

DOI: 10.7511/jslx20230509001

基于可靠度的桥梁结构动力优化设计

黄海新^{*1}, 吕亚伦¹, 程寿山²

(1. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401; 2. 交通运输部公路科学研究所
桥梁结构安全技术国家工程实验室(北京), 北京 100080)

摘要: 针对桥梁结构所受动荷载具有不确定性的问题, 基于模态叠加法推导了动力响应的数字特征, 利用一次二阶矩法建立结构的动应力可靠度约束函数, 并对其进行显式化处理, 分别建立了以频率、动位移和动应力可靠度为约束的动力优化设计数学模型, 并基于 Matlab 平台编制了相应的优化程序。算例测试结果表明, 动力优化准则法、粒子群算法和灰狼算法均能在同时满足动力性能和应力可靠度约束条件下使结构整体质量目标函数获得最优值, 其中 PSO 收敛性和稳定性好, DOC 迭代次数少, 且优化后构件可靠度相较于传统动力优化设计提升超过 70%。同时发现, 为确保面临较大不确定性时结构的可靠度指标不降低, 结构优化后的质量会随着荷载幅值变异系数的增大而有所增加。本文方法可为桥梁结构受外界随机激励下的动力优化设计问题提供理论指导。

关键词: 结构动力优化设计; 动力特性; 动力响应; 桥梁结构; 结构可靠度

中图分类号: O224; O313

文献标志码: A

文章编号: 1007-4708(2024)06-0998-07

1 引言

桥梁结构在服役期间常受到动荷载作用, 为保证桥梁结构的安全性和可靠性, 对桥梁结构的动力性能进行优化设计是十分必要的。然而在工程中, 结构所受外部荷载和物理参数等都存在一定的不确定性, 使得传统动力优化设计^[1-4]对工程结构难以获得合理的优化结果。为充分考虑这种不确定性对结构安全性造成的影响^[5,6], 研究者将可靠度理论融入结构动力优化设计中, 使得设计结果也更贴近工程实际。

陈建军等^[7]基于概率论建立了具有频率可靠度约束的结构动力优化模型, 对桁架和简支梁进行了基于可靠度的动力优化。Mishra 等^[8]以结构动力可靠度最小化为目标建立优化模型, 选取隔震结构进行了物理参数优化。Hu 等^[9]开展了随机激励和随机参数工况下的结构动力可靠度优化, 其将动力可靠度分析和确定性结构优化解耦进行, 提升了优化效率。文献^[10,11]基于概率密度演化理论和直接概率积分对 TMD 结构的层间位移响应可

靠度进行分析, 并以位移响应可靠度为约束优化了 TMD 参数。李小兰^[12]采用直接概率积分法得到结构静动力响应的可靠度, 进而对框架结构进行了基于静动力可靠度约束的结构优化设计。Al-Sanad 等^[13]针对随机风荷载作用下的风力机塔架结构, 结合响应面法和一次二阶矩法建立了结构的可靠度约束模型, 并通过 GA 算法对结构进行了最小重量化设计。综上, 基于可靠度的结构动力优化设计研究目前主要局限于仅对动力特性或动力响应某一可靠度进行优化, 难以同时对结构自身免谐振和外部激励下结构响应不超标要求的有效兼顾。

为此, 本文将结构动力特性与结构动力响应可靠度同时考虑, 建立基于概率的动力可靠度优化设计模型, 实现结构动力特性调控和限制结构响应的双重目标, 使结构优化设计更为实际与合理。优化模型由于同时涉及到结构动力特性分析、动力响应分析和优化设计方法, 并且可靠度约束都是关于设计变量的隐式复合函数, 带来的问题是求解更为困难和复杂。鉴于此, 本文首先对结构可靠度约束进行显式化处理, 同时引入智能算法, 并通过算例对

收稿日期: 2023-05-09; 修改稿收到日期: 2023-07-21.

基金项目: 天津市交通运输科技发展计划(2021-29, 2023-48); 桥梁结构安全技术国家工程实验室开放课题(2019-GJKFKT; 2021-GJKFKT)资助项目.

作者简介: 黄海新^{*}(1976-), 男, 博士, 教授(E-mail: hhxhebut@126.com).

引用本文: 黄海新, 吕亚伦, 程寿山. 基于可靠度的桥梁结构动力优化设计[J]. 计算力学学报, 2024, 41(6): 998-1004.

HUANG Hai-xin, LÜ Ya-lun, CHENG Shou-shan. Dynamic optimization design of bridge structures based on reliability [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2024, 41(6): 998-1004.

优化结果及选用算法的稳定性和收敛性进行检验,最终实现了同时满足动力约束和可靠度约束的结构最小质量优化设计。

2 可靠度约束数学模型

2.1 可靠度约束的显式表达

在结构动力响应可靠度的求解过程中,无论是动位移还是动应力都是关于设计变量的隐式复合函数形式,使得优化问题变得较为复杂。为此,本文对结构动力响应可靠度约束作显式化处理。

设可靠度约束表达式为

$$P^* - \text{Pr ob}\{R - S \geq 0\} \leq 0 \quad (1)$$

式中 P^* 为给定的界限可靠度, R 和 S 分别为结构的抗力和荷载效应。

假定结构抗力 R 和荷载效应 S 均服从正态分布,则结构的功能函数 $Z = R - S$ 同样也服从正态分布,由可靠度分析的一次二阶矩方法^[14],可以将式(1)简化为

$$\beta^* - \beta = \beta^* - \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \leq 0 \quad (2)$$

式中 $\beta^* = \Phi^{-1}(P^*)$ 即为给定的可靠度指标。

由式(2)可知,通过一次二阶矩的方法将可靠度的概率约束转化为对可靠度指标的约束,只需要求得结构动力响应的均值和方差即可得到可靠度约束的显式表达,对动力优化过程及灵敏度信息的获取大幅度减少了计算量。

2.2 动力响应数字特征的推导

由 2.1 节可知,为得到结构的可靠度显式约束函数,需要求得结构响应的均值和方差,因此,本节在模态叠加法的基础上,推导动力响应的数字特征。

2.2.1 动位移的数字特征

假定结构所受荷载幅值 F_p 为随机变量且服从正态分布,当结构中存在服从其他分布的随机变量时,可用 JC 法的当量正态化将其转化为正态分布随机变量。以模态叠加法为基础,利用概率统计中计算随机变量数字特征的矩法,可得结构位移响应的均值和方差分别为

$$\{\mu_{u(t)}\} = \sum_{n=1}^N \{\phi\}_n \mu_{q_n(t)} \quad (3)$$

$$\{\sigma_{u(t)}^2\} = \sum_{n=1}^N \{\phi^2\}_n \sigma_{q_n(t)}^2 \quad (4)$$

式中 $\{\phi\}_n$ 为结构振型, $\mu_{q_n(t)}$ 和 $\sigma_{q_n(t)}^2$ 分别为结构振型坐标的均值和方差,其值可表示为

$$\mu_{q_n(t)} = \frac{1}{M_n \omega_{Dn}} \int_0^t \mu_{P_n(\tau)} e^{-\zeta_n \omega_n (t-\tau)} \cdot \sin[\omega_{Dn} (t-\tau)] d\tau \quad (5)$$

$$\sigma_{q_n(t)}^2 = \left\{ \frac{1}{M_n \omega_{Dn}} \int_0^t \sigma_{P_n(\tau)} e^{-\zeta_n \omega_n (t-\tau)} \cdot \sin[\omega_{Dn} (t-\tau)] d\tau \right\}^2 \quad (6)$$

式中 M_n 和 ω_n 分别为结构第 n 阶振型质量和自振频率, $P_n(t)$ 为结构所受振型荷载, ζ_n 为阻尼比,其中 $\omega_{Dn} = \omega_n \sqrt{1 - \zeta_n^2}$ 。

2.2.2 动应力的数字特征

同样,采用计算数字特征的矩法可得到结构动应力的均值和方差为

$$\{\mu_{\sigma(t)}\}^e = E[B] \{\mu_{u(t)}\}^e \quad (7)$$

$$\{\sigma_{\sigma(t)}^2\}^e = E[B] \{\sigma_{u(t)}^2\}^e \quad (8)$$

将上述所得结构动位移和动应力的均值和方差代入式(2),可建立动力优化的可靠度约束函数。

3 基于可靠度的结构动力优化数学模型

3.1 频率和动应力可靠度约束下的数学模型

根据可靠度约束的显式化处理,建立频率和动应力可靠度约束下的动力优化设计数学模型为

$$\text{求 } \mathbf{A}_n = [A_1 \quad A_2 \quad \cdots \quad A_n]$$

$$\min W = \sum_{n=1}^M W_n(A_n)$$

$$\text{s.t. } \omega_n < \omega^u \text{ 或 } \omega_n > \omega^l \quad (9)$$

$$\beta_\sigma^* - \frac{\mu_{\sigma^*} - \mu_{\sigma_{\max}(t)}}{\sqrt{\sigma_{\sigma^*}^2 + \sigma_{\sigma_{\max}(t)}^2}} \leq 0$$

$$A_n^l < A_n < A_n^u$$

式中 A_n 为设计变量, $W_n(A_n)$ 为目标函数, ω^u 和 ω^l 分别为固有频率的上限和下限, A_n^u 和 A_n^l 分别为设计变量的上下界, β_σ^* 为结构屈服应力的可靠度指标, μ_{σ^*} 和 $\sigma_{\sigma^*}^2$ 分别为结构屈服应力的均值和方差, $\mu_{\sigma_{\max}(t)}$ 和 $\sigma_{\sigma_{\max}(t)}^2$ 分别为最大动应力响应值的均值和方差。

在建立基于可靠度的动力优化数学模型之后,即可利用优化算法进行迭代优化,进而得到符合约束条件的设计变量和最优目标函数值。

3.2 动位移和动应力可靠度约束下的数学模型

同理,构建动位移和动应力可靠度约束下的动力优化设计数学模型为

$$\text{求 } \mathbf{A}_n = [A_1 \quad A_2 \quad \cdots \quad A_n]$$

$$\min W = \sum_{n=1}^M W_n(A_n)$$

$$\text{s.t. } u_i < [u] \quad (10)$$

$$\beta_\sigma^* - \frac{\mu_{\sigma^*} - \mu_{\sigma_{\max}(t)}}{\sqrt{\sigma_{\sigma^*}^2 + \sigma_{\sigma_{\max}(t)}^2}} \leq 0$$

$$A_n^l < A_n < A_n^u$$

式中 u_i 为结构上某一节点处的最大动位移响应, $[u]$ 为结构允许的最大动位移。

4 优化算法

4.1 动力优化准则算法

结构动力优化设计迭代寻优过程中需多次进行结构动力特性和动力响应分析, 结构规模较大时非常耗时, 而动力优化准则法(DOC)所需重分析的次数不受结构规模的限制, 与数学规划法相比, 具有重分析次数少和收敛速度快的优点。

首先, 动力优化准则法根据已经建立的结构动力优化设计的数学模型构造拉格朗日函数

$$L = W(A_n) + \sum_{i=1}^k \alpha_i (g_i - g_i^u) - \sum_{j=1}^l \beta_j (h_j - h_j^l) - \sum_{n=1}^{BM} \xi_n (A_n - A_n^l) + \sum_{n=1}^{BM} \eta_n (A_n - A_n^u) \quad (11)$$

式中 $W(A_n)$ 为含设计变量的目标函数, 结构单元个数为 BM , α_i, β_j, ξ_n 和 η_n 为拉格朗日乘子。

根据 Kuhn-Tucker 条件^[15], 令拉格朗日函数两侧对设计变量 A_n 求导, 此处引入设计变量调节因子 S_1 ($0 < S_1 < 1$), 进而构造出第 n 个设计变量的迭代公式

$$A'_n = f_n A_n \quad (A_n^l < f_n A_n < A_n^u) \quad (12)$$

式中 A'_n 为迭代优化之后的设计变量, f_n 为设计变量的迭代修正系数, 表达式为

$$f_n = S_1 + \frac{1 - S_1}{\partial W(A_n) / \partial A_n} \cdot \left\{ - \sum_{i=1}^k \alpha_i \frac{\partial g_i}{\partial A_n} + \sum_{j=1}^l \beta_j \frac{\partial h_j}{\partial A_n} \right\} \quad (13)$$

式中 $\frac{\partial g_i}{\partial A_n}$ 和 $\frac{\partial h_j}{\partial A_n}$ 均为动力约束条件对设计变量的导数, 即梯度形式的灵敏度, 其值可由梯度法或差分法求得。

4.2 粒子群算法

粒子群算法(PSO)是 Kennedy 等^[16]受鸟类运动规律启发提出的一种群智能优化算法, 其不依赖于优化问题本身的严格的数学性质, 具有本质并行性, 适用于连续优化问题和模糊系统控制等方面, 比果蝇算法等具有较高的寻优精度。粒子群算法

假定在某一 N 维区域内存在由 m 个粒子组成的群落, 则第 i 个粒子的位置和速度向量分别为

$$\mathbf{X}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iN}) \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (14)$$

$$\mathbf{V}_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iN}) \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (15)$$

对每一个粒子赋予相应的适应度函数, 并计算粒子在当前位置的适应度值, 从而获取粒子群的个体极值和群体极值, 即可利用式(16, 17)来更新粒子个体的速度和位置, 并最终得到最优适应度函数值。

$$v_{ij}(t+1) = v_{ij}(t) + c_1 \cdot \text{rand1} \cdot [p_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + c_2 \cdot \text{rand2} \cdot [g_{ij}(t) - x_{ij}(t)] \quad (16)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (17)$$

式中 t 为粒子群的第 t 次迭代, rand1 和 rand2 为分布在 $[0, 1]$ 的随机数, c_1 和 c_2 为学习因子, 分别决定着对粒子个体极值和群体极值的继承程度。

4.3 灰狼算法

灰狼算法(GWO)是 Mirjalili 等^[17]通过研究灰狼的领导制度和狩猎行为提出的一种新的群智能算法, 其具有求解能力强、参数少和易实现等特点, 适用于求解组合优化、多约束和动态不确定等问题, 比鲸鱼算法等具有结构清晰和收敛精度高的优势。灰狼算法将狼群等级制度抽象为数学模型, 则可以将 α 狼、 β 狼和 δ 狼视为优化问题排名前三的最优解, ω 狼视为种群中的候选解。根据式(18, 19)对整个狼群中灰狼个体的位置不断更新, 并在每一次迭代之后重新排名, 最终获得最优解。

$$\begin{cases} \mathbf{X}_1 = \mathbf{X}_{\omega\alpha}(t) - \mathbf{A} \cdot \mathbf{D}_\alpha \\ \mathbf{X}_2 = \mathbf{X}_{\omega\beta}(t) - \mathbf{A} \cdot \mathbf{D}_\beta \\ \mathbf{X}_3 = \mathbf{X}_{\omega\delta}(t) - \mathbf{A} \cdot \mathbf{D}_\delta \end{cases} \quad (18)$$

$$\mathbf{X}_\omega(t+1) = (\mathbf{X}_1 + \mathbf{X}_2 + \mathbf{X}_3) / 3 \quad (19)$$

式中 $\mathbf{X}_{\omega\alpha}, \mathbf{X}_{\omega\beta}$ 和 $\mathbf{X}_{\omega\delta}$ 分别为 α 狼、 β 狼和 δ 狼的位置向量, $\mathbf{D}_\alpha, \mathbf{D}_\beta$ 和 \mathbf{D}_δ 为 α 狼、 β 狼和 δ 狼与猎物之间的距离, $\mathbf{X}_\omega(t+1)$ 为更新之后的灰狼位置向量, \mathbf{A} 和 \mathbf{C} 为两个系数向量。

5 算例分析

算例1 37杆简支桁架桥如图1所示, 桥长 $L =$

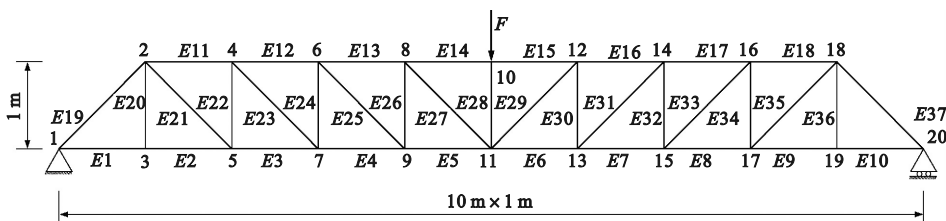


图1 简支桁架桥

Fig. 1 A simply supported truss bridge

10 m,高度 $h=1$ m,弹性模量 $E=210$ GPa,质量密度 $\rho=7800$ kg/m³。各杆件的初始截面积 $A_0=5 \times 10^{-4}$ m²,其截面积上下限为 $[1 \times 10^{-3}$ m², 2.5×10^{-4} m²]。在桁架节点 10 处作用一竖直简谐荷载 $F=F_p \sin 10t$ N,荷载幅值 F_p 和杆件屈服应力 $[\sigma]$ 均为服从正态分布的随机变量,两者均值分别为 100 kN 和 300 MPa。本算例以各杆件截面积为设计变量,要求(1)桁架结构一阶自振频率小于 24 Hz;(2)杆件 E1 的动应力可靠度大于 0.9999,对应可靠度指标 $[\beta]=3.7$ 。在满足设计要求的前提下,利用本文三种优化算法,得到结构总重量最

小化设计。

为比较传统优化设计和可靠度优化设计的不同,并探究荷载随机程度对优化结果的影响,本算例将变异系数分为三种工况,(1)变异系数 $v_{F_p}=0$,即不考虑可靠度的传统优化设计;(2)变异系数 $v_{F_p}=0.01$;(3)变异系数 $v_{F_p}=0.1$ 。

图 2~图 4 分别为 DOC、PSO 和 GWO 三种算法对三种工况下桁架桥的优化结果。可以看出,在荷载幅值变异系数分别为 0,0.01 和 0.1 三种工况下,三种算法均能在满足频率和可靠度约束下稳定收敛。其中,PSO 算法在收敛性和稳定性中都要

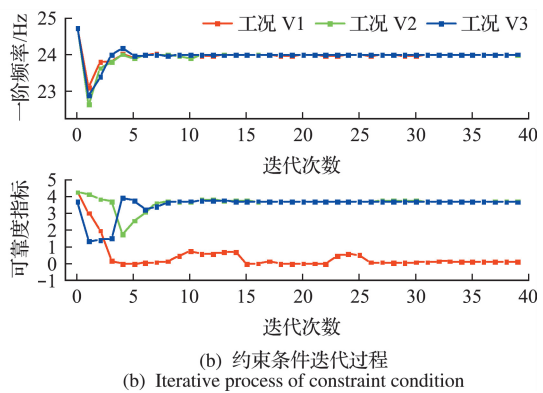
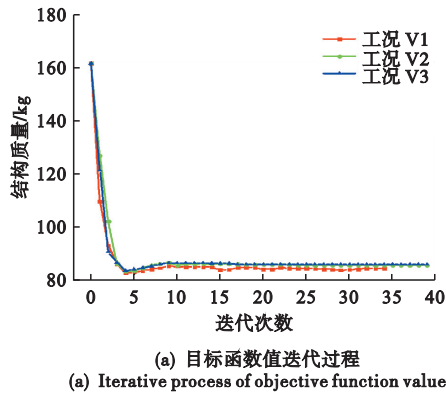


图 2 动力优化准则法迭代过程

Fig. 2 Iterative process of dynamic optimization criterion method

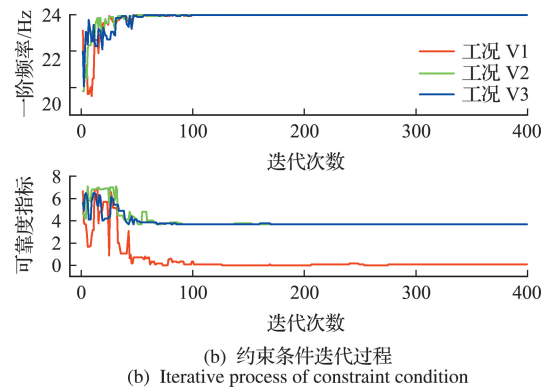
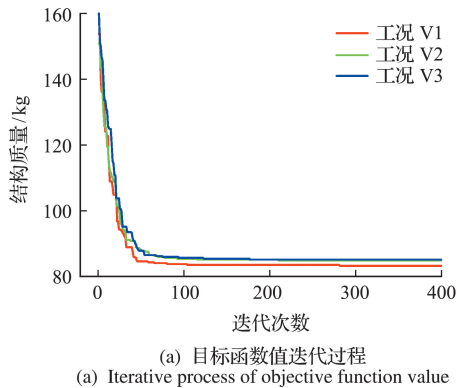


图 3 粒子群算法迭代过程

Fig. 3 Iterative process of particle swarm optimization method

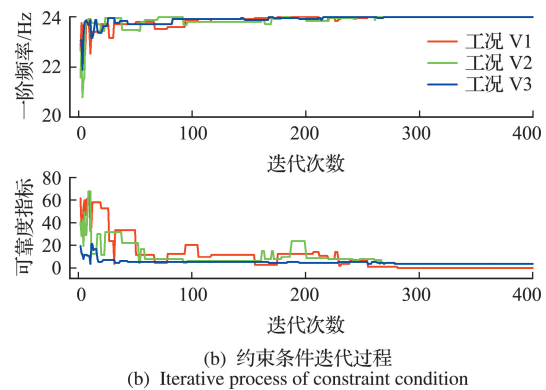
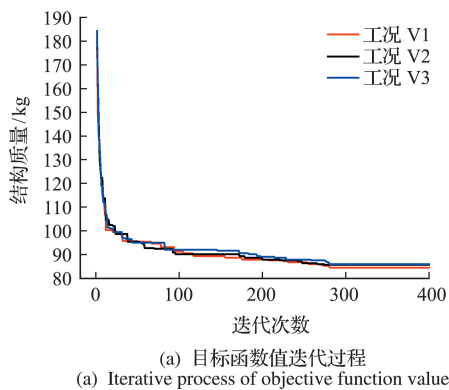


图 4 灰狼算法迭代过程

Fig. 4 Iterative process of grey wolf optimization method

稍强于 DOC 算法和 GWO 法。DOC 算法所需迭代次数明显少于其余两种算法,计算效率较高。三种工况的优化结果列入表 1。

表 1 V1-V3 工况下桁架桥优化结果
Tab. 1 Optimization results of truss bridge under V1-V3 conditions

优化算法及初始值	结构质量 /kg	一阶频率 /Hz	可靠度	可靠度指标
初始值	160.45	24.73	1.0000	4.28
DOC 算法(V1)	83.79	24.00	0.5472	0.12
PSO 算法(V1)	83.32	24.00	0.5125	0.03
GWO 算法(V1)	84.13	23.99	0.5978	0.25
DOC 算法(V2)	85.09	23.99	0.9999	3.71
PSO 算法(V2)	84.92	24.00	0.9999	3.70
GWO 算法(V2)	85.21	23.94	0.9999	3.71
DOC 算法(V3)	85.37	24.00	0.9999	3.70
PSO 算法(V3)	85.15	24.00	0.9999	3.70
GWO 算法(V3)	85.46	23.99	0.9999	3.71

由表 1 可知,三种工况下各算法优化后结构一阶频率均满足设计要求,结构优化后总质量相较于初始质量下降明显。以 V1 工况为例,三种算法优化后的结构质量相较于初始值分别降低 47.8%, 48.1% 和 46.4%,三种算法最大相对误差约为 0.4%。计入可靠度约束后,三种算法优化后结构的可靠度均满足设计要求,验证了算法的有效性。PSO 算法优化后的结构质量在三者中最优。

进一步观察可知,当结构所受荷载变异系数增大时,优化目标值也随之增大。其原因是当随机荷载变异系数增大后,可靠度会随之减小,当被约束可靠度趋近于目标可靠度时,会需要更大的安全余量,从而使得总质量增大。观察 V2 和 V3 两种工况下初始可靠度可以发现,当荷载变异系数增大时,结构初始可靠度会随之减小,这与现有结构可靠度理论是相符的。

对比三种工况的优化结果可知,工况 V1 优化后的结构质量均小于工况 V2 和 V3 优化后的结果,前者优化后虽频率满足动力条件,但其可靠度并不能满足设计要求,结构存在失稳风险,而 V2 和 V3 工况虽优化后结构质量略微高于前者,但其可靠度满足设计要求,保证了结构的安全性和可靠性。因此,基于可靠度的结构动力优化设计相较于常规传统动力优化设计,在满足基本动力特性要求的基础之上,进一步保证了结构的安全性,更加切合实际工程。

算例 2 如图 5 所示,长为 4 m 的矩形截面悬

臂梁等分为 20 个平面梁单元,初始梁高 $h_0=0.3$ m,截面宽度 $b=0.15$ m,弹性模量 $E=200$ GPa,质量密度 $\rho=2600$ kg/m³。悬臂端作用一简谐荷载 $F=F_b \sin 10t$ N,假设荷载幅值 F_b 和屈服应力 $[\sigma]$ 均为服从正态分布的随机变量,均值分别为 10 kN 和 30 MPa。本算例以单元梁高为设计变量,其变化范围为 $[0.5$ m, 0.1 m],要求(1)悬臂端最大位移响应不超过 0.015 m;(2) E1 单元的动应力可靠度大于 0.9999,对应可靠度指标 $[\beta]=3.7$ 。在满足设计要求的前提下,实现悬臂梁结构总质量最小化设计。

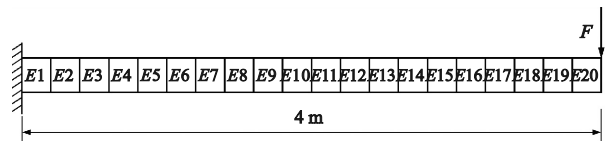


图 5 矩形截面悬臂梁
Fig. 5 Cantilever beam with a rectangular section

同样,本处也设定与算例 1 相同的三种变异系数工况 V1, V2 和 V3。计算结果表明,三种算法在动位移和可靠度约束下均能使悬臂梁结构达到最小质量化设计,其中 PSO 算法的稳定性和收敛性最佳,DOC 算法迭代次数最少(限于篇幅,优化过程从略)。三种工况的优化结果列入表 2。

表 2 V1-V3 工况下悬臂梁优化结果
Tab. 2 Optimization results of cantilever beam under V1-V3 conditions

优化算法及初始值	结构质量 /kg	最大位移响应 /m	可靠度	可靠度指标
初始值	468.00	0.32×10^{-2}	1.0000	4.28
DOC 算法(V1)	241.42	1.50×10^{-2}	0.5629	0.21
PSO 算法(V1)	241.34	1.50×10^{-2}	0.5044	0.01
GWO 算法(V1)	241.46	1.50×10^{-2}	0.6010	0.26
DOC 算法(V2)	243.86	1.50×10^{-2}	0.9999	3.71
PSO 算法(V2)	243.45	1.50×10^{-2}	0.9999	3.70
GWO 算法(V2)	243.71	1.50×10^{-2}	0.9999	3.71
DOC 算法(V3)	244.61	1.50×10^{-2}	0.9999	3.70
PSO 算法(V3)	244.53	1.50×10^{-2}	0.9999	3.70
GWO 算法(V3)	244.66	1.50×10^{-2}	0.9999	3.70

由表 2 可知,V1 工况下 DOC, PSO 和 GWO 三种算法优化后,悬臂梁总质量较初始质量分别下降 48.41%, 48.43% 和 48.41%,三种算法最大相对误差小于 0.05%,且最大位移响应皆满足约束要求。V2 和 V3 工况下,考虑荷载幅值变异系数后,悬臂梁总质量均取得了较好的优化结果,优化后质量比工况 V1 仅高出约 1%~2%,动位移并未

产生明显变化,但可靠度提升70%以上,可见在考虑可靠度约束后目标优化值虽有增大,但结构更加安全可靠。验证了本文提出的基于动位移和可靠度约束的动力优化设计的可行性和有效性。

6 结 论

(1) 建立基于对频率、动位移和动应力可靠度约束下的结构动力优化设计数学模型,算例表明可使结构整体质量较初始值下降近50%,优化后结构力学参数和可靠度均满足设计要求。

(2) 通过对比优化过程和优化结果可知,DOC,PSO及GWO三种算法均能稳定收敛至优化目标值,且相对误差不超过0.5%。其中,PSO优化结果最佳,DOC迭代次数较少。

(3) 以结构最小重量为动力优化设计目标时,算例基于可靠度的结构优化质量高出传统动力优化设计结果约1%~2%,但可靠度提升超过70%,保证了结构的安全性。

(4) 当荷载幅值变异系数变大时,在可靠度指标不变的前提下,算例表明结构优化后的质量会有所增加,以保障在不确定性较大场景下的结构安全性。

参考文献(References):

- [1] 朱继宏,赵 华,刘 涛,等.简谐力激励下多组件结构系统的整体优化设计[J].航空学报,2018,39(1):226-237. (ZHU Ji-hong,ZHAO Hua,LIU Tao,et al. Integrated layout and topology optimization design of multi-component structure system under harmonic force excitation[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*,2018,39(1):226-237. (in Chinese))
- [2] 魏德敏,文星宇.基于混合 PSO 算法的桁架动力响应优化[J].振动与冲击,2011,30(5):174-178. (WEI De-min,WEN Xing-yu. Dynamic response optimization for a truss structure based on hybrid PSO algorithm[J]. *Journal of Vibration and Shock*,2011,30(5):174-178. (in Chinese))
- [3] Zhu Q,Su Y,Zhao S Q. Optimization of anti-wind disturbance ability of a long-span cable-driven parallel camera robot based on a Genetic Algorithm[J]. *Journal of Physics: Conference Series*,2022,2183(1):012018.
- [4] Kaveh A,Bakhshpoori T,Afshari E. Hybrid PSO and SSO algorithm for truss layout and size optimization considering dynamic constraints[J]. *Structural Engineering and Mechanics*,2015,54(3):453-474.
- [5] 曹萌萌,周书敬.基于可靠度的结构优化方法综述[J].工业建筑,2014,44(S1):302-304,315. (CAO Meng-meng,ZHAO Shu-jing. Review of reliability structural optimization methods[J]. *Industrial Building*,2014,44(S1):302-304,315. (in Chinese))
- [6] 程耿东,许 林.基于可靠度的结构优化的序列近似规划算法[J].计算力学学报,2006,23(6):641-646. (CHENG Geng-dong,XU Lin. Sequential approximate programming approach to reliability based structural optimization[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*,2006,23(6):641-646. (in Chinese))
- [7] 陈建军,车建文.基于概率的工程结构动力特性优化设计[J].应用力学学报,2000,17(1):29-35,164. (CHEN Jian-jun,CHE Jian-wen. Optimum design based on probability for dynamic characteristics of engineering structures [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*,2000,17(1):29-35,164. (in Chinese))
- [8] Mishra S K,Roy B K,Chakraborty S. Reliability-based-design-optimization of base isolated buildings considering stochastic system parameters subjected to random earthquakes [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*,2013,75:123-133.
- [9] Hu Z,Du X P. Reliability-based design optimization under stationary stochastic process loads[J]. *Engineering Optimization*,2016,48(8):1296-1312.
- [10] 孙 永,秦 云,王宪杰,等.基于随机概率密度演化的结构-TMD 参数优化[J].上海理工大学学报,2018,40(1):97-102. (SUN Yong,QIN Yun,WANG Xian-jie,et al. Structure-TMD parameters optimization based on the stochastic probability density evolution [J]. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*,2018,40(1):97-102. (in Chinese))
- [11] 李 辉,陈国海,杨迪雄.基于动力可靠度的框架建筑减震结构优化设计[A].第31届全国结构工程学术会议[C].2022. (LI Hui,CHEN Guo-hai,YANG Di-xiong. Optimal design of frame building damping structure based on dynamic reliability [A]. 31st National Conference on Structural Engineering [C]. 2022. (in Chinese))
- [12] 李小兰.结构静/动力可靠度分析与优化设计的高效算法研究[D].大连理工大学,2021. (LI Xiao-lan. Research on Efficient Algorithms for Structural Static/Dynamic Reliability Analysis and Optimization Design [D]. Dalian University of Technology,2021. (in Chinese))
- [13] Al-Sanad S,Wang L,Parol J,et al. Reliability-based design optimisation framework for wind turbine tow-

- ers [A], 2nd IAHR-Asia Symposium on Hydraulic Machinery and Systems[C], 2019.
- [14] 贡金鑫,魏巍巍. 工程结构可靠性设计原理[M]. 北京:机械工业出版社, 2007. (GONG Jin-xin, WEI Wei-wei. *Reliability Design Principle of Engineering Structure* [M]. Beijing: China Machine Press, 2007. (in Chinese))
- [15] 林家浩. 优化准则设计中的双因子算法[J]. 大连工学院学报, 1984, **23**(2): 105-112. (LIN Jia-hao. Double factor algorithm in optimization criterion design[J]. *Journal of Dalian Institute of Technology*, 1984, **23**(2): 105-112. (in Chinese))
- [16] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization [A]. International Conference on Neural Networks [C]. 1995.
- [17] Mirjalili S, Mirjalili S, Lewis A. Grey wolf optimizer [J]. *Advances in Engineering Software*, 2014, **69**: 46-61.

Dynamic optimization design of bridge structures based on reliability

HUANG Hai-xin^{*1}, LÜ Ya-lun¹, CHENG Shou-shan²

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

2. National Engineering Laboratory of Bridge Safety and Technology (Beijing),

Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100080, China)

Abstract: For the problem of uncertainty of dynamic loads on a bridge structures, the numerical characteristics of its dynamic response are determined based on the modal superposition method, and the reliability constraint function of dynamic stress is established by using the first-order second-moment method. The mathematical models of dynamic optimization design with constraints of frequency and dynamic stress reliability, dynamic displacement and dynamic stress reliability respectively, and the corresponding optimization programs are coded on Matlab platform. The test results of examples show that, the dynamic optimization criterion method, particle swarm algorithm and grey wolf algorithm can obtain the optimal value of the objective function of the whole structure mass under the constraint of both dynamic performance and stress reliability, the convergence and stability of PSO are the best, and the number of Doc iterations is the least, and the reliability of the optimized component is improved by more than 70% compared with the traditional dynamic optimization design. Meanwhile, it is found that the optimized mass of the structure will increase with the increase of the variation coefficient of the load amplitude in order to ensure that the reliability index of the structure does not decrease when facing larger uncertainties. The method presented in this paper can provide theoretical guidance for the dynamic optimal design of bridge structures under external random excitation.

Key words: structural dynamic optimization design; dynamic characteristics; dynamic response; bridge structures; structural reliability