

## 【歷史】【軍事】現代諸葛弩

2020-06-01 06:16:00

原文網址：<http://blog.udn.com/MengyuanWang/137487763>

30多年前剛到美國的時候，我並不確定會在這兒待多久，爲了不浪費這趟人生經歷，我自問美國有什麼台灣不容易接觸到的活動，結論是槍械（“射”）和駕駛飛機（“御”），我選擇了後者。其實我並不是不喜歡射擊，只是更偏愛技術性高、噪音小、危險性低的弓箭，所以在美國定居之後，也想過要練習射箭，可惜住家附近找不到合適的靶場。這是因爲美國人拿弓箭當嗜好的，絕大部分是爲了打獵，而不是Olympic式射靶。我不認爲殘殺野生動物有什麼趣味可言，連帶著對狩獵用的弓箭和靶場也意興闌珊。

不過弓箭是古代戰爭中的主要兵器之一，它的設計和製造是軍事史學的重要成分，所以我也一直從這個角度出發而有所關注。例如連發弩發明於中國，在國外也廣爲所知，一般稱爲“Chu Ko Nu”“諸葛弩”，這是因爲連發弩雖然在戰國時代已有應用，但是諸葛亮對其做了深入的研究和改進，因而得名。《天工開物》記載了一個諸葛弩的版本，但認爲它的射程威力不足，不適合軍事應用，只能居家防盜；這可能是個小型弩，古代的軍用連發弩應該會犧牲射速和便携性來獲得足夠的殺傷力。

近年來，一些歐美的業餘歷史愛好者開始仿造古代的冷兵器，以便獲得更精確的性能參數，瞭解其優缺點。他們往往把自己的研究過程和成果發表在《YouTube》上，與大眾分享。我特別注意弓箭類的資訊，例如英國人Tod's Workshop（參見<https://www.youtube.com/watch?v=DBxdTkddHaE>）曾經複製了從1545年沉沒的英國戰船HMS Mary Rose上發現的長弓，請來一位業餘長弓手（這些長弓的拉力Draw Weight高達160磅，比一般現代獵弓的60-70磅高出甚多，非有十年以上的苦練無法拉動），對著一面中古騎士胸甲（由另一位專門仿造中古護甲的業餘愛好者，根據1390年法國Cherbourg的原物所做的精確複製，從鋼材到尺寸都忠實再現；正面厚度2.5毫米，側面1.5毫米）在中近距離進行多次試射，發現無法擊穿其正面。著名的1415年Agincourt戰役中，英國長弓大破法國重甲兵，其實源自法軍群龍無首，沒有統一的指揮體系，結果一窩蜂地衝進英軍預設的袋型陣地，使得英國長弓手得以攻擊法軍隊形的側面和背面，這才成爲一面倒的局面。

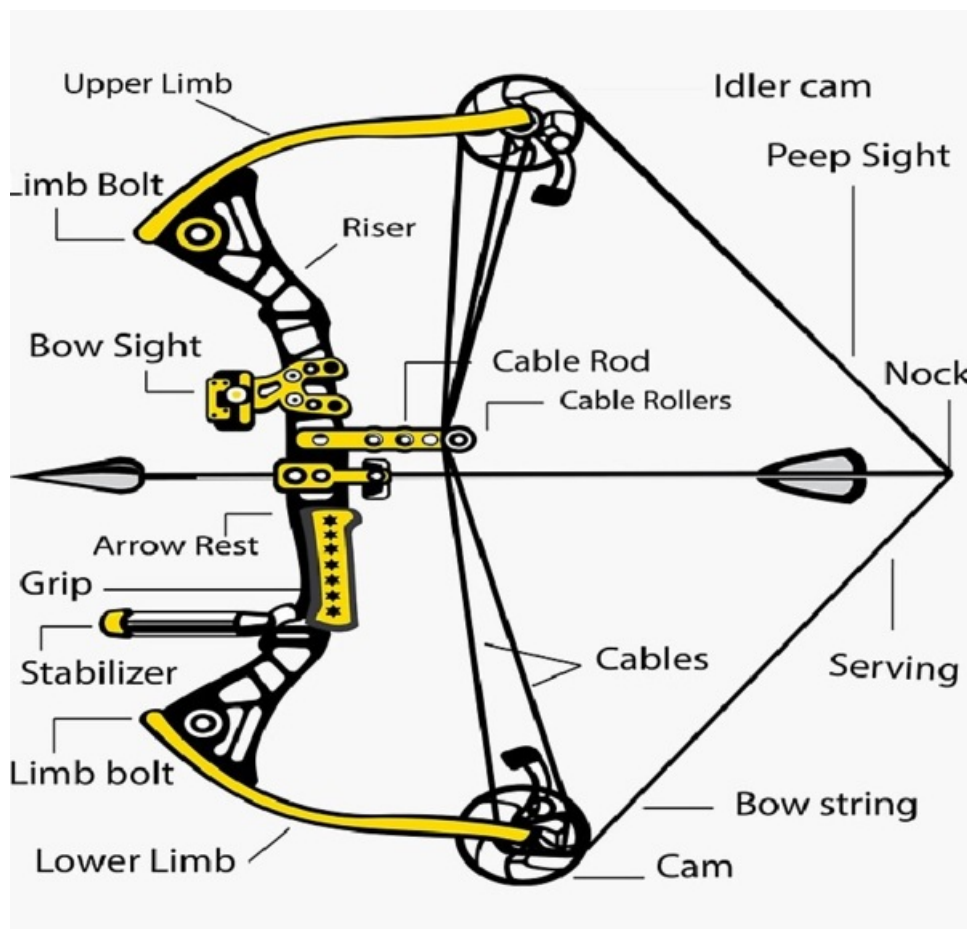
另一個研究的方向，是利用現代知識和工具來改進冷兵器的設計和製造。在弓箭方面，最知名的是德國人Jörg Sprave，他的標志性發明就是受諸葛弩啓發的連發弩，不過他爲了改進射速，採用自由滑動的中間支撐，拉弦和發射姿態和弓相同，而不像傳統的弩。Sprave的滑動弩可以是純中世紀的版本（亦即只用當時就有的材料；參見<https://www.youtube.com/watch?v=d6-UotZevrs>），也可以搭配現代的複合弓（Compound Bow，我會在下面幾個段落介紹它的技術原理；蒙古的Composite Bow也被翻譯成複合弓，很容易造成誤解；Sprave的作品參見<https://www.youtube.com/watch?v=NTJnyQ-bZLU>）。它的射速高達每秒1.5發，比長弓的射速（大約每四秒一發）快6倍，必須用杠桿拉弦的諸葛弩就更不用提了。在射程威力上Sprave也沒有在機械上做犧牲，純粹受射手肌肉強度和耐力的限制，不過初始動能不如傳統的弩，這也是本文要討論的改進方向。

這裏我先解釋一下弓弩的物理原理：它基本上是一個彈簧，所以一般來說彈力和拉距成正比。弓的最大拉距（Draw Length），由射手的臂長和肩寬決定，普通在22-30英寸（550-750毫米）之

間。到達最大拉距時拉力（Draw Weight）也最大；前面提到現代獵弓的拉力在60-70磅，也就是270-320N之間，而中世紀晚期的英國長弓，拉力達到160磅，相當於720N。取拉距的最大值（古代軍隊的弓箭手通常是選個子最大的壯漢來充任，因為弓箭的威力對操作人員的體型和力道最敏感）750毫米，每次拉弓所需的能量高達270J。弓把彈性能轉化為箭支動能的效率，主要由弓和弦的材質決定，現代大約是90%，古代可能比較接近80%，那麼長弓發箭的初始動能約為216J。當時的木箭加鐵製的穿甲頭，總重為80g（根據來自HMS Mary Rose的樣本），對應著73m/s的初速。

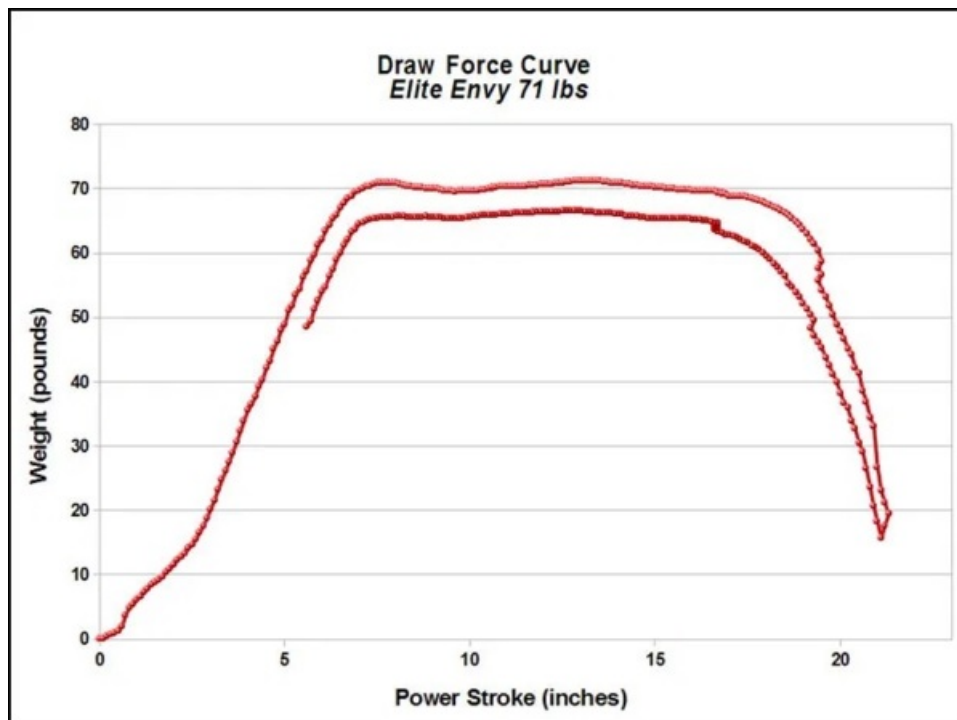
我在《人類的起源》一文中曾提過，已知最早的弓箭在7萬年前出現於南非，是僅次於長矛的古老武器。最早的弩則出現在600BCE的中國，到500BCE希臘也有了自己的版本，可能是獨立發明的。弩比起弓的好處，主要是它對射手的體型、臂力和技巧要求低得多，可以在幾分鐘之內教會一個剛被徵召來的農民。這是因為它可以藉助轆轤（Windlass）或杠桿來拉弦，然後用扳機來維持待發狀態。相對來看，長弓高達160磅的最大拉力就發生在待發姿態，連職業長弓手都不可能維持超過幾秒，所以他們通常是隨拉隨放，而這就減低了瞄準的餘裕。中古歐洲的重型弩，拉力可以高達1250磅（5600N，參見[https://www.youtube.com/watch?v=MMoL\\_SBD6gw](https://www.youtube.com/watch?v=MMoL_SBD6gw)），這時的拉距是6.5英寸（163毫米），彈性能456J，初始動能365J；如果使用重50g的弩箭，初速可以達到121m/s。弩的主要缺點，在於射速低，所以連發機制對弩的意義比弓更為重大。

前面解釋了長弓的主要缺點，在於最大拉力發生在待發姿態，這對需要精確瞄準的山林打獵（如果沒有命中心肺要害，獵物往木叢裏一鑽，追蹤起來就有困難）影響較大，在軍事上因為可以齊射反而不是太大的問題。最早的解決方案是反曲弓（Recurve Bow，即弓的兩端向前反曲，例如古代的蒙古弓和現代的Olympic競賽用弓），它可以使拉力的增加慢於拉距，在同樣的最大拉力和拉距限制下，總能量增加20-30%。



在1969年，美國人Hollis Wilbur Allen發明了Compound Bow，利用特殊形狀的滑輪（上圖）來改變拉力對拉距的函數曲線，典型的如下圖，來自一型叫做Elite Envy的複合弓。這裏最大拉距被設定為22英寸（550毫米），最大拉力71磅（320N）不是發生在最大拉距上，而在大約1/3處。

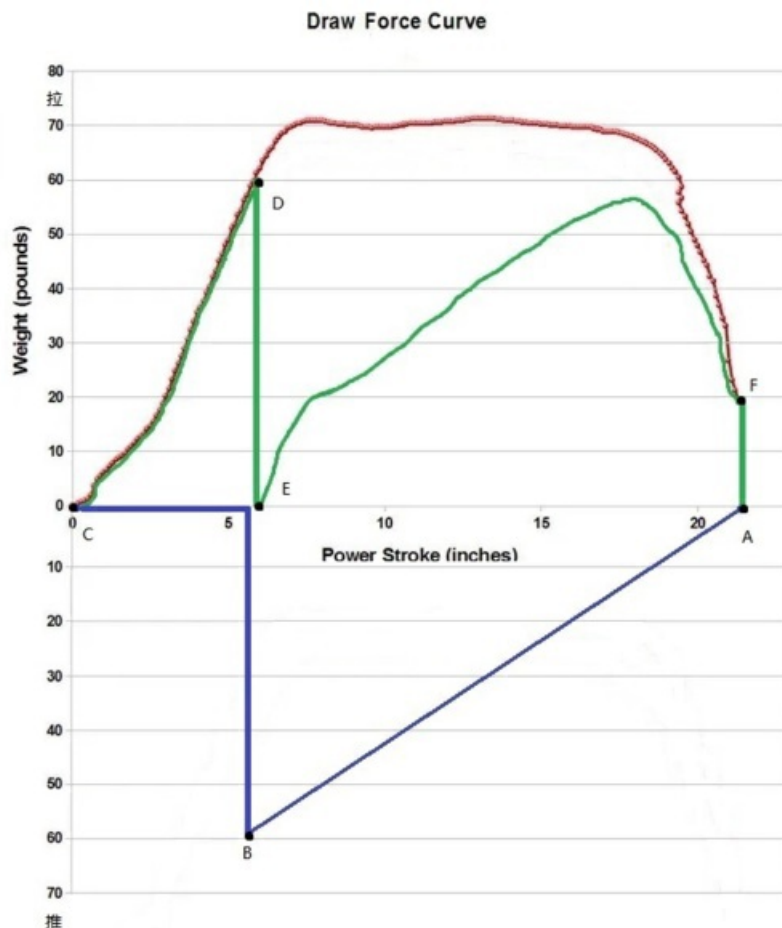
待發狀態拉力只有20磅，一般人也能輕鬆維持一段時間。居上的曲線是拉弓時的拉力函數，其下的面積是總彈性能（約為 $320\text{N} \times 0.55\text{m} \times 0.8 = 141\text{J}$ ）；下面的曲線則是放箭時的推力函數，它所包下的面積是箭支的初始動能（約為 $141\text{J} \times 0.9 = 127\text{J}$ ）。發射30g重的碳纖維箭支，初速達到92m/s。打獵有效射程一般在30m左右（主要受準確度限制），用銳利的Broadhead箭頭來射野豬，如果沒有撞上骨頭，有時可以對穿軀幹。



在相同的拉距和拉力條件下，現代的複合弓能產生比英國長弓高將近100%的初始動能，而維持待發狀態所需的力道只有30%。當然，如果像Sprave那樣，用複合弓來拉動滑動弩，那麼因為有扳機，所以待發拉力完全不成問題。

總結來說，一個體型中等、體力一般的現代人，即使在現代複合弓效率加倍的幫助下，仍然比不上中古時期專業的長弓手。Sprave的滑動弩只是進一步提高射速、消除待發拉力，在威力上沒有幫助。那麼是否有更進一步的巧妙設計，能在維持高射速的前提下，大幅提升初始動能，甚至到能正面擊穿中古板甲的地步呢？

Sprave注意到他的滑動弩比起傳統的弓弩多出了一個前推復位的動作，他靈感一來，覺得可以利用這個多餘的衝程來做機械功，累積額外的彈性能。於是他加裝了一個阻力彈簧，在推杆的過程中積蓄能量，在拉弓的階段釋放出來，想象中似乎可以幫助射手拉動更強的弓。他後來把彈簧換成弓，整個裝置由兩個方向相對的反曲弓組成，本月又把反曲弓升級為複合弓（參見<https://www.youtube.com/watch?v=thMxjrMS-Go>），觀眾們大呼爽快，但其實深入思考一下，就會明白他還沒有摸清楚正確的設計方向；這是因為他是個Tinkerer，主要靠試錯來摸索，沒有從原理上仔細思考。



上面是Sprave二衝程滑動弩的拉力函數圖；這裏我們考慮一個拉力複合弓和推力彈簧的組合，並假裝弓和彈簧的能量轉化效率都是100%。紅綫來自複合弓，藍綫是彈簧，綠綫是兩者共同作用下的淨力。Y軸的正向是拉力，負向是推力。在發射上一發弩箭之後，我們處在循環起點A。然後射手的右臂向前推動滑桿，逐步剋服彈簧的阻力，一直到彈簧的最大伸展點B。這時滑桿和彈簧解開連鎖，繼續自由前進到最遠點C。接著滑桿勾上弓弦，後拉到D點，彈簧解鎖，開始幫助射手拉弓，所以淨拉力一下子大幅降低到E點。當射手把滑桿拉到代發位置F，扳機扣住弓弦，拉力回歸到零，也就是原本的起始點A。

我們的目標是在保持拉距和最大拉力/推力在局限範圍內的前提下，將初始動能最大化。但是這裏初始動能（即紅綫下的面積）並沒有增加，拉距沒有改變，而最大拉力/推力只是從71磅降到60磅（B和D點）。可見這個版本的二衝程連發弩以增加總重和複雜性為代價，並沒有獲得性能的大幅提高。

當然，一旦把拉力函數圖畫出來，應該已經有讀者能看出Sprave的失誤何在。最高效的設計，是在兩個方向都使用複合弓，以獲得平坦的拉/推力曲綫，而且這兩個複合弓應該有相同的拉距，但是相差剛好一倍的拉力強度。如果藍綫是像紅綫一樣的梯形而不是鋸齒形，深度又只有紅綫高度的一半，那麼就可以把最大拉力減半。換句話說，在同樣的拉距和拉力條件下，初始動能可以倍增。Sprave嘗試了複合弓+複合弓的版本，但是沒有想清原理，兩個弓拉力強度相似，只是稍微調整了拉距，結果損失了效率增益的大部。

其實我注意到這個滑動弩還容許另一個改進，就是可以把拉距也加倍。請注意，Sprave的設計在上圖C點對應著射手的雙臂向前平舉並排，其實完全可以讓右臂繼續前推，左臂後拉，等達到左手發弓的姿態，再轉向完成拉開主弓的第二衝程。如此一來，整個循環的X軸加長100%，初始動能也因此而再獲倍增。

總結來說，一個正確設計的二衝程滑動弩，可以容許普通人在射速更高的條件下，達到一般複合

弓4倍的威力，亦即大約508J的初始動能，這是長弓的兩倍半，比重型弩還要高40%，甚至高於 Glock 17手槍的槍口動能（490J）；百米之內要擊穿任何中古鋼甲，完全沒有疑義。

## 7 条留言

狐禪

2020-06-01 08:27:00

不過攜帶實在不方便。也許可用於夜間狙擊或甚至掛上高爆彈頭當小型直射炮--無聲是個優點。

“

雖然這個設計依賴現代發明，但是我考慮的是穿越回古代的假想應用。和現代各式各樣的殺人工具相比，它的確沒有什麼卓越的特點。我知道這篇文章不太符合博客的傳統精神：一般我只在乎對世界有實際影響的話題，而這個現代諸葛弩在現實裏高不成低不就，頂多算是成年人的大玩具。不過我既然已經發明了它，不寫下來有點可惜，讀者如果對軍事歷史有興趣可以參考，否則略過也沒有什麼損失。

Niets

2020-06-01 09:32:00

王先生提到要穿透中古鋼甲，除了能量，可能对箭头材质也有一定要求。Tod的Medieval Myth Busting视频里尝试了用古代和现代材料制作不同的箭头，虽然都没能穿透胸甲，但是现代箭头还是有明显的提升。现代的防弹插板small arms protective insert(SAPI)和古代的胸甲其实有异曲同工之妙。为了保护躯干不受小口径全威力弹（5.56x45类似的）的伤害，人类又一次把胸甲找回来了，当然材质完全不一样。

“

在弓弩的速度範圍內，箭頭材質和形狀在穿甲能力上是個次要的因素，只要夠硬夠緊湊就行了；最終還是要看動能。我練習射箭的時候，用的就是穿甲箭頭，基本就是淬過火的鋼做成鈍角圓錐狀，適合擊穿均質硬裝甲；如果是鎖子甲，最好是用銳角圓錐箭頭；如果是布料或其他軟纖維材質，鋒利的Broadhead的效率最高。現代的穿甲彈，也是回歸箭支的長杆形狀，在減低風阻和集中撞擊衝力上都是最優。

desertfox

2020-06-02 03:03:00

弩的射速確實是最大的問題。宋代的神臂弓其實是弩由西夏傳入再經改良，（不知用的是何種複合材料）據古書記載然後由今人核算，射程可達驚人的520公尺，在南宋時曾重創金兵的重甲騎兵。但毛病就是張弦時還得靠腳蹬幫忙拉開，這樣就只能配發給步兵了。

“

重弩一般需要腳蹬固定，然後用轆轤開弓，即使是很熟練的弩手，一分鐘兩發就謝天謝地了。二衝程滑動弩瞬間射速應該可以達到兩秒一發，真正的限制反而來自肩背肌肉的恢復能力，實際上的長時間持續射速可能不比傳統重弩高多少。520米只可能是最大射程，亦即朝天45°左右發射的結果，既無準頭、也無存速，在實戰上只對輕甲兵集群有點騷擾作用，一般情況下是不值得這樣浪費箭支的。電影/電視導演喜歡它的視覺效果，可是中世紀的畫作裏，弓箭手永遠都是平射，有效射程基本在100米以內，而且對手的甲冑越高級，有效射程就越短，如果是一流的板甲，那麼只有最強的重弩在極近距離才能射穿正面。弩的確是宋兵依賴的主要利器，不過它只對遼和西夏作戰時比較有效。金朝早期的馬匹載重力極高，容許鐵浮屠穿戴雙層甚至三層甲，大幅壓低了宋兵重弩的殺傷力，遼軍的反曲弓就更加沒轍，這是遼和北宋迅速滅亡的主因，也是武器的性能細節決定歷史大方向的一個例子。

OVL

2020-06-02 09:12:00



看完了七公的這篇博文，其實我第一時間的反應也是想像如果穿越到了古代時候的景象，如果說郭靖在襄陽守城之時有足夠的這把弓的話，結果應該就會完全不同了吧

“

這個穿越想象，我自己並不太好意思多談，因為全狀態的二衝程滑動弩離不開複合弓的平坦拉力函數曲線，而複合弓本身對現代的材料科學和精密加工依賴很大，不像Sprave的滑動支撐是簡單木工結構，中古時代的巧匠至少在理論上有可能獨立開發出來。當然，如果忽略複合弓的現代技術成分，假想這種性能的連發弩在古代就發明，那麼對歷史走向絕對會有決定性的影響。中國3000年的可靠歷史，一直是北方游牧民族輪流入侵，並且多次建立王朝，而這些游牧民族的人口數目和經濟產能都遠低於中原的農耕族群，他們的戰力優勢基本完全來自馬匹所賦予的機動力、衝擊力和防護力（騎兵更方便披重甲）。正因為騎兵是冷兵器時代的王牌兵種，歐亞Steppe不斷向外做武力輻射，一直到早期的Musket大規模裝備，俄國人才得以對草原騎兵取得優勢，並將他們徹底征服。這個二衝程滑動弩的性能全面壓倒早期的Musket，在中原漢族王朝的手裏，基本可以對匈奴、鮮卑、柔然、突厥、契丹、女真、蒙古等族的侵略免疫。

無知者，無畏

2020-06-05 11:20:00

把它做出来？既然能够把它设计出来，就把它做出来！怎么样？

“

我對木工和金工都一竅不通，純粹是做理論的，接下來必須另有工程師來做具體設計，然後有熟練的工匠負責製造。這裏的難處，在於那兩個複合弓。目前世界上所有量產的複合弓，拉距都在30寸以下，拉力不到100磅。我博文中的構想需要兩個拉距為1.2米的複合弓，拉力分別為140磅和70磅，這都必須特別訂製。複合弓是連Sprave也不敢試圖自製的東西，大概得要直接聯絡專業工廠才可能。

無知者，無畏

2020-06-06 11:15:00

我倒是有機器 我倒是有機床，一台小型的車床加銑床，還有一台小型的可以加工精密工件的CNC數控機床。我讀中學的時候，有一個退役軍官當我們的老師，他用卡車懸掛的彈簧翹板加工過一套簡單硬弩，他當時是用牛筋做弦，他用來射鳥，經常有收穫。我也曾經動過自己做弩的念頭，甚至考慮裝上望遠鏡做觀瞄器，可是思路不成熟，一直沒有動手，加之澳大利亞對這類東西管制挺嚴，需要向警察申報，有點猶豫！不過我的設想是做一種“擊鎚弩”，原理是用弩弦推動一個重鎚，然後重鎚擊打弩箭完成動能轉換，這樣弩箭可以獲得比較高的初速度，但是設想還不完善，至少理論上還沒有證實。

“

每次撞擊，都會有很大的動能損失，還是直接對箭矢施力最簡單實用。不過我想你也知道，這樣一來，弓臂必須越輕越好，所以才會用上現代的複合（Composite，不是Compound）材料。複合弓因為用了滑輪，弓弦纏繞三次，所以弓臂的速度和加速度都減少三倍，實在是很聰明的設計。你如果有3D Printer，可以試試滑輪的形狀設計。複合弓一看就知道細節上有許多經驗法則，非幾年的功夫、多次的嘗試不能做得好。我從來沒有在網絡上遇到能做複合弓的業餘人士。

感觉一直无法理解的是为什么明朝末年已经装备相当热兵器的明朝军队会数次惨败给建州女真人。特别是萨尔浒战役中，朝鲜还派遣了一万人，其中有他们装备仿造日本火绳枪的精锐部队，明朝这边也有携带佛朗基炮，算上来支援的叶赫部女真的优秀骑兵，三倍以上于建州的军队竟然以极其不好看的交换比大败了。有说是火器质量不行，完全可以考虑用弩却又貌似装备很少。。。其中据说只有戚继光的部队和秦良玉的土家族土司兵打出了接近1：2的漂亮交换比，但是人太少加起来只有七千人左右，很快消耗殆尽。

“

兵員素質和組織紀律是真正的決定因素。明軍人數雖多，大部分不是打野戰的材料，既沒有戰技戰術，也沒有紀律忠誠。少數精英部隊的戰力高於女真，但是欠缺情報、後勤，再加上寡不敵衆、時時又有其他將領扯後腿，被殲滅是自然結果。

[返回索引页](#)