

doi: 10.7690/bgzdh.2019.03.022

自动洗消机械臂的设计与控制

王志甄¹, 廖洋¹, 邹志云¹, 娄雷¹, 周守艳²

(1. 军事科学院防化研究院, 北京 102205; 2. 徐州徐工随车起重机有限责任公司, 江苏 徐州 221007)

摘要: 为应对日趋复杂的核生化安全威胁, 进一步提升洗消装备的自动化程度和快速作业能力, 设计用于装备快速自动化洗消的自动洗消机械臂。给出洗消作业流程, 采用多层臂架折叠技术实现越野底盘车载需求, 通过多自由度复合运动控制技术实现自动化洗消过程所需的精确匀速直线运动。结果表明: 该机械臂能用于对车辆和大型目标物的快速、自动化洗消, 有军事和民用意义。

关键词: 洗消; 防化; 机械臂; 龙门; 电液伺服; 多自由度

中图分类号: TP241; TJ92 **文献标志码:** A

Design and Control of Automatic Decontamination Manipulator

Wang Zhizhen¹, Liao Yang¹, Zou Zhiyun¹, Lou Lei¹, Zhou Shouyan²

(1. Research Institute of Chemical Defense, Military Academy of Sciences, Beijing 102205, China;

2. XCMG Xuzhou Truck-mounted Crane Co., Ltd., Xuzhou 221007, China)

Abstract: In order to cope with the increasingly complex threats of nuclear and biochemical safety, and further improve the automation and quick operation ability of the decontamination equipment, an automatic decontamination manipulator for equipment rapid and automated decontamination was designed. The decontamination operation process was expounded, and the vehicle-mounted requirements of off-road chassis were met by the multi-layer boom folding technology. The precise and uniform linear motion required in the automatic decontamination process was realized by the multi-degree-of-freedom compound motion control technology. The results show that it can be used for the requirements of rapid and automatic decontamination of vehicles and large objects, and has obvious military and civilian significance.

Keywords: decontamination; chemical defense; manipulator; frame; electro-hydraulic servo; multi-degree-of-freedom

0 引言

近年来, 各国面临着日趋复杂的核生化安全威胁, 从东京地铁沙林事件、日本福岛核泄漏事故到中国突发的 SARS 疫情等, 核生化威胁已超越国界, 成为国际社会与经济生活的重大现实威胁^[1-2]。生物、化学武器攻击等可以对装备车辆等目标物造成巨大危害, 需及时对其快速洗消, 同时由于持续不断的恐怖活动、难以杜绝的化学事故和以非洲猪瘟、SARS 等为代表的病毒威胁的存在, 对车辆和大型目标物进行即时、快速和自动化洗消是新时代的迫切需求。

国内外研究机构对洗消装备进行了持续不断的研究, 如美国的 EasyDECONTM DF-200 便携式泡沫洗消器、俄罗斯 RDP-4V 型背负式洗消器、美军联合军种洗消系统(JMDS)、德国“克歇尔”系列等大型洗消系统^[3]。我国也形成了系列化喷洒车等洗消装备, 但针对车辆等的自动化快速洗消需求, 为避免驾驶员由于视线模糊导致驾驶意外发生等情况,

有必要研制自动化洗消装置。德国 Karcher 公司 Jet21 型洗消装备为典型的大型车辆洗消装备^[4], 采用吊臂门式洗消方式, 对车辆等被消对象进行全方位洗消, 适用于高危环境及长时间自动化作业, 但其以重载卡车和长 12 m 半挂车作为底盘, 结构复杂, 机动性差。为提升洗消装备的自动化程度和快速作业能力, 笔者基于多层臂架折叠技术和多自由度复合运动控制技术, 设计新型自动洗消机械臂, 解决装备的快速机动性结构设计难题及作业所需的协同动作和直线运行精度要求。

1 洗消作业需求及机械臂结构设计

1.1 洗消装备作业及设计需求

针对核生化战场环境下车辆装备等大型目标物的自动化快速洗消作业需求, 要求洗消装备能够随时随地快速展开完成洗消作业任务。门式洗消采用与被消对象外形相似的框架结构, 配合底盘洗消装置^[5], 能对被消对象的全身进行全覆盖洗消。自动洗消机械臂是洗消装备实施作业的核心部件, 与一

收稿日期: 2019-01-16; 修回日期: 2019-01-30

作者简介: 王志甄(1987—), 男, 河南人, 博士, 工程师, 从事洗消装备技术、先进控制方法研究。

般的工业机械臂^[6-13]等结构相比,在设计使用时需考虑以下问题:

1) 洗消装备以坦克、卡车等车辆为主要被消对象,结构相对固定,但目标尺寸变化范围较大,同时考虑机动作业需求,采用越野车载平台装载形式,以适用于移动开设洗消站需求,要求设计的自动洗消机械臂具有展开作业范围大和收拢尺寸便于车载的特点。

2) 为了确保洗消效果,需均匀分布洗消液,要求终端龙门门架匀速运行,且需具有较高的运动精度以避免碰撞损伤被消对象。

3) 终端负载较大,包含臂架和洗消管路,为了保证作业机构的工作可靠性、强度和刚度,机械臂自重很大,需采用液压形式驱动负载。

1.2 自动洗消机械臂设计

在综合考虑需求的情况下,笔者基于多层臂架折叠技术和多自由度复合运动控制技术,设计自动洗消机械臂^[14],展开状态如图1所示。

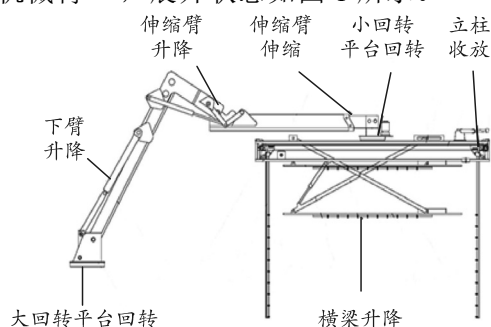


图1 自动洗消机械臂作业展开状态

自动洗消机械臂共有7个独立动作,包括5个自由度机械臂:大回转平台回转、下臂升降、伸缩臂升降、伸缩臂伸缩、小回转平台回转,以及2个自由度末端执行器:立柱收放、横梁升降,通过这7个运动实现自动洗消机械臂的展开撤收和作业。

转台主要实现整套洗消机械臂的回转,臂架的变幅与伸缩实现龙门门架位置的变化,小回转平台与大回转平台反向同步运转以实现龙门门架水平运动,龙门门架通过内部升降横梁和立柱水平移动完成洗消作业。自动洗消机械臂通过回转平台和伸缩臂的回转—伸缩—回转3个运动叠加,实现龙门门架机构直线运动。龙门门架机构作为机械臂的末端执行器,悬挂在臂架末端,适应洗消对象的尺寸变化需求,执行复杂的洗消动作,其中立柱和横梁上分别搭载高压、低压洗消管路和喷嘴,通过上装药剂调制系统的配合完成药剂布洒和消除等洗消

作业。

1.3 多层臂架折叠

为保证洗消装备的机动性和即时展开作业,自动洗消机械臂安装在越野车辆底盘。如图2所示,收拢状态包含下臂层、伸缩臂层、安装框架层、横梁层和立柱层在内的5层折叠臂架,结构紧凑,满足车辆行驶要求。

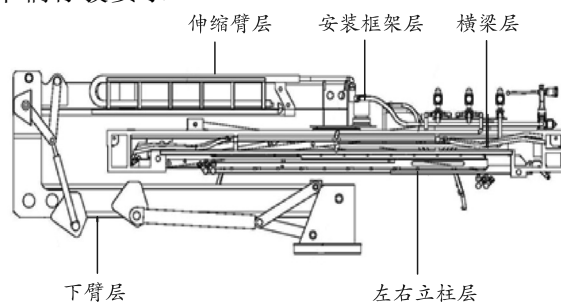


图2 自动洗消机械臂收拢状态

下臂层采用L型折臂结构,截面为八边形,提高了下臂上下2个方向的抗弯、抗扭能力。通过连杆机构与大回转平台和伸缩臂连接,通过2个变幅油缸实现下臂角度的变化。

伸缩臂层主要由基本臂、一伸臂、内置伸缩油缸组成,截面为六边形。通过连杆机构与下臂连接,通过2个变幅油缸实现角度变化,通过内置伸缩油缸实现门架结构位置调整。

安装框架层由方形钢管焊接而成,保证自动洗消机械臂收车后,左右立柱和横梁可隐藏在安装框架内。通过回转支承安装在伸缩臂下部,内置滑道用于左右立柱滑动。

横梁层由横梁、升降杆、升降油缸组成,通过销轴固定在安装框架上部支架上;通过升降油缸实现洗消高度的变化。横梁离地高度变化范围为2500~4000mm,可适应不同高度的被消对象。

左右立柱由立柱杆、滑动架和驱动机构组成。立柱杆采用槽形结构,方便洗消喷杆的安装固定,立柱杆通过滑动架与安装框架上的滑动轨道配合连接;驱动机构由液压马达、链条、链轮组成,液压马达驱动链轮,带动链条使滑动架沿轨道滑动,实现左右立柱同步运动。滑动架与左右立柱通过销轴和弹簧连接,保证左右立柱杆平缓展开。在安装框架两端加装尼龙挡块,左右立柱向外扩张时通过尼龙挡块自动折叠,保证左右立柱回收到位、互不干涉。左右立柱距离调节范围为800~4500mm,通过横梁升降、立柱平移实现门架尺寸变化,适应装备的洗消要求。

1.4 自动洗消机械臂结构分析

建立的 5 自由度自动洗消机械臂结构为 RRRPR 形式。对其进行运动学分析，首先根据标准的 Denavit-Hartenberg 方法建立机械臂的参考坐标系^[15]，得到的 D-H 参数如表 1 所示。图 3 为通过 Matlab 建立的机械臂模型。

表 1 自动洗消机械臂 D-H 参数

杆件	θ_i/rad	a_{i-1}/rad	a_{i-1}/mm	d_i/mm	运动范围
一回转	θ_1	1.570 8	0	1500	-3.141 6~3.141 6
下臂	θ_2	0	4 500	0	0.785 4~2.879 8
伸缩臂	θ_3	1.570 8	0	0	-1.309 0~0.785 4
伸缩	1.570 8	1.570 8	0	d_4	4 000~6 500
二回转	θ_5	0	0	500	-3.141 6~3.141 6

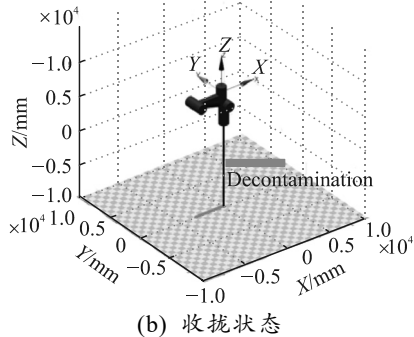
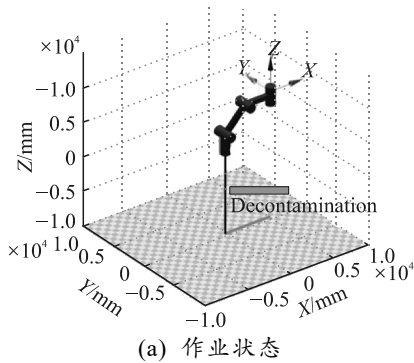


图 3 自动洗消机械臂的模型

机械臂的工作空间能直接反映其工作范围与工作效率，主要受连杆长度与关节转动角度和伸缩臂长度范围影响。根据蒙特卡罗法^[16]对设计的自动洗消机械臂的工作空间进行分析，结果如图 4 所示。

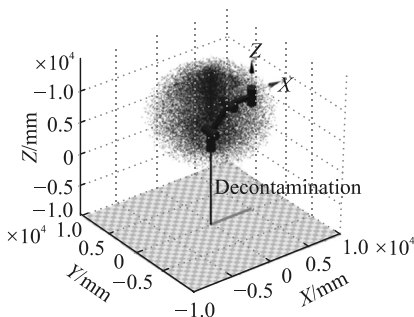


图 4 自动洗消机械臂工作空间

2 控制方案

2.1 控制结构

液压系统由整车提供液压动力源。自动洗消机械臂液压系统主要包括液压控制元件、液压执行元件和液压管路接头等。取力器从底盘发动机取力，通过传动轴带动柱塞泵运转，为自动洗消机械臂运动提供动力。多路比例阀通过分析计算设定压力和流量，从而控制液压执行元件实现自动洗消机械臂 7 个自由度运动。通过传感器对运动量检测，实施反馈控制，保证运动轨迹与精度。为了实现精确控制，电控系统使用了高速控制器、回转角度传感器、伸缩臂长度传感器和臂架角度传感器等电子元件。系统控制结构如图 5 所示。

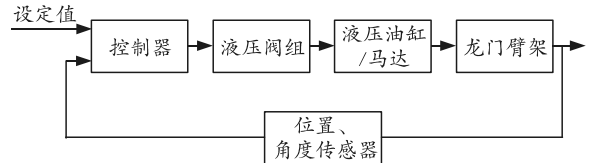


图 5 控制结构

2.2 洗消流程

洗消作业流程设计：被消对象(坦克、车辆等大型装备)固定不动，自动洗消机械臂龙门架根据洗消对象外形尺寸自动变形，通过运动复合实现直线运动轨迹的精确控制，按照前端面—顶面和侧面—后端面的顺序，对洗消对象实施自动化快速洗消，如图 6 所示。

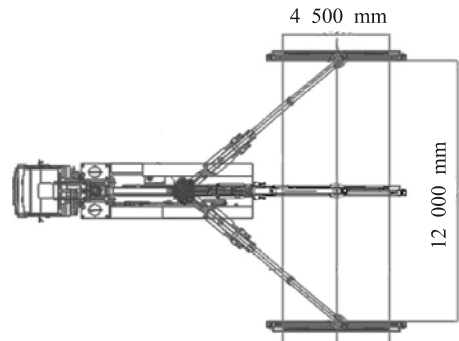


图 6 洗消作业

前、后端面洗消时，左右立柱原来水平放在龙门架上，左右立柱向中心位置靠拢至左右立柱水平距离为 800 mm，然后再回到按公式计算长宽高的初始位置，横梁从初始设置位置下降到离地面一定高度位置，然后升到初始设置位置后，流程结束。车身顶面和侧面洗消运行轨迹是龙门架从根据设计长宽高按公式计算的初始位置开始，通过大回转平台、小回转平台以及伸缩臂配合动作，从左到右

走直线运动，完成洗消流程。

2.3 多自由度复合运动控制

在自动洗消机械臂的作业过程中，控制的难点之一在于沿车身方向的直线运动。自动洗消机械臂展开后，洗消对象固定不动，此时固定下臂升降和伸缩臂升降 2 个自由动作，调节大、小回转平台回转、伸缩臂伸缩，且大回转平台与小回转平台保持相同角度，以保证门架与被消对象的相对位置相对垂直，通过“回转—伸缩—回转”3 个运动的叠加，复合实现门架机构沿洗消对象直线匀速运动。

自动洗消机械臂洗消作业时，3 个运动的驱动与控制原理如图 7 所示。

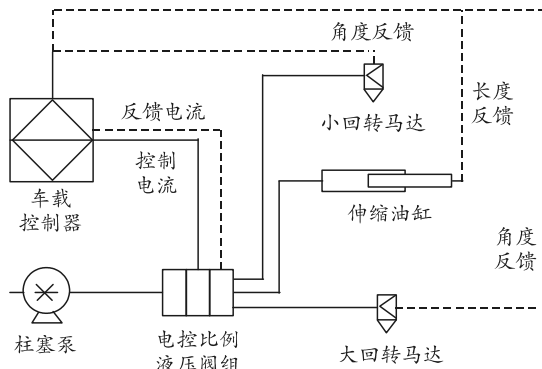
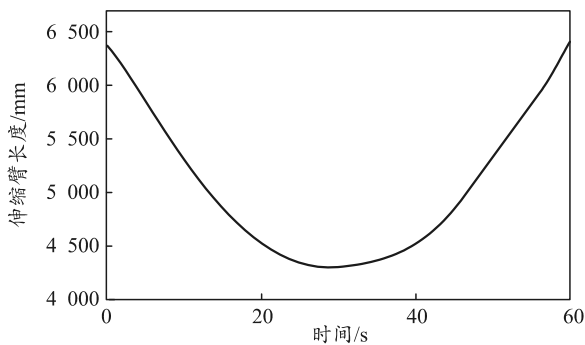
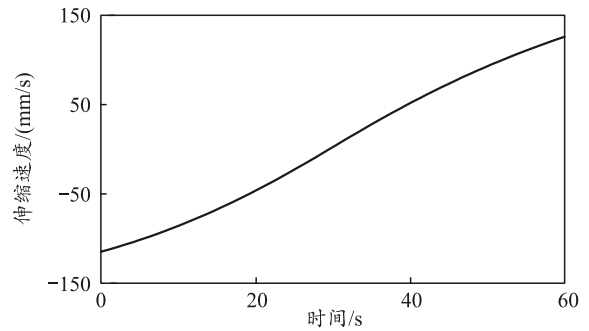


图 7 液压驱动控制原理

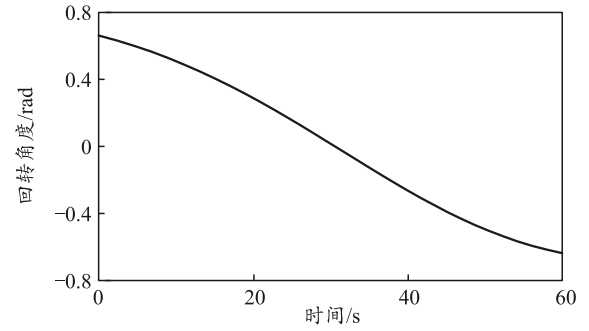
其中，大回转马达、伸缩油缸、小回转马达这 3 个运动部件由柱塞泵驱动，车载控制器通过电流来控制比例阀开度，从而调整运动速度，使回转—伸缩—回转 3 个运动的速度与直线运动速度相匹配。在运动过程中，通过两级闭环进行 PID 控制，根据电控比例阀的电流反馈进行半闭环控制，对比例阀开度进行调节，保证开度输出符合要求；根据运动部件处的位置(角度、长度)反馈进行全闭环控制，车载控制器据此判断轨迹状态，进行实时调整，保证直线运动轨迹精度。根据设计需求，当洗消对象要求长度为 12 m，车身洗消时间为 1 min 时，直线运动轨迹控制时伸缩臂和回转参数如图 8 所示。



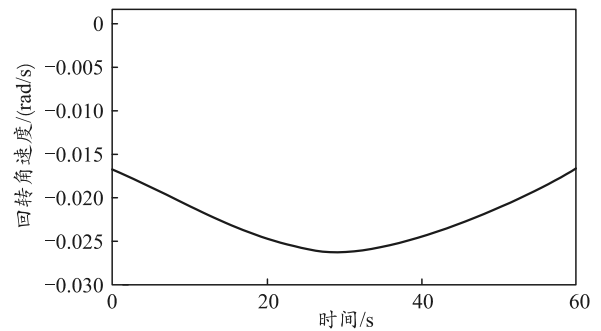
(a) 伸缩臂长度



(b) 伸缩速度



(c) 回转角度



(d) 回转角速度

图 8 直线运动轨迹控制时伸缩臂和回转参数

驱动自动洗消机械臂动作的液压系统具有柔性较大、延时较长等特点，且运动部件惯性大，在运动过程中按照目标曲线实时追踪控制难以满足运动精度的要求；因此，在实现自动洗消机械臂的直线运动轨迹控制算法时，采取先验参数与实时 PID 调节相结合的算法。首先，根据测试的运动基础参数，建立大回转、伸缩和小回转 3 个运动在直线上每个位置的控制基础参数表，将其作为运动控制的先验参数；在运动过程中，根据实际位置查表获得每个运动部件的基本控制参数，同时，根据位置反馈信号对各运动状态进行检测。根据误差大小进行分类处理：在误差小于 30 mm 时，不进行调节；在误差为 30~60 mm 时，进行 PID 调节；在误差为 60~100 mm 时，进行极限调整，使误差较大的运动仅保持微小运动；在误差大于 100 mm 时，进行停机保护。控制算法流程如图 9 所示。

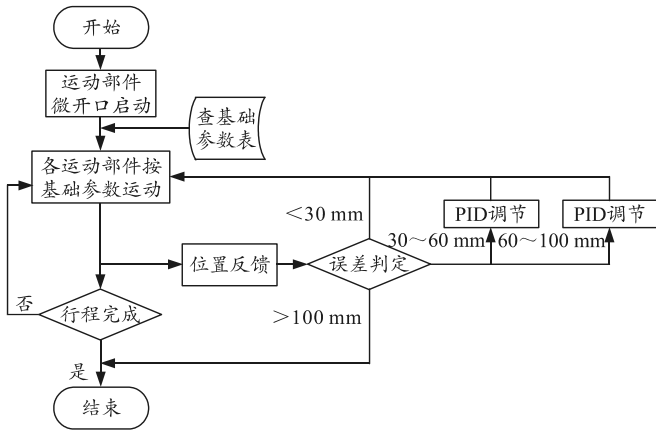


图 9 直线运动控制算法流程

3 控制效果

作为洗消装备的一部分，设计完成的自动洗消机械臂实物如图 10 所示。该自动洗消机械臂随整车参加了多种复杂环境下的验证实验，各项实验结果表明：自动洗消机械臂能够满足洗消装备所需作业状态，多运动复合控制具有较高的运动精度和稳定性，算法鲁棒性好，直线运行误差在 30~90 mm 内，系统稳定可靠，满足指标要求。



图 10 自动洗消机械臂实物

4 结束语

为应对日趋复杂的核生化安全威胁，笔者设计用于装备快速自动化洗消的自动洗消机械臂，采用多层臂架折叠技术实现越野底盘的车载需求。该多自由度机械臂满足多种作业工况的洗消执行机构搭载需求，通过多自由度复合运动控制技术实现自动化洗消过程所需的精确匀速直线运动，结合上装的洗消系统实现对车辆和大型目标物等的快速和自动

化洗消，对提升国家反核生化安全威胁能力和日常洗消作业能力等具有明显的军事和民用意义。

参考文献：

- [1] 赵晨光, 高晓辉. 防化——全人类的事业[J]. 解放军生活, 2017(9): 12.
- [2] 徐彤武. 当代全球卫生安全与中国的对策[J]. 国际政治研究, 2017(3): 9-37.
- [3] 聂志勇, 孙海鹏, 孙晓红, 等. 化学应急洗消技术及装备研究进展[J]. 军事医学, 2016, 40(4): 267-271.
- [4] 张南. 德国推出卡孚尔 Jet21 型大型车辆洗消系统[M]// 世界军事年鉴. 北京: 解放军出版社, 2004: 436.
- [5] 李国荣, 廖洋, 陈尚志, 等. 用于车辆底部的清理设备: 中国, CN108528406A[P]. 2018-09-14.
- [6] RANZANI T, CIANCHETTI M, GERBONI G, et al. A Soft Modular Manipulator for Minimally Invasive Surgery: Design and Characterization of a Single Module[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2016, 32(1): 187-200.
- [7] PINSKIER J, SHIRINZADEH B, CLARK L, et al. Design, development and analysis of a haptic-enabled modular flexure-based manipulator[J]. Mechatronics, 2016, 40: 156-166.
- [8] 谢海波, 王程, 杨华勇. 液压驱动连续型机械臂原理与设计[J]. 液压与气动, 2017(9): 13-16.
- [9] 滕举元, 许洪斌, 王毅, 等. 采摘机器人机械臂运动轨迹规划设计仿真[J]. 计算机仿真, 2017, 34(4): 362-367.
- [10] 闫继宏, 石培沛, 张新彬, 等. 软体机械臂仿生机理、驱动及建模控制研究发展综述[J]. 机械工程学报, 2018, 54(15): 1-14.
- [11] 李文新, 唐涛, 李欲江. 液压挖掘机动臂与斗杆液压回路分析及改进[J]. 工程机械, 2015, 46(4): 48-51.
- [12] 李蓓, 侯保林. 某两自由度弹药传输机械臂拓扑优化设计[J]. 兵工自动化, 2018, 37(9): 57-60.
- [13] 张英勇. 面向超大船体外表面的喷涂机械臂研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016: 11-30.
- [14] 李国荣, 廖洋, 周守艳, 等. 一种车辆自动龙门洗消装置: 中国, CN205769198U[P]. 2016-12-07.
- [15] 郭发勇, 梅涛, 赵江海. D-H 法建立连杆坐标系存在的问题及改进[J]. 中国机械工程, 2014, 25(20): 2710-2714.
- [16] 王睿, 冯宝林, 徐华结, 等. 基于蒙特卡罗法的工业机械臂精度分析[J]. 机械设计, 2016, 33(1): 76-80.