

基于ANSYS的航空发动机外部管路振动仿真分析

滕云楠*, 马振通#

东北大学机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2022年2月25日; 录用日期: 2022年3月22日; 发布日期: 2022年3月29日

摘要

基于ANSYS Workbench对航空发动机外部管路进行仿真分析。针对直管型管路、90°型管路、S型管路、Ω型管路及其不同壁厚, 对管路固有频率、模态以及振动响应进行了分析。仿真分析结果表明, 随着管路壁厚的增加, 管路的固有频率也逐渐增加。直管型管路、S型管路、Ω型管路振动响应较小, 90°型管路振动响应较大。分析结果为航空发动机外部管路优化设计提供了一定的依据。

关键词

航空发动机, 外部管路, 模态分析, 振动响应

Vibration Simulation Analysis on Aeroengine External Pipelines Based on ANSYS

Yunnan Teng*, Zhentong Ma#

School of Mechanical Engineering and Automation, Northeast University, Shenyang Liaoning

Received: Feb. 25th, 2022; accepted: Mar. 22nd, 2022; published: Mar. 29th, 2022

Abstract

The external pipelines of aeroengine were analyzed based on ANSYS Workbench. The natural frequency, mode and vibration response of straight pipes, 90° pipes, s-pipes, Ω pipes with different

*第一作者。

#通讯作者。

thickness were analyzed. The simulation results show the natural frequency of the pipelines increase with the thickness of the pipelines. The vibration responses amplitude of straight pipeline, s-pipes and Ω pipes are smaller, but the vibration responses of 90° pipelines are larger. This simulation results provide a bit of basis for the design and optimization of aero-engine external pipelines.

Keywords

Aero-Engine, External Pipeline, Modal Analysis, Vibration Response

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

航空发动机管路数量众多且结构复杂, 管路之间一般通过管接头和卡箍等结构连接在一起, 组成了各种管路系统结构。各种结构之间由于安装、焊接和相互耦合等原因, 特别是由于机匣的强烈振动及温度、压力等外部环境剧烈变化的影响, 管路系统经常会发生各种各样的振动故障, 从而造成严重事故。管路系统结构的完整性对发动机的正常工作极其重要。目前, 国内外学者对管路振动问题做了大量研究, Olson [1]等采用梁单元为对象计算管道经常遇到的流固耦合问题。Mamaghani 等[2]研究了非线性能量对输流管路在激励下的减振影响。卢丽金等[3]总结了飞机管路振动故障的机制和排除方法。李占营等[4]采用 Galerkin 方法研究了哥氏力和管路参数对航空发动机管路固有频率的影响。王世忠[5]等利用反对称矩阵理论计算方法对输液管道进行流固耦合问题分析。邱明星等[6]通过试验和数值计算结合的方法, 验证了利用有限元方法计算充液管路固有频率的有效性的合理性。贾志刚等[7]通过研究对航空发动机的管路结构模式进行分类总结, 基于结构参数分析了不同管路结构的振动特性。康力等[8]基于发动机试车数据, 对典型管路的振动响应特性进行了计算。Qian Zhou 等[9]针对航空发动机管道自动布线问题, 提出了一种基于 lee 算法和遗传算法的新方法。Gholami Hojjat 等[10]研究了循环内压作用下光滑凹痕或光滑凹痕与凿槽缺陷组合管道的应变基疲劳寿命分析。徐培原等[11]针对航空发动机外部管路系统卡箍布局不合理而导致发动机发生共振或振动过大问题, 对发动机复杂管路的卡箍布局进行优化设计。航空发动机液压管路工作环境复杂, 管路内部充满高压的液压油, 外部发动机机匣的振动也会通过卡箍等紧固件对管路结构产生激励。刘玉柱等[12]有限元分析与振动应力测试相结合的方法, 通过分析导管的固有频率和振动应力值, 确定导管振动异常与外界激励影响有关, 并提出了解决方案, 当外激励和管路固有频率接近时产生共振, 严重影响管路使用寿命。

本文基于 ANSYS Work bench, 对直管型管路、 90° 型管路、S 型管路、 Ω 型管路及其不同管路壁厚的航空发动机液压管路进行分析, 为航空发动机外部管路的设计及优化提供依据。

2. 管路模型建立

2.1. ANSYS Workbench 简介

ANSYS Workbench 是一款功能强大的有限元仿真软件, 软件内部集成了结构、流体、电场、磁场、声场等分析模块, 各个模块之间也能实现耦合分析[13] [14]。本文针对直管型管路、 90° 型管路、S 型管路、 Ω 型管路进行有限元仿真分析。

2.2. 管路有限元模型建立

模型材料为 1Cr18Ni9Ti, 其密度为 7900 kg/m^3 , 泊松比为 0.285, 弹性模量为 198 GPa, 如表 1 所示。

Table 1. Material parameters

表 1. 材料参数

密度/ kg/m^3	泊松比	弹性模量/GPa
7900	0.285	198

对直管型管路、 90° 型管路、S 型管路、 Ω 型管路建立模型, 如图 1 所示。

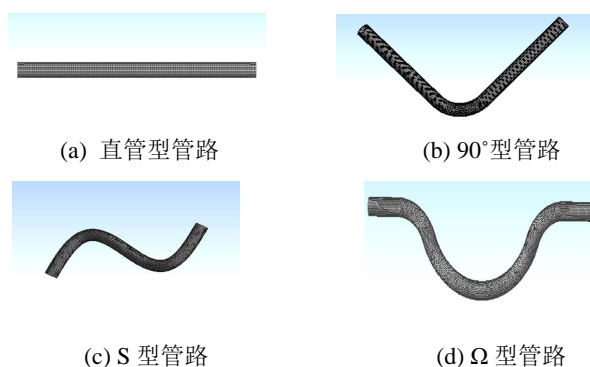


Figure 1. Finite element models of pipes

图 1. 管路有限元模型

其中, 各个模型管路的壁厚分别为 1.6 mm, 1.8 mm, 2 mm, 2.2 mm, 2.4 mm。

3. 仿真分析

3.1. 模态分析

模态分析用于确定管路结构固有频率。根据文献[15] [16]关于油压力对固有频率有一定影响, 本文采用控制变量法分析不同壁厚和不同管型下对管路固有频率的影响。得到不同管型管路在不同壁厚下的固有频率计算结果, 如表 2~5 所示。

Table 2. Natural frequencies for straight pipelines/Hz

表 2. 直管型管路不同壁厚固有频率/Hz

阶次/壁厚	1.6 mm	1.8 mm	2 mm	2.2 mm	2.4 mm
1	531.5	536.62	541.77	546.95	552.15
2	531.5	536.63	541.77	546.95	552.15
3	1417	1429.9	1442.8	1455.8	1468.8
4	1417	1429.9	1442.8	1455.8	1468.8
5	2667.1	2689.7	2712.4	2735.3	2758.2
6	2667.1	2689.7	2712.4	2735.3	2758.2
7	3122.8	3122.8	3122.8	3122.8	3122.8

Continued

8	4209.2	4242.3	4275.6	4308.9	4342.3
9	4209.2	4242.3	4275.6	4308.9	4342.3
10	5011.3	5011.7	5012	5012.3	5012.6

Table 3. Natural frequencies for 90° pipelines/Hz
表 3. 90°型管路不同壁厚固有频率/Hz

阶次/壁厚	1.6 mm	1.8 mm	2 mm	2.2 mm	2.4 mm
1	438.95	445.18	450.22	455.13	459.99
2	1380.1	1398.6	1414	1428.9	1443.7
3	1473.8	1493.3	1508.9	1524.1	1539
4	2163.1	2199	2226.3	2252.4	2277.6
5	2377.3	2400.7	2419.9	2439.1	2457.6
6	3892.5	3946.6	3985.5	4021.9	4055.2
7	4045.3	4112.6	4158.6	4200.9	4241.7
8	4234	4242.6	4248.8	4254.5	4261.5
9	4787.5	4904	4968.2	5020.9	5072.8
10	5499.1	5519	5532.8	5545.7	5560.7

Table 4. Natural frequencies for S pipelines/Hz
表 4. S型管路不同壁厚固有频率/Hz

阶次/壁厚	1.6 mm	1.8 mm	2 mm	2.2 mm	2.4 mm
1	838.62	846.95	855.92	864.63	873.34
2	880.39	889.2	900.37	911.31	921.66
3	1296	1309.7	1324.6	1338.7	1352.4
4	2130.6	2160.3	2199.3	2235.8	2269.7
5	3023.8	3052.9	3085.6	3116.4	3146.6
6	4504.4	4566.6	4629.6	4685.8	4737
7	4521.5	4567.8	4635.5	4694.5	4747.8
8	6160.7	6263.6	6367	6453.2	6525.7
9	6941.3	7018.8	7126.7	7219.8	7286.2
10	6973.9	7060.2	7147	7221.9	7306.5

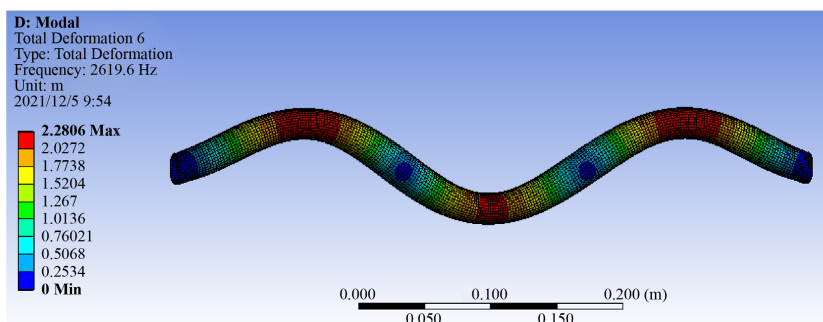
Table 5. Natural frequencies for Ω pipelines/Hz
表 5. Ω型管路不同壁厚固有频率/Hz

阶次/壁厚	1.6mm	1.8 mm	2 mm	2.2 mm	2.4 mm
1	437.71	445.46	452.4	458.91	464.98
2	1248.1	1267.6	1285.3	1301.9	1317.4
3	1407.7	1432.7	1455.1	1475.9	1495.3

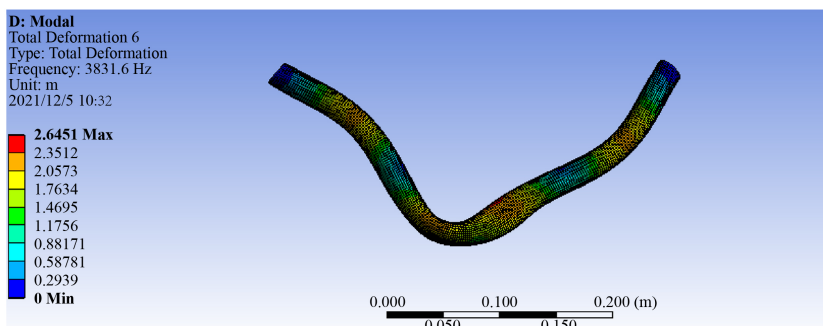
Continued

4	1451.5	1481.4	1507.8	1531.9	1554.2
5	1961.3	1990.7	2017.2	2042	2065.1
6	1968.4	2019.9	2064.1	2103.4	2138.3
7	2998.3	3045.5	3086.6	3123.5	3157.2
8	4197.6	4286.9	4360.8	4424.8	4481
9	4788.1	4883.4	4960.9	5026.6	5083.7
10	5696.1	5855	5977.5	6074.8	6153.9

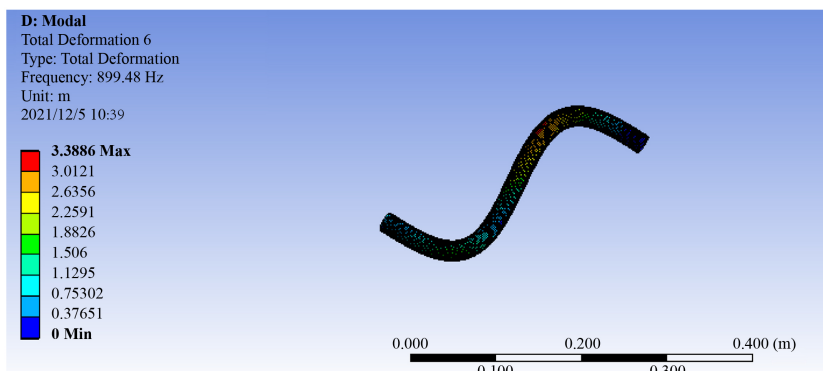
由分析结果可知,随着壁厚的逐渐增加,管路的固有频率也逐渐增加。壁厚为 1.6 mm 的直管型管路、90°型管路、S 型管路、Ω 型管路振型图如图 2 所示。



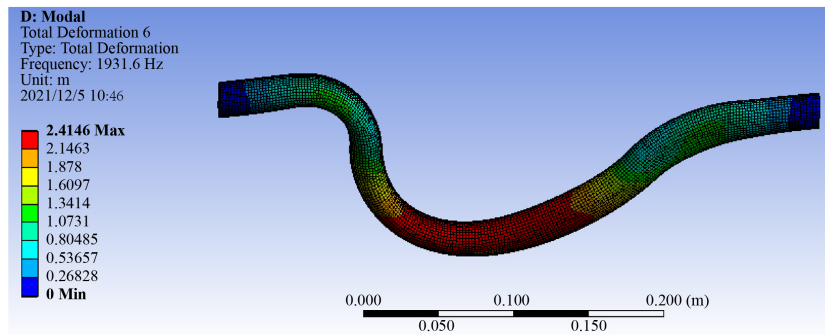
(a) 直管型管路



(b) 90°型管路



(c) S 型管路



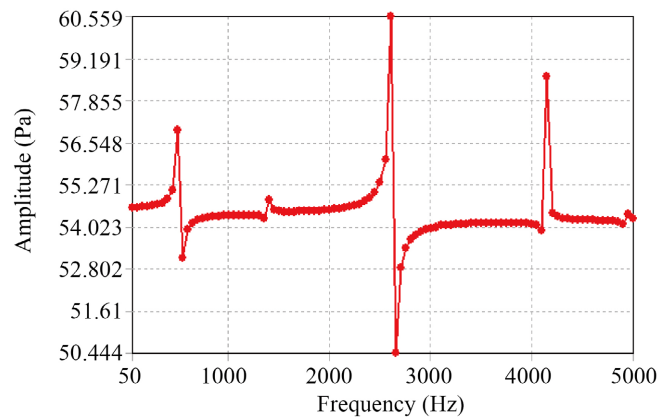
(d) Ω 型管路

Figure 2. Vibration modes for pipelines
图 2. 各管型管路振型图

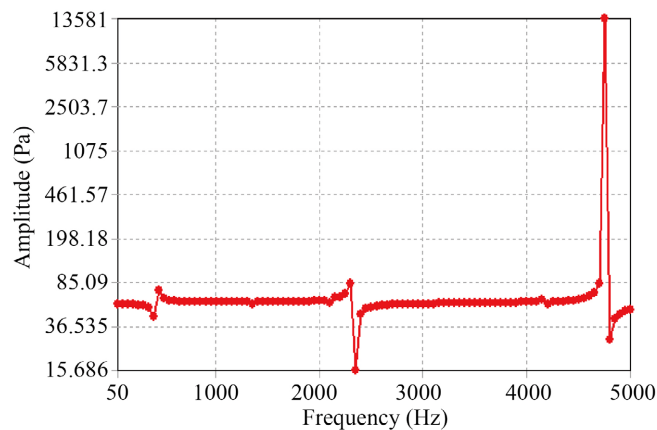
从以上仿真结果可知, 直管管型的变形最小, 其次是 Ω 管型管路、 90° 型管路, S 管型的变形值最大。

3.2. 振动响应分析

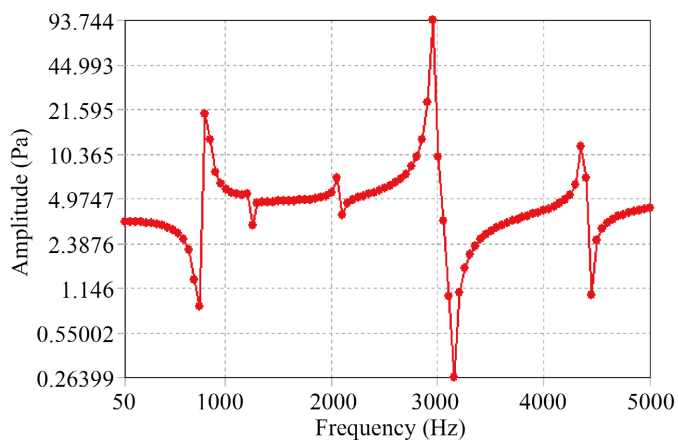
航空发动机管路会受到来自发动机的基础简谐振动激励, 正常管道内压力为 1~2 MPa [15], 根据控制变量法的原则, 预应力保持不变, 分析管路壁厚为 1.6 mm 的直管型管路、 90° 型管路、S 型管路、 Ω 型管路的振动响应, 应力幅值如图 3 所示。



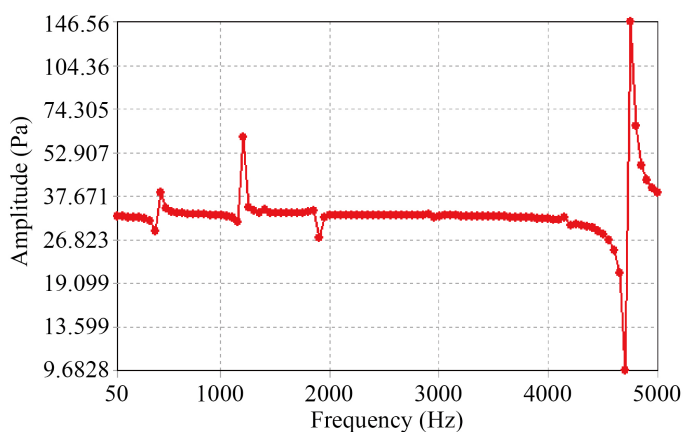
(a) 直管型管路



(b) 90° 型管路



(c) S 型管路

(d) Ω 型管路**Figure 3.** Amplitude responses for pipelines**图 3.** 各管路振动响应幅值图**Table 6.** The max stress responses**表 6.** 应力响应幅值最大值

管型	应力最大值/Pa	最大值时频率/Hz
直管型管路	60.559	2600
90°型管路	13581	4750
S 型管路	93.744	2950
Ω 型管路	146.56	4750

不同管型管路振动响应值的最大值如表 6 所示。由振动响应分析结果可知, 相同条件下各类管型管路中, 直管型管路的应力值最小, 其次是 S 型管路、 Ω 型管路, 90°型管路应力值最大。

4. 结论

对航空发动机外部管路进行了有限元仿真分析。由分析结果可知, 随着管路壁厚的逐渐增加, 管路的固有频率逐渐增大。相同条件下各类管型管路振动响应中, 直管型管路的应力值最小, 其次是 S 型管路和 Ω 型管路, 90°型管路振动响应最大。管路设计时应充分考虑管路壁厚和管型对固有频率和振动响应

的影响, 合理优化设计壁厚和管型, 以利于管路的长久稳定工作。

基金项目

NSFC-联合基金“大型复杂机械结构疲劳全寿命可靠性理论及方法研究”(U1708255)。

参考文献

- [1] Olson, L.G. and Jamison, D. (1997) Application of a General Purpose Finite Element Method to Elastic Pipes Conveying Fluid. *Journal of Fluids and Structures*, **11**, 207-222. <https://doi.org/10.1006/jfls.1996.0073>
- [2] Mamaghani, A.E. and Khadlem, S.E. (2016) Vibration Control of a Pipeconveying Fluid under External Periodic Excitation Using a Nonlinear Energy Sink. *Nonlinear Dynamics*, **86**, 1761-1795. <https://doi.org/10.1007/s11071-016-2992-x>
- [3] 卢丽金, 黄超广, 沈祖辉. 飞机液压/燃油管路系统振动故障模式、机制及排除方法[C]//中国振动工程学会. 中国航空结构动力学专业组第十六届学术交流会论文集. 西安: 振动工程学报出版社, 2008: 88-92.
- [4] 李占营, 王建军, 邱明星. 航空发动机管路流固耦合振动的固有频率分析[J]. 航空发动机, 2017, 43(1): 66-70.
- [5] 王世忠, 王茹. 三维管道固液耦合振动分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1992(4): 43-49.
- [6] 邱明星, 陈志英, 王建军, 刘中华, 赵伟志. 充液管路固有频率试验与计算分析[J]. 推进技术, 2013, 34(11): 1537-1542.
- [7] 贾志刚, 陈志英. 航空发动机管路调频方法研究[J]. 装备制造技术, 2008(1): 18-20.
- [8] 康力, 洪杰, 徐雷, 赵凯, 张大义. 航空发动机外部管路的振动响应分析[J]. 航空发动机, 2015, 41(2): 50-54.
- [9] Zhou, Q. and Lyu, Y. (2020) Research Based on Lee Algorithm and Genetic Algorithm of the Automatic External Pipe Routing of the Aircraft Engine. *International Journal of Mechanical Engineering and Applications*, **8**, 40-44. <https://doi.org/10.11648/j.ijmea.20200801.16>
- [10] Gholami, H., Shahrooi, S. and Shishehsaz, M. (2021) Strain-Based Fatigue Life Analysis of Pipelines with External Defects under Cyclic Internal Pressure. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, **56**, 313-326. <https://doi.org/10.1177/0309324720957569>
- [11] 徐培原, 刘伟. 发动机外部管路系统的卡箍布局多目标优化[J]. 航空发动机, 2020, 46(6): 46-52. <https://doi.org/10.13477/j.cnki.aeroengine.2020.06.009>
- [12] 刘玉柱, 刘学文, 许绝舞, 杨静思. 某航空液压管道振动异常故障研究[J]. 航空维修与工程, 2021(6): 57-60.
- [13] 于瀛. 基于 ANSYS Workbench 的管道系统流固耦合振动特性分析[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2016.
- [14] 喻靖宇, 顾伟伟, 吕晓翼, 张润忤, 刘树林. 海底管道固有频率影响因素分析[J]. 机械制造, 2015, 53(5): 11-15.
- [15] 王煜, 李书明, 黄燕晓. 航空发动机液压管路振动特性分析[J]. 机械设计, 2019, 36(S1): 129-131.
- [16] 潘柏霖. 航空发动机外部管路特性与系统动力学参数研究[J]. 内燃机与配件, 2018(6): 6-7.