

面向工业机器人配合使用的变位机设计 开发与实验研究

才磊 郭建飞 李斌 张晋

(唐山松下产业机器有限公司, 河北唐山 063000)

摘要:设计了一款能够和机器人进行协调配合的变位机,建立起一套从负载侧到电机侧的计算方法和设计流程。上述设计主要包括性能指标制定、减速机和电机计算选型、传动系统设计计算,并采用有限元分析优化关键零部件的结构设计。为了验证变位机的实际性能,设计并实施了针对关键参数的实验测试,对变位机类产品的设计、验证具有重要的参考、借鉴意义。

关键词:工业机器人;变位机;选型计算;定位精度

中图分类号:TH12 文献标识码:A

DOI: 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2022.11.006

Design development and experimental research of positioner for industrial robot

CAI Lei, GUO Jianfei, LI Bin, ZHANG Jin

(Panasonic Welding Systems (Tangshan) Co., Ltd., Tangshan 063000, CHN)

Abstract: The paper designs a positioner that can coordinate with the robot, and establishes a set of calculation methods and design processes which from the load side to the motor side. The above work mainly includes the formulation of performance indicators, the calculation and selection of reducers and motors, the design and calculation of transmission systems, and use finite element analysis to optimize the structural design of key components. In order to verify the actual performance of the positioner, the experimental test for key parameters is designed and implemented, which has important reference significance for the design and verification of positioner products.

Keywords: industrial robot; positioner; type selection calculation; positioning accuracy

工业机器人作为我国高端装备制造的基础设备之一,是我国“十二五”发展规划中高端制造装备战略性新兴产业的重要组成部分^[1],是制造业生产自动化中的重要一环^[2]。工业机器人区别于服务机器人、医疗机器人,其主要指的是六自由度关节型机器人,虽然其本身具有较高的自由度,但在焊接、切割、打磨的对象工件较为复杂时,六自由度关节型机器人很难完美甚至无法完成上述工作。尤其当用户对机器人运行姿态和生产效率有较高要求时,上述问题更加凸显出来。此时,需要在工业机器人和工件之间再增加一个自由度,上述工作可以由高精度单轴变位机来完成。基于上述情况,设计了一款能够和机器人进行协调配合使用的变位机,建立起一套从负载侧到电机侧的计算方法和设计流程,并通过相关实验对变位机的实际性能进行了验证和

分析。

1 变位机整体结构设计

1.1 模型的建立

该变位机作为和机器人配合使用的产品,本身需要具有较高的精度。同时考虑到使用场地以及安装、运输的方便性等因素,在进行结构设计时产品的轻量化、小型化要求也需要兼顾。由此作为出发点,首先搭建起:负载→减速机→传动系统→电机的整体系统简图,如图1所示。

该系统简图作为产品设计的基础,直接规划并确定了后续设计计算的过程和方向。该系统简图的优点在于:结构紧凑—减速机和电机并列放置,有效减小了整体的体积,提高空间利用率;多级减速机构—设计了包含减速机本身在内的三级减速机构,

能够涵盖较大减速比，有效降低对电机、减速机等部品的参数要求，提高部品选型的适用性；多种传动方式相结合——一级减速机构采用同步带传动，在保证传动精度的同时可以有效地降低装配、加工等的精度要求，二级减速机构涉及到和减速机输入端配合，为满足精度要求以及保证产品本身的可靠性，采用齿轮传动方式。

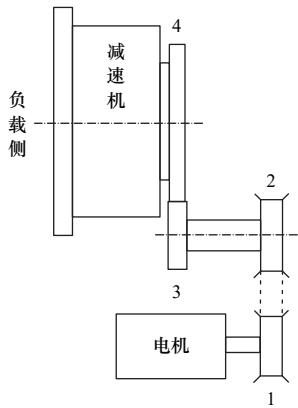


图1 系统简图

图1中，一级减速机构1-2为同步带传动；二级减速机构3-4为齿轮传动；三级减速机构为减速机。

1.2 负载参数和机械特性的确定

依据市场需求的调查以及目标用户群体的定位，对于变位机的性能指标参数进行初始设定。该性能指标参数的设定作为整个设计、计算流程的出发点，直接决定后续关键零部件的选型计算和最终产品的性能，因而需要提前明确。关键性能指标参数如表1所示。

表1 关键性能指标参数

变位机关键性能参数	参数值
自由度	1
负载能力/kg	200
最大输出转速N/(r/min)	30
动作范围	±3 600°
容许偏心距/m	0.07
位置重复性精度/mm	±0.05

同时，如图2所示的负载机械特性也是参与计算的重要参数，机械特性可以理解成负载侧转速发生变化时的响应快慢程度，该参数的高低对于减速机和电机的性能要求有着直接的影响，其在很大程

度上决定了变位机产品的加减速能力、整体响应时间，进而影响到用户比较关心的生产效率、节拍快慢等实际生产问题。

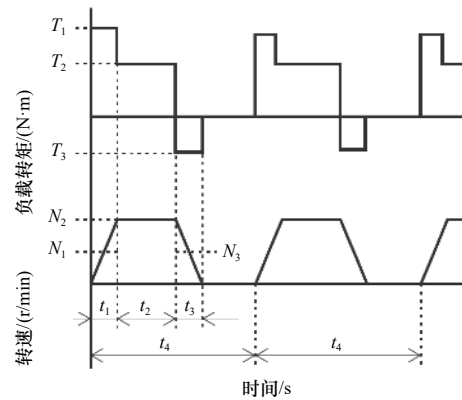


图2 负载机械特性

图2中，启动阶段运行时间 $t_1=0.24$ s；稳定运行阶段运行时间 $t_2=0.52$ s；减速阶段运行时间 $t_3=0.24$ s；运行周期时间 $t_4=6$ s；启动阶段最大转矩 $T_1=349.7$ N·m；稳定运行阶段最大转矩 $T_2=137.2$ N·m；减速阶段最大转矩 $T_3=75.3$ N·m。

1.3 减速机关键参数的计算

依据此前确定的相关参数，通过式（1）和（2）^[3]计算出减速机输出端的平均负载转矩和平均输出转速，依托上述计算结构并参照减速机规格书选定减速机规格和型号。

$$T_m = \sqrt[10]{\frac{t_1 \times N_1 \times T_1^{\frac{10}{3}} + t_2 \times N_2 \times T_2^{\frac{10}{3}} + \dots + t_n \times N_n \times T_n^{\frac{10}{3}}}{t_1 \times N_1 + t_2 \times N_2 + \dots + t_n \times N_n}} = 212.2 \quad (1)$$

$$N_m = \frac{t_1 \times N_1 + t_2 \times N_2 + \dots + t_n \times N_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} = 22.8 \quad (2)$$

式中： T_m 为平均负载转矩，N·m； N_m 为平均输出转速，r/min。

初步选定减速机之后依据其规格书的标准参数，对其寿命、启停瞬时最大转矩、最高转速等参数进行校核。如果均能满足要求，则最终确定减速机选型正确。若不符合，则需要返回重新修改相关参数以及所选减速机的规格，再次进行校核计算。

重新修改参数的方法：一是降低性能指标参数，包括机械特性、负载重量和偏心距离等；二是提高减速机规格，使之满足上述校核要求，该方法会直接影响后续传动系统以及电机在设计选型时的规格参数。上述两种方法的选用需要综合考虑。

1.4 传动系统的设计和计算

减速机规格和参数确定之后，进行整体结构和

传动方式的设计。

整体结构的设计基于前文提到的系统简图，在系统简图的基础上对各个部件的空间位置、传动路线和方式进行确认，明确最终的传动方案。

传动方案确定之后，需要计算出总减速比范围并对减速比进行合理的分配。本产品设计有三级减速机构，第三级为减速机本身具有的减速比，基于变位机最高输出转速、减速机本身减速比以及电机的额定转速，按照式(3)计算出一级和二级减速比乘积 I_{12} 。

$$I_{12} = \frac{N_{电}}{N \times I_3} = \frac{3000}{30 \times 36.57} = 2.73 \quad (3)$$

式中：减速机减速比 $I_3=36.57$ ；二级减速机构减速比 I_2 ；一级减速机构减速比 I_1 ；电机额定转速 $N_{电}=3000 \text{ r/min}$ ；最大输出转速 $N=30 \text{ r/min}$ 。

由式(3)可以看出， $I_{12}=2.73$ 是一、二级减速机构减速比乘积的上限值，如果大于上述值，在其余参数已经确定的前提下，电机的实际转速会超出额定转速，显而易见，这对电机的使用是不利的。

各级减速比由相互配合的齿数之比决定，在模数 m 确定的前提下，由分度圆直径 $d=m \times z$ 可以看出，齿数 z 决定了齿轮的尺寸大小。从产品小型化的要求出发，一、二级减速机构中的齿轮均不宜过大，因而减速比的分配也应遵循上述原则。基于上述考虑， I_1 减速比最终设定为 1.61， I_2 减速比最终设定为 1.56，一级和二级总减速比 I_{12} 为 2.52。最大输出转速 $N=30 \text{ r/min}$ 时，电机的转速 $N_{电}$ 约为 2765 r/min，未超出 3000 r/min 的额定转速，符合使用要求。

1.5 电机关键参数的计算和确认

电机关键参数的计算和减速比的设计和分配有着直接的关联，基于 1.3 和 1.4 章节中已经确定的参数，反向计算出电机的关键参数：启动阶段最大转矩 (T_1) 和稳定运行阶段最大转矩 (T_2)，用于电机的最终选型。

2 变位机强度分析

变位机壳体作为支撑减速机和负载的关键结构部件，其强度对于变位机整体的精度、寿命和可靠性等有着至关重要的影响，因而运用 SolidWorks Simulation 对其整体的强度进行分析^[4]。变位机壳体在运动过程中主要承受负载本身的重力以及偏心所带来的离心力，基于实际情况针对变位机壳体进行

力学仿真，并根据实际仿真结果优化结构设计，最终方案的有限元分析结果如图 3 和图 4 所示。

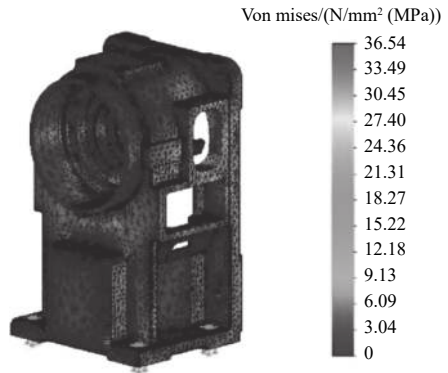


图 3 有限元分析结果-整体

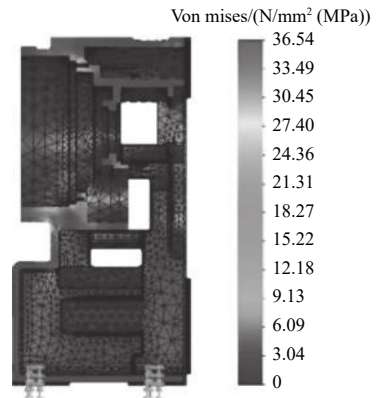


图 4 有限元分析结果-半剖

3 变位机性能的实验研究

为了验证变位机本身的位置重复性精度以及变位机和机器人协调配合的精度，设计进行了相关的实验研究。

3.1 协调配合精度的实验

变位机本身的减速比、额定转速等关键参数和机器人本身的动作参数通过机器人控制算法建立联系之后，设计了验证实验，对变位机和机器人在空间当中动作时协调配合的轨迹精度进行了验证。

变位机采用卧式安装方式，如图 5 所示，其中在变位机能够自由旋转的输出端，安装带有标尺线的标尺板，机器人末端安装专用的划线工具。通过设定好的运行程序，使二者在配合的情况下同时动作，在标尺板刻画出相应的圆形和正方形，查看根据预设程序得到的实际轨迹在标尺板的偏差，判断协调配合的精度高低，如图 6 所示。

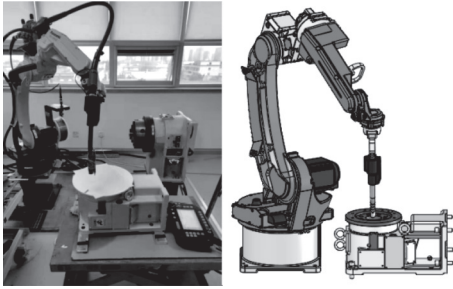


图5 机器人和变位机协调配合实验

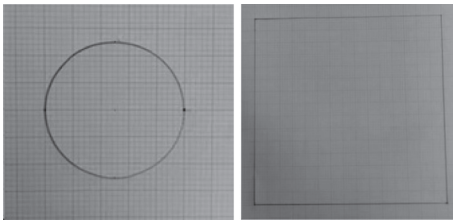


图6 协调配合精度测量

3.2 位置重复性精度的实验测量

为了验证变位机的位置重复性精度以及在长时间运行下的位置重复偏差推移,设计了一套由高精度激光测距仪构成的位置重复性精度测量与实时监测系统,如图7和图8所示。该系统主要包括:

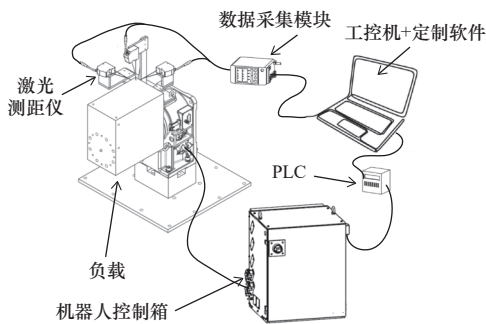


图7 测量与实时监测系统示意图

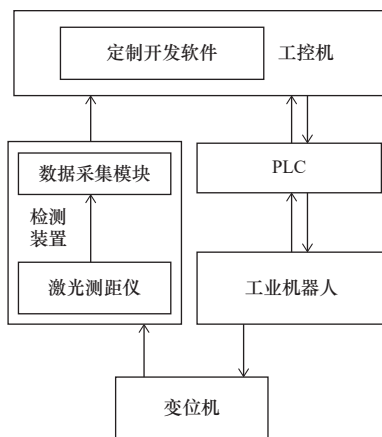


图8 系统原理流程图

(1) 用于数据处理和程序控制的定制开发软件,以及承载该软件的工控机,如图9所示。

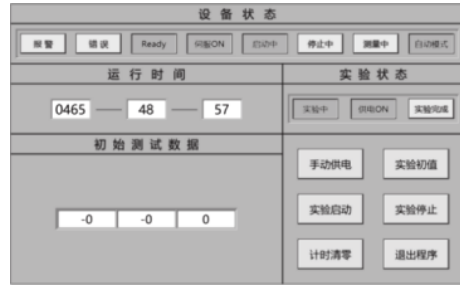


图9 定制开发软件界面

(2) 用于通过外部信号控制机器人和变位机的PLC。

(3) 用于对变位机负载位置进行测量的激光测距仪,分别在X、Y、Z三个方向对负载的固定位置按照一定的采样周期和频率实施测试,如图10所示。

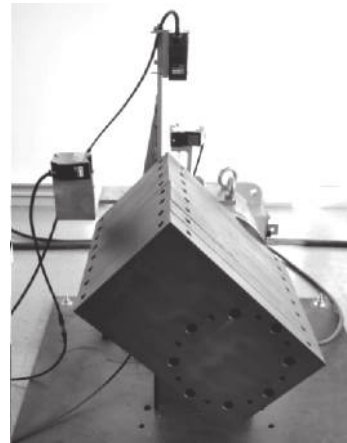


图10 测量与实时监测系统实物图

(4) 参与测试的变位机,变位机通过机器人端进行转动的控制,按照设定的程序进行长时间连续动作,在固定位置,由激光测距仪进行数据的测量和采集。

(5) 数据采集模块,将激光测距仪采集的数据进行转换处理后发送到工控机中。

对采集的数据参照国标中式(4)~(6)进行数据处理^[5],得到经过实验测算的位置重复性精度 RP_l ,以此作为判定是否符合表1中关键性能指标参数的重要实验依据。

$$RP_l = \bar{l} + 3S_l \quad (4)$$

式中:

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

$$S_l = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_j - \bar{l})^2}{n-1}} \quad (6)$$

如式(7)所示, l_j 为第j次实到位置和各个实到位置集群重心间的距离^[5],简称第j次位置重复偏差。根据其数学含义,在增加测量次数的基础上,

对每次计算得出的 l_j 进行多次数、长时间的统计,即可得到偏差值随着运行时间的推移图,该图表作为判断产品性能稳定性的重要实验依据。

$$l_j = \sqrt{(x_j - \bar{x})^2 + (y_j - \bar{y})^2 + (z_j - \bar{z})^2} \quad (7)$$

其中: \bar{x} 、 \bar{y} 和 \bar{z} 是对同一位置重复测量 n 次后所得数据的平均值,如式(8)~(10)所示^[5]。

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \quad (8)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j \quad (9)$$

$$\bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_j \quad (n > 30) \quad (10)$$

式中: x_j 、 y_j 、 z_j 是第 j 次测量的数值。

经过数据处理之后得到位置重复偏差推移图,如图11所示。由此可以看出,随着测量次数的增加,即测量时间的推移,变位机位置重复偏差呈现逐步增大的趋势,其符合实际的使用工况。同时在一段时间之后趋于稳定并未出现较大幅度陡升的情况,因而判定变位机经过较长时间运行后处于较为稳定的运行状态。

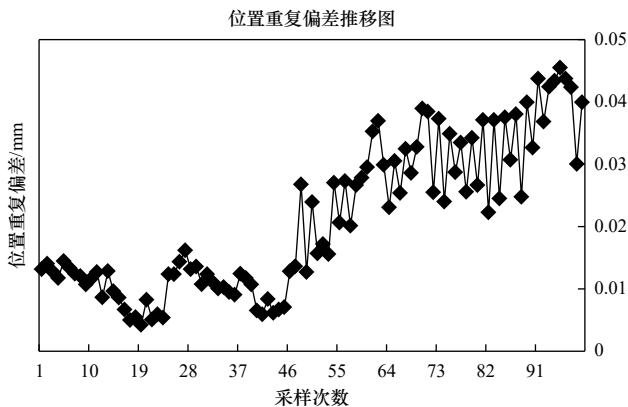


图11 位置重复偏差推移图

4 结语

设计了一款能够和机器人进行协调配合的变位机,建立起一套从负载侧到电机侧的计算方法和设计流程,主要包括负载侧性能指标制定、减速机计算选型、传动系统设计计算和电机计算选型,并采用有限元分析辅助优化关键零部件的结构设计,同时为了验证变位机的实际性能,设计并实施了针对位置重复性精度在内的关键参数的实验研究。上述计算方法和设计流程以及实验方案对工业机器人以及变位机类产品的设计、验证具有重要的参考、借鉴意义。

参 考 文 献

- [1]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.
- [2]孟明辉,周传德,陈礼彬,等.工业机器人的研发及应用综述[J].上海交通大学学报,2016,50(S1):98-101.
- [3]NABTESCO.精密控制用高刚性减速机技术资料集(CAT.121020)[Z].东京:Nabtesco株式会社,2014.
- [4]陈永当,鲍志强,任慧娟,等.基于SolidWorks Simulation的产品设计有限元分析[J].计算机技术与发展,2014,22(9):177-180.
- [5]北京机械工业自动化研究所.GB/T 12642-2013 工业机器人性能规范及其试验方法[S].北京:中国国家标准化管理委员会,2014.

第一作者/通信作者:才磊,男,1986年生,工学硕士,工程师,主要研究方向为工业机器人及周边辅机具设计方向,已发表论文3篇。E-mail: cailei@tsmi.cn

(编辑 李静)

(收稿日期:2022-04-26)

文章编号:20221108

如果您想发表对本文的看法,请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。