

量子信息光学*

郭光灿

(中国科学技术大学物理系, 合肥 230026)

摘要 介绍了一门新的学科分支——量子信息光学。它是量子光学与信息科学相结合的产物。光场的量子效应在实现大容量的信息传输, 超高精度的信息检测以及不可破译、不可窃听的量子密码术方面有着极其重要的应用前景, 在光子学的发展中将发挥独特的作用。该文阐述了量子信息光学中若干物理问题和研究方向, 包括超低噪声光源、量子信息复制、量子态工程、量子非破坏性测量和量子密码术。

关键词 压缩态, 量子态工程, QND 测量, 量子密码术

Abstract We introduce quantum information optics as a new branch of science, which is the result of combining quantum optics and information science. The quantum effects of the light field have very important applications for information transmission with super-large capacity, information detection with super-high precision and unbreakable secure quantum cryptography, and will play a unique role in photonics. The several fundamental physical problems and main research fields in quantum optics are expounded, including light sources with super-low noise, the copying of quantum information, quantum state engineering, quantum non-demolition measurement and quantum cryptography.

Key words squeezed state, quantum state engineering, QND measurement, quantum cryptography

1 引言

我们的时代是信息时代。电子和光子是两大类信息载体。以电子作为信息载体的电子信息系统在现代社会中发挥极其重要的作用, 这是不言而喻的。以光子和光波作为信息载体的光子器件和光信息系统的发展晚于电子信息系统。目前, 代表着信息科学发展水平的是电子系统。但是由于电子和光子具有不同的特性, 因此它们作为信息载体所能达到的信息功能就有很大的差异。例如, 电子信息系统的进一步发展, 在速度、容量、空间相容性、信息检测精度等方面都将受到限制, 而以光子作为信息载体的光子信息系统则可以呈现出无可比拟的优越性。

一旦充分地挖掘出光子作为信息载体的潜在功能, 信息科学的发展就将达到前所未有的新水平。这就是人们预言“21 世纪是光子学时代”的依据, 也是促进当前光子学迅速发展的动力。

不同类型的光场, 其根本区别在于量子统计特性的不同。现有的光源按其量子统计特性可分为三类。第一类是激光诞生以前人们广泛使用的热光源, 这类光源的发光机制是自发辐射过程, 其光场是完全随机的噪声, 用此类光源作为信息载体所能达到的信息功能十分有限。第二类光源是激光, 其发光机制是受激辐射过程, 理想的激光场称为相干态, 它具有许多特殊的性质^[1]。相干态有最小的总量子噪声(等于

* 国家自然科学基金资助项目。

1995 年 4 月 3 日收到初稿, 1995 年 6 月 2 日收到修改稿。

真空噪声),是最接近经典单色光场的量子态.相干态作为信息载体显示出极其优良的性能.然而,即使是相干态光场,其所有的物理量都具有确定的量子噪声(称为标准量子噪声),这个极限量子噪声最终限制着相干光信息系统的功能.第三类光源称为非经典光场.例如,压缩态就属于此类光源,其总的量子噪声虽然高于相干态的噪声,但它的某个物理量的量子噪声低于标准量子噪声极限,因此用它来携带信息,将有着很高的信噪比,可实现更强的信息功能.

上述三类光场都可使用量子化电磁场来描述,但在许多场合下,热光场和激光取经典理论处理就足够了.但第三类(非经典光场)只能采用量子理论描述,因为这类光场具有纯属于量子效应的特征,没有任何经典对应物.经典信息光学不计及光场的量子特征,其光源仅限于热光场和激光.当光信息系统必须考虑到光的量子性,或者采用非经典光场来传送或提取信息,则必须严格地在量子理论框架内处理光信息的问题,这就是量子信息光学,它与经典信息光的根本区别在于信息的传输、检测、存储等应用到光场的量子特性,从而能实现经典光信息系统所无法达到的信息功能.

光信息的传输和提取受到信息系统的信噪比的限制,在理想场合,原则上可以消除信息系统中的全部经典噪声,以达到最大限度的信噪比.但即便如此,信息系统的功能仍然受到量子噪声的限制.这一方面是由于作为信息载体的量子光场本身不可避免地会有量子噪声,最终的信噪比将受制于这种量子噪声,于是自然界中任何比真空噪声还微弱的信号(如引力波、生物体的各种信息等)都将被淹没在真空噪声之中而难于被探测到.另一方面,光的探测过程本身是一个量子过程,在量子理论中,测量某个体系的物理量必然会引起某种对该体系的干扰,从而产生附加的噪声,这将进一步限制提取信息的能力.光信息系统本质上是量子系统,评价信息系统的极限功能必需采用量子理论.因此,当我们企图突破现有经典信息系统的极限时,面对着的应该是光量子信息系统,在这个系统

中,体系的固有量子噪声和在测量过程中仪器反作用的干扰等无疑地将构成一道难以逾越的屏障,阻碍着人类从自然界中获取更深层次的信息.

人们若要洞察自然界中更深的奥秘,揭开生物学中的种种谜团,或者企图探取极其微弱的自然信息,或者企图以更高精度传递更大容量的信息,就必须寻找新的原理、新的方法来研究实现更高精度、更低噪声、更大容量的光量子信息系统的新途径,以打破现有光信息系统的极限性.量子信息光学的主要目标就是研究这种光量子信息系统的原理和方法,最终有可能实现对微观量子信息的有效传递和提取,甚至可能按照人的意愿去设计和制备能实现某种特定功能的宏观量子体系,从而将人类认识自然的能力提高一大步.

2 超低噪声光源

作为信息载体的光场,其噪声限制着信息系统的信噪比.相干态具有标准量子噪声,压缩态等非经典光场则有低于这个标准极限的量子噪声,在信息领域中就能显示其优越性.

所谓“压缩态”^[2,3],广义地讲是指光场的某个物理量的量子噪声低于标准量子噪声量子态.按照被压缩的物理量的不同,压缩态可分为不同的类型.常见的有两大类:一类是压缩相干态(又称正交相位压缩态),相应的共轭量是光场的两个正交位相分量的振幅算符.就相干态而言,这对共轭量的起伏相等,而压缩相干态的某个分量的量子噪声变小,另一分量的噪声变大;另一类压缩态是所谓的光子数压缩态,相应的共轭量是光子数算符 N 和位相.相干态的光子数起伏 $\langle(\Delta N)^2\rangle$ 等于平均光子数 $\langle N \rangle$,而光子数压缩态则有 $\langle(\Delta N)^2\rangle$ 小于 $\langle N \rangle$,即光子数的噪声低于标准噪声,其代价是光场相位起伏增大.这两类压缩态都已在实验上研制成功^[4,5].

采用压缩态替代相干态作为信息系统的电源可以显著地改善信息系统的功能.例如,实验

上业已证实,在迈克耳孙干涉仪中采用压缩相干态可以明显地提高信噪比.在引力波探测系统中,若采用高度压缩的光束,则有可能检测到微弱的引力波信号.

当然,目前压缩态光场还达不到用于信息系统的水平,还必须进一步研究产生高压缩度、高稳定压缩态的途径.我们曾研究两种产生光子数压缩态的方案.我们发现^[6],利用激光泵浦 N 个均匀加宽的三能级原子体系,在一定的条件下可获得光子数压缩态,其 F 因子($F = \frac{\langle(\Delta N)^2\rangle}{\langle N\rangle}$, $F < 1$ 为光子数压缩态, $F = 0$ 为光子数完全确定的福克态)可达 0.16, 低于文献[5]应用负反馈半导体激光器获得的 F 因子(0.25).我们还证明^[7],采用负反馈级联三能级体系可以产生亚泊松分布的光场(即光子数压缩态).级联原子输出两光束之间存在某种关联,将其中一束负反馈去控制抽运源.当反馈作用足够强时,可以完全抑制抽运噪声,此时内场为亚泊松分布光, F 因子为 0.5;当原子数减小时,在低频区的外场,其 F 因子小于 1;当原子数为 1 时,则可得福克态光场.

现有产生压缩态的实验装置过于庞大,不适合作光子信息系统的来源,因此必须探索产生压缩态的新机制,研制微型的非经典光源,以利于在集成光学系统中使用.这些新的研究方向包括:光纤非线性效应产生压缩态,应用腔量

子电动力学原理研制微激光器,基于量子尺寸效应的低维量子器件(如量子阱、量子线、量子点)等.

3 量子信息复制

在信息传输过程中,人们希望能将信息从主通道中分流出来而又不干扰主通道的信息.在经典理论中,这种分流或测量原则上可以干扰传输通道中的信息,实现多分流(或多分支)、无失真地信息传输.但是在量子理论中,测量或分流通道与传输通道必须作为一个整体,由量子力学的规律所支配.“分流”是个相互作用过程,其结果必然会干扰传输信道的量子系统,有可能破坏主通道的信息.量子信息系统欲实现多分流的信息提取,就必须寻找既能从主通道提取量子信息,又不干扰、破坏主通道的信息的新途径.目前采用的方法是改变现有在信息系统中直接从主通道分流的办法,而使用另一个作为探测信息用的系统(称为 Meter 系统),它的功能是通过与主通道的系统相互作用而将信息完全“复制”出来,又不破坏携带信号的物理量.这种非破坏性提取信息的方式相当于一台“量子复印机”,主通道的信息不断地被 Meter 系统所“复制”而分流出来,达到实现多分叉信息传输的目的(图 1).

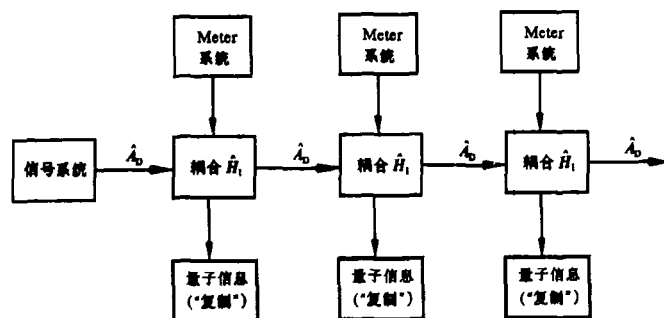


图 1 量子信息复制

能否实现这种量子的光学分流,关键在于寻找合适的 Meter 系统和所谓“反作用逃逸(BAE)”的探测过程. Meter (即测量器)与信号系统的相互作用(用哈密顿算符 \hat{H}_1 描述)对于信息的提取是必不可少的,但信息系统携带信息的物理量(记为 \hat{A}_D)会受到 \hat{H}_1 的影响,这种反作用会干扰乃至毁坏掉信息,使量子信息分流无法实现,因此设法避开 \hat{H}_1 的反作用便成为关键性的问题,这就是反作用逃逸. 反作用逃逸(BAE)测量定义为测量系统与待测系统的相互作用不改变待测的物理量 \hat{A}_D , 或者即使改变 \hat{A}_D , 其变化也可以被预测.

目前量子光学的实验已成功演示了反作用逃逸的实验原理^[8,9], 但尚未真正实现量子光学分流, 必须在理论和实验上对此作进一步深入的研究.

4 量子态工程

广义上讲, 量子光学的重要目标之一就是制备各种各样的宏观量子态. 例如, 激光器制备的是相干态, 利用非线性光学过程可制备各种压缩态, 目前正致力于寻找产生光子数完全确定的福克态也是一种宏观量子态的制备过程. 总之, 产生各种具有特殊非经典效应的光场的途径就是寻找相应的宏观量子态的制备方法.

在量子信息光学中, 我们感兴趣的是非经典光场. 这种光场的产生大致有两种途径: 一是将相干态光场经由某种非线性过程使它的某一对共轭力学量之间的量子噪声重新分配, 从而导致其中一个力学量的量子噪声显著减少; 二是在产生相干态的装置中, 引进某种新的机制, 它可增大系统的有序力, 或者减少系统内部的无序力, 使系统的输出不再是相干态, 而是某个物理量的压缩态. 前一种途径称为无源法(或被被动法), 后一种途径则称为有源法(或主动法). 就光子数压缩态而言, 后一种方法更有效.

制备宏观量子态的另一种新方法是利用量子测量过程对待测系统的反作用来促使该系统向特定宏观量子态的演化. 如前所述, 在量子理

论中, 仪器在测量过程中必定会干扰待测系统的量子态, 通常在超高精度、超低噪声的信息系统中要设法消除这种干扰. 但事物总有两面性, 这种“干扰”若运用得当也会产生积极的效果. 理论上已证明^[9], 在某种非线性过程中, 测量 Meter 系统的适当物理量, 可以将信号系统制备到待定的量子态上. 例如, 测量光参量过程空闲波的光子数, 可使信号波变成一种宏观可识别的相干叠加态. 这种量子态是典型的非经典光场^[10,11], 它是光场消灭算符 \hat{a} 的二次幂 \hat{a}^2 的本征态, 称为奇、偶相干态, 其中偶相干态为

$$|\Psi\rangle_e = \frac{1}{2} \left[\exp\left(\frac{1}{2} |\alpha|^2\right) \right] \times \left(\text{ch} |\alpha|^2 \right)^{-\frac{1}{2}} (|\alpha\rangle + |-\alpha\rangle),$$

奇相干态为

$$|\Psi\rangle_o = \frac{1}{2} \left[\exp\left(\frac{1}{2} |\alpha|^2\right) \right] \times \left(\text{sh} |\alpha|^2 \right)^{-\frac{1}{2}} (|\alpha\rangle - |-\alpha\rangle),$$

式中 $|\alpha\rangle$ 为相干态. 偶相干态具有明显的压缩现象而绝无反聚束效应, 而奇相干态则正好相反, 它有明显的反聚束效应而绝无压缩现象.

在宏观经典领域中, 人们可以按照自己的意愿来设计各种经典系统, 以实现特定的功能. 在量子世界中, 描述量子系统的是态函数, 态函数具有几率幅的意义, 它不存在经典概念上的物理含义, 采用宏观经典的手段来制备特定的量子系统态函数绝非易事. 然而, 在光的量子信息系统中, 光场的量子态直接影响系统的信息功能, 因此量子态的制备有着重要的作用, 这就导致“量子态工程”这个概念的出现. 所谓“量子态工程”是指能人为地控制量子态的制备, 亦即能按照人的意愿来设计和制备具有特定量子统计特性的量子态.

图2是一种量子态制备的原理性方案. $|\alpha_i\rangle$ 代表相干态. 假定能设计一种量子态的叠加装置, 并能实现人为地控制叠加重数系数 C_{α_i} , 则可以由相干态的叠加来制备特定的量子态 $|\Psi\rangle$,

$$|\Psi\rangle = \sum_i C_{\alpha_i} |\alpha_i\rangle.$$

在最简单的情况下, 态 $|\Psi\rangle$ 由两个相干态叠加而成, 即

$$|\Psi\rangle = C_1 | \alpha \rangle + C_2 | \beta \rangle.$$

这种宏观可识别的量子叠加态, 俗称薛定谔猫。在量子光学中已经有许多方法可以用来制备光场的薛定谔猫态, 在文献[12]中已有详细介绍。不同的“猫态”具有不同的量子统计特性。前面所述的奇、偶相干态实际上就是一种特殊的猫态。我们已经详细地研究过猫态的量子统计特性。

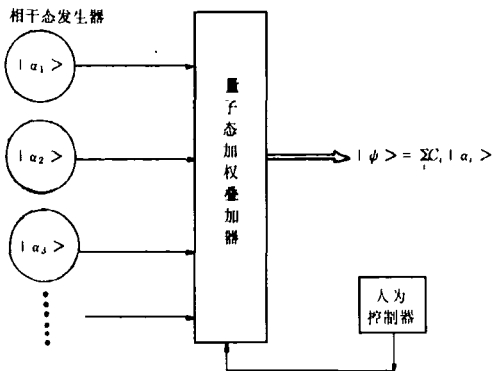


图2 量子态工程的原理图

随着量子光学和近代光学技术的发展, 量子态工程已经从一种理想的追求变成可操作的现实, 这将为人类揭示光场的本质以及运用量子效应造福于人类本身开辟新的天地。

5 量子非破坏性(QND)测量^[13]

QND 测量是用来探测极微弱信号的有效途径。此种测量的主要目标是合理地选取待测的物理量 \hat{A} 以及与其耦合的后级测量系统, 以避免共轭量之间无规的量子噪声及测量系统的反作用对测量精度的影响, 从而实现对 \hat{A} 进行一系列准确的测量, 并使每一个测量值都能由第一次测量结果预测出来。理想 QND 测量需要满足三个判据, 它们分别描述 QND 测量的效果、被测量物理量免受干扰的程度以及量子态的制备能力。最近 P. Grangier 小组^[14] 提出用两个参数(即条件起伏和传递系数)来分别刻画 QND 测量中的量子态制备能力和量子光学分流能力。

条件起伏定义为

$$W_{x_s, x_m} = W_{x_s, x_s}^{\text{out}} - \frac{|W_{x_s, x_m}^{\text{out}}|^2}{W_{x_m, x_m}^{\text{out}}},$$

式中量子相关度 $W_{xy}^{\text{out}} = \langle X^{\text{out}} Y^{\text{out}} \rangle - \langle X^{\text{out}} \rangle \langle Y^{\text{out}} \rangle$, X 和 Y 分别代表 x_s 和 x_m , x_s 为待测信号场的正交位相分量, x_m 为测量仪器(即 Meter 系统)的正交位相分量。 W_{x_s, x_m} 用来描述系统的量子态制备能力, 可以证明 $0 \leq W_{x_s, x_m} \leq 2$ 。理想的量子态制备要求 $W_{x_s, x_m} = 0$ 。当 $0 < W_{x_s, x_m} < 1$ 时, 则表示系统具有非理想的量子态制备能力; 当 $W_{x_s, x_m} > 1$ 时, 则意味着系统为经典系统, 不具备量子态制备能力。

传递系数定义为

$$T_s = \frac{\text{SNR}_s^{\text{out}}}{\text{SNR}_s^{\text{in}}}, \quad T_m = \frac{\text{SNR}_m^{\text{out}}}{\text{SNR}_m^{\text{in}}},$$

式中 SNR 是信噪比, 下标“s”, “m”分别表示待测信号场与 Meter 系统的探测场, 上标“in”, “out”分别表示输入和输出。传递系数 ($T_s + T_m$) 用来描述系统的量子光学分流能力。可以证明 $0 \leq T_s + T_m \leq 2$ 。理想场合要求 $T_s + T_m = 2$, 它表示 Meter 系统可以完全复制信号场的信息而不引进任何对待测物理量的干扰。当 $1 < T_s + T_m < 2$ 时, 则系统具有非理想的量子光学分流能力。若 $T_s + T_m < 1$, 则为经典系统。

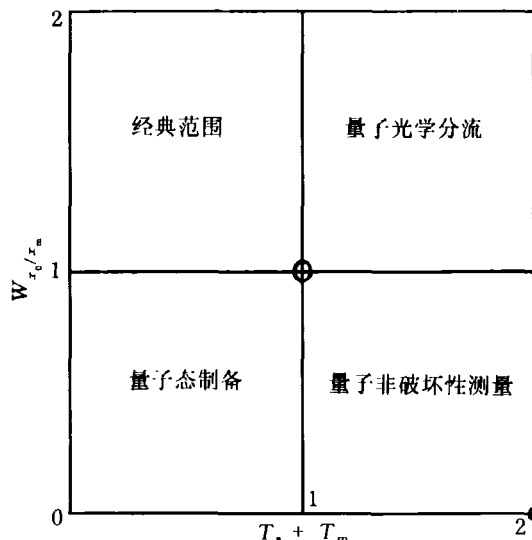


图3 QND 测量的判据

⊕ 为经典-量子分界点; • 为理想 QND 测量

当系统同时满足 $W_{x_s, x_m} = 0$ 和 $T_s + T_m = 2$ 时, 则称为理想的 QND 测量; 而当系统同时满足 $0 < W_{x_s, x_m} < 1$ 和 $1 \leq T_s + T_m \leq 2$ 时, 则称为非理想的 QND 测量(图 3).

在所有 QND 测量方案中, 分束器是最简单的一种. 在无损耗时, 当探测场为理想压缩相干态时, 分束器可实现 QND 测量. 最近我们采用量子光学的热库理论研究分束器在有损耗时和探测场为非理想压缩相干态, 以及信号场含有热噪声这种真实条件下, 分束器作为 QND 测量装置的实际效果, 这为进一步开展实验研究提供了可靠的理论依据^[15].

光场的 QND 测量原理可以推广到测量其他的物理量. 基于受激布里渊散射过程中声波和其相应散射光波这两个不同自由度之间所建立起来的量子相关性, 我们提出一种实现量子的光-声模式混合器的原理, 并探讨了这种混合器实现对声子场 QND 测量的可能性^[16].

我们详细地研究了用 Jaynes-Cummings 模型(JCM)实现 QND 测量的可能性. JCM 是描述单个两能级原子与单模光场相互作用的理想化模型. 我们证明了在缓变振幅和非旋转波近似下, JCM 满足 QND 测量的条件, 并求出该模型的解. 此系统既可以通过探测光场来实现对原子正交位相分量的 QND 测量, 又可以通过探测原子来实现对光场的 QND 测量^[17].

6 量子密码术

保密通信有着极其广泛的用途, 特别是在军事、外交、经济等领域中. 保密通信的基本原理是: 采用密钥(密码本)对欲传送的明文进行加密变换, 变换后的密文在公开信道上传送, 接收者采用同一密钥对所接收到的密文进行解密变换后便得到明文. 破译专家企图在不知道密钥的情况下从密文获取明文的信息. 在 20 年代 Verman 证明, 如果一个密钥长度不短于要传送的信息且仅使用一次, 那么这个密文就不可破译. 因此通信的保密性主要依赖于密钥传递的保密性.

目前所使用的保密通信系统是经典系统, 很难制备完全随机的密码本, 而且在传递密码本过程中原则上无法防止第三者窃听. 近年来, 人们将密码学和量子力学联系起来, 导致“量子密码术”的诞生. 量子密码的原理是基于量子体系的几率幅描述是完备的, 且任何探测(如窃听)过程都会对量子态产生不可避免的扰动. 量子的随机性提供了一种理想的密钥, 而探测的扰动则用来判别密码传送过程中是否被窃听.

现已提供若干量子密码方案, 这里简述基于 EPR 效应的方案^[18]. EPR 效应是指非局部的量子相关效应, 它由爱因斯坦等人为了反驳玻尔的量子理论而提出来的. 假设利用某一物理过程产生一对电子, 它们满足总自旋为 0 的条件. 然后它们沿着相反的方向传输, 无论它们在空间上相距多远, 它们的自旋总是相关的. 采用合适的自旋测量装置, 在双方完全测量之后便可产生共同的密钥. 若有窃听者存在, 测量结果的相关函数便发生改变.

采用频率下转变产生的一对孪生光子(它们相当于 EPR 电子), 在实验上已实现 10 km 的量子密码通信.

参 考 文 献

- [1] 郭光灿, 量子光学, 高等教育出版社, (1990), 118.
- [2] D. F. Walls, *Nature*, **36-10**(1983), 141.
- [3] 彭堃堉, 物理, **20**(1991), 588;
曹昌祺, 物理, **20**(1991), 460;
郭光灿, 物理, **21**(1992), 32;
彭堃堉、谢常德、郭光灿, 物理, **22**(1993), 248.
- [4] L. A. Wu et al., *Phys. Rev. Lett.*, **57**(1986), 2520;
彭堃堉等, 物理学报, **42**(1993), 1079;
R. L. Robinson, *Science*, **233**(1986), 280.
- [5] S. Machida and Y. Yamamoto, *Phys. Rev. Lett.*, **58**(1987), 1000; **60**(1988), 792.
- [6] 郭光灿、柴金华, 物理学报, **40**(1991), 912.
- [7] 柴金华、郭光灿, 中国科学, **A**, **10**(1992), 1089.
- [8] B. Yurke et al., *Phys. Rev. A*, **42**(1990), 1730.
- [9] Shang Song and C. M. Caves, *Phys. Rev. A*, **41**(1990), 5261.
- [10] 郭光灿, 中国科学技术大学学报, **23**(1993), 31.
- [11] Xia Yun-jie and Guo Guang-can, *Physics Lett. A*, **138**(1989), 218.
- [12] 吴锦伟、郭光灿, 物理, **24-5**(1995), 269.

- [13] 张晓龙、郭光灿、彭堃堉等, 物理学进展, 14-2(1994), 173.
[14] J. F. Roch et al., *Appl. Phys. B*, 55(1992), 291.
[15] 薛秋寒、郭光灿, 物理学报, 44-9(1995), 1410.

- [16] 杨卫国、郭光灿, 科学通报, (待发表).
[17] 郭光灿等, 世界光学大会论文集, 上海, (1993), 49.
[18] A. K. Ekert, *Phys. Rev. Lett.*, 67(1991), 661.

色度学及其进展*

朱正芳 汤顺青

(北京理工大学工程光学系, 北京 100081)

摘要 颜色是人的感觉器官对外界光刺激的一种反映, 是一种知觉量. 现代色度学采用心理物理学方法成功地解决了颜色匹配和色差的定量预测. 该文对视觉生理、基本匹配实验、三刺激值和色品坐标、均匀色空间、色貌预测、颜色信息交流、颜色复现等现代色度学的基本内容和新发展作了简要的介绍.

关键词 色度学, 颜色

古时候, 人们就已经掌握了绘画、印染等技术, 但对颜色本质的认识却是模糊不清的. 牛顿将日光经过三棱镜色散成光谱, 并且模拟全音阶的七个音符将光谱分为七种颜色: 红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫; 他还将光谱中的不同部分相混合, 产生了不同的颜色, 提出了颜色混合中用重心原理来确定混合色结果的方法. 牛顿是揭示颜色与光之间关系的第一个人. 19 世纪格拉斯曼(Grassmann)等在研究颜色视觉机理、颜色混合规律等许多方面作出了重要的贡献. 而现代色度学的建立才只有几十年的历史, 是现代科学家艰苦工作的成果. 值得提出的是国际照明委员会(CIE)几十年来一直引导和组织色度学重要项目的研究. 1931 年, CIE 第 8 次会议上提出了有关色度学最早的推荐书. 从而奠定了现代色度学的基础. 随着科学技术的发展和社会的进步, 人们对颜色信息的交流、颜色定量度量 and 彩色复现提出了更高的要求. “色度学”这门学科就迅速发展和完善起来, 理论和应用都取得了长足的进步.

1 人眼的颜色视觉

现在人们认为, 颜色在客观上是光的一种特性, 在主观上是一种视知觉现象, 像味觉、听

觉、嗅觉、触觉一样, 是人的感受器官对外界刺激的反映. 与一般的物理量不同, 它包含着复杂的生理和心理过程.

在整个电磁波谱中, 只有一小部分能引起人的视觉. 要严格确定可见光的波长范围是困难的, 一般来说, 可以取 380—780 nm 作为可见光的波长范围. 然而, 当光很强, 人眼又在暗适应的情况下, 眼睛可感受的波长范围至少可扩大到 350—900 nm. 而有时在色度学计算中, 取 400—700 nm, 也可以得到一定的精度. 在我们日常生活中, 见到单色光的机会不多, 一般都是混合光. 一定成分的混合光, 有一种确定的颜色与之对应; 但反过来, 一种颜色并不只对应一种光谱组合. 也就是说, 两种光谱成分完全不同的混合光, 有可能引起的颜色知觉完全一样. 例如 6 W 540 nm(绿)与 25 W 650 nm(红)的单色光相混合, 产生的颜色与 10 W 580 nm(黄)的单色光相同. 这种现象在色度学中称为“同色异谱”.

人眼能分辨颜色的数量, 人们从不同角度进行过推算, 其结果出入很大, 有人说在最佳观察条件下人眼能辨别 1000 多万种颜色. 总之人的视觉系统辨别颜色的能力是很强的. 尽管分

* 1995 年 3 月 17 日收到.