

PDS 方法在空间光学窗口可靠度分析中的应用

余飞^{1,2} 吴清文¹ 黎明^{1,2}

(1中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 空间光学部,长春 130033)(2中国科学院 研究生院 北京 100039)

The application to the method of PDS for space optics window reliability analysis

YU Fei^{1,2}, WU Qing-wen¹, LI Ming^{1,2}

(1Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)(2Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

【摘要】目前,概率统计理论和基于确定论的有限元理论都很成熟,结构可靠度又是评价机械结构可靠性的重要指标。为了实现将有限元技术和概率设计技术相结合对结构进行可靠度分析,并且利用分析结果对结构进行改进。采用有限元软件提供的概率设计方法(PDS)对空间遥感器的窗口玻璃进行可靠度分析得到结构的可靠度值和概率灵敏度,并且运用这两个分析结果对不合格结构进行改进。最后,通过干涉仪测试该结构改进前后的 RMS 值。由测试结果可知,改进后结构的可靠性大大提高了。因此,使用 PDS 方法对结构进行可靠度分析可以实现对结构的可靠性进行评估和改进。

关键词:有限元;概率设计;结构可靠度;空间遥感器

【Abstract】At present, the finite element theory which is based on the theory of determination and probability statistics are very mature. Structural reliability is an important index of the evaluation of the mechanical structure reliability. In order to analysis the structural reliability using the combination of the finite element technology and probability design technology and to improve the structure by means of the analysis results, a method of probability design (PDS) in the finite element software was used to do the reliability analysis of space remote sensing-glass and to gain the value of its reliability and sensitivity, then improve the unqualified structure according to the analysis results. Finally, test its RMS value using interferometer. The results show that the improved structure has greatly enhanced the reliability. As a result, the using of the PDS method on structural reliability analysis can evaluate and improve the reliability of the structure.

Key words: Finite element; Probability design; Structural reliability; Space remote sensor

中图分类号:TH16;TP202+.1 文献标识码:A

1 引言

在设计阶段真实结构的材料属性、几何尺寸、外部载荷和边

界条件等具有不确定性和离散性,而且事实上他们的真实值是无法得到的。在机械结构的传统设计中通常都是采用一个大于1的

* 来稿日期:2009-04-28

化处理,提取特征参数(其过程和上述提取参数相同),然后利用相似度函数把提取的特征参数和数据库中已有的参数进行对比,找出最接近的参数。界面,如图7所示。(左上图为输入的轨迹,左下图为查询到的相应参数动态演示后的轨迹)。

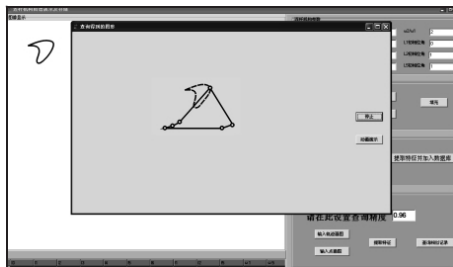


图7 查询界面

通过观察,两图形高度相似,证实了数学形态学的正确性,也说明该方法是切实可行的。

5 结论

利用数学形态学的形状谱来描述连杆曲线特征参数简便有效,其突出优点是连杆曲线的尺寸、方位及相对应位置无关。以连杆曲线形状谱建立连杆曲线特征参数图谱库,具有数据冗余度小,查询迅速的特点。借助构建的电子图谱库,可以快速查询到实现期望轨迹的连杆机构的尺度参数,同时解决了根据轨迹优化综合平面连杆机构初值给定的盲目性。

参考文献

- 1 Lu Yi, Tatu Leinonen. Computer-aided geometry approach of approximate dimensional synthesis for Stephenson six-bar linkage [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2003
- 2 刘勇, 肖人彬. 机构轨迹生成理论进展. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005(4)
- 3 冯立艳, 黄永强, 李学刚. 连杆曲线特征参数提取方法的研究. 机械设计与制造, 2007(6)

安全系数来消除这些不确定设计变量和参数对结构安全可靠性的影响,但是安全系数的取值完全靠设计者的经验,所以容易产生两种情况。一种是设计偏于保守,另一种是偏于危险。众所周知,“保守”设计会导致结构尺寸过大,重量过重,费用增加,在受空间和重量严格限制的地方,这种设计难以接受。而“危险”设计则可能使产品故障频繁,甚至可能引起重大的安全事故,这是绝对不允许的。因此,传统的安全系数法在实质上并没有能回答所设计的零件究竟在多大程度上是安全的。同样也不能回答所设计的零件在使用中究竟发生故障的概率是多大。为了回答这两个问题,人们将概率和数理统计理论引入到机械结构设计中,从而形成了一种新的可靠性设计和分析方法——概率设计分析法。概率设计和分析是以应力—强度干涉理论为基础,将应力和强度作为服从一定分布的随机变量处理。我们可以根据已有的设计,进行分析计算以确定零部件的可靠度。但是,干涉理论要求已知应力 s 和强度 S 的分布类型和概率密度函数,而且工程实际中的随机变量不只是两个,而是一个 n 维向量,分量之间可能是独立的也可能是相关的,功能函数在多数情况下是非线性的甚至是不能显式表达的隐式函数。因此,在进行可靠度计算时通常采用一次二阶矩等近似概率法来求解,但是它要求极限状态函数为显式,但实际问题中极限状态函数更多的是隐式,比如是由有限元分析的结果构造的,因此将有限元法和近似概率法结合起来有很大的实际意义^[1]。PDS 技术(Probabilistic Design System)就是基于有限元的概率设计^[2],就是要在工程上运用这种技术来对结构的可靠性进行评估和改进。

2 PDS 技术简介

2.1 PDS 主要应用的方向

(1)当有限元模型的输入参数不确定时,有限元结果的不确定性有多大?响应参数的置信度有多高?响应参数包括温度、应力、位移等。

(2)输入参数的不确定性决定响应参数的不确定性,目标产品满足设计要求的概率有多大?工作失效的概率有多大?

(3)在所有不确定性的输入参数中哪个参数的不确定性对于响应参数的影响程度最大,或者说对于目标产品最容易引起其工作失效?响应参数对输入参数变化的灵敏度有多大?

2.2 PDS 的分析方法

PDS 技术一般提供两种分析方法——蒙特卡洛法和响应面法。蒙特卡洛法是最唯一的检验或者评价近似解的方法,是目前系统可靠度分析中的相对精确法^[3]。

响应面法也是近年来日益受到重视的一种可靠度计算方法,是用一个简单的显式函数逐步逼近实际的隐式(或显式)极限状态函数,使可靠度计算得到简化。由于该方法可以直接应用确定性结构的计算程序,使得可靠度分析工作更加简单易行,而且响应面法通常比蒙特卡洛模拟技术需要的循环次数少,可以进行非常低概率的分析。单个循环之间是相互独立的,非常适合并行处理,求解效率较高,为大型复杂结构的可靠度分析展现出良好的前景^[4]。

3 结构进行概率分析的工程意义

如果分析计算的结果表明零件可靠性不满足设计要求,可以

首先通过改变重要的输入变量来提高结构的可靠度。当然,并不是所有的输入变量都是可以控制的,但是,即使发现产品的可靠性是由不能控制的变量决定的,这也是非常重要的,因为说明产品设计存在重大问题。如果要处理的变量是几何尺寸或者公差,那么提高可靠性和质量就可以通过使用精度更高的加工机械或者更好的加工方法来实现,总之,概率分析可以帮助我们确定在什么方面下手最有效。

如果分析计算的结果表明零件的可靠性或者失效概率结果是可以接受的,说明产品的可靠性好,那么通常也需要解决一个问题:如何在不减少可靠性和质量的情况下节约资金。在这种情况下,首先要改变的是最不重要的输入变量,因为它们最不容易影响产品的可靠性和质量。比如,如果几何特征和公差不重要,就可以考虑选择相对不太贵的加工方法,如果材料特性是不重要的,通常并不依靠单独改变材料特性来节省费用。载荷或者边界条件是潜在的、节省资金的途径,但是这和问题本身密切相关^[2]。

4 空间遥感器窗口玻璃的可靠性分析

光学窗口是载人飞船的重要部件,是航天员的观测地物的通道,同时也是空间光学遥感入射光线的必经路径。所以对光学窗口不仅要求具有一定的刚度和强度,而且必须满足其光学质量要求,以保证遥感相机的成像质量^[5]。其中,对通过窗口玻璃的平行光的等光程性能有非常高的要求,也就是要保证窗口玻璃在工作过程中厚度的最大变化值要小于 $\lambda/50$ ($\lambda=0.6328\mu\text{m}$)。

4.1 光学窗口组件结构简介

光学窗口组件的结构示意图如图1所示。窗口组件主要由壳体、两块窗口玻璃和内、外压板组成。

4.2 初始窗口玻璃的结构尺寸、材料属性及所受载荷

最初设计的窗口玻璃的结构尺寸及所受载荷,如图2所示,玻璃胶结在壳体上,受温度和压力两类载荷的共同作用。温度载荷是通过热控方式来加载的,具体为玻璃两个面的中心的温度分别为 T_2 和 T_3 ,外周的温度为 T_1 。压力载荷为左右表面的压力差为 0.5 个大气压力。

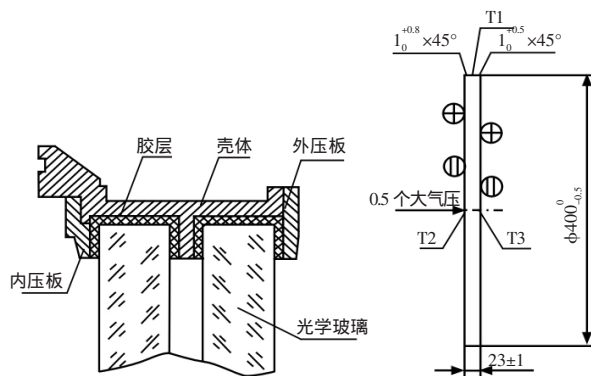


图1 窗口组件

图2 窗口玻璃的尺寸及受载状态

窗口玻璃的材料为 K9 玻璃,其弹性模量 E 为 81320MP,泊松比为 0.209,线胀系数 α 为 $7.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,热传导率 $\lambda=0.001207\text{W}/(\text{mm}\cdot^\circ\text{C})$ 。

4.3 窗口玻璃可靠性分析时随机输入变量类型

整个模型采用参数化建模,用随机变量来表示各输入条件,各输入变量的分布及其特征参数如表1所示。假设各随机变量是相互独立的。其中,正态分布的参数一、二分别表示均值和标准

方差。均匀分布的参数一、二分别表示截断下限和截断上限。对数正态分布 1 的参数一、二分别表示均值和标准方差。由于温差比较小,不考虑镜面畸变和折射率梯度变化对等光程的影响。

表 1 窗口玻璃随机输入变量参数

变量名称	变量代号	所属分布	参数一	参数二
弹性模量	YOUNG	正态分布	81320	4066
玻璃厚度	H	均匀分布	22	24
玻璃半径	R	均匀分布	199.75	200
玻璃外周温度	T1	均匀分布	20.1	20.3
玻璃内表面中心温度	T2	均匀分布	19.7	19.9
玻璃外表面中心温度	T3	均匀分布	19.9	20.1
玻璃内表面所受压力	YALI	对数正态分布 1	0.05	0.005
玻璃的热传导系数	CDXISHU	均匀分布	0.0012	0.0014

4.4 分析及结果讨论

根据有限元软件提供的参数化建模语言,建立窗口玻璃的有限元模型,利用 PDS 响应面法对其进行可靠性分析,得到结构的可靠度值和概率灵敏度。

4.4.1 玻璃厚度最大变化的累计分布函数

玻璃厚度最大变化(用代号 DELTAHD 表示)的累计分布函数,如图 3 所示。

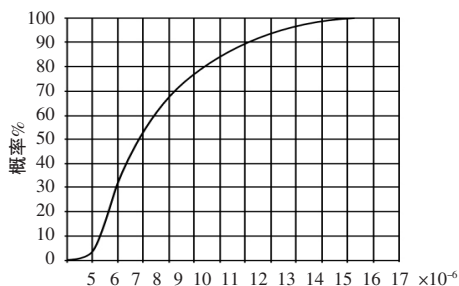


图 3 DELTAHD 的累计分布函数

由图 3 可以确定累计分布函数在概率设计变量轴线上任意点的数值,由此可以知道玻璃厚度最大变化(DELTAHD)小于 $\lambda/50$ ($\lambda=0.6328\mu\text{m}$) 的概率为 0.8962,也就是玻璃的可靠度为 89.62%,可靠度指标仅为 1.26,初始设计不满足设计要求。

4.4.2 灵敏度分析

以条状图和饼式图查看灵敏度,并按灵敏度的大小进行了变量排序。随机响应变量 DELTAHD 相对于随机输入变量 R、H 和 YALI 等的灵敏度图,如图 4 所示。

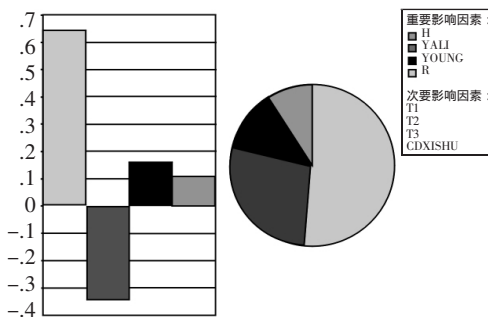


图 4 DELTAHD 的灵敏度图

5 分析结果对窗口玻璃设计进行改进

由图 4 可知,对随机响应变量 DELTAHD 影响最大的是 H,其次是 YALI、YOUNG 和 R。由于外在的压力环境和材料本身的属性是很难改变的,所以提高窗口玻璃可靠度最有效的方法就是

改变厚度。下面通过改变玻璃的厚度 H 来考察结构的可靠度变化情况,仿真分析结果,如表 2 所示。

表 2 不同厚度窗口玻璃的可靠度

H(mm)	可靠度值	可靠度指标 β
20	0.7734	0.75
23	0.8962	1.26
28	0.9987	3.00

由于工程中一般最少要求可靠度值要达到 95%,才可以认为结构是合格的,所以通过分析比较可知,当厚度取 28mm 时,结构的可靠度为 99.87%,满足设计要求,因此将玻璃的厚度改为 28mm。

6 对改进前后两种结构进行等光程测试

为了比较改进前后两种结构的等光程性能,使用干涉仪对 23mm 和 28mm 的窗口进行等光程测试,得到干涉云图,如图 5、6 所示。

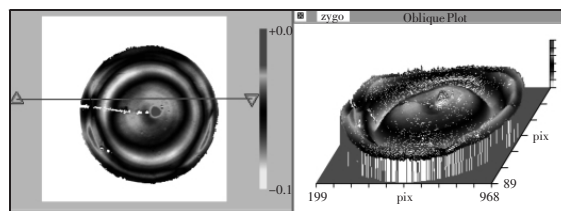


图 5 H 为 23mm 时干涉云图

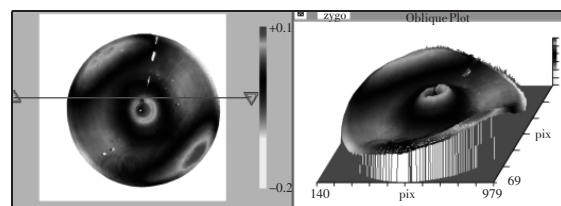


图 6 H 为 28mm 时干涉云图

通过云图测得的 RMS 值来判断光程差,测试结果,如表 3 所示。

表 3 测试结果

H 值(mm)	RMS 值($\lambda=0.6328\mu\text{m}$)
23	0.034 λ
28	0.018 λ

测试结果表明,23mm 时光程差为 $1/29\lambda$,28mm 时光程差为 $1/56\lambda$,也就是说将玻璃厚度从 23mm 调整到 28mm 时,结构的可靠性提高了近一倍,满足了设计要求。

7 结论

综上所述,通过 PDS 方法对结构进行可靠性分析,可以得到比较准确的可靠度值和概率灵敏度,运用这两个指标可以实现对结构的可靠性进行评估和改进。从而使所设计的结构满足设计要求。

参考文献

- 李良巧,顾唯明.机械可靠性设计与分析[M].北京:国防工业出版社,1998
- 博弈创作室编著.ANSYS9.0 经典产品高级分析技术与实例详解[M].北京:中国水利水电出版社,2005
- 晁成新.基于 ANSYS 的可靠性分析[J].山西建筑,2007,35(33):85-86
- 武清玺.结构可靠性分析及随机有限元法[M].北京:机械工业出版社,2005
- 吴清文等.空间传感器中窗口的热光学特性研究[J].光学技术,2001,27(3):260-261,265
- 丁延卫,韩双丽,李积慧.空间光学窗口的热光学的灵敏度分析[J].光电工程,2002,29(5):15-18