刚柔耦合臂手遥操作系统的设计与实验

目录

[致谢 2](#_Toc144846709)

[摘要 2](#_Toc144846710)

[ABSTRACT 2](#_Toc144846711)

[1 绪论 2](#_Toc144846712)

[2 刚柔耦合臂手遥操作系统主从端结构设计 2](#_Toc144846713)

[2.1. 主端上肢外骨骼结构设计 2](#_Toc144846714)

[2.2. 从端刚柔耦合臂手结构设计 2](#_Toc144846715)

[3 遥操作主控端的运动控制设计 2](#_Toc144846716)

[3.1. 主控端上肢外骨骼运动学分析与仿真 2](#_Toc144846717)

[3.1.1. 运动学建模 2](#_Toc144846718)

[3.1.2. 工作空间分析 2](#_Toc144846719)

[3.1.3. 运动学仿真 2](#_Toc144846720)

[3.2. 主控端上肢外骨骼动力学建模与仿真 2](#_Toc144846721)

[3.2.1. 动力学建模 2](#_Toc144846722)

[3.2.2. 动力学参数辨识流程设计 2](#_Toc144846723)

[3.2.3. 动力学仿真 3](#_Toc144846724)

[3.3. 主控端上肢外骨骼随动控制研究 3](#_Toc144846725)

[4 遥操作的工作空间映射算法 3](#_Toc144846726)

[5 刚柔耦合臂手遥操作的实验分析与应用 3](#_Toc144846727)

[5.1. 遥操作的实验平台搭建 3](#_Toc144846728)

[5.2. 参数辨识实验 3](#_Toc144846729)

[5.3. 外骨骼随动控制实验 3](#_Toc144846730)

[5.4. 主从遥操作控制实验 3](#_Toc144846731)

[6 总结与展望 3](#_Toc144846732)

# 致谢

# 摘要

# ABSTRACT

# 绪论

# 刚柔耦合臂手遥操作系统主从端结构设计

## 主端上肢外骨骼结构设计

## 从端刚柔耦合臂手结构设计

# 遥操作主控端的运动控制设计

## 主控端上肢外骨骼运动学分析与仿真

### 运动学建模

本文取本研究者（正常成年男性）的体型数据作为外骨骼设计参数标准。人体身高173cm，体重66kg，外骨骼MDH参数表如下表所示。

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |
| 1 | 0° | 0 |  | 0 | 0mm~150mm |
| 2 | -90° | 0 | -188.76 |  | -30°~90° |
| 3 | 90° | 0 | -81.24 |  | -120°~30° |
| 4 | 80° | 0 | 0 |  | -120°~60° |
| 5 | 0° | 252.5 | -12.15 |  | -30°~120° |
| 6 | 90° | 0 | 112 |  | -90°~90° |

外骨骼运动限制条件

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 运动范围 | 最大速度（） | 最大加速度（） | 最大力矩（） |
| 1 | 0mm~150mm | 50 | 100 | 45 |
| 2 | -30°~90° | 30 | 60 | 45 |
| 3 | -120°~30° | 45 | 90 | 11.5 |
| 4 | -120°~60° | 30 | 60 | 45 |
| 5 | -30°~120° | 90 | 180 | 11.5 |
| 6 | -90°~90° | 60 | 120 | 2.5 |

### 工作空间分析

### 运动学仿真

## 主控端上肢外骨骼动力学建模与仿真

### 动力学建模

### 动力学建模及其线性化

本文利用牛顿欧拉法递推外骨骼机械臂动力学，通过运动学可解算得到各连杆质心速度信息，并利用牛顿欧拉公式计算得到各连杆质心处的惯性力和力矩。需要注意的是，本文外骨骼第一关节为移动关节，其余关节为转动关节。

设定初始条件为，，，，。

对每个连杆应用牛顿欧拉方程，从连杆1到连杆6向外递推计算连杆的速度和加速度。方程如下：

从连杆6到连杆1迭代计算连杆间的相互作用力和力矩以及关节驱动力矩，方程如下：

当第i+1个关节是移动关节时，牛顿欧拉法递推如下，向外递推计算连杆的速度和加速度：

向内迭代计算连杆间的相互作用力和力矩以及关节驱动力矩：

对摩擦力的建模，这里采用库仑摩擦力和粘滞摩擦力的结合。摩擦力模型如下式所示：

引入关节的摩擦力与伺服电动机的惯量，对外骨骼机械臂动力学进行修正得到下式：

由于上述动力学中的转动惯量是相对于连杆质心的，为方便后续对动力学方程进行线性化，这里利用平行轴将连杆相对于其质心的转动惯量转化为相对于关节轴的转动惯量。

平行轴定理如下式所示：

其中为单位矩阵。

令，将3.5式和3.6式代入可得：

根据矢量连续叉乘性质和平行轴原理，上式可简化为：

因此，3.7式可以写为：

由上式可知，将连杆的质心惯量描述转换到连杆惯量描述后可以消掉的二次项，简化动力学方程，便于后续进行线性化操作。

此时，可以定义需要辨识的动力学参数为：

其中，，即

在利用最小二乘法等算法进行参数辨识时，要求被辨识量是已知量的线性函数。

**动力学方程线性化：**

外骨骼机械臂动力学方程可以表示成状态空间方程形式

其中，表示关节坐标系下的连杆与关节电机的惯量矩阵；表示的离心力与科氏力的耦合矩阵，随着位置和速度改变；表示的重力矢量； 表示的关节摩擦力向量，只受关节速度影响，其中与都会受到关节位置影响。本文在参数辨识实验中，不添加任何外力和负载，即，。

若每个连杆的惯性张量相对于其附属坐标系表示，那么就可将其与动力学参数线性表示。上面已将连杆的质心惯量描述转换到连杆惯量描述，因此动力学方程可以转换为如下线性形式：

其中，为回归矩阵，表示外骨骼机械臂的运动状态，与动力学参数无关。为动力学标准参数集，，向量大小为78，即本外骨骼机械臂共有78个需要辨识的未知动力学参数。但是并非所有动力学参数对关节力矩都会产生影响，矩阵的某些列可能存在线性相关，这会导致回归矩阵不满秩，因此需要进行参数独立性处理，将回归矩阵满秩化。最小惯性参数集的数量是由矩阵的列向量的线性相关性决定，其列秩即为最小惯性参数集的数量。重组后的回归矩阵的列数和参数向量将大幅度减少，此时，

其中，是满秩化后的回归矩阵，是对应的最小参数集。

本文采用QR分解来获得最小参数集。

将分为列满秩和其他两部分，对应和。即：

由于可以由线性表示，即，因此线性化形式的动力学方程可表示为：

那么：即为最小参数集。本文所设计的外骨骼最小参数集为48。

### 动力学参数辨识流程设计

本文所采用的动力学参数辨识方法是将外骨骼机械臂实际运动的动力学特征作为其惯性参数的线性化函数进行求解，需要采集外骨骼机械臂按照激励轨迹运行过程中的动力学信息，包括外骨骼机械臂各关节角度、角速度、角加速度等运动参数和关节扭矩等力矩参数。然后通过最小二乘法进行动力学参数辨识。总体辨识流程如下：

1. 使用牛顿欧拉法建立外骨骼机械臂动力学并将其线性化。
2. 在线性化动力学方程的基础上得到最小参数集。
3. 选择合适的激励轨迹并进行优化。
4. 外骨骼机械臂运行激励轨迹的同时采集运动信息和力矩信息并进行滤波处理。
5. 利用最小二乘法进行动力学参数辨识。

**基于最小二乘估计的动力学参数辨识：**求出一组待定最小参数集的值，使得辨识模型计算得到的力矩与采集到的真实力矩之间的误差平方和最小。此时的最小参数集就是所需要的辨识结果。

即：

其中，为实验所测得的实际关节扭矩。

要使得误差平方和最小，需满足误差平方和函数的一阶偏导数为0，此时应满足下式：

根据线性化动力学方程，两边同时左乘，即：

所以，

将外骨骼机械臂按照激励轨迹进行运动，同时采集各关节角度、角速度、角加速度、力矩等信息。将所有采集到的数据合并到一起构成用于最小二乘法解算的回归矩阵：

其中为时间点采集到的外骨骼各关节的力矩信息，为时间点采集到的运动参数带入到的满秩回归矩阵。为所有关节激励轨迹参数向量，其中，。

**激励轨迹的设计及优化：**

激励轨迹的设计直接影响到动力学参数辨识的准确性，一个理想的激励轨迹能够最大程度激发出外骨骼机械臂的各项动力学性能。本文所选择激励轨迹是傅里叶级数轨迹，它的周期性能够保证轨迹运行过程中数据能够被多次采样，便于后续均值滤波处理，提高采集的数据准确性。且数据处理简便、计算量小，对噪声不敏感。

基于傅里叶级数的激励轨迹表示如下：

其中，、、为待优化的参数，每个关节有个。为激励轨迹基频，本文取，即关节运动频率，关节运动周期。取五次傅里叶轨迹，即。

对于激励轨迹的优化问题可以归纳为选择合适的评价标准来确定激励轨迹中的参数，使用最小二乘法来进行参数辨识，本质上是求解线性化的动力学方程，因此

### 动力学仿真

## 主控端上肢外骨骼随动控制研究

使外骨骼机械臂能够克服自身的重力和摩擦力，顺应外力作用运动。

1）基于位置控制的零力控制：

可以借助机械臂末端力矩传感器来获得机械臂末端受到的外力，或者使用关节扭矩传感器测量关节力，然后通过雅可比矩阵计算出机械臂末端所受外力。

或者利用差值分析，通过采集机器人运动状态下的电流值将其转换为力矩值并与机器人动力学模型计算的力矩值进行差值计算得到外力的估测。

把外力的大小和方向转化为机械臂关节速度，对速度进行积分可以计算得到关节位置的增量，然后将计算得到的关节信息与速度信息通过控制器命令传递给机械臂控制器，从而控制机械臂跟随操作者施加的外力。

优点：

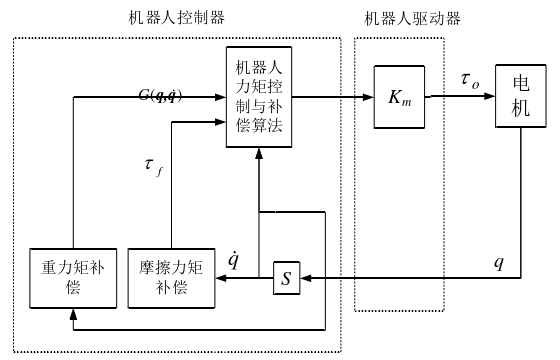
缺点：需要额外的末端六维力矩传感器，或者各关节电机扭矩传感器。

2）**基于力矩控制的零力控制**：

需要机械臂各关节电机工作在力矩模式下，通过关节电机输出各关节补偿力矩，抵消机械臂自身的重力和摩擦力。

优点：不需要额外的力矩传感器，节约系统成本。辨识和补偿的对象只有重力矩和摩擦力，计算量大大减少，系统复杂性较低；辨识和补偿的对象只有重力矩和摩擦力，计算量大大减少，系统复杂性较低；

缺点：只对机器人的重力和摩擦力进行补偿，操作者再拖动时需要克服机器人自身的惯性力、科氏力、离心力等非线性力。



基于力的阻抗控制方法：通过位置偏差求得需要补偿的接触力。通过力控模式控制电机。

基于位置的阻抗控制方法：通过接触力求得需要补偿的位置偏差。通过位置模式控制电机。

本文所设计的外骨骼机械臂是一种较轻巧灵活的机械臂，无较大的惯性力，因此本文选用基于位置的阻抗控制方法。

# 遥操作的工作空间映射算法

# 刚柔耦合臂手遥操作的实验分析与应用

## 遥操作的实验平台搭建

## 参数辨识实验

## 外骨骼随动控制实验

## 主从遥操作控制实验

# 总结与展望