

文章编号: 1000-0887(2003) 01-0039-08

基于可靠性的工程结构动力响应优化设计^{*}

戴 君, 陈建军, 李永公, 赵竹青, 马洪波

(西安电子科技大学 电子机械学院, 西安 710071)

(张景绘推荐)

摘要: 在考虑结构物理参数和作用荷载同时具有随机性的情况下, 建立了具有动应力、动位移可靠性约束和设计变量上下限约束的工程结构优化设计数学模型; 分别对结构动力响应的数字特征和基于可靠性的结构动力响应的灵敏度进行了推导; 利用内罚函数法求解。算例表明文中构建的优化模型和提出的求解方法是合理与可行的。

关键词: 工程结构; 动力响应; 动力灵敏度; 可靠性约束; 优化设计
中图分类号: O327; TU318 文献标识码: A

引 言

结构动力响应优化是结构动力优化设计中的重要内容之一, 它是以动力激励下结构响应的物理量为目标或约束的结构动力学优化设计。由于该问题同时涉及到结构动力特性分析和动力响应分析以及优化设计, 因此, 求解较结构静态优化问题要困难和复杂得多^[1]。尽管如此, 历年来相继有若干研究成果问世。如: Kapoor^[2] 利用无约束极小化中的 Powell 方法, 对发射塔桁架结构的外形进行了动力响应优化设计。Chahande^[3] 对结构动力响应优化设计的几种方法进行了讨论与比较。近年来, Pantelides^[4] 将一种 MISA 算法(改进的模拟退火法) 应用于求解具有动应力的动位移约束的结构优化问题。Cheng 等^[5] 对涡轮机座的框架结构进行了动力响应优化设计。孙焕纯等^[6] 从工程角度出发, 提出了结构动态优化问题的“拟静力”方法。顾元宪等^[7] 开发了 MCADS 软件系统并应用于航天结构的动力优化设计之中。

然而, 现有的绝大多数结构动力优化均属于确定性范畴, 即建模中将结构的全部参数和作用荷载等均视为确定性量。显然, 此类模型将无法反映出结构参数和作用荷载的随机性对结构动力设计结果的影响。在某些实际问题中, 随机因素是客观存在的, 如: 结构本身物理参数取值的分散性, 外界作用荷载的不确定性等等, 且它们有时是不容忽略的。因此, 研究基于概率的结构动力响应优化设计问题具有重要的理论和实际意义。诚然, 此类问题将难度更大, 求解更复杂, 目前有关研究文献甚少, 如: Rao^[8]、Jha^[9]、陈塑寰^[10] 等人的工作, 且其中的多数优化

* 收稿日期: 2001_10_28; 修订日期: 2002_09_25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59500596)

作者简介: 戴君(1963—), 女, 浙江诸暨市人, 副教授, 硕士(E-mail: jjchen@xidian.edu.cn);

陈建军(1951—), 河北保定市人, 教授, 博士生导师, 系主任(E-mail: jjchen@xidian.edu.cn)

设计仅涉及了作用荷载的随机性。

本文将在作者前期基于概率的工程结构特性优化设计^[11]的基础上,对基于可靠性的工程结构动力响应优化设计问题进行研究。在同时考虑结构物理参数和作用荷载随机性的情况下,构建了具有动应力和动位移可靠性约束以及设计变量上下限约束的结构优化数学模型,分别对结构动力响应随机变量的数字特征和基于可靠性的结构动力响应的灵敏度进行了推导,在此基础上对结构进行了基于可靠性的动力响应优化设计。

1 基于可靠性的工程结构动力响应优化数学模型

对于工程结构设计而言,满足强度或刚度条件是最基本的要求。因此,结构动力响应优化设计中的主要约束一般应包括动应力和动位移约束。鉴于在本文中同时将考虑结构物理参数(弹性模量 E 、质量密度 ρ 、强度极限 σ)和作用荷载幅值的随机性,为此构建了如下适用于一般工程结构的具有动应力和动位移可靠性约束、使结构重量随机变量均值极小化的优化设计数学模型:

$$\text{find: } A = \{A_1, A_2, \dots, A_{n_e}\},$$

$$\text{min: } W(A) = \sum_{i=1}^{n_e} \rho A_i S_i, \quad (1)$$

$$\text{s. . t. : } R_\sigma^* - P_r\{\sigma^* - \sigma_{\max}(t) \geq \delta_\sigma\} \leq 0, \quad (2)$$

$$R_{x_j}^* - P_r\{x_j^* - x_{j\max}(t) \geq \delta_{x_j}\} \leq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, n_g), \quad (3)$$

$$A^l \leq A_i \leq A^u \quad (i = 1, 2, \dots, n_e), \quad (4)$$

式中: A 是设计变量; ρ, WA 分别是结构质量密度和总重量的均值; $A_i S_i$ 是第 i 个设计变量单元的体积, S_i 需根据设计变量的选择而定; $R_\sigma^*, R_{x_j}^*$ 分别是设计给定的单元应力和第 j 个自由度位移的可靠度; $P_r\{\cdot\}$ 表示计算所得出的可靠度; σ^*, x_j^* 分别是结构许用应力和第 j 个自由度位移的极限值,它们可以是随机变量,亦可以是确定值; $\sigma_{\max}(t), x_{j\max}(t)$ 分别是结构在响应时间历程中的动应力和第 j 个自由度动位移响应的最大值,它们均为随机变量; $\delta_\sigma, \delta_{x_j}$ 分别是结构设计中为避免结构由于强度或刚度不足而发生破坏所给定的容差带; A^u, A^l 分别是设计变量的上、下限值; n_e 是设计变量数; n_g 是结构中的单元总数。

以上模型可适用于多种结构类型,对于板壳结构,则以板壳厚度为设计变量;对于杆系结构(桁架、梁),则以杆截面积为设计变量。对于不同截面形状的梁,令其主惯性矩 I 和截面积 A 有如下近似关系:

$$I = aA^b, \quad (5)$$

式中: a, b 为常数,其值随梁截面形状的不同而定。

在上述优化模型中,结构的尺寸设计变量均为确定性量;目标函数是重量密度随机变量 ρ 的线性函数,其取值的分散性可由 ρ 的变异系数确定之;而结构的动应力与动位移约束都是以概率形式表出的,这无疑给优化求解带来极大的不便。为此,这里首先利用可靠性中的一次二阶矩理论,将模型中的概率约束进行等价化处理,使原可靠性约束(2)和(3)式化为如常规约束形式(具体推志过程可见文[12]):

$$\beta_\sigma^* - \frac{\mu_\sigma^* - \mu_{\sigma_{\max}(t)} - \delta_\sigma}{(\sigma_{\sigma^*}^2 + \sigma_{\sigma_{\max}(t)}^2)^{1/2}} \leq 0, \quad (2)'$$

$$\beta_{y_j}^* - \frac{\mu_{y_j}^* - \mu_{y_{\max}(t)} - \delta_{y_j}}{(\sigma_{y_j}^{*2} + \sigma_{y_{\max}(t)}^2)^{1/2}} \leq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, n_g), \quad (3)'$$

式中: $\beta_{\sigma}^* = \Phi^{-1}(R_{\sigma}^*)$, $\beta_{y_j}^* = \Phi^{-1}(R_{y_j}^*)$ 分别是结构动应力和第 j 个自由度位移的给定可靠度指标, $\Phi^{-1}(\cdot)$ 表示标准正态变量概率分布的反函数; μ_{σ}^* 和 σ_{σ}^{*2} 分别是结构许用应力极限值 σ^* 的均值和方差; $\mu_{y_j}^*$ 和 $\sigma_{y_j}^{*2}$ 分别是第 j 个自由度动位移许用量 x_j^* 的均值和方差; $\mu_{\sigma_{\max}(t)}$, $\sigma_{\sigma_{\max}(t)}^2$ 分别是结构在时间历程中动应力响应峰值的均值和方差; $\mu_{y_{\max}(t)}$, $\sigma_{y_{\max}(t)}^2$ 分别是结构在时间历程中第 j 个自由度动位移响应峰值的均值和方差。对于这些结构响应量随机变量的数字特征可以通过下节的基于概率的结构动力响应分析计算获得。

2 结构动力响应随机变量的数字特征

为获得结构动力响应随机变量的数字特征(均值、方差), 我们的求解策略是: 从确定性结构动力响应的表达式出发, 利用矩法或代数综合法分别导出结构位移和单元应力随机变量的数字特征。

1 确定性结构动力响应

从常规的确定性结构有限元动力学方程出发, 利用振型迭加法和 Duhamel(杜哈美)积分可求得在动力荷载激励下结构的位移响应列阵为:

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{i=1}^P \phi_i z_i(t), \quad (6)$$

其中:

$$z_i(t) = \frac{1}{\omega_i} \int_0^t R_i(\tau) \exp[-\zeta \omega_i(t - \tau)] \sin \omega_i(t - \tau) d\tau \quad (i = 1, 2, \dots, P), \quad (7)$$

$$R_i(t) = \phi_i^T \mathbf{Q}(t), \quad (8)$$

式中: ω_i 、 ϕ_i 、 ζ_i 分别是为结构中的第 i 阶固有频率、模态和振型阻尼比; $z_i(t)$ 是在主坐标系下结构中第 i 个自由度的位移响应; $\mathbf{Q}(t)$ 是作用在结构上的动力荷载列阵; P 为振型迭加个数。

当结构的位移响应求得之后, 根据有限元法中单元结点位移与单元应力之关系, 可求得任一单元 e 的应力响应列阵为:

$$\sigma(t)^e = \mathbf{D}^e \mathbf{B}^e \mathbf{x}(t)^e \quad (e = 1, 2, \dots, n_g), \quad (9)$$

式中: $\mathbf{x}(t)^e$, $\sigma(t)^e$ 分别是单元 e 的结点位移和单元应力列阵; \mathbf{D}^e , \mathbf{B}^e 分别是单元 e 的弹性矩阵和几何矩阵, 它们的具体表达式取决于单元类型。

2 结构位移响应随机变量的数字特征

从(6)式出发, 将其中的固有频率 ω_i 模态 ϕ_i 和动力荷载列阵 $\mathbf{Q}(t)$ 均视为随机变量, 利用求解随机变量数字特征的代数综合法及随机变量数字特征的性质, 可推得结构位移响应的均值和均方差分别为:

$$\mu_{\mathbf{x}(t)} = \sum_{i=1}^P \mu_{\phi_i} \mu_{z_i(t)}, \quad (10)$$

$$\sigma_{\mathbf{x}(t)} = \left\{ \sum_{i=1}^P \left[\mu_{\phi_i}^2 \mu_{z_i(t)}^2 (V_{z_i(t)}^2 + V_{\omega_i}^2 + V_{\omega_i}^2 \cdot V_{z_i(t)}^2) \right] \right\}^{1/2}. \quad (11)$$

由以上两式, 可得结构中第 j 个自由度位移响应 $x_j(t)$ 的变异系数为

$$V_{z_i(t)} = \frac{\left[\sum_{i=1}^P \mu_{\phi_i}^2 \mu_{z_i(t)}^2 \left(V_{z_i(t)}^2 + V_{\omega_i}^2 + V_{z_i(t)}^2 V_{\phi_i}^2 \right) \right]^{1/2}}{\sum_{i=1}^P \mu_{\phi_i} \cdot \mu_{z_i(t)}} \quad (12)$$

式中: 符号 μ , σ , V 分别表示随机变量的均值、均方差和变异系数。其中 $\mu_{z_i(t)}$ 和 $V_{z_i(t)}$ 可根据 (7) 式利用求解随机变量函数矩的方法得出, 此时 $z_i(t)$ 是随机变量 ω_i 和 $R_i(t)$ 的函数, 而 $R_i(t)$ 又是随机变量 ϕ_i 及 $Q(t)$ 的函数。 μ_{ϕ_i} 为结构中第 j 个自由度的第 i 阶固有模态的均值, 它可通过结构动力特性分析计算求得; V_{ω_i} 为固为频率随机变量 ω_i 的变异系数, 其计算表达式已在文[11]中导出如下:

$$V_{\omega_i} = \frac{\sqrt{2[1 + V_{\rho}(V_{\rho} - C_{E\rho}V_E)] - \sqrt{4[1 + V_{\rho}(V_{\rho} - C_{E\rho}V_E)]^2 - 2[V_E^2 + V_{\rho}^2 - 2C_{E\rho}V_E V_{\rho}]}}}{\sqrt{4[1 + V_{\rho}(V_{\rho} - C_{E\rho}V_E)]^2 - 2[V_E^2 + V_{\rho}^2 - 2C_{E\rho}V_E V_{\rho}]}} \quad (13)$$

式中: V_E 、 V_{ρ} 分别是随机变量 E 、 ρ 的变异系数; $C_{E\rho}$ 是 E 和 ρ 的相关系数。

3 单元应力响应随机变量的数字特征

设结构材料为各向同性, 其物理参数 E 、 ρ 为随机变量, 则结构各单元的弹性矩阵 D^e 可表为:

$$D^e = ED^{e\#} \quad (14)$$

式中: E 是随机变量; $D^{e\#}$ 是 D^e 的确定性部分, 即当 $E = 1$ 时单元 e 的弹性矩阵。

于是关系式(9) 现可表为:

$$\sigma(t)^e = D^{e\#} B^e \cdot Ex(t)^e \quad (e = 1, 2, \dots, n_g) \quad (15)$$

从上式出发, 利用求解随机变量数字特征的代数综合法, 可求得各单元应力响应的均值、均方差分别为:

$$\mu_{\sigma(t)^e} = D^{e\#} B^e \cdot \mu_E \mu_{x(t)^e} \quad (16)$$

$$\sigma_{\sigma(t)^e} = D^{e\#} B^e \mu_E \mu_{x(t)^e} (V_{x(t)^e}^2 + V_E^2 + V_{x(t)^e}^2 V_E^2)^{1/2} \quad (17)$$

其中, 单元 e 节点位移响应的变异系数 $V_{x(t)^e}$ 可由(12) 式求得。

3 基于可靠性的灵敏度分析与优化分析

1 基于可靠性的结构动力响应灵敏度分析

结构的动应力和动位移可靠性约束函数经等价化处理后, (2)' 和 (3)' 两约束均可统一以下式表为

$$\beta^* - \beta \leq 0 \quad (18)$$

其中, 可靠性指标 β 的表达式为:

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S - \delta}{(\sigma_R^2 + \sigma_S^2)^{1/2}} \quad (19)$$

式中, 脚标 R 表示许用的位移或应力对应的随机变量, 脚标 S 表示设计中的结构位移或应力对应的随机变量, 在荷载作用方式既定的情况下, S 仅是结构设计变量的函数, 且通常 R 和 S 两随机变是相互独立的; δ 是为了满足强度、刚度要求而给定的一个容差带。

现将可靠性指标 β 的表达式(19) 两端对设计变量 A_i 求偏导, 并引入变量 S 的变异系数 V_S

= α_s/μ_s , 经整理简化, 最终可导出可靠性指标 β 对设计变量的灵敏度表达式为:

$$\frac{\partial \beta}{\partial A_i} = \frac{-\sigma_R^2 - \nu_s^2 \mu_s \mu_R + \nu_s^2 \mu_s \delta}{(\sigma_R^2 + \sigma_s^2)^{3/2}} \cdot \frac{\partial \mu_s}{\partial A_i} \quad (20)$$

现只需将上式中的变量 R 分别用诸许多位移和许用应力替代之, 而将 S 由相应的动位移和动应力响应值替代之, 便可获得结构动位移和动应力响应的可靠度和灵敏度分别为:

$$\frac{\partial \beta_{x_j(t)}}{\partial A_i} = \frac{-\sigma_{x_j}^2 - \nu_{x_j}^2 \mu_{x_j(t)} \mu_{x_j}^* + \nu_{x_j}^2 \mu_{x_j(t)} \delta}{(\sigma_{x_j}^2 + \sigma_{y_j(t)}^2)^{3/2}} \cdot \frac{\partial \mu_{x_j(t)}}{\partial A_i} \quad (21)$$

$$\frac{\partial \beta_{\sigma(t)}}{\partial A_i} = \frac{-\sigma_{\sigma}^2 - \nu_{\sigma(t)}^2 \mu_{\sigma(t)} \mu_{\sigma}^* + \nu_{\sigma(t)}^2 \mu_{\sigma(t)} \delta}{(\sigma_{\sigma}^2 + \sigma_{\sigma(t)}^2)^{3/2}} \cdot \frac{\partial \mu_{\sigma(t)}}{\partial A_i} \quad (22)$$

式中: $\partial \mu_{x_j(t)}/\partial A_i, \partial \mu_{\sigma(t)}/\partial A_i$ 分别是结构动位移和动应力响应的均值对设计变量的灵敏度, 其值可以通过常规的结构动力响应灵敏度分析的“拟载荷”法^[7]求得。

由(20)式可以看出, 可靠性指标对设计变量的灵敏度即等于常规的灵敏度前乘以一个修正系数, 而该修正系数是由有关的随机变量的一、二阶矩和给定的容差三者共同确定的。

2 优化方法

为了充分利用灵敏度信息, 提高优化的计算效率, 本文采用了优化中广泛使用且相当有效的内点惩罚函数求解方法。在构造内点惩罚函数之后的一系列无约束优化中, 采用了收敛较为迅速的共轭梯度算法。

4 算 例

例1 具有动应力和动位移可靠性约束的矩形截面悬臂梁结构

该结构几何尺寸及单元划分见图1。结构材料的弹性模量 E 和质量密度 ρ 均为正态分布随机变量, 它们的均值和变异系数分别为: $\mu_E = 206.706 \text{ MPa}$, $\nu_E = 0.1$; $\mu_\rho = 3.2054 \times 10^3 \text{ kg/cm}^3$, $\nu_\rho = 0.1$; 材料的泊松比为 0.3; 振型阻尼比 $\zeta = 0.008$ 。该悬臂梁在自由端处作用一沿 z 轴方向的简谐激励力 $Q \sin \omega t$, 其力幅 Q 亦为正态随机变量, 均值和变异系数分别为: $\mu_Q = 444.528 \text{ N}$, $\nu_Q = 0.1$; 激励频率 $\omega = 10 \text{ Hz}$ 。结构许用的应力极限和位移限值亦为正态随机变量, 它们的均值和变异系数分别为: $\mu_\sigma^* = 9.6463 \text{ MPa}$, $\nu_\sigma^* = 0.1$; $\mu_\delta^* = 2.032 \text{ cm}$, $\nu_\delta^* = 0.1$ 。现以梁结构三个单元的横截面积为设计变量, 设计变量的上下限分别为 32.258 cm^2 和 3.2258 cm^2 。结构动应力和动位移的可靠性约束分别为: 结构中最大动应力响应的峰值和梁自由端动位移响应的峰值分别满足各自给定的可靠度。这里设计给定的动应力和动位移约束的可靠度均定为 0.95。

为了将基于可靠性的优化设计与常规优化设计结构进行比较, 对本例我们建立了随机模型 I 和常规模型 II 两种优化模型。在常规模型中, 是将所有随机变量的变异系数均取为零, 将动应力和动位移约束作为常规约束进行优化设计。当获得常规的最优化设计结构之后, 再依据随机模型中各随机变量的变异系数之值计算出相应的结构应力和位移的可靠度值。初始设计和两种模型的优化设计结构一并列在表1中。从常规优化结构 II 易见: 常规优化虽然满足常规约束条件, 但并不满足可靠性约束条件。从可靠性的优化结果 I 中显见: 此例中的应力可靠性约束是一个紧约束。此外, 经优化设计之后, 结构重量均值下降非常显著, 且梁的横截面积呈现出从固定端至自由端逐渐变细的趋势, 这与结构的受力情况是相符的。

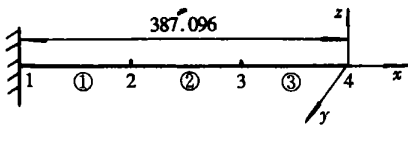


图 1 矩形截面悬臂梁结构(单位 cm)

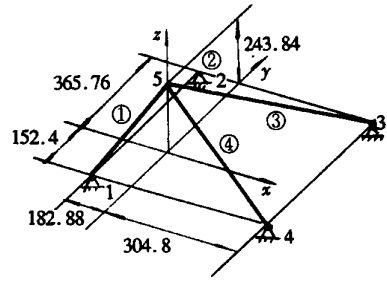
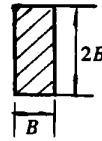


图 2 空间四杆桁架结构(单位 cm)

表 1 悬臂梁优化设计结构

设计变量	A_1/cm^2	A_2/cm^2	A_3/cm^2	W/kg	$\mu_{\sigma_{\max}(t)}/MPa$	$\mu_{x_j \max}/cm$	R_o	R_x	结构分析次数
初始设计	19.354 8	19.354 8	19.354 8	0.945 5	3.828 9	0.471 9	1.000	1.000	1
优化结果 I	12.671 6	9.239 3	5.600 0	0.488 0	7.227 8	1.490 7	0.95	0.98	85
优化结构 II	10.943 8	7.777 4	4.671 0	0.380 9	9.604 9	2.005 9	0.52	0.55	110

例 2 具有动应力和动位移约束的空间四杆桁架结构

结构的几何尺寸及单元、节点编号如图 2。结构材料为铝，其振型阻尼 $\zeta = 0.01$ ；弹性模量 E 和质量密度 ρ 均为正态随机变量，它们均值分别为： $\mu_E = 68.902 \text{ Gpa}$ ， $\mu_\rho = 2.77 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^3$ 。动力阶跃荷载作用于结点 5 处，其力幅亦为正态随机变量，它在三方向分量的均值分别为： $\mu_{Q_x} = 4.445 3 \times 10^4 \text{ N}$ ， $\mu_{Q_y} = 8.890 6 \times 10^4 \text{ N}$ ， $\mu_{Q_z} = -2.667 2 \times 10^5 \text{ N}$ 。全部杆件的许用应力极限值以及结点 5 处在 z 方向允许位移的极限值均为正态随机变量，它们的均值和变异系数分别为： $\mu_{\sigma^*} = \pm 172.255 \text{ MPa}$ ， $\nu_{\sigma^*} = 0.1$ ， $\mu_{z^*} = 1.27 \text{ cm}$ ， $\nu_{z^*} = 0.1$ 。给定应力、动位移约束的可靠度均为 0.95。现以四根杆件的横截面为设计变量，其给定的上、下限值分别为 64.516 cm^2 和 $0.322 6 \text{ cm}^2$ 。

表 2 空间四杆桁架优化结构

设计变量	初始设计	常规优化结构 $\nu_\rho = \nu_E = \nu_Q = 0$	可靠性优化结果	
			模型 I $\nu_\rho = \nu_E = \nu_Q = 0.01$	模型 II $\nu_\rho = \nu_E = \nu_Q = 0.1$
A_1/cm^2	38.709 6	26.529 6	24.549 0	5.0651
A_2/cm^2	19.354 8	11.809 0	14.231 6	15.034 2
A_3/cm^2	25.806 4	16.440 0	19.007 0	19.757 4
A_4/cm^2	12.903 2	3.852 1	1.384 5	0.443 2
W/kg	115.31	69.391	76.374	80.402
$\mu_{\sigma_{\max}(t)}/MPa$	110.588	170.877	143.798	132.912
$\mu_{x_j \max}(t)/cm$	0.812 8	1.270 3	1.144 8	1.064
R_o	1.000	0.532	0.95	0.95
R_x	1.000	0.5	0.98	0.98

对本例仍构造了常规优化和可靠性优化两种模型。对常规优化模型的处理同例 1。在可靠性优化模型中，为了考察随机变量的分散程度对优化结果的影响，我们特将结构的物理参数和作用荷载的变异系数分别取为 I、II 两组不同的值，分别进行了优化设计。优化设计结果列

于表 2 中。

从优化结构可以看出: 可靠性优化设计所获得的两组结果是有较大差异的。这表明: 结构物理参数和作用荷载的分散程度对优化结果有着较大的影响; 同算例 1, 常规优化结果虽然满足了常规约束, 但并不满足可靠性约束。显然, 当结构物理参数或作用荷载两者之一具有随机性时, 常规的优化模型和方法将无能为力, 而本文提出的基于可靠性优化模型和方法可大显身手。

5 结 论

1) 悬臂梁结构经动力响应优化设计之后, 梁的截面积设计方案将更为合理。

2) 常规优化与可靠性优化的结果是不同的。从概率的观点看, 一般前者是后者的不可行解。故对于随机参数结构或随机荷载的情况, 常规的优化模型和求解方法是无法得出合理的设计结果。

3) 结构的物理参数和作用荷载的分散性对结构的优化结果具有较大影响, 随着所有随机变量分散性(变异系数) 的增大, 结构设计结果的最优程度将有所下降, 即结构的目标函数值将随之劣化。

4) 算例表明: 本文针对随机参数结构受到随机性荷载激励这一工程中较普遍存在的情况, 所提出的基于可靠性的结构动力响应优化设计数学模型和求解方法是合理与可行的。

[参 考 文 献]

- [1] 陈建军, 车建文, 崔明涛, 等. 结构动力优化设计综述与展望[J]. 力学进展, 2001, 32(2): 181—192.
- [2] Kapoor M P, Kumarasamy K. Optimum configuration of transmission towers in dynamic response regime[A]. In: Topping B H V Ed. Proceedings International Symposium on Optimum Structural Design[C]. Tucson: Ariz, Grodon & Breach, 1981, 185—189.
- [3] Chahande A I, Arora J S. Development of a multiplier method for dynamic response optimization problem[J]. Structural Optimization, 1993, 5(6): 69—78.
- [4] Pantelides C P, Tzan S R. Optimal design of dynamically constrained structures[J]. Computers & Structures, 1997, 62(1): 141—150.
- [5] Cheng G D, Kang Z, Wang G. Dynamic optimization of a turbine foundation[J]. Structural Optimization, 1997, 13(4): 244—249.
- [6] 孙焕纯, 石连栓, 柴山. 考虑动应力、动位移约束的离散变量结构优化设计[J]. 计算力学学报, 1997, 14(增刊): 723—726.
- [7] 顾元宪, 亢战, 关振群. MCADS 系统在航天结构动力优化中的应用和发展[J]. 计算力学学报, 1997, 14(增刊): 589—594.
- [8] Rao S S. Optimization of airplane wing structures under gust loads[J]. Computers & Structures, 1985, 21(3): 741—749.
- [9] Jha V K. Optimization of aerospace structures subjected to random vibration and fatigue constraints [J]. The Shock & Vibration Bulletin, 1986, 56(part2): 193—200.
- [10] 陈塑寰, 宋大同. 多自由度振动结构的随机优化设计[J]. 力学学报, 1994, 29(4): 432—439.
- [11] CHEN Jian_jun, CHE Jian_wen, SUN Huai_an, et al. Probability dynamic of truss structures[J]. Structural Engineering & Mechanics. 2002, 13(2): 231—239.
- [12] CHENG Jian_jun, DUAN Bao_yan. Structural optimization by displaying the reliability constraints[J]. Computers & Structures, 1994, 50(6): 777—783.

Dynamic Response Optimization Design for Engineering Structures Based on Reliability

DAI Jun, CHEN Jian_jun, LI Yong_gong,

ZHAO Zhu_qing, MA Hong_bo

(School of Electronic Mechanical Engineering,
Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: In many practical structures, physical parameters of material and applied loads have random property. To optimize this kind of structures, an optimum mathematical model was built. This model has reliability constraints on dynamic stress and displacement and upper & lower limits of the design variables. The numerical characteristic of dynamic response and sensitivity of dynamic response based on probability of structure were deduced respectively. By equivalent disposing, the reliability constraints were changed into conventional forms. The SUMT method was used in the optimization process. Two examples illustrate the correctness and practicability of the optimum model and solving approach.

Key words: engineering structure; dynamic response; dynamic sensitivity; reliability constraint; optimal design