

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.09.004

一种机械臂末端旋拧工具的设计^{*}

于学文^{1,3},侯月阳,卢山,章晓明,王奉文

(上海航天控制技术研究所 上海市空间智能控制技术重点实验室,上海 201109)

摘要:针对航天器在轨精细操作应用需求,对螺钉旋拧工具进行了研究,设计了一种适用于空间机械臂自主旋拧螺钉的末端工具。该工具由机械臂末端关节电机驱动旋转,利用电磁铁对螺钉吸附、夹持和释放,通过复位弹簧的压缩和复位实现了对螺钉的随动而不需在旋拧过程中改变机械臂的整体位置和姿态,以臂上力矩传感器实时监测了拧紧力矩。提出了基于智能手眼相机识别与测量的柔顺自适应旋拧方法,并在地面仿真模拟操作中对测量精度和旋拧力矩进行了测试。试验结果表明:所设计的末端旋拧工具机械结构简单,易于操作控制,实现了设计功能,能可靠地对螺钉进行旋拧作业并合理控制拧紧力矩。

关键词:空间机械臂;末端工具;拧螺钉;电磁铁;复位弹簧

中图分类号:TH122;TP241

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)09-0971-05

Design of a manipulator end effector used to twist screws

YU Xue-wen, HOU Yue-yang, LU Shan, ZHANG Xiao-ming, WANG Feng-wen

(Shanghai Key Laboratory of Space Intelligent Control Technology, Shanghai Aerospace Control
Technology Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: Aiming at the application requirements of the spacecraft on-orbit fine operation, the facility used to twist screws was investigated. An end effector was designed for a space manipulator twisting screws automatically. The effector was rotated by the manipulator's end joint motor, and an electromagnet was used to take up or put down a screw, which was allowed to move back and forth without changing the total attitude or position of the space manipulator by means of the compression and extension of the back-moving spring. The tightening torque was real-time monitored by the manipulator's torque sensor. A flexible adaptive method was presented to twist screws based on smart hand-eye camera recognition and measurement, the measurement accuracy and tightening torque were tested in ground-based simulated operation. The experimental results show that the end effector has simple mechanical structure and is easy to operate and control, it realizes the designed function and can be reliably applied for twisting screws operation while controlling the tightening torque appropriately.

Key words: space manipulator; end effector; twist screw; electromagnet; back-moving spring

0 引言

随着航天科技的发展,空间机器人和空间机械臂已越来越多应用于在轨组装、维护、释放、捕获、回收与科学实验等操作。空间和舱外任务日益复杂多样,不同的任务需要配备专用的执行器^[1]。其中,对螺钉的旋拧安装和拆卸就是一种具有较高要求的精细化灵巧操作。

利用机械臂和机器人进行螺钉旋拧的机械化作业在工业领域的生产流水线上已经有了一定范围的应用,并实现了较高程度的自动化^[2]。但这些应用都限于既定的工段工位,操作对象的位置坐标都是明确、不变的,并不涉及操作工具对操作对象的自主寻找、识别、测量、定位和对接等工作。此外,这些工业设备往往体积较大、组成复杂,并不能简单移植用于空间环境的操作。

目前航天领域舱内乃至舱外安装、拆卸、维修中的

收稿日期:2016-12-14

基金项目:上海市自然科学基金资助项目(16ZR1415600);上海市科技人才计划资助项目(17XD1420700)

作者简介:于学文(1985-),男,河南商丘人,硕士,工程师,主要从事空间执行机构设计方面的研究. E-mail:shtjyxw@163.com

螺钉旋拧都是由航天员手动操作完成。我国天宫二号开展了人机协同在轨维修试验,试验中的拧螺钉任务是航天员与机械手协同拿电动工具进行,而非机械手自主操作。面向未来空间任务和深空探索的潜在应用需求,研究自主作业工具和操作技术是很有必要的。

本研究针对某空间机械臂设计一种末端旋拧工具,与机械臂以及臂上的视觉相机、力矩传感器有机配合组成基于手-眼视觉的闭环操作系统,实现自主安装、拆卸螺钉的功能。

1 末端工具设计

末端工具进行拧螺钉操作需要协调同步两种动作:(1)旋转运动,驱动螺钉旋转;(2)直线运动,跟随螺钉进出。直线运动速度与旋转速度线性相关,为旋拧角速度与螺钉螺距的乘积。考虑到航天发射成本和空间环境作业特点,设计尽量简化机构复杂度、减小体积、降低重量、提高可靠性。

本研究设计的工具利用电磁铁线圈的通、断电对螺钉吸附、夹持和释放;利用复位弹簧的压缩和复位实现扳手组件对螺钉的随动,使机械臂更易操控;利用机械臂末端关节动力简化工具自身结构,与机械臂组成基于视觉识别的闭环系统。

1.1 总体方案

末端旋拧工具的三维模型如图 1 所示。

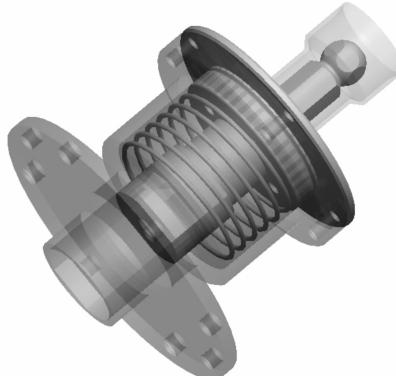


图 1 末端工具模型

该工具主要由适配筒、传动滑杆、扳手组件、电磁铁和复位弹簧等组件组成。

其内部结构如图 2 所示。

其中适配筒是末端工具的总装壳体,其内部安装传动滑杆及扳手组件并对其进行上、下限位;对外通过弹性联轴器与机械臂末关节的电机输出轴相连,带动整个末端工具做旋转运动进而旋拧螺钉,既保持初定位精度,便于初始旋入,又能在旋拧阶段提供一定的容差度,防止旋拧过程中发生卡死。传动滑杆与电磁铁和扳手组件固连成一体式滑动部件,它与适配筒通过

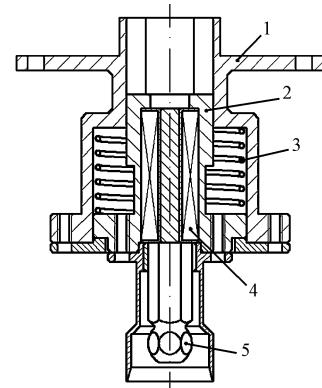


图 2 末端工具结构

1—适配筒;2—传动滑杆;3—复位弹簧;4—电磁铁组件;5—扳手组件

异形孔轴配合形成运动副,与适配筒保持同步旋转的同时可以相对滑动,用于带动扳手组件,并适应螺钉旋进旋出的直线运动,而不必时时操控调整机械臂的位置来配合这种运动。复位弹簧始终处于压缩状态,支撑在适配筒与滑动部件之间,通过该弹簧的压缩与复位实现对螺钉的紧密随动,保持末端工具的可滑动部件在各种姿态与操作中始终保持张紧力平衡状态,位置唯一确定。电磁铁组件安装在传动滑杆内,与扳手固连,通过控制线圈的通电断电,就能实现对螺钉的吸附、夹持和释放。扳手组件安装在传动滑杆上,与其共同旋转并前后滑动,通过扳手和头套与目标螺钉成功对接后对螺钉进行旋拧操作。该工具可以旋拧 M3 到 M8 的内六角圆柱头螺钉,对不同大小的螺钉,只需要更换相应规格的扳手组件即可。

1.2 复位弹簧

末端工具要有适中的径向刚度,用以保持扳手的位置与姿态,同时容许一定的位置和角度误差;但其轴线方向的刚度要小,便于扳手与螺钉的实时密切随动以及操作力的合理施加。旋拧螺钉时轴向的力矩和运动有一定的耦合,压缩复位弹簧能很好地满足这种轴向位置与力的双重要求。合理设计弹簧刚度和设置预压缩力,既能保持轴线方向的刚度使工具系统稳定,又能适应螺钉直线运动,在旋出螺钉时不产生过大的阻力,在施加力矩旋入螺钉的同时提供拧螺钉所需的轴向力^[3-4]。

末端工具需要进行竖直方向、水平方向以及各种不同角度的作业,弹簧受力因工况而异。其中扳手竖直朝上进行拆卸螺钉操作时弹簧受力最大,主要承受活动部件的重力、静动摩擦力和操作力等。其静态举起螺钉和动态旋拧螺钉时的受力分别见下式:

$$kx_0 = G_0 + G_d - f_{j1} - f_{j2} + F_s \quad (1)$$

$$k(x_0 + x) = G_0 + G_d - f_{d1} - f_{d2} + F_z \quad (2)$$

式中: G_0 —滑动部件自重,包括传动滑杆、电磁铁及其紧固件; G_d —螺钉及其相应扳手组件的自重; f_{j1}, f_{j2} —适配套筒与传动滑杆之间的静摩擦力; f_{d1}, f_{d2} —动摩擦力; F_s —适配套筒的约束力; F_z —螺钉对扳手的反作用力; x_0 —弹簧预压缩量; x —螺钉对弹簧的再压缩量; k —弹簧刚度。

弹簧刚度其计算公式如下式:

$$k = \frac{G \times d^4}{(8 \times D^3 \times n)} \quad (3)$$

式中: G —弹簧材料的切变模量; d —弹簧丝直径; D —弹簧中径; n —有效圈数^[5]。

弹簧主要起缓冲和预压作用,从机械结构可知,预压力只与弹簧刚度和压缩量有关。压缩量相同情况下,若弹簧刚度过小,不能提供足够的支撑力;若弹簧刚度过大,会造成旋出螺钉的负担。综合考虑,采用较小的弹簧刚度,以一定的预压缩量保证支撑力。经计算分析,研制的弹簧刚度为0.1 N/mm,弹簧丝直径1 mm,弹簧中径30 mm,有效圈数6圈,自由长度为30 mm,预压缩量6 mm,最大压缩量22 mm,允许操作长度为16 mm。这样,0.6 N的预压缩力足以保证所有工况下对滑动组件和螺钉的可靠支撑;最大压缩力2.2 N,也不会对螺钉旋拧造成显著的轴向阻碍。

1.3 电磁铁

末端工具利用直流螺管式电磁铁的通电、断电实现对螺钉的吸附、抓取、夹持、转运和释放。电磁铁产生的磁场强度与电流、线圈圈数及中心的铁磁体有关^[6]。设计中确定线圈的参数和铁磁体的选择,操作中通过电流控制磁场强度,进而控制吸力,确保螺钉能被可靠地吸住。本研究设计铁芯采用电工纯铁(DT4C),线圈骨架绕线轴径是5 mm,绕线外径为13 mm,绕线宽度27 mm,漆包线直径为0.5 mm,采用间叠式绕制,绕线圈数540圈。

目前,研究电磁铁吸力的方法主要有经验公式计算法、专业软件仿真计算法以及实验研究法,ANSYS软件计算结果比经验公式计算结果更加可靠^[7,9]。本研究采用ANSYS软件与公式计算相结合的方法进行分析计算,并在研制出样机后做了实测验证。

螺管式电磁铁吸力计算公式如下:

$$F = \frac{B^2 S}{2\mu_0} \quad (4)$$

式中: F —电磁力,N; μ_0 —真空磁导率, $4\pi \times 10^{-7}$ H/m; S —极面截面积,因螺钉及相应扳手的规格而异,m²; B —磁感应强度,与安匝数NI、气隙尺寸、材料特性等多种因素相关,T。

仿真分析显示,当励磁电流为0.6 A时,扳手头部

区域的磁感应强度约为0.5 T,由此可估算电磁铁对螺钉产生的磁吸力,以长16 mm的M8螺钉为例:

$$F = \frac{0.5^2 \times 41.57^{-6}}{2 \times 4 \pi \times 10^{-7}} = 4.12 \text{ N}$$

螺钉质量约10 g,重0.1 N,可见,电磁吸力足以保证对螺钉可靠吸附。

2 旋拧操作流程

本研究将螺钉旋拧工具安装在机械臂末端,组成完整的闭环操作系统,其中配合使用的,还有螺钉存放库安装板,用于固定、存放旋拧拆卸下来的或者备用待安装的各种规格的螺钉。

机械臂自主旋拧螺钉的工作可归类为旋出拆卸、旋入安装两种操作。其旋出拆卸操作的工作流程如下:通过基于视觉识别的闭环控制,操控机械臂带着末端工具定位对准螺钉头,并使扳手头套组件与螺钉头对接嵌合;电磁铁上电产生电磁力吸住螺钉;末端电机驱动扳手旋拧,旋出的螺钉推动弹簧缩进套筒,这个阶段只需机械臂末端关节电机旋转,而不必控制末端执行器的整体随动,机械臂的操控程序也因此而简化;待螺钉全部旋出后,机械臂缓慢后退,先使弹簧恢复到初始极限位置,再操作机械臂,将螺钉送往螺钉库;通过视觉识别闭环控制,操控机械臂末端工具带着拆卸下来的螺钉定位对准存放孔,经导向锥孔引导,将螺钉旋入;待螺纹旋合固定后,断电释放螺钉;机械臂复位,等待指令做下一步操作。

旋入安装操作与旋出拆卸操作的流程顺序相反:先定位、对接螺钉,电磁铁上电吸附,将螺钉旋出存放孔,再移送至安装位置,定位对准安装孔,预压紧,旋入、拧紧,安装完成,电磁铁断电释放螺钉,机械臂复位。

实现螺钉安装与存放首要解决的是螺钉与螺纹孔的初始旋合问题,本研究采用主动控制与被动适从相结合的方式来解决这一问题。主动控制通过机械臂本体的高精度位置操控以及基于视觉识别技术的闭环控制系统进行实施和保证。被动适从,一方面采用弹性联轴器进行适配筒与机械臂末关节电机输出轴之间的固连,既能保持同轴度以保证末端定位操作的高精度,又使其能够容许一定的位置误差和角度误差,在工具与目标对接有一定范围内的小偏差时仍能进行正常操作,提高系统的容差度。另一方面,本研究通过合理的导向结构设计,对螺钉进行对接引导。本研究在扳手组件中设置螺钉头套,头套与扳手及螺钉规格相对应,螺钉头套如图3(a)所示。其开口处设导向倒角,在扳手与螺钉对接的同时引导螺钉头进入头套,通过螺钉

头与头套间的孔轴配合使螺钉与扳手始终保持一定的同轴度,以避免水平和倾斜安装螺钉操作时因螺钉倾斜而导致不能旋合。分段式螺钉存放孔如图 3(b)所示。通过螺纹旋合固定存放拆卸下来或待安装的备用螺钉,在螺纹孔段前设计锥度的光孔引导螺钉旋入。

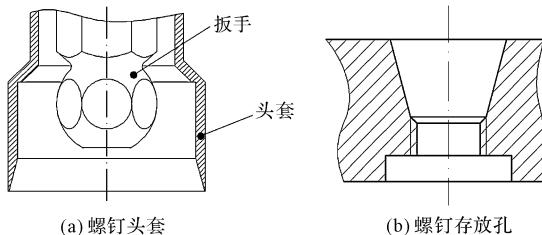


图 3 导向结构

3 基于单目视觉的旋拧螺钉试验

本研究完成末端工具研制,并装在机械臂上,利用视觉相机与控制器构成基于智能手眼相机识别与测量的柔顺自适应闭环操作系统,进行了旋拧螺钉的地面仿真模拟试验。

3.1 末端旋拧工具的研制

本研究按前述设计进行螺钉旋拧工具的加工、装配,并安装于机械臂末关节,其中螺钉头套被拆下以便于观测监控。

末端工具样机(不含螺钉头套)如图 4 所示。

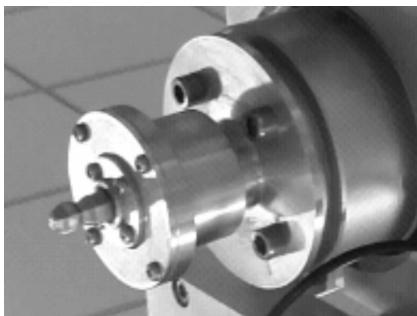


图 4 末端工具样机(不含螺钉头套)

本研究在试验前进行旋拧工具的调试,检查扳手组件可随传动滑杆在适配筒内进行顺畅滑动,确认复位弹簧的回复力大小适当,能将扳手组件及负载螺钉从适配筒内弹出,可靠地完成复位。

3.2 视觉测量方案与相机选型

为减小机械臂末端负载及降低系统复杂程度,本研究采用单目视觉测量方案。根据任务要求,设定镜头与目标距离在 400 mm 左右,测量系统布局如图 5 所示。

本研究根据设定的目标距离范围、测量分辨率要求以及工作景深要求,选择康奈视相机,相机系统选型具体如表 1 所示。

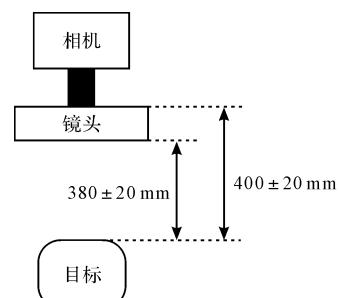


图 5 测量系统布局图

表 1 相机系统选型

部件名称	型号
相机	ISM - 1403 - 11
镜头	ML - MC25HR
光源	SF - HD 120 * 50 - 15 - W
接圈	VM - 400MM
线缆	编程线缆: 5 m
网线	CAT - 6; 5 m
模块	Micro
标定板	1 × 1, 100 × 100 (mm × mm)
系统	XM - Smart System

3.3 螺钉图像识别

本研究对操作目标螺钉进行智能识别,识别方法是将螺钉圆柱头的外圆轮廓及内六角凹槽的六边形轮廓作为螺钉特征,并将拍摄到的图像与标准螺钉图像特征进行比较,按照相似程度打分,相似度超过 80% 即认为是目标螺钉。通过相机的 PatternMAX 智能软件解算螺钉的外轮廓坐标信息,将每次得到的坐标差值发送给机械臂控制器,实现机械臂闭环控制。相机 200 万像素可达到的检测精度为 0.0625 mm/pixel,可以稳定检测小至 0.5 mm 的偏移。试验中相机拍摄的目标区域图像如图 6(a)所示。成功识别螺钉并做标记的情形如图 6(b)所示。

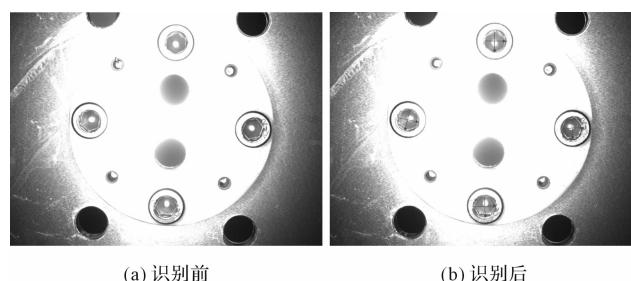


图 6 螺钉图像识别

3.4 螺钉旋拧试验

试验完成预设的旋拧螺钉工作流程。本研究通过基于视觉识别的闭环控制,机械臂末端旋拧工具准确定位目标螺钉,对螺钉进行旋松、拧紧、拆卸与存放。

试验照片如图 7 所示。

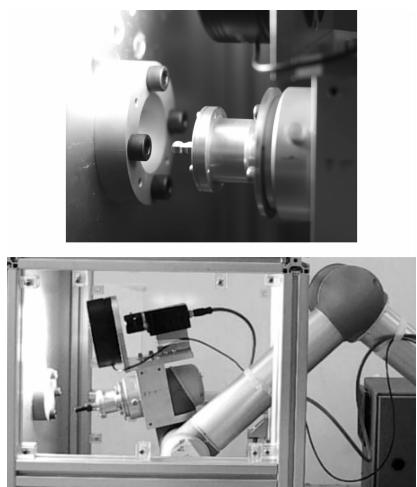


图7 螺钉旋拧试验

试验过程中,复位弹簧通过压缩与复位实现对螺钉进出的随动,能满足位移及作用力的控制要求;螺钉头套较好地保持螺钉姿态。实测电磁铁对螺钉产生的吸力比分析计算的略大,以M8螺钉为例,实测为4.7 N,能可靠吸附使其不脱落。

螺纹连接靠施加预紧力夹紧零件以达到紧固目的,轴向预紧力与螺钉拧紧力矩有对应关系^[10-11],通过拧紧力矩控制预紧力,拧紧力矩的选择与控制是提高螺钉连接可靠性的关键。拧紧力矩以螺钉的公称直径和强度等级为基本依据^[12],也与被紧固结构材料以及具体使用场合等因素相关。螺钉拧紧控制方法有力矩控制法、力矩-转角控制法、假想角度控制法以及屈服点控制法等^[13]。本研究采用力矩控制法,以用于金属的8.8级普通螺钉拧紧力矩参考值为目标力矩进行设定,完成操作后用紧固法检验拧紧效果。以机械臂的末关节力矩传感器实时监测旋拧螺钉过程中的动态力矩,力矩达到预先设定值即停止旋拧。完成操作后,对已经拧紧的螺钉用指针式力矩扳手再施加一个逐渐增大的力矩,沿拧紧方向旋拧,记下螺钉再一次产生瞬间旋转运动的读数。每个规格的螺钉做20组试验,记录实测力矩并求出平均值,螺钉拧紧力矩实测值如表2所示。

表2 螺钉拧紧力矩实测值

公称直径/mm	设定值/Nm	实测均值/Nm
M3	1.2	1.29
M4	3.0	3.27
M5	5.9	6.25
M6	10	10.74
M8	25	26.33

以M3螺钉为例,本研究设定拧紧力矩为1.2 Nm,20组实测值在1.26 Nm~1.35 Nm之间,均值1.29 Nm,比设定目标值略大,在15%以内,这是因为旋拧动作停止有一定延迟,且再次拧动已经拧紧的螺钉需克服更大的静摩擦力,适当降低设定力矩即可更接近目标力矩。试验结果表明,设计的末端工具实现了自主旋拧螺钉的设计功能,并能根据需求控制拧紧力矩。

4 结束语

本研究设计了一种螺钉旋拧末端工具,与空间机械臂组成基于视觉辨识的闭环操作系统,试验结果验证了其对不同规格螺钉的自主操作能力,并对拧紧力矩的精确控制进行了验证和分析。后续将在此基础上进行设计优化改进,降低重量和功耗、提高精度与可靠性,研究空间环境适应性以及末端工具模块的自主更换技术。

参考文献(References) :

- [1] 刘奇坤. 空间机器人末端工具更换装置的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学机电工程学院,2011.
- [2] 周平. 基于PLC的自动拧螺钉机控制系统设计[J]. 机电工程技术,2015,44(12):114-116.
- [3] 蒋一莉. 机器人复合热源自动螺柱焊枪的研制[D]. 南京:南京理工大学材料工程学院,2013.
- [4] 李绣峰,刘桂雄,邝泳聪. 用于机器人螺钉柔性装配的夹持器[J]. 光学精密工程,2000,8(1):51-54.
- [5] 张涛. 圆柱螺旋弹簧的参数化设计及分析[D]. 秦皇岛:燕山大学机械工程学院,2012.
- [6] 卢新波,谢宪旺,张中明. 电磁铁相关技术参数的分析[J]. 液压气动与密封,2010(11):36-38.
- [7] 聂聆聪,莫昱,姚晓先. 一种螺管式电磁铁的测试与仿真[J]. 实验技术与管理,2008,36(11):103-108.
- [8] 陈文虎,黄志勇,李胜强. 电磁铁驱动机构模型的实验研究[J]. 实验技术与管理,2008,25(2):33-35.
- [9] 李达,张军,张道清,等. 直流螺管式电磁铁吸力经验公式的修正[J]. 赣南师范学院学报,2010,31(6):58-60.
- [10] 张晓斌,于建政,贾晓娇,等. 某飞行器用紧固件拧紧力矩与预紧力关系研究[J]. 航空制造技术,2006(8):81-84.
- [11] 刘利,冯玉伟. 螺栓拧紧力矩的确定及检验方法[J]. 煤矿机械,2007,28(5):155-156.
- [12] 郭爱成. 电动工具螺钉拧紧力矩控制方法[J]. 电动工具,2015(2):6-12.
- [13] 张雷. 力矩拧紧机的应用及拧紧方式、参数的选择[D]. 长春:吉林大学汽车工程学院,2011.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

于学文,侯月阳,卢山,等. 一种机械臂末端旋拧工具的设计[J]. 机电工程,2017,34(9):971~975.

YU Xue-wen, HOU Yue-yang, LU Shan, et al. Design of a manipulator end effector used to twist screws[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017,34(9):971~975.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>