

文章编号:1004-4213(2011)10-1484-6

超高速摄影仪转镜运转可靠性数值与实验分析

余春晖¹,李春波²,柴金龙²,江展洪²,李景镇³,黄虹宾^{2,3}

(1 深圳职业技术学院 汽车与管理学院,广东 深圳 518055)

(2 深圳大学 机电与控制工程学院,广东 深圳 518060)

(3 深圳市微纳光子信息技术重点实验室,广东 深圳 518060)

摘 要:为探讨分析转镜运转可靠性的数值方法,运用 Monte Carlo 理论并结合 ANSYS 参量化设计语言,根据小样本原理和可靠性理论建立了转镜运转可靠性分析数学模型.对转镜运转可靠性进行了数值分析,并对数值分析结果进行了实验验证.数值分析结果表明:转镜的功能函数值远大于零,最大应力与转镜转速的线性相关系数达 0.9,镜体密度的相关系数值为 0.15,最大应力、应变、位移的偏斜度和峭度值均为正值,统计结果服从正态分布呈右偏态,在 95% 的置信度水平下,转镜可靠度为 0.999.这说明在理想状态下转镜的运转可靠性满足要求,转镜的最大应力值取决于转镜转速,并且镜体的密度对转镜最大应力有较大影响.转镜运转可靠性试验中没有转镜出现破坏,表明转镜运转可靠性数值分析方法是正确的,为转镜的运转可靠性分析提供一种可行、高效的数值分析手段.

关键词:超高速摄影仪转镜;运转可靠性分析;Monte Carlo 方法;变异系数;转镜可靠性试验

中图分类号:TB872; TB853.1

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114010.1484

0 引言

转镜作为超高速摄影仪中重要的光学加速部件,其运行时的可靠性是超高速摄影仪安全工作的重要保障.由于转镜转速高,制造困难,内部应力应变复杂使得转镜运转可靠性研究相对比较困难.当前国内外对转镜的研究主要集中在转镜的动力学特性、转镜的表面变形量、转镜强度等几个方面.文献[1]提出了针对转镜镜面变形量几何补偿方法.文献[2-3]根据转镜表面变形特性,提出了蜂窝结构设计理念.文献[4-10]分别对铍转镜和高强度铝合金转镜的动力学性能进行了研究.文献[10]研究了转镜对超高速摄影仪信息量的影响.文献[11]介绍了我国自主研发的 S-150 超高速摄影仪.

目前,还没有发现有关对转镜运转可靠性研究的相关报道.本文运用 Monte Carlo 方法^[12-13],结合可靠性分析理论和 ANSYS 参量化设计语言(ANSYS Parameter Design Language, APDL),根据转镜已知基本变量的概率密度分布函数,建立了转镜可靠性分析模型,并利用 ANSYS 概率设计模块(Parameter Design System, PDS),以转镜的功能函数为主要研究对象,对恒定转速为 30000 rpm 的

转镜进行了数值分析,并搭建了转镜试验测试系统,根据小样本原理确定转镜可靠性试验样本数,对转镜可靠性数值分析结果进行试验验证.数值分析结果显示,转镜的功能函数值远大于零,镜体密度与转镜最大应力的相关系数值大于 0.15,最大应力、应变、位移的概率分布曲线的偏斜度和峭度值均为正值,说明转镜的运转可靠性满足要求.转镜运转可靠性试验中 10 个转镜试样没有出现破坏,这说明转镜可靠性数值分析方法是正确的.

1 理论基础

转镜的应力和强度服从正态分布,其概率密度函数^[13]分别是

$$f(S) = \frac{1}{\sigma_S \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{S - \mu_S}{\sigma_S} \right)^2 \right], \quad -\infty < S < +\infty \quad (1)$$

$$g(\delta) = \frac{1}{\sigma_\delta \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\delta - \mu_\delta}{\sigma_\delta} \right)^2 \right], \quad -\infty < \delta < +\infty \quad (2)$$

式中, σ_S 、 σ_δ 和 μ_S 、 μ_δ 分别为应力 S 和强度 δ 的标准差和均值.

转镜的运转可靠度

基金项目:国家自然科学基金(No. 60978039)资助

第一作者:余春晖(1977-),女,讲师,硕士,主要研究方向为计算力学. Email: yuchunhui@szpt.edu.cn

通讯作者:黄虹宾(1964-),男,教授,主要研究方向为超高速摄影. Email: huanghb@szu.edu.cn

收稿日期:2011-06-13;修回日期:2011-06-22

$$R=P(y>0)=\int_0^{+\infty}\frac{1}{\sigma_y\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y-\mu_y}{\sigma_y}\right)^2\right]dy \quad (3)$$

式中, $y=\delta-S$, 为转镜运转可靠性功能函数. 由式(3)可以看出转镜运可靠性属于多维数问题且积分域复杂, 功能函数的积分式是没有解析解. 因此, 必须引入数值方法求解转镜的可靠性问题. 由于转镜的应力、强度、弹性模量、结构尺寸参量都是可靠性分析的随机基本变量, 且满足一定的数理统计规律. 由大数定理可以知道, 当样本较大时, 母体的统计规律可以由样本来代替, 故可通过在转镜基本变量的概率密度分布函数范围内抽取样本值, 并将每个样本值代入可靠性概率公式, 通过计算得到该样本值下的可靠度, 最后统计分析得到转镜的可靠度. 当在转镜的概率密度分布函数范围内抽取的样本值足够大时, 统计得到的样本的可靠度就是转镜的可靠度.

1.1 Monte Carlo 方法

Monte Carlo 方法求解转镜可靠性的基本思想是, 首先根据转镜基本变量的概率密度分布函数建立转镜运转可靠性概率分析模型, 使所求问题的解正好是该模型参量或其他有关的特征量, 然后通过多次随机抽样进行模拟统计分析出转镜最大应力在一定数值下的百分比. 只要试验次数足够多, 该百分比便近似于转镜的运转可靠度. 假设由转镜的基本随机变量的概率密度分布函数 $f_{X_j}(x_j)$ 产生 N 个基本变量的随机样本 $x_j (j=1, 2, \dots, N)$, 将这 N 个随机样本代入功能函数 Z , 统计落入失效区域 $F=\{x: g(x)\leq 0\}$ 的样本点数 N_f , 用失效发生的频率 N_f/N 近似代替失效概率 P_f . 这样就近似得出转镜失效概率的近似值 \hat{P}_f . 失效概率估计值 \hat{P}_f 的期望为

$$E[\hat{P}_f]=E\left[\frac{1}{N}\sum_{j=1}^N I_F(x_j)\right] \quad (4)$$

$$I_F(x_j)=\begin{cases} 1, & x \in F \\ 0, & x \notin F \end{cases} \text{ 为失效区域指示函数.}$$

由于转镜样本 x_j 与母体 x 独立同分布, 有

$$E[\hat{P}_f]=\frac{1}{N}E\left[\sum_{j=1}^N I_F(x_j)\right]=E[I_F(x)]=E[I_F(x)]=P_f \quad (5)$$

故 \hat{P}_f 是 P_f 的无偏估计量.

由于转镜样本为独立分布, 失效概率估计值 \hat{P}_f 的方差为

$$\begin{aligned} \text{Var}[\hat{P}_f] &= \text{Var}\left[\frac{1}{N}\sum_{j=1}^N I_F(x_j)\right]= \\ & \frac{1}{N}\sum_{j=1}^N \text{Var}[I_F(x_j)] \end{aligned} \quad (6)$$

由于样本 x_j 与母体 x 独立同分布, 失效概率估

计值 \hat{P}_f 的方差可以化为

$$\text{Var}[\hat{P}_f]=\frac{1}{N}\text{Var}[I_F(x_j)]=\frac{1}{N}\text{Var}[I_F(x)] \quad (7)$$

转镜样本方差依概率收敛于其母本方差, 所以用 $I_F(\cdot)$ 的样本方差 $S^2=\frac{1}{N-1}\left(\sum_{j=1}^N I_F^2(x_j)-N\bar{I}_F^2\right)$, 代替母本方差 $\text{Var}[I_F(x)]$, 有

$$\begin{aligned} \text{Var}[I_F(x)] &\approx \frac{1}{N-1}\left(\sum_{j=1}^N I_F^2(x_j)-N\bar{I}_F^2\right)= \\ & \frac{N(\hat{P}_f-\bar{P}_f^2)}{N-1} \end{aligned} \quad (8)$$

则失效概率估计值的方差估计为

$$\text{Var}[\hat{P}_f]\approx\frac{N(\hat{P}_f-\bar{P}_f^2)}{N-1} \quad (9)$$

\hat{P}_f 的变异系数 $\text{Cov}[\hat{P}_f]$ 为

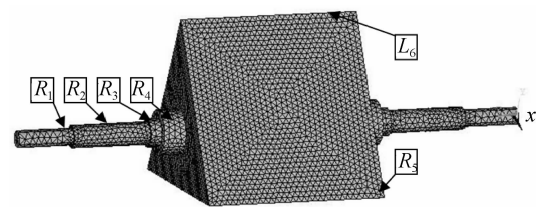
$$\text{Cov}[\hat{P}_f]=\frac{\sqrt{\text{Var}[\hat{P}_f]}}{E[\hat{P}_f]}=\sqrt{\frac{1-\hat{P}_f}{(N-1)\hat{P}_f}} \quad (10)$$

当 N 趋于无穷大时, 由 Monte Carlo 方法得到转镜失效概率估计值的变异系数就是解析解得到的转镜的失效概率, 而转镜的失效概率和其可靠度是互补的, 二者的和为 1.

2 数值仿真

2.1 转镜有限元模型

图 1 是转镜有限元模型, 图中标注的参量为可靠性分析中选取的对转镜应力影响较大的结构尺寸. 转镜由转轴和镜体两部分经过盈配合连接, 其中镜体材料为硬铝合金, 弹性模量为 71.7 Gpa, 泊松比为 0.33, 密度为 $2780 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. 转轴为 45 钢, 并经调质、淬火处理, 弹性模量为 210 GPa, 泊松比为 0.26, 密度为 $7800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. 转镜用单列深沟球轴承来支撑.



R: Radiuses of shaft segment; L: Length of mirror body

图 1 转镜有限元模型

Fig. 1 Finite element modal of the rotating mirror

2.2 转镜结构及其相关统计参量

Monte Carlo 方法可以在转镜基本变量的概率密度分布函数分布范围内按照一定的数学方法随机抽取样本点, 并将样本值代入功能函数进行多次循环计算, 最后统计分析出转镜的响应量与转镜基本

变量之间的关系. 利用 ANSYS 提供的 PDS 模块, 选用 Monte Carlo 法进行转镜可靠性数值分析, 根据基本变量的概率密度分布函数建立转镜可靠性分析文件, 并利用 ANSYS 的 APDL 参量化设计语

言, 编译生成转镜可靠性执行文件. 表 1 为转镜可靠性分析文件中定义的基本变量的概率密度分布函数.

表 1 基本变量说明
Table 1 Basic variable specifications

Variable number	Basic variable	Variable name	Probability density function	Mean value	Standard deviation
1	Density of aluminum alloy	ALUDENS	GAUS	2.78E+3	8.34E+1
2	Density of 45 steel	STEDENS	GAUS	7.80E+3	2.34E+2
3	Elastic modulus of 45 steel	YOUNG1	GAUS	2.1E+11	6.30E+9
4	Elastic modulus of aluminum alloy	YOUNG2	GAUS	7.2E+10	2.16E+9
5	Rotational speed	W	GAUS	3.142E3	2.00E+3
6	Length of mirror body	L_6	GAUS	3.25E-02	2.00E-05
7	Circumradius of mirror body	R_5	GAUS	2.00E-02	1.00E-05
8	Radius of shaft segment 4	R_4	GAUS	4.00E-03	1.00E-05
9	Radius of shaft segment 3	R_3	GAUS	2.50E-03	1.00E-05
10	Radius of shaft segment 2	R_2	GAUS	1.60E-03	1.00E-05
11	Radius of shaft segment 1	R_1	GAUS	1.50E-03	7.00E-06

Monte Carlo 方法需要对基本变量在概率密度分布函数范围内进行抽样, 抽样方法的选择对数值分析结果有较大影响^[10]. 由于拉丁超立方抽样技术具有“记忆”功能, 能够强制抽样点离散分布于抽样空间中, 避免了对抽样空间进行重复抽样. 通常在同样的求解准确度要求下, 拉丁超立方技术抽样比直接法^[10]可减少 20%~40% 的模拟次数, 从而节省大量计算空间和时间. 本文选用 Monte Carlo 方法中的拉丁超立方抽样技术对转镜的基本变量在其概率密度分布函数范围内进行 1 000 次抽样, 重复循环 1 000 次计算后, 统计分析得到转镜响应量的特征.

2.3 数值分析结果

图 2 为转镜最大应力均值和标准差的样本历史曲线, 从中可以清楚地看到转镜的基本变量在抽样取值计算过程中, 最大应力的均值和标准差的结果变化. 转镜最大应力均值收敛于 3.8798×10^6 Pa, 最大应力的标准差收敛于 5.3516×10^5 Pa. 从图 2 还可以直观地看出, 经过初期短暂波动后转镜最大应力均值和标准差的样本历史曲线很快趋于水平, 这说明转镜可靠性分析中, 样本数满足 Monte

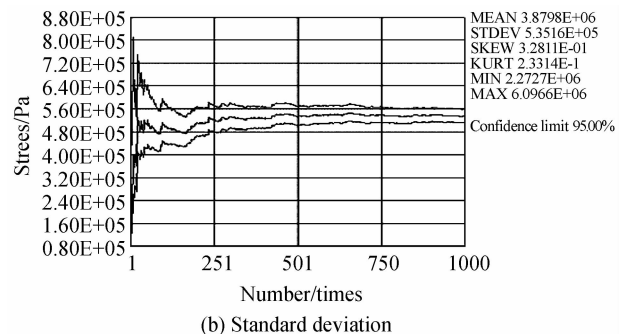
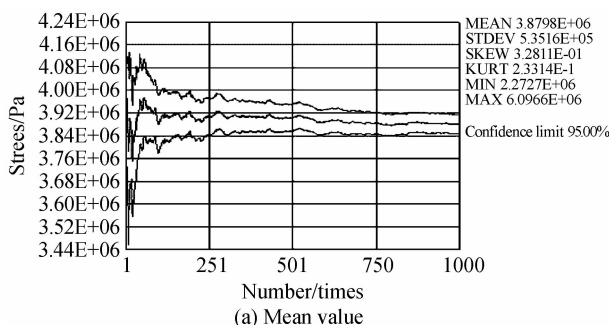


图 2 最大应力样本历史曲线

Fig. 2 History curves for the output parameter maximum stress

Carlo 方法求精确解对样本数的要求.

图 3 为转镜最大应力累积分布函数曲线. 该曲线表明, 在 95% 的置信度水平下, 转镜最大应力值小于 6.0 MPa 的概率为 0.999, 即转镜的可靠性为 0.999, 这完全满足超高速摄影仪在运转时对转镜可靠性的要求. 转镜最大应力的概率分布基本满足正态分布(如图 4). 从表 2 可以看出, 功能函数的最小

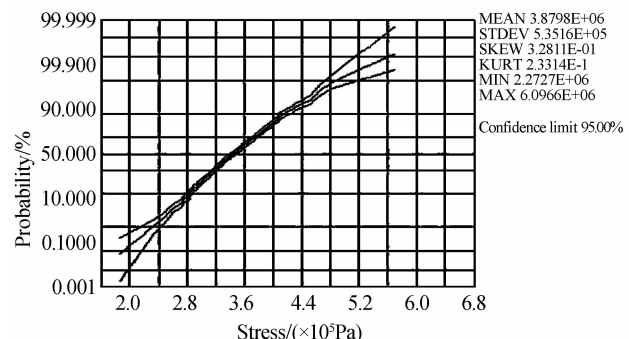


图 3 最大应力累积分布函数曲线

Fig. 3 Cumulative distribution function of maximum stress

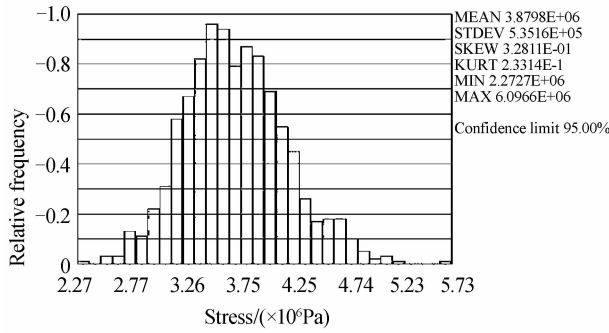


图 4 最大应力的概率分布
Fig. 4 Probability distribution of the maximum stress

值大于零,说明在置信度为 95%的情况下,转镜是安全可靠的.值得注意的是转镜最大应力、最大位移和最大应变的偏斜度大于零,即统计结果呈右偏态.3 个输出响应量的分布曲线峭度都为正数,即最大应力、应变、位移的分布曲线呈陡峭状态,统计得到的数据集中分布在理论均值附近,这说明转镜 3 个响应量最大值的变化范围小,都趋于均值,转镜样本数满足 Monte Carlo 方法数值求解的数量要求.

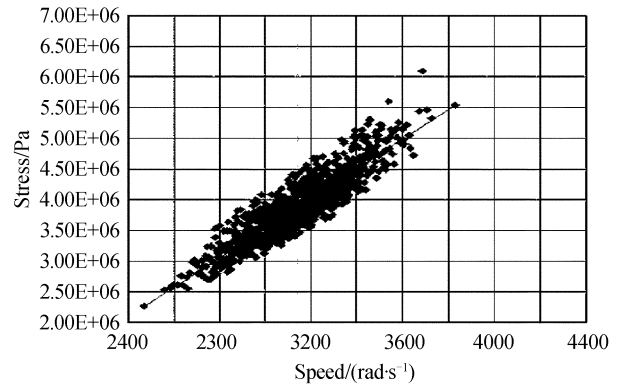
在转镜运转可靠性分析中,转镜基本变量与响应量之间的关系至关重要.由于转镜材料属性已知,

表 2 响应量的统计结果

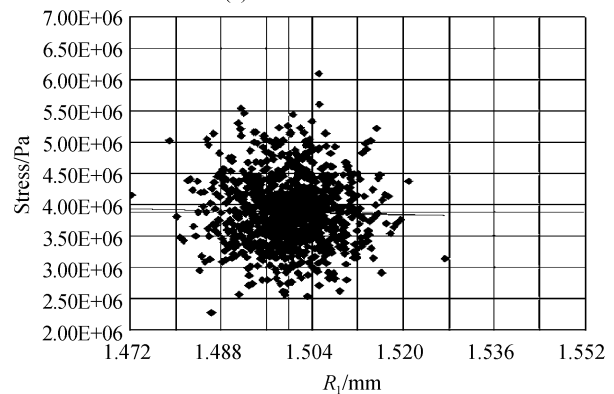
Table 2 Statistical result of the random output parameters

Response variable	Mean value	Standard deviation	skewness	kurosis	Minimum value	Maximum value
Maximum strain	4.9074E-05	6.6396E-06	0.3399	0.2717	2.9107E-05	7.4822E-05
Maximum displacement	4.5107E-07	5.9341E-08	0.3038	0.2616	2.7831E-07	6.8422E-07
Maximum stress	3.8798E+06	5.3516E+05	0.3281	0.2331	2.2727E+06	6.0966E+06
Performance function	3.5112E+08	5.3516E+05	-0.3281	0.2331	3.4890E+08	3.5273E+08

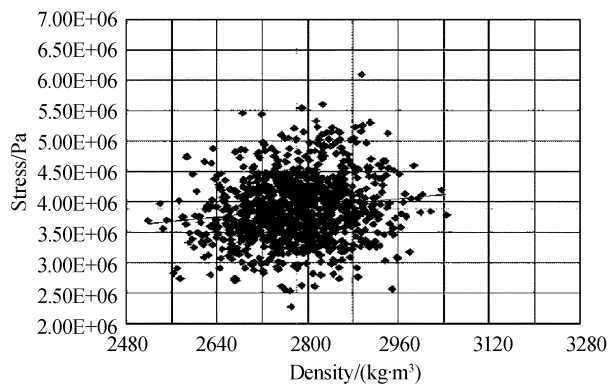
如何使材料在有限的力学性能情况下发挥最大的功效而不影响转镜整体性能,或者在对现有转镜结构修改过程中,如何利用最小的改变量实现最佳的效果一直是转镜设计中的难题. ANSYS 的 PDS 模块输出的散点图反应 Monte Carlo 在转镜基本变量的概率密度函数内抽样点的分布情况,以及转镜的单个基本变量与转镜可靠性分析输出响应量最大应力、最大位移和最大应变的关系.为节省篇幅,本文只列出部分基本变量与最大应力的散点图(图 5).由散点图可发现,转镜最大应力与转速线性相关,转速是对转镜最大应力值影响最大的基本变量.表 3 是转镜可靠性分析中各基本变量与输出响应量之间的线性相关系数,它反应了基本变量对输出响应量



(b) The maximum stress and W



(c) The maximum stress and R₁



(a) The maximum stress and ALDENS

图 5 最大应力与部分基本变量的散点图
Fig. 5 Scatter diagrams of the maximum stress and some basic variables

表 3 基本变量和响应量的线性相关系数

Table 3 Linear correlation coefficients between basic and output variables

Response variable\ basic variable	ALDENS	STDENS	YOUNG1	YOUNG2	W	L ₆	R ₅	R ₁	R ₃	R ₂	R ₁
Maximum strain	0.158	-0.037	0.065	-0.282	0.930	-0.002	0.015	0.074	0.013	0.006	-0.007
Maximum displacement	0.152	-0.028	-0.018	-0.207	0.952	0.008	0.016	0.059	0.006	0.006	-0.010
Maximum stress	0.145	-0.045	0.069	-0.067	0.900	-0.026	0.004	0.053	0.004	-0.018	-0.026

的影响方式和影响程度. 相关系数为正, 说明该基本变量与对应的响应量正相关, 响应量的值随着该基本变量的值的增大而增大, 相关系数为负, 则结果相反. 值得注意的是, R_4 是转镜的结构尺寸中对转镜可靠性影响最大的基本变量. 转镜最大应力的线性相关系数较大, 说明转镜材料属性对转镜可靠性的影响较大. 根据转镜可靠性分析结果得到的转镜的参量和其响应量的线性相关系数, 对转镜的结构进行修改, 可以实现对小的基本变量的修改达到最好的修改效果.

3 试验分析

3.1 试验装置

转镜试验测试系统由电机驱动系统、温度控制系统、速度调节系统、保护装置、转镜试验测试台等组成如图 6. 转镜转速由高频电机通过变频器直接控制, 并根据测速装置上的读数来调节转镜转速. 由于在可靠性试验中转镜需要长时间运转, 电机将产生较大温升. 为避免温度升高对电机的破坏, 系统通过循环水路来控制电机的温度.

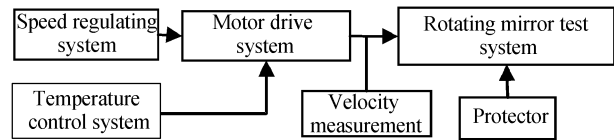


图 6 转镜试验测试系统流程图

Fig. 6 Flow scheme of the rotating mirror test system flow scheme

3.2 样本数试验的试验数据

根据可靠性极小样本理论^[11], 在 0.95 的置信度水平下, 转镜可靠性试验的样本数应该大于 3. 考虑到小样本数下, 制造加工产生的缺陷积累后影响转镜可靠性试验的准确度, 选用 10 个材料、加工方法、结构尺寸完全相同的转镜进行试验分析. 按照超高速摄影仪间歇式运转的实际情况, 对 10 个转镜按分步加载的方式进行运转可靠性试验, 加载步骤和加载时间如表 4. 在预设转速为 30 000 rpm 下, 每个试样累计加载运行时间均超过 360 min, 卸载后发现转镜没有出现宏观破坏. 这说明转镜在 30 000 rpm 转速下, 可靠性满足要求. 这与可靠性数值分析结果是一致的, 说明转镜的可靠性数值分析方法具有较高准确度, 能够应用于指导转镜的设计.

表 4 转镜可靠性试验数据

Table 4 Reliability test data of rotating mirror

Specimens/loading time	First/min	Second/min	Third/min	Fourth/min	Fifth/min	Sixth/min	Seventh/min
Rotating mirror specimen 1	55	60	57	54	49	61	62
Rotating mirror specimen 2	54	53	65	56	56	45	63
Rotating mirror specimen 3	57	54	53	61	61	49	59
Rotating mirror specimen 4	63	60	63	55	57	61	60
Rotating mirror specimen 5	49	62	55	53	59	58	57
Rotating mirror specimen 6	56	55	62	66	56	58	63
Rotating mirror specimen 7	56	63	65	64	60	53	48
Rotating mirror specimen 8	59	49	53	55	65	53	69
Rotating mirror specimen 9	52	63	66	67	61	57	62
Rotating mirror specimen 10	56	52	53	55	68	60	61

4 结论

提出了运用 Monte Carlo 理论, 结合 ANSYS 参量化设计语言, 根据小样本原理建立了转镜运转可靠性分析数学模型, 并对转镜运转可靠性进行了数值分析和试验. 数值分析发现, 最大应力与转镜转速的线性相关系数为 0.9, 镜体密度的相关系数值为 0.15, 且二者与转镜最大应力都为正相关. 最大应力、应变、位移的偏斜度和峭度值均为正值, 且统计结果服从正态分布呈现右偏态, 在 95% 的置信度水平下, 转镜可靠度为 0.999, 即该转镜运转可靠性满足设计要求. 在 30000 rpm 的恒定转速下, 10 个试验样本没有出现破坏, 说明转镜运转可靠性数值分析结果与试验结果的是一致的. 转镜运转可靠性

分析数学模型具有较高准确度, 能够满足转镜可靠性设计的要求.

参考文献

- [1] HUANG Hong-bin, CHAI Jin-long, GONG Xiang-dong, *et al.* Advance deforming mirror faces of rotating for streak camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(5): 1015-1018. 黄虹宾, 柴金龙, 龚向东, 等. 扫描式超高速摄影转镜镜面的几何补偿[J]. *光子学报*, 2008, **37**(5): 1015-1018.
- [2] HUANG Hong-bin, CHAI Jing-long, LI Jing-zhen, *et al.* Design and mechanical analysis on rotating mirror with honeycomb cellular structure in ultra-high speed camera[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **25**(2): 363-366. 黄虹宾, 柴金龙, 李景镇, 等. 超高速摄影中蜂窝结构转镜的设计与力学性能[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(3): 363-366.
- [3] HUANG Hong-bin, LI Jing-zhen, HUI Bin, *et al.* Mechanical and optical performance analysis on rotating mirror with honeycomb cellular structure in ultra-high speed camera

- [J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2008, **25**(2): 163-166.
黄虹宾,李景镇,惠彬,等.超高速摄影中蜂窝结构性能分析[J].深圳大学学报理工版,2008,**25**(2):163-166.
- [4] J Z, SUN F S, GONG X D, *et al.* Study on dynamic behavior of rotating mirrors[C]. *SPIE*,2005, **5638**: 117-123.
- [5] HUANG Hong-bin, SUN Feng-shan, LI Jing-zhen, *et al.* Modal analysis for aluminous rotating mirror of ultra-high speed camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(4): 746-749.
黄虹宾,孙凤山,李景镇,等.超高速摄影仪中铝转镜的模式分析[J].光子学报,2007,**36**(4):746-749.
- [6] LI Jing-zhen, SUN Feng-shan. Dynamic property of rotating mirror of high intensity aluminium alloy for ultra high speed photography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(5): 636-639.
李景镇,孙凤山.超高速摄影用高强度铝合金转镜动态特性的研究[J].光子学报,2000,**29**(5):636-639.
- [7] HUANG Hong-bin, LI Jing-zhen, SUN Feng-shan, *et al.* Numerical simulation on static property for rotating three-faced mirror of ultra-high speed photography [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(7): 1364-1368.
黄虹宾,李景镇,孙凤山,等.超高速摄影中三面体转镜力学特性的计算机仿真[J].光子学报,2007,**36**(7):1364-1368.
- [8] HUANG Hong-bin, CHAI Jin-long, LI Jing-zhen, *et al.* Mechanical analysis on beryllium rotating mirror of ultra-high speed camera[J]. *Journal of Shenzhen university Science and Engineering*, 2007, **24**(2): 122-125.
黄虹宾,柴金龙,李景镇,等.超高速摄影中铍转镜静力学与动力学性能分析[J].深圳大学学报理工版,2007,**24**(2):122-125.
- [9] HUANG Hong-bin, LI Jing-zhen, GONG Xiang-dong, *et al.* Modal analysis of rotating mirror clipped by the elastic bearings for ultra-high speed photography[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **9**(2): 225-228.
黄虹宾,李景镇,龚向东,等.超高速摄影中弹性支撑转镜的模式分析[J].强激光与粒子束,2007,**9**(2):225-228.
- [10] SHARDIN H. The relationship between maximum frame frequency and resolution in rotating mirror framing camera [C]. Proceedings of the 3rd International Congress on High Speed Photography, 1957: 316-318.
- [11] LI J Z, SUN F S, GONG X D, *et al.* Model S-150 ultra-speed framing camera with continuous access [C]. *SPIE*, 2003, **4948**: 336-341.
- [12] 吕震宙,宋述芳,李洪双,等.结构机构可靠性及可靠性灵敏度分析[M].北京:科学出版社,2009:99-101.
- [13] 宋保维.系统可靠性设计与分析[M].西安:西北工业大学出版社,2008:191-193.

Numerical and Experimental Analysis on the Operational Reliability of Rotating Mirror for Ultra-high Speed Camera

YU Chun-hui¹, LI Chun-bo², CHAI Jin-long², JIANG Zhan-hong², LI Jing-zhen³, HUANG Hong-bin^{2,3}

(1 *Automotive & Transportation Engineering, Shenzhen Polytechnic, Shenzhen, Guangdong 518055, China*)

(2 *College of Mechatronics and Control Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China*)

(3 *Shenzhen Key Laboratory of Micro-Nano Photonic Information Technology, Shenzhen, Guangdong 518060, China*)

Abstract: In order to explore a new method of calculating the operational reliability of rotating mirror by numerical analysis and experiment, a mathematic model of operational reliability of rotating mirror was established by the ANASYS parameter design language, based on the Monte Carlo method and the small sample theory. The result of numerical analysis shows that the value of performance function is further than the value of zero. The correlation coefficient of the maximum stress and the revolving speed of rotating mirror are 0.9, the correlation coefficient of the mirror body density with that is 0.15 and the skewness and kurtosis of the maximum stress, strain and displacement are positive. Meanwhile, the statistical results of the maximum stress, strain and displacement obey normal distribution and show right skewed state. The sample data is concentration appears around the mean value. In the confidence level of 95%, the reliability of rotating mirror is 0.9999. It can be concluded that the operational reliability of rotating mirror can meet the performance requirement in theory. The maximum stress of rotating mirror is determined by the operational and the density of the mirror body. None of the ten rotating mirror is damaged in the reliability experiment of rotating mirror. The results obtained in the course of this investigation clearly demonstrate that the numerical analysis of operational reliability for rotating mirror is right, which can prove a new method of analyzing the operational reliability with higher practicable and efficient.

Key words: Ultra-high speed camera rotating mirror; Operational reliability analysis; Monte Carlo method; Coefficient of variation; Reliability experimental