

文章编号 1004-924X(2018)05-1078-20

精密柔索传动技术研究现状及分析

范大鹏*, 谢馨, 祁超, 范世珣, 张连超
(国防科技大学智能科学学院, 湖南长沙 410073)

摘要:精密柔索传动是一种通过主、从动轮之间有适当预紧的传动介质来实现的挠性摩擦传动方式,具有布局灵活、高精度、轻量化等特点,在多种灵巧性精密机电装置和伺服机构中得到了广泛的应用。本文归纳了柔索传动技术在精密指向机构、人机交互机器人、跑步机器人、灵巧手和微创手术末端器械等方面的应用进展;总结了亟待解决的基础理论和应用研究相关问题,主要包括传动机理研究、伺服系统的应用研究、针对典型应用需求的工程设计方法研究等;最后,对进一步发展精密柔索传动理论分析与工程设计技术提出了建议。

关键词:精密柔索传动;应用进展;传动机理;应用技术;工程设计方法

中图分类号:TH132.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182605.1078

Research on status and analysis of precise cable drive technology

FAN Da-peng*, XIE Xin, QI Chao, FAN Shi-xun, ZHANG Lian-chao

(College of Artificial Intelligence,
National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

* Corresponding author, E-mail: fdp@nudt.edu.cn

Abstract: A precise cable drive system is a flexible friction transmission method that utilizes the power transmitted from drive capstans to a driven pulley through a proper preloaded transmission medium. It has many advantages, such as flexible layout and high precision, besides being lightweight. It is widely used in many dexterous precise electromechanical devices and servomechanisms. The progress in the applicability of the precise cable drive is summarized in the aspects of precision pointing mechanism, harmonious robot, haptic interface mechanism, running robot, dexterous hand and endoscopic surgery. Next, the urgent issues of the basic theory and application research are dealt with, including studies on transmission mechanism, applied studies on servo systems, and engineering design methods for typical applications. Eventually, some suggestions regarding further research on theory analysis and engineering design technology of the precise cable drive system have been put forward.

Key words: precise cable drive; application progress; transmission mechanism; applied technology; engineering design method

收稿日期:2018-01-31;修订日期:2018-02-16.

基金项目:国家 973 重点基础研究发展计划资助项目(No. 2015CB057503)

1 引言

精密柔索传动是一种通过主、从动轮之间有适当预紧的传动介质实现的固定式空间型摩擦挠性传动方式。所谓固定式空间型挠性传动是指传动介质两端被直接固定或预紧在主动件或从动件上,利用传动介质的径向柔韧性及传动轮的布局灵活性,从而实现空间任意两轴间运动传递的机械传动方式。其中,钢丝绳是常用的传动介质。

柔索传动应用广泛,在不同应用背景下体现了不同的传动特点。精密指向机构是以高精度控制和快速响应为目标,主要利用柔索传动的零空回、高精度、高刚度等特点。人机交互机器人、力觉交互系统等应用希望具有较高的末端重复精度和较好的人机交互能力,主要利用柔索传动结构紧凑、构型简洁、运动灵活的特点。跑步机器人则利用柔索传动平稳、柔顺的优点,可以达到较好的储能、隔振、低耗的效果。灵巧手和微创手术末端工具是以多自由度、机构灵活性为目标,主要发挥了柔索传动小型化、布局灵活、承载能力大、且具有狭小空间长距离传动的优点。

尽管柔索传动技术在精密指向、人机交互、末端操作器等小型化、轻量化、高精度设备应用领域呈现出较好的应用潜力。但是,目前柔索传动机构仍以经验设计为主,尚未形成完整的设计理论和方法体系,特别是在高精度、高动态应用的场合,对影响柔索传动精度、输出扭矩的主被动轮表

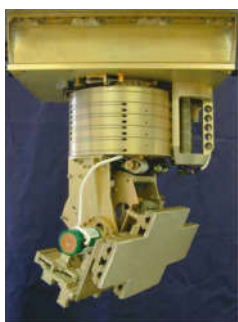
面摩擦、柔索材料弯曲、预紧力、温度、负载等因素的作用机理尚不能在理论上给出完整解释。柔索传动设计方法目前缺乏系统性和针对性,由此制约了其精密传动性能的进一步提高和设计方法的形成。本文主要对精密柔索传动的应用和研究现状进行分析和归纳,为进一步开展精密柔索传动理论及关键技术研究提供建议。

2 应用进展

二十世纪八十年代,以 Salisbury^[1-3]、Carson^[4-5]为代表的国外学者就开始对柔索传动技术的工作机理和传动特性等方面进行了阐述。从此,柔索传动以其独特的传动特点,逐渐在众多领域中得到了广泛的应用,面向不同应用需求的产品也逐渐问世。本文根据传动特点,将基于柔索传动技术的应用归纳为精密指向机构、人机交互机器人、跑步机器人、灵巧手和微创手术末端工具等四个方面。

2.1 精密伺服机构

精密伺服机构常用于精确控制天线、光电探测器、雷达等设备的空间指向运动,广泛应用于目标捕获、跟踪、瞄准和定位等光电系统中^[6]。柔索传动具有高精度、高效率、零空回、重量轻、无需润滑等特点,因此在车载天线、机载吊舱、导引头、空间探测等诸多领域中得到了广泛的应用,并且成为提升新一代高精度、高动态、轻量化精密伺服机构性能的重要技术途径。



(a) 光电侦察吊舱
(a) Electro-optical pod



(b) 自由空间激光通信系统
(b) Free space laser communication system



(c) 星载遥感平台
(c) Satellite remote sensing platform



(d) 车载天线稳定平台
(d) Vehicle mounted antenna stabilization platform

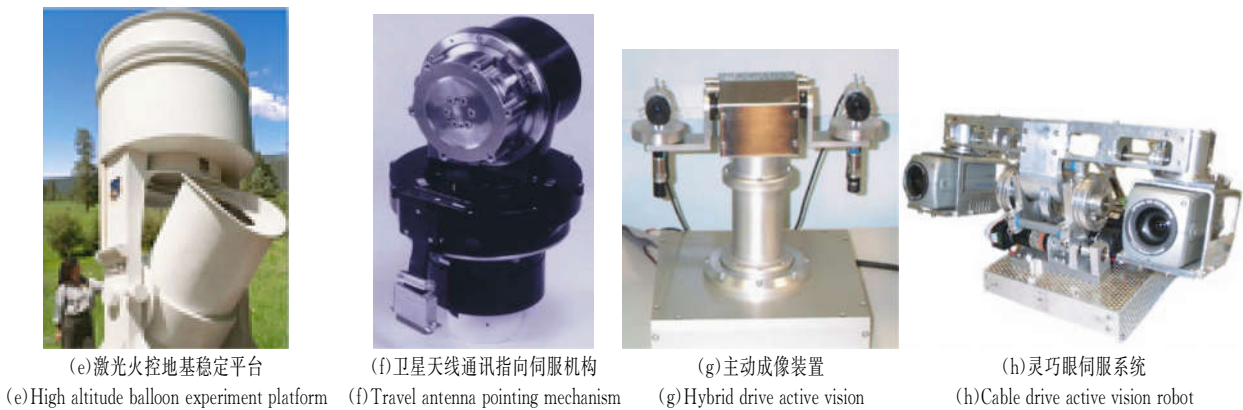


图 1 柔索传动技术在精密指向机构中的应用

Fig. 1 Cable drive technology applied in precision pointing mechanisms

美国 Sagebrush 技术公司一直致力于柔索传动技术在精密指向机构中的应用研究。图 1(a)~1(e)所示为柔索传动技术在车载天线、机载吊舱、空间探测等领域的应用,这些精密指向机构均采用了 Roto-Lok 传动技术。该传动形式将多股柔索以“8”字形在主动轮上缠绕数周后固定预紧在从动轮上。图 1(a)为应用于 Northrop 公司无人机的雷达吊舱,最大回转速度为 $600 (^{\circ})/s$,角位置分辨率为 $873 \mu rad$,负载能力为 0.6 kg ,总质量为 3.76 kg 。图 1(b)为 BMDO/IST 自由空间光电两自由度稳定系统^[7],该系统可以实现在 12 km 以外 5 cm 的指向精度,角位置分辨率大约为 $5 \mu rad$,系统带宽为 25 Hz ,负载约为 13.2 kg ,系统总质量为 22.7 kg 。图 1(c)为 NASA 星载遥感平台,回转速度为 $120 (^{\circ})/s$,角位置分辨率为 0.004° ,负载能力为 9 kg ,总质量为 5.9 kg 。图 1(d)为 AVL 科技公司应用 Roto-Lok 传动技术设计的多款车载天线稳定平台,其中, Model-1520 两轴稳定平台系统空回为 $0.002^{\circ} \sim 0.006^{\circ}$,指向精度为 $0.02^{\circ} \sim 0.3^{\circ}$,分辨率为 $0.01^{\circ} \sim 0.1^{\circ}$,转动范围分别为 $240^{\circ}, 190^{\circ}$ 。图 1(e)为美国空军研究实验室设计的 HABE 激光火控地基稳定平台^[8],两轴驱动力矩均为 $50 \text{ N} \cdot \text{m}$,俯仰轴指向精度为 $191 \mu rad$,方位轴为 $80 \mu rad$,系统带宽约为 22 Hz 。图 1(f)是美国 Moog 公司研制的卫星天线通讯指向伺服机构^[9],其方位轴采用类直齿轮柔索传动构型,在该自由度上可实现 $\pm 200^{\circ}$ 的回转范围和 $\pm 0.01^{\circ}$ 的跟踪精度。图 1(g)是澳大

利亚人民大学信息技术与工程学院工程系研制的 HyDrA 主动成像装置^[10],其方位运动采用类锥齿轮型柔索传动,结构更加紧凑,回转范围为 180° ,最大角速度为 $350 (^{\circ})/s$,转角分辨率为 0.0018° 。图 1(h)为应用柔索传动实现的 CeDAR 灵巧眼伺服系统^[11],该装置的俯仰运动采用两级减速比为 $25:1$ 的类直齿轮柔索传动,而两个探测器的方位运动采用两级减速比为 $19:1$ 的类直齿轮柔索传动和一级类锥齿轮的柔索传动。巧妙的传动系统设计,两个自由度均能实现 90° 的回转范围, 0.01° 的转角分辨率,该装置的有效负载为 0.7 kg ,总质量为 3.5 kg 。

国内也有研究机构对柔索精密传动进行研究,南京电子科技研究所研制的车载卫通天线^[12]采用了柔索精密传动。天线座方位的驱动范围为 $\pm 150^{\circ}$,俯仰驱动范围为 $-40^{\circ} \sim 90^{\circ}$,方位运动速度为 $0.1 \sim 0.2 (^{\circ})/s$,俯仰运动速度为 $0.1 \sim 1.5 (^{\circ})/s$,传动精度为 0.3° 。长春光学精密机械与物理研究所研制的某航空光学传感器扫描组件和消旋组件^[13]也采用了柔索精密传动,在同步精度为 0.03° ,旋转速度为 $5 (^{\circ})/s$ 时,稳速精度可达 1.5% 。

从柔索传动在有限转角精密伺服机构的应用来看,目前在海外较为成熟的产品中,柔索传动的传动精度高于 $10 \mu rad$ 以上,传动效率高达 98% ,带宽高于 20 Hz ,负载力矩大于 $50 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

2.2 人机交互机器人

人机交互机器人^[14]是指与人相互合作完成

中特定任务的机器人。柔索传动应用在人机交互机器人中具有独特的优势,其主要原因有三个方面:第一,末端控制精度高,如触觉机械臂 WAM^[15]的末端重复精度优于 100 μm ,力觉交互设备 Phantom^[16]的末端重复精度优于 40 μrad ;第二,机器人安全性能好,柔索传动以其零空回、高效率、低摩擦的传动特点,使得机构具有较好的开环反向驱动能力^[17],以此保证较好的人机交互能力;第三,运动灵活和施力保真度高,柔索传动利用其布局灵活的特点,可以将驱动电机固定在机体上,通过传动介质将力和运动传递到各个运动关节,大幅度降低其空间尺寸与运动惯量,进而提高系统的力矩控制带宽。下面将从机械臂、力觉交互设备和康复机器人三个方向描述柔索机构在人机交互方面的应用。

在人机交互机械臂方面,较为成熟的产品当属美国 Barrett 公司的 WAM 触觉机械臂^[15],如图 2(a)所示。其中,四个自由度的运动均是通过

柔索传动实现的;基座方位向运动是采用多级柔索传动实现的,肩部两个自由度运动是通过类锥齿轮差动传动而实现的,第四个自由度是将驱动电机固定在机体上,通过柔索传动将力和运动传递到肘部运动关节上的,其转动范围分别为 300°,225°,315°和 230°,工作空间可达 3.5 m^3 ,角度分辨率高达 0.001°,机械臂末端的重复精度优于 100 μm ,最大负载为 4 kg,总质量为 25 kg。WAM 机械臂已应用于医疗、空间、海洋探索等场合。此外,在该方向较为典型的应用包括:图 2(b)所示的 Domo 仿人机器人^[18],图 2(c)所示的 Low-cost 机械臂^[19],图 2(d)所示的 Hambot 静脉导管置入机械臂^[20],图 2(e)所示的双臂移动机器人^[21],图 2(f)为用于医疗器械的 MiroSurge 轻质医疗机械臂^[22]。国内在该方面的应用包括:图 2(g)所示的上海交通大学研制的五自由度柔索传动机械臂^[23]和图 2(h)所示的北京航空航天大学研制的七自由度柔索驱动拟人机械臂^[24]等。



图 2 柔索传动技术在人机交互机械臂中的应用

Fig. 2 Cable drive technology applied in harmonious robots



图 3 柔索传动技术在力觉反馈设备中的应用

Fig. 3 Cable drive technology applied in haptic interface mechanisms

力觉交互设备是指通过力觉进行人机交互的设备^[25],可应用于虚拟手术、虚拟装配和数字样机开发等领域。目前,一些美国公司已经推出了相对成熟的商业化产品。其中,最著名的当属 Sensable 公司的 PHANTOM^[16]系列化产品。该系列产品具备六个自由度的运动能力,其中三自由度的力反馈功能均是通过柔索传动实现的,其转动范围、转动分辨率及最大输出力矩如下:偏航角为 5.18 rad、40 μ rad、515 mN·m,俯仰角为 4.54 rad、40 μ rad、515 mN·m,翻滚角为 5.85 rad、140 μ rad、170 mN·m,反向驱动刚度可达 3.5 N/mm(参照型号:Premium-1.5)。国外许多大学和研究机构也开展了这方面的研究,目前已经发布了众多基于柔索传动的力觉交互设备。较为典型的有:图 3(b)所示的美国宾夕法尼亚大学的手持式力反馈装置 iTorqU^[26],图 3(c)、3(d)所示的分别为美国斯坦福大学的六自由度 ssHaptic 力反馈装置^[27-28]和 3-DOF 差分构型力反馈设备^[29],图 3(e)所示的 Quanser 公司 HD² 并联式力反馈设备^[30],图 3(f)所示的日本名古屋大学的 DELTA-4 并联力反馈装置^[31],图 3(g)所示的雅典国立科技大学的 5-DOF 力反馈设备^[32]等。

目前,国内许多研究机构对基于柔索传动的

力反馈装置进行了一定的探索,也研制出了一系列的原理样机,但从性能指标、稳定性及工程化程度各方面而言,尚与国外产品有一定的差距。北京航空航天大学发明了并联式六自由度力觉交互装置^[33],力图同时实现大输出力、高虚拟刚度及大工作空间。此外,还设计了串联式三自由度力觉交互设备 iFeel3^[34],如图 3(h)所示,工作范围可达 70 mm×100 mm×150 mm,反向驱动刚度可达 1.5 N/mm。上海交通大学也采用柔索传动发明了五自由度力觉交互设备^[25],用于实现对临床手术过程的真实模拟。

康复训练机器人是典型的人机交互系统,它直接作用于人体,与人在同一个物理空间工作,人与机器作为一个整体协调运动,使患肢各运动关节能获得有效的康复训练。柔索传动以其传动路线灵活性、自重轻承载力大、反向驱动摩擦小等特点,逐渐应用于康复机器人的各方面。华盛顿大学 Rosen 采用柔索传动技术,设计了七自由度上肢康复机器人 EXO-UL7^[35],如图 4(a)所示。七个自由度分布在肩部三个,肘部一个,腕关节三个,能够满足绝大部分的日常活动。在上肢康复机器人领域中,通常是依靠牺牲系统刚度和输出力矩来降低系统质量,这样往往会使系统达不到人体抖动频率。该机器人采用柔索两级传动,将

驱动电机布置在基体上,降低了系统重量的60%。试验结果表明,系统第一阶谐振位于6 Hz,高于人体抖动频率2~5 Hz,提高了系统的安全性。此外,图4(b)为加拿大Queen大学设计的6-DOF 上肢康复机器MEDAR-M^[36],肘关节和腕关节四个自由度采取N+1的运动形式,通过五股钢丝绳进行运动控制。哥伦比亚大学设计的7-DOF 柔索驱动上肢康复机器人CAREX-7^[37]则是通过并联驱动形式进行运动控制,如图4(c)所示。美国西北大学教授Colgate^[38]研制了

一种单自由度人体下肢康复训练机构,帮助肢体缺陷的患者实现下肢的负重训练,如图4(d)所示。该系统利用柔索传动零空回的特点,在阻尼补偿时避免产生较大的极限环,将系统带宽提高到10 Hz,并通过柔索传动实现了20 N·m的持续负载力矩,可以较好地完成绝大部分的负重训练任务。此外,意大利Cempini^[39]等人设计的HX三自由度康复机构是针对手指而言的,如图4(e)所示。国内,华中科技大学^[40]、西安电子科技大学^[41]等单位也投入到该领域的研究之中。



图4 柔索传动技术在康复机器人中的应用

Fig. 4 Cable drive technology applied in limb rehabilitation robots

2.3 跑步机器人

跑步机器人就是模仿生物跑步运动功能的一类机器人,相对于移动机器人和行走机器人而言,具有更强的跨越障碍的能力^[42]。柔索传动具有刚度可控、传动柔顺的特点,可以提高机器人储能隔振方面的功效。为提高跑步速度、降低功耗,研究者逐步将柔索传动引入到跑步机器人领域中。

两足机器人Mabel^[43-44]采用刚度可控的柔索传动作为传动部件,如图5(a)所示。其优势有两点:第一,利用柔索传动长距离传动的特点,降低了系统的运动惯量,提高了运动稳定性;第二,通过螺旋轮改变玻璃纤维板的预紧张力,以达到调控系统刚度的作用,进而可以吸收跑步过程中脚掌着地时的反作用力并将它转化为能量存储,等脚掌离开地面时释放能量,起到储能隔振方面的功效。在此平台下,Grizzle^[43]研究了运动过程中系统刚度调控策略,提出了基于虚拟约束和零动态的运动控制理论,实现了稳定步行和快速跑步的完美结合,最快跑步速度可达1.52 m/s,是当

时速度最快的两足机器人。图5(b)所示的C-Runner三自由度两足机器人^[45]采用的是谐波齿轮和柔索复合传动,并通过自由段弹簧对柔索传动进行预紧调控,该系统尚处于原理样机性能测试阶段。在四足跑步机器人领域,图5(c)所示的苏黎世理工学院研制的starLETH^[46]和图5(d)所示的东京工业大学研制的TITAN-VIII^[47]均采用了柔索传动,以提高系统的柔顺性。国内哈尔滨工业大学^[48]设计了一种柔索传动、动滑轮组增力的机器人关节用模块化挠性驱动单元FDU-II,通过张力反馈和关节全闭环控制,可产生与生物肌肉组织双向收缩驱动关节的相似运动。将FDU-II应用在双足跑步机器人FDUBR-I上,如图5(e)所示。

从上述跑步机器人的进展情况可知,柔索传动缓冲减振、节省能耗的优势在跑步机器人中逐渐得到体现,但是传动回差和滞后特性影响跑步运动稳定性也是亟待解决的难题。

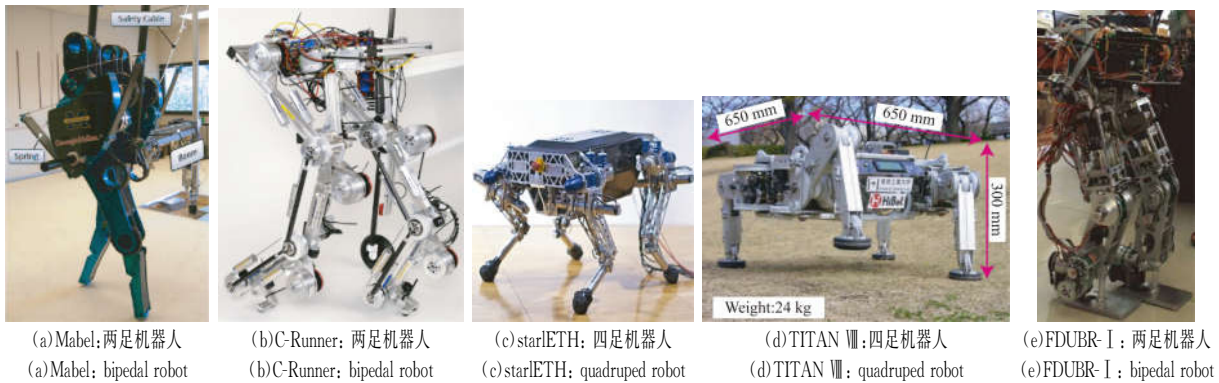


图 5 柔索传动技术在跑步机器人中的应用

Fig. 5 Cable drive technology applied in running robots

2.4 灵巧手和微创手术末端工具

柔索传动以其独特的长距离传动能力以及传动路线灵活、自重轻、承载力大等特点,广泛应用于灵巧手和微创手术工具中。

灵巧手是指具有多自由度、多感知功能及良好抓取操作性能的多指机器人。基于柔索传动的灵巧手可以将驱动电机置于腕部位置,通过巧妙的绳轮布局,实现运动和力的传递,具有较好的运动灵活性和柔顺性,适应于太空等复杂的环境,并受到了世界各国科研机构的广泛关注,其中以德国、英国和意大利的研究最具代表性。图 6(a)~6(c)分别为德国宇航中心研制的 DLR-II Hand^[49]、SpaceHand^[50]、David-Hand^[51]系列基于柔索传动的第三代灵巧手。相比于前两代灵巧手,它们不仅感知能力更加丰富,集成度、机电一体化程度也有很大的提高,其性能参照表 1。其中,David-Hand 对调控柔索刚度进行了特别设计,每个关节均由两股钢丝绳驱动,而每股钢丝绳均对应一个电机。当两个电机驱动方向相同时,则对应的关节运动;当驱动方向相反时,则提高钢丝绳的传动刚度。图 6(d)为英国 Shadow 公司研制的灵巧手^[52],该灵巧手由 25 个关节共 20 个独立自由度构成,包含了位置、触觉、压力、温度、电流等传感器,各关节的控制精度优于 $\pm 1^\circ$,响应速度可达 1 Hz,总质量为 4.2 kg。

表 1 基于柔索传动的灵巧手性能参照表

Tab. 1 Performance of cable drive based dexterous hand

灵巧手	手指数	自由度	负载力/N	速度/ ($^\circ \cdot \text{s}^{-1}$)	总质量/ kg
DLR-II Hand	4	13	30	360	1.8
Space Hand	4	12	25	—	3.3
David-Hand	5	20	20	720	4.5
Shadow	5	20	—	—	4.2
DLR/HIT II Hand	5	15	10	360	1.8

国内最具代表性的灵巧手 DLR/HIT II Hand^[53],如图 6(e)所示,是哈尔滨工业大学和 DLR 联合研制的五指仿人灵巧手。整个灵巧手由 15 个独立自由度构成,每个手指有 4 个活动关节、3 个独立自由度,末端两个关节的运动是通过柔索耦合机构实现的,所有的驱动器和电路板均集成在手指或手掌内。

传统的微创手术末端工具一般采用杆件传动方式或齿轮链传动方式来实现运动和力的传递,但是这些方式构成的工具尺寸较小,加工困难且精度难以保证,轴承还需要润滑,无法应用于医疗环境。而柔索传动具有承载力大、反冲力小、无需润滑、能够长距离传动等特点,因此广泛应用于微创手术工具中。

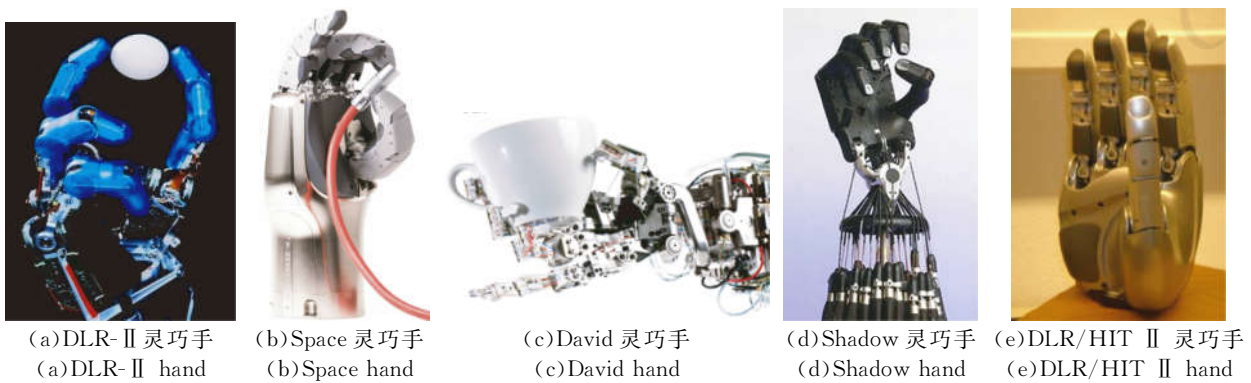


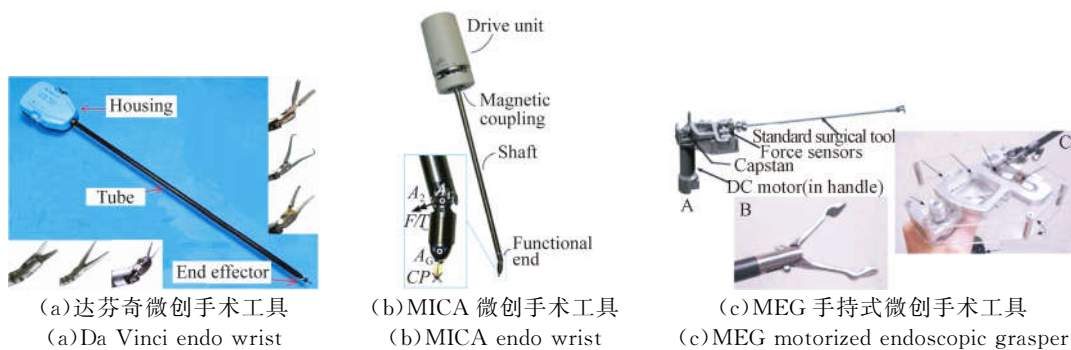
图 6 柔索传动技术在灵巧手中的应用

Fig. 6 Cable drive technology applied in dexterous hands

Intuitive Surgical 公司开发了一系列 Da Vinci 微创手术工具^[54],如图 7(a)所示。为减轻质量和降低成本,工具主体采用碳素和塑料材质。为增加工具的灵活性,采用多短节相连接结构、蛇形腕部关节等结构,钢丝绳作为传动系统,可实现七个自由度的腕部运动和 90°的运动行程。德国宇航中心研发的微创手术工具 MICA^[55]采用柔索作为长距离传动介质,如图 7(b)所示。MICA 共具有两个自由度的关节运动及一个自由度的夹紧运动,关节运动范围为 ±40°,最大夹紧力可达 10 N,夹紧力精度可达 0.015 N,最大输出力矩可达 150 N·mm,力矩分辨率为 6 N·mm,运动关节带宽可达 5 Hz,且具有 6-DoFs 的关节力感知和 1-DoF 的夹紧力感知能力,质量仅有 850 g。图 7(c)为美国华盛顿大学研制的手持式微创手术工具 MEG^[56],直流电机的驱动力首先通过 19:1 的行星齿轮箱和 10:1 的柔索传动进行减速处理,然后利用凸轮机构将旋转运动转换为直线运动,最终通过柔索传递到末端夹紧机构。该机构的最大夹紧力为 24.5 N,伺服带宽可达 3 Hz。RAVEN-2^[57-58]是由美国华盛顿大学研制

的主从式手术机器人系统,其中 4 自由度微创手术工具如图 7(d)所示。国内已经开展对微创手术机器人系统手术器械的研究,如哈尔滨工业大学研制的 4 自由度腹腔微创手术机器人手术器械^[59]等。其中天津大学王树新教授研制的“妙手 A”显微外科手术机器人的串联式手术工具^[60](如图 7(e)所示)和手持式手动手术工具 Easy Grasp^[59](如图 7(f)所示)属于较为成功的案例。串联式手术工具具有的 4 个自由度(自转、腕部偏转、俯仰及开合)均是通过柔索实现的,其中,工具末端的俯仰与开合相互耦合,上下颚对称设计,采用相同且对称安装的传动结构。上下颚的同向转动是俯仰运动,反向转动则为开合运动。Easy Grasp 是通过钢丝与杆件组成平行四边形来实现运动一致的。其中杆件的作用是实现工具的自转,而工具的偏转和开合则由柔索来实现。

综上所述,柔索传动技术灵活性、高精度、轻量化等显著优点,已成为传统传动方式的有益补充。在精密指向、人机交互、末端操作设备等领域呈现出广泛的应用前景。



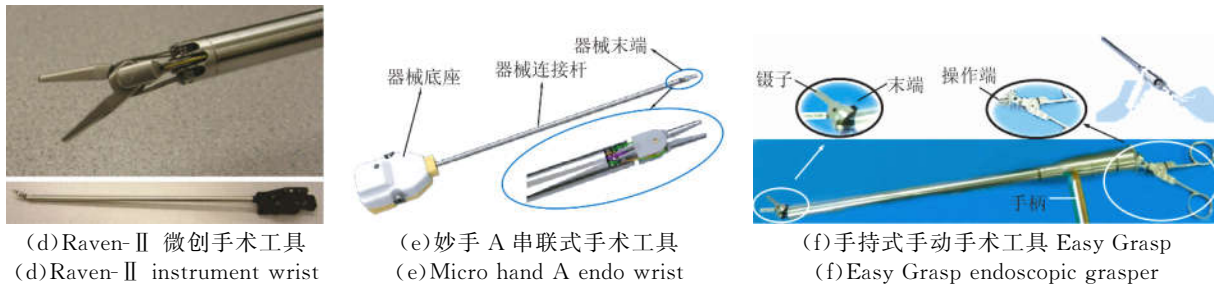


图 7 柔索传动技术在微创手术工具中的应用

Fig. 7 Cable drive technology applied in endoscopic surgery

3 基础与应用研究

随着机械向高效、高速、精密、多功能方向发展,精密柔索传动已成为轻量化机电装置的一种理想传动形式,但目前柔索传动机构的设计理论体系仍不够完备,分析计算与工程设计的软件工具较为欠缺。为解决这些问题,国内外学者针对精密柔索传动的可能应用领域开展了大量的基础研究,主要集中在传动机理、传动特性、系统化设计方法等方面。

3.1 传动机理研究

柔索传动从传动原理上属于摩擦挠性传动的一种,其机理研究主要包括稳态摩擦机理、瞬态摩擦机理、摩擦特性变化以及传动特性仿真方法等方面。

柔索传动的稳态摩擦机理研究可以分为蠕变理论和切变理论两种,其中后者数学计算复杂,实际应用较少。蠕变理论是基于欧拉方程建立的关于传动轮与弹性传动介质间摩擦关系的理论。该理论的基础是:假设轮与带之间存在库仑摩擦,并将传动介质视为悬线,根据传动介质在轮上是否产生弹性滑移,而分为滑动弧段和黏滞弧段。但是,早期的蠕变理论忽略传动介质的惯性质量、弯曲刚度、弹塑性变形等影响因素,其分析结果与实际传动存在较大误差,因而诸多学者研究了多种修正方法。Bachtel^[61]和Rubin等人^[62]采用不同方法修正了传动介质惯性质量对传动过程中最大输出力矩、弹性滑移角、传动效率等的影响。Kong等人^[63]在考虑传动介质惯性质量的基础上,进一步分析了弯曲刚度对传动过程的影响。Jung等人^[64]考虑了弯曲刚度、非线性摩擦、弹性伸长等因素对动力传递的影响。Kim等人^[65]采用非典型摩擦律替代库仑摩擦律进行稳态传动机

理分析,Morimoto等人^[66]探讨了传动介质弹塑性变形下的稳态传动机理。

然而,在实际的加减速等瞬态传动过程中,传动介质的力运动特性呈现波动状态。因此,非稳态下柔索类传动的力运动变化情况一直是多体系统动力学研究者着力研究的热点问题之一。Leamy等人^[67]提出采用摄动法分析瞬态过程中传动介质张力的分布以及从动轮的速度响应。但是该解析方法只能分析稳态下的小偏离运动,主要的瞬态机理研究还是通过数值分析方法完成的。Leamy等人^[68]将传动介质视为桁架单元,将轮视为定轴转动单元,并通过惩罚函数建立带与轮之间的摩擦模型,以此来分析瞬态过程中力的运动变化特性。Vetyukov等人^[69-73]采用空间欧拉法描述传动介质的运动,可以将运动方程放在固定边界条件下进行求解,并采用二维板单元描述传动介质,以此来分析启动、谐波激励等瞬态过程中的传动轮力矩变化以及传动介质速度力的变化情况。为解决大变形、大转动柔性多体系统的动力学问题,Shabana等人^[74]提出绝对节点坐标方法,该方法中单元节点的坐标定义在全局坐标系下,采用斜率矢量代替传统有限单元中的节点转角坐标,具有常值质量矩阵、无科氏力和离心力项等特点,适应于大变形条件下的建模。Dufva等人^[75]在绝对节点坐标系下提出一种三维梁单元,可直接应用于分析柔索类传动过程中力的运动变化特性。为提高其仿真精度,Cepon等人^[76]采用黏弹性材料特性来调整阻尼及刚度矩阵,再通过线性互补下的罚函数法来描述接触模型,以此来分析传动介质任意微段的运动力变化情况。

瞬态摩擦机理研究主要关注摩擦系数的动态变化特性。研究表明,柔索张力、滑速、正压力以及工作温度均会影响摩擦系数。Peng等人^[77]的

实验结果证实低滑速下,绳-轮间摩擦系数随着柔索张力的增大而增大。Lee^[78]同样发现提高系统预紧力的同时,绳-轮摩擦会成比例的增加。Albro^[79]分析了五种不同形状的沟槽对摩擦因子的影响。Tu^[80]分别研讨了在流体润滑、混合润滑和边界润滑三个阶段中,绳轮材料、滑速、系统刚度、柔索张力、润滑剂黏度、润滑剂添加剂及绳轮表面粗糙度共七个因素对摩擦系数的影响机制。

对于复杂构型的柔索传动系统,由于绳轮相互作用过程的复杂性,难以直接采用理论推导的方法分析其力运动传动特性,因此采用多体动力学软件进行复杂柔索传动机构特性仿真的方法受到了诸多学者的重视。柔索传动的仿真方法大致可以分为三类。第一,刚性有限元法,即将柔索划分称为有限段圆柱刚性体,以轴套力等柔性连接力来描述绳的柔性变形,以此建立柔索传动系统的多体动态接触动力学模型。该方法仍然属于多刚体耦合动力学系统,制约了柔索应力-应变变化情况的分析。此外为了追求仿真精度,需要将柔索划分成很多微段,降低仿真效率。第二,模态柔性体建模法,利用有限元软件计算出部件的模态参数,然后代替多体系统中的某些刚性体,该柔性体在多体中受力后的响应采用模态叠加法进行计算。该方法对接触问题的建模不准确,因为接触是用虚拟的“触点”表述,要提高精度需要静力修正模态。柔体变形后模态模型需要更新,但是需要运行外部有限元程序进行模态分析。第三,有限元柔性体建模法^[81-83]。利用 RecurDyn/Fflex、Adams/Cable 等模块中的梁单元对传动介质进行有限元柔性体建模,该方法同时提高了求解精度和仿真效率,对于求解大变形、刚性体与柔性体相互接触的场合有独特的优势。但是该方法目前主要应用于摩擦提升机等动力传递系统,在高精度应用场合下研究传动过程中力的运动特性成因仍有待探索。

上述基础研究表明,精密柔索传动特性取决于柔索预紧力、自身弹性蠕变以及与传动轮间摩擦特性的综合作用,尚不能从理论上给出完整精确的理论描述,导致精密柔索传动的转矩、位移等特性及其环境、负载的认识不够深入,对工程应用的指导性较为有限。因此,仍需深化柔索传动介质与传动轮之间的摩擦传动机理研究,掌握工况、载荷等因素对传动过程的力、运动、能量等特性影

响的物理本质,建立有效的刚柔耦合传动理论和仿真分析方法。

3.2 精密伺服机构中的应用基础研究

精密伺服机构是柔索传动的主要应用领域。随着柔索传动在高精密、轻量化、多自由度伺服机构中应用的不断增加,柔索传动误差、传动空回、传动刚度等特性已成为制约伺服性能提升的关键因素。

传动误差^[84-85]是指当输入轴单向回转时,输出轴转角的实际值相对理想值的变动量。周超群等^[86]指出传动误差分成两部分:落在开环截止频率之内的低频分量和落在开环截止频率之外的高频分量。在闭环伺服系统中,低频分量不会给输出带来误差,而高频分量会无衰减地影响伺服精度。同步带传动同样作为精密挠性传动单元,其成果对精密柔索传动的研究具有一定的启示作用。相关日本学者对如何降低横向振动幅值^[87-88]、传动误差的创成机理^[89]、张紧力对传动误差的影响^[90]、传动轮的偏心对传动误差的影响^[91]等方面进行了大量系统的研究工作。Kagotani 等^[89]指出传动介质的横向振动是影响传动运动精度和输出力矩波动的源头。传动误差的频率成分由两部分组成:一倍和两倍横向振动基频。传动误差幅值是由三部分叠加而成,分别是:带振动导致的自由段传动介质的长度变化引起的传动误差;带与轮初始啮合点的爬行引起的传动误差;传动轮惯性力矩变化引起的传动误差。而输出轮力矩波动的频率等于横向振动基频,其波动幅值是由传动介质的长度变化和带与轮的啮合爬行引起的。然而,针对柔索传动误差的研究并不多。Baser 等^[92]提出传动误差是由负载导致的滑移误差和绳轮偏心距导致的运动误差两部分组成的,并建立了低频段的传动误差模型。Kilic 等^[93]通过试验定性分析了绳轮材料及尺寸、柔索材料及尺寸、柔索张力及包角和稳态速度等因素对传动误差的影响,并指出柔索传动误差也包含高频分量,但是未对传动误差的高频部分进行准确的建模。

传动空回是指当机构变向时输出轴转角的实际值相对理想值的跳动量,主要是由于传动介质弹性变形造成的,它导致输出与输入之间呈非线性关系。传动空回对伺服系统的稳定性、稳定精度都有较大的影响,一是引起相位滞后,影响系统的稳定性;二是引起极限环振荡产生自振静态误

差;三是引起速度正弦跟随信号在过零处出现“过补偿”和“未完全补偿”的现象,严重制约稳定精度的提升;四是传动空回对低速平稳性的影响较大,使系统的速度波动加剧。Lu 等^[94]建立了柔索传动的传动空回模型,指出柔索传动系统的传动空回取决于传动介质的材料特性(包括弹性模量和等效截面积)、传动系统的几何参数(包括主从动轮半径和中心距)和力学参数(包括预紧力、负载和摩擦系数),并着重分析了预紧力对传动空回的影响。但是其他设计因素如负载、传动介质材料对传动空回的映射关系仍需要进一步展开研究。

传动刚度指的是传动系统抵抗弹性变形的能力。高传动刚度的传动链抗扰能力强、传动灵敏、响应速度快、力和运动的传递特性好,能获得较高的运动精度。在特定的负载条件下,如何设计预紧力、包角等关键因素才能满足系统伺服性能要求,以及外负载变化情况下的刚度迟滞特性对伺服性能的影响分析则成了亟待解决的问题。Werkmeister 等^[95]将柔索传动滑移段及自由变形段六段等效为非线性弹簧,以此建立了柔索传动刚度模型,并对预紧力、负载、中心距及摩擦因子等参数进行了灵敏度分析。Snow^[96]分析了负载变化下传动刚度的软弹簧特性,即传动刚度随着负载增加而降低的特性,并根据中心距与绳轮直径的比值大小,建立了三种传动刚度模型。Rajh^[97]针对外负载变化下的迟滞特性,提出了分段传动刚度模型。但是,针对柔索传动刚度所表现出来的软弹簧特性和迟滞特性对伺服性能的影响分析较少,该方面的研究需要进一步加强。

对于两自由度柔索传动构型^[98-100],两轴之间一般存在位置、惯量和力矩等多种耦合,实质上是一多变量强耦合非定常系统。耦合度分析结果表明,在不考虑控制系统的前提下两自由度柔索传动系统是不稳定的,因此需要对两自由度柔索传动构型的耦合特性展开分析。该耦合特性不同于柔索传动机器人各关节间运动的耦合特性,后者只需要分析柔索传动导致的各关节运动耦合特性,而前者还需要对各设计参数对耦合度的影响,传动误差对系统耦合特性分析等展开研究。而针对差分构型耦合特性的研究尚不够完善,鲁亚飞等^[99]研究了两电机转角与内外框架转角之间的运动学耦合关系,并利用拉格朗日方程分析了其动力学耦合特性。Olaru 等^[101]给出了差分

结构的驱动力矩与关节输出力矩的变换矩阵。

通过以上传动误差、传动空回、传动刚度和耦合特性等关键传动特性的研究可知,柔索传动关键设计参数-传动特性-伺服性能三者之间的映射关系仍不明确。应从分析评价伺服系统性能优劣的主要控制参量出发,研究传动特性与伺服性能之间的映射关系,进而建立设计参数对伺服性能的灵敏度关系,形成高性能伺服机构用精密柔索传动机构的分析与设计方法。

3.3 工程设计方法研究

由于柔索传动构型的灵活性,且传动部件的设计与宿主、负载特性密切相关,柔索传动设计准则、设计方法的系统化、标准化程度不高,使得它在精密、复合伺服机构中的工程化应用受到较大制约。对柔索传动而言,传动布局、柔索材料选型、预紧机构、传动轮表面材料摩擦特性等设计问题是工程化设计过程的核心问题。针对这些核心问题,实现设计方法的标准化、设计流程的规范化,关系到能否形成有效的工程设计方法。

在柔索传动的设计方法研究方面,张林安^[102]结合约束螺旋方法提出单自由度闭环钢丝传动模块机构的构型综合方法。鲁亚飞^[103]论述了柔索传动的系统组成、典型构型、工作特点以及关键设计问题,提出了一种基于横向一致性、绳槽匹配^[104]以及同绳异槽缠绕三原则的无干涉柔索传动绳槽设计方法,初步形成柔索传动系统的设计准则与一般步骤。Rahmati^[105]总结了设计柔索传动机器人的一般步骤包括布局方式、预紧方式、材料选择等几个方面,并归纳了两种导向轮的一般布局方式。本文从传动轮布局优化、柔索材料选型、预紧方式设计等方面简要说明柔索传动工程化设计的研究情况。

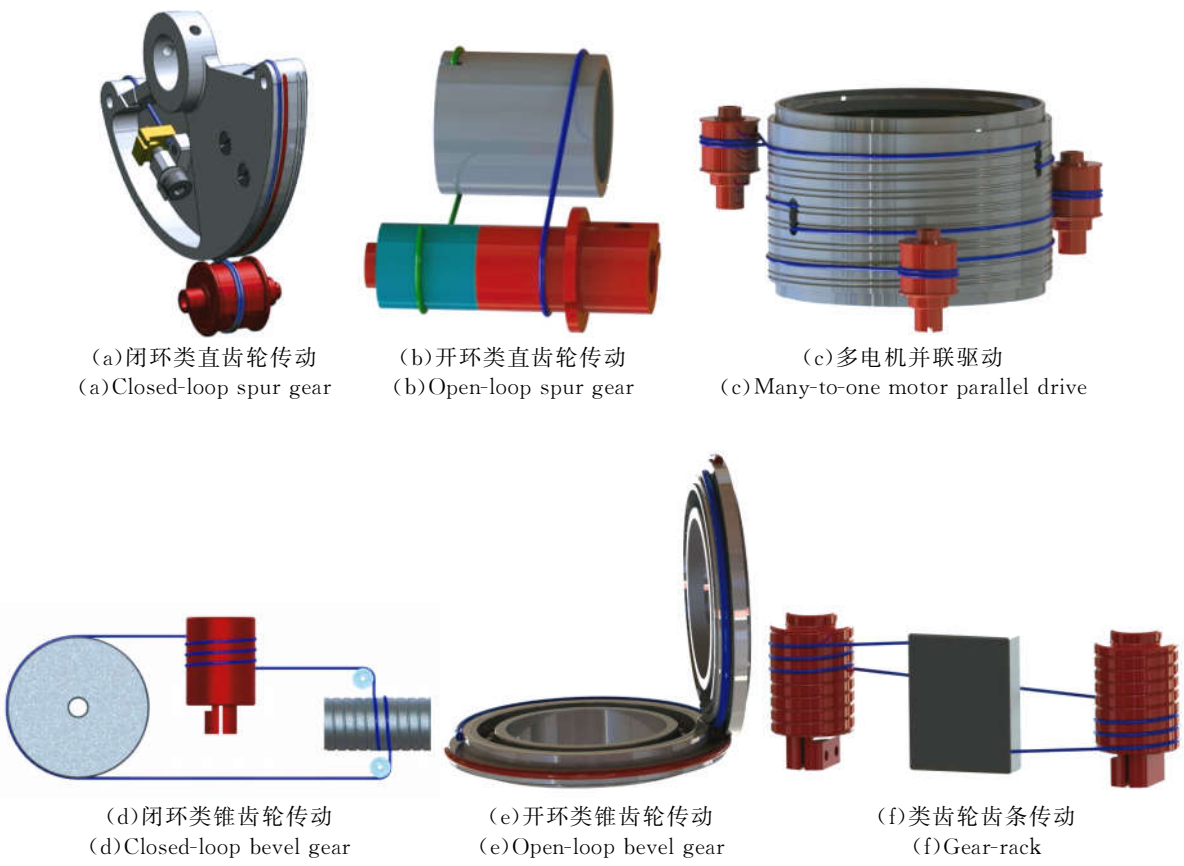
3.3.1 传动轮布局优化

利用绳轮布局灵巧的优势,柔索传动发展出数种空间传动形式。Sagebrush 科技公司推出了类似于直齿轮传动的“Roto-Lok”构型,如图8(a)所示。该传动形式下柔索以“8”字形在主动轮上缠绕数周后固定预紧在从动轮上。该传动构型在精确预紧的情况下传动精度可以达到微弧度量级,传动效率可以达到 99%,适用于高精度高效率的应用场合。图 8(b)为开环类直齿轮传动形式,其优势在于可以将主动轮设计成两截,通过两部分主动轮的相互运动而起到柔索预紧的作用。

图 8(c)为多电机并联驱动形式。该传动构型不仅具有较大的输出力矩、转矩/重量比和紧凑的结构形式,而且可以提高柔索传动单元的传动刚度,以提高大负载下的传动能力。此外,若在恶劣环境下,某根钢丝绳由于疲劳受损或断裂,其余两根仍然能够保证系统一定的工作能力。图 8(d)和 8(e)为类锥齿轮传动构型。该构型是为解决空间交叉轴传动而设计的。闭环类锥齿轮传动构型是通过导向轮实现的。开环类锥齿轮传动构型是将主动轮和从动轮分别设计成阶梯轮形式,并保证两轮上相对应的阶梯圆在空间相切正交,再通过两股绕向相反的柔索实现正反方向的运动。图 8(f)为类齿轮齿条传动构型,该构型可以将主动轮的旋转运动变为从动轮直线运动,难点在于需要解决传动过程中柔索在主动轮上的轴向运动。图 8(g)为类涡轮蜗杆传动构型。为实现运动和力的传递,需要对该传动构型下的固定预紧方式、

绳槽匹配、横向螺距匹配等问题展开研究。

柔索差动传动指的是能够通过一种构型同时实现两自由度的传动形式,优势在于可以降低运动惯量,满足轻量化、小型化的发展趋势,但是不可避免地带来运动及动力耦合。图 8(h)中采用的差动传动构型中从动轮为四层阶梯轮形式,分别与两层阶梯轮形式的主动轮相互垂直布置,并通过阶梯圆之间的空间相切正交实现柔索的缠绕,最终通过两个主动轮间的配合实现从动轮两个自由度的运动。图 8(i)所示的差动传动采用类直齿轮和类锥齿轮型柔索传动复合形式,每个主动轮上固定两根精密柔索,柔索在主动轮上缠绕大半圈后经由 Y 轴传动轮分别固定在 X 轴传动轮上的绳槽内,再通过两个驱动电机的相互配合实现两轴的运动。该差动构型的缺点是在 X 轴运动过程中,柔索在 Y 轴传动轮会产生相对滑移,产生的滑动摩擦扰动对传动精度有较大的影响。



(a)闭环类直齿轮传动
(a)Closed-loop spur gear

(b)开环类直齿轮传动
(b)Open-loop spur gear

(c)多电机并联驱动
(c)Many-to-one motor parallel drive

(d)闭环类锥齿轮传动
(d)Closed-loop bevel gear

(e)开环类锥齿轮传动
(e)Open-loop bevel gear

(f)类齿轮齿条传动
(f)Gear-rack

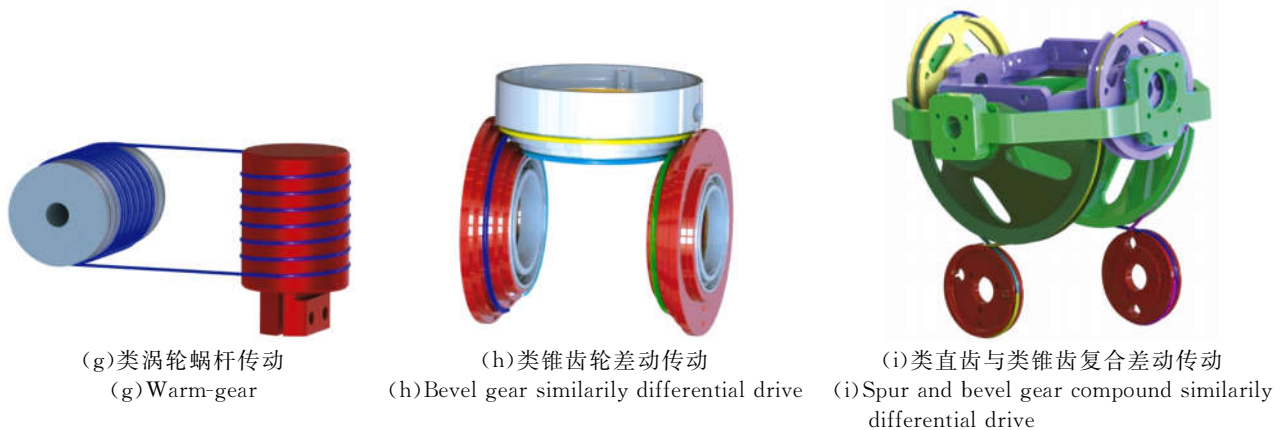


图 8 柔索传动数种空间传动构型

Fig. 8 Transmission configurations of cable drive

导引轮系传动形式的作用是为了满足系统长距离传动及改变运动方向的需求。Rahmati 等^[105]根据作用的不同,将导向轮分为改变运动方向和柔索长度补偿两类,并给出了各类导向轮的约束条件。王晓菲^[59]根据柔索本身的螺旋特点,应用螺旋理论和流形理论提出了实际应用中柔索的曲率和挠率的方程,为柔索受力和导向轮设计提供理论基础。

3.3.2 柔索材料选型

钢丝绳以其较好的柔度与高弹性模量的特点,成为了柔索传动的常用传力介质。但是,随着柔索传动应用呈现高精度、小型化、轻量化、环境复杂化的发展趋势,使用中钢丝绳愈发不能作为通用介质。而传动介质的弹性模量、弯曲刚度等材料属性,传动介质与传动轮之间的摩擦机制是影响传动特性的主要影响因素。研究者根据不同应用环境的需求对传动介质进行了改善。

在机构轻量化、小型化的设计中,钢丝绳的弯曲刚度是主要的限制条件。SAVA^[106]指出绳轮与钢丝绳的比值至少要大于 18。因此, Mazumdar^[107]采用 Vectran 等合成纤维替代钢丝绳作为传动介质,当绳轮与钢丝绳比值为 8:1 时, Vectran 仍能够保持约 85% 的拉力,进而系统可以减小约 56% 的体积。将该系统应用于两足机器人之中,可以达到 28 Hz 的力矩控制带宽、150~200 N·m 的最大输出力矩能力、95% 的传动效率以及约为 247 000 转的使用寿命。

在具有滑动摩擦的应用场合,随着传动介质滑动速度的增加,系统容易出现滞滑现象,从而降

低系统的伺服性能。但是通过选择接触介质可以改变剪切机制,使得传动介质与绳轮间的摩擦因子随滑动速度稳步提高,便可以消除滞滑现象。Schiele 等^[108]采用聚四氟乙烯作为钢丝绳包裹层,以消除滞滑现象。Tu 等^[80]在绳轮表面添加脂肪酸类润滑剂以改变剪切机制。

灵巧手对传动介质的要求包括:易于通过狭小空间、弯曲刚度小、耐用性好等,但对弹性模量要求不高。DLR^[109]采用 Dyneema 纤维材料替代钢丝绳,通过测试,该材料的使用寿命是钢丝绳的 200 倍,最大承载力是钢丝绳的 2 倍,且易于拼接和固定。

3.3.3 预紧方式设计

在柔索传动中,预紧力的存在起到三个方面的作用。第一,预紧力可以消除传动的空回,提高传动的刚度和效率;第二,在钢丝绳预加一定的载荷,可以消除钢丝绳自身的松弛,保证在往复调整过程中特性的一致;第三,预紧力的存在也是提高精密柔索传动系统传动能力的重要手段。因此,为保证传动的精确性和可靠性,对预紧装置提出了新的要求:第一,结构简单、便于操作,能够适应于狭小的空间;第二,适应性强,可以实现要求范围内的张力调节,保证传动过程有足够的张力;第三,自调节功能,要求具有调控张力的能力,且能够适应于空间环境。

常用的柔索传动预紧方式大致可以归纳为四种:第一,张紧轮预紧方式^[23],该方式易于实现,但是增加多余的张紧轮轴系,使得结构趋于复杂化;第二,移动轴系预紧方式,即装载柔索后反向

移动输入、输出轴系进行预紧。该方式的难点在于需要通过导轨等辅助设施以保证轴系移动后的装配尺寸精度,因此主要应用于试验系统。

第三,传动轮错开预紧方式,即将传动轮设计成两截式,装载传动介质后,通过两部分主动轮的相互运动而起到柔索预紧的作用。MIT^[110-111]通过置于传动轮内部的涡轮蜗杆副错动两截传动轮,达到预紧传动介质的效果。此外在妙手系统^[112]和谢里夫理工大学研制的球形腹腔机械臂^[105]中也是采用此预紧方式。该方式空间利用率高,预紧充分,但是机构较为复杂,难以加工。

第四,末端预紧方式,常用的有螺纹滑块预紧、碟形弹簧预紧和柔顺梁预紧等。在自由空间激光通信系统 BMDO/IST^[113]、力觉交互装置 PhanTom^[114]等高精度应用场合均是采用高刚度弹簧预紧,但是该方式为了调节预紧力,需要将预紧机构设计成开放式结构,占用设计空间。韩海姣^[115]、Neal^[116]均将末端预紧装置设计成柔顺梁的方式,分析了变形量与预紧力之间的对应关系,以保证足够的预紧张力。该方式简单有效,可以保证较小的附加质量。

上述研究对开展柔索传动装置的设计具有较大的价值,但是仍未形成系统具体的柔索传动工程设计方法,还需要从传动构型拓扑化设计、新型柔索与传动轮材料、自适应预紧机构设计等方面进行更深入的研究,以促进柔索传动工程化设计软件的开发。

4 启示与展望

柔索传动技术以其零空回、反向驱动摩擦低、柔顺性能好、布局灵活、自重轻、承载能力大、且能在狭小空间内长距离传动等优点,已成为轻量化伺服机构中一类重要的传动方式,并得到了广泛的应用。尽管精密柔索传动的应用较多,但是仍未形成完整规范的理论分析和工程设计方法,这种状况会制约柔索传动在高端精密伺服机构中的应用。究其原因在于从理论上仍不能完全解释柔索传动过程中力的运动特性成因、能量传递及耦合机理及其不确定性等因素对传动行为的影响问

题,导致传动单元优化设计目标、运动/力矩协同控制等工程应用问题研究的理论依据不够完备。因此,亟待深入研究并掌握柔索传动的内部结构参数、外部负载及传动条件等相结合的传动特性生成规律,建立柔索传动机理分析的理论模型,形成完整的柔索传动优化设计方法。需要关注并开展的研究如下:

(1) 柔索传动伺服机构的性能调控理论与方法

精密柔索传动的传动误差、传动空回、传动刚度滞回特性、软弹簧特性等,已成为制约伺服性能提升的关键因素。因此,需要深入研究传动过程中力、位移、能量等特性的转换规律,建立能描述柔索传动内部力、位移和能量传递行为的刚柔混合动力学模型。通过该模型对结构、材料、装配等因素与传动精度、力矩特性、响应特性的关系进行定量分析。掌握传动精度保持与劣化、磨损与失效等性能参数的成因机理,形成精密柔索传动部件特性分析的理论方法,建立设计参数-传动特性-伺服性能三者之间的映射关系,以为调控精密柔索传动伺服机构的伺服性能研究提供理论依据。

(2) 结构、驱动、传感以及控制集成设计方法

针对高性能伺服机构的应用需求,从实现整体传动性能优化的角度,研究精密柔索传动的机构-传感-控制驱动的并行与集成设计方法,开展柔索机构、电磁压电驱动部件、嵌入式传感控制部件的多学科集成建模和仿真方法研究,掌握柔索传动部件行为的机电协同分析方法,为精密传动的机构-传感-驱动部件优化和控制算法设计提供定量化分析方法。

(3) 空间特殊环境下服役行为与失效特性

柔索传动技术由于具有传动精度高、效率高以及无需润滑等特点,在空间特殊环境下具有较好的应用前景。针对柔索传动的结构特点,研究空间高真空、微重力、大温差等特殊工作条件下柔索传动的性能演变方式和失效模式,定量分析柔索传动部件在不同工作状态下的应力、应变分布以及疲劳特性,并提出相应的可靠性设计方案。

参考文献:

- [1] SALISBURY JR K J, TOWNSEND W T, DIPIETRO D M, *et al.*. Compact cable transmission with cable differential; US, 5046375 [P]. 1991-09-10.
- [2] PIETRO D, MARK D. *Development of an Actively Compliant Underwater Manipulator*[D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1988.
- [3] SALISBURY K, TOWNSEND W, EBRMAN B, *et al.*. Preliminary design of a whole-arm manipulation system (WAMS) [C]. *Proceedings of 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, 1988: 254-260.
- [4] CARSON D G. Precision positioning apparatus having a rotating driving element and a rotating driven element; US, 4351197[P]. 1982-09-28.
- [5] CARSON D G. Rotary drive apparatus having multiple drive shafts; US, 4787259[P]. 1988-11-29.
- [6] 范世琦. 精密指向机构非线性动力学建模与测控问题研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
FAN SH X. *Study on Nonlinear Dynamic Modeling Measurement and Control Problems for Precision Pointing Mechanisms*[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012. (in Chinese)
- [7] KOREVAAR E J, BLOOM S H, SLATNICK K D, *et al.*. Status of SDIO/IS&T lasercom testbed program[J]. *SPIE*, 1993, 1866: 116-127.
- [8] SCHULTHESS M R, ARDAMAN A A, BAUGH S, *et al.*. Performance of the high-altitude balloon experiment Roto-lok drive gimbal systems [J]. *SPIE*, 1994, 2221: 652-664.
- [9] MOOG. Spacecraft mechanisms product catalog [G]. MOOG Schaffer Magnetics Division, 2005: 67-68.
- [10] SUTHERLAND O. Tracking with hybrid-drive active vision [C]. *International Symposium on Experimental Robotics*, ISER, 2000.
- [11] DANKERS A, ZELINSKY A. CeDAR: A real-world vision system; mechanism, control and visual processing[J]. *Machine Vision and Applications*, 2004, 16(1): 47-58.
- [12] 段颖辉. 小型车载卫通天线座的结构设计[J]. 电子机械工程, 2004, 20(2): 21-24.
DUAN Y H. Mechanical design of a small vehicle-borne satellite communication antenna pedestal[J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2004, 20(2): 21-24. (in Chinese)
- [13] 张洪文, 曹国华, 李延伟, 等. 钢丝绳传动在航空光学遥感器上的应用[J]. 激光与红外, 2013, 43(4): 418-422.
ZHANG H W, CAO G H, LI Y W. *et al.*. Application of wire rope gearing in aerial optical remote sensor[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(4): 418-422. (in Chinese)
- [14] COLGATE J E, WANNASUPHOPRASIT W, PESHKIN M A. Cobots: robots for collaboration with human operators [C]. *Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division*, ASME, 1996, 58: 433-439.
- [15] Barrett. Inc. WAM Arm[EB/OL]. <http://barrettcom/companyhtm>, 2011.
- [16] 3DSYSTEMS. Phantom premium: Advanced haptic devices for academic and commercial research and development [EB/OL]. <http://www-geomagic.com/en/products/phantom-premium/overview>. 2015.
- [17] ROOKS B. The harmonious robot[J]. *Industrial Robot: An International Journal*, 2006, 33(2): 125-130.
- [18] EDSINGER A L. *Robot Manipulation in Human Environments*[D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2007.
- [19] QUIGLEY M, BREWER R, SOUNDARARAJ S P, *et al.*. Low-cost accelerometers for robotic manipulator perception[C]. *Proceedings of 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, 2010: 6168-6174.
- [20] BREWER R D, SALISBURY J K. Visual vein-finding for robotic IV insertion[C]. *Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, 2010: 4597-4602.
- [21] MALYSZ P, SIROUSPOUR S. Maneuverability and grasping experiments in teleoperation of non-holonomic/twin-armed robots[C]. *Proceedings of 2012 IEEE Haptics Symposium*, IEEE, 2012: 203-209.
- [22] HAGN U, NICKL M, JÖRG S, *et al.*. The DLR MIRO: a versatile lightweight robot for surgical applications[J]. *Industrial Robot*, 2008, 35(4): 324-336.
- [23] 闫婉. 新型移动机器人系统设计与研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
YAN W. *The System Design and Study for New Type Mobile Robot*[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2011. (in Chinese)

- [24] 陈伟海,游贤强,崔翔,等. 绳驱动拟人臂机器人的动力学建模及张力分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(3): 335-339.
CHEN W H, YOU X Q, CUI X, *et al.*. Dynamics modeling and tension analysis for a cable-driven humanoid-arm robot[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2013, 39(3): 335-339. (in Chinese)
- [25] 李国杰. 基于虚拟现实技术的力觉交互设备的研究与构建[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
LI G J. *Research & Design of a Haptic Interface Based on Virtual Reality Technology*[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- [26] WINFREE K N, ROMANO J M, GEWIRTZ J, *et al.*. Control of a high fidelity ungrounded torque feedback device: the iTorqU 2. 1[C]. *Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, 2010: 1347-1352.
- [27] SALISBURY C, SALISBURY JR J K. Haptic device for telerobotic surgery: US, 8924009 [P]. 2015-12-30.
- [28] SALISBURY C M, SALISBURY J K, GILLESPIE R B, *et al.*. A microsurgery-specific haptic device for telerobotic medical treatment[C]. *Emergency Preparedness and Response and Robotic and Remote Systems Topical Meeting*, American Nuclear Society, 2008.
- [29] BREWER D, LEEPER A, SALISBURY J K. A friction differential and cable transmission design for a 3-DOF haptic device with spherical kinematics[C]. *Proceedings of 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, 2011: 2570-2577.
- [30] LEE L F, NARAYANAN M S, MENDEL F, *et al.*. Kinematics analysis of in-parallel 5 DOF haptic device[C]. *Proceedings of 2010 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, IEEE, 2010: 237-241.
- [31] ARATA J, KONDO H, SAKAGUCHI M, *et al.*. Development of a haptic device "DELTA-4" using parallel link mechanism[C]. *Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, 2009: 1404-1410.
- [32] VLACHOS K, PAPADOPOULOS E, MITROPOULOS D N. Design and implementation of a haptic device for training in urological operations [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2003, 19(5): 801-809.
- [33] 马运忠, 张玉茹, 曹永刚. 六自由度力觉交互装置刚度分析[J]. 机械设计与研究, 2007(S1): 225-229.
MA Y ZH, ZHANG Y R, CAO Y G. Stiffness analysis of 6 DOF haptic device[J]. *Machine Design and Research*, 2007(S1): 225-229. (in Chinese)
- [34] LI CH B, WANG D X, ZHANG Y R. iFeel3: a haptic device for virtual reality dental surgery simulation[C]. *Proceedings of 2011 International Conference on Virtual Reality and Visualization*, IEEE, 2011: 179-184.
- [35] PERRY J C, ROSEN J. Design of a 7 degree-of-freedom upper-limb powered exoskeleton [C]. *Proceedings of the 1st IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics*, IEEE, 2006: 805-810.
- [36] BALL S J, BROWN I E, SCOTT S H. MEDARM: a rehabilitation robot with 5DOF at the shoulder complex[C]. *Proceedings of 2007 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, IEEE, 2007: 1-6.
- [37] CUI X, CHEN W H, JIN X, *et al.*. Design of a 7-DOF cable-driven arm exoskeleton (CAREX-7) and a controller for dexterous motion training or assistance [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, 22(1): 161-172.
- [38] AGUIRRE-OLLINGER G, COLGATE J E, PESHKIN M A, *et al.*. A 1-DOF assistive exoskeleton with virtual negative damping: effects on the kinematic response of the lower limbs[C]. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, 2007: 1938-1944.
- [39] CEMPINI M, CORTESE M, VITIELLO N. A powered finger-thumb wearable hand exoskeleton with self-aligning joint axes[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2015, 20(2): 705-716.
- [40] JIANG X ZH, HUANG X H, XIONG C H, *et al.*. Position control of a rehabilitation robotic joint based on neuron proportion-integral and feed-forward control [J]. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 2012, 7(2): 024502.
- [41] 樊骏锋. 基于绳索驱动的上肢康复机器人研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
FAN J F. *A Study of Cable-driven Robot for Upper Limbs Rehabilitation*[D]. Xi'an: Xidian University, 2014. (in Chinese)
- [42] 黄元林, 付成龙, 王健美, 等. 双足跑步机器人控制方法研究概述[J]. 机器人, 2009, 31(4): 370-377.

- HUANG Y L, FU CH L, WANG J M, *et al.*. A survey of the research on control methods for biped running robot[J]. *Robot*, 2009, 31(4): 370-377. (in Chinese)
- [43] PARK H W, SREENATH K, HURST J W, *et al.*. Identification and dynamic model of a bipedal robot with a cable-differential-based compliant drivetrain[R]. CGR 10-06, Michigan; University of Michigan Control Group, 2010.
- [44] HURST J W. *The Role and Implementation of Compliance in Legged Locomotion* [D]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2008.
- [45] LOEFFL F C, WERNER A, LAKATOS D, *et al.*. The DLR c-runner: concept, design and experiments[C]. *Proceedings of 2016 IEEE-RAS 16th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, IEEE, 2016: 758-765.
- [46] HUTTER M, GEHRING C, BLOESCH M, *et al.*. STARLETH: a compliant quadrupedal robot for fast, efficient, and versatile locomotion[C]. *Proceedings of the 15th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*, Autonomous Systems Lab, ETH Zurich, 2012: 904.
- [47] OHTSUKA S, ENDO G, FUKUSHIMA E F, *et al.*. Development of terrain adaptive sole for multi-legged walking robot[C]. *Proceedings of 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, 2010: 5354-5359.
- [48] 侯月阳. 挠性驱动单元及其在仿人双足步行机器人应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
HOU Y Y. *Research on Flexible Drive Unit and Its Application in Humanoid Biped Robot*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
- [49] BORST C, FISCHER M, HAIDACHER S, *et al.*. DLR hand II: experiments and experience with an anthropomorphic hand[C]. *Proceedings of 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, 2003: 702-707.
- [50] CHALON M, MAIER M, BERTLEFF W, *et al.*. Spacehand: a multi-fingered robotic hand for space[C]. *Proceedings of the 13th Symposium on Advanced Space Technologies in Robotics and Automation*, ESA, 2015.
- [51] HAND A, FRIEDL W, CHALON M, *et al.*. FAS A flexible antagonistic spring element for a high performance over[C]. *Proceedings of 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, 2011: 1366-1372.
- [52] SRC. Shadow Dexterous Hand Technical Specification [EB/OL]. (2013-01-01). http://www-shadowrobotcom/wp-content/uploads/shadow_dexterous_hand_technical_specification_E1_20130101.pdf.
- [53] CHEN ZH P, LII N Y, WIMBÖCK T, *et al.*. Experimental analysis on spatial and cartesian impedance control for the dexterous DLR/HIT II hand[J]. *International Journal of Robotics and Automation*, 2014, 29(1): 1-12.
- [54] Company IS. EndoWrist ©/Single-Site © Instrument & Accessory Catalog[EB/OL]. In: https://www.intuitivesurgical.com/assets/docs/1021625-EUrA_Si_System_I&A_Catalog_no_pricing_EU_highres.pdf, (ed.). 2015.
- [55] HAGN U, KONIETSCHKE R, TOBERGTE A, *et al.*. DLR miroSurge: a versatile system for research in endoscopic telesurgery[J]. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 2010, 5(2): 183-193.
- [56] ROSEN J, BROWN J D, DE S, *et al.*. Biomechanical properties of abdominal organs in vivo and postmortem under compression loads[J]. *Journal of Biomechanical Engineering*, 2008, 130(2): 021020.
- [57] HANNAFORD B, ROSEN J, FRIEDMAN D W, *et al.*. Raven-II: an open platform for surgical robotics research[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2013, 60(4): 954-959.
- [58] MOREYRA M R. Wrist with decoupled motion transmission; US, 6969385[P]. 2005-11-29.
- [59] 王晓菲. 基于柔性丝传动的腹腔微创手术器械设计方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
WANG X F. *Mechanism of Minimally Invasive Surgery Device with Cable Transmission* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese)
- [60] 赵旭东. 腹腔微创手术机器人手术器械的结构设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
ZHAO X D. *Structural Design of Surgical Instrument for Celiac Minimally Invasive Surgical Robot* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- [61] BECHTEL S E, VOHRA S, JACOB K I, *et al.*. The stretching and slipping of belts and fibers on pulleys [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2000, 67(1): 197-206.

- [62] RUBIN M B. An exact solution for steady motion of an extensible belt in multipulley belt drive systems[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2000, 122(3): 311-316.
- [63] KONG L Y, PARKER R G. Steady mechanics of belt-pulley systems[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2005, 72(1): 25-34.
- [64] JUNG J H, PAN N, KANG T J. Generalized capstan problem: bending rigidity, nonlinear friction, and extensibility effect[J]. *Tribology International*, 2008, 41(6): 524-534.
- [65] KIM D, LEAMY M J, FERRI A A. Dynamic modeling and stability analysis of flat belt drives using an elastic/perfectly plastic friction law[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 2011, 133(4): 041009.
- [66] MORIMOTO T, IIZUKA H. Rolling contact between a rubber ring and rigid cylinders: mechanics of rubber belts[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2012, 54(1): 234-240.
- [67] LEAMY M J. On a perturbation method for the analysis of unsteady belt-drive operation[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2005, 72(4): 570-580.
- [68] LEAMY M J, WASFY T M. Transient and steady-state dynamic finite element modeling of belt-drives[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2002, 124(4): 575-581.
- [69] ELISEEV V, VETYUKOV Y. Effects of deformation in the dynamics of belt drive[J]. *Acta Mechanica*, 2012, 223(8): 1657-1667.
- [70] VETYUKOV Y, ELISEEV V. The model of a deformable string with discontinuities at spatial description in the dynamics of a belt drive[M]// BELYAEV A K, IRSCHIK H, KROMMER M. *Mechanics and Model-Based Control of Advanced Engineering Systems*. Vienna: Springer, 2014: 275-283.
- [71] VETYUKOV Y, ELISEEV V, KROMMER M. Modeling the dynamics of a flexible belt drive using the equations of a deformable string with discontinuities [J]. *IFAC-Papersonline*, 2015, 48(1): 604-609.
- [72] VETYUKOV Y, OBORIN E, KROMMER M, *et al.*. Transient modelling of flexible belt drive dynamics using the equations of a deformable string with discontinuities[J]. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, 2017, 23(1): 40-54.
- [73] VETYUKOV Y, GRUBER P G, KROMMER M. Nonlinear model of an axially moving plate in a mixed Eulerian-Lagrangian framework[J]. *Acta Mechanica*, 2016, 227(10): 2831-2842.
- [74] SHABANA A A, YAKOUB R Y. Three dimensional absolute nodal coordinate formulation for beam elements: theory[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2001, 123(4): 606-613.
- [75] DUFVA K, KERKKÄNEN K, MAQUEDA L G, *et al.*. Nonlinear dynamics of three-dimensional belt drives using the finite-element method [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2007, 48(4): 449-466.
- [76] EPON G, BOLTEŽAR M. Dynamics of a belt-drive system using a linear complementarity problem for the belt-pulley contact description [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2009, 319(3-5): 1019-1035.
- [77] PENG Y X, ZHU ZH C, CHEN G A, *et al.*. Effect of tension on friction coefficient between lining and wire rope with low speed sliding[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2007, 17(3): 409-413.
- [78] LEE T K, KIM C Y, LEE M C. Friction analysis according to pretension of laparoscopy surgical robot instrument[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2011, 12(2): 259-266.
- [79] ALBRO C S, LIU F. Effect of groove shape on the frictional hold of a sheave on polyester rope [J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 1985, 107(1): 103-106.
- [80] TU C F, FORT T. A study of fiber-capstan friction. 1. Stribeck curves[J]. *Tribology International*, 2004, 37(9): 701-710.
- [81] 方子帆, 吴建华, 何孔德, 等. 索结构碰撞动力学模型及应用研究[J]. *系统仿真学报*, 2011, 23(5): 1005-1009.
- FANG Z F, WU J H, HE K D, *et al.*. Impact dynamic modeling and application study of cable structures [J]. *Journal of System Simulation*, 2011, 23(5): 1005-1009. (in Chinese)
- [82] 李菁, 李济顺, 刘义, 等. 虚拟样机技术在摩擦式提升机动力学分析中应用[J]. *机械设计与制造*, 2014(9): 238-241.
- LI J, LI J SH, LIU Y, *et al.*. Application of virtual prototyping in multi-rope friction mine hoist analysis[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2014(9): 238-241. (in Chinese)

- [83] 刘义, 陈国定, 李济顺, 等. 摩擦提升机的虚拟样机研究[J]. 计算机仿真, 2009, 26(11): 272-277. LIU Y, CHEN G D, LI J SH, *et al.*. Research on virtual prototyping of multi-rope friction winder [J]. *Computer Simulation*, 2009, 26(11): 272-277. (in Chinese)
- [84] 李凯, 叶佩青, 周晓尧, 等. 精密行星滚柱丝杠的传动特性[J]. 光学精密工程, 2016, 24(8): 1908-1916. LI K, YE P Q, ZHOU X Y, *et al.*. Transmission characteristics of precise planetary roller screw[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(8): 1908-1916. (in Chinese)
- [85] 杨会生, 李志来, 樊延超, 等. 空间相机均力输出式调焦机构[J]. 光学精密工程, 2016, 24(4): 796-803. YANG H SH, LI ZH L, FAN Y CH, *et al.*. Focusing mechanism with equal output forces for space camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(4): 796-803. (in Chinese)
- [86] 周起群, 陈小安, 合焯. 伺服系统中精密传动装置精度分析[J]. 现代制造工程, 2007(4): 73-76. ZHOU CH Q, CHEN X A, HE Y. Precision analysis of mechanical transmission in servo system [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2007(4): 73-76. (in Chinese)
- [87] KOYAMA T, WATANABE K, NAGAI K, *et al.*. A study on timing belt noise (how to reduce resonant noise) [J]. *Journal of Mechanical Design*, 1990, 112(3): 419-423.
- [88] WATANABE K, KOYAMA T, NAGAI K, *et al.*. A study on timing belt noise (theoretical analysis for forced transverse vibration of timing belt with parametric excitation) [J]. *Journal of Mechanical Design*, 1990, 112(3): 424-429.
- [89] KAGOTANI M, UEDA H. Transmission error in synchronous belt with resonance under installation tension[C]. *ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, ASME, 2011, 8: 871-880.
- [90] SUSUMU S, MINORU K. Influence of installation tension on transmission error due to resonance in a synchronous belt[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2014, 137(1): V002T07A006.
- [91] KAGOTANI M, UEDA H. Transmission error due to resonance in synchronous belt drive with eccentric pulley[C]. *ASME 2016 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, ASME, 2016: V008T10A004.
- [92] BASER O, KONUKSEVEN E I. Theoretical and experimental determination of capstan drive slip error[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2010, 45(6): 815-827.
- [93] KILIC E, DOLEN M, KOKU A B. Experimental evaluation of cable-drum systems as linear motion sensors[C]. *Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Mechatronics*, IEEE, 2011: 666-671.
- [94] LU Y F, FAN D P. Transmission backlash of precise cable drive system[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2013, 227(10): 2256-2267.
- [95] WERKMEISTER J, SLOCUM A. Theoretical and experimental determination of capstan drive stiffness[J]. *Precision Engineering*, 2007, 31(1): 55-67.
- [96] SNOW E R. *The Load/deflection Behavior of Pretensioned Cable-pulley Transmission Mechanisms*[D]. Massachusetts; Massachusetts Institute of Technology, 2007.
- [97] RAJH M, GLODEŽ S, FLAŠKER J, *et al.*. Design and analysis of an fMRI compatible haptic robot[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2011, 27(2): 267-275.
- [98] TOWNSEND W T, GUERTIN J A. Teleoperator slave-WAM design methodology [J]. *Industrial Robot*, 1999, 26(3): 167-177.
- [99] LU Y F, LIAO H B, HEI M, *et al.*. Development of a differential cable drive mechanism for acquiring tracking and pointing application[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2015, 229(17): 3191-3200.
- [100] 罗护. 基于精密绳传动的导引头机构若干问题研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008. LUO H. *Research on Cable-drive Seeker Mechanism*[D]. Changsha; National University of Defense Technology, 2008.
- [101] OLARU I M C, KRUT S, PIERROT F. Novel mechanical design of biped robot SHERPA using 2 DOF cable differential modular joints[C]. *Proceedings of 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, 2009: 4463-4468.

- [102] 张林安. 微创手术机器人柔性工具机构综合与主从控制策略研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
ZHANG L A. *Type Synthesis on Flexible Instrument of MIS Robot and the Study of Master-slave Control Strategy*[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese)
- [103] 鲁亚飞. 精密柔索传动机理与设计方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
LU Y F. *Study on the Principle and Design Method of the Precise Cable Drive*[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013. (in Chinese)
- [104] CHUA J Y. *Design of a Wearable Cobot*[D]. Florida: Florida State University, 2006.
- [105] RAHMATI Z, BEHZADIPOUR S. Analysis and design of a cable-driven mechanism for a spherical surgery robot[C]. *Proceedings of the 22nd Iranian Conference on Biomedical Engineering*, IEEE, 2015: 221-226.
- [106] Carl Stahl SAVA Industries, INC [Z/OL]. <http://www.savacable.com/>.
- [107] MAZUMDAR A, SPENCER S J, HOBART C, et al.. Synthetic fiber capstan drives for highly efficient, torque controlled, robotic applications[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2017, 2(2): 554-561.
- [108] SCHIELE A, LETIER P, VAN DER L R, et al.. Bowden cable actuator for force-feedback exoskeletons[C]. *Proceedings of 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, 2006: 3599-3604.
- [109] GREBENSTEIN M, CHALON M, HIRZINGER G, et al.. Antagonistically driven finger design for the anthropomorphic DLR hand arm system[C]. *Proceedings of the 10th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, IEEE, 2010: 609-616.
- [110] TOWNSEND W T. *The Effect of Transmission Design on Force-controlled Manipulator Performance*[D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1988.
- [111] PIETRO D M D. *Development of an Actively Compliant Underwater Manipulator*[D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1988.
- [112] QU J X, LI J H, ZHANG L N, et al.. Design of a novel force-reflecting haptic device for minimally invasive surgery robot[C]. *Proceedings of 2013 ICME International Conference on Complex Medical Engineering*, IEEE, 2013: 357-362.
- [113] SOFKA J. *New Generation of Gimbals Systems for Aerospace Applications*[D]. Binghamton: State University of New York at Binghamton, 2007.
- [114] MASSIE T H, SALISBURY J K. The PHAN-ToM haptic interface: a device for probing virtual objects[C]. *Proceedings of the ASME Winter annual Meeting, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, ASME, 1994: 295-300.
- [115] 韩海蛟. 导引头钢丝绳传动张紧装置研制及加速寿命试验模型研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
HAN H J. *Research on the Elastic Tensioning Device for Rope Drive in Seeker and Accelerated Life Test Model*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [116] NEAL J D. *Design and Control of a Cable-driven Sectorial Rotary Actuator for Open-loop Force Control*[D]. Virginia: Virginia Tech, 2015.

作者简介:



范大鹏(1964—),男,河南周口人,教授,博士生导师,1991年于华中科技大学获得博士学位,主要从事数控技术,嵌入式系统以及精密光电跟踪平台测控技术的研究。E-mail: fdp@nudt.edu.cn