

单跳激励下水工高性能面板时空效应舒适度性态研究

马家林,程洋,李万林

(仪征市水利工程总队,江苏扬州211400)

摘要:基于国内外舒适度研究现状与评价标准,提出了一种利用Dirac Delta函数来表征水工高性能面板时空分布的舒适度研究方法。通过建立改进单跳激励模型(HJ-CDLEM),求解得到水工高性能面板模型的激励响应机理方程,提出同时考虑时间效应和结构空间效应的水工高性能面板舒适度性态评价指标,并以此开展了舒适度性态评估,揭示了激励作用在该种水工结构中的响应传播特性与空间分布特征。

关键词:水工高性能面板;单跳激励;时空效应;舒适度性能

中图分类号:TV312

文献标志码:A

文章编号:1009-7716(2024)02-0220-07

1 工程概况

随着建筑事业日趋完善,人们对工作环境、工作质量、工作品质愈美愈善的追求,工作场地舒适度研究成为近年来备受瞩目的话题。伴随着当前我国水利事业的蓬勃兴旺以及国际化趋势,品质工作备受关注。就水电站厂房结构而言,由于水电站运行过程中电磁振动、机械振动、水力振动3个方面导致的振动问题不可避免,直接影响工作人员作业,严重者会出现身心健康等后遗症^[1-3]。

当前,我国《水工建筑物抗震设计规范》(DL 5073—2000)^[4]对于振动问题标准偏低,仅从频率、噪声等评价指标加以规定,而对于舒适度指标还没有形成统一的标准。文献[5-6]研究表明,结构振动会使得使用者明显感觉不适。而且,当振动超过一定范围,会对人的消化系统、神经系统、内分泌系统等造成紊乱,甚至出现一系列不良心理效应,造成疲劳、恐慌等心理损害^[7-8]。

结构振动导致的舒适度问题的关键在于其评价方法和评价指标。目前,对于结构振动引起的舒适度评价指标大多采用的是加速度评价指标^[9-12],以及噪声评价指标和频率评价指标,而对于考虑结构空间效应和时间效应的舒适度评价指标还有待做进一步的研究。

收稿日期:2023-09-02

作者简介:马家林(1986—),男,本科,工程师,从事水利工程管理及施工方向工作。

2 舒适度激励响应机理研究

2.1 单人跳跃集中动荷载激励模型(HJ-CDLEM)

人致荷载激励能引起结构产生振动,严重则影响结构实用性,甚至造成安全性问题^[13-15]。国内外学者通过建立动力特性模型和动力试验对人致荷载激励进行了相关研究,对于单人跳跃荷载激励,Allen^[16-18]等对其进行了研究工作。然而,以上研究成果中总结出的动力因子等参数差异较大,况且,中西方人体特征参数差异大,不能以西方研究成果来体现国内荷载激励模式。因此,本文根据我国陈隽等^[19]基于Bachmann“单人跳跃荷载模型”^[20]提出的修正半正弦平方模型,得到改进的单人跳跃集中动荷载激励模型(Centralized Dynamic Load Excitation Model for Human Jump[HJ-CDLEM]),其函数表达式为:

$$F(t) = \begin{cases} K_p G \sin(\pi t_p^{-1} t), & (0 \leq t < t_p, f_p \leq 1.5 \text{ Hz}) \\ K_p G \sin^2(\pi t_p^{-1} t), & (0 \leq t < t_p, 1.5 \text{ Hz} < f_p \leq 3.5 \text{ Hz}) \\ 0, & (t_p \leq t < T_p) \end{cases} \quad (1)$$

式中: K_p 为脉冲系数; G 为单人体重; t_p 为接触楼面时间; T_p 为一次弹跳时间; f_p 为跳跃频率。

脉冲系数 K_p 根据跳跃频率 f_p 来取值,基于单次跳跃过程中能量守恒定律,满足如下等式:

$$\int_0^{t_p} F(t) dt = G \cdot T_p \quad (2)$$

将式(1)代入到式(2)计算可得:

$$K_p = \begin{cases} \frac{\pi}{2.4\alpha}, & (f_p \leq 1.5 \text{ Hz}) \\ \frac{2}{\alpha}, & (1.5 \text{ Hz} < f_p \leq 2.0 \text{ Hz}) \\ \frac{\eta}{\alpha}, & (2.0 \text{ Hz} < f_p \leq 3.5 \text{ Hz}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\alpha = t_p/T_p$,为接触率; $\eta = -0.332f_p^2 + 1.908f_p - 0.792$ 。

2.2 考虑时空效应的水工高性能面板加速度解析解

水工高性能面板振动微元如图1所示,分析水工高性能面板在单人跳跃集中动荷载激励作用下的振动时,用到了如下基本假定^[21-24]:(1)钢筋混凝土楼板材料满足各项同性及线弹性属性;(2)单人跳跃集中动荷载激励与整体楼板抗冲击能力相比较弱,因此忽略装配端钢梁自身的变形;(3)水工高性能面板振动时,其挠度明显小于其板厚度;(4)水工高性能面板满足绝对等厚度原则,且装配式螺栓满足简支对称约束。

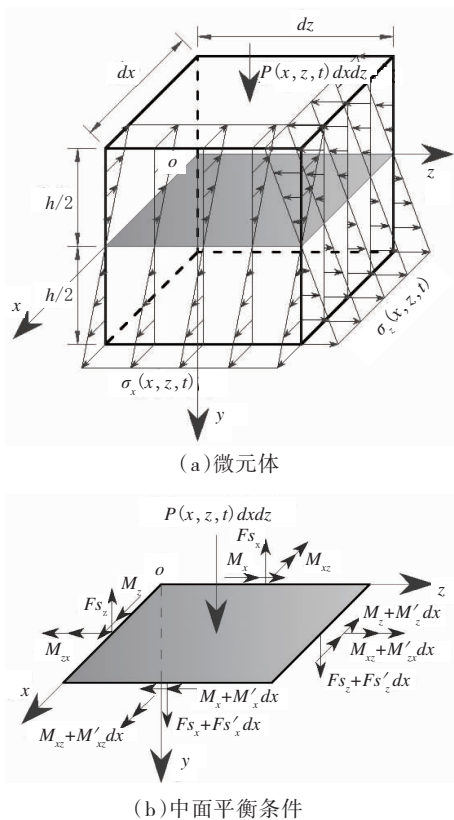


图1 水工高性能面板振动微元示意图

根据以上基本假定,确定水工高性能面板内力表达式为:

$$M_x(x, z, t) = -D \left[\frac{\partial^2 w(x, z, t)}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 w(x, z, t)}{\partial z^2} \right] \quad (4)$$

$$M_z(x, z, t) = -D \left[\frac{\partial^2 w(x, z, t)}{\partial z^2} + v \frac{\partial^2 w(x, z, t)}{\partial x^2} \right] \quad (5)$$

$$M_{xz}(x, z, t) = -D(1-v) \frac{\partial^2 w(x, z, t)}{\partial x \partial z} \quad (6)$$

$$M_{zx}(x, z, t) = -D(1-v) \frac{\partial^2 w(x, z, t)}{\partial z \partial x} \quad (7)$$

$$F_{s_x}(x, z, t) = D \frac{\partial \nabla^2 w(x, z, t)}{\partial x} \quad (8)$$

$$F_{s_z}(x, z, t) = D \frac{\partial \nabla^2 w(x, z, t)}{\partial z} \quad (9)$$

通过式(4)~式(9)建立平衡关系,有:

$$\frac{\partial M_x(x, z, t)}{\partial x} + \frac{\partial M_{xz}(x, z, t)}{\partial z} - F_{s_z}(x, z, t) = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial M_z(x, z, t)}{\partial z} + \frac{\partial M_{zx}(x, z, t)}{\partial x} - F_{s_x}(x, z, t) = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial F_{s_x}(x, z, t)}{\partial x} + \frac{\partial F_{s_z}(x, z, t)}{\partial z} + m \frac{\partial^2 w(x, z, t)}{\partial t^2} = P(x, z, t) = 0 \quad (12)$$

引入 Dirac Delta 函数来表征单人跳跃作用点位置激励模式,则有:

$$P(x, z, t) = \begin{cases} K_p G \delta(x-x_0) \delta(z-z_0) \sin(\omega_p t), & (0 \leq t < t_p, f_p \leq 1.5 \text{ Hz}) \\ K_p G \delta(x-x_0) \delta(z-z_0) \sin^2(\omega_p t), & (0 \leq t < t_p, 1.5 \text{ Hz} < f_p \leq 3.5 \text{ Hz}) \\ 0, & (t_p \leq t < T_p) \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\omega_p = \pi t_p^{-1}$ 。

定义 $\delta(x)$ 函数和 $\delta(z)$ 函数为:

$$\delta(x-x_0) = \frac{2}{B} \sum_{j=1}^{\infty} \sin\left(\frac{j\pi}{B} x_0\right) \sin\left(\frac{j\pi}{B} x\right) \quad (14)$$

$$\delta(z-z_0) = \frac{2}{L} \sum_{k=1}^{\infty} \sin\left(\frac{k\pi}{L} z_0\right) \sin\left(\frac{k\pi}{L} z\right) \quad (15)$$

由式(10)~式(13),确定水工高性能面板的振动微分方程^[25-26]。

$$D \nabla^2 \nabla^2 w(x, z, t) + m \frac{\partial^2 w(x, z, t)}{\partial t^2} = P(x, z, t) \quad (16)$$

式中: $D = Eh^3/[12(1-\nu^2)]$,为水工高性能面板的抗弯刚度; ν 为水工高性能面板的泊松比; E 为水工高性能面板的杨氏模量; $\bar{m} = \rho h$,为水工高性能面板单位面积上的质量分布。

对式(16)取适合其边界条件的振型函数 $\psi_{mn}(x, z)$ 为:

$$\psi_{mn}(x, z) = X_{mn}(x) \sin(\omega_n z) \quad (17)$$

式中: $\omega_n = n\pi L^{-1}$ 。

将式(17)代入振型方程 $\nabla^2 \nabla^2 \psi(x, z) - \beta^4 \psi(x, z) = 0$ 可得:

$$\frac{d^4 X_{mn}(x)}{dx^4} - 2\omega_n^2 \frac{d^2 X_{mn}(x)}{dx^2} + (\omega_n^4 - \beta^4) X_{mn}(x) = 0 \quad (18)$$

式中: $\beta^4 = \omega_n^2 \bar{m}/D$ 。

于是求得 $X_{mn}(x)$ 分量:

$$X_{mn}(x) = c_m \sin(\theta_{1mn} x) + d_m \cos(\theta_{1mn} x) + e_m \text{sh}(\theta_{2mn} x) + f_m \text{ch}(\theta_{2mn} x) \quad (19)$$

式中: $\theta_{1mn} = (\beta^2 - \omega_n^2)^{0.5}$; $\theta_{2mn} = (\beta^2 + \omega_n^2)^{0.5}$ 。

于是可得振型函数 $\psi_{mn}(x, z)$:

$$\psi_{mn}(x, z) = [c_m \sin(\theta_{1mn} x) + d_m \cos(\theta_{1mn} x) + e_m \text{sh}(\theta_{2mn} x) + f_m \text{ch}(\theta_{2mn} x)] \sin(\omega_n z) \quad (20)$$

根据基本假定和水工高性能面板的实际边界^[27-29],水工高性能面板的边界条件概括为:

$$\left[\frac{\partial^2 \psi_{mn}(x,z)}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 \psi_{mn}(x,z)}{\partial z^2} \right]_{x=0} = 0 \quad (21)$$

$$\left[\frac{\partial^2 \psi_{mn}(x,z)}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 \psi_{mn}(x,z)}{\partial z^2} \right]_{x=B} = 0 \quad (22)$$

$$\left[\frac{\partial^3 \psi_{mn}(x,z)}{\partial x^3} + (2-v) \frac{\partial^3 \psi_{mn}(x,z)}{\partial x \partial z^2} \right]_{x=0} = 0 \quad (23)$$

$$\left[\frac{\partial^3 \psi_{mn}(x,z)}{\partial x^3} + (2-v) \frac{\partial^3 \psi_{mn}(x,z)}{\partial x \partial z^2} \right]_{x=B} = 0 \quad (24)$$

$$[\Omega]_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} 0 & -(\theta_{1mn}^2 + v\omega_n^2) & 0 & (\theta_{2mn}^2 - v\omega_n^2) \\ -(\theta_{1mn}^2 + v\omega_n^2) \sin(\theta_{1mn} B) & -(\theta_{1mn}^2 + v\omega_n^2) \cos(\theta_{1mn} B) & (\theta_{2mn}^2 - v\omega_n^2) \text{sh}(\theta_{2mn} B) & (\theta_{2mn}^2 - v\omega_n^2) \text{ch}(\theta_{2mn} B) \\ \theta_{1mn} [\theta_{1mn}^2 - (2-v)\omega_n^2] & 0 & \theta_{2mn} [\theta_{2mn}^2 - (2-v)\omega_n^2] & 0 \\ \theta_{1mn} [\theta_{1mn}^2 - (2-v)\omega_n^2] \cos(\theta_{1mn} B) & -\theta_{1mn} [\theta_{1mn}^2 - (2-v)\omega_n^2] \sin(\theta_{1mn} B) & \theta_{2mn} [\theta_{2mn}^2 - (2-v)\omega_n^2] \text{ch}(\theta_{2mn} B) & \theta_{2mn} [\theta_{2mn}^2 - (2-v)\omega_n^2] \text{sh}(\theta_{2mn} B) \end{bmatrix} \quad (26)$$

令式(26)的行列式 $[\Omega]_{4 \times 4} = 0$,根据 m 和 n 的不同取值,可求得一系列 θ_{1mn} 、 θ_{2mn} 的值。

根据 $m(m=1, 2, 3, L)$ 和 $n(n=1, 2, 3, L)$ 取值的组合,将得到的 θ_{1mn} 和 θ_{2mn} 带回式(25),求得振型函数:

$$\psi_{mn}(x,z) = \{ \theta_{2mn} \eta_{1mn} \sin(\theta_{1mn} x) + \theta_{1mn} \eta_{2mn} \text{sh}(\theta_{2mn} x) - \varphi_{mn} [\eta_{2mn} \cos(\theta_{1mn} x) + \eta_{1mn} \text{ch}(\theta_{2mn} x)] \} \sin(\omega_n z) \quad (27)$$

式中: $\varphi_{mn} = \eta_{1mn}^{-1} \eta_{2mn}^{-1} [\cos(\theta_{1mn} B) - \text{ch}(\theta_{2mn} B)]^{-1} [\theta_{2mn} \eta_{1mn}^2 \sin(\theta_{1mn} B) - \theta_{1mn} \eta_{2mn}^2 \text{sh}(\theta_{2mn} B)]$, $\eta_{1mn} = \beta_{mn}^2 \omega_n^{-2} + v - 1$, $\eta_{2mn} = \beta_{mn}^2 \omega_n^{-2} - v + 1$ 。

以下采用函数展开法求解水工高性能面板振动问题,式(16)中水工高性能面板的挠度可表达为:

$$w(x,z,t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \psi_{mn}(x,z) w_{mn}(t) \quad (28)$$

振型 $\psi_{mn}(x,z)$ 已满足振动方程,将式(28)带回式(16),简化并消去振型函数项,可求得 $w_{mn}(t)$:

$$w_{mn}(t) = a_{mn} \sin(\omega_{mn} t) + b_{mn} \cos(\omega_{mn} t) + w_{pmn}(t) \quad (29)$$

$$w_{pmn}(t) = \int_0^t \cos_{mn}(\tau) \sin[\omega_{mn}(t-\tau)] d\tau$$

$$\omega_{mn} \iint_s \bar{m} \psi_{mn}^2(x,z) ds$$

因此,式(13)中单次跳跃荷载激励模式进一步可表达为:

$$P_{mn}(t) = \begin{cases} K_p G \int_s \sin(\omega_p t) \delta(x-x_0) \delta(z-z_0) \psi_{mn}(x,z) ds, & (0 \leq t < t_p, f_p \leq 1.5 \text{ Hz}) \\ K_p G \int_s \sin^2(\omega_p t) \delta(x-x_0) \delta(z-z_0) \psi_{mn}(x,z) ds, & (0 \leq t < t_p, 1.5 \text{ Hz} < f_p \leq 3.5 \text{ Hz}) \\ 0, & (t_p \leq t < T_p) \end{cases} \quad (30)$$

又因为水工高性能面板的初始条件为:

$$w_{mn}(0) = 0 \quad (31)$$

$$\frac{\partial w_{mn}(0)}{\partial t} = 0 \quad (32)$$

当 $\beta^2 > \omega_n^2$ 时,将式(20)代入式(21)~式(24),得矩阵方程:

$$[\Omega]_{4 \times 4} \begin{bmatrix} c_m \\ d_m \\ e_m \\ f_m \end{bmatrix} = 0 \quad (25)$$

矩阵 $[\Omega]_{4 \times 4}$ 为:

$$[\Omega]_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} 0 & -(\theta_{1mn}^2 + v\omega_n^2) & 0 & (\theta_{2mn}^2 - v\omega_n^2) \\ -(\theta_{1mn}^2 + v\omega_n^2) \sin(\theta_{1mn} B) & -(\theta_{1mn}^2 + v\omega_n^2) \cos(\theta_{1mn} B) & (\theta_{2mn}^2 - v\omega_n^2) \text{sh}(\theta_{2mn} B) & (\theta_{2mn}^2 - v\omega_n^2) \text{ch}(\theta_{2mn} B) \\ \theta_{1mn} [\theta_{1mn}^2 - (2-v)\omega_n^2] & 0 & \theta_{2mn} [\theta_{2mn}^2 - (2-v)\omega_n^2] & 0 \\ \theta_{1mn} [\theta_{1mn}^2 - (2-v)\omega_n^2] \cos(\theta_{1mn} B) & -\theta_{1mn} [\theta_{1mn}^2 - (2-v)\omega_n^2] \sin(\theta_{1mn} B) & \theta_{2mn} [\theta_{2mn}^2 - (2-v)\omega_n^2] \text{ch}(\theta_{2mn} B) & \theta_{2mn} [\theta_{2mn}^2 - (2-v)\omega_n^2] \text{sh}(\theta_{2mn} B) \end{bmatrix} \quad (26)$$

将式(29)代入式(31)和式(32)可求得系数。

$$a_{mn} = \omega_{mn}^{-1} w_{pmn} \quad (33)$$

$$b_{mn} = 0 \quad (34)$$

因此,单人跳跃荷载激励下水工高性能面板的挠度表达式为:

$$w(x,z,t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \psi_{mn}(x,z) [\omega_{mn}^{-1} w_{pmn}(0) \sin(\omega_{mn} t) + w_{pmn}(t)] \quad (35)$$

由于 Dirac Delta 函数具有这样的性质:

$$\int_{-\infty}^{\infty} F(x) \delta(x-x_0) dx = F(x_0) \quad (36)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} F(x) \delta'(x-x_0) dx = -F'(x_0) \quad (37)$$

于是,单人跳跃荷载激励下水工高性能面板的挠度动力稳态解可转换为:

$$w(x,z,t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{G^* \psi_{mn}(x_0, z_0)}{J_{mnp} \iint_s \psi_{mn}^2(x,z) ds} \psi_{mn}(x,z) \sin(\omega_p t) \quad (38)$$

式中: $G^* = K_p \delta(x-x_0) \delta(z-z_0) G$, $J_{mnp} = \bar{m}(\omega_{mn}^2 - \omega_p^2)$ 。

由式(35)对 t 进行二阶微分,可得考虑时空分布效应的水工高性能面板加速度表达式为:

$$a(x,z,t) = w(x,z,t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-\omega_p^2 G^* \psi_{mn}(x_0, z_0)}{J_{mnp} \iint_s \psi_{mn}^2(x,z) ds} \psi_{mn}(x,z) \sin(\omega_p t) \quad (39)$$

3 水工高性能面板舒适度性态评估

通过优化水工高性能面板中混凝土材料特性,分别设置 2 个等级的普通性能混凝土楼板、2 个等级的高性能混凝土楼板、2 个等级的超高性能混凝土楼板,进行水工高性能面板高性能敏感参数分析与评

估,所需高性能评估参数见表1,高性能性态分析参数见表2。

表1 组合楼板高性能评估敏感参数

性能等级	强度等级	密度 $\rho/(kg \cdot m^{-3})$	弹性模量 E_{cs}/GPa	泊松比 ν_{cs}	抗弯刚度 $D^*/(\times 10^6 N \cdot m)$	单位面积质量分布 $\bar{m}^*/(\times 10^2 kg \cdot m^{-2})$
普通性能	C15	2 400	22.0	0.20	1.392 2	2.160
	C40	2 430	32.5	0.22	2.056 6	2.187
高性能	C60	2 450	36.0	0.20	2.278 1	2.205
	C80	2 90	39.0	0.20	2.467 9	2.241
超高性能	C100	2 500	43.08	0.19	2.715 1	2.250
	C150	2 500	49.53	0.14	3.069 1	2.250

表2 组合楼板高性能评估分析参数

性能等级	C15	C40	C60	C80	C100	C150	
振动参量参数	ω_1	1.256 6	1.256 6	1.256 6	1.256 6	1.256 6	1.256 6
	ω_{11}	126.777	153.809	160.511	165.718	173.470	184.431
	θ_{111}	0.648 21	0.002 08	0.001 47	0.001 96	0.001 82	0.000 86
	θ_{211}	1.891 73	1.777 16	1.777 14	1.777 15	1.777 15	1.777 11
	η_{111}	0.466 08	0.219 90	0.199 42	0.2000 2	0.190 02	0.140 00
	η_{211}	2.066 08	2.066 90	1.780 02	1.799 42	1.810 02	1.860 00
	φ_{11}	2.887 37	0.017 79	0.0138 7	0.018 62	0.018 32	0.012 04
J_{11p}	0.96 Hz	3.468×10^6	5.169×10^6	5.677×10^6	6.150×10^6	6.767×10^6	7.649×10^6
	1.16 Hz	3.465×10^6	5.168×10^6	5.674×10^6	6.148×10^6	6.764×10^6	7.647×10^6
	1.41 Hz	3.463×10^6	5.165×10^6	5.672×10^6	6.145×10^6	6.761×10^6	7.644×10^6
	2.34 Hz	3.453×10^6	5.155×10^6	5.662×10^6	6.135×10^6	6.752×10^6	7.634×10^6

人致结构振动的舒适度性态评估的关键在于其评价指标。目前,舒适度性态评估指标一般基于结构的加速度响应来进行,而基于加速度均方根的评价方法被广大研究人员所采用,并且被写入“ISO标准”、“BS标准”等规范中。因此,本次水电站厂房高性能水工高性能面板舒适度性态评估采用“ISO标准”、“BS标准”,以及国际振动舒适度研究典型成果,通过类比进行分析。

“ISO2631-1997”标准采用最大瞬态振动值(MTVV)来进行舒适度评估,其表达式为:

$$MTVV = \max \{ a_1(t_0), a_2(t_0), a_3(t_0), \dots, a_m(t_0) \} \quad (40)$$

式中: $a_m(t_0) = \sqrt{\int_{t_0}^t [a_m(t)]^2 dt}$ 。

其最大瞬态振动值与舒适程度关系见表3。

表3 最大瞬态振动值与舒适程度关系表

MTVV/ (mm·s ⁻²)	<315	315~630	500~1 000	800~ 1 600	1 250~ 2 500	>2 000
舒适程度	没有 不舒适	稍有 不舒适	比较 不舒适	非常 不舒适	极不 舒适	

“BS 6472-1992”标准采用振动计量(VDV)来进行舒适度评估,其表达式为:

$$VDV = \sqrt[4]{\int_0^t [a(t)]^2 dt} \quad (41)$$

振动计量与舒适程度关系见表4。

表4 振动计量与舒适程度关系表

环境	比较不抱怨	抱怨	非常抱怨
住宅	100	200	400
办公室	200~400	400~800	800~1600
车间	800	1600	3200

通过相关试验得到四种频率(0.96、1.16、1.41、2.34 Hz)下的典型单跳激励时程曲线,如图2各图所示。

基于上述4种激励模式,开展不同性能等级的水工高性能面板舒适度性态对比分析,通过优化水工高性能面板中混凝土材料特性,设置普通性能、高性能,以及超高性能3种等级进行水工高性能面板舒适度性态评估敏感参数分析,得到4种激励模式下的水工高性能面板舒适度性态评估结果见表5至表8。

由表5至表8可知,通过采用ISO标准、BS标准和 Meister 评价指标对不同性能等级的水工高性能

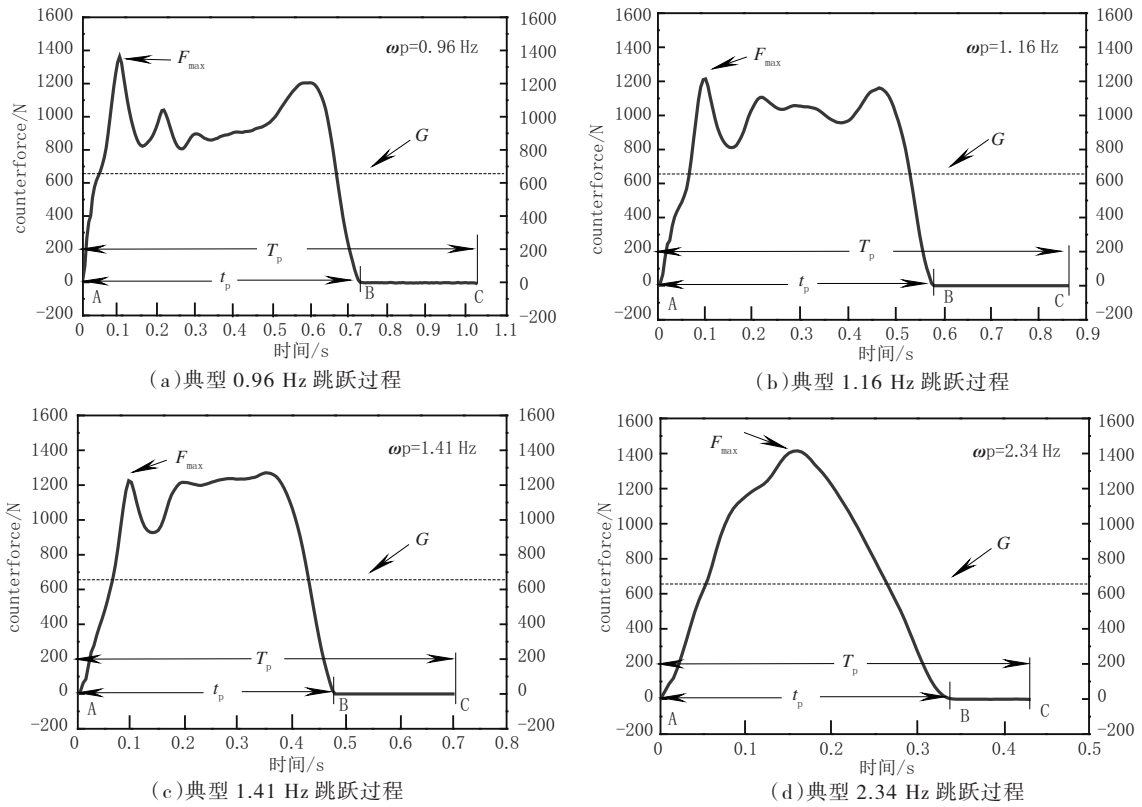


图2 四种频率下单跳激励历程曲线

表5 HJ-CDLEM-0.96Hz 水工高性能面板舒适度性态

性能等级	ISO 标准		BS 标准		Meister 评价指标		
	MTVV	舒适程度	VDV	舒适程度	峰值加速度	舒适程度	
普通性能	C15	68.66	没有不舒适	8.29	比较不抱怨	79.446	强烈感觉
	C40	48.41	没有不舒适	6.96	比较不抱怨	56.007	强烈感觉
高性能	C60	44.46	没有不舒适	6.67	比较不抱怨	51.443	强烈感觉
	C80	40.89	没有不舒适	6.39	比较不抱怨	47.308	强烈感觉
超高性能	C100	37.26	没有不舒适	6.10	比较不抱怨	43.108	强烈感觉
	C150	33.34	没有不舒适	5.77	比较不抱怨	38.571	强烈感觉
评估结论	能接受		能接受		能明显感觉		

表6 HJ-CDLEM-1.16Hz 水工高性能面板舒适度性态评估

性能等级	ISO 标准		BS 标准		Meister 评价指标		
	MTVV	舒适程度	VDV	舒适程度	峰值加速度	舒适程度	
普通性能	C15	41.67	没有不舒适	6.46	比较不抱怨	54.342	强烈感觉
	C40	29.36	没有不舒适	5.42	比较不抱怨	38.301	强烈感觉
高性能	C60	26.98	没有不舒适	5.19	比较不抱怨	35.179	强烈感觉
	C80	24.81	没有不舒适	4.98	比较不抱怨	32.350	强烈感觉
超高性能	C100	22.60	没有不舒适	4.75	比较不抱怨	29.477	强烈感觉
	C150	20.22	没有不舒适	4.49	比较不抱怨	26.374	强烈感觉
评估结论	能接受		能接受		能明显感觉		

能面板舒适度性态评估对比表明, 所得舒适度评估结论一致, 分别为“没有不舒适”、“比较不抱怨”、“强烈感觉”。采用“ISO 标准”、:BS 标准“:对水工高性能

能面板进行舒适度性态评估所得评估结论一致, 即“能接受”; 而采用的 Meister 评价指标对水工高性能面板进行舒适度性态评估所得评估结论为“能明显

表7 HJ-CDLEM-1.41Hz 水工高性能面板舒适度性态评估

性能等级	ISO 标准		BS 标准		Meister 评价指标		
	MTVV	舒适程度	VDV	舒适程度	峰值加速度	舒适程度	
普通性能	C15	32.72	没有不舒适	5.72	比较不抱怨	46.881	强烈感觉
	C40	23.05	没有不舒适	4.80	比较不抱怨	33.034	强烈感觉
高性能	C60	21.17	没有不舒适	4.60	比较不抱怨	30.339	强烈感觉
	C80	19.47	没有不舒适	4.41	比较不抱怨	27.899	强烈感觉
超高性能	C100	17.74	没有不舒适	4.21	比较不抱怨	25.420	强烈感觉
	C150	15.87	没有不舒适	3.98	比较不抱怨	22.743	强烈感觉
评估结论	能接受		能接受		能明显感觉		

表8 HJ-CDLEM-2.34Hz 水工高性能面板舒适度性态

性能等级	ISO 标准		BS 标准		Meister 评价指标		
	MTVV	舒适程度	VDV	舒适程度	峰值加速度	舒适程度	
普通性能	C15	22.81	没有不舒适	4.78	比较不抱怨	39.059	强烈感觉
	C40	16.06	没有不舒适	4.01	比较不抱怨	27.498	强烈感觉
高性能	C60	14.75	没有不舒适	3.84	比较不抱怨	25.252	强烈感觉
	C80	13.56	没有不舒适	3.68	比较不抱怨	23.218	强烈感觉
超高性能	C100	12.35	没有不舒适	3.51	比较不抱怨	21.152	强烈感觉
	C150	11.05	没有不舒适	3.32	比较不抱怨	18.921	一般感觉
评估结论	能接受		能接受		能明显感觉		

感觉”,所得评估结果稍有偏差。不足在于体现不出高性能性态对水工高性能面板舒适度的差异性。

因此,提取表5至表8中数据进一步进行对比,如图3各图所示。

由图3中(a)、(b)、(c)、(d)4图对比分析表明,对于不同激励频率下的水工高性能面板,表现出相同舒适度性态规律。通过对比六种不同性能等级的水工高性能面板,随着混凝土性能等级的提升,峰值加速度和MTVV指标呈现不断减小的趋势,在C40性能等级处出现拐点,之后保持线性关系,表明水工高性能面板随着混凝土性能等级的提升,呈现出越来越舒适的性态;而VDV指标伴随混凝土性能等级提升变化不大,对舒适度性态影响较小。

4 结论

通过提出改进单跳激励模型(HJ-CDLEM),研究了水工高性能面板模型的时空分布效应下的舒适度性态参数与评估指标,得到如下结论:

(1)基于Bachmann“单人跳跃荷载模型”提出的修正半正弦平方模型,建立了改进单跳激励模型(HJ-CDLEM),改进模型可以实现正反演分析,以及

能够在不同人群及不同频率下进行修正分析,便于进行深入的振动机理推导研究,得到了与水工高性能面板的舒适度性态评估相关的参数指标。

(2)通过选择“ISO标准”、“BS标准”,以及国际振动舒适度研究典型成果三种舒适度指标,通过类比分析表明:峰值加速度和MTVV指标随着混凝土性能等级的提升,体现出越来越舒适的性态;而VDV指标伴随混凝土性能等级提升变化不大,对舒适度性态影响较小。

参考文献:

- [1] 孙万泉,马震岳,赵凤遥.抽水蓄能电站振源特性分析研究[J].水电能源科学,2003,21(4):78-81.
- [2] 马震岳,董毓新.水电站机组和厂房振动的研究和治理[M].北京:中国水利水电出版社,2004.
- [3] 李炎.当前我国水电站(混流式机组)厂房结构振动的主要问题和研究现状[J].水利水电工程学报,2006(1):74-77.
- [4] DL 5073—2000,水工建筑物抗震设计规范[S].
- [5] Kerr S C, Bishop N W M. Human induced loading on flexible staircases[J]. Engineering Structures, 2001(23):37-45.
- [6] 刘军进,肖从真,潘宠平,等.跳跃和行走激励下的楼盖竖向振动反应分析[J].建筑结构,2008,38(11):108-110.
- [7] 朱光汉,王正玲.传入人体的振动和环境振动的评价与标准[J].振动与冲击,1992(3):66-70.

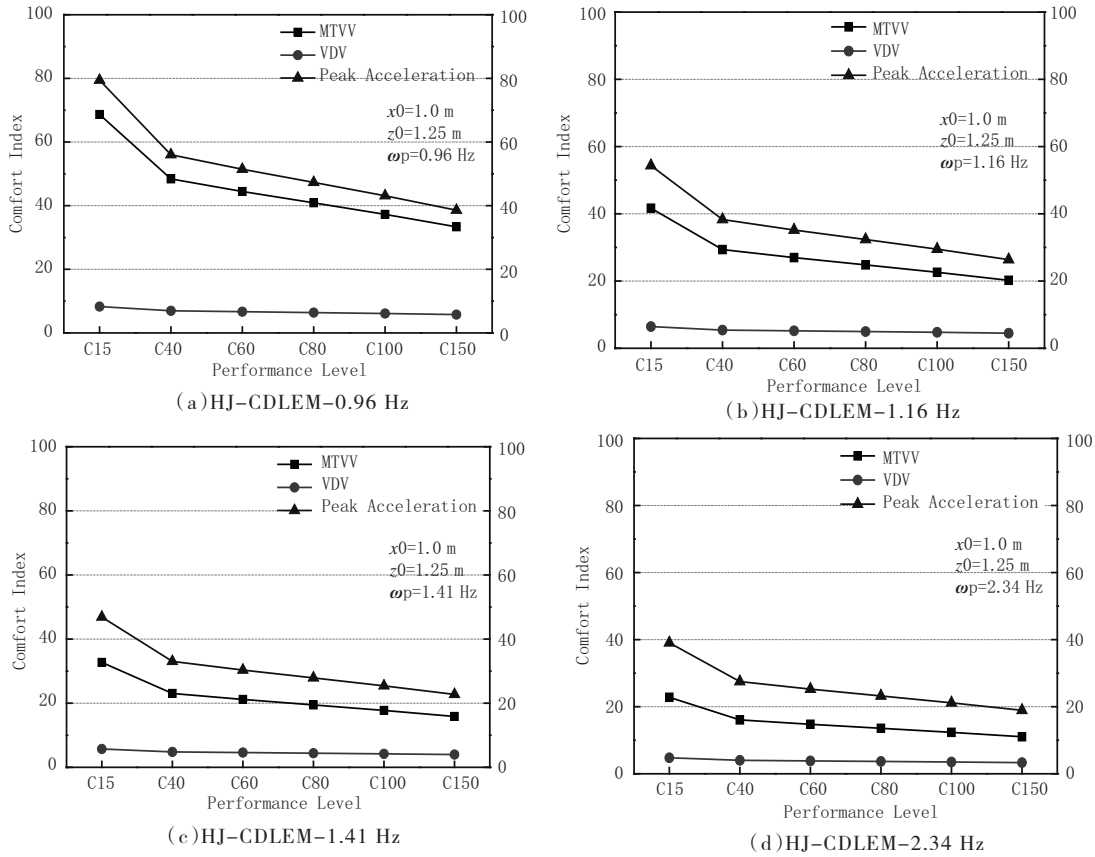


图3 不同性能水工高性能面板舒适度性态对比分析

[8] 何宗成,王柏生.大跨度人行天桥的振动影响测试与分析[J].振动与冲击,2006,25(4):138-141.

[9] Chen Y.Finite element analysis for walking vibration problems for composite precast building floors using ADINA: modeling, simulation, and comparison[J].Computers and Structures, 1999(72): 109-126.

[10] 何勇,金伟良,宋志刚.多跨人行桥振动均方根加速度响应谱法[J].浙江大学学报,2008,42(1):48-53.

[11] 韩小雷,陈学伟,毛贵牛,等.基于人群行走仿真的楼板振动分析方法及反应谱公式推导[J].建筑科学,2009,25(5):4-9.

[12] 谢伟平,洪文林,李霆.某体育馆楼板振动舒适度研究[J].噪声与振动控制,2010(2):80-83.

[13] Wolmuth B, Suttees J.Crowd-related failure of bridges [J].Civil Engineering, 2003, 156(3): 116-123.

[14] Brownjohn J, Pavic A.Vibration control of ultrasensitive facilities[J]. Structures and Buildings, 2006, 159(5): 295-306.

[15] 陈政清,华旭刚.人行桥的振动与动力设计[M].北京:人民交通出版社,2009.

[16] Allen D E, Rainer J H, Pernica G.Vibration criteria for assembly occupancies [J].Canadian Journal of Civil Engineering, 1985, 12 (3): 617-623.

[17] Rainer J H, Pernica G, Allen D E.Dynamic loading and response of footbridges[J].Canadian Journal of Civil Engineering, 1988, 15(1): 66-71.

[18] Kasperski M.Men-induced dynamic excitation of stand structures [A].15th ASCE Engineering Mechanics Conference[C].June 2-5, 2002.

[19] 陈隽,王玲,陈博,等.跳跃荷载动力特性与荷载模型实验研究[J].振动工程学报,2014,27(1):16-24.

[20] Bachmann H.Durch Menschen verursachte dynamische Lasten und deren Auswirkungen auf Balkentragwerke [J].Birkh?user Basel, 1988,31(11):77-91.

[21] R.Szilard.陈太平,译.Theory and analysis of plates classical and numerical methods[M].北京:中国铁道出版社,1984.

[22] 杨耀乾.薄壳理论[M].北京:中国铁道出版社,1984.

[23] 钟阳,张永山.四边固支弹性矩形薄板的自由振动[J].动力学与控制学报,2005,3(2):68-72.

[24] 鲍四元,邓子辰.哈密顿体系下矩形薄板自由振动的一般解[J].动力学与控制学报,2005,3(2):12-18.

[25] Warren A G.Free and forced oscillations of thin bars, flexible discs and annuli[J].PHIL.mag,9(1930):881-901.

[26] Anderson B W.Vibration of triangular cantilever plates by the rize method[J].JAM,1954,21(4):365-366.

[27] 王光远.建筑结构的振动[M].北京:科学出版社,1978.

[28] 曹志浩.矩阵特征值问题[M].上海:上海科技出版社,1980.

[29] 曹国熊.弹性矩形薄板的振动[M].北京:中国建筑工业出版社,1983.