

基于改进粒子群算法的管道动强度可靠性优化设计*

Pipe Dynamic Reliability Optimization Based on Improved Particle Swarm Algorithm

西北工业大学固体力学系 邹学锋 王安强 刘永寿 翟红波 岳珠峰

[摘要] 本文对某型飞机液压管道采用的带压缩因子的粒子群算法(PSO)进行了改进,并对其支撑位置进行动力学优化。使用映射方法来离散粒子的位置,分别利用“和声搜索”法和“飞回技术”法对粒子群算法的边界条件和约束条件进行处理,改进了粒子群算法。并有效结合有限元(FEM)和改进的粒子群算法,以管道的疲劳累积损伤可靠度为约束,以一阶固有频率最大为目标对支撑位置进行动力学优化。经过优化,提高了管道的一阶固有频率,降低了振动水平,增强了系统的抗振能力。

关键词: 改进粒子群算法 可靠度 支撑 优化

[ABSTRACT] For a certain type of aircraft hydraulic pipe, the discrete particle swarm algorithm with constriction factor is adopted to optimize the locations of supports. The particle swarm optimization is improved by using the mapping method to discrete the positions of particles, using the ‘fly-back mechanism’ technique to handle the boundary constraints and the harmony search algorithm to handle the problem-specific constraints. An interface program between the improved particle swarm optimization algorithm and ANSYS is developed. Under the constraints of reliability, the locations of the supports are optimized with the first natural frequency as the objective function. The optimized pipeline has higher first natural frequency, lower dynamic stress and better anti-vibration capability.

Keywords: Improved particle swarm optimization Reliability Support Optimization

液压管道系统是飞机的重要组成部分。据统计,管道系统故障占飞机总故障的30%以上,而这其中又以振动故障居多,尤其是强迫共振引起的危害最为严重,因此有必要对管道系统的动强度进行优化设计,使管道

避开危险的强迫共振。另外,振动疲劳断裂也是液压管道系统经常发生的故障之一,因此对管道进行优化的同时要保证管道系统的疲劳累积损伤可靠度,减少振动疲劳破坏。

粒子群算法是一种近年来发展很快的新的进化计算技术,它的提出只有十几年,却已经成为演化计算等领域的研究热点,并且已经被“国际演化计算会议”列为一个讨论的专题^[1-3]。粒子群算法由Eberhart博士和Kennedy博士^[3]提出,此算法源于对鸟群捕食的行为研究。同遗传算法一样,粒子群算法也是一种基于迭代的智能优化工具。它有着简单、易于实现、收敛速度快等优点。另外,改进的粒子群算法还能和现有的有限元有效结合,解决一些复杂的工程优化问题^[4-5]。

本文利用有限元对液压管道系统进行模态分析和随机振动分析,通过“和声搜索”法和“飞回技术”法对带压缩因子的离散粒子群优化算法进行了边界处理和约束处理,并在疲劳累积损伤可靠度约束下以一阶固有频率最大为目标对管道支撑位置进行优化设计,得到了管道支撑位置的可靠性优化设计方案。

1 疲劳可靠性分析理论

Crandall和Mark^[6]提出了基于随机振动结果的Miner方法。对于恒定应力幅,疲劳失效允许的循环次数是按材料的疲劳曲线($S-N$)进行确定。一般工程材料的 $S-N$ 曲线数学公式为:

$$NS^b = C, \quad (1)$$

式中, b 和 C 为大于零的与材料性质有关的常数。

当应力幅值不是常数时,利用Miner线性累积损伤求和公式来计算累积损伤量 D ,即:

$$D = \sum D_i = \sum \frac{N_i}{N}. \quad (2)$$

如果结构响应是一个确定的周期振动,将(1)式代入到式(2)中,可以得到:

$$D = \frac{1}{C} \sum N_i S_i^b. \quad (3)$$

假设应力是一个具有零均值的平稳过程,而且峰值

* 陕西省教育厅科学研究计划项目(2010jk593)、高等学校学科创新引智计划项目(B07050)、西工大基础研究基金(JC201238)资助。

次数 m 和应力幅值 S 相互独立,以 $D(t)$ 表示由于随机应力 $x(t)$ 在单位时间造成的疲劳损伤,则有在时间 $(0, T)$ 内累积损伤 D_T 的期望值为:

$$E[D_T(T)] = \int_0^T E[D_T(t)]dt = TE(D), \quad (4)$$

又有:

$$E[D(t)] = E\left[\frac{1}{C} \sum N_i S^b\right] = \frac{1}{C} E[m(t)] \int_{-\infty}^{+\infty} S^b f_s(S, t) dS, \quad (5)$$

将(5)代入(4)得到:

$$E[D_T(T)] = \frac{T}{C} E[m(t)] \int_{-\infty}^{+\infty} S^b f_s(S, t) dS, \quad (6)$$

式中,峰值总数期望值 $E(m)$ 可以用以正斜率与零线交差次数的期望值 n_0^+ 来代替, n_0^+ 表示 $x(t)$ 在单位时间内以正斜率通过的 $x=0$ 的平均次数,由随机过程与某一安全界限的交差次数统计理论可知:

$$E(m) = n_0^+ = \frac{\sigma_x}{2\pi\sigma_x}. \quad (7)$$

振动传递的过程中,由于各种滤波环节的作用,随机激励的带宽会大大减小,因此可以把结构应力的输出过程看出是一个窄带的随机过程。对于窄带高斯过程,其峰值概率密度函数服从瑞利分布:

$$f(S_i) = \frac{S_i}{\sigma_s^2} \exp\left(-\frac{S_i^2}{2\sigma_s^2}\right), \quad (8)$$

式中, σ_s^2 为指定点应力响应的均方差(标准差)。

将式(8)和式(7)代入式(6)即得疲劳累积损伤可靠度:

$$P = 1 - E(D) = 1 - \frac{T}{C} \frac{\sigma_x}{2\pi\sigma_x} (\sqrt{2}\sigma_s)^b \cdot \Gamma\left(1 + \frac{b}{2}\right). \quad (9)$$

2 改进粒子群算法

2.1 数学描述

粒子群算法是基于群体迭代的优化算法。在算法中,每个优化问题的潜在解都可以想象成 H 维搜索空间上的一个点,即粒子;粒子群的搜索区域对应设计变量的变化范围,每粒子对应设计空间的一个可行解。

粒子群优化算法先随机初始化一群粒子,然后进行迭代来寻求最优解,每一次迭代过程中,粒子群存在 2 个极值,个体极值 pbest (粒子本身找到的最优解) 和群体极值 gbest (整个群体目前找到的最优解),粒子通过跟踪 2 个极值来更新自己,同时通过跟踪来实现与其他粒子间的信息传递。其示意图如图 1 所示。

设搜索空间为 H 维,总粒子数为 n ,第 i 个粒子的

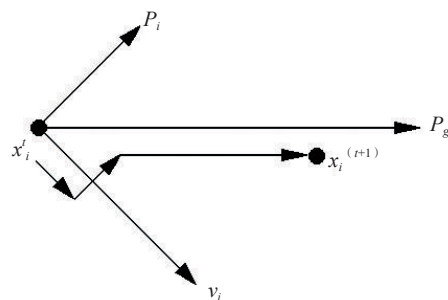


图1 粒子飞行原理图

Fig.1 Fly theory of particle

位置 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$, 第 i 个粒子的历史最优位置(个体极值) $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id})$, 所有粒子的最优位置(全局极值) $P_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gd})$, 第 i 个粒子的变化速度为 $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$ 。

为了有效控制粒子的飞行速度使算法达到全局与局部的探测和局部搜索两者间的平衡,经常采用带压缩因子的粒子群算法^[7],粒子按照下列公式进行速度和位置的更新:

$$V_{id}^{(t+1)} = \phi\{w \cdot v_{id}^t + c_1 r_1 (p_{id}^t - x_{id}^t) + c_2 r_2 (p_{gd}^t - x_{id}^t)\}, \quad (10)$$

$$x_{id}^{(t+1)} = x_{id}^t + v_{id}^{(t+1)}, \quad (11)$$

$$\phi = \frac{2}{|2 - C - \sqrt{C^2 - 4C}|}, C = c_1 + c_2, \quad (12)$$

式中, c_1 和 c_2 为学习因子,取正常数; r_1 和 r_2 为均匀分布于 $[0, 1]$ 之间的随机数; n 和 H 分别是粒子数和维数; i 的取值范围为 $1 \leq i \leq n$; d 的取值范围为 $1 \leq d \leq H$; w 为惯性权重。另外,设定粒子变化速度上限为 V_{\max} 。

为了在前期提高算法的全局搜索能力,而后期增强算法的局部搜索能力,发展出了带控制因子的非线性递减惯性权重策略^[8],其计算公式为:

$$w_t = (w_{\max} - w_{\min} - d_1) \exp\left(\frac{1}{1 + d_2 t / t_{\max}}\right), \quad (13)$$

式中, w_{\max} 和 w_{\min} 分别表示 w 的最大值和最小值, d_1 、 d_2 为控制因子。大量实验证明, $d_1=0.2$ 和 $d_2=0.7$ 时能使算法的性能大大提高。

2.2 边界条件的处理

利用“和声搜索”^[9]的局部优化算法来对飞出边界的粒子进行处理,当第 i 个粒子的第 d 维超出边界时,该粒子在第 d 维上的取值用粒子向量群中所有第 d 维分量中随机选取一个分量来代替。即 $x_{id} < x_{id \min}$ 或 $x_{id} > x_{id \max}$ 时,

$$x_{id} = p_t^b, t = \text{int}[r \text{ and } (0, n)], \quad (14)$$

式中, n 为粒子总数。

2.3 约束条件的处理

传统的处理约束问题的方法是罚函数法,它能够处理一般的约束问题,但求解的时候可能会随着迭代点向最优解靠近而使无约束函数失效,而且罚因子的取值还直接影响迭代计算的收敛性。

“飞回技术”^[10]的原理就是当粒子违背约束条件时,强迫粒子飞回原来的位置,重新进行下一次迭代搜索。此方法很适合粒子群算法使用,由于粒子的“认知”特性和“社会”特性,粒子会在下一次搜索时以一个更加合适的速度进行飞行搜索。

2.4 算法流程

- (1) 随机初始化粒子速度 V_i 和位置 X_i ;
- (2) 计算粒子的适应值 f_i ;
- (3) 得到个体极值 P_i 和全局极值 P_g ;
- (4) 根据公式(10)和(11)更新 V_i 和 X_i ;
- (5) 检验 X_i 是否满足边界条件: 是,则进行下一步,否则利用式(14)对其进行取值;
- (6) 计算约束值: 若满足约束条件,则进行下一步,否则,返回原来位置,跳回步骤(4)重新进行迭代计算;
- (7) 计算适应值 f_i ,更新个体极值 P_i 和全局极值 P_g ;
- (8) 判断是否达到收敛准则(达到预设条件或最大迭代步数): 是则结束,输出优化结果,否则返回步骤(4)继续进行迭代。

3 优化模型

某型飞机液压管道系统实体及有限元模型如图2和图3所示。

管道材料为普通钢,其密度 $\rho_{管}=7800\text{kg/m}^3$,泊松比 $\nu=0.3$,弹性模量 $k_{管}=210\text{GPa}$; 管道的内径 $R=10\text{mm}$,壁厚 $\delta=1\text{mm}$; 管内流体密度 $\rho_{液}=808\text{kg/m}^3$; 管道的内压为 21MPa ; 支撑刚度 $k=1\text{e}7\text{N/m}$; 4段直管划分的节点数分别为 100、200、100、100。

建立粒子群算法的优化模型,以4个支撑节点位置作为设计变量。将它们看做是粒子 a 的4个维度,分别

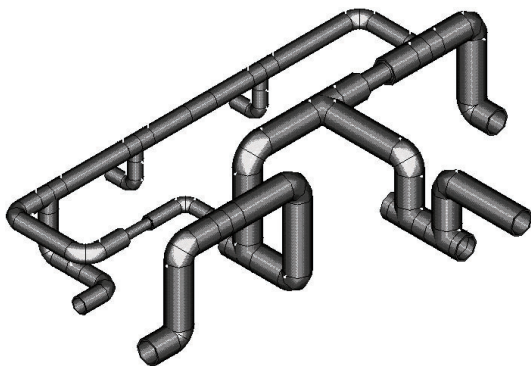


图2 某型飞机液压管道系统实体图
Fig.2 Solid figure of aircraft hydraulic pipe

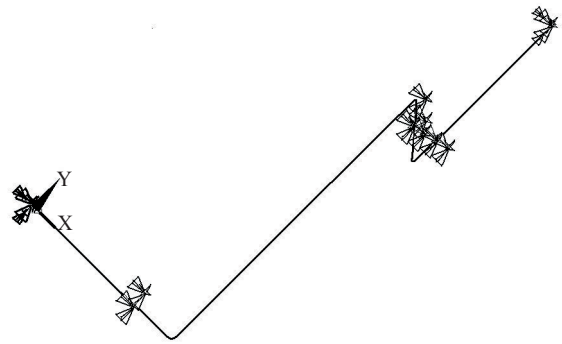


图3 管道有限元模型
Fig.3 Finite element model of pipe

表示为 $x(a,1), x(a,2), x(a,3), x(a,4)$ 。由于弹簧支撑只能加在节点上,支撑位置可用节点编号来表示,粒子每一个维度上的边界条件分别为 $0 \leq x(a,1) \leq 100, 101 \leq x(a,2) \leq 300, 301 \leq x(a,3) \leq 400, 401 \leq x(a,4) \leq 500$ 。

由于节点编号是连续的整数,所以必须采用离散的粒子群优化算法,通常采用映射函数法,对设计变量进行离散处理,本文将式(11)变为:

$$x_{id}^{(t+1)} = \text{int} [x_{id}^t + v_{id}^{(t+1)}] \quad (15)$$

另外,本文以管道的疲劳累积可靠度作为约束对象,在对支撑位置进行优化的同时,需要对管道系统的可靠度进行计算,已知在确定时间 T (10000个飞行小时,即 $3.6\text{e}7$ 秒)内,该管材料的 $S-N$ 曲线如图4所示。

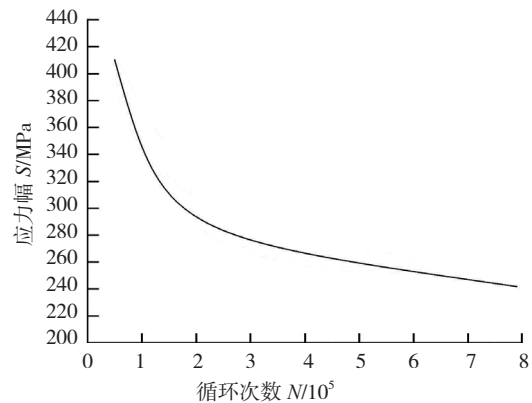


图4 本文所用管材料的疲劳曲线
Fig.4 S-N curve of material for pipe

经拟合可以得到, $k=0.5\text{e}-18, b=5.2$ 。为了保证管道的疲劳累积可靠度 p 在 0.99 以上,本文采用“飞回技术”对可靠度约束进行处理。

将管道的一阶固有频率 f 作为粒子群算法的优化目标,从而使一阶固有频率的最大值跳出随机激励的频率范围,从而避开共振区域,降低振动水平。

4 优化结果

粒子数目取 $a=20$,进行随机振动分析时使用速度谱,频率范围为0.1~300Hz,激励方向为 Y 方向,程序首先随机初始化粒子种群可粒子速度,然后通过式(10)和(15)进行迭代计算,自变量 $x(a,1),x(a,2),x(a,3),x(a,4)$ 以及优化目标 f 的优化历程曲线分别如图5和图6所示。

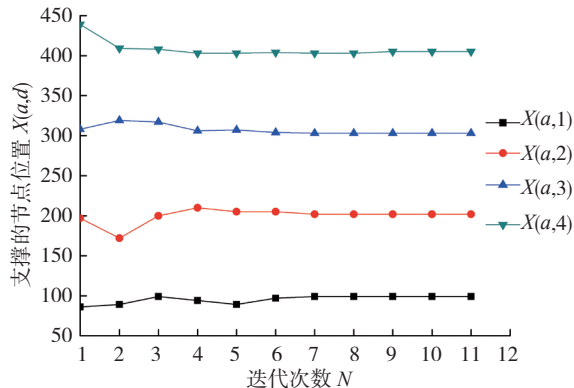


图5 支撑节点位置的优化历程曲线

Fig.5 Optimized curves of supports' node location

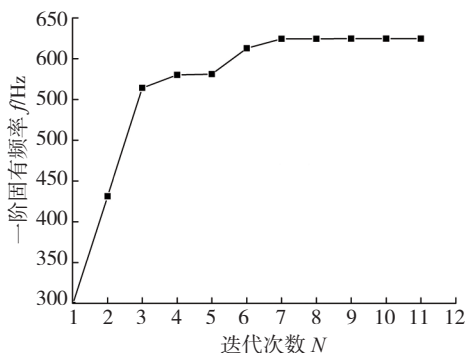


图6 一阶固有频率的优化历程曲线

Fig.6 Optimized curve of first natural frequency

粒子群算法在第8步的时候能够收敛到最优解。如表1所示,此时支撑所在的节点位置分别为, $x(a,1)=99, x(a,2)=202, x(a,3)=303, x(a,4)=405$ 。系统的疲劳损伤累积可靠度为0.9953673,最优解 $f=624.5569\text{Hz}$,这个频率跳出了随机激励的频率范围,因此系统能够有效避免共振的发生。

表1 优化前后各变化量的比较

	自变量 $x(a,1)$	自变量 $x(a,2)$	自变量 $x(a,3)$	自变量 $x(a,4)$	一阶固有 频率 f/Hz
优化前	86	197	308	439	297.7392
优化后	99	202	303	405	624.5569

5 结论

本文结合有限元和改进粒子群优化方法,在疲劳累

积损伤可靠度不低于0.99的约束下,以一阶固有频率最大为目标,对飞机液压管道进行支撑动力学优化。研究表明,粒子群算法对于管道支撑动力学优化是合理、有效的。通过支撑位置的合理优化,可以在保证系统疲劳可靠度的同时提高一阶固有频率,降低管道振动,增强结构抗振能力,为以后的工程实践提供指导作用。

参考文献

- [1] Lee K Y, El-Sharkawi M A. Modern heuristic optimization techniques with applications to power systems. IEEE Power Engineering Society, 2002,2: 45-51.
- [2] Van den Bergh F, Engelbrecht A P. A new locally convergent particle swarm optimizer. IEEE Conference on Systems, 2002, 3: 94-99.
- [3] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization. In IEEE International Conference on Neural Networks, 1995,4: 1942-1948.
- [4] 邱晔,牟伟强,魏生民,等.基于层次分析法与粒子群算法的飞机装配公差多目标优化.航空制造技术,2010(16): 66-69.
- [5] 孙光永,李光耀,陈涛,等.多目标粒子群优化算法在薄板冲压成形中的应用.机械工程学报,2009,45(5): 153-159.
- [6] Crandall S H, Mark W D. Random vibration in mechanical systems. New York:Academic Press, 1963.
- [7] Clerc M, Eberhart R. Particle swarm explosion stability and convergence in multidimensional complex space. IEEE Transactions On Evolutionary Computation, 2002, 6(1): 58-88.
- [8] 李丽,牛奔.粒子群优化算法.北京:冶金工业出版社,2009.
- [9] 高立群,葛延峰,孔芝,等.自适应和声粒子群搜索算法.控制与决策,2010,25(7): 1101-1104.
- [10] He S, Prempain, Wu Q H. An improved particle swarm optimizer for mechanical design optimization problems. Engineering Optimization, 2004, 36(5): 585-605.

(责编 深蓝)

(上接第83页)

常高10~20℃。

(5)在一定范围内特征点峰值温度随 ω/v 比值的增加而变大; ω/v 比值的减小而减小。

参考文献

- [1] Thomas W M, Nicholas E D, Needham J C, et al. Friction stir butt welding: U.S, NO.5460317[P].1995-24.
- [2] 苏晓莉,王快社,周俊杰,等.铝合金搅拌摩擦焊接参数对温度场的影响.轻合金加工技术,2006,34(2):40-42.
- [3] 徐伟锋,刘金合,栾国红,等.厚板铝合金搅拌摩擦焊接温度场的检测与分析.机械科学与技术,2008,27(9):1159-1162.
- [4] 苏晓莉,王快社,周俊杰.铝合金搅拌摩擦焊接温度场检测.焊接技术,2006,28(1):12-14.
- [5] Schmidt H, Hattel J, Wert J. An analytical model for the heat generation in friction stir welding. Modeling and Simulation in Materials and Engineering,2004(12):143-151.

(责编 亦非)