

Xenakis 與隨機音樂 (Stochastic Music)

楊凱仁

一、前言

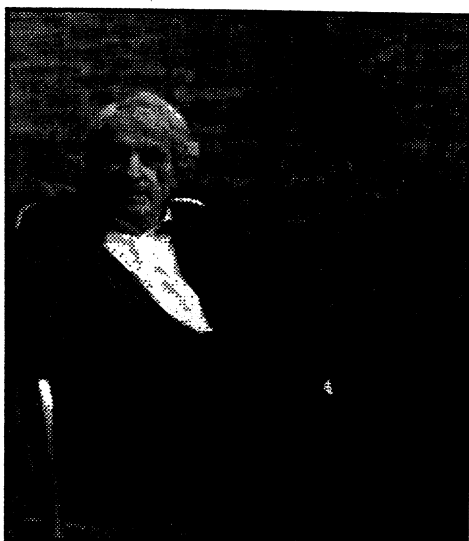
二十世紀的人類生活經歷著快速的轉變：工業發展、兩次世界大戰、科技成就、冷戰時代、快速現代化、陌生化、……，這些改變衝擊著人類的生活與價值觀，並深刻地反映在音樂的表現上：反浪漫、勇於探索、大膽懷疑、反美學、高度實驗性、批判性、……，而二十世紀的音樂發展，在題材上刻劃極度深刻，風格表現多元化，由早期的表現主義、新古典主義，到後來的具象音樂、序列音樂、機遇音樂、電子音樂、低限音樂、……，這些音樂充分反映了這個時代的歷史變遷、社會發展以及人類的現實生活。

十九世紀末的音樂創作，調性中心的感覺已漸漸消失，到了二十世紀，音樂更加遠離調性，甚至以消除調性為目的，而調性廢除後的音樂創作，並非是隨興而至的寫作，必須要有精簡的嚴格要求（如：十二音技巧、序列音樂）或高度形式化要求（如：數學），才能寫出一連串不中斷的聲音。Xenakis 是二十世紀中期作曲家中，致力於音樂與科學的整合，追求音樂形式之美，深具實驗性的探索與對古希臘文化的追尋，其觸角遍及點描音樂、音響作曲、電子音樂、電腦音樂、……，以全新的音樂思維取代傳統，展現了現代精神、理性思想，並影響了歐美先進作曲法的發展。

二、Xenakis 的生平與創作

（一）概述

Iannis Xenakis，揚尼斯·星那基斯 (1922-2001)，具希臘血統的法國建築師、作曲家、音樂理論家與教授，1922年5月29日於羅馬尼亞(Romania)的 Braïla 出生，是家中長子，2001年2月4日病逝於法國巴黎，父親 Clearchos Xenakis、母親 Fotini Pavlou 皆是希臘人，父親從商；1953年與 Françoise Gargouil 結婚，育有一女 Mākhi。



(二) 羅馬尼亞的童年時期

Xenakis 一家在羅馬尼亞居住達十年之久，其間 Xenakis 廣泛接觸了吉普賽音樂、羅馬尼亞的民間音樂與希臘正教(Orthodox Church)儀式中的拜占庭(Byzantine)音樂，造成其日後一度對民間音樂感興趣並應用民間音樂素材於創作中；在家中，母親也會演奏古典鋼琴曲，這些都是 Xenakis 早期的音樂經驗。

(三) 希臘的求學階段與參與反抗運動

1932 年舉家遷回希臘，Xenakis 在 Spetsai¹的私立學院接受教育，對科學與希臘文學有強烈興趣，並在此期間開始藉由廣播接觸到從貝多芬到布拉姆斯的西方音樂，也對希臘傳統音樂感到興趣，曾參加學校的合唱團，1934 年起，開始在 Aristotle Kundurov 門下學習鋼琴與理論課程，在希臘傳統音樂的影響之下，Xenakis 寫下了少數的合唱與器樂作品，但之後都被他所銷毀；後來由於想成為工程師，1940 年秋天進入雅典工藝技術學院(Athens Polytechnic Institute)學習工程學與數學，但同年 11 月由於義大利入侵希臘，學校課程被迫中斷；之後二次世界大戰爆發，希臘遭到納粹德國佔領，²當時德國在希臘徵收糧食，造成 1941 年到 42 年冬天數以千計的希臘人死於饑荒，並在 1943 年 2 月強徵希臘人投入德國後方的生產工作；起初 Xenakis 加入右翼國家主義反抗組織，但在 1941 年底，Xenakis 跳槽加入由共產黨領導的國家解放陣線，之後成為該反抗納粹組織的書記，Xenakis 在群眾示威活動中相當活躍、積極，參與武裝解放運動達四年之久。

1944 年 10 月中旬，英軍擊退納粹德國並接管希臘，恢復希臘君主政體並著手消滅共產黨領導的國家解放陣線，1945 年 1 月 1 日，在一場對抗英軍坦克的武裝巷戰中，Xenakis 的臉部遭子彈擊中、嚴重負傷，造成左眼失明。之後國家解放陣線失去了政治與軍事力量，英軍為了捉拿餘孽，展開了白色恐怖；儘管活躍於戰時的反抗運動，Xenakis 仍在 1946 年 2 月獲得工程學士文憑，隨即被徵召從軍，在軍中 Xenakis 獲悉凡過去曾參加國家解放陣線的黨員皆被送往集中營服刑，於是逕行逃亡，但遭到逮捕，之後判處死刑、褫奪公權終身，1947 年 9 月，Xenakis 持假護照逃至義大利，並非法入境法國，試圖經由法國逃往美國，卻在巴黎因為非法移民的身份遭受扣留；在學生時期的國家解放陣線與遭遇白色恐怖之後，Xenakis 不再加入任何特定的黨派與政治組織。

(四) 法國的工作時期. 建築師與作曲家

1947 年，Xenakis 流亡巴黎，由於之前在音樂學習上多靠自學，為使自己的

¹ 希臘的一個島嶼。

² 德國自 1941 年 4 月起佔領希臘，直到 1944 年 10 月。

音樂學習更臻完善，在巴黎師範音樂學院(Ecole Normale de Musique)受教於奧乃格(Arthur Honegger, 1892-1955)、米堯(Darius Milhaud, 1892-1974)門下，1950 到 1951 年期間，在巴黎音樂學院(Paris Cons.)師事梅湘(Olivier Messiaen, 1908-1992)，學習音樂分析與音樂美學，梅湘對其大部份皆靠自學而來的音樂才能與具原創性、豐沛的音樂理念感到欣賞，並給予鼓勵與幫助，Xenakis 也曾前往瑞士的 Gravesano，與謝弦 (Hermann Scherchen, 1891-1966)學習音樂，³謝弦給了這位年輕作曲家許多幫助，後來更為其擔綱多部作品的首演指揮工作，從 1957 年舉行首演的 *Pithoprakta* 到 1966 年首演的 *Terretektorh*。

然而早期在法國流亡的 Xenakis 並非只與音樂家多所接觸，1948 到 1959 年期間，為了生活，他為建築大師柯比意(Le Corbusier)工作，⁴起初只是作為一名工程師，後來逐漸擔任重要職位，成為其工作團隊中的建築師，參與多項建築工程，包括南特⁵(Nantes)住宅區計劃、Chandigarh⁶會議大樓、巴格達(Baghdad)體育場、……。

1954 年，Xenakis 創作了個人第一部音樂作品《靜止之後》(*Metastasis*, 1953-54)，後來在 1958 年於比利時布魯塞爾(Brussels)舉行的世界博覽會會場上，Xenakis 將《靜止之後》(*Metastasis*)的創作方法應用於飛利浦展覽館(Philips pavilion)的建築設計，在世界博覽會會場上，他也結識了瓦瑞茲(Edgard Varèse, 1883-1965)，後者正忙於將在飛利浦展覽館內播出的《電子詩篇》⁷(*Poème électronique*, 1957-1958)，Xenakis 也由 Varèse 的創作中得到刺激，了解電子媒介的創造性潛力，並開始嘗試音效與燈光藝術的實驗；1963 年於巴黎出版個人音樂理論著作《形式化的音樂》(*Musiques formelles*)，⁸1965 年成為法國公民，並定

³ Hermann Scherchen，赫曼·謝弦，1891 年 6 月 21 日生於柏林，卒於 1966 年，自修苦學成功的德國指揮家，1918 年創立了謝弦弦樂四重奏團(Scherchen Quartett)，1924 年接替名指揮 Wilhelm Furtwängler，成為法蘭克福交響樂團的指揮，1932 年離開德國前往瑞士，其音樂著作《指揮手冊》(*Handbook of Conducting*) 是指揮學上的重要論著。

⁴ 柯比意 (Le Corbusier, 1887-1965)，1887 年生於瑞士，作家、畫家、建築師以及市鎮規劃師，法國建築大師，在建築上尋求與各種藝術的統合。

⁵ 地名，位於法國的港口城市。

⁶ 地名，位於印度。

⁷ 1957 年，Varèse 應荷蘭電氣公司 (Philips) 的邀請，為布魯塞爾世界博覽會的飛利浦展覽館設計音響。根據建築師們的構思，Varèse 希望其作品能帶給聽眾「創世紀」的感覺，因此 Varèse 創作了《電子詩篇》，採用了傳統的獨唱、合唱、鋼琴與打擊樂，並加入了純電子音響、噪音、鐘、鐘錶滴答聲、警報器、鑽床、電梯、各種人聲、錄音裝置... 等音響；Varèse 將這些聲音混合在一起，樂曲本身沒有明確的曲式結構，現場由安置在四面八方的 425 個擴音器播放這部作品，給予人一種立體空間感。《電子詩篇》經常被認為處於噪音的邊緣，旋律設計、動機發展都不明顯，也不存在著曲式結構。

⁸ 此書的英文譯本於 1971 年出版，英文修訂第二版於 1992 年出版。

居巴黎，爲了刺激與增進音樂理論的研究，1966 年他在巴黎創建了「數學音樂和自動化音樂中心」(Centre d'Études Mathématique et Automatique Musicales) (EMAMu)，之後 Xenakis 開始在世界各地參加其音樂演出活動、巡迴演講、教授作曲與建築；1967 到 1972 年期間，執教⁹於美國印第安納州立大學 (Indiana University)，並於印第安納州立大學成立了 EMAMu 的姊妹機構，「數學音樂和自動化音樂中心」(Center for Musical Mathematics and Automated Music)。1970 年，法蘭西學院 (Collège de France) 的核能研究中心 (Centre de Recherche Nucléaire) 授予 EMAMu 官方認可地位。

1972 到 1974 年期間，Xenakis 開始與「國家科學研究中心」(Centre National de la Recherche Scientifique) 合作進行研究；並自 1972 年起，執教於巴黎大學，直到 1989 年爲止；1974 年獲頒拉威爾獎章 (Ravel Medal)；1975 年被選爲美國藝文學院 (American Academy of Arts and Letters) 榮譽院士；1976 年，獲得國家音樂大獎 (Grand Prix National de la Musique) 並在巴黎 Sorbonne 大學獲頒博士學位 (Doctorat d'Etat)，後來根據當時舉行口試¹⁰時的錄音，1979 年於巴黎出版《藝術／科學：合成》(Art/Science: Alloys)；1983 年成爲法國美術學院 (Académie des Beaux-arts) 院士；1987 年獲得巴黎音樂大獎；1999 年獲頒 Polar 音樂獎 (Polar Music Prize)。

(五) 音樂創作與理念

早期參與希臘反納粹運動的受苦經驗與身爲工程師、建築師的工作經驗，深刻地影響了後來成爲作曲家的 Xenakis，透過運用數學概念於音樂創作的組織架構中，Xenakis 背離了其所認爲的「固執的」序列主義，使用集合論 (Set Theory)、符號邏輯 (Symbolic Logic)、機率論 (Probability Theory) 於創作之中，並發表具目的論與非決定論的「隨機作曲法」(stochastic method)，不同於純粹的機遇手法；Xenakis 喜歡運用希臘文爲所有作品命名，以強調現代科學與藝術的哲學其實是源自古希臘的概念，後來 Xenakis 更試圖將古希臘悲劇融入自己的創作中；1980 年，Xenakis 利用電腦發展了“UPIC”，這是一種電子作曲機器，可將畫在光盤上的線條轉換爲音樂，Xenakis 將 UPIC 運用於作曲與音樂教育，任何沒有學過作曲的人只要掌握了有關圖形與音樂的關係，就可以把自己的情緒、想法畫出來，並轉換爲音樂。雖然 Xenakis 曾創作電子音樂，但其大部份作品仍是使用傳統的

⁹ Xenakis 爲印地安那州立大學的客座教授，每年的授課期間只有幾個月。

¹⁰ 口試於 1976 年 5 月 18 日舉行，口考教授有：Olivier Messiaen, Michel Ragon, Olivier Revault d'Allonnes, Michel Serres, Bernard Teyssède。

西方樂器。

Xenakis 音樂創作的理念是「形式化」(formalization)，由數學模型中得到抽象的結構，或許是受到古希臘數學家畢達哥拉斯 (Pythagoras) 「萬物皆數」觀念的影響，Xenakis 運用數學模型控制音樂的組成，其所使用的數學模型有：

1. 機率論：
 - (1) 平面上點的機遇分佈 (作品：*Diamorphoses*)
 - (2) 大數法則 (作品：*Pithoprakta*)
 - (3) 最小約束 (minimal constraints) (作品：*Achoripsis*)
 - (4) 常態分佈 (作品：*ST/10*、*Atrées*)
 - (5) 馬可夫鏈 (作品：*Analogiques*)
2. 賽局理論 (game theory) (作品：*Duel*、*Stratégie*)
3. 群論 (group theory) (作品：*Nomos Alpha*)
4. 集合論與布林代數 (set theory and Boolean algebra) (作品：*Herma*、*Eonta*)

Xenakis 相當偏愛使用機率論數學模型，之所以偏愛機率論，是因為機率論模型能夠造成聲音集中成團，形成他所謂「聲音的雲」(clouds of sound)、「聲音的銀河」(galaxies of sound)。

三、機遇音樂與隨機音樂

機遇音樂、偶然音樂與隨機音樂¹¹，這三個中文譯名的意義，單就中文字面上的理解，其概念是接近的，但若深究原文，隨機音樂的含意是與機遇音樂、偶然音樂完全不同的概念，雖然都有機率、機會的成份，但操弄機率的方式彼此不同，茲分別說明、介紹於下：

(一) 機遇音樂、偶然音樂

「機遇音樂」或「偶然音樂」(Chance Music, Choice Music, Aleatory Music【英】；Zufallsmusik, Aleatorik【德】) 都是概念相同的音樂名詞，其中 Aleatory 或 Aleatorik 都是源自拉丁文字根 *alea*，即骰子之意。

¹¹ 目前的中文翻譯中有將 stochastic music 譯為「推測音樂」，筆者認為「推測音樂」的譯名雖然在意義上較為接近，但無法表示出 stochastic music 中的機率本質，故採用了數學與統計學上對於 stochastic 的譯法，即「隨機」。

二十世紀五〇年代，當序列主義者們忙著用複雜、精密的方法來處理和控制他們手頭的音樂素材時，一種宗旨與序列主義迥然不同的音樂誕生了。也許出於對極端控制機械性的反感，也許是因為複雜的作曲方式不可能使人聽懂，有些作曲家便試圖在音樂作品和演奏中加進部份不確定因素，以產生偶然的結果，也可算是一種即興手法。從此之後，音樂創作不單只是作曲家的成果，也給了演奏者、指揮家、觀眾有了參與創作的機會，而音樂的演出將因為每次的選擇不同、參與者不同，而產生不同的演出，這種音樂被稱為「偶然音樂」或「機遇音樂」。

「機遇音樂」的鼻祖是美國作曲家約翰·凱吉 (John Cage, 1912-1992)，1912年9月15日生於洛杉磯，1930年在克萊蒙特的一所大學肄業，曾先後在洛杉磯與巴黎隨魏斯 (A. Weiss, 1891-1971)、柯維爾 (H. Cowell, 1897-1965)、以及荀白克 (A. Schönberg, 1874-1951) 學習作曲。曾任「紐約社會研究學院」(New School for Social Research in New York) 講師、辛辛那提大學客座教授以及國家藝術文學研究所委員。

John Cage 受過嚴格的序列主義訓練，也接觸了大量非西方主流音樂文化，1945年起，他開始研究起東方哲學與禪宗，這也影響了其對於音樂創作的認識；Cage 顯然是受到禪宗哲學的深刻影響，他認為作曲家必須放棄控制聲音的意念，要重新改變對音樂的認識，設法讓音樂成為聲音本身，而不是任何人為的理論或表現人類情感的工具。曾經有人問他寫作音樂的目的是什麼時，他回答說：「我的目的就是取消目的」。也因此其創作風格，更導向了「機遇」的範疇。其機遇音樂作品有：《變動的音樂》(*Music of Changes for Piano*)、《想像風景第四號》(*Imaginary Landscape no.4*)。

1957年史托克豪森 (Karlheinz Stockhausen, 1928-) 於達姆斯達 (Darmstadt) 發表的作品《鋼琴曲十一》(*Klavierstücke XI*) 就是一部帶有機遇音樂傾向的作品，包含十九個音樂片段，演奏的順序自由，演奏家可以隨機選擇樂段演奏，某些段落可省略，亦可重複，但是當一個片段重複彈奏之後，就必須終止演奏。因此，很難會有兩次完全一樣的演奏。

機遇音樂作為一種音樂觀念，已為部份作曲家運用於創作之中。但大多數的作曲家都保持著一種慎重的態度，他們有選擇地運用偶然的手段，從而窺探它自由、突有變化、出人意料的魅力，他們並不要像 Cage 那樣，撼動人們對音樂的認知以及動搖整個音樂藝術的根基，他們只想為音樂加上點意想不到的裝飾。因此，機遇的運用在 Cage 的音樂裡幾乎已是他表達音樂思維的目的，而在其他

作曲家手中，機遇只是作為一種音樂創作的手段而已。

(二) 隨機音樂

「隨機音樂」(英文：stochastic music，德文：stochastische Musik) 為 Xenakis 音樂創作的理念與方法，所謂「隨機」(stochastic) 並不同於全然的機遇、偶然，其原始希臘字源為 *stochos*，意即「無法避免地朝向某個目標、終點邁進」¹²，這是一個由機率論 (Probability Theory) 中借來的名詞，用來泛指採用機率方式進行創作並受到機率法則所控制的現代音樂，即音樂的創作雖是機遇、偶然的過程，但藉由經過設計的機率或隨著機率法則，音樂並非是開放、大量地循環產生，而是在開放中逐步走入一種封閉的狀態，其中個別元素的行為無法預料，但組合而成的整體卻能被預先設定，換言之，即一種受控制的即興。

出於對序列音樂極端決定論的反感，Xenakis 在 1954 年發表了反對序列音樂的論文，《序列音樂的危機》(*La crise de la musique sérielle*)，並在兩年後提出了“stochastic music”的作曲方式，在文中他提到：

線性複音由於其複雜性而破壞了自身的結構，實際上，人們只聽到分散在不同音域的一堆音，巨大的複雜性妨礙了聽者對聲部內在關係的理解，也偶爾造成了一種非理性的壯觀聲響。在線性複音系統與聽到的音響效果間存在著矛盾，即音響效果究竟是面狀或是團狀？當我們把每個音都當作個別獨立的存在時，複音結構的內在矛盾終將消失。事實上，當線性合成及其複音重合不再作用時，在特定的時刻，每個獨立狀態的統計平均值¹³與其移動轉變的平均值將有其價值，我們所選取元素的平均值能夠控制其所得到的壯觀聲響。這個結果是由機率的觀念所推導而來，質言之，這是一條脫離傳統線性範疇音樂思維的新出路。¹⁴

Xenakis 所謂的「能夠控制其所得到的壯觀聲響」，乃是利用機率論中的「大

¹² 在數學中，對於「隨機過程」(stochastic process) 的研究，也會出現朝向某一目標、終點邁進的現象。

¹³ 在此文中，可將平均值視為機率，以增進了解。事實上，統計上的平均值與機率的觀念其實是一體之兩面。例如：在大選後，可實際統計各候選人的得票率，這是一種統計的平均值；但對於下次的大選而言，這個平均值便成了一种預測值，即過去的平均被視為一種未來的機率。又如：學生的學期平均成績 90 分，這 90 分固然是過去一學期來各科的平均值，但對於下學期而言，90 分則成爲一種極可能獲得的成績，具有機率上的意義。

¹⁴ 轉譯自 Xenakis, Iannis: *Formalized Music*. New York, 1992. p.8。

數法則」(Law of Large Numbers) 來控制音樂，使得音樂在隨機、機遇的發展之外，仍有一潛在的共同趨向。

「大數法則」，又稱「大數論」、「大數定律」或「平均法則」，是機率論的主要法則之一，「大數法則」的意義是：在隨機現象的大量重複出現中，往往呈現幾乎必然的規律。我們可用擲骰子的現象來說明何謂「大數法則」，擲一顆骰子(公正的骰子)，得到 1 點、2 點、3 點、4 點、5 點、6 點的機率各是六分之一，可是實際上擲一顆骰子六次卻很難得到 1 點、2 點、3 點、4 點、5 點、6 點的情形各一次，但若是擲一顆骰子六萬次或六十萬次，便會發現 1 點、2 點、3 點、4 點、5 點、6 點出現的次數很平均，機率也接近六分之一。

以上乃是大數法則的一種最基本例子，在 Xenakis 的音樂創作中，隨機音樂乃是藉由計算、模擬、推測而求得，一切皆是偶然與機遇的產物，是極端的非決定論，唯一的決定因素便是在過程中由「大數法則」擔任音樂背後的控制機制。

(三) 總結. 機遇音樂與隨機音樂的比較

相同之處：

- 1.出現的時間大致相同，皆在二十世紀五〇年代。
- 2.皆反對序列主義的極端決定論。
- 3.皆使用偶然性於創作中。

相異之處：

機遇音樂或偶然音樂	隨機音樂
John Cage 所提倡	Iannis Xenakis 所提出
作曲家利用「偶然」的設計，使演奏者與觀眾能夠實際參與音樂的創作，難以有兩次一樣的演出。	透過電腦，利用隨機的計算、模擬、推測而產生音樂。
由作曲家決定偶然性的設計與實行	由「大數法則」來控制偶然

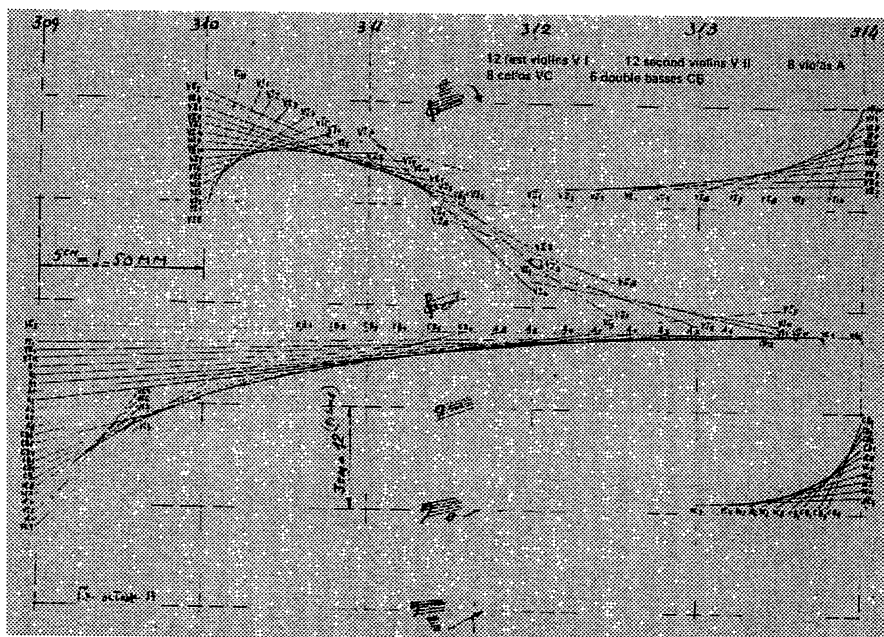
四、隨機音樂——概念的形成與創作

(一) 第一部作品《靜止之後》(Metastasis)

在點描性音列音樂盛行時，Xenakis 發表了由滑音 (glissandi) 所構成的《靜

止之後》¹⁵(*Metastasis*)，為 Xenakis 的第一部創作，寫作於 1953-54 年間，這首為六十一個獨立樂器而寫的曲子，旨在探索弦樂器的音響性能，特別是滑音，1955 年於 Donaueschingen Festival 由指揮家 Hans Rosbaud¹⁶擔綱首演，《靜止之後》是一個導向形式化音樂 (Formalized Music) 的起點，在這部作品中，作曲家進行了許多創作嘗試，首先，在記譜方式上，由於 Xenakis 認為音樂除了具有時間性之外，也具有抽象的空間性，因此 Xenakis 放棄了傳統五線譜，而是採用座標化的記譜法，用橫座標軸 (即 x 軸) 表示“時間”，並用縱座標軸 (即 y 軸) 表示“音高”【譜例 1】¹⁷。

【譜例 1】



其次，聲部數量達到 61 聲部，傳統樂團被極端地分割。並且使樂團中的弦樂團系統地使用個別的滑音，在總譜上，每個弦樂聲部皆有著經過計算的特定角度，這些經由編織的滑奏試圖造成一種聲音的空間感，並在時間進行中不斷變化，形成不斷前進的「滑奏音浪」¹⁸【譜例 2】；身為建築師與作曲家的 Xenakis 並不認為建築與音樂理論是毫不相關的，相反地，他認為與聲音有關的音樂作品也必定和空間有關，在《靜止之後》創作完成的幾年後，1958 年於比利時布魯

¹⁵ *metastasis* 本有「轉移」、「轉換」、「新陳代謝」之意，但這部作品名為 *Metastasis*，其意義乃是由 *meta* (後設、元、之後) 加上 *stasis* (靜止、停滯) 所組成，因此宜譯為《靜止之後》(*After-standstill*)。

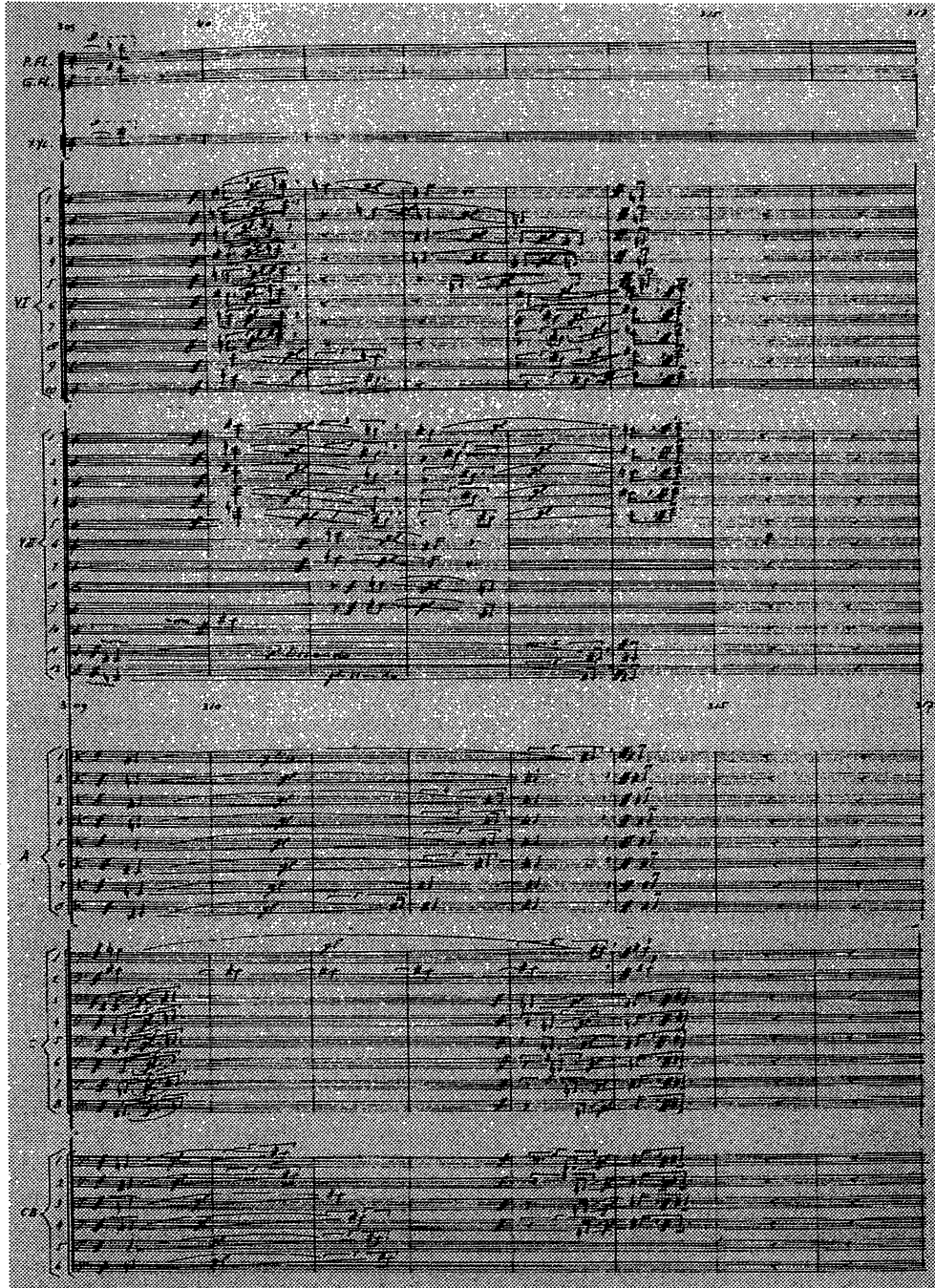
¹⁶ 奧地利指揮家，1895-1962。

¹⁷ 本文中，所有的譜例皆是取自《形式化的音樂》(*Formalized Music*) 一書。

¹⁸ 這個名詞乃是出自《劍橋插圖音樂指南》，Stanley Sadie 主編。濟南，2002。筆者認為「滑奏音浪」相當符合《靜止之後》在聽覺上的效果。

塞爾舉行的萬國博覽會上，Xenakis 將《靜止之後》的「滑音編織」¹⁹應用於飛利浦展覽館 (Philips pavilion)²⁰ 的外觀建築設計【圖 1】。

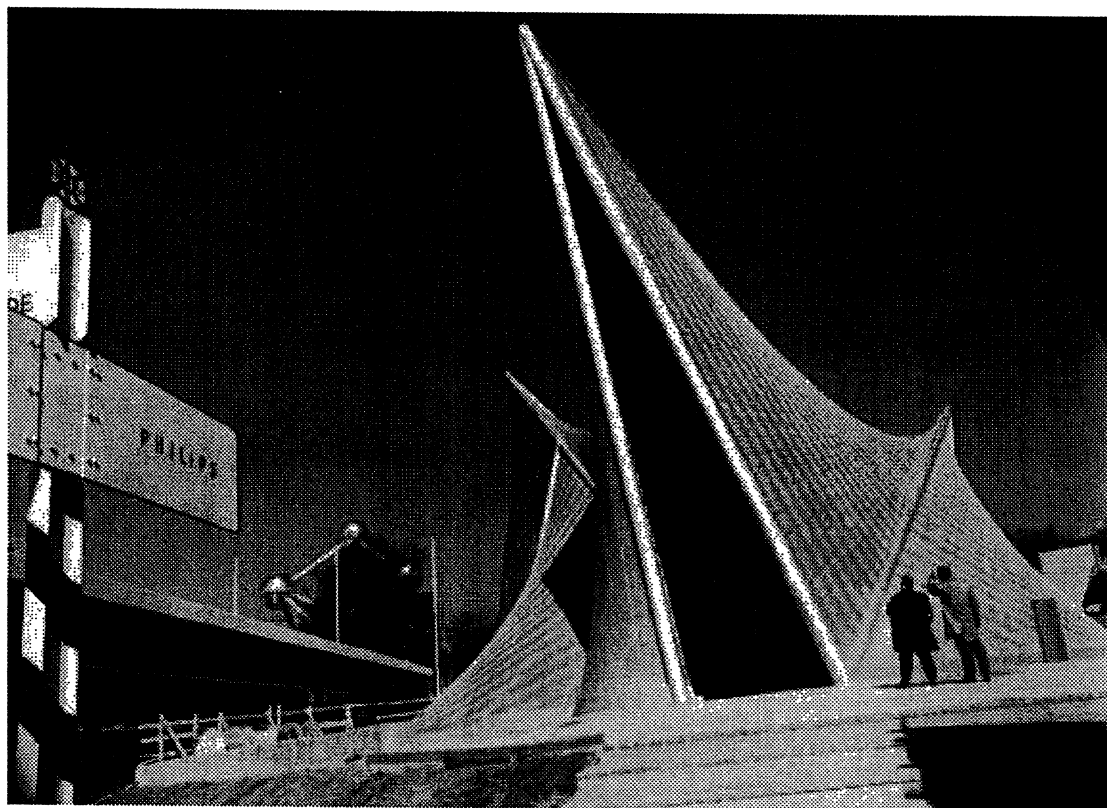
【譜例 2】



¹⁹ 此為筆者所提出，對照【譜例 1】進行比對，彼此交錯的滑音編織成網狀結構，故稱為「滑音編織」。

²⁰ 設計飛利浦展覽館 (Philips pavilion) 的建築師乃是以 Xenakis 為首的柯比意 (Le Corbusier) 建築設計團隊，因為當時柯比意手邊還有其他的建築計劃。而實際掛名飛利浦展覽館 (Philips pavilion) 的建築師只有柯比意一人。

【圖 1】飛利浦展覽館 (Philips pavilion)



Xenakis 努力使自己的音樂作品與建築中的規律相結合，以體現一種形式之美，在《靜止之後》中，Xenakis 運用了黃金分割、雙曲線與拋物線²¹進行「滑音編織」，而在縱的聲部關係上，Xenakis 也部份採用了機率的計算，因此這部作品可視為作曲家走上隨機音樂的起點。《靜止之後》也展現了作曲家企圖以傳統樂團表現出新的音響效果，而這樣的音響效果使得新興的電子音樂也相形見拙。

(二) 走向隨機音樂—《透過機率模擬的行動》(Pithoprakta)²²

1954 年，Xenakis 發表了反對序列音樂的論文—《序列音樂的危機》(*La crise de la musique sérielle*)，並提出了 stochastic music 的初步觀念，Xenakis 反對序列音樂中極端的決定論，認為維也納樂派的序列主義者與梅湘由於無法在邏輯上控制無調性的非決定論，於是便極端地轉向了最嚴格的控制系統，而這個系統遠比調性系統更為抽象，換句話說，Xenakis 認為序列主義對於音高、音長、音強、音色的控制是不合理與抽象的，他認為需要在邏輯上控制無調性，而非以極度的

²¹ 請參見附錄 A。

²² 目前所見的中文譯名中，有《機率行為》或《皮托普拉克塔》。

序列方式控制無調性，因為這樣似乎又掉入了另一個遠比調性系統更為抽象與複雜的狀態中。²³因此 Xenakis 在論文《序列音樂的危機》發表之後的第二年便提出了“Stochastic Music”的作曲方式，他在其理論著作《形式化的音樂》(Formalized Music) 提到了：

透過音樂上的必然，這種機率論中的計算法則進入了作曲之中。²⁴

在自然現象中，雨或冰雹撞擊堅硬表面的聲響、夏日的蟬鳴都是一種隨機的(stochastic) 聲音現象，這些音響是由數以千計的獨立聲音組合而成，這一大群的聲音如同一個整體般，是一個嶄新的聲音現象，並遵循著隨機法則，如果一個作曲家試圖以大量的弦樂撥奏(pizzicato) 來形成與模擬這樣的聲音現象，那麼他需要理解其背後嚴密與邏輯性的數學法則。在政治性的集會示威活動中，數以千計的人群以整齊的節奏呼喊著口號與訴求，而後集會的領導者喊出另一個新口號，這個新口號開始傳播給所有的人，並漸漸地取代了原來的舊口號，造成一種聲音的轉換，城市裡充滿著喧囂聲，而後敵軍的武裝鎮壓開始，²⁵示威民眾與敵軍爆發了衝突，這是一個充滿暴力與殘暴之美的事件，原本以完美整齊節奏所呼喊的口號在一瞬間成了巨大、混亂、不規則的尖叫，機關槍的擊發聲與子彈的呼嘯聲使得群眾的呼喊達到了完全的失序，群眾很快地被驅散了，在一場視覺與聽覺的刺激後，伴隨而來的是充滿絕望與死亡的平靜，這種以連續或突然暴發的方式，由完全的秩序到全然失序的過程便是隨機的法則(stochastic laws)²⁶。

Xenakis 的第一部隨機音樂作品是於 1955-56 年間所創作的《透過機率模擬的行動》(Pithoprakta)，這是一首為五十個獨立樂器而寫的曲子，包含四十六件弦樂器、兩把長號、一架木琴與一片木板。Xenakis 將這部作品題獻給自己的老師謝弦²⁷ (Hermann Scherchen, 1891-1966)，謝弦也擔綱起 1957 年 3 月在慕尼黑 Musica Viva 音樂會的首演指揮工作。作曲家利用機率理論中的發現，試圖在聲音的連續與不連續之間進行對抗，透過滑奏表示聲音的連續，用撥奏、弓的敲打、以手拍打弦樂器的共鳴箱代表聲音的不連續，以大量的孤立音點(即不連續音)

²³ 一般認為序列主義的音樂與其他音樂相比，已是較理性與缺乏感情，但 Xenakis 認為當序列主義者在安程序列時，其實是帶有情感的選擇(如：對某些特定數字的偏好)，即使序列的安排能夠不帶有情感、好惡，但這樣的安排也是缺乏邏輯與不合理的。

²⁴ 轉譯自 Xenakis, Iannis: *Formalized Music*. New York, 1992. p.8。原文為：The laws of calculus of probabilities entered composition through musical necessity。

²⁵ Xenakis 曾參與反納粹的集會示威活動，這些活動往往伴隨著血腥鎮壓而結束。

²⁶ 以上關於集會示威受到血腥鎮壓的描述，乃節譯自 Xenakis, Iannis: *Formalized Music*. New York, 1992. p.9。

²⁷ 請參見註 3。

充斥著整體的音響空間，造成一種密集的粒狀效果，再藉由大數法則的控制，形成集中的「聲音的雲」(clouds of sound)。

這部作品是作曲家真正的隨機音樂創作，Xenakis 透過三個嚴格定義的隨機滑奏公設²⁸ (hypothesis) 逐步建立起隨機音樂的模型：

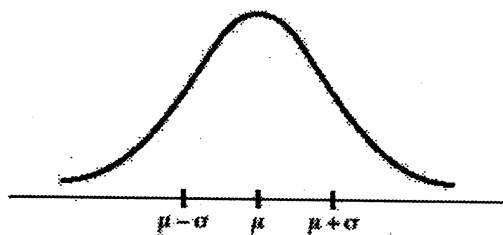
公設一：在滑奏時，單位音程的聲音密度是一個常數，例如：在兩個具有相同音程的音域內，使用同樣樂器進行滑奏時，應包含著相同的聲音粒子數²⁹。

公設二：滑奏的速度應是均勻的，但具有方向性，如：上行滑奏的速度為正，下行滑奏的速度為負。

公設三：滑奏的方向具有均等性，即滑奏有可能為上行亦可能為下行，上行或下行的機率各是二分之一。

由這三個公設出發，Xenakis 開始推導他的隨機滑奏模型³⁰，Xenakis 得到了一個常態分佈 (Normal Distribution) 的模型【圖 2】。換言之，在其嚴格定義的公設之下，使用樂器進行隨機的滑奏，其音長、音高、音強分配的模型是常態的，即就音高而言，不會有太多尖銳的高音，也不會有太多的低音，音高使用的平均值集中於中間音域。

【圖 2】常態分佈 (Normal Distribution) 曲線



常態分佈 (Normal Distribution) 模型是創作隨機音樂的一個方式，也是大數法則使用的先決條件，建立在常態分佈的模型下便可以使用大數法則，在數學上，大數法則的內容是：有 n 個常態分佈的獨立³¹ 機率事件 (x_1 、 x_2 、 x_3 、……、 x_n)，它們的平均值都是 μ 、變異數都是 σ ，那麼由這 n 個獨立機率事件 (x_1 、 x_2 、 x_3 、……、 x_n) 所形成整體機率事件的平均事件 Y ，即 Y 等於

²⁸ 這三個公設皆相當抽象，旨在建立一個符合邏輯的數學模型。

²⁹ 將之具體化，可想像以小提琴由 Do 滑奏到 Mi 或由 Fa 滑奏到 La 的大三度內，有著數目相同的聲音粒子，是均勻的。

³⁰ 詳細推導過程請參見附錄 B。

³¹ 所謂的獨立，是指事件與事件之間不會互相干擾、影響。

$\frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n}$ ，則當 n 趨近於無限大時， Y 的平均值也將等於 μ ，寫成

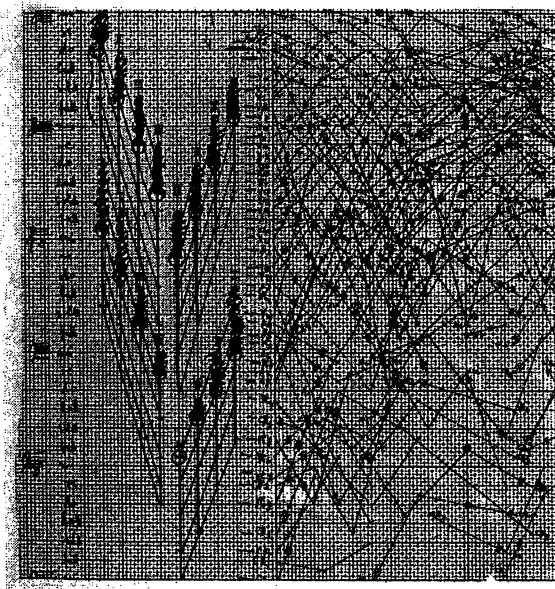
數學式便是 $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} \right) = \mu$ ；如果以具體例子來說，則可設想在相

同的性別下，有著相同的平均壽命，³²而世事往往未能盡如人意，因此有些人走得早，有些人走得晚，但當我們就整體的行為來觀察時，便會發現：雖然人的壽命有個別的不同，但整體看來，仍是往平均壽命的數值集中。

Xenakis 的《透過機率模擬的行動》(*Pithoprakta*)便是一部建立在常態分佈模型之上，以大數法則進行控制的隨機音樂作品，每一個弦樂聲部的滑奏看似彼此不同、隨機而獨立，但由於立基於常態分佈模型，因而透過大數法則造成一種向“平均值”集中的音響效果。同樣採用座標化的記譜法，以方格紙記譜，用橫座標軸（即 x 軸）表示“時間”，在方格紙上以五公分為基本單位，每五公分等於 26MM (Mälzel Metronome)，³³並把五公分的基本單位再細分為三等分、四等分、五等分更小的單位，以造成更細微的音長變化與更多樣的對位關係；縱座標軸（即 y 軸）表示“音高”，以 0.25 公分表示一個半音音程，即一公分表示四個半音，也就是一個大三度；四十六個弦樂聲部，每一聲部各由一條折線所代表【譜例 3】、【譜例 4】，而每一條折線都是由常態分佈的機率公式 $f(v) = \frac{2}{a\sqrt{\pi}} e^{-v^2/a^2}$ 所求得。

34

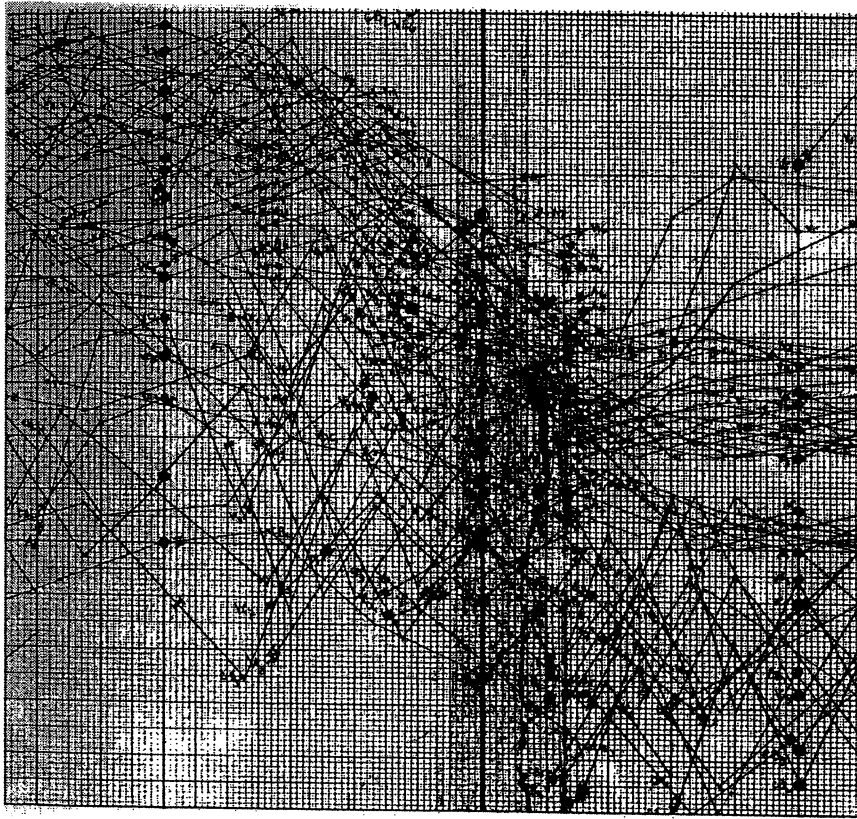
【譜例 3】



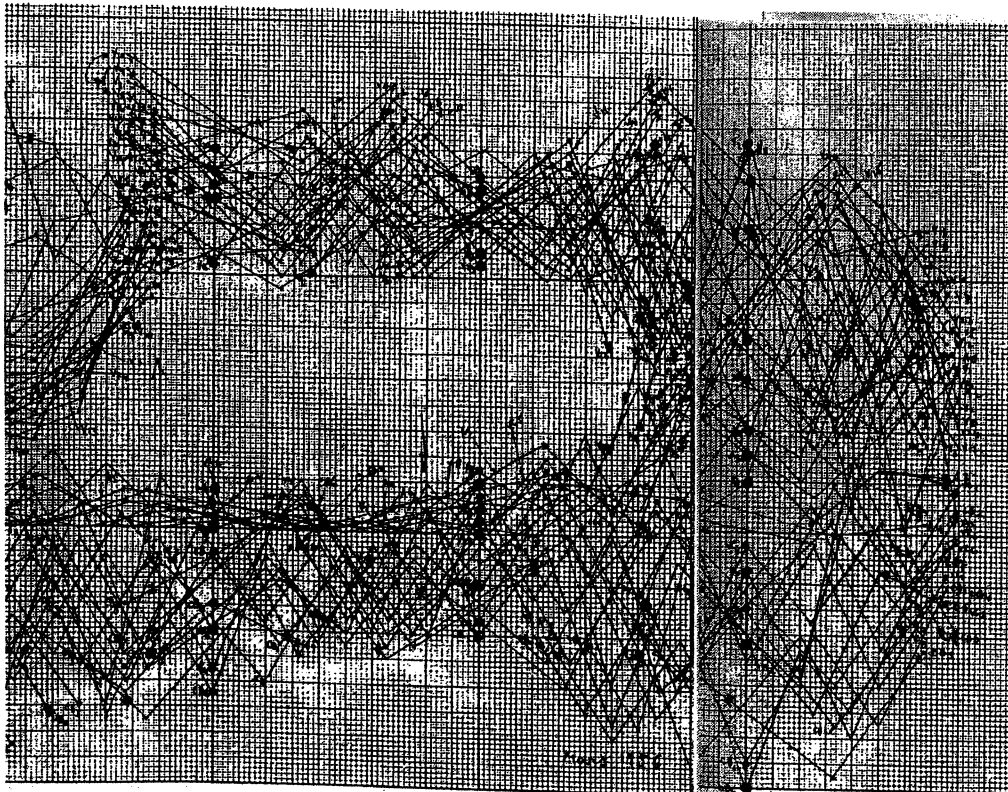
³² 這是由統計得來的結果。

³³ 即每分鐘 26 拍。

³⁴ 關於這個公式的推導，請參見附錄 B。



↑向平均值集中的音響



【譜例 4】

This image displays a complex musical score, likely for a large ensemble or orchestra, characterized by dense, overlapping notation across multiple staves. The score is organized into several systems, each containing multiple staves. The notation is highly detailed, with numerous notes, rests, and dynamic markings. The overall appearance is that of a highly technical and intricate piece of music, consistent with the style of Iannis Xenakis's stochastic music. The score is presented in a black and white, halftone format.

(三) 馬可夫鏈與隨機音樂創作

Xenakis 在《形式化的音樂》(*Formalized Music*) 該書的第二章 *Markovian Stochastic Music—Theory*，提出了以馬可夫鏈 (Markov Chain) 創作隨機音樂的理論，並在第三章 *Markovian Stochastic Music—Application*，將馬可夫鏈應用於創作之中。

讓我們對機率與音樂的關係作一番討論，「機率」可說是「事情或狀態出現的可能性」，事情不一定發生，但發生的機率是存在的；無論作曲家作曲、管弦樂配器手法，或是演奏者在樂器上作即興演奏，其實都是一連串的「選擇」過程。至於如何選擇，乃是由社會條件及個人條件所決定，所謂社會條件包括時代風格、文化...等，另外個人條件則與作曲家或演奏者所受不同的訓練、不同的思考邏輯、個人偏好有關。總之，這樣的選擇造成了音樂的產生，而這些選擇都被某些條件所限制，換言之，可以將音樂視為特定條件限制下的機率事件³⁵：即哪些音樂素材被選擇？哪些被重覆使用？

在社會現象或自然現象中，許多現象都會隨時間的改變而呈現不同的狀態。假設某現象所可能呈現的不同狀態 (situation) 為有限個或可數無限個； s_1 ， s_2 ，... s_n ，每隔一段固定時間來觀察它所呈現的狀態。如果此現象滿足下列的性質：在任意觀察期中此現象呈現狀態 s_i 時，則它在下一觀察期呈現 s_j 的機率為 p_{ij} 。則就可以說這個變化過程形成一個馬可夫鏈。這是十九世紀東歐數學家馬可夫 (Markov) 所提出，用以預測在有限條件之下，隨機現象從發生至演變的一連串過程，以及其基本元素變化與出現機率。

設有一個馬可夫鏈，其可能出現的不同狀態有 s_1 ， s_2 ，... s_n ，而由狀態 s_i 轉變為 s_j 的機率為 p_{ij} ，令

$$A = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix}, \text{ 稱 } A \text{ 為這個馬可夫鏈的推移矩陣。}$$

³⁵ 如同大數法則限制常態分佈模型一樣。

運用馬可夫鏈以及其推移矩陣，加上電腦程式的計算模擬，便可進行簡單的機遇音樂創作，³⁶但在 Xenakis 的隨機音樂創作中，要使音樂「無法避免地朝向某個目標、終點邁進」，之前這樣的控制是由大數法則所造成，而事實上，由馬可夫鏈的推移矩陣也可以控制音樂朝向某個目標、終點邁進，舉例說明如下：

如果音樂創作簡化到只用 C、D、E 三個音³⁷，而其音樂進行的推移矩陣³⁸為

$$\begin{bmatrix} C & \frac{9}{16} & \frac{6}{16} & \frac{1}{16} \\ D & \frac{4}{16} & \frac{8}{16} & \frac{4}{16} \\ E & \frac{1}{16} & \frac{6}{16} & \frac{9}{16} \end{bmatrix}, \text{ 矩陣的第一行即表示由 C 到 C 的機率為 } \frac{9}{16}, \text{ C 到 D 的機率為}$$

$\frac{6}{16}$ ，C 到 E 的機率為 $\frac{1}{16}$ ；矩陣的第二行即表示由 D 到 C 的機率為 $\frac{4}{16}$ ，D 到 D

的機率為 $\frac{8}{16}$ ，D 到 E 的機率為 $\frac{4}{16}$ ；矩陣的第三行即表示由 E 到 C 的機率為 $\frac{1}{16}$ ，

E 到 D 的機率為 $\frac{6}{16}$ ，E 到 E 的機率為 $\frac{9}{16}$ ；開始時起始音使用三個音的機率是相

同的，皆為三分之一，即 $(C, D, E) = \left[\frac{1}{3} \quad \frac{1}{3} \quad \frac{1}{3} \right]$ ，但若之後各音的決定也和起始

音一樣，都是 C、D、E 各三分之一，這樣的音樂便是毫無巧思的機遇音樂，因此，第二音的機率分佈是由起始音的機率分佈乘以推移矩陣而得的：³⁹

³⁶ 請參見附錄 C。

³⁷ 在此為簡化矩陣所以只用三個音，而實際運用時，可以大大地擴張所使用的音。

³⁸ 此推移矩陣可自行設計，只要每一行的機率總和是 1 即可。

³⁹ 矩陣的乘法運算方式為“行”乘以“列”後，相加即可，所以把 $\left[\frac{1}{3} \quad \frac{1}{3} \quad \frac{1}{3} \right]$ 這一“行”乘上

$$\text{推移矩陣中的第一“列”} \begin{bmatrix} \frac{9}{16} \\ \frac{4}{16} \\ \frac{1}{16} \end{bmatrix}, \text{ 即 } \left(\frac{1}{3} \times \frac{9}{16} \right) + \left(\frac{1}{3} \times \frac{4}{16} \right) + \left(\frac{1}{3} \times \frac{1}{16} \right) = \frac{14}{48}; \text{ 繼續將“行”乘}$$

以推移矩陣中的第二“列”，相加後便可得到 $\frac{20}{48}$ ；將“行”乘以推移矩陣中的第三“列”，相

加後便可得到 $\frac{14}{48}$ 。

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{9}{16} & \frac{6}{16} & \frac{1}{16} \\ \frac{4}{16} & \frac{8}{16} & \frac{4}{16} \\ \frac{1}{16} & \frac{6}{16} & \frac{9}{16} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{14}{48} & \frac{20}{48} & \frac{14}{48} \end{bmatrix}, \text{所以在第二音的決定上, 使用}$$

C 的機率是 $\frac{14}{48}$ 、D 的機率是 $\frac{20}{48}$ 、E 的機率是 $\frac{14}{48}$ ，第三音的機率分佈是由第二音的機率分佈乘以推移矩陣而得的，可表示如下：

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \frac{14}{48} & \frac{20}{48} & \frac{14}{48} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{9}{16} & \frac{6}{16} & \frac{1}{16} \\ \frac{4}{16} & \frac{8}{16} & \frac{4}{16} \\ \frac{1}{16} & \frac{6}{16} & \frac{9}{16} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{9}{16} & \frac{6}{16} & \frac{1}{16} \\ \frac{4}{16} & \frac{8}{16} & \frac{4}{16} \\ \frac{1}{16} & \frac{6}{16} & \frac{9}{16} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{9}{16} & \frac{6}{16} & \frac{1}{16} \\ \frac{4}{16} & \frac{8}{16} & \frac{4}{16} \\ \frac{1}{16} & \frac{6}{16} & \frac{9}{16} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{9}{16} & \frac{6}{16} & \frac{1}{16} \\ \frac{4}{16} & \frac{8}{16} & \frac{4}{16} \\ \frac{1}{16} & \frac{6}{16} & \frac{9}{16} \end{bmatrix}^2 \end{aligned}$$

$$\text{則第四音的機率分佈就是：} \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{9}{16} & \frac{6}{16} & \frac{1}{16} \\ \frac{4}{16} & \frac{8}{16} & \frac{4}{16} \\ \frac{1}{16} & \frac{6}{16} & \frac{9}{16} \end{bmatrix}^3$$

$$\text{則第五音的機率分佈就是：} \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{9}{16} & \frac{6}{16} & \frac{1}{16} \\ \frac{4}{16} & \frac{8}{16} & \frac{4}{16} \\ \frac{1}{16} & \frac{6}{16} & \frac{9}{16} \end{bmatrix}^4,$$

在推移矩陣中，只要矩陣裡的每個 P_{ij} 大於 0，那麼這樣的矩陣在經過不斷的自乘後，將會等於一個固定的矩陣：⁴⁰

⁴⁰ 這是一個數學的定理，在此則可以矩陣的乘法進行證明，請參見附錄 D。

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \begin{bmatrix} \frac{9}{16} & \frac{6}{16} & \frac{1}{16} \\ \frac{4}{16} & \frac{8}{16} & \frac{4}{16} \\ \frac{1}{16} & \frac{6}{16} & \frac{9}{16} \end{bmatrix}^n = \begin{bmatrix} \frac{4}{14} & \frac{6}{14} & \frac{4}{14} \\ \frac{4}{14} & \frac{6}{14} & \frac{4}{14} \\ \frac{4}{14} & \frac{6}{14} & \frac{4}{14} \end{bmatrix}$$

換句話說，隨著隨機音樂的進行，到了最後，音的機率分佈將是固定的：

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{9}{16} & \frac{6}{16} & \frac{1}{16} \\ \frac{4}{16} & \frac{8}{16} & \frac{4}{16} \\ \frac{1}{16} & \frac{6}{16} & \frac{9}{16} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{4}{14} & \frac{6}{14} & \frac{4}{14} \\ \frac{4}{14} & \frac{6}{14} & \frac{4}{14} \\ \frac{4}{14} & \frac{6}{14} & \frac{4}{14} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{12}{42} & \frac{18}{42} & \frac{12}{42} \end{bmatrix}$$

，使用 C 的機率為 $\frac{12}{42}$ 、D 的機率為 $\frac{18}{42}$ 、E 的機率為 $\frac{12}{42}$ ，過程中雖是機遇的，但最後仍「無法避免地朝向某個目標、終點邁進」。

隨機音樂已成為 Xenakis 獨特的音樂創作語法，隨機 (stochastic) 並非只是一種音樂類別，它也是一種音樂創作手法，在《透過機率模擬的行動》(Pithoprakta) 之後，Xenakis 不斷開發隨機音樂的創作，藉由電腦的輔助創作了隨機音樂作品 ST (ST 為 stochastic 開頭的兩個字母)，如：《ST/48-1,240162》，其中 48 為演奏者人數，1 為第一版之意，240162 則表示作品初稿完成的日期，1962 年 1 月 24 日，最後透過 IBM7090 電腦的計算而完成；《弦樂四重奏 ST/4》以及為弦樂四重奏、豎琴、豎笛、低音豎笛、兩把法國號與打擊樂器而創作的《ST/10-1,080262》。

五、賽局理論與音樂競賽

賽局理論⁴¹ (Game Theory) 是數學的一個分支，研究決策的形成，應用於任何具有下列三個條件的情境中：(1) 有兩個或兩個以上的賽局者 (player)，每個人有兩個以上的策略 (strategy) 可供選擇；(2) 整個賽局的結果 (outcome) 由賽局者對策略的選擇而決定；(3) 對於每一個結果的得益 (payoff) 都可以給定一個數字來代表賽局者的偏好程度 (preference)。此理論的主要目標，是想藉形式化的推理，來決定賽局者為了追求其最大利益，會採用何種策略，以及如果他們真的如此選擇會產生什麼結果。

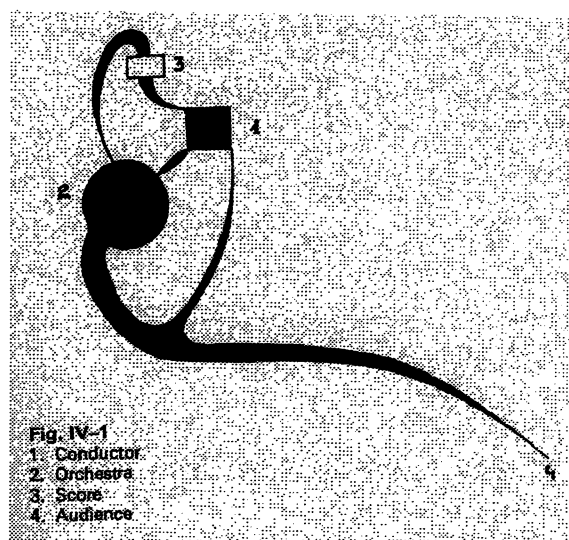
⁴¹ 也有「博弈論」的譯名。

Xenakis 之所以將賽局理論應用於音樂創作上，讓兩個樂團進行競賽，其實也是建立在一種類似「隨機」的出發點上，由於賽局的進行並非是純粹的偶然性發展，還帶有參賽者意志的選擇，參賽者對於最大利益的追求，造成有意識的選擇，於是「帶有意識的選擇」在此取代了大數法則、馬可夫鏈，使賽局「無法避免地朝向某個目標、終點邁進」，Xenakis 並不是應用賽局理論去分析指揮家如何帶領自己的樂團獲得最大利益（即最高得分）並獲得勝利，而是把策略的選擇自由留給指揮家，利用賽局理論只是為了建立一場絕對公平的賽局，並設法增加賽局的精彩與複雜程度，因此這與一般在經濟上討論如何追求最大利益的賽局理論，具有著應用上的不同。

（一）自律 (Autonomous) 音樂、他律 (Heteronomous) 音樂

自律音樂 (autonomous music) 與他律音樂 (heteronomous music) 為 Xenakis 在其理論著作《形式化的音樂》(Formalized Music) 中所提出的，Xenakis 認為在傳統的音樂創作中，作曲家建立一切音樂細節：動機的發動、音符、音強、音色與表演風格，鉅細彌遺地記錄在總譜之上，指揮家與演奏者遵循著作曲家擬訂的計劃與模式而行動；即便作曲家為指揮家或演奏者保留著即興創作的空間，這樣的即興仍舊是建立在作曲家所設計的模式之下。總譜模式一次並永遠地呈現在指揮家與演奏者面前，除了在音樂技巧上要求達到完美演奏、在詮釋上達到作曲家想望的音樂性表達之外，這種總譜模式無法為表演者帶來任何衝突 (conflict)。在音樂實踐與符號模式 (即總譜) 之間，只存在著內部衝突 (internal conflict)，指揮家與演奏者藉著對於輸入符號的比對與回饋，猶如何服機制一般地控制著音樂的輸出，衝突的張力被封閉在總譜之中，這種只具有內部衝突的音樂便是自律音樂 (autonomous music) 【圖 3】。

【圖 3】



有了內部衝突 (internal conflict) 的想法，Xenakis 提出了外部衝突 (external conflict) 的有趣概念，藉由兩個對立的樂團或演奏者而達成，其中一方的行動將影響另一方的決策，如同兩人對弈，以一種高度辯證性的和諧，各自執行出自彼此意志的策略行動。各自具有指揮的兩個樂團，彼此競爭，每個樂團演奏的音樂表現如同一種策略、戰術，對抗著另一對立樂團的音樂表現 (即策略、戰術)，根據對方的策略，做出適時的改變與適當的反擊，而彼此之間每一次的策略對決，轉換為量化的得分，而這樣的計分換算表可以矩陣的方式表示。⁴²這種有著外部衝突的音樂便是他律音樂 (heteronomous music)，Xenakis 指出這種音樂是有先例可循的，在一些歐洲的傳統民族音樂中，便存在著這樣的現象：兩位演奏者以一種彼此競爭的方式演奏音樂，試圖在旋律、節奏上干擾、混淆對方，破壞對方的秩序並造成一種即興效果。

(二) 音樂的競賽：《決鬥》(Duel) 與《策略》(Stratégie)

在他律音樂的概念之下，Xenakis 在 1958-59 年間創作了《決鬥》，是一部為兩個樂團與兩位指揮所創作的作品，Xenakis 利用隨機作曲法設計了五段音樂，分別代表不同的策略：

策略 I：隨機分散的一束聲音粒子，如：撥奏、用弓敲打弦樂器……等。

策略 II：平行且持續的弦樂。

策略 III：網狀、糾結的「滑音編織」。

策略 IV：隨機的打擊樂。

策略 V：隨機的木管樂段。

策略 VI：靜默。

形成 $6 \times 6 = 36$ 種可能的組合，Xenakis 利用賽局理論為 36 種組合賦予每種組合各自對應的得分，以其建立一個公平競爭的環境，在《形式化的音樂》中，Xenakis 也交代了如何建立公平賽局的過程。⁴³

在《決鬥》之後，Xenakis 在 1962 年又創作了這類的音樂作品《策略》，同樣是為兩個樂團與兩位指揮所作，作曲家同樣地利用隨機作曲法設計了六段音

⁴² 關於矩陣式計分換算表，請參見附錄 E。

⁴³ 但並非清楚、詳細地交代，事實上《形式化的音樂》一書常常在其形式化推導過程 (即數學推導過程) 中，省略了某些步驟，因此整本書中往往隱藏著等待解答的疑惑，或許作者著重於概念的使用，而非概念的推導過程，也或許作者故意設下一個又一個的數學問題讓讀者在解決的過程中獲得成就感。

樂，每段的長度至少為兩分鐘，代表六種基本策略：

策略 I：隨機的木管樂段。

策略 II：打擊樂。

策略 III：用手拍打弦樂器的共鳴箱。

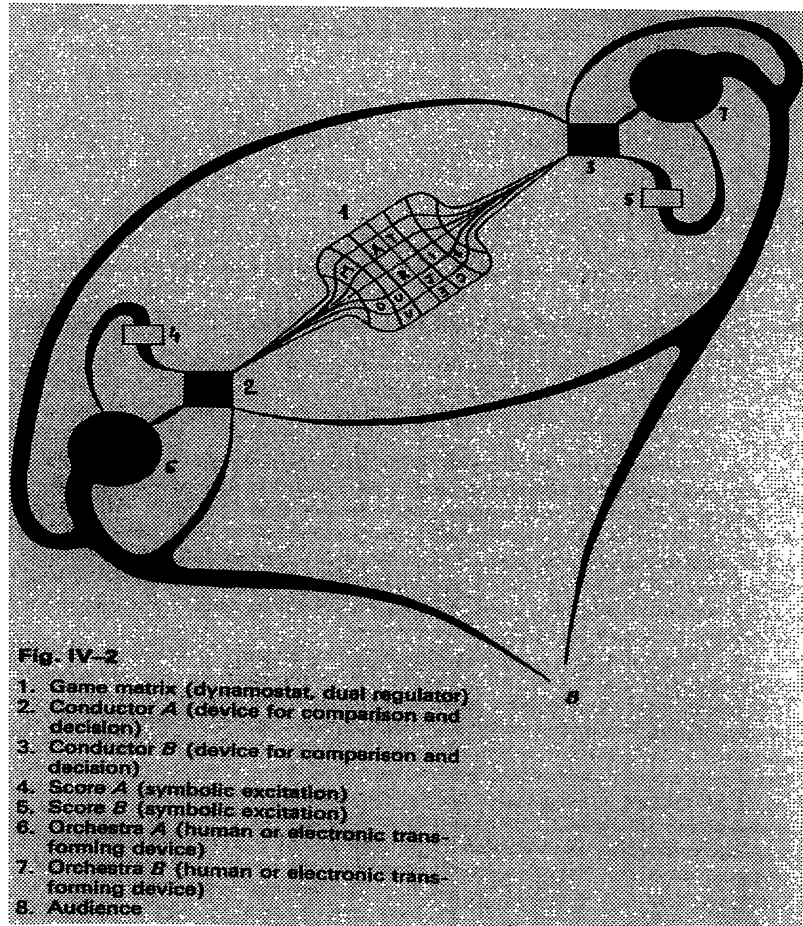
策略 IV：點描式的弦樂撥奏。

策略 V：弦樂滑奏。

策略 VI：持續的弦樂和聲。

除了以上六種基本策略之外，還有另外十三種策略，由同時使用兩個或三個策略而形成，如：策略 I + 策略 II = 策略 VII、策略 I + 策略 III = 策略 VIII、……，總共 $6 + 13 = 19$ 種策略，形成 $19 \times 19 = 361$ 種可能的情形。策略的選擇 (即要演奏哪一段音樂)，由指揮家根據對手使用的策略進行判斷，但每段音樂的演奏必須超過 10 秒，才能換下一段音樂，設置裁判與計分員經由矩陣 (見附錄 E) 換算樂團的得分，如同球賽般的進行，丟銅板決定誰先開始、電子計分板、頒獎儀式……等【圖 4】。

【圖 4】



六、結語

Xenakis 在《形式化的音樂》該書的前言中提到：

對聲音或音樂而言，去進行美或醜的區分是無意義的。

面對現代音樂多元發展的過程中，聲音早已經由作曲家的解放回歸聲音自身，於是沒有所謂重要的音或不重要的音、沒有所謂的美醜標準，只剩下刺激聽覺感官的純目的論，於是作曲家努力追求嶄新的音響、前所未有的創作概念、大膽聳動的題材、……。Xenakis 則是走出了一條與眾不同的路，他努力建立新的音樂理論，在追求嶄新音響之餘，也尋求理論基礎、觀念的突破，並結合各種媒介。

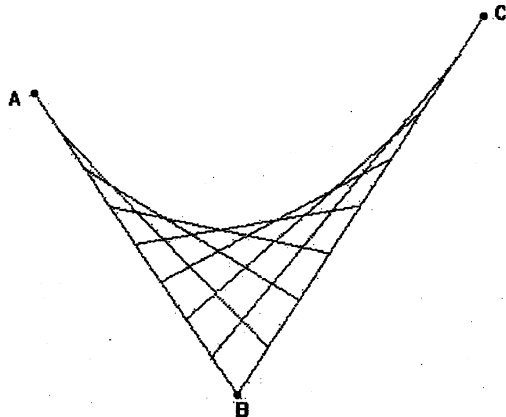
由於 Xenakis 對音樂有豐富的想像力，再加上深受自然科學訓練的影響，因而他的作品不僅反映了建築式的形式思維、數學式的邏輯思維，也表現出他在藝術上獨特、理性的創作風格與特色，在探討自然科學與音樂藝術的內在聯繫作出了傑出的成就。

附錄

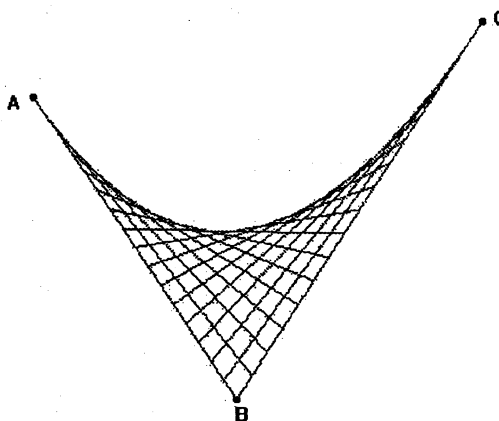
(一) 透過編織所形成的拋物線

給兩線段 AB、BC，自兩線段各取 n 個等分點，從 A 到 B 點標上 1,2,3...，自 B 到 C 點標上 1',2',3'...，分別連接 11',22',33'...，將包絡出拋物線

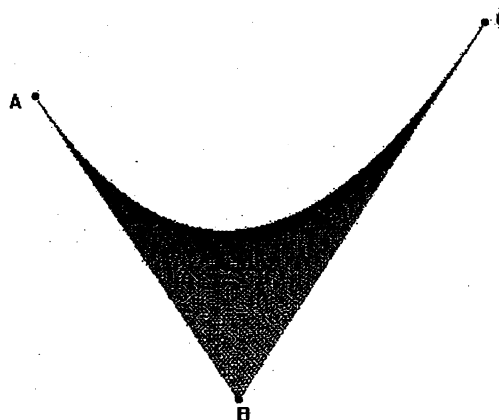
N=8 時，如右圖



N=16 時，如右圖



N=100 時，如右圖



說明：

1. 因此圖形為包絡出來，每條直線上皆只有一點在曲線上
2. 每條直線皆為曲線切線

(二) 常態分佈 (Normal Distribution) 模型的推導⁴⁴

公設一：在滑奏時，單位音程的聲音密度是一個常數，例如：在兩個具有相同音程的音域內，使用同樣樂器進行滑奏時，應包含著相同的聲音粒子數。

公設二：滑奏的速度應是均勻的，但具有方向性，如：上行滑奏的速度為正，下行滑奏的速度為負。

公設三：滑奏的方向具有均等性，即滑奏有可能為上行亦可能為下行，上行或下行的機率各是二分之一。

⁴⁴ 此推導過程乃來自 Xenakis, Iannis: *Formalized Music*. New York, 1992, 頁 14, 但由於書中省略部份過程，在此由筆者進行部份增補。

設滑奏速度為 v 時，對應的機率函數為 $f(v)$ ； n 為單位音程內的聲音密度，即每單位音程中有 n 個聲音粒子； r 為音程數；則根據公設一與公設三，當滑奏速度由 v 增加為 $v + dv$ 時（ dv 表示些微的變化），則增加的聲音粒子數為：

$$nr \frac{1}{2} f(v) dv。$$

由公設二與公設三出發，不考慮方向性時，設滑奏速度為 v 時，對應的機率函數為 $g(v^2)$ ；⁴⁵當滑奏速度由 v 增加為 $v + dv$ 時，則增加的聲音粒子數為：
 $nrg(v^2)dv$ 。

因此，可以得到方程式 $nr \frac{1}{2} f(v) dv = nrg(v^2)dv$ 。

將機率函數 $g(v^2)$ 內的變數 v^2 轉換為 v ，因此令 $g(v^2) = H(v)$ ，對等號兩邊同取自然對數後，因此 $\ln g(v^2) = h(v)$ ，即 $d \ln g(v^2) = h'(v)dv$ ，為了使 $h(v)$ 是變數 v 的二次函數，則下列等式恆成立：

$$\frac{d \ln g(v^2)}{v dv} = \frac{h'(v)dv}{v dv} = \text{常數} = -2j \quad ^{46}$$

因此， $h'(v) = -2jv$ ， $h(v) = -jv^2 + c$ ， $H(v) = ke^{-jv^2}$ ，但因為 $H(v)$ 是機率函數，所以將 $H(v)$ 由負無限大積分到正無限大，其值必定等於 1。⁴⁷

所以， $\int_{-\infty}^{+\infty} H(v)dv = 1$ ，即 $\int_{-\infty}^{+\infty} ke^{-jv^2} dv = 1$ ， $k \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-jv^2} dv = 1$ ， $k \sqrt{\frac{\pi}{j}} = 1$ ，所以 $k = \frac{\sqrt{j}}{\sqrt{\pi}}$ ，

如果 $j = \frac{1}{a^2}$ ，則 $k = \frac{1}{a\sqrt{\pi}}$ ，因此 $\frac{1}{2} f(v) = g(v^2) = H(v) = \frac{1}{a\sqrt{\pi}} e^{-v^2/a^2}$ ，

所以， $f(v) = \frac{2}{a\sqrt{\pi}} e^{-v^2/a^2}$ （此為常態分配函數）

⁴⁵ 由於不考慮方向性，因此 $v = -4$ 或 $v = 4$ 便是兩種相同的情況，所以使用 v^2 表示。

⁴⁶ 之所以這個常數是 $-2j$ ，純粹是為了之後計算上的方便。

⁴⁷ 在一整個事件之中，其個別情況的機率總和必為 1，如：丟擲一枚銅板，出現正面的機率是二分之一，出現反面的機率也是二分之一，因此總和為 1；但若為機率函數，則是由負無限大到正無限大的積分值為 1。

(三) 以馬可夫鏈的推移矩陣創作機遇音樂

程序如下：

1. 決定變動元素，如：音高、節奏、...等。
2. 設定元素變化的規則，如：相同的音不能連續使用兩次、節奏以等差數列漸強...等。
3. 根據以上條件，導出此馬可夫鏈的推移矩陣。
4. 選擇開始時的音高、節奏、力度。
5. 以電腦程式進行模擬，產生機遇音樂。

創作實例說明：為求簡化，將只針對單一聲部進行說明。

1. 決定變動元素：

(1) 使用 Do、Re、Mi 三個音

(2) 使用 1 秒鐘及 2 秒鐘作為音長時值

(3) 單一固定力度為 40 分貝

2. 設定元素變化的規則，如：相同的音不能連續使用兩次

3. 根據以上條件，導出此馬可夫鏈的推移矩陣：

由於只使用 Do、Re、Mi 三個音及使用 1 秒鐘及 2 秒鐘作為節奏時值，且力度固定為 40 分貝，所以其音樂變化將有 $3 \times 2 \times 1 = 6$ 種情形 (situation)，分別是 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 、 S_5 、 S_6 ，表示為 (a, b, c) 的樣子，其中 a 代表音高，b 代表音長，c 代表力度。

$S_1 = (\text{Do}, 1 \text{ 秒鐘}, 40 \text{ 分貝})$

$S_2 = (\text{Do}, 2 \text{ 秒鐘}, 40 \text{ 分貝})$

$S_3 = (\text{Re}, 1 \text{ 秒鐘}, 40 \text{ 分貝})$

$S_4 = (\text{Re}, 2 \text{ 秒鐘}, 40 \text{ 分貝})$

$S_5 = (\text{Mi}, 1 \text{ 秒鐘}, 40 \text{ 分貝})$

$S_6 = (\text{Mi}, 2 \text{ 秒鐘}, 40 \text{ 分貝})$

根據所設定的規則，相同的音不能連續使用兩次，因此可以設計出馬可夫鏈的推移矩陣⁴⁸所示：

⁴⁸ 此矩陣的設計，必須符合每一行的機率總和為 1。

從 \ 到	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆
S ₁	0	0	$\frac{1}{6}$	$\frac{2}{6}$	$\frac{2}{6}$	$\frac{1}{6}$
S ₂	0	0	$\frac{2}{6}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{2}{6}$	$\frac{1}{6}$
S ₃	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{6}$	0	0	$\frac{2}{6}$	$\frac{2}{6}$
S ₄	$\frac{1}{6}$	$\frac{3}{6}$	0	0	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{6}$
S ₅	$\frac{3}{6}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{6}$	0	0
S ₆	$\frac{1}{6}$	$\frac{2}{6}$	$\frac{2}{6}$	$\frac{1}{6}$	0	0

4.選擇開始時的音高、節奏、力度：我們選擇 $S_3 = (\text{Re}, 1 \text{ 秒鐘}, 40 \text{ 分貝})$ 作為起始音

5.以電腦程式進行模擬，產生機遇音樂：

以電腦程式模擬一個骰子，由於選擇 $S_3 = (\text{Re}, 1 \text{ 秒鐘}, 40 \text{ 分貝})$ 作為起始音，所以骰子上六個面的分配為 S_1 與 S_2 各一面、 S_5 兩面、 S_6 兩面（在 S_3 的那一行， S_1 到 S_6 的機率分別為 $\frac{1}{6}$ 、 $\frac{1}{6}$ 、 0 、 0 、 $\frac{2}{6}$ 、 $\frac{2}{6}$ ），模擬擲骰子的結果，若結果為 S_5 ，則 S_5 為第二個音。

再模擬一個骰子，由於 $S_5 = (\text{Mi}, 1 \text{ 秒鐘}, 40 \text{ 分貝})$ 是第二個音，所以骰子上六個面的分配為 S_1 三面， S_2 、 S_3 、 S_4 各一面（在 S_5 的那一行， S_1 到 S_6 的機率分別為 $\frac{3}{6}$ 、 $\frac{1}{6}$ 、 $\frac{1}{6}$ 、 $\frac{1}{6}$ 、 0 、 0 ），模擬擲骰子的結果，若結果為 S_1 ，則 S_1 為第三個音。如果讓電腦程式不停地執行下去，便可以接著得到第四個音、第五個音…，造成一連串不中斷的聲音。

(四) 推移矩陣收斂證明

在推移矩陣中，只要矩陣裡的每個 P_{ij} 大於 0，那麼這樣的矩陣在經過不斷的自乘後（設自乘 n 次），將會等於一個固定的矩陣：

$$\begin{bmatrix} \frac{9}{16} & \frac{6}{16} & \frac{1}{16} \\ \frac{4}{16} & \frac{8}{16} & \frac{4}{16} \\ \frac{16}{16} & \frac{16}{16} & \frac{16}{16} \\ \frac{1}{16} & \frac{6}{16} & \frac{9}{16} \\ \frac{16}{16} & \frac{16}{16} & \frac{16}{16} \end{bmatrix}^n = \begin{bmatrix} \frac{4}{14} & \frac{6}{14} & \frac{4}{14} \\ \frac{14}{14} & \frac{14}{14} & \frac{14}{14} \\ \frac{4}{14} & \frac{6}{14} & \frac{4}{14} \\ \frac{14}{14} & \frac{14}{14} & \frac{14}{14} \\ \frac{4}{14} & \frac{6}{14} & \frac{4}{14} \\ \frac{14}{14} & \frac{14}{14} & \frac{14}{14} \end{bmatrix}$$

那麼矩陣自乘 (n + 1) 次後：

$$\begin{bmatrix} \frac{9}{16} & \frac{6}{16} & \frac{1}{16} \\ \frac{4}{16} & \frac{8}{16} & \frac{4}{16} \\ \frac{16}{16} & \frac{16}{16} & \frac{16}{16} \\ \frac{1}{16} & \frac{6}{16} & \frac{9}{16} \\ \frac{16}{16} & \frac{16}{16} & \frac{16}{16} \end{bmatrix}^{n+1} = \begin{bmatrix} \frac{9}{16} & \frac{6}{16} & \frac{1}{16} \\ \frac{4}{16} & \frac{8}{16} & \frac{4}{16} \\ \frac{16}{16} & \frac{16}{16} & \frac{16}{16} \\ \frac{1}{16} & \frac{6}{16} & \frac{9}{16} \\ \frac{16}{16} & \frac{16}{16} & \frac{16}{16} \end{bmatrix}^n \times \begin{bmatrix} \frac{9}{16} & \frac{6}{16} & \frac{1}{16} \\ \frac{4}{16} & \frac{8}{16} & \frac{4}{16} \\ \frac{16}{16} & \frac{16}{16} & \frac{16}{16} \\ \frac{1}{16} & \frac{6}{16} & \frac{9}{16} \\ \frac{16}{16} & \frac{16}{16} & \frac{16}{16} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{4}{14} & \frac{6}{14} & \frac{4}{14} \\ \frac{14}{14} & \frac{14}{14} & \frac{14}{14} \\ \frac{4}{14} & \frac{6}{14} & \frac{4}{14} \\ \frac{14}{14} & \frac{14}{14} & \frac{14}{14} \\ \frac{4}{14} & \frac{6}{14} & \frac{4}{14} \\ \frac{14}{14} & \frac{14}{14} & \frac{14}{14} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{9}{16} & \frac{6}{16} & \frac{1}{16} \\ \frac{4}{16} & \frac{8}{16} & \frac{4}{16} \\ \frac{16}{16} & \frac{16}{16} & \frac{16}{16} \\ \frac{1}{16} & \frac{6}{16} & \frac{9}{16} \\ \frac{16}{16} & \frac{16}{16} & \frac{16}{16} \end{bmatrix}$$

利用矩陣乘法，將第一行 $\left[\frac{4}{14} \quad \frac{6}{14} \quad \frac{4}{14} \right]$ ，分別乘以第一列 $\begin{bmatrix} \frac{9}{16} \\ \frac{4}{16} \\ \frac{16}{16} \\ \frac{1}{16} \\ \frac{16}{16} \end{bmatrix}$ 、第二列 $\begin{bmatrix} \frac{6}{16} \\ \frac{8}{16} \\ \frac{16}{16} \\ \frac{6}{16} \\ \frac{16}{16} \end{bmatrix}$ 、

第三列 $\begin{bmatrix} \frac{1}{16} \\ \frac{4}{16} \\ \frac{16}{16} \\ \frac{9}{16} \\ \frac{16}{16} \end{bmatrix}$ ，得到的結果分別是 $\frac{4}{14}$ 、 $\frac{6}{14}$ 、 $\frac{4}{14}$ ，此為新矩陣的第一行；由於第

二行、第三行與第一行相同，分別乘以第一列、第二列、第三列後，得到的結果

仍是 $\frac{4}{14}$ 、 $\frac{6}{14}$ 、 $\frac{4}{14}$ ，所以原來的推移矩陣會收斂到 $\begin{bmatrix} \frac{4}{14} & \frac{6}{14} & \frac{4}{14} \\ \frac{14}{14} & \frac{14}{14} & \frac{14}{14} \\ \frac{4}{14} & \frac{6}{14} & \frac{4}{14} \\ \frac{14}{14} & \frac{14}{14} & \frac{14}{14} \\ \frac{4}{14} & \frac{6}{14} & \frac{4}{14} \\ \frac{14}{14} & \frac{14}{14} & \frac{14}{14} \end{bmatrix}$ 。

(五) 矩陣式計分換算表

MATRIX OF THE GAME

Conductor Y (columns)

Conductor X (rows)	Conductor Y (columns)																			
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII	XIX	XX
I	16	10	26	-18	4	-52	-40	-40	22	-24	-8	-36	-22	24	-40	122	128	-38	22	2
II	-26	26	-44	-22	-24	52	-20	-16	22	20	6	-18	-20	-12	-10	-24	-26	-20	44	2
III	-10	-2	26	26	24	0	4	-56	-32	-24	4	-52	-40	-40	-16	-44	-16	20	22	2
IV	4	-20	24	24	4	-12	12	-12	-28	8	-8	-24	-40	4	22	-18	-16	28	-4	4
V	-10	-24	-26	4	104	-8	44	20	-8	4	26	-8	-20	-24	-16	40	8	20	-24	4
VI	24	44	12	-16	-4	44	24	-8	24	4	-28	-40	-22	-44	24	44	4	4	-68	2
VII	-26	-52	20	16	36	44	44	4	-28	-48	0	-46	-36	-12	-20	-40	-44	16	40	4
VIII	-22	-8	-52	-8	12	4	4	68	-44	-12	8	-52	-4	8	22	-26	-40	-16	24	2
IX	-26	10	-16	-22	2	4	-44	-52	22	44	2	44	-18	64	24	22	-36	-28	-22	8
X	-48	22	-22	4	-4	22	-46	-16	8	-26	-24	-4	8	22	24	4	-8	20	-22	4
XI	4	24	26	-4	4	-28	-26	-12	24	4	64	68	6	40	-12	-2	-24	-22	-28	10
XII	-26	-12	-108	-28	-24	-42	26	22	24	0	-22	24	26	-4	4	-22	-28	40	24	2
XIII	26	-20	-24	-40	-22	-44	14	-16	4	22	-14	20	22	-16	-28	44	-18	28	62	2
XIV	22	-14	-16	0	-22	-22	26	22	-12	26	24	-28	62	26	-28	-44	-20	-28	22	2
XV	-20	8	4	28	-28	14	0	20	2	-4	-22	18	26	-26	46	-26	18	-8	14	4
XVI	20	28	24	-28	20	16	-2	-16	20	-20	-20	26	-8	-26	-40	102	-24	-28	20	2
XVII	22	22	22	-20	16	0	-44	-48	-22	0	-16	-16	-20	-22	24	-20	26	22	-26	8
XVIII	-26	-24	8	4	0	-2	52	28	-12	-4	36	-8	28	-24	-16	-14	42	-12	-40	2
XIX	-52	-52	-66	4	6	-6	-4	44	-66	-4	44	12	44	40	16	-46	44	-42	-22	4

Fig. IV-5. Strategy

Two-person Game. Value of the Game = 0.

- ▲ Woodwinds
- Normal percussion
- |— Strings striking sound-boxes
- ∴ Strings pizzicato
- # Strings glissando
- ≡ Strings sustained
- Combinations of two and three different tactics

(六) Xenakis 作品整理

弦樂合奏作品：

- 1959 *Syrmos*, for 18 or 36 strings or doubled
1959 *Analogiques A and B*, for 9 strings and 4-track tape
1971 *Aroura*, for 12 strings or multiple
1976 *Retours-Windungen*, for 12 violoncelli
1982 *Pour Les Baleines*, for large string orchestra
1983 *Shaar*, for large string orchestra

管弦樂作品：

- 1954 *Metastasis*, for 61 instruments
1956 *Pithoprakta*, for 50 instruments
1959 *Duel*, a “game” for 2 orchestras
1962 *ST/48*, for 48 musicians
1962 *Stratégie*, a “game” for 2 orchestras
1966 *Terretektorh*, for 88 musicians scattered throughout the public
1967 *Polytope De Montreal*, sound and light show, with music for 4 identical
orchestras
1968 *Nomos Gamma*, for 98 musicians scattered throughout the public
1969 *Synaphai*, for piano and orchestra
1969 *Kraanerg*, ballet music for 4-track tape and orchestra
1971 *Antikhthon*, ballet music for orchestra
1973 *Eridanos*, for orchestra
1974 *Noomena*, for orchestra
1974 *Erikhthon*, for piano and orchestra
1975 *Empreintes*, for orchestra
1977 *Jonchaies*, for orchestra
1980 *Ais*, for baritone, percussion solo and orchestra
1984 *Lichens I*, for orchestra

合唱作品：

- 1962 *Polla Ta Dhina*, for children’s choir and orchestra
1966 *Oresteia*, stage music for mixed chorus, children’s choir and orchestra

- 1967 *Nuits*, for 12 mixed solo voices, a cappella
 1973 *Cendrées*, for mixed chorus (36 to 72 voices) and orchestra
 1977 *Medea*, stage music for male chorus and instrumental ensemble
 1977 *A Colone*, for male chorus (or women's chorus)
 1977 *A Helene*, text by Euripides for women's chorus, a cappella
 1979 *Anemoessa*, for chorus and orchestra
 1981 *Nekuia*, for mixed chorus and orchestra
 1981 *Serment-Orkos*, text by Hippocrates for mixed chorus, a cappella
 1982 *Pour la Paix*, for mixed chorus, tape and narrators, also for a capella
 choir
 1983 *Chant des Soleils*, for mixed chorus, children's choirs, brass,
 percussion

器樂合奏作品：

- 1957 *Achorriopsis*, for 21 instruments
 1960 *Atrées*, for 10 instruments
 1962 *ST/10*, for 10 instruments
 1962 *ST/4*, for string quartet
 1962 *Morsima-Amorsima*, for piano, violin, viola, violoncello and double
 bass
 1963 *Eonta*, for piano, 2 trumpets and 3 trombones
 1964 *Hiketides*, instrumental suite for 2 trumpets, 2 trombones and strings
 1965 *Akrata*, for 16 wind instruments
 1969 *Anaktoria*, for 8 instruments
 1972 *Linaia-Agon*, a "game" for tenor, tpt, F tpt, tb
 1975 *Phlegra*, for 11 instruments
 1975 *N'Shima*, for 2 Fr. hn, 2 tbn, 2 mezzo-sop, vc
 1976 *Epei*, for Eng. hn, B-flat cl, C tpt, 2 tenor tbn, db
 1977 *Akanthos*, for fl, cl, sop, 2 vlms, vla, vlc, db, pno
 1977 *Ikhoor*, for string trio
 1977 *Palimpsest*, for wind instruments and string quintet
 1983 *Tetras*, for string quartet
 1984 *Khal Perr*, for brass quintet and percussion

器樂獨奏作品：

- 1961 *Herma*⁴⁹, for piano
1966 *Nomos Alpha*, for violoncello
1971 *Mikka*, for violin
1971 *Charisma*, for clarinet and violoncello
1973 *Evryali*, for piano
1974 *Gmeeoorah*, for organ
1976 *Khoai*, for harpsichord
1976 *Mikka "S"*, for violin
1976 *Theraps*, for double bass
1976 *Dmaathen*, for oboe and percussion
1977 *Kottos*, for violoncello
1979 *Dikhthas*, for violin and piano
1981 *Mists*, for piano
1981 *Embellie*, for viola
1981 *Komboi*, for harpsichord and percussion
1984 *Naama*, for harpsichord

聲樂作品：

- 1982 *Pour Maurice*, for Baritone and piano

打擊樂作品

- 1969 *Persephassa*, for 6 percussionists
1975 *Psappa*
1978 *Pleiades*, for 6 percussionists

電子音樂作品：

- 1957 *Diamorphoses*, electro-acoustic music for 4-track tape
1958 *Concert PH*, electro-acoustic music for 4-track tape
1960 *Orient-Occident*, electro-acoustic music for 4-track tape, music for the film "Orient-Occident"
1962 *Bohor*, electro-acoustic music for 8-track tape
1970 *Hibiki Hana Ma*, electro-acoustic music for 12-track tape for an

⁴⁹ *Herma* 被許多鋼琴演奏家認為是極度困難的鋼琴獨奏曲。

- audiovisiual show with an orchestral basis
- 1971 *Persepolis*, light and sound show with electro-acoustic music for 8-track tape
- 1972 *Polytope de Cluny*, light and sound show with 7-track tape
- 1977 *La Legende D'Eer*, for the Diatope, light and sound show action for
- 1600 electronic flashes, 4 laser beams, 400 mirrors, various optical devices and 7-track tape
- 1978 *Mycenes A*, stereo tape of music composed on the UPIC "musical drawing board" at CEMANu

參考書目

外文部份：

1. *Baker's Biographical Dictionary of Musicians*, emeritus editor: Nicolas Slonimsky. New York, 1992.
2. *Baker's Biographical Dictionary of Musicians*, edited by Laura Kuhn. Vol 6. New York, 2001.
3. *Baker's Biographical Dictionary of 20th Century Classical Musicians*, edited by Laura Kuhn. New York, 1997.
4. *Baker's Dictionary of Music*, edited by Richard Kassel. New York, 1997.
5. *The Concise Oxford Dictionary of Music*, edited by Michael Kennedy. New York, 1985.
6. *The New Grove Dictionary of Music and Musicians*, edited by Stanley Sadie. London, 1980.
7. *The New Grove Dictionary of Music and Musicians*, edited by Stanley Sadie. London, 2001.
8. *The New Harvard Dictionary of Music*, edited by Don Michael Randel. London, 1986.
9. *The New Oxford Companion to Music*, general editor: Denis Arnold. New York, 1983.
10. *The Norton/Grove Concise Encyclopedia of Music*, edited by Stanley Sadie. London, 1988.
11. Apell, Willi: *Harvard Dictionary of Music*. Cambridge, 1972.
12. Blume, Friedrich hrsg.: *Die Musik in Geschichte und Gegenwart* (MGG, in 17

- Bde.): Allgemeine Enzyklopädie der Musik, Kassel: Barenreiter-Verlag, 1949-1968; 1955.
13. Jacobs, Arthur: *A New Dictionary of Music*. Harmondsworth, 1967.
 14. Griffiths, Paul: *The Thames and Hudson Encyclopaedia of 20th-Century Music*. New York, 1986.
 15. Kennedy, Michael: *The Oxford Dictionary of Music*. New York, 1985.
 16. Michels, Ulrich: *dtv-Atlas Musik*. (in 2 Bde.) München: Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH&Co. KG, 1991.
 17. Stolba, K. Marie: *The Development of Western Music*. New York, 1998.
 18. Varga, Balint Andras: *Conversations with Iannis Xenakis*. London, 1996.
 19. Xenakis, Iannis: *Arts/Sciences: Alloys*. New York, 1985.
 20. Xenakis, Iannis: *Formalized Music*. New York, 1992.

中文部份：

1. 《大陸音樂辭典》，康謳主編。台北，1980。
2. 潘皇龍，《讓我們來欣賞現代音樂》。台北，1987。
3. 葛利菲斯 (Paul Griffiths)，《現代音樂史》(林勝儀譯)。台北，1989。
4. 《黎明音樂辭典》，洪萬隆總編。台北，1994。
5. 杰拉爾德·亞伯拉罕 (Gerald Abraham)，《簡明牛津音樂史》。上海，1999。
6. 《新訂標準音樂辭典》，音樂之友社主編 (林勝儀譯)。台北，1999。
7. 劉志明，《西洋音樂史與風格》。台北，2000。
8. 馬清，《二十世紀歐美音樂風格》。台北，2000。
9. 曾瀚霖，《音樂認知與欣賞》。台北，2001。
10. 《劍橋插圖音樂指南》，Stanley Sadie 主編。濟南，2002。