

航空发动机套齿动态装配间隙非概率优化设计

陈志英, 谷 裕, 周 平, 刘宏蕾, 王 朝
(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘要:为解决航空发动机套齿动态装配间隙的响应问题,在考虑动态变形和参数不确定性的情况下,将 1 种非概率区间分析方法与 Kriging 响应面模型及响应面优化方法相结合,对套齿初始装配间隙进行了可靠性优化设计。以某刚性套齿联轴器作为数值算例,在确定性设计的基础上,考虑机械载荷、热载荷、材料参数的分散性,运用区间分析方法得到了动态装配间隙的响应范围,利用非概率可靠性指标对初始装配间隙进行了优化设计。与确定性设计相比,优化设计提高了结构的可靠性;与概率设计相比,优化设计降低了对不确定参数的信息要求。验证了非概率方法解决装配对象不确定性结构响应问题的可行性与适用性。

关键词:套齿;动态装配间隙;非概率区间分析方法;可靠性优化;航空发动机

中图分类号: V232.9

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2017.03.001

Non-probabilistic Optimization Design of Dynamic Assembly Gap for Aeroengine Spline

CHEN Zhi-ying, GU Yu, ZHOU Ping, LIU Hong-lei

(School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to solve the problem of uncertain response of the dynamic assembly gap for aeroengine spline, considering the dynamic deformation, a non-probabilistic interval analysis method was combined with the Kriging response surface model and the response surface optimization method, and the reliability optimization design of the initial assembly gap for spline was carried out. A rigid spline coupling was taken as a numerical example, based on the deterministic design, considering the dispersion of mechanical load, thermal load and material parameters, the interval analysis method was used to obtain the dynamic response range of the gap, and a non-probabilistic reliability index was used to optimize the initial assembly gap. Compared with the deterministic design, the reliability of the structure is improved. Compared with the probabilistic design, the information requirement of the uncertain parameters is reduced. The feasibility and applicability of non-probabilistic method to solve the problem of uncertain structural response of assembly objects are verified.

Key words: spline; dynamic assembly gap; non-probabilistic interval analysis method; reliability optimization design; aeroengine

0 引言

航空发动机是 1 个由众多零件组成的装配体,诸如齿轮齿侧、转静子径向轴向、篦齿封严等之间的装配间隙对发动机的可靠性有着重要影响^[1]。然而各关键装配间隙的影响因素除了结构尺寸外,还包括系统的材料力学行为、构件状态抗力、载荷、环境与时间历程等不确定因素^[2],因此装配对象不确定性的结构响应问题的分析与优化设计对提高航空发动机可靠性有重要意义。同时,基于概率的结构可靠性设计已经受到广泛关注^[3-6]。但应该指出,结构的不确定性变量

概率密度的试验信息常常是缺乏的,因此不确定变量是否满足某种假定的分布很难验证^[7],而且概率数据的较小误差可能引起概率分析的较大误差^[8]。区间分析方法作为非概率理论中 1 种研究方法,由于只需要不确定变量的上、下界,降低了对试验数据的要求,并且可以给出结构响应的上、下界,在设计初期也被应用于结构的不确定性分析中^[9-12]。而以上研究主要集中在轮盘、叶片等重要结构和转子动力特性上,以装配对象进行非概率分析及优化设计的研究很少。

本文以航空发动机刚性套齿联轴器为研究对象,基于区间分析方法并结合 Kriging 响应面模型及响应

收稿日期: 2016-11-19 基金项目: 国家自然科学基金(51275024)资助

作者简介: 陈志英(1960),男,教授,主要从事发动机结构强度可靠性及多学科优化方面工作; E-mail: chenzying@buaa.edu.cn。

引用格式: 陈志英, 谷裕, 周平, 等. 航空发动机套齿动态装配间隙非概率优化设计[J]. 航空发动机, 2017, 43(3): 1-4. CHEN Zhiying, GU Yu, ZHOU Ping, et al. Non-probabilistic optimization design of dynamic assembly gap for aeroengine spline[J]. Aeroengine, 2017, 43(3): 1-4.

面优化方法,对套齿装配间隙进行非概率可靠性优化设计。验证了基于区间分析的非概率方法在装配对象不确定性结构响应问题中的适用性与可行性;在试验信息缺乏的设计初期提供 1 种装配对象不确定性问题的解决方法。

1 区间不确定变量

刚性套齿联轴器是航空发动机中的典型连接结构,齿侧间隙是影响套齿配合质量的关键装配特征参数。套齿结构在受到载荷作用之后,其齿侧间隙会随载荷增大而增大,而齿侧间隙过大会导致不平衡量增加,引起发动机振动过大,初始装配间隙过小又会导致装配困难^[13]。因此在考虑参数不确定性的情况下,应合理确定初始装配间隙,尽量减小装配难度,同时使齿侧间隙在整个任务剖面内不超过规定阈值,保证结构的可靠性。基于以上考虑,定义相关变量,将初始装配间隙 X 考虑成设计变量,将影响动态侧隙响应的转速 y_2 、温度 y_3 、扭矩 y_4 、密度 y_5 、弹性模量 y_6 考虑成区间变量,将动态侧隙响应 $g(x, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6)$ 作为输出变量,进行非概率优化设计。

将装配对象不确定参数 考虑成区间变量,参数的上、下界分别为 y_{\min} 、 y_{\max} 。即 $y \in [y_{\min}, y_{\max}]$, 令

$$y_c = \frac{y_{\min} + y_{\max}}{2} \quad (1)$$

$$y_r = \frac{y_{\max} - y_{\min}}{2} \quad (2)$$

则区间 y_r 和区间参数 y 可分别表示为

$$y_i = y_c + y_r \Delta r \quad (3)$$

$$y = y_c + y_r \omega \quad (4)$$

式中: $\Delta r \in \{-1, 1\}$, 为标准化区间; $\omega \in \Delta r$, 为标准化区间变量; y_c 为区间变量 y 的算术平均值; y_r 为区间变量 y 的离散, 代表 y 相对于均值的离散程度。

2 非概率可靠性优化方法

2.1 非概率可靠性指标

与概率分析不同,非概率方法无法得出变量概率密度函数,不能进行结构可靠度计算。因此非概率方法利用可靠性指标度量结构可靠性^[14-15]。设极限状态函数为

$$H = g_{\text{accept}} - g(x, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6) \quad (5)$$

若 $H < 0$, 则套齿处于失效状态; $H > 0$, 则处于可靠状态。其上、下界分别为 H_{\max} 、 H_{\min} 。则定义套齿结构可

靠性参数为

$$\eta = H_c / H_r = \frac{(H_{\min} + H_{\max})}{(H_{\max} - H_{\min})} \quad (6)$$

当 $\eta > 1$ 时, 对任意 x 均有 $H > 0$, 套齿安全可靠; 当 $\eta < -1$ 时, 对任意 x 均有 $H < 0$, 齿侧间隙超过阈值, 结构一定不可靠; 当 $-1 \leq \eta \leq 1$ 时, 系统可能可靠, 也可能不可靠, η 越大, 套齿结构越可靠。因此 η 可作为套齿可靠性的度量。

2.2 非概率可靠性优化模型

根据输出函数的上、下界, 采用区间运算法则计算出极限状态函数的上、下界, 从而求得套齿结构在各设计点下的可靠性指标, 建立如下可靠性优化模型

$$\text{Find } X, \eta(X, P) \geq \eta_{\text{accept}}$$

$$\text{s.t. } x_{\min} \leq x \leq x_{\max}, y_i \in [y_{\min, i}, y_{\max, i}], i = 2, 3, 4, 5, 6 \quad (7)$$

即在给定区间范围内, 找到 1 个合适的初始装配间隙 x , 在各参数在一定区间范围内时, 使得结构可靠性指标满足要求。

3 数值算例

3.1 确定性分析

选取某航空发动机高压转子刚性套齿联轴器, 初始装配间隙 $x = 100 \mu\text{m}$, 根据中国机械工业标准, 选取 d 级精度, 公差等级为 5, 齿侧间隙阈值定为 $120 \mu\text{m}$ 。建立如图 1 所示的有限元模型, 选取某航空发动机的典型任务剖面中的爬升阶段, 即载荷最大阶段作为危险点, 计算最大载荷下的齿侧间隙。其中爬升阶段载荷: 转速为 1150 rad/s , 温度为 $366 \text{ }^\circ\text{C}$, 扭矩为 $2.15\text{E}+07 \text{ N}\cdot\text{mm}$ 。经过有限元仿真, 得到计算结果如图 2 所示。由计算结果可知, 危险点最大齿侧间隙为 $117.34 \mu\text{m}$, 小于 $120 \mu\text{m}$, 满足最大允许值。

3.2 区间分析

在实际情况下, 结构受到的载荷、温度、材料属性以及力学性能都有一定的分散性, 确定性设计的结果并不一定能够保证结构可靠, 因



(a) 装配模型



(b) 内套齿



(c) 有限元模型

图 1 套齿几何模型及有限元模型

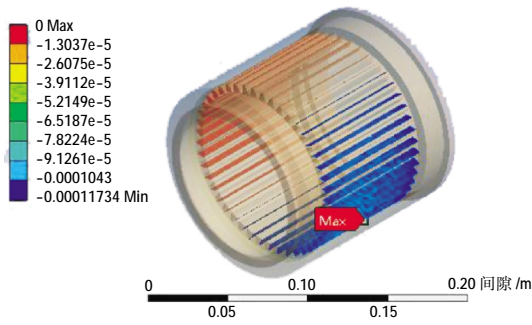


图 2 危险状态齿侧间隙响应分布

此需要对套齿齿侧间隙进行不确定分析。

本例将齿侧间隙、转速、温度、扭矩、密度、弹性模量考虑成区间变量,合理选择其取值范围,见表 1。

表 1 区间不确定变量

	设计点	最小值	最大值
$x/\mu\text{m}$	100	90	110
$y_2/(\text{rad/s})$	1150	1035	1265
$y_3/^\circ\text{C}$	366	329.4	402.6
$y_4/(\text{N}\cdot\text{mm})$	$2.15\text{E}+07$	$1.935\text{E}+07$	$2.365\text{E}+07$
$y_5/(\text{kg}/\text{m}^3)$	7800	7020	8580
y_6/GPa	$1.66\text{E}+11$	$1.494\text{E}+11$	$1.826\text{E}+11$

将齿侧间隙 x 考虑成设计变量,将转速、温度、扭矩、密度、弹性模量考虑成不确定参量。以设计点为基础,进行试验设计得到 46 组样本点,利用 Kriging 响应面模型^[16]构建受载荷下的动态齿侧间隙 $g(x, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6)$ 与设计变量 x 和区间不确定参量 $y_i (i=2, 3, 4, 5, 6)$ 的响应面模型。

基于已有的 46 组样本点和响应面模型,将样本点中的设计变量

齿侧间隙 x 考虑成确定量,将其其他不确定参量 $y_i (i=2, 3, 4, 5, 6)$ 考虑为区间变量,利用有限元软件 ANSYS 中的响应

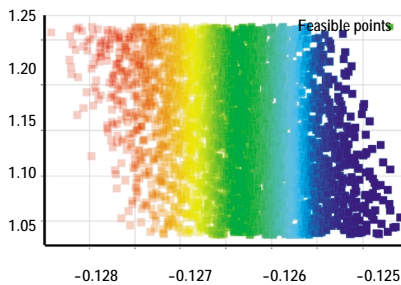


图 3 转速抽样结果

面优化模块,进行 3000 次抽样,如图 3 所示。

求得 46 个样本点的输出响应最大值、最小值,给出齿侧间隙响应所在区间,列出了 12 组典型数据,见表 2。

表 2 部分样本点下的输出变量上、下界

样本点 / μm	Min/ μm	Max/ μm	样本点 / μm	Min/ μm	Max/ μm
90.0000	104.8565	110.5545	100.0000	114.6793	121.2462
90.6367	105.7497	111.4536	102.9260	118.0391	123.7430
92.3800	107.4929	113.1968	104.1210	119.2338	124.9377
93.4237	108.5366	114.2406	106.4690	121.5821	127.2860
96.8077	111.9205	117.6244	109.0040	124.1175	129.8214
99.7953	114.9081	120.6120	110.0000	125.1131	130.8170

从表中可见,当初始装配齿侧间隙在 [90,110] 范围内时,考虑变量不确定性,结构动态侧隙响应范围为 [104.85,130.82],而初始设计点为 $100 \mu\text{m}$ 时,齿侧间隙最大值为 $121.25 \mu\text{m}$,超过规定阈值 $120 \mu\text{m}$,说明此时结构存在失效的危险,因此需要对初始装配间隙进行修正,使最大侧隙响应低于 $120 \mu\text{m}$ 。

3.3 初始装配间隙可靠性优化设计

本例中的极限状态函数为

$$H=120-g(x, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6)$$

根据侧隙响应范围可以计算出极限状态函数上、下界,从而求得各设计点可靠性指标,见表 3。

表 3 极限状态函数上、下界及可靠性指标

$x/\mu\text{m}$	$H_{\min}/\mu\text{m}$	$H_{\max}/\mu\text{m}$	η
90.0000	9.4455	15.1435	4.315374
90.6367	8.5464	14.2503	3.996686
92.3800	6.8032	12.5071	3.385456
93.4237	5.7594	11.4634	3.019425
96.8077	2.3756	8.0795	1.832974
99.7953	-0.6120	5.0919	0.785410
100.0000	-1.2462	5.3207	0.620460
102.9260	-3.7430	1.9609	-0.312440
104.1210	-4.9377	0.7662	-0.731340
106.4690	-7.2860	-1.5821	-1.554740
109.0040	-9.8214	-4.1175	-2.443750
110.0000	-10.817	-5.1131	-2.792840

建立可靠性参数 η ,关于设计变量 x 的响应面模型。本例设 $\eta_{\text{accept}}=1$,最终得到的优化结果见表 4。

表 4 可靠性优化结果

设计方法	初始装配间隙 / μm	动态齿侧间隙范围 / μm	η
确定性设计	100	[114.68,121.25]	0.62
非概率优化设计	98.8	[113.35,120.00]	1

根据优化结果可知,当初始装配间隙小于 98.8 时,保证了动态载荷下的齿侧间隙一定不会超过规定

阈值,而为了降低装配难度,应尽量选择较大的初始装配间隙。在具体工程实际中,可以根据机械工业标准合理权衡及选定可靠性指标、装配难度、初始齿侧间隙与间隙阈值,在无法获得不确定变量概率分布的设计初期,进行以装配系统为对象的非概率可靠性优化设计。

4 结论

在不确定性参数概率分布未知的设计初期,基于区间分析非概率理论结合响应面法对刚性套齿结构进行非概率可靠性优化设计,得到以下结论:

(1)确定性设计在考虑载荷、材料力学性能分散性之后,套齿结构存在失效危险。

(2)通过区间分析理论结合响应面法对齿侧间隙进行非概率分析,可以得到套齿动态齿侧间隙响应范围。

(3)利用非概率可靠性参数度量结构可靠性,验证了非概率方法优化装配特征参数的可行性,为装配对象不确定性响应问题提供 1 种适用的解决方法。

参考文献:

- [1] 石宏.航空发动机装配工艺技术[M].北京:北京航空航天大学出版社,2015:90-104.
SHI Hong. Technology of aero-engine assembly process [M].Beijing: Beihang University Press,2015:90-104.(in Chinese)
- [2] 李其汉.航空发动机结构强度设计问题[M].上海:上海交通大学出版社,2014:389-401.
LI Qihan. The design problem of aero-engine structure strength [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press,2014:389-401.(in Chinese)
- [3] 余顺年,马履中.基于模糊概率设计的装配尺寸链公差分配[J].工具技术,2004,38(6):67-69.
YU Shunnian, MA Lyuzhong. Tolerance distributing of assemble dimensional chain on basis of fuzzy probability design [J].Tool Engineering, 2004, 38(6):67-69.(in Chinese)
- [4] 费成巍,白广忱,范觉超.涡轮转子多尺寸装配可靠性优化分析[J].推进技术,2013,34(1):15-18.
FEI Chengwei, BAI Guangchen, FAN juechao. Optimization and analysis for multi-dimensions assembly reliability of turbine rotor [J]. Journal of Propulsion Technology,2013,34(1):15-18.(in Chinese)
- [5] 白斌,白广忱,童晓晨,等.航空发动机叶盘结构应力和变形的概率分析[J].航空发动机,2014,40(2):38-46
BAI Bin,BAI Guangchen,TONG Xiaochen,et al. Probability analysis of structure stress and deformation for aeroengine bladed disk [J]. Aero-engine,2014,40(2):38-46. (in Chinese)
- [6] 王荣桥,胡殿印,申秀丽.航空发动机典型结构概率设计技术[J].航空制造技术,2014(7):26-30.

- WANG Rongqiao, HU Dianyin, SHEN Xiuli. Probabilistic design technology on typical structure of aero-engine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology,2014(7):26-30. (in Chinese)
- [7] 邱志平.非概率集合理论凸方法及其应用[M].北京:国防工业出版社,2005:30-43.
QIU Zhiping. Convex method based on non-probabilistic set-theory and its application [M].Beijing: National Defense Industry Press,2005:30-43. (in Chinese)
- [8] Elishakoff I. Essay on uncertainties in elastic and viscoelastic structures: from AM Freudenthal's criticisms to modern convex modeling[J]. Computers & Structures, 1995, 56(6): 871-895.
- [9] 徐可君,江龙平.叶片振动的非概率可靠性研究[J].机械工程学报,2002,38(10):17-19.
XU Kejun, JIANG Longping. Non-probabilistic reliability research on vibration of blades [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(10): 17-19. (in Chinese)
- [10] 王军,洪杰,陈萌.航空发动机转子系统动力特性的非概率分析[J].航空动力学报,2012,27(1):75-81.
WANG Jun, HONG Jie, CHEN Meng. Non-probabilistic analysis on aero-engine rotordynamics[J]. Journal of Aerospace Power,2012,27(1):75-81. (in Chinese)
- [11] 郝勇,陈萌,洪杰.基于泰勒展开法的转子系统动力特性区间分析方法[J].航空动力学报,2014,29(3):571-577.
HAO Yong, CHEN Meng, HONG Jie. Interval analysis method of rotordynamics based on Taylor expansion method [J]. Journal of Aerospace Power,2014,29(3):571-577. (in Chinese)
- [12] 方鹏亚,常新龙,胡宽.基于区间不确定性的涡轮盘强度可靠性优化设计[J].推进技术,2013,34(7):962-967.
FANG Pengya, CHANG Xinlong, HU Kuan. Reliability optimization design for turbine disk strength based on interval uncertainty[J]. Journal of Propulsion Technology,2013,34(7):962-967. (in Chinese)
- [13] 李俊慧,马艳红,洪杰.转子系统套齿结构动力学设计方法研究[J].航空发动机,2009,35(4):36-39.
LI Junhui, MA Yanhong, HONG Jie. Dynamic design method of spline joint structure for rotor system [J]. Aeroengine,2009,35(4):36-39. (in Chinese)
- [14] Rao S S, Berke L. Analysis of uncertain structural systems using interval analysis[J].AIAA Journal,1997,4(4):727-735.
- [15] Qiu Z P, Chen S H, Elishakoff I. Non-probabilistic eigenvalue problem for structures with uncertain parameters via interval analysis[J]. Chaos, Solitons and Fractals 1996,7(3):303-308.
- [16] 陈志英,任远,白广忱.粒子群优化的 Kriging 近似模型及其在可靠性分析中的应用[J].航空动力学报,2011,26(7):1522-1530.
CHEN Zhiying, REN Yuan, BAI Guangchen. Particle swarm optimized Kriging approximate model and its application to reliability analysis [J]. Journal of Aerospace Power,2011,26(7):1522-1530. (in Chinese)

(编辑:栗枢)