

基于外摩擦的医疗机器人关节锁紧结构实验研究

王洪建¹, 曹彤¹, 刘达², 唐粲²

(1. 北京科技大学机械工程学院, 北京 100083; 2. 北京航空航天大学机器人研究所, 北京 100083)

摘要: 分析了目前机器人锁紧机构的发展现状, 介绍了医疗机器人系统的工作原理. 基于机器人关节摩擦力矩产生的机理, 阐述了机器人关节锁紧的影响因素. 通过相关的实验研究及分析, 确定了影响机器人关节锁紧能力的主要因素, 获得了机器人关节锁紧能力与活塞尺寸、内腔尺寸、摩擦环材料和尺寸及液压油粘度等影响因素的基本关系.

关键词: 医疗机器人; 液压; 关节锁紧; 摩擦材料; 摩擦环; 粘度

中图分类号: TP242

文献标识码: B

Experimental Research on Lockup Structure of External Friction Based Medical Robot Joint

WANG Hong-jian¹, CAO Tong¹, LIU Da², TANG Can²

(1. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Robotics Institute, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: The state of the art of lockup mechanism is analyzed, and the principle of medical robot is introduced. Based on the friction moment principle of robot joints, the influencing factors of robot joint lockup are described. Main factors influencing the joint lockup performance are determined by experiments and analysis, and the basic relationship between the lockup performance of robot joints and the influencing factors, including piston diameter, cavity diameter, material of friction ring, friction ring average diameter and viscosity of hydraulic oil, is obtained.

Keywords: medical robot; hydraulic pressure; joint lockup; friction material; friction ring; viscosity

1 引言 (Introduction)

机器人在空间中保持指定的位置和姿态, 必须使其关节能在给定的位姿下锁紧, 因此机器人的关节锁紧成为机器人机构设计不可或缺的部分. 近几年, 医疗机器人逐渐开始应用于临床手术, 北京航空航天大学机器人所已经研制开发了 5 代医疗机器人^[1], 在这几代机器人的关节锁紧机构中, 主要采用了 3 种机构: (1) 电磁离合器锁紧机构, 即各关节上安装电磁离合器, 利用通断电后电磁离合器的开合实现关节的锁放; (2) 弹簧锁紧机构, 是一种机械适应式锁紧机构, 利用弹簧拉紧关节外圈, 使外圈与摩擦片抱紧实现锁紧功能; (3) 近期提出的液压锁紧机构, 利用活塞往复运动压缩液压油传递的压力使关节与摩擦环抱紧与松脱, 从而实现关节锁紧^[2]. 电磁离合器机构体积大、成本高, 安装复杂, 使得整个系统体积、成本随之增加; 弹簧锁紧机构中弹簧容易变形失效, 使得弹力越来越小, 而且摩擦片与

关节轴摩擦导致摩擦片及关节轴端面损耗, 使锁紧状态不稳定, 自主性差. 液压锁紧机器人机构主要依靠摩擦环与关节端面的摩擦力, 摩擦片不容易磨损失效, 锁紧力矩大, 同时, 关节锁紧靠流体压力, 操作方便, 使机器人系统结构紧凑, 提高了机器人的灵活性.

目前液压锁紧机构主要用于大型机床、冶金轧制机械和起重设备^[3], 大都由液压泵、油缸、各种阀门及锁紧机构组成, 体积较大, 结构复杂, 不适用于灵活性要求较高、体积要求紧凑的机器人系统.

通过上述对医疗机器人锁紧机构优缺点的比较并结合目前液压锁紧机构的应用现状, 本文针对基于外摩擦的液压机器人锁紧结构, 阐述了机器人系统的工作原理, 分析了锁紧机构摩擦力矩的影响因素, 并通过对不同直径活塞、不同材料摩擦环及不同粘度液压油的性能对比实验研究, 总结改进机器人关节锁紧能力的影响因素, 概括机器人关节锁紧

能力与活塞、内腔、摩擦环尺寸及升降压弹簧弹性系数之间几个因素的基本理论关系。

2 摩擦力矩的影响因素 (The influencing factors of friction moment)

图 1 是机器人关节锁紧结构简图, 关节产生摩擦力矩的机理主要是依靠弹簧在预紧压缩状态下的弹力使顶杆推动活塞, 活塞压缩液压介质, 使得关节接合面与摩擦环抱紧产生压力; 当拉伸钢丝时, 弹簧继续被压缩, 活塞后退, 使得关节可以松脱。以下从理论上分析摩擦力矩与各参数之间的关系。

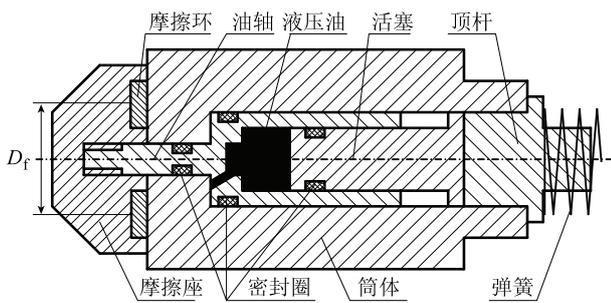


图 1 关节液压锁紧结构模型

Fig.1 Model of hydraulic joint lockup structure

根据液体的可压缩性、液体体积模量^[4]及体积公式的定义, 可知

$$K = -\frac{\Delta p}{\Delta V} \cdot V_0 \quad (1)$$

式中, K 、 Δp 、 ΔV 、 V_0 为液体体积模量、压强变化、活塞移动前后液体体积变化、初始体积。

$$V_0 = \pi \cdot \frac{\varphi_p^2 + \varphi_1^2}{4} \cdot L \quad (2)$$

式中, φ_p 、 φ_1 、 L 为活塞直径、内腔直径、内腔长度。

$$\Delta V = \pi \cdot \frac{\varphi_p^2}{4} \cdot X_p \quad (3)$$

式中, X_p 为活塞位移。

$$F = k \cdot X_s \quad (4)$$

式中, F 、 k 、 X_s 为弹簧弹力、弹簧刚度系数、弹簧形变。

$$M_f = \mu \cdot N \cdot D_f \quad (5)$$

式中, M_f 、 μ 、 N 、 D_f 为摩擦力矩、摩擦系数、正压力、摩擦环平均直径。

联立式 (1)~(5) 可得:

$$M_f = A \cdot \frac{\varphi_p^4}{\varphi_p^2 + \varphi_1^2} \cdot \mu \cdot D_f \cdot X_p \quad (6)$$

$$M_f = k \cdot X_s \cdot D_f \quad (7)$$

不计泄漏、阻尼, 由式 (6)、(7) 可知, M_f 与活塞直径 φ_p 、内腔直径 φ_1 、活塞位移 X_p 、摩擦系数 (摩擦材料) μ 、摩擦环平均直径 D_f 、弹簧形变 X_s 、弹簧刚度系数 k 有关, 以上变量中弹簧形变 X_s 与活塞位移 X_p 等值, 故理论上摩擦力矩 M_f 与 φ_p 、 X_p 、 D_f 、 μ 、 k 成正比, 与 φ_1 成反比。

以下实验针对 M_f 与各因素的关系, 验证以上推论是否与实验符合, 总结 M_f 与各因素的实际关系。由于 M_f 在机器人系统中通过末端承重体现, 以下实验分析末端承重与各因素之间的关系。

3 实验及分析 (Experiments and analysis)

由于在伸展状态下第 2 关节承受的力矩最大, 以下各实验数据是以末端静态承重时第 2 关节刚发生失效为临界状态 (经过实验验证, 在末端达到极限承载能力后, 第 2 关节最先发生失效), 在不计系统泄漏、液体阻尼、内摩擦等因素前提下, 就不同尺寸活塞、不同粘度液压油、不同材料及尺寸的摩擦环进行实验, 验证末端静载与上述因素的关系。

3.1 活塞直径与末端承重关系实验

实验器材为直径 5~10 mm 的活塞及附活塞腔的关节轴 (因实验条件所限)、弹簧秤, 依次更换活塞及关节轴, 并用弹簧秤测量末端承重 (图 2), 两者关系如图 3 所示。



图 2 使用弹簧秤测量末端承重

Fig.2 Measuring end load by spring balance

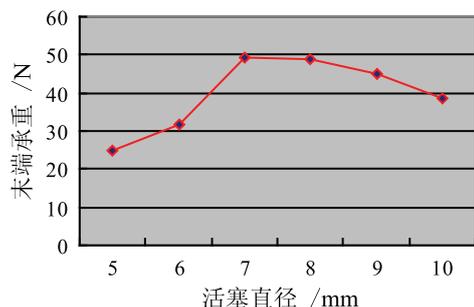


图 3 活塞直径与末端承重关系

Fig.3 The relationship between piston diameter and end load

由图 3 可知，在直径 5~10 mm 之间，活塞直径与末端承重，即活塞直径与机器人内部压强，并不是成线性关系的，在活塞直径为 7 mm 或 8 mm 时达到范围内最大值。可见实验结果与第 3 节的理论并不符合，原因主要是机器人系统内的介质液压油随着体积的变化混入其中的空气体积分数不规则引起的。由实验结果可知，活塞直径为 7 mm 时，系统达到最大压强。

3.2 不同粘度液压油与末端承重及压强敏感性关系实验

实验中准备 3 种液压油（32#抗磨液压油、46#抗磨液压油、10#航空液压油）^[5]，分别更换内腔中的液压介质，用弹簧秤测量末端承重（图 2）并记录数据如表 1 所示。

表 1 不同粘度液压油与末端承重关系实验数据

Tab.1 Experimental data of oils with different viscosities and end load

液压油牌号	10#航空液压油	L-HM32	L-HM46
运动粘度 /mm ² /s	10	32	46
末端承重 /N	50	49	48
压强敏感性	良	基本满足	稍差

由表 1 可知，机器人系统内液压介质对末端承重的影响并不突出。但是在实验中发现 3 种介质的压强敏感性是不同的。压强敏感性指的是在加压到降压过程中，系统压降大小引起的关节摩擦锁紧灵敏程度，例如系统的压强为 10 MPa，当液压介质为 L-HM32 时，降压后为 2 MPa；当液压介质为 L-HM46 时，降压后系统压强为 4 MPa，不同介质下产生的压降 Δp 不同，即 Δp 为压强敏感性的直观反映。

由实验可见，介质粘度对末端承重影响不突出，但是对压强敏感性影响较显著，介质的粘度与压强敏感性成反比，如图 4 所示。

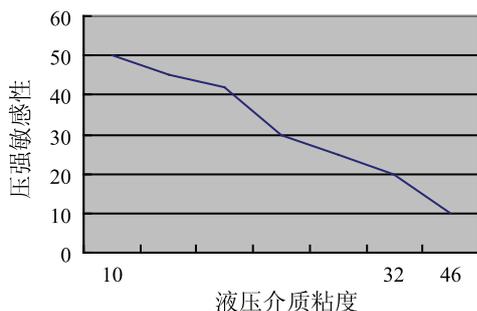


图 4 压强敏感性与液压介质粘度关系

Fig.4 The relationship between pressure sensitivity and viscosity of hydraulic medium

3.3 摩擦环材料与末端承重关系实验

本实验目的之一是测试不同材料摩擦环的性能，二是测量系统内部的实际压强范围。

实验过程中分别就 6 种不同材料的摩擦环进行实验，分别是 45#钢、紫铜 (T2)、灰铸铁 (HT250)、黄铜 (H62)、夹布胶木、尼龙 66。

实验过程将机器人第 2 关节更换黄铜 (H62) 材料摩擦环，使用油泵对机器人系统内部加压，油泵供油压强设定依次在 2~12 MPa，压强数值由压力表读取，黄铜 (H62) 材料摩擦环下测试 3 组数据后取平均值。黄铜 (H62) 材料摩擦环实验完成后，更换其它材料摩擦环，重复以上步骤，完成 6 种材料的实验。各种材料测量数据的平均值见表 2。

表 2 不同压强下不同材料摩擦环与末端承重关系实验平均数据值

Tab.2 Experimental average values of friction rings of different materials and end load under different pressures

油泵压力 /MPa	末端承重 ×9.8 /N					
	H62	45	T2	尼龙 66	HT 250	夹布胶木
2	0.600	0.750	0.600	1.250	0.850	1.000
3	1.475	1.350	1.225	1.750	1.375	1.700
4	2.050	1.775	1.725	2.475	1.850	2.450
5	2.725	2.150	2.125	3.300	2.350	3.225
6	3.400	2.550	2.550	3.850	2.900	3.900
7	3.875	3.050	3.075	4.475	3.425	4.550
8	4.275	3.400	3.550	5.550	3.925	5.325
9	4.800	4.050	4.175	6.300	4.250	5.950
10	5.525	4.575	4.700	6.650	4.850	6.250
11	6.125	5.000	5.125	7.000	5.750	7.025
12	6.200	5.600	5.250	> 8.00	6.100	7.550

由表 2 数据，6 种材料摩擦环的摩擦性能图如图 5 所示。由图 5 可知，在 6 种材料的摩擦环中，尼龙 66 和夹布胶木的摩擦性能较好，在 0~8 MPa 时，两者性能没有显著差异，在 8~12 MPa 时，尼龙 66 的摩擦性能优于夹布胶木。对于机器人系统，摩擦环处长期承受压力，尼龙 66 容易发生塑性变形，会使尼龙 66 摩擦环产生压缩量，易使关节处两接触摩擦面松脱，进而导致摩擦状态不稳定，关于尼龙 66 摩擦环的变形分析有待进一步实验验证。目前本机机器人系统使用的是夹布胶木摩擦环。

以上实验主要依靠外部油泵供压使关节锁紧，此时系统内的压强就是外部油泵的压强，油泵压强范围是 2~12 MPa，因此在不使用外部油泵而使用机

机器人系统自身升压机构时,无法得到系统内部的实际压强.利用各种材料的摩擦环在机器人系统自身升压机构的作用下,即在系统内部实际压强下,测试末端的承重能力,见表3.通过与表2数据对比,可得出系统内部实际压强 P_1 的范围.

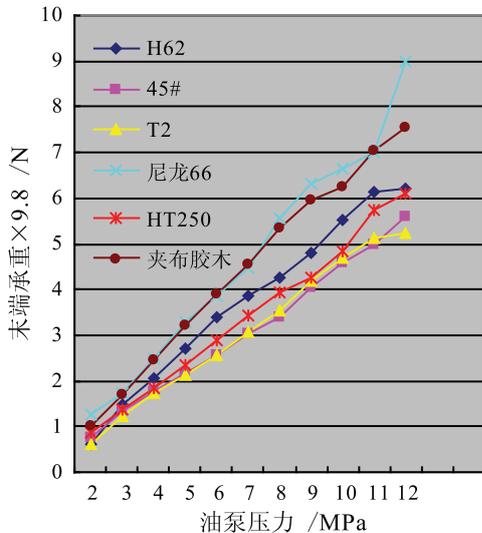


图5 不同油泵压强下6种摩擦环材料的摩擦性能图

Fig.5 The property of six kinds of friction ring materials under different pump pressures

表3 在内部系统供压时摩擦环材料与末端承重关系实验数据

Tab.3 Experimental data of ring material and end load under inner system pressure

摩擦环材料	H62	45	T2	尼龙66	HT250	夹布胶木
末端承重 $\times 9.8$ /N	4.85	4.40	4.60	6.05	5.40	6.00
P_1 /MPa	9.4	9.4	9.8	8.7	10.6	9.1

通过表3与表2数据对比,可知系统的内部压强 P_1 的范围应在8~10 MPa内,即 $8 \text{ MPa} \leq P_1 \leq 10 \text{ MPa}$,用线性插值法可得各种材料下的 P_1 值,然后求其平均值为9.5 MPa,即系统内部压强值约为9.5 MPa.

3.4 不同内腔直径与摩擦环直径实验

由实验条件所限,本实验只对两种尺寸的内腔直径和摩擦环平均直径进行实验.采用黄铜材料摩擦环,将内腔直径由3 mm减小到2.5 mm,末端承重由41.65 N增大到47.53 N,提高了14%,理论值应提高13.6%;摩擦环直径由35 mm增加到37.5 mm,末端承重由40.67 N提高到43.12 N,提高了6%,理论值应提高7.1%.

由以上数据可知,末端承重与内腔直径在局部范围内成反比,与摩擦环直径成正比.

4 结论 (Conclusion)

(1) 阐述了关节锁紧机器人影响摩擦力矩的各因素与内部压强的关系.

(2) 从实验角度验证了活塞尺寸、液压介质、摩擦环对机器人关节锁紧性能的影响,一是活塞尺寸与末端承重并不成线性关系,在直径为7 mm时达到极值;二是液压介质对末端承重影响并不突出,但对压强敏感性影响较为显著;三是摩擦环材料对末端承重影响较大,最终确定选用夹布胶木材料.

(3) 通过实验对比计算出机器人系统的内部压强约为9.5 MPa,对于机器人系统强度和刚度校核提供了重要的依据,有助于提高医疗机器人系统的安全性.

(4) 锁紧状态下,末端静态极限承载能力可达58.8 N,与前代样机相比,在末端承重和压强敏感性等性能上都有显著提高.

通过实验可知,机器人的末端诸影响因素是相互关联的,应进一步进行多目标优化,使机器人锁紧机构更趋于合理.

参考文献 (References)

- [1] 田增民, 卢旺盛, 王田苗, 等. 遥控操作机器人脑立体定向手术临床应用(附10例报道)[J]. 海军总医院学报, 2007, 20(2): 82~85.
Tian Zeng-min, Lu Wang-sheng, Wang Tian-miao, et al. Clinical application of robotic telemanipulation system in stereotactic surgery (10 cases reports)[J]. Journal of Naval General Hospital, 2007, 20(2): 82~85.
- [2] 刘达, 唐燊. CT导航微创外科机器人关节液压锁紧结构研究[J]. 机器人, 2008, 30(4): 298~303.
Liu Da, Tang Can. On hydraulically locking structure of robot joint for minimally invasive CT-guided surgery[J]. Robot, 2008, 30(4): 298~303.
- [3] 周立友. 大型镗床液压锁紧机构的调整[J]. 一重技术, 2006, (6): 74~75.
Zhou Li-you. The adjustment of hydraulically locking mechanism for large-scale boring machine[J]. Cfhi Technology, 2006, (6): 74~75.
- [4] 章宏甲, 黄谊, 王积伟. 液压与气压传动[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
Zhang Hong-jia, Huang Yi, Wang Ji-wei. Hydraulic and Pneumatic Transmission[M]. Beijing: China Machine Press, 2000.
- [5] 雷天觉, 杨尔庄, 李寿刚. 液压工程手册[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1998.
Lei Tian-jue, Yang Er-zhuang, Li Shou-gang. Manual of Hydraulic Engineering[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1998.

作者简介:

王洪建(1983-),男,硕士生.研究领域:医疗外科机器人.

曹形(1962-),女,副教授.研究领域:计算机图形学.

刘达(1972-),男,博士.研究领域:医疗机器人技术.