

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.09.017

码垛机器人关节结构的有限元分析及优化研究^{*}

徐金章,王延飞

(泰安技师学院 机械工程系,山东 泰安 271000)

摘要:针对大负载码垛机器人关节传动精度的问题,对四关节码垛机器人第二轴关节传动结构中起传递扭矩作用的齿轮轴进行了研究。对机器人装配过程中影响工业机器人运行精度的潜在因素进行了归纳,提出了改善齿轮轴受力情况的改进方法,降低了工业机器人在运行过程中齿轮轴与 RV 减速机之间产生预压力的可能性;利用 SolidWorks 软件建立机器人三维模型,采用 ANSYS、ADAMS 软件对机器人第二轴关节传动结构进行了分析;增设了轴承用于齿轮轴导向与支撑,并进行了仿真分析,对改进后的样机进行了重复定位精度测试。研究及测试结果表明:改进后的结构可改善齿轮轴的受力情况,减少因装配工艺、零部件误差等因素对机器人运行精度的影响,对关节型机器人的结构设计具有一定的借鉴意义。

关键词:码垛机器人;齿轮轴;ANSYS;ADAMS;仿真

中图分类号:TH132;TP242

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)09-1089-05

Finite element analysis and optimization for articular structure of palletizing robot

XU Jin-zhang, WANG Yan-fei

(Department of Mechanical Engineering, Taian Technician College, Taian 271000, China)

Abstract: Aiming at the problem of joint transmission accuracy of heavy-duty palletizing robot, the gear shaft which played the role of transmitting torque in the joint transmission structure of the second axis of the four-joint palletizing robot was studied. The potential factors affecting the running accuracy of industrial robots in the process of robot assembly were summarized, and an improved method to improve the force condition of gear shaft was designed, which enabled the possibility of the pre-pressure between the gear shaft and the RV reducer was reduced during the operation of the industrial robot. The three-dimensional model of the robot was built with SolidWorks software, and the second axis joint transmission structure of the robot was analyzed with ANSYS and ADAMS software. A bearing was added to guide and support the gear shaft, and the simulation analysis was carried out. The repeated positioning accuracy of the improved prototype was tested. The results indicate that the improved structure can improve the force condition of the gear shaft, and reduce the influence of assembly process, parts error and other factors on the robot running accuracy. It can be used for reference in the structural design of the articulated robot.

Key words: palletizing robot; gear shaft; ANSYS; ADAMS; simulation

0 引言

对码垛机器人的研究通常涉及多刚体动力学、机构学、机械设计、传感技术、控制工程等学科^[1]。由于国外厂家对工业机器人的研究较早,整体技术更为成

熟,使得码垛机器人的产品规格、型号较为完备。目前,为迎合更广泛的市场需求,国外厂家正朝着高速、高精度、智能化方向不断研发新型码垛机器人产品^[2-4]。相比国外,国内厂家在码垛机器人方面的研究还不是很成熟^[5-6],在载荷能力、速度、可靠性、长期运

收稿日期:2019-11-14

基金项目:国家级高技能人才培养基地项目(鲁人社字[2018]199号)

作者简介:徐金章(1968-),男,山东菏泽人,高级讲师,主要从事机械结构设计方面的研究。E-mail:283576785@qq.com

行精度等方面与国外存在较大差距^[7]。

同时,由于国外厂家对工业机器人核心零部件形成垄断,国内码垛机器人产品价格高、竞争力低。为此,众多国内码垛机器人厂家多采用测绘国外同类产品、购买运动控制系统方式来快速形成自己的产品系列,并抢占市场。但这样的发展方式导致国内厂家缺乏关键部件的研发能力,无法把控机器人产品性能,限制了国内码垛机器人产品在精度、可靠性等方面的提高。因此,有必要对关键零部件进行深入地研究,夯实理论基础。

在码垛机器人本体结构中,国内外厂家大都采用伺服电机输出扭矩,通过固定在电机轴上的齿轮轴传递扭矩至 RV 减速机的传动结构。随着市场对高速重载码垛机器人的需求量不断增加,码垛机器人所用 RV 减速机的减速比及外形也越来越大,导致齿轮轴长度不断加长,部分国外厂家(如那智不二越等)已开始关注负责传递扭矩的齿轮轴在重载码垛机器人传动过程中的受力情况。

为此,本文以某公司生产的四关节码垛机器人为研究对象,采用有限元分析技术^[8]对该机器人关节传动结构及齿轮轴进行研究。

1 码垛机器人结构介绍

本文所研究的码垛机器人是某公司研发的型号为 TKR4180 型四关节码垛机器人,最大负载为 180 kg,其整体三维模型如图 1 所示。

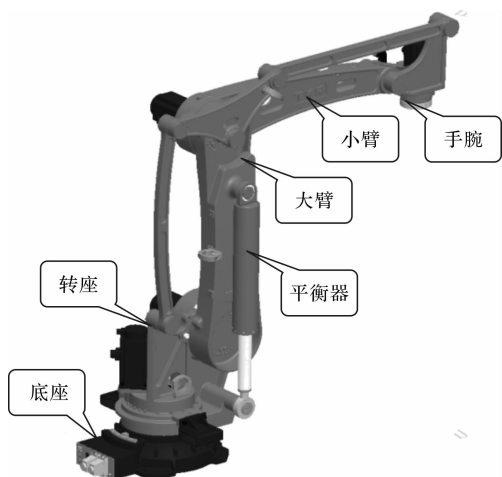


图 1 TKR4180 型机器人三维模型

码垛机器人的主体结构是基于平衡吊原理的连杆机构^[9-10],具有承载能力大、稳定性好、结构紧凑、节省能耗等特点。TKR4180 型码垛机器人具有 4 个旋转轴关节,关节运动由 4 台交流伺服电机协同控制,完成抓取动作。其中,第二、三、四轴关节均采用交流伺服

电机与 RV 减速机直连结构,第一轴关节处增加中间齿轮实现运动传递。

由于第二轴关节所受负载转矩较大,笔者以第二轴关节传动结构进行分析。关节传动结构如图 2 所示。

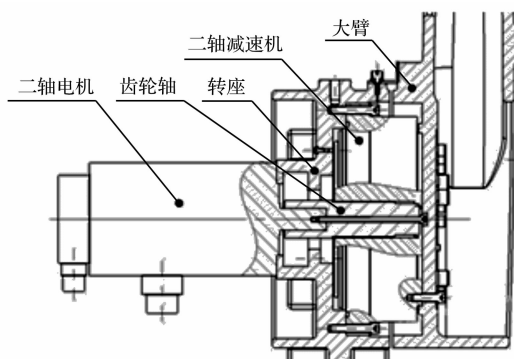


图 2 第二轴关节传动结构图

其中,二轴电机采用南京埃斯顿自动化有限公司产品,型号为 EMG-50DSA24,电机参数如表 1 所示。

表 1 电机参数

电机型号	额定功率/kW	额定转矩/Nm	峰值扭矩/Nm
EMG-50DSA24	5	23.9	71.6

为满足使用要求,电机轴材质选用 45#,输入齿轮轴材质选用 20CrMoA。材料属性如表 2 所示。

表 2 材料属性

材质	弹性模量/Pa	泊松比	密度/kg·m ⁻³
45#	2.11E11	0.289	7.89E3
20CrMoA	2.09E11	0.269	7.80E3

第二轴关节机械传动原理如下:

二轴电机固定在转座上,输入齿轮轴通过 M8×160 内六角螺钉与二轴电机轴可靠连接,并与二轴 RV-450E 型减速机啮合传动;二轴减速机外壳通过螺栓与转座固定连接,二轴减速机输出轴与大臂通过螺栓固定连接;当二轴电机转动时,输入齿轮轴与二轴减速机啮合传动,通过减速机输出轴带动大臂转动,实现减速、增扭功能。

目前,大多数码垛机器人传动结构均采用该方案。

2 仿真分析

2.1 模型的建立

从图 2 可知,输入齿轮轴在运动过程中类似悬臂结构,且因 RV 减速机结构限制,导致输入齿轮轴较长(总长度为 215 mm)。当各零部件正确装配时,输入齿轮轴只承受轮齿啮合时的扭矩作用。但如果因零部件偏差、装配误差等原因导致伺服电机与 RV 减速机

的同轴度超差,极易出现输入齿轮轴轮齿与RV减速行星齿轮无法正确啮合的情况,导致输入齿轮轴末端即承受扭矩作用;同时还承受因附加接触压力而形成的弯矩作用,影响传动精度。

为此,对于图2所示的传动结构,笔者采用SolidWorks软件分别绘制电机轴、输入齿轮轴三维模型,装配后导入ANSYS软件进行受力分析。由于电机输出的扭矩作用在相互啮合的齿面上,为便于施加载荷,笔者在齿轮轴轮齿侧的中心处创建一个节点,并设定为MPC184单元(MPC即Multi-point constraints,称多点约束或MPC184单元,该单元可与其他节点形成刚性约束并传递扭矩)。

本研究根据输入齿轮轴、电机轴材质分别设置材料参数,对模型进行网格划分。

2.2 分析过程

2.2.1 理想情况下的受力分析

理想情况下,约束电机轴各方向运动,在输入齿轮轴轮齿侧的MPC184单元处施加电机峰值扭矩并求解。因所分析模型材料为塑性金属,需分析材料内部应力能否使材料产生屈服,并导致塑性应变,故本研究采用弹/塑性材料所遵循的第四强度理论(即形状改变比能密度理论或Von Mises理论)来分析模型。

通过分析得到Von Mises等效应力(即冯米斯应力,表示模型内部的应力分布,当应力值达到屈服极限时,材料产生屈服),齿轮轴等效应力结果如图3所示。

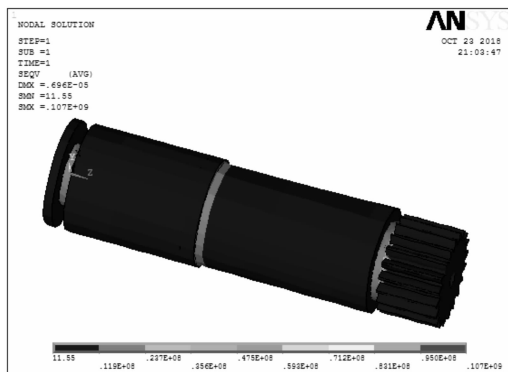


图3 齿轮轴 Mises 等效应力图

从图3可知,在输入齿轮轴轮齿与减速机行星齿轮正确啮合的情况下,输入齿轮轴仅受到减速机行星轮的反作用力矩所形成的反向扭矩;当交流伺服电机输出峰值扭矩时,输入齿轮轴所受最大等效应力为107 MPa,最大应力区位于轮齿齿根部。

输入齿轮轴材质为20CrMoA,该材质的屈服强度 $[\sigma_s] = 685 \text{ MPa}$,远大于107 MPa,故正确啮合情况下,输入齿轮轴各部位受力较小,能够满足工业机器人在电

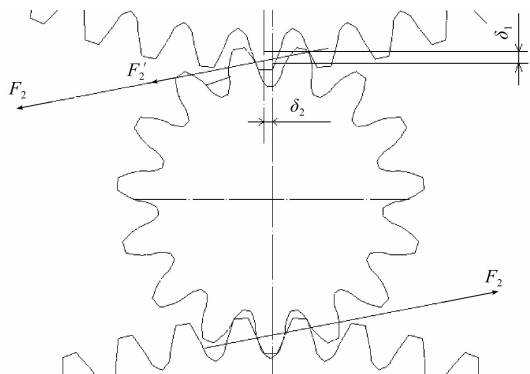
机启动瞬间或机械部件卡死等极限情况下的使用要求。

2.2.2 实际工况下的受力分析

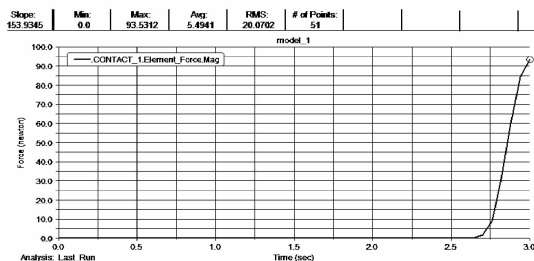
由于受装配工艺、工人素质及技术水平、零部件加工质量等因素的影响,工业机器人在本体装配过程中,不可能每次都能做到理想正确安装。对于第二轴关节处的输入齿轮轴轮齿与RV减速行星轮轮齿来说,其配合精度会受到多个因素的影响,如交流伺服电机与转座上的定位面是否同轴,电机轴与输入齿轮轴是否同轴等等。因此,需认真分析处于啮合状态的输入齿轮轴与RV减速机之间的受力情况。

装配过程中,如果输入齿轮轴与RV减速机不同轴,会导致输入齿轮轴轮齿与RV减速机行星轮轮齿非正确啮合。假设减速机行星轮竖直中心线与输入齿轮轴竖直中心线偏移 δ_2 距离,两齿轮分度圆之间偏移 δ_1 距离,致使接触齿面非正确接触而产生预压力。电机在输出扭矩时,输入齿轮轴受到RV减速机行星轮轮齿沿啮合线方向的作用力 F_2 (两个 F_2 作用力,近似大小相等、方向相反)。

除此之外,输入齿轮轴还会受到预压作用力 F'_2 ,该作用力垂直于接触面,沿啮合线方向作用在输入齿轮轴轮齿上,形成附加弯矩,受力分析如图4所示。



(a) 非正确啮合情况轮齿轴受力



(b) 接触压力仿真计算

图4 非正确啮合情况轮齿轴受力

以图4(a)所示装配状态为分析模型,测量得 $\delta_1 = 0.92 \text{ mm}$, $\delta_2 = 0.49 \text{ mm}$ 。采用ADAMS动力学仿真软件计算得啮合轮齿之间的最大接触压力为93.53 N。

笔者将接触压力、电机峰值扭矩作为输入,采用

ANSYS 软件对输入齿轮轴进行受力分析。首先约束电机轴各方向运动。

在 MPC184 单元处施加电机峰值扭矩载荷,在齿轮轴轮齿上施加接触压力,实际工况下的受力分析结果如图 5 所示。

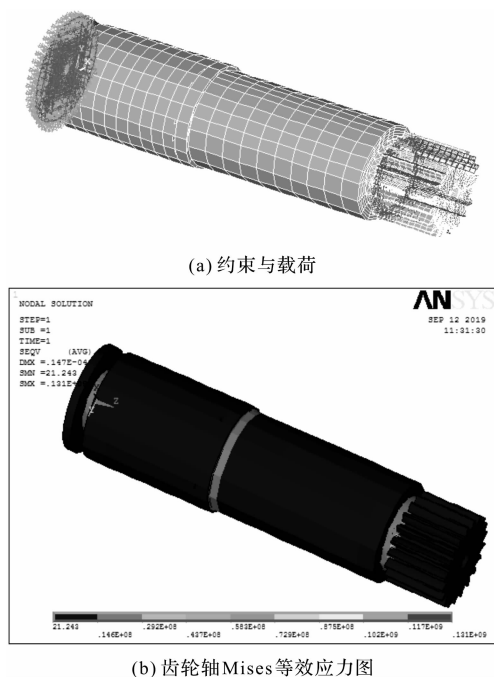


图 5 实际工况下的受力分析

从图 5 可知,在有附加接触压力的情况下,输入齿轮轴除受到扭矩作用外,还受到附加弯矩的作用,故内部应力值大于理想装配情况下的内部应力值。最大应力值为 131 MPa,大于理想装配情况下输入齿轮轴的最大应力值 107 MPa,但远小于该材料的屈服强度 $[\sigma_s] = 685 \text{ MPa}$ 。

可见在实际装配过程中,如果因零部件加工误差超差、装配误差等因素导致轮齿非正确啮合,会导致部分配合零部件受力不理想。

2.3 优化方案及分析

通常工业机器人第二轴关节处负载转矩最大,所需减速比更大,因而 RV 减速机的尺寸比其他几个关节的减速机大,导致与 RV 减速机配合的输入齿轮轴更加细长。

为改善运动精度,笔者对第二轴关节传动结构进行了优化。原传动结构采用交流伺服电机与 RV 减速机直连,传动链少、传动精度高。笔者在不更改伺服电机、RV 减速机的前提下,优化转座内腔结构,并根据输入齿轮轴尺寸,在转座内腔增设一个 16012 深沟球轴承,使得深沟球轴承内圈与输入齿轮轴外径过渡配合,以此约束处于悬臂结构的输入齿轮轴。增设轴承座以固定 16012

深沟球轴承,轴承座通过 6 个 M6 螺栓固定在转座上。

优化后的机器人二轴整体传动结构如图 6 所示。

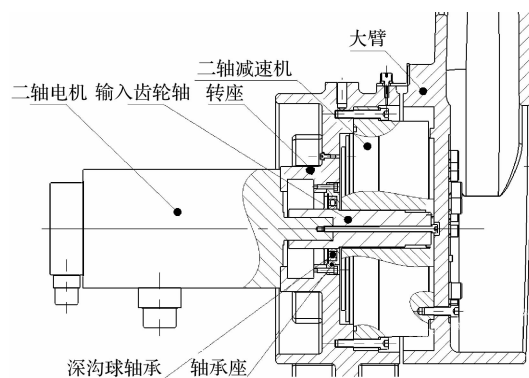


图 6 优化后的传动结构剖面图

为验证所优化结构的合理性,笔者采用 ANSYS 软件,按照实际情况施加约束,在 MPC184 单元上施加电机峰值扭矩载荷,在齿轮轴轮齿施加接触压力。

改进结构的受力分析结果如图 7 所示。

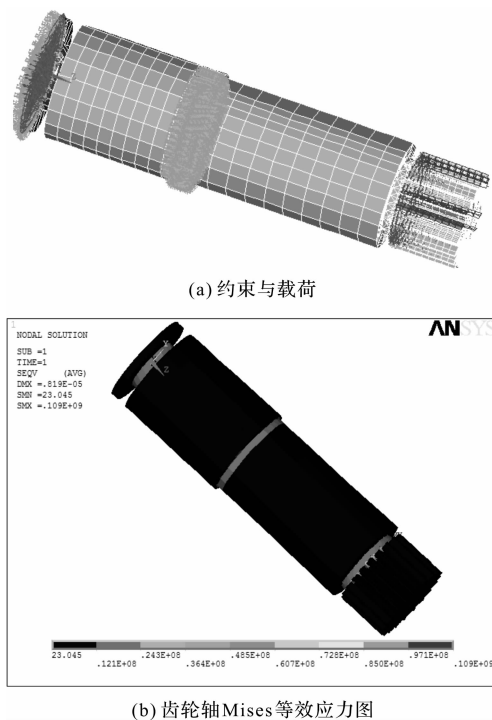


图 7 改进结构的受力分析

从图 7 可知,增设深沟球轴承对输入齿轮轴进行约束之后,在相同受力情况下,输入齿轮轴最大应力值由 131 MPa 减小为 109 MPa,且远小于该材料的屈服强度 $[\sigma_s] = 685 \text{ MPa}$,整体结构更为合理。

同时,在输入齿轮轴长期受力情况下,发生疲劳失效的可能性也得到有效降低。最后,由于深沟球轴承的辅助导向作用,降低了此处出现装配误差的可能性,减小了齿面摩擦,对运动精度有一定提高。

笔者按优化方案进行结构设计,并完成了码垛机

器样机试制及装配;在带载 180 kg 条件下,对机器人分别按照 10%、50%、100% 运行速度进行了重复定位精度测量。

测量时,将方形检验块安装在负载下端,在测试台的 X 、 Y 、 Z 3 个方向分别放置一个千分表,用万向磁性表座固定千分表。利用示教器编制了一段动作程序,该程序应使得机器人按设定速度运行时各关节均产生转动,且第一轴关节转动角度最好大于 90° ;在检验块慢速到达目标点时,设定等待时间,并调整 3 个表头分别与检验块的 3 个相互垂直的平面同时接触;随后编制程序使得检验块慢速移开千分表,并回到初始程序点。

将机器人该程序自动运行,当检验块慢速撞击千分表时,分别记录 3 个千分表数值。如此循环 30 次,可得到 90 个数据,将以上数据代入公式中,即可求得机器人重复定位精度:

$$r = \bar{D} + 3S_D \quad (1)$$

式(1)中:

$$\bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_j \quad (2)$$

$$S_D = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_j - \bar{D})^2}{n-1}} \quad (3)$$

式(2,3)中:

$$D_j = \sqrt{(X_j - \bar{X})^2 + (Y_j - \bar{Y})^2 + (Z_j - \bar{Z})^2} \quad (4)$$

式(4)中:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n X_j \quad (5)$$

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Y_j \quad (6)$$

$$\bar{Z} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Z_j \quad (7)$$

式中: X_j — X 方向第 j 次千分表的读数; Y_j — Y 方向第 j 次千分表的读数; Z_j — Z 方向第 j 次千分表的读数; n —循环次数; r —重复定位精度。

该机器人实测最大重复定位精度为 ± 0.26 mm,设计要求重复定位精度为 ± 0.3 mm,满足设计要求。

TKR4180 型机器人部分参数如表 3 所示。

表 3 TKR4180 型码垛机器人部分参数

型号负载/kg	自由度	重复定位精度/mm	工作半径/mm
TKR4180180	4	± 0.3	3 150

本文引用格式:

徐金章,王延飞. 码垛机器人关节结构的有限元分析及优化研究[J]. 机电工程,2020,37(9):1089-1093.

XU Jin-zhang, WANG Yan-fei. Finite element analysis and optimization for articular structure of palletizing robot[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020,37(9):1089-1093.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

3 结束语

本文对大负载码垛机器人关节传动结构进行了分析,针对码垛机器人负载能力越大,所需 RV 减速机外形越大,导致传递扭矩的齿轮轴变长,受力情况不如小负载码垛机器人的问题,采用了 ANSYS 软件对某公司研发的 180 kg 四关节码垛机器人第二轴关节传动结构进行了分析;分析结果表明:在实际装配过程中,该传动结构因对中性不足而导致的配合误差会影响机器人传动精度。

据此,笔者提出了在输入齿轮轴处增设轴承,作为导向及辅助支撑的优化方案,最后通过仿真分析进行了验证。验证结果表明:优化后的新结构可有效降低输入齿轮轴的内部应力。

在样机测试环节,笔者又对机器人进行了重复定位精度测试,测试结果表明:该机器人重复定位精度满足设计要求,且长期稳定性良好。

参考文献 (References):

- [1] 曹志民. 四自由度码垛机器人设计、承载能力分析与优化研究[D]. 武汉:武汉科技大学机械自动化学院,2014.
- [2] 豆磊. 码垛机器人的现状及发展趋势研究[J]. 时代农机,2018,45(7):87.
- [3] 李勋. 工业码垛机器人存在问题与解决对策[J]. 中国新技术新产品,2019(12):21-22.
- [4] PARISIEN C, THAGARD P. Robosemantics: how stanley the volkswagen represents the world[J]. *Minds and Machines*, 2008,18(2):169-178.
- [5] 王田苗,陶永. 我国工业机器人技术现状与产业化发展战略[J]. 机械工程学报,2014,50(9):1-13.
- [6] 赵巍秋. 我国工业机器人发展的机遇与挑战[J]. 金属加工(冷加工),2014(12):26-28.
- [7] 辛飞飞. 基于平行四杆机构的码垛机器人本体结构研究[D]. 泰安:山东科技大学机械电子工程学院,2014.
- [8] MOAVENI S. Finite element analysis: theory and application with ANSYS[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1988.
- [9] 闰爱和,焦希润,张素青. 平衡吊的运动分析及平衡方法[J]. 太原重型机械学院学报,2000(4):295-300.
- [10] 王知行,刘廷荣. 机械原理[M]. 北京:高等教育出版社,1999.

[编辑:李辉]