

乘性噪音和加性噪音效应对脉孢菌生物钟体系 内信号随机共振的增强^{*}

施建成^{1)†} 郎秀峰²⁾

1) 广西师范学院化学系, 南宁 530001)

2) 北京航空航天大学理学院, 北京 100083)

(2008 年 5 月 28 日收到, 2008 年 8 月 6 日收到修改稿)

利用有和无外信号作用的脉孢菌生物钟体系, 研究了与加性噪音相关或不相关的乘性噪音对加性噪音诱导出的内信号随机共振的影响作用. 结果表明: 无外信号的情况下, 不论加性和乘性噪音相关与否, 当乘性噪音强度小于临界值时, 乘性噪音的加入使加性噪音诱导产生的内随机共振强度得到增强; 当大于其临界值时, 加性噪音的随机共振强度却得不到进一步增强. 这说明脉孢菌生物钟体系能抵抗外噪音的干扰而维持自身的生理节奏. 当加入外信号时, 对于乘性和加性噪音不相关的情况, 发现存在最佳频率(0.003 Hz)的外信号能使加性噪音诱导出的内信号随机共振得到增强. 然而对于乘性和加性噪音相关的情况, 所有频率的外信号都对加性噪音诱导出的随机共振产生抑制的作用. 此外, 发现噪音的相关度可以控制生物钟体系内信号随机共振的强度, 且存在合适范围的值使体系的随机共振强度得到增强.

关键词: 噪音, 脉孢菌生物钟体系, 内信号随机共振

PACC: 8220M, 8220F, 8710

1. 引言

生物钟在自然界中从单细胞植物到哺乳动物包括人类^[1-3]都普遍存在. 它可以调节有机体的生理节奏来适应周围环境(如温度, 气候等)的周期变化, 并促使生命有机体构建一套有效的起居周期. 但是, 一些有机个体(以人为例), 由于工作和学习等各种原因使其生理节奏很难趋向于自然循环周期, 他们的生物钟因比日常的生理节奏推迟或提前而产生了各种综合症, 如情绪低沉, 睡眠紊乱等^[4]. 因此如何最佳地调整生物钟在实际生活中就显得尤为重要. 在生物机体中, 生理节奏的产生机理源于基因控制, 也就是生物钟蛋白对自身基因的转录过程有抑制作用^[5,6]. 一般来说, 生理节奏的核心机理可用脉孢菌生理振荡器模型来描述^[7]. 它是基于自动调节基因表达的负反馈环机理模型的一个典型代表. 因此从该模型中获得的结果可很容易地推广到其他生物钟体系中.

自从 80 年代发现随机共振以来^[8], 噪音的建设性作用一直是过去的几十年中非线性科学领域的一个研究热点^[9-19]. 例如, Hou 等^[14]发现生物钟体系中的内噪音对其随机共振现象的产生能起积极的作用. Yi 等^[16]研究了外噪音对生物钟体系内随机共振的影响作用. 但这些研究仅考虑了一种噪音来源. 实际上, 生物钟体系通常会受到不同来源噪音的影响. 同时由于生物钟体系控制参数的值可随外界因素(外噪音)的变化而发生变化, 这可能会对由生化反应的随机本质引起的内噪声产生一定的影响. 因此在研究脉孢菌生物钟体系时需要考虑内和外噪音之间的相互作用. 内噪音和外噪音之间的相互作用称为噪音之间的相关性, 其强弱可用噪音相关强度值的大小来衡量^[20]. Jia 等^[21]研究了内和外噪音的协同作用对生物钟体系相干共振的影响, 但他们仅研究了内和外噪音是各自独立的, 没有相关性的情况. 然而事实上, 生物钟体系中内和外噪音之间的相关性是不可避免的, 那么噪音的相关性对生物钟体系生理节奏的影响如何? 噪音之间相关和不相关的情况

^{*} 广西省教育厅科研基金(批准号: 200707LX178)资助的课题.

[†] E-mail: mfaic668@sina.com

下,生物钟体系的生理节奏有何异同?这方面的研究至今还未见报道.因此我们认为这方面的研究可能具有潜在的实用性和创新性.

乘性噪音可定性地看作是体系的外噪音,而加性噪音则可代表体系内部产生的噪音(内噪音)^[22].本文以脉孢菌生物钟体系为研究对象,主要目的是研究与加性噪音(内噪音)相关或不相关的乘性噪音(外噪音)和外信号的协同作用将如何影响脉孢菌生物钟体系的内随机共振行为.通过获得的结论为生物钟生理节奏的研究提供理论依据.研究结果表明,加性和乘性噪音之间相关或不相关的情况下,噪音与外信号的协同作用分别对脉孢菌生物钟体系的随机共振行为能产生不同的影响作用,而且噪音的相关强度也直接影响着体系的随机共振行为.这些结果进一步展示了噪音在生命体系中的积极作用,可帮助人们从新的角度去认识生命体如何利用和开发周围环境的噪音来实现自身的某些功能.

2. 动力学模型

选取具有代表性的三变量脉孢菌生物钟模型^[14, 19](如图 1 所示)作为研究对象.该体系的时间演化方程可表示为

$$\begin{aligned}\frac{d[M]}{dt} &= v_s \frac{K_I^n}{K_I^n + [P_N]^n} - v_m \frac{[M]}{K_M + [M]}, \\ \frac{d[P_C]}{dt} &= K_s [M] - v_d \frac{[P_C]}{K_d + [P_C]} - K_1 [P_C] + K_2 [P_N], \\ \frac{d[P_N]}{dt} &= K_1 [P_C] - K_2 [P_N],\end{aligned}\quad (1)$$

其中,三物种 $[M]$ 、 $[P_C]$ 和 $[P_N]$ 分别表示生物钟基因 mRNA、细胞液和核中生物钟蛋白的浓度.参数 v_s 表示生物钟基因的转化速率,由于它的值可随外界因素的变化而发生变化,因此被选为控制参数.其他参数的物理性质及它们的值列于表^[14, 19],在模型中涉及的反应步骤及其相应的转化速率列于表^[14, 19].当 v_s 作为控制参数时,经过线性稳定性分析可以得到体系的分岔图(见图 2).从分岔图可看出体系的分岔点 $v_s^* \approx 0.257$,当所选控制参数 $v_s < 0.257$ 时,体系处于稳定态的区域,而当 $v_s > 0.257$ 时,体系处于振荡态的区域.

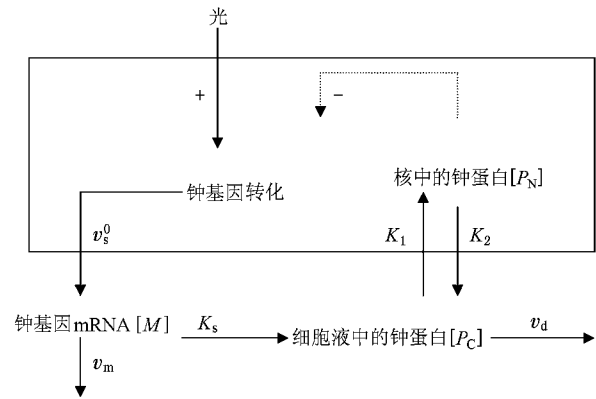


图 1 脉孢菌生物钟模型示意图

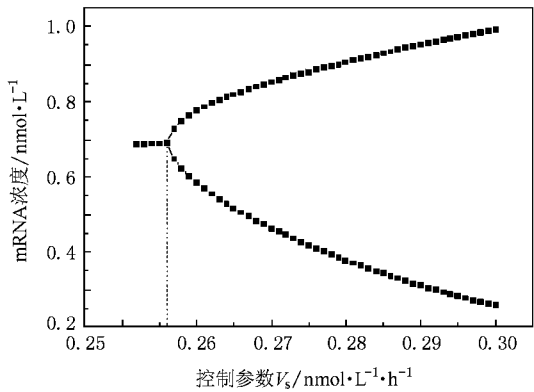


图 2 确定性方程(1)的分岔图 分岔点为 0.257

表 1 公式(1)中所使用的参数及其物理意义

符号	参数	数值
v_s	生物钟基因转录速率的控制参数	—
$K_I/\text{nmol} \cdot \text{L}^{-1}$	核蛋白施压于基因转录的阈值	0.2
n	表征施压的希尔系数	4
$K_m/\text{nmol} \cdot \text{L}^{-1}$	与 mRNA 降解相关的米氏常数	0.2
K_s/h^{-1}	mRNA 转化为钟蛋白的速率值	2.0
$K_d/\text{nmol} \cdot \text{L}^{-1}$	与钟蛋白降解有关的米氏常数	0.1
K_1/h^{-1}	钟蛋白的输入速率	0.2
K_2/h^{-1}	钟蛋白的输出速率	0.2

表 2 反应步骤及其速率方程式

反应步骤	类别	转化速率
$G \rightarrow M + G$	钟基因的转录	$W_1 = a_1 \cdot V = \frac{v_s K_I^n}{K_I^n + [P_N]^n} \cdot V$
$M \rightarrow$	mRNA 的降解	$W_2 = a_2 \cdot V = \frac{v_m [M]}{K_m + [M]} \cdot V$
$M \rightarrow P_C + M$	mRNA 的转化	$W_3 = a_3 \cdot V = K_s [M] \cdot V$
$P_C \rightarrow$	胞液钟蛋白的降解	$W_4 = a_4 \cdot V = \frac{v_d [P_C]}{K_d + [P_C]} \cdot V$
$P_C \rightarrow P_N$	钟蛋白的输入	$W_5 = a_5 \cdot V = K_1 [P_C] \cdot V$
$P_N \rightarrow P_C$	钟蛋白的输出	$W_6 = a_6 \cdot V = K_2 [P_N] \cdot V$

3. 结果与讨论

3. 1. 不相关乘性噪声和加性噪声调制下的内随机共振

为研究不相关的乘性噪声和加性噪声以及外信号的扰动对体系内随机共振动力学行为的影响,噪声和外信号分别加到状态变量 M 上,因此(1)式变为

$$\begin{aligned}\frac{d[M]}{dt} &= (v_s^0 + v_s^0 D \xi(t) + A \sin(w_e t)) \frac{K_1^n}{K_1^n + [P_N]^p} \\ &\quad - v_m \frac{[M]}{K_M + [M]} + k \gamma(t), \\ \frac{d[P_C]}{dt} &= K_3[M] - v_d \frac{[P_C]}{K_d + [P_C]} \\ &\quad - K_1[P_C] + K_2[P_N], \\ \frac{d[P_N]}{dt} &= K_1[P_C] - K_2[P_N],\end{aligned}\tag{2}$$

其中 v_s^0 是控制参数 v_s 的数值,在本文中 v_s^0 选为 0.256,以保证确定性体系处于稳定态. D 和 k 分别为所注入的乘性和加性噪声的强度, $\xi(t)$ 是具有零均值 $\xi(t) = 0$ 和单位方差 $\xi(t)\xi(t + \tau) = \delta(\tau)$ 的高斯白噪声, $\gamma(t)$ 是与 $\xi(t)$ 具有相同性质的高斯白噪声. A 和 w_e 分别表示外周期信号的振幅和频率. 不相关的乘性噪声和加性噪声的形式可表示为 $\xi(t)\gamma(t) = \gamma(t)\xi(t) = 0$. 方程(2)用欧拉方法进行数值模拟计算,时间持续 19000 s. 为定性地表征内信号随机共振(ISR),选取最后 16384 个点通过快速傅里叶变换来获得功率谱. 根据所得功率谱,信号和噪声的比值(信噪比,简称 SNR)定义为 $H(\Delta\omega/\omega_f)^{-1}$ ^[17],其中 H 是功率谱中最高峰的高度, ω_f 是最高峰所对应的频率, $\Delta\omega$ 是半峰宽. 文中每个 SNR 值都是通过 20 次独立运算求平均获得的.

下面着重考察与加性噪声不相关的乘性噪声和外信号的协同作用如何影响加性噪声诱导出的随机共振行为. 从图 3(a)可观察到,当不相关乘性噪声强度为 0.0001 时,体系的随机共振强度比不加乘性噪声时的明显得到增强,但随着乘性噪声强度继续增加到 0.0006 和 0.001 时却发现体系的随机共振强度基本不发生变化. 这说明乘性噪声的加入对加性噪声诱导出的随机共振有积极的增强作用,但当乘性噪声到达某一强度时,其强度的进一步增强对加性噪声的随机共振就起不到改善作用了. 也就是说体

系存在着临界的乘性噪声强度,当小于临界强度时,其可使体系的随机共振强度得到增强,大于临界强度时,噪声已达饱和状态,此时脉孢菌生物钟体系能抵抗乘性噪声的影响而维持自身动力学行为的稳定. 从图 3(b)也可看出,不同强度的乘性噪声影响下,加性噪声诱导的振荡频率不随乘性噪声强度变化而发生变化,说明脉孢菌生物钟体系能抵抗一定强度范围噪声的影响.

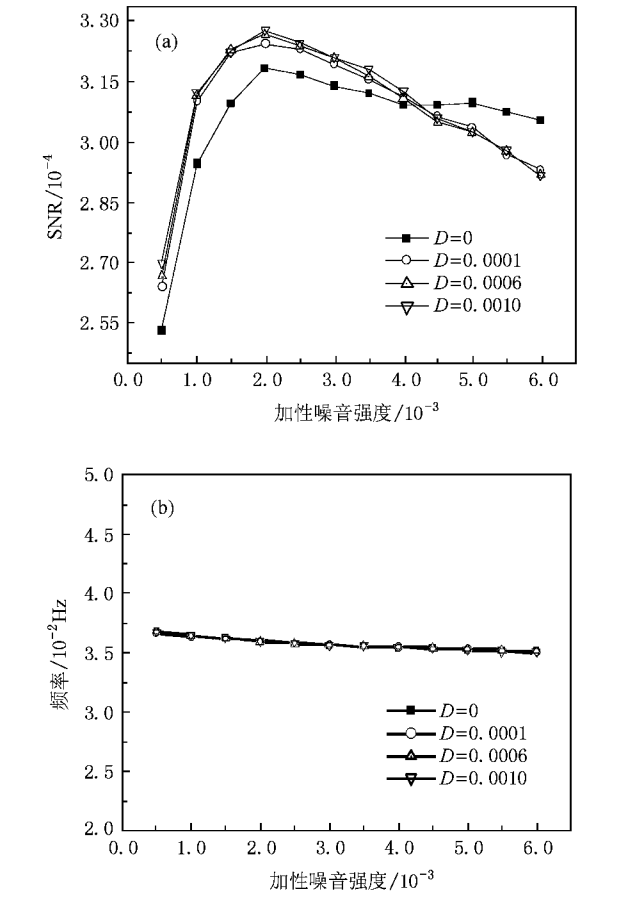


图3 $\lambda = 0$ 不同乘性噪声强度(D)下,状态变量的 SNR(a)和频率(b)分别随加性噪声强度变化的情况

为进一步验证上述结论,我们继续考察了不相关的加性噪声对乘性噪声诱导出的随机共振的影响作用并把结果显示于图 4 中. 从图 4 可看出,随加性噪声强度从 0.0001 增到 0.001,乘性噪声的随机共振强度逐渐增强. 该结果明显有别于乘性噪声对加性噪声随机共振的影响(见图 3(a)). 另外,从图 3(a)可观察到乘性噪声由 0.0001 增到 0.001 时曲线的形状基本不发生变化. 而在图 4 中,当加性噪声强度由 0.0001 增为 0.001 时各曲线的形状发生了较大的变化. 这些结果都说明体系对加性噪声的敏感度

强于对乘性噪音的,这可从噪音的作用机制得到解释,因为乘性噪音是噪音加在了确定性方程的控制参数项 v_s 上,而加性噪音则是噪音直接加在确定性方程中,噪音的两种作用方式对体系动力学行为的影响自然有差异,其中的机制值得进一步研究.

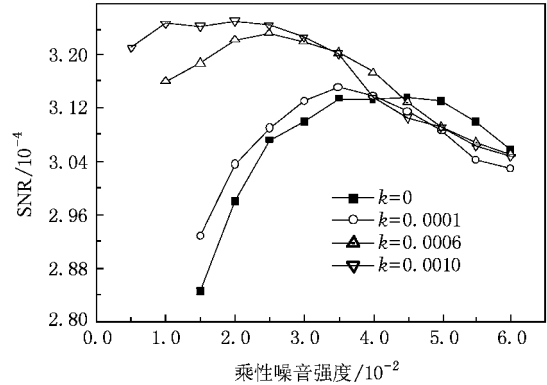


图 4 $\lambda = 0$,不同加性噪音强度(k)下,状态变量的信噪比(SNR)随乘性噪音强度变化的情况

1999 年, Gammaitoni 等^[10]在研究修正的施密特电路过程中指出通过改变加在施密特电路中的两个外信号的初相来实现对随机共振强度的控制. 受到该研究结果的启示, 外信号将会对生物钟体系的随机共振行为起到什么影响作用呢? 从图 5 可观察到, 体系的共振强度随外信号频率值的增大先增强, 到 0.003 Hz 时达最强, 然后随频率值的进一步增大而减弱, 而且只有频率为 0.003 Hz 时的共振强度比不加外信号时的强, 其他频率下的共振强度都比不加外信号时的弱. 这说明只有频率为 0.003 Hz 时的外信号才对体系的共振行为产生增强的作用, 即 0.003 Hz 是使体系的共振信号得到增强的最佳频率. 从图 6 可看出, 体系的随机共振强度在特定频率不同振幅值的外信号影响下都比不加外信号时的强, 而且随振幅值的增大而逐渐增强. 结果说明特定频率的不同振幅值的外信号对体系的共振行为都能起到增强的作用. 刘峰等^[23]的研究结果表明, 神经元网络体系存在一个频率为 15—60 Hz 的敏感范围使信噪比有一个很大的值. 但在本文所研究的生物钟体系中, 不是一个范围而是一个最佳的频率值使体系的信噪比达最大.

3. 2. 相关的乘性噪音及加性噪音调制下的内随机共振

由于脉孢菌生物钟体系控制参数 v_s 的值可随

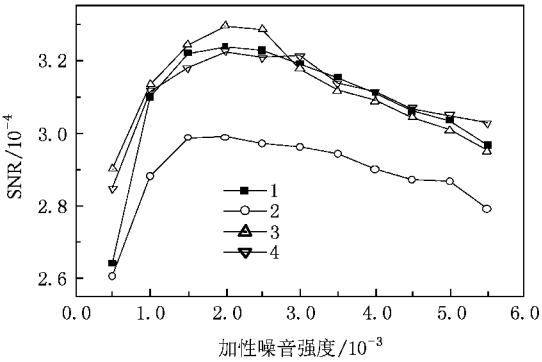


图 5 $\lambda = 0$,振幅值固定为 0.003 Hz,不同频率的外信号下,状态变量的信噪比(SNR)随加性噪音强度的变化情况. 曲线 1—4 分别是外信号频率为 0, 0.001, 0.003, 0.005 Hz 的情况, 乘性噪音的强度固定为 0.0001

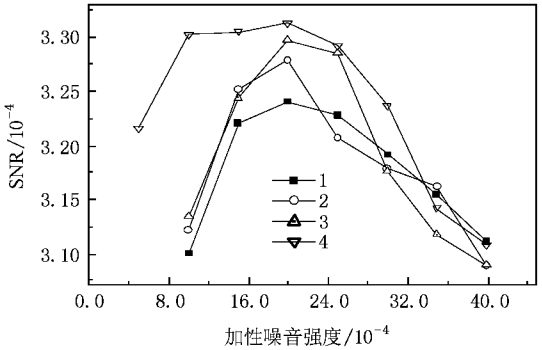


图 6 $\lambda = 0$,频率值为 0.003 Hz,不同振幅值的外信号下,状态变量的信噪比(SNR)随加性噪音强度的变化情况. 曲线 1—4 分别是外信号振幅值为 0, 0.001, 0.003, 0.004 的情况, 乘性噪音的强度固定为 0.0001

外界因素(外噪音)的变化而发生变化,而这种变化会影响 mRNA 的合成速率,这可能对由生化反应的随机本质引起的内噪声产生一定的影响. 因此在研究脉孢菌生物钟体系还需要考虑内和外噪音之间的相互作用. 乘性噪音可定性地看作是体系的外噪音, 而加性噪音则可代表体系内部产生的噪音(内噪音)^[22]. 本文把乘性噪音和加性噪音之间的相互作用称为噪音之间的相关性^[20], 其相关性的强弱用相关强度值 λ 衡量.

以下我们主要研究相关的乘性噪音和加性噪音是如何影响生物钟体系的内随机共振行为的. 相关乘性噪音及加性噪音的形式可表示为 $\xi(t)\chi(t) = \chi(t)\xi(t) = \lambda \sqrt{Dk}\delta(\tau)$ ^[20], 其中 λ 是乘性噪音和加性噪音之间的相关强度, D 和 k 分别为乘性和加性噪音的强度. 图 7—9 是噪音之间的相关度

(λ)为1时体系的内随机共振分别在不同乘性噪声强度、外信号频率(w_e)以及外信号振幅值(A)之下随加性噪声强度的变化情况.从图7(a)可看出,当乘性噪声的强度为0.0001时,加性噪声诱导出的随机共振强度明显增强.乘性噪声强度为0.0006和0.001时,随机共振的共振峰高度几乎没改变,但共振峰却随乘性噪声强度的增强而逐渐向左漂移.这说明存在着临界的乘性噪声强度,当乘性噪声小于临界值时,其可增强加性噪声的随机共振强度,大于临界值时,乘性噪声对加性噪声的随机共振强度不产生影响作用.另外,结果也说明乘性噪声的加入增强了体系对加性噪声的敏感度.从图8可看出,在不同频率的外信号作用下,体系的共振强度都比不加外信号时的弱,说明外信号对体系的共振行为起到了抑制作用.从图9可看出,体系的随机共振强度随振幅值的增大而减弱,说明外信号对体系的共振行为起到抑制的作用.

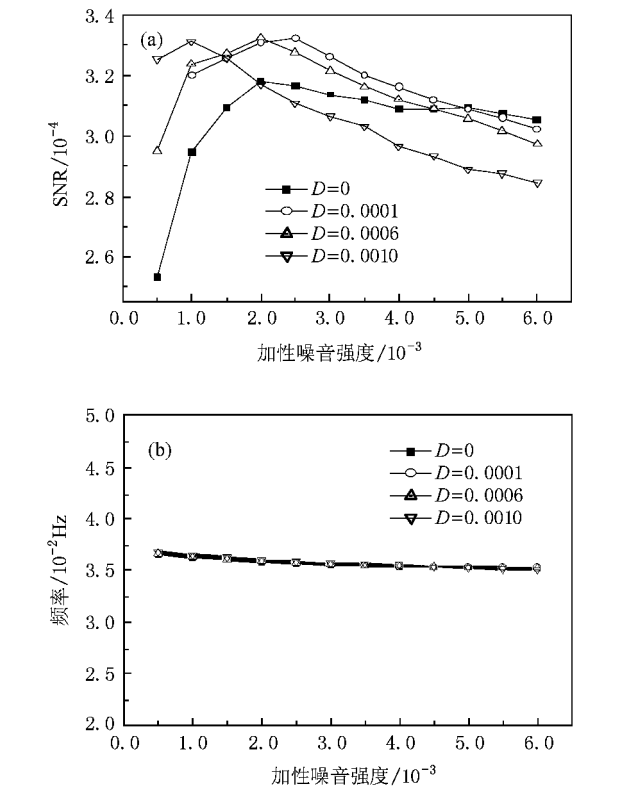


图7 $\lambda=1$ 不同乘性噪声强度(D)下,状态变量的 SNR(a)和频率(b)分别随加性噪声强度变化的情况

比较图3(a)和7(a)可看出,乘性噪声和加性噪声相关与否,乘性噪声对加性噪声诱导出的随机共振行为的影响作用相似,即乘性噪声的加入对加性噪声诱导出的随机共振有积极的增强作用,但当乘

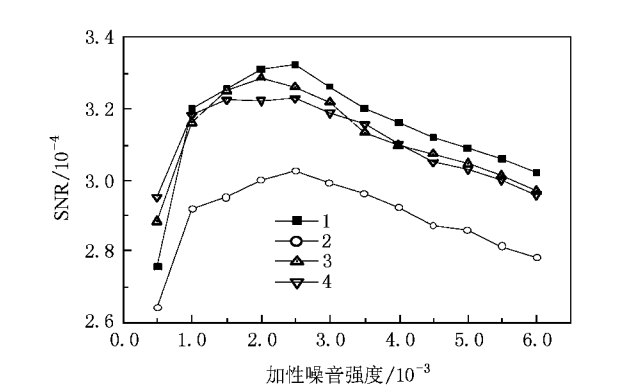


图8 $\lambda=1$,振幅值为0.003,不同频率的外信号下,状态变量的信噪比(SNR)随加性噪声强度的变化情况.曲线1—4分别是外信号频率为0,0.001,0.003,0.005 Hz的情况,乘性噪声的强度固定为0.0001

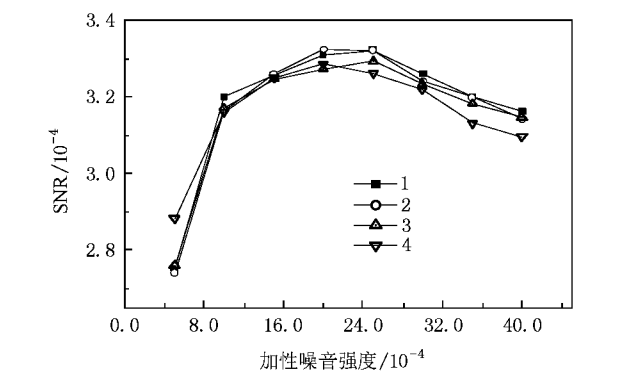


图9 $\lambda=1$,频率值为0.003 Hz,不同振幅值的外信号下,状态变量的信噪比(SNR)随加性噪声强度的变化情况.曲线1—4分别是外信号振幅值为0,0.001,0.003,0.004的情况,乘性噪声的强度固定为0.0001

性噪声到达某一临界强度时,其强度的进一步增强对加性噪声的共振强度就起不到改善的作用了.那么乘性和加性噪声之间的相关度对体系随机共振行为是不是没有影响作用呢?为进一步研究这个问题,我们考察了乘性噪声和加性噪声在不同相关度下随机共振强度的变化情况,结果显示于图10中.从图10可看出,乘性噪声和加性噪声无相关性时的随机共振曲线把不同噪声相关度的曲线分成了两部分.噪声相关度为0.4和0.6时,体系的内信号随机共振强度弱于噪声无相关时的共振强度,而为0.8和1时的共振强度却强于噪声无相关时的强度.在内随机共振的研究中,已经报道了许多方法来控制共振强度,如时间延迟^[24]、耦合水平^[25]以及控制参数与分岔点间的距离^[22]等.本研究发现噪声的相关度也可作为控制体系内随机共振强度的一种手段.

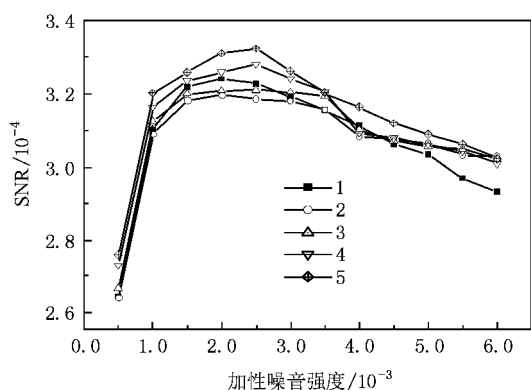


图 10 不同噪声相关强度(λ)下,状态变量的信噪比(SNR)随加性噪声强度的变化情况.曲线 1—5 的噪声相关强度 λ 分别为 0.0、0.2、0.4、0.6、0.8 和 1,乘性噪声强度固定为 0.0001

比较图 5 和 8 以及图 6 和 9,发现外信号对有或无相关噪声的内随机共振强度起到截然相反的影响作用.当噪声不相关时,存在着最佳频率的外信号能使体系的随机共振强度明显得到增强.而在噪声相关的情况下,外信号使体系的随机共振强度受到抑制.说明噪声的相关及不相关与外信号之间存在着完全不同的协同作用机制,从而使体系的随机共振现象产生差异.另外,比较图 3(b)和 7(b)发现,不论是噪声相关还是不相关,状态变量的频率(Hz)都不随噪声强度变化而发生变化.这说明了脉孢菌生物钟体系能抵抗一定强度范围的噪声的影响,即体系在噪声影响的条件下可维持内在的生理节奏保持不变.这结果也说明生物钟的生理节奏能抵抗外因素的影响而维持自身的恒定.

Jia 等^[21]研究了内和外噪声的协同作用对生物钟体系相干共振的影响作用.他们发现外噪声在一定的强度范围内可以增强内噪声相干共振.本研究发现,最佳频率的外信号可使不相关噪声诱导出的随机共振得到增强,合适的噪声相关度也可使体系的随机共振强度得到增强.众所周知,对于人体来说,不规则的生理周期振荡能导致生物钟紊乱和不

同的综合症.例如,睡眠提前和睡眠延迟综合症.上述结果可为治疗生理周期紊乱综合症提供理论的依据.如一些研究表明在强光之下可纠正人体的生理周期综合症^[26].此外,我们希望通过本工作的研究结果能更好地理解其他节奏机理,如心脏搏动节奏、呼吸节奏以及荷尔蒙水平的波动节奏等.

4. 结 论

通过利用有和无外信号作用的脉孢菌生物钟体系,用数值模拟的方法研究了与加性噪声相关或不相关的乘性噪声对加性噪声诱导出的内信号随机共振的影响作用.结果表明:不论加性和乘性噪声相关与否,当乘性噪声强度小于临界值时,乘性噪声的加入使加性噪声诱导产生的内随机共振强度得到增强,但大于其临界值时,加性噪声的随机共振强度却得不到进一步地增强.而且噪声诱导的生理振荡的频率基本不随噪声强度的变化而发生变化,这说明脉孢菌生物钟体系能抵抗外噪声的干扰而维持自身的生理节奏.当加入外信号时,对于噪声不相关的情况,发现存在最佳频率(0.003 Hz)的外信号能使体系的内信号随机共振得到增强;而对于噪声相关的情况,外信号使体系的随机共振受到抑制的作用.这些现象说明噪声的相关与否与外信号的协同作用机制是不同的,其中的物理机制值得进一步探讨.最后,发现噪声的相关度可作为控制脉孢菌生物钟体系内随机共振的参数,且发现存在着合适范围的值可使体系的随机共振强度得到增强.以上结论说明不同来源的噪声相关与否对脉孢菌生物钟体系随机共振的动力学行为起着重要的作用.通过调节不同来源噪声之间的相关度以及外信号的频率可以增强或抑制噪声引起的共振信号从而达到调节生物钟的目的.本文的模拟结果可对内随机共振现象的实验研究有理论的指导意义,同时可帮助人们从不同的角度更好地理解生物体系中其他生物节奏的机理.

- [1] Saunders D S 1977 *An Introduction to Biological Rhythms* (Glasgow and London: Blackie)
- [2] Winfree A T 1977 *Nature* **253** 315
- [3] Cloudsley-Thompson J L 1980 *Biological Clocks—Their Function in Nature* (London: Weidenfeld and Nicolson)
- [4] Mahowald M W, Schenck C F, Connor K A 1991 *Chaos* **3** 287

- [5] Dunlap J C 1999 *Cell* **96** 271
- [6] Young M W 2000 *Trends Biochem. Sci.* **25** 601
- [7] Leloup J C, Gonze D, Goldbeter A 1999 *J. Biol. Rhythms* **14** 433
- [8] Benzi R, Sutera A, Vulpiani A 1981 *J. Phys. A* **14** L453
- [9] Benzi R, Paris G, Sutera A 1981 *J. Phys. A* **14** 501

[10] Gamaitoni L , Löcher M , Bulsara A , Hänggi P , Neff J , Wiesenfeld K , Ditto W , Inghiosa M E 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 4574

[11] Zhang G J , Xu J X 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 557 (in Chinese) [张广军、徐健学 2005 物理学报 **54** 557]

[12] Goychuk I , Hänggi P 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 070601

[13] Ning L J , Xu W 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 1944 (in Chinese) [宁丽娟、徐 伟 2007 物理学报 **56** 1944]

[14] Hou Z H , Xin H W 2003 *J. Chem. Phys.* **119** 11508

[15] Li Q S , Zhu R 2001 *J. Chem. Phys.* **115** 6950

[16] Yi M , Jia Y 2005 *Phys. Rev. E* **72** 012902

[17] Hu G , Ditzinger T , Ning C Z , Haken H 1993 *Phys. Rev. Lett.* **71** 807

[18] Yi M , Jia Y , Liu Q , Zhan X 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 621 (in Chinese) [易 鸣、贾 亚、刘 泉、詹 璇 2008 物理学报 **57** 621]

[19] Gonze D , Halloy J , Gaspard P 2002 *J. Chem. Phys.* **116** 10997

[20] Jia Y , Yu S N , Li J R 2000 *Phys. Rev. E* **62** 1869

[21] Yi M , Jia Y , Liu Q , Li J R , Zhu C L 2006 *Phys. Rev. E* **73** 041923

[22] Li Y P , Li Q S 2004 *J. Chem. Phys.* **120** 8748

[23] Liu F , Wang J F , Wang W 1999 *Phys. Rev. E* **59** 3453

[24] Hou Z H , Xin H W 1999 *Phys. Lett. A* **263** 360

[25] Shinohara Y , Kanamaru T , Suzuki H , Horita T , Aihara K 2002 *Phys. Rev. E* **65** 051906

[26] Rosenthal N E , Joseph-Vanderpool J R 1990 *Sleep* **13** 354

Enhancement of internal stochastic resonance in *Neurospora*

circadian clock system :Multiplicative and

additive noises effects^{*}

Shi Jian-Cheng^{1)*} Lang Xiu-Feng²⁾

1) Department of Chemistry , Guangxi Teachers Education University , Nanning 530001 , China)

2) School of Science , Beijing University of Aeronautics and Astronautics , Beijing 100083 , China)

(Received 28 May 2008 ; revised manuscript received 6 August 2008)

Abstract

The effects of multiplicative noise on additive noise-induced internal signal stochastic resonance(ISR)are studied in a *Neurospora* circadian clock system driven by external signal or not . Two cases are investigated : multiplicative noise and additive noise are independent or correlated . The results show that in the two cases , there exists a critical intensity of multiplicative noise for the additive noise-induced ISR in the system without the external signal . When a multiplicative noise with intensity smaller than the critical level is introduced ,the strength of ISR can be significantly reinforced ; while the ISR behaviors cannot be further enhanced when the noise with the intensity larger than the critical level is introduced . The latter implies that the *Neurospora* system might be robust to environmental noise and sustain the intrinsic circadian rhythms . When the external signal is injected into the system , for the case of without correlation between two noises , there exists an optimal frequency (0.003 Hz) of the signal for the ISR information amplification , but for the case of with correlation between the two noises , the ISR is suppressed by the signal with any frequency . In addition , the correlation 's intensity between the two noises can also control the ISR , and there exists a proper range of correlation 's intensity for the ISR amplification .

Keywords : noise , *Neurospora* circadian clock system , internal signal stochastic resonance

PACC : 8220M , 8220F , 8710

^{*} Project supported by the Scientific Research Foundation of the Education Bureau of Guangxi Province ,China (Grant No. 200707LX178).

[†] E-mail : mfai668@sina.com