某型号离心机吊篮拓扑优化设计

王东升¹, 刘青林¹, 钟继根¹, 蒋春梅¹, 郭中泽¹, 刘宁生² (1. 中国工程物理研究院 总体工程研究所, 绵阳 621900; 2. 开迪数字仿真科技有限公司, 北京 (00089)

摘要:在某型号离心机吊篮设计中,采用了拓扑优化设计。根据离心机吊篮的最大外形尺寸、连接边界、 承载质量、离心机最大加速度值等参数,确定了拓扑优化的设计区域、载荷条件、边界条件,并用 ANSYS 建 立了其有限元模型。以整体刚度最大为目标,根据吊篮质量要求施加拓扑优化约束条件,建立了书篮拓扑优化 的数学模型。采用 TOSCA 软件进行优化求解。拓扑优化后结构质量满足约束条件,则度显著提高。

关键词: 离心机; 吊篮; 拓扑优化; 有限元方法 中图分类号: V416.2; TB115 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2009.03.013

1 引言

离心机被广泛应用于航天器的加速度环境模 拟、混合物质的分离、岩土力学研究以及航天员体 能训练等领域。吊篮是试件的承载结构,是离心机 的重要部件之一。吊篮通过吊耳与离心机转臂销轴 相联结,位于最大离心场中,旋转时它所产生的离 心力是离心机的主要载荷之一,因而减轻它的重 量、合理设计其结构外形可明显降低离心机的功 耗。吊篮的结构形式通常根据经验采用网格结构。 传统的设计过程往往需要"设计一分析一改进" 多 次循环才能够完成,需要耗费较多的人力令时间和 经费。因此采用结构优化设计方法是解决该问题的 有效途径。

结构优化设计是用系统的、目标定向的过程与 方法代替传统设计,其目的在于寻求既经济又适用 的结构形式,以最少的材料、最低的造价实现结构 的最佳性能,主要包括拓扑优化、形状优化和尺寸 优化^[1]。其中拓扑优化是对任系结构的节点布局、 节点间的连接关系,或连续体结构的开孔数量和位 置等拓扑信息而开展的优化设计,是结构优化的较 高层次。结构拓扑优化设计的主要研究对象是连续 体结构,由于拓扑优化设计结果需要描述连续体结 构中各处的材料特征,即描述结构中各处材料是否 存在,其设计变量为无穷多个。将该问题转化为有 限个单元是否存在的问题,设计变量变为有限个, 利用数学规划法和准则法,依据给定的准则和约束 文章编号: 1673-1379 (2009) 03-0254-05

实现连续体的拓扑优化设计。结构拓扑优化在工程 结构设计的初始阶段可以提供一个概念性设计,帮 助设计者对复杂结构与部件能够灵活地、理性地优 选方案, 寻找结构最佳的传力路径^[2]。

常见的拓扑优化方法有: 均匀化法 (Homogenization Method, HM)、变密度法 (Pseudo-density Method)、渐进优化(Evolutionary Strutural Optimization, ESO)法等。其中均匀化法 及变密度法已日渐成熟,已经推出了基于这两种方 法的通用的商用优化软件,如美国 Altair 公司的 OptiStruct,德国 FE-DESIGN 公司的 TOSCA 软件 等。拓扑优化技术已被广泛应用于航空航天、船舶、 汽车、机械制造、微电子、新型材料设计等众多领 域,取得了良好的经济效益。

本文基于 TOSCA 及 ANSYS 软件对离心机吊 篮进行了拓扑优化设计,采用变密度法及优化准则 法(Optimality Criteria, OC)进行优化求解。拓扑 优化后结构质量满足约束条件,刚度显著提高。

2 整体刚度最大化的拓扑优化数学模型

离心力载荷作用下的结构优化属于静力优化 问题。对于结构静力优化,结构整体刚度最大等价 于结构的柔顺度(Compliance)C最小化^[3]。柔顺 度在数值上等于外力在结构真实位移场上所做的 功,也等于结构的单元应变能总和的2倍,其值越 小意味着结构的整体刚度越大,反之亦然,因此结

收稿日期: 2008-11-10; 修回日期: 2008-11-28

作者简介: 王东升 (1972-), 男, 高级工程师, 主要从事振动环境工程的研究工作。E-mail: wds720519@sina.com。 条件删除部分区域内的甲兀, 形成带扎的连续体,

构整体刚度最大也等价于结构的总应变能最小化。 对于有限元离散化的优化问题,以材料用量为约束 条件,可建立的拓扑优化设计模型为

find:
$$X = [x_1, \dots, x_N]$$

min: $C = F^T u$
s.t: $h(x) = \sum_{e=1}^N v_e x_e - V_0$, (1)
 $F = K u$,

$$0 < x_{\min} \leq x_e \leq x_{\max} = 1$$

式中: x_e 为设计变量,表示单元 e的存在状态,在 区间上[0,1]连续变化, x_e =1 代表单元 e为实体单 元,当 x_e =0时为空洞单元; F为节点载荷向量; u为节点位移向量; N为单元的总数; v_e 为单元体积; V_0 为用体积表示的结构设计允许材料用量上限; h(x)为结构单元总体积与体积上限的差值; K 为总 体刚度矩阵; x_{max} 和 x_{min} 分别为设计变量 x_e 变化上、 下限,为避免刚度矩阵奇异, x_{min} 常取 10⁻³或 10⁻²。

3 变密度法及材料差值模型

拓扑优化通过刚度-密度插值模型,实现了离 散型设计变量的拓扑优化问题向连续型设计变量 的优化问题的转化。变密度法是属材料(物理) 描 述方式的结构拓扑优化方法,即人为地引进一种假 想的密度可变的材料,其相对密度(伪密度 pseudo-density)和弹性模量之间的关系也是假定 的,每个单元的伪密度为设计变量,将结构拓扑优 化问题转化为材料最优分布设计问题,应用优化准 则法或数学规划方法求解材料最优分布设计。相对 密度是指材料密度和材料特性之间的一种对应关 系,常见插值模型有固体各向同性微结构/材料惩 罚模型(Solid Isotropic Microstructures/Material with Penalization, SIMP)和材料属性的合理近似模 型 (Rational Approximation of Material Properties, RAMP)。SIMP 或 RAMP 模型通过引入惩罚因子 对中间密度值进行惩罚,使中间相对密度向0或1 聚集,呈现黑白分明的拓扑优化设计结果,能很好 地逼近实体和孔洞分明的 0-1 优化结果。Tosca 程 序申提供了这两种差值模型供选择。

SIMP 插值模型是 Bendsoe^[4]提出的,可描述为

$$\begin{cases} E_e = (x_e)^p E_{e0} \\ \rho_e = x_e \rho_{e0} \end{cases}, \qquad (2)$$

式中: E_e 、 ρ_e 分别为单元材料弹性模量和密度: E_{e0} 、 ρ_{e0} 分别为实体单元的材料弹性模量和密度: ρ 为惩 罚系数,通常取 $p \ge 3$,其作用是在拓扑优化中能 够呈现黑白分明的拓扑优化结果图。

RAMP 插值模型是 Stolpe^[5]提出的,可描述为

$$\begin{cases} E_e = \frac{x_e}{1 + q(1 - x_e)} E_{e0} \\ \rho_e = x_e \rho_{e0} \end{cases}$$
(3)

式中: q 为惩罚系数,通常取 q≥2,其作用是在拓 扑优化中能够呈现黑白分明的拓扑优化结果图。

4 优化算法

拓扑优化的特点是:

(1) 约束条件往往属于结构性能一类, 数量较少;

(2) 设计变量非常多,且随有限元网格细分, 单元增多,设计变量增多。虽然可用常见的数学规 划方法求解,其稳定性较好,但是需要多次对约束 函数和目标函数进行求导计算,难以胜任。

序列凸规划适合求解拓扑优化设计问题,如凸 线性序列近似规划(CONLIN)、渐进移动线法 MMA(Method of Moving Asymptotes)等;另一类 是基于Kuhn-Tucker条件的优化准则法,是一种收 敛速度快、求解目标函数和约束函数次数较少的一 种方法,非常适合拓扑优化问题的求解。本文采用 优化准则法进行优化求解。

含等式约束的拓扑优化问题的标准形式为

min:
$$f_0(x)$$
,
s.t: $f_i(x) - \overline{f_i} = 0$, $i = 1, 2, ..., M$, (4)
 $0 < x_{\min} \le x_e \le x_{\max}$, $e = 1, 2, ..., N_{\circ}$

式(4)表示的优化问题的拉格朗日函数(Lagrange Function)为

$$L = f_0(x) + \sum_{i=1}^{M} \lambda_i f_i(x) + \sum_{e=1}^{N} \eta_e(x_{\min} - x_e) + \sum_{e=1}^{N} \mu_e(x_e - x_{\max}),$$
(5)

式中: λ_i 为总体拉格朗日系数; η_e 和 μ_e 是设计变量上下限约束的拉格朗日系数。

根据等式约束的非线性规划问题的 Kuhn-Tucker 条件可知:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial x_{e}} = \frac{\partial \left[f_{0}(x) \right]}{\partial x_{e}} + \sum_{i=1}^{M} \lambda_{i} \frac{\partial \left[f_{i}(x) \right]}{\partial x_{e}} - \eta_{e} + \mu_{e} = 0, \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda_{i}} = f_{i}(x) = 0. \end{cases}$$

假定上下限约束是主动的,则 η_e 和 μ_e 全部为零,于是有

$$\begin{cases} -\frac{\partial \left[f_{0}(x)\right]}{\partial x_{e}} = 1; \\ \sum_{i=1}^{M} \lambda_{i} \frac{\partial \left[f_{i}(x)\right]}{\partial x_{e}} = 1; \\ f_{i}(x) = 0_{\circ} \end{cases}$$
(6)

进而可以变量更新迭代格式为



式中: *ξ*为阻尼系数,通常等于 0.5, 也可以在 0~ 1 之间变化,引入阻尼系数的 日的是使迭代步骤稳 定; *k* 为迭代步数。

在设计变量迭代更新的过程中,不允许设计变 量有较大的变化,例如某个单元直接从实体到空洞 的变化,为此引入了个时做移动极限的量*m*,可 以在 0~1之间变化,通常取值 0.3。引入移动极限 的目的也是使迭代步骤稳定。于是变量更新格式 为:

$$x_{e}^{k+1} = \begin{cases} \max\left((1-m)x_{e}^{k}, x_{\min}\right), & \text{if } x_{e}^{k}\left(B_{e}^{k}\right)^{\xi} \leq \max\left((1-m)x_{e}^{k}, x_{\min}\right); \\ x_{e}^{k}\left(B_{e}^{k}\right)^{\xi}, & \text{if } \max\left((1-m)x_{e}^{k}, x_{\min}\right) \leq x_{e}^{k}\left(B_{e}^{k}\right)^{\xi} \leq \min\left((1-m)x_{e}^{k}, x_{\max}\right); \\ \min\left((1-m)x_{e}^{k}, x_{\max}\right), & \text{if } \min\left((1-m)x_{e}^{k}, x_{\max}\right) \leq x_{e}^{k}\left(B_{e}^{k}\right)^{\xi} \end{cases}$$
(8)

其中

$$B_{e}^{k} = \max\left(0, -\frac{\frac{\partial \left[f_{0}(x)\right]}{\partial x_{e}}}{\sum_{i=1}^{M} \lambda_{i} \frac{\partial \left[f_{i}(x)\right]}{\partial x_{e}}}\right) \circ (9)$$

5 吊篮拓扑优化

5.1 设计区域

设计区域是优化对象可以占据的整个空间区域,一般选取最大可能的区域,以充分挖掘优化潜力。设计区域一般采用简单的几何体,以便简化有限元模型的建立^[6]。对优化对象上需要保留的装配部位、联结螺栓孔、空洞及不允许改变的部分必须加以区分,这部分区域属于非设计区域。通常在建模的过程中将可设计区域与非设计区域的单元分组,以便在108CA中设置。

图 1 为吊篮的常用结构形式。根据离心机吊篮 外形最大尺寸及试验件安装空间等设计要求,确定 结构的设计空间如图 2 所示。图中红色及绿色区域 为不可设计区域,其他区域为可设计区域。红色区 域为与离心机臂销轴相联接的轴承,壁厚 40 mm。 绿色区域为试件的安装平面,厚 30 mm。吊篮材料 采用 45 号钢。设计空间内材料质量为 4972 kg,其 中轴承 47.665 4 kg,安装面 260.489 kg,其他部分 为 4 663.83 kg。



图 1 常见的离心机吊篮结构 Fig. 1 An ordinary centrifuger nacelle



图 2 设计空间 Fig. 2 The space for the design

5.2 分析类型和模型

针对不同的目标函数,有限元分析的类型可以 是静力学、模态分析、动力学分析。模型单元数的 多少决定了优化结果的真实程度,也决定了计算效 率。高阶单元比一阶单元精度高,优化结果往往较 好,但有限元分析所需计算量和对内存、硬盘等硬 件要求更高^[6]。为了确保能得到稳定、准确的有限 元解及较短的计算时间,采用不同的单元类型和网 格密度进行试算是比较常用的方法。

吊篮拓扑优化分析类型属于线性静力问题。有限元模型建立全部在 ANSYS 中完成,包括几何建模、划分网格、设定边界条件、施加载荷、设定分析类型等工作。边界条件为轴承内表面节点全部固支。载荷包括两方面:一方面是由于试件在离心力作用下施加在安装面上的压力,最严酷的工况为负载质量为1t、离心加速度150g,转化为力约为1.5×10⁶N;另一方面的载荷是吊篮本身在离心场中产生的体力。吊篮全部采用 solid 45 单元,单元数 88 740 个。

5.3 目标及约束

目标函数可以是柔顺度、最大位移、固有频率 等或以上几者的组合。约束包括材料用量和工艺约 束。材料用量是必须确定的约束条件,合适的材料 用量往往在优化结果出来以前无法精确估计,常用 的方法是指定几种不同的材料用量分别进行优化, 再从结果中选择最优的材料。在拓扑优化过程中, 可以针对锻造、铸造、机加工等不同的加工方式来 施加工艺约束,以保证优化结果的可制造性^[6]。 TOSCA中可施加的工艺约束包括最小/最大结构尺 寸、拔模(铸造)的角度和方向、各种对称条件等。

本文根据吊篮总质量小于 1 600 kg 的设计要求,以结构整体刚度最大化(即总应变能最小)为 优化目标,对吊篮进行优化。

5.4 优化结果

TOSCA 接 5.1~5.3 节的内容以命令流的形式 生成一个优化文件。优化文件包括: 读入有限元模 型,设置可设计区域及非设计区域,确定质量约束 条件,设定目标函数,材料插值模型,优化求解方 法,优化迭代步,优化结果输出文件类型等。

优化求解是一个迭代过程,每一个迭代步通常

包括有限元分析、灵敏度计算和修改材料分布,在 多次迭代后,材料分布趋于稳定优化即告结束。本 次优化在第 39 步结束,优化后的吊篮结构见图 3。 优化后吊篮总质量为 1 508.8 kg,约为优化前总质量 的 30%;总应变能降为原来的 8.74%。

5.5 后处理

即优化结果提取。连续体的拓扑优化结果是以 0-1 分布表示,不能马太制造使用,在3维情况下 甚至很难判断其具体形状,故必须将其转化为易于 理解的表达方式,如表面为角形网格,或转化为离 散结构,如骨架结构或板一杆一梁结构等^[6]。

(1) 平滑处理

由于拓扑优化是在有限元网格上进行的,所以 结果不可避免地带有有限元网格的局限性,如直线 成为锯齿状的折线,图3就是一个典型的例子。随 着有限元网格的加密,锯齿形状可以减弱,但无法 完全消除。Tosca采用等势面方法获得优化结构的 表面网格。程序将拓扑优化的原始结果视为材料密 度这一连续标量函数在空间离散点的取值,借助可 视化技术,建立起密度函数的等势面,最终以表面 三角形网格的形式来表示。平滑处理后表面网格覆 盖的体积与优化过程中指定的体积约束基本相同。 平滑处理后的吊篮优化结果见图4。



(2) 简化

从拓扑优化结果提取的网格往往含有大量单 元,其中包含了不少冗余信息,可以将其进行简化。 另外从便于制造和美观的角度往往也需要对一些 细节进行简化。

6 后续工作

6.1 非参数形状优化^[6]

拓扑优化旨在求得刚度最大的结构,并没有考虑强度条件。所以尽管整体最优,但往往在局部上还不够完善,会出现应力集中的情况。为了消除应力集中,必须进行局部修改,如形状优化。可以在建立 CAD 模型后,对 CAD 模型进行常规的参数优化;也可以直接对有限元模型进行优化,即非参数形状优化。由于后处理中得到的只是表面网格,所以在非参数优化前,还应将表面网格转化为实体网格。

6.2 优化结果的 CAD 建模^[6]

由于计算机很难理解 3 维优化结果所体现的 设计意图,也不能使用简单的造型元素将这些设计 意图表达出来,所以至今还没有一种通用的方法能 依靠计算机从优化结果中自动提取出 CAD 模型。 因此,这一工作对于熟练掌握造型技术的设计人员 来说,仍然需要花费大量时间。

建立 CAD 模型的过程是:首先将 TOSCA 提 供的 STL 或 IGES 格式的优化结果表面网格读入 CAD 系统,简化处理后,借助 CAD 系统的逆向反 求功能,参照优化结果,遂步建立起参数化 CAD 模型。由于要求所使用的 CAD 系统具有较高级的 逆向工程模块,所以一般需要 Catia、UGS_ IMAGEWARE 等高端 CAD 软件的支持。

在建立 CAD 模型后,可以再次划分网格进行

有限元分析,通过比较 CAD 建模前后目标函数的 偏差来评价建模过程对原始结果的忠实程度。

7 结论

(1)本文探讨了拓扑优化设计在离心机吊篮 设计中的应用研究,结果表明拓扑优化能够在离心 机吊篮的概念设计阶段获得最优的构型方案。优化 结果在满足质量要求的同时,如度提高显著。

(2) 拓扑优化是一个多学科交叉的工作,需要 CAD、CAE、CAM 等多学科技术人员的参与,除 了需要具备一定相关专业的知识外,还需要设计、 有限元分析、制造等工程经验的支持。

(3) 拓扑优化技术在国外很多领域已有大量 成功应用的案例,商用的拓扑优化软件也相对成 熟。国内的工程应用还较少,需要加强这方面的工 作,从而缩小与国外的差距。

参考文献 (References)

 (1) 郭中泽,陈裕泽,张卫红,等.基于单元材料属性更改的结构渐进拓扑优化方法[J].机械科学与技术,2006, 25(8):928-931

- [2] 隋允康,叶红玲,杜家政.结构拓扑优化的发展及其 模型转化为独立层次的迫切性[J].工程力学,2005, 22(增刊):107-118
- [3] Hassani B, Hinton E. A review of homogenization and topology optimization III—topology optimization using optimality criteria[J]. Computers and Structures, 1998, 69: 739-756
- [4] Bendsoe M P. Optimal shape design as a material distribution problem[J]. Struct Optim, 1989, (1): 193-202
- [5] Stolpe M, Svanberg K. An alternative interpolation scheme for minimum compliance topology optimization[J]. Structural Multidiscipline Optimization, 2001, 22(2): 116-124
- [6] 张卫红, 王敏. 拓扑优化技术在汽车工业的应用[J]. 昆明理工大学学报, 2005, 30(1): 77-81