張拉整體結構的發展史與其應用

文／戴明鳳

前言

何謂張拉整體結構？

「張拉整體」是 " Tensegrity " 英文一詞的中文翻譯，" Tensegrity " 英文則是由張力（由拉力產生的張力）的英文 " Tension " 與具有共構或整體意含的英文 " Integrity " 兩個英文字組合而成的新名詞。故中文也有譯為「張拉共構體」。[1-3]

如圖 1 所示，是清華大學跨領域科學教育中心自製的典型張拉整體結構實體圖。兩個原為獨立不連續的固體結構單元，在原彼此不直接接觸的狀態下，經由數條繩線的連接，並透過繩線間的「張力」所形成的「拉力」，使兩個獨立的物體結合形成一個「共構體」或稱「整體結構」。並使其中一個獨立的子結構部分看起來似乎是被懸掛在半空中，不會因受重力作用而垂掉下來的穩定平衡結構。圖中的張拉整體結構體上方的三角型平板不僅看似懸浮在半空中，還可以承受高達 1 kg 以上的重物。很有趣吧！圖 2 呈現了不少由網路搜尋所得的相關設計成品。

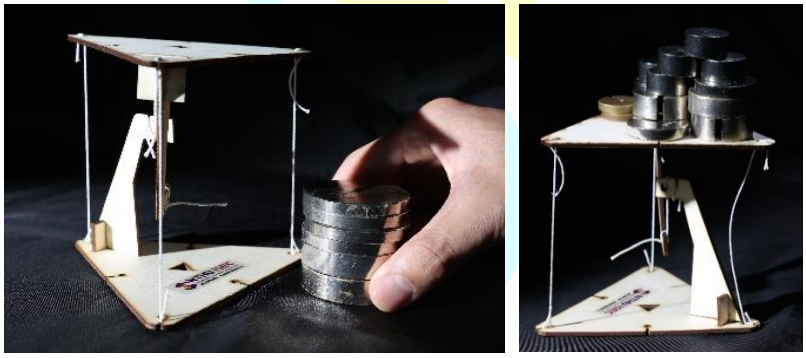


圖 1. 清大跨領域科學教育中心自製之張拉整體結構系列的典型結構之一的實體圖。

以上、下兩個不連續的獨立木質板作為立體單元，再透過數條被緊拉而形成有張力的繩線作用，使線與木質板的整體交互作用而得以獲得一個穩定的平衡狀態。圖中的張拉整體結構體的上方平台可以承重到高達 1 kg 以上的質量。

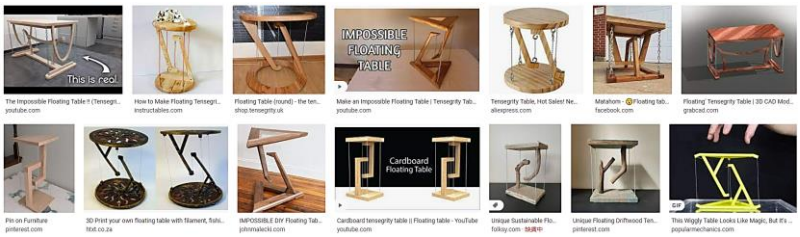


圖 2. 以張拉整體結構為基礎設計的生活家俱產品

圖片來源：google 搜尋所得之網路作品

「張拉整體」是 20 世紀中期，由美國理查·巴克敏斯特·富勒（Richard Buckminster Fuller，1895-1983 年）提出的一個特殊的力學結構概念，並創造出的新術語。當時是用來描述「由剛性結構和纜索組成的自張緊結構，即在結構內透過同時產生『纜索的牽引力』和『剛性結構的壓縮力』形成一個穩定平衡的整體結構。」意即張拉整體是一個結構系統所表現出來的特性，系統內運用了能夠在固有的應力下（如牽引力和壓縮力），能共同且同時作用於其他固體元件（通常是鋼體或木杆）的電纜（牽引力）和結構系統的剛度，從而使系統產生更大的阻力和穩定性。

根據富勒的說法，此系統是通過對抗力量形成，「以自然的機構為基礎，能運用最少的元素，形成堅固的結構」。

如在繩線的張力和物體的重力組合系統中，可將原為各自獨立且具有質量的個體零件 （即彼此之間不是利用黏結劑或任何固定的夾具），透過看似柔軟的繩線經張拉效應所產生的張拉力，而將這些獨立的個體零件組拉成一個完整且穩定的立體結構，這種空間組織構成了一個持續平衡的拉伸和壓縮的連續狀態，此即稱為「張拉共構體」或「張拉整體」結構。因是透過看似柔軟的繩線或繩索的牽拉而形成的整體結構，故某些獨立的個體讓人看來有如飄浮在空中的錯覺感和飄零的意境。

此種型態的力學作用形成了一個彼此相互連結與支撐的結構，就像生物體內的肌肉和骨骼一樣，可透過其中的一個元素（如肌肉組織連結）來強化另一個元素（強化骨骼功能）。此結構型態有時也會被生物學家運用來根據生物的幾何特徵，解釋組成生物的元素與方式。

近年來，全球各地玩家也開始以 Tensegrity 結構為發想，進行各種形態創意設計。讓我們也一起來腦力激盪，設計自己的張拉整體作品，並體驗這神奇的「平衡」現象！

壹、張拉整體結構概念的起源[1-5]

首先提出張拉整體結構概念者，最早的具體紀錄應可追溯到 1921 年，俄羅斯雕刻藝術家卡爾·約根森（Karl Ioganson）的發明。他展示了一個由 3 根杆和 8 條索組成的張拉整體模型，如圖 3 所示。但這個模型不具有足夠強的剛度，任一根索的收縮都會使模型產生機構性位移，以致結構不穩而垮塌。不過，它與後來被視為經典代表作的「Simplex 單元」設計已經非常接近，後者作品是由 3 杆 9 索所組成的「自平衡結構體」，如圖 3 所示。

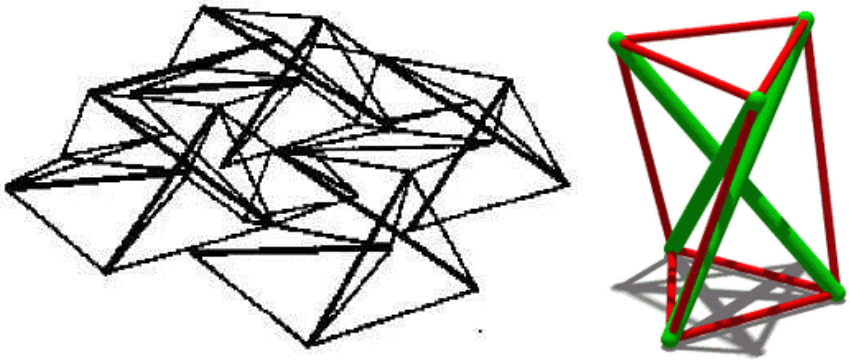


圖 3. 張拉整體模型草圖與設計圖

- 左圖：1921 年，卡爾·約根森提出的 3 杆 8 索之張拉整體模型草圖。
- 右圖：經典的「Simplex 單元」張拉整體模型設計圖，由 3 杆 9 索組成張拉整體模型。紅色較細的線代表「索」提供了系統中所需的自承力，綠色較粗的線表「杆」為結構系統中的受壓單元。

3 杆 9 索的 Simplex 單元可說是最簡單的張拉整體結構，看上去很像一根三角柱被擰了一個角度，每根杆件的兩端點都分別連接了 3 條索。在此系統中索為受壓的杆提供了軸向壓力，並且「固定」了杆件端點的位置。但很可惜此作品當時沒有得到太多注意與認可，但 Simplex 單元卻可說是後來開發許多張拉整體結構作品的基本組件。此處所指的「杆」是指長度長到人手不方便操控，且質量也不輕的棍狀物體，故很不容易以獨自傾斜，或是垂直安放的方式擺置。

／ 國文小常識 ／

國字辨析：「杆、桿、竿」三個國字的差異性

杆、桿、竿三字都是指棍狀物，一般人可能認為沒有差異，但嚴格來說三者所指的棍狀物大小尺寸不同。大體的區別如下說明：

（1） **桿**：可以拿在手上使的叫桿，如『筆桿』、『秤桿』；

（2） **杆**：太大，以致無法拿在手上隨意使用的叫杆，如『電線杆』。

（3） **竿**：有時特別指的是植物體的竹幹、竹莖。

「旗桿」和「旗竿」的差別在於前者是短木桿，後者是長竿子；而「竹竿」不可以寫成「竹「杆」。「撐竿跳」也不作『撐「杆」跳』。「電線杆」上插滿五彩繽紛的「旗桿」，「電線杆」、「旗桿」，建議不宜寫成『電線「桿」』、『旗「竿」』喔！

參考來源：「不可不知的錯別字」，鮑秀珍

http://www.kmuh.org.tw/www/drgga/book3/K10/K101.htm

1948 年，一位不僅是哲學家、更是傑出建築師及發明家的美國理查·巴克敏斯特·富勒，在黑山學院演講中提到了一個有趣的概念，「Small islands of compression in a sea of tension」。他比喻宇宙中的天體如同是漂浮在萬有引力的拉力海洋之中，受萬有引力拉、壓的孤島，在大自然中有「間斷壓（不連續壓）」與「連續拉」的現象同時存在，並互相作用。後來也是著名雕塑家肯尼斯·斯內爾森（Kenneth Snelson）當時正在富勒的團隊內學習，受到富勒此比喻的啟發，對此概念產生很大的興趣，故而在 1948 年，以此概念為基礎設計了一件名為「Snelson's X」的裝置藝術作品，並獲得專利，如圖 4 所示。之後，他陸續使用此張拉整體的理念創作出許多很經典的作品。有興趣者可參閱免費的電子書 "*Kenneth Snelson: Art and Ideas* "

下載網址：http://kennethsnelson.net/KennethSnelson_Art_And_Ideas.pdf

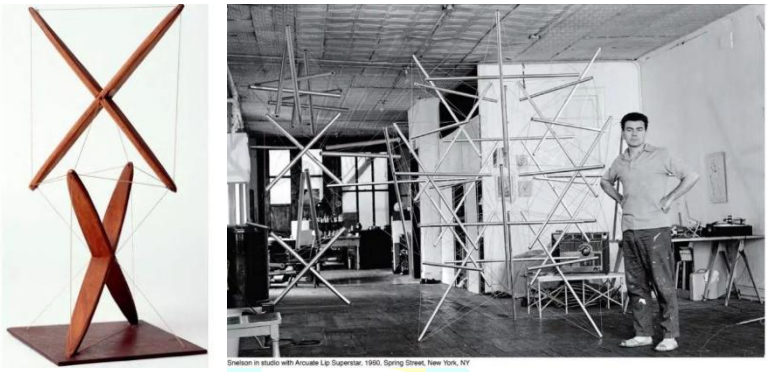


圖 4. 1948 年，雕塑家肯尼斯·斯內爾森，以「Snelson's X」為名的藝術作品和他的其他張拉整體結構設計。

富勒看到 Snelson's X 後，突然意識到，這個結構正是他當時苦苦尋找的答案。因此富勒用「tensional」（張拉） 和「integrity」（整體） 合成創設了一個「Tensegrity」**（張拉整體）**新名詞。自此，此類張拉整體結構才引起大眾比較廣泛的注意，因此現今一般多公認富勒和內爾森是張拉整體結構的發明者。但數年後，對於提起或開發張拉整體結構，富勒在諸多場合中不再提斯內爾森的名字，而斯內爾森也改以**「浮動壓縮**（Floating Compression）」一詞闡述他的作品理念。

「浮動壓縮」用以描述一種三角結構，由杆狀支柱（作為壓縮元件）組成，由纜索（張力元件）約束，其中支柱互不接觸。該單元由電纜部分預加應力，並在整個三角結構中保持安全平衡。簡而言之浮動壓縮構件是由**「懸掛在緊密網中的木棍組成，其中木棍彼此不接觸」**。

預應力結構將來自纜索的張力均勻地分佈在整體結構自身各處，以使壓縮單元被懸掛在張力網中，從而使施加在一個點上的應力均勻且即時地分佈在整個結構中。結構中

並沒有杠杆臂或支點。

此幾何結構設計只需使用質量輕巧的電纜或繩線作為受拉的部件（或連接用的繫帶），這些受拉的繩線若足夠緊繃的話，就能支撐起其他質量重許多之材質所製成的受壓部件（支柱或平面）。構成結構形式的支柱被固定在受拉構件的連接網絡中。富勒將張拉整體形容為「張力海洋中的被壓縮的小島」。

「張拉整體結構」一詞由富勒首次提出，主要用於描述「具有張力與拉力的繩索或電纜等，將不連續的剛性構件組合而成的結構系統」。整體結構系統通過具有拉力的繩索和具有剛性的構件，在多個拉應力間彼此互相平衡的作用下，在不同的方位上形成一系列強而有力的支撐力，以提供立體結構足夠強的穩定性。結構體內每個構件都是完整不可分割或缺少的一部分，如同人體肌肉與骨骼相互作用，兩者是相輔相成。

身兼哲學家與傑出建築師及發明家的富勒一生發表了超過 30 本書籍，有許多創意的發明，更創造了多項現今仍廣為流用的英文詞彙。這些創作主要是建築結構設計，最著名之一即是球型屋頂結構的創作。富勒烯（Fullerene）就因其形狀類似富勒的球型屋頂（見圖 5）而得名。

圖 5. 巴克敏斯特·富勒及其作品

- 左圖：巴克敏斯特·富勒年輕時的肖像
- 中圖：1967 年，富勒的圓頂建築作品
  （The Montreal Biosphère by Buckminster Fuller，照片來源 Montreal Biosphere - Wikipedia）
- 右圖：Fuller's home in Carbondale.
  （圖片來源：https://en.wikipedia.org/wiki/Buckminster_Fuller）

1985 年，英國化學家哈羅德·沃特爾·克羅托博士和美國科學家理察·斯莫利在萊斯大學成功地製備出了第一個富勒烯，即「C_{60} 分子」或「碳 60 富勒烯」，如圖 6 所示。富勒烯是一種由碳組成的中空分子，形狀可呈球型、橢球型、柱型或管狀。在結構上與石墨很相似，石墨是由六元環組成的石墨烯層堆積而成，而富勒烯不僅含有六元環還有五元環，偶爾還有七元環。C_{60} 分子的結構因與富勒的圓頂建築作品很相似，科學家為了表達對他的敬意，因而將之命名為「巴克明斯特·富勒烯」也稱巴克球、巴基球

（Buckyball）。自然界也存在富勒烯分子，2010 年透過太空望遠鏡觀測，科學家們發現在外太空中也有富勒烯的存在，故有科學家推測也許就是外太空的富勒烯為地球提供了生命的種子。

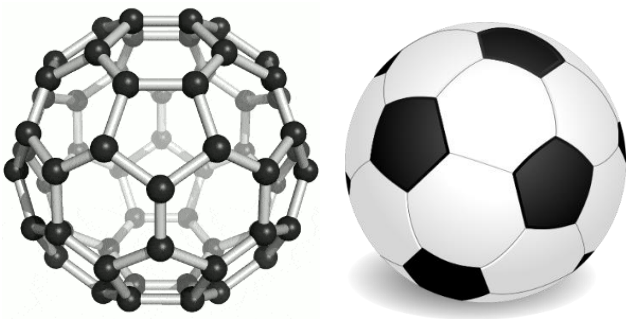


圖 6. C_{60} 的分子結構與現代足球的結構非常類似

圖片來源：https://en.wikipedia.org/wiki/Fullerene

貳、張拉整體結構的特點

此結構是由「不連續的受壓構件（對杆-索組成的系統而言，即指支杆的部分）」與「連續的受拉單元（即指繩索的部分）」所組成的自支承與自應力的空間結構。而受壓構件之間不直接接觸，是透過受拉單元的繩索支撐著。

故張拉整體可說是「具有不連續壓縮的連續張力」。張拉整體結構堅固、靈活、輕便、在多方向都穩定，並且不受重力影響等諸多特性。它的穩定性不依賴於單個元素的強度；而是通過纜索將應力均勻分佈在整個結構中，以獲得高強度，即使是在相對的兩側[12, 19]。這個系統可說通過對抗力量形成，以「合併對立的力作用」，故根據富勒的說法，這是「自然的結構基礎；能夠運用最少的元素，形成一個強大堅固的結構」。

Levin [18-20] 將張拉整體原理應用於人體並將其命名為生物張拉整體。他表示，骨骼可說是漂浮在軟組織綜合張力網路中的壓縮元件，包括韌帶、肌肉、軟骨和結締組織。

1951 年，在英國展出的摩天塔（Skylon tower），如圖 7 所示，其中 3 根又長又重的塔柱，使用了 6 條索將之豎立在地面上。塔柱的兩端各有 3 條索，下方的 3 條索固定了整體結構的位置，而上部的 3 條索則用於讓塔柱結構保持豎直。

圖 7. 1951 年，在英國展出的摩天塔（Skylon tower）中，3 根又長又重的柱子，使用了 6 條索組成一個張拉整體結構系統。

張拉整體結構的剛性是由預應力提供，但在施加**預應力**之前，結構體系通常相當不穩定，故此結構屬於「臨界受力體系」。初始提供的預應力大小對整體結構的形態形成及結構的剛性都具有決定性的影響與作用，通常必需充分運用「幾何非線性結構力學」，才能進行完整詳細的分析。

科學小知識

何謂預應力（prestressing force）？

為了改善結構體在實際服役應用時的效益，故會在施作期間預先對結構體施加的壓應力。結構完成後，在使用服役期間，預加壓應力可全部或部分抵消荷載導致的拉應力，以避免結構被破壞。常用於混凝土結構，在混凝土結構承受荷載之前，預先對結構施加一定壓力，以使結構在外荷載作用時，受拉區混凝土內力產生壓應力，用以抵消或減小外荷載產生的拉應力。以使結構在正常使用時，不會產生裂縫或裂得比較延後些。

參考來源：百科知識「預應力」
https://reurl.cc/6ExpAr

對有結構力學分析經驗的人來說，當在討論一般傳統結構的受力關係時，可以很容易地理解力平衡所形成的靜態平衡狀態，且不難做得到平衡。但張拉整體結構卻是牽一髮而動全身，因此使得這種共構結構的穩定平衡增添了一份微妙有趣的神秘感。

斯內爾森根據創作靈感所設計的藝術裝置普遍被認為是張拉整體概念最早實作成功的作品。之後，有富勒、艾莫瑞奇（P. G. Emmerich）、瓦爾耐（O. Vilnay）、莫特羅（R. Motro）、漢納（A. Hanaor）等多位藝術家透過數學與圖形理論，研究出更多

種不同型式、不同單元組合所形成的張拉整體結構體系。如圖 8 所示，富勒利用短棒與細繩線所設計的中空球型張拉整體結構，組成了一個 20 面體穹頂構造的張拉結構，以及其他更多面的球狀體結構。

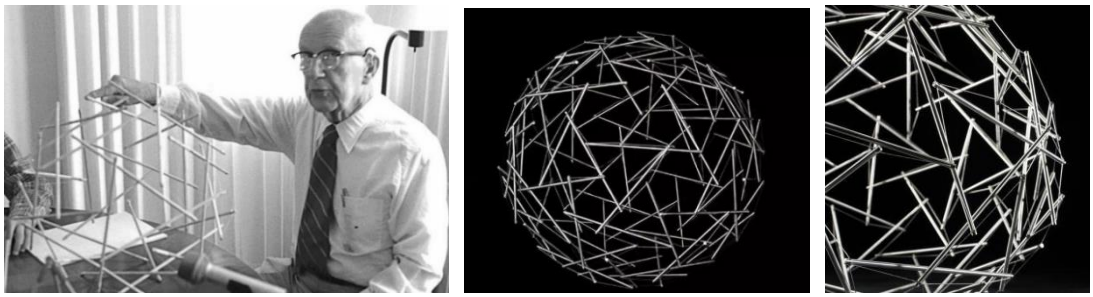


圖 8. 富勒展示其設計的中空球型的張拉整體結構

富勒利用短棒與細繩線組成一個穹頂構造的 20 面體張拉結構，以及其他更多面的球狀體結構。

參、雕塑家斯內爾森的經典創作—杆與索美麗神奇的交連

斯內爾森（Kenneth Snelson）是 21 世紀美國相當著名的雕塑家，斯內爾森受此結構概念啟發，因此特別積極於此結構系統的研發設計。自 1948 年開始，他對於張拉整體裝置的創作靈感似乎從未停止過，他主要的工作與貢獻是致力於將剛性的鋁合金或金屬鋼管和柔性的不鏽鋼索件組成張拉整體結構，創作了許多令人覺得不可思議，且極具視覺衝擊力的大型藝術作品。並在此結構的發展史上成了很重要的推手，也成就了很多經典且重要的作品。本段落內所呈列的圖片都是節錄自 “Kenneth Snelson: Art and Ideas”一書，書中記載了不少斯內爾森歷年著名的經典作品，及設計時的理念和心路歷程。此為免費版的電子書，共 174 頁，由 Eleanor Heartney 撰文斯內爾森本人親自補充。

文章網址：http://kennethsnelson.net/KennethSnelson_Art_And_Ideas.pdf

圖 9 呈現了他年輕時的作品之一 Tensegrity tower，是由多個 3 杆 9 索的張拉整體（即前述提及的 Simplex 單元結構）疊加成的，每層的下部三個壓杆支點落在下一層頂部拉杆三角形的邊上。

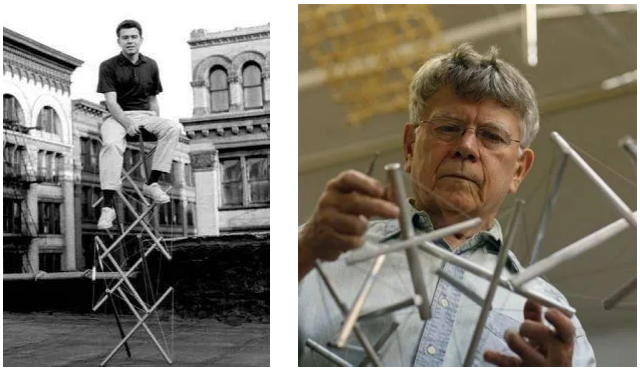
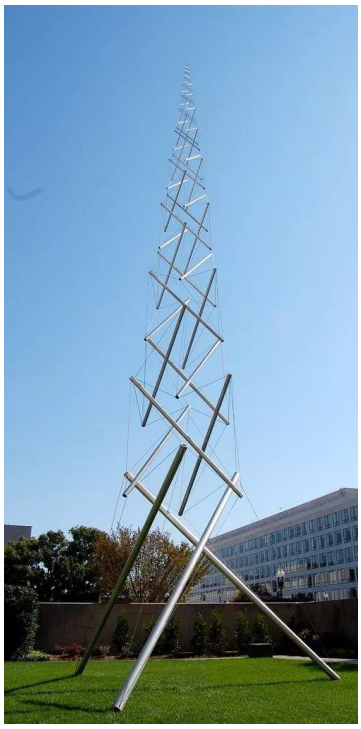


圖 9. 斯內爾森照片

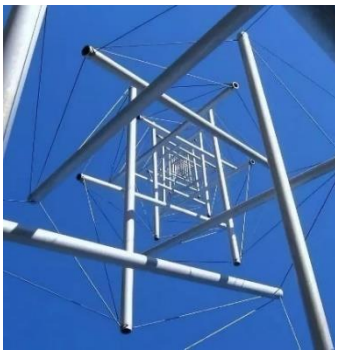
- 左圖：年輕時的斯內爾森與在他創作的 Tensegrity Tower 作品。
- 右圖：年長時照片。

1968 年，斯內爾森將多個 Simplex 單元疊高起來，受壓單元體的壓杆是以鋁合金管材質製作，拉索則使用不鏽鋼索；製作了一座高 18 公尺，寬 6.18 公尺，長 5.42 公尺尖塔造型的建築體，命名為 Needle Tower，見圖 10 所示。此作品現陳列在美國華盛頓特區的 Hirshhorn Museum and Sculpture 公園。這可說是斯內爾森最經典的代表作品之一，此塔的後續延伸版竟能懸挑到高達 30 公尺之高！這即是根據富勒的理論所沿伸發展出的作品，富勒設計的測地圓頂在 1948 年就已暗示了拉伸結構的概念[5]。圖 11-13 呈列斯內爾森多項其他著名的作品。

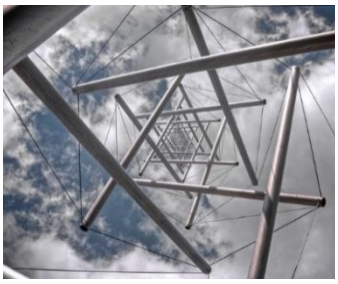


(a)

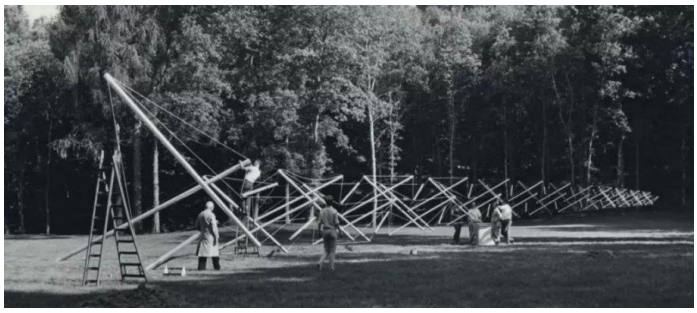
(b)



(c)



(d)



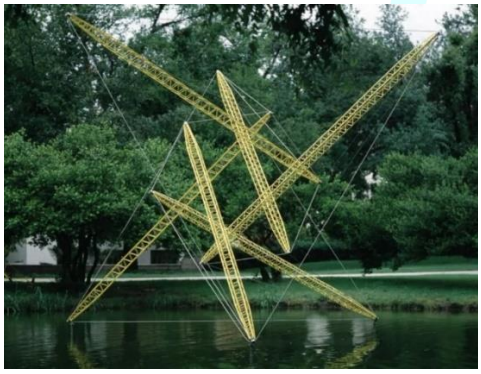
(e)

(f)

圖 10. 斯內爾森設計的針塔

(a)1968, K. Snelson 設計的針塔（Needle tower I）結構
(b) 1969, Needle tower II 塔高達 30 公尺
(c) Needle tower 中心的側拍照片　(d)中心的仰視照片　(e)現場安裝過程　(f)跨河結構。

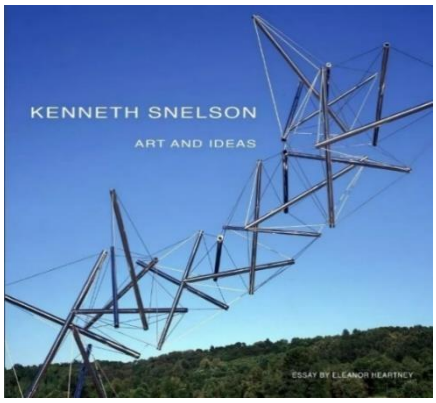
圖片來源：Needle Tower © Clayton Shonkwiler via Flickr 和 Easy K_Kenneth Snelson © Robin Capper via Flickr Licença CC BY-NC 2.0。



(a) Northwood I, 1969

(b) Cantilever, 1967

(c) Key City, 1968



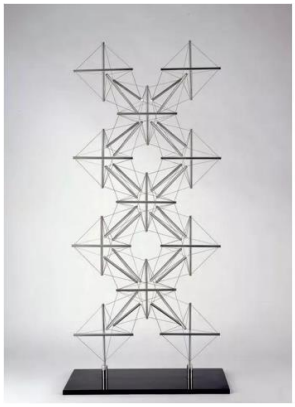
(d) 1962-1988 雕塑作品 Fly

圖 11. 斯內爾森其他張拉整體的作品

圖片來源：" *Kenneth Snelson: Art and Ideas* " 免費版電子書
http://kennethsnelson.net/KennethSnelson_Art_And_Ideas.pdf

圖 12. 斯內爾森的 Vortex III 作品, 2002

- 左上圖：頂視照片　／　左下圖：設計稿
- 中間圖：模型作品的實體照片
- 右圖：1968, V-X 實體照, 不鏽鋼材質, 182.9 x 304.8 x 304.8 cm^3。
- 圖片來源：" *Kenneth Snelson: Art and Ideas* " 免費版電子書
  http://kennethsnelson.net/KennethSnelson_Art_And_Ideas.pdf



(a) X-Planar Tower

(b) Rainbow Arch, 2001

(c) Double City Boots, 1968

(d) B-Tree II, 1981-2006

(e) Triple Crown, 1991

(f) Dragon, 1999-2000

(g) New Dimension, 1977

(h) 壓杆與拉索的節點設計

圖 13. 斯內爾森其他張拉整體的作品

圖片來源：" *Kenneth Snelson: Art and Ideas* " 免費版電子書

http://kennethsnelson.net/KennethSnelson_Art_And_Ideas.pdf

肆、非直線型杆狀的之受壓單元組成的張拉整體結構

早期大部分張拉整體結構的受壓構件多是以直線形的杆狀為主，且只承受軸向力。但其實不須如此。早期經典之作「Snelson's X」的「壓杆」就不是直線型，而是 X 型。壓杆也可以是多杆，或曲線形狀，或二維平面狀，或三維立體塊狀等等，如圖 14 所示的幾款張拉整體結構體。

(a) 呈列於中國南京高等職業學校的雕塑

(b) 「懸浮」系列的張拉整體結構（建築師／李少航、鍾華穎 結構師／袁鑫）

(c) 承擔壓力的三維構件（Frumar et al., 2009）

(d) 球形張拉整體機器人（Böhm 等人, 2016

圖 14. 非直線型壓杆式的受壓單元之張拉整體結構體

伍、近代張拉整體結構在各領域的應用

一、張拉整體在生物力學的探究應用

張拉整體被認為是生命形式結構的生物力學基礎之一，可用以描述從碳分子的基本單元到細胞，再到全身組織系統的運作[12-14]。甚至可藉以探討如何通過改變細胞的形狀，來介導機械應力移轉到化學反應的轉導機制。許多關於細胞張拉整體性的領先研究多是由哈佛大學 Wyss 生物啟發工程研究所的創始成員 Donald Ingber 完成的[12-15]。

生物學家認為要瞭解「韌帶懸吊」的運作機制，就須要瞭解軟組織（如韌帶和肌肉）

與身體結構元素（骨骼）之間的相互作用關係。而這種關係即可透過張拉整體性（Tensional Integrity）的原則來理解。生物學家 Flemons [17]即致力於研究軀幹、膝蓋、腳、脊柱、椎間盤、骨盆和骨骼的張拉整體結構在生物力學上關連性。另一位 Stephen Levin 博士將張拉整體原理應用於人體，並將其命名為生物張拉整體。發表了許多描述肌肉骨骼系統內生物的張拉整體性的研究成果[18-20]。他認為「骨骼是漂浮在軟組織綜合張力網路中的壓縮元件，包括韌帶、肌肉、軟骨和結締組織」。

二、生活中的科學藝術傢俱或藝術展示品:

不少人將雕刻藝術家原設計的龐大藝術作品的尺寸小型化後，設計成可居家使用的生活美學用品。K. Snelson1 也不少有小型化的桌上型作品，如圖 15 所示。或透過張拉整體概念設計並製作出的大、小茶几，椅子，桌子、展示架或置物架等等各式物品不勝枚舉，且極具創意與美學意涵，亦有商品化產品。如圖 16 中呈現可實際使用的飄浮椅，以及圖 2 呈現的多款小型實用的生活用品。

圖 15. 斯內爾森的小型化桌上型作品

圖片來源：" *Kenneth Snelson: Art and Ideas* " 免費版電子書
http://kennethsnelson.net/KennethSnelson_Art_And_Ideas.pdf

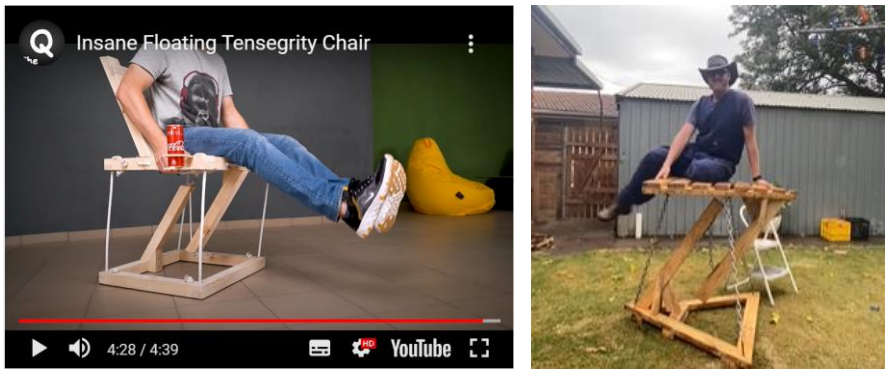


圖 16. 實現科學理論於生活中的飄浮椅
（圖片來源：網路）

- 左圖：https://www.cool3c.com/article/157640、https://youtu.be/4nkdl1iqKQA
- 右圖：https://www.youtube.com/watch?v=IZTKL4f3azA&t=48s

三、張拉整體機器人

2013 年，NASA Ames Research Center 研發以張拉整體結構體為基礎的機器人系統，規劃用於探索行星表面。典型代表之一是如圖 17 所示，NASA 研發的 Super Ball。此系統就不是採用 simplex 的單元，而是 20 面體（icosahedron），一共使用了 6 個壓杆。每支壓杆上裝有致動器，可以操控壓杆伸長或縮短，以改變壓杆的長度。NASA 透過遺傳算法與機器學習，找出最佳的控制方法和策略；透過控制系統，調節拉索和壓杆的長度，可以使整個結構產生變形，如此便可以驅動結構體行進。

圖 17. NASA 開發的 Super Ball 張拉整體機器人（2003 年）
可操控壓杆長度，使整體結構產生變形，進而可帶動結構體行進，以達到機械人的工作功能。規劃用於探索行星表面。

四、張拉整體與索穹頂的結合

1964 年，富勒再次以張拉整體結構為基礎發想，利用短程線形成環向和徑向的拉索，將立柱層層向上拉抬起排列，以撐出穹頂的立體型態，如圖 18 所示。根據此向上升的懸吊式穹頂概念設計了一款全新的結構形式，稱為 Aspension Dome 結構。Aspension 一詞即是富勒根據此穹頂型態創造出來的另一新名詞。

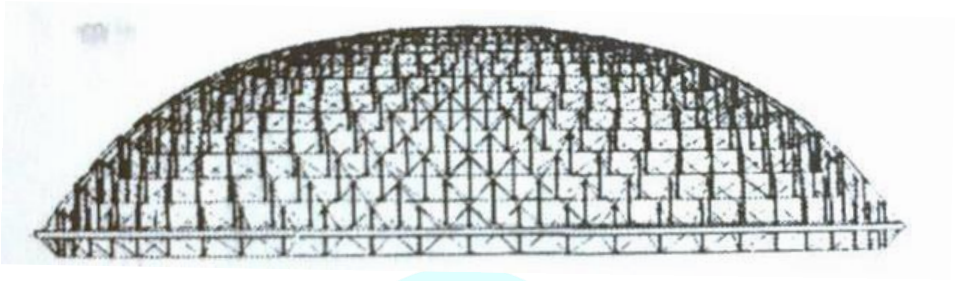


圖 18. 1964 年，富勒設計的懸吊式穹頂 Aspension Dome

之後，蓋格爾（D. H. Geiger）也根據富勒的張拉整體結構的基礎，發明了支承於周邊受壓環樑上的一種索杆預應力的張拉整體穹頂結構體，稱為**索穹頂**。1986 年，蓋格爾將索穹頂結構體系成功地應用於漢城奧運會的體操館（穹頂直徑為 119.8 公尺）和擊劍館的屋頂設計上（穹頂直徑為 89.9 公尺）。

另有 M.萊維（Levy） 於 1992 年，設計了一款穩定性更強的三角形網格穹頂，並將之運用在亞特蘭大奧運會的主體育館的屋頂結構上。如圖 19 所示，此喬治亞體育館穹頂（Georgia Dome）平面呈橢圓形，此雙曲拋物面型之張拉整體索穹頂需要用到的鋼量僅 3 kg/m^2，就能撐起面積高達 193 公尺 × 240 公尺的穹頂。相當令人嘖奇。但後因維護和使用原因，該館於 2017 年被拆除。

圖 19. M.萊維（Levy）設計的喬治亞體育館空拍圖及該館的穹頂設計圖（1992 年）

索穹頂雖是 Aspension Dome 張拉整體結構的進化版結構體，但因沒有嚴格地遵循結構自支承與自應力的原則，所以當偏離下部受壓環樑時，結構體就無法保持穩定平衡。

五、白色犀牛

2001 年，日本川口建一教授設計了一座索膜結構，取名為 " White Rhino " （請見圖 20），採用了 2 個張拉整體單元作為索膜的主要支撐構件，可能是張拉整體結構在建築類結構中的首次應用。

圖 20. 名為 " White Rhino " 的作品
展示於日本千葉，2001 年。

戴明鳳
國立清華大學物理系教授

參考資料

[1] 蘇薇晨（2003）。**基於張拉整體結構探討動態性結構**。國立交通大學建築研究所碩士論文。https://ir.nctu.edu.tw/bitstream/11536/72882/1/951001.pdf

[2] Francesewright（2012）. *STRUCTURAL INSPIRATION : TENSEGRITY*.（結構靈感：張拉整體結構）https://fewrightstannergate.wordpress.com/2012/10/27/structural-inspiration-tensegrity/

[3] Robbin, T.（1996）. *Engineering a new architecture.* New Haven and London: Yale University Press.

[4] Free E-book: "*Kenneth Snelson: Art and Ideas*", Essay by Eleanor Heartney, Additional text by Kenneth Snelson, http://kennethsnelson.net/KennethSnelson_Art_And_Ideas.pdf

[5] Aaron Dong〈張拉整體結構簡介〉。https://zhuanlan.zhihu.com/p/29875553

[6] Wikipedia: Kenneth_Snelson. https://en.wikipedia.org/wiki/Kenneth_Snelson

[7] ArchDaily。https://reurl.cc/3jWbEV

[8] Serola Biomechanics。https://reurl.cc/GovGR3

[9] 楊笑天（2018）。**張拉整體——結構中的杆和索還可以這麼玩，學習了！**。建築結構。https://read01.com/PMxENzL.html

[10]林詩韻（譯）。**什麼是整體張拉結構？在建築中如何被運用？** https://www.archdaily.cn/cn/895688/shi-yao-shi-zheng-ti-zhang-la-jie-gou-ta-men-ke-yi-zuo-shi-yao

[11] Pinterest。https://reurl.cc/oe6K3V

[12] Ingber, DE，生命的建築，Sci Am, 1998. 278(1): p. 48-57。

[13] Wang, N. 等人（2001）。活細胞中的機械行為與張拉整體模型一致。*Proc Natl Acad Sci USA,. 98*(14): p. 7765-70。

[14] Ingber, DE, Tensegrity I（2003）。細胞結構和分級系統生物學。*J Cell Sci, 116*(7): p. 1157-73。

[15] Ingber，DE。張拉整體 II，結構網路如何影響蜂窩資訊處理網路，*J Cell Sci, 116*(8): p. 1397-408。

[16] Galli, C., et al.（2005）. Life on the wire：論細胞中的張拉整體性和力平衡。*Acta Biomed,. 76*(1): p. 5-12。

[17] Flemons（2007）。**TE 解剖學的幾何學，張拉整體的骨骼**。http://www.intensiondesigns.com/geometry_of_anatomy.html。

[18] Levin, SM.（1995）。三維空間中的骶骨，*Spine: State of the Art Reviews, 9*(2): p. 381-88。

[19] Levin, SM.（1997）。**人類骨盆力學的另一種方法：張拉整體性，在運動、穩定性和腰痛中；骨盆的重要作用**。邱吉爾·利文斯通：紐約，157-167。

[20] Levin, SM.（1998）。**張力整體系統和骨盆疼痛綜合征，在第三屆世界腰背和骨盆疼痛大會上**。奧地利維也納：歐盟會議組織者。