

[新设备·新材料·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.05.015

面向上纱机器人的末端执行器的结构设计

焦航^{1,2}, 金守峰^{1,2}

(1. 西安工程大学机电工程学院, 陕西西安 710600;
2. 西安工程大学西安市现代智能纺织装备重点实验室, 陕西西安 710600)

摘要:针对筒子纱的人工上纱效率低、劳动强度高问题,课题组设计了面向上纱机器人的末端执行器。根据筒子纱的结构特点和上纱工艺要求,采用 SolidWorks 软件对末端执行器进行建模,设计具有双移动内撑式手爪、自动调节手爪间距装置及气动推纱机构的末端执行器,实现单次2个筒子纱的抓纱和推纱的上纱过程。对抓取机构建立静力学模型,通过 SolidWorks 软件和 ANSYS 软件对末端执行器的关键结构零部件进行运动学和静力学的仿真分析。仿真结果表明抓取机构的运动过程稳定,结构可靠,达到了设计要求。

关键词:上纱机器人;筒子纱;末端执行器;内撑式手爪;SolidWorks 软件

中图分类号:TH114 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2020)05-0084-06

Structural Design of End Effector of Yarn Loading Robot

JIAO Hang^{1,2}, JIN Shoufeng^{1,2}

(1. School of Mechanical & Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;
2. Xi'an Key Laboratory of Modern Intelligent Textile Equipment, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710600, China)

Abstract: Aiming at the problems of low efficiency and high labor intensity of manual yarn loading of bobbin yarn, an end effector of the yarn loading robot was designed. According to the structural characteristics of the bobbin yarn and the requirements of the yarn loading process, the end effector was modeled by SolidWorks software. The designed end effector is composed of a two-way movable internal supporting gripper, an automatic spacing adjustment device and a pneumatic yarn pushing mechanism, which realizes the process of grasping and loading two bobbins at a time. The static model of the grasping mechanism was established, and the kinematics and static simulation analysis of the key structural components of the end effector was carried out by SolidWorks and ANSYS software. The simulation results show that the motion process of the grasping mechanism is stable and the structure is reliable, which meets the design requirements.

Keywords: yarn loading robot; bobbin yarn; end effector; internal supporting gripper; SolidWorks software

筒子纱是纺织企业的络筒工序的产品,是从上道工序的细纱机或捻线机上落下来的管纱,根据织布、针织等用纱的后道工序的要求,在络筒机上卷绕成具有一定卷绕密度的筒纱。筒子纱从络筒机下来后,通常需要大量的人工来完成转运和包装,其工作强度大,效率低^[1]。随着工业机器人技术的快速发展,带有不同末端执行器的机器人被应用在抓取、装配、码垛和采摘

等各领域^[2-3]。姜杰凤等^[4]设计的一种用于飞机高锁螺母的自动安装的末端执行器,该末端执行器可完成除装配外的自动传送等功能,但其控制系统有待完善;夏海渤等^[5]设计的一种对车体进行打磨的末端执行器,包括控制组件和除尘组件,该末端执行器能够很好地代替人工完成打磨,但打磨过程中的除尘效果不是很好;朱志伟等^[6]设计的一种用于物体焊接的末端执

收稿日期:2020-03-14;修回日期:2020-07-22

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2017JM5141);陕西省教育厅专项科研计划项目(17JK0334);陕西省科技计划项目(2020GY-172);西安市科技局创新引导项目(201805030YD8CG14(5));西安市现代智能纺织装备重点实验室项目(2019220614SYS021CG043)。

第一作者简介:焦航(1966),男,陕西彬州人,硕士研究生,主要研究方向为机器视觉测量。通信作者:金守峰(1979),男,辽宁北镇人,博士,副教授,主要研究方向为机器视觉检测与控制。E-mail:jdxysf@126.com

行器,配合机器人本体实现焊接,保证焊接的平稳;李克讷等^[7]设计的一种用于配料的末端执行器,可灵活的完成工作,但因其工作空间的影响,其末端执行器的轨迹会有部分位置偏差;张国龙等^[8]设计的一种用于抛光、打磨类末端执行器,该末端执行器可完成多项加工过程,但其力控的方式存在延迟大等问题;沙智华等^[9]设计的一种用于孔类加工的末端执行器,使用楔形结构抱紧的方式,工作过程受偏心距影响较大。霍洪鹏等^[10]设计的一种应用在机床上的上下料末端执行器,通过4自由度机器人完成末端执行器的位姿变换,在完成上下料的过程中仍有部分位置偏差;陈建宇等^[11]设计的一种对车削类工件上下料的末端执行器,可抓取各类尺寸的工件,但仅面向圆轴类零件;冯慧娟等^[12]设计的一种搬运机器人,共由4个通用模块组成,搬运情况较好,但需要人工选取具体工况。Bac等^[13]设计的一种用来采摘甜椒的末端执行器,通过真空吸盘将甜椒吸附住,进而由气动的唇形切刀对甜椒的果梗进行切割,该末端执行器在抓取时的成功率较高,但其抓取的方式对物体有一定程度的损伤,仅适用于特定物体的抓取;Silwal等^[14]设计的一种对苹果进行抓取的末端执行器,通过绳来带动手指包络进而夹持果实,该末端执行器在抓取过程用时较短,但由于该末端执行器所花成本较低,其抓取过程的鲁棒性有待提高。陈晨等^[15]设计了一种用于碳纤维叠层布的缝纫机辅助机构设计,运用机械设计理论、采用Pro/E软件对辅助机构进行建模和仿真,并对机构进行速度、加速度和位移分析;叶敏和范娟等^[16-17]设计的一种对荔枝进行采摘的末端执行器,通过仿人手指对果梗进行抓取,进而使用旋转切刀对果梗进行切割,其仿人的手指具有多指抓取特征,使得抓取过程比较稳定,但是适用面比较窄。

课题组在分析筒子纱的结构特点及工艺要求的基础上,设计开发了上纱机器人抓取筒子纱的末端执行器。该末端执行器由内撑式的抓取机构、气压驱动的推纱机构和间距调节装置等3部分构成,实现单次抓取2个筒子纱,提高抓取效率并降低劳动强度。

1 筒子纱的结构特征及上纱工艺要求

原纱在通过络筒机的卷绕成型后形成了如图1所示的筒子纱。筒子纱的外形为圆柱形或圆锥形,外径 D_1 的范围为210~275 mm,锥形筒子纱的上下两端直径差($D_1 - D_2$)为10 mm^[18-19],纱线卷绕在中空的纱管上,纱管的直径为 d ,质量为1.6~3.8 kg。筒子纱从包装箱中取出后要通过人工逐一挂到纱架上,在上

纱过程中存在重复性劳动较多,强度大且效率低^[20]的问题。

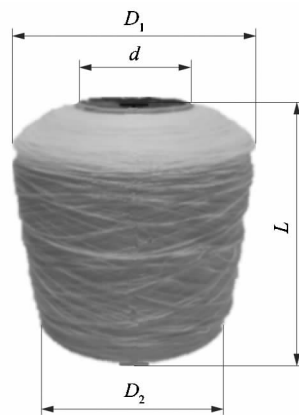


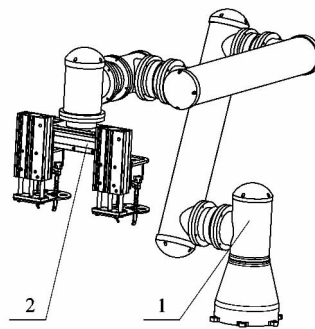
图1 筒子纱结构

Figure 1 Structure of bobbin yarn

2 上纱机器人的末端执行器的结构设计

2.1 上纱机器人总体设计

根据筒子纱的结构特点和上纱工艺要求,课题组设计了图2所示的上纱机器人。由机器人本体和末端执行器构成,上纱机器人的本体为6自由度的关节型机器人,满足不同空间位置上的筒子纱上纱工艺要求,采用电力驱动,有效载荷为100 N。末端执行器为双内撑式结构,采用气压驱动。



1—机器人本体;2—末端执行器。

图2 上纱机器人

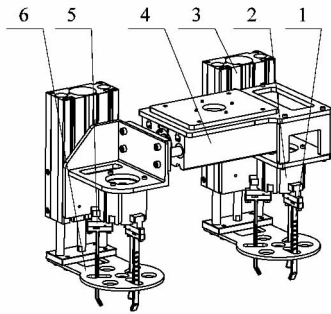
Figure 2 Yarn loading robot

上纱机器人采用固定工位,代替人工完成上纱,通过末端执行器对成对码放的筒子纱进行抓取,由本体机器人关节的空间运动将筒子纱放置在间距相等的纱架上,完成上纱。

2.2 末端执行器的结构设计

为了避免筒子纱的表面损伤和污染,以及提高抓取效率,课题组根据筒子纱的结构特点,设计了如图3所示的单次抓取2个筒子纱的双内撑式末端执行器。执行器由内撑式专用手指、驱动手指气缸、导杆气缸、

间距调节装置和推板等元件构成。



1—内撑式专用手指;2—右侧驱动手指气缸;3—右侧3轴导杆气缸;4—间距调节装置;5—手指气缸连接件;6—推板。

图3 末端执行器结构

Figure 3 Structure of end effector

2.2.1 抓取机构的设计

由于筒子纱的被抓取位置为内表面,其形状为圆锥形,课题组采用了内撑式手抓结构。为了抓取牢固,内撑式手抓结构采用了如图4所示的3个手指的方案。为了减轻质量,手指选用碳纤维材料。手指的下部与筒子纱内表面接触,手指上部有连接机构,用于连接驱动装置。为了适应不同内径的筒子纱,采用了3爪气缸作为驱动元件,使3个手指平移运动完成内撑式抓取。手抓结构安装时须使圆柱形气缸的轴线与筒子纱轴线重合。

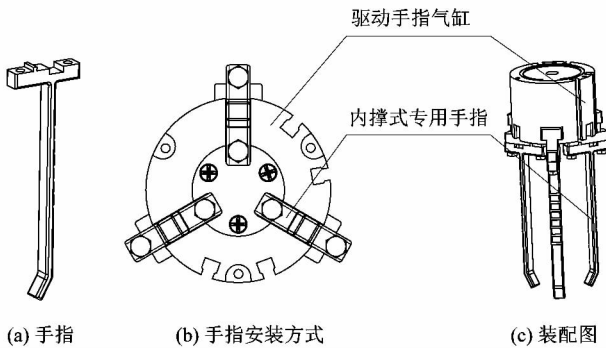
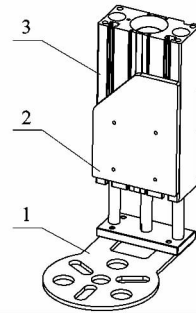


图4 内撑式手爪结构

Figure 4 Internal supporting gripper structure

2.2.2 推纱机构的设计

机器人本体将抓取到的筒子纱运送到纱架上时,为了自动完成筒子纱的放置,课题组设计了如图5所示的自动推纱机构,该机构由推板、导杆气缸连接板和导杆气缸等元件构成。推板为执行机构,气缸为驱动机构,在气缸的驱动下,推板可沿着抓取机构的圆柱形气缸轴线做平移运动,当抓取筒子纱时,推板退回到初始位置;放置筒子纱时,推板向外推出,将筒子纱放置在纱架上。



1—推板;2—3轴导杆气缸连接板;3—3轴导杆气缸。

图5 推纱机构

Figure 5 Pushing mechanism

2.2.3 间距调节装置的设计

筒子纱在纱架上放置的位置是固定的,而在抓取时,成对摆放的筒子纱的间距会有所变化,为了使上纱机器人具有柔性抓取的功能,课题组设计了如图6所示间距调节装置,该装置由气缸作为驱动元件,推杆作为执行元件。间距的初始状态按纱架上两筒子纱的轴线间距来设定,当被抓取的筒子纱间距有变化时,则可以通过气缸驱动推杆来调节,使抓纱机构圆柱形气缸的轴线与筒子纱的轴心重合,达到有效抓取和放置。

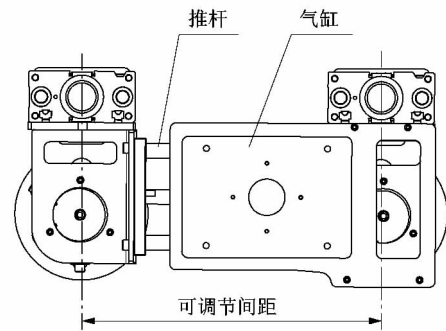


图6 间距调节装置

Figure 6 Spacing regulating device

3 抓取机构的静力学模型

课题组通过虚位移的原理构建了如图7所示的抓取机构的静力学模型,分析各个力的联系。

由虚功原理可知

$$T\omega_1 = Fv \quad (1)$$

式中: T 为输入连杆的力矩矢量; ω_1 为输入连杆的虚拟角速度; F 为外力矢量; v 为外力矢量方向的虚拟速度矢量。

根据刚体平面运动则有

$$v = \omega_2 d_1 \quad (2)$$

式中: ω_2 为非输入连杆的虚拟角速度; d_1 为接触点 O_1 至抓取机构手指末端的长度。

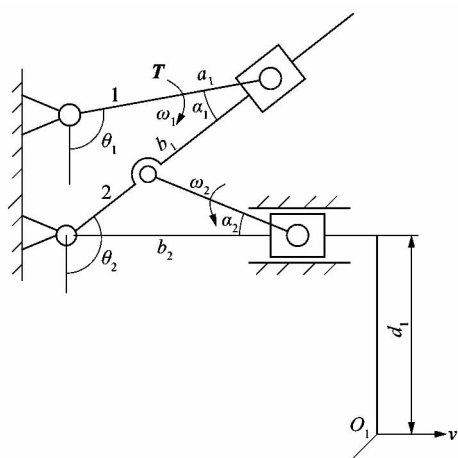


图7 抓取机构的静力学模型

Figure 7 Static model of grasping mechanism

由于抓取机构的左右2个内撑式的手爪为对称放置,其结构和原理相同,因此课题组只对1个内撑式的手爪的手指结构建立静力学模型,如图8所示。图中, \$\theta_1, \alpha_1, \alpha_2\$ 和 \$\theta_2\$ 为角度参数; \$\omega_1\$ 和 \$\omega_2\$ 为虚拟角速度; \$a_1, b_1\$ 和 \$b_2\$ 为连杆长度。

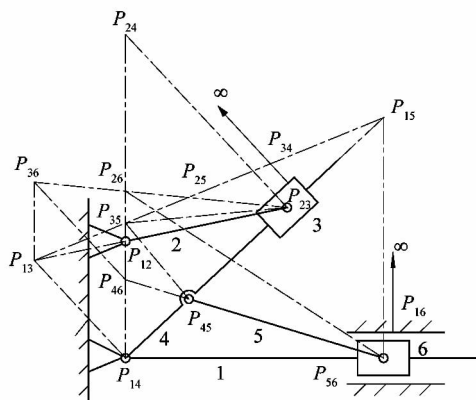


图8 内撑式手爪的速度瞬心图

Figure 8 Velocity instantaneous center diagram of internal supporting gripper

由于抓取机构的构件数量 \$k=6\$, 则由式(3)可知抓取机构所具有的瞬心的数目 \$N=15\$。

$$N = k(k - 1) / 2。 \quad (3)$$

由图8可知,瞬心 \$P_{12}, P_{14}, P_{23}, P_{34}, P_{45}, P_{16}\$ 和 \$P_{56}\$ 均在各运动副上,通过式(4)~(5)可计算瞬心 \$P_{13}, P_{15}, P_{24}, P_{25}, P_{26}, P_{35}, P_{36}\$ 和 \$P_{46}\$。

$$v_{P_{45}} = \omega_1 L_{P_{12}P_{45}}; \quad (4)$$

$$\omega_2 = \frac{v_{P_{45}}}{L_{P_{15}P_{45}}} = \frac{\omega_1 L_{P_{12}P_{45}}}{L_{P_{15}P_{45}}}。 \quad (5)$$

式中: \$v_{P_{45}}\$ 为点 \$P_{45}\$ 处的瞬时速度; \$L_{P_{12}P_{45}}\$ 为点 \$L_{P_{12}}\$ 至 \$L_{P_{45}}\$ 的长度; \$L_{P_{15}P_{45}}\$ 为点 \$L_{P_{15}}\$ 至 \$L_{P_{45}}\$ 的长度。

通过式(1)、(2)、(4)、(5)可得到输入连杆的力矩矢量 \$T\$ 和外力矢量 \$F\$ 的关系:

$$F = T \frac{\omega_1}{d} \cdot \frac{L_{P_{15}P_{45}}}{\omega_1 L_{P_{12}P_{45}}} = T \frac{L_{P_{15}P_{45}}}{d L_{P_{12}P_{45}}}。 \quad (6)$$

根据同样的方法可以得到连杆结构中的输入和外力的关联。

由式(6)可知,内撑式手爪的抓取机构对筒子纱的作用力可根据力矩的大小进行调节。通过现有的力矩检测装置对机械手指的力矩进行检测,得到机械手爪在筒子纱处的作用力,以保证末端执行器在抓取筒子纱的过程中稳定安全。

4 关键零部件的仿真分析

4.1 抓取机构的运动学仿真分析

为了验证本设计的上纱机器人末端执行器在抓取过程中的运动性能及装置的安全性和可靠性,在对抓取机构采用 SolidWorks 软件建模的基础上,进行运动学的仿真分析。本设计中的筒子纱的纱管内径为 65 mm, 抓取机构在初始状态时,内撑式手爪所形成的外包络圆柱面如图9所示,其直径为 35 mm。抓取机构的位移、速度及加速度运动学仿真分析如图10所示。

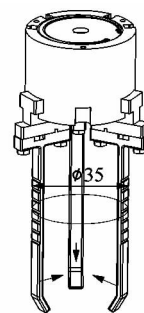


图9 内撑式手爪外包络圆柱面

Figure 9 Internal supporting gripper outer cylindrical surface

由图10(a)可知,初始状态时内撑式手爪进入筒子纱的纱管中心,3爪气缸驱动手指移动,启动时的内撑式手爪的外包络圆柱面直径为 35 mm, 5.0 s 后内撑式手爪接触到筒子纱内表面;由图10(b)可知, 0.0 ~ 2.5 s 时速度为递增过程, 2.5 ~ 5.0 s 时速度为递减过程,在 2.5 s 时抓取机构的内撑速度达到最大值为 4.5 mm/s;由如图10(c)可知, 0.0 ~ 2.5 s 时内撑式手爪为匀加速运动, 2.5 ~ 5.0 s 时为匀减速运动,保证手指运动能够稳定的接触到筒子纱内表面。

4.2 手指结构的静力学分析

由于抓取机构采用内撑式的抓取方式对筒子纱进行抓取,手指作为与筒子纱直接接触的零部件,其结构

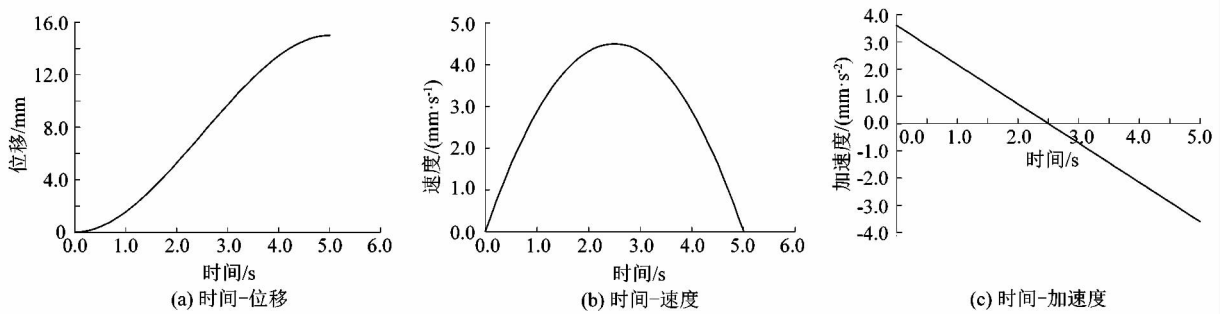


图 10 抓取机构的运动分析

Figure 10 Motion analysis of the grasping mechanism

以及在抓取过程中的受力情况将直接影响末端执行器抓取的安全性和稳定性。课题组采用 ANSYS 软件对抓取机构的手指结构进行有限元分析,手指结构用 SolidWorks 软件建模,将其导出 x_t 格式,导入 ANSYS Workbench 中,手指结构选取材料为碳纤维。在 Engineering Data 界面中设定材料属性,摩擦因数 $\mu = 0.3$,密度为 $1.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。在 Mesh 选项中添加 Method 进行网格划分,设置网格划分方法为 Multizone,在网格划分详细列表中将 Relevance 设置为最大值 100,将 Relevance Center 设置为 Fine,网格大小设置为 5 mm。添加 5.22 N 的约束力后对手指模型进行求解,手指结构的变形云图和等效应力云图如图 11 所示。

由图 11 可知,发生变形最大的地方是手指的指尖部位,变形的最大值为 0.039 518 mm;手指结构的最大应力发生在末端与驱动结构连接处,最大应力为 1.706 8 MPa。与碳纤维的屈服强度 9.3 MPa 相比,手指所受应力小于材料的屈服强度,表明手指的结构设计满足筒子纱抓取过程中的应力要求,内撑式手爪在抓取筒子纱的过程中,可保证其稳定性和安全性。

5 结论

1) 课题组针对以劳动密集型为主的纺织企业人工上纱效率低及强度高等问题,对筒子纱的结构和上纱工艺进行分析。采用 SolidWorks 软件对上纱机器人的末端执行器进行模型的建立与零件图的装配,该末端执行器由抓取机构、推纱机构和间距调节装置构成,以气压驱动作为动力,通过平移内撑式的手爪结构实现抓取,能够自适应调节抓取机构的间距。

2) 课题组建立抓取机构的静力学模型,得到了输入连杆的力矩矢量 T 和外力矢量 F 的关系;在 SolidWorks 软件建模的基础上,对抓取机构进行了运动学仿真;由仿真结果可知,抓取机构以匀加速和匀减速的运动方式移动内撑式手爪,保证了抓取运动的稳定性。

3) 课题组对抓取机构采用 ANSYS 有限元分析软件进行静力学分析,结果表明手指结构的最大应力发生在末端与驱动结构连接处,最大应力为 1.706 8 MPa,小于碳纤维的屈服强度 9.3 MPa。而发生变形最大的地方是手指的指尖部位,变形的最大值为 0.039 518 mm。该设计满足筒子纱抓取过程中的应力需求。

参考文献:

[1] 周鹏飞,吕汉明,谢楠,等.筒子纱编织袋包装与码垛控制系统的开发[J].棉纺织技术,2018,46(5):27.
 [2] 杜思明,张仁朝.基于机器视觉的自动分拣码放系统研究[J].包装工程,2018,39(15):194.

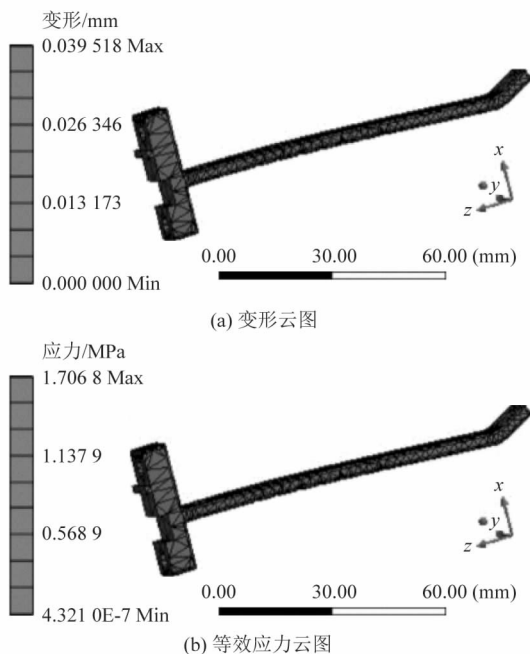


图 11 手指结构的变形云图和等效应力云图
 Figure 11 Deformation cloud diagram and equivalent stress cloud diagram of finger structure