DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2011.10.021

ANSYS 结构优化技术在机械设计中的应用

Application of ANSYS Structure Optimization Technology in Mechanical Design

南京航空航天大学航空宇航学院　　曾志华　虞伟建

[摘要]　介绍了 ANSYS 优化设计模块，并针对机械结构优化设计给出了具体设计步骤。用实例研究了结构优化设计在 ANSYS 上实现的基本思想及主要步骤。证明了用 ANSYS 优化分析功能实现结构优化分析的可行性，从而为其他复杂结构的优化分析提供了新的方法和依据，为从事机械优化设计人员提供了新的方法和思路。

关键词：ANSYS　有限元　接触分析　优化设计　接头

[ABSTRACT]　ANSYS optimization design model is introduced, and the concrete design steps for mechanical structure optimization are given out. Basic thought and key steps is introduced to realize structure optimization design on ANSYS with the instance, which proves the feasibility of ANSYS optimized analysis function to realize the structure optimization analysis. So that the new method is provided to the optimized analysis for the other complicated structures. New methods and thinking are provided for designer engaged in this aspect.

Keywords: ANSYS　Finite element　Contact analysis　Optimization design　Joint

结构优化设计作为一种寻找最优设计方案的技术，一直都是机构设计理论和方法研究领域的热门话题。长期以来，不少学者从不同角度提出了多种结构优化的方法，如极大熵原理、简单遗传算法、模拟退火法等，但这些方法普遍存在着求解复杂、实现困难等缺陷[1]。随着计算机技术的发展，结构优化设计 30 多年来在理论、方法和软件等方面都取得了相当显著的进展，可以通过采用基于有限元分析的 ANSYS 优化工具箱，结合面向对象程序设计技术进行结构优化设计计算，为人们长期所追求的工程结构和产品的设计最优化提供了先进的方法和工具，成为近代设计方法的重要内容之一。目前结构优化设计领域中的研究十分活跃[2]。

在工程应用中，求解复杂结构优化问题，通常需要自行编制有限元计算程序，此类程序不仅编制难度较大，而且计算结果的可靠性较差。在利用优化算法对结构进行优化时，将 ANSYS 作为有限元分析工具，替代人工编制的有限元程序，能大大节约结构优化问题的求解时间，提高计算结果的可靠性。通用有限元软件 ANSYS 的 APDL 语言为结构优化设计的数值分析提供了一个良好的开发环境，本文正是基于 APDL 利用其优化设计模块进行结构优化设计[3]。

1　ANSYS 软件

ANSYS 软件是融结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体，以有限元分析为基础的大型通用 CAE 软件，已广泛应用于机械制造、石油化工、轻工、船舶、航空航天、汽车交通、电子、土木工程、水利、铁道、日用家电等一般工业及科学研究。软件主要包括前处理模块、分析计算模块和后处理模块 3 个部分。前处理模块提供了一个强大的实体建模及网格划分工具，用户可以方便地构造有限元模型；分析计算模块包括结构分析、流体动力学分析、电磁场分析、声场分析、压电分析以及多物理场的耦合分析；后处理模块用来查看计算结果。对于某一有限元模型，当我们需要修改设计时，就必须修改有限元模型的几何尺寸或改变载荷状况，建立新的有限元模型，然后再重复以上分析过程。这种“设计—分析—修改设计—再分析—再修改”的过程，在有限元分析中存在着大量的重复性工作，直接影响设计的效率。而运用 ANSYS 提供的参数化设计语言 APDL，通过结构设计参数的调整，可以自动完成上述循环功能完成优化设计，从而大大减少修改模型和重新分析所花的时间，极大地减少了设计人员的劳动强度，同时大大缩短了设计研发周期。

2　结构优化设计

2.1　结构优化设计的数学模型

最优结构方案可以包括很多方面：若构件本身的形状允许改变，可以选择构件的最好形状；若几何形状已定，则可以适当选取尺寸，使结构总重量最轻。

对于通用的问题可归纳为：在满足一定约束条件下，选取设计变量，使目标函数达到最大(或最小)。其数学模型[4]为：

$$\min \quad f(X) \quad , \quad X \in \mathbf{R};$$

$$\text{s.t.} \quad g_j(X) \leqslant 0, (j=1,2,\cdots,p);$$

$h_k(X)=0$，　　$(k=1,2,\cdots,m)$；

其中，$f(X)$为目标函数；$X=(x_1,x_2,\cdots,x_n)$为设计变量；$g_j(X)$，$h_k(X)$为约束方程。

综上所述，优化设计是一种寻找最优设计方案的技术，所谓最优设计方案，是指可以满足所有的设计要求，而且所需的支出（如质量、面积、体积、应力、费用等）最小的方案，即最有效率的方案。

2.2 ANSYS 的优化方法

优化方法是使单个函数（目标函数）在控制条件下达到极值的方法。ANSYS 提供了两种主要优化方法，即零阶方法和一阶方法。零阶方法通过对目标函数添加罚函数将问题转化为非约束的优化问题，再用曲线拟合来建立目标函数和设计变量之间关系来实现逼近，每次优化循环生成一个新的数据点。这是一个完善、通用的方法，可以很有效地处理大多数的工程问题。一阶方法同样是通过对目标函数添加罚函数将问题转化为非约束的优化问题后，再使用因变量对设计变量的偏导数进行梯度计算，从而确定搜索方向，对非约束问题进行最小化。此方法基于目标函数对设计变量的敏感程度，因此精确度很高，尤其是在因变量变化很大，设计空间也相对较大时，其收敛速度较慢。对于这两种方法，ANSYS 提供了一系列“分析→评估→修正”的循环过程，即对于初始设计进行分析，对分析结果就设计要求进行评估然后修正，这一循环过程重复进行，直到所有的设计要求都满足为止。除此之外，用户可以利用自己开发的优化算法替代 ANSYS 本身的优化方法进行优化设计。

2.3 ANSYS 优化设计的步骤

有两种方法实现 ANSYS 机械优化设计：命令批处理方法和图形交互式法。对这两种方法的选择取决于用户对 ANSYS 程序的熟练程度，本文以批处理形式说明 ANSYS 用于机械优化设计的具体步骤[5] 如下：

（1） 生成分析文件。该文件包括整个分析过程，由 ANSYS 参数化设计语言 APDL 编写，并且必须满足参数化建模（在前处理器 PREP7 完成）、求解（在处理器 SOLUTION 内完成）、提取并指定状态变量和目标函数（在处理器 POST1 或 POST26 内完成）3 个条件。APDL 是 ANSYS 优化设计的基础，只有创建了参数化的分析流程才能对其中的设计参数执行优化改进，达到最优化设计目标，利用 APDL 建立参数化的模型是优化设计的一个核心步骤。

（2） 提取对应参数。在 ANSYS 结果数据库里提取与分析文件中变量相对应的参数，一般为状态变量和目标函数，实现命令：Parameters → Get Scalar Data。

（3） 进入优化设计处理器，指定分析文件，实现命令：/OPT。

（4） 声明优化变量，即指定哪些参数是设计变量，哪些参数是状态变量，哪个参数是目标函数。ANSYS 允许有不超过 60 个设计变量（DV）和不超过 100 个状态变量（SV），但是只能有 1 个目标函数（OBJ），实现命令：/OPVAR。

（5） 选择优化工具或方法。ANSYS 程序提供了 5 种优化工具，默认优化方法是零阶方法，用户可根据实际情况指定方法和工具，实现命令：/OPTYPE。

（6）指定优化循环控制方式。每种优化方法和工具都有相应的循环控制参数，比如最大迭代次数等。所有这些控制参数都用同一路径设定，选择菜单：Design Opt → Method/Tool。

（7）进行优化分析。所有的控制选项设定后，即可进行分析，实现命令：/OPEXE。在优化过程中，优化循环文件（Jobname.LOOP）会根据分析文件生成。循环在满足下列任一情况时终止、收敛、中断（不收敛，但最大循环次数或是最大不可行解数目达到了）、分析完成。

3 实例分析

3.1 接头强度分析

接头作为一种普遍的连接件，在机械设计工业中运用得很多，对于接头的研究，不仅要求其能满足基本的连接、传力、传扭等作用，同时也要满足应力强度要求。随着现代工业的发展，为了降低成本，在部件设计时也要充分考虑费用最小原则。下面就用接头连接件的强度分析及其结构优化作为探讨 ANSYS 优化技术的例子。

整个接头模型采用 SOLID95——20 节点六面体单元，具有协调的位移函数，能很好地模拟边界曲线。材料的弹性模量为 210GPa，泊松比为 0.3，在研究过程中为了很好地模拟实际的装配情况，采用接触单元 targe170 和 conta174 设置接触对约束模拟接头和销子的相互作用[6]，为了提高接触的模拟精度，尽量使用映射网格划分，并对接触面上的单元进行局部细化。在模型中，销子及耳片形状比较规则，可以使用映射网格划分，而接头的其他地方则采用自由网格划分，模型共有 34495 个实体单元。有限元模型如图 1 所示。整个模型都采用参数化设计语言建立，把结构的关键尺寸和优化所用到的设计变量设置为参数，这为下面的优化打下基础。在计算中，把销子 1 固结，在销子 2 上施加面载荷，经有限元分析计算后等效应力分布（见图 2），应力集中和孔边部分应力分布都与实际情况相符。

3.2 接头优化设计分析过程

选择设计变量。结构件的设计变量一般取它们的

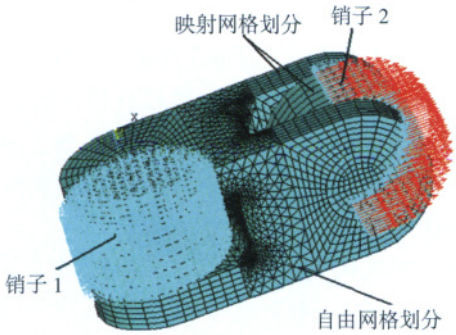

图1　接头有限元模型

Fig.1　Finite element model of join

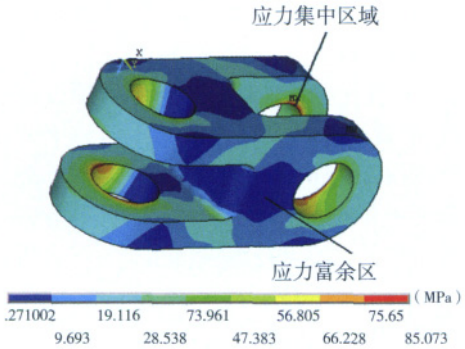

图2　Von Mises云图

Fig.2　Cloud picture of Von Mises

几何尺寸，如接头的耳片半径 R、耳片厚度 T、销子孔半径、及中间部分的厚度均可取作它的设计变量。但选取太多的设计变量会使得收敛于局部最小值的可能性增加，在高度非线性时甚至引起不收敛，而且需要更多的机时，在本模型中，考虑到对体积影响度的大小，选取耳片半径 R 和耳片厚度 T 作为设计变量。然后给设计变量定义一个合理的范围，范围过大并不能表示好的设计空间，而范围过小可能排除了好的设计。变量初始值 R=20，T=10，定义设计变量的命令为“opvar，R，dv，16，25；opvar，T，dv，6，12”。

选择状态变量。状态变量通常是控制设计变量的因变量数值，要选择足够的约束设计的状态变量数，在接头模型中，我们主要考虑的是满足结构件的强度条件，因此提取接头的最大应力作为状态变量。接头 von mises 应力（图 2）显示接头最大应力发生在销子 2 和耳片接触面的上方，最大值为 85.07MPa，提取最大等效应力并设为状态变量：PRNSOL，S，PRIN；NSORT，S，EQV，0，0，0；*GET，SMAX，SORT，MAX；OPVAR，SMAX，SV，0，100。

选择目标函数。这里所讨论的优化设计并不涉及各结构件的形状优化，接头优化设计的最终目的是要在满足给定的条件下使得其重量达到最小，对于密度均匀的结构件，就是要使得其体积最小。提取接头单元总体积的命令为：etable，evolu，volu（volu=每个单元的体积）；ssum （将单元表中每列数据相加）*get，volume，ssum，item，evolu（volume= 总体积）

选择优化工具和优化方法。零阶工具的优化方法收敛速度快，其优化精度能满足绝大多数工程结构的需要，最大迭代次数设为 30 次。

为保证计算机能“自动地”完成有限元优化设计，以上全部过程必须用 APDL 参数化语言编写相应的有限元优化设计子程序，调用它即可完成各结构件的有限元优化设计，优化设计结果见表 1。

表1　优化序列为SET8时的接头优化结果

迭代次数	耳片半径 R/mm	耳片厚度 T/mm	应力值/MPa	体积/mm^3
1	20.000	10.000	85.073	65 269
2	23.625	8.743	82.151	85 746
3	19.492	10.154	86.457	62 214
4	20.838	9.708	83.795	70 104
5	17.007	10.880	94.904	47 311
6	16.262	11.065	99.174	42 838
7	16.086	11.095	99.154	41 753
8	16.037	11.096	99.459	41 429

根据 ANSYS 提供的最佳优化序列为 SET8，优化结果为耳片半径 R=16.037mm，耳片厚度 T=11.096mm，这时接头的体积与优化前相比减少了 36%，可见采用优化设计所带来的效果是显著的。设计变量的优化曲线见图 3，目标函数的收敛情况见图 4。

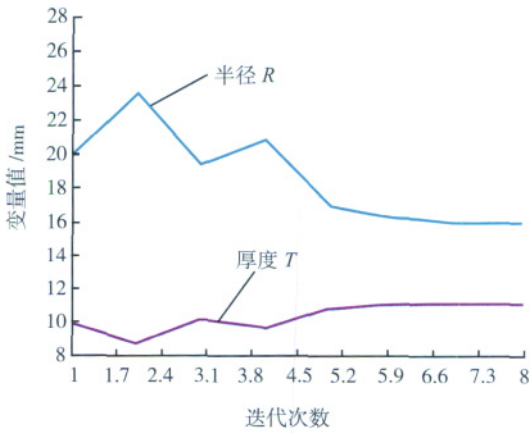

图3　优化序列为SET8时设计变量R、T优化曲线

Fig.3　Optimized curve of R and T of DV at optimized sequence SET8

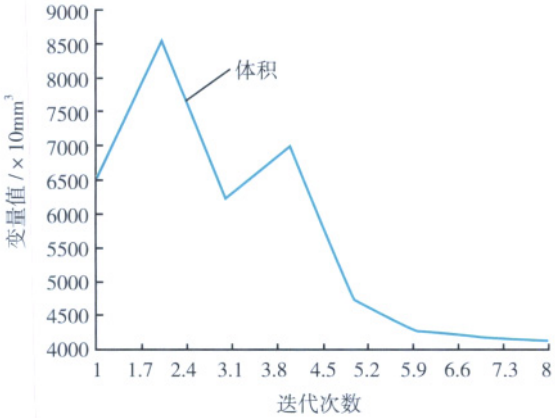

图4 目标函数优化曲线

Fig.4 Optimized curve of OBJ

从接头等效应力云图(图 2)中可以看到接头中间部分有很大一块应力富余区,基本不受力。为了进一步减轻接头重量,在保证满足应力强度的条件下,可以在低应力区挖孔,接头约束条件、受力情况保持不变,计算所得等效应力和前面计算结果相差不大,最大等效应力为 84.987MPa。以耳片半径、耳片厚度和中间孔半径为设计变量,以最大等效应力为状态变量,以体积为目标函数进行优化,优化结果见表 2。

根据最佳优化序列为 SET10, 优化结果为耳片半径 R=16.073mm,耳片厚度 T=10.863mm,中孔半径 R_3=4.155mm,这时接头的体积与优化前相比减少了 38%。但由序列 8 可知,如果把应力上限值加大,优化结果会更理想,也可以在零阶优化基础上进行一阶优化寻找更精确的优化解。设计变量、状态变量的优化曲线分别见图 5、图 6,目标函数的收敛情况见图 7。

4 结束语

研究了 ANSYS 优化设计基本原理和步骤,并且将该方法用于结构设计,能有效降低材料消耗与制造成本,提高产品的质量与工作性能。同时证明,利用

(下转第 85 页)

表2 优化序列为SET10时的接头优化结果

迭代次数	耳片半径 R/mm	耳片厚度 T/mm	中孔半径 R_3 /mm	应力值/MPa	体积/mm³
1	20.000	10.000	4.000	84.987	64 767
2	23.625	8.286	2.436	84.965	82 208
3	22.231	8.688	3.286	85.954	74 264
4	23.631	6.017	2.736	107.22	65 578
5	18.883	9.964	3.154	90.525	56 619
6	16.790	10.568	4.028	97.111	44 314
7	16.181	10.708	4.254	100.090	40 687
8	16.061	10.682	3.914	101.100	39 926
9	16.332	10.342	4.330	101.65	40 550
10	16.073	10.863	4.155	99.693	40 452

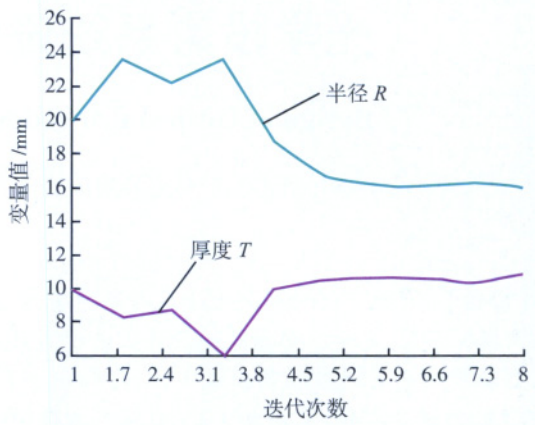

图5 优化序列为SET10时设计变量R、T优化曲线

Fig.5 Optimized curve of R and T of DV at optimized sequence SET10

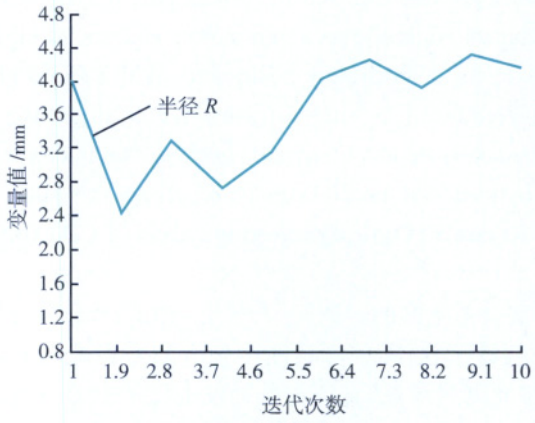

图6 设计变量R_3优化曲线

Fig.6 Optimized curve of R_3 DV

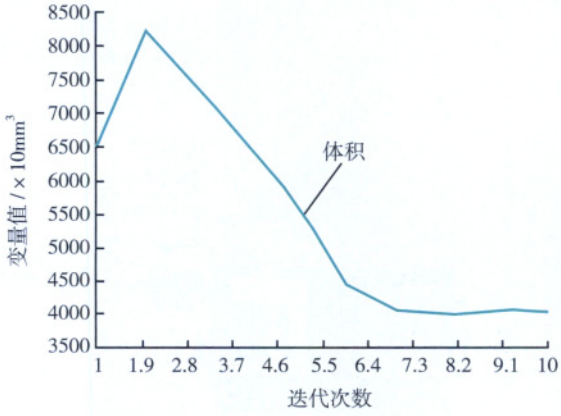

图7 目标函数优化曲线

Fig.7 Optimized curve of OBJ

4 实例

以某航空发动机涡轮转子叶片为例，依据本文的叶片测量建模技术，生成的叶片模型，如图7所示。对测量数据点和叶片模型比较，误差控制在0.01mm~0.04mm之间，满足误差要求。因此可以看出，本课题的所提出的叶片测量建模方法是可行的。

图7 叶片实体模型

Fig.7 Solid model of blade

5 结论

本课题以等高测量法为基础，根据测量数据点，采用一系列切实可行的方法最后生成叶片型面实体模型。实例证明：实体模型在光顺度和误差方面均已满足其结构设计要求。因此，此类方法简单方便，具有较强的实用价值，可以为后续数控加工和误差分析提供精准的几何模型。

参 考 文 献

[1] 白瑀，张定华，任军学，等．叶片高质量造型方法研究．机械科学与技术，2003（3）：447-449.

[2] 单晨伟，张定华，刘维伟，等．叶片测量造型方法研究．机床与液压，2006（2）：183-185.

[3] 屈健康，蔺小军，肖德智．逆向制造CMM测量关键技术研究．机械制造，2009（12）：44-46.

[4] 艾玲，王亮．三坐标测量叶片型面半径补偿技术的应用与分析．计量技术，2002（12）：22-24.

[5] 王省富．样条函数及其应用．西安：西北工业大学出版社，1989.

[6] 梁佳洪，刘会霞，王霄．基于NURBS曲线的快速生成产品特征线的方法研究．组合机床与自动化加工技术，2004（2）：43-46.

[7] 施法中．计算机辅助几何设计与非均匀有理B样条．北京：高等教育出版社，2001.

[8] Poliakoff J F, Wong Y K, Thomas P D. An automated curve fairing algorithm for cubic B-spline curves. Journalof Computational and Applied Mathematics, 1999, 102（1）：73-85.

（责编 岭雾）

（上接第71页）

ANSYS的优化分析功能进行结构的优化分析是可行的，为结构特别是复杂结构的优化分析提供了新的方法。优化设计已成为现代机械设计理论和方法中的一个重要领域，并且愈来愈受到从事机械设计的科学工作者和工程技术人员的重视。而将ANSYS软件作为优化设计的一个平台，进行虚拟仿真的设计，是进行优化设计全新的尝试，它能使设计者从繁杂的手工设计中解放出来，显著地缩短产品的研发周期。

参 考 文 献

[1] 黄海．二级多点近似结构优化方法研究．航空学报，1991，12（10）：35-42.

[2] 顾元宪．结构优化设计的研究与应用，国际学术动态，1991（6）：81-83.

[3] 博弈创作室．APDL参数化有限元分析技术及其应用实例，北京：中国水利水电出版社，2004.

[4] 商跃进．有限元原理与ANSYS应用指南，北京：清华大学出版社，2005.

[5] 邵蕴秋．ANSYS8.0有限元分析实例导航，北京：中国铁道出版社，2004.54-83.

[6] 钱俊梅，江晓红，仲小冬，等．浅谈基于ANSYS软件的接触分析问题．煤矿机械，2006（7）：62-64.

（责编 侧卫）

（上接第77页）

文中所述方法已在测量机测量航空发动机整体叶盘、叶片、叶轮型面以及汽轮机整体喷嘴环叶片型面中使用，结果表明此方法确实可行、方便、可靠，且具有较高的精度和较好的实用性。

参 考 文 献

[1] 鲍莉，王俊峰．测头半径误差补偿原理及其应用．轴承，2009（7）：38-40.

[2] 卢红，张仲甫．测头半径补偿的方法．组合机床与自动化加工技术，2001（9）：39-41.

[3] 王红敏，孙殿柱，张志诚．基于CMM的曲面检测技术与测头半径补偿．工具技术，2006（10）：77-80.

[4] 徐丽丽，白万民，接触式测头测量中测头半径补偿的研究．机械工程与自动化，2006（12）：61-62，66.

[5] 陈晓晖，周钢，李中伟，钟凯．柔性测量臂测头半径补偿算法研究．新技术新工艺2009（6）：10-14.

[6] 颉赤鹰，陈少克．三坐标测量机测头半径补偿的新方法．组合机床与自动化加工技术，2006（1）：50-52.

[7] 孙科，田怀文．三坐标测量机测头半径补偿实用算法[J]．机械，2009，（2）：6-8.

[8] 孙科，贾美薇，田怀文．三坐标测量机测头半径实用补偿算法．制造业自动化，2009（4）：67-80.

[9] 陈惠贤，王胜玉，徐晓栋．逆向工程中基于Delaunay三角剖分的测头半径补偿．工具技术，2007（9）：87-89.

（责编 泰山）