

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.09.002

新型模块化机械臂的研制及其有限元分析研究^{*}

王 阳, 郭林福^{*}

(北京交通大学 机械与电子控制工程学院, 北京 100044)

摘要:针对机械臂的设计特点和技术难点,对机械臂的本体结构进行了研究,提出了一种全新的模块化设计方法,该方法通过 Solidworks 建立了机械臂三维模型,进行了模块化机械臂伺服单元的设计。首先,对机械臂的电机和谐波减速器进行了选型,通过实验计算了不同关节角度的转矩,确定了最终的选择方案;然后,利用 Ansysworkbench 对机械臂的关键零部件进行了有限元分析,得出了机械臂第二关节等重要部件的应力和位移云图,从体积布局以及工作模式等角度进行了硬件设计,采用闭环控制算法和力反馈算法开发方案,实现了三闭环的伺服电机控制和一体化伺服驱动单元的力反馈;最后,在结构和算法的基础上开发出了 OUR 系列模块化机械臂。研究表明,关键零部件具有较大的刚度和强度,各关节具有高度的独立化和模块化。

关键词:三维建模;模块化;伺服驱动;有限元;闭环控制;力反馈

中图分类号:TP242;TH122;TH39

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)09-1044-07

Design and finite element analysis of new modular manipulator

WANG Yang, GUO Lin-fu

(School of mechanical and electronic control engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Aiming at the design features and technical difficulties, the main body structure of the manipulator was studied. A new modular design method was put forward, which is based on Solidworks, and the design of modular manipulator servo unit was carried out. The motor and harmonic reducer of manipulator were selected. The torque of different joint angles was calculated and the final selection scheme was determined. The finite element analysis of the key parts of the manipulator was made by using Ansysworkbench, and the stress and displacement contour of the important parts such as the second joints of the manipulator were obtained. The hardware design was carried out from the angle of volume layout and working mode. Closed loop control algorithm and force feedback algorithm were used to realize the force feedback of three closed loop servo motor control and integrated servo drive unit. Finally, based on the structure and algorithm, a series of OUR modular manipulators were developed. The research results indicate that the key components have large stiffness and strength, each joint has a high degree of independence and modularization.

Key words: 3D modeling; modularization; servo drive; finite element; closed loop control; force feedback

0 引言

促进机器人标准化、模块化发展,关键要突破机器人本体、减速器、伺服电机、控制器、传感器与驱动器等关键零部件及系统集成设计制造等技术瓶颈。为此,

遨博(北京)智能科技有限公司和北京工业自动化研究所共同研发了 OUR 系列模块化机械臂。

近年来,模块化机器人领域的主要研究主要有:优越机器人以模块化、轻型、安全为特点,但是在价格方面没有太多优势。Rethink 公司的拟人型模块化机器

收稿日期:2016-04-14

基金项目:北京市科技计划资助项目(D16110400290000, D161100002916001)

作者简介:王 阳(1989-),男,河北保定人,主要从事机器人设计与控制方面的研究. E-mail:1185288120@qq.com

通信联系人:郭林福,男,副教授,硕士生导师. E-mail:lfguo@bjtu.edu.cn

人采用降低成本的方案设计了双臂机器人 Baxter,但是采用较低端部件,使精度降低。目前,国内众多的科研机构、公司也都投入到模块化机器人的研究、设计、制造当中,但现有的模块化机器人平台或多或少存在以下缺陷:主动模块的输出力矩小,系统的性能不高,没有完全实现硬件与软件的模块化以及硬件模块与软件模块的对应等特点。OUR 系列机器人本体模仿人的手臂,共有 6 个关节,每个关节由高性能伺服电机、谐波减速器、机械刹车、驱动器和通信总线组成。其中机器人驱动模块采用遨博公司专有技术 OURDrive,实现了关节模块的大扭矩和电机细分驱动控制。

本研究针对机械臂的设计特点和技术难点,对机械臂的本体结构进行研究。

1 机械臂的结构设计

本研究利用 Solidworks 建立了 OUR 六自由度机械臂三维模型,如图 1 所示。

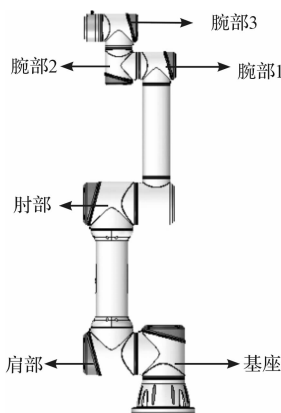


图 1 三维模型

OUR 六自由度机械臂是由 6 个旋转关节构成,每一个关节都是一个独立的模块单元。这样可以减少零件数量,更加快速地满足个性化需求。

2 一体化伺服驱动单元模块化结构设计及分析

每个一体化伺服驱动单元内部包含完整的机械结构和控制电路,并且设计了一种通用快速连接机构,实现机械与电气上的快速连接。每一个伺服驱动单元内部存储器保存了配置、校准、位置等信息,保证每个关节可插拔和快速替换^[1]。

一体化伺服驱动单元的设计主要包括以下几个部分:①壳体及支撑结构;②空心无刷伺服电机;③旋转编码器和绝对编码器;④电子刹车电路;⑤伺服驱动电

路;⑥减速机构总成。由于减速比较大,本研究用谐波减速器和一级直齿轮构成两级减速,这样也可方便通过更换齿轮配比、在同一模块上实现不同的转速和扭矩。

一体化伺服单元的机械结构图如图 2 所示。

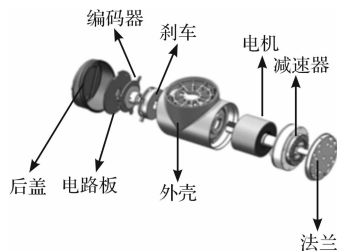


图 2 一体化伺服驱动单元机械结构

2.1 驱动系统的设计

2.1.1 设计分析方法

驱动系统的设计必须简单、可靠性强^[2]。首先,本研究选择交流伺服电机,交流伺服电机的响应性和可靠性都比较好,而且过载能力较强,启动和制动转矩都比较大。其次是电机减速方案的设计,谐波传动具有传动精确、相对简单、可以获得较大的传动比等优点^[3]。考虑到六自由度机械臂结构比较简单,为了减少系统质量和电机输出的扭矩,提高机械臂的紧凑型和稳定性^[4-6],本研究采用谐波传动作为减速方案。因此驱动系统的最终方案是交流伺服电机和谐波减速器。

各关节的动力参数要求是各关节的驱动元件和传动件选型的重要依据^[7]。由机器人动力学知识可知,完整的机器人动力学方程具有如下形式:

$$\boldsymbol{Q} = \boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{F}(\dot{\boldsymbol{q}}) + \boldsymbol{G}(\boldsymbol{q}) \quad (1)$$

式中: $\boldsymbol{q}$ —关节位置向量; $\dot{\boldsymbol{q}}$ —关节速度向量; $\ddot{\boldsymbol{q}}$ —关节加速度向量; $\boldsymbol{M}$ —惯性张量; $\boldsymbol{C}$ —与哥氏加速度和向心加速度有关的量; $\boldsymbol{F}$ —与粘性摩擦和库仑摩擦有关的量,它还与关节转角位置有关; $\boldsymbol{G}$ —惯性负载; $\boldsymbol{Q}$ —关节广义力向量。

在设计时,机器人的动力参数计算方法主要有两类:一是静力学方法,二是动力学方法。对于低速机械,其运动构件因惯性力而引起的动载荷不大,即式中 $\boldsymbol{C}$ 项的影响很小,可以忽略不计,同时也可以忽略摩擦力的因素。这种不计动载荷而仅考虑静载荷的计算称为静力学计算。对于高速运动,由于其动载荷很大, $\boldsymbol{C}$ 项的影响很大,往往大大超过其他静载荷,不能忽略不计,且粘滞摩擦也须加以考虑,这种同时涉及静载荷和动载荷的计算称为动力学计算^[8]。考虑到机械臂是安装在移动机器人平台上,只要动作协调,并不要求工业

机器人那样必须达到很快的移动速度,所以机械臂各个关节的速度比较低,于是本研究采用静力学方法来估算机械臂所需要的力矩^[9]。

2.1.2 关节力矩的计算及结构选型

机械臂一个工作循环由正行程和返回行程组成,而一个行程则由加速、匀速、减速和停止四个部分组成,结合实际工作情况,工作循环的各部分时间如表 1 所示。

表 1 工作循环的各部分时间

行程	正程				回程			
运动过程	加速	匀速	减速	停止	加速	匀速	减速	停止
时间 /s	0.2	0.4	0.2	0.5	0.2	0.4	0.2	0.5

(1) 1 ~ 3 关节减速比为 120, 关节最大速度为 120°/s, 对应电机转速为 2 400 r/min, 4 ~ 6 关节减速比为 100, 关节最大速度转速为 180°/s, 对应电机转速为 3 000 r/min。

(2) 减速器传动效率设为 60%, 考虑到最差情况及其他机械摩擦损失, 系统的总体传动效率设为 50%。

在计算转矩之前, 首先确定各个关节的最大角速度。各个关节的转矩主要由两个部分构成, 负载转矩和负载转动产生的转动转矩。各个关节的角速度和角加速度如下:

$$\omega_{j_{\max}} = 120^\circ/\text{s} \quad (2)$$

$$\omega_{j_{\max}} = 180^\circ/\text{s} \quad (3)$$

式中: $\omega_{j_{\max}}$ —前 3 个关节的角速度上限, $\omega_{j_{\max}}$ —后 3 个关节的角速度上限。

由角速度和加速时间可以求角加速度如下:

$$\alpha_{j_{\max}} = \frac{\omega_{j_{\max}}}{t_1} \quad (4)$$

$$\alpha_{j_{\max}} = \frac{\omega_{j_{\max}}}{t_1} \quad (5)$$

式中: t_1 —加速时间。

最终可以得到机械臂各关节角的运动参数如表 2 所示。

表 2 机械臂各关节角的运动参数

关节编号	J_1, J_2, J_3	J_4, J_5, J_6
关节角速度上限 $\omega_{j_{\max}}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	2.11	3.14
关节角加速度上限 $\alpha_{j_{\max}}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-2})$	10.45	15.7

各个关节输出转矩主要由两个部分构成, 负载转矩和负载加速转动惯量产生的转矩, 负载转矩:

$$T_1 = \sum m_i L_i \times g = M \times g \times L = 112.35 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (6)$$

式中: m_i —除去 1 关节外的各个部件所有质量之和,

L_i —该轴与过质心的轴的距离, L —整体质量质心到关节 2 的距离。

利用 Solidworks 可以测得 $M = 19.83 \text{ kg}$, $L = 0.578 \text{ m}$, $I = 3.39 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。

转动惯量计算如下:

$$J = I + \sum m_i L_i^2 = 9.93 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (7)$$

式中: J —刚体的转动惯量, I —绕通过质心转轴的转动惯量。

通过上述公式, 可以计算各模块的转动惯量。设定了旋转关节模块的角加速度后就可以计算加速惯性扭矩:

$$T_2 = J \times \alpha_{j_{\max}} = 103.74 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (8)$$

由此可得 2 关节所受最大力矩:

$$T = T_1 + T_2 = 216.10 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (9)$$

又因为减速器的传动效率为 50%, 减速比为 120, 可以得到电机克服重力的转矩如下:

$$T_g = \frac{T_1}{\eta \times i} = 1.87 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (10)$$

电机的加速转矩如下:

$$T_a = \frac{T_2}{\eta \times i} = 1.73 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (11)$$

式中: i —减速比, η —传动效率, T_1 —负载转矩, T_2 —加速惯性扭矩。

电机受到的总力矩:

$$T = T_g + T_a = 3.6 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (12)$$

电机的最大功率:

$$P = \frac{T \times n}{9\,550} \quad (13)$$

式中: P —电机功率, n —电机转速, T —电机承受力矩。

代入 $T = 3.6 \text{ N/m}$, $n = 2\,400 \text{ r/min}$, 可以计算 2 关节最大功率 $P = 905 \text{ W}$ 。

电机的最大功率主要由两个部分构成, 电机克服重力转矩消耗的功率 P_g 以及电机加速扭矩对应的功率 P_a 。采用如下公式计算:

$$T_g = \frac{9\,550 P_g}{n} \quad (14)$$

$$T_a = \frac{9\,550 P_a}{n} \quad (15)$$

式中: T_g —电机克服重力转矩, T_a —电机加速扭矩, P_g —电机克服重力转矩消耗的功率, P_a —电机加速扭矩对应的功率。

最后算得 $P_g = 470 \text{ W}$, $P_a = 430 \text{ W}$ 。

因此可以算得电机的平均功率如下:

$$P = \frac{P_g t_1 + P_a t_2 + P_g t_3}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4} = 276.88 \text{ W} \quad (16)$$

式中: t_1, t_2, t_3, t_4 —加速,匀速,减速和停止的时间。

2 关节减速器的平均负载转矩由平均负载转矩公式可以算得 $T_r = 158.6 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

依次可以计算 1、2、3、4、5、6 各个关节需求扭矩及电机扭矩和功率,计算结果如表 3 所示。

表 3 各关节需求扭矩及电机扭矩和功率

关节编号	关节静扭 矩/ $\text{N} \cdot \text{m}$	关节加速 扭矩/ $\text{N} \cdot \text{m}$	关节最大 扭矩/ $\text{N} \cdot \text{m}$	减速器平均 扭矩/ $\text{N} \cdot \text{m}$	电机循环平均 功率/ W	电机克服重力 扭矩/ $\text{N} \cdot \text{m}$	电机加速 扭矩/ $\text{N} \cdot \text{m}$	电机最大 扭矩/ $\text{N} \cdot \text{m}$	电机瞬时 最大功率/ W
1 关节	0.00	103.74	103.74	69.84	64.85	0.00	1.73	1.73	434.53
2 关节	112.35	103.74	216.10	158.60	276.88	1.87	1.73	3.60	905.12
3 关节	52.14	32.43	84.57	64.50	117.68	0.87	0.54	1.41	354.22
4 关节	17.06	7.63	24.69	19.40	54.31	0.34	0.15	0.49	155.09
5 关节	15.06	6.67	21.73	17.05	47.74	0.30	0.13	0.43	136.54
6 关节	9.94	3.15	13.09	10.67	30.30	0.20	0.06	0.26	82.25

由以上各个关节计算的参数最终确定电机的选型如表 4 所示。

表 4 电机参数

参数	小电机	大电机
线反电势系数	11.12	11.09
计算线电阻/ Ω	<1.4	<0.3
额定转矩/ $\text{N} \cdot \text{m}$	0.48	1.59
计算额定功率/ W	150	500
定子总长度/ mm	29.4	38.5

其中 1~3 关节用的是大电机,4~6 关节用的是小电机。对比表 3 可以看到,对于 2 关节,达到设计性能指标所需要的电机最大功率和扭矩超过电机的额定功率和额定转矩近两倍,因此要求电机需要具备短时过载两倍的能力,即在最高转速 2 400/min 时,电机的最大扭矩仍能达到 3.6 $\text{N} \cdot \text{m}$,瞬时最大功率能达到 905 W,否则 2 关节将不能达到预定的速度和加速度性能。其他关节电机的需求转矩和功率均在电机的额定转矩和功率之内(4 关节电机需求转矩和功率比额定功率略大,但很接近),可以满足性能要求。

从循环平均功率看,大小电机的循环平均功率都比额定功率小很多,有较大的安全余量,电机应该不会因负载而过热。

2.1.3 减速器校核结果分析

目前所选系列的减速器相关参数如表 5 所示。

表 5 LHSG 系列减速器参数

减速器型号	减速比	平均负载 转矩/ $\text{N} \cdot \text{m}$	启动/停止 转矩/ $\text{N} \cdot \text{m}$	制动冲击 扭矩/ $\text{N} \cdot \text{m}$
LHSG—14	100	14	34	66
LHSG—17	100	49	66	134
LHSG—20	100	61	102	182
LHSG—25	100	133	194	351
	120	133	207	376
LHSG—32	100	267	411	800
	120	267	436	848

根据分析可以确定选择 LHSG-14/100 和 LHSG-25/120 两种型号,其中前者用于 4~6 小关节,后者用于 1~3 大关节。其中平均负载转矩为减速器长期工作时允许使用的平均扭矩,对应于表 3 中各关节的减速器循环平均转矩,启动/停止转矩为加减速过程中减速器可以承受的扭矩,对应于表 3 中的关节最大扭矩,制动冲击转矩为刹车时减速器可以承受的扭矩,因为目前的制动减速度小于起动加速度,所需要的制动扭矩也小于表 3 中的关节最大扭矩,即只要启动/停止转矩满足要求,则制动冲击扭矩也满足要求。

关节的各项需求扭矩都不能超过表 5 中减速器的对应扭矩,要留有较大余量。按照这一原则,可以看到除了 2 关节的需要的最大扭矩和平均扭矩都超过了 LHSG-25/120 型减速器的对应允许值,其他关节的需求最大扭矩和平均扭矩均在所选减速器的允许范围之内。为了解决 2 关节减速器超载的问题,可以采用两种办法,一是采用更大型号的减速器,二是限制 2 关节的运动范围,使其不要在水平位置附近工作。为了确定允许的工作范围,本研究对 2 关节在不同转角位置下工作时的最大扭矩和平均转矩进行了计算,结果如表 6 所示。

从表 6 可以看到,当 2 关节的工作行程中心位置偏离垂直线的角度在 50°时,减速器的需求平均扭矩为 135.72 $\text{N} \cdot \text{m}$,接近于 LHSG-25/120 型减速器的许用平均转矩 133 $\text{N} \cdot \text{m}$,为了安全起见,2 关节的工作行程中心位置偏离垂直线的角度要限制在 45°以内。需要注意的是,2 关节的最大转动角度仍可以偏离垂直线超过 45°,只是其工作行程的中心位置偏离垂直线的角度不能超过 45°,否则 2 关节减速器仍可能处于超载工作状态。

表 6 关节在不同转角位置工作时的关节扭矩和电机参数

工作中心位置 偏离垂线角度/(°)	关节静扭 矩/N·m	关节最大 扭矩/N·m	减速器平 均扭矩/N·m	电机循环平 均功率/W	电机克服重 力扭矩/N·m	电机加速 扭矩/N·m	电机最大 扭矩/N·m	电机瞬时最 大功率/W
90.00	112.35	216.10	158.60	276.88	1.87	1.73	3.60	905.12
80.00	110.65	214.39	157.09	273.66	1.84	1.73	3.57	897.97
70.00	105.58	209.32	152.63	264.09	1.76	1.73	3.49	876.73
60.00	97.30	201.04	145.39	248.47	1.62	1.73	3.35	842.07
50.00	86.07	189.81	135.72	227.27	1.43	1.73	3.16	795.01
40.00	72.22	175.96	124.05	201.14	1.20	1.73	2.93	737.01
30.00	56.18	159.92	110.96	170.86	0.94	1.73	2.67	669.82
20.00	38.43	142.17	97.13	137.37	0.64	1.73	2.37	595.48
10.00	19.51	123.25	83.28	101.67	0.33	1.73	2.05	516.24
0.00	0.00	103.74	69.84	64.85	0.00	1.73	1.73	434.53

2.2 机械臂关键零件的有限元分析

限于篇幅本研究只对其中的关键零部件进行受力分析。过程如下:首先利用 Solidworks 建立机械臂的简化模型,然后倒入 Ansysworkbench 软件,定义单元类型和材料属性,而后进行划分网格,施加约束和载荷以及后处理^[10]。最后得到机械臂的最大应变和最大应力。经上面分析,可以知道关节 2 的受力最大,并且在负载重力转矩和负载加速转矩共同作用下最大,最大转矩为 216.10 N·m。当机械臂处在水平位置向的位移图和应力云图如图 3 所示。

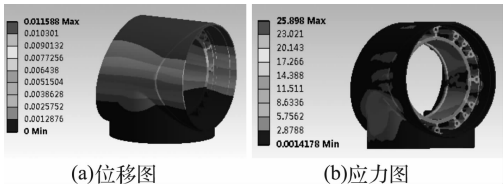


图 3 关节 2 的位移图和应力图

由分析可以知道,机械臂 2 关节的最大应力为 25.898 MPa,远小于该材料的屈服极限,最大变形发生在外壳的螺栓孔处。2 关节外壳的最大位移为 0.011 58 mm,它的变形对整个机械臂的定位精度较小,不会对机械臂的整个系统造成较大影响,这为机械臂后期的结构优化奠定了基础。

3 驱动控制系统设计方案

3.1 驱动控制系统硬件设计方案

根据总体设计指标,驱动控制系统的具体设计方案如下:

(1) 体积和器件布局。为了降低成本和方便维护,系列化的驱动单元拟采用相同的硬件设计,这就要求驱动器的体积能够同时满足不同系列驱动单元的需求,同时器件的布局应避免与模块内部的其他部件干涉^[11];

(2) 工作电压。根据总体设计方案,驱动器的工作电压设计为 12 V ~ 48 V,考虑到电机制动时的反向供电效应可能导致的电源升压,驱动器的耐压应不低于 60 V;

(3) 输出电流。根据机械臂的负载要求,扭矩折合到电机输出轴的输出扭矩约为 0.4 Nm。拟使用的电机转矩常数为 0.054 Nm/A,则驱动器需输出的最大电流约为 7.2 A。考虑到负载波动和可能出现的过流情况,驱动器输出电流应具备 2 ~ 3 倍的实际承受能力,因此驱动器的输出电流能力设为 20 A;

(4) 工作模式。根据总体设计方案,驱动器应能够工作在电流伺服模式、速度伺服模式和位置伺服模式;

(5) 通讯接口。根据总体设计方案,驱动器应具备 232 串行接口以及 CAN 总线接口。CAN 总线终端电阻可通过跳线方式选择。

3.2 闭环控制算法和力反馈算法开发方案

伺服电机采用三闭环的控制方法,其控制结构如图 4 所示。最外环是位置环,中间环是速度环,最内环是电流环。位置环的反馈误差经过位置调节器后作为速度环的目标值,速度环的反馈误差经过速度 PID 调节器后作为电流环的目标值,电流环的反馈误差经过电流调节器后作为最终的 PWM 调制器控制信号输入。三闭环伺服周期的确定要考虑 MCU 的计算能力、电机电气时间常数和机械时间常数等因素。

伺服驱动方法提供 3 种模式:位置伺服模式、速度伺服模式和电流伺服模式^[12-13]。当驱动器工作在电流伺服模式时,其目的是控制电机的输出力矩,此时图中的 S2 是断开的状态,由控制器或上位机给定电机目标电流,通过与实际电流采样值进行比较和 PID 调节后,调整 PWM 的占空比,使得电机电流与目标电流一致。

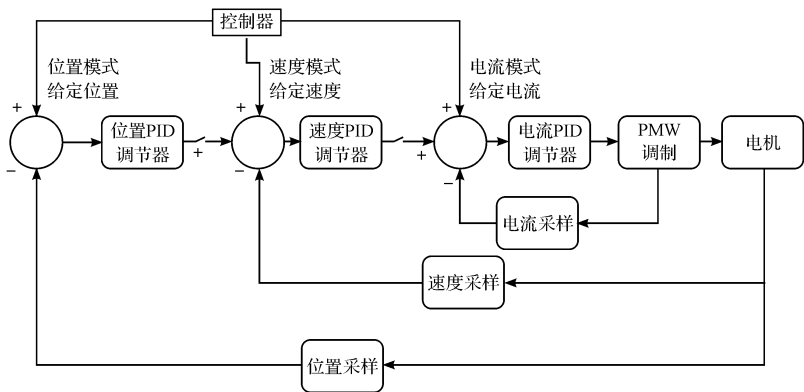


图4 三闭环控制基本结构

当驱动器工作在速度伺服模式时,驱动器的目标是控制电机的输出转速,此时图中的S1是断开的,控制器给定的是电机的目标速度。当驱动器工作在位置伺服模式时,目标位置值由驱动器给定,目标位置与实际位置的差值经过调节后作为速度环的输入。

PWM 调制算法拟比较两种方法,最终确定一种较

好的方案。一种 PWM 调制方法是“六步换向法”(Six Step Modulation)^[14],另一种是“空间矢量调制法”(Space Vector Modulation)。六步换向法实现简单控制方便,控制精度做进一步的实验分析。空间矢量调制算法(SVPWM)计算量大,波形调制更精确。拟比较两种调制方法的效果,均衡算法复杂性和性能确定最终方案。程序流程如图5所示。

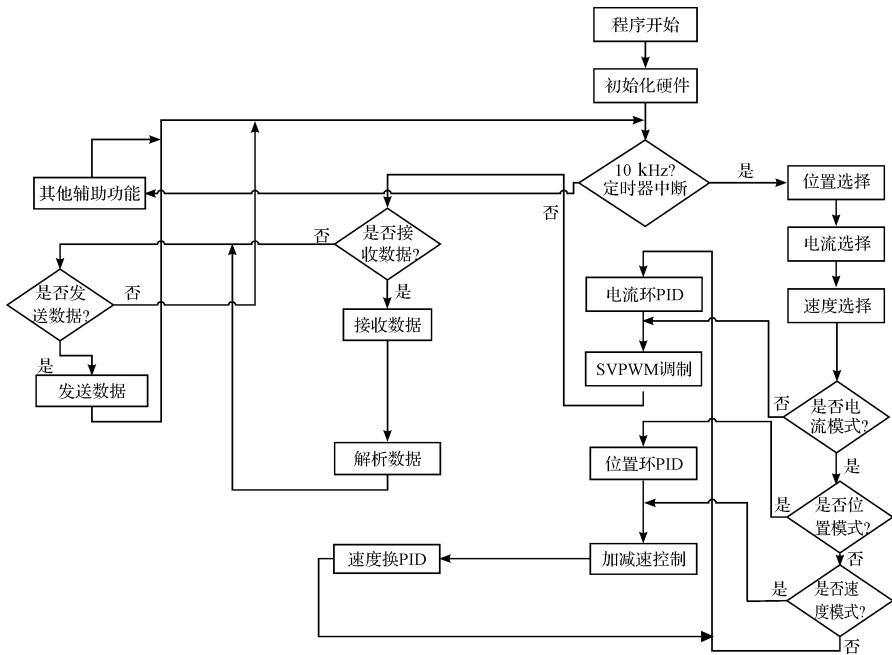


图5 驱动控制程序流程图

力反馈算法基于上述的硬件结构和三闭环控制算法开发,不采用力/力矩传感器,而是利用电机的电流、速度反馈信息^[15]。本研究拟采用负载转矩观测技术实现一体化伺服驱动单元的力反馈。转矩观测一直以来是电机控制领域的难点,其主要原因包括:电流信号的噪声会引起转矩观测偏差,而电流信号中的脉冲沿很陡的噪声包含丰富的谐波分量,常规的滤波方法难以达到较好的滤波效果;电机模型的不准确是转矩观测的另一个难点。针对上述问题,本研究拟对比两种方案:降维状态观测器和模型参考观测器^[16]。降维状

态观测器的应用非常广泛,其对模型的准确性有较高要求。模型参考观测器根据李亚普诺夫稳定理论设计,具有很好的鲁棒性和全局稳定性,算法的准确性依赖于参考模型中用到的参数。笔者通过对比两种方案,并利用参数辨识技术提高转矩观测精度,开发一体化伺服驱动模块的力反馈方法,满足工业机器人示教和碰撞保护的要求。

4 系统实验和分析

为了验证机械臂具有良好的工作机械臂样机性

能,本研究对机械臂的本体和控制系统进行搭建,机械臂样机如图 6 所示。本研究在 PC 端输入各个关节的转角范围,使各个关节运动到极限转角位置,其中四关节和六关节各转 3 圈,一共进行了 3 次实验,实验数据

如表 7 所示。实验结果表明,各个关节均能达到设计要求,整个过程机械臂性能良好,运转稳定,编码器实际脉冲数和编码器指令脉冲数的误差很小,编码器的最大误差为 0.092%,能够满足工作要求。

表 7 机械臂工作性能验证数据

关节	起始位置 /(°)	终止位置 /(°)	编码器脉 冲指令数	第一次实 际脉冲数	误差/(%)	第二次实 际脉冲数	误差/(%)	第三次实 际脉冲数	误差/(%)
1	0	360	1 966 080.5	1 965 783.4	0.015	1 964 972.6	0.056	1 965 324.4	0.038
2	0	45	245 760.8	245 667.7	0.037	245 463.3	0.081	245 598.9	0.065
3	0	200	1 092 267.8	1 091 971.1	0.027	1 091 652.9	0.092	1 091 827.6	0.04
4	0	1 080	5 898 240.6	5 897 386.0	0.016	5 897 573.5	0.011	5 896 852.5	0.024
5	0	180	983 040.0	982 730.5	0.032	982 664.5	0.006 7	982 783.9	0.026
6	0	1 080	5 898 240.7	5 896 955.7	0.022	5 896 389.2	0.031 4	5 986 475.7	0.029

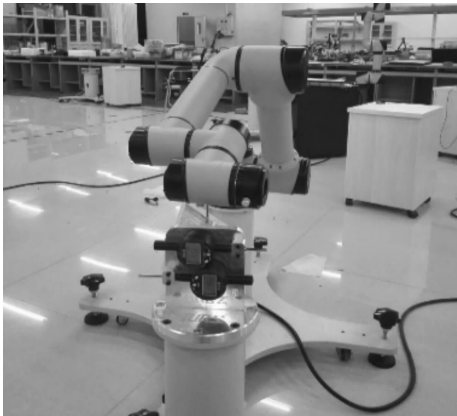


图 6 机械臂样机

5 结束语

本研究介绍了一种新型模块化六自由度机械臂的设计方法,该机械臂具有结构紧凑、重量轻、体积小、负载能力强等特点。各个模块具有相同的结构,能够根据需求快速组装成不同构型的机械臂。

笔者通过计算机械臂的受力情况和对比不同角度的转矩来选择合适的电机和减速器,对机械臂的关键零部件进行了有限元分析,验证了结构的可靠性,为结构优化奠定了基础。本研究对驱动系统进行了硬件设计,确定了闭环控制算法和力反馈算法方案,在以上方案的基础上研发出了 OUR 机械臂样机。实验测试表明,该机械臂具有较高的独立化和模块化以及良好的工作性能,可为后续的改进设计提供经验。

参考文献 (References):

[1] 卜夺奇,周建军,马天文. 腱传动仿人手指机构的设计与分析[J]. 机电工程,2012,29(3):286-289.

[2] 贺磊,徐国华,刘亚平. 水下机器人关节电机驱动系统研究[J]. 机电工程,2013,30(1):77-80.

[3] 招绍坤. 轻型机械臂模块化设计与运动控制的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学机电工程自动化学院,2009.

[4] KIM S H, KIM Y H. Realization of a virtual simulator system Window 98/NT environment[C]// Industrial Electronics,2001 proceedings. ISIE 2001. IEEE International Symposium. Pusan: IEEE,2001:216-220.

[5] 杨淞. 一种六自由度机械臂的运动控制系统设计[D]. 上海:上海交通大学机械与动力工程学院,2014

[6] 张昊,王超亮,田文龙,等. 同步仿生机械臂设计[J]. 兵工自动化,2015,34(5):77-78.

[7] 程乾,蒋刚. 电液驱动六足机器人三维空间力学分析[J]. 机械传动,2015,39(1):43-47

[8] 耿令波. 工业机器人动力学参数辨识方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学机电学院,2013.

[9] 马江. 六自由度机械臂控制系统设计与运动学仿真[D]. 北京:北京工业大学机械工程与应用电子技术学院,2009.

[10] 韩斌慧. 基于 Solidworks 的复杂壳体造型和模态分析[J]. 煤炭技术,2015,34(2):203-205.

[11] 李波,张瑾,李国栋. 排爆机器人机械臂控制系统设计[J]. 机电工程,2015,32(8):1110-1114.

[12] 刘和平,王维俊. TMS320LF240XDSP—C 语言开发应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2003.

[13] 张斌,李耀华. 可顺序控制多台电机的伺服驱动方法[J]. 电工技术,2000(6):25-27.

[14] 高辉,姚莉莉. “六步换向”法控制无刷直流电机设计[J]. 防爆电机,2012,47(4):3-5.

[15] 侯敬巍,赵丁选,巩明德,等. 遥操作机器人的新型力反馈算法[J]. 计算机应用研究,2011,28(5):1679-1681.

[16] 李杰,齐晓慧,甄红涛,等. 基于扩张状态观测器的通用模型参考自适应控制设计与分析[J]. 中国科学技术大学学报,2014,44(10):818-827.

[编辑:李辉]

本文引用格式: