

基于区间非概率模型的热驱动柔顺机构可靠性拓扑优化

占金青 上官瑶 尹健 古昊忠 刘敏

(华东交通大学机电与车辆工程学院, 南昌 330013)

摘要: 为了满足热驱动器可靠性要求,提出一种基于区间非概率模型的热驱动柔顺机构可靠性拓扑优化方法。采用区间非概率模型描述热载荷的不确定性,以输出位移构建可靠性功能函数,在可靠性指标约束条件下寻求机构体积最小化,建立基于区间非概率模型的热驱动柔顺机构可靠性拓扑优化模型,利用移动渐近线算法更新设计变量。与确定性优化结果相比,可靠性拓扑优化获得的热驱动柔顺机构体积有所增加,能够有效地满足可靠性指标约束,可靠性设计的热驱动柔顺机构输出位移上、下限理论值与有限元分析结果误差均小于5%,验证了设计方法有效性;并且分析了不同输出刚度和热载荷区间对热驱动柔顺机构可靠性拓扑优化结果的影响。

关键词: 热驱动柔顺机构; 热载荷不确定性; 可靠性拓扑优化; 区间非概率模型

中图分类号: TH112

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)11-0504-09

OSID:



Reliability-based Topology Optimization of Thermally Actuated Compliant Mechanisms Based on Interval Non-probabilistic Model

ZHAN Jinqing SHANGGUAN Yao YIN Jian GU Haozhong LIU Min

(School of Mechatronics and Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: To meet the reliability requirements of thermal actuators, a method for reliability-based topology optimization of thermally actuated compliant mechanisms based on interval non-probabilistic model was proposed. The interval non-probabilistic model was adopted to describe the uncertainties of thermal load. The functional function was constructed by the output displacement of thermally driven compliant mechanisms. The objective function was used to minimize the volume of the thermally actuated compliant mechanisms, and the reliability index was used as the constraint. The model for reliability-based topology optimization of thermally actuated compliant mechanisms based on interval non-probabilistic model was established. The method of moving asymptotes was applied to update the design variables. Compared with the results of deterministic topology optimization, the volume of thermally actuated compliant mechanisms obtained by reliability-based topology optimization was increased, and the reliability index constraints can be effectively met. The theoretical results of thermally actuated compliant mechanisms obtained by reliability design had an error of less than 5% relative to the finite element analysis results. The effectiveness of the proposed design method for thermally actuated compliant mechanisms was demonstrated. The influence of different output stiffness and thermal load intervals on the results of reliability-based topology optimization of thermally actuated compliant mechanisms was analyzed.

Key words: thermally actuated compliant mechanisms; uncertainties of thermal loads; reliability-based topology optimization; interval non-probabilistic model

收稿日期: 2024-06-03 修回日期: 2024-07-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(52065019, 52165002)和江西省自然科学基金项目(20242BAB26067, 20224BAB204041, 20232BCJ23021)

作者简介: 占金青(1979—),男,教授,博士,主要从事柔顺机构优化设计研究, E-mail: zhan_jq@126.com

通信作者: 刘敏(1990—),男,副教授,博士,主要从事柔性铰链优化设计研究, E-mail: lmin2016@foxmail.com

0 引言

柔顺机构在精密操作、生物医疗、微机电系统等领域有着广泛应用^[1-7]。柔顺机构驱动方式有电磁、压电、形状记忆合金、热驱动等方式^[8-9]。热驱动柔顺机构是利用弹性体热膨胀变形,产生输出端运动。与其他驱动方式比较,热驱动柔顺机构能输出较大的力和位移,并具有易控制、易集成等优点。

目前,拓扑优化方法^[10-11]已成为热驱动柔顺机构主要设计方法之一。SIGMUND^[12]采用拓扑优化方法进行热驱动柔顺机构拓扑优化设计。SAXENA等^[13]考虑局部温度和应力约束,采用蜂窝有限元单元建立热驱动柔顺机构拓扑优化模型。ANSOLA等^[14-15]采用进化结构优化方法分别进行均匀温度场作用和非均匀温度场作用的热驱动柔顺机构设计。LUO等^[16]提出了一种热驱动柔顺机构形状和拓扑优化方法。张宪民等^[17]利用并行策略进行多相材料热驱动器拓扑优化设计,将复杂多相材料问题转换为多个单相材料子问题。GRANLUND等^[18]采用有限应变热-超弹性材料进行热驱动柔顺机构拓扑优化设计。AL等^[19]考虑材料热传导和热对流,采用并行多尺度拓扑优化方法进行热驱动柔顺机构设计,实现热驱动器宏观和微观结构优化。QIU等^[20]采用灵敏度聚类方法进行热驱动柔顺机构多尺度拓扑优化设计,将每个子区域由适当的超材料表示,有效提高了机构性能。上述研究均在确定条件下进行热驱动柔顺机构拓扑优化设计。

在实际工程中,热驱动柔顺机构性能易受到材料特性、几何参数和荷载条件等不确定性因素影响^[21]。因此,对热驱动柔顺机构进行可靠性拓扑优化设计显得非常重要。MAUTE等^[22]采用功能度量法评价可靠度约束,研究大变形柔顺机构可靠性拓扑优化设计方法。崔明涛等^[23]将弹性模量和作用荷载视为随机变量,进行柔顺机构多目标可靠性拓扑优化设计。ZHANG等^[24]考虑荷载和材料特性的不确定性,利用水平集方法进行柔顺机构可靠性拓扑优化设计。LUO等^[25]考虑荷载作为随机变量,基于应力约束进行结构可靠性拓扑优化设计。SATO等^[26]采用欧拉描述几何形状不确定性,提出了一种柔顺机构基于可靠性拓扑优化方法。目前,可靠性设计研究很少涉及热固耦合多物理场热驱动柔顺机构拓扑优化设计问题。CHO等^[27]采用概率模型描述材料的热膨胀系数不确定性,进行多相材料热驱动柔顺机构拓扑优化设计。但是,当随机变量样本不足或获取困难时,概率模型准确计算变得困难。采用区间变量描述参数不确定性,可以很好地解决

样本不足产生的问题。

本文提出一种基于区间模型的热驱动柔顺机构可靠性拓扑优化方法。采用区间非概率模型描述热载荷的不确定性,以机构输出位移构建可靠性功能函数,在可靠性指标约束条件下寻求机构体积最小化,建立基于区间非概率模型的热驱动柔顺机构可靠性拓扑优化模型,利用移动渐近线算法更新设计变量。

1 区间模型及功能函数

1.1 区间模型

区间模型^[28]能够解决样本不足产生的问题,可以极大地减少时间和计算成本。因此,采用区间向量来描述热载荷不确定性。

在区间模型中,区间变量 a 可表示为

$$a \in a^I = [\underline{a}, \bar{a}] \quad (1)$$

式中 a^I ——区间变量 a 区间

\underline{a} ——区间 a^I 下限

\bar{a} ——区间 a^I 上限

则有

$$a^c = \frac{a + \bar{a}}{2} \quad (2)$$

$$a^r = \frac{a - \bar{a}}{2} \quad (3)$$

式中 a^c ——区间 a^I 中值

a^r ——区间 a^I 离差

为了方便表示区间变量,将区间变量用标准化区间描述为

$$a = a^c + \delta a^r \quad (4)$$

式中 δ ——标准化区间变量,取 $-1 \sim 1$

1.2 功能函数

以热驱动柔顺机构输出位移构建可靠性功能函数 F 为

$$F(r, s) = r - s \quad (5)$$

式中 r ——输出位移约束值

s ——输出位移

将功能函数进行标准化处理,从而求得可靠性指标,将热驱动柔顺机构可靠性拓扑优化设计双层优化问题转换为单层优化问题。

将功能函数 F 标准化后可得失效能面 g 为

$$g(\delta_r, \delta_s) = r^c - s^c + r^r \delta_r - s^r \delta_s = 0 \quad (6)$$

式中 r^c ——输出位移约束中值

s^c ——输出位移中值

r^r ——输出位移约束离差

s^r ——输出位移离差

δ_r ——输出位移约束标准化区间变量

δ_s ——输出位移标准化区间变量

可求得可靠性指标 η 为

$$\eta = \frac{r^c - s^c}{r^r + s^r} \quad (7)$$

可靠性指标 η 大于其许用值 η^* , 代入式(7)可得

$$s^c + \eta^* r^r + \eta^* s^r - r^c \leq 0 \quad (8)$$

2 热驱动柔顺机构可靠性拓扑优化模型

2.1 材料插值模型

采用改进的固体各向同性材料惩罚方法^[29]表示单元弹性模量和单元密度之间的关系,即

$$E_e(x_e) = [x_{\min} + x_e^p(1 - x_{\min})]E_0 \quad (9)$$

式中 $E_e(x_e)$ ——第 e 个单元弹性模量

x_e ——第 e 个单元密度, 取 $0 \sim 1$

x_{\min} ——空洞单元密度

P ——惩罚系数

E_0 ——实体材料弹性模量

2.2 热载荷计算

当温度发生变化时, 机构结构会产生热应变 ε , 计算式为

$$\varepsilon = \alpha(T - T_0)[1 \quad 1 \quad 0]^T \quad (10)$$

式中 α ——材料线膨胀系数

T_0 ——初始温度 T ——工作温度

考虑温度为均匀变化, 单元等效节点热载荷 F_m^c 可表达为

$$F_m^c = \iint_{\Omega} B^T D \alpha (T - T_0) [1 \quad 1 \quad 0]^T h dx dy = \frac{\alpha E \Delta T h}{2(1 - \mu)} [-1 \quad -1 \quad 1 \quad -1 \quad 1 \quad 1 \quad -1 \quad 1]^T \quad (11)$$

式中 B ——应变矩阵 D ——弹性矩阵

h ——单元厚度 ΔT ——温度场变化量

μ ——材料泊松比

2.3 可靠性拓扑优化模型

考虑热载荷不确定性, 以输出位移构建可靠性功能函数, 在可靠性指标约束条件下寻求机构体积最小化, 建立基于区间非概率模型的热驱动柔顺机构可靠性拓扑优化模型为

$$\begin{cases} \min V = f^* V_0 = \sum_{e=1}^n x_e v_0 \\ \text{s. t.} \begin{cases} K_m(x_e) U_m(x_e) = F_m(\Delta T, x_e) \\ s^c + \eta^* r^r + \eta^* s^r - r^c \leq 0 \\ 0 \leq x_{\min} \leq x_e \leq 1 \quad (e = 1, 2, \dots, n) \end{cases} \end{cases} \quad (12)$$

式中 V ——优化后机构体积

f^* ——体积分数

V_0 ——优化前机构体积

n ——有限单元数目

v_0 ——充满实体材料单元体积

K_m ——整体刚度矩阵

U_m ——整体节点位移向量

F_m ——整体节点等效热载荷向量

3 灵敏度与过滤技术

3.1 灵敏度

采用基于梯度的移动渐近线方法 (Methods of moving asymptotes, MMA)^[30]进行优化问题求解, 需计算优化目标和可靠性约束灵敏度。

由式(12)可得目标函数灵敏度为

$$\frac{\partial V}{\partial x_e} = \frac{\partial(x_e v_0)}{\partial x_e} = v_0 \quad (13)$$

机构输出位移 s 对设计变量灵敏度为

$$\frac{\partial s}{\partial x_e} = \frac{\partial s^c}{\partial x_e} + \eta^* \frac{\partial s^r}{\partial x_e} \quad (14)$$

$$\text{其中} \quad s^c = \frac{\bar{s} + s}{2} \quad (15)$$

$$s^r = \frac{\bar{s} - s}{2} \quad (16)$$

式中 \bar{s} ——输出位移上限

s ——输出位移下限

由式(15)、(16)可得 s^c 和 s^r 对设计变量的灵敏度分别为

$$\frac{\partial s^c}{\partial x_e} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{s}}{\partial x_e} + \frac{\partial s}{\partial x_e} \right) \quad (17)$$

$$\frac{\partial s^r}{\partial x_e} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{s}}{\partial x_e} - \frac{\partial s}{\partial x_e} \right) \quad (18)$$

将式(17)、(18)代入式(14), 可得输出位移 s 灵敏度为

$$\frac{\partial s}{\partial x_e} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{s}}{\partial x_e} + \frac{\partial s}{\partial x_e} + \eta^* \frac{\partial \bar{s}}{\partial x_e} - \eta^* \frac{\partial s}{\partial x_e} \right) \quad (19)$$

引入伴随矢量, 热驱动柔顺机构输出位移上限 \bar{s} 表示为

$$\bar{s} = L^T \bar{U}_m + \lambda^T (K_m \bar{U}_m - F_m) \quad (20)$$

式中 L ——单位矢量 λ ——伴随列阵

\bar{U}_m ——整体节点位移上限列阵

对式(20)求导可得

$$\frac{\partial \bar{s}}{\partial x_e} = L^T \frac{\partial \bar{U}_m}{\partial x_e} + \lambda^T \left(K_m \frac{\partial \bar{U}_m}{\partial x_e} + \frac{\partial K_m}{\partial x_e} \bar{U}_m - \frac{\partial F_m}{\partial x_e} - \frac{\partial F_m}{\partial U_m} \frac{\partial \bar{U}_m}{\partial x_e} \right) = (L^T + \lambda^T K_m) \frac{\partial \bar{U}_m}{\partial x_e} + \lambda^T \left(\frac{\partial K_m}{\partial x_e} \bar{U}_m - \frac{\partial F_m}{\partial x_e} \right) \quad (21)$$

由于伴随列阵可取任一值, 令其满足

$$L^T + \lambda^T K_m = 0 \quad (22)$$

式(21)可简写为

$$\frac{\partial \bar{s}}{\partial x_e} = \boldsymbol{\lambda}^T \left(\frac{\partial \mathbf{K}_m \bar{\mathbf{U}}_m}{\partial x_e} - \frac{\partial \mathbf{F}_m}{\partial x_e} \right) \quad (23)$$

将式(9)代入式(11)中求导可得

$$\frac{\partial \mathbf{F}_m}{\partial x_e} = P x_e^{p-1} \frac{\alpha E_0 (1 - x_{\min}) \Delta T h}{2(1 - \mu)} \cdot [-1 \quad -1 \quad 1 \quad -1 \quad 1 \quad 1 \quad -1 \quad 1]^T \quad (24)$$

将式(24)代入式(23)中可得

$$\frac{\partial \bar{s}}{\partial x_e} = \boldsymbol{\lambda}^T (1 - x_{\min}) P x_e^{p-1} \left[\mathbf{K}_0 \bar{\mathbf{U}}_m^e - \frac{\alpha E_0 \Delta T h}{2(1 - \mu)} [-1 \quad -1 \quad 1 \quad -1 \quad 1 \quad 1 \quad -1 \quad 1]^T \right] \quad (25)$$

式中 \mathbf{K}_0 ——单元刚度矩阵

$\bar{\mathbf{U}}_m^e$ ——单元节点位移上限列阵

同理,可求出输出位移下限 \underline{s} 对设计变量 x_e 的灵敏度 $\partial \underline{s} / \partial x_e$ 。将 $\partial \bar{s} / \partial x_e$ 和 $\partial \underline{s} / \partial x_e$ 代入式(19), 求出输出位移 s 对设计变量的灵敏度 $\partial s / \partial x_e$ 。

3.2 过滤技术

采用映射过滤法^[31]以避免优化结果出现棋盘格、中间密度单元等数值不稳定性现象。综上所述, 基于区间模型的热驱动柔顺机构可靠性拓扑优化设计流程如图 1 所示。

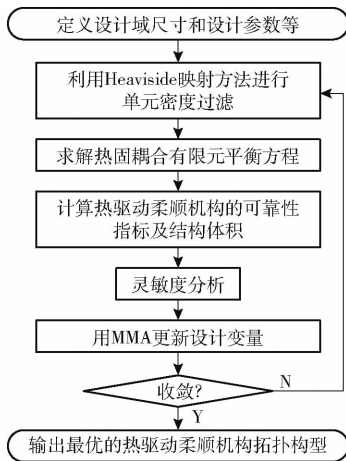


图 1 热驱动柔顺机构可靠性拓扑优化设计流程图

Fig. 1 Flowchart of reliability-based topology optimization of thermally actuated compliant mechanisms

4 数值算例

基于区间非概率模型的热驱动柔顺机构可靠性拓扑优化方法利用 Matlab 软件编程实现, 通过两个数值算例来验证所提出方法的有效性。两个算例中, 材料弹性模量 E_0 为 100 GPa, 泊松比 μ 为 0.3, 热膨胀系数 α 为 1×10^{-5} , 空相材料弹性模量 E_{\min} 为 $10^{-9} E_0$, 最小过滤半径 r_{\min} 为 4 倍单元尺寸, 输出位置输出弹簧刚度 k_{out} 为 100 N/m。控制参数 β 初始

值为 1, 每隔 50 步翻倍, 最大值为 16, 参数 Δ 为 0.5。

4.1 热驱动器 1

图 2 为热驱动器 1 的设计域、约束及作用边界。热驱动柔顺机构上、下、左边界固定, 右侧中点为输出端。当温度变化时, 期望输出端产生向右的运动。由于机构上、下对称, 取下半设计域进行设计, 将其离散为 20 000 个四边形单元。

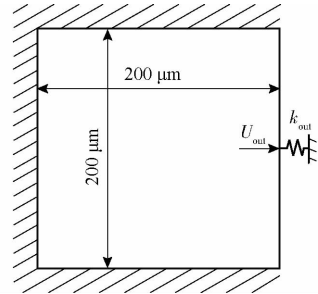


图 2 热驱动器 1 设计域

Fig. 2 Design domain of thermal actuator 1

当温度变化 ΔT 为 100℃ 和输出位移约束为 1.6 μm 时进行热驱动器 1 确定性拓扑优化设计, 确定性拓扑优化模型是在位移约束条件下寻求机构体积最小化, 确定性拓扑优化结果如图 3 所示, 体积分数和输出位移为 0.159 和 1.6 μm 。考虑温差变化 ΔT 中值和输出位移约束中值为 100℃ 和 1.6 μm , 温差变化 ΔT 的离差值和输出位移约束值 r 的离差值均为中值的 10%, 即 ΔT 和 r 分别为 90 ~ 110℃ 和 1.44 ~ 1.76 μm , 在可靠性指标许用值为 1.2 条件下进行热驱动器 1 可靠性拓扑优化设计, 拓扑构型如图 4 所示。图 5 为热驱动器 1 可靠性拓扑优化过程的体积分数和可靠性指标的迭代曲线, 在迭代初期出现震荡, 200 步后趋于稳定, 体积分数收敛于 0.260; 可靠性指标 η 收敛于许用值 1.2, 输出位移为 1.833 ~ 2.240 μm 。与确定性拓扑优化结果相比, 可靠性拓扑优化获得的热驱动器 1 构型存在显著差异, 机构输出位移区间中值更大, 同时机构体积分数更大, 表明需要更多的用材来满足热驱动器 1 的可靠性要求。

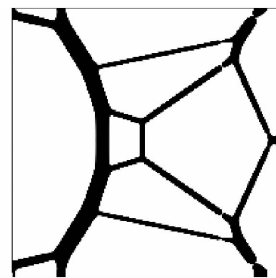


图 3 确定性拓扑优化获得的热驱动器 1 构型
Fig. 3 Configuration of thermal actuator 1 obtained by deterministic topology optimization

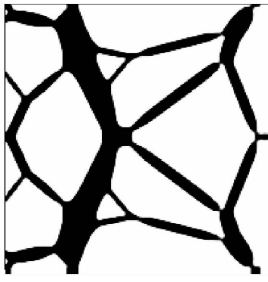


图4 可靠性拓扑优化获得的热驱动器1构型
($\eta^* = 1.2$)

Fig.4 Configuration of thermal actuator 1 obtained by reliability-based topology optimization ($\eta^* = 1.2$)

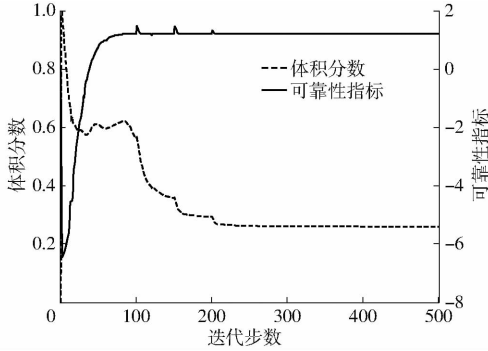


图5 热驱动器1可靠性拓扑优化迭代曲线($\eta^* = 1.2$)

Fig.5 Iteration curves for reliability topology optimization of thermal actuator 1 ($\eta^* = 1.2$)

在相同条件下,采用 Abaqus 软件对可靠性拓扑优化($\eta^* = 1.2$)获得的热驱动器1进行有限元分析,结果如图6所示。由图6可知,热驱动器1输出位移上、下限为 $1.904, 2.327 \mu\text{m}$ 。热驱动器1输出位移上、下限理论值与有限元分析结果误差均小于5%,验证了设计方法的有效性。

为了研究可靠性指标许用值 η^* 对热驱动器可靠性设计的影响,在温差变化 ΔT 的输出位移约束相同条件下 (ΔT 为 $90 \sim 110^\circ\text{C}$, r 为 $1.44 \sim 1.76 \mu\text{m}$),考虑 η^* 为 $1.4, 1.6, 1.8, 2.0$ 进行热驱动器1可靠性拓扑优化设计,热驱动器1拓扑构型和优化结果如图7和表1所示。由图7可知,当许用可靠性指标 η^* 变化,获得的热驱动器1拓扑构型发生变化。随着可靠性指标许用值 η^* 增大,获得的热驱动器1均满足可靠性指标要求,所需材料体积分数更大,输出位移区间中值也逐渐变大,如表1所示。这表明热驱动器1需要更多的用材来满足更大的可靠性指标要求。

为了研究温差幅值对热驱动器可靠性设计的影响,当许用可靠性指标 η^* 为 $1.2, r$ 为 $1.44 \sim 1.76 \mu\text{m}$ 和温差变化 ΔT 中值为 100°C 时,考虑温差变化 ΔT 离差值为 $8, 12, 16, 20^\circ\text{C}$ 条件下进行热驱动器1可靠性拓扑优化设计,获得的热驱动器1拓扑构型和优化结果如图8和表2所示。当温差变化 ΔT 离差

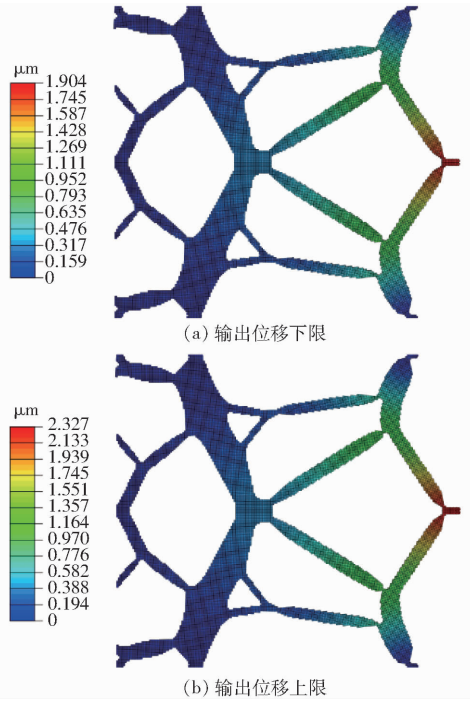


图6 热驱动器1($\eta^* = 1.2$)输出位移上、下限有限元分析结果

Fig.6 Finite element analysis results of output displacements of thermal actuator 1 ($\eta^* = 1.2$)

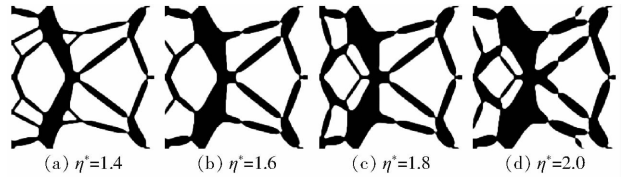


图7 不同可靠性指标条件下的热驱动器1构型

Fig.7 Configurations of thermal actuator 1 obtained by different reliability indexes

表1 不同可靠性指标条件下热驱动器1优化结果
Tab.1 Results for topology optimization of thermal actuator 1 under different reliability indexes

许用可靠性指标 η^*	体积分数	输出位移/ μm	优化后可靠性指标
1.4	0.286	1.909 ~ 2.333	1.4
1.6	0.329	1.989 ~ 2.431	1.6
1.8	0.364	2.072 ~ 2.533	1.8
2.0	0.420	2.160 ~ 2.640	2.0

增大,热驱动器1拓扑构型也发生变化,更多的杆件结构出现;热驱动器1体积分数也逐渐增大。当温差变化 ΔT 离差变大,热驱动器1需要更多的用材来满足相同的可靠性指标要求。

为了研究输出弹簧刚度对热驱动器可靠性设计的影响,在许用可靠性指标、温差 ΔT 和输出位移约束相同条件下 ($\eta^* = 1.2, \Delta T = 90 \sim 110^\circ\text{C}, r = 1.44 \sim 1.76 \mu\text{m}$),考虑输出弹簧刚度 k_{out} 分别为 $50, 70, 90, 110 \text{ N/m}$ 条件下进行热驱动器1可靠性拓扑优化设

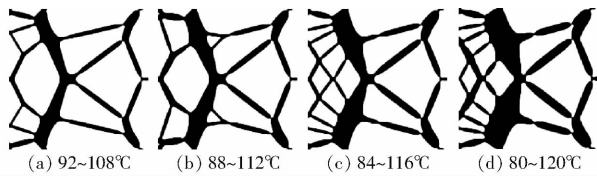


图 8 不同温度变化区间下热驱动器 1 构型

Fig. 8 Configurations of thermal actuator 1 obtained by different temperature intervals

表 2 不同温度变化区间的热驱动器 1 可靠性拓扑优化结果

Tab. 2 Results for reliability-based topology optimization of thermal actuator 1 under different temperature intervals

参数	温度 $\Delta T/^\circ\text{C}$			
	92 ~ 108	88 ~ 112	84 ~ 116	80 ~ 120
体积分数	0.239	0.277	0.316	0.380
可靠性指标	1.2	1.2	1.2	1.2

计,热驱动器 1 拓扑构型和优化结果如图 9 和表 3 所示。随着输出弹簧刚度增大,设计的热驱动器 1 结构变得更加粗壮,机构体积分数也逐渐增大,且均能够满足可靠性指标要求。

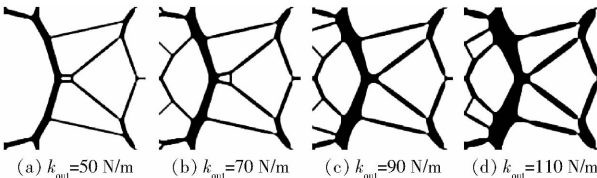


图 9 不同输出弹簧刚度下热驱动器 1 构型

Fig. 9 Configurations for thermal actuator 1 obtained by different output spring stiffnesses

表 3 不同输出弹簧刚度的热驱动器 1 可靠性拓扑优化结果

Tab. 3 Results for reliability-based topology optimization of thermal actuator 1 under different output spring stiffnesses

参数	输出弹簧刚度 $k_{\text{out}}/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$			
	50	70	90	110
体积分数	0.126	0.176	0.226	0.286
可靠性指标	1.2	1.2	1.2	1.2

4.2 热驱动器 2

图 10 为热驱动器 2 的设计域、约束及作用边界。热驱动器 2 设计域 4 个顶点固定,右侧中点为输出端。当温度变化时,期望输出端产生向右运动。同样,由于机构上、下对称,取下半设计域进行设计,将其离散为 20 000 个四边形单元。

同样地,考虑温度变化 ΔT 为 100°C 和输出位移约束为 $1.200\ \mu\text{m}$ 时,进行热驱动器 2 确定性拓扑优化设计,确定性拓扑优化结果如图 11 所示,体积分数和输出位移为 0.086 和 $1.200\ \mu\text{m}$ 。在 $\Delta T = 90 \sim$

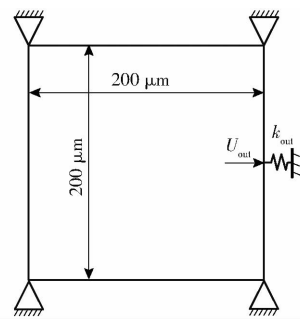


图 10 热驱动器 2 设计域

Fig. 10 Design domain of thermal actuator 2

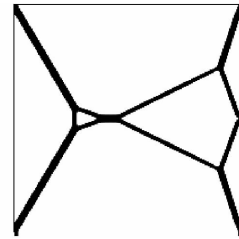


图 11 确定性拓扑优化热驱动器 2 构型

Fig. 11 Configuration of thermal actuator 2 obtained by deterministic topology optimization

110°C 和 $r = 1.08 \sim 1.32\ \mu\text{m}$ 条件下,考虑可靠性指标许用值为 1.6 条件下进行热驱动器 2 可靠性拓扑优化设计,机构构型如图 12 所示。图 13 为热驱动器 2 可靠性拓扑优化过程的体积分数和可靠性指标的迭代曲线图,在迭代初期出现震荡,200 步之后趋于稳定,体积分数收敛于 0.195;可靠性指标 η 收敛于许用值 1.6,输出位移为 $1.491 \sim 1.823\ \mu\text{m}$ 。与确定性拓扑优化结果相比,可靠性拓扑优化获得的热驱动器 2 构型存在显著差异,机构输出位移区间中值更大,同时机构体积分数更大,这表明需要更多的用材来满足热驱动器 2 可靠性要求。

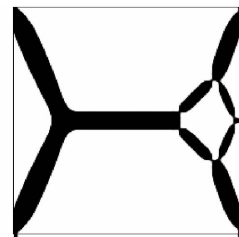


图 12 可靠性拓扑优化获得的热驱动器 2 构型 ($\eta^* = 1.6$)

Fig. 12 Configuration of thermal actuator 2 obtained by reliability-based topology optimization ($\eta^* = 1.6$)

采用 Abaqus 软件对可靠性拓扑优化 ($\eta^* = 1.6$) 获得的热驱动器 2 进行有限元分析,分析结果如图 14 所示。由图 14 可知,热驱动器 2 输出位移上、下限分别为 1.522 、 $1.861\ \mu\text{m}$ 。热驱动器 2 输出位移上、下限理论值与有限元分析结果误差均小于 5%,验证提出设计方法的有效性。

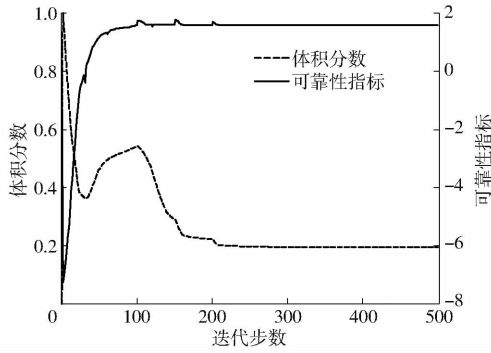


图 13 热驱动器 2 可靠性拓扑优化迭代曲线 ($\eta^* = 1.6$)

Fig. 13 Iteration curves for reliability topology optimization of thermal actuator 2 ($\eta^* = 1.6$)

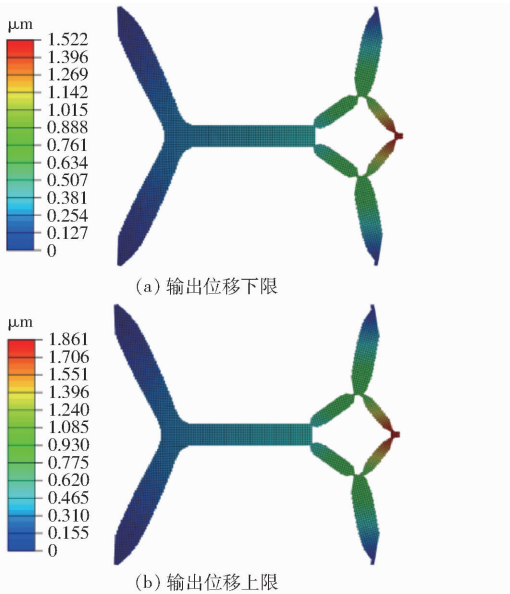


图 14 热驱动器 2 ($\eta^* = 1.6$) 输出位移上、下限有限元分析结果

Fig. 14 Finite element analysis results of output displacements of thermal actuator 2 ($\eta^* = 1.6$)

为了研究不同可靠性指标许用值 η^* 对热驱动器可靠性设计结果的影响,在 $\Delta T = 90 \sim 110^\circ\text{C}$ 和 $r = 1.08 \sim 1.32 \mu\text{m}$ 条件下,考虑 η^* 为 1.2、1.4、1.8、2.0 进行热驱动器 2 可靠性拓扑优化设计,热驱动器 2 拓扑构型和优化结果如图 15 和表 4 所示。由图 15 可知,当许用可靠性指标 η^* 变化,获得的热驱动器 2 拓扑构型发生变化。随着可靠性指标许用值 η^* 增大,获得的热驱动器 2 均满足可靠性指标要求,所需要材料的体积分数更大,输出位移区间中值也逐渐变大,如表 4 所示。这表明热驱动器 2 需要更多的用材来满足更大的可靠性指标要求。

在许用可靠性指标 $\eta^* = 1.6$, $r = 1.08 \sim 1.32 \mu\text{m}$ 和温差 ΔT 中值为 100°C 条件下,考虑温差变化 ΔT 离差为 4、8、12、16 $^\circ\text{C}$ 条件下进行热驱动器 2 可靠性拓

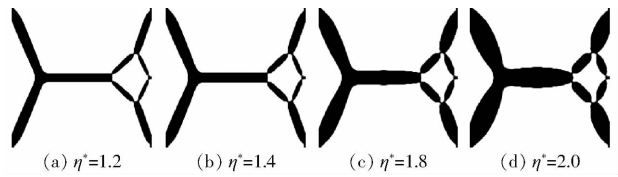


图 15 不同可靠性指标条件下热驱动器 2 构型

Fig. 15 Configurations of thermal actuator 2 obtained by different reliability indexes

表 4 不同可靠性指标条件下热驱动器 2 优化结果
Tab. 4 Results for topology optimization of thermal actuator 2 under different reliability indexes

许用可靠性指标 η^*	体积分数	输出位移/ μm	优化后可靠性指标
1.2	0.152	1.375 ~ 1.680	1.2
1.4	0.172	1.432 ~ 1.750	1.4
1.8	0.228	1.554 ~ 1.900	1.8
2.0	0.280	1.620 ~ 1.980	2.0

扑优化设计,得到热驱动器 2 拓扑构型和优化结果如图 16 和表 5 所示。当温差变化 ΔT 离差增大,热驱动器 2 拓扑构型也发生变化;热驱动器 2 体积分数也逐渐增大。当温差变化 ΔT 离差变大,获得的热驱动器 2 需要更多的用材,以满足相同的可靠性指标要求。

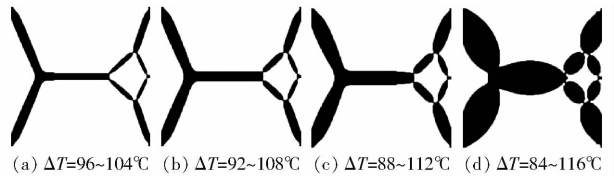


图 16 不同温度变化区间下热驱动器 2 构型

Fig. 16 Configurations of thermal actuator 2 obtained by different temperature intervals

表 5 不同温度变化区间的热驱动器 2 可靠性拓扑优化结果

Tab. 5 Results for reliability-based topology optimization of thermal actuator 2 under different temperature intervals

参数	$\Delta T/^\circ\text{C}$			
	96 ~ 104	92 ~ 108	88 ~ 112	84 ~ 116
体积分数	0.142	0.174	0.226	0.396
可靠性指标	1.6	1.6	1.6	1.6

为了研究输出弹簧刚度对热驱动器可靠性设计的影响,在 $\eta^* = 1.6$ 、 $\Delta T = 90 \sim 110^\circ\text{C}$ 和 $r = 1.08 \sim 1.32 \mu\text{m}$ 条件下,考虑输出弹簧刚度 k_{out} 为 50、70、90、110 N/m 进行热驱动器 2 可靠性拓扑优化设计,得到热驱动器 2 拓扑构型和优化结果如图 17 和表 6 所示。随着输出弹簧刚度增大,设计的热驱动器 2 结构变得更加粗壮,机构体积分数也逐渐增大,并且均能够满足可靠性指标要求。

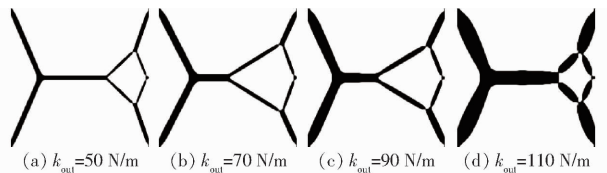


图 17 不同输出弹簧刚度下获得的热驱动器 2 构型

Fig. 17 Configurations for thermal actuator 2 obtained by different output spring stiffnesses

表 6 不同输出弹簧刚度的热驱动器 2 可靠性拓扑优化结果

Tab. 6 Results for reliability-based topology optimization of thermal actuator 2 under different output spring stiffnesses

参数	$k_{out}/(N \cdot m^{-1})$			
	50	70	90	110
体积分数	0.085	0.116	0.155	0.229
可靠性指标	1.6	1.6	1.6	1.6

5 结论

(1) 采用区间非概率模型描述热载荷的不确定性, 以输出位移构建可靠性功能函数, 在可靠性指标约束条件下寻求机构的体积最小化, 实现了热驱动柔顺机构可靠性设计。

(2) 与确定性拓扑优化结果对比, 可靠性拓扑优化获得的热驱动器拓扑构型存在显著差异, 能够有效地满足可靠性指标约束, 机构输出位移更大, 同时体积分数更大。可靠性设计的热驱动柔顺机构输出位移上、下限理论值与有限元分析结果误差均小于 5%。

(3) 随着许用可靠性指标增大, 获得的热驱动器输出位移区间中值增加, 同时体积分数逐渐变大。

(4) 随温度变化区间离差和输出弹簧刚度增大, 获得热驱动器拓扑构型发生变化, 需要更多材料来满足相同的可靠性指标要求。

参 考 文 献

- [1] HOWELL L L. Compliant mechanisms[M]. New York: McGraw-Hill, 2001.
- [2] 于靖军, 郝广波, 陈贵敏, 等. 柔性机构及其应用研究进展[J]. 机械工程学报, 2015, 51(13): 53-68.
YU Jingjun, HAO Guangbo, CHEN Guimin, et al. State of-art of compliant mechanisms and their applications[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(13): 53-68. (in Chinese)
- [3] XIAO W, HU D, CHEN W, et al. A new type of soft pneumatic torsional actuator with helical chambers for flexible machines [J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2020, 13(1): 1-24.
- [4] LIU C H, CHEN T L, CHIU C H, et al. Optimal design of a soft robotic gripper for grasping unknown objects[J]. Soft Robotics, 2018, 5(4): 452-465.
- [5] WANG J, LAN C. A constant-force compliant gripper for handling objects of various sizes[J]. Journal of Mechanical Design, 2014, 136(7): 071008.
- [6] 刘敏, 袁奇, 张佳, 等. 基于半圆型波纹周期梁的柔顺恒力机构优化设计[J]. 农业机械学报, 2023, 54(12): 449-458.
LIU Min, YUAN Qi, ZHANG Jia, et al. Optimal design of compliant constant-force mechanism based on semicircular corrugated periodic beam[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12): 449-458. (in Chinese)
- [7] 马金玉, 余胜东, 康升征, 等. 基于压电作动器驱动的微操作机构设计与运动控制[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 417-426.
MA Jinyu, YU Shengdong, KANG Shengzheng, et al. Design and motion control of micro operation mechanism driven by piezoelectric actuator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 417-426. (in Chinese)
- [8] RUBIO W M, SILVA E C N, BORDATCHEV E V, et al. Topology optimized design, microfabrication and characterization of electro-thermally driven microgripper[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2009, 20(6): 669-681.
- [9] 占金青, 晏家坤, 蒲圣鑫, 等. 基于等几何分析的电热驱动柔顺机构拓扑优化设计[J]. 机械工程学报, 2023, 59(21): 177-187.
ZHAN Jinqing, YAN Jiakun, PU Shengxin, et al. Topological design of electrothermomechanical compliant mechanisms using isogeometric analysis[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(21): 177-187. (in Chinese)
- [10] YIN L, ANANTHASURESH G K. A novel topology design scheme for the multi-physics problems of electro-thermally actuated compliant micromechanisms[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2002, 97: 599-609.
- [11] YAN J, GUO X, CHENG G. Multi-scale concurrent material and structural design under mechanical and thermal loads[J]. Computational Mechanics, 2016, 57: 437-446.
- [12] SIGMUND O. Design of multiphysics actuators using topology optimization—Part I: one-material structures[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2001, 190(49-50): 6577-6604.
- [13] SAXENA R, SAXENA A. Design of electrothermally compliant MEMS with hexagonal cells using local temperature and stress constraints[J]. Journal of Mechanical Design, 2009, 131(5): 051006.
- [14] ANSOLA R, VEGUERÍA E, CANALES J, et al. Evolutionary optimization of compliant mechanisms subjected to non-uniform

- thermal effects[J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2012, 57: 1–14.
- [15] ANSOLA R, VEGUERÍA E, CANALES J, et al. Electro-thermal compliant mechanisms design by an evolutionary topology optimization method[J]. *Engineering Computations*, 2013, 30(7): 961–981.
- [16] LUO Z, TONG L, MA H. Shape and topology optimization for electrothermomechanical microactuators using level set methods [J]. *Journal of Computational Physics*, 2009, 228(9): 3173–3181.
- [17] 张宪民, 胡凯, 王念峰, 等. 基于并行策略的热固耦合多材料柔顺机构设计[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(10): 22–29.
ZHANG Xianmin, HU Kai, WANG Nianfeng, et al. Design of thermo-structure coupling multi-material flexibility mechanism based on parallel strategy[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2016, 44(10): 22–29. (in Chinese)
- [18] GRANLUND G, WALLIN M, GÜNTHER-HANSEN O, et al. Topology optimization of compliant mechanisms under transient thermal conditions[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2024, 418: 116478.
- [19] AL A M, SHIMODA M. On multiphysics concurrent multiscale topology optimization for designing porous heat-activated compliant mechanism under convection for additive manufacture[J]. *Engineering Structures*, 2023, 294: 116756.
- [20] QIU Z, LI Q, LIU S. Sensitivity clustering-based multi-scale topology optimization method for metamaterial thermal actuators [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2024, 67(1): 9.
- [21] 占金青, 李翼丰, 朱本亮, 等. 考虑输出刚度不确定性的柔顺机构拓扑优化设计[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(1): 412–418.
ZHAN Jinqing, LI Yifeng, ZHU Benliang, et al. Topological optimization design of compliant mechanisms considering output stiffness uncertainty[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(1): 412–418. (in Chinese)
- [22] MAUTE K, FRANGOPOL D M. Reliability-based design of MEMS mechanisms by topology optimization[J]. *Computers & Structures*, 2003, 81(8–11): 813–824.
- [23] 崔明涛, 陈建军, 陈永琴, 等. 整体式柔性机构的多目标可靠性拓扑优化设计[J]. *西安电子科技大学学报*, 2007, 34(5): 784–788.
CUI Mingtao, CHEN Jianjun, CHEN Yongqin, et al. The multi-objective reliability topology optimization design of integral flexible mechanism[J]. *Journal of Xidian University*, 2007, 34(5): 784–788. (in Chinese)
- [24] ZHANG X M, OUYANG G F. A level set method for reliability-based topology optimization of compliant mechanisms[J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2008, 51(4): 443–455.
- [25] LUO Y, ZHOU M, WANG M Y, et al. Reliability based topology optimization for continuum structures with local failure constraints[J]. *Computers and Structures*, 2014, 143(9): 73–84.
- [26] SATO Y, IZUI K, YAMADA T, et al. Reliability-based topology optimization under shape uncertainty modeled in Eulerian description[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2019, 59: 75–91.
- [27] CHO K H, PARK J Y, IM M G, et al. Reliability-based topology optimization of electro-thermal-compliant mechanisms with a new material mixing method[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2012, 13(5): 693–699.
- [28] RAO S S, BERKE L. Analysis of uncertain structural systems using interval analysis[J]. *AIAA Journal*, 1997, 35(4): 727–735.
- [29] RONG J, RONG X, PENG L, et al. A new method for optimizing the topology of hinge-free and fully decoupled compliant mechanisms with multiple inputs and multiple outputs[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2021, 122(12): 2863–2890.
- [30] SVANBERG K. The method of moving asymptotes—a new method for structural optimization[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1987, 24(2): 359–373.
- [31] GUEST J K, PRÉVOST J H, BELYTSCHKO T. Achieving minimum length scale in topology optimization using nodal design variables and projection functions[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2004, 61(2): 238–254.