DOI: 10.3901/JME.2018.03.055

主-被动复合变刚度柔性关节设计与分析*

史延雷 张小俊 张明路

(河北工业大学机械工程学院 天津 300130)

摘要: 为解决传统刚性机器人在特定领域应用受限问题,为其设计一款同时具有主、被动变刚度特性的复合式柔性关节。通过调查研究国内外变刚度柔性关节结构,对变刚度柔性关节按结构原理分为杠杆机构、凸轮机构两类,并基于凸轮机构原理,通过紧凑化设计实现了主-被动变刚度在同一关节的整合。建立该柔性关节数学模型,并对凸轮槽曲线进行了优化设计,得到了关节等效刚度随柔性变形量逐渐增大的凸轮槽曲线,在此基础上对柔性关节进行了刚度特性分析。对关节样机进行了静态刚度测量及动态抛掷试验,结果表明该变刚度柔性关节能够实现主、被动刚度调节功能,且在结构设计上适应现有机器人机构应用。

关键词: 机器人关节; 柔性关节; 变刚度

中图分类号: TP242

Design and Analysis of a Active-passive Variable Stiffness Flexible Joint

SHI Yanlei ZHANG Xiaojun ZHANG Minglu

(School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130)

Abstract: In order to solve the limitation of traditional rigid robot application in specific fields, a composite flexible joint with active and passive variable stiffness characteristics is designed. By studying the structure of variable stiffness flexible joints at home and abroad, the variable stiffness flexible joint is divided into two kinds of lever mechanism and cam mechanism according to the structure principle. And based on the principle of cam mechanism, the integration of Active-Passive variable stiffness in the same joint is realized by the compact design. The curve of cam groove is optimized through establishing mathematical model, and the property that the equivalent stiffness of joints increases gradually with the flexible deformation is finally realized. On this basis, the stiffness characteristics of flexible joints are analyzed. The static and dynamic stiffness measurement experiments of the joint prototype were carried out and the experimental results show that the variable stiffness flexible joint can realize the active and passive stiffness adjustment function and adapt to the existing robot mechanism in structural design.

Key words: robot joint; flexible joint; variable stiffness

0 前言

面对新任务,传统的刚性机器人设计已经达到了极限^[1-3]。在未知工况环境,刚性机器人经常容易碰撞到不可预见的障碍物而损坏;在人机交互领域,安全约束是机器人与人类互动的重要方面,为安全运转,传统刚性机器人应用一般运动缓慢且动力不足,实际应用困难^[4];在工业生产、柔性装配领域,定载荷组装、柔性对中等对相互作用力较为敏感的应用,高精度力矩传感器应用存在成本高、控制系统实时性要求高的缺点^[5]。

而在自然界中,肌肉-筋腱-骨骼所构成的动物运动组织,不仅能够实现快速大负载的奔跑、跳跃,同时也能保证在慢速运动过程中精准的力-位置输出特性,这种优越的生物力学特性不仅仅依托动物强大的神经网络、运动中枢,其肌肉-跟腱组织的柔顺特性是实现这一优越运动能力的保证^[6-7]。运动研究人员通过对中长跑运动员大量试验数据拟合发现,运动员腿部关节刚度与运动经济型存在高度正相关^[8],腿部整体刚度体现与步频步速也存在正相关特性,同时,运动员跳跃过程中,随着重心降低,腿部整体刚度呈逐渐增大趋势^[9]。进一步研究发现,动物通过多组肌肉单元配合伸缩,达到改变运动关节整体等效刚度的目的,以适应不同精度、速度、负载任务需求,对保护自身组织免收冲击力损伤有着重要的意义^[10-11]。

* 国家自然科学基金(61503119)和河北省优秀青年基金(YQ2014027)资助项目。20170114 收到初稿,20170614 收到修改稿

为实现机器人运动关节的在线刚度调整功能,国内外科研人员进行多种结构设计:德国宇航中心机器人及机电一体化协会,研制了一种基于凸轮机构的变刚度关节 VS-Joint^[12],利用关节旋转,带动凸轮滚子在底部凸轮盘内的位置变化,改变弹簧的压缩量,达到关节变刚度柔性输出;其第二代变刚度柔性关节(Floating spring joint, FSJ)^[13]并应用于新型 DLR 手臂系统中,该机构每个凹槽处由原来的一个凸轮滚子增加为两个,从而实现了低摩擦、低耗能,增大了承受负载的能力。意大利理工学院 TSAGARAKIS 等^[14]研制的变刚度驱动器 CompAct-VSA,该机构利用齿轮齿条传动改变凸轮形状杠杆臂的旋转轴心所在的位置,凸轮通过滚子与弹簧作用,从而改变机构的输出刚度,该机构体积较大,结构复杂,实际应用效果较差。哈尔滨工业大学李满天等^[15]研发的面向足式机器人的可调刚度柔性关节依据杠杆原理通过改变杠杆机构作用点位置的方式改变其刚度输出,巧妙利用多个圆盘相对转动实现了基于杠杆原理的关节刚度主动调节,结构设计适用于鲍登线驱动。

现有柔性关节机构均只实现了主动或被动一个方面变刚度输出,为满足新一代机器人应用需求,结合仿生学研究,本文设计了一种新型主-被动复合变刚度柔性关节(下文简称变刚度关节),通过紧凑化设计,使得变刚度关节同时具备了外界作用力下的被动变刚度及内部集成驱动实现主动调节刚度两种特性。复合式变刚度特性使得关节在面对不同环境、任务时适应能力更强,且在不同工作频率、不同大小冲击下,通过改变自身弹性特征,避免损坏、共振等不利因素对精度的影响。通过试制样机并进行试验测试,初步验证了该变刚度关节结构可行性。

1 变刚度机构构型分析

对国内外柔性关节进行综合分析,根据变刚度柔性关节依据的基本机构原理,将柔性关节分为两种类型:杠杆机构和凸轮机构,两种机构都能满足关节主动和被动变刚度,输出柔性力的要求。

1.1 杠杆机构

以杠杆机构为基础的变刚度柔性关节设计中,利用杠杆原理作用力随力臂变化而变化的特点,改变弹簧弹力输出达到改变柔性关节刚度的目的,如图1所示,关节受到外力 F 作用推动杠杆旋转,设弹簧压缩量为 Δh ,此时

$$F = \frac{x_1}{l} \cdot \Delta h \cdot k \quad (1)$$

由式(1),通过改变作用于杠杆上力 F 的力的作用点 l 或改变弹簧相对于杠杆的支撑位置 x_1 , 均可以达到改变杠杆输出力与旋转角度的关系,即改变系统整体输出刚度。此弹性元件可以设计为扭簧,作用点移动可采用丝杠带动滑块移动实现,意大利理工学院 Compact-VSA 以及哈工大机器人实验室柔性关节依此原理为基础研发设计。

图1 杠杆机构变刚度原理图

1.2 凸轮机构

以凸轮机构为基础的变刚度柔性关节设计中,利用凸轮-凸轮槽相对运动时凸轮位移随凸轮槽接触面曲率不断变化的特点实现改变柔性关节刚度。如图2所示,将柔性关节旋转运动等效为平面运动,凸轮与弹簧及相应结构部件为关节驱动输入,沿 x 轴正方向运动,凸轮盘为关节输出部件,受外力作用可沿 x 轴平动, Δx 即为柔性关节的柔性变形量,弹簧压缩凸轮,推动凸轮盘平动, F_1 即为柔性关节输出力,假设在原点位置弹簧初始压缩量为 Δl_0 , 在 x_1 位置,由于忽略凸轮直径,弹簧弹力 $(f(x_1) + \Delta l_0) \cdot k$ 乘以该为切线斜率即为柔性关节输出力

$$F_1 = \dot{f}(x_1) \cdot (f(x_1) + \Delta l_0) \cdot k \quad (2)$$

图2 凸轮机构变刚度原理图

对上式在任意位置对柔性变形量 x 求导,得到柔性关节等效刚度系数

$$k_s = k \cdot (\ddot{f}(x) \cdot f(x) + \dot{f}^2(x) + \Delta l_0 \cdot \ddot{f}(x)) \quad (3)$$

由式(3)可见,柔性关节等效刚度 k_s 与曲线 $f(x)$ 与 Δl_0 相关,两个参数分别对应了柔性关节的主、被动变刚度特性。

(1) Δl_0 不变,针对需求设计曲线 $f(x)$ 就可以合适的等效刚度 k_s 与柔性变形量 x 关系曲线,即被动变刚度特性。

(2) $f(x)$ 确定, 改变初始压缩量 Δl_0 , 柔性关节刚度能够随着 Δl_0 增大而增大, 达到改变柔性关节刚度特性目的, 即实现主动变刚度。

综合对比两种变刚度机构, 两种机构均能实现主动和被动变刚度功能, 但是杠杆机构实现变刚度需要通过改变有效作用杆长, 一般其构型体积较大, 不适于集成安装在关节部位, 降低了柔性关节的普适性; 而凸轮机构相对紧凑, 变刚度特性设计灵活(改变凸轮槽轮廓线即可实现不同变刚度特性), 配合相匹配的柔性驱动器即可组成变刚度柔性关节。本设计依据凸轮-凸轮盘机构原理设计。

2 主-被动变刚度关节机构设计

基于凸轮机构的被动变刚度柔性关节构型方案, 主要包含基于凸轮-凸轮槽的被动刚度调节部分(A), 安装有电动机-梯形丝杠的主动刚度调节、柔性驱动(B)两个部分, 如图 3 所示。

图3 主-被动变刚度关节结构图

被动变刚度的实现主要通过加工有相同轮廓线凸轮槽的关节输入、输出盘及两对凸轮组实现, 依靠安装在两凸轮组中间的弹性元件实现柔性输出; 主动变刚度的实现主要由柔性驱动电动机带动梯形丝杠转动, 调节弹簧预压缩量实现柔性关节等效刚度调整。机器人实际安装应用中, 输入盘与关节驱动器连接, 可直接与谐波减速器法兰输出连接, 关节输出盘与下肢固定, 当机器人运动过程中, 关节输出盘受到外力作用, 与输出盘发生相对转动(即关节柔性变形), 借助两组弹簧产生阻碍关节柔性变形的弹性力, 实现关节柔顺特性。

2.1 被动变刚度结构设计

如图 4 所示, 被动变刚度核心结构为凸轮-凸轮槽机构, 分为输入盘、输出盘和两个凸轮组组成。以关节轴心为原点、凸轮组平动方向为 y 轴建立直角坐标系, 考虑主动调刚度部分机构构型、输入输出盘相同轮廓线的凸轮槽约束, 凸轮组仅有沿 y 轴平动自由度且两凸轮组位移关系大小相等方向相

反; 输入盘与输出盘仅有绕轴线转动的自由度且受凸轮组-弹簧约束, 两盘转动角度大小相等方向相反。

图4 被动变刚度结构示意图

四足机器人在跑跳过程中, 下肢受到地面冲击力, 带动关节输出盘相对于关节驱动输入盘转动, 相同轮廓线的凸轮槽反向转动, 致使两凸轮组间距离缩短, 压缩凸轮组间安装的推力弹簧, 从而产生阻碍两盘相对转动的弹性阻力, 从而实现柔性输出。

利用不同凸轮槽轮廓线设计, 使角度 θ 的变化与弹簧长度变化 ΔL 呈现预期的数学关系, 使得柔性关节等效刚度随关节柔性变形量变化而改变, 实现被动变刚度的功能。

2.2 主动变刚度结构设计

基于凸轮机构的主动变刚度柔性关节, 通过梯形丝杠改变弹簧预压缩量从而达到改变关节等效刚度的目的。主动变刚度部分通过轴承与输入、输出盘连接, 其部件组成如图 5 所示: 一对凸轮安装在沿光轴平动的凸轮座上构成了凸轮组一、二, 凸轮组一上固定有调刚度直流电动机和梯形丝杠, 电动机转动带动丝杠调节调刚度座与凸轮组二之间的距离, 当调刚度电动机确定在某一位置时, 调刚度座与凸轮组一距离不变且随凸轮组一同步运动, 当柔性关节受到外界冲击, 输入、输出盘相对转动, 两凸轮组间距离减小, 压缩弹簧实现关节被动柔性, 关节在运行过程中, 通过调刚度电动机调节调刚度座与凸轮组一距离, 改变弹簧预压缩量达到主动变刚度的特性。

图5 主动变刚度结构示意图

主动变刚度部分以丝杠螺母传动为核心, 导程选择最小 2 mm, 以保证较高的轴向负载能力及线性运动精度; 弹性元件采用大同矩形弹簧外径 22 mm 系列, 自由长度 50 mm, 刚度系数选择范围 15 N/mm~150 N/mm, 可选范围较大可根据实际应用自由选配。

3 变刚度柔性关节参数设计分析

机器人柔性关节需要在保证安全可控的柔性力输出同时, 还需要保证满足应用场景的精度要去, 即变刚度柔性的设计原则为: 较小柔性变形角度时低刚度特性减小冲击, 较大柔性变形角度时高刚度实现大扭矩输出。

输入、输出盘凸轮槽轮廓曲线直接决定了该柔性关节的变刚度特性, 故针对轮廓线进行分析, 如图 6 所示, 以凸轮盘中心 o 为原点, 以弹簧压缩反方向为 y 轴正方向, 建立直角坐标系 oxy 。

图6 凸轮结构柔性关节输出力矩分析

设柔性变形前, 凸轮槽轮廓曲线上任一点 (x_0, y_0) 符合参数方程为

$$\begin{cases} x_0 = f_1(t) \\ y_0 = f_2(t) \end{cases} \quad (4)$$

柔性关节柔性变形角度即为两凸轮盘相对旋转 θ 角度, 根据几何对称关系, oxy 坐标系中, 两凸轮盘分别以反方向围绕原点 o 旋转 α 角度, 故此时关节柔性变形角度 $\theta = 2\alpha$ 。针对图中实线凸轮槽曲线, 通过坐标变换, (x_0, y_0) 绕原点 o 逆时针旋转 α 角度得到点 (x_1, y_1) 。

$$\begin{cases} x_1 = x_0 \cos(\alpha) - y_0 \sin(\alpha) \\ y_1 = x_0 \sin(\alpha) + y_0 \cos(\alpha) \\ \alpha = \theta/2 \end{cases} \quad (5)$$

oxy 坐标系第一象限中, 凸轮与凸轮槽接触点 (x_c, y_c) , 凸轮圆心坐标为 (x_1, y_1) , 且凸轮圆点到 y 轴距离始终为 $h/2$, 凸轮半径 r , 根据几何关系可得

$$\begin{cases} k_1 = dy_c/dx_c \\ x_t = x_c - r \cdot \sqrt{1/(1+k_1^2)} \\ y_t = y_c - r \cdot \sqrt{k_1^2/(1+k_1^2)} \\ x_t = h/2 \end{cases} \quad (6)$$

假设: 整个弹簧原长为 l_0 , 旋转前初始压缩量 Δl_0 , 弹簧刚度 k_0 , 弹簧弹力 F_t , 凸轮-凸轮槽接触力 F_1 , 接触力作用于凸轮盘的切向力 F_2 , 柔性关节输出力矩 M , 满足如下表达式

$$\begin{cases} F_t = k_0 \cdot (l_0 - 2y_t + \Delta l_0) \\ F_1 = F_t \cdot \sqrt{(1+k_1^2)/k_1^2} \\ F_2 = F_1 \cdot \sin(\arctan(y_c/x_c) - \arctan k_1) \\ M = 2 \cdot F_2 \cdot \sqrt{x_c^2/y_c^2} \end{cases} \quad (7)$$

将式(4)~(6)代入到式(7)中得到输出力矩 M 与柔性关节旋转角度 θ 及弹簧初始压缩量 Δl_0 之间函数关系, 其中 f_1, f_2, r, l_0, k_0 为可控量

$$M = f(\theta, \Delta l_0) \cdots [f_1, f_2, r, l_0, k_0] \quad (8)$$

由式(8)可知以下两点。

(1) 由 f_1, f_2 轮廓曲线决定的输出力矩 M 与柔性变形角度 θ 之间的非线性关系即为柔性关节的被动变刚度特性。

(2) 通过伺服电动机驱动丝杠改变弹簧初始压缩长度 Δl_0 , 达到改变输出力矩 M 大小的目的, 即为柔性关节的主动变刚度特性。

为达到理想的被动变刚度, 对凸轮盘曲线进行设计分析, 首先采用最简单的椭圆曲线作为轮廓曲线带入方程, 结合机械设计标准件选型, 取

$$\begin{cases} x_0 = 40 \cdot \cos t \\ y_0 = 65 \cdot \sin t \\ r = 8 \quad k_0 = 40 \quad h = 28 \end{cases} \quad (9)$$

取 $\Delta l = 0\text{mm}$ 、 $\Delta l = 5\text{mm}$ 、 $\Delta l = 10\text{mm}$, 通过 Matlab 进行分析计算, 绘制输出力矩 M 与柔性变形角度 θ 之间曲线关系如图 7 所示。

图7 柔性变形量-输出力矩关系曲线

通过图 7 可直观发现, 随着柔性变形角度 θ 的增大, 柔性关节输出力矩曲线后半段斜率即柔性关

节等效刚度开始减小。通过仿生学研究发现, 等效刚度逐渐增大的变刚度特性能够保证较好的柔性输出及运动稳定性^[16-17]。因而凸轮槽曲线进行改进, 增大椭圆曲线有效作用后半段曲率, 故采用分段曲线设计, 单个凸轮有效作用曲线设计为圆弧曲线, 经过多次参数核算优化, 取圆弧半径 $R=18\text{ mm}$, 第一象限圆心坐标(1, 18), 曲线如图 8 所示。

图 8 圆弧曲线凸轮槽示意图

曲线方程及结构参数设计

$$\begin{cases} x_0 = 1 + 18 \cos t \\ y_0 = 18 + 18 \sin t \\ r = 6.5 \quad k_0 = 60 \quad h = 15 \end{cases} \quad (10)$$

分别在 $\Delta l = 0\text{ mm}$ 、 $\Delta l = 2\text{ mm}$ 、 $\Delta l = 4\text{ mm}$ 情况下对柔性关节刚度特性进行分析得到图 9。

图 9 柔性变形量-输出力矩关系曲线

图 9 可见, 随着柔性变形角度 θ 的增大, 柔性关节输出力矩曲线斜率即柔性关节等效刚度呈逐渐增大趋势, 满足设计目标; 同时, 随着调整初始压缩量 Δl_0 , 关节等效刚度曲线呈总体增大趋势, 实现了主动变刚度特性。

4 试验

4.1 柔性关节样机及试验系统

为满足机器人对关节体积和质量的要求, 关节样机主要结构件采用 7075 铝合金加工, 关节其他结构部件选型如下: 凸轮采用工业标准凸轮滚针轴承随动器; 线性导向光轴采用高性能的不锈钢并高频淬火表面镀铬; 直线导向轴承采用无油衬套, 增大

径向载荷能力; 关节主动变刚度电动机采用 Maxon RE25 直流伺服电动机配 325:1 行星齿轮减速器; 梯形丝杠采用 30° 梯形丝杠, 直径 12 mm 螺距 2 mm。

建立试验系统测试变刚度柔性关节变刚度柔性输出特性, 关节静态变刚度试验驱动单元采用 Maxon RE30 搭配 546:1 行星轮减速器保证驱动力充足, 驱动电动机通过同步带带动 50:1 谐波减速器, 谐波减速器与柔性关节输入盘固定, 变刚度柔性关节输出盘连接一根直杆, 直杆前端与底板之间安装有压力传感器, 用于测量柔性关节输出力矩; 柔性关节输入盘与输出盘间安装有 OMRON 旋转编码器 E6A2-CWZ3E 分辨率 360 线每圈, 两个伺服电动机驱动器采用 CAN 总线通信控制, 使用 NI-USB6212 计数器及其模拟量采集功能对编码器转角信号及压力传感器电压信号进行采集, 上位机实时记录角度信息及其对应输出力矩。其试验环境如图 10 所示。

图 10 关节样机试验系统

4.2 柔性关节样机静态刚度测试

变刚度柔性关节静态等效刚度测量包括主动变刚度与被动变刚度两个方面, 试验设计为分别在 $\Delta l = 0\text{ mm}$ 、 $\Delta l = 2\text{ mm}$ 、 $\Delta l = 4\text{ mm}$ 三种情况下对电动机输出力矩与柔性变形量关系曲线进行测量。试验方法为: 关节做单向匀速缓慢转动以消除角加速度引起的测量误差, LabVIEW 采集旋转编码器及压力传感器数值, 按尺寸关系换算得到柔性关节柔性变形角度及输出力矩之间的关系曲线, 试验结果如图 11 所示。

图 11 实测柔性变形量-输出力矩关系曲线

曲线分别对应三种不同的弹簧初始压缩量下关节输出力矩曲线。对比图 11 与理论计算曲线图 9:

刚度曲线趋势基本相同,即柔性关节等效刚度呈逐渐变大趋势,试验结果证明了关节方案可行性。

对比试验结果与理论计算发现以下两点。

(1) 试验测得同一柔性变形角度下,输出力矩相比理论计算偏大,且随着柔性变形角度的增大,最大偏差能到 50%。通过对长时间工作后的试验样机拆解发现,由于凸轮与凸轮槽接触力及摩擦力造成凸轮槽产生轻微磨损变形。

(2) 试验发现在正向压缩、反向释放柔性关节两个过程中,关节等效刚度在释放过程中偏大。可能原因:直线轴承受到弹簧推力及凸轮-凸轮槽接触力作用,两力并不同轴线致使直线轴承受到较大倾覆力矩,致使直线轴承与直线导轨间摩擦力过大,影响到柔性关节等效刚度特性。

4.3 柔性关节样机抛掷试验

简单的重物抛掷试验能够很好的反应机器人旋转关节的运动特性,抛掷过程中连杆末端所达到的最大速度体现了旋转关节的功率输出能力;特别对于柔性关节,串联弹性所具备的能量放大作用^[18]能够优化关节驱动器的功率输出特性,使驱动器运行在力-速度曲线的最佳位置^[19]。抛掷试验关节驱动电动机更换更大功率的 FAULHABER-3272G024C 电动机,堵转扭矩可达 800 mN·m,伺服电动机不配备行星轮减速器而直接与谐波减速器同步带连接,保证电动机最大速度输出能力,关节样机连杆末端固定 400g 铁块作为抛掷负载。

假定连杆与地面平行时为零度,接近地面旋转为正方向。抛掷试验谐波减速器输出转角设计为:先由 0 加速旋转到 11°,停止 100 ms 后反方向加速旋转到 -24°,停止 140 ms 后返回水平位置, $\Delta l = 0\text{mm}$ 时试验得到的转角曲线及旋转角速度曲线如图 12 所示。

由于谐波减速器减速比较小且反向阻尼相对行星轮减速器较小,在转动惯量较大的情况下,电动机实际输出位置与设定曲线偏差较大,对试验结果影响不大。

在 50~100 ms 阶段,柔性关节第一次储存能量,当到达 150 ms 电动机输出停止时,柔性关节弹性势能保持而弹力方向变为反方向,电动机方向加速过程中,柔性关节第二次储存能量,在 200 ms 左右柔性关节弹性势能转换为动能,末端连杆在 220 ms 左右速度达到最大 0.93 °/ms,此时电动机最大速度为 0.58 °/ms,速度放大倍数近两倍,体现出柔性关节的能量放大作用。

由于刚度较小,电动机停止转动后,柔性关节仍处于震荡状态,不够稳定。利用柔性关节主动变

刚度,增大关节刚度 $\Delta l = 2\text{mm}$,同样进行抛掷试验,结果如图 13 所示。

图 12 $\Delta l = 0\text{mm}$ 柔性关节抛掷试验

图 13 $\Delta l = 2\text{mm}$ 柔性关节抛掷试验

柔性关节刚度增大后,震荡情况明显得到改观,大约在 600 ms 达到稳定;但此时末端最大速度降低

为0.81%/ms。因而,针对不同任务需求,通过主动改变关节刚度能够达到最佳的运动特性。

5 结论

针对传统刚性机器人在诸多应用领域受限问题,对机器人关节进行了仿生设计,为其添加仿生柔顺特性,设计一款可实现主动-被动复合变刚度特性的柔性旋转,针对特定应用通过设计凸轮槽曲线达到最佳的被动刚度特性,同时通过柔性关节自身集成的伺服驱动器,实现在线刚度主动调整功能,提高机器人多任务切换、运动适应特性。

本文对国内外现有变刚度柔性关节进行研究分析,提出了基于杠杆、凸轮原理的两种变刚度柔性关节分类,并依据凸轮-凸轮槽机构对柔性关节进行了仿生设计。柔性关节输入采用谐波减速器法兰接口,能够方便地串联到大部分现有机器人刚性关节。文中搭建了柔性关节刚度测试系统对主-被动变刚度柔性关节进行了综合测试,通过试验结果验证了该变刚度柔性关节的设计方案可行性。

后续工作将围绕可调刚度结构优化及尺度综合,减小摩擦及应力变形、老化;测试变刚度柔性关节动态特性,包括进一步分析被动变刚度曲线对机器人运动的实际意义以及相应应用领域试验测试。

参 考 文 献

- [1] BURGARD W, BROCK O, STACHNISS C. Safety evaluation of physical human-robot interaction via crash-testing[C]// Proceedings of Robotics: Science & Systems Iii, June, 2007, Georgia Institute of Technology, 2007, Atlanta, Georgia, Usa: MIT Press, 2007: 217-224.
- [2] MARKUS G, PATRICK V D S. Antagonism for a highly anthropomorphic hand-arm system[J]. Advanced Robotics, 2008, 22(1): 39-55.
- [3] KOGANEZAWA K, Mechanical stiffness control for antagonistically driven joints[C]// Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2005, Edmonton, Alberta, Canada. IEEE/RSJ, 2005: 2512-2519.
- [4] BICCHI A, TONIETTI G. Fast and soft-arm tactics - dealing with the safety-performance tradeoff in robot arms design and control[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2004, 6: 22-33.
- [5] 王巍, 贺平, 万良辉. 飞机柔性装配技术研究[J]. 机械设计与制造, 2006(11): 88-90.
WANG Wei, HE Ping, WAN Lianghui. Study of technology on aeroplane flexible assembly[J]. Machinery Design & Manufacture, 2006 (11): 88-90.
- [6] ALEXANDER R M. The maximum forces exerted by animals[J]. Journal of Experimental Biology, 1985, 115: 231-238.
- [7] ROBERTS T J, MARSH R L, WEYAND P G, et al. Muscular force in running turkeys: The economy of minimizing work[J]. Science, 1997, 275(5303): 1113-1115.
- [8] COLLINS S, RUINA A, TEDRAKE R, et al. Efficient bipedal robots based on passive-dynamic walkers[J]. Science, 2005, 307(5712): 1082-1085.
- [9] 毛勇, 王家威, 贾培发, 等. 双足被动步行研究综述[J]. 机器人, 2007, 29(3): 274-280.
MAO Yong, WANG Jiaxin, JIA Peifa, et al. Passive dynamic biped walking a survey [J]. Robot, 2007, 29(3): 274-280.
- [10] ANDERSON S, WISSE M, ATKESON C G, et al. Powered bipeds based on passive dynamic principles[C]// Proceedings of the 5th IEEE-RAS International Conference on Humanoid robots, 2005, Tsukuba, Japan. IEEE, 2005: 110-116.
- [11] DALLEAU G, BELLI A, BOURDIN M, et al. The spring-mass model and the energy cost of treadmill running[J]. European Journal of Applied Physiology, 1998, 77(3): 257-63.
- [12] WOLF S, HIRZINGER G. A new variable stiffness design: Matching requirements of the next robot generation[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA), 2008, Pasadena, California, USA. IEEE, 2008: 1741-1746.
- [13] WOLF S, EIBERGER O, HIRZINGER G. The DLR FSJ: Energy based design of a variable stiffness joint[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA), 2011, Shanghai, China. IEEE, 2011: 5082-5089.
- [14] JAFARI A, TSAGARAKIS N G, VANDERBORGHT B, et al. A novel actuator with adjustable stiffness (AwAS)[C]// Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010, Taipei, Taiwan, China. IEEE, 2010: 4201-4206.
- [15] 尹鹏, 李满天, 郭伟, 等. 面向足式机器人的新型可调刚度柔性关节的设计及性能测试[J]. 机器人, 2014, 36(6): 676-682.
YIN Peng, LI Mantian, GUO Wei, et al. Design and testing of a novel joint with adjustable stiffness for legged robot[J]. Robot, 2014, 3: 322-329.
- [16] 范秦海, 周越. 肌肉弹性力量对运动员跳跃能力的影响[C]// 全国运动生物力学学术交流大会, 2002, 石家庄, 2002: 154-156.

- FAN Qin Hai, ZHOU Yue. Effects of muscle elastic strength on jumping ability of athletes[C]// Proceedings of National Conference on Sports Biomechanics, 2002, Shijiazhuang. 2002: 154-156.
- [17] 魏勇, 刘宇. 运动中下肢刚度变化及其机制研究进展[J]. 中国运动医学杂志, 2009, 28(2): 222-225.
- WEI Yong, LIU Yu. Research progress on changes and mechanism of lower limb stiffness in exercise[J]. Chinese Journal of Sports Medicine, 2009, 28(2): 222-225.
- [18] 马洪文, 赵朋, 王立权, 等. 刚度和等效质量对 SEA 能量放大特性的影响[J]. 机器人, 2012, 34(3): 275-281.
- MA Hongwen, ZHAO Peng, WANG Liquan, et al. Series elastic actuator mechanical model and stability analysis[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2012, 34(3): 275-281.
- [19] KUBO K, KAWAKAMI Y, FUKUNAGA T. Influence of elastic properties of tendon structures on jump performance in humans[J]. Journal of Applied Physiology, 1999, 87: 2090-2096.
-
- 作者简介: 史延雷, 男, 1988 年出生, 博士研究生。主要研究方向为柔性关节、足式机器人。
E-mail: shiyanlei2014@126.com
- 张小俊(通信作者), 男, 1980 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为足式机器人、特种机器人。
E-mail: zxjun_80@163.com
- 张明路, 男, 1964 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为特种机器人。
E-mail: zhangminglu@hebut.edu.cn