

水下七功能电动机械手设计研究

岳鹏^{1,2}, 张奇峰², 安晓卫¹, 曲风杰²

(1.沈阳理工大学 辽宁 沈阳 110016 2.机器人学国家重点实验室 中国科学院沈阳自动化研究所 辽宁 沈阳 110016)

摘要:以适用于水下自主作业的电动机械手为研究对象,通过设计一个具有六自由度和夹钳剪切功能机构,组建了一个水下自主作业七功能电动机械手。机械手主要包括三个基本运动模块和一个夹钳剪切模块,具有质轻,作业范围大,回收状态良好等特点;机械手实现了内部走线,深海密封作业,关节绝对位置的检测和高精度控制。介绍了水下七功能电动机械手的整体结构,典型运动模块结构和工作原理,并对机械手进行运动学分析及作业空间分析,对其关键关节进行静力学分析,动力学仿真和有限元分析,验证机械手结构设计的可行性。

关键词:结构设计 作业空间 七功能水下电动机械手 静力学分析 动力学仿真

中图分类号: TH16 ; TP241 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3997(2014)04-0114-04

Structure Design of 7F Underwater Electric Manipulator and Feasibility Analysis

YUE Peng^{1,2}, ZHANG Qi-feng², AN Xiao-wei¹, QU Feng-jie²

(1.Shenyang Ligong University, Liaoning Shenyang 110016, China 2.State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Liaoning Shenyang 110016, China)

Abstract Taking the electric manipulator as the research object which can operate autonomously underwater, through designing a mechanism with six degrees of freedom and a function of clipping and cutting, it forms a 7 function electric manipulator working autonomously underwater. The manipulator mainly includes two basic movement module and a clipping and cutting module, and possesses advantages of lightweight, large operating range and good recovery state; also, it achieves goals of cable going inside, deep-water-sealing operation, detection of the joint's absolute position and high precision control. It introduces the overall structure of underwater 7 function electric manipulator, the structure of its main movement module and working principle, and conducts analysis on the manipulator's kinematics and operating space, and carries out statics analysis, dynamic simulation and finite-element analysis on the main joint to prove the feasibility of the manipulator structure design.

Key Words Structure Design ; Operation Space ; 7 Function Underwater Electric Manipulator ; Statics Analysis ; Dynamics Simulation

1 引言

面临陆地资源的日益枯竭,向存储有巨大能源和矿物质的海洋进军已成为社会发展趋势。随着科学技术的快速发展,水下机器人已成为海底勘探和作业的一种重要装备,主要包括载人潜水器(Human Occupied Vehicle,简称HOV)、遥控潜水器(Remotely Operated Vehicle,简称ROV)和自主水下机器人(Autonomous Underwater Vehicle,简称AUV)。水下机器人可进行各种水下作业,包括海底地形勘探、矿物质勘探与采样、海底电缆埋设与维修、军事勘探与排雷作业等等。但是随着作业要求的提高,搭载作业机械手的新型自主水下机器人—UVMS(Underwater Vehicle-Manipulator System,简称UVMS)成为世界研究热点。UVMS不仅能自主航行,还具备一定的自主作业能力。UVMS系统主要包括载体系统—AUV和电动机械手作业系统。由于机械手载体的特殊性、航行和作业的高自治性、作业环境的严峻性,决定了水下其搭载的电动

机械手设计的高复杂性^[1-3]。目前国外在水下自主作业机械手领域技术较成熟的有夏威夷大学SAUVIM的水下机械手MARIS7080,意大利的AMADEUS水下双机械手系统和美国马西兰大学的SAMURAI极地海下电动机械手。国内仅有中国科学院沈阳自动化研究所、华中科技大学、浙江大学、哈尔滨工业大学等机构进行了初步研究,没有涉足UVMS七功能电动机械手设计领域。因此搭载于AUV上的电动机械手结构设计与研究具有很高的科研价值、社会价值和军事价值^[4-6]。介绍了水下七功能电动机械手的整机结构设计、主要模块设计、综合运动学建模及作业空间分析、肩部俯仰关节静力学分析及动力学仿真情况验证设计的可行性。

2 机械手结构设计

2.1 整机结构设计

针对机械手载体的特殊性,航行和作业的高自主性及作业环境的严峻性,此机械手的设计除了遵循一般机械手的设计规范

来稿日期 2013-09-14

基金项目 国家 863 项目(2012AA091101)

作者简介 岳鹏(1988-)男,山东临沂人,在读硕士研究生,主要研究方向 水下机械手方面的学习研究;

张奇峰(1979-)男,河南商丘人,博士,副研究员,主要研究方向 水下机器人方面的研究

外,还应满足以下几点要求:

(1)由于机械手搭载于 AUV 系统上,受 AUV 自带能源的局限性限制,在机械手框架结构设计、驱动组件和电位计的选择、密封件的选择过程中要遵循质量最轻量化原则。

(2)由于 UVMS 的机械手系统是自主作业系统,其自主程度很高,机械手必须具备关节传动的高刚性以及绝对位置检测和反馈功能。因此,在选择电机、减速机和电位计时要综合考虑额定性能指标、精度及其他原则等因素,做出最优选择。

(3)由于 UVMS 工作于水下,在航行过程中会遇到水阻力作用。因此,为了减少 UVMS 在航行中的阻力,减少其航行能耗,机械手各个关节采用圆柱形结构,当机械臂作业完毕回收时,大臂、小臂和腕部都平行于载体成折叠姿态,减小了航行时对载体产生的扰动。

(4)由于机械手在水下作业,机械手密封设计必须可靠,同时,通过特殊的结构设计满足各个关节的电源线和信号线全部配置于机械手内部,以确保机械手系统工作的独立性。机械手组成模块如图 1 所示。

水下 7 功能电动机械手具有六个自由度:分别为肩关节摆动、肩关节俯仰、肘关节俯仰、肘关节回转、腕关节俯仰和腕关节回转,同时,机械手拥有夹钳剪切功能,能完成夹持剪切作业,如图 1 所示。而且电源线和信号线能通过机械手内部传输,走线路径如图 1 中虚线所示。机械手的性能指标,如表 1 所示。

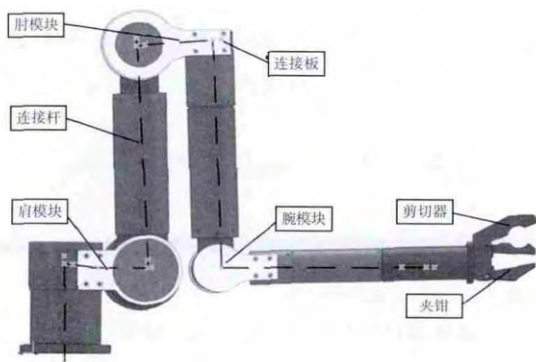


图 1 机械手组成模块
Fig.1 Modules of the Manipulator

表 1 机械手性能指标
Tab.1 Performance Indicators of Manipulator

运动功能		六自由度+抓取/剪切	
抓举能力		5kg	
关节活动范围	肩模块	摆动	±90°
		俯仰	±90°
	肘模块	俯仰	±90°
		回转	±90°
	腕模块	俯仰	±90°
		回转	±90°

2.2 典型模块设计

2.2.1 回转模块

回转关节包括:腕转关节外套筒、回转关节内套筒,法兰轴承、动密封件、静密封件、电位计、电位计固定板、传动轴、电机减速机组件及适配编码器,如图 2 所示。工作原理如下:

无刷直流电机通过传动轴与俯仰壳体相连,将扭矩传送到下一关节,完成下面关节的回转动作。电位计的转子与输出轴通

过螺钉连接,定子通过固定板与回转关节内套筒相连,当传动轴转动时,可完成关节运动角度的测量。

回转关节外套筒与内套筒通过法兰轴承连接,保证了相对转动的流畅进行,回转关节外套筒与内套筒通过旋转格莱圈进行动密封,回转关节外套筒与俯仰壳体通过 O 圈进行静密封,内套筒与上一连接件通过 O 圈进行静密封,将关节与外界隔离开。

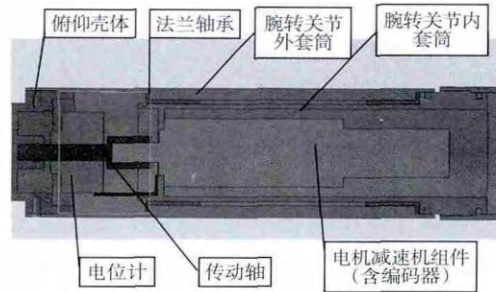


图 2 回转模块
Fig.2 Rotary Module

2.2.2 俯仰模块

俯仰关节包括:走线连接板、深沟球轴承、关节外壳、动密封件、传动连接板、静密封件、连接螺栓、谐波减速机组件、轴套、电位计、电位计定子固定板、无刷直流电机及适配编码器,如图 3 所示。工作原理如下:

无刷直流电机通过电机输出轴的轴套于谐波减速机相连,谐波减速机的输出端与传动连接板通过螺栓连接,将扭矩依次传到下一关节,完成下面关节的俯仰动作。

另一端,走线连接板与电位计的转子相连,电位计的定子通过固定板与模块外壳保持先对静止,当连接板转动时,可完成关节的转动角度的测量。

两连接板各通过一个深沟球轴承与关节外壳相连,通过旋转格莱圈进行动密封,既保证相对旋转运动的顺畅完成,又能将关节与外界隔离开。

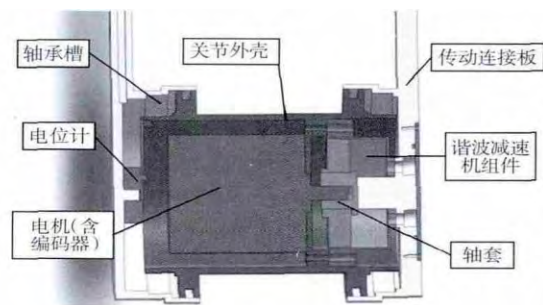


图 3 俯仰模块
Fig.3 Pitch Module

2.2.3 夹钳剪切模块

剪切夹钳关节包括:腕部连杆、直线电位计、电位计连接板、直线电机、剪切器组件和夹钳组件,如图 4 所示。工作原理如下:

直线电机带动推杆运动,推杆推动夹钳组件完成夹钳的张合,同时,当夹钳张开时,由一侧夹钳和固定刀组成的剪切器完成剪切动作。直线电位计的壳体与腕部连杆相连,内部的连杆通过电位计连接板与推杆相连,当推杆运动时,带动电位计连杆运动,完成直线运动位置的测量。

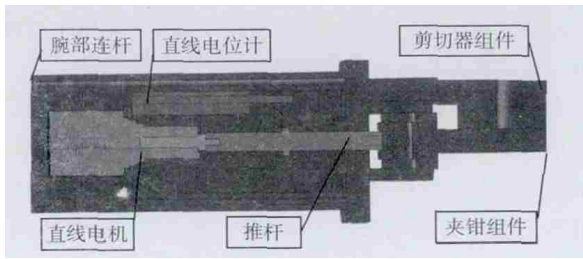


图4 夹钳剪切模块

Fig.4 Clamping and Shearing Module

3 运动学分析及作业空间

运动学的求解必须先在三维空间里建立坐标系，如图5所示，在水下7功能电动机械手上建立坐标系。

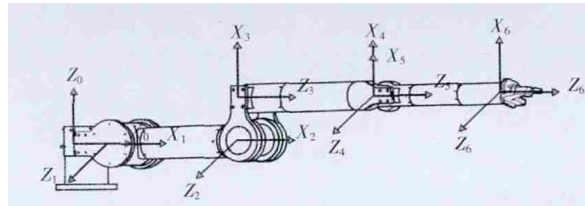


图5 坐标系的建立

Fig.5 Establishment of the Coordinates

机械手的参考坐标系为{0}，它固定在基座上。利用标准Denavit-Hartenberg 法则^[7-8]可得到各连杆的参数，如表2所示。

表2 机械手 D-H 参数表
Tab.2 D-H Parameter of Manipulator

<i>i</i>	<i>a_i</i> (mm)	<i>α_i</i> (°)	<i>d_i</i> (mm)	<i>θ_i</i> (°)
1	0	90	0	<i>θ</i> ₁
2	131	0	0	<i>θ</i> ₂
3	395	90	0	<i>θ</i> ₃
4	120	-90	419	<i>θ</i> ₄
5	0	90	0	<i>θ</i> ₅
6	0	0	379	<i>θ</i> ₆

连杆坐标系{*i*}相对于{*i-1*}系的连杆变换用^{*i-1*}*T_i*表示，连杆变换的通式为：

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -d_i s\alpha_{i-1} \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & d_i c\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

在代入连杆参数后，就可以求出⁰*T*₁、¹*T*₂、²*T*₃、……、⁵*T*₆。把这些连杆变换矩阵依次相乘就可以得到坐标系{6}相对于基坐标系{0}的变换矩阵：

$${}^0T_6 = {}^0T_1 {}^1T_2 \cdots {}^5T_6 \quad (2)$$

求出夹钳剪切器坐标系相对于参考坐标系的齐次变换矩阵，根据传感器测得的关节转角可以求出夹钳剪切器在参考坐标系下的位置与姿态信息。

对水下7功能电动机械手进行运动空间求解，得到机械手的运动空间，如图6所示。

4 静、动力学及有限元分析

通过分析可知，在作业空间中，机械手受力最大处位于肩部俯仰关节。因此，在负载5kg条件下，只要肩部俯仰关节满足静力学强度和动力学强度等条件，即证明机械手设计合理可行。

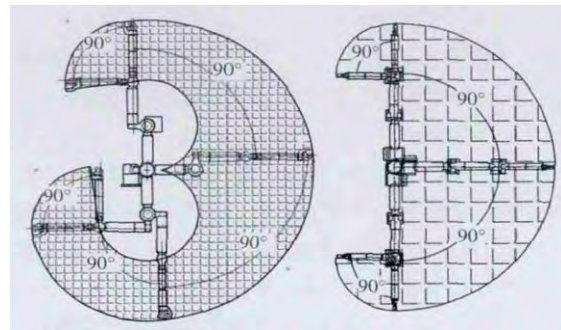


图6 机械手的作业空间

Fig.6 Workspace Envelope of Manipulator

4.1 肩部俯仰关节静力学分析

结合机械手的结构特点和指标要求，在机械手末端施加5kg载荷，当机械手完全水平伸展时，如图7所示。肩部俯仰关节受力最大，因此，对此姿态下的肩部俯仰关节进行静力学分析。

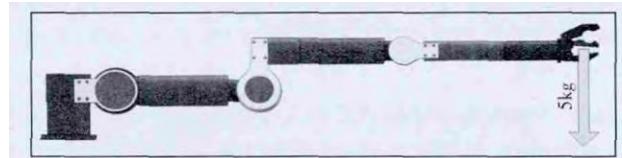


图7 肩部俯仰关节最大受力姿态

Fig.7 Maximum Force Posture of Pitching Shoulder Joint

当机械手处于图7所示姿态时，机械手本体自重产生的力矩为： $M_M = m_{\text{关节}} \times g \times L_1$ (3)

式中 $m_{\text{关节}}$ —在水下作用于肩部俯仰关节有效机械手本体总重，单位 kg； L_1 —该位置下有效机械手本体重心对关节回转中心的力臂，单位 m。

作用在机械手夹钳上的5kg负载产生力矩为：

$$M_L = m_{\text{负载}} \times g \times L_2 \quad (4)$$

式中 $m_{\text{负载}}$ —最大负载重量，单位 kg； L_2 —该位置下负载对关节回转中心的力臂，单位 m。

作用在减速机输出轴上的最大力矩： $M_d = M_M + M_L$ (5)

机械手在此姿态下，肩部俯仰电机转动需要的最小扭矩：

$$T = M_d / N \quad (6)$$

式中 N —与肩部俯仰关节电机适配的谐波减速机的减速比。

代入数据可得 $T = 616 \text{ mNm}$

又由 $T = 9550 P / n$

得 $n = 1550 \text{ r/min}$ (7)

式中 n —机械手在此姿态加最大负载情况下的最高转速，单位 r/min； P —肩部俯仰关节电机的额定功率，单位 kW。

由所选肩部俯仰关节电机及减速机资料知：

电机的额定扭矩为 284Nm，堵转扭矩为 3740Nm，额定转速为 3740r/min。由于关节最大瞬时扭矩小雨堵转扭矩，最高转速小于额定转速，故在短时间非连续工作时，所选电机的转速和扭矩满足机械手作业要求。减速机在输入转速为 1000r/min 时，额定输出扭矩为 72.5Nm，由于在非连续工作状态下，减速机的瞬时输出扭矩为连续工作状态下的 2.5 倍，即 181.25Nm，大于作用在输出轴上的最大力矩，故在短时间非连续工作时，所选减速机的输出扭矩满足机械手作业要求。

4.2 肩部俯仰关节动力学仿真和有限元分析

Recursive Dynami 是新一代多体系统动力学仿真软件,它采用相对坐标系运动方程理论和完全递归算法,非常适合于求解大规模的多体系统动力学问题。该软件求解速度快和稳定性好。将 SolidWorks 建立的虚拟样机导入到 Recurdyn 中,按照实际的受力、功能和连接关系将构件组合成目标模型。机械手为开链结构,底座及整个机械手简化为均质刚体,忽略构件之间的摩擦力。

设置仿真时间为 4s,设置仿真步数为 150,结合机械手实际作业运动规律,建立各个旋转副的速度函数,对末端夹钳关节施加载荷,即最大负载 50N。

通过动力学仿真,得到机械手肩部俯仰关节质心的力 F 、扭矩 T 、加速度 a 随时间 t 的变化曲线,如图 8 所示。由曲线可知,关节在运动过程中的力、扭矩、加速度变化平稳,没有出现突变状况。关节受到的最大扭矩为 98N/m,所选择的电机及减速机指标满足要求。

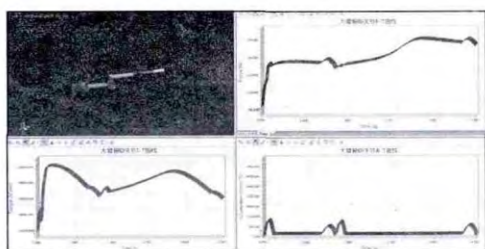


图 8 肩部俯仰关节力-时间、力矩-时间、加速度-时间曲线
Fig.8 F-t, T-t, a-t Curve of Pitching Shoulder Joint

为了校核在动力学仿真过程中肩部俯仰关节主要受力构件—肩部俯仰内套筒的强度,对其进行有限元分析。在 Recurdyn 中,对肩部俯仰内套筒建立有限元模型,按照上述动力学仿真步骤,进行动态有限元分析以用于强度校核,结果显示,如图 9、图 10 所示。

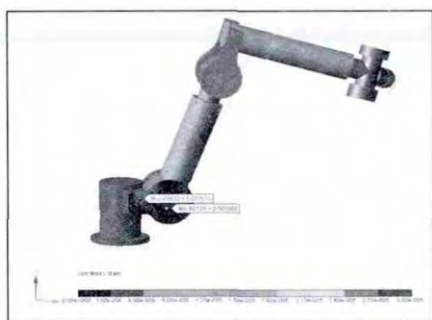


图 9 肩部俯仰内套筒有限元应变云图
Fig.9 Finite-Element Strain Nephogram of Pitching Shoulder Inner Sleeve

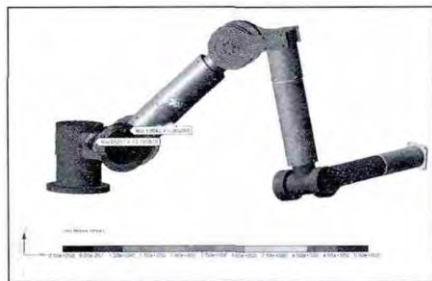


图 10 肩部俯仰内套筒有限元应力云图
Fig.10 Finite-element Stress Nephogram of Pitching Shoulder Inner Sleeve

肩部俯仰内套筒应力主要集中在与摆动关节连接处,最大应力为 13.19MP,远小于材料的屈服强度,最大应变为 0.000016mm,可以忽略不计。因此,通过对肩部俯仰内套筒的有限元分析可知,所设计的肩部俯仰内套筒结构强度、刚度满足条件。

4.3 结果分析

(1)通过对水下 7 功能电动机械手的运动学建模及分析,求得机械手的作业空间,验证了各个关节在指标要求范围内作业的可行性。(2)以肩部俯仰关节为例进行静力学分析,通过求得关节在最大负载下输出端的扭矩,验证了驱动电机及减速机选择的合理性。(3)以肩部俯仰关节为例进行动力学仿真,仿真过程中采用真实作业过程中关节运动的速度模型,结果表明关节的力、力矩及加速度变化平稳,没有出现突变情况,通过对关节的关键构件—肩部俯仰内套筒进行有限元分析,应力应变数值很小,留有充足的设计裕度,完全满足结构强度、刚度要求。

5 结论

根据水下机械手载体—AUV 航行作业及其环境特殊的特点,设计了一个具有六自由度和夹钳剪切功能的电动机械手,通过合理的布置各个关节的位置关系,实现了机械手大作业空间及良好的回收状态,机械手通过结构密封和密封件密封保证了机械手的密封性,实现了内部走线,同时,每个关节安装有电位计,可以完成关节转角的测量和高精度控制。最后通过对水下 7 功能电动机械手进行运动学建模、作业空间分析、肩部俯仰关节的静力学分析、动力学仿真和关键构件有限元分析,验证了本设计结构的可行性,为 UVMS 自主作业研究提供了硬件基础和理论支撑,进一步推进了我国 UVMS 自主作业研究的进程。

参考文献

- [1] 公丕亮,张奇峰.基于形态图的 UVMS 水下三维目标识别[J].机械设计与制造,2011(3).
(Gong Pei-liang, Zhang Qi-feng. UVMS underwater 3D object recognition based on shape figure [J]. Machinery Design and Manufacture, 2011(3).)
- [2] 孙昊.大潜深 AUV 纵向变结构控制研究[J].弹道学报,2012(4).
(Sun Hao. Big dive deep AUV longitudinal variable structure control research [J]. Journal of Ballistic, 2012(4).)
- [3] 刘运亮,张奇峰.模块化电动机械手设计与运动学分析[J].机械设计与制造,2012(3).
(Liu Yun-liang, Zhang Qi-feng. Modular electric manipulator design and kinematics analysis [J]. Machinery Design and Manufacture, 2012(3).)
- [4] Craig Lewandowski, David Akin, Barrett Dillow, Nicholas Limparis, Craig Carignan, Hanumant Singh, Robert Sohn. Development of a deep-sea robotic manipulator for autonomous sampling and retrieval [C]. 2008 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles, AUV, 2008(7).
- [5] 王宏建,王晶.基于组合 EKF 的自主水下航行器 SLAM[J].机器人,2012(9).
(Wang Hong-jian, Wang Jing. EKF autonomous underwater vehicle SLAM based on the combination [J]. Robot, 2012(9).)
- [6] John J. Craig. 机器人学导论[M].北京:机械工业出版社,2010.
(John J. Craig. Introduction to Robotics [M]. Beijing: Mechanical Industry Publishing House, 2010.)
- [7] 张奇峰,张艾群.基于能源消耗最小的自治水下机器人—机械手系统协调运动研究[J].机器人,2006(9).
(Zhang Qi-feng, Zhang Ai-qun. The autonomous underwater robot—manipulator system coordinated movement study based on the minimum energy consumption [J]. Robot, 2006(9).)
- [8] 封岸松,戴炬.冗余自由度机械手的避障控制[J].机器人,2002(10).
(Feng An-song, Dai Ju. Redundant dof manipulator obstacle avoidance control [J]. Robot, 2002(10).)