

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.05.003

基于 ANSYS 的穿鞋带机械手的结构优化

严楠¹, 高晓丁¹, 陈罡², 薛世润²

(1. 西安工程大学机电学院, 陕西 西安 710048;
2. 浙江纺织服装职业技术学院机电工程学院, 浙江 宁波 315211)

摘要:针对目前制鞋生产中穿鞋带工序存在的工作繁杂、生产效率低下等问题,设计了一款4自由度的新型工业机械手,其中包括穿鞋带机械手的结构与工作方式。基于静刚度理论探讨了静刚度对机械手工作精度的影响。利用SolidWorks软件对穿鞋带机械手造型,并将其导入ANSYS软件进行分析,进而对其不合理机构进行了优化设计。优化后的机械手静刚度增加、弹性变形减小、质量减轻,提高了其工作精度,运动更加灵活,整体力学性能也得到显著改善。

关键词:机械手;轻量化;ANSYS软件;优化设计

中图分类号:TP241.2 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2014)05-0008-04

Structural Optimization of Wearing Shoelaces Manipulator Based on ANSYS

YAN Nan¹, GAO Xiaoding¹, CHEN Gang², XUE Shirun²

(1. College of Mechanical & Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;
2. College of Mechanic and Electronic Engineering, Zhejiang Textile & Fashion College, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

Abstract: Aiming at tedious work and low production efficiency in process of wearing shoelaces during shoe production, a new 4-dof industrial manipulator was designed; The structure and working methods of wearing shoelaces manipulator was introduced; The working precision of manipulator was explored based on the theory of static stiffness; The model of wearing shoelaces manipulator was built based on SolidWorks software. The unreasonable mechanism of manipulator was optimized when imported into ANSYS software to be analyzed. The results show that optimized manipulator static stiffness is increased, elastic deformation is decreased, weight is reduced, work precision is improved, movement becomes more flexible, and the overall mechanical properties are improved significantly.

Key words: manipulator; lightweight; ANSYS; optimization design

在制鞋生产过程中,穿鞋带是制鞋过程中的一道重要工序,需要大量的人力和时间来完成,导致生产周期长、产生成本高等问题。此外,从事穿鞋带生产的工人在长时间工作情况下会感到任务繁琐、单调乏味等问题,并导致生产积极性不高、效率低下。上述问题严重制约着鞋类生产企业的生产效率,需要寻求一种自动化程度高的工业机械手来帮助解决此类问题,但到目前为止,具有穿鞋带功能的机械手在国内外还未曾研发,因此急需研发新型机械手来取代这种紧张、繁琐和枯燥的体力劳动。

本文针对穿鞋带作业的任务要求设计一款新型穿

鞋带机械手,具有工作空间大、动作灵活、结构紧凑等特点,并对机械手本身的结构、质量和外形尺寸进行了优化。优化后的机械手质量更轻、刚性提高,进一步改善了其工作特性。

1 机械手设计

1.1 机械手总体布局

在设计穿鞋带机械手时应首先从其功能的实现和机械手在工作中遇到的问题来考虑整体布局与工作布局方式^[1-3]。在穿鞋带过程中,鞋孔直径小且排列紧密,对机械手控制精度要求高;鞋带具有柔性,容易导致机械手运动过程中发生干涉等问题,不利于对其运

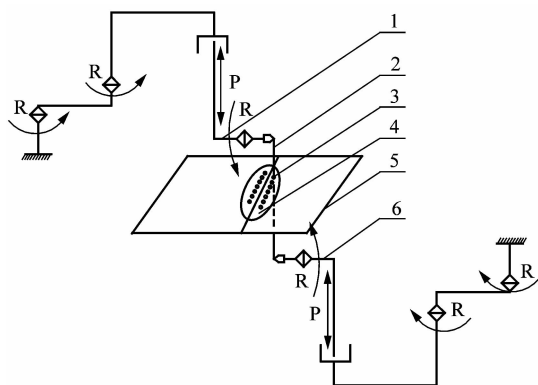
收稿日期:2014-04-16;修回日期:2014-06-26

基金项目:宁波市产业技术创新及成果产业化重点项目(2013B10013)

作者简介:严楠(1987),男,河北唐山人,硕士研究生,主要研究方向为机械信息测试和控制系统。E-mail:yannan2008h@163.com

动控制,这些问题应首先从整体布局方式考虑。

本设计的工作方式是通过采用2个结构完全相同的机械手相配合作业,共同完成穿鞋带的任务。整体布局如图1所示。具体工作过程是:第一个机械手的末端执行器牵引鞋带头穿入鞋带孔,另一个机械手的末端执行器在另一侧夹住鞋带、通过相应运动将鞋带拉出、并从另一侧的下一孔穿出,2个机械手依次交替完成穿鞋带的任务。图1所示为穿鞋带工作布局,具有干涉小、工作空间大、结构紧凑、占用工作场地面



1—机械手1;2—鞋带;3—目标鞋孔;4—鞋带;5—工作台;6—机械手2

图1 机械手配合穿鞋带布局图

Figure 1 Manipulator wearing shoelaces layout

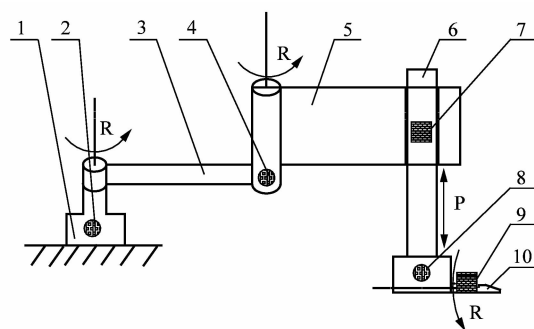
积小等特点。

1.2 机构设计与优化

机构设计是机械手设计的重要环节,根据穿鞋带作业要求确定机械手的自由度、组成形式、关节数目和配置方式,使机械手具有最优的工作空间和工作性能。

本设计采用4自由度的“RRPR”型串联式的机械手臂,机构示意图如图2所示。基座固定于操作台,连杆1通过旋转副与基座相连,采用电机驱动,并将电机1安装于基座上,以便降低机械手运动时的惯量;连杆2与连杆1之间亦为旋转副,驱动电机安装于连杆2上;滑杆与连杆2之间是移动副,用气缸1驱动;末端执行器与滑杆之间是旋转副,用电机3驱动。气缸2用于控制末端执行器的工作。该机械手臂运动灵活、工作空间大,各关节之间具有联动功能,确保了机械手在穿鞋带作业过程中具有良好的空间姿态调节功能。

高速度、高精度是“RRPR”型机械手臂工作性能的重要指标,而影响这些指标的关键因素之一是各个构件的质量。由于串连机械手的驱动装置一般都安置在关节处,致使机械悬臂增加,运动时惯性增大,严重影响机械手运动时的平稳性和精度控制。由于



1—基座;2—电机1;3—连杆1;4—电机2;5—连杆2;6—滑杆;7—气缸1;8—电机3;9—气缸2;10—末端执行器

图2 机械手结构简图

Figure 2 Manipulator structure diagram

“RRPR”型机械手臂的构件多为细长杆,整体刚度会影响机构的性能,因而需要对优化设计的“RRPR”型机械手臂的力学性能进行分析验证,在保证安全工作的前提下尽量减小整体质量,以确保机械手良好工作。

2 “RRPR”型机械手臂静刚度分析

当机械手执行穿鞋带任务时,末端执行器会对周围环境施加一定的力或力矩;反过来,这种接触力(或力矩)也可能使末端执行器偏离理想的位置,而偏移量的大小与该机械手的静力学刚度有关^[4]。因而“RRPR”型机械手臂静刚度直接会影响该机械手的定位精度。对“RRPR”型机械手臂静刚度特性的研究可首先从静刚度映射关系进行分析,即研究机构驱动系统与传动系统等的输入刚度与机械手末端输出刚度之间的映射关系。对于串连机械手臂,驱动与传动系统的刚度合在一起用弹簧常数 k^i 表示,以反映关节 i 的变形与所传递力矩(或力)的关系,用 ΔX 表示机械手末端的变形,是由各关节变形为 $(\Delta q_i$ 各关节的变形)的累积效果。用 J 表示雅克比矩阵,由速度雅克比矩阵($m \times n$ 维)的定义可得

$$\Delta X = J(\Delta q_1, \Delta q_2, \dots, \Delta q_n)^T \quad (1)$$

可知末端执行器变形与机械手静刚度和末端等效力旋量之间的关系为

$$\Delta X = CF \quad (2)$$

其中, F 为机械手末端的等效力旋量, C 为机械手的柔度矩阵($m \times n$ 维)。定义 C 逆为机械手的刚度矩阵 K ,则 C, K 表达式可分别表示为:

$$C = J \text{diag}(k_1, k_2, \dots, k_n)^{-1} J^T, \quad (3)$$

$$K = C^{-1} = J^{-T} \text{diag}(k_1, k_2, \dots, k_n) J^{-1}. \quad (4)$$

式(2)反映了在外部工作环境产生的等效力旋量 F 在一定条件下,末端执行器的变形量大小取决于机

械手本身的静刚度特性,该特性会直接影响机械手的工作精度。由式(3)和式(4)可以看出,柔度矩阵和刚度矩阵都是对称阵,且结果与机构的驱动刚度和雅克比矩阵有关。对整个工作空间而言,可以利用静刚度矩阵的最小奇异值来分析其工作空间中的刚度情况。作为一项评价机械手刚度特性的重要指标,静刚度不仅与机械手的拓扑结构有关,而且与机构的尺寸参数

和截面参数密切相关。因此,对机械手结构进一步优化是提高机械手的静刚度性能的一种有效方法^[5-8]。

3 “RRPR”型机械手臂有限元分析

由于 ANSYS 的造型功能较弱,本设计通过 SolidWorks 软件建造结构模型,并另存为 parasolid. x_t 格式,然后导入 ANSYS Workbench 求解分析。AWE 静力学求解过程如图 3 所示^[9]。

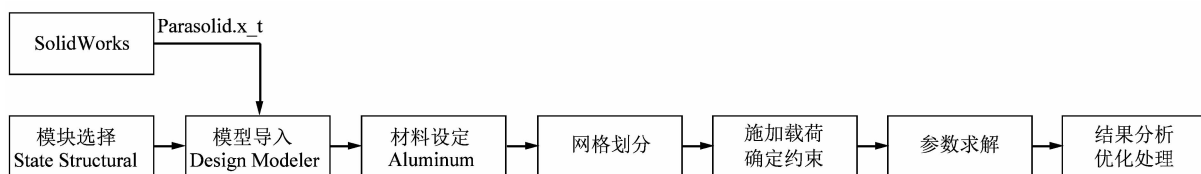


图 3 AWE 静力学求解图

Figure 3 AWE Statics Solution diagram

3.1 构建“RRPR”型机械手臂力学模型及求解

在设计过程中,选择铝合金作为主体材料,重力默认向下。穿鞋带机械手的手爪牵引鞋带运动,在实际工况下,所受最大力不超过 20 N,等效为机械手末端执行器手爪左右两部分分别添加 10 N 的外力。显然,当受力方向一致时机械手整体的弯曲变形和所受的剪切力最大,也是工作最恶劣状态,应在此状态下构建机械手的静态力学模型。构造的“RRPR”型机械手臂力学模型如图 4 所示。

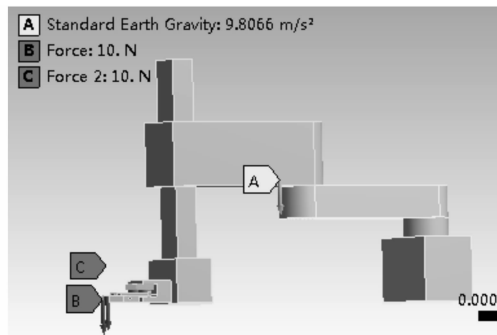


图 4 机械手静态力学模型

Figure 4 Manipulator static mechanics model

3.2 设计参数及分析

1) 经分析计算可得:连杆 2 质量 5.888 kg;连杆 1 质量 2.413 kg,而整体质量为 14.220 kg,因此二者质量之和占整个机械手总体质量的 58.38%,是机械手达到轻量化要求优化处理的首选对象。

2) 最大变形发生在末端执行器末端,最大变形量为 0.168 mm,如图 5 所示。

3) 最大剪切应力 5.30 MPa,如图 6 所示。破坏程度最大的位置在末端执行器与齿轮连接的连杆上,在

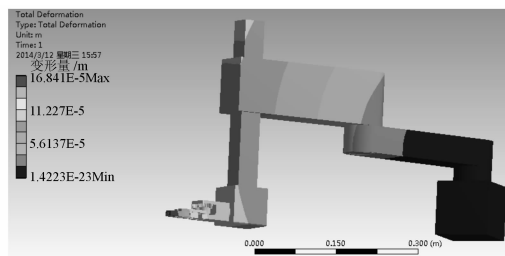


图 5 弯曲变形云图

Figure 5 Deformation nephogram

整体框架上是比较薄弱的结构,如图 7 所示。此外,与基座相连的连杆所受剪切应力相对于周边结构较大,局部结构安全性差,影响整体刚度,需要对其结构尺寸、杆件厚度需要适当调整。

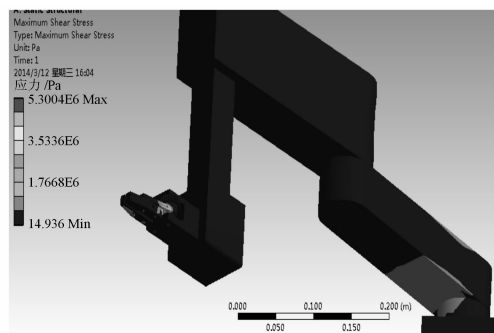


图 6 整体剪切力云图

Figure 6 Overall shear stress nephogram

针对原设计中出现的问题,又进行了进一步的优化设计^[10]:①连杆 1 加厚 10 mm;②基座连杆 1、连杆 2 及滑杆内部去除部分材料;③末端执行器与齿轮之间的连杆改用钢材料。

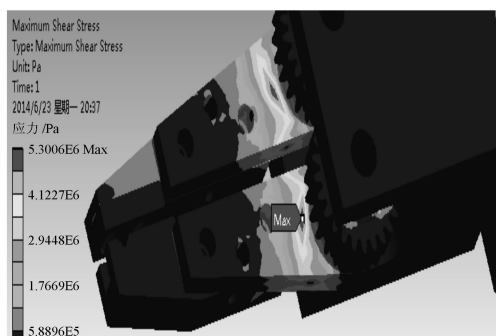


图7 最大剪切应力位置

Figure 7 Maximum shear stress location

3.3 “RRPR”型机械手臂优化设计结果评价

优化设计后对各个参数进行了分析,并将优化设计前后指标参数进行比对,如表1所示。

表1 优化分析参数表

Table 1 Optimization analysis parameter table

方案	质量/kg	最大变形/mm	最大剪应力/MPa
原设计	14.220	0.168	5.30
优化设计	11.729	0.119	4.98

从上述结果中可知,新方案相对于原方案最大弯曲变形量降低了 0.049 mm,最大剪切应力降低了 0.32 MPa,整体刚性有了较大的改善。而且整体质量相对于原设计减少 2.491 kg,降低了 17.52%。“RRPR”型机械手臂的力学特性得到了显著改善,能够满足机械手轻量化的要求,从而使得使机械手运动更加灵活,控制更加精确。

4 结语

目前带有穿鞋带功能的机械手在国内外还未曾研发,根据制鞋生产中穿鞋带工序的特点设计了一种新型机械手结构。由于刚度解析模型具有一定的复杂

性,不利于对更复杂机构进行研究计算,本文基于静刚度理论将机械手模型导入 ANSYS 软件进行分析,提高求解的速度与精度;从结构、尺寸、材料等方面进行调整优化,在静态特性层面上提高了机械手的工作性能;相比市场上的“SCARA”机器人,从最大弯曲变形数据可以发现“RRPR”机械手在垂直、水平空间具有较好的刚度,有利于改善其运动速度及定位精度。该方法简化了模型设计,提高了设计效率,节约了研发周期和成本,具有较强的实用性。但本文未对穿鞋带机械手运动时的动态特性作出必要的分析与评价,后续还需要进一步地探讨。

参考文献:

- [1] 陈燕,邹湘军,徐东风,等.荔枝采摘机械手机构设计及运动学仿真[J].机械设计,2010,27(5):31-34.
- [2] 梁喜凤,王永维,苗香雯.番茄收获机械手机构尺寸优化设计[J].机械设计与研究,2008,24(1):21-24.
- [3] 赵大兴,周小明,李九灵.集装箱喷漆机械手工作空间分析与仿真[J].机械设计,2008,2(25):15-17.
- [4] CHEBOXAROV V V, FILARETOV V F, VUKOBRATOVIC' M. Raising the stiffness of manipulators with lightweight links[J]. Mechanism and Machine Theory,2000,35(1):1-13.
- [5] DUMAS C, CARO S, CHERIF M, et al. Joint stiffness identification of industrial serial robots[J]. Robotica,2012,30(4):649-659.
- [6] 于靖军,刘辛军,丁希仑,等.机器人机构学的数学基础[M].北京:机械工业出版社,2008.
- [7] 田野,陈晓鹏,贾东永,等.仿人机器人轻型高刚性手臂设计与运动分析[J].机器人,2011,33(3):332-339.
- [8] 王鹏,徐晓希,李吉祥,等.小型化四足机器人的运动学分析及仿真研究[J].机电工程,2013,30(8):901-904.
- [9] 李兵,何正嘉,陈雪峰,等. ANSYS Workbench 设计、仿真与优化[M].北京:清华大学出版社,2013.
- [10] 芮执元,马占义.铝锭码垛机械手框架的应力分析与优化[J].机械设计与制造,2010(5):141-143.

(上接第7页)

参考文献:

- [1] 郭兆阳,王元华,徐宏.急冷废热锅炉进口分配器内分布管椭圆度对气体流动与分布的影响[J].化工学报,2012,63(8):2365-2374.
- [2] TERUKAZU O, HIDEYA N, YUKIYASU T. Heat transfer and flow around an elliptic cylinder[J]. Heat Mass Transfer, 1984,27(10):1771-1779.
- [3] BOURIS D, PAPADAKIS G, BERGELES G. Numerical evaluation of alternate tube configurations for particle deposition rate reduction in heat exchanger tube bundles[J]. Heat Fluid Flow, 2001,22(5):525-536.

- [4] LI Z, DAVIDSON J H, MANTELL S C. Numerical simulation of flow field and heat transfer of streamlined cylinders in cross flow[J]. Heat Transfer, 2006, 128(6):564-570.
- [5] XIMENES M P. Heat and mass transfer in elliptical tubes and plate fin heat exchangers[D]. Sao Jose dos Campos, Brazil: Air Force Institute of Technology, 1981.
- [6] 马正飞,殷翔.数学计算方法与软件的工程应用[M].北京:化学工业出版社,2004.
- [7] 韩占忠,王敬. FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用[M].北京:北京理工大学出版社,2006.
- [8] 张奕主.传热学[M].南京:东南大学出版社,2004.