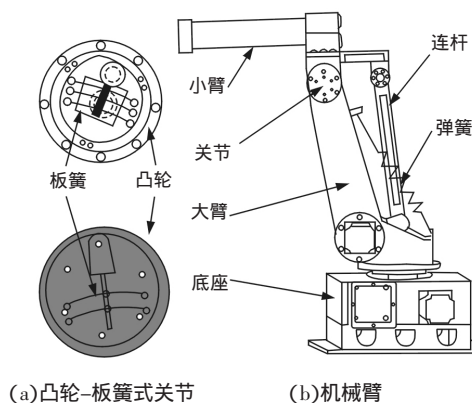


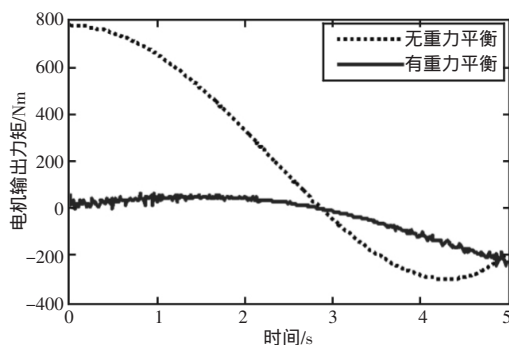
图 2 重力平衡机械臂

Fig.2 Gravity Balance Manipulator

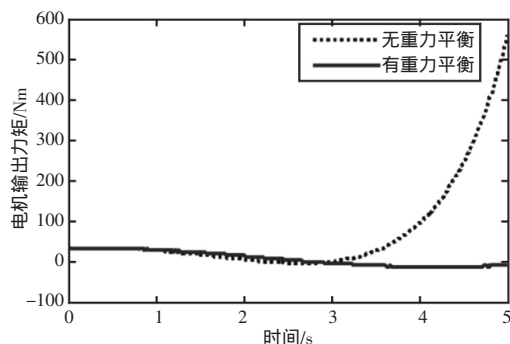
借助 ADAMS 仿真软件对重力平衡机构设计的合理性进行验证 将 SolidWorks 中建立的三维模型导入 ADAMS 之前 需要对模型进行简化 去除不必要的零部件、倒角、圆角以及孔洞 保留关键分析部件 简化后并导入 ADAMS 中 设定仿真参数 进行动力学仿真分析 并在后处理模块中得到电机输出力矩与时间之间的关系曲线<sup>[10]</sup>。

### 3.2 仿真结果分析

在 ADAMS 中分别对机械臂在有重力平衡机构和无重力平衡机构条件下进行动力学仿真 对比添加重力平衡机构前后电机输出力矩的变化 仿真结果 如图 3 所示。由图 3 可知 机械臂大臂电机输出力矩高于小臂电机输出力矩 添加重力平衡机构后 大臂电机和小臂电机输出力矩明显减小。仿真结果表明 该重力平衡机构能够实现机械臂的重力平衡。



(a)大臂电机输出力矩



(b)小臂电机输出力矩  
图3 驱动电机输出力矩

Fig.3 Output Torque of Drive Motor

## 4 重力平衡实验验证

### 4.1 实验台搭建

双关节机械臂样机如图4所示。采用PC机作为上位机,选用MAXON A-max 22 直流伺服电机和配套使用的EPOS 驱动器作为机械臂的驱动单元和控制单元。

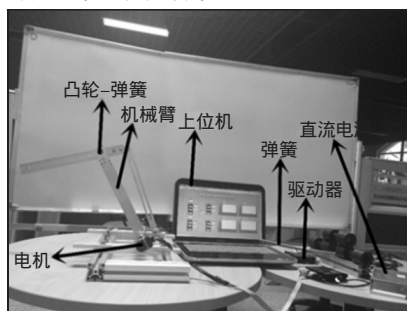
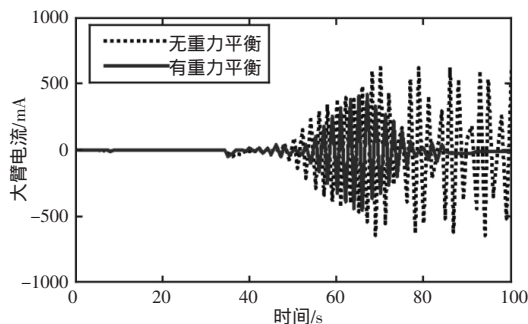


图4 重力平衡实验台

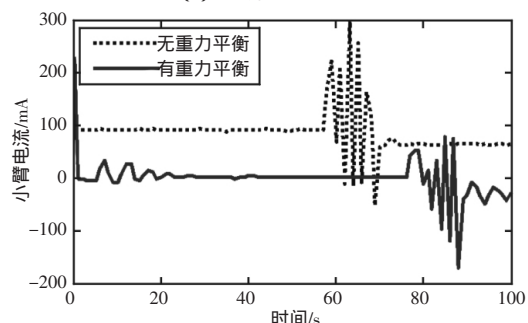
Fig.4 Test Station of Gravity Balance

### 4.2 实验及结果分析

将实验分为机械臂末端无负载、末端负载 50g、末端负载 100g 三种情况对电机性能进行分析,实验结果如图5~图7所示。



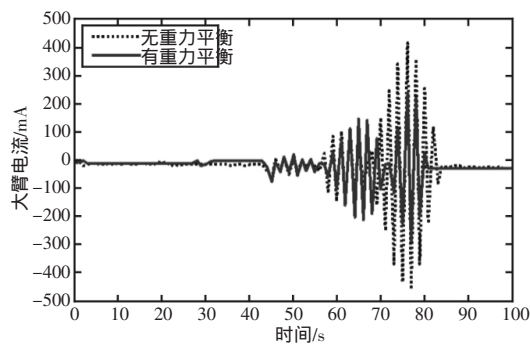
(a)无负载大臂电流



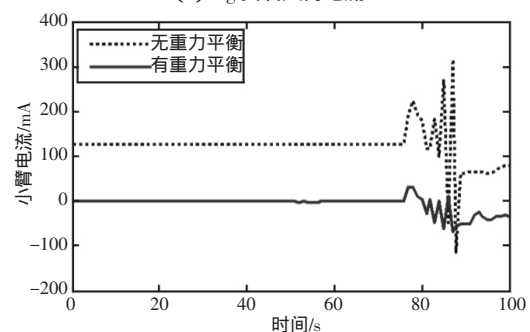
(b)无负载小臂电流

图5 无负载机械臂驱动电机电流

Fig.5 The Arm Drive Motor Current without Load



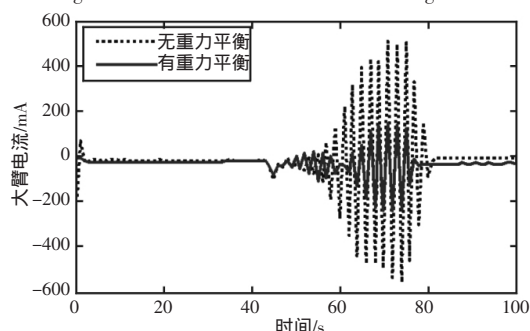
(a)50g 负载大臂电流



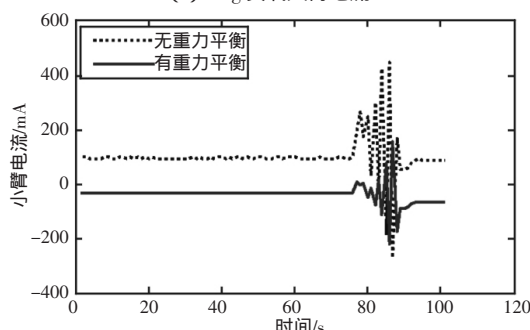
(b)50g 负载小臂电流

图6 50g 负载机械臂驱动电机电流

Fig.6 The Arm Drive Motor Current at 50g Load



(a)100g 负载大臂电流



(b)100g 负载小臂电流

图7 100g 负载机械臂驱动电机电流

Fig.7 The Arm Drive Motor Current at 100g Load

由实验结果可知,在机械臂末端无负载、负载 50g、负载 100g 的情况下,大、小臂添加重力平衡之后,驱动电机电流均得到明显的减小,实验结果表明,该重力平衡机构能够平衡机械臂的重力。

## 5 结论

综合应用弹簧重力平衡装置和凸轮-板簧重力平衡装置,进行机械臂重力平衡装置的设计,建立双关节机械臂在有重力平衡机构和无重力平衡机构条件下的能量数学模型。(下转第 50 页)

达百根,滚轴两端若采用常规切削圆料,加工量大,采用模具加工,切削工作极大的减少,因此,该滚轴两端模具成型。通过上述方法加工的滚轴,已能够很好地应用在南极磷虾脱壳设备中。

## 5 结语

(1)分析了工艺需求的特点,并建立面向用户、设计信息、企业内部、社会环境和服务能力的工艺需求获取方法模型。

(2)运用 KJ 法从深度和广度的方向对工艺需求进行归类组织,在此基础上借助于 AHP 对工艺需求进行评估,并利用 QFD 理论将工艺需求转换为相应的工艺特征,完成了对工艺需求的组织、分析与转化。

(3)运用 TRIZ 理论对工艺特征进行分析,最后生成可满足工艺需求的工艺创新设计方案。

工艺需求导向贯穿整个工艺创新设计过程,有效服务于工艺创新设计,使其变得有章可循。上述提出的以工艺需求的获取、管理、评价和转换为流程的工艺创新设计方法是一种工艺创新模式的初步尝试,还不完善。工艺创新设计过程本身是一项系统而复杂的工作,如何将工艺需求进一步具体化,如何将工艺特征进一步细化到工步等,这些问题还需深入研究。

## 参考文献

- [1] J. Chosson H. Ruf. The influence of leadership on product and process innovations in China: The contingent role of knowledge acquisition capability[J]. Industrial Marketing Management 2015(50): 18-29.
- [2] Xiaojun Pan, Shoude Li. Dynamic optimal control of process-product innovation with learning by doing [J]. European Journal of Operational Research 2016 248(1): 136-145.
- [3] 王志勇, 赵武, 王晨. 面向创新方法的切削工艺知识库研究[J]. 机械设计与制造 2016(2): 26-28.
- (Wang Zhi-yong Zhao Wu, Wang Chen. Research on the cutting process knowledge base based on innovation design method[J]. Machinery Design & Manufacture 2016(2): 26-28.)
- [4] 考书婷, 乔立红. 基于多色集合的工艺动态场景映射技术[J]. 计算机集成制造系统 2013, 19(5): 946-953.
- (Kao Shu-ting Qiao Li-hong. Mapping technology for process dynamic setting by polychromatic sets[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems 2013, 19(5): 946-953.)
- [5] 郑联语, 唐晓青, 汪叔淳. 基于 QFD 的数控加工工艺质量优化规划方法[J]. 机械工程学报 2001, 37(8): 38-42.
- (Zheng Lian-yu, Tang Xiao-qing, Wang Shu-chun. QFD-based optimization planning for process quality in NC machining[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering 2001, 37(8): 38-42.)
- [6] 邓家祺, 韩晓建, 曾硝. 产品概念设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- (Deng Jia-ti, Han Xiao-jian, Zeng Xiao. Product Conceptual Design[M]. Beijing: China Machine Press, 2002.)
- [7] 王莲芬, 许树柏. 层次分析法引论[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2002.
- (Wang Lian-fen, Xu Shu-bai. Analytic Hierarchy Process: An Introduction[M]. Beijing: China Renmin University Press, 2002.)
- [8] Y. Akao. Quality Function Deployment: Integrating Customer Requirements into Product Design[M]. Cambridge: Productivity Press, 2004.
- [9] 李彦, 李文强. 创新设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- (Li Yan, Li Wen-qiang. Method to Creative Design[M]. Beijing: Science Press, 2013.)
- [10] 郑晓伟, 沈建. 南极磷虾捕捞初期适宜挤压脱壳工艺参数[J]. 农业工程学报 2016, 32(2): 252-257.
- (Zheng Xiao-wei, Shen Jian. Appropriate shelling process parameters of Antarctic krill at initial stage of fishing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering 2016, 32(2): 252-257.)

(上接第 46 页)

以 IRB-6660 型重载机械臂为参照, 建立机械臂仿真模型并进行 ADAMS 动力学仿真, 仿真结果表明添加重力平衡装置后, 大臂电机和小臂电机输出力矩明显减小。以等比例缩小方式设计加工双关节机械臂样机进行实验验证, 实验证实大、小臂添加重力平衡后, 驱动电机电流均得到明显的减小。综合仿真与实验结果可以得出该重力平衡机构具有良好的重力平衡效果, 能够有效实现对机械臂的重力平衡的结论。

## 参考文献

- [1] 袁亮, 于春梅. 虚拟样机环境下机械臂模型验证与控制系统仿真[J]. 机械设计与制造 2016(5): 5-8.
- (Yuan Liang, Yu Chun-mei. Mechanical arm model validation and control system simulation under virtual prototype environment [J]. Machinery Design and Manufacture 2016(5): 5-8.)
- [2] 安彦波, 高娃, 宋宝玉. 关节机器人机械臂自重的电机补偿[J]. 机械工程师 2008(9): 38-39.
- (An Yan-bo, Gao Wa, Song Bao-yu. Motor compensation of robot arm of joint robot[J]. Mechanical Engineer 2008(9): 38-39.)
- [3] Kenan Koser. A cam mechanism for gravity-balancing [J]. Mechanics Research Communications 2009(4): 523-530.
- [4] Arakelian V, Briot S. Balancing of Linkages and Robot Manipulators: Advanced Methods with Illustrative Examples[M]. Springer, 2015.
- [5] Arakelian V. Gravity compensation in robotics[J]. Advanced Robotics, 2016, 30(2): 79-96.
- [6] Arakelian V, Briot S. Gravitational Force Balancing of Robotic Systems [M]. Springer: Balancing of Linkages and Robot Manipulators, 2015: 241-269.
- [7] 刘爽, 崔建昆. 用于机械臂重力补偿的凸轮拉簧机构研究[J]. 农业装备与车辆工程 2017(7): 49-53.
- (Liu Shuang, Cui Jian-kun. Study on weight compensation mechanism with a cam tension spring mechanism[J]. Agricultural Equipment and Vehicle Engineering 2017(7): 49-53.)
- [8] Plooi M, Wisse M. A Novel Spring Mechanism to Reduce Energy Consumption of Robotic Arms[J]. IEEE Int C Int Robot 2012: 2901-2908.
- [9] Demeulenaere B, De Schutter J. Input torque balancing using an inverted cam mechanism[J]. Journal of Mechanical Design 2005, 127(5): 887-900.
- [10] 朱华炳, 张娟. 基于 ADAMS 的工业机器人运动学分析和仿真[J]. 机械设计与制造 2013(5): 204-206.
- (Zhu Hua-bing, Zhang Juan. ADAMS-based analysis and simulation of industrial robot kinematics[J]. Machinery Design and Manufacture 2013(5): 204-206.)