

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2017.08.016

# 基于 APDL 语言的机翼结构优化设计与分析

谢帅\*, 李飞, 吴波

中国飞行试验研究院, 陕西 西安 710089

**摘要:** 机翼结构设计是飞机结构设计的重要环节之一, 通常在气动外形确定之后进行。根据机翼气动外形, 首先对元件进行二维布局设计, 确定机翼结构形式及梁、肋、缘条、油箱等的位置, 初步给出各构件尺寸大小, 然后在 ANSYS 中应用 APDL 语言, 建立合理的有限元模型, 进行静力学计算分析, 进一步使用子问题逼近算法对机翼结构进行强度和变形约束下的结构优化, 得到重量最轻的结构设计。结果表明, 使用 APDL 这种参数化的建模语言进行机翼结构优化是可行的, 能有效提高结构优化和设计阶段的工作效率。

**关键字:** APDL 语言; ANSYS; 优化设计; 有限元; 机翼结构

**中图分类号:** V224    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1007-5453 (2017) 08-0016-05

在航空装备迅速发展的今天, 实现快速设计已经成为提高竞争力的必要手段。常规的有限元分析包含大量的图形用户界面 (Graphical User Interface, GUI) 操作, 在有限元建模、结构优化和灵敏度分析时, 往往牵一发而动全身, 带来相当繁琐的重复性工作, 可重用性不高, 工作量大且效率低下。APDL 是 ANSYS 参数化设计语言, 可以用通用化的程序完成有限元计算分析的标准过程, 自动实现产品的优化设计更新。

APDL 语言在机械产品的参数化设计中应用广泛, 马军等<sup>[1]</sup>开发了系列化产品有限元快速优化设计系统, 并对挖掘机斗齿进行了快速优化设计; 郑建辉等<sup>[2]</sup>对机车牵引齿轮齿廓进行修形分析; 郑连纲等<sup>[3]</sup>编制反应堆压力容器疲劳裂纹扩展计算程序; 任慧龙等<sup>[4]</sup>对双体船关键部位局部结构进行了优化设计, 通过应用 APDL 参数化设计语言, 减少了大量的工作量, 提高了设计计算的效率; 白金泽等<sup>[5]</sup>应用 APDL 语言对某复杂结构进行完整建模和静强度分析, 体现出了 APDL 语言在处理板体连接以及螺栓有限元模拟方面

的优势; 郭英男等<sup>[6]</sup>借助 APDL 语言实现了有限元建模、计算和后处理的全程参数化, 建立了连接件有限元仿真设计系统。

由于机翼结构设计具有迭代性和循环性, 从二维布局设计、修改到建立三维几何模型通常要耗费结构设计人员大量的时间, 影响了飞机的设计效率。因此, 本文研究基于 APDL 语言的机翼结构设计与分析, 主要对机翼部件进行初步设计, 选择合适的结构形式, 并对其进行结构传力分析, 应用 APDL 语言建立有限元模型, 在约束条件下进行优化设计, 最终达到最合理的设计方案。

## 1 结构布置与传力分析

某型飞机主要承担侦察与搜索任务, 需要在空中长时间飞行, 因而机翼较长。根据计算出的总体气动特性, 合理选择翼型, 布置舵面数量与位置, 机翼总体外形如图 1 所示。总体参数如下: 半翼展为 10m; 展弦比  $\lambda=7.7$ ; 翼根相对厚度  $c=13\%$ ; 舵面布置后缘从翼尖至翼根为后缘副翼、飞行扰流

收稿日期: 2017-06-19; 退修日期: 2017-06-21; 录用日期: 2017-07-06

\* 通讯作者. Tel.: 029-86830410 E-mail: cft\_xshuai@163.com

引用格式: XIE Shuai, LI Fei, WU Bo. Wing structure optimization design and analysis based on APDL language [J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 28 (08): 16-20. 谢帅, 李飞, 吴波. 基于 APDL 语言的机翼结构优化设计与分析 [J]. 航空科学技术, 2017, 28 (08): 16-20.

板、后缘襟翼。

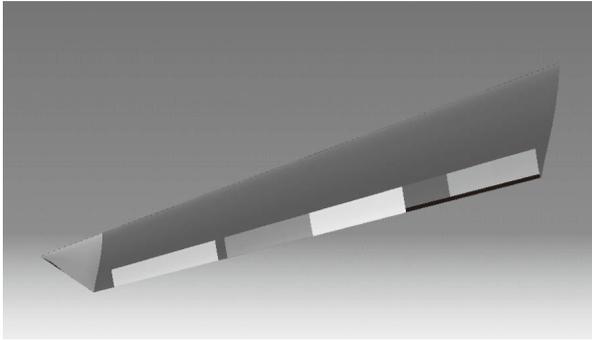


图1 机翼气动外形

Fig.1 Aerodynamic configuration of wing

该翼面结构高度较大,机翼受到的气动力需要通过主要受力原件上传到机身处。因此,设计中采用了薄蒙皮双梁式的机翼结构形式。梁式机翼只需通过少量的集中结头连接,简单而方便。梁作为主要传递总体弯矩的构件,需要在截面高度较大处布置较强的梁,从效率上看是适宜的。一般双梁式结构将主梁布置于结构高度最大处,以承受机翼受到的总体弯矩。但该机翼翼根处最大高度位于34%弦长处,若将主梁布置于此位置,则主梁腹板隔开了机翼内部空间,不利于整体油箱的布置。而此结构高度较大,正好可以利用这一优点来布置较大的整体油箱,以提高续航能力。出于这样的考虑,不再布置墙,以减轻机翼重量,并保证了翼盒的弦向空间,为整体油箱留出较大空间。而适当加强机翼前梁和后梁靠近机身段的长桁,以承担由整体油箱带来的集中载荷。

考虑到整体油箱的布置,主梁(前梁)布置在翼剖面弦长15%处,结合后缘舵面的位置,将后梁布置在翼剖面弦长65%处。翼梁在展向方向按弦长的等百分比线布置,并且轴线没有转折,从而使传力直接、连续,对机构的刚度、强度均有利,可减轻接结构重量,且方便制造。翼梁采用腹板式翼梁,其优点是刚度较大。

为了便于与翼梁腹板连接,采用腹板式翼肋。翼根及翼尖处,布置完整的翼肋;中间部分由于舵面的活动,布置缺少后段的翼肋。根据CATIA气动外形,翼肋的位置主要由舵面来确定。在机翼与机身连接处、舵面分割处布置加强肋,其余位置布置普通肋。

从等强度观点出发,机翼各剖面上长桁的总截面积应从根部到翼尖逐步减小。初步设定,在前后梁之间布置4条长桁,在前梁与前缘之间布置1条长桁。由于上壁面受压,更容易失稳,因此考虑适当增加上壁面的长桁数量。双梁式

机翼翼根处与机身进行单耳铰接与双耳固接的三点连接。

## 2 机翼有限元建模

机翼的襟翼和副翼等舵面可视为机翼整体中的一部分,并和机翼保持刚性连接参与机翼结构分析;长桁、翼梁与翼肋缘条可忽略其截面形状,将其等效为集中面积;整体油箱则简化为配重,施加在翼根附近盒段的节点上。根据机翼的结构特点可以采用“杆-板”机翼模型。划分网格时,上缘、下缘结构采用空间梁单元 beam188,腹板和蒙皮采用弹性壳 shell63<sup>[7]</sup>。

采用自下而上的方式建模,先建立几何模型然后将其划分为有限元模型。首先建立关键点,通过关键点连接生成线和面,线即为上缘、下缘杆件,面即为腹板和蒙皮。然后根据实际结构的物理属性定义相关结构参数,利用“Esize”命令控制单元边界尺寸,生成网格,完成有限元模型的建立。ANSYS中关键点分布如图2所示,将梁缘条、桁架和翼肋缘条的截面形状定义为长方形。机翼内部结构模型如图3所示。



图2 关键点

Fig.2 Key points

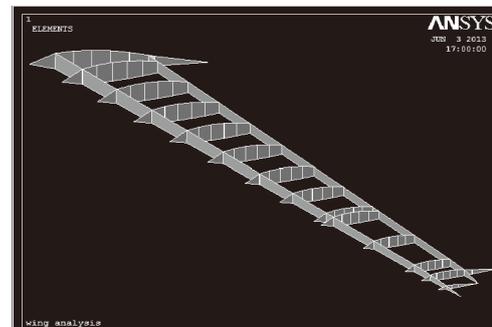


图3 机翼内部结构模型

Fig.3 Model of wing inner structure

利用ANSYS惯性释放功能计算出机翼质量为104.72kg。该飞机主要用途为侦察、监视及通信,设计指

标最大起飞重量 900kg,且不需要做大的机动,因此选择最大过载  $n=2$ 。机翼单侧机翼总升力估算方法如式(1)所示:

$$L=n \cdot G=2 \times 900 \times 9.8/2=8820\text{N} \quad (1)$$

机翼沿翼展方向升力呈椭圆分布,如图 4 所示;弦向翼型升力分布如图 5 所示,将其简化后如图 6 所示。

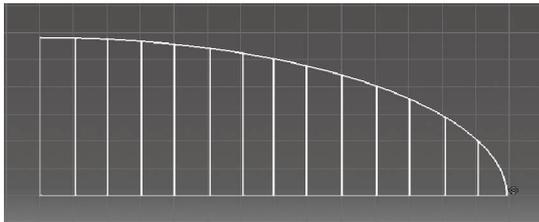


图 4 展向升力分布  
Fig.4 Lift distribution along span

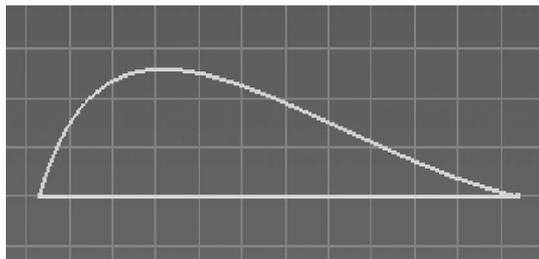


图 5 弦向升力分布  
Fig.5 Lift distribution along chord

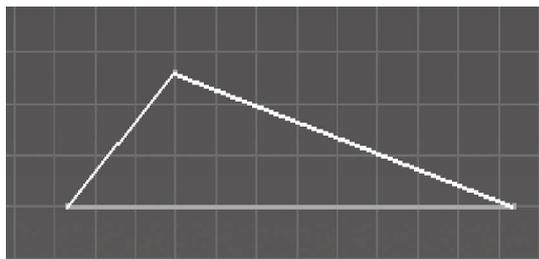


图 6 升力简化图  
Fig.6 Diagram of reduced lift

此时需要将总升力等效在每个节点上,根据之前的机翼布置与网格划分,该机翼共 14 个翼肋,分两步进行:第一步将总升力先分配在每个翼肋上,第二步将每个翼肋的总升力分配在弦向的每个节点上。

机翼展向升力分布曲线为 1/4 椭圆,因此每个节点的升力可近似为每段区域内的数值积分。为了快速计算,将其简化为梯形积分,利用 Matlab 的内置函数 trapz,此函数为基于梯形法则的数值积分公式,计算方法如下所示:

$$I=\text{trapz}(x, y) \quad (2)$$

式中: $x, y$  分别为自变量和对应的值。

另外,施加载荷时还需要考虑机翼的自重。ANSYS 将重力以惯性力的方式施加,所以在输入加速度时,其方向应与实际的方向相反。由于采用的毫米单位制,需要将其进行单位换算,其命令流如下:

$$\text{ACEL}, 0, 9.8\text{e-}3, 0$$

约束以及加载示意图如图 7 所示。

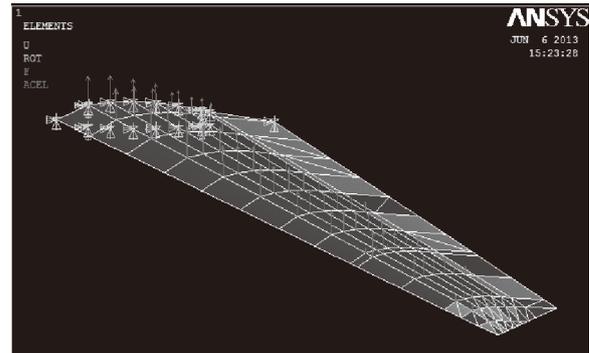


图 7 约束及加载示意图  
Fig.7 Constraints and loads sketch

### 3 结构优化

机翼结构的数学优化模型包括所定义的目标函数、优化变量及约束条件。通常数学优化模型可以表示为:

(1) 设计变量:翼梁、肋、长桁的位置、数量和尺寸;

(2) 目标函数:重量最轻;

(3) 约束条件:剩余强度系数  $\eta = \frac{\sigma_s}{\sigma_{\max}} \geq 3$ ,翼尖最大变形  $y \leq 600\text{mm}$ 。

在 ANSYS 后处理平台通过 APDL 语言提取计算结果及模型参数并编译优化模型之后,进入优化处理器,定义目标函数、优化变量和约束条件,并选择和设定优化算法进行优化分析。ANSYS 提供了多种适合工程应用的优化算法。本文采用子问题逼近算法,根据每次优化循环的结果对目标函数进行更新。子问题逼近算法搜索空间大,计算效率高,但其最优解的获取依赖于初始点的选取<sup>[4,8]</sup>。最终的优化结果如表 1 所示,应力云图和变形云图如图 8 和图 9 所示。

表 1 优化结果

Table 1 Optimization results

名称	上翼面		下翼面		翼肋缘条截面	蒙皮厚度	腹板厚度	翼肋厚度
	梁缘条截面	长桁截面	梁缘条截面	长桁截面				
初始尺寸/mm	6×1	5×1	4×1	4×1	4×1	1	2	2
优化尺寸/mm	5×1	4×1	3×1	3×1	3×1	0.8	1.5	1.5

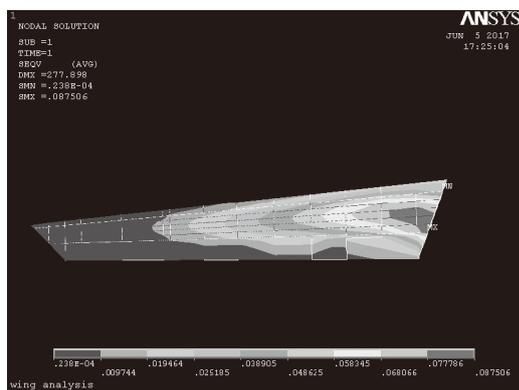


图 8 应力云图  
Fig.8 Stress nephogram

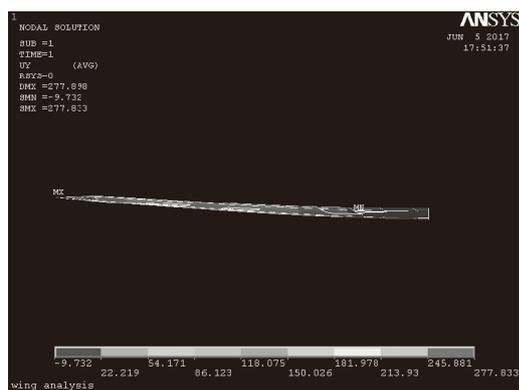


图 9 变形云图  
Fig.9 Deformation nephogram

通过优化计算,机翼上表面最大应力由 35.71MPa 增大到 87.50MPa,机翼翼尖变形由 112.9mm 增大到 278mm,机翼结构重量由 104.72kg 减小到 80.12kg,而 LY12 材料的屈服强度为 275MPa,则结构的剩余强度由 7.70 减小到 3.14,可知初始设计的机翼结构强度冗余量较大,经过优化设计,在保证强度刚度要求的前提下,大大减轻了机翼结构重量,提高了结构效率。

## 4 结论

本文应用 APDL 语言对研究对象建立有限元模型,在约束条件下进行优化设计,得到如下结论:

(1) 使用 APDL 这种参数化的建模方法建立的机翼结构有限元模型,提高了设计计算效率,使用子问题逼近算法对机翼结构参数进行优化,得到了强度刚度约束条件下的最优设计方案,使机翼结构的应力处于合理的水平;

(2) 翼尖变形冗余量依旧很大,是由于靠近翼尖部分结构刚度较大,可在后续设计工作中进一步优化,如对附近的翼肋开减重孔,对翼梁缘条进行等强度优化设计等。

AST

## 参考文献

- [1] 马军,李阳帆,侯俊剑,等. 系列产品有限元快速优化设计方法与系统开发研究[J]. 机械设计, 2015 (12): 78-82.  
MA Jun, LI Yangfan, HOU Junjian, et al. Research of serialized products based on finite element rapid optimization design and systematic development[J]. Journal of Machine Design, 2015 (12): 78-82. (in Chinese)
- [2] 郑建辉,施晓春,何卫东. 基于 APDL 的机车牵引齿轮齿廓修形分析[J]. 大连交通大学学报, 2015, 36 (6): 15-19.  
ZHENG Jianhui, SHI Xiaochun, HE Weidong. Analysis of locomotive traction gear profile modification based on APDL[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2015, 36 (6): 15-19. (in Chinese)
- [3] 郑连纲,谢海,苏东川,等. 基于 ANSYS 程序的反应堆压力容器疲劳裂纹扩展分析方法研究[J]. 核动力工程, 2015 (6): 67-69.  
ZHENG Liangang, XIE Hai, SU Dongchuan, et al. Study of reactor pressure vessel fatigue crack growth analysis based on ANSYS[J]. Nuclear Power Engineering, 2015 (6): 67-69. (in Chinese)
- [4] 任慧龙,张清越,胡雨蒙,等. 基于参数化子模型的小水面双体船结构优化[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2015 (11): 88-92.  
REN Huilong, ZHANG Qingyue, HU Yumeng, et al. Optimization of small waterplane area twin-hull ship structure based on parametric sub-model[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition, 2015 (11): 88-92. (in Chinese)
- [5] 白金泽,孙秦,郭英男. 应用 ANSYS 进行复杂结构应力分析[J]. 机械科学与技术, 2003, 22 (3): 441-443.  
BAI Jinze, SUN Qin, GUO Yingnan. Stress-analysis of a complex structure with the ANSYS system[J]. Mechanical Science and Technology, 2003, 22 (3): 441-443. (in Chinese)
- [6] 郭英男,孙秦,毋玲. 航空连接结构的参数化有限元分析系统设计与开发[J]. 航空工程进展, 2010, 1 (1): 80-84.  
GUO Yingnan, SUN Qin, WU Ling. Parametric finite element system development for the joint structures on aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2010, 1 (1): 80-84. (in Chinese)
- [7] 黄旌,高涛. ANSYS 用于机翼有限元的建模研究[J]. 红河学院学报, 2006, 4 (2): 8-11.

- HUANG Jing, GAO Tao. A modeling research of the wing finite element analysis with ANSYS [J]. Journal of Honghe University, 2006, 4 (2): 8–11. (in Chinese)
- [8] 李兵, 宫鹏涵. ANSYS 14 有限元分析自学手册 [M]. 北京人民邮电出版社, 2013: 10–80.
- LI Bing, GONG Penghan. ANSYS 14 finite element analysis self-study manual[M]. Beijing: Posts and Telecommunications Press, 2013: 10–80. (in Chinese)
- 作者简介  
谢帅 (1991– ) 男, 硕士, 工程师。主要研究方向: 飞机载荷强度试飞。  
Tel: 029–86830410  
E-mail: cfte\_xshuai@163.com
- (责任编辑 朱赫)

## Wing Structure Optimization Design and Analysis Based on APDL Language

XIE Shuai\*, LI Fei, WU Bo

*Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China*

**Abstract:** Wing structure design is an important part of aircraft design, which usually starts after aerodynamic configuration is confirmed. This paper made 2D configuration design of parts according to aerodynamic configuration firstly, confirmed wing structure type and the location of beam, rib, flange, oil box, etc, defined the size of parts preliminary, built reasonable finite element model using APDL in ANSYS, made statics computation and analysis, made wing structure optimization by sub-problem approximation method under constraints of stiffness and strength, got the most lightest structure weight finally. The results show that it is feasible to make wing structure optimization using APDL language, it also can increase structure efficiency and design efficiency.

**Key Words:** APDL language; ANSYS; optimization design; finite element; wing structure

---

Received: 2017-06-19; Revised: 2017-06-21; Accepted: 2017-07-06

\*Corresponding author. Tel. : 029-86830410 E-mail: cfte\_xshuai@163.com