

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.03.051

基于有限元分析的发动机活塞轻量化设计

林贵堃^{1,2}, 陈细妹¹, 闲家明², 黄俊贤², 曾海鹏², 韩佳霖²

(1. 福建水利电力职业技术学院, 福建 永安 366099; 2. 厦门华夏学院 信息与智能机电学院, 福建 厦门 361024)

摘要:在有限元分析的基础上,采用材料替换及结构拓扑优化的方法对某发动机活塞进行轻量化设计。利用 SolidWorks 建立活塞三维模型,将活塞原始材料 1015 铝合金替换为 7075 铝合金;运用 Altair Inspire 有限元分析软件分别对两种材料的活塞进行静力学分析及模型质量测量,采用拓扑优化方法进行结构优化。仿真结果表明:优化后活塞质量减轻了 64%,活塞的最大应力减小了 12%,安全系数提升了 3.7。

关键词:发动机活塞;有限元分析;轻量化;应力分析

中图分类号:TH457 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2024)03-0239-04

Lightweight Design of Engine Piston Based on Finite Element Analysis

LIN Guikun^{1,2}, CHEN Ximei¹, XIAN Jiaming², HUANG Junxian², ZENG Haipeng², HAN Jialin²

(1. Fujian Polytechnic of Water Conservancy and Electric Power, Yong'an 366099, China;

2. School of Information & Intelligent Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen Huaxia University, Xiamen 361024, China)

Abstract:Based on the finite element analysis, the lightweight design of an engine piston is carried out by the methods of material replacement and structural topology optimization. SolidWorks is used to establish a 3D model of the piston. 1015 aluminum alloy, the original material of the piston, is replaced by 7075 aluminum alloy. Altair Inspire is applied to conduct static analysis and model mass measurement for the pistons of the two materials, and structure optimization is carried out by topology optimization method. The simulation results show that after material replacement and structure optimization, the piston mass is reduced by 64%, the maximum stress of the piston reduced by 12%, and the safety factor increased by 3.7.

Keywords:engine piston; finite element analysis; lightweight; stress analysis

0 引言

活塞是发动机的最关键零部件,其质量将直接影响发动机的性能^[1]。若要保证发动机的稳定运行,活塞的强度及刚度必须达到力学性能要求,但单纯增加活塞材料厚度不仅会增加质量,增加运行能量消耗,还会增大制造成本。因此,有必要对活塞进行轻量化设计。

目前国内外学者对轻量化设计主要采用两种方式,一种是根据疲劳强度理论进行结构优化设计,改善结构,使强度得到提高,从而减少材料使用,减轻质量^[2];另一种则是通过材料替换,应用高性能材料来减轻质量^[3]。

本文以某发动机活塞为研究对象,首先建立活塞的三维模型,然后进行材料替换,在此基础上利用有限元分析方法分别对两种材料活塞的强度、刚度特性进行分析,之后进行拓扑优化^[4],最后根据有限元分析结果、拓扑优化结果进行结构

优化设计,并在满足力学性能要求的基础上,对优化后活塞模型的强度、刚度特性进行有限元分析,通过与优化前的结果进行对比,验证轻量化设计的有效性。

1 模型的建立

活塞大致可分为活塞、连杆、活塞销 3 部分,如图 1 所示。

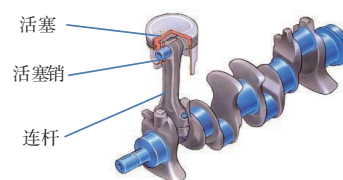


图 1 活塞结构

由于活塞销主要起到连接连杆与活塞的作用,结构也较为规范,因此,能够进行轻量化设计的主要是活塞部分^[5-6]。活塞主要由活塞顶部、

基金项目:福建省教育厅中青年教师教育科研项目(JAT210592;JAT220585);厦门华夏学院育苗基金项目

第一作者简介:林贵堃(1993—),男,福建泉州人,讲师,硕士,研究方向为工程机械设计、有限元仿真,18390957543@163.com。

通信作者:陈细妹(1980—),女,福建大田人,讲师,硕士,研究方向为工程机械设计、机械类专业教学,812214987@qq.com。

活塞裙部及销孔组成,而只有活塞裙边的内侧部分,可进行结构优化。因此用 SolidWorks 三维软件建立活塞三维模型,如图 2 所示。

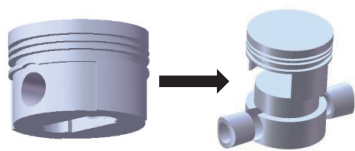


图 2 活塞模型示意图

2 轻量化材料

基于材料替换与有限元分析的轻量化设计过程如图 3 所示。在建完三维模型后,需要进行材料替换,优化前活塞使用的材料是 1015 铝合金,对其进行轻量化设计时需要在满足强度要求的同时选用更加轻质的材料进行替换。7075 铝合金具有强度高、韧性好、密度低等优点,普遍应用于航空航天、军工等领域,是较为合适的活塞轻量化材料^[7]。因此,本文选择 7075 铝合金进行材料替换。1015 铝合金与 7075 铝合金的材料特性如表 1 所示。

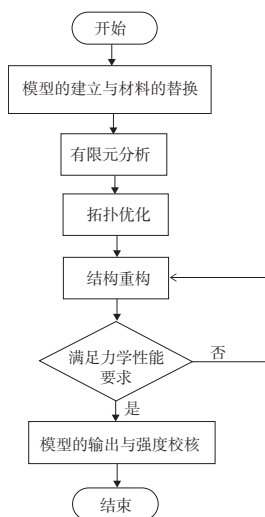


图 3 设计流程示意图

表 1 材料性能参数

材料	弹性模量/ GPa	泊松比	密度/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	屈服应力/ MPa
1015	200	0.29	7.87	285.0
7075	75	0.33	2.80	413.7

3 有限元分析

3.1 创建模型载荷工况

将三维模型输入到 Altair Inspire,对原始几何模型添加约束以及外部载荷条件,如图 4 所示。1)中间两处圆孔位置添加固定约束;2)垂直于活塞上表面施加 10 MPa 的压力;3)活塞侧面施加 5 MPa 的压力。

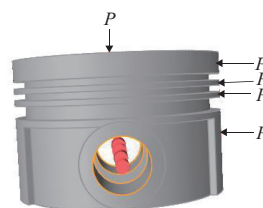


图 4 活塞受力示意图

3.2 结果分析

对活塞有限元模型设置相应的约束和载荷后,分别对两种材料进行静力学分析,计算应力、安全系数与最大位移。

1) 1015 铝合金

如图 5 所示为采用 1015 铝合金的活塞有限元分析结果。从图中可以看出,最大应力为 50.77 MPa,出现在活塞销孔正上方内侧部位。这是由于在工作时,顶部受到燃烧室气体燃烧做功而产生的较大压力,同时受到连杆与活塞销的阻力,在销孔正上方处产生了较大的压应力。与此同时,活塞的最小安全系数为 5.6,最大形变为 0.006 2 mm。

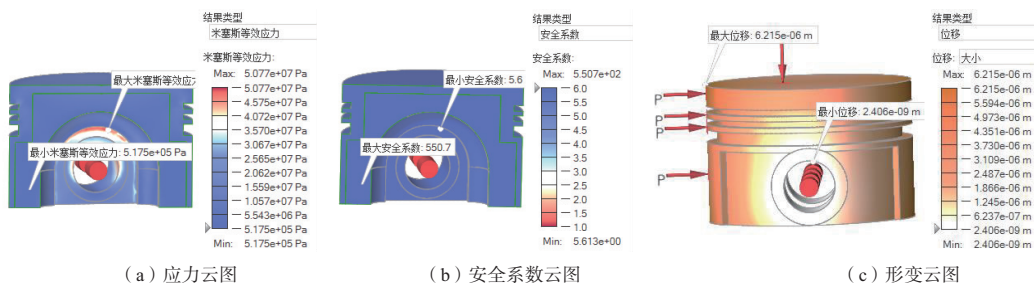


图 5 1015 铝合金活塞云图

2) 7075 铝合金

如图6所示为采用7075铝合金的活塞有限元分析结果。材料改变时,最大应力变化不大,为50.42 MPa,依然集中在活塞销孔正上方内侧部

位。但由于7075铝合金较1015铝合金有更高的屈服应力及较小的弹性模量,因此经过材料替换后,活塞的最小安全系数提高至8.2,最大形变增大至0.0167 mm。

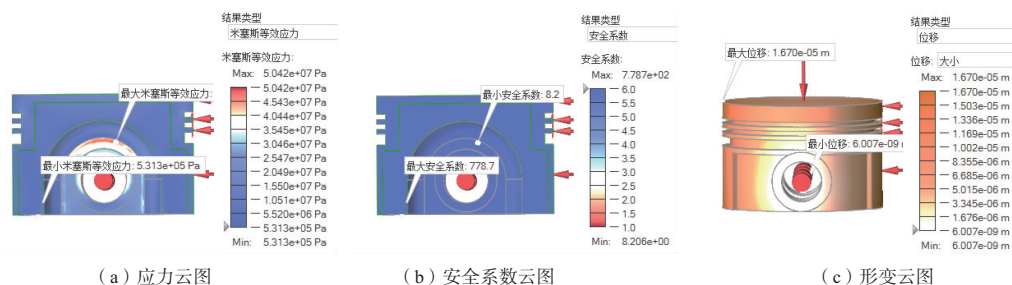


图6 7075 铝合金活塞云图

3.3 对比分析

由图5、图6可知,初始活塞变形最大的部位出现在活塞顶的边缘部分,主要是由于这个部位处于边缘而支撑中间,受到的支撑力较小,但由于1015铝合金于本身弹性模量较大,所以整体形变量并不大。初始活塞最大应力为50.77 MPa,远小于1015铝合金的屈服极限,所以模型的刚度是符合要求的。材料替换后,新活塞与原活塞相比应力相差不大,并且由于7075铝合金的屈服极限要高于1015铝合金,所以活塞强度符合要求,同时安全系数也明显增大。但最大应力降低仍不明显,因此还需要对活塞进行结构优化设计,从结构上使活塞强度增加。

4 拓扑优化分析

4.1 指定设计空间

在Altair Inspire 拓扑优化中,指定活塞裙部为设计空间,如图7所示。被指定的设计空间在优化算法下,根据设定的条件最大可能地剔除多余的材料,直至最终形状成型为止,优化后的结构形式具有良好的受力特性和良好的制造工艺性^[8]。考虑到在实际工作时,活塞顶部起着传热、环槽与活塞杆配合以及密封的作用,活塞裙部起着导向作用,须保证活塞销孔对称面上的裙部高度不变^[9],因此活塞裙部、销孔为设计空间,活塞顶为非设计空间。

4.2 优化参数设定

鉴于活塞恶劣的工况以及前文活塞件的静力学分析结果,可知活塞要有足够的强度和刚度,才能保证发动机运转平稳和持久耐用。因此,在

Altair Inspire 软件中,将最大化刚度设置为优化目标并勾选保持形状平滑以使优化结果连续^[10]。结合原始结构和工艺性考虑,本文采用的质量目标范围为30%~40%。

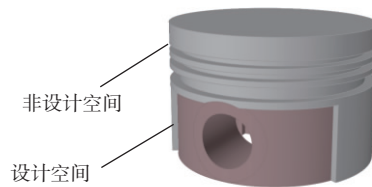


图7 设计空间

4.3 拓扑优化结果

根据图8所示的拓扑结果,发现活塞设计区域的材料分布沿活塞销孔中央向两侧递减,在活塞销孔附近基本没有材料的去除,这是由于活塞在工况中承受极大的垂向载荷,垂向载荷对结构中间部分有较大影响,而对远离中间部分及末端影响有限。对于活塞的工况来说,主要是把活塞销孔以及活塞缸壁支撑的材料保留住,从而降低材料的质量,但需要特别注意的是支撑的厚度不能过薄,否则在实际使用中会承受不住一定的载荷压力。

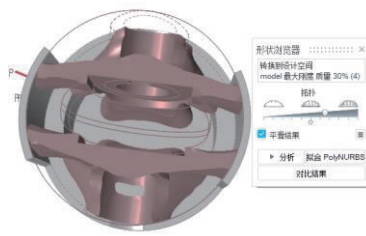


图8 拓扑优化结果

4.4 结构重构

根据图5、图6的分析结果以及图8的拓扑优化结果得出以下优化方案:

1) 应力主要集中在孔上方形状突变的位置, 因此将活塞裙部两边凹下去的面拉伸 3 mm 使其与里面持平, 并且把销孔也延长 3 mm 使其刚好与活塞裙配合的同时也增加支撑的受力面积;

2) 为了控制质量的增加, 结合拓扑优化结果, 在避开受力集中点、不影响强度的同时, 发现在活塞裙部与活塞顶部接触部分的面积可以适当减少。因此在活塞裙的上方打半径为 5 mm、深度为 13 mm 的 7 个小孔并进行圆角处理, 避免应力集中, 在减少质量的同时增强结构的承受能力。

采用 SolidWorks 对模型进行结构优化, 优化后的新活塞模型如图9所示。虽然活塞裙部形状突变处增加了材料, 但与在活塞裙上面打了小孔后减少的材料差不多, 并且由于铝合金的密度小, 改进后的活塞质量为 0.531 kg, 与初始活塞的 1.51 kg 相比, 质量仍然减少了 64%。

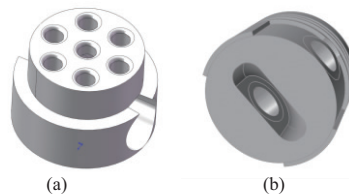


图9 优化后的活塞三维模型

5 强度校核

将结构优化后的活塞模型再次输入到 Altair Inspire, 使其与原活塞模型受力情况一致, 对其进行静力学分析, 结果如图10、表2所示。从图10与表2可知, 在原模型上进行材料替换与结构优化具有一定效果, 经过优化后, 最大应力为 44.67 MPa, 相较于初始活塞最大应力减少了 12%, 且远小于 7075 铝合金的屈服极限; 安全系数为 9.3, 相较于初始活塞提升了 3.7; 虽然最大形变位移增加了 0.009 mm, 但是对活塞的工作影响微乎其微, 可以忽略不计。

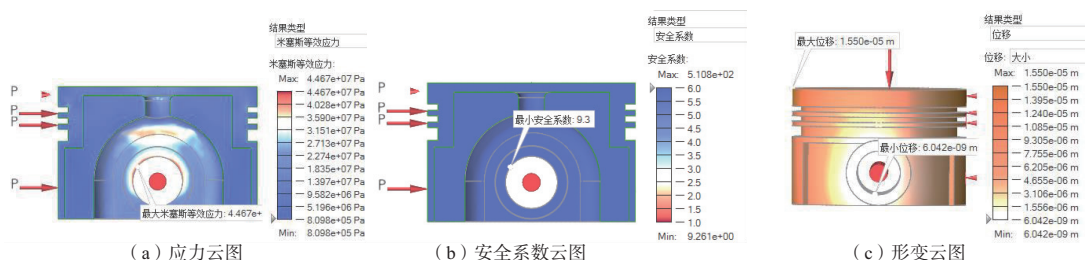


图10 结构优化后 7075 铝合金活塞云图

表2 优化后静力学分析结果

项目	材料	最大应力/MPa	安全系数	最大位移/mm	质量/kg
初始活塞	1015	50.77	5.6	0.006 2	1.510
材料替换	7075	50.42	8.2	0.016 7	0.537
结构优化+材料替换	7075	44.67	9.3	0.015 5	0.531

6 结语

本文通过材料替换与结构优化的方式实现了发动机活塞的轻量化设计, 使活塞质量减轻了 64%。有限元分析仿真结果表明: 经过优化, 活塞的最大应力降至 44.67 MPa, 减少了 12%; 最小安全系数为 9.3, 安全系数提升了 3.7。由此可见, 采用材料替换和结构优化相结合的方法, 可有效实现轻量化设计。

参考文献:

- [1] 张焕梅, 郭芸俊. 机床箱体有限元分析与轻量化设计[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2018, 39(6): 695-701.
- [2] 葛超峰, 杨满盈, 李庭勇. 汽油机活塞技术的现状与展望[J]. 内燃机与动力装置, 2018, 35(5): 88-94.
- [3] 曹火光, 邵佳丰. 基于材料替换与结构优化的压缩机活塞轻量化设计[J]. 机械设计与制造工程, 2021, 50(2): 1-4.

(下转第 248 页)

图 16—图 18 为扰动来临时,LADRC 中 LESO 对扰动的观测情况。

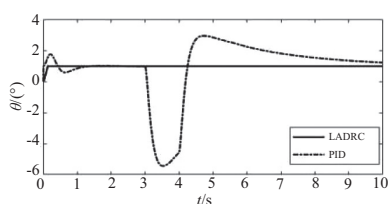


图 13 无人直升机俯仰角响应曲线

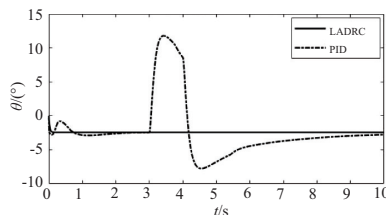


图 14 无人直升机滚转角响应曲线

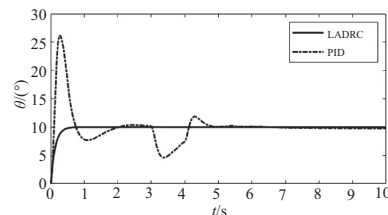


图 15 无人直升机偏航角响应曲线

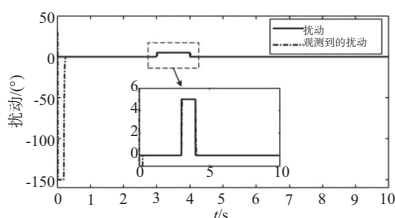


图 16 无人直升机俯仰通道扰动观测曲线

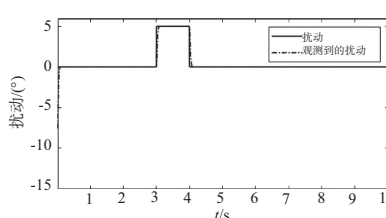


图 17 无人直升机滚转通道扰动观测曲线

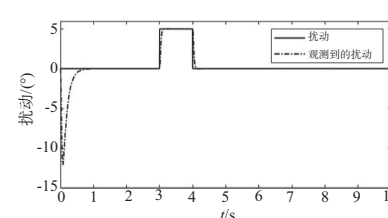


图 18 无人直升机偏航通道扰动观测曲线

由图 16—图 18 观测曲线可知,LESO 可以很好地观测到扰动,进而通过估计补偿抵消扰动带来的影响,从而起到抗扰的效果。

7 结语

本文基于某型号无人直升机完成了无人直升机构建模、特性分析和内环控制器设计等流程,通过仿真结果对比,本文所设计和实现的直升机内环控制器可以加强姿态回路的鲁棒性和稳定性,达到了预期的效果。

参考文献:

- [1] 王鹏.无人直升机发展现状及技术难点[J].计算机产品与流通,2018(1):91-92.
- [2] AHMED B, KENDOUL F. Flight control of a small helicopter in unknown wind conditions[C]//49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC). Atlanta, GA, USA; IEEE, 2011:3536-3541.
- [3] LAI Y C, LE TRI Q. System identification and control of

a small unmanned helicopter at hover mode[C]//2017 2nd International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE). Bangkok, Thailand; IEEE, 2017: 92-96.

- [4] 王云霞,代冀阳,王村松,等.一种线性自抗扰控制器的无人直升机姿态控制方法研究[J].计算机应用研究,2019,36(6):1753-1757.
- [5] 王云霞.基于线性自抗扰控制的无人直升机路径跟踪方法研究[D].南昌:南昌航空大学,2018.
- [6] 尹亮亮.无人直升机飞行控制若干关键技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2012.
- [7] 缪丽娟.小型无人直升机悬停与低速段飞行控制律研究[D].南京:南京航空航天大学,2014.
- [8] 韩京清.自抗扰控制技术[J].前言科学,2007(1):24-31.
- [9] 刘泽群.无人直升机飞行控制及视景仿真实现[D].南昌:南昌航空大学,2019.

收稿日期:2022-10-24

(上接第 242 页)

- [4] 童身亮.发动机轻量化途径及工艺创新探究[J].内燃机与配件,2021(5):33-34.
- [5] 王国华,宁玉浩,陈笑天,等.锻钢活塞有限元分析及优化[J].内燃机,2019(6):40-42.
- [6] 宋树峰,薛冬新,王洪峰,等.某柴油机机体静强度有限元分析[J].内燃机与动力装置,2018,35(2):47-51.
- [7] 江海洋,孙明月,吴铭方,等.7075 铝合金热变形连接接头的组织与性能[J].金属热处理,2020,45(2):46-50.

- [8] 李贵旺.海上平台往复式活塞压缩机故障分析及轻量化改造[J].天津科技,2020,47(4):55-58.
- [9] 胡振,乔信起,王渠东,等.发动机活塞轻量化的研究进展[J].小型内燃机与摩托车,2013(6):76-81.
- [10] 牛飞.结构拓扑优化设计若干问题的建模、求解及解读[D].大连:大连理工大学,2013.

收稿日期:2022-11-03