

國立臺灣大學生物資源暨農學院生物機電工程學系
機械設計 期中專題書面報告



組別 第六組

組員：B10611014 詹皇璽

B11611001 王宥嫻

B11611014 張曉芹

B11611025 李文婷

B11611050 劉庭妤

指導老師：丁健芳 助理教授

朱元南 退休教授

專題呈現日期：2025.04.09

摘要

本次機械設計課程專題旨在實作與探討兩項機構設計——空橋與齒輪箱。透過實際設計、建構與測試，驗證材料與結構配置對機械性能的影響。在空橋設計部分，採用材料力學中常見的桁架原理進行結構規劃，並在有限的材料條件下，追求高承重與輕量化的平衡；齒輪箱則依據馬達動力特性進行減速比與輸出力矩的配合設計，以提升其提升重物的效率。設計過程中，我們初步計算了桁架結構需要的冰棒棍數以及齒輪箱的減速比，並進行實體測試，分別優化了兩項機構的性能。最終競賽結果顯示，我們設計的空橋成功懸吊住高於自身一百多倍重量的重物；齒輪箱則在限制尺寸與馬達扭矩的前提下，成功吊起重物，不過承重比遠不如桁架，因此我們的齒輪箱有較大的改善空間。

目錄

摘要	2
第一章 緒論	4
第二章 系統架構與原理	5
2.1 空橋結構原理	5
2.1.1 結構形式選擇	5
2.1.2 連接方式選擇	5
2.1.3 桁架模組與尺寸選擇	6
2.1.4 平台接觸與黏接條件	7
2.1.5 設計版本取捨與數量限制	7
2.1.6 結構合理性與內力分析簡述	8
2.2 齒輪盒傳動原理	8
2.2.1 傳動方式取捨	8
2.2.2 齒輪配置與減速比設計	9
2.2.3 製作條件與材料限制	9
2.2.4 輸出形式與實作連接	9
2.2.5 總結	10
第三章 成果與討論	10
3.1 成果	10
3.1.1 空橋	10
3.1.2 齒輪箱	12
3.2 討論	13
3.2.1 空橋	13
3.2.2 齒輪箱	15
附錄	17
分工	17
參考資料	17

第一章 緒論

動機與目標

本次專題設計以「空橋」與「齒輪箱」為主題，兩者皆為日常與工程實務中常見的力學應用元件，具有高實作價值與挑戰性。空橋的結構配置、跨距、材料選用與數量限制，讓我們在設計一座既輕又強的空橋時有諸多需要考量的困難；齒輪箱則要求我們據馬達輸出條件，設計合適的減速與增力結構，使其能夠順利舉升重物。

理念與策略

在空橋設計方面，我們以桁架結構去做設計，該結構以多組三角形單元組成，具備優異的力流分散與抗壓抗彎性能，是機械工程中常見的設計原型。我們針對不同桁架構造的細節進行比較，例如結構類型、底角角度、層數，最終為了考量冰棒棍的數量限制，我們將較不必要的桿件砍除，並選擇一種兼具結構穩定性與材料使用效率的方案作為主體設計。

為了減輕自重，我們特別關注膠水與接合方式的應力分布，並經過實際測試比較了多種膠水（如AA擠壓、AA用牙籤、3M、熱融膠、保麗龍膠、白膠）的黏性與性能，考量價格與乾燥時間，最終選擇了保麗龍膠作為接合材料，以達到最佳的效果。

齒輪系統則採用多段減速設計，利用共軸排列提升結構整合度與穩定性。齒輪由助教以3D列印方式製作，考慮材料特性與誤差調整，設計時預留適當間隙以利裝配。輸出端透過曲柄與吊繩連接載重，簡化操作流程並方便測試。整體而言，我們在有限條件下完成一套具穩定性、效率與實用性的機構設計。

決策過程與創新重點

本次專題的挑戰不僅來自於設計本身，更多的是在於有限資源下的最適化。冰棒棍的數量限制、橋長（受跨距影響）與齒輪箱重量要求，都要求我們在設計中進行大量的取捨與優化。針對這些挑戰，我們採取了以下幾個策略：

空橋部分，我們引入了「材料配置效益最大化」的思維，依據受力方向合理配置構件，讓每根冰棒棍發揮最大結構效益。創新方面，我們在空橋的接合部分尤其注重膠水的選擇，實測不同類型膠水在黏著力、乾燥時間與價格上的表現，才選定了與其他組不同的保麗龍膠作為接合材料，並花費了大量時間等待膠慢慢乾，以提升整體穩定性。

齒輪箱部分，設計採用多段共軸式齒輪組合，以提高傳動穩定性並簡化裝配。我們注重齒輪排列的空間效率與結構對稱性，並針對齒輪比進行多次測試，以獲得最適的輸出表現。在材料選用方面，因少考量3D列印精度與裝配誤差，未於設計階段預留適當間隙，故後續採取手動方式補救，確保各零件之間順利安裝與穩定運作。

第二章 系統架構與原理

本設計包含空橋結構與齒輪盒兩部分，評比標準皆為比載重比，需在重量限制下達成最佳承載或輸出表現；此外，空橋需跨距60公分，齒輪盒之曲柄長度需大於6公分。以上為競賽指定設計條件。本章將就兩部分之設計原理與機構分析進行說明。

2.1 空橋結構原理

2.1.1 結構形式選擇

本組曾考慮使用拱橋或桁架結構。拱橋之理論與建模相對簡單，然而在組裝時拱形會出現高度不一致與支撐不足等問題，難以精準控制受力方向，且不易施加預壓，故未採用。相較之下，桁架結構之力流清楚、模組化程度高，更適合重複單元製作與精度控制，最終選擇以下承式X型桁架作為基礎，如圖2.1所示。

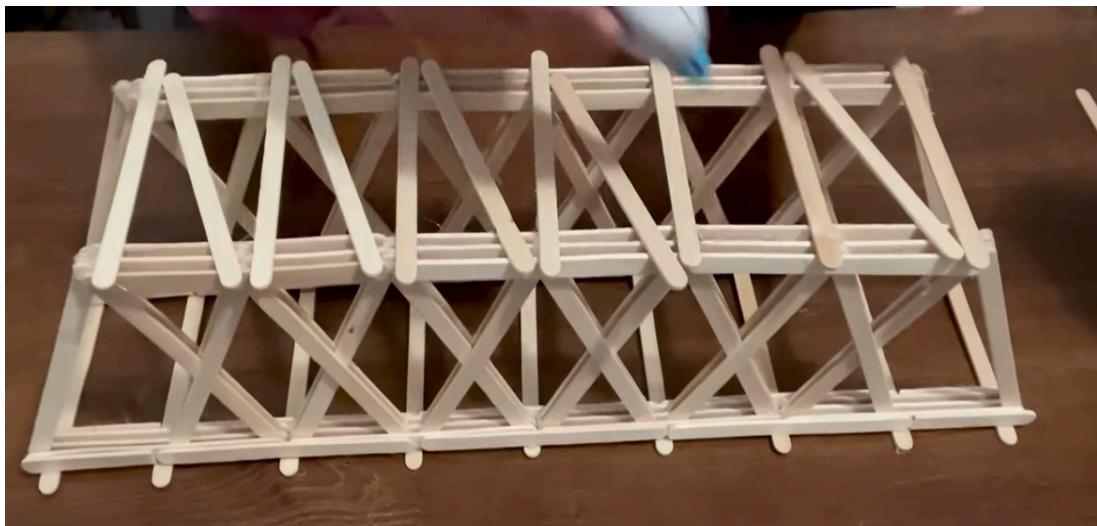


圖2.1:下承式X型桁架示意圖，截自參考資料[1]

2.1.2 連接方式選擇

本組曾考慮以膠接或機械方式（如螺絲螺帽墊圈）連接。雖然機械連接可拆卸，但重量顯著增加，且冰棒棍不適合鑽孔與重複拆裝，最終採用膠接方式。膠接部分曾進行簡單實驗，實驗方法如下：

- 用兩根冰棒棍相黏，其中黏合部分約為5.5公分，跨距約為10.5公分，在中間處以S型掛勾吊掛重物，若重物落地則視為不合格，如圖2.2所示。
- 實驗結果如表2.1使用白膠、三秒膠、熱融膠與保麗龍膠試黏。最終選擇保麗龍膠，主要考量為初黏時間短，且固化後不脆，以及價格相對三秒膠低廉。



圖2.2:實驗裝置示意圖，S型掛勾下方會吊掛重物
註：上圖為正常承重，下圖為即將斷裂的前一秒

	1504.6	2101	2492.8	2787.4	3264.6
AA擠壓	✓	✓	✗	✗	✗
AA用牙籤	✓	✗	✗	✗	✗
3M	✓	✓	✓	✓	✓
熱融膠	✓	✓	✓	✗	✗
保麗龍膠	✓	✓	✓	✓	✓
白膠	✓	✓	✓	✓	✓

表2.1 各種膠水能承重量(單位:公克)
註：AA與3M在表格中為兩種不同品牌的三秒膠

2.1.3 桁架模組與尺寸選擇

本組採用模組化設計，左右對稱、上下雙層結構，以便控制數量與維持整體平衡。桁架高度約為0.6–0.7根冰棒棍，寬度約為0.6根冰棒棍（單側），比例偏低且重心穩定，有助提升初始承載表現。

為提升橋體對集中載重的抗彎能力，本組於橋面結構採用局部堆疊加強的橫向配置。每側在橋體長度方向的同一垂直面上，於上下兩層分別配置四根橫向冰棒棍，總

計八根構件排列於相同側面，如圖2.3所示。此種多重排列方式可提升該區域的彎曲剛性與穩定性，抑制撓曲與局部失穩，在重量僅微幅增加的條件下，有助於提升整體承載表現。



圖2.3:空橋細節圖，可看出單側即為上下各4層，共8層的橫向結構

2.1.4 平台接觸與黏接條件

比賽雖未強制規定橋與平台固定方式，但部分組別因滑動造成測試失敗。本組橋底兩端加黏三根橫向冰棒棍以穩定接觸平台，黏接面長度約為3公分，測試中未發生滑動現象，如圖2.3所示。

2.1.5 設計版本取捨與數量限制

初期曾參考參考資料一所示之影片架構，如圖2.1所示。雖未直接採用原設計，最終版本仍以其為基礎進行調整與簡化。原結構若完全照做，約需使用288根冰棒棍，遠超出競賽規定之120根上限，故僅保留其部分形式進行修改。亦曾評估參考資料二所示之中學生科展設計，如圖2.4所示，惟該結構節點繁多、組裝程序複雜，不利於限時內操作與修正，因而未採用。

	四角華倫 桁架	華倫桁架	郝氏桁架	普拉特桁架	自行設計桁架
單邊構造					
單側桁架構 造內三角形 數量	10	14	10	10	20
自重 (W_1 、 gw)	189.6	203.2	182.9	179.6	206.1
最大承重 (W_2 、 gw)	54950	139900	123200	125100	145200
載重比(R) $R = W_2/W_1$	290	688	674	697	705

圖2.4:學生自行設計桁架與其他桁架的載重比對照，截自參考資料[2]

在排除上述外部設計後，本組提出兩種自訂設計版本，如圖 2.5 所示，兩者主要差異在於是否加入垂直桿件，以及底角角度不同。版本一於模組中加入垂直桿件，材料使用量約為 150 根冰棒棍；版本二未加入該構件，但因橫向構件數量較多，材料使用量約為 156 根。兩者皆超出比賽規定上限 120 根，最終以版本一為基礎，刪減部分構件後重新配置，使設計符合材料限制。

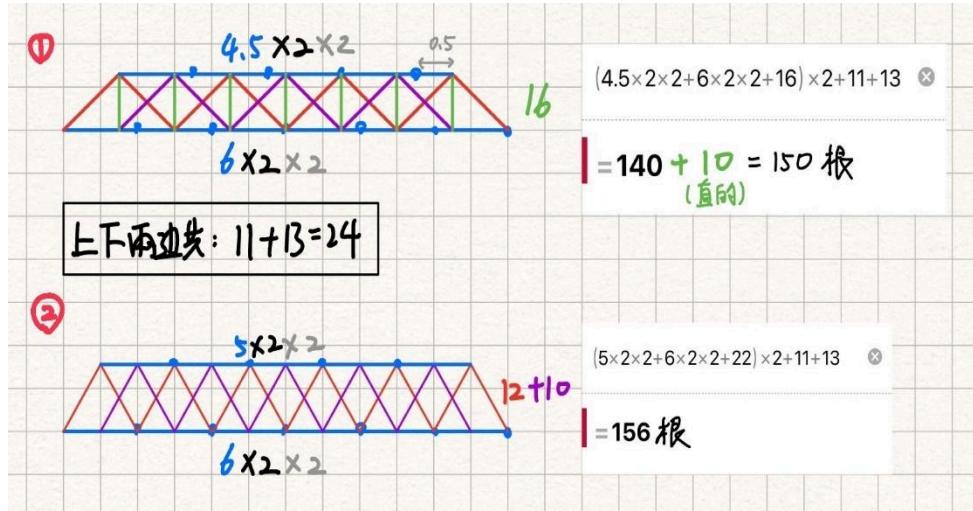


圖 2.5: 初版設計圖

2.1.6 結構合理性與內力分析簡述

由於桁架為下承式形式，故主要受力集中於下方節點與側邊支撐。各模組皆為對稱設計，並具備基本撐壓與剪力分配條件。整體結構未進行電腦模擬，但可藉對稱性與構件配置合理性進行判斷。

2.2 齒輪盒傳動原理

2.2.1 傳動方式取捨

本設計需將馬達輸出之高速低扭力轉換為低速高扭力，以應付比賽中比載重比之評比條件。設計初期考慮過三種主要方案：

- 單級齒輪系：結構簡單，惟減速比有限。
- 行星齒輪：結構緊湊、減速比高，但加工精度與裝配要求高。
- 多級齒輪系：透過多級直齒輪逐級減速，結構清楚、可控性高。

綜合製作難度與穩定性後，最終採用多段串聯之複式齒輪系。

2.2.2 齒輪配置與減速比設計

本設計採用兩組齒數比為 1:3 的齒輪組與兩組齒數比為 1:4 的齒輪組，齒輪數據如表2.2所示，交錯配置於共軸系統中（採 3-4-3-4 排列）如圖2.6所示，總減速比為 144:1。齒輪依序傳動，以簡化軸心定位與裝配流程，提升結構穩定性。

齒數比	小齒輪節圓直徑	大齒輪節圓直徑	模數
1:3	20 mm	60 mm	1
1:4	16 mm	64 mm	1

表2.2:齒輪數據

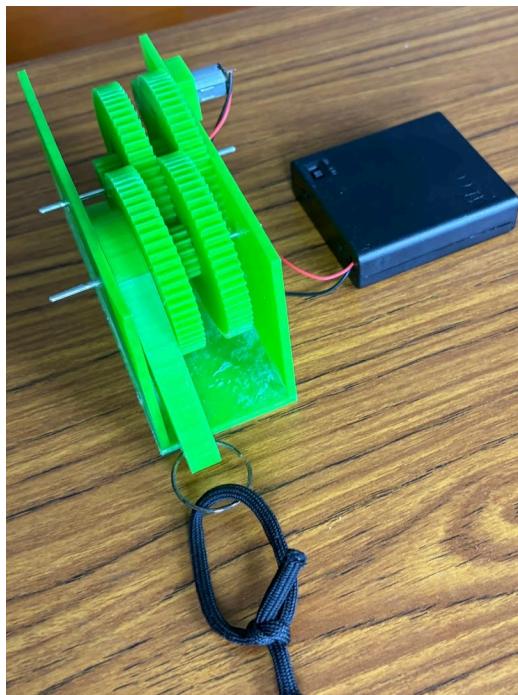


圖2.6:齒輪盒成品，四組回歸齒輪齒數比依序為3-4-3-4

2.2.3 製作條件與材料限制

齒輪與齒輪盒由助教協助列印，材料為 PLA。設計時考量 PLA 材料於列印過程中可能產生之公差與尺寸誤差，於齒軸與軸孔等部位保留適當間隙，以降低裝配困難與干涉風險。

2.2.4 輸出形式與實作連接

輸出軸末端設置外露曲柄，並繫上吊繩與測試載重相連，操作時由馬達驅動齒輪系進行升重。齒輪盒可直接擺放於平台上操作，未進行額外固定。

2.2.5 總結

綜合上述設計，齒輪盒以多段複式齒輪系統實現 1:144 減速比，結構簡化、功能穩定，能有效將馬達輸出轉換為足夠之扭力應對比賽需求，並具備合理的裝配與傳動效率。

第三章 成果與討論

3.1 成果

3.1.1 空橋

經過當日實測，最後橋體總重約為210.3g，在所有組別中為較重的橋體。測試時由於裝載承重物之水桶已達負荷上限，吊起之重量使水桶手柄及桶側無法負荷而斷裂(圖3.1)，換了第二個水桶後繼續測量，在水桶已出現嚴重變形即時停止(圖3.2)，因此最終僅以34.58kg為最終承重紀錄。

然而，當時橋體並未出現任何彎曲、斷裂等，因此此紀錄為水桶負荷上限而非橋梁負荷上限，而後經過協調，最終採用水桶所能承載之最大承重紀錄，耐重比為164.45，成為第一。與第二名之耐重比 136.68有明顯差距。



圖3.1：比賽時達負荷上限而斷裂之水桶



圖3.2：比賽時嚴重彎曲之水桶

比賽後由於想測試我們組橋梁的支撐上限，開始嘗試置於相同跨距(60cm)之場地，由不同人坐於上方(圖3.3)，經過測試後大致確認橋體可以承載至60多公斤的人穩穩坐於上方，而直到到了70多公斤男生坐於上方橋體才有明顯彎曲與斷裂。



圖3.3：測試人坐於橋體上方

整體橋樑彎曲如圖3.4，斷裂處如圖3.5，斷裂處所在位置於橋體正中央，與我們預想相同，而斷裂的那根冰棒棍位於單一側夾於中間處，同樣也是建構橋梁最初的步驟所完成的部分，是將單一冰棒棍交錯堆疊組成的強化結構，因此我們也認為最後的斷裂處發生於最單薄的結構上十分合理。若是能將最基礎的結構增加為三層或以上，應該可以大大提升支撐效果，但考慮會暴增的橋體重量與冰棒棍使用數量，並不適用於本此比賽，僅能提供給想要追求更多負荷重量之建議。

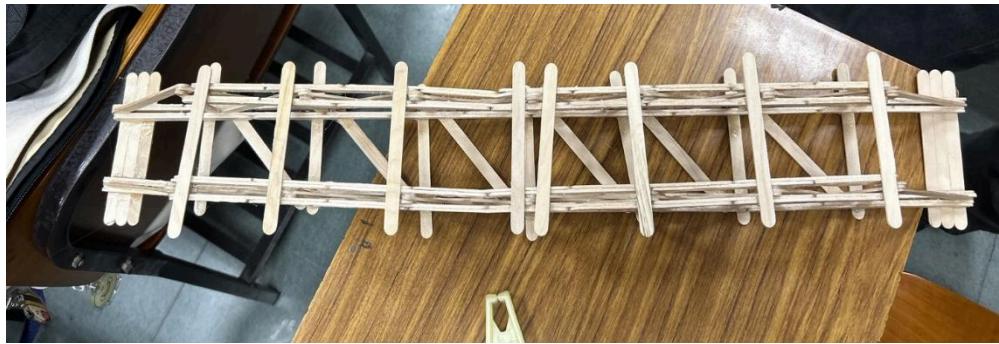


圖3.4：整體橋樑彎曲

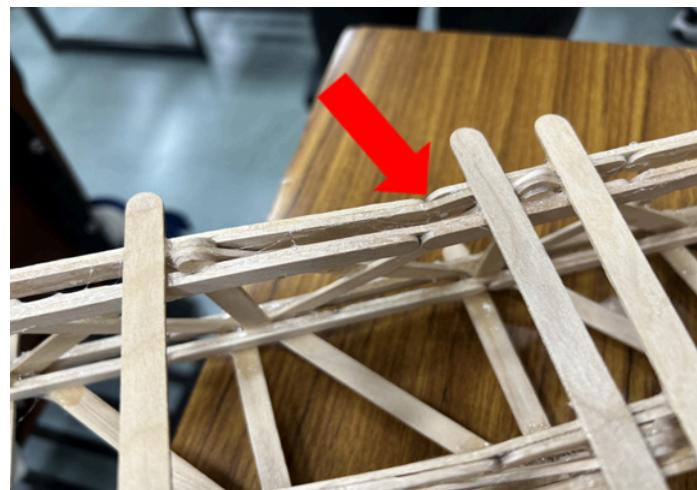


圖3.5：橋樑斷裂處

3.1.2 齒輪箱

齒輪箱最終淨重 131.6g，承載重量能達到 1kg 重，承重比為 7.60，在限制尺寸與馬達扭矩的前提下，成功吊起重物。然而當承重更大的重量時，根據觀察，馬達轉軸與第一個齒輪間會發生滑動，造成馬達無法帶動齒輪轉動(圖3.6)，因此無法再舉起更重的承載重量。

因為重物過重時，轉動齒輪則需要更大的扭矩，但是因為考慮到馬達日後尚需使用，我們沒有將馬達轉軸與第一個齒輪黏死，因此齒輪孔洞會被慢慢磨大而使馬達轉軸無法正確地與孔洞緊密咬合，最終使動力無法傳動。由於競賽無規定馬達與齒輪間的組裝，因此若是能將馬達轉軸與齒輪中心孔洞黏合，使它們之間不會有相對滑動，將能夠大幅改善所遇困難。

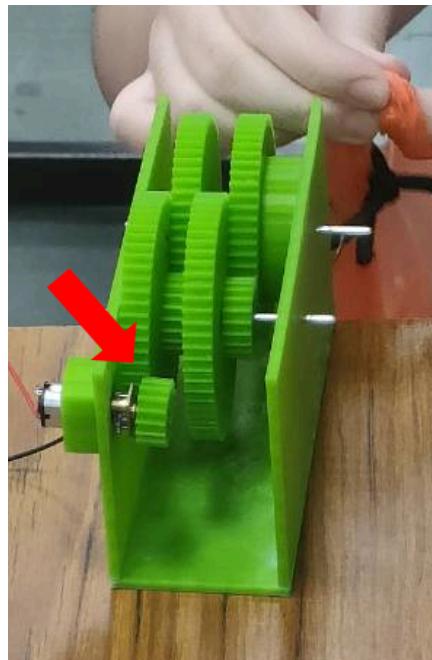


圖3.6：齒輪箱之馬達無法帶動齒輪轉動位置

3.2 討論

3.2.1 空橋

我們在設計冰棒棍空橋時，受限於材料數量、組裝精度與結構穩定性等多項因素，需在實務與理論間進行多次權衡與修正。以下分項說明各設計與實作層面之觀察與反思。

1. 材料數量限制對結構設計策略之影響

比賽規定可使用 120 根冰棒棍，對整體設計構成重大限制。初期設計參考網路影片與科展作品，採三層桁架結構與高密度模組化配置，但是經過計算發現材料數量遠超出限制。因此我們調整為雙層架構，並將桁架基本單元由正三角形改為鈍角三角形（邊長比例 1:1:1.5），有效降低模組數量與桁架高度。

同時，橋底「N 型支撐」亦由每半根配置調整為每一根配置，藉此在保持基本剛性的前提下，降低結構密度。整體設計策略轉向以「剛性與用量平衡」為核心考量，透過犧牲部分結構強度，換取可控的材料用量與整體穩定性。

2. 模組設計對裝配精度與穩定性之影響

模組化結構雖提升重複性與理論對稱性，實作時還是出現部分誤差累積現象。由於冰棒棍尺寸存在個體誤差，且膠接時受限於操作精度，部分模組間接縫產生輕微錯位，進而造成局部結構偏斜。此現象特別出現在中段橋體位置，導致整體受力略為不均，需額外以夾具輔助修正。未來可以考慮設計簡易模板來提升一致性及對稱性。

3. 接觸面配置與平台固定策略探討

考量橋體滑動風險，我們在橋底兩端橫向黏貼三根冰棒棍，延長接觸面並提升平台摩擦力。實測結果顯示，該設計除穩定橋體位置外，亦可適度分擔載重，形成接近「橫向撐腳」之效果，對抗側向傾倒提供額外穩定力。與其他未進行底部設計之組別相比，滑動與翻覆風險明顯降低，證明此簡易補強設計有實質效益。平台接觸處所增設的橫向棍件，原僅作為防滑設計，後觀察發現有助於穩定橋體兩側結構對稱性，特別是在載重接近極限時，能減緩兩側內縮或外推的變形情形。

4. 結構表現與測試結果偏差分析

比賽當日測試中，橋體本身未出現斷裂，但因懸吊器材本體損壞（水桶變形），導致測試終止。測試無法完全反映橋體極限承載能力，實測中橋體成功承重 34.583 公斤，而後續測試曾承受 60 公斤之成人體重而未斷裂，推估結構尚具超過 70% 之剩餘潛力，顯示測試限制可能導致實際承載能力低估。未來若能避免外部測試條件限制，可更準確評估結構實際表現。

5. 設計中未使用模擬工具之限制與觀察

本次專題未使用電腦模擬軟體進行力學分析，設計主要依賴結構直覺與文獻參考。雖整體結構未出現明顯設計錯誤，但部分細節（如模組錯位與應力集中區）難以預測。未來若導入簡易 FEM 分析工具（如 SolidWorks Simulation），可預先識別潛在弱點，進行優化設計與材料重新分配，提高成功率與極限載重表現。

6. 與參考設計之差異與回饋

參考設計多採三層高桁架結構、密集模組排列與中央強化設計，雖具高承載潛力，但無法滿足材料限制。本組最終捨棄過多節點與支撐，改以模組簡化與支撐再配置為設計主軸。此方法雖然稍微降低了載重能力，但成功避免超額用材，並提升整體穩定性。而從中也發現，簡化設計搭配合理力流規劃，依然可以保有相當程度的剛性。

7. 與其他組別設計策略之比較與反思

觀察其他組別失敗原因，以橋體滑動、側傾與節點破裂為主。本組所採對稱模組設計與底部固定策略，在穩定性表現上具備明顯優勢。惟部分組別採用局部集中補強（如中段疊加），在短時間承載時表現良好，顯示不同策略各有強項。進一步觀察比賽當日各組設計與操作方式，亦可歸納出以下幾項影響表現之關鍵因素：

其一，有組別直接將重物吊掛於橋體底部橫向木棍，而非如本組利用老師提供之鐵棍並固定於橋體正中央。該組橋體本身未見明顯破壞，只有吊掛點的木棍先斷裂，顯示該方法未能使載重有效傳遞至整體結構。此案例顯示，吊掛點的配置與支撐方式，應納入結構設計考量，避免載重集中於局部無支撐的部位上。

其二，雖有組別僅吊掛 11.183 公斤，總載重相對不高，但由於橋體極為輕巧，整體載重比高達 136.68，顯示在符合剛性需求的前提下，減輕自重可顯著提升表現。相較之下，本組於橋體關鍵處加大量保麗龍膠以確保強固，雖增強穩定性，卻也讓自重偏高，未來若能於黏接材料與補強策略上進行最佳化配置，有助於提升載重比表現。

其三，部分組別於吊掛過程中施力不均，導致橋體傾斜或受力偏移，最終造成結構破壞。此現象反映出測試操作方式亦對結果有顯著影響，穩定且對稱之吊掛設計有助於提升測試成功率。

其四，亦有組別橋體長度不足，未達規定之 60 公分橫跨距離，導致橋體兩端無法正確固定於測試平台上。此類情況多因初期未確實測量尺寸或未將平台寬度納入設計考量所致，顯示基礎幾何規格亦為成敗關鍵之一。

綜合以上觀察，未來設計與測試流程中應更加重視整體受力傳遞、橋體重量控制、操作施力方式與初步尺寸規劃，方能確保設計理念可於實測中充分發揮。

8. 若重新設計之調整方向

如果無材料限制或具備更高製作自由度，建議可回歸三層桁架架構，增加冰棒棍使用量，並結合模組預製與夾治具裝配，來提升精度與剛性。同時，可以考慮使用高強度輕量材料（如竹片或複合材），進一步提升橋體載重能力與結構效率。

3.2.2 齒輪箱

本組齒輪箱雖順利完成多段減速並實現負重，但實測結果僅達一公斤，載重比相對偏低。檢視結構配置與測試表現，推估其限制主要來自幾項關鍵因素：

1. 減速比雖高但扭力傳遞效率有限

本組設計為四級直齒輪組，減速比達 1:144，理論上可產生較高輸出扭力，但由於各齒輪間未使用滾珠軸承或潤滑系統，傳動過程中能量損失較大。此外，齒輪間部分配合過緊、間隙不足，有可能造成卡頓現象，降低實際輸出效率。未來可以考慮適當放寬齒軸間隙，或在不違反材料限制條件下，加入簡易低摩擦元件（如塑膠墊片）提升傳動滑順度。

2. 馬達固定與齒輪支撐機制仍有改善空間

比賽過程中曾出現馬達轉動而齒輪空轉之現象，顯示其與齒輪盒間未形成足夠支撐與穩固連接。雖以保麗龍膠修補固定，此屬應急處理，整體穩定性不足。建議未來可考慮於設計階段即納入馬達固定架、卡槽或機構相容配合面，減少膠接依賴，提高整體結構整合度與抗剪能力。

3. 整體結構重量影響載重比表現

齒輪盒與外殼皆以 PLA 列印製成，雖然提供結構剛性，可是外殼厚度與覆蓋面積可進一步最佳化。可以評估只保留必要支撐處、開孔減重，或重新配置齒輪盒整體形狀，使材料集中於受力區域。此舉不但可以降低自重，也有助提升單位重量之輸出效率。

4. 軸孔設計未留足夠容差，影響裝配精度

初期未為 2mm 軸預留足夠裝配之容差，導致過程需以人工擴孔調整，此舉容易產生孔徑不均與傾斜誤差，影響齒輪旋轉平衡與整體穩定性。未來應於設計初期明確設定列印容差，預留至少 1mm 的間隙，例如針對 2mm 軸設計 3mm 孔徑，可以提升裝配效率與精度，避免破壞齒輪本體。

5. 參考其他組別設計可導入之策略

觀察別組表現良好的齒輪箱，普遍具備以下特點：一為體積小巧、佈局集中，減少偏心問題；二為馬達與輸出軸間支撐連結完整，轉動過程穩定性佳。

綜合以上分析，未來齒輪箱設計若能於初期即考量裝配容差、動力傳遞效率與結構自重之平衡，並強化支撐連接細節，將有助於提升整體穩定性與載重表現。

附錄

分工

本組在專題執行過程中並未採取嚴格劃分之分工方式，而是以「彈性協作、視情況支援」為原則，依照各組員時間與能力安排，協力完成設計、製作與報告撰寫等任務。以下為依實際參與內容整理之分工概述。

空橋分工

工作	找資料	設計架構	測試黏膠	製作空橋	測試載重
姓名	詹皇璽 王宥姍 張曉芹 李文婷 劉庭妤	詹皇璽 王宥姍 張曉芹 李文婷 劉庭妤	王宥姍 李文婷 劉庭妤	詹皇璽 王宥姍 張曉芹 李文婷 劉庭妤	張曉芹 李文婷 劉庭妤

齒輪箱分工

工作	計算參數	繪製STL檔	列印	組裝	測試載重
姓名	劉庭妤	張曉芹 李文婷	助教們！ 感謝助教們 的幫助	王宥姍 李文婷 劉庭妤	詹皇璽 王宥姍 張曉芹 李文婷 劉庭妤

參考資料

1. Physics Burns (Raymond Burns)(2022)。〈Easy Popsicle Stick Bridge〉 [YouTube 影片]。
取自：
https://www.youtube.com/watch?v=s3HZievz_3Y
2. 中小學科學展覽會(2020)〈中華民國第60屆中小學科學展覽會作品說明書佳作〉。
取自：
<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/60/pdf/NPHSF2020-032905.pdf?374>

個人心得

詹皇璽：

因為不是應屆修課，本來很擔心分組問題，但運氣很好，被現在的組員們收留。大家在設計專題的過程中都非常願意討論與實測，也讓最後的成品效果遠遠超出預期。競賽當天，從用盡小型重物、到水桶裂開、再到新水桶提把被壓彎，最後我們甚至試著讓人坐上去，才真正找出空橋的極限。整個過程充滿挑戰與樂趣，也讓我覺得，能和這群認真的夥伴一起修課，是非常幸運的！

王宥姍：

這是系上少有的實作課程，因此對我來說也是需要學習的與難得的實作訓練，透過期中專題學習了從零到有，需要小組間事前的模型理論的討論、分工、實體的實踐，我認為最困難的是實作過程中遇到的與理想衝突的現實需要解決，像是畫橋樑結構圖完後發現實際上黏合會有人工不小的誤差，冰棒棍不同層數的厚度也會造成黏合的不易，齒輪孔洞經過3D列印也會有的公差未注意到，都會造成作品的不完美，也是最考驗我們臨機應變與動手的實力關卡。

張曉芹：

我覺得最困難的是討論結構時因為根數、長度限制所以討論了一陣子才確認結構。後續實作又發現熱熔膠黏不牢，但大家馬上買膠、測試，讓我覺得很有凝聚力。我覺得我們這組最強的就是遇到問題能快速解決，且我們耐心謹慎黏橋、用夾子固定直到膠全乾，我覺得這是橋體能這麼牢固的原因之一。

李文婷：

其實一開始知道要做空橋和齒輪盒時，會擔心如果結構選錯或膠用的過多，我們成品的載重比就會很低。但實際操作時，遇到的問題卻是膠不黏（因為不容易平整的塗）、要等膠乾、成本等等的考量，所以後來發現怎麼樣好好地把空橋黏出來、黏對稱、好好等乾（我們每上一層膠就等20分鐘好好的讓他乾）才是重點。至於齒輪箱印出來後遇到的問題是忘記留適當的公差，導致我們拿東西硬鑽開，很像原始人在鑽木取火的鑽了一段時間，記憶深刻。

劉庭妤：

這次專題我深刻認知到理論和實際的差距，如果下次還有類似的競賽，應該儘早開始準備，以應對各式突發狀況，以及各個版本可以不斷測試、比較、改良。還有及早認知到3D列印的誤差問題，也許對期末專題有幫助。