

某直升机主减速器行星轮系功质比的区间多目标优化

黄康¹, 马加奇¹, 夏公川¹, 周志红¹, 张祖芳^{1,2}

(1. 合肥工业大学 机械工程学院, 合肥 230009;

2. 合肥工业大学 马鞍山高新技术研究院, 安徽 马鞍山 243071)

摘 要: 针对某型直升机主减速器行星轮系功质比的优化问题,建立含有密度和啮合摩擦因数等不确定性参数的区间多目标优化函数及相应的约束函数,利用改进的区间多目标分层优化方法,得到多目标优化函数的最优结果区间和参数变量,对优化前后主减速器行星轮系的传动性能进行深入比较。根据优化结果设计直升机主减速器行星轮系的传动效率试验方案,试验结果表明:区间多目标优化后主减速器行星轮系质量减少6.2%,传动效率提高2.14%,且效率曲线变化随着载荷的波动更加趋于稳定,说明区间多目标优化方法应用于某型直升机主减速器行星轮系功质比优化方面的有效性。

关 键 词: 直升机主减速器; 功质比; 多目标优化; 区间分析; 效率试验

中图分类号: V321; TH132

文献标志码: A

Interval multi-objective optimization for the specific power of a helicopter's main reducer planetary gear trains

HUANG Kang¹, MA Jiaqi¹, XIA Gongchuan¹,
ZHOU Zhihong¹, ZHANG Zufang^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering,

Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Ma'anshan High-Tech Research Institute,

Hefei University of Technology, Ma'anshan Anhui, 243071, China)

Abstract: The interval multi-objective optimization objective functions and constraint functions for the optimization problem of the specific power of a certain helicopter's main reducer planetary gear trains with uncertain parameters of density and friction coefficient were established. The optimal parameter interval of objective functions and the design variables were obtained by using the improved interval multi-objective hierarchical optimization method, then the helicopter's optimal main reducer planetary gear trains were compared and analyzed. Finally the experiment scheme for the efficiency of helicopter's main reducer planetary gear trains was designed according to the optimization results. The results showed that: the gearing efficiency was improved by 2.14%, while the weight declined by 6.2% after the in-

收稿日期: 2016-03-04

基金项目: 国家国际合作项目(2014DFA80440)

作者简介: 黄康(1968—),男,教授、博士生导师,博士,主要从事数字化设计、机械系统动力学、汽车动力传动系统及其零部件研究。

引用格式: 黄康,马加奇,夏公川,等. 某直升机主减速器行星轮系功质比的区间多目标优化[J]. 航空动力学报, 2017, 32(10): 2447-2455. HUANG Kang, MA Jiaqi, XIA Gongchuan, et al. Interval multi-objective optimization for the specific power of a helicopter's main reducer planetary gear trains[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(10): 2447-2455.

terval multi-objective optimization of the helicopter’s main reducer planetary gear trains, and the trend of the efficiency curves was more smooth and steady under the high-speed and heavy-duty working conditions, illustrating the effectiveness of the interval multi-objective optimization method used in the specific power optimization of a certain helicopter’s main reducer planetary gear trains.

Key words: helicopter main reducer; specific power; multi-objective optimization; interval analysis; efficiency experiment

直升机作为航空飞行工具,整机质量和功率是整机最重要的性能衡量参数。直升机的主减速器质量一般要占整个直升机结构质量的 1/7~1/9,所以直升机传动系统主减速器的质量和效率直接影响着直升机整机的负载能力、续航和机动性等方面。

功质比,又称比功率。由于传动系统的输出功率由传动系统的传动效率与发动机输出功率决定,故对直升机传动系统中主减速器的功质比优化集中于质量和效率的优化。目前直升机传动系统的研究均为确定性参数,但在实际工程问题中不确定性参数广泛存在于材料性质、几何特性等信息中,所以为了进行可靠的分析和设计,必须考虑参数的不确定性。

在多目标优化问题中,有些优化问题本身就具有某种不确定性^[1],由于在建立数学模型时获取的有益参数过少,或者测绘数据不准确,或者人为简化模型导致的不确定性^[2]等,均会导致建立的数学模型包含不确定性参数,影响结果的准确性。因此优化变量必然存在最大可行区间,而不是一个确定的最优值^[3-5]。

王安麟等^[6]采用积极集策略对大型行星齿轮传动机构的可靠性进行多目标优化计算;基于区间优化的多目标优化^[7-10]方法研究不断成熟;秦大同等^[11]利用混合离散复合形法对建立的多目标优化模型进行求解;李方义等^[12]利用区间序占优关系和区间可能度来处理含有不确定参数的目标函数和约束函数。李新兰等^[13]将非线性区间多目标优化问题转化为确定性多目标优化问题;刘洞波等^[14]利用基于区间分析的区间粒子滤波进行位姿估计。不确定参数结构的特征值问题一般通过区间分析方法^[15]求解。可以采用多目标遗传算法^[16-17]构建优化框架,李玥等^[18]通过多目标遗传算法对航空发动机 PID 控制器参数进行优化设计。姜潮等^[19]针对参数区间的混合不确定问题,构造一种含区间变量的时变可靠性分析

方法。

以齿根弯曲、齿面接触及胶合疲劳强度、重合度、齿轮干涉以及行星轮系安装条件等作为约束条件,建立含有不确定参数的目标函数和约束函数,利用多目标分层优化方法对直升机主减速器的多目标函数进行求解。最后通过区间优化前后的行星轮系传动效率试验对优化结果验证。

1 主减行星轮系多目标优化目标

某型直升机主减速器的结构方案如图 1 所示,根据直升机传动系统的特性,其主减速器以大重合度行星轮系的最小质量和最大效率为目标函数,并考虑目标函数中的不确定性参数,利用区间数学建立其优化设计数学模型。

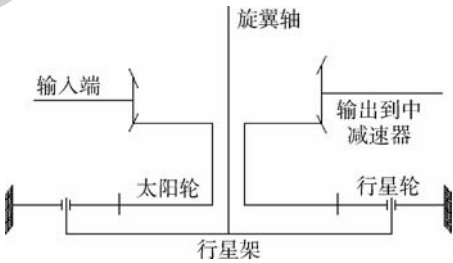


图 1 某型直升机主减速器的结构方案图
Fig. 1 Structure scheme of a helicopter main reducer

考虑如下区间多目标优化最大化问题:

$$\begin{cases} \max f(\mathbf{X}, \mathbf{C}) = [f_1(\mathbf{X}, \mathbf{C}_1), f_2(\mathbf{X}, \mathbf{C}_2), \dots, f_m(\mathbf{X}, \mathbf{C}_m)] \\ \text{s. t. } \mathbf{X} \in \mathbf{S} \subseteq \mathbf{R}^n \\ \mathbf{C}_i = (c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{il})^T; \quad c_{ik} = [c_{ik}^l, c_{ik}^r] \\ k = 1, 2, \dots, l \end{cases} \tag{1}$$

式中 $\mathbf{X}$ 为 n 维设计变量; $\mathbf{S}$ 为 $\mathbf{X}$ 的变量空间; $f(\mathbf{X}, \mathbf{C}_i)$ ($i=1, 2, \dots, m$) 为第 i 个含有区间参数的目标函数; $\mathbf{C}_i$ 为区间向量参数; c_{ik} 为 $\mathbf{C}_i$ 的第 k 个分量; c_{ik}^l, c_{ik}^r 分别为 c_{ik} 的上下限。

由于目标函数含有区间参数,因此,上式的各

目标函数值均为区间,并记为

$$f_i(\mathbf{X}, \mathbf{C}_i) = [f_i^l(\mathbf{X}, \mathbf{C}_i), f_i^r(\mathbf{X}, \mathbf{C}_i)] \quad (2)$$

当传动效率处于最大区域时,其质量目标并非最小;同理,当行星轮系的质量目标最小时,其传动效率也并非为最大值。因此对于这样的多目标优化问题,只能求解目标函数的最优解集。

1.1 质量最小

由于齿轮系材料存在非均匀性,且经过粗加工、热处理和磨削精加工后,齿轮系各处的密度 ρ 已经相差较大,不是确定值,变化范围为 $7.7 \sim 8.7 \text{ g/cm}^3$ 。选择行星轮系的中心轮、行星轮和齿圈质量作为最小质量目标。

行星轮系主减速器总质量的表达式为

$$\min f_1(\mathbf{X}, \rho) = \frac{\pi m}{4} \cdot [d_{as}^2 z_s \varphi_{de} + n d_{ap}^2 z_p \varphi_{de} + (d_{fr}^2 - d_{ar}^2) z_r \varphi_{di}] \cdot \rho \quad (3)$$

式中 $\rho \in [\rho^l, \rho^r] = [7.7, 8.7]$ 。

1.2 效率最高

忽略行星轮系中的轴承及轴的效率损失以及润滑对效率的影响,行星轮系的传动效率^[15]可表示为

$$\max f_2(\mathbf{X}, \mu_m) = 1 - \frac{z_r \pi \eta \mu_m}{2(z_s + z_r)} \cdot \left(\epsilon_{sp} \frac{z_s + z_p}{z_s z_p} + \epsilon_{rp} \frac{z_p - z_r}{z_p z_r} \right) \quad (4)$$

式中 μ_m 为啮合摩擦因数, $\mu_m \in [u_m^l, u_m^r] = [0.02, 0.04]$; ϵ_{sp} 为中心轮与行星轮啮合重合度; ϵ_{rp} 为行星轮与齿圈啮合重合度。

2 选取设计变量及约束条件

2.1 选取设计变量

除了考虑重合度 ϵ 对齿轮系效率及强度的影响外,对于给定传动比的行星轮系,综合考虑模数 m 、太阳轮齿数 z_s 和齿顶高系数 h_a^* 等对行星齿轮系质量的影响。因此选定 8 个优化设计变量:太阳轮齿数 z_s , 模数 m , 太阳轮变位系数 x_s , 行星轮变位系数 x_p , 齿圈变位系数 x_r , 齿顶高系数 h_a^* , 压力角 α , 行星轮个数 n 。

$$\mathbf{X} = [z_s \quad m \quad h_a^* \quad \alpha \quad x_s \quad x_p \quad x_r \quad n] \quad (5)$$

$$\begin{cases} \tan \alpha_{sp} - \frac{z_p}{z_s} (\tan \alpha_{ap} - \tan \alpha_{sp}) \geq \tan \alpha - \frac{4(h_a^* - x_s)}{z_s \sin 2\alpha} & z_p > z_s \\ \tan \alpha_{sp} - \frac{z_s}{z_p} (\tan \alpha_{as} - \tan \alpha_{sp}) \geq \tan \alpha - \frac{4(h_a^* - x_p)}{z_p \sin 2\alpha} & z_p \leq z_s \end{cases} \quad (13)$$

2.2 建立约束条件

与设计变量一一对应,共建立 8 个约束条件。

2.2.1 齿面接触疲劳强度约束

太阳轮与行星轮的啮合

$$\begin{cases} \sigma_{ho} = Z_h Z_e Z_\epsilon \sqrt{\frac{F_t}{d_s^2 \varphi_{de}}} \cdot \frac{z_p + z_s}{z_p} & z_p > z_s \\ \sigma_{ho} = Z_h Z_e Z_\epsilon \sqrt{\frac{F_t}{d_p^2 \varphi_{de}}} \cdot \frac{z_s + z_p}{z_p} & z_p \leq z_s \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{式中 } Z_\epsilon = \sqrt{\frac{4 - \epsilon_{sp}}{3}}.$$

行星轮与齿圈的啮合

$$\sigma_{ho} = Z_h Z_e Z_\epsilon \sqrt{\frac{F_t}{d_p^2 \varphi_{de}}} \cdot \frac{z_r - z_p}{z_p} \quad (7)$$

则齿面接触应力为

$$\sigma_h = \sigma_{ho} \sqrt{K_a K_v K_{h\beta} K_{ha} K_{hp}} \quad (8)$$

满足如下约束条件:

$$\begin{cases} \max \{ \sigma_{hs}, \sigma_{hsp} \} \leq [\sigma_{hsp}] \\ \max \{ \sigma_{hr}, \sigma_{hrp} \} \leq [\sigma_{hrp}] \end{cases} \quad (9)$$

2.2.2 齿根弯曲疲劳强度约束

$$\begin{cases} \sigma_f = \sigma_{f0} K_a K_v K_{f\beta} K_{fa} K_{fp} \\ \sigma_{f0} = \frac{F_t}{mb} Y_{fa} Y_{sa} Y_\epsilon Y_\beta \\ [\sigma_f] = \frac{\sigma_{flim}}{S_{flim}} Y_{nt} Y_{\delta relt} Y_{Rrelt} Y_x \end{cases} \quad (10)$$

满足如下约束条件:

$$\begin{cases} \max \{ \sigma_{fs}, \sigma_{fsp} \} \leq [\sigma_{fsp}] \\ \max \{ \sigma_{fr}, \sigma_{frp} \} \leq [\sigma_{frp}] \end{cases} \quad (11)$$

2.2.3 齿面胶合疲劳强度约束

采用积分温度准则进行胶合疲劳强度约束,约束条件如下:

$$\theta_{int} = \theta_m + B_2 \theta_{flaint} \leq \frac{\theta_{sint}}{S_{sintmin}} \quad (12)$$

式中 $\theta_m = (\theta_{oil} + B_1 \theta_{flaint}) x_c$, $\theta_{flaint} = \frac{\theta_{flae} x_\epsilon}{X_q}$, $\theta_{flae} =$

$$\mu_b X_m X_{be} \frac{W_{bmt}^{0.75} \cdot V_{mt}^{0.5}}{(a')^{0.25}}, W_{bmt} = \frac{F_t}{b} K_a K_{ba} K_{h\beta}.$$

2.2.4 齿轮啮合过渡曲线不干涉约束

中心轮齿顶与行星轮齿根不产生干涉^[20]的条件

中心轮齿根与行星轮齿顶不产生干涉的条件

$$\begin{cases} \tan\alpha_{sp} - \frac{z_s}{z_p}(\tan\alpha_{as} - \tan\alpha_{sp}) \geq \tan\alpha - \frac{4(h_a^* - x_p)}{z_p \sin 2\alpha} & z_p > z_s \\ \tan\alpha_{sp} - \frac{z_p}{z_s}(\tan\alpha_{ap} - \tan\alpha_{sp}) \geq \tan\alpha - \frac{4(h_a^* - x_s)}{z_s \sin 2\alpha} & z_p \leq z_s \end{cases} \quad (14)$$

2.2.5 滑动率相等约束原则

按照滑动率相等原则进行变位系数分配,当一齿轮的齿根与另一齿轮的齿顶啮合时,齿根处的滑动率达到最大值 $\eta_{\max}$ 。

$$\begin{cases} z_p(\tan\alpha_{as} - \tan\alpha) \left[\left(1 + \frac{z_s}{z_p}\right) \tan\alpha - \tan\alpha_{ap} \right] = z_s(\tan\alpha_{ap} - \tan\alpha) \left[\left(1 + \frac{z_p}{z_s}\right) \tan\alpha - \tan\alpha_{as} \right] & z_p > z_s \\ z_s(\tan\alpha_{as} - \tan\alpha) \left[\left(1 + \frac{z_s}{z_p}\right) \tan\alpha - \tan\alpha_{ap} \right] = z_p(\tan\alpha_{ap} - \tan\alpha) \left[\left(1 + \frac{z_p}{z_s}\right) \tan\alpha - \tan\alpha_{as} \right] & z_p \leq z_s \end{cases} \quad (15)$$

2.2.6 重合度约束条件

中心轮与行星轮啮合副的重合度 ϵ_{sp} 以及行星轮与齿圈啮合副的重合度 ϵ_{rp} 约束条件分别如下:

$$\begin{cases} 5.0 \geq \epsilon_{sp} > 2.0 \\ 5.0 \geq \epsilon_{rp} > 2.0 \end{cases} \quad (16)$$

2.2.7 变位系数约束

为了保证多目标优化有解并提高优化效率,需要根据实际情况对变位系数设计变量上下限进行约束,公式如下:

$$\begin{cases} 0.5 \geq x_s \geq h_a^* - \frac{z_s \sin^2 \alpha}{2} \\ 0.5 \geq x_p \geq h_a^* - \frac{z_p \sin^2 \alpha}{2} \\ 0.5 \geq x_r \geq h_a^* - \frac{z_r \sin^2 \alpha}{2} \end{cases} \quad (17)$$

2.2.8 传动比误差

考虑到行星齿轮系质量和效率优化目标过程中,传动比会出现变化区间,需对传动比进行误差约束,约束条件如下:

$$\frac{|z_r + z_s - 4.0945z_s|}{4.0945z_s} \times 100\% \leq 5\% \quad (18)$$

由于公式较多,式(6)~式(18)中各参数的物理意义均可参考标准 HB/Z89.1-85。

3 区间优化结果

3.1 区间占优分析

在区间规划中,区间数序关系表示一个区间优化优于另一个区间,用于区间数的排序。用排序关系小于等于 M, R 比较式(3)和式(4)中的目标函数,需要目标函数具有最小的中值点和半径。

对质量最小化目标函数式(3)进行含有不确定性区间参数处理,故式(3)可以转化为如下的多

目标优化问题:

$$\min \{M[f_1(\mathbf{X}, \rho)], R[f_1(\mathbf{X}, \rho)]\} \quad (19)$$

式中 $M[f_1(\mathbf{X}, \rho)]$ 和 $R[f_1(\mathbf{X}, \rho)]$ 的计算公式如下:

$$M[f_1(\mathbf{X}, \rho)] = \frac{f_1^l(\mathbf{X}) + f_1^r(\mathbf{X})}{2} S \quad (20a)$$

$$R[f_1(\mathbf{X}, \rho)] = \frac{f_1^r(\mathbf{X}) - f_1^l(\mathbf{X})}{2} \quad (20b)$$

式(20a)相当于优化不确定性目标函数的平均值,式(20b)相当于优化目标函数的偏差。

通过优化式(20b)可降低目标函数对不确定因素的敏感性,从而保证目标函数设计的鲁棒性。对于任一设计变量 $\mathbf{X}$, 目标函数 σ 的上下界 $f_1^l(\mathbf{X})$ 、 $f_1^r(\mathbf{X})$ 下式确定:

$$\begin{cases} f_1^l(\mathbf{X}) = \min_{\rho \in \Gamma} f_1(\mathbf{X}, \rho) \\ f_1^r(\mathbf{X}) = \max_{\rho \in \Gamma} f_1(\mathbf{X}, \rho) \\ \rho \in \Gamma = \{\rho | \rho^l \leq \rho \leq \rho^r\} \end{cases} \quad (21)$$

如果对任一设计变量 $\mathbf{X}$, 都用上述优化过程来求取目标参数区间的上下边界,会造成优化的嵌套。

3.2 区间分析

为了提高优化效率,采用区间分析法来快速求解不确定性目标函数的区间。

同样对质量目标函数不确定参数密度 ρ 进行区间参数确定性描述。密度区间参数 ρ^i 通过中值点与半径可以写成如下形式:

$$\begin{cases} \rho^i = [\rho^l, \rho^r] = [\rho^c - \rho^w, \rho^c + \rho^w] = \rho^c + \delta\rho \\ \delta\rho \in [-1 \quad 1]\rho^w \\ \rho^c = \frac{\rho^l + \rho^r}{2} \\ \rho^w = \frac{\rho^r - \rho^l}{2} \end{cases} \quad (22)$$

式中 ρ^c, ρ^w 为区间数的中值点和半径。

不确定参数 ρ 可以写成

$$\rho = \rho^c + \delta \rho$$

(23)

将目标函数在有界不确定区间参数的中值点 ρ^c 附近进行泰勒展开并保留 1 次项,有

$$f_1(\mathbf{X}, \rho) = f(\mathbf{X}, \rho^c + \delta \rho) \approx f_1(\mathbf{X}, \rho^c) + \frac{\partial f_1(\mathbf{X}, \rho^c)}{\partial \rho} \delta \rho$$

(24)

$$\begin{cases} f_1^i(\mathbf{X}) = \min_{\rho \in \Gamma} f_1(\mathbf{X}, \rho) = f_1(\mathbf{X}, \rho^c) - \left| \frac{\partial f_1(\mathbf{X}, \rho^c)}{\partial \rho} \right| \rho^w \\ f_1^r(\mathbf{X}) = \max_{\rho \in \Gamma} f_1(\mathbf{X}, \rho) = f_1(\mathbf{X}, \rho^c) + \left| \frac{\partial f_1(\mathbf{X}, \rho^c)}{\partial \rho} \right| \rho^w \end{cases}$$

(26)

式中 $f_1(\mathbf{X}, \rho^c)$ 即为目标函数在 $(\mathbf{X}, \rho^c)$ 的值,目标函数关于不确定性参数的微分可以通过中心差分法来得到近似值。

根据式(26)则式(19)可以写作为

$$\begin{cases} M[f_1(\mathbf{X}, \rho)] = \frac{\min_{\rho \in \Gamma} f_1(\mathbf{X}, \rho) + \max_{\rho \in \Gamma} f_1(\mathbf{X}, \rho)}{2} = f_1(\mathbf{X}, \rho^c) \\ R[f_1(\mathbf{X}, \rho)] = \frac{\max_{\rho \in \Gamma} f_1(\mathbf{X}, \rho) - \min_{\rho \in \Gamma} f_1(\mathbf{X}, \rho)}{2} = \left| \frac{\partial f_1(\mathbf{X}, \rho^c)}{\partial \rho} \right| \rho^w \end{cases}$$

(27)

对于不确定参数的效率目标函数同样采用上述区间分析方法进行处理,有效提高优化效率。

3.3 区间优化过程及结果

权系数 C_i 求取方法流程图见图 2 所示。

在求得质量和效率目标函数的权系数 C_i 后,采用统一目标加权法结合区间四则运算将多目标

根据自然区间扩展可以得到目标函数的区间如下:

$$f_1(\mathbf{X}) = f_1(\mathbf{X}, \rho^c) + \frac{\partial f_1(\mathbf{X}, \rho^c)}{\partial \rho} \delta \rho$$

(25)

因此,目标函数的上下界为

(26)

优化问题化为含有区间参数的单目标优化问题。根据式(19)和式(26),设置设计变量的初始值和区间范围,利用 Fmincon 函数求得目标函数式(3)和式(4)的权系数,含不确定区间参数的多目标分层优化法如图 3 所示。

设计变量的初始值和区间上下限对 Fmincon 函数优化的结果影响较大,设计变量的初始值与上下限如表 1 所示。

需对表 1 中模数 m 和中心轮齿数 z 。圆整处理,进行目标函数最优区间及约束函数验证。

直升机主减速器行星齿轮系区间多目标优化结果如表 2 所示。表中, W_1 和 W_2 为各目标函数比例分配系数。

3.4 优化前后结果对比

优化前直升机主减速器行星轮系的质量、体积均为确定值,区间多目标优化后行星齿轮系的质量、体积和效率均是最优区间,优化前后的结果不能直接进行比较,需要忽略目标函数中的不确定参数,使用确定参数代替。表 3 通过确定参数以齿轮系密度 $\rho = 8.0 \text{ g/cm}^3$ 和啮合摩擦因素 $\mu_m = 0.03$ 进行比较。

从表 3 可以看出优化后行星齿轮系相对优化前的体积降低约 6.2%;轮系传动效率提高约 2.14%;齿轮系强度方面,从表 4 可以看出,在相同的工况载荷下,齿面接触强度和弯曲强度提高

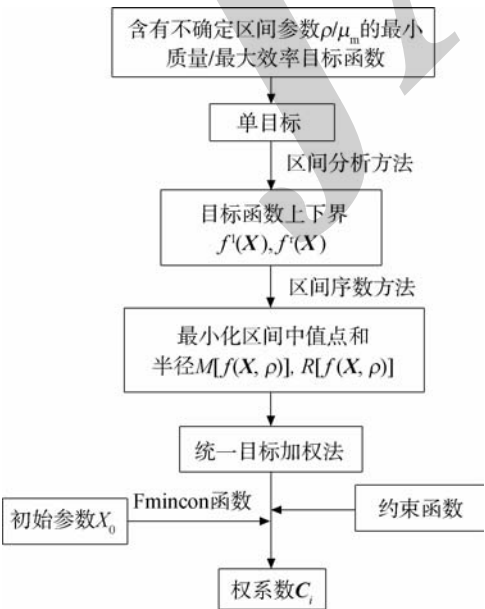


图 2 含有不确定区间参数的权系数求解

Fig. 2 Solution of weight coefficients with uncertain interval parameters

约 2.2%~3.5%；抗胶合疲劳能力略有所下降，但是考虑到重合度变大内外啮合计算胶合温度离许用胶合温度相差较大，认为满足胶合疲劳强度。

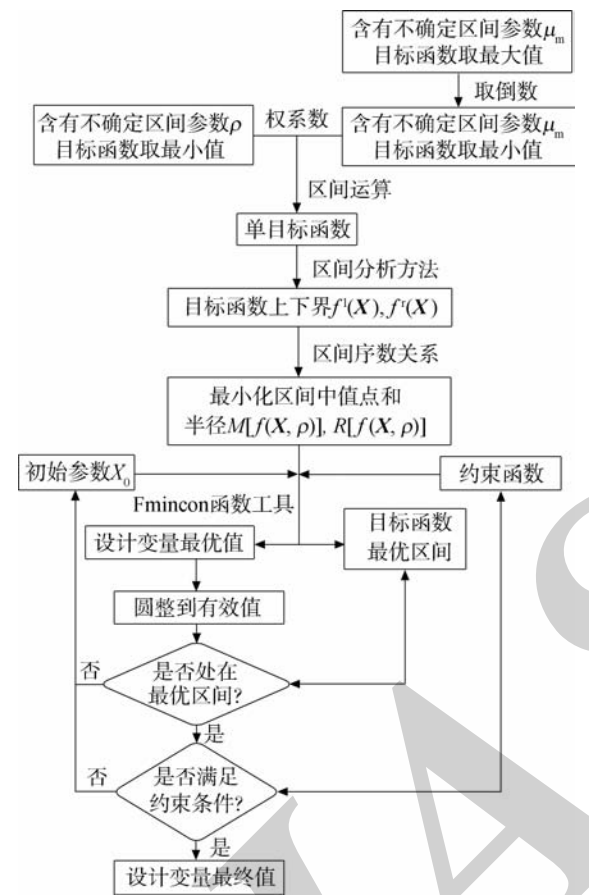


图 3 不确定区间参数的多目标分层优化法
Fig. 3 Multi-objective hierarchical optimization method for uncertain interval parameters

表 1 设计变量初始值区间及优化结果
Table 1 Initial values of the design variables and the optimization results

参数	初始值	上限	下限	优化值	处理值
m/mm	3	5	2	4.132	4
$z_s/\text{个}$	20	25	17	22.927	23
$\alpha/^\circ$	20	22	13	18.460	
h_a^*	1.1	1.4	1	1.302	
x_s	-0.1	0.5	-0.5	0.0529	
x_p	-0.1	0.5	-0.5	0.0108	
x_r	-0.1	0.5	-0.5	0.5	
$n/\text{个}$	3	5	3	3	3

表 2 主减速器行星轮系多目标优化结果
Table 2 Multiple objective optimization results of the main reducer

W_1	W_2	质量/kg	效率/%
0.508	0.492	22.832~25.798	95.534~97.767

表 3 直升机主减速器优化前后结果对比
Table 3 Comparison of the results before and after optimization of a certain type of helicopter main reducer

参数	优化前	优化后
体积/ cm^3	2476.7	2322.9
质量/kg	19.813	18.583
效率/%	94.513	96.651

表 4 直升机主减速器优化前后约束条件结果对比
Table 4 Comparison of restriction results before and after optimization of a certain type of helicopter main reducer

参数	优化前		优化后	
	中心轮与行星轮	行星轮与内齿圈	中心轮与行星轮	行星轮与内齿圈
重合度	1.565	1.705	2.032	2.278
胶合临界温度/ $^\circ\text{C}$	175.3	153.9	181.3	165.6

参数	优化前			优化后		
	行星轮	中心轮	内齿圈	行星轮	中心轮	内齿圈
接触强度/ MPa	821.00	847.50	680.73	802.95	828.87	657.13
弯曲强度/ MPa	217.39	330.25	317.80	210.96	326.25	308.24

4 效率试验验证

4.1 试验方案设计

根据上述研究分别设计加工了两组行星轮系,如图 4 所示。一组根据优化前的参数设计加工;另一组根据区间优化后的参数设计加工。两组行星齿轮系的材料均为 20Cr2Ni4A,渗碳淬火处理,且两组行星轮系的加工工艺和安装工艺基本保持一致。效率传动试验采用了电封闭齿轮综合性能试验台如图 5 所示。

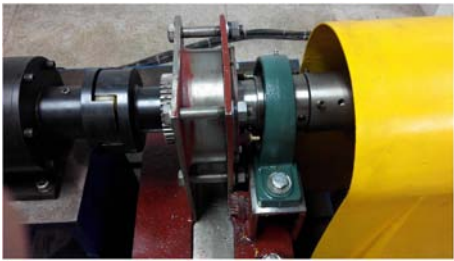


图 4 试验行星轮系

Fig. 4 Test of planetary gear trains



图 5 电封闭齿轮综合性能试验台架

Fig. 5 Test bench for the comprehensive performance of electric closed gears

传动效率计算公式为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% \tag{28}$$

电封闭齿轮试验台需要设定参数有:输入转速 n_1 (r/min), 负载扭矩 T_2 (N·m)。通过试验台可以测试的参数有:输出转速 n_2 (r/min), 输入扭矩 T_1 (N·m), 减速器油温 t_t (°C), 输入功率 P_1 (kW), 输出功率 P_2 (kW)。

试验步骤设计如下:

- 1) 输入转速数为 400、800、1200、1600、2000 r/min, 共 5 个。
- 2) 负载扭矩数为 50、100、150、200、250、300、350、400、450、500、550、600 N·m, 共 12 个。

4.2 试验结果分析

根据上面的试验方案, 记录得到了相应的传动效率值, 区间多目标优化前后的传动效率在不同工况下的曲线图分别如图 6 和图 7 所示。

通过图 6 和图 7 对比后发现: ①在相同工况下区间优化后行星轮系的传动效率比优化前的传动效率明显高出许多; ②随着负载和转速的提高, 优化后行星轮系传动效率的平稳区更高且更窄, 也就是说随着载荷波动变化, 区间优化后行星轮系的效率变化趋势更加平稳。

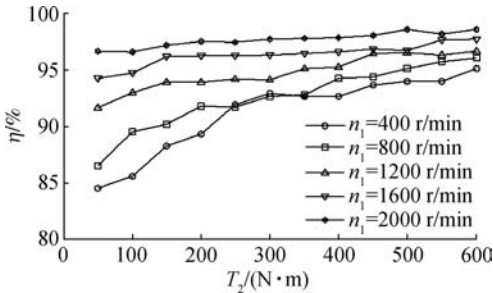


图 6 优化前行星轮系效率变化曲线

Fig. 6 Planetary gear trains efficiency curves before the optimization

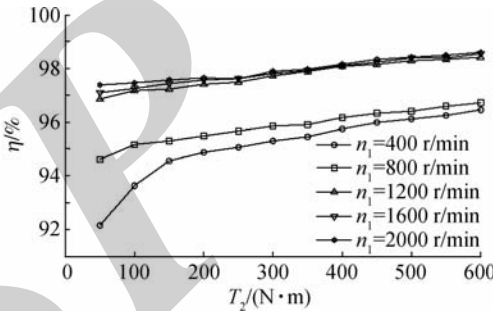


图 7 优化后行星轮系效率变化曲线

Fig. 7 Planetary gear trains efficiency curves after the optimization

5 结 论

1) 以直升机主减行星齿轮系的功质比优化为目标, 以齿轮副齿根弯曲、齿面接触及胶合疲劳校核强度、重合度、齿轮干涉以及行星轮系安装条件等作为约束条件, 建立了含有不确定参数的目标函数和约束函数。

2) 利用改进的处理含不确定区间参数的多目标分层优化方法, 得到行星齿轮系多目标函数的最优结果区间及设计变量的最优值。通过实例计算结果表明, 优化后的直升机主减速器的功质比提高, 其传动性能明显改善。

3) 通过行星轮系优化前后的效率对比试验发现, 区间优化后行星轮系的传动效率明显提高, 且随着载荷波动变化, 效率变化趋势相对更加平稳。这种传动效率特性对于直升机等航空航天类齿轮传动性能研究具有十分重要的意义。

参考文献:

[1] OBERKERAMPF W L, HELTON J C, JOSLYN C A, et al. Challenge problems: uncertainty in system response given uncertain parameters[J]. Reliability Engineering and

- System Safety, 2004, 85(1/2/3): 11-19.
- [2] ZAMAN K, RANGAVAJHALA S, MCDOALD M P. A probabilistic approach for representation of interval uncertainty[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2011, 96(1): 117-130.
- [3] 姬芬竹, 高峰, 吴志新. 纯电动汽车传动系参数的区间优化方法[J]. 农业机械学报, 2006, 37(3): 5-7.
- JI Fenzhu, GAO Feng, WU Zhixin. Interval optimization method of power train parameters in pure electric vehicles[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(3): 5-7. (in Chinese)
- [4] 王涛. 汽车悬架参数的多目标标准决策优化[J]. 农业机械学报, 2009, 40(4): 27-32.
- WANG Tao. Multi-objective and multi-criteria decision optimization of automobile suspension parameters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4): 27-32. (in Chinese)
- [5] 谢俊, 刘军, 郭晨海, 等. 汽车半主动悬架的多目标遗传优化[J]. 农业机械学报, 2003, 34(5): 28-31.
- XIE Jun, LIU Jun, GUO Chenhai, et al. Multi-objective optimization of a semi-active automobile suspension by genetic algorithms[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(5): 28-31. (in Chinese)
- [6] 王安麟, 蒋涛, 曾鹏宇, 等. 大型行星齿轮系统可靠性设计的多目标优化[J]. 中国工程机械学报, 2009, 7(3): 253-257.
- WANG Anlin, JIANG Tao, ZAN Pengyu, et al. Multi-objective optimization in reliability design for large-scale planetary gear transmission system[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2009, 7(3): 253-257. (in Chinese)
- [7] 蒋春明, 阮米庆. 汽车机械式变速器多目标可靠性优化设计[J]. 汽车工程, 2007, 29(12): 1090-1093.
- JIANG Chunming, RUAN Miqing. Multi-objective reliability optimal design of automotive mechanical transmission[J]. Automotive Engineering, 2007, 29(12): 1090-1093. (in Chinese)
- [8] 胡朝辉, 成艾国, 陈少伟. 多目标优化在新车型总体轻量化设计中的应用[J]. 中国机械工程, 2013, 24(3): 404-409.
- HU Zhaohui, CHENG Aiguo, CHEN Shaowei. Applications of multi-objective optimization to new overall lightweight design[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(3): 404-409. (in Chinese)
- [9] 徐小军, 陈循, 尚建忠, 等. 波浪补偿系统差动行星传动多目标模糊可靠性优化设计[J]. 中国机械工程, 2008, 19(4): 392-395.
- XU Xiaojun, CHEN Xun, SHANG Jianzhong, et al. Multi-objective fuzzy reliability optimal design of differential planet transmission mechanism for heave compensation system[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(4): 392-395. (in Chinese)
- [10] 刘桂萍, 韩旭, 姜潮. 基于微型多目标遗传算法的薄板冲压成形变压边力优化[J]. 中国机械工程, 2007, 18(21): 2614-2617.
- LIU Guiping, HAN Xu, JIANG Chao. Optimization of variable binder force in sheet metal forming using the micro multi-objective genetic algorithm[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(21): 2614-2617. (in Chinese)
- [11] 秦大同, 赵勇. 盾构机刀盘驱动多级行星齿轮传动系统的多目标优化[J]. 中国机械工程, 2012, 23(1): 12-17.
- QIN Datong, ZHAO Yong. Multi-objective optimization of multi-stage planetary gear train used in shield machine cutter drive[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(1): 12-17. (in Chinese)
- [12] 李方义, 李光耀, 郑刚. 基于区间的不确定多目标优化方法研究[J]. 固体力学学报, 2010, 31(1): 86-93.
- LI Fangyi, LI Guangyao, ZHENG Gang. Uncertain multi-objective optimization method based on interval[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2010, 31(1): 86-93. (in Chinese)
- [13] 李新兰, 姜潮, 韩旭. 基于区间的不确定多目标优化方法及应用[J]. 中国机械工程, 2011, 22(9): 100-105.
- LI Xinlan, JIANG Chao, HAN Xu. An uncertain multi-objective optimization based on interval analysis and its application[J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(9): 100-105. (in Chinese)
- [14] 刘润波, 刘国荣, 王迎旭, 等. 基于区间分析无迹粒子滤波的移动机器人 SLAM 方法[J]. 农业机械学报, 2012, 43(10): 155-160.
- LIU Dongbo, LIU Guorong, WANG Yingxu, et al. Slam method for mobile robot based on interval analysis unscented particle filter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 155-160. (in Chinese)
- [15] 邱志平, 王靖. 不确定参数结构特征值问题的概率统计方法和区间分析方法的比较[J]. 航空学报, 2007, 28(3): 590-592.
- QIU Zhiping, WANG Jing. Comparison of probabilistic statistical method and interval analysis method for eigenvalue problem of structure system with uncertain parameters[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(3): 590-592. (in Chinese)
- [16] 朱绪胜, 郑联语. 基于关键装配特性的大型零部件最佳装配姿态多目标优化算法[J]. 航空学报, 2012, 33(9): 1726-1736.
- ZHU Xusheng, ZHENG Lianyu. Multiple-objective optimization algorithm based on key assembly characteristics to posture best fit for large component assembly[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(9): 1726-1736. (in Chinese)
- [17] 孙伟, 张呈林. 直升机桨叶气动外形多目标优化设计[J]. 航空动力学报, 2011, 26(7): 1608-1614.
- SUN Wei, ZHANG Chenglin. Multi-objective optimization for aerodynamic shape of helicopter blade[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(7): 1608-1614. (in Chinese)
- [18] 李玥, 孙健国. 基于遗传算法的航空发动机多目标优化 PID 控制[J]. 航空动力学报, 2008, 23(1): 174-178.

LI Yue, SUN Jianguo. Multi-objective optimization of aeroengine PID control based on multi-objective genetic algorithms[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(1): 174-178. (in Chinese)

[19] 姜潮,黄新萍,韩旭,等. 含区间不确定性的结构时变可靠度分析方法[J]. 机械工程学报, 2013, 49(10): 186-193. JIANG Chao, HUANG Xinping, HAN Xu, et al. Time-dependent structural reliability analysis method with interval uncertainty[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(10): 186-193. (in Chinese)

[20] 张干清,龚宪生,王欢欢,等. 基于可靠灰色粒子群算法的盾构机行星减速器轮系的多目标优化设计[J]. 机械工程学报, 2010, 46(23): 135-145. ZHANG Ganqing, GONG Xiansheng, WANG Huanhuan, et al. Multi-objective optimization design on gear train of planetary reducer in shield tunneling machine based on reliably grey particle swarm optimization[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(23): 135-145. (in Chinese)

(编辑:叶 青)