

基于弱测量操作下的量子关联动力学及关联转移

杜少将^{1,2} 夏云杰¹ 满忠晓¹ 张英杰¹ 段德洋¹

(¹ 曲阜师范大学物理工程学院山东省激光偏光与信息技术重点实验室, 山东 曲阜 273165)
² 济宁学院物理与信息工程系, 山东 曲阜 273155)

摘要 利用弱测量技术研究两量子比特的量子关联动力学演化和转移。有纠缠突然死亡现象产生的非最大纠缠初态经前选择测量操作后,在演化过程中不但能够提高量子关联强度,而且能够缩短甚至消除量子比特纠缠的突然死亡区域;而对于演化中无纠缠突然死亡的非最大纠缠初态,弱测量操作则会降低量子比特间关联强度。对初始处于最大纠缠态的粒子,弱测量操作不能增强粒子间的纠缠但可以优化量子关联中的量子失谐。弱测量在实现量子关联转移时的破坏极小,能够延迟纠缠的衰减,并可使量子纠缠的转移时间提前。另外腔场与量子比特间的耦合强度与系统耗散率的关系决定纠缠原子在腔中动力学演化,表现为马尔可夫和非马尔可夫过程。

关键词 量子光学;弱测量;共生纠缠;量子失谐;纠缠突然死亡;量子关联转移

中图分类号 O431 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1127001

Quantum Correlation Dynamics and Transfer Based on Weak Measurement

Du Shaojiang^{1,2} Xia Yunjie¹ Man Zhongxiao¹ Zhang Yingjie¹ Duan Deyang¹

(¹ Shandong Provincial Key Laboratory of Laser Polarization and Information Technology, Department of Physics, Qufu Normal University, Qufu, Shandong 273165, China)
² Department of Physics and Information Engineering, Jining University, Qufu, Shandong 273155, China)

Abstract Dynamics evolution of quantum correlation of two entangled qubits is investigated by using the techniques of weak measurement. The initial non-maximally entangled particles with entanglement sudden death happening are operated by pre-selection measurement, which not only improve the quantum correlations, but also can reduce or even eliminate entanglement sudden death region; As for the evolution of non-maximally entangled initial state without entanglement sudden death, the weak measurement will degrade the intensity of quantum correlation of qubits. The operation of weak measurement can not enhance entanglement between particles but can optimize quantum discord when particles are initially in maximally entangled state. Weak measurement has little effect on the quantum correlation transfer procession and can postpone the decay of entanglement, and even can make entanglement transfer happen earlier. In addition, the relation of system dissipation rate and coupling strength between the cavity field and qubits can also affect its dynamical evolution, showing Markov and non-Markov processes.

Key words quantum optics; weak measurement; concurrence; quantum discord; entanglement sudden death; quantum correlation transfer

OCIS codes 270.5580; 270.5570; 270.5585; 270.5290; 270.2500

1 引言

量子纠缠(QE)作为量子信息科学中的一种不可或缺的重要资源引起人们的广泛关注,后来人们发现量子系统存在另外一种非定点关联——量子失

谐(QD),同样可以作为信息载体实现其在量子通信领域中的应用,而且 QD 在演化过程中逐渐衰减,不会出现突然死亡现象, QE 和 QD 统称为量子关联。热库对量子系统的相互作用可利用马尔可夫和非马

收稿日期: 2013-05-22; **收到修改稿日期**: 2013-06-27

基金项目: 国家自然科学基金(61178012,11247240)

作者简介: 杜少将(1975—),男,博士研究生,讲师,主要从事量子光学与量子信息方面的研究。E-mail: dsjsd@126.com

导师简介: 夏云杰(1963—),男,博士,教授,主要从事量子光学与量子信息方面的研究。E-mail: yjxia_sd@126.com

(通信联系人)

尔可夫热库模型探究量子关联系统的动力学演化, 并利用量子测量方法对开放系统进行探测, 以获取系统包含的量子信息。冯·纽曼测量在量子力学中可以区分给定观测量的本征态, 但是同时此测量会造成量子态的塌缩使原来量子状态完全破坏。为减小测量仪器对量子系统退相干的影响, 1988年 Aharonov 等^[1]提出一种通过与量子系统的微弱相互作用来获取量子系统信息的弱测量方法, 该测量方法对系统造成极小的微扰, 可获得给定系统的前选择态和后选择态的系统弱值, 经过弱测量操作可获得不同自由度下量子关联信息; 2004年 Resch 等^[2]理论上提出了实验上可行的从局域单粒子可观测测量间的关联中提取联合弱值的方法; 2011年, 樊超等^[3-4]对光学相关性测量和原子测量对量子系统的影响分别进行了研究。2012年对于用于量子信息处理的刻槽平面离子芯片及腔量子电动力学的量子特性研究也深入开展^[5-7], Hofmann 等^[8]研究了怎样使量子克隆系统中的弱值出现在联合测量中; 同年 Puentes 等^[9]利用具有轨道角动量的二维指针态分析了提取单粒子算符高阶弱值的可能性。基于

弱测量技术的实验在很多领域也获得极大进展, 例如如何利用弱测量技术在腔量子电动力学(QED)中显示波粒二象性^[10-11]、量子系统波函数的直接测量^[12]以及对纠缠光子对极化自由度的弱值研究^[13]等。最近 Cheong 等^[14]发现了弱测量中信息获取与可逆性间的平衡关系, 这对量子信息的纠错和量子计算具有一定的应用前景。另外利用弱测量和量子测量方法对两体量子关联操纵以及运用前、后选择测量优化量子纠缠的方案也进行了深入的研究^[15-16]。本文通过利用弱测量对初态纠缠原子的前选择进行测量操作, 研究弱测量作用下对量子关联动力学演化特点及量子关联转移的影响。

2 理论模型

考虑初始处于纠缠的 Bell 态的两个二能级原子分别置于两个单模耗散腔中, 腔与外部热库发生相互作用。整个系统由两个子系统组成, 分别为腔与原子子系统和热库子系统, 每个子系统独立演化, 子系统的哈密顿量可表示为^[17-18]

$$H = H_{ac} + H_r + H_1 = \left[\frac{1}{2} \omega_0 \sigma_z + \omega_c a^\dagger a + g(\sigma_- a^\dagger + \sigma_+ a) \right] + \sum_k \omega_k b_k^\dagger b_k + \sum_k \kappa_k (ab_k^\dagger + a^\dagger b_k), \quad (1)$$

式中 H_{ac} 表示原子与腔场组成体系的哈密顿量, H_r 表示热库哈密顿量, H_1 为两者间的相互作用哈密顿量。 g 表示原子与腔场间的耦合常数, κ_k 表示腔与外部热库间的耦合常数。 $\sigma_- = |m\rangle\langle m| - |n\rangle\langle n|$ 为原子的反转算符, $\sigma_+ = |m\rangle\langle n|$ 为原子的下降和上升算符, $a^\dagger, a, b_k^\dagger, b_k$ 分别为腔和热库

的产生和湮灭算符。

原子初态为

$$|\Psi(0)\rangle = \sin \theta |00\rangle + \cos \theta |11\rangle, \quad (2)$$

对原子初态作前选择测量操作, 对任意比特的测量操作可表示为^[15]

$$\begin{cases} |0\rangle_i \langle 0| \rightarrow |0\rangle_i \langle 0|, & |1\rangle_i \langle 1| \rightarrow (1-p_i) |1\rangle_i \langle 1| \\ |0\rangle_i \langle 1| \rightarrow \sqrt{1-p_i} |0\rangle_i \langle 1|, & |1\rangle_i \langle 0| \rightarrow \sqrt{1-p_i} |1\rangle_i \langle 0| \end{cases}, \quad (3)$$

式中 $0 \leq p_i < 1$, 表示量子比特由激发态向基态的跃迁几率, 同时表示弱测量操作强度。

经前选择测量操作后两原子量子态为

$$\rho_{AB}(p, 0) = \sin^2 \theta |00\rangle_{AB} \langle 00| + \cos^2 \theta (1-p)^2 |11\rangle_{AB} \langle 11| + \sin \theta \cos \theta (1-p) |00\rangle_{AB} \langle 11| + \sin \theta \cos \theta (1-p) |11\rangle_{AB} \langle 00|, \quad (4)$$

其归一化因子为 $\sqrt{\sin^2 \theta + \cos^2 \theta (1-p)^2}$ 。

每个子系统独立演化, 为研究方便, 假定腔场和热库初始均处于真空态, 多模真空热库表示为 $\prod_k |0\rangle_k = |\bar{0}\rangle_r$, 处于激发态的一个原子与环境组成的初态为 $|\phi(0)\rangle = |\bar{100}\rangle_{a,c,r}$, t 时刻子系统演化态表

示为

$$|\phi(t)\rangle = \mu(t) |\bar{100}\rangle_{a,c,r} + \nu(t) |\bar{010}\rangle_{a,c,r} + \lambda(t) |\bar{001}\rangle_{a,c,r}, \quad (5)$$

对每一子系统满足 $|\mu(t)|^2 + |\nu(t)|^2 + |\lambda(t)|^2 = 1$ 。

原子和腔场相对于热库的约化密度矩阵主方程为

$$\frac{d\rho_{ac}}{dt} = i[\rho_{ac}, H_{ac}] - \gamma \left(\frac{1}{2} a^\dagger a \rho_{ac} - a \rho_{ac} a^\dagger + \frac{1}{2} \rho_{ac} a^\dagger a \right), \quad (6)$$

式中 γ 表示光腔的耗散率。

利用初态 $|\phi(0)\rangle = |100\rangle_{a,c,r}$, 结合(1)式可得

$$\begin{cases} \mu(t) = \exp\left(-\frac{\gamma t}{2}\right) \left[\cos(\sqrt{g^2 - \gamma^2/16}t) + \frac{\gamma}{g^2 - \gamma^2/16} \sin(\sqrt{g^2 - \gamma^2/16}t) \right]^2 \\ \nu(t) = \frac{g^2}{g^2 - \gamma^2/16} \exp\left(-\frac{\gamma t}{2}\right) \sin^2(\sqrt{g^2 - \gamma^2/16}t) \end{cases}. \quad (7)$$

结合(1)式、(5)式可得整个系统演化态为

$$\Psi(t) = \sin \theta |00\rangle_{a_1, a_2} |00\rangle_{c_1, c_2} |00\rangle_{r_1, r_2} + \cos \theta |\phi(t)\rangle_1 |\phi(t)\rangle_2. \quad (8)$$

利用两体共生纠缠的度量方法, 当 X 型态的约化密度矩阵表示为^[19]

$$\rho_{AB} = \begin{bmatrix} x & 0 & 0 & v \\ 0 & y & u & 0 \\ 0 & u^* & z & 0 \\ v^* & 0 & 0 & w \end{bmatrix}, \quad (9)$$

其共生纠缠度表示为

$$C(\rho_{AB}) = 2\max\{0, |u| - \sqrt{xw}, |v| - \sqrt{yz}\}.$$

(10)

未经测量操作的初态原子利用(5)、(7)、(8)式可得两个原子对整个系统的约化密度矩阵, 各矩阵元如下

$$\begin{cases} x = \cos^2 \theta \mu^4(t) \\ y = z = \cos^2 \theta \mu^2(t) [1 - \mu^2(t)] \\ w = \sin^2 \theta + \cos^2 \theta [1 - \mu^2(t)]^2 \\ u = 0 \\ v = \sin \theta \cos \theta \mu^2(t) \end{cases}. \quad (11)$$

经测量操作的原子的约化密度矩阵元为

$$\begin{cases} x = \cos^2 \theta (1 - p)^2 \mu^4(t) \\ y = z = \cos^2 \theta (1 - p)^2 \mu^2(t) [1 - \mu^2(t)] \\ w = \sin^2 \theta + \cos^2 \theta (1 - p)^2 [1 - \mu^2(t)]^2 \\ u = 0 \\ v = \sin \theta \cos \theta (1 - p) \mu^2(t) \end{cases}. \quad (12)$$

将(11)式和(12)式中 $\mu(t)$ 换成 $\nu(t)$ 可得腔场的约化密度矩阵, 若换成 $\lambda(t)$ 可得热库相对系统的约化密度矩阵。

量子关联中 QD 的计算如下^[19]

$$\begin{cases} D(\rho) = \min\{D_1, D_2\} \\ D_1 = S(\rho_A) - S(\rho_{AB}) - x \text{lb}\left(\frac{x}{x+y}\right) - y \text{lb}\left(\frac{y}{x+y}\right) - w \text{lb}\left(\frac{w}{w+y}\right) - y \text{lb}\left(\frac{y}{w+y}\right) \\ D_2 = S(\rho_A) - S(\rho_{AB}) - \Lambda^+ \text{lb}\Lambda^+ - \Lambda^- \text{lb}\Lambda^- \\ \Lambda^\pm = \frac{1}{2} (1 \pm \sqrt{(x-w)^2 + 4(|u| + |v|)^2}) \end{cases}, \quad (13)$$

式中 D 表示量子失谐, S 表示冯·纽曼熵, Λ^- , Λ^+ 为简化公式引入的中间参量。

3 数值模拟与理论分析

3.1 弱测量作用下的量子关联动力学

非最大纠缠初态演化过程有不同的动力学演化特征。有的初态在演化过程中其量子关联呈现周期性逐渐衰减的趋势, 如图 1(c), (d) 所示, QE 和 QD

演化过程中量子关联没有出现长时间为零的现象。有的初态会在演化中产生纠缠突然死亡现象, 如图 1(a) 实线所示, 未经弱测量操作的量子比特间的 QE 在演化过程中有一段时间出现共生纠缠度为零的现象; 而 QD 未产生这种现象, 如图 1(b) 实线所

示。经弱测量操作后的量子态在初始演化阶段对关联强度 QE 和 QD 均有一个干扰,而且初始弱测量强度越大,对粒子间的初始关联干扰越大[如图 1(a)~(d)中 $p=0.25, p=0.4, p=0.6$ 的虚线所示]。演化过程中有纠缠突然死亡现象产生的量子态经弱测量操作能够在演化中明显提高粒子间的关联强度,而且还可以缩小甚至消除纠缠突然死亡现象的发生[如图 1(a)三种虚线所示];弱测量操作对 QD 的演化影响更加显著,弱测量强度越小,演化过程中对 QD 的优化效果越好[如图 1(b)虚线所示],但对于 QE,弱测量强度越大对 QE 的优化效果越好[如图 1(a)中 $p=0.25, p=0.4$ 所示],当弱测量强度过大时[图 1(a), (b)中 $p=0.6$ 所示],对 QD 动

力学演化完全失去优化作用,但对减小 QE 的纠缠突然死亡区域有较好的优化效果。当量子态在动力学演化中做周期性逐渐衰减时[图 1(c), (d)中虚线所示],弱测量操作对量子关联动力学演化过程中不但不能优化量子态的动力学行为,而且还会降低量子关联的演化强度。通过分析,弱测量对非最大纠缠初态演化过程中的优化效果取决于初态的选择,弱测量对于一类非最大纠缠量子态[如图 1(a), (b)所示]能够在演化过程增强量子关联并减小甚至消除纠缠突然死亡现象;而对于另一类非最大纠缠量子态[如图 1(c), (d)所示],弱测量对量子关联中的 QE 和 QD 的动力学演化均不能产生优化效果。

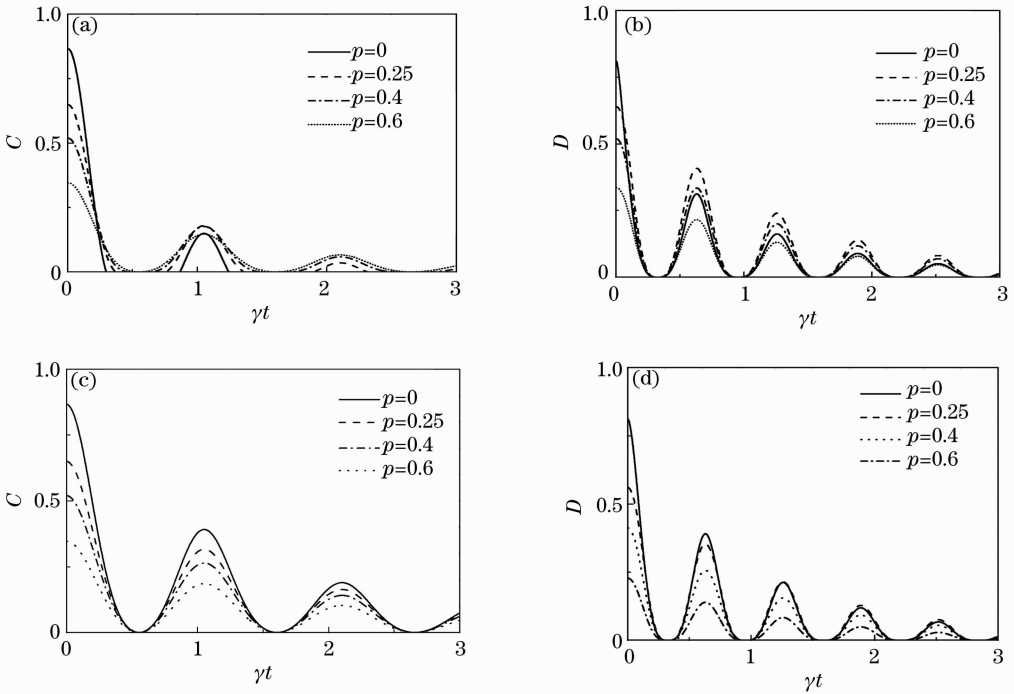


图 1 弱测量对量子关联动力学演化的影响。(a) QE, $\theta=\pi/6, g=5\gamma$; (b) QD, $\theta=\pi/6, g=5\gamma$;
(c) QE, $\theta=\pi/3, g=5\gamma$; (d) QD, $\theta=\pi/3, g=5\gamma$

Fig. 1 Dynamical evolution of quantum correlation under different weak measurements. (a) QE, $\theta=\pi/6, g=5\gamma$; (b) QD, $\theta=\pi/6, g=5\gamma$; (c) QE, $\theta=\pi/3, g=5\gamma$; (d) QD, $\theta=\pi/3, g=5\gamma$

对于初始处于最大纠缠初态的粒子,弱测量对 QE 在演化中长时间没有优化作用,而对 QD 则在演化过程中起到明显的优化作用[如图 2(a)、(b)所示]。当弱测量的几率值选择 1 时,相当于对量子态做正交投影测量,量子态完全塌缩到其本征态上。另外弱测量操作干扰了量子系统中的量子互信息中的经典信息与量子关联的分布,对量子关联 QD 需要重新测量。

3.2 弱测量作用下的量子关联转移

量子关联中的 QE 和 QD 是实现量子通信的重

要资源,要实现远距离的量子信息的传递,需要建立远距离节点间的纠缠态,但量子态本身很脆弱,很难远距离分发。为实现这一目的,需要量子关联交换技术。量子关联交换过程是量子中继技术的基础,通过“量子存储+级联的纠缠交换”过程,可以使得千公里尺度上的关联分发成为可能,所以量子关联转移在信息传递中起到了重要作用。

如图 3 所示,对于处于耗散腔中的原子间的量子关联转移到了腔场中,而且随着时间演化在腔场和原子间交替进行且逐渐减弱,并最终将量子关联

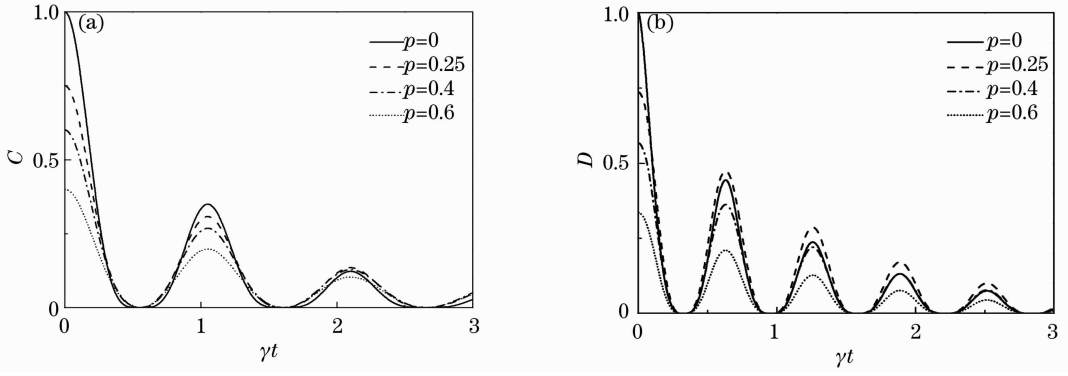


图 2 弱测量下最大纠缠初态的动力学演化特征。(a) QE: $\theta=\pi/4$, $g=5\gamma$; (b) QD: $\theta=\pi/4$, $g=5\gamma$
 Fig. 2 Dynamical evolution of maximum entanglement state under different weak measurements. (a) QE: $\theta=\pi/4$, $g=5\gamma$; (b) QD: $\theta=\pi/4$, $g=5\gamma$

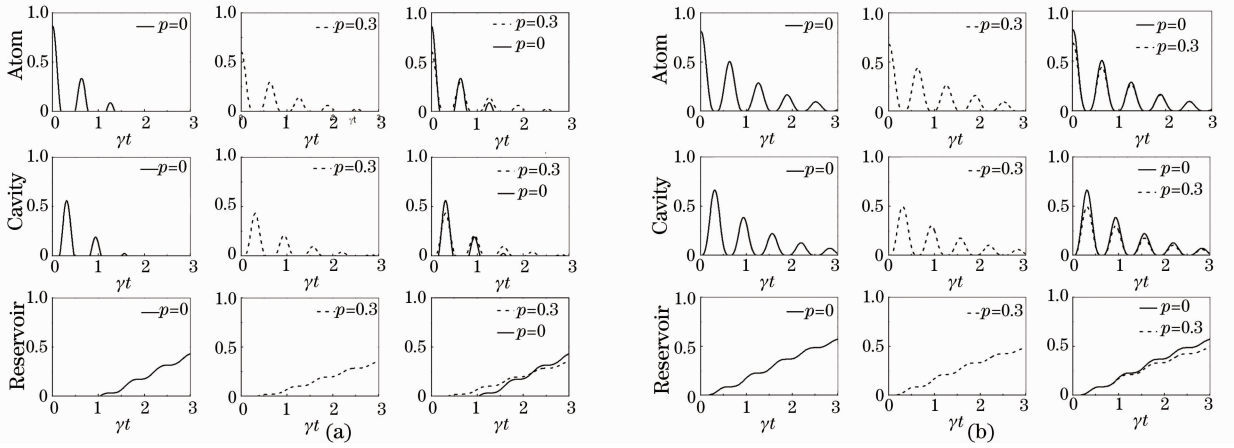


图 3 弱测量前后一般量子态的量子关联转移。(a) QE: $\theta=\pi/6$, $g=5\gamma$; (b) QD: $\theta=\pi/6$, $g=5\gamma$
 Fig. 3 Quantum correlation transfer of common state before and after weak measurements. (a) QE: $\theta=\pi/6$, $g=5\gamma$; (b) QD: $\theta=\pi/6$, $g=5\gamma$

转移到热库中,经弱测量操作后对这种量子关联转移的影响很小,同时还可获取量子关联转移过程中的量子信息,另外弱测量操作还可以将量子纠缠转

移到热库中的时间提前。

初始处于最大纠缠初态粒子在弱测量操作后量子关联转移无明显的优化效果,弱测量对两种量子

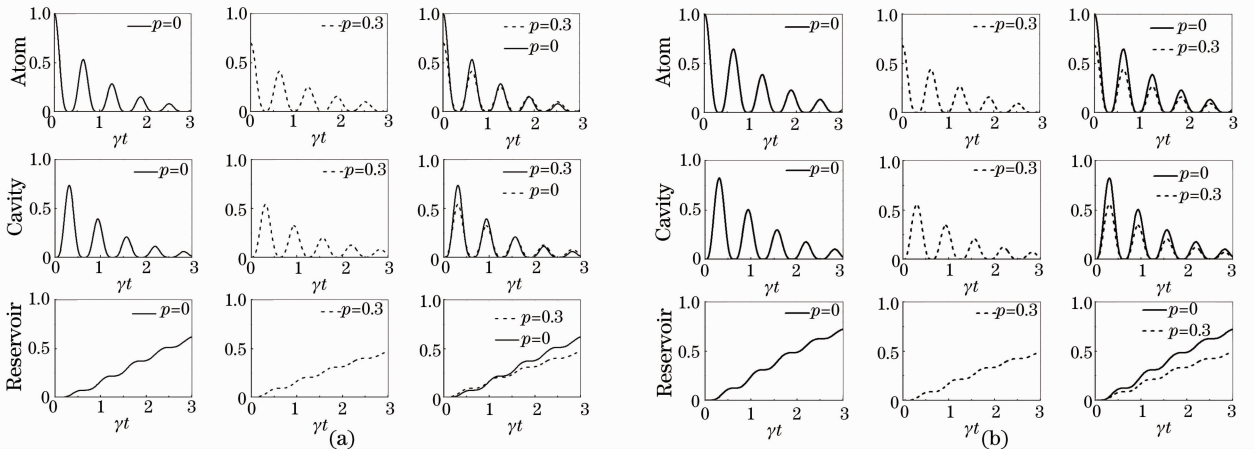


图 4 弱测量前后最大纠缠初态的量子关联转移。(a) QE: $\theta=\pi/4$, $g=5\gamma$; (b) QD: $\theta=\pi/4$, $g=5\gamma$
 Fig. 4 Quantum correlation transfer of maximum state before and after weak measurements. (a) QE: $\theta=\pi/4$, $g=5\gamma$; (b) QD: $\theta=\pi/4$, $g=5\gamma$

关联在原子、腔场和热库间的关联转移均有干扰(如图4所示),但影响很小。

3.3 耦合强度和耗散率对量子关联演化的影响

纠缠原子分别在各自的耗散腔中独立演化受到腔场与原子的耦合强度和腔场耗散率的影响。如图5所示,对于初始处于最大纠缠态的原子,当原子与腔场的耦合强度与耗散率相近(即腔场的耗散较大)时,原子间的量子关联 QE 和 QD 的演化近乎一致,呈现逐渐衰减的趋势;当原子与腔场的耦合强度

远大于腔场的耗散时,原子间量子关联做周期性振荡,可见在耦合越强、耗散越小时两原子间量子关联 QE 和 QD 振荡周期增加,关联时间较长,反之,原子间的量子关联很快衰减为零,很难恢复到较大量子关联。耦合越强,耗散率越低,量子关联的振荡越频繁,流入环境中的信息对系统影响较大,呈现非马尔可夫过程;反之,当腔场耗散较大时,流入环境的信息在庞大的热库中消失,对系统影响很小,呈现马尔可夫过程^[14]。

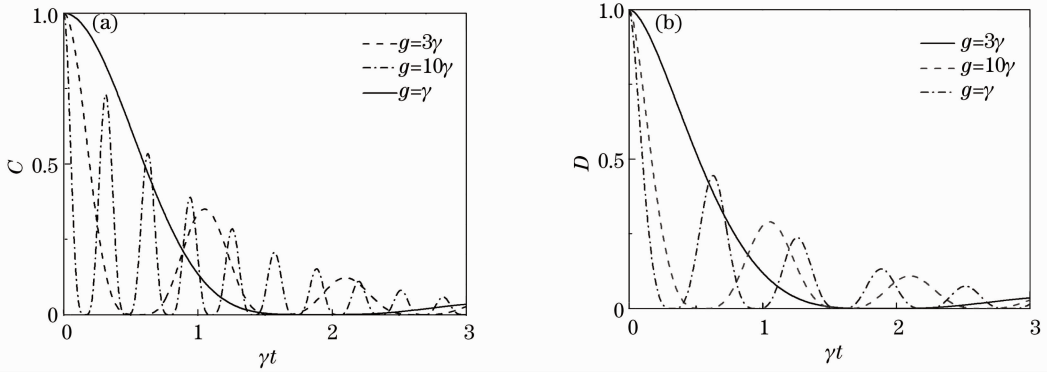


图5 耦合强度对量子关联演化的影响。(a) QE: $\theta = \pi/4$; (b) QD: $\theta = \pi/4$

Fig. 5 Effect of coupling intensity on quantum correlation. (a) QE: $\theta = \pi/4$; (b) QD: $\theta = \pi/4$

4 结 论

初始处于纠缠的两量子比特其初态经弱测量操作后分别置于处于热库中的两个独立的耗散腔中进行动力学演化。发现经弱测量操作后的量子系统,对于部分初始处于非最大纠缠的量子比特的量子关联的动力学演化过程中有一定的优化作用,能够延缓量子关联强度的衰减,并能够提高演化过程中的关联强度;而对于初始处于最大纠缠的粒子,弱测量操作对量子系统 QE 的优化提高不如对 QD 的效果明显。初始时刻弱测量对量子关联有一定干扰破坏,弱测量的强度越大,对初始关联的破坏越大。在量子关联转移现象中量子纠缠受系统和环境的影响,在一定时间内仅仅局限于粒子和腔场间的纠缠转移,特别对于非最大纠缠初态的粒子,对于与腔作用的热库之间很难建立起纠缠的转移,但弱测量操作能够加快量子纠缠在腔场和热库间的纠缠转移;量子关联中的 QD 在转移过程中却不受初态的影响,在原子、腔和热库间几乎同时会发生量子关联的转移。

参 考 文 献

1 Yakir Aharonov, David Z Albert, Lev Vaidman. How the result of a measurement of a component of the spin of a spin $-1/2$

particle can turn out to be 100 [J]. Phys Rev Lett, 1988, 60 (14): 1351-1354.

2 K J Resch, A M Steinberg. Extracting joint weak values with local, single-particle measurements [J]. Phys Rev Lett, 2004, 92 (13): 130402.

3 Fan Chao, Li Yingcai, Fu Hongliang, *et al.*. Research on measurement method of image motion of space camera based on optical correlator [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31 (7): 0712006.

樊超,李英才,傅洪亮,等.光学相关法测量空间相机像移的性能研究[J].光学学报,2011,31(7):0712006.

4 Lu Daoming. Influences of selective atomic measurement on entanglement properties in a system of atoms interacting with coupled cavities [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 0727002. 卢道明.原子测量对耦合腔系统中纠缠特性的影响[J].光学学报,2011,31(7):0727002.

5 Xie Liangwen, Wang Faqiang, Liang Ruisheng, *et al.*. Influence of polarized light in non-Abelian cavity quantum electrodynamics model [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0527001.

谢良文,王发强,梁瑞生,等.非阿贝尔腔量子电动力学模型下偏振光场的影响[J].光学学报,2012,32(5):0527001.

6 Lu Daoming. Quantum properties in the system of atoms interacting with weak coherent cavities fields [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1027001.

卢道明.原子与弱相干腔场相互作用系统中的量子特性[J].光学学报,2012,32(10):1027001.

7 Ji Weibang, Wan Jinyin, Cheng Huadong, *et al.*. Scalable grooved planar ion chip design for quantum information processing [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(7): 0727001.

冀炜邦,王金,成华东,等.可扩展的用于量子信息处理的刻槽平面离子芯片设计[J].光学学报,2012,32(7):0727001.

8 Holger F Hofmann. How weak values emerge in joint measurements on cloned quantum systems [J]. Phys Rev Lett,

- 2012, 109(2): 020408.
- 9 G Puentes, N Hermosa, J P Torres. Weak measurements with orbital-angular-momentum pointer states [J]. *Phys Rev Lett*, 2012, 109(4): 040401.
- 10 G T Foster, L A Orozco, H M Castro-Beltran, *et al.*. Quantum state reduction and conditional time evolution of wave-particle correlations in cavity QED [J]. *Phys Rev Lett*, 2000, 85(15): 3149–3152.
- 11 H M Wiseman. Weak values, quantum trajectories, and the cavity-QED experiment on wave-particle correlation [J]. *Phys Rev A*, 2002, 65(3): 032111.
- 12 S Jeff Lundeen, Brandon Sutherland, Aabid Patel, *et al.*. Direct measurement of the quantum wave function [J]. *Nature*, 2011, 474: 188–191.
- 13 G J Pryde, J L O'Brien, A G White, *et al.*. Measurement of quantum weak values of photon polarization [J]. *Phys Rev Lett*, 2005, 94(22): 220405.
- 14 Yong Wook Cheong, Seung-Woo Lee. Balance between information gain and reversibility in weak measurement [J]. *Phys Rev Lett*, 2012, 109(15): 150402.
- 15 Zhongxiao Man, Yunjie Xia, Nguyen Ba An. Manipulating entanglement of two qubits in a common environment by means of weak measurements and quantum measurement reversals [J]. *Phys Rev A*, 2012, 86(1): 012325.
- 16 Zhongxiao Man, Yunjie Xia, Nguyen Ba An. Enhancing entanglement of two qubits undergoing independent decoherences by local pre- and postmeasurements [J]. *Phys Rev A*, 2012, 86(5): 052322.
- 17 B Bellomo, G Compagno, R Lo Franco, *et al.*. Dynamics and extraction of quantum discord in a multipartite open system [J]. *Int J Quantum Inform*, 2011, 9(7): 1665.
- 18 B Bellomo, R Lo Franco, G Compagno. Non-Markovian effects on the dynamics of entanglement [J]. *Phys Rev Lett*, 2007, 99(16): 160502.
- 19 F F Fanchini, T Werlang, C A Brasil, *et al.*. Non-Markovian dynamics of quantum discord [J]. *Phys Rev A*, 2010, 81(5): 052107.

栏目编辑：王晓球