

柔性轴在卫星光通信中的使用与优化设计

张福瑞^{1,2}, 阮萍¹, 韩俊锋¹

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对卫星光通信粗跟踪系统中机械轴存在空回、轴系摩擦、轴间隙的不足的问题, 提出采用柔性轴支撑光端机的方案。首先介绍了采用柔性轴卫星光通信的原理; 然后分析了柔铰工作方向的柔度、最小切割处应力特性; 从关键点挠度出发推导了回转误差角表达式, 并分析了回转误差角对捕获性能的影响; 在柔性轴特性研究的基础上, 采用遗传算法对柔性铰链进行了优化设计。设计结果为: 柔性铰链工作方向柔度 $0.768 \text{ rad/N}\cdot\text{m}$, 最小切割处应力 $1.768\text{e}+8 \text{ Pa}$, 回转误差角 $343 \mu\text{rad}$; 最后采用有限元法对设计结果进行了验证, 三项指标的相对误差均小于 3.5% , 证明设计是可靠的。研究内容可为采用柔性轴的卫星光通信系统设计提供一定参考。

关键词: 卫星光通信; 柔性轴; 遗传算法; 回转误差角

中图分类号: O439 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201948.0818001

Application and optimum design of flexible shaft in satellite optical communication

Zhang Furui^{1,2}, Ruan Ping¹, Han Junfeng¹

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: For the shortcomings of backlash shaft, friction and clearances in coarse tracking system of satellite optical communication, a scheme of using a flexible shaft to support the terminal was presented. The principle of flexible shaft in satellite optical communication was presented. Then the characteristics of flexibility in working direction and stress in thinnest incision were analyzed. According to the key point deflection, the rotation error angle expression was derived and its influence on capture probability was analyzed. Based on the research of flexible shaft characteristics, the flexible hinge was optimized by genetic algorithm. The results are as follows: the flexibility in working direction is $0.768 \text{ rad/N}\cdot\text{m}$, the stress of thinnest incision is $1.768 \text{ e}+8 \text{ Pa}$ and the rotary error angle is $343 \mu\text{rad}$. Finally, the finite element method was utilized to verify the design consequences, the relative error of the three indexes was less than 3.5% , which proved that the design was reliable. This study can provide some reference for flexible shaft design in satellite optical communication terminal.

Key words: satellite optical communication; flexible shaft; genetic algorithm; rotary error angle

收稿日期: 2019-03-05; 修订日期: 2019-04-03

基金项目: 中国科学院研究所 135 项目(Y655811213)

作者简介: 张福瑞(1990-), 男, 博士生, 主要从事空间激光通信方面的研究。Email: jiffring@126.com

导师简介: 阮萍(1967-), 女, 研究员, 主要从事光学仪器方面的研究。Email: ruanp@opt.ac.cn

0 引言

随着卫星需要传输的数据量迅猛增长,传统的卫星通信方式已经达到 Gbit 的微波通信极限,无法满足数据传输的需求,而卫星光通信凭借其高速率、高保密性、高增益、质量轻、功耗低、指向性高、抗干扰能力强等特点被认为是解决微波卫星通信瓶颈的新技术。现今卫星光通信的发展存在两大亟需解决的问题,一是高精度 APT (Acquisition Pointing and Tracking)子系统的研制,二是高速率通信分系统的研制^[1-3]。APT 系统主要由粗跟踪分系统、精跟踪分系统、提前量分系统以及通信分系统组成,粗跟踪与精跟踪形成复合轴结构,用以实现对目标卫星的捕获与稳定跟踪。其中,粗跟踪分系统主要用于对目标的初始捕获,以及对天上低频高幅振动的抑制^[4-5]。近几年,在一些小卫星激光通信终端上采用了一种卫星与终端配合的工作方式,由卫星调节姿态完成大范围的转角,进一步再通过 APT 系统完成对目标的捕获与跟踪,这种方式不需要大体积的粗跟踪转台,为 APT 系统的轻量化设计提供了方便。目前卫星光通信端机粗跟踪系统中较多采用机械轴的结构形式,如 O 型架式、经纬仪式、摆镜式等结构。典型粗跟踪系统的质量在 20.8 kg,驱动电子学部分的质量在 12.4 kg,整体功耗大约在 48 W 左右,而空回、轴系摩擦、轴间隙等问题降低了机械轴的指向精度。随着空间激光通信系统性能不断提升^[6-7],对光端机粗跟踪系统光束指向性能提出了更高的要求。柔性轴技术是最近几年的一项热门研究技术,其原理是通过材料的弹性形变产生位移或者转动,柔性结构具有转动角精度高、转角连续、无空回、无摩擦、结构轻小等特点,被广泛应用于光束指向设备中,如快速反射镜 FSM(Fast Steering Mirror)。为提高光端机粗跟踪系统指向性能,文中基于柔性轴的特点,提出了采用柔性轴作为空间激光通信光端机的支撑方式,对柔性轴在卫星光通信端机中的特性进行了分析,推导了回转误差角表达式,借助遗传算法 GA (Genetic Algorithm)对椭圆弧柔性铰链进行了优化设计。最后,采用了有限元分析法对设计结果进行了验证。文中所做研究对提高空间激光通信系统性能提供了一定的帮助。

1 柔性轴光端机原理

柔性轴空间激光通信终端如图 1 所示,系统由运动传动单元、运动执行机构、探测器组成。

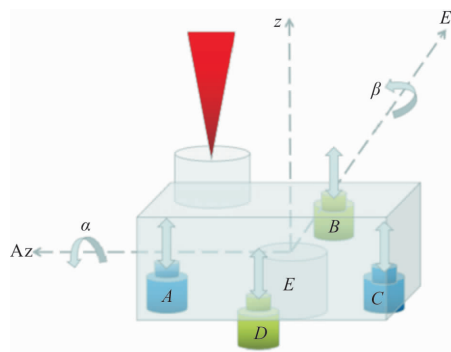


图 1 采用柔性轴的光通信终端

Fig.1 Optical communication terminal using flexible shaft

采用椭圆弧切口的二自由度柔性铰链(E)作为运动传递单元,提供方位(α)俯仰(β)转动自由度;促动器(A、B、C、D)作为运动执行机构,通过上下移动提供推、拉力控制光端机。在捕获阶段,卫星先通过动量轮调节其姿态进行粗瞄准,这种控制的方式精度在 1° 左右,然后通过粗跟踪系统进行误差补偿,当采用柔性铰链作为光端机的支撑,此时柔性铰链的角行程为 $1^\circ(1^\circ \approx 17.4 \text{ mrad})$;促动器可选的有压电陶瓷和音圈电机,压电陶瓷位移精度高、带宽高,但是行程小,音圈电机出力大、行程大、精度较高适合大转动惯量系统。

2 柔性轴特性分析

2.1 柔性轴工作方向刚度分析

图 2(a)所示为椭圆弧柔性铰链,坐标系为 C-XYZ,其中 C 点为回转中心, w 为柔铰宽度,图 2(b)为 XY 平面内椭圆弧柔性铰链, t 为柔性铰链做小厚度、 a 为切口宽度、 b 为切口深度、D 点为柔性铰链自有端点,C 点为柔性铰链回转中心,在转动时柔铰受到绕 Z 轴的扭矩载荷 M_z 。

在弯矩 M_z 作用下,柔性铰链将产生沿 Y 轴的线位移 $u_y^{M_z}$,绕 Z 轴的角位移 θ_z 。工作方向的柔度 $C_{M_z}^{\theta_z}$ 体现了作用在 Z 轴的扭矩与角位移 θ_z 间的关系,是一项很重要的指标。其表达式为^[8]:

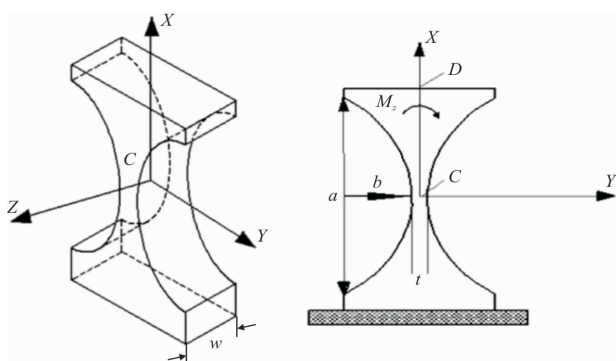
$$C_{M_z}^{\theta_z} = \frac{12a}{Ewr^3} \frac{(12s^2+8s+2)\sqrt{4s+1} + 12s(2s+1)^2 \arctan \sqrt{4s+1}}{(4s+1)^{5/2}(2s+1)} = \frac{12a}{Ewr^3} \cdot f_1 \quad (1)$$

式中： E 为弹性模量； $s=b/t$ ，在 MATLAB 中采用指数函数拟合法对公式(1)中的 f_1 进行简化，拟合后的残差平方和为 0.006 469，拟合判定系数与调整的判定系数分别为 0.999 2 和 0.998 2，拟合误差小于 2%。 f_1 的拟合结果为：

$$f_1 = 1.05 s^{-0.4365} \quad (2)$$

那么柔性铰链工作方向柔度被改写为：

$$C_{M_z}^{\theta_z} = \frac{12a}{Ewr^3} \cdot 1.05 s^{-0.4365} \quad (3)$$



(a) 椭圆弧柔性铰链 (b) 柔性铰链参数
(a) Elliptical arc flexure hinge (b) Parameters of flexible hinge

图 2 椭圆弧柔性铰链及相关参数

Fig.2 Elliptic arc flexure hinge and related parameters

2.2 回转误差角计算公式推导

轴漂是柔性铰链的一种寄生运动，其大小是衡量柔性铰链回转精度一项很重要的指标，轴漂的存在会导致光轴实际指向与理想指向存在回转误差角，目前惯用的方法是采用回转中心点的挠度来表征柔铰回转精度，这种方法并不能直接反应回转误差角。文中基于柔性铰链回转中心点与自有端点挠度，采用矢量算法求解回转误差角表达式。回转误差角如图 3 所示。

$W(C)$ 表示 C 点的挠度， $W(D)$ 表示 D 点的挠度， CD 为柔铰中轴线， $D'C'$ 与 X 轴的夹角为 α ， $D'C$ 与 X 的夹角为 β ，那么回转误差角可表示为： $\varepsilon = \alpha - \beta$ 。由于只受弯矩作用的柔性铰链被当做 Euler-Bernoulli 梁^[9]，其变形符合平截面假设定理截面变形可近似为刚体位移^[10]，因此在分析回转角误差时只需要考虑回转中心点与自由端点在 Y 方向的位移 u_y^c

与 u_y^d ，再由 C 点与 D 点挠度推导回转误差角。 u_y^c 与 u_y^d 的表达式为：

$$u_y^c = \frac{12M_z a^2}{Ewr^3} \cdot \int_{-\pi/2}^0 \left[\int_{-\pi/2}^{\phi} \frac{1}{(2b+t-2bcos\beta)^3} \cdot \cos\phi d\phi \right] \cdot \cos\phi d\phi \quad (4)$$

$$u_y^d = \frac{12M_z a^2}{Ewr^3} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{\cos\phi}{(2b+t-2bcos\beta)^3} d\phi \quad (5)$$

公式(4)、(5)通过积分后变为：

$$u_y^c = \frac{6M_z a^2}{Ewr^3(1+2s)} \quad (6)$$

$$u_y^d = \frac{12M_z a^2}{Ewr^3} \left[\frac{2(2s+1)\arctan \sqrt{4s+1}}{s\sqrt{4s+1}} - \frac{\pi}{2s} \right] = \frac{12M_z a^2}{Ewr^3} \cdot f_2 \quad (7)$$

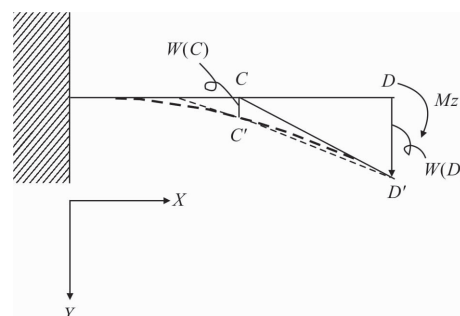


图 3 回转误差角示意图

Fig.3 Rotation error angle schematic

在 MATLAB 中采用同样对 f_1 拟合的方式对 f_2 进行拟合，那么拟合后 f_2 的表达式为：

$$f_2 = 1.55 s^{-0.27} \quad (8)$$

那么公式(7)重新表示为：

$$u_y^d = \frac{12M_z a^2}{Ewr^3} \cdot 1.55 s^{-0.27} \quad (9)$$

柔性铰链最大转角与作用力矩的关系为：

$$M_z = K_{M_z}^{\theta_z} \cdot \theta_z = \frac{Ewr^3 \theta_z}{12af_1} \quad (10)$$

进一步将公式(10)分别代入公式(6)和公式(9)中可得 u_y^c 、 u_y^d 与转角 θ_z 的关系：

$$u_y^c = \frac{a\theta_z}{2.1(1+2s)s^{-0.4365}} \quad (11)$$

$$u_y^d = 1.476a\theta_z s^{-0.1665} \quad (12)$$

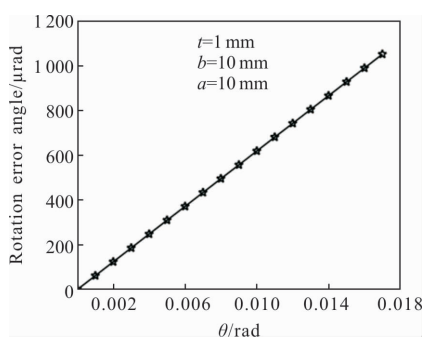
根据图 3 由三角函数关系，此时柔铰回转误差

角 ε 的表达式为:

$$\varepsilon = \arctan(u_y^d/a) - \arctan[(u_y^d - u_y^c)/a] \quad (13)$$

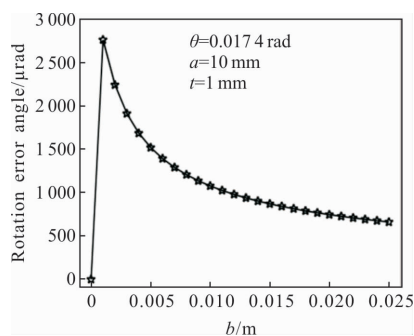
根据公式(11)、(12)、(13)要精确性的分析各参数对转动刚度的影响比较困难,在 MATLAB 中编写计算程序,采用固定变量法定量的分析参数 a 、 b 、 t 、 θ_z 对回转误差角 ε 的影响。各参量与回转误差角的灵敏度关系如图 4 所示。

从图 4(a)~(d)中的分析可得:(1) 回转误差角 ε 与角行程 θ 基本呈线性递增关系;(2) 当开口深度 $b < t$ 时回转误差角 ε 随着 b 的增大而增加,当 $b > t$ 时



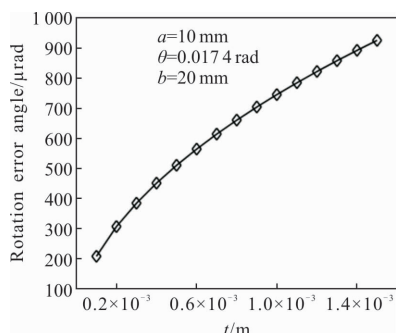
(a) 回转误差角与角行程关系

(a) Relationship between rotation error angle and angular travel



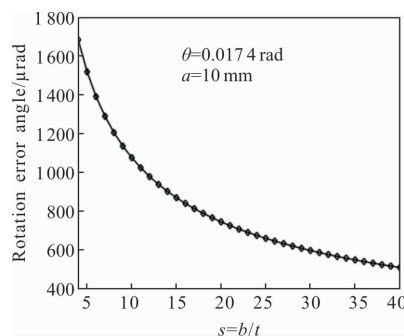
(b) 回转误差角与切口深度的关系

(b) Relationship between rotation error angle and depth of incision



(c) 回转误差角与最小切割厚度的关系

(c) Relationship between rotation error angle and thinnest incision



(d) 回转误差角与参量 s 的关系

(d) Relationship between rotation error angle and parameter s

图 4 各参量对转动误差角的影响

Fig.4 Influence of parameters on rotation error angle

回转误差角 ε 随着 b 的增大而减小;(3) 回转误差角 ε 与最小切割厚度 t 呈非线性递增关系,随着 t 的增大回转误差角增速逐渐降低;(4) 当 $b < t$ 时,回转误差角 ε 随着 s 的增大而增加;当 $b > t$ 时,回转误差角 ε 随着 s 的增大而减小。这从分析结论(2)中也可以得到。当 $s=1$ 时有最大回转误差角(此时柔铰切口形状为圆形)。

2.3 回转误差角对捕获性能的影响

粗跟踪系统的目的是补偿由于卫星姿态控制、轨道预测、轨道摄动等因素带来的误差,当粗跟踪对上述误差角进行补偿后,由于回转误差角的存在将会引入一个随机位置角 ϕ ,一般认为随机位置角的概率密度服从瑞利分布,此时发射端覆盖目标卫星的概率为:

$$P_{\text{FOV}} = \int_0^{\theta_U} f(\phi) d\phi = 1 - \exp\left(-\frac{\theta_U^2}{2\rho^2}\right) \quad (14)$$

式中: θ_U 为束散角; ρ 为标准差。在拉依达准则下可以计算出当 $\theta_U/\sigma=4$ 时,发射端对不确定区域的覆盖率大于 99%。假设不确定区域大小为 $1600 \mu\text{rad}$,那么可以计算出粗跟踪误差角标准差应当小于 $400 \mu\text{rad}$ 。

2.4 最大应力分析

载荷作用在柔性铰链的最小厚度处将产生弯曲应力,最大弯曲应力应不小于许用应力,根据材料力学中梁的纯弯曲理论可以得到最大应力计算公式为^[1]:

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{6kM_s}{t^2W} \leq [\sigma] = \frac{\sigma_s}{n_s} \quad (15)$$

式中: $k=(\zeta+0.253)/(\zeta+0.097)$ 为应力集中系数, $\zeta=a^2/bt$,取安全系数 $n_s=2$ 所选材料为 65 Mn,屈服强度为 $\sigma_s=0.43 \text{ GPa}$ 。弹性模量 $E=210 \text{ GPa}$,将公式(10)代入到公

式(15)中可得柔铰最小厚度处最大应力为:

$$\sigma_{\max} = \frac{6kEt\theta_z}{12af_1} \leq 0.215 \text{ GPa} \quad (16)$$

3 柔性轴优化设计实例

3.1 设计变量

椭圆弧柔性铰链的机械性能主要受到最小厚度 t 、切口宽度 a 、切口深度 b 以及柔铰厚度 w 的影响,因此设计变量为 $X=[x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T=[t \ a \ b \ w]^T$,取变量上下界分别为:

$$\begin{aligned} ub &= [0.001 \ 3 \ 0.03 \ 0.03 \ 0.01 \ 3]^T \\ lb &= [0.000 \ 25 \ 0.001 \ 0.001 \ 0.001 \ 0.001]^T \end{aligned} \quad (17)$$

3.2 目标函数

柔性铰链的参数优化属于序列二次规划问题,使用传统优化算法虽然收敛速度快、计算量小但是容易陷入局部最优解,而且求解的结果依赖于初始值。相较于传统优化算法,遗传算法不仅能够求出全局最优解,而且求解结果不依赖于初值,具有较强的鲁棒性,适用于多种复杂的求解模型。

借助于惩罚函数,可以将带约束的优化问题转化为无约束优化问题。一般的约束优化问题可以表示为:

$$\begin{aligned} \min f(x): \quad & \text{s.t. } g_i(x) < 0 \quad i=1 \cdots m \\ & h_j(x) < 0 \quad j=1 \cdots n \end{aligned} \quad (18)$$

在公式(18)中, $g_i(x)$ 表示非线性不等式约束, $h_j(x)$ 表示非线性等式约束^[12]。定义惩罚辅助函数为:

$$F(X, \rho) = f(x) + \lambda P(x) \quad (19)$$

式中: λ 为惩罚因子,以 $g_i(x)$ 、 $h_j(x)$ 构造惩罚项 $P(x)$ 为:

$$P(x) = \sum_{i=1}^m [\max\{0, -g_i(x)\}]^\alpha + \sum_{j=1}^n |h_j(x)|^\beta \quad (20)$$

式中: α 、 β 为常数,一般取 $\alpha = \beta = 2$ 。此时无约束优化函数的目标函数为:

$$\min F(X, \rho) \rightarrow f(x) + \lambda_k P(x) \quad (21)$$

3.3 约束条件

(1) 非线性不等式约束: 回转角精度的不等式约束 $\varepsilon < \varepsilon^*$, ε^* 为最大误差角,由 2.3 节中的分析得:

$$c(\varepsilon) = \arctan(u_y^d/a) - \arctan((u_y^d/u_y^c)/a) \leq 400 \quad (22)$$

(2) 非线性等式约束: 由 1.4 节中的分析最大应力约束 $\sigma_{\max} = 0.215 \text{ GPa}$;

$$ceq(x) = \frac{6kEt\theta_z}{12af_1} = 0.215 \text{ GPa} \quad (23)$$

(3) 线性不等式约束: 根据第 1.2 节中 t 、 a 、 b 对 ε

的灵敏度分析,取各结构参量间的约束关系为:

$$\begin{aligned} & 4t < a < b; \\ A &= [4 \ -1 \ 0 \ 0; 0 \ 1 \ 1 \ 0] \\ B &= [0, 0]^T \end{aligned} \quad (24)$$

3.4 数学模型

根据上述建立的优化变量、目标函数、约束条件可得优化模型的数学形式为:

$$\begin{cases} \text{obj. min } F(x) = f(x) + \lambda_1 c(x) + \lambda_2 ceq(x) \\ \text{s.t. } 0.000 \ 25 \text{ m} \leq x_1 \leq 0.001 \ 3 \text{ m} \\ \quad 0.001 \text{ m} \leq x_2 \leq 0.025 \text{ m} \\ \quad 0.001 \text{ m} \leq x_3 \leq 0.025 \text{ m} \\ \quad 0.001 \text{ m} \leq x_4 \leq 0.013 \text{ m} \\ \left[\begin{matrix} 4 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \end{matrix} \right] \cdot [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T < \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (25)$$

3.5 优化结果

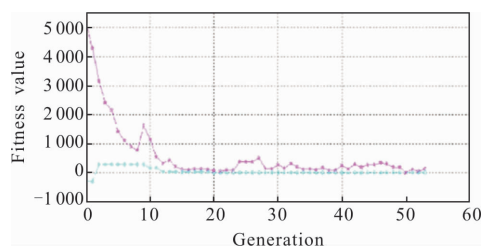
相关参数如表 1 所示,取初始种群 $n=20$; 交配概率 $P_c=0.8$; 变异概率 $P_m=0.2$; $\lambda_1=0.6$, $\lambda_2=0.4$ 。

表 1 优化模型参数

Tab.1 Optimizing model parameters

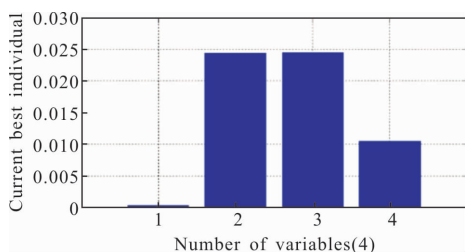
Elastic modulus /GPa	Angle accuracy / μrad	Fatigue stress/MPa	Poisson's ratio μ	Rotation angle/mrad
210	500	215	0.33	17.4

经过 53 次计算后平均适应度值为 127.014, 最优适应度值为 9.946, 达到限制条件优化停止。优化得到的柔性铰链尺寸参量为: $t=0.3 \text{ mm}$ 、 $a=24.4 \text{ mm}$ 、 $b=24.5 \text{ mm}$ 、 $w=10.5 \text{ mm}$ 。 $C_{M_z}^{\theta_z} = 0.755 \ 5 \text{ rad}/(\text{N} \cdot \text{m})$ 、最小切割厚度处最大应力为 $\sigma = 1.773\text{e}+8 \text{ Pa}$ 、回转角误差 $\varepsilon = 348 \ \mu\text{rad}$ 均满足约束条件。将结果代入到公式(7)、(10)与(16)中分别得到柔性铰链工作方向柔度、最大应力与回转角误差角分别为: $C_{M_z}^{\theta_z} = 0.768 \text{ rad}/(\text{N} \cdot \text{m})$ 、 $\sigma = 1.768\text{e}+8 \text{ Pa}$ 、 $\varepsilon = 343 \ \mu\text{rad}$ 优化结果如图 5 所示。



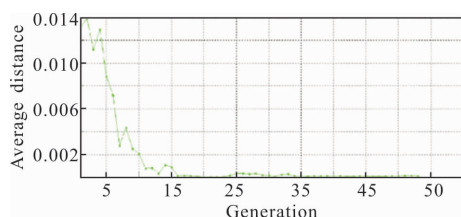
(a) 适应度值

(a) Fitness value



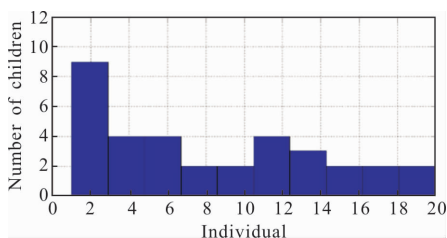
(b) 个体优化结果

(b) Individual optimization results



(c) 个体间平均间距

(c) Average distance between individuals



(d) 子代种群数

(d) Subpopulation number

图 5 遗传算法优化结果

Fig.5 Optimization results of genetic algorithm

4 有限元验证

在 Solidworks 中建立几何体，将文件导入 Ansysworkbench 中建立有限元模型。设置两个切割面网格划分方法为 Face Sizing，网格尺寸 $5e-4$ m，其余网格划分大小为 0.005 m，模型共由 8 544 个单元构成。模型一端(A、B)加载绕 z 轴的力矩，另一端(C)完全固定，有限元仿真得到的柔性铰链柔度为 $C_{M_z}^{\theta_z} = 0.752 \text{ rad}/\text{N} \cdot \text{m}$ ；最小切割处最大应力为 $\sigma = 1.828e+8 \text{ Pa}$ ；回转误差角为 $\varepsilon = 351 \mu\text{rad}$ 。有限元模型如图 6 所示。

表 2 数据为有限元分析结果与近似理论计算结果误差分析，结果显示柔度、回转误差角、应力三个指标的相对误差均小于 3.5%，说明了设计结果的正

确性。

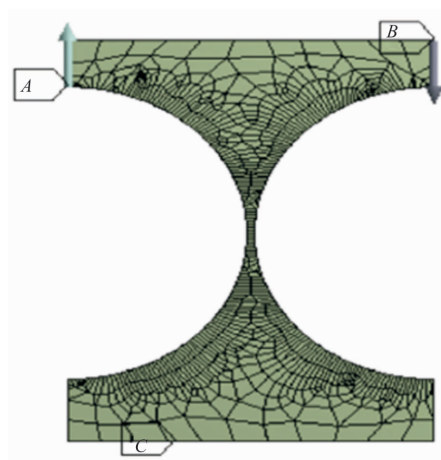


图 6 椭圆弧柔性铰链有限元模型

Fig.6 Finite element model of elliptic arc flexible hinge

表 2 有限元仿真与理论计算误差分析

Tab.2 Finite element simulation and theoretical calculation error analysis

	Flexibility $/\text{rad} \cdot (\text{N} \cdot \text{m})^{-1}$	Rotation error angle/ μrad	Stress/MPa
Theoretical calculation	0.768	343	176.8
Finite element simulation	0.752	351	182.8
Relative error	-2.1%	2.3%	3.39%

5 结论

高精度指向性能是空间激光通信 APT 系统最重要的指标之一，目前在粗跟踪系统中采用的机械轴存在轴间隙、空回、轴系摩擦等因素，不利于提高 APT 系统指向性能，而柔性轴利用材料的弹性形变能够提供高精度的角位移。但是柔性轴的高精度与大行程相互制约，需要进行合理的设计。文中从柔性铰链回转中心点与自由端点挠度出发给出了回转误差角的直观表达式；在卫星光通信柔性轴特性研究的基础上，采用遗传算法对柔性铰链进行了优化设计，设计结果：柔性铰链工作方向的柔度为 $0.768 \text{ rad}/(\text{N} \cdot \text{m})$ ，最小切割处应力值为 $1.768e+8 \text{ Pa}$ ，回转误差角为 $343 \mu\text{rad}$ 。最后采用有限元法进行了验证，三项指标的有限元仿真结果与理论计算结果相对误差分别为 -2.1%、2.3%、3.39%，说明优化设计的正确性。文中提出的采用

柔性轴支撑的卫星光通信端机,对高性能的空间激光通信光端机系统的设计具有一定借鉴意义。

参考文献:

- [1] Ke Xizheng, Kang Ye, Liu Juan. Experimental research on PAPR reduction algorithms in FSO-OFDM system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(6): 0622001. (in Chinese)
- [2] Xiang Jinsong, Zhang Mingjie. A new method of simulation turbulent effects for space laser communication [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(9): 2721-2725. (in Chinese)
- [3] Wu Congjun, Yan Changxiang, Gao Zhiliang. Overview of the development of space laser communications [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5): 670-680. (in Chinese)
- [4] Khatri F I, Robinson B S, Semprucci M D, et al. Lunar laser communication demonstration operations architecture [J]. *Acta Astronautica*, 2015, 111: 77-83.
- [5] Gao Duorui, Li Tianlun, Sun Yue, et al. Latest developments and trends of space laser communication [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(6): 901-913. (in Chinese)
- [6] Xu Yunxiang, Wu Bin, Wang Bo. Open-loop Doppler frequency shift estimation in satellite coherent optical communication [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(9): 0922004. (in Chinese)
- [7] Rose T S, Janson S W, Lalumondiere S, et al. LEO to ground optical communications from a small satellite platform [C]//SPIE, 2015, 9354: 93540I.
- [8] Chen G, Liu X, Du Y. Elliptical-Arc-Fillet flexure hinges: toward a generalized model for commonly used flexure hinges [J]. *Journal of Mechanical Design*, 2011, 133(8): 081002.
- [9] Friedrich R, Lammering R, Rösner M. On the modeling of flexure hinge mechanisms with finite beam elements of variable cross section [J]. *Precision Engineering*, 2014, 38(4): 915-920.
- [10] Wang Wensheng, Cheng Gengdong, Li Quhao. A model reduction method for dynamics analysis of complex slender structure based on the plane cross-section assumption of beam [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2012, 29(3): 295-299. (in Chinese)
- [11] Fu Jinjiang, Yan Changxiang, Liu Wei, et al. Stiffness optimization of two-axis flexible supporting platform for fast steering mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(12): 3378-3386. (in Chinese)
- [12] Kaliappan M, Augustine S, Paramasivan B. Enhancing energy efficiency and load balancing in mobile and hoc network using dynamic genetic algorithms [J]. *Journal of Network & Computer Applications*, 2016, 73: 35-43.