

基于并联构型的3自由度 肩关节运动学设计与分析

姓 名	周资崴
指导老师	陈文斌
专 业	机械工程

2020年5月19日

目录

CONTENTS

1 绪论

2 机构原型与数学建模

3 运动学和运动传递性能分析

4 肩关节的结构参数设计

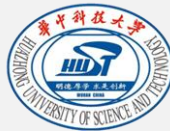
5 肩关节的建模与仿真分析

6 总结

1

绪论

课题背景和意义



1

绪论

• 课题来源

- 国家重点研发计划课题，人体臂手操作特性解析与模块化上肢假肢设计，课题编号：2018YFB1307201

• 选题背景

- 上肢截肢患者迫切需要肩关节假肢帮助其重建手臂运动功能
- 国内外大多数肩关节的研究和设计都采用串联结构
- 人体关节的运动是由平行的肌肉群驱动的
- 并联机构更符合人体的客观现实

• 选题意义

- 并联结构设计的肩关节更贴近人体的实际肩关节，更适合上肢假体的整体设计，具有重要的创新意义

国内外研究现状

1

绪论

两类肩关节构型

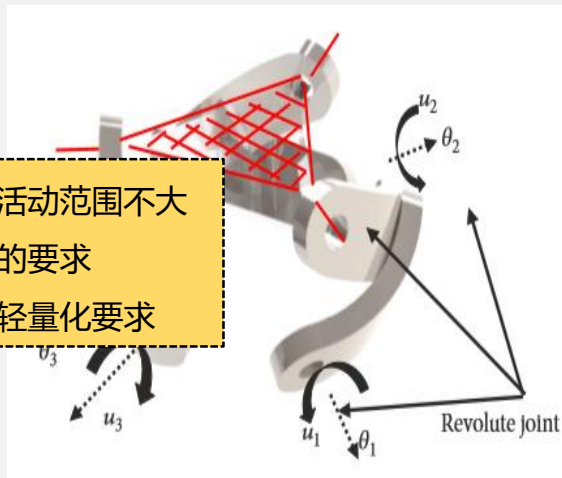
串联式肩关节



- 关节自由度不耦合，工作空间大，控制简单
- 下级驱动器为上级负载，驱动效率低
- 结构不够紧凑，刚度不够，尺寸大

- 工作空间小 → 肩关节的活动范围不大
- 刚度好 → 上肢假肢的要求
- 尺寸重量轻 → 肩关节的轻量化要求

并联式肩关节



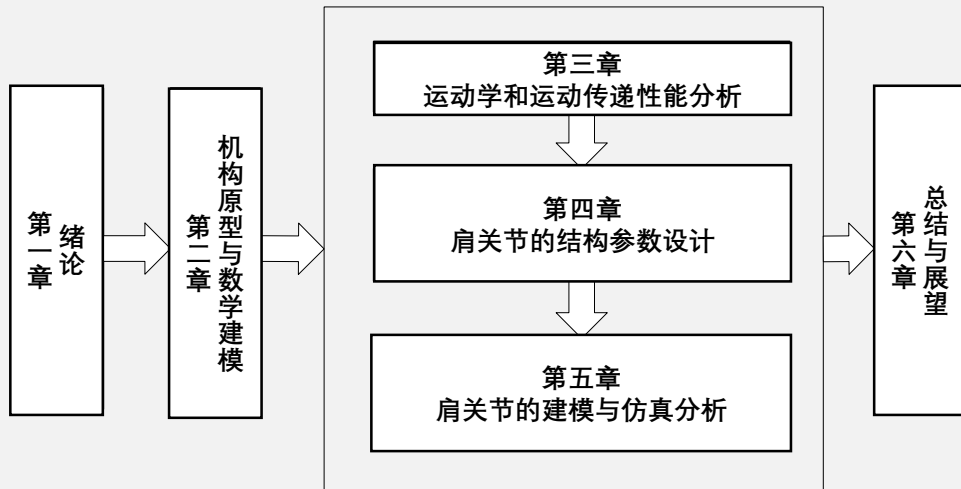
- 效率高，三个自由度的驱动电机可以安装在静平台上，自身不会成为其他电机的负载
- 动平台由三条支链共同支撑，所以有较好的刚度
- 灵巧度较低，工作空间较小

论文主要工作与结构

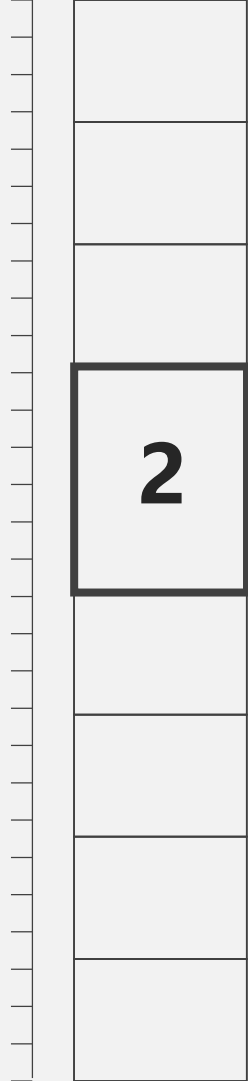
1

• 主要工作:

- 推导3DOF球面并联机构的运动学分析和动力学分析
- 进行3DOF球面并联机构的参数优化
- 完成肩关节的三维建模和一系列的仿真分析
- 进行有限元分析, 对三种不同的位姿分析机构应力



绪论

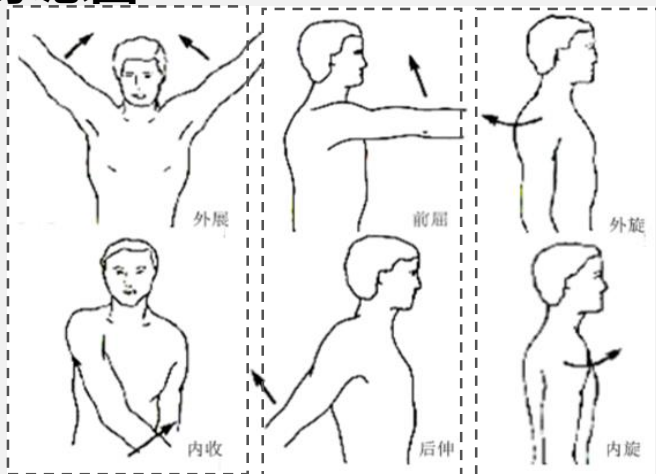


机构原型与数学建模

人体肩关节运动分析

2

• 肩关节的运动示意图:



• 设计运动范围:

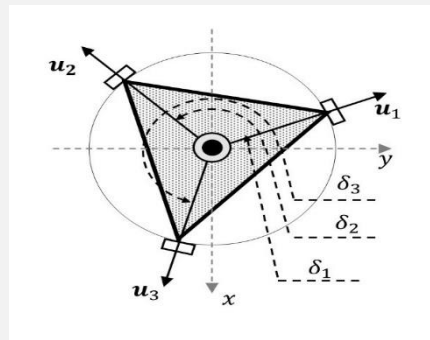
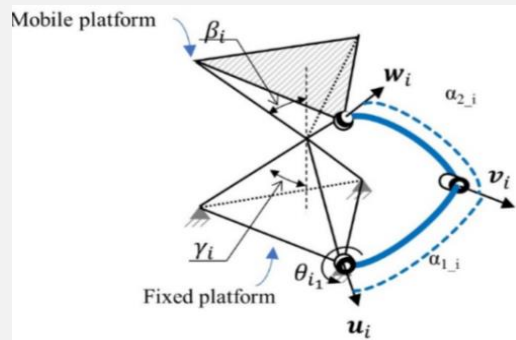
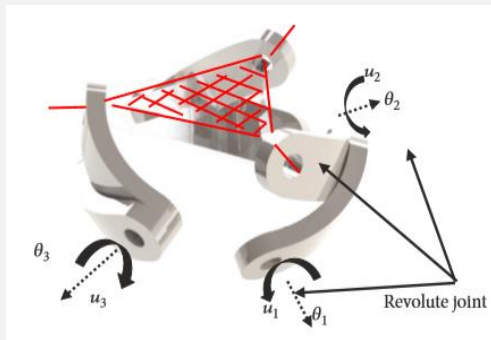
运动	取值范围($^{\circ}$)
内收—外展	$[-10,90]$
前屈—后伸	$[-90,20]$
外旋—内旋	$[-40,50]$

机构原型与数学模型

2

机构原型与数学建模

• 三自由度球面并联机构 (3RRR)



总共具有11个不同的结构参数

$\gamma, \beta, \alpha_{1_1}, \alpha_{1_2}, \alpha_{1_3}, \alpha_{2_1}, \alpha_{2_2}, \alpha_{2_3}, \delta_1, \delta_2, \delta_3$

• 存在公共约束的机构自由度分析

$$M = d(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i$$

$$= (6 - 3) * (8 - 9 - 1) + 9 = 3$$

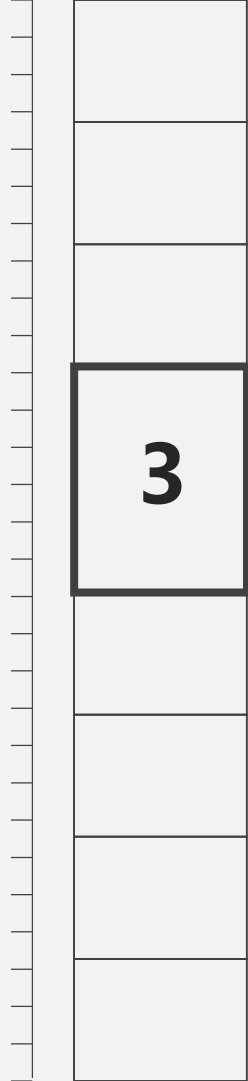
M——机构的自由度数

n——机构中构件的数目

g——机构中的运动副数目

f_i ——第i个运动副的自由度数

d——机构的阶数



运动学和运动传递性能分析

运动学反解推导

3

• 运动学反解

已知动平台的姿态变化角 α, β, γ , 求解三个电机输入角度 θ_i ($i = 1, 2, 3$)

• 结果

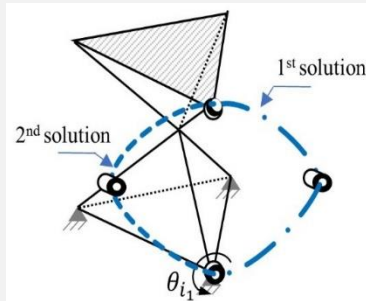
$$A \tan(\theta_i)^2 + B \tan(\theta_i) + C = 0$$

其中A, B, C是11个连杆参数和姿态变化角 α, β, γ 的函数

• 分析

一元二次方程。对于每条支链的输入角度 θ_i , 存在两个解。因此, 对于该机械手工作空间中的每个位置, 都可以得到八种可能的组合解 $2 \times 2 \times 2$ 。

但是不同的解对应支链不同的构型, 而某些解对应的支链间可能会发生干涉, 所以当机构构型唯一取定之后, 运动学反解的结果也是唯一的。



运动学正解推导

3

- **运动学正解**

已知三个电机输入角度 θ_i ($i = 1, 2, 3$) 求解动平台的姿态变化角 α, β, γ

- **结果**

$$\sum_{i=0}^8 K_i (\tan \phi)^i = 0$$

其中 K_i 是三个输入主连杆的角度 θ_i ($i = 1, 2, 3$) 的函数

- **分析**

关于 ϕ 的一元八次方程，该通过求解方程得到 ϕ 值，进而可以求得动平台姿态变化角 α, β, γ

雅可比矩阵推导

- **速度雅可比矩阵的条件数**

衡量输入角速度和输出角速度之间传递精度（灵巧性）

$$k(J) = \|-K_q^{-1}J_x\| \|-J_x^{-1}K_q\|$$

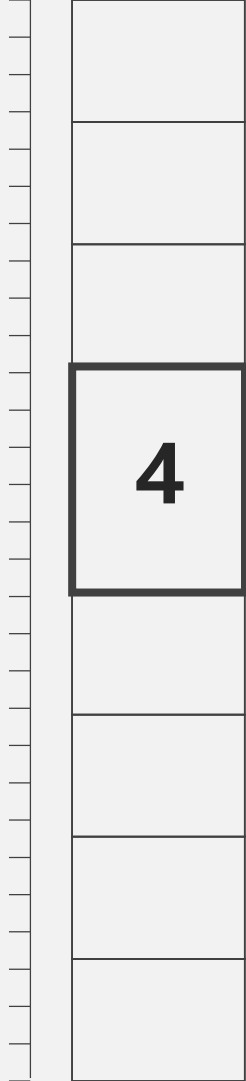
$k(J)$ 取值范围是 $[1, +\infty]$ ，值越小，灵巧性越高。

- **力雅可比矩阵的条件数**

衡量输入力矩和输出力矩之间传递精度

$$k(G) = -K_q^{-1}J_x$$

$k(G)$ 取值范围是 $[1, +\infty]$ ，值越小，传递精度越高。



肩关节的结构参数设计

优化目标函数的确定

4

- **三个优化目标**

- 第一个目标是工作空间尽可能与人体肩关节活动范围接近
- 第二个目标是工作空间各处的灵巧性尽可能高
- 第三个目标是三个输入轴的扭矩尽可能小，较小的扭矩有利于降低驱动电机的功率需求，进而降低肩关节整体重量和尺寸

- **11个优化结构参数**

$$\gamma, \beta, \alpha_{1_1}, \alpha_{1_2}, \alpha_{1_3}, \alpha_{2_1}, \alpha_{2_2}, \alpha_{2_3}, \delta_1, \delta_2, \delta_3$$

优化目标函数的确定

4

➤ 第一个目标是工作空间尽可能与人体肩关节活动范围接近

1. 对人体肩关节活动范围按每 10° 进行离散化，共 $12 \times 11 \times 10 = 1320$ 个点
2. 对于每个离散化后的点判断 $A \tan(\theta_i)^2 + B \tan(\theta_i) + C = 0$ 是否有解
3. 统计一元二次方程有解的点的个数（在工作空间内的点的个数）记为 g_1 ，选取合适的结构参数值使得 g_1 最大

• 设计运动范围：

运动↻	取值范围($^\circ$)↻
内收—外展↻	$[-10, 90]$ ↻
前屈—后伸↻	$[-90, 20]$ ↻
外旋—内旋↻	$[-40, 50]$ ↻

优化目标函数的确定

4

➤ 第二个目标是工作空间各处的灵巧性尽可能高

1. 对人体肩关节活动范围按每 10° 进行离散化，共 $12 \times 11 \times 10 = 1320$ 个点
2. 对于每个离散化后的点求速度雅可比条件数 $k(J) = \| -K_q^{-1} J_x \| \| -J_x^{-1} K_q \|$ 的值，k值处于 $[1, 10]$ 区间内的比例作为灵巧性评价指标
3. 统计k值处于 $[1, 10]$ 区间内的比例作为灵巧性评价指标 g_2 ，选取合适的结构参数值使得 g_2 最大

• 设计运动范围:

运动↺	取值范围($^\circ$)↺
内收—外展↺	$[-10, 90]$ ↺
前屈—后伸↺	$[-90, 20]$ ↺
外旋—内旋↺	$[-40, 50]$ ↺

优化目标函数的确定

4

➤ 第三个目标是三个输入轴的扭矩尽可能小

1. 对人体肩关节活动范围按每 10° 进行离散化，共 $12 \times 11 \times 10 = 1320$ 个点
2. 对于每个离散化后的点求个离散化后的点利用力雅可比矩阵 $\tau = J^T F$ 求 τ 的值
其中末端力 F 是由考虑手臂重量(15N)，手重量(5N)和所承受的负载重量(5N)相应的力臂而产生的扭矩
3. 选取合适的结构参数值使得 $g_3 = \max(\tau)$ 最小

• 设计运动范围：

运动↻	取值范围($^\circ$)↻
内收—外展↻	$[-10, 90]$ ↻
前屈—后伸↻	$[-90, 20]$ ↻
外旋—内旋↻	$[-40, 50]$ ↻

优化结果

4

• 多目标优化方法：遗传算法

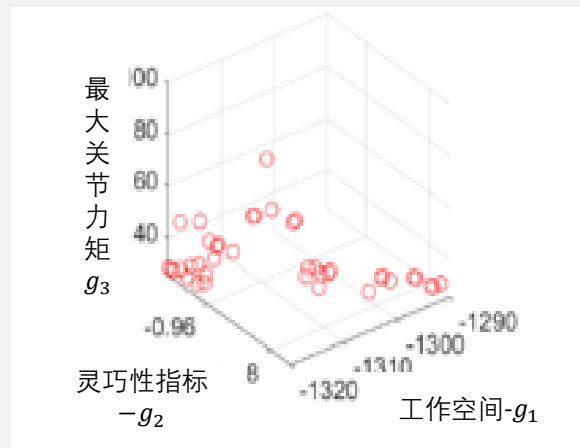
选取合适的11个参数值

$$\gamma, \beta, \alpha_{1_1}, \alpha_{1_2}, \alpha_{1_3}, \alpha_{2_1}, \alpha_{2_2}, \alpha_{2_3}, \delta_1, \delta_2, \delta_3$$

使得

g_1 最大, g_2 最大, g_3 最小

• 工作空间、灵巧度与最大关节力矩三者之间的关系



• 选取 $g_1=1320$, $g_2=0.99$, $g_3=4.5\text{N}\cdot\text{m}$ 的一组结构参数值

γ	β	α_{1_1}	α_{1_2}	α_{1_3}	α_{2_1}
73.97034	74.02084	65.55052	89.83113	81.71658	66.60625
α_{2_2}	α_{2_3}	δ_1	δ_2	δ_3	
83.08663	81.55116	68.03214	186.1973	295.7946	



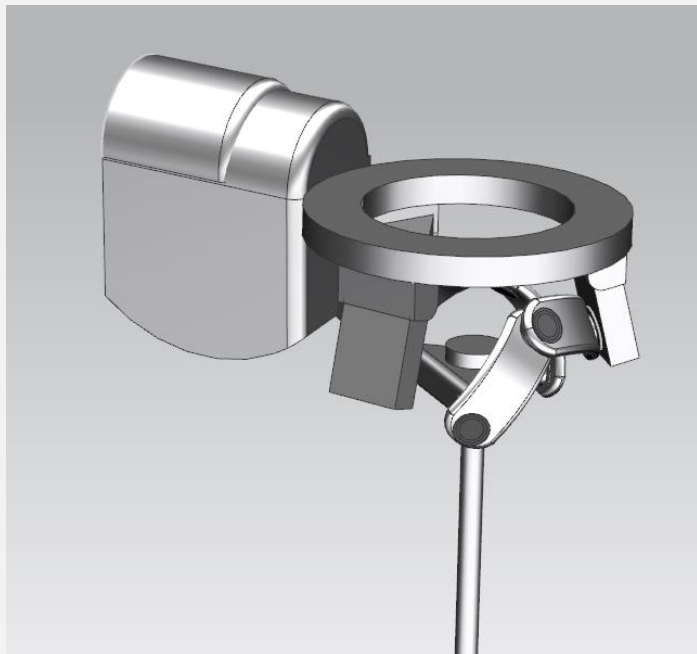
5

肩关节的建模仿真与分析

建模结果

5

肩关节的建模仿真与分析



肩关节装配结果图



整体设计效果图

仿真过程

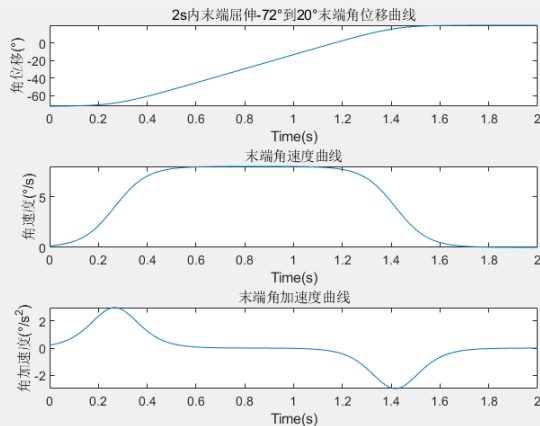
5

• 2s内完成三种典型运动的末端轨迹规划

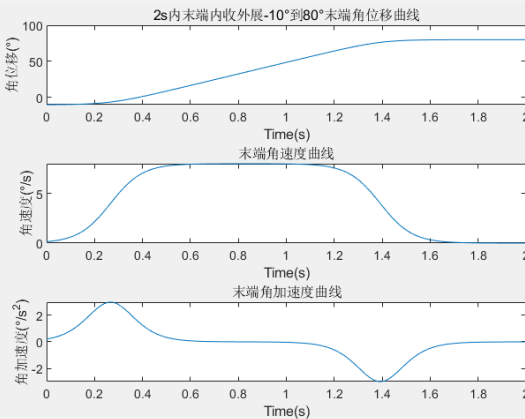
保证2s时间内运动过程平滑，轨迹高阶连续，符合人体实际运动规律，采用S型位移曲线轨迹，表达式为

$$S(t) = \frac{S_d}{2} + \frac{v_e^2}{4a_e} \ln \left[\frac{\cosh 2a_e t / v_e - \delta}{\cosh(2a_e t / v_e - \delta - 2S_d a_e / v_e^2)} \right]$$

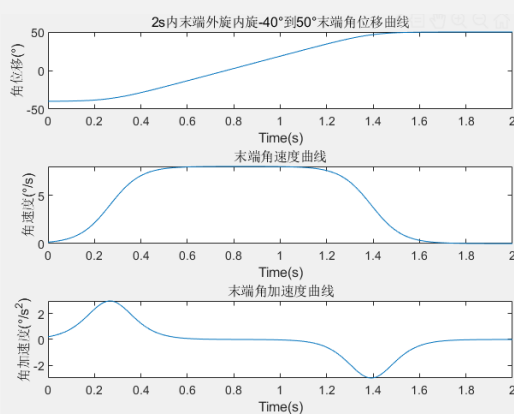
屈伸运动的末端轨迹曲线



内收外展运动的末端轨迹曲线



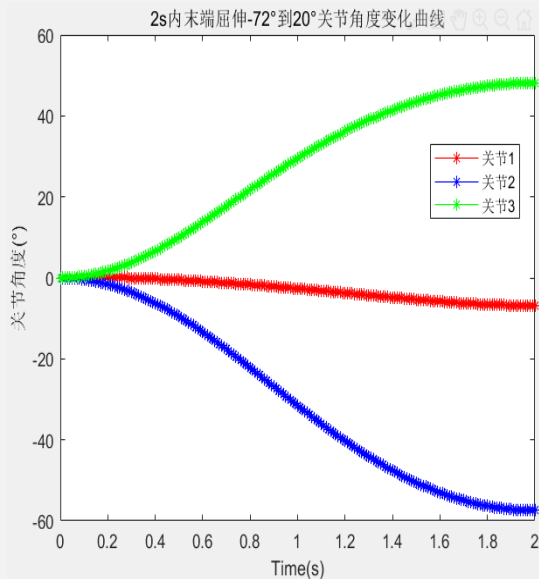
外旋内旋运动的末端轨迹曲线



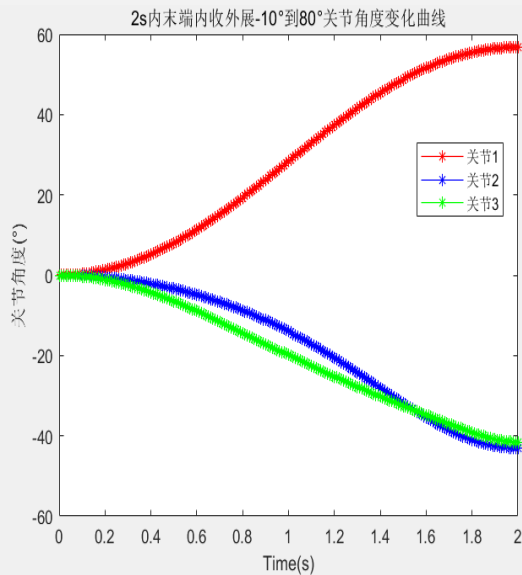
• 关节反解

对设计的末端轨迹采样，然后对每个采样点进行运动学反解，求得2s内三种典型运动的各关节角度随时间变化曲线

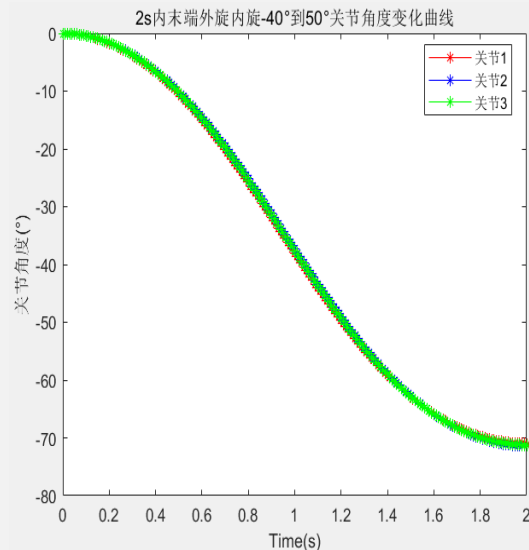
屈伸运动的关节角度变化



内收外展运动的关节角度变化



外旋内旋运动的关节角度变化



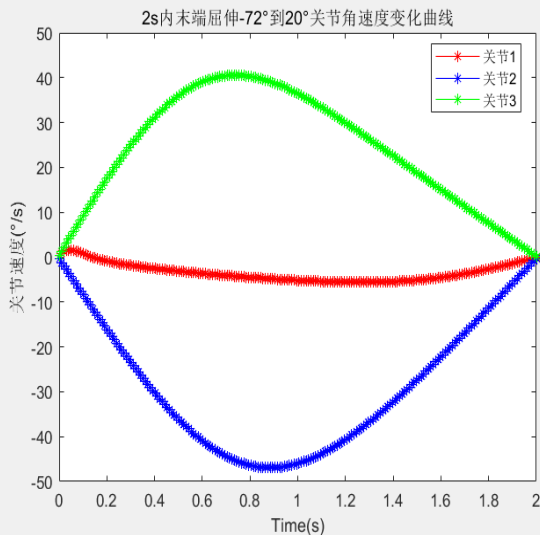
仿真过程

5

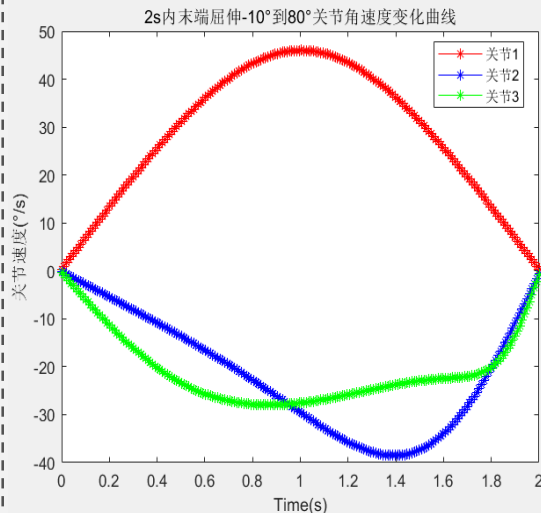
• 关节角速度曲线

根据2s内完成三种典型运动的各关节角度随时间变化曲线，对时间求导得到关节角速度随时间变化曲线

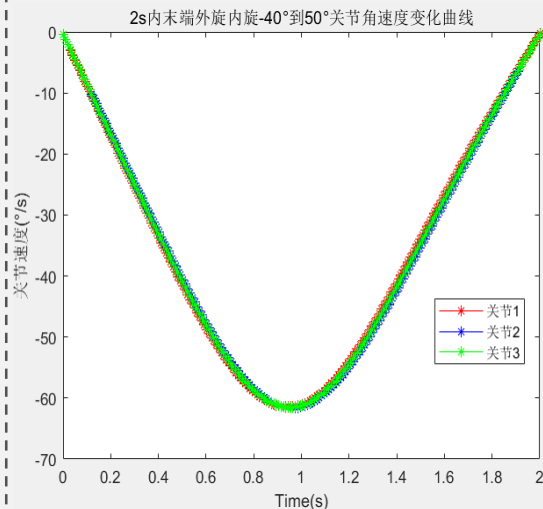
屈伸运动的关节角速度变化



内收外展运动的关节角速度变化



外旋内旋运动的关节角速度变化



仿真过程

5

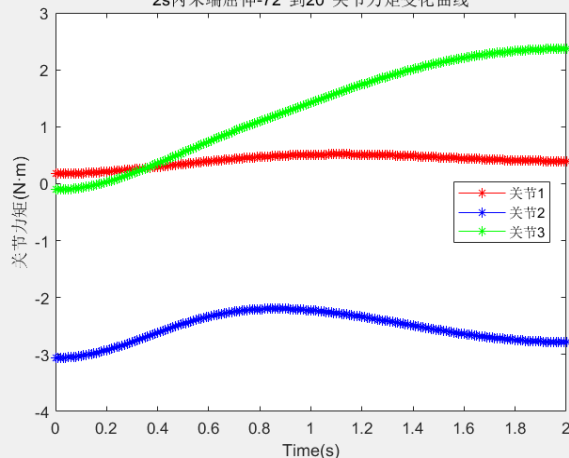
• 关节力矩曲线

肩关节末端受力 F 是由考虑手臂重量(15N), 手重量(5N)和所承受的负载重量(5N)并且考虑其相应的力臂而产生的扭矩

通过力雅可比矩阵可以求得肩关节末端在2s时间内进行三种典型运动的关节力矩随时间的变化曲线

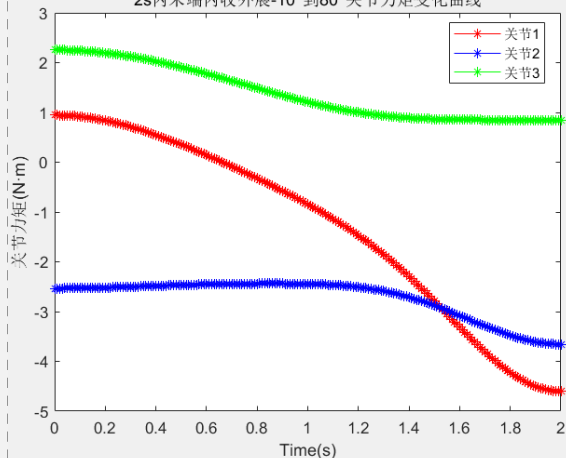
屈伸运动的关节力矩变化

2s内末端屈伸-72°到20°关节力矩变化曲线



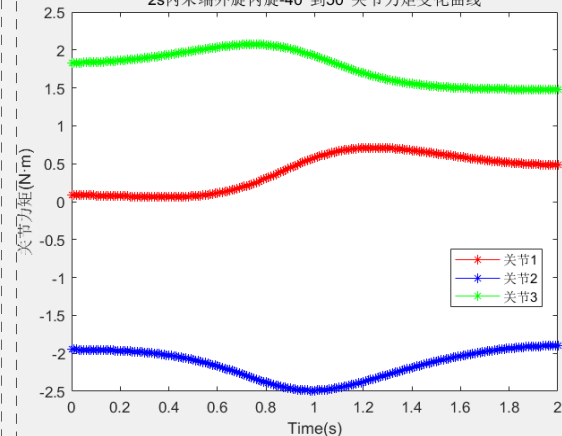
内收外展运动的关节力矩变化

2s内末端内收外展-10°到80°关节力矩变化曲线



外旋内旋运动的关节力矩变化

2s内末端外旋内旋-40°到50°关节力矩变化曲线



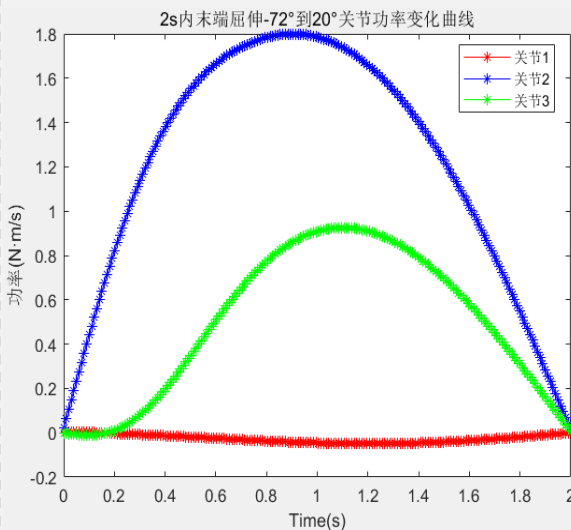
仿真过程

5

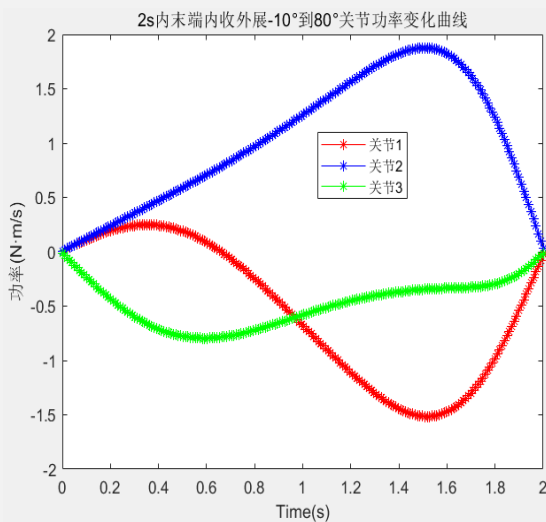
• 关节电机功率曲线

将各个时刻关节速度和关节力矩相乘，可以得到肩关节末端在2s时间内进行三种典型运动的各个关节功率随时间变化曲线

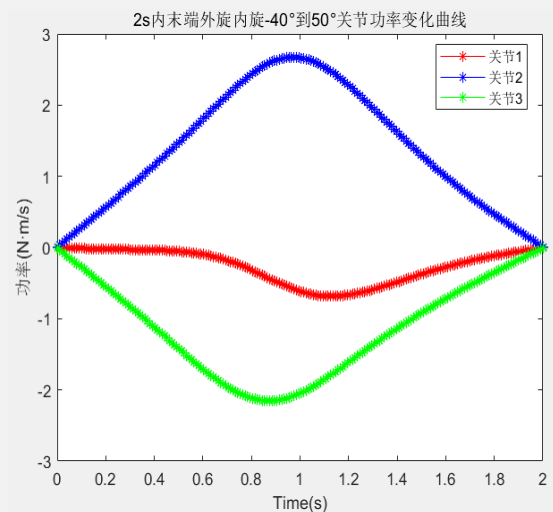
屈伸运动的关节功率变化



内收外展运动的关节功率变化



外旋内旋运动的关节功率变化



仿真过程

5

将运动学反解的数值结果输入EXCEL表格进行仿真，得到三种运动的仿真动画

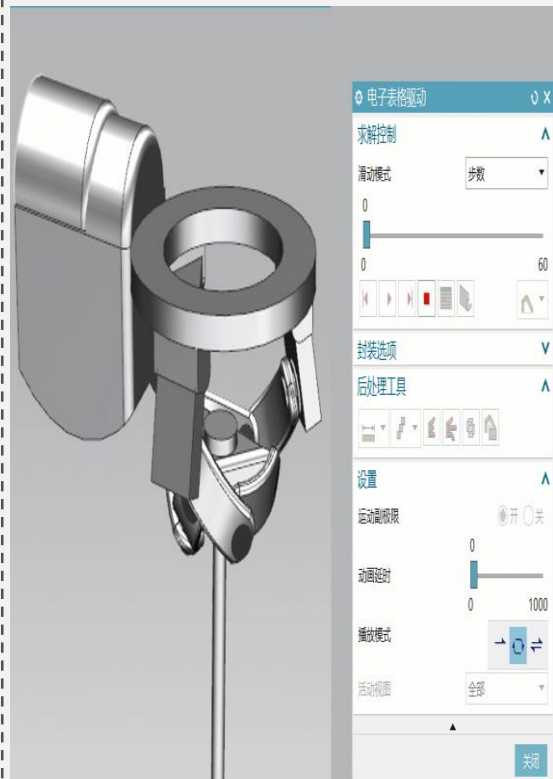
屈伸运动的运动学仿真



内收外展运动的运动学仿真



外旋内旋运动的运动学仿真

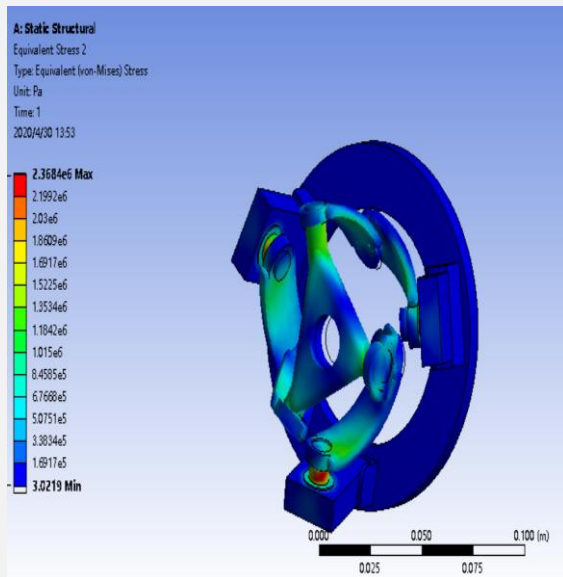


有限元分析

5

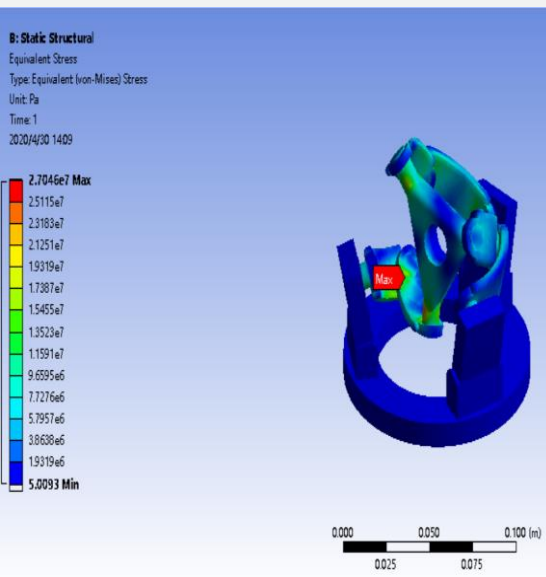
肩关节的建模仿真与分析

手臂自然下垂姿态的应力云图



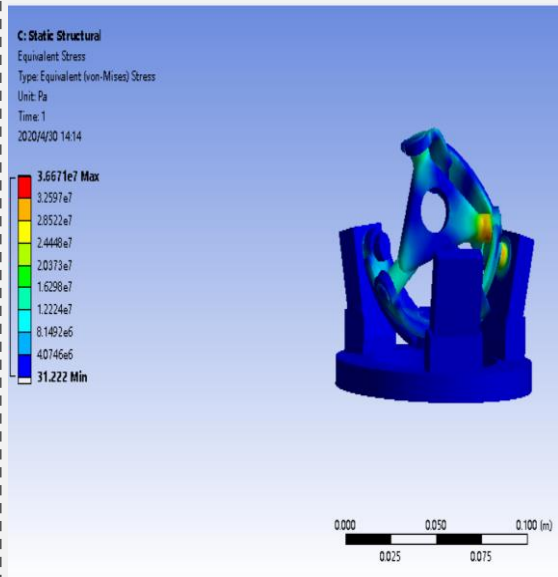
最大应力在电机轴上，2.3684Mpa
许用应力为250Mpa

手臂前屈-90°姿态的应力云图

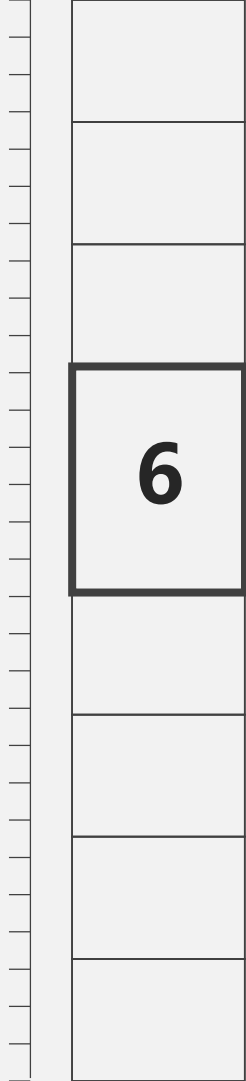


最大应力在支链杆上，27.046Mpa
许用应力为280Mpa

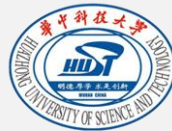
手臂外展90°姿态的应力云图



最大应力在支链杆上，36.67Mpa
许用应力为280Mpa



总结



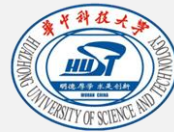
总结

6

总结

• 工作总结

- 建立三自由度球面并联机构的数学模型，确定11个设计参数，通过约束关系推导运动学正反解，并在运动学反解的基础上推导速度雅可比矩阵和力雅可比矩阵，并且对机构的奇异形位进行分析和求解。
- 从工作空间、灵巧度和最大力矩这三个优化目标出发，利用遗传算法多目标优化对11个参数进行选取，最终确定了一组工作空间、灵巧度和最大力矩都满足设定条件的机构结构参数。
- 根据参数优化结果，在UG软件中进行肩关节建模设计，并且运动学反解的结果对肩关节的前屈后伸、内旋外旋、内收外展三种运动进行了运动仿真，运动仿真的结果与理论分析的结果相一致，为进一步分析奠定理论基础。
- 对设计出来的机构，选定材料，设定边界条件，对三种受力最危险的姿态进行了Ansys有限元分析，结果表明最大应力远小于材料的需要应力，符合设计要求。



0

Ending

谢谢！

欢迎各位老师批评指正
