

考虑螺栓连接的航空发动机管路建模及振动特性分析

刘中华¹, 李建福¹, 孙志航¹, 柴清东², 马辉², 贾铎³

(1. 空装驻沈阳地区第二军事代表室, 沈阳 110043; 2. 东北大学 机械工程与自动化学院, 沈阳 110819;
3. 中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

摘要: 为了建立考虑真实卡箍结构影响的管路系统动力学模型、获取结构设计参数和装配参数等对管路系统动力学特性的影响规律, 以航空发动机外部管路为研究对象, 考虑金属橡胶卡箍螺栓拧紧力矩的影响, 基于 ANSYS 有限元软件建立了包含螺栓连接的管路模型。通过模态试验及基础激励响应试验验证了有限元模型的准确性。进一步分析了螺栓拧紧力矩、卡箍跨距及管体长度对双卡箍管路系统固有频率的影响规律。结果表明: 拧紧力矩的增大导致管路的固有频率的提高, 针对本研究模型, 在拧紧力矩达到 $8\text{ N}\cdot\text{m}$ 以后, 管路固有频率逐渐趋于稳定; 拧紧力矩对不同长度管路的固有频率影响不同, 管路越长, 拧紧力矩的作用越弱, 即卡箍的支承刚度对管路固有频率的影响越弱。

关键词: 管路; 卡箍; 螺栓连接; 动力学特性; 航空发动机

中图分类号: V229+.5

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2021.06.008

Modeling and Analysis of Vibration Characteristics of Aeroengine Pipeline with Bolt Connection

LIU Zhong-hua¹, LI Jian-fu¹, SUN Zhi-hang¹, CHAI Qing-dong², MA Hui², JIA Duo³

(1. Shenyang Area 2nd Military Representative Room of Air Force Equipment Department, Shenyang 110043, China;
2. School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;
3. AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: In order to establish the dynamic model of the pipeline system considering the influence of the real clamp structure, and obtain the influence law of the structural design parameters and assembly parameters on the dynamic characteristics of the pipeline system, taking the external pipeline of the aeroengine as the research object, a piping model including bolted connections is established based on ANSYS finite element software. And the influence of the tightening torque of the metal rubber clamp bolts is also considered in this model. The accuracy of the finite element model is verified through modal tests and basic excitation response tests. Furthermore, the influences of bolt tightening torque, clamp span and pipe length on the natural frequency of the double clamp piping system are analyzed. The results show that the increase in the tightening torque leads to an increase in the natural frequency of the pipeline. As far as this model is concerned, after the tightening torque reaches $8\text{ N}\cdot\text{m}$, the natural frequency of the pipeline gradually stabilizes. Moreover, the influence of tightening moment on natural frequency of pipeline of different length is different, the longer the pipeline, the weaker the effect of tightening torque is, in other words, the weaker the influence of the support stiffness of the clamp on the natural frequency of the pipeline.

Key words: pipe; clamp; bolt connection; dynamic characteristics; aeroengine

0 引言

外部管路是航空发动机的重要组成部分, 长期以来, 由振动引起的发动机外部管路失效一直是影响发动机可靠性的重要问题之一^[1-3]。因此, 对外部管路

振动特性的研究尤为重要。

针对航空发动机外部管路采用卡箍支撑的结构特点, 尹泽勇等^[4]对卡箍刚度进行了有限元计算, 并通过试验对典型卡箍的刚度进行了验证, 获得了卡箍刚度的计算方法, 可用于工程实际; Ulanov 等^[5]通过迟

收稿日期: 2019-12-05 基金项目: 航空动力基础研究项目资助

作者简介: 刘中华(1988), 男, 硕士, 工程师, 从事航空发动机外部结构设计工作; E-mail: bilvde2008@163.com。

引用格式: 刘中华, 李建福, 孙志航, 等. 考虑螺栓连接的航空发动机管路建模及振动特性分析[J]. 航空发动机, 2021, 47(6): 45-49. LIU Zhong-hua, LI Jianfu, SUN Zhihang, et al. Modeling and analysis of vibration characteristics of aeroengine pipeline with bolt connection[J]. Aeroengine, 2021, 47(6): 45-49.

滞回线确定了卡箍刚度及等效黏性阻尼,提出一种基于 ANSYS 的振动特性分析方法,且仿真计算与试验结果吻合较好;Nassar 等^[6]通过试验分析了拧紧速度等因素对螺栓连接性能的影响,提高了估算其夹紧力的可靠性;李占营等^[7]对柔性卡箍的实际结构进行分析,得出卡箍横向刚度具有分段线性的特点,并进一步分析了其对振动响应的影响;Qiu 等^[8]基于有限元法分析了影响螺栓连接性能的各项参数,表明预紧力是最为主要的参数;Gao 等^[9]采用梁单元模拟管路,用弹簧模拟卡箍的形式建立卡箍管路系统模型,并通过试验验证了模型的有效性;Rao 等^[10]基于有限元提出反推螺栓预紧力的算法,获得了螺栓不松动的预紧力范围;Kim 等^[11]采用有限元软件通过不同的建模方法建立了带有螺栓连接的结构,表明采用实体螺栓模型的计算结果最为准确。

由以上的文献分析可知,针对管路-卡箍系统的力学模型,大多将卡箍螺栓的拧紧影响等效为卡箍本身的刚度特性,与实际结构存在一定的差距。本文在已有研究基础上,考虑管路-卡箍系统模型中螺栓拧紧的影响,采用有限元接触模型与试验相结合的方式对比研究。

1 有限元模型建立

1.1 实体模型建立

考虑管路-卡箍系统的实际结构,基于 ANSYS 有限元软件,建立了管路卡箍支撑条件下的实体接触有限元模型,如图 1 所示。

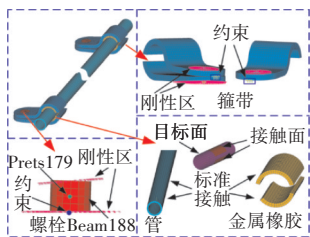


图 1 管路系统有限元模型

其中管路外径 8 mm,内径 6.4 mm,长 500 mm,卡箍跨距 450 mm 且对称分布。相应管路、卡箍及其他构件的材料参数^[12]见表 1。

管体、金属橡胶及卡箍板材均选用 Solid45 实体单元进行网格划分,共

46690 个节点,43156 个单元。金属橡胶与箍带间采用共节点操作,模拟真实焊接结构;金属橡胶与管路

间为标准接触,其中金属橡胶面为接触面,管路面为目标面,接触单元与目标单元分别选用 Conta174 和 Targe170 单元;卡箍螺栓部分采用 Beam188 梁单元建模,每个螺栓划分为 4 个单元,5 个节点,在螺栓中心节点添加 Prets179 预紧力单元,模拟卡箍螺栓的预紧效果;螺栓头部与螺栓台采用刚性区域模拟,即螺栓头部与箍带相接触的区域的所有节点采用刚性区绑定在一起;考虑到拧紧后上下箍带的实际接触长度,对上箍带边缘 3 个节点的位移约束为 0,达到固定约束的目的。

1.2 管路弹性模量优化

通过对管路的测量,其结构参数误差较小,而由于自购管路其弹性模量可能存在一定的偏差,为了消除管路自身的误差,更好地反映卡箍对管路的动力学特性所造成的影响,提高螺栓拧紧对管路动力学影响的分析精度,需对管路弹性模量通过自由模态试验进行修正。采用 1 阶优化算法对最佳弹性模量进行寻优,优化范围为 $1.8 \times 10^{11} \sim 2.4 \times 10^{11}$ Pa,迭代次数 50 次,初值为 2.04×10^{11} Pa。优化后的弹性模量结果为 1.99×10^{11} Pa,其中前 8 阶固有频率对比结果见表 2。

表 2 试验与优化结果对比

阶次	试验频率/ Hz	优化前仿真/ Hz	优化前误差/ %	优化后仿真/ Hz	优化后误差/ %
	Hz	Hz	%	Hz	%
1	180.41	183.64	1.79	181.27	0.48
2	498.41	505.53	1.42	499.00	0.11
3	976.27	991.44	1.55	978.63	0.24
4	1586.11	1605.93	1.25	1585.17	-0.06
5	2392.94	2424.03	1.30	2392.70	-0.01
6	3272.90	3309.72	1.13	3266.94	-0.18
7	4348.16	4387.43	0.90	4330.71	-0.40
8	5533.06	5599.04	1.19	5526.66	-0.12

2 模型验证

2.1 模态试验验证

采用上文修正后的管路模型,考虑卡箍螺栓的预紧力效应对管路固有特性的影响,在拧紧力矩为 7 N·m 下对固有频率进行仿真计算,采用如下经验公式^[13]。

(1) 计算预紧力。

$$F=T/(0.22\ d) \tag{1}$$

式中: T 为拧紧力矩; d 为螺栓直径,本文 $d=6$ mm。

由于预紧力的存在,在 ANSYS 软件模态求解前应进行静力学分析以考虑预应力影响。

为证明仿真模型有效性,通过锤击法获得管路系

统固有频率及振型^[14],试验测试现场如图 2 所示。采用 DH5956 测试系统进行数据采集和分析。

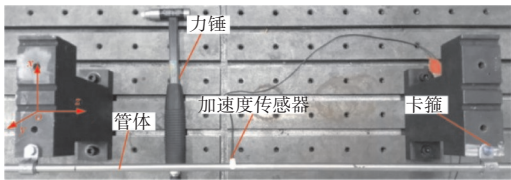


图 2 锤击试验

仿真计算与试验测试对比结果见表 3。从表中可见,在拧紧力矩为 7 N·m 时,管路各方向仿真计算的前 2 阶固有频率与试验结果基本一致,误差均在 4% 以内,能够满足实际工程需要。其中管路 x 方向固有频率低于管路 y 方向的,这是因为金属橡胶卡箍 y 方向是螺栓预紧的方向,而在 x 方向管路靠卡箍结构形状夹紧,所以管路 x 方向固有频率低于管路 y 方向的。这也体现出卡箍不同方向刚度不一致的特点。

表 3 固有频率仿真与试验结果对比

振型	方向	固有频率/Hz		误差/%
		仿真	试验	
1 阶弯曲	x	148.88	155.0	3.95
	y	164.03	165.4	0.83
2 阶弯曲	x	456.81	472.4	3.30
	y	473.49	480.3	1.42

管路 y 向试验及仿真前 2 阶振型对比如图 3 所示; x 向振型与之类似,不再赘述。

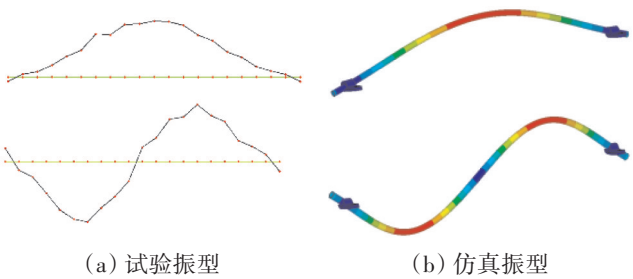


图 3 振型对比

2.2 基础激励试验验证

航空发动机管路经常受到旋转机械产生的周期性不平衡激励作用,当激振频率接近管路的固有频率时,往往导致管路产生大幅度共振。卡箍管路系统在基础激励下的振动测试系统如图 6 所示。电磁振动台用于模拟机匣的基础激励,激振加速度为 0.5g。

在响应计算中选取比例阻尼进行求解,模态阻尼比均为 0.04,仿真计算与试验测试的对比结果如图 4

所示。二者吻合较好,充分验证了本文模型的有效性。

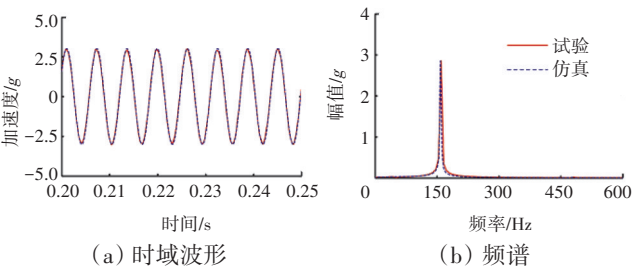


图 4 仿真与试验振动响应对比

3 固有特性参数分析

3.1 拧紧力矩对管路固有频率的影响

航空发动机外部管路在机匣外装配过程中,卡箍上的螺栓通过人工手动拧紧,拧紧力矩存在差异。仿真模型选用上文修正后的有限元模型,在螺栓上施加不同拧紧力矩,分析管路卡箍螺栓在拧紧力矩为 2~13 N·m 下的固有频率。仿真计算与试验测试对比结果如图 5 所示。

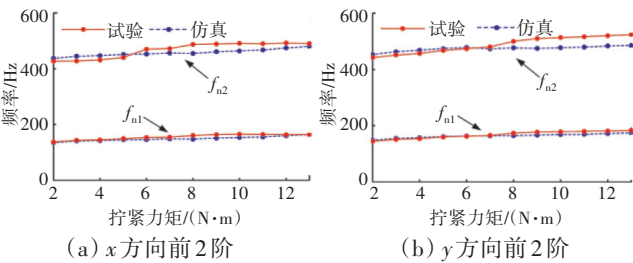
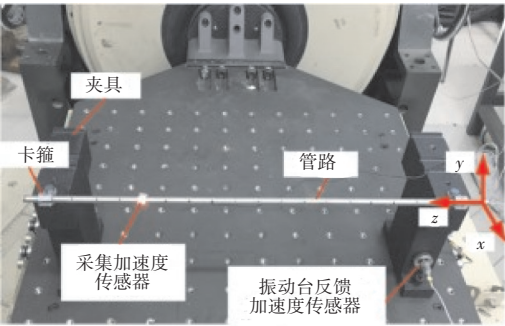


图 5 仿真与试验固有频率对比

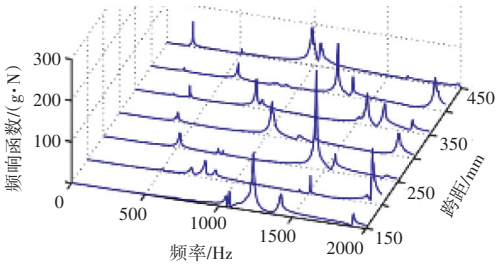
从图 5 中可见,随着拧紧力矩的不断增大,管路的固有频率逐渐升高,这是由于随着螺栓的拧紧,金属橡胶逐渐被挤压,支承刚度逐渐增大,使管路固有频率不断提高。在不同拧紧力矩下,管路不同方向第 1、2 阶固有频率最大误差均在 8% 以内,满足实际工程需求。此外,在拧紧力矩达到 8 N·m 以上时,管路的固有频率提高缓慢且趋于稳定,这是因为金属橡胶已经被压实,支承刚度增大有限。

3.2 卡箍跨距对管路固有频率的影响^[15]

卡箍在航空管路的布局中起着固定约束的作用,但由于发动机装配空间问题,许多管路的固定卡箍跨距均不相同。采用与前文相同的管路模型,通过固定管路一端卡箍,调整另外一端卡箍位置,分析管路在不同卡箍跨距下,管路系统在 2000 Hz 以内的固有频率,并通过试验验证仿真计算的准确性。在不同跨距下试验的频响函数如图 6 所示,仿真计算与试验测试



(a) 试验装置



(b) 频响函数

图 6 不同跨距下频响函数

的对比结果见表 4。从图 6 和表 4 中可见,在不同卡箍跨距下,固有频率均吻合较好,最大误差未超过 6.06 %。一方面,说明卡箍模型的准确性,相应的卡箍模型可应用于工程实际;另一方面,根据计算结果,在固定一端卡箍时且保证管长不变的情况下,增加卡箍跨距将使管路基频呈现先提高后降低的趋势,这是由于管路在小跨距时,一端悬臂,随着跨距的增大,管路悬臂端逐渐减小,因此呈现此趋势。

表 4 不同跨距下管路固有频率

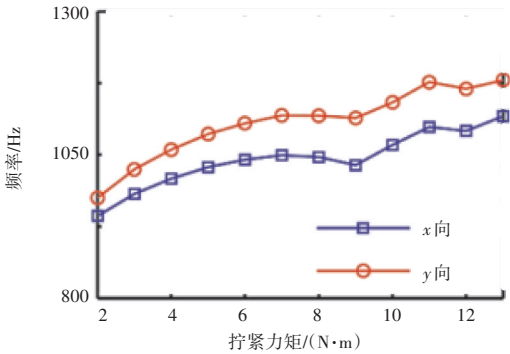
跨距/mm	第 1 阶对比			第 2 阶对比		
	仿真/Hz	试验/Hz	误差/%	仿真/Hz	试验/Hz	误差/%
150	60.62	60.4	-0.34	387.26	381.5	-1.51
200	80.75	81.8	1.27	511.44	511.5	0.01
250	113.61	118.4	4.05	498.46	519.4	4.03
300	170.38	176.4	3.41	381.13	388.2	1.82
350	231.46	237.4	2.5	375.62	364.4	-3.08
400	201.68	211.8	4.78	570.26	571.3	0.18

跨距/mm	第 3 阶对比			第 4 阶对比		
	仿真/Hz	试验/Hz	误差/%	仿真/Hz	试验/Hz	误差/%
150	1050.42	1052	0.15	1312.21	1237.2	-6.06
200	787.51	801.4	1.73	1513.82	1516.7	0.15
250	799.68	811.8	1.49	1515.12	1449	-4.56
300	1045.7	1027.1	-1.82	1301.93	1326.3	1.82
350	835.93	829.5	-0.77	1637.96	1558.6	-5.13
400	881.97	857.5	-2.85	1340.09	1354.1	1.03

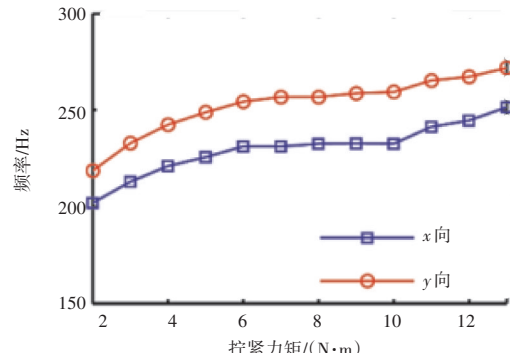
3.3 拧紧力矩对不同管长固有特性的影响

在实际管路布局安装时,通常管路长度、跨度及拧紧力矩会有所不同。研究长 0.2、0.4、0.6 m 的管路在拧紧力矩为 2~13 N·m 下的固有频率变化规律。在建模过程中,卡箍中心距离管路两端均为 0.025 m,其余参数参考前文的有限元模型。

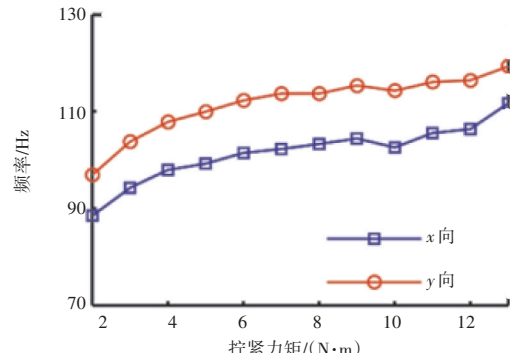
仿真计算结果如图 7 所示。对于不同的管长,管路 y 方向固有频率均大于 x 方向的,这与前文的原因相同。从图中可见,当管长为 0.2 m 时,随着拧紧力矩的增大,管路 y 方向第 1 阶固有频率提高了 205 Hz;而当管长为 0.6 m 时,随着拧紧力矩的增大,管路 y 方向第 1 阶固有频率仅提高 20 Hz。即随着管路长度的增



(a) 管长为 0.2 m



(b) 管长为 0.4 m



(c) 管长为 0.6 m

图 7 拧紧力矩对不同长度管路固有特性影响

加,固有频率受拧紧力矩的影响逐渐减小,也即卡箍的支承刚度对管路固有频率的影响逐渐减小。这是因为随着管路长度的增加,管路的结构刚度对固有频率的影响逐渐增大,而支承刚度的影响逐渐减弱。

4 结论

(1) 针对双卡箍夹持管路系统,基于ANSYS软件建立了考虑螺栓连接的管路系统有限元模型,利用锤击试验和基础激励响应试验进行验证,结果充分表明本文模型的有效性。

(2) 由于卡箍自身结构的不对称性,卡箍刚度也具有不对称的特点,螺栓预紧方向的刚度大于另一方向的,通过试验与仿真计算的验证。

(3) 通过试验及仿真对比可知,随着拧紧力矩的增大,管路的固有频率呈提高趋势,对于本文的研究对象而言,在拧紧力矩达到 $8\text{ N}\cdot\text{m}$ 以后,管路固有频率趋于稳定。

(4) 拧紧力矩对不同长度管路固有特性的作用不同,管路越长,拧紧力矩的作用越弱,即卡箍的支承刚度对管路固有频率的影响越弱。

参考文献:

- [1] 李洋,佟文伟,韩振宇. 发动机引气管卡箍断裂原因分析[J]. 失效分析与预防,2013,8(3): 167-172.
LI Yang, TONG Wenwei, HAN Zhenyu. Fracture analysis of aeroengine cited trachea clamp[J]. Failure Analysis and Prevention, 2013, 8(3): 167-172. (in Chinese)
- [2] Alizadeh A A, Mirdamadi H R, Pishevar A. Reliability analysis of pipe conveying fluid with stochastic structural and fluid parameters[J]. Engineering Structures, 2016, 122: 24-32.
- [3] Tian J, Yuan C, Yang L, et al. The vibration characteristics analysis of pipeline under the action of gas pressure pulsation coupling[J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 16(3): 499-505.
- [4] 尹泽勇,陈亚农. 卡箍刚度的有限元计算与实验测定[J]. 航空动力学报, 1999, 14(2): 179-182.
YIN Zeyong, CHEN Yanong. Finite element analysis and experimental measurement of stiffness of hoop[J]. Journal of Aerospace Power, 1999, 14(2): 179-182. (in Chinese)
- [5] Ulanov A M, Bezborodov S A. Calculation method of pipeline vibration with damping supports made of the MR material[J]. Procedia Engineering, 2016, 150: 101-106.
- [6] Nassar S A, Ganeshmurthy S, Ranganathan R M, et al. Effect of tightening speed on the torque-tension and wear pattern in bolted connections[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2007, 129(3): 1669-1681.
- [7] 李占营,王建军,邱明星. 简谐激励下柔性卡箍支承管路系统响应[J]. 航空动力学报, 2017, 32(11): 2705-2712.
LI Zhanying, WANG Jianjun, QIU Mingxing. Responses of pipe system with flexible clamp under harmonic excitation[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(11): 2705-2712. (in Chinese)
- [8] Qiu M, Yan J, Zhao B, et al. A finite-element analysis of the connecting bolts of slewing bearings based on the orthogonal method[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2012, 26(3): 883-887.
- [9] Gao P X, Zhai J Y, Yan Y Y, et al. A model reduction approach for the vibration analysis of hydraulic pipeline system in aircraft[J]. Aerospace Science & Technology, 2016, 49: 144-153.
- [10] Rao G, Wei G. Inversion of pretightening force on bolts by fea and its application[C]// International Conference on Electrical and Control Engineering. Wuhan: IEEE Computer Society, 2010: 2824-2827.
- [11] Kim J, Yoon J C, Kang B S. Finite element analysis and modeling of structure with bolted joints[J]. Applied Mathematical Modelling, 2007, 31(5): 895-911.
- [12] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册: 第1卷[M]. 北京: 中国标准出版社, 1988: 658-675.
Editorial Board of China Aviation Materials Handbook. China aviation materials handbook: Vol. I[M]. Beijing: Standards Press of China, 1988: 658-675. (in Chinese)
- [13] 徐灏. 机械设计手册: 第3卷[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995: 21-53.
XU Hao. Handbook of mechanical engineering: Vol. 3[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1995: 21-53. (in Chinese)
- [14] 邱明星,陈志英,王建军,等. 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.
QIU Mingxing, CHEN Zhiying, WANG Jianjun, et al. Experiment and numerical analysis of natural frequency for liquid-filled pipe[J]. Journal of Propulsion Technology, 2013, 34(11): 1537-1542. (in Chinese)
- [15] 刘伟,曹刚,翟红波. 发动机管路卡箍位置动力灵敏度分析与优化设计[J]. 航空动力学报, 2012, 27(12): 2756-2762.
LIU Wei, CAO Gang, ZHAI Hongbo. Sensitivity analysis and dynamic optimization design of supports' positions for engine pipelines[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(12): 2756-2762. (in Chinese)

(编辑:程海)