

水跃区水流脉动压力频谱相似律研究

练继建 王继敏 辜晋德

(天津大学建筑工程学院, 天津 300072 E-mail: tju_luntan@126.com)

摘要 模型相似律是水工模型与原型之间的换算准则, 前人对水流脉动压力相似律已做了大量的研究, 但是对脉动压力频谱的相似准则至今仍没有达成共识. 本文将水跃作为研究对象, 对 1:1, 1:2 和 1:5 系列模型上测试所得的脉动压力频谱的主频和优势频段等进行了比较. 结果表明, 水跃强旋滚区脉动压力频谱符合重力相似律; 跃首跃尾脉动压力频谱主频和优势频段都很低, 不同比尺的脉动压力频谱较相近, 常被误认为 $\lambda_f = 1$, 但优势频段和频谱图归一化分析表明, 跃首跃尾脉动压力优势频段也基本符合重力相似律.

关键词 水跃 脉动压力 频谱 主频 相似律

水流脉动压力是泄水建筑物承受的重要荷载, 有时是导致泄水建筑物破坏的主要荷载. 由于高速水流的复杂性, 脉动压力数值计算的难度较大, 水流脉动压力取值主要通过水工模型实验来确定. 水流脉动压力相似律是水工模型与原型之间脉动压力的换算准则, 也是正确估计原型上动水荷载需要解决的关键问题. 脉动压力相似律问题, 是指按重力相似准则设计的水工模型中, 脉动压力幅值和频率的相似律.

脉动压力相似律问题早已引起了国内外水利工作者的广泛关注, 数十年来进行了大量的工作, 取得了相当的进展. 至今关于水流脉动压力的模型律尚未有统一的观点, 主要有两种不同的结论. 一种观点认为脉动压力的模型相似律符合重力相似准则, 即振幅比尺 $\lambda_{p'/\gamma} = \lambda_l$, 而频率比尺 $\lambda_f = \lambda_l^{-1/2}$; 另一种观点认为脉动压力不符合重力准则, 即振幅比尺 $\lambda_{p'/\gamma} = \lambda_l$, 而频率比尺 $\lambda_f = 1$. 这两种观点都是建立在一定数量的实验资料和理论分析的基础上. 夏毓常和张黎明^[1]通过对一些国内外已建工程泄水建筑物脉动压力的原型实测数据与模型实验数据对比分析得出结论, 认为若水流中大尺度漩涡紊动对脉动压力起主要贡献, 则脉动压力频率可以按照斯特鲁哈相似准则引申; 若水流中小尺度漩涡紊动对脉动压力起主要作用, 则模型中由于黏滞力消耗的能量无法忽略, 原型与模型数据之间存在明显的缩尺效应, 所以其脉动压力原型与模型之间不符合重力相似律. 赵耀南^[2]从理论出发分析了黏性不相似对紊

流脉动频率的影响, 并指出这可能是促成 $\lambda_f = 1$ 的原因之一; 王木兰^[3]介绍了脉动压力模型律的几种论点, 认为强紊流的脉动压力基本符合重力相似准则, 而对于溢流坝面、陡槽底部和厂房顶溢流等平顺边界上的水流脉动压力而言, 由于其脉动和边界层内水流有关, 因此不符合重力相似律. 阎诗武^[4]列举了近 50 年国内外脉动压力相似律的研究成果, 指出问题的焦点在于是否应用重力律换算脉动压力的幅值和频率, 认为黏滞性的影响可能导致脉动幅值偏小, 分离流的频率略低, 因此脉动压力的统计特征主要是均方根值与主频, 并指出在工程上按照重力相似律换算脉动压力是偏于安全的. 黄涛^[5]通过溢流坝的系列模型实验得出脉动压力频率不符合重力相似准则, 即 $\lambda_f = 1$. 崔广涛等^[6]在分析前人研究成果的基础上, 提出在突变流或渐变流边界上的脉动压力是符合重力相似律的. 张声鸣^[7]采用系列模型对水跃底部压力进行了分析, 得出了 $\lambda_f = 1$ 的结论. 文献^[8, 9]也对水流脉动压力的模型相似律进行了探讨, 并根据重力相似律设计了水弹性模型.

由于脉动压力产生的机理复杂, 脉动压力在测量技术以及信号处理方面未采用统一的标准, 使各家所得的结论不完全相同. 近年来, 测试技术和信号处理技术有了长足的进展, 因此对脉动压力进行系统的研究, 全面深入地揭示水流脉动压力的相似律, 为水工模型实验和工程设计提供更科学的依据是十分必要的.

1 水跃模型实验装置及实验方案设计

本实验装置如图 1 所示。水箱底部为出水口，联结有压出水段，避免了闸孔出流收缩断面的出现。水箱充水后底部形成有压出流，通过对水箱内水位的调节，在指定的位置形成水跃。预先在水跃出现的位置安装脉动压力传感器，传感器沿水槽纵向中心线布置。

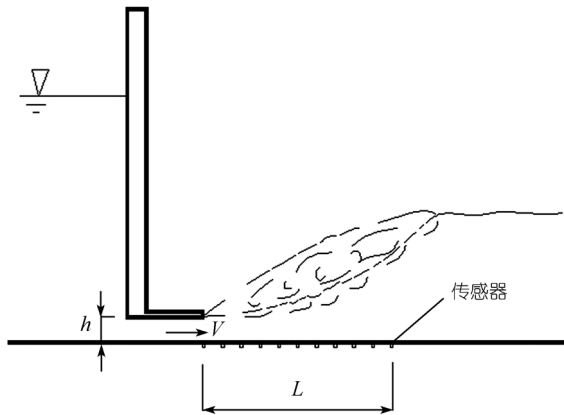


图 1 实验装置示意图

根据孔口开度的不同，该实验设计了 3 个不同的水跃比尺，3 个比尺的开度 e 分别为 10, 5 和 2 cm，相应的比尺为 1:1, 1:2 和 1:5。因为水跃的特性主要受 Fr 数的影响，因此以出水口断面 Fr 数 ($Fr = V/\sqrt{gh}$) 为相似准数，每一个比尺设计了 4 组不同的工况，其 Fr 数分别为 6.3, 6.08, 5.08 和 3.61；其中前 3 个工况 Fr 数均大于 4.5，属于稳定水跃，最后一个 Fr 数小于 4.5，属于不稳定水跃。

由于水跃的影响范围随比尺的减小明显减小，因此在进行不同比尺工况转换的时候，布置在底板上的传感器也随之变动。比尺减小时，传感器布置间距也减小，以求达到相同的精度。

2 结果分析

2.1 脉动压力强度相似律

将各个测点的脉动压力均方根值 σ 用跃首流速水头 $\rho V^2/2$ 无量纲化，得出各个测点的脉动压力强度系数，即 $\beta = \sigma / (\frac{1}{2} \rho V^2)$ 。将不同比尺工况下的测点位置用水箱出口的开度无量纲化，得出测点的相对位置 $X = L/h$ ， h 为跃前水深，在本实验中即为孔口开度 e 。取 X 为横坐标， β 为纵坐标，将不同比尺的水

跃脉动压力强度系数绘于同一张图，如图 2 所示。

图 2 的实验结果表明，不同开度下的水跃强度值基本集中在一条曲线附近，因此可以得出 Fr 数相等的情况下，不同比尺的水跃脉动压力强度系数沿程分布是一致的，也就是 $\lambda_\beta = 1$ 。由 $\beta = \sigma / (\frac{1}{2} \rho V^2)$ 可以推出 $\lambda_\sigma = \lambda_V^2$ ；又由于 $\lambda_V = \lambda_l^{0.5}$ ，最后可得 $\lambda_\sigma = \lambda_l$ ，即脉动压力强度符合重力相似律。

2.2 脉动压力主频分布特征

提取水跃底部沿程测点脉动压力的主频，以相对距离 X 为横坐标，主频值为纵坐标，将不同比尺工况下主频值绘于同一张图，如图 3 所示。

观察主频沿程分布图可以发现，水跃的主频沿程分布基本服从同一趋势。整个水跃主频都集中在低频段，在各个工况下主频最大值也不超过 7 Hz；水跃跃首主频很低，在 $X = 5 \sim 10$ 之间(水跃旋滚区)出现峰值，之后主频值沿程减小，当 $X > 20$ 之后主频值降至与跃首相当。

虽然在强旋滚区不同比尺的主频数值差距较大，但是在跃首和跃尾的大部分区域主频数值比较接近，往往会得出 $\lambda_{f_{max}} \approx 1$ 的结论。

2.3 脉动压力优势频段分布特征

考虑到脉动压力主频率的取得存在一定的随机性，下面对脉动压力优势频段进行分析。通过前面脉动强度相似的分析，可以看出在 $Fr = 6.3$, $Fr = 6.08$ 和 $Fr = 5.08$ 工况下，脉动压力强度系数 β 在 $X = 15$ 附近出现峰值；而在 $Fr = 3.61$ 情况下，脉动压力强度系数 β 在 $X = 10$ 附近出现峰值。选取各比尺下 β 最大的点，对比其优势频段及峰值频率(主频)，结果如表 1 所示。

从表 1 中可以看出，虽然某些工况下峰值频率十分接近，但其频谱优势频段却有明显差别。

选取 $Fr = 6.30$ 和 $Fr = 3.61$ 两组工况的部分测点，取其 50% 能量频段范围，将不同比尺优势频段范围绘于图上并拟合得到优势频段包络线如图 4 和 5 所示。由图 4 和 5 中可以看出，优势频段包络线范围明显不同，总体趋势是大比尺包络线范围较小，而小比尺包络线范围较大；在相同比尺情况下， Fr 数大则能量包络范围也较大。综合考虑以上优势频段的分析结果，可以认为脉动压力频率不符合 $\lambda_f \approx 1$ 的模型相似律。

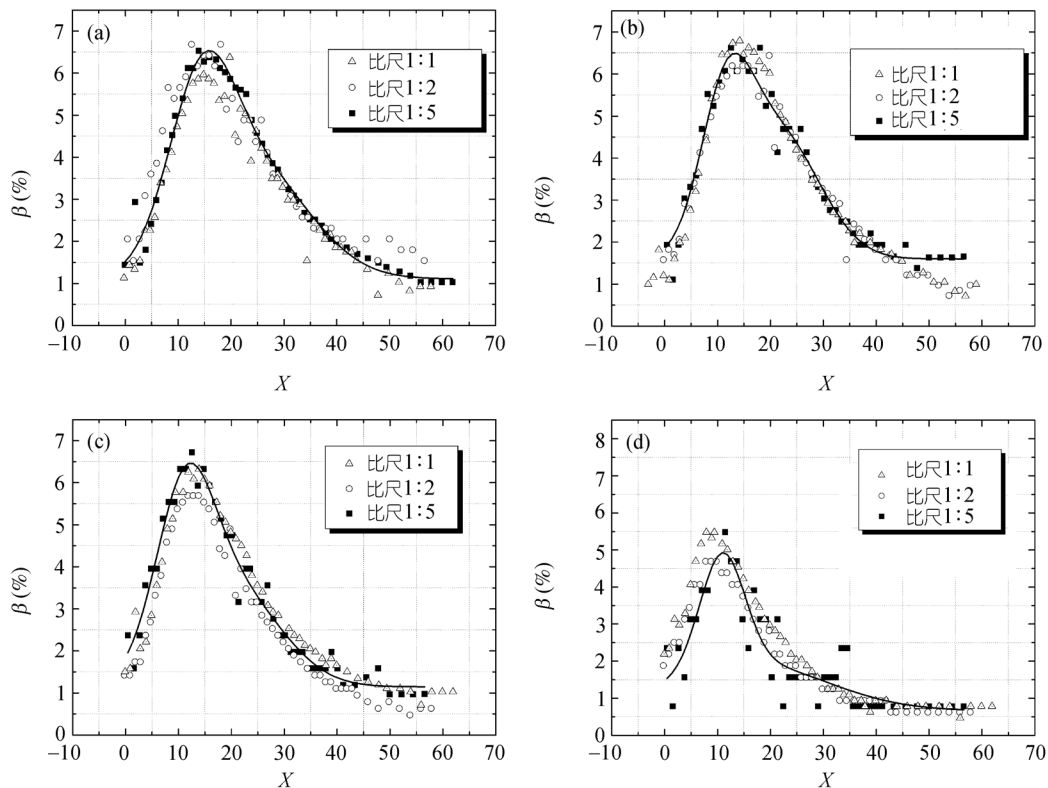


图2 不同 Fr 数水跃脉动压力强度系数分布图

(a) $Fr = 6.30$; (b) $Fr = 6.08$; (c) $Fr = 5.08$; (d) $Fr = 3.61$

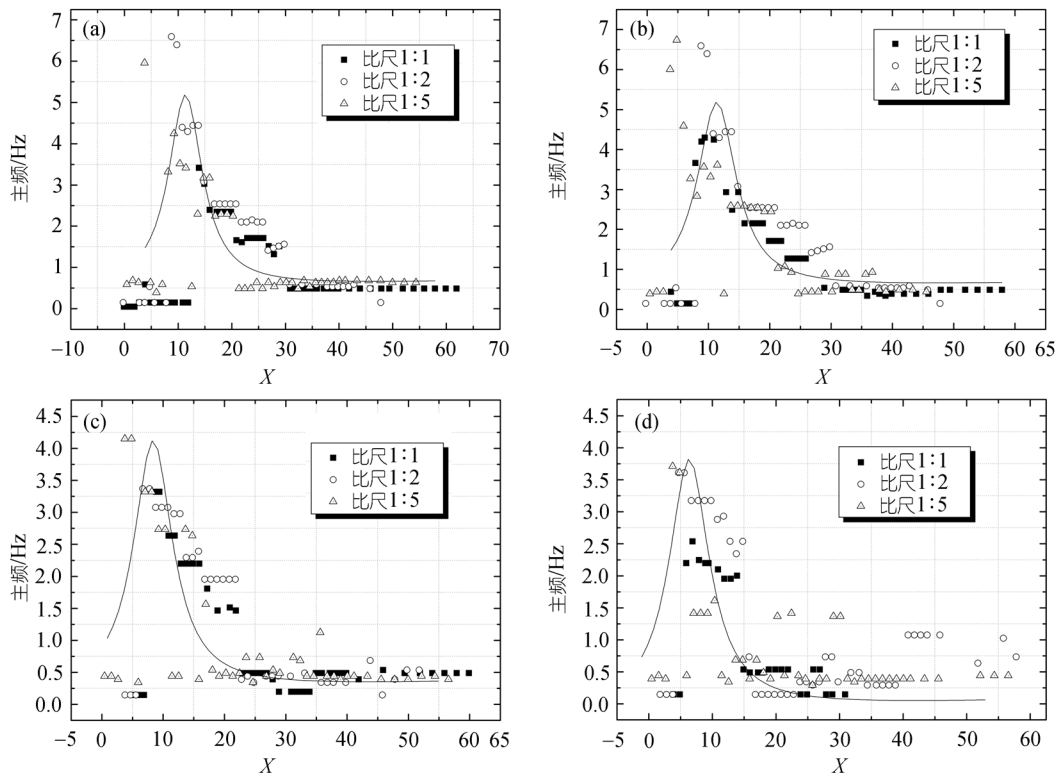


图3 不同 Fr 数水跃脉动压力主频沿程分布图

(a) $Fr = 6.30$; (b) $Fr = 6.08$; (c) $Fr = 5.08$; (d) $Fr = 3.61$

表 1 各工况优势频率与峰频列表

Fr	比尺	实验编号	优势频率段	峰值频率	测点号	相对位置 $X(L/h)$
6.3	1:1	2	0.78~6.25	3.03	16	14.89
	1:2	5	1.26~7.66	3.07	16	14.78
	1:5	9	1.9~12.6	3.36	14	14.75
6.08	1:1	1	0.97~5.22	2.93	16	14.89
	1:2	6	1.07~7.08	2.78	16	14.78
	1:5	10	1.46~11.9	3.52	14	14.75
5.08	1:1	3	0.87~3.90	2.20	16	14.89
	1:2	7	0.92~4.93	2.30	16	14.78
	1:5	11	2.09~7.37	4.19	14	14.75
3.61	1:1	4	1.17~4.19	2.20	11	9.39
	1:2	8	1.41~4.98	3.17	11	9.78
	1:5	12	2.44~9.17	5.03	9	9.25

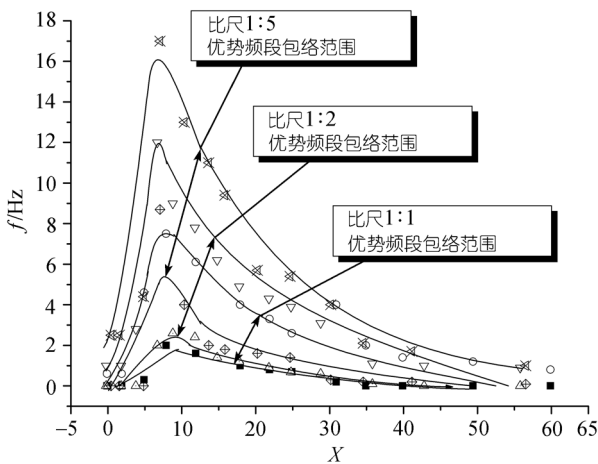


图 4 $Fr = 6.30$ 不同比尺优势频段包络线

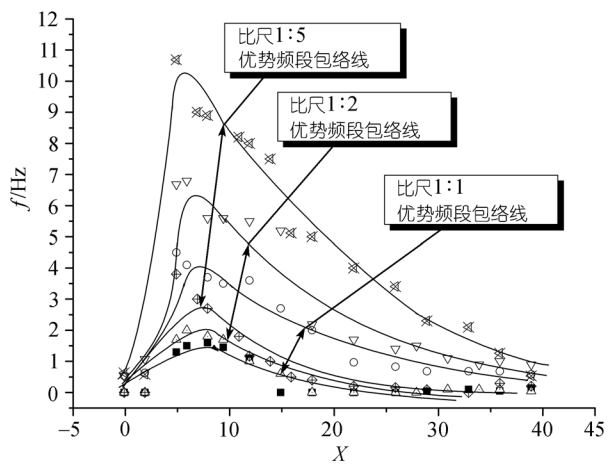


图 5 $Fr = 3.61$ 不同比尺优势频段包络线

按重力相似律准则, 频率的相似律则应符合斯特鲁哈(Strouhal)数准则, 即

$$St = \frac{fl}{V} = \text{const}, \quad (1)$$

其中, f 为水流脉动频率; l 是特征长度, 在此取孔口高度; V 为特征流速, 在此取孔口平均流速.

将纵坐标频率用斯特鲁哈数进行无量纲处理, 并将优势频段上下限的无量纲值绘于一个图上, 如图 6 和 7 所示. 可见水跃脉动压力沿程能量占 50% 的优势频段经斯特鲁哈数(St)无量纲化之后有一致的规律, 可以绘出一致的包络范围曲线, 表明脉动压力的优势频率段明显符合重力相似律.

2.4 沿程脉动压力频谱图特性及其相似律分析

由于不同比尺之间频谱能量相差量级, 若不加以处理就绘于同一图上就无法显示出小比尺的频谱特性. 而幅域的相似关系在前面已经有了详细的讨论, 因此在此处为了除去幅域的影响, 将不同比尺频谱用各自的峰值作归一化处理, 将不同比尺的频谱转换到同一尺度上进行比较. 图 8 是不同 Fr 数的水跃脉动压力强度峰值点频谱图.

由图 8 的实验结果可以看出, 各个测点的频谱形态相似, 主频都集中在 5 Hz 以下; 随着比尺的减小, 频谱峰值频率(主频)向高频移动; 对照频谱的优势频率列表, 可以发现随着比尺的减小, 优势频段向高频

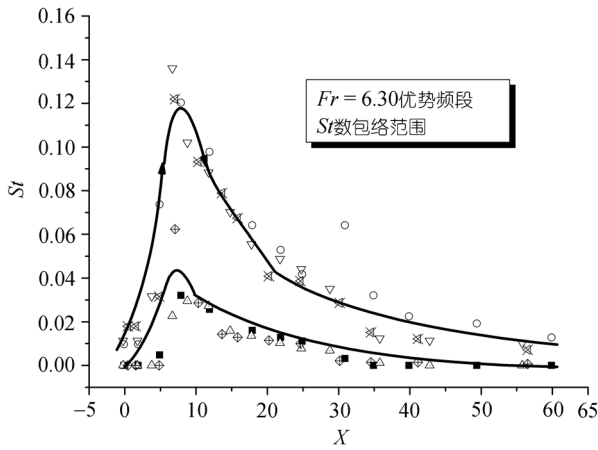


图6 $Fr = 6.30$ 优势频段无量纲包络线

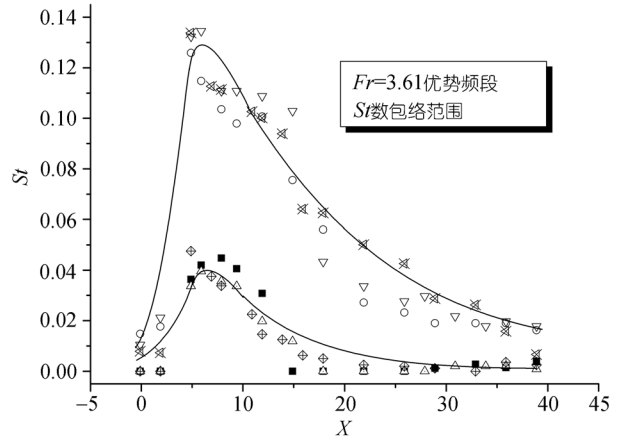


图7 $Fr = 3.61$ 优势频段无量纲包络线

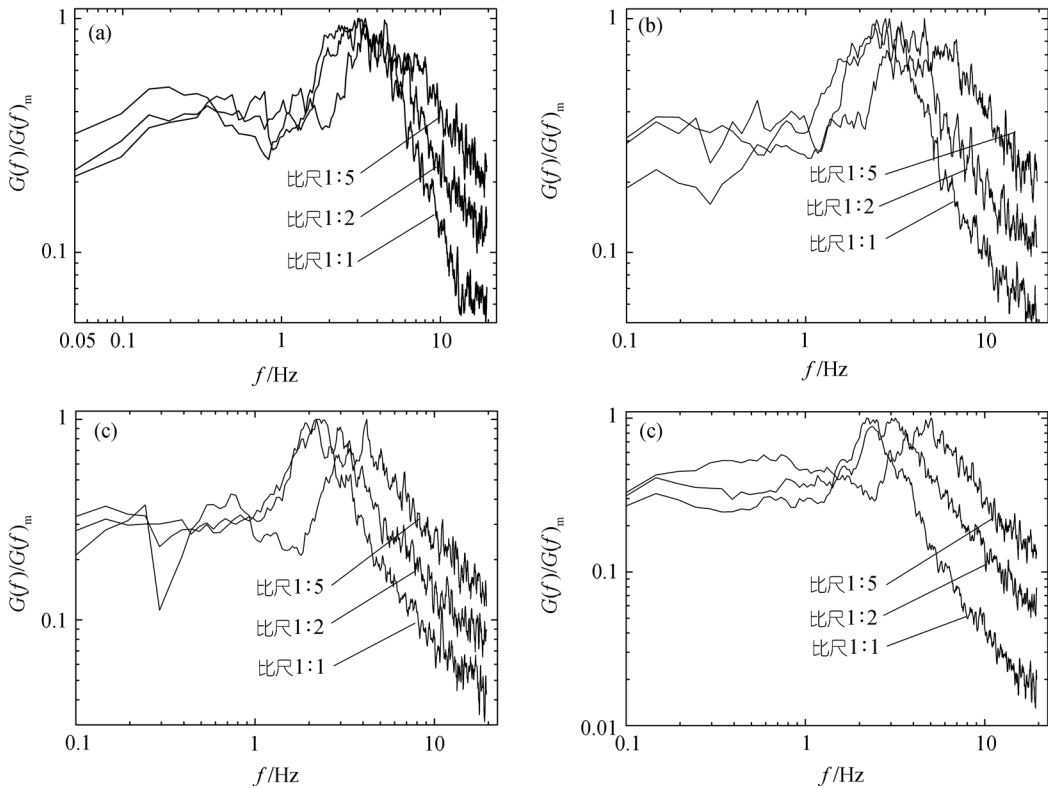


图8 不同 Fr 数水跃脉动压力强度峰值点频谱图

(a) $Fr = 6.30$; (b) $Fr = 6.08$; (c) $Fr = 5.08$; (d) $Fr = 3.61$

移动，且频段有所拓宽。比较频谱的高频部分，高频区域分离明显。

提取不同比尺的频谱，仍然按照各自峰值归一化。横坐标用斯特鲁哈数无量纲化，将所得的结果绘制如图9所示。

由图9可以看出，经过 St 数无量纲化后，不同比尺的谱图无论是峰值位置还是能量分布情况，都符合得相当好，高频部分吻合程度也比较高。因此可以说，对于水跃脉动强度系数最大的位置，运用重力相似准则换算不同比尺的频率是合适的。

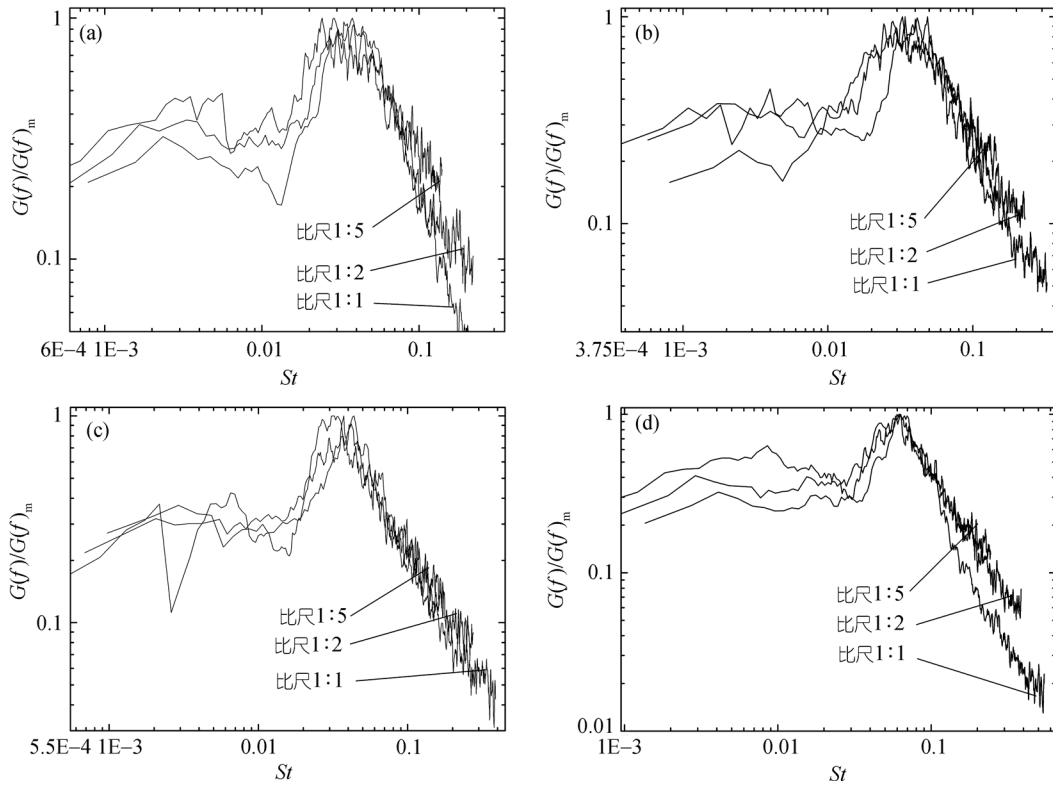


图 9 不同 Fr 数水跃脉动压力强度峰值点频谱图
 (a) $Fr = 6.30$; (b) $Fr = 6.08$; (c) $Fr = 5.08$; (d) $Fr = 3.61$

图 9 选取的是各个水跃脉动强度最大的位置，该位置由于水流旋滚剧烈，脉动频谱主频也比沿程其他位置较高。其他位置的优势频率基本集中于 3 Hz 以下。

进一步选水跃沿程的其他测点，提取其脉动压力频谱，用对数坐标绘于同一图上，同时绘出经 St 数无量纲后的谱图，结果如图 10 所示。

对比频谱图和无量纲谱图可以看出，除了跃首之外，不同比尺的无量纲谱图吻合较好。在实际实验过程中可以观察到跃首部分水流并非稳定，而是在孔口出流和旋滚水流共同作用下在出水口附近波动，因此此处水流脉动与其他位置并不完全相同。观察发现跃首水流除一个明显峰频之外，仍然存在另一个能量较小的峰。 $Fr = 6.08$, $Fr = 5.08$ 和 $Fr = 3.61$ 三个 Fr 数的水跃跃首脉动压力谱图如图 11 所示，可以发现无量纲谱图中不仅主峰位置相近，次峰位置也重合得很好。

3 结语

水流脉动压力的频谱相似律一直存在争议，争议的焦点是脉动压力频谱是否符合重力相似律。本文以水跃区水流脉动压力为研究对象，对 1:1, 1:2 和 1:5 系列模型上测试所得的脉动压力频谱的主频、优势频段和无量纲归一化频谱进行了分析。结果表明，水跃强旋滚区脉动压力频谱符合重力相似律；跃首跃尾脉动压力频谱主频和优势频段都很低，不同比尺的脉动压力频谱较相近，常被误认为 $\lambda_f = 1$ ，但从优势频段和频谱图归一化分析表明，跃首跃尾脉动压力优势频段也基本符合重力相似律。

受实验条件限制，本文实验中跃首最大流速仅为 6.2 m/s，与实际工程仍有较大的差距。由于实际工程中的紊流具有更高的流速以及雷诺数，水流边界层的影响可以进一步忽略，应该更加符合重力相似准则。因此认为本文的结论可以推广到实际工程中去。

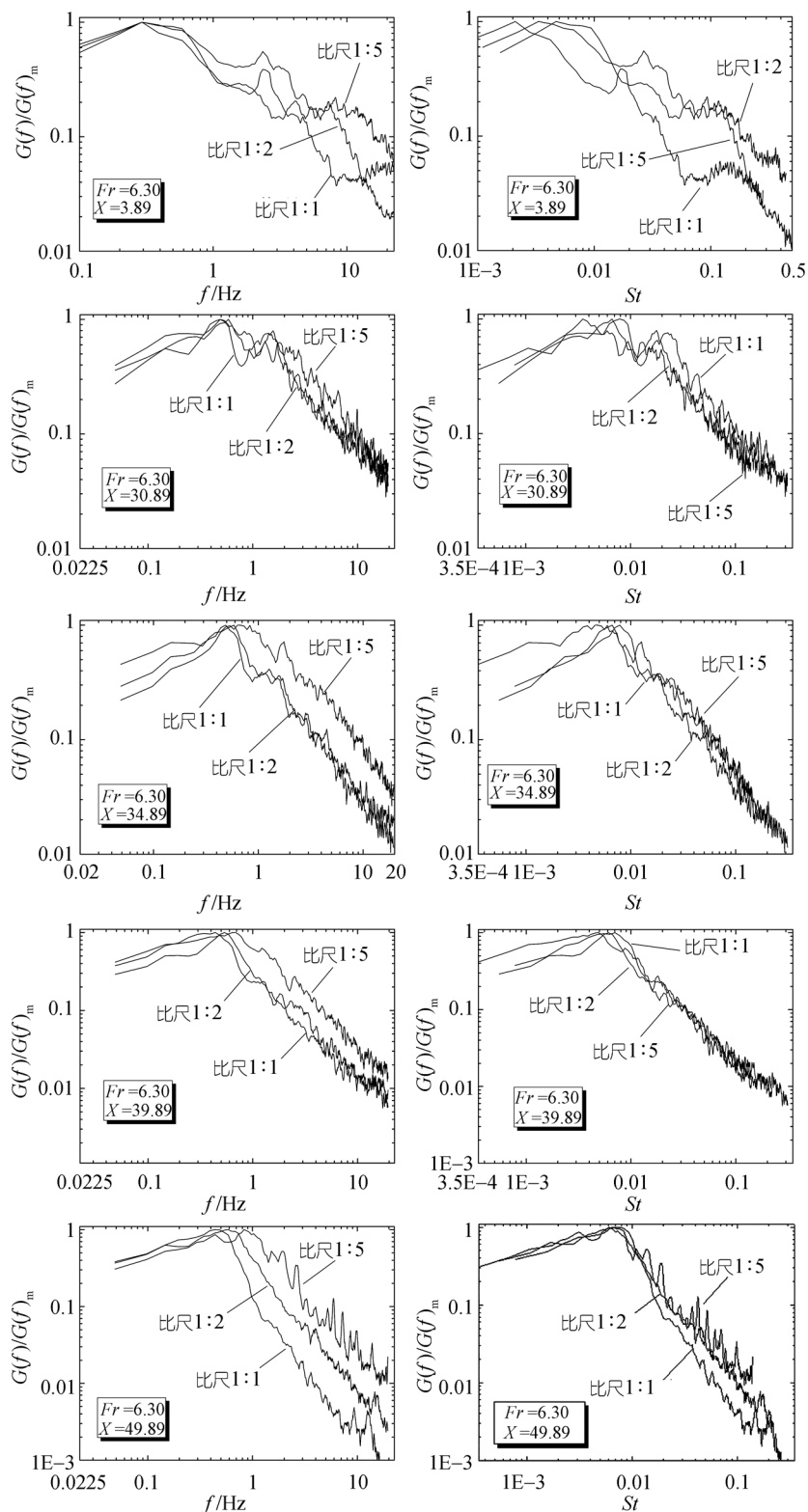


图 10 水跃沿程部分测点频谱图及无量纲谱图

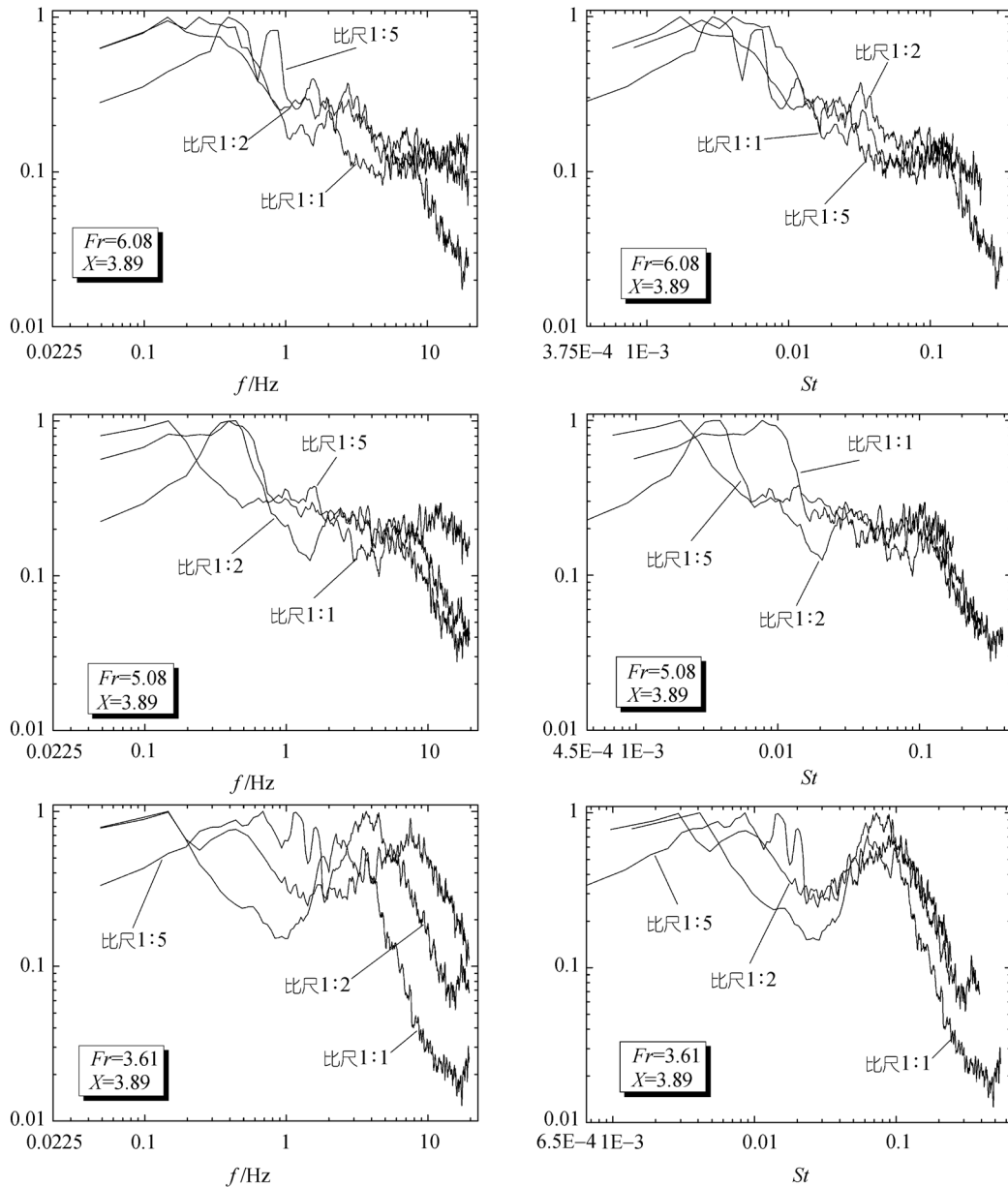


图 11 不同 Fr 数水跃跃首频谱图

参 考 文 献

- 1 夏毓常, 张黎明. 水工水力学原型观测与模型试验. 北京: 中国电力出版社, 1999
- 2 赵耀南. 重力相似水力模型中紊流微结构的相似律. 水利学报, 1988, 8: 97—101
- 3 王木兰. 水流脉动压力的数据处理、工程应用及机理研究的进展. 河海大学科技情报, 1990, 9: 28—43
- 4 阎诗武. 泄水结构流激振动研究进展. 泄水工程与高速水流, 1984, 3: 42—62
- 5 黄涛. 水流脉动压力特征及其模型相似律. 水利学报, 1993, 1: 51—57
- 6 崔广涛, 练继建, 彭新民, 等. 水流动力荷载与流固相互作用. 北京: 中国水利水电出版社, 1999. 46—51
- 7 张声鸣. 水跃区水流脉动压力相似律的试验研究. 长江科学院院报, 1991, 12: 1—9
- 8 练继建, 崔广涛. 水工结构水弹性模型模拟方法与应用. 水利水电技术, 2001, 32(12): 20—21
- 9 练继建, 崔广涛, 黄锦林. 导墙结构的流激振动研究. 水利学报, 1998, 11: 33—37, 68