

目录

一、摘要.....	- 2 -
二、项目背景.....	- 2 -
三、建模阶段.....	- 3 -
1. 材料基本参数确定.....	- 3 -
2. 简化处理.....	- 4 -
3. 建模结果.....	- 5 -
四、静力学建模.....	- 6 -
1. 探究不同大小载荷对机械臂节点位移、应力应变的影响.....	- 6 -
(a) 施加不同载荷.....	- 8 -
(b) 结果分析.....	- 16 -
2. 探究不同材料的机械臂节点位移、von Mises 应力.....	- 17 -
(a) 铝合金、镍铬钢、延性铁不同材料机械臂求解.....	- 18 -
(b) 结果分析.....	- 20 -
3. 上述两类分析对比与机械臂结构改进.....	- 21 -
五、动力学模态分析.....	- 24 -
六、总结与反思.....	- 29 -
附录.....	- 30 -
建模过程详细介绍.....	- 30 -
KR16 机器人性能参数.....	- 33 -

一、摘要

本次大作业主要从工程的角度出发，以有限元分析为基本方法，探究工业机械臂的静力学和动力学性质。

首先进行了机械臂的建模。以 KUKA 系列 KR16 机器人为基本参照，进行了相对应的简化，确定了对应的尺寸，完成了 ANSYS 的建模。

在静力学分析部分，首先分析了不同载荷作用下机械臂的节点位移、von Mises 应力应变的变化，发现在 KR16 相关性能指标允许范围内不同载荷对于机械臂节点位移等影响不大。其次从工程需要出发，分析了以铝合金、镍铬钢、延性铁为例的不同材料的机械臂在相同载荷作用下的机械臂节点位移、应力应变，发现不同材料的影响对于节点位移、应力等性质有不同程度的影响，这对于我们选择合适的材料用于机械臂的生产提供了一些思路。对比上面两个分析发现，机械臂的自重是影响机械臂在某一位姿形变的重要因素，基于这个结论，在不影响机械臂各种性能的前提下，对机械臂的几何结构进行了改进。

在动力学分析部分，因为了解机械结构的固有频率是十分重要的，所以进行了对机械臂的模态分析。求解了机械臂在自身重力作用下前 20 阶的固有频率，并且用动画形式观察了前 5 阶的振型。在此基础上，又对比了铝合金和镍铬钢不同材料的机械臂的固有频率的不同，再次说明了机械臂的材料选择的重要性。

关键词：ANSYS，有限元分析，机械臂，静力学，模态分析

二、项目背景

当今世界，工业化的发展可谓日新月异，各个装配车间、流水线的效率令人惊叹，并且一直朝着无人化、自动化的方向努力。而工业化发展的过程中有一个重要的产物，那就是工业机械臂。

工业机械臂是拟人手臂、手腕和手功能的机械电子装置。拟人手臂、手腕和手功能的机械电子装置；它可把任一物件或工具按空间位姿（位置和姿态）的时变要求进行移动，从而完成某一工业生产的作业要求。如夹持焊钳或焊枪，对汽车或摩托车车体进行了点焊或弧焊；搬运压铸或冲压成型的零件或构件；进行激光切割；喷涂；装配机械零部件等等。

分析机械臂的不同材料的性质，对于机械臂的设计和制造有着重要的意义。比如说铝合金、钢等不同材料的使用会使得机械臂的质量、屈服极限、制造成本等都有很大的不同。

分析机械臂的结构，比如说采取一些特殊的减重设计，就可以在对性能影响不大的基础上减少机械臂的制造成本和质量。这种机械设计在对于机械臂的研究中也是十分关键的。

分析机械臂的静力学性质，比如在某些载荷和重力作用下机械臂的应力应变等，对于机械臂性能的检验有很大的帮助。

分析机械臂的模态等性质，对机械臂的设计也是十分关键的。比如采用液压驱动的机械臂，其固有频率应该避开液体脉动频率。

于是我们展开了上述各种探究。



图 1 工业机械臂



图 2 KUKA 工业机器人系列

三、建模阶段

我们使用了课上一直学习的 ANSYS 经典模式进行建模，受制于经典模式稍弱的建模能力，我们也进行了相对应的简化。这里叙述比较关键的建模过程，较为完整的建模过程详见[附录](#)。

1. 材料基本参数确定

首先，我们选用了 KUKA 产品系列中的 KR16 作为参照，根据相关文献和官方的资料，进行了机械臂相关参数的确定。

材料的相关参数如下：

表 1 机械臂材料相关参数

材质	弹性模量	泊松比	密度
铝合金	约 70GPa	约 0.33	7.85*10^3 kg/m3

注：关于机械臂的可选材料，这里列举一种，后面还有针对不同材料的分析

2. 简化处理

为了便于我们建模，我们对 KR16 进行了相关的简化处理。



图 3 KUKA 系列 KR16 机械臂

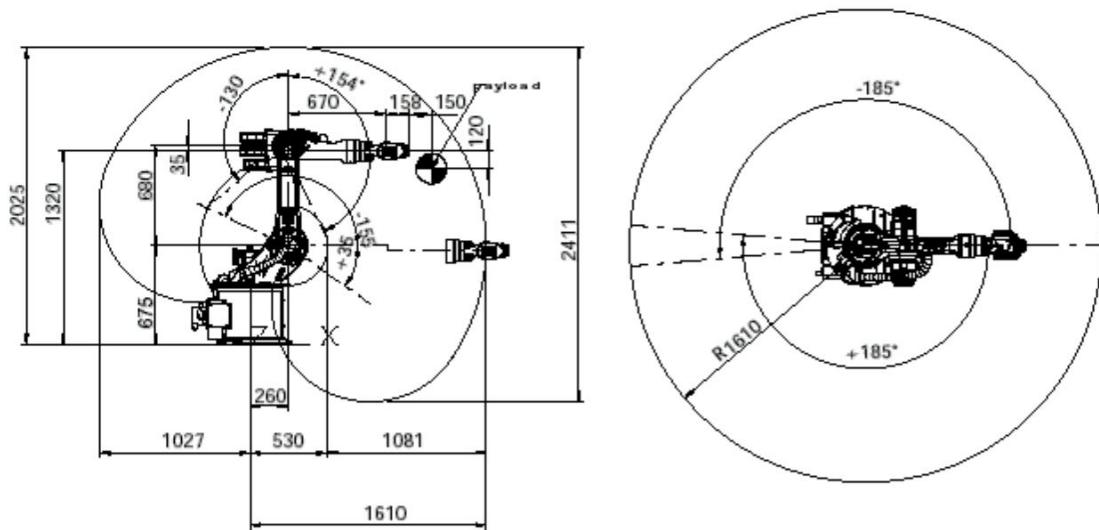


图 4 KUKA 系列 KR16 机械臂相关参数

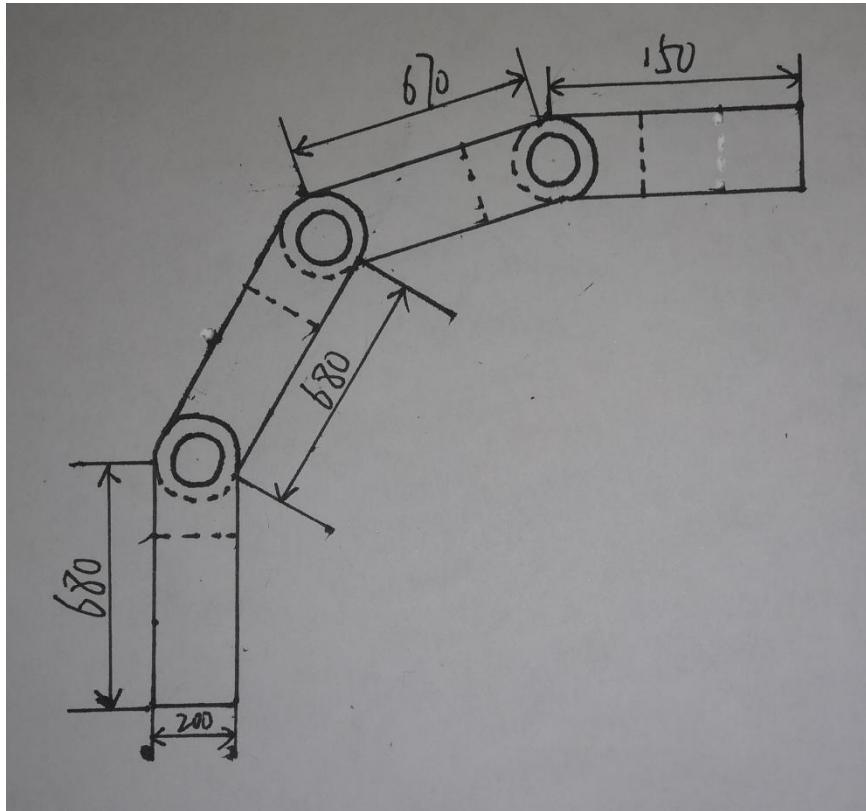


图 5 简化形式 KUKA 系列 KR16 机械臂相关参数

可以看出，这里做的简化是讲六自由度的机械臂的最后手部三个自由度省略，将转动副用最基本的圆柱形式表示，将连杆用长方体来表示。这样的简化便于我们建模，并且最大程度上也保留了机械臂的原始形状和参数。这有利于我们后续的分析。

3. 建模结果

于是使用 ANSYS 进行了建模，建模后得到的结果如下：其中，从下往上第一个转动副所连两个连杆夹角为 30 度，另两个转动副锁链两个连杆的夹角也是如此，所以最后手部是水平的。

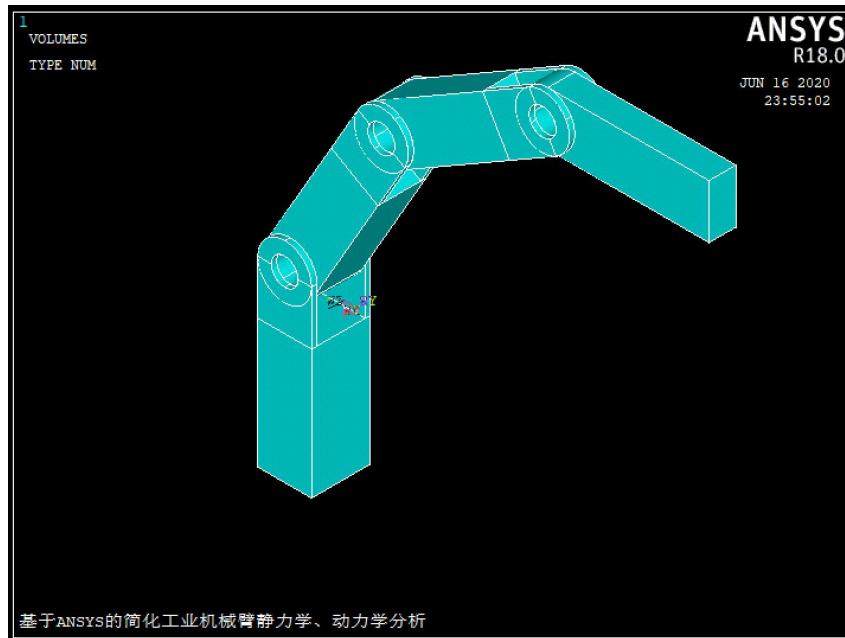


图 6 简化机械臂 ANSYS 模型

四、静力学建模

1. 探究不同大小载荷对机械臂节点位移、应力应变的影响

这一部分我们探究在机械臂锁死的条件下，机械臂手部抓取不同质量大小的物体，即载荷不同时，机械臂位移和应力应变的变化。

首先，我们要进行划分网格和施加约束。

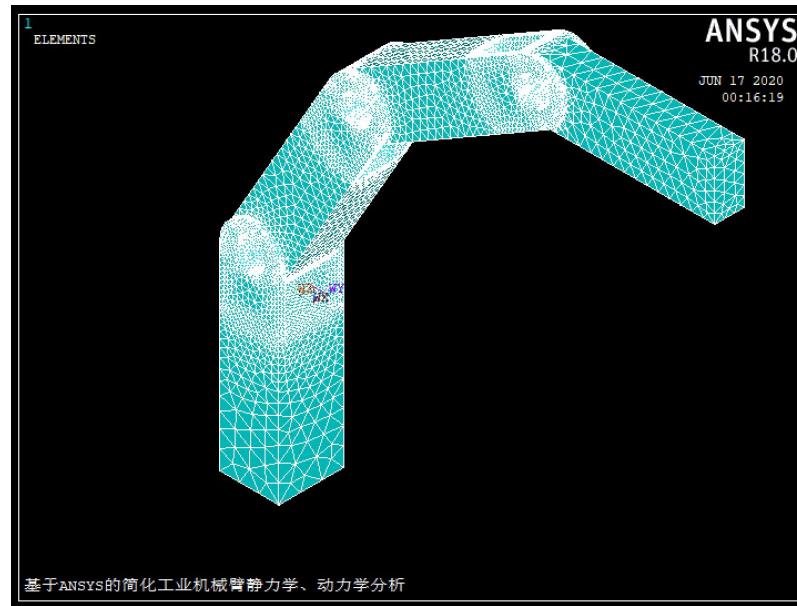


图 7 机械臂模型划分单元网格

然后，对机械臂底部施加约束，对机械臂施加重力。

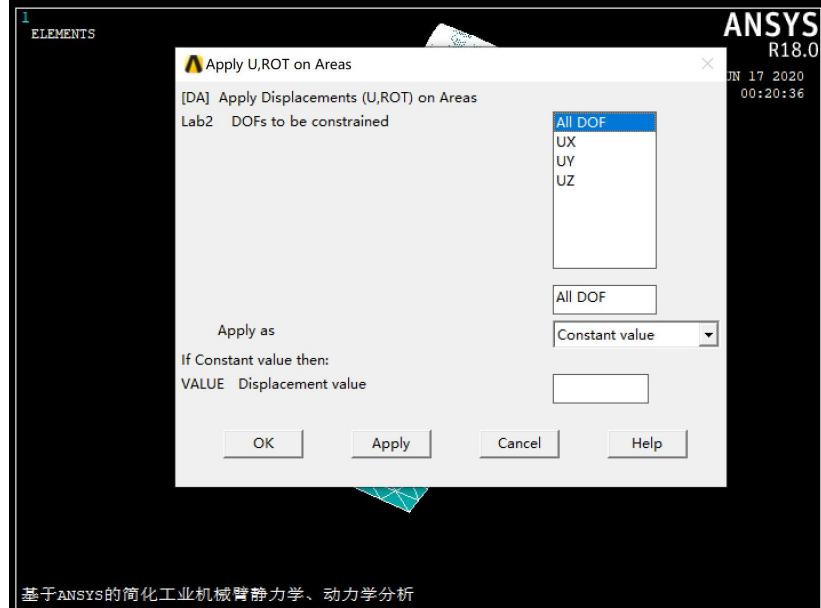


图 8 对机械臂底部基座平面施加 ALL DOF 约束

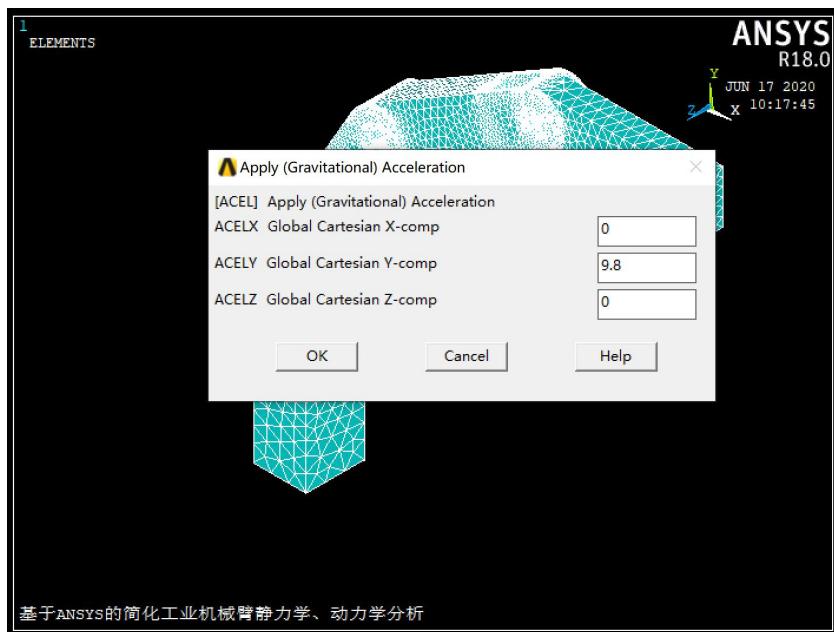


图 9 对机械臂施加重力

然后，我们要模拟机械臂手部受力情况，假设机械臂抓取或者托举一个重物，那么我们将其简化为作用于机械臂末端上边平面的均布力，当我们作用 10N, 50N, 100N, 150N, 300N 的力时，分别对应 166Pa, 833Pa, 1666Pa, 2500Pa, 5000Pa 的压强时，分析机械臂的节点位移、应力、应变变化情况。

(a) 施加不同载荷

(1) 166Pa 压强时

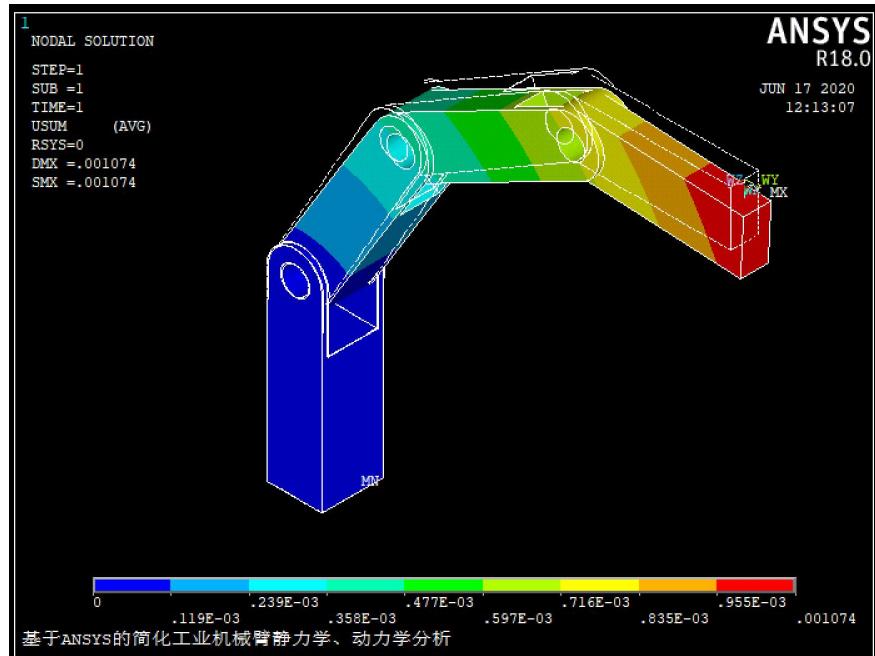


图 10 166Pa 压强作用下节点位移云图

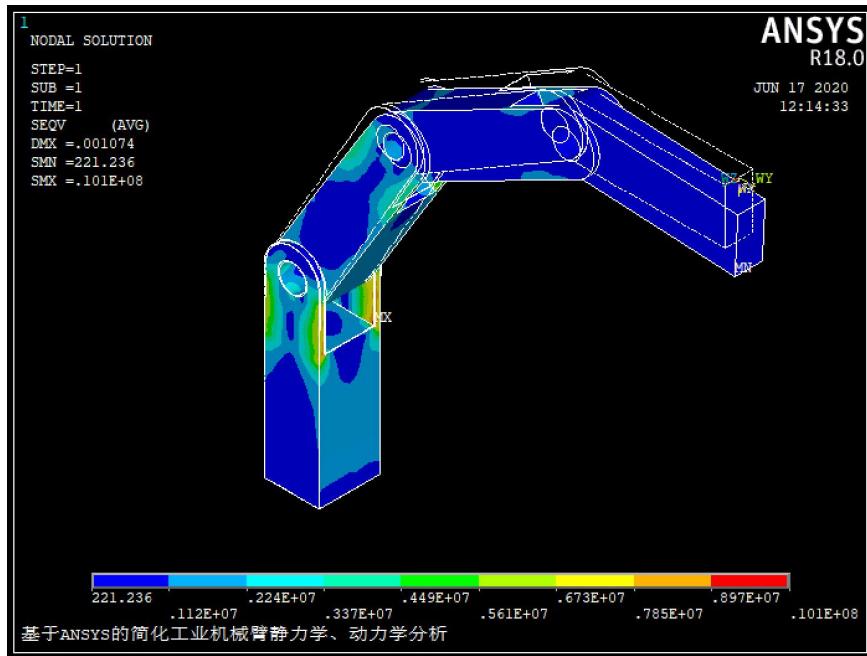


图 11 166Pa 压强作用下 von Mises 应力云图

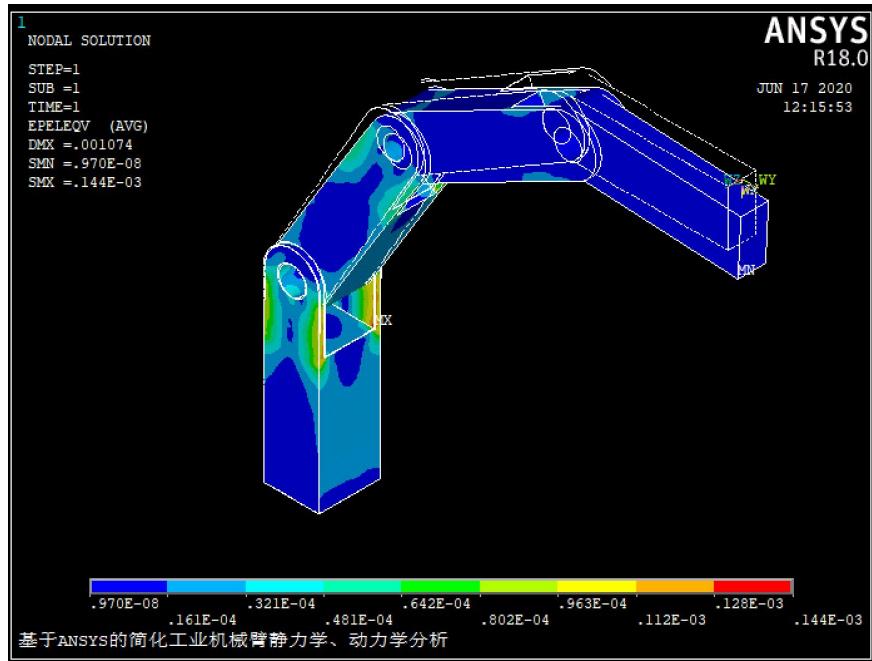


图 12 166Pa 压强作用下 von Mises 弹性应变

	PRNSOL Command
File	
2224	0.58612E-003-0.49958E-003-0.20751E-006 0.77014E-003
2225	0.58611E-003-0.49959E-003-0.19558E-006 0.77014E-003
2226	0.58610E-003-0.49959E-003-0.18485E-006 0.77013E-003
2227	0.58615E-003-0.51521E-003-0.18131E-006 0.78039E-003
2228	0.58615E-003-0.51056E-003-0.21498E-006 0.77733E-003
2229	0.58720E-003-0.88765E-003-0.22668E-006 0.10643E-002
2230	0.58626E-003-0.53253E-003-0.20844E-006 0.79202E-003
2231	0.58651E-003-0.56439E-003-0.20411E-006 0.81396E-003
2232	0.58668E-003-0.59189E-003-0.21033E-006 0.83338E-003
2233	0.58683E-003-0.61866E-003-0.20806E-006 0.85271E-003
2234	0.58693E-003-0.64536E-003-0.21060E-006 0.87234E-003
2235	0.58700E-003-0.67207E-003-0.21818E-006 0.89233E-003
2236	0.58707E-003-0.69879E-003-0.21617E-006 0.91267E-003
2237	0.58712E-003-0.72554E-003-0.21623E-006 0.93334E-003
2238	0.58715E-003-0.75230E-003-0.21962E-006 0.95431E-003
2239	0.58718E-003-0.77905E-003-0.22037E-006 0.97555E-003
2240	0.58719E-003-0.80577E-003-0.22171E-006 0.99703E-003
2241	0.58720E-003-0.83223E-003-0.22316E-006 0.10185E-002
2242	0.58720E-003-0.85714E-003-0.22507E-006 0.10390E-002
2243	0.58720E-003-0.87182E-003-0.22559E-006 0.10511E-002
2244	0.58720E-003-0.88625E-003-0.22655E-006 0.10631E-002
2245	0.58721E-003-0.88123E-003-0.22636E-006 0.10590E-002
2246	0.58614E-003-0.51383E-003-0.23452E-006 0.77947E-003
2247	0.57714E-003-0.46646E-003-0.17489E-006 0.74208E-003
2248	0.58523E-003-0.48907E-003-0.18475E-006 0.76268E-003
2249	0.58338E-003-0.48095E-003-0.18698E-006 0.75607E-003
2250	0.58121E-003-0.47475E-003-0.18473E-006 0.75047E-003
2251	0.57908E-003-0.47004E-003-0.18056E-006 0.74584E-003
2252	0.51949E-003-0.43357E-003-0.56693E-008 0.67665E-003
2253	0.53119E-003-0.43459E-003 0.70603E-008 0.68632E-003
2254	0.54134E-003-0.43723E-003 0.14333E-008 0.69586E-003

图 13 166Pa 压强作用下节点位移具体值

这里我们重点关注 2245 号节点，这个点是位于机械臂末端的一个点，记录其具

体数值，后续我们进行定量分析。

(2) 833Pa 压强作用下

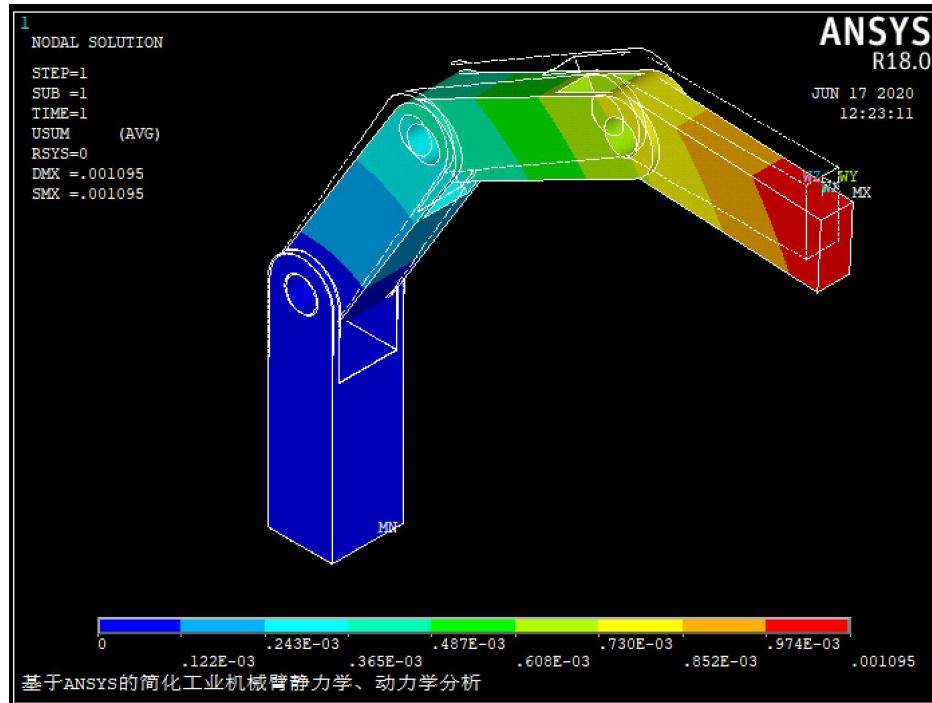


图 14 833Pa 压强作用下节点位移云图

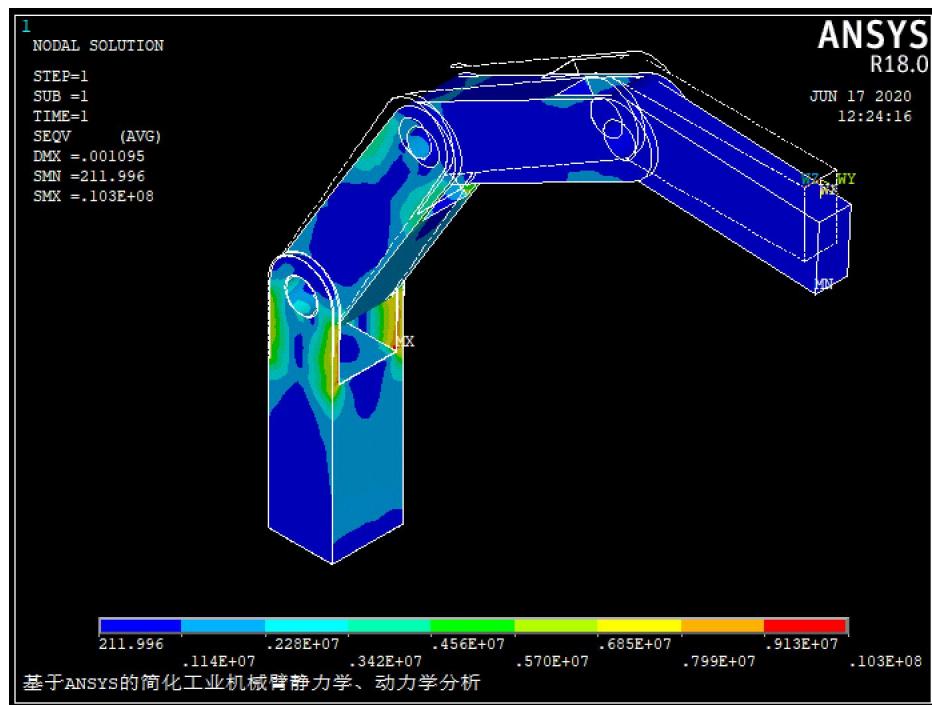


图 15 833Pa 压强作用下 von Mises 应力云图

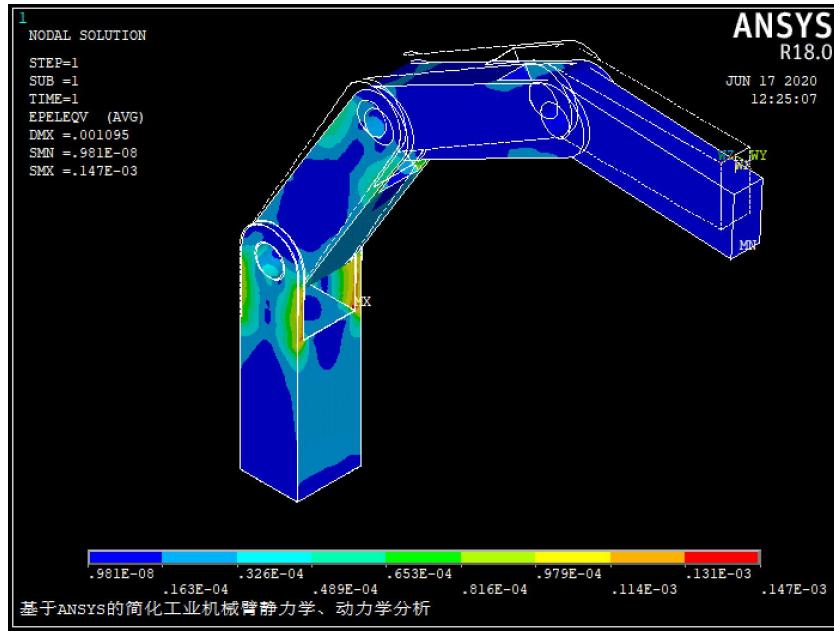


图 16 833Pa 压强作用下 von Mises 弹性应变云图

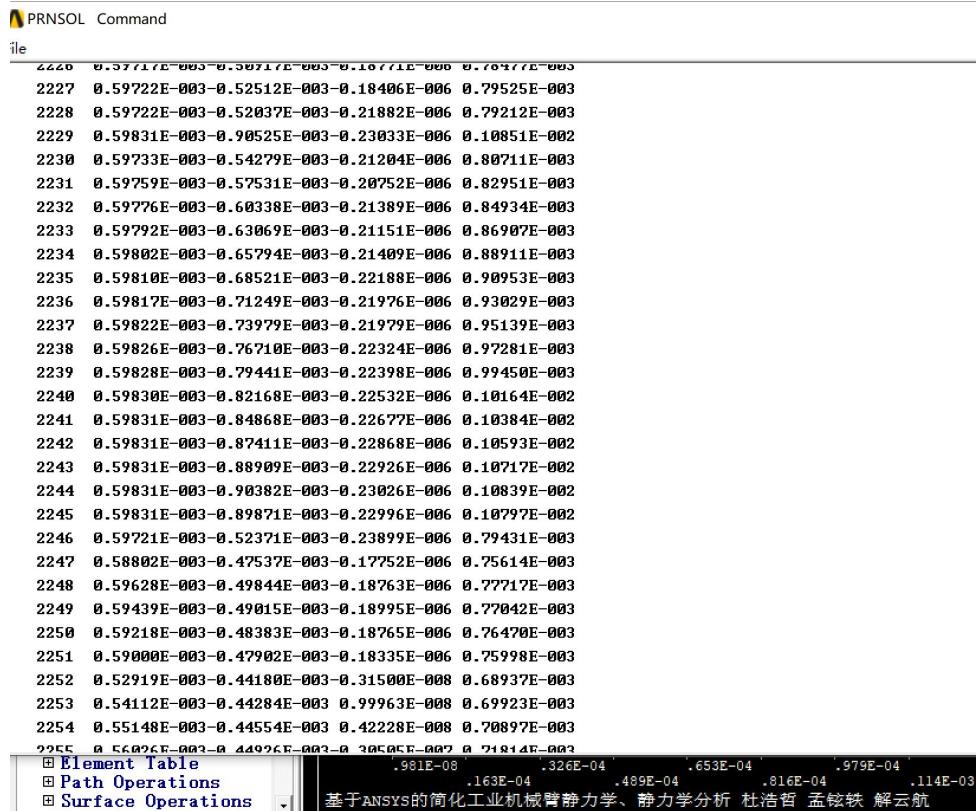


图 17 833Pa 压强作用下节点位移图

(3) 1666Pa 压强作用下

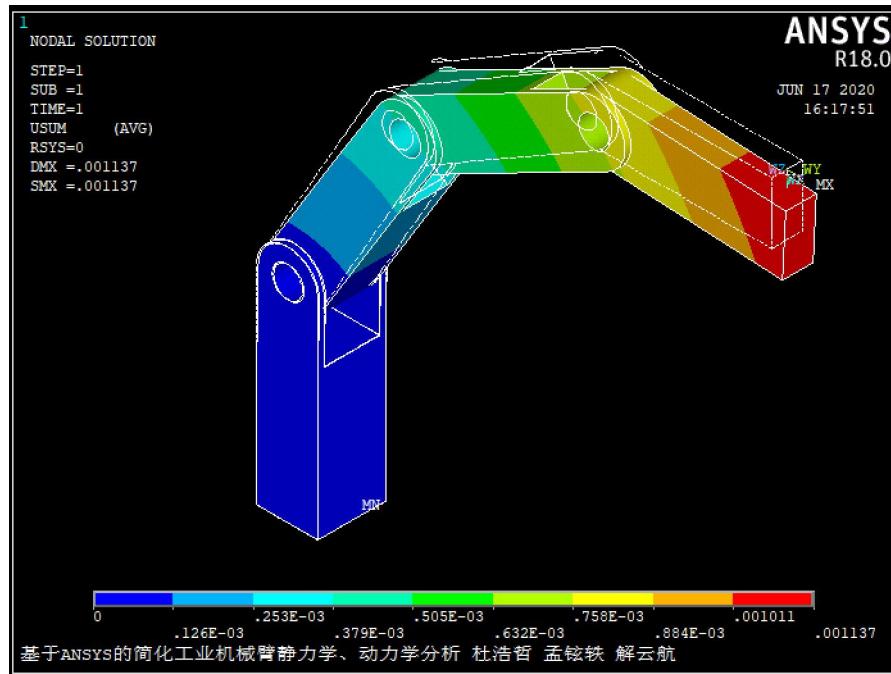


图 18 1666Pa 压强作用下节点位移云图

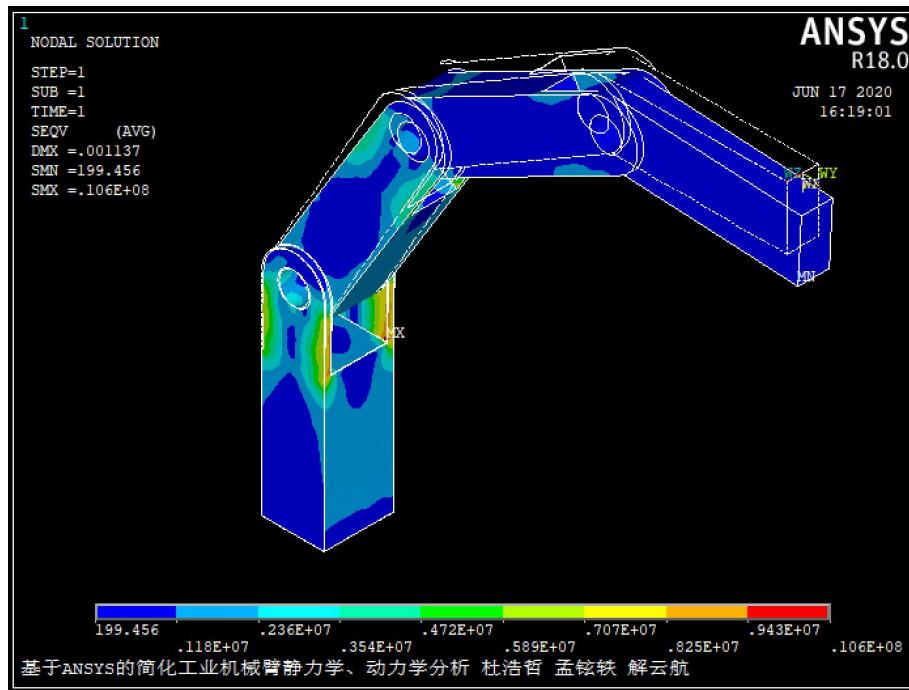


图 19 1666Pa 压强作用下 von Mises 应力云图

```

PRNSOL Command
ile
2233 0.62004E-003-0.65469E-003-0.21839E-006 0.90170E-003
2234 0.62015E-003-0.68304E-003-0.22104E-006 0.92257E-003
2235 0.62023E-003-0.71141E-003-0.22924E-006 0.94382E-003
2236 0.62031E-003-0.73979E-003-0.22691E-006 0.96544E-003
2237 0.62036E-003-0.76819E-003-0.22687E-006 0.98740E-003
2238 0.62040E-003-0.79661E-003-0.23046E-006 0.10097E-002
2239 0.62042E-003-0.82502E-003-0.23117E-006 0.10323E-002
2240 0.62044E-003-0.85340E-003-0.23251E-006 0.10551E-002
2241 0.62045E-003-0.88150E-003-0.23396E-006 0.10780E-002
2242 0.62045E-003-0.90795E-003-0.23588E-006 0.10997E-002
2243 0.62045E-003-0.92354E-003-0.23658E-006 0.11126E-002
2244 0.62045E-003-0.93887E-003-0.23766E-006 0.11254E-002
2245 0.62045E-003-0.93355E-003-0.23715E-006 0.11209E-002
2246 0.61928E-003-0.54340E-003-0.24792E-006 0.82389E-003
2247 0.60972E-003-0.49312E-003-0.18276E-006 0.78417E-003
2248 0.61831E-003-0.51712E-003-0.19337E-006 0.80605E-003
2249 0.61635E-003-0.50849E-003-0.19586E-006 0.79903E-003
2250 0.61405E-003-0.50192E-003-0.19346E-006 0.79308E-003
2251 0.61178E-003-0.49692E-003-0.18893E-006 0.78816E-003

```

图 20 1666Pa 压强作用下节点位移数值

(4) 2500Pa 压强作用下:

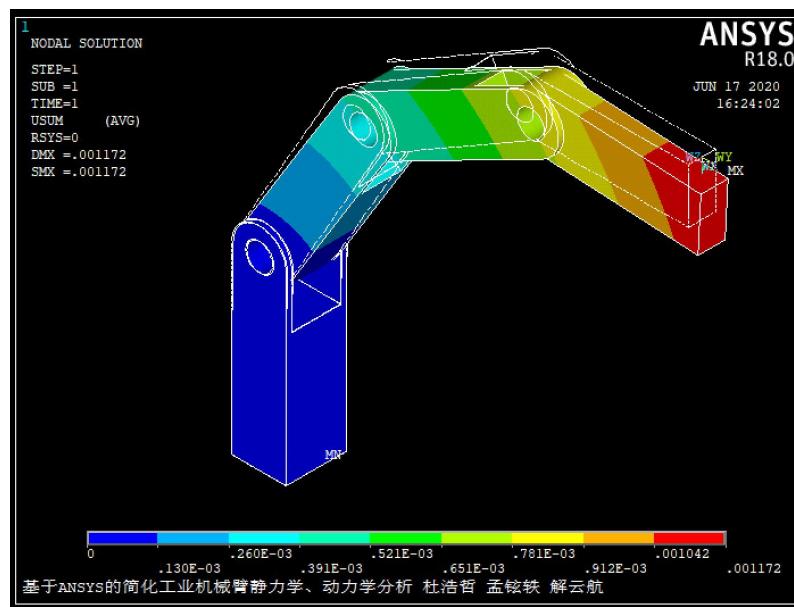


图 21 2500Pa 压强作用下节点位移云图

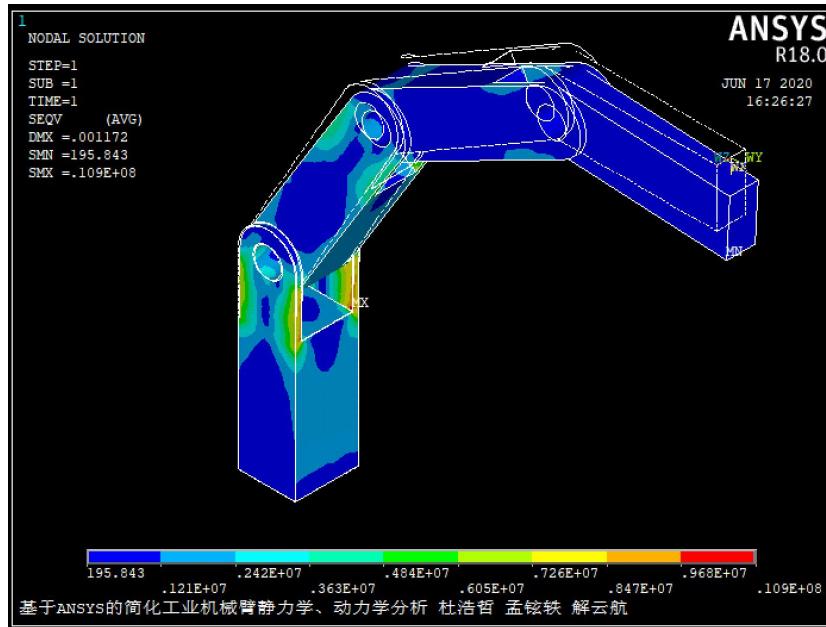


图 22 2500Pa 压强作用下 von Mises 应力云图

	PRNSOL Command
File	
2240	0.63892E-003-0.87988E-003-0.23851E-006 0.10874E-002
2241	0.63893E-003-0.90889E-003-0.23997E-006 0.11110E-002
2242	0.63894E-003-0.93620E-003-0.24189E-006 0.11335E-002
2243	0.63894E-003-0.95230E-003-0.24269E-006 0.11468E-002
2244	0.63894E-003-0.96813E-003-0.24383E-006 0.11600E-002
2245	0.63894E-003-0.96263E-003-0.24314E-006 0.11554E-002
2246	0.63771E-003-0.55984E-003-0.25537E-006 0.84858E-003
2247	0.62784E-003-0.50793E-003-0.18714E-006 0.80758E-003
2248	0.63671E-003-0.53271E-003-0.19816E-006 0.83016E-003
2249	0.63468E-003-0.52381E-003-0.20081E-006 0.82292E-003
2250	0.63230E-003-0.51702E-003-0.19831E-006 0.81677E-003
2251	0.62996E-003-0.51186E-003-0.19358E-006 0.81170E-003
2252	0.56465E-003-0.47190E-003 0.60673E-008 0.73588E-003
2253	0.57746E-003-0.47301E-003 0.20738E-007 0.74646E-003
2254	0.58858E-003-0.47591E-003 0.14429E-007 0.75691E-003
2255	0.59801E-003-0.47990E-003-0.24058E-007 0.76676E-003
2256	0.60587E-003-0.48454E-003-0.69417E-007 0.77579E-003
2257	0.61233E-003-0.48944E-003-0.11231E-006 0.78390E-003

图 23 2500Pa 压强作用下节点位移数值

(5) 5000Pa 压强作用下

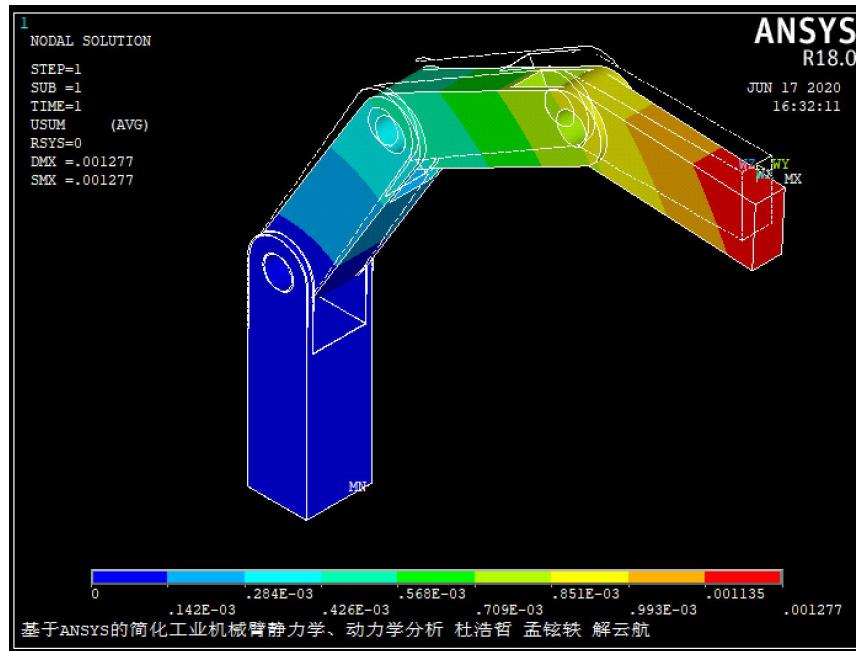


图 24 5000Pa 压力作用下节点位移云图

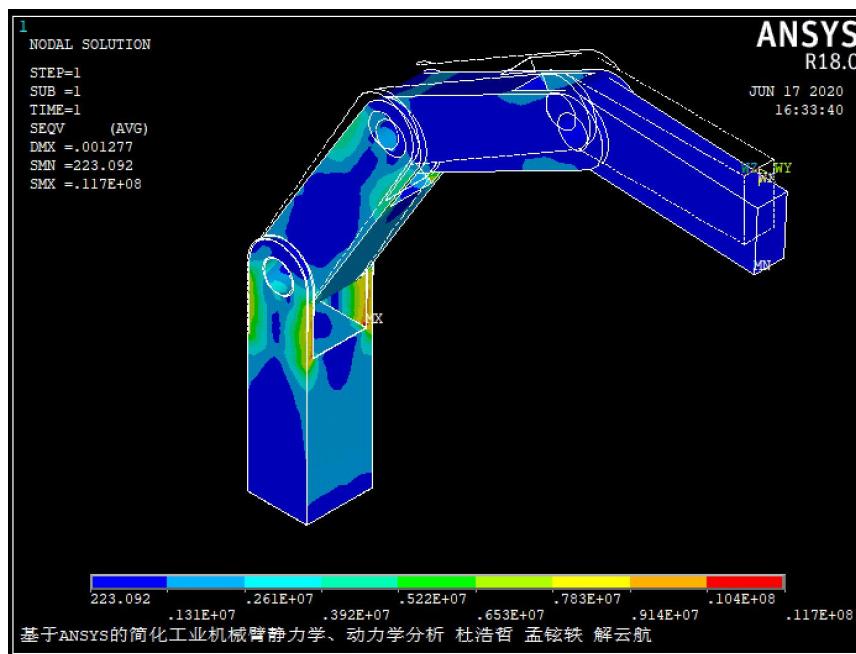


图 25 5000Pa 压力作用下 von Mises 应力云图

PRNSOL Command

File

```

2236 0.69417E-003-0.83091E-003-0.25080E-006 0.10827E-002
2237 0.69423E-003-0.86300E-003-0.25051E-006 0.11076E-002
2238 0.69428E-003-0.89511E-003-0.25454E-006 0.11328E-002
2239 0.69431E-003-0.92720E-003-0.25515E-006 0.11584E-002
2240 0.69433E-003-0.95926E-003-0.25651E-006 0.11842E-002
2241 0.69434E-003-0.99101E-003-0.25798E-006 0.12100E-002
2242 0.69435E-003-0.10289E-002-0.25998E-006 0.12346E-002
2243 0.69435E-003-0.10385E-002-0.26102E-006 0.12493E-002
2244 0.69435E-003-0.10558E-002-0.26234E-006 0.12637E-002
2245 0.69435E-003-0.10498E-002-0.26113E-006 0.12587E-002
2246 0.69294E-003-0.60912E-003-0.27771E-006 0.92260E-003
2247 0.68214E-003-0.55235E-003-0.20025E-006 0.87773E-003
2248 0.69184E-003-0.57945E-003-0.21251E-006 0.90245E-003
2249 0.68963E-003-0.56972E-003-0.21562E-006 0.89452E-003
2250 0.68703E-003-0.56229E-003-0.21285E-006 0.88780E-003
2251 0.68447E-003-0.55665E-003-0.20754E-006 0.88224E-003
2252 0.61301E-003-0.51296E-003 0.18639E-007 0.79932E-003
2253 0.62702E-003-0.51417E-003 0.35389E-007 0.81088E-003
2254 0.63918E-003-0.51733E-003 0.28348E-007 0.82231E-003
2255 0.64049E-003-0.52170E-003-0.15266E-007 0.83307E-003

```

图 26 5000Pa 压强作用下节点位移数值

(b) 结果分析

(1) 首先，分析不同载荷对应的末端节点位移。

表 2 不同载荷对应的末端节点位移

施加压强 (Pa)	2245 号节点位移
166	0.001059
833	0.0010797
1666	0.0011209
2500	0.0011554
5000	0.0012587

画出对应折线图：

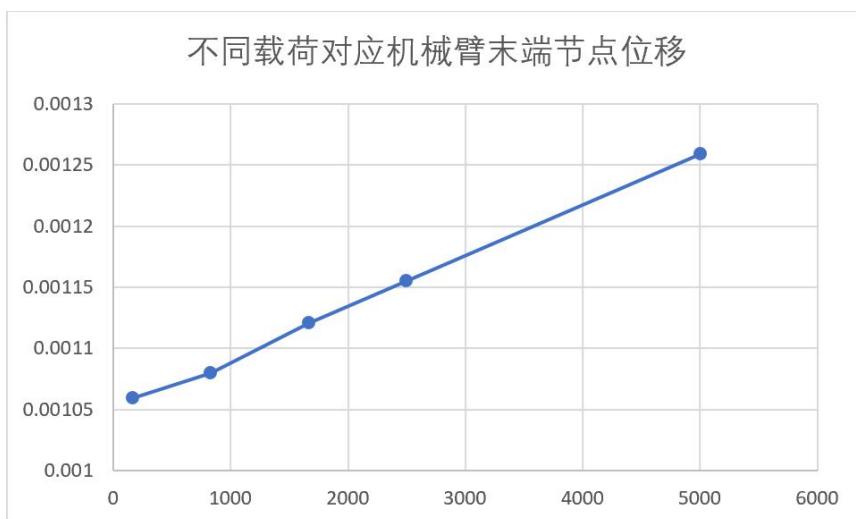


图 27 不同载荷对应机械臂末端节点位移

通过上面的数据分析和对应的节点位移云图可以看出，随着施加给机械臂末端的力越大，机械臂末端节点位移也越大。但是，根据附录中的 KR16 机器人性能指标可知，最大的负载重量为 16kg。而在这样的工作范围内，甚至 3 倍于最大负载的工作状态下，负载对于锁死状态下的机械臂的弯曲形变影响不大。当然这也与机械臂的位姿状态有关，在本部分我们使用的位姿时两连杆夹角均为 30 度的位姿状态。

(2) 其次，分析 von Mises 应力应变。

不同载荷作用下最大 von Mises 应力

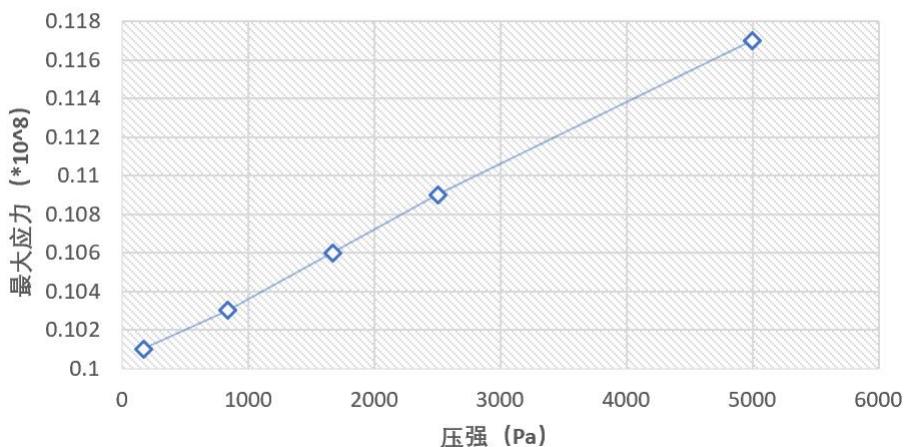


图 28 不同载荷作用下最大 von Mises 应力

我们可以从 von Mises 应力云图或上面最大应力变化折线图中看出，随着施加给机械臂末端的力越大，机械臂最大 von Mises 应力也越大，但是在工作范围允许的不同载荷作用下，应力变化率不大。

而受应力最大的部分时从下往上第一个转动副。而且应力非常大，甚至有些部分达到了 10^8 量级。所以在进行机械设计和后续产品维护中，要特别注意在第一个转动副处多加保护，或者采用更好的材料。

2. 探究不同材料的机械臂节点位移、von Mises 应力

我们选取了不同中的可能用来制作机械臂的金属材料，列举如下：

表 3 不同材料相关属性

材质	弹性模量	泊松比	密度
铝合金	约 70GPa	约 0.33	$7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
镍铬钢	约 206GPa	约 0.3	$7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
延性铁	约 120GPa	约 0.31	$7.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$

(a) 铝合金、镍铬钢、延性铁不同材料机械臂求解

不同的材料的机械臂均受到自身重力和 600Pa 压强作用。

(1) 铝合金

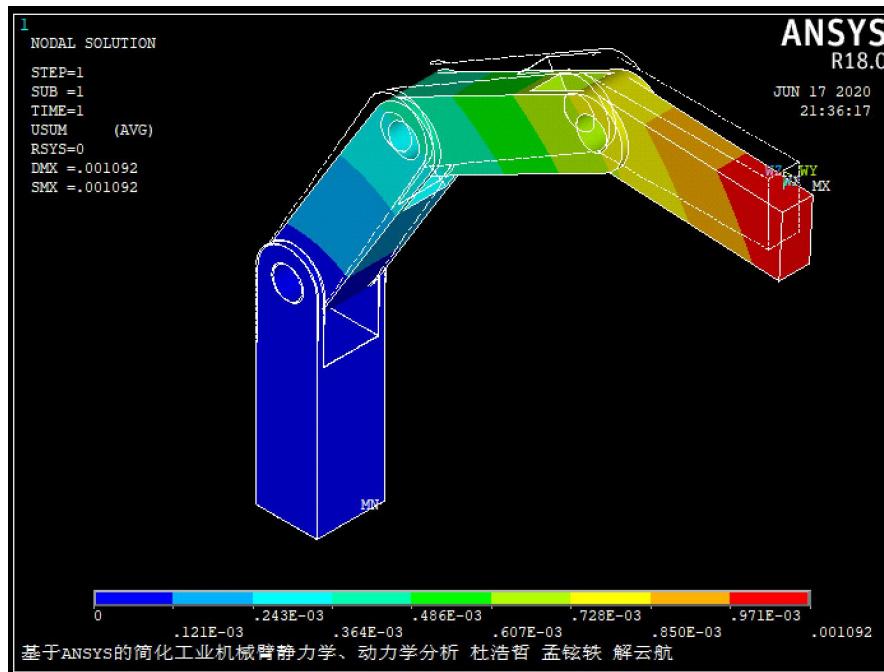


图 29 铝合金机械臂节点位移云图

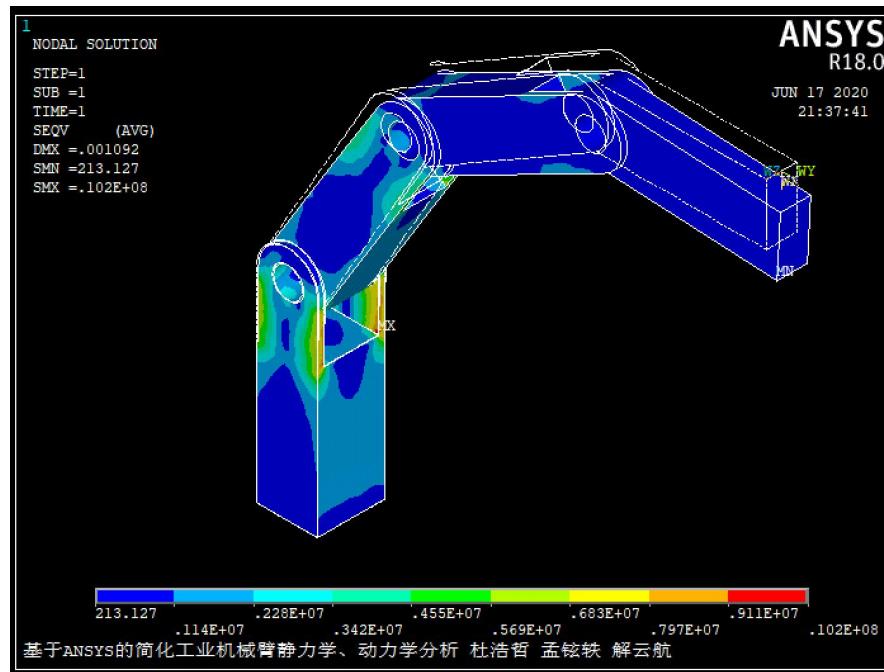


图 30 铝合金机械臂 von Mises 应力云图

(2) 镍铬钢

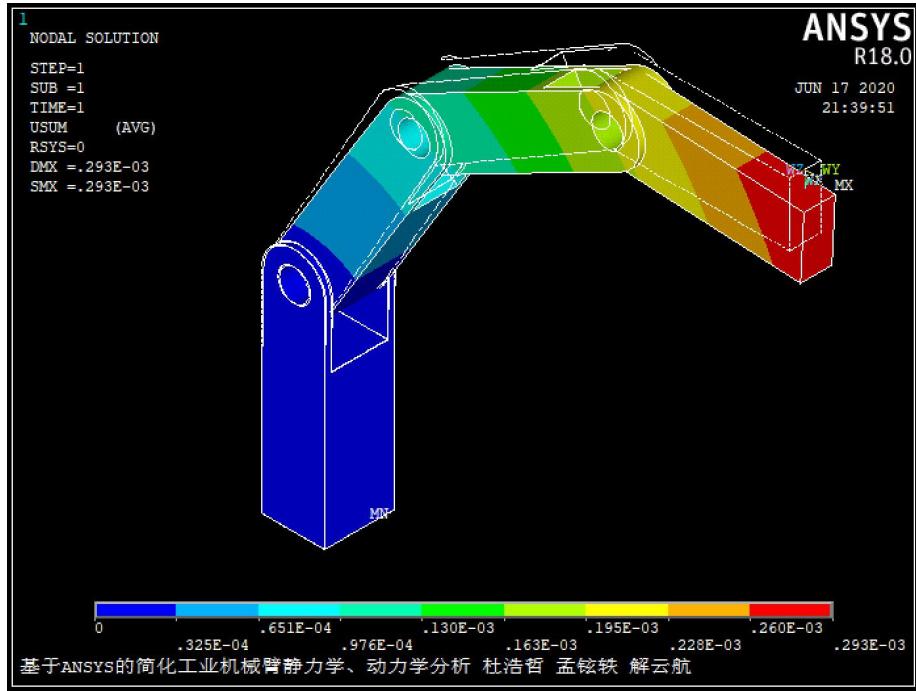


图 31 镍铬钢机械臂节点位移云图

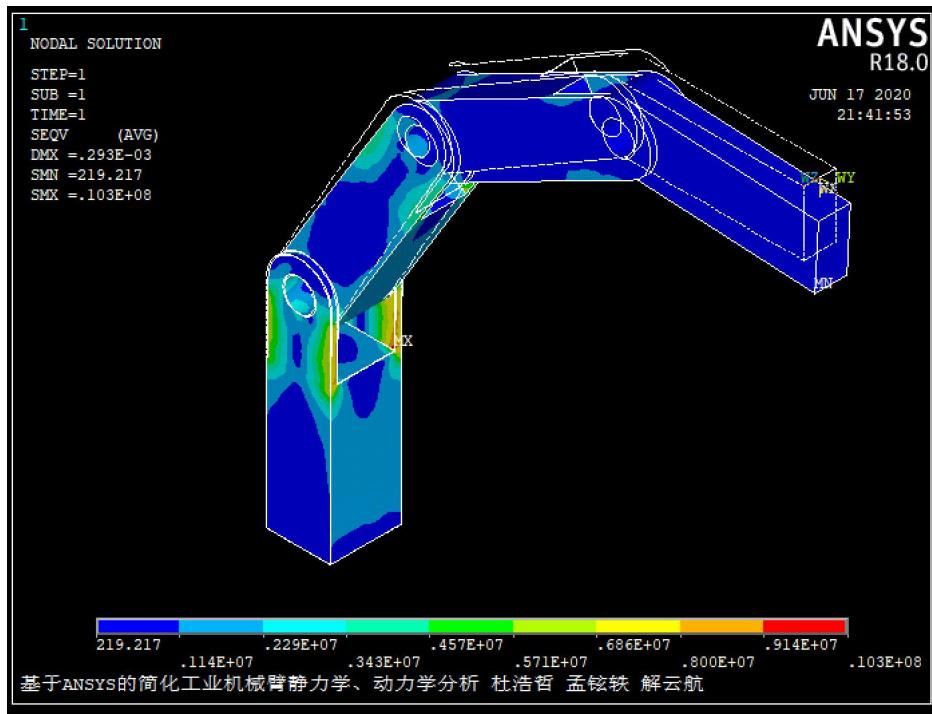


图 32 镍铬钢机械臂 von Mises 应力云图

(3) 延性铁

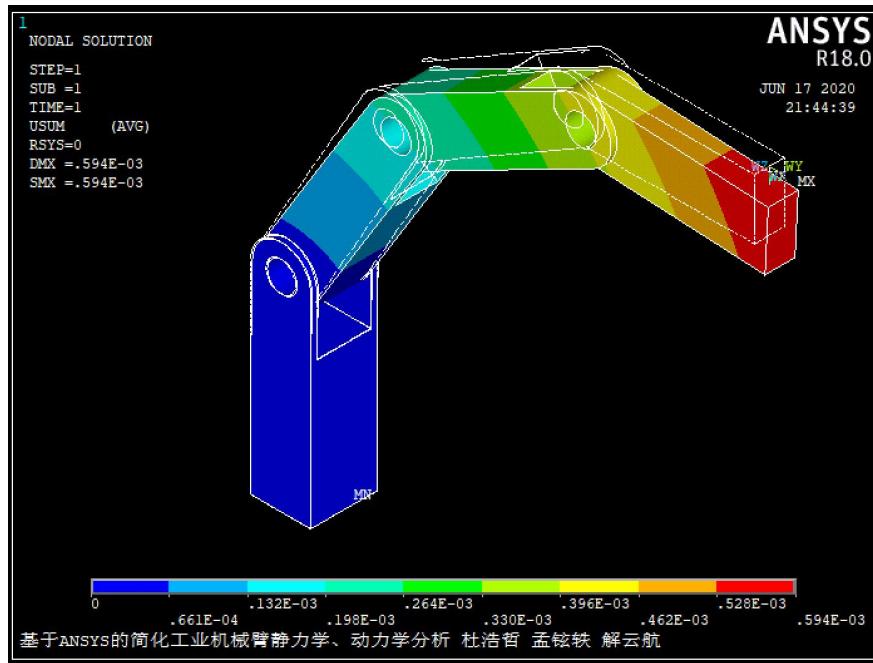


图 33 延性铁机械臂节点位移云图

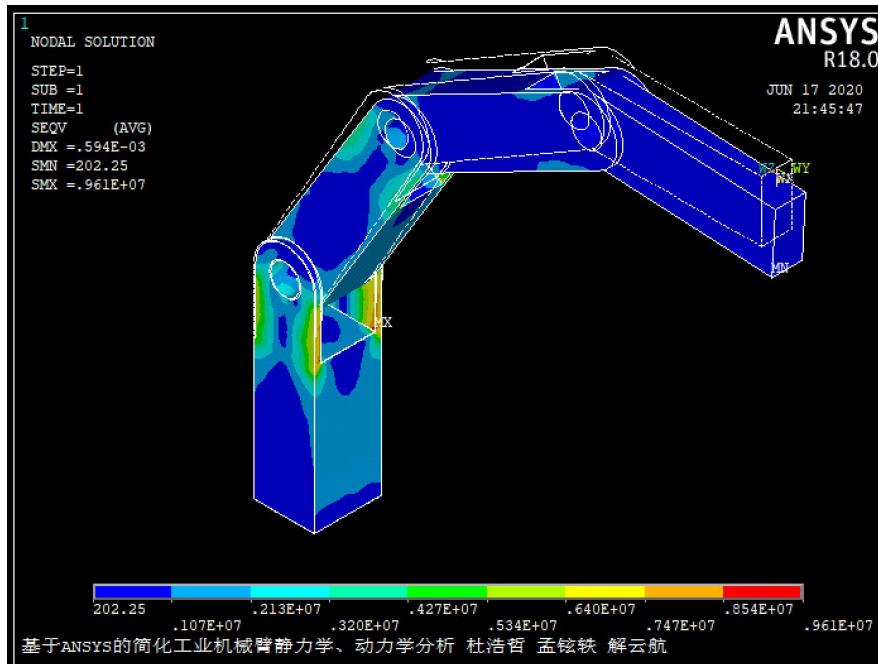


图 34 延性铁机械臂 von Mises 应力云图

(b) 结果分析

表 4 不同材料机械臂最大节点位移、最大应力

材料	最大节点位移 (m)	最大 von Mises 应力 (*10^8 N)
铝合金	0.001092	0.102
镍铬钢	0.000293	0.103

延性铁	0.000594	0.0967
-----	----------	--------

所以可以看出，不同材料对于机械臂的静力学的性质确实有不同程度的影响。从表3中可以看到弹性模量是镍铬钢>铝合金>延性铁，泊松比为延性铁>铝合金>镍铬钢。根据刚才的实验可以初步定性的发现，弹性模量越大，受相同大小力作用下，节点位移减小，最大 von Mises 应力也会减小。而对于密度而言，其直接影响重力，重力越大，节点位移自然会越大，相应的应力也会增大。而对于泊松比这一材料属性而言，泊松比增加，节点位移会减小，应力也减小。

当然，选择一个机械臂的材料对于一个具体的工程问题而言是十分重要的，也是需要考虑多个方面的。做好材料的选择，不仅要考虑形变、应力，还要考虑抗腐蚀性能、成本、美观等多个因素。总之，作为一个好的产品，材料的选择要综合全面的考虑，上述的分析提供了一些可以考虑的思路。当然，这也体现了一个性能良好的新材料的出现对于工程领域是有巨大的推动作用的。

3. 上述两类分析对比与机械臂结构改进

上面两个部分分别分析了不同载荷和不同材料对于机械臂节点位移和应力应变的影响。很容易发现，在工作允许范围内的载荷变化对于机械臂在某一位姿状态下的形变和应力影响不大，而材料中的某些属性，比如弹性模量或是密度等的变化对于机械臂的形变、应力的影响是比较大的。以密度为例，密度直接影响机械臂的自重，那么自重的大小就是十分关键的因素。如果能够对机械结构进行一些改进，并且对工作性能影响不大，那么有可能可以减小机械臂的形变程度和应力大小。在此判断基础上，我们进行了尝试。

将模型中的连杆中部挖空，这样能够减少自重，如下面所示：

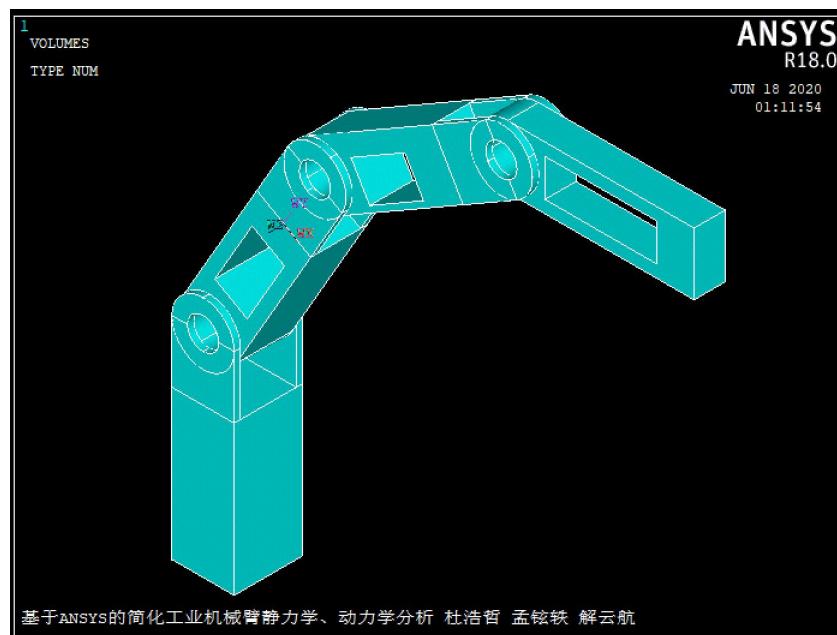


图 35 改进机械臂

然后施加约束和力进行求解。

通过施加相同压强与之前结构得到的结果进行对比：

比如在 166Pa 压强作用下：

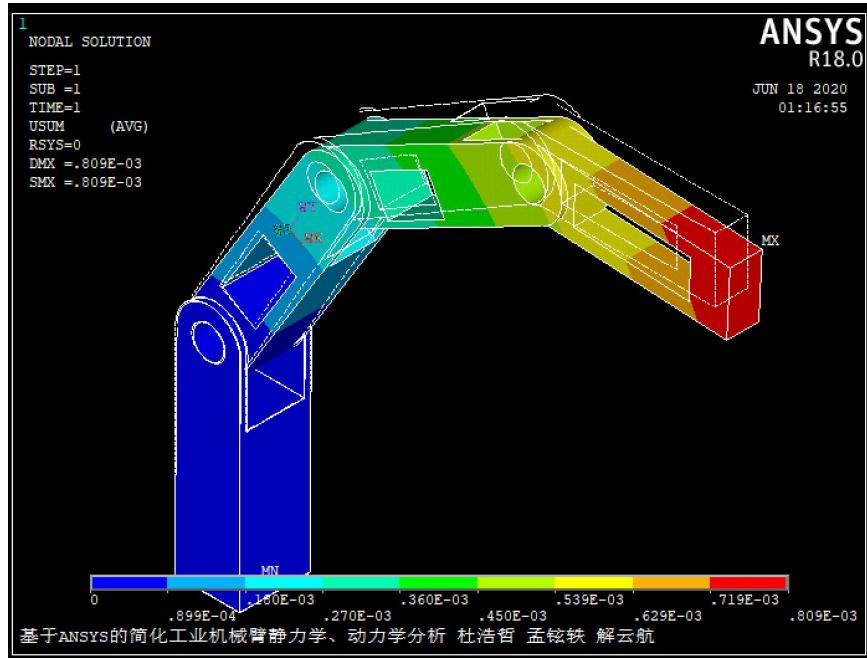


图 36 166Pa 压强作用下改进机械臂节点位移云图

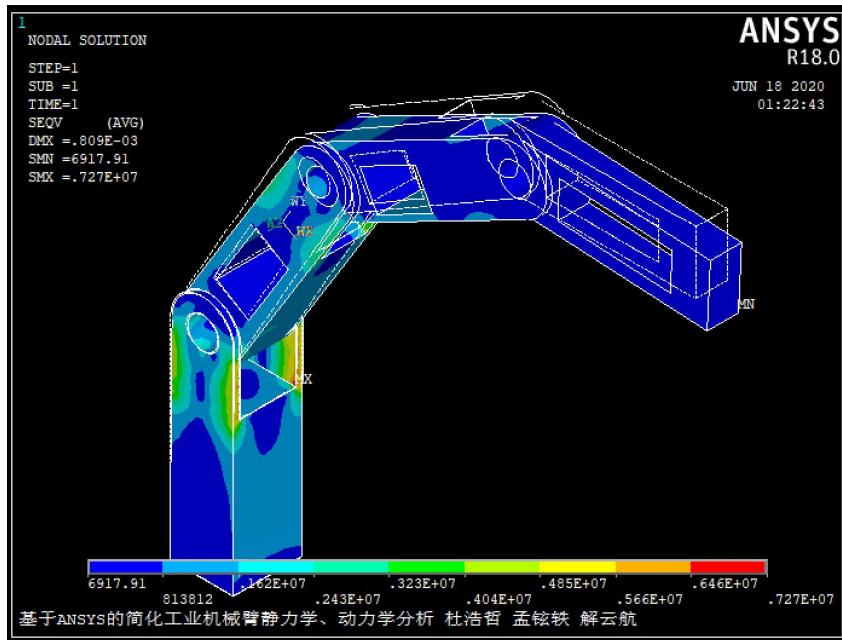


图 37 166Pa 压强作用下改进机械臂 von Mises 应力云图

限于篇幅，这里将不同压强下得到的对比结果用表格的方式呈现出来：

表 5 改进前后机械臂最大节点位移对比

压强 (Pa)	改进前 (m)	改进后 (m)
166	0.001074	0.000809
833	0.001095	0.000839
1666	0.001137	0.000877
2500	0.001172	0.000915
5000	0.001277	0.001028

表 6 改进前后机械臂最大 von Mises 应力对比

压强 (Pa)	改进前 (*10^8 N)	改进后 (*10^8 N)
166	0.101	0.0727
833	0.103	0.0750
1666	0.106	0.0779
2500	0.109	0.0807
5000	0.117	0.0893

画出折线图进行对比:

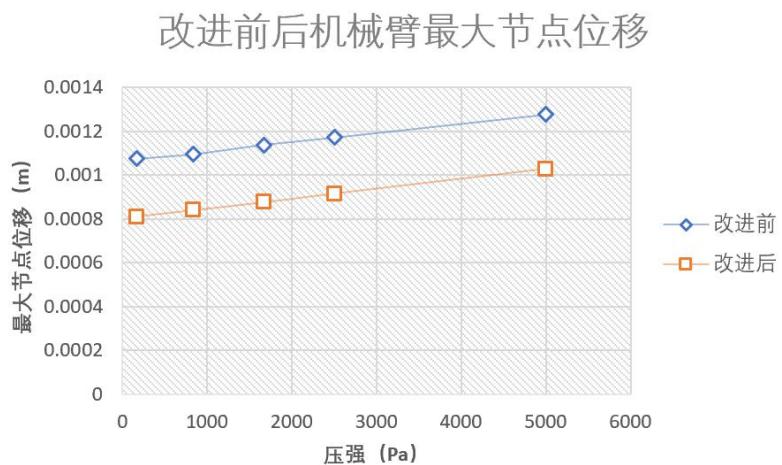


图 38 改进前后机械臂最大节点位移折线图

改进前后机械臂最大 von Mises 应力

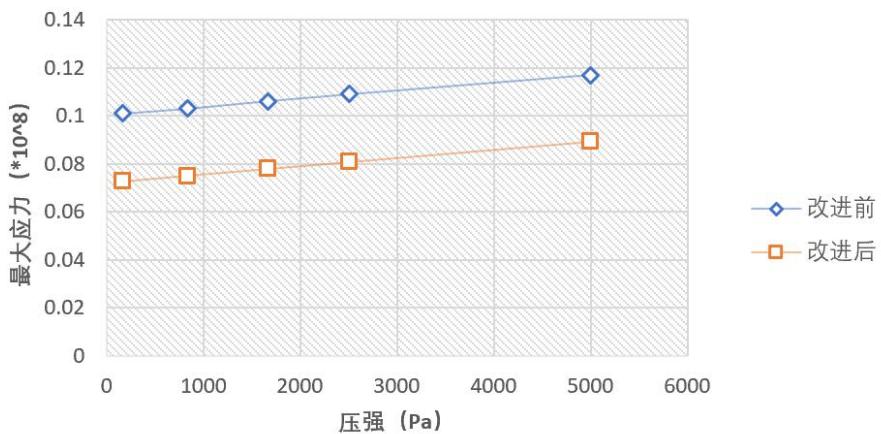


图 39 改进前后机械臂最大 von Mises 应力折线图

分析可得: 经过这样的“挖空”改进, 在相同的压强作用下, 改进后的机械臂无论是节点位移还是 von Mises 应力都有相对应的减小。但是这样的改进, 由于中空的结构, 相比较于实心的结构而言, 也会导致机械系统的不稳定性。所以也要综合考虑工程上的应用和材料性质进行改进。

五、动力学模态分析

在第一部分背景中已经说明过, 研究一个机械元件的固有频率对于设计者而言是十分重要的, 比如说就有可能出现液压驱动的机械臂的固有频率和液体脉冲的频率是邻近的情况, 这是十分不利的, 所以从工程角度出发, 必须要研究清楚机械臂的固有频率。由此我们进行了模态分析。

在本次分析中, 机械臂只受自身重力的作用。

首先, 进行模态提取方法和最大最小频率的设置, 在本次模态分析中使用 Block Lanczo smethod 分块的对称特征值求解问题, 频率设置为 1Hz-10000Hz。

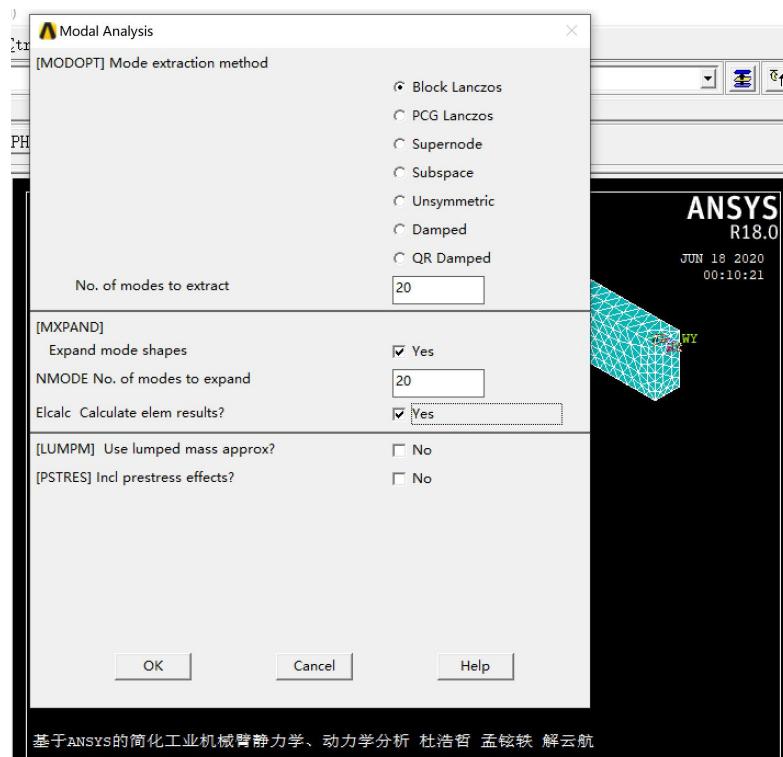


图 40 模态提取方法和阶数设置

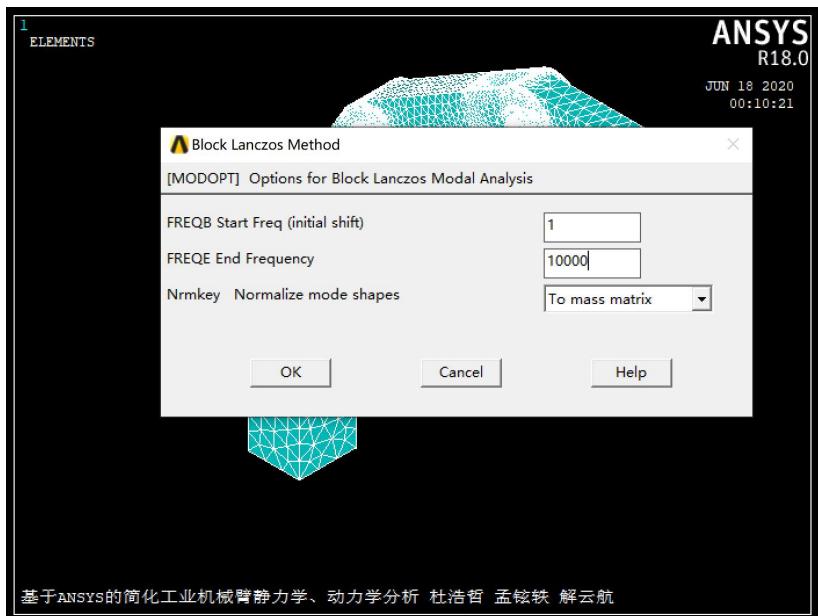


图 41 模态分析最大最小频率设置
然后进行求解，分析其得到的结果。

表 7 机械臂模态分析前 20 阶结果

***** INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE *****

SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	15.609	1	1	1
2	16.492	1	2	2
3	59.706	1	3	3
4	62.656	1	4	4
5	151.62	1	5	5
6	182.80	1	6	6
7	246.89	1	7	7
8	300.99	1	8	8
9	305.61	1	9	9
10	395.92	1	10	10
11	442.81	1	11	11
12	508.39	1	12	12
13	588.80	1	13	13
14	608.77	1	14	14
15	665.52	1	15	15
16	706.82	1	16	16
17	710.37	1	17	17
18	827.98	1	18	18
19	916.32	1	19	19
20	1045.1	1	20	20

然后以前五阶为例进行振型的分析：

(1) 第 1 阶：

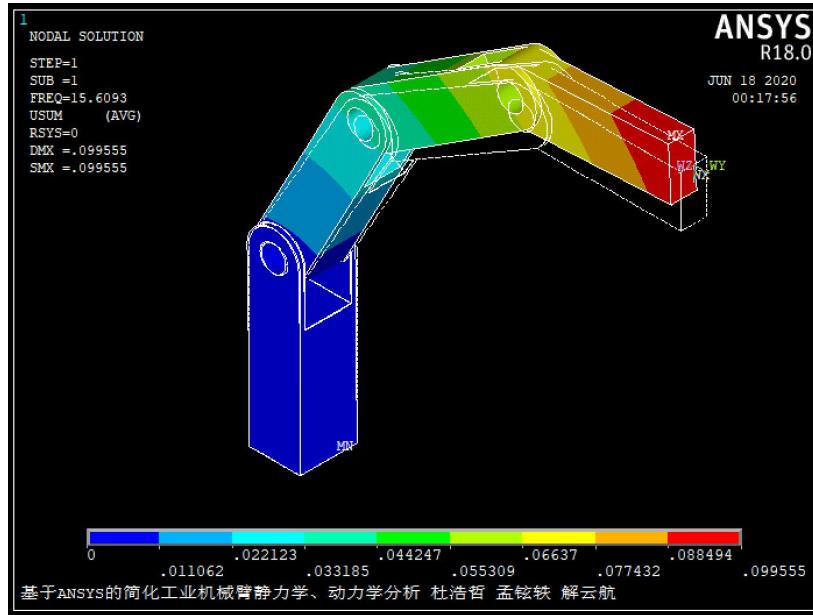


图 42 机械臂 1 阶振型

用 PlotCtrls-Animate-Mode Shape 选项观察 1 阶振型，机械臂会进行俯仰振动，这时候机械臂末端手部运动最为激烈，幅度最大。

(2) 第 2 阶：

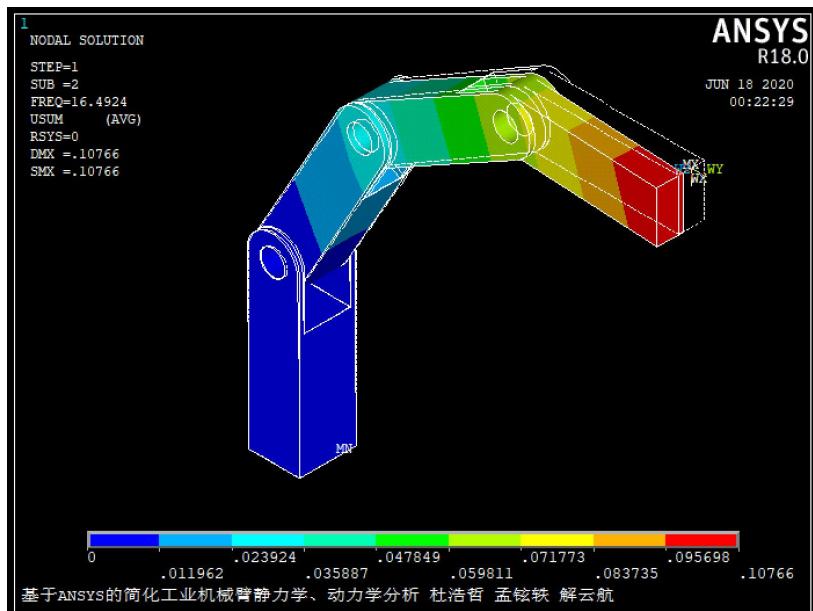


图 43 机械臂第 2 阶振型

用 PlotCtrls-Animate-Mode Shape 选项观察 2 阶振型，机械臂进行横向的摆动，而且也是机械臂末端运动幅度最大。

(3) 第 3 阶模型

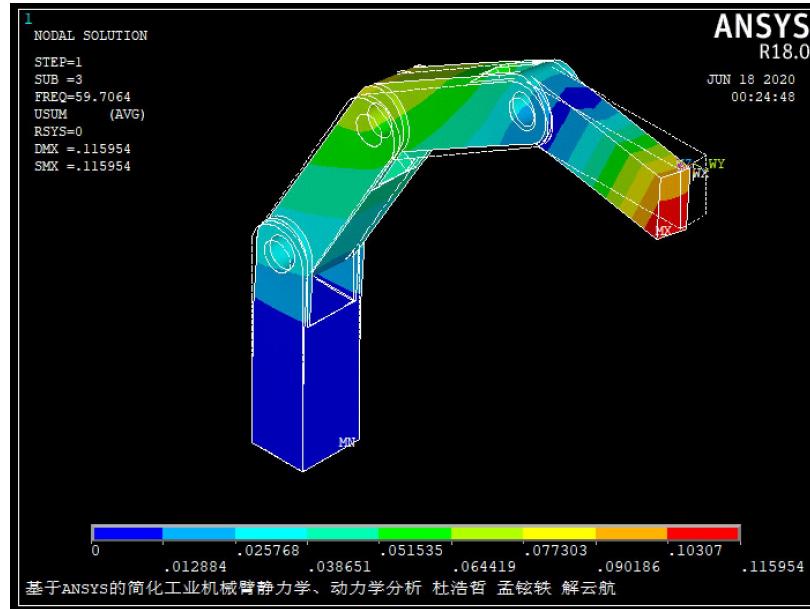


图 44 机械臂第 3 阶振型

用 PlotCtrls-Animate-Mode Shape 选项观察 3 阶振型，机械臂在进行横向振动的同时还伴随着类似绕末端轴线方向的转动的扭曲运动。

(4) 第 4 阶：

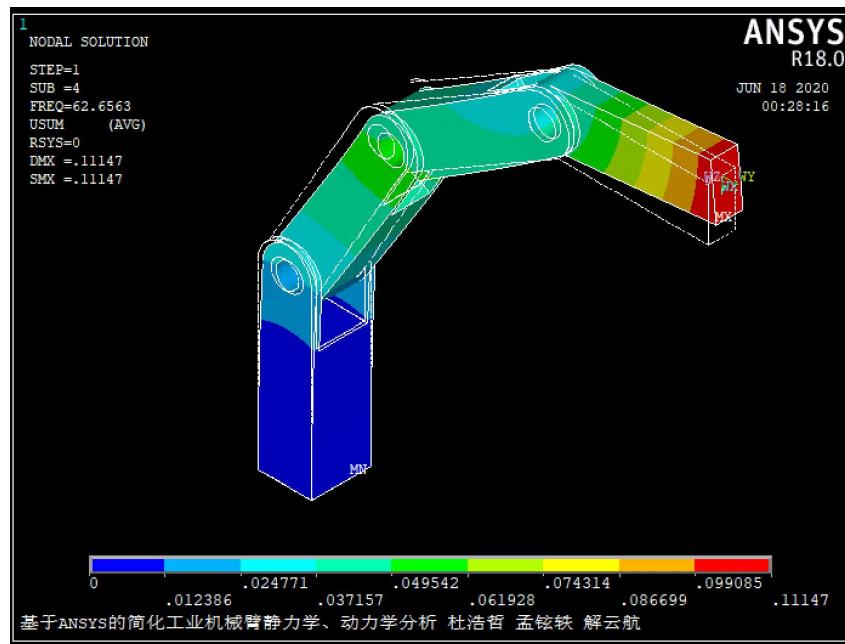


图 45 机械臂第 4 阶振型

用 PlotCtrls-Animate-Mode Shape 选项观察 4 阶振型，机械臂在俯仰摆动的过程中也会进行轻微的横向摆动，运动形式更加复杂，与第 1 阶振型的运动是有不同的。

(5) 第 5 阶：

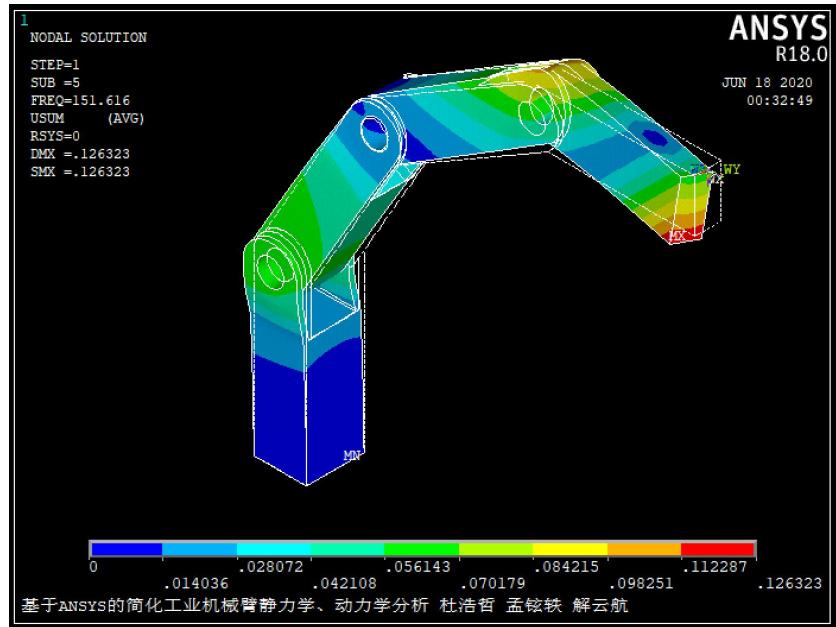


图 46 机械臂第 5 阶振型

可以看出，第 5 阶振型的节点位移云图与前面的有着比较明显的不同，比如从下往上第一个转动副的相对位移增加，末端连杆的节点位移分布中中间部分的位移很小。用 PlotCtrls-Animate-Mode Shape 选项观察 5 阶振型，其振动三种方向的振动都有，合成一个比较复杂的振动形式，从下面的其中一帧的图片也可以看出振动的复杂性。

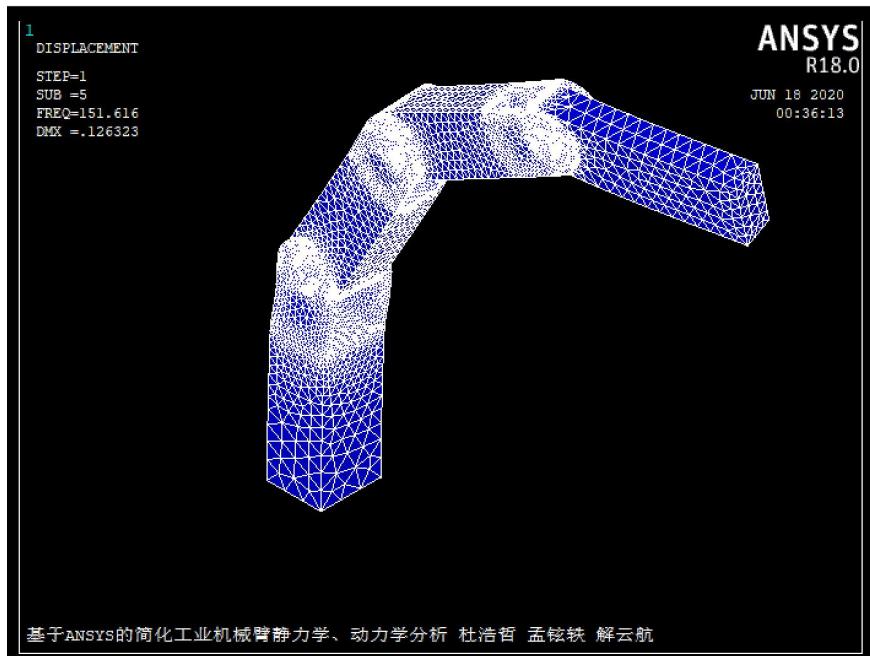


图 47 机械臂第 5 阶振动形式（某一帧）

然后，我们还探究了不同材料的前 20 阶固有频率。

表 8 铝合金（左）和镍铬钢（右）的前 20 阶固有频率

***** INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE *****					***** INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE *****				
SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE	SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	15.609	1	1	1	1	30.151	1	1	1
2	16.492	1	2	2	2	31.917	1	2	2
3	59.706	1	3	3	3	115.30	1	3	3
4	62.656	1	4	4	4	121.00	1	4	4
5	151.62	1	5	5	5	292.56	1	5	5
6	182.80	1	6	6	6	353.05	1	6	6
7	246.89	1	7	7	7	477.24	1	7	7
8	300.99	1	8	8	8	581.32	1	8	8
9	305.61	1	9	9	9	590.44	1	9	9
10	395.92	1	10	10	10	764.52	1	10	10
11	442.81	1	11	11	11	857.88	1	11	11
12	508.39	1	12	12	12	981.43	1	12	12
13	588.80	1	13	13	13	1138.3	1	13	13
14	608.77	1	14	14	14	1172.4	1	14	14
15	665.52	1	15	15	15	1282.3	1	15	15
16	706.82	1	16	16	16	1367.8	1	16	16
17	710.37	1	17	17	17	1372.2	1	17	17
18	827.98	1	18	18	18	1601.0	1	18	18
19	916.32	1	19	19	19	1766.1	1	19	19
20	1045.1	1	20	20	20	2021.9	1	20	20

可见，从固有频率的角度，选择合适的材料也是十分重要的。上表列出了铝合金和镍铬钢的固有频率，通过这样的有限元分析可以看出，镍铬钢的每一阶固有频率基本是铝合金的 2 倍左右。

六、总结与反思

我们认为我们的大作业还有一下不足和值得完善和发展的地方：

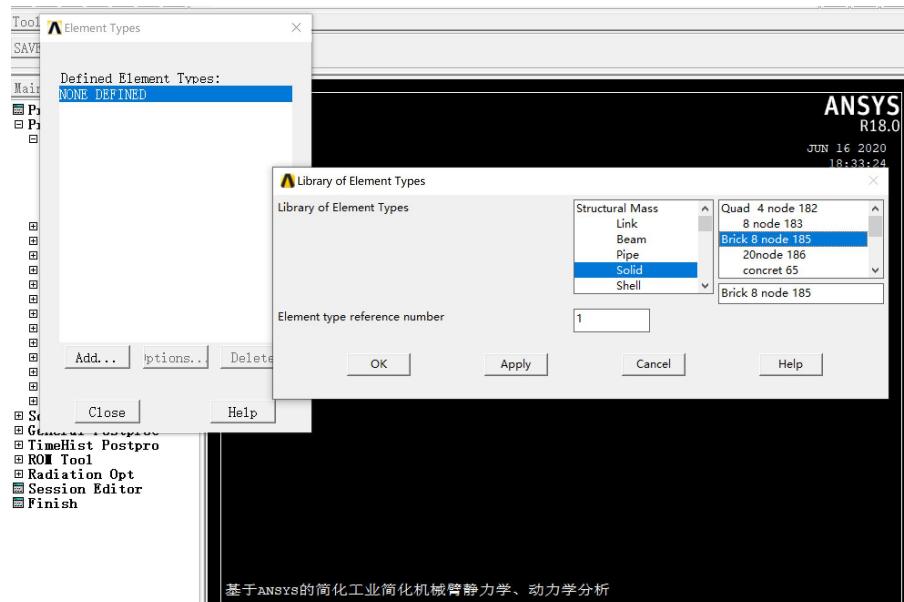
1. 划分网格可以更加精细化。在本次分析中可以看到，在转动副附近的网格划分十分密集，并不是特别理想，如果能够分不同部分进行网格划分，并进行相关属性设置，那么通过有限元分析得到的结果或许会更加精确。
2. 使用的时 ANSYS 经典模式，其建模能力较差，而且建模错了很难撤回，所以不得不对模型进行简化。事实上，ANSYS 的 Workbench 提供了更强大的建模能力和更友好的用户界面，如果需要进行更精细的建模，可以考虑使用 Workbench。
3. 我们还可以探究多种位姿对于节点位移、应力应变的影响。
4. 我们对于机械臂结构的改进还比较粗糙，只是为了验证这一想法，后续还可以进行更多的美化和创意的实现。

总之，这次大作业，我们从工程实践的角度去探究机械臂的静力学、动力学性质，通过 ANSYS 有限元分析，得到了许多值得思考的结果，也为机械臂的设计提供了一些思路。同时，将工程数值方法和机器人学所学内容进行交叉融合，巩固了课堂上所学。所以综上，我们通过大作业收获了很多，我们认为这次大作业也颇有意义。

附录

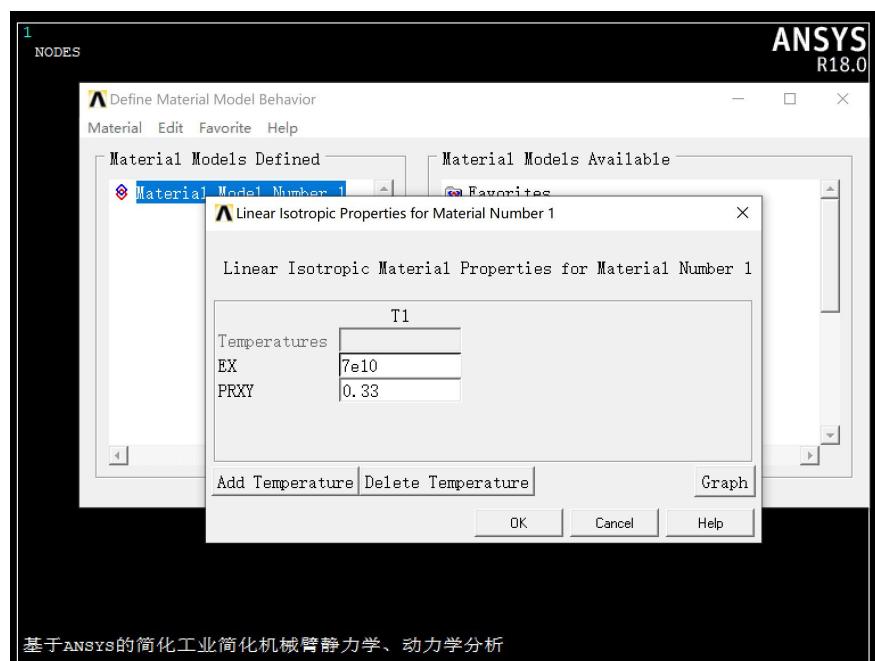
建模过程详细介绍

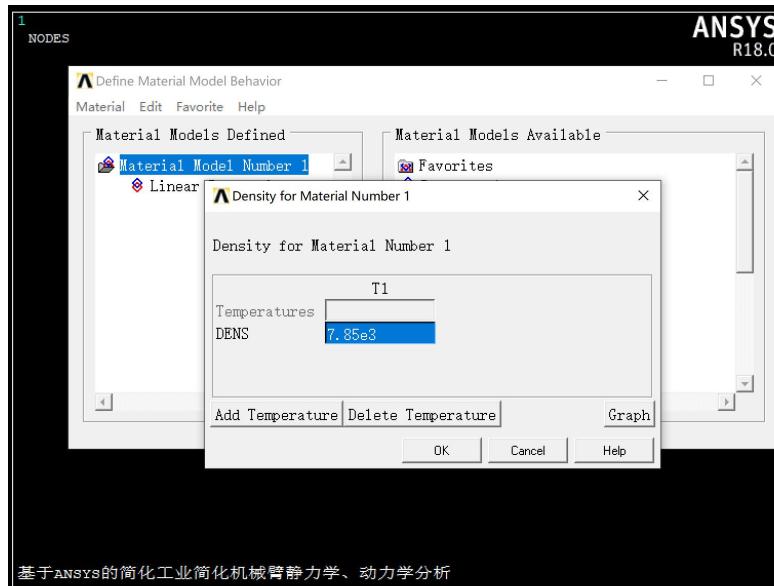
(1) 设置好 Element Type 为 Brick8 node 185



(2) 设置好材料的密度、弹性模量、泊松比

以铝合金材料为例进行建模:



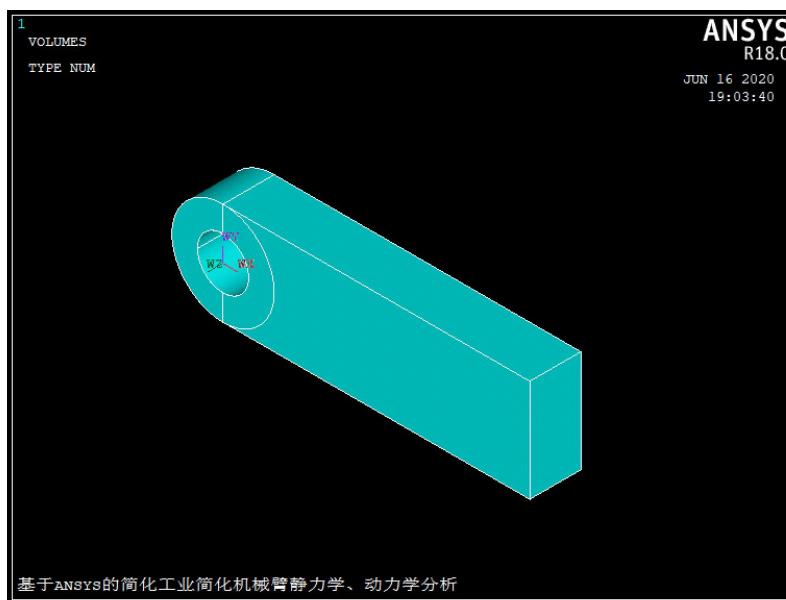


基于ANSYS的简化工业简化机械臂静力学、动力学分析

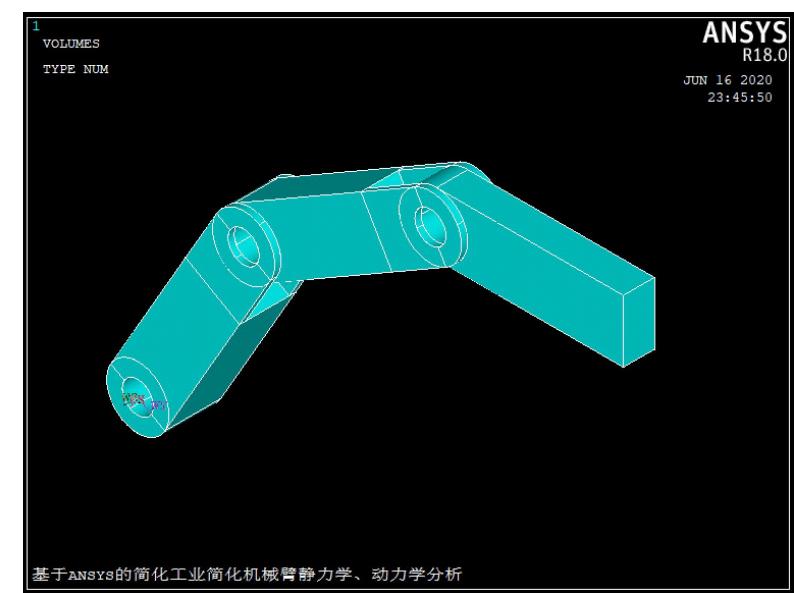
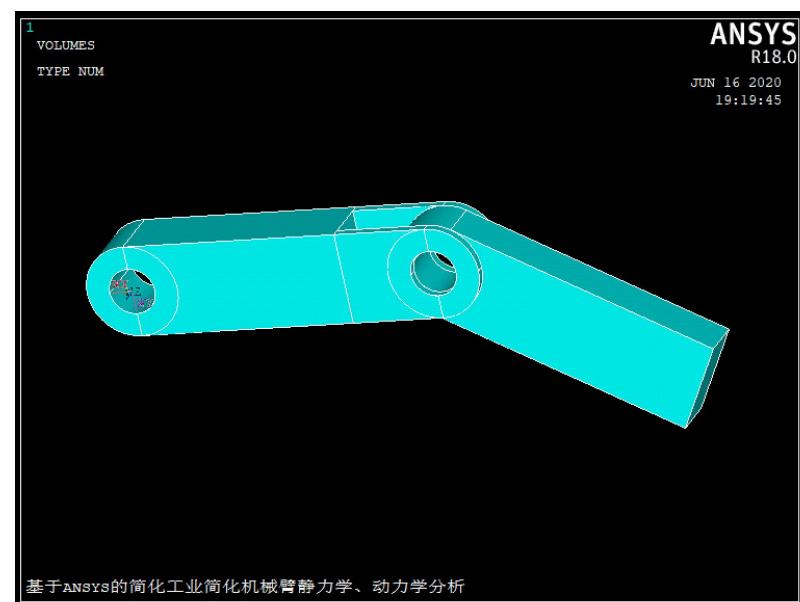
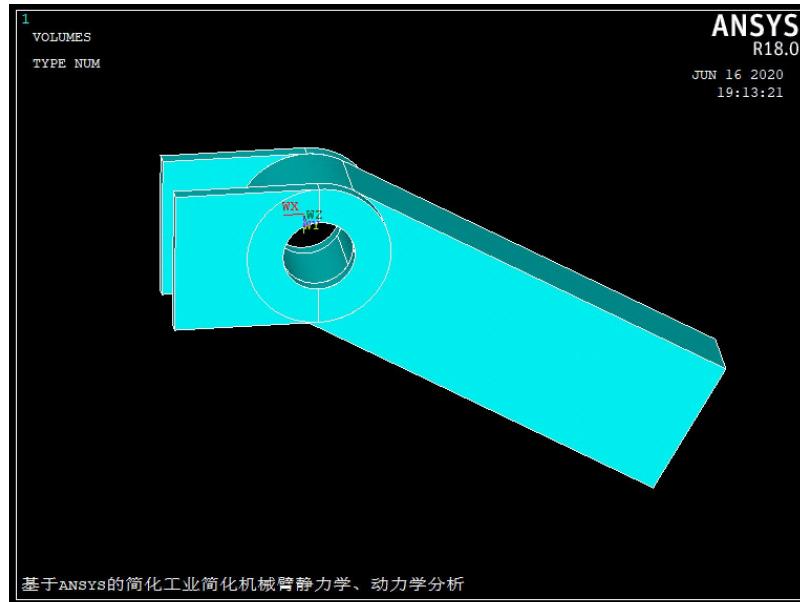
(3) 一步一步完成机械臂各个单元的构建

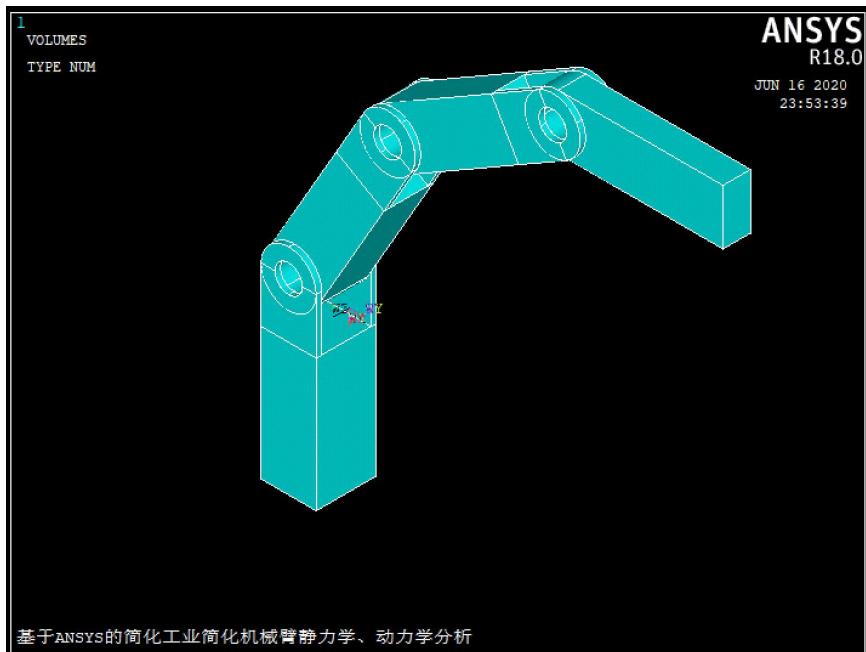
一步一步完成机械臂各个转动副和相应连杆:

建模时候的技巧主要是先建立好长方体，然后将 Workplane 工作平面移到相对应的长方体的边的中心，然后再建立不同圆柱体进行布尔运算加减画出这样的转动副。这样操作起来简单清晰。实现不同连杆之间通过转动副连接的时候，先画出两个薄板，再进行大的长方体的绘制和连接。



基于ANSYS的简化工业简化机械臂静力学、动力学分析





由此，简化的机械臂模型就建立完成。

KR16 机器性能参数

表 KR16 机器性能参数

KR16 性能参数

负载(指第 6 轴最前端 P 点负载)	16 公斤	
手臂/第 1 轴转盘负载	10/20 公斤	
总负载	46 公斤	
运动轴数	6	
法兰盘 (第 6 轴上)	DIN ISO 9409-1-A50	
安装位置	地面/墙壁/天花板	
重复精度	+/-0.05mm	
控制器	KRC2	
自重	235 公斤	
作业空间范围	14.5 立方米	
每个轴的运动参数	运动范围	运动速度
轴 1	+/-185°	156°/s
轴 2	+35°/-155°	156°/s
轴 3	+154°/ -130°	156°/s
轴 4	+/-350°	330°/s
轴 5	+/-130°	330°/s
轴 6	+/-350°	615°/s