

140

1653
866
1

创新者的报告

(第1集)

中国科学院综合计划局 编

科学出版社

2000

内 容 简 介

中国科学院是我国国家创新体系的重要组成,是国家知识创新系统的核心部分之一,于1998年开展了知识创新工程试点工作。本书收录了中国科学院1998年以来取得的一批科技成果或重大阶段性进展,内容包括数学、物理学、化学、天文学、地学、生物学、技术科学及其有关交叉学科等方面内容。

本书可供具有大专以上文化程度的有关人员阅读参考。

创新者的报告

(第1集)

中国科学院综合计划局 编

责任编辑 彭克里

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2000年11月第 一 版 开本:787×1092 1/16
2000年11月第一次印刷 印张:14 1/4
印数:1—2 500 字数:216 000

ISBN 7-03-008949-9/N·105

定价:36.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)



前言

Preface

创新是人类社会进步和经济发展的动力和源泉。知识创新是指通过科学研究包括基础研究和应用研究获得新的自然科学和技术科学知识的过程。知识创新的目的是追求新发现,探索新规律,创造新方法,积累新知识,知识创新是技术创新的基础,是新技术和新发明的源泉。知识创新为人类认识世界、改造世界提供新理论和新方法,为人类文明进步和社会发展提供不竭的动力。在 21 世纪初,面临着知识经济时代的到来,建立国家创新体系是经济和社会可持续发展的基础和引擎,是综合国力和国际竞争力的支柱和后盾。如果把国家创新体系比作知识经济的动力系统,那么可以把创新知识比作其动力系统的燃料。正如江泽民主席指出:“科技的发展,知识的创新,越来越决定着一个国家、一个民族的发展进程。”

中国科学院是我国国家创新体系的重要组成,是国家知识创新系统的核心部分之一。在党中央、国务院和国家科技领导小组的领导及有关部门的大力支持下,我院从世界科技发展趋势和国家经济与社会发展的战略需要出发,在院所两个层次凝炼和提升科技创新目标,开始进行了建院 50 年来涉及面最广、意义最为深远的科学布局和组织结构调整,开展了深层次的、大力度的体制和机制改革,显著提高了科技竞争能力,有力地调动了科技人员的积极性,推动了科技创新的快速进展。

中国科学院创新工程试点工作 1998 年启动以来,取得了良好的开端,得到了社会各界的广泛关心与理解。为了加强创新知识的传播,同时也为了答谢各界对中国科学院的支持以及增加对我院科技创新工作进展的了解,我们对 1998 年实施创新工程试点工作以来取得的科技创新成果或重大阶段性进展进行了整理,编辑成《创新者的报告》系列书,陆续出版。

《创新者的报告》系列书属于科技创新成果或重大阶段性进展的简单介绍,不属于论文,为了节省篇幅,我们在编辑过程中,把参考文献都省略



了。读者欲了解哪项成果的详情，可与中国科学院综合计划局成果专利处联系或直接与撰写者单位联系。

在本书编辑过程中，得到了中国科学院有关部门、各研究所的领导、管理人员、科技人员的大力支持，尤其是报告的撰写者在科研工作的百忙中抽出时间为本书撰稿，在此，我们一并表示衷心感谢。

由于编写时间仓促和我们水平有限，书中谬误之处一定不少，敬请读者不吝指正。

编 者

INNOVATORS REPORT



高超声速湍流分离流研究

Study of Hypersonic Turbulent Separated Flow

撰稿/王世芬(力学研究所)

一、研究目的和意义

高超声速湍流分离流研究是当今世界航天高技术领域空气动力学研究的一个重要课题,具有强烈的应用背景和重大的理论价值,对航天战略有其深远的意义。21 世纪是人类开发和利用空天飞机的时期,但在空天飞机和其他高速再入飞行器表面翼、襟、进气道入口等处,由于激波与湍流边界层相互作用,使物面边界层产生分离-再附,引起严重的局部气动加热;而分离激波发生的大尺度低频振荡,不仅产生严重的气动噪声,还会引起声疲劳,直接影响到飞行器的性能和安全,合理地抑制或应用分离流是提高飞行器性能的一个有效途径。从学科的发展来看,随着计算机和计算技术的迅速发展,数值模拟已成为研究空气动力学的重要手段之一,但由于现有的湍流模型主要基于传统的平均流动概念,不包含湍流分离激波大尺度低频运动这一非定常特性,致使激波诱导湍流分离流的计算结果与实验存在较大差异。为设计先进的、安全和可靠的飞行器,建立反映湍流分离所固有的非稳定特性这一物理本质的数学模型,迫切需要开展湍流分离流场结构和激波运动特性的实验研究,以推动空气动力学的发展,满足航天高技术事业的需求。

该课题以飞行器表面若干典型、有实际意义的局部湍流分离流场为研究对象,用简化的几何外形-平板与无后掠(后掠)压缩拐角、平板与尖(钝)前缘舵作实验模型,在高超声速炮风洞中,选用准定常流动时间长和流场品质优良的高马赫数和高雷诺数气流条件,使其平板边界层自然转捩并在拐角或舵上游充分发展为湍流,通过油流显示和瞬态表面压力及热流率测量,对其高超声速绕流中湍流分离流场结构和气动加热及气动加载过程进行观测;并通过对信号的条件采样和统计分析,给出高超声速湍流分离非稳定特性,即分离激波运动的特征参数,干扰流场中最大无量纲压力和热流率标准偏差;



在对分离区相干结构分析和全流场壁面特性一定认识的基础上,探讨激波振荡的起因,寻求控制湍流分离流场的主控参数。

二、研究成果和所达到的技术水平

1. 研究成果

(1) 在国内外领先开展了高马赫数下湍流分离激波非稳定性现象观测和定量分析

在高超声速脉冲型风洞中,率先用压力和热流率脉动两种测试技术和多通道同步高速采集系统,成功捕获到高马赫数下分离区上游激波干扰区中壁面信号低频高幅脉动产生、发展和消失过程(图 1),在世界上首次给出马赫数高达 7.8 时分离激波运动的特征参数(激波运动区长度、速度、频率和激波根部历程及概率密度分布),以及分离线附近以局部平均压力无量纲的压力标准偏差最大值和以局部平均热流率无量纲的热流率标准偏差最大值(图 2)。发现分离激波的根部不是单波,而是一束压缩波;马赫数虽对无量纲分离激波运动参数影响不大,但脉动幅值却随马赫数的升高而加大。这些结果填补了高超声速激波非稳定性研究的空白,使国际上激波非稳定性现象观测和定量分析的马赫数范围从 5 提高到 7.8,为湍流分离流理论模式的完善和工程应用积累了宝贵资料。

在高超声速脉冲型风洞中获得的湍流分离激波运动特性向世界展示,激波大尺度低频运动是湍流分离的一个固有特性,无论在低速下吹式风洞或高超声速脉冲型风洞,激波非稳定现象是共同的,具有相同的物理本质,具有重要的理论价值。

(2) 揭示尖(钝)前缘舵高超声速湍流分离流场不少有意义的新现象

在世界上首次获得法向马赫数高达 5.6 时尖(钝)前缘舵湍流分离流谱图(图 3),揭示了分离线和再附线是成对出现的,只是二次分离涡尺度较小,

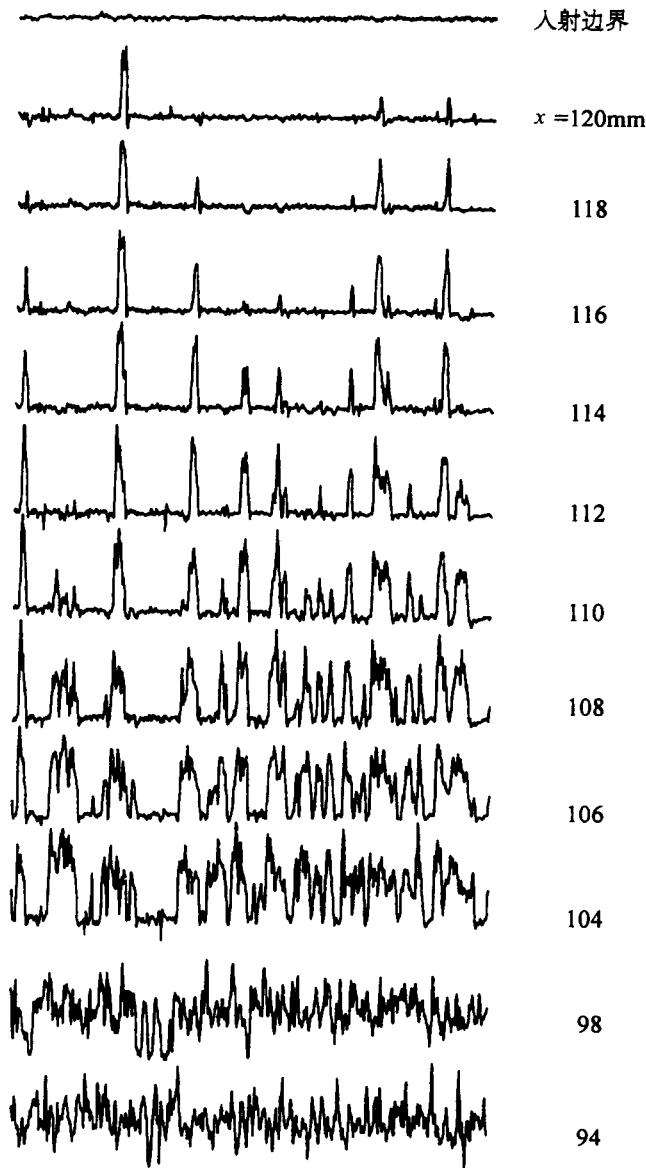


图1 分离激波上游影响起始区中心线上热流信号的典型时间历程

以致在低激波强度下出现二次分离线几乎掩盖二次再附线的现象，化解了 Settles 教授在“AIAA 90-375”一文中所提到油流显示与拓扑理论间的矛盾。建立了 $2.0 \leq M_\infty \leq 8.2$ 、 $\alpha \leq 35^\circ$ 湍流分离流场中，锥形干扰区内主分离线和主再附线位置与无黏激波角和迎角的相关式，证实无黏条件是控制锥形干扰区尺度的主要因素，而壁面压力和热流率的峰值与法向马赫数相关。



并发现舵诱导高超声速湍流分离流，流场中一旦出现二次分离，其分离线随激波强度增加向舵前缘扩展，无超声速干扰流场中呈现消失再现的现象，而上游影响线紧靠主分离线。这些现象的揭示为高超声速数值计算方法的改进和工程预计方法的建立提供了科学依据。

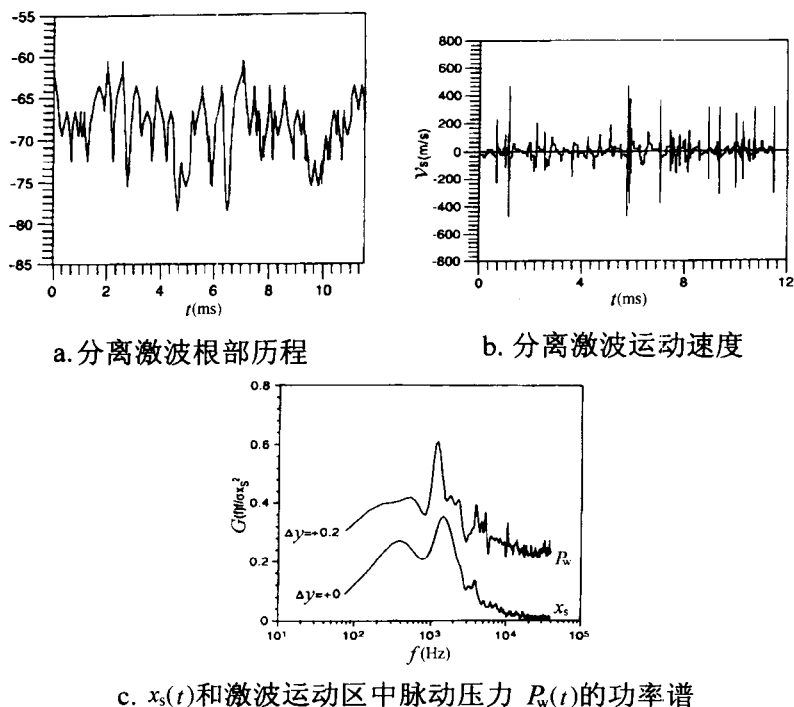


图2 $M_\infty=7.8$ 时分离激波运动的特征参数

(3) 提出分离激波振荡的起因

通过二维压缩拐角上游平板来流湍流边界层、激波运动区和分离区壁面压力脉动信号的观测和分析，指出激波振荡的原因是分离区内的相干结构，其控制因素是来流湍流边界层和逆压梯度，深化了对湍流分离物理本质的认识，为抑制激波大尺度低频振荡指出了方向，具有重要的理论价值和潜在的应用前景。

(4) 成功研制了一个精度高、响应快、频带宽的多通道表面压力和热流测试系统及信号分析程序

在该课题实施过程中，成功研制了以精度高、响应快的小型固态压阻传感器和铂膜电阻温度计为核心，24 通道低噪声宽频带热压测试仪为桥梁



的表面压力和热流率测量系统,为分离区壁面压力和热流率的动态测量提供了条件。低噪声宽频带热压测试仪结构新颖、功能齐全、使用方便,其性价比为国内外许多仪器所不及,解决了需求与经费间的矛盾,走了一条符合我国国情的道路。特别值得指出的是该课题在激波非稳定性现象观测中,除采用国际上流行的压力脉动测量技术外,还发展了壁面热流率脉动测量技术,充分挖掘了脉冲型风洞传热测试技术的潜力。就研究分离激波运动而言,热流率测量有三大优点:①传感器成本低、响应快;②空间分辨率高;③壁面热流率与摩擦系数有关,其实验数据有利于湍流模型有效性的验证和改进,因此受到国际同行的关注。

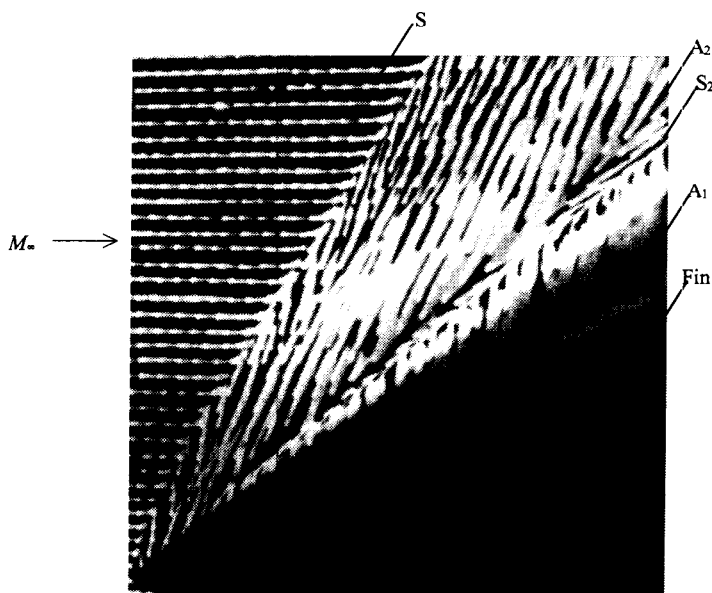


图3 $M_{\infty}=7.8$ 时 30° 尖缘舵在平板上的干扰流谱图

信号分析是将现象观测由直观感觉(定性)上升到细致结构分析(定量)的必要手段。该课题根据多通道高速采集系统同步捕获到的壁面压力和热流率瞬态变化信号,应用条件采样和统计分析方法,编写了获取激波非定常运动参数以及分析来流湍流边界层分离区脉动信息传递特性和功率谱等程序,为深入认识激波与湍流边界层干扰流场的非定常特性和探讨激波振荡的起因奠定了基础。

(5) 在高超声速脉冲风洞中,首创一种能记录和长期保存的全尺度油流谱图新方法

该技术改变传统的做法,将直接在实验模型表面涂刷含指示物油剂的



方式变成先在模型表面牢固粘贴一层强度高、不易变形、表面经打蜡抛光特殊处理的薄纸，将含指示物的油剂离散点在纸上，使其吹风后形成的油流谱图直接在纸上成像。实验后再从模型表面揭下蜡纸，得可供长期保存的全尺度油流谱图。本技术的关键是蜡纸制作，它的作用一方面改变油滴接触界面性能，减小吹风前油滴变形度，加大吹风时的流动速率，使其在毫秒级有效运行时间内快速响应形成逼真清晰的油流谱图；另一方面借助蜡层渗透吸油功能，使实验后所得的湿润流谱图变干，克服高超声速脉冲风洞真空运行给流谱图全尺度记录和保存带来的诸多麻烦，如避免了在照相和印放像片中因摄像角度、光学象差、光源布置等原因造成的图像偏差，减轻胶纸粘揭对流谱图的破坏和对运作时间、模型数量提出的要求，属国内外首创。此方法的优点是操作简便，图像清晰，结果可靠，能为壁面附近流动提供形象直观的全尺度物理图像，有利于对流场结构的了解，便于定量分析和关键区测点布局及测量系统放大倍数与量程设置，提高了实验工效。它为该课题物面附近复杂流动现象的研究提供了宝贵资料(图4)。

正是由于(4)与(5)两个关键技术的突破，该课题冲破以往物面间断点和时均测量的束缚，走出一条“点”与“面”、“时均”与“瞬态”、“信号观测”与“数据分析”相结合的道路。实践表明，只有通过“面”测量(如油流显示)，才能对分离流场有一个较全面的了解，也只有在“面”测量基础上，通过对关键区域各“点”参数的时均和瞬态测量及其结果分析，才能揭示其流动本质。

2. 所达到的技术水平

激波湍流边界层相互作用及其诱导分离由于具有强烈的应用背景和重要的理论价值，近半个世纪以来，国内外许多科学家先后开展了有关的研究工作，但主要集中在 $M \leq 5$ 领域和平均流场的观测。高超声速领域因其流场结构复杂，影响因素多，而设备能力和测试技术水平有限，研究工作十分匮乏。该课题组经过多年的艰苦努力，突破了在高超声速脉冲型风洞中观测分离激波运动参数、复杂流场结构和壁面气动加载和加热动态过程，获取和分析脉动信号所遇到的十分复杂和困难的关键技术，成功获得高超声速湍流分离区壁面流动形象直观的全尺度物理图像和激波干扰区壁面信号低频高幅脉动产生、发展和消失过程，增强了脉冲型风洞研究复杂流动和动态特性的能力，为今后开展应用基础和基本流动研究开创了广阔前景，并使我国成为国

www.ertongbook.com

三、应用情况和前景

此外，该课题组围绕其研究内容在国内外学术刊物和国际、国内会议上发表多篇论文，培养了人才，并产生了广泛的学术影响。其成果已被美国出版的 *Supersonic and Hypersonic Shock Boundary Layer Interaction Database* 和 *Fluctuating Loads in Shock Wave/Turbulent Boundary Layer Interaction: Tutorial and Update* 引用，并被 *SCI*、*EI*、*ISTP*、*Science Abstract Series A: Physics Abstracts*, *International Aerospace Abstracts* 和 *Реферативный Журнал Механика*, *Сводный Том* 收载，为我国在世界上激波与湍流边界层相互作用领域占有一席之地作出了贡献；对促进先进、安全、可靠飞行器的研制和湍流分离流机理的研究及流动模式的建立与完善具有潜在的应用前景和重要的理论价值。



概率量子克隆

Probabilistic Quantum Cloning

撰稿/郭光灿 段路明 李传锋(中国科学技术大学)

一、引言

量子信息科学是量子物理与信息科学相结合的新兴交叉前沿学科,它以量子态作为信息载体(信息单元称为量子比特),信息的传输、存储、处理、提取等均遵从量子力学原理,于是量子力学的许多特点在信息过程中便发挥出奇特的功能。业已证明,量子信息在提高运算速度、确保信息安全等方面可以突破现有经典信息系统的功能极限,为 21 世纪信息科学的持续发展开辟了新的原理和方法。量子计算机以其高度并行运算能力可以轻易地计算某些难解的数学问题,如大数因子分解,从而攻破现在广泛使用的公开密钥 RSA 体系。量子密码原则上可提供不可窃听、不可破译的保密通信体系。量子因特网能够兼备信息传输和信息处理的功能,并具有无法攻破的保密性能。尽管目前量子信息的发展仍然处于基础研究的阶段,许多优异的信息功能还有待开发,但它已为人们展现出量子信息技术十分诱人的应用前景和生机盎然的生命活力。这就是为什么量子信息在国际上兴起虽然只有短短几年时间,却已引起国际学术界、各国政府、军事界和产业界高度重视的原因。

量子信息系统的独特功能依赖于量子力学的性质,因此在量子信息的基础研究中,除了在量子理论框架下重新研究诸如图灵原理、香农定理等传统信息论的内容之外,还必须研究量子信息独有的基本规律,这些规律既是量子信息优异功能的理论基础,又是量子信息的基本限制。量子不可克隆定理便是其中最重要的规律之一,它既是量子密码安全性的基础,又给量子信息的有效提取设置了不可逾越的障碍。

量子不可克隆定理最早是由 Wootters 和 Zurek 于 1982 年在《自然》(Nature)上发表一篇短文所提出的,然而,这个定理直到 20 世纪 90 年代后



期量子信息兴起之后才引起学术界的重视。该定理指出,任何物理手段都不可能精确地复制未知量子态,否则将会违背量子叠加性原理。之后 Yuen 证明,基于么正特性,克隆两个非正交态是不可能的。Barnum 等人将量子不可克隆定理推广到混合态场合,给出所谓“量子不可播送定理”。

量子不可克隆定理确保了量子密码的绝对安全性,现有的量子密码术所使用的信源均为非正交量子态,任何窃听的行为都必然会被合法用户所发现,因此量子密码原则上可以提供不可窃听、不可破译的保密通信体系。一旦量子计算机研制成功,现在所使用的密码体系(如 RSA 体系)将不再是安全的,信息的安全性只能借助于量子密码术。另一方面,量子信息的不可克隆性给量子通信和量子计算机中信息的有效提取造成巨大困难,人们不可能通过精确复制量子态来获取信息,因此,如何从量子信息系统中获取信息便成为量子信息领域中至关重要的研究课题。

然而,量子不可克隆定理并不意味着人们完全丧失掉提取量子信息的能力,事实上已经证明,采用降低克隆精确程度的策略仍然可以有效地提取量子信息。目前已研究出两类不同原理的克隆机,一类是所谓“普适量子克隆机”,另一类是所谓“概率量子克隆机”。前者仅实施么正操作,因此它属于确定性克隆,即每次都能克隆成功,但鉴于量子不可克隆定理,所克隆出来的量子态与被克隆量子态不可能相同,即这是不精确复制的过程。通常用保真度 F 来描述两个量子态相近似的程度,若 $F=1$,则两个量子态精确相同。显然,确定性克隆的 F 必然小于 1。适当地设计可使得克隆机的性能不依赖于输入态。即对任何输入的量子态,输出态的 F 相同(小于 1),这便是所谓“普适量子克隆机”。若进一步优化克隆机的有关参数,可使 F 达到最大。例如 $1 \rightarrow 2$ 克隆机将一个输入态克隆成两个输出态,其最大保真度为 $5/6$ 。

另一方面,概率量子克隆机不仅实施么正操作而且进行量子测量,依照测量的结果来确定克隆是否成功,一旦克隆成功,被克隆出来的态与输入态精确相同,即 $F=1$,因此这类克隆机是以某个不为零的概率精确复制出输入的态。这类概率量子克隆的原理是我们在国际上最先提出的,它已作为提取量子信息的有效方法,被学术界越来越广泛的引用并更加深入的研究,我们在“*Phys. Rev. Lett.* (1998)”等刊物上发表的有关论文成为该领域的原创性研究成果。

目前,量子克隆不但作为量子信息提取的手段被广泛研究,还被应用



到量子计算等领域来提高量子计算等的能力,甚至被用来提高探测器的效率等。

二、概率量子克隆原理

量子克隆机是对其输入量子态实行么正变换的量子系统,普适量子克隆过程仅运用这类么正变换。在量子理论中量子测量会导致波包坍缩,这是个非么正过程。我们证明,运用么正变换和量子测量能以某种概率成功地克隆出完全精确的量子态。首先,我们证明了如下的定理:

定理 1: 如果 $|\psi_0\rangle$ 和 $|\psi_1\rangle$ 是量子系统 A 的两个非正交态,那么总存在么正变换 U 和量子测量 M , 它们结合在一起会导致下列的演化:

$$\begin{aligned} |\psi_0\rangle|\mathcal{E}\rangle &\xrightarrow{U+M} |\psi_0\rangle|\psi_0\rangle, \\ |\psi_1\rangle|\mathcal{E}\rangle &\xrightarrow{U+M} |\psi_1\rangle|\psi_1\rangle, \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $|\mathcal{E}\rangle$ 是另一个量子系统 B 的空白输入态。

设系统 A 的非正交态集 $\{|\psi_0\rangle, |\psi_1\rangle\}$ 是待克隆的态,系统 B 的输入态为 $|\mathcal{E}\rangle$, 克隆之后,要求态 $|\mathcal{E}\rangle$ 变换成为与 A 输入态完全相同的态。我们引入探测系统 P, 其初态为 $|m_p\rangle$, 于是 ABP 整个体系纯态的一般性么正变换可写成

$$\begin{aligned} U(|\psi_0\rangle|\mathcal{E}\rangle|m_p\rangle) &= \sqrt{\eta_0}|\psi_0\rangle|\psi_0\rangle|m_0\rangle + \sqrt{1-\eta_0}|\Phi_{ABP}^0\rangle, \\ U(|\psi_1\rangle|\mathcal{E}\rangle|m_p\rangle) &= \sqrt{\eta_1}|\psi_1\rangle|\psi_1\rangle|m_1\rangle + \sqrt{1-\eta_1}|\Phi_{ABP}^1\rangle, \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $|m_p\rangle, |m_0\rangle$ 和 $|m_1\rangle$ 是探测系统 P 的态, $|\Phi_{ABP}^0\rangle$ 和 $|\Phi_{ABP}^1\rangle$ 是组合系统 ABP 的两个态。由态 $|m_0\rangle$ 和 $|m_1\rangle$ 所张成的子空间记为 S_0 ; 态 $|\Phi_{ABP}^0\rangle$ 和 $|\Phi_{ABP}^1\rangle$ 与空间 S_0 正交。在克隆机中对探测系统 P 实行量子测量,若发现其态投影到空间 S_0 , 则表明 AB 系统处于态 $|\psi_s\rangle|\psi_s\rangle, s=0$ 或 1 , 于是克隆成功,若对 P 测量的结果不处于子空间 S_0 上, 则意味着克隆失败。

概率量子克隆机的成功克隆概率称为克隆效率,由方程(2)不难看出, $\eta_0(\eta_1)$ 是成功克隆输入态 $|\psi_0\rangle(|\psi_1\rangle)$ 的效率,这些效率依赖于克隆过程的么正变换 U , 亦即选择不同的参数,克隆机的效率是不相同的。那么概率量子克隆机是否存在最大的克隆效率? 我们业已证明了下列不等式:

ANCA QCL 4-01



$$\frac{\eta_0 + \eta_1}{2} \leq \frac{1}{1 + |\langle \psi_0 | \psi_1 \rangle|} \quad (3)$$

这里已假定了 $|\psi_0\rangle$ 与 $|\psi_1\rangle$ 为非正交态。上述不等式隐含着十分重要的物理本质，它对克隆效率设置了一个基本界线。对于非正交态，效率 η_0 和 η_1 绝不可能同时达到 100%，若某个态的克隆效率增大，则另一个态的克隆效率必然降低。方程(3)中的等式只有当 $\eta_0 = \eta_1$ 和 $|m_0\rangle = |m_1\rangle$ 场合才成立。 $\eta_0 = \eta_1$ 的情况特别令人感兴趣，它表明克隆效率不依赖于被克隆的输入态，这时候 $\eta_0 = \eta_1 = \eta$ 且有

$$\eta \leq \frac{1}{1 + |\langle \psi_0 | \psi_1 \rangle|} \quad (4)$$

因此，效率 $\frac{1}{1 + |\langle \psi_0 | \psi_1 \rangle|}$ 事实上就是克隆机所能获得的最大效率，其值取决于两个可能输入态的内积 $\langle \psi_0 | \psi_1 \rangle$ 。这个结果表明，输入态的交叠越大，最大的克隆效率就越小。

那么，是不是任何量子态的集合都可以被概率克隆？我们业已证明，只有线性无关的量子态才可以被概率克隆，这便是下列定理：

定理 2：由态集 $S = \{|\psi_1\rangle, |\psi_2\rangle, \dots, |\psi_n\rangle\}$ 中秘密地选取出来的量子态当且仅当 $|\psi_1\rangle, |\psi_2\rangle, \dots, |\psi_n\rangle$ 线性无关，才可能采用一般性的幺正—坍缩操作来实现其概率克隆。

显然，普适克隆可以看成是概率克隆的特例，即所有克隆效率 (η_i) 均为 1。当且仅当 $|\psi_1\rangle, |\psi_2\rangle, \dots, |\psi_n\rangle$ 彼此正交才有可能实现这类克隆。因此，非正交态绝不可能采用相同的克隆机来实现确定性克隆。

应当强调的是，普适克隆和概率克隆都受到量子不可克隆定理的制约，在普适克隆中，这种制约体现在最大保真度必定小于 1，在概率克隆中，则体现在最大克隆效率必定小于 1。