

《柔顺机构优化设计》检测报告

PaperOK

总相似率：30.23%

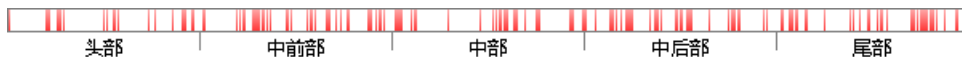
基本信息

文档名称	柔顺机构优化设计
报告编号	692eae59-7176-4951-b5e7-239ab64acac3
文档字数	11702
提交人姓名	周戩
提交方式	粘贴文本检测
检测范围	学位论文库（含硕博）、学术期刊库、会议论文库、法律法规库、互联网资源库、自建比对库
提交时间	2018-05-18 18:47:30

检测报告指标详情

原创率	抄袭率	引用率	字数统计	参考文献字数
69.77%	30.23%	0%	11702	-

相似片段位置图



注：红色部分为重度相似，橙色部分为中度相似，蓝色部分为引用部分

相似片段详情（仅显示前10条）

序号	篇名	来源	命中率
1	面向柔顺机构的拓扑优化设计应用拓展研究	学位论文库	4.96%
2	SU-8柔性微夹钳的拓扑优化设计与制作工艺-手机知网	互联网资源库	1.51%
3	基于变密度法的连续体结构拓扑优化研究	学位论文库	1.17%
4	纤维增强复合材料变形与损伤的细观力学分析	学位论文库	0.82%
5	基于ansys续体的拓扑优化与预应力优化.pdf文档全文免费阅读、在线看	互联网资源库	0.8%
6	基于整体应变的柔顺机构多目标拓扑优化设计	学术期刊库	0.71%
7	320吨矿用电动轮自卸车货厢与举升机构参数化和轻量化设计研究	学位论文库	0.65%
8	... μ 为材料的泊松比。由最小势能原理可以得到 单元的刚度矩阵的...	互联网资源库	0.63%
9	柔顺机构的分析及基于可靠性的优化设计-手机知网	互联网资源库	0.62%
10	基于拓扑优化的微夹钳设计 - jz.docin.com豆丁建筑	互联网资源库	0.61%

文档原文标注

柔顺机构国内外发展现状：

传统意义上，机构是一种机械装置，该装置是用来对力的传递，在传递的过程中，同时也会转换

能量和运动。它不会产生弹性变形，因为传统意义上的机构运动和力的传递是依赖于机构中的运动副。然而，由于运动副的原因，如果要对机构进行微小话，这些运动副结构的加工制造和装配维护等是非常的困难的。而且，由于运动副要进行相对运动，就要有一定的间隙，那么这些间隙就会产生运动方面的上不准确，也就是某些特定的动作精度达不到要求，这是传统意义上的机构所避免不了的问题。同时随着工业的发展，在许多领域，特别是在军事领域和航空领域的机械对精度的要求越来越高，那么如何解决这个问题呢。随着人们对机构方面研究的深入，发现了一种可以取代运动副的方法，那就是用材料的微小变形来取代运动副，主要思想是运动是靠这材料的变形而不会运动副机构的相对运动，这样的运动的精度会比传统意义上的机械运动的精度高的多。同时，随着在新材料、新工艺、新的制造技术不断出现的今天，和计算机计算领域的发达，这让微小机械的设计变成了可能，并且运用柔性材料的微变形，取代运动副，这让微小机械的制造和它的精度发生了翻天覆地的变化。随着这个领域的发展，由柔性材料制作微小机械，实现了一种不需要装配即整体式的造物，产生了一类新型的顺应人与自然和谐要求的新型机构——柔顺机构。

柔顺机构

柔顺机构的起源比较早，是由Buens和Crossley在1958年提出，之后柔顺机构的概念就出现在各大博士论文中。其中Her率先对柔顺机构的设计进行展开式研究。

如图1.1为柔顺卷边机构，有柔顺机构的研究者认为，柔顺机构与刚性机构的不同之处在于它是由柔性材料的变形而产生运动。当然柔顺机构也可以通过设计运动副，运用它来传递运动。其形状像一个扁嘴钳。输入力通过中间结构传递到输出端，但是任然由少量能量存在柔性部件中，它是应以应变能的形式存在的。同时，它是一个独立分机构，因为它的全部装置都是刚性的，不存在运动这一说。

图1·5柔顺钳

柔顺机构其实在很早以前就出现了，它也不是人们凭空想出来的机构，它的设计思想不是人们凭空想出来的，而是来自生物在环境中进化而设想出来的。以往，人们对于机械的设计吸光性选择刚性机构，因为刚性几乎不会变形，就代表着强壮，所以刚性机构是作为机械设计的首选。但是其实在自然界中，人们所接触到的许多生物体，它们的机构都具有多多少少的柔性，并不都是刚性的。比如人类的胳膊，它是由肌肉的变形而产生运动，肌肉明显就是一种柔性材料。还有几乎所有的微生物，他们没有脊椎等，几乎全都是靠着柔性来起支配作用。其实人类以前就对柔性机构有了一定的设计，比如古时候打仗人们用的弓，它是由材料的变形而存储能量。通过人们对柔性机构的接触，人们还发现了柔顺机构的使用寿命一般比刚性机构的使用寿命长。那么现在，人们对柔顺机构理解是机构中由柔性的那一部分，不一定是整个机构。同时，柔顺机构主要分为两个类，一类是部分柔顺机构，然而它柔性构件和刚性构件。另一类就是全柔顺机构，如图。这里我们重点介绍一下全柔顺机构，它被分为两种类型：一种如图所示的集中式柔顺机构，它因其弹性变形主要集中在机构的柔性铰链处得名。另外一种分布式柔顺机构，如图，顾名思义，它的柔顺部分不同于集中式柔顺机构，而是呈均匀分布在整体机构中。

图1·6柔顺机构的分类

柔顺机构是一种新型机构，它的一些特性与传统的刚性机构的特性千差万别。比如它是靠变形而不是靠运动副来传递运动和力的特性，这也是它的优越性。同时，柔顺机构也有两方面的优点：它的成本较低，它能提高机械性能。如图为超越离合器，它是一体做成的，不需要安装，而且总零件数相对于传统机构少了不少，同时在总零件数减少的情况下也降低了成本。

图1·7柔性超越离合器

柔顺机构现在在航空领域有着很大的发展潜力，主要是因为可以不需要运动副，或者是只需要少量的运动副。这样相对于刚性机构就减少了磨损，以此同时，它还可以做到轻量化和微型化。所以，有柔顺机构的特性，使得它不只在航空领域，甚至在一些医疗设备领域等需要精度高的机械领域都有很大的发展潜力。

柔顺机构的设计方法

柔顺机构虽然在性能方面相对于刚性机构有很多优势，但是它的设计方面就相当复杂，主要是弹性变形的特性没有那么系统化。目前，主要有两种设计柔顺机构的方法，第一类是伪刚体模型，第二类就是拓扑优化方法。第一类方法的主要思想是用刚体来近似代替柔性的变形，使得它们的运动近似。拓扑优化方法就是采用拓扑的技术，拓扑出机构的形状和尺寸。

基于伪刚体模型的设计方法

在柔顺机构的早期，人们还没有完全抛弃刚性机构的思想，因此，基于伪刚体模型的设计方法仍然带有刚体运动学基础，然而在这基础上再加入柔顺构件，从而得到了前面介绍过的部分柔顺机构。其实它的基本思想就是用刚体来近似代替柔性的变形，使得它们的运动近似。

如图，图中解释了基于伪刚体模型的设计方法，如图是一个悬臂梁，它的一端固定，另外一端承受的载荷。如图是相应的伪刚体模型。该模型以用伪刚体杆件代替了相应的柔性悬臂梁的转动，其误差在规定的范围之内。

基于拓扑优化的设计方法

基于伪刚体模型的设计方法虽然能很好的对柔顺机构用刚体作为代替，但是它的设计也有很大的局限性，主要是它的思想还是没有完全拓扑刚体运动特性。然而柔顺机构的拓扑优化很好的解决了这个问题。基于拓扑优化的设计方法可以很好的针对连续体。它的主要思想是将连续体离散化，然后根据有限元法模型进行建模。现在柔顺机构的拓扑优化方法大致分两类，一类是基础结构法，另一类是相对密度法。两者的建模思想还是在设计变量上有区别。对于模型的目标函数和约束条件还是类似的。一般柔顺机构的拓扑优化的目标函数是多目标函数，有使得柔性最小的同时又能保证输出位移最大且输出位移处足够的刚度，这就是一个多目标。在输出位移最大且有输出位移处足够的刚度的基础上提出了互应变能。它相当于在输出位移处有一个一定弹性模量的弹簧，这样就能体现出输出位移处能承受一定的载荷。在有了目标函数的同时，加上相应的约束条件和相应的输入载荷，通过优化算法，最终可以得到柔顺机构的相应的拓扑形状。其实，只要模型建的足够好，最终的最优解不只的机构拓扑形状，同时还确定了机构的具体尺寸。

本文主要研究的内容和工作

柔顺机构和刚体机构不用，它对力和能量的转换和传递不是刚体机构那样通过运动副，而是通过弹性变形。它的输出位移等精度都要有着微米级要求，因此它的设计和其他刚性材料有着一定的差别，因此，柔顺机构的拓扑优化变得十分重要，本文就是围绕着这个问题展开。

本文拓扑优化的方法，采用密度惩罚函数插值法描述拓扑模型并以优化准则法进行优化，之后对柔顺机构的具体尺寸进行了优化和对柔顺机构进行了动静态分析

1基于密度惩罚函数插值法，建立以网格单元的相对密度为设计变量，以材料利用率和方向自由度为约束、将输出位移最大化作为优化目标的拓扑优化模型，并用优化准则法对模型进行优化求解

2根据柔顺机构动静态平衡的相关理论，用ansys对柔顺机构进行动静态分析。

本章小结

本章首先介绍了柔顺机构在国内外发展的现状，以及柔顺机构的优化方法。同时重点说明了柔顺机构拓扑优化设计的研究情况，给出了柔顺机构拓扑优化的相关定义，确定了研究对象。

拓扑优化模型

相对密度法

OC算法

相对密度拓扑优化算例

整体刚度矩阵

应力约束

算例结果与流程图

本章小结

拓扑优化模型

对柔顺机构的拓扑优化设计进行分析研究，需要有一个柔顺机构要满足的设计域，然后将设计域进行离散化，把设计域分成独立的微小单元，并根据柔顺机构所要求的性能选取合适的目标函数、设计变量、约束条件和终止准则，并以上述要求搭建数学模型。对于拓扑优化问题而言，如何用数学表达式来描述拓扑模型，即模型的设计变量的选取是整个问题的关键。不一样的数学表达方式将会使得设计问题产生不一样结果。另一个关键就是对所给出的模型求解最优解的优化算法的选取。选取适当的优化算法对于结果的好坏也将产生直接的影响。下面将重点介绍应用较为广泛的密度惩罚函数插值法（SIMP）和优化准则算法（OC）

相对密度法

拓扑本质上来说就是指设计域中实体材料与空腔的分布，那么，拓扑优化问题实际上就是一个 $\{0,1\}$ 离散变量的组合优化问题，即设计域中哪一部分为空腔变量值就为0，哪一部分为材料变量值就为1，那么拓扑优化问题的最优解就是通过不断的迭代，求出设计变量 $\{0,1\}$ 值得分布。拓扑优化问题中拓扑描述方式就关键性的决定着设计变量最优解。在拓扑优化方法中，以均匀化方法，变密度法与基础结构法最具有代表性。

均匀化法

均匀化法是相对密度法中的一种方法，它是一种常用的参数方法。这方法在拓扑优化问题上是由Bendsoe和Kikuchi提出，刚开始它只是用于求解一些机构柔度最小的问题，在后面对它的深入研究，在它很好地解决柔顺机构的设计问题。

该方法的主要思想是对设计域网格化，但是网格单元不是普通的网格单元，而是一些微结构，它们是基于一些包括材料空腔的胞元。如下图所示，用3个变量表示：，它们表示胞元中的一个矩形空的三个参数。若，胞元充满材料（即为实体）；若，胞元是空腔；介于0和1之间的表示有孔结构。通常将方位角定义成与主应力方向一致。的最优值可转化成连续的密度值，是孔的几何形状和方位角函数。接卸来我们可以计算结构的有效属性，即均匀化的弹性张量。对于一些尺寸的孔，它们的通常存放在数据表中，而中间密度可以通过插值得得。

此处有图（柔顺机构设计与理论书本P94）

变密度法

上面讲述的均匀化法能很好的解决拓扑优化问题，但是它有一个缺点，那就是它的设计变量比较多。为了解决这个问题，变密度法随着产生。变密度法的设计变量相对于均匀化法的设计变量有所改动，它的设计变量的取值是之间的值。并且，它是直接用一个密度与相应的弹性模量的乘积来最

为一个新的弹性模量，这样就对模型进行了很大程度上的简化。它的最核心的思想就是把材料密度的优化取代了之前的结构的拓扑优化。由于这样的思想，变密度法的程序过程简单了许多，因为它的设计变量减少了许多。因此变密度法得到了业内人士很好的推广。但是，虽然它解决了前面均匀化法带来的问题，却也带来了新的问题，那就是对于设计变量取中间值，也就是说材料的密度取中间值是一种不太理想的材料。

变密度方法主要可以分为两种不同的模型，一种是SIMP模型，另外一种为RAMP模型。这两种模型的结构差不多，它们采用了一种对材料密度取指数的方法，这个指数被称为惩罚因子。惩罚因子的主要作用就是使得设计变量的值小概率在0和1的中间，大多数情况下都是靠近0或者靠近1。这样当设计变量为（0,1）之间的值时，该设计变量会产生指数级的数值，这些数值将会对目标函数带来很大的惩罚，所以使得中间密度向0或者1靠近。用上述的思路就可以把一个连续变量的拓扑优化模型转化成了一个近似0-1规划的优化模型了。并且中间密度的惩罚不会对拓扑模型带来关键性的失策，因为中间密度单元只是相对应一个很小的弹性模量，对结构的刚度矩阵的影响将是非常的小，几乎可以疏忽它。

本文讲述的SIMP密度刚度插值模型对中间密度的惩罚由下式表达：

式中 ρ_0 为设计变量为1时的弹性模量，它体现了材料的初始弹性模量。为惩罚因子，表示第 i 单元的弹性模量，它表示模型对初始弹性模量的修改。通过上式密度、初始弹性模量、设计变量和惩罚因子的表达式。得到光滑的材料插值模型。在上式中，惩罚因子 扮演着关键性的作用，也是SIMP的核心，它的取值会对计算结果带来很大的影响，理论上来说，它是越大越好。但太大的参数容易引起棋盘格现象。惩罚情况如下图所示

此处有图（柔顺机构设计与理论书本P94）

通常，基于变密度法的优化模型如下：

式中， ρ 为设计变量，它的取值就是材料的相对密度； N 为设计域中的有限单元个数； K 为结构的总体刚度矩阵； U 为结构的总体位移向量； F 为结构所受载荷向量； C 为目标函数，为结构的柔顺度； V 为结构优化后的体积； V_0 为结构单元体积； V_{max} 为初始结构体积； V_{upper} 为体积上限； ρ_{min} 为优化后材料利用率； ρ_{lower} 为最小相对密度。

OC算法

对于拓扑优化问题，目前使用较多的优化算法有遗传算法（GA）、序列凸规划算法（SCP）、和优化准则算法（OC）

本文运用的优化准则算法对SIMP模型的求解。优化准则从工程上有一定依据的假设，建立优化设计的准则和迭代公式，然后进行迭代求解。

由上一节可知，SIMP法对中间密度的惩罚形式为：

那么基于SIMP法的拓扑优化问题的优化模型表达式如下：

灵敏度分析

位移

从而可得位移对设计变量的偏导为：

体积

得体积对设计变量的的偏导为：

目标函数

由前面式子综合可得目标函数对设计变量的偏导为：

准则算法

针对该优化问题得到相应的拉格朗日函数如下：

当 时取极值，上述拉格朗日函数应满足Kuhn-Tucker必要条件为：

当 时，设计变量的上下限约束不起作用，当 时，设计变量的下限约束起作用，当 时，设计变量的上限约束起作用，故上述Kuhn-Tucker条件等价于下式：

对于上式等于0的情况，并且由 可得：

将 ， 代入上式，并利用结构刚阵的对称性则：

能够通过选取合适的 值来去除式中的 项得到：

变换上式得：

假设

式中 为阻尼系数，引入 的目的是为了确保数值计算的稳定性和收敛性。

Kuhn-Tucker条件乘子 迭代方案

每次迭代与体积有关的拉格朗日乘子 的值2变化的，它的求取可以通过常用的牛顿法或二分法，为简便起见本文运用二分法进行求解，迭代步骤为：

因为 ，找到极限

计算：

计算： 并更新

迭代次数加1，并且重复（2），（3），直到

式中 可接受的体积约束容差度。

相对密度拓扑优化算例

本文以一个桥梁柔顺机构为例，由于桥梁可看为对称问题，拓扑优化设计域为桥梁的右半部分，由 个节点组成。如下图，其中节点1上有一个垂直向下的力 作为对桥梁的载荷，由于桥梁的左右对称原因，设计域最左边的所有节点都有在 轴方向位移约束，另外，设计域最右边节点在 轴方向位移上有约束，当我们确认材料利用率时，以整个桥梁的柔性最小最为目标，求解最优解。

该拓扑优化问题用数学形式可以简单描述为：

其中 为输入载荷； 为在载荷 作用下节点位移矢量； 为材料利用率； 为桥梁的刚度矩阵。

上图表示了设计变量都为1的桥梁的初始状态图，之后通过OC算法，判断一个单元相对密度的“有无” 不断迭代设计变量，更新设计变量。根据OC算法的思想，我们具体设置如下：

式中

为正的可动界限

为数值阻尼系数

为由 求得的系数

其中

整体刚度矩阵

整体刚度矩阵 由设计域中所有的单元刚度矩阵 组成。计算出整个单元的单元刚度，就可以将其组合成整体刚度矩阵。

第一步选择适当的坐标系，写出单元的位移和节点力向量。

选择如图4-9所示，直角坐标系。单元的三个节点按逆时针方向排列。节点坐标为

平面弹性问题，所有的单元都在里面。每个节点有两个自由度。和，所以一个三节点的三角形单元有六个位移自由度和僵硬的六个节点力分量如图4-10所示，可分别写为。

因每个向量含有6个分量，因此单元刚度矩阵 应该是 6x6 的

第二步，选择适当的位移插值函数。

平面弹性问题，每一节点对应x和y两个方向的位移。三节点三角形单元共有六个节点自由度位移插值函数中应包含六个待定的常数 最简单的函数形式是两个线性函数。

上市中有常数项，一次项，而且线性函数在单元内必定是连续的，在单元边界上可由该边的两个节点函数值所唯一确定。因测试满足前面讨论的对位移插值函数的要求，将他写成矩阵形式有。

第三步求单元中任意一点位移 以节点位移 的关系。

这一步的目的是求出待定系数。将各节点坐标分别代入式中有

总起来有

由上式可得，其中

式中

求出用节点为表示的待定系数，位移插值函数可以写成。

其中 一般称为单元形状函数。因为它只与单元节点坐标及其相应的坐标变量有关，完全由单元的原始形状所决定，而与节点位移无关。

如果将式 写为下列形式

其中

则形状函数可以写为

其中

第四步：求单元应变—单元位移—节点位移之间的关系

由上式有

或写为

将 代入，有

其中

矩阵 称为三角形单元几何矩阵

第五步：求应力—应变—节点位移间的关系

先看平面应力问题。由上面物理方程有

改写一下，有

或

其中，矩阵 为平面应力问题弹性矩阵。

平面应变问题的弹性矩阵 可参考上面写出

由上式联合可得应力与节点位移之间的关系式

当然。平面应力问题和平面应变问题的弹性矩阵 有不同的形式，为方便计，我们写成统一的形式：

对平面应变问题

对平面应变问题

第六步：求节点力与节点位移的关系

借用第三章中虚功原理推导的结果，则节点力与节点位移间的关系为

三节点三角形单元的几何矩阵 和弹性矩阵我们已经得到，而且它们都是常数矩阵，因此可以提到积分符号以外。从而积分只剩下 ，其结果是单元厚度 乘以单元面积 。对于等厚度单元，有

其中

因此，单元刚度矩阵为

由于 为常量，三角形单元的 可以显示地得到。

从而三节点三角形单元的刚度矩阵 为

式中

单元刚度矩阵 建立之后，就可以将各个单元的矩阵装配构成设计域的整体单元刚度矩阵。整体刚度矩阵的装配是根据设计域上所有的单元节点编号进行的。

算例结果与程序流程图

本章小结

本章介绍了密度惩罚函数插值法、优化准则法的基本思想，并引入以此为基础柔顺机构拓扑为例，介绍了上述方法对桥梁拓扑的成果。其中重点介绍了作为柔顺机构优化问题中十分重要的整体刚度矩阵构造方法。

微夹钳的拓扑优化

微夹钳的背景

微夹钳的互应变能

微夹钳的建模与求解

结果

微夹钳的拓扑优化

微夹钳的背景

微夹钳在尺寸为纳米或者微米级的机械领域有着重要的地位，它是重要的、关键性的一种微型执行器件。对于微夹钳，它的通用性和它的夹持范围是对微夹钳的引用前景起着关键性的影响。

微夹钳目前要难题的在它的钳体结构上的设计，它的设计方法主要分为两类方法，一类是人们对于夹钳概念的经验设计方法，另外一类是对钳体的优化设计方法。在优化设计方法上，其中有伪刚体法和对柔性铰链进行优化的方法。但是上述方法都有它们的不足之处，那就是必先知道微夹钳的机构类型。这时，另外一种优化方法的出现就显得格外重要了。微夹钳的拓扑优化方法很好的解决了合格问题，它在不知道微夹钳的机构类型的情况下，就可以直接得出微夹钳的相应机构。因此它得到了广泛的应用。

本文将用对密度法模型，对微夹钳的设计域进行网格化，之后在相应的约束下，以输出位移最大，即目标函数为柔性小的同时输出端位移要最大的情况下，求出微夹钳的具体机构形状。

微夹钳的应变能和互应变能

一般来说，在柔顺机构的设计中，我们只需要使得目标为满足约束条件的情况下，整体分柔性最小，就如前面我们描述的桥梁的拓扑优化，只需要在满足桥梁所受载荷和位移约束的条件下，使得桥梁的柔性最小。但是，当对其他柔顺机构来说，这样的目标函数还是不够的，例如：微夹钳的拓扑优化。当一个输入力作用在输入端的给定方向上时，在输出端的指定方向上给定预期运动就构成了柔顺机构的运动要求。因此，在输出端产生需要的位移就必须要有足够的柔度。然而，如果连续体的柔性太大，它将不能承受任何输出载荷。因此，为了能够支撑输出端的作用载荷或抵抗外部物体在输出端产生的力，也需要有足够的刚度。所以我们引入应变能和互应变能的概念。

应变能和互应变能的定义如下式：

为应变能，表示连续体的柔性。为互应变能，表示输出端位移的表达式。为整体的刚度矩阵。

微夹钳的建模与求解

目标函数

微夹钳的拓扑优化模型，我们运用之前所讲的相对密度法的思想，只是对目标函数稍加修改。微夹钳如果要输出端产生需要的位移就需要有足够的柔度，然而输出端要承受一定的力就要有一定的刚度，所以这是一个多目标优化问题，但是我们运用应变能和互应变能的组合函数，把它变成单目标函数。

这两个目标可以有多种方式组合。线性加权组合公式可以给出一个目标函数，定义为：

加权因子 可以用于调整 和 标准化值得相对权重。由于 前面有一个符号，而 前面有一个正号，这意味着，当最小化 时，使 最大，而是 最小。

也有机械效率最大化组合方式，定义为：

参数的确定和求解

根据拓扑优化的理论模型，设计一种钳口常开型的微夹钳钳体部分，钳体部分的设计域如图1所示，由于设计域以及边界条件均为上下对称，所以为了简化设计过程，只对设计域的上半部分进行拓扑优化设计，如图2。

设计域网格的划分

在对设计域的拓扑之前，由于设计域材料是连续体，因此如要把设计域离散化，也就是运用有限元法进行对设计域的网格划分。划分结果如图3，以设计域坐上角为坐标原点，以垂直向下为 轴的正方向，以水平向右为 轴的正方向。同时，把设计域等分割成 个单元，每个单元之间以节点相连接，节点按一定的规则排序，从上到下，再从左到右的排序，总共有1600个节点。同时，每一个节点都有两个方向上的自由度，如图4。

约束和载荷

根据有限元法的思想，需要把对连续体的约束和对连续体的载荷转移到相应的节点上来，用节点上的载荷和节点上的约束代替实际载荷和约束。因此，先假设所有的节点的两个自由度都没有约束，在把相应节点的相应的自由度控制为0，对于上述设计域，节点为 的节点的两个轴方向的自由度都被约束了。

Matalb对模型的求解

由上面所述，对于多目标优化问题可以转化为单目标问题，本文运用第二种组合方式，即表达式如下，

程序流程如图

在程序的流程中，一些参数的初始化对优化的结果会产生很大的影响。例如 轴方向上的单元个数， 轴上的单元个数，优化后的材料利用率 和材料插值的惩罚因子。开始，对这些参数的设置为

经过matlab的迭代求解求结果如图

由上图可以看出，随着迭代次数的叠加，目标函数值呈下降趋势，当迭代次数到150时，结果目标函数值趋近于0。

第0次迭代 第1次迭代 第2次迭代 第3次迭代

第4次迭代 第5次迭代 第6次迭代 第7次迭代

最终优化结果

由上图可以明显看到，随着迭代次数不断增加，微夹钳的模样越来越清晰，到第4次迭代几乎形状就趋近于稳定，得出的微夹钳拓扑结构经验上可以实现夹捏的功能，但是，由图片上看到，拓扑出的形状并不是光滑的曲线，而是像棋盘一样的小块，故名是棋盘格式。解决棋盘格现象的方法有很多，本文主要讲解网格过滤法，且运用网格过滤法来去除棋盘格现象。

网格过滤法由Sigmund提出，用于修改目标函数的敏感信息

式中， r 是预先定义的最小单元直径的一半， d_{ij} 为邻近单元 i 和 j 的距离。当 r 趋近于0时，灵敏度收敛于原始灵敏度，当 r 趋近于无限大时，各灵敏度相等。这种方法，通过对目标函数的灵敏度的修改，从而改变优化结果，使得优化结果更加的平顺。

在加入网格过滤过程之后，优化出来的结果如图

无网格过滤 有网格过滤

由上图可以看出，有网格过滤优化出来的结果对比与无网格过滤优化出来的结果数值上变的更加均匀，奇异值几乎没有。通过选取的不同的过滤半径来观察对优化结果的影响。不同的过滤半径对应的优化结果如下图：

从上图的拓扑优化结果我们可以看出，当时，优化结果出现棋盘格式，其结果等效于不施加过滤函数；当时，优化结果清晰，过滤效果明显，有效的去除了棋盘格现象；当时，优化结果出现较大变化，灰色单元开始增多，出现少量的中间密度材料。所以建议过滤半径的取值范围为。

本章小结

本章主要讲述了微夹钳的背景和微夹钳的拓扑优化，介绍了微夹钳拓扑的整个过程，包括它的互应变能、优化目标函数、约束条件、网格化方法及优化算法。并对结果的奇异值进行了网格过滤，根据不同的过滤半径得到不同的结果，最终取的最好的拓扑优化结果。

微夹钳的设计与ansys检验

微夹钳的具体尺寸设计

基于上一章拓扑出来微夹钳拓扑图，只是微夹钳的一个大概图样，是不能直接拿去加工的。所以需要进一步对拓扑图修改，确定微夹钳钳体的具体尺寸，使得微夹钳的性能更高。

下面采用单一变量法对钳体的尺寸进行设计：即仅仅改变某一尺寸的大小，而将其他尺寸固定不变，然后保证钳指位移的情况下，是其刚度最大，进而确定出该尺寸的大小。最终，微夹钳的尺寸设计如下图：

微夹钳的总高为70，总宽为34，厚度为3，夹指之间的距离为18。

微夹钳静动态特性有限元分析

微夹钳的尺寸由上一节已经确定，但是对于微夹钳的具体性能，它的输入载荷与输出位移之间的关系，输入载荷与输出加速度之间的关系等都还不清楚，要进一步对微夹钳的性能进行了解，需要对模型进行仿真。

ANSYS WORKBENCH是针对研发过程中异构问题而开发出的协同仿真软件，该软件可以对模型的静动态特性进行具体的分析。利用UG对微夹钳建模，将其导入ANSYS WORKBENCH中，设置相关参数，固定微夹钳低端并在输入处输入法向载荷，并对模型进行仿真。

对微夹钳的网格划分

对网格的划分有多种方法，同时对于有限元模型来说它是一个关键性的环节。不同的网格划分方法对计算结果的精度带来很大的影响。

网格单元的大小，网格的疏密分布和网格单元的类型是对模型的计算结果有着很大的影响。

如上图所示，不同的参数设置会影响动态分析结果的输出，在参数方式一的情况下，钳指的输出位移为2.1538mm，在参数方式二的情况下，钳指的输出位移为2.4499mm。参数方式一在网格单元大小上比参数方式二小，而且它的网格疏密度分布合理：即在应力大的地方网格单元多一些，在应力小的地方网格单元少一些。虽然参数方式一的运算时间比参数方式二长，但是在时间允许的情况下，参数方式一是更加合理的选择。

位移和加速度特性分析

采用有限元分析微夹钳的位移和加速度特性时，给微夹钳设置材料为弹簧钢，材料的弹性模量，泊松比，密度，屈服强度。输入载荷随时间变化，表达式如下：

仿真后结果如图

上图为微夹钳的位移特性分析图，微夹钳的夹指那里有最大的位移，符合对微夹钳的设计要求，且最大位移为2.7257mm。同时，上图也给出了随着时间的增加，位移随着时间的变化在线性的变大。表格是输入载荷和输出位移的具体关系。

上图为微夹钳的加速度特性分析图，由图中可以明显看出，在上夹指有着最大的加速度，在下夹指有着最小的加速度，这是因为上下夹指是对称的，它们的加速度方向不一样。但是它们的绝对值都是最大的，这符合微夹钳的设计要求，在夹指处具有足够的夹紧力。上图还显示了夹指最大加速度和最小加速度随时间的变化，可以看出它们是对称的，这验证了上面的说法。

下表为输入载荷和输出加速度的关系

本章小结

本章主要介绍了微夹钳的具体尺寸的确定和微夹钳的动静态分析。运用ansys软件，对微夹钳的性能做了详细的分析，根据设置不同的参数，得出不同的结果。

总结与展望

本文的主要工作

在学习和总结国内外关于柔顺机构拓扑优化知识的基础上，本文基于密度惩罚函数插值法与优化准则法，对柔顺机构拓扑优化的微夹钳的设计方法展开研究。具体工作如下：

1介绍了国内外柔顺机构的发展情况，并对柔顺机构的伪刚度法和拓扑优化法进行了细说。着重

介绍了拓扑优化法在柔顺机构中的应用。

2以桥梁为例子，对设计域进行拓扑优化，详细的描述了拓扑优化的整个过程，目标函数和约束条件的确定、优化准则法的运用和柔顺机构整体刚度的计算，最终实现了对桥梁的拓扑优化，并分析了拓扑出的结果。

3针对拓扑优化算法的应用，着重的讲解了微夹钳的拓扑优化及它的全部过程，包括设计域的确定、对设计域的网格化、载荷的确定、约束的确定及对优化结果的网格过滤。并进一步研究的各参数对结果带来的影响，选出对结果最佳的参数。

4通过拓扑优化出来的微夹钳的大概形状，确定微夹钳的具体尺寸，并运用ansys对微夹钳进行仿真，对仿真的结果加以分析，最终确定微夹钳的实用性。

对未来的展望

在柔顺机构研究领域，柔顺机构的拓扑优化不是出现的特别早，可以算是一个新的问题。随着机械领域的发展，人们对高精密和微小型化的机械的应用越来越强烈，使得柔顺机构的拓扑优化问题越来越重要。

本文所提出的方法虽然在一定程度上对机构的拓扑优化有所帮助，但仍有些不足和有所改进之处，具体如下：

1拓扑优化的约束问题没有很好的解决机构上的各种各样的约束，同时对于一些约束的约束力又太强，会造成优化的结果没有或是极少。

2本文运用个对结果奇异值网格过滤的方法是启发式方法，没有特别严谨的数学证明。

3把本文的方法及设计程序拓展到通用的有限元设计程序中，作为宏插件复合使用，比如ansys