

【海軍】談超音速彈丸

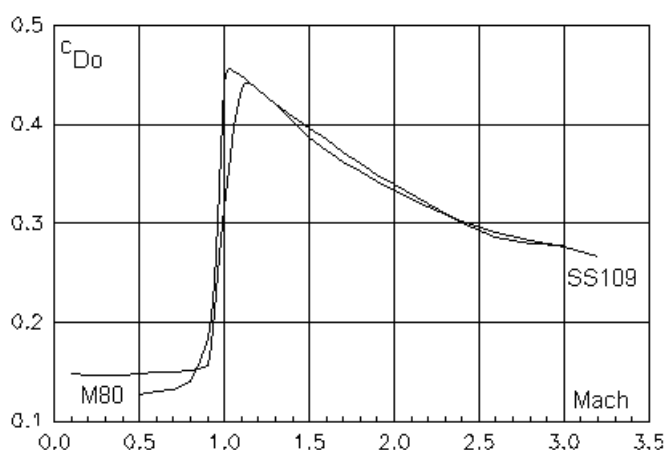
2018-02-05 10:20:00

原文網址：<http://blog.udn.com/MengyuanWang/110139713>

我在前一篇文章討論共軍的新電磁炮時，提到不論初速多高，任何彈丸的海平面平射有效射程都不可能超過40公里。結果自然有人質疑這個結論（不盲目迷信權威，是件好事，即使這個權威就是我），但是因為這種流體動力學的問題，沒有簡單的理論解，現象極度複雜，我無法在留言欄的有限空間裏好好解釋。考慮了一會兒，覺得雖然有點太專精，但是一般軍迷和媒體都可能對超音速彈丸受空氣阻力而減速的問題有興趣，卻又從沒有人把它科普過，所以我雖不是彈道學專家，還是以物理人的身份討論一番。不是理工出身的讀者，可以徑行忽略這篇文章。

一般科普文章談到空氣阻力，都說阻力 $= \rho * A * C_d * v^2 / 2$ （ v 是速度， ρ 是空氣密度， A 是物體的橫截面），那麼我們只要測量阻力係數 C_d ，就可以知道在不同速度下，阻力有多大。換句話說，在空氣中穿行的物體，形狀可以很複雜，尺寸大小也各自不同，但是這些影響空氣阻力的種種因素（除了速度、空氣密度和橫截面積之外），全部被包容到一個係數裏去了。例如汽車的 C_d ，一般轎車在0.28左右，休閑車是0.35，皮卡則接近0.4。這樣的公式，只有在 C_d 不隨速度變化的前提下才有大用；很巧的是，當速度低於音速時（但不是太接近0），這是一個很好的近似。

然而隨著速度的提高，空氣阻力隨速度的變化，就成為高度非線性的。下面的圖是把前面所提的阻力方程式推廣到較大的速度範圍後，畫出 C_d 隨速度而變的函數。可以看出有四個主要的區域：A）在Mach 0.85以下， C_d 基本是一個定值，這是前面提到的，為什麼會定義 C_d 這個阻力係數的原因（也是為什麼民航客機的巡航速度一般都在Mach 0.7-0.85之間）；B）從Mach 0.85到Mach 1.1之間， C_d 大幅提高，這是因為音爆激波開始形成，1940年代所謂的“音障”就是研究人員對這個一面牆似的阻力增加所做的描述；C）從Mach 1.1到Mach 5之間， C_d 又開始慢慢降低，這段函數其實很接近反比曲線，換句話說，在這個區間，空氣阻力其實是與速度成簡單正比的（之所以會有這樣的簡單結果，是因為彈丸的外形不複雜，激波阻力主宰了它們減速的過程），但是科學界因為約定成俗，仍然繼續使用與速度平方成正比的老公式；D）雖然圖中沒有顯示出來（因為這張圖裏的兩條曲線對應著兩種不同的步槍彈，它們的槍口初速只有Mach 3出頭），但是在Mach 5以上， C_d 又成為一個定值，一般是在低速數值的一到兩倍之間，視物體本身的形狀和大小而定（物體越粗短，這個比值越高）。



這是一個典型的彈丸阻力係數對速度的函數，縱軸是Cd，橫軸是Mach數。一般會達到超音速的東西，不是彈丸，就是火箭和飛機；火箭和彈丸的函數曲線比較相似，但是飛機因為有機翼有攻角（必須產生升力，因此又多了與升力對應的阻力），要更複雜得多，我不在此討論。

軍迷讀者應該常常看到所謂的“亞音速”（或者“次音速”，“Subsonic”）、“穿音速”（“Transonic”）、“超音速”（“Supersonic”）和“高超音速”（“Hypersonic”）等詞匯，它們的定義來源正是上面所描述的空氣阻力係數作為速度的函數曲線，有不同形狀的A、B、C和D四個區間。

好，我們對空氣阻力和速度的關係有了基本的瞭解，現在可以回頭來討論本文的主題，也就是電磁炮的彈丸在海平面空氣中的減速現象。目前實用電磁炮可能達到的初速，頂多是Mach 7，更可能是Mach 5，所以主要是在前面所提的C（超音速）區間。如前所述，在這個區間，空氣阻力其實是與速度成簡單正比的。學過大一微積分的讀者，可以試著從這個正比關係來推導彈丸減速的規律，你們應該會發現，彈丸速度會隨距離而做綫性損失；但是損失的斜度視彈丸的形狀而定，必須從實驗求得。

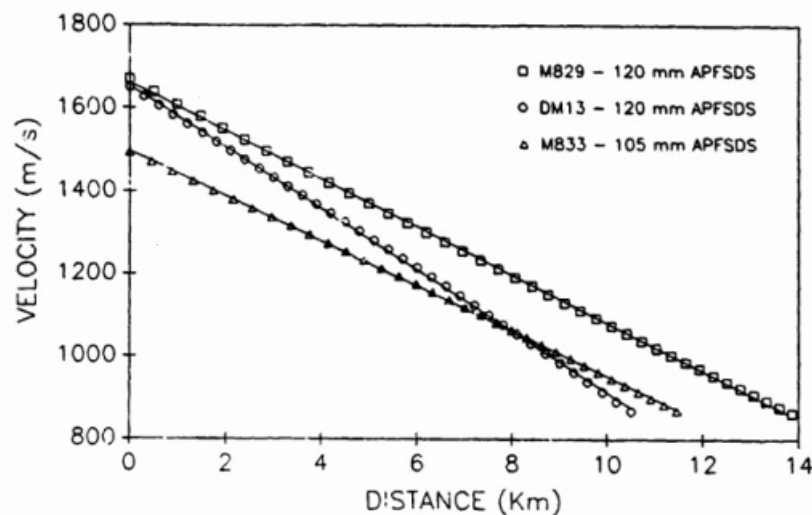


Figure 1A. Velocity vs. Range, Large Caliber Fin-Stabilized Projectiles.

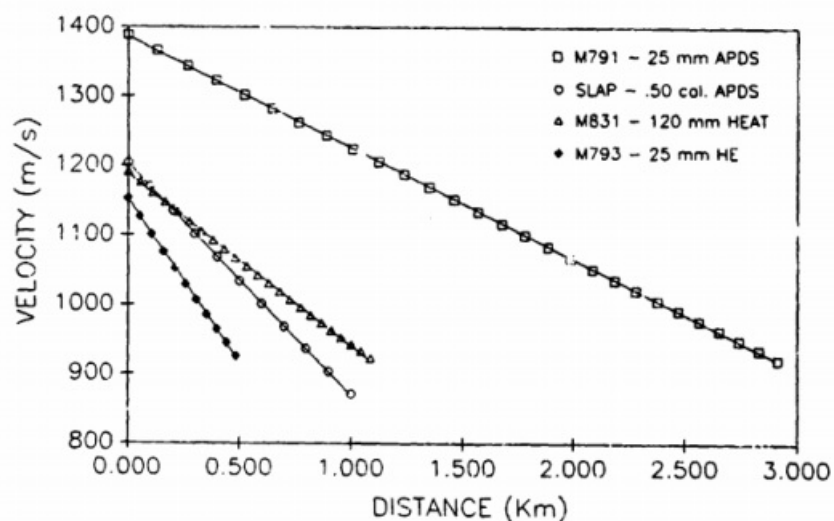


Figure 1B. Velocity vs. Range, Miscellaneous Projectiles.

這兩張圖來自1990年美國陸軍彈道實驗室（US Army Ballistic Research Laboratory）的一篇論文（參見<http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a224217.pdf>，已經解密了）。圖1A是三種APFSDS（翼穩脫殼穿甲彈，亦即阻力極小的次口徑長杆飛行物）的速度對距離函數，圖1B則對

應著幾種小口徑彈丸。它們都高度符合綫性關係，可見在超音速區間空氣阻力與速度成簡單正比是一個很好的近似。

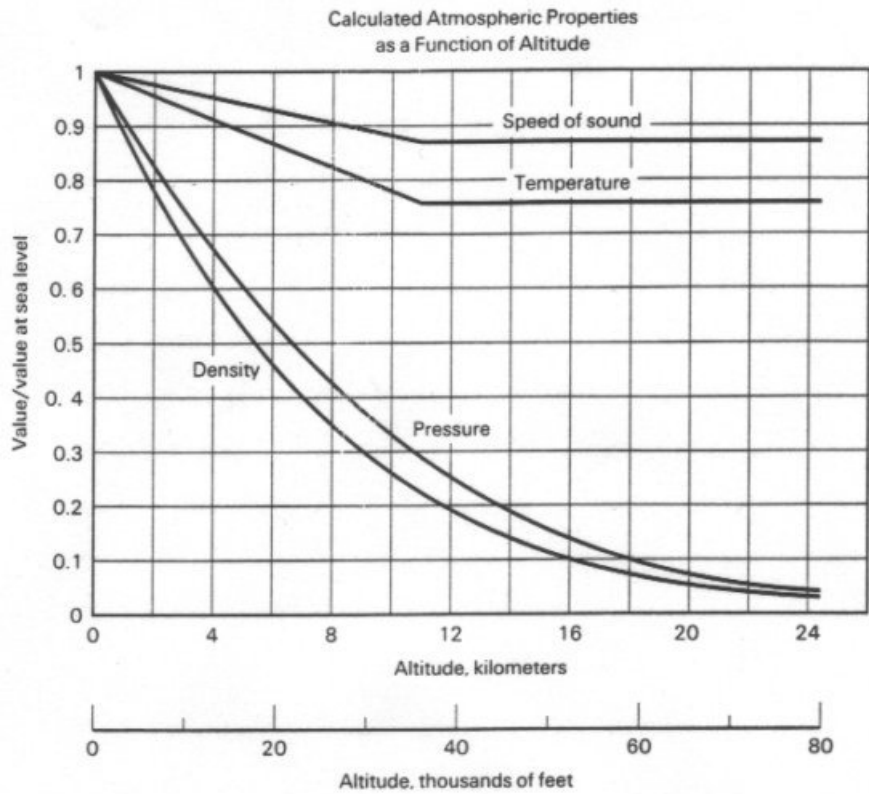
這裏我們先看看圖1A的最上方曲綫和圖1B的最下方曲綫，分別對應著極為細長的M829（即M1坦克所用的120毫米穿甲彈）和比較粗短的M793（是典型的小口徑高爆彈丸）。我的估計是前者的斜率是-0.13（單位是Mach/km，亦即每公里損失的Mach數），後者的斜率則是-1.3，剛好高了10倍。人類可以做出來的海軍艦炮彈丸，只要重量在30千克以下，不論是火炮還是電磁炮，在海平面Mach 1.1到Mach 5之間的速度損失率，基本都應該在這兩個數值之間。以下的討論將取速度衰減係數 $k = 0.13$ 來代表大型次口徑長杆動能彈，用 $k = 0.3$ 來代表典型的大口徑高爆彈。

現有的典型海軍艦炮，例如美軍的Mark 45五寸炮，發射高爆彈的初速是Mach 2.3（如果要改用APFSDS，因為彈丸較輕，初速應該更高，可能可以接近Mach 3；120毫米和125毫米的陸軍坦克炮，發射APFSDS都可以達到Mach 5），有效射程號稱是24公里，但是這其實早已是曲射了，速度也掉到音速之下。荷蘭的Goalkeeper近防炮發射次口徑脫殼彈的初速是Mach 3.3，有效射程2公里。上圖中最接近它形狀和大小的，是M791（1B裏的最上方綫），對應著大約 $k = 0.5$ ，所以我們可以估計終端速度是 $3.3 - 0.5 * 2 \approx \text{Mach } 2.3$ ，這才是平射彈應有的最低水平。陸軍的坦克炮也是同樣的道理，M829的初速是Mach 4.9， k 值是前述的0.13，在4公里的有效射程外，終端速度還有Mach 4.4，陸軍卻不吹噓更高的射程了。

如果電磁炮發射APFSDS，那麼40公里外的Mach數損失是 $0.13 * 40 = 5.2$ ，即使初速是Mach 7（請注意，Mach 5以上這個公式其實已經不適用，實際的阻力與速度平方成正比，比速度正比更高得多，所以Mach數損失應該高於5.2，更精確的估算是5.5左右，方法參見下一個段落），終端速度也只在Mach 1.8以下（實際上是Mach 1.5），還不如雄風三型飛彈，但是卻沒有任何高爆藥，所以其破壞力也就只是一個小洞（讀者請想想雄三的純動能損害還不足以擊毀一艘小漁船，何況炮彈比飛彈更小了一百倍左右）。如果這個電磁炮平射高爆彈，那麼17公里外的Mach數損失就已經超過 $0.3 * 17 = 5.1$ ，Mach 7的初速更是完全沒有意義。

同樣用大一微積分，可以簡單求得在Mach 5以上，因為阻力是與速度平方成正比，速度對距離會成指數下降，亦即 $v \propto e^{(-x/D)}$ 。考慮APFSDS做為最低阻力的例子，可以求得 $D = 5/0.13 \approx 40$ 公里（嘿嘿，你們以為40公里是我隨口亂說的嗎？）；換句話說，在Mach 5以上，每40公里，速度降低為原本的37%（這是Euler常數 e 的倒數）。所以如果在40公里外，要求終端速度為Mach 5，那麼初速必須是 $5 * e \approx \text{Mach } 14$ 。別說這是21世紀身管材料科技不可能達到的高度，就算外星人送給我們新的超級耐磨耐熱材料，能做出Mach 14的電磁炮，空氣阻力所造成的摩擦生熱也達到Mach 5的八倍，足以融化鎢芯彈丸。

【後註一】因為在留言欄談起來，我順便提一提。要算曲射的射程比較麻煩，首先必須知道大氣密度對高度的函數，請參見下圖：



這個函數曲線很類似一個指數，我取 $\rho \propto e^{(-z/H)}$ ，這裏H可以從圖上直接讀出，大約是7.7公里；換句話說，每上升7.7公里，大氣密度減低為原本的37%。然後也不須要寫程式來解那套微分方程組，Excel這種電子表格已經綽綽有餘。我放了幾個傳統火炮發射大口徑（120-130毫米）高爆彈的初速、射高和射程數據，反推到的速度衰減係數k都是0.3，這就是本文稍早選擇 $k = 0.3$ 來代表大口徑高爆彈的理論基礎。

至於美軍那門Mach 5初速（對應著炮口動能=32MJ，這是因為他們用的彈丸重22千克，剛好和120、122、125毫米口徑的高爆彈類似，所以前面我選用120-130毫米口徑的火炮彈丸來估算出 $k = 0.3$ ，是有道理的）的電磁炮，如果不用火箭助推和滑翔增程，最大的自由彈道射程是多少呢？我的計算結果是55公里，對應著58°的發射仰角；這剛好是廠商吹噓的最大射程220公里（120海里）的1/4，只比初速大約Mach 2.7的既有155火炮發射Base Bleed彈丸（底排彈雖然看來有火焰，其實不是火箭助推，所用的火藥很少；BB的用處，是吹走彈丸後方的低壓區，以避免Karman Vortex Street，也就是造成旗幟在風中飄揚的那個渦流作用；我以後會寫專文介紹）多出13公里，可見靠增加初速來提高射程，是件事倍功半的傻事（海軍實在應該先問問陸軍，明明已經有Mach 5的平射坦克炮，為什麼不把同樣的技術應用在曲射榴彈炮上）。換句話說，電磁炮連用在遠程曲射對地轟擊，都不見得是效費比最高的方案。

【後註二】留言欄裏，有讀者提起一戰時代的巴黎炮，初速接近Mach 5，彈丸重152千克，有120公里以上的射程（歷史記錄不太確定）。我的回答已經暗示了（但沒有明說，所以在這裏講清楚），22千克的彈丸初速到達Mach 5之後，要增加自由射程，額外的動能其實最好是用來增大彈丸而不是提高初速，因為前者可以減低速度衰減係數k，而後者卻會提高k（即從綫性減速變成指數衰減）。那麼電磁炮的設計者為什麼反物理定律而行呢？這其實是商業考慮：電磁炮轉化能量的效率比火炮低很多，所以總動能有嚴格的上限，但是火炮要達到Mach 5並不難，電磁炮能量小、射速低、設備昂貴龐大複雜，基本一無是處，唯一的賣點在於有可能達到Mach 7，所以賣家的忽悠只好圍繞著這個唯一的特點來做文章，那麼彈丸就只能拼命輕量化，不能超過22千克。

目前電磁炮的原型機只達到32MJ的炮口動能，在可見的未來，不會超過64MJ，我們可以拿這些數據來和歷史上的幾個著名火炮做對比：

1) 巴黎炮：彈重152千克，初速Mach 4.9，動能220MJ；

2) 大和號的18寸炮：穿甲彈重1460千克，初速Mach 2.3，動能440MJ；

3) Gustav 800毫米炮：穿甲彈重7100千克，初速Mach 2.0，動能1840MJ。

當然，後兩者不是為射程而優化的，但是它們卻用二戰時代的技術達到了電磁炮完全不能企及的動能水平，又一次地曝露了電磁炮相對於火炮技術的局限性。至於火炮針對射程優化之後，能達到什麼程度？Bull博士在被以色列暗殺之前，用1980年代的技術為伊拉克設計了兩型火炮，叫做Project Babylon，其中第一代的小號炮叫做Baby Babylon，口徑350毫米，自由彈道射程750公里，我的Excel電子表格說初速必須在Mach 9以上，假設是Mach 9，彈重700千克，那麼炮口動能是3300MJ，比電磁炮的極限高出50倍。

21 条留言

遐怪

2018-02-05 11:51:00

这是没打算给文科生看。

“

這裏的總結是，即使假設最好的情況，高速彈丸每30公里會損失4馬赫左右的速度，所以要對40公里以外的敵艦做炮擊，是純粹的癡人說夢。

南山臥蟲

2018-02-05 13:26:00

//前不久央视播出的《创新中国》第三集里有个报道可以给人以启发，假如中国能解决磁悬浮列车的列车悬浮问题，为什么不能在电磁炮上解决电磁炮弹的悬浮问题呢？巨大的列车都能悬浮起来，相对小的电磁炮弹解决起来也不是难事，军舰要比列车的空间还要大，容纳高温超导磁悬浮设备的空间更大。假如电磁炮弹悬浮在电磁炮的炮座上，发射时就不会对“炮管”造成摩擦，这个问题也就不是问题了。// <http://www.hongdezk.com/a/hantangguilai/20180204/195168.html> 以上是刀口的意見(僅指悬浮炮管方面), 供大家參考。

“

哎，這是科盲的說法。我在前一篇文章已經解釋過了，軌道炮的彈丸是綫圈環路的一部分，必須承載極高的電流。如果用不接觸的磁力來推動，就是我說的綫圈炮，效率比軌道炮低太多了，而且永磁磁鐵必須大量消耗在彈丸上。

kurutoga

2018-02-05 13:36:00

40km 一般认为已经超出了地平线 如果是平射，有效射程达到30km就已经了不起了。按照美军的说法，超过地平线设计，需要较高射角，弹头飞出大气浓厚的区域。这些都是纸上说说，具体效果不得而知。 另外一个评论的朋友，电磁轨道炮EMRG正常工作需要和导轨非常良好的接触，接触点需要通过几千安培以上的电流。磁悬浮技术只可能应用于其他类型的武器。

“

地平綫不是太大的問題，因為有預警機和數據鏈，如果沒有大氣阻力，電磁炮發射高速動能彈理論上就能打到80公里上下（還是遠不如飛機和導彈）。電磁炮和Zumwalt的155炮要用曲射分別打到360和180公里，也是大忽悠。考慮不同高度時的大氣密度，你可以用我這篇文章裏的公式，來發現根本不可能有那樣的彈道射程。美國軍工廠商宣稱的射程數據，都是利用火箭助推再加上滑翔增程，而且火箭占了全彈的一大半，彈頭基本沒有威力。如果是純粹的自由飛行彈道，射程連1/3都沒有。

//這是科盲的說法// 有勞王兄指正. 哇哈哈, 其實.....這已經是刀口通篇文章裏, 最靠譜的一個論點了, 其餘的, 唉.

“

我越是小心論證，越是確定電磁炮沒有實戰價值。看來中共海軍真的可能是故意炫耀，要刺激美國搞軍備競賽，拖垮他們的經濟。

南山臥蟲

2018-02-05 15:59:00

//看來中共海軍真的可能是故意炫耀// 若真如此，也是好事，说明战忽局的工作受重视了，要提升软/巧实力，下一步希望轮到媒體和对外研究吧。

“

當然還有另一個可能，就是他們財大氣粗了，和以前的美軍一樣，聽著好玩的東西就花錢試試。

南山臥蟲

2018-02-05 20:47:00

//传统火炮进化到现在，出现了一个瓶颈，那就是发射药燃烧速度是有极限的，这就意味着炮弹的速度也不可能提高了。如果要提高射程，那就只能采用火箭炮这种模式，否则炮弹最多也就飞行40公里。如果想要更高的发射速度，那不好意思，就要求助于本文的主角——电磁炮！// <https://mp.weixin.qq.com/s/LxZVU0Z2NKeJllzqfBhCWQ> 唉，还有更「精彩」的。这篇所謂科普，图文並茂，正合文科生的口味。最妙的是，它还无意间「呼应」了王兄以下一段幽默：（嘿，你們以為40公里是我隨口亂說的嗎？）哇哈哈哈哈哈！

“

我想再談一點有關挑起軍備競賽的事：這樣的決策顯然不是海軍自己能做主的，甚至中央軍委都不夠格，必須由政治局拍板，所以如果真有這個意圖，電磁炮就不會是個例，而是全面地投入研發各式各樣的下一代軍工技術，不管它們靠不靠譜。可惜電磁炮不但在戰術實用上不靠譜，在忽悠美國這個目的上也希望渺茫。這是因為美國人已經投入了十幾年的資源，原型機的工程化已被嘗試過了，所以我提的電磁炮毛病和缺點他們清楚得很，中方的宣傳很可能只會讓他們暗笑在心。

果粉之一

2018-02-06 05:35:00

人類歷史從來最大的問題就是沒有真知灼見關謠斷妄，多少有形無形資源會不斷被虛擲浪費，遑論信假以為真以致迷途不知返，感謝王博士厚實堅毅的學養氣節力挽狂瀾！再想請教王博士，大陸獨步全球的激波風洞技術是否有可能微型化後提供電磁砲管內減少阻力或摩擦力甚至提供部分推力的幫助呢？

“

沒有可能。那些超高音速風洞模擬的是極稀薄空氣中以Mach 9-11飛行時的氣動（亦即機翼/機身的升力）問題，是專為大氣層邊緣（50-150公里高）飛行器設計的，和電磁炮沒有一絲關係。

临高启明

2018-02-06 13:34:00

从这张图看，电磁炮的射程还是很可观的，当然中短期内不实用是真的。
http://digitalpaper.stdaily.com/...t_368149.htm?div=-1 如此强大的单舰平台，马伟明称之为“全能舰”，对其攻防性能逐一进行了设想。防空分为3个层次：200—600公里范围，使用可重复自动装填的通用电磁发射装置发射反导导弹，实现点对点防御；10—200公里，利用电磁轨道炮实现目标面拦截；10公里以内，利用激光炮作为最后一道防线，对末端导弹进行拦截。反潜和反鱼雷上，利用电磁发射装置发射反潜导弹对潜艇进行攻击，利用电磁线圈炮对来袭鱼雷进行拦截。在反舰与对陆攻击体系的构想中，“全能舰”将形成3层火力圈：600—1000公里，使用可重复自动装填的通用电磁发射装置发射远程巡航导弹和弹道导弹，完成对海和对岸目标攻击；200—600公里，利用电磁火箭弹（炮），进行对海和对岸目标攻击；200公里以内，利用电磁轨道炮完成对

海和对岸目标的攻击，一具电磁轨道炮可将对岸打击能力提高一个数量级。按照马伟明的“全能舰”计划来看，海军是打算把电磁“炮”当作未来可能的战争模式改变者之一。另外，陆军应该也是准备要上“电磁迫击炮”和第四代全电坦克的“电炮”。我个人倒是不把电磁炮当作“炮”来看待，与其说是“炮”，不如说是“质量投送器”，长远来看，还是大有可为的。

“

如果你實在看不懂一篇文章，至少試著去看懂第一段開宗明義和最後一段總結。我寫了三篇文章，洋洋灑灑，在這裏最後那一段還做了很淺白的總結，核心論點就是你給的這些圖片和宣傳，都是謊言，結果你還是來照本宣科一番。32MJ就是Mach 5初速（64MJ就是Mach 7初速）的電磁炮，他們說可以打到120海里，也就是220公里，但是我的論證發現實際上只有1/4，也就是55公里的射程，其餘的165公里，是用火箭助推和滑翔增程搞出來的，代價就是1）整個彈頭的質量和空間都被用到火箭、滑翔翼和引導頭上了，根本沒地方放高爆藥，2）因為要讓引導頭和滑翔翼能承受極大的加速g力，比同射程的導彈和火箭彈還貴好幾倍。做白日夢很容易，但是憑空胡扯些數據被打臉之後，至少要有尊重邏輯的態度。600-1000公里的射程的導彈，需要用電磁彈射來增加不到10公里（我的論證發現Mach 5初速只增加13公里的實際射程，大型導彈不可能以電磁彈射加速到Mach 5）的射程嗎？如果價錢是0，或許可以的，但是絕對沒有實戰上的大影響（實際上發射射速比起垂直發射大為減低，不適合用在必須對抗飽和攻擊的對空導彈）。射程是300公里的火箭彈，有必要換成貴100倍而且彈頭載荷小10倍，“射程”只有220公里的電磁炮嗎？絕對沒有。謊言重複1000000遍，還是謊言，只不過成了1000000個蠢蛋相信的謊言。

追雲燕

2018-02-06 21:12:00

這個“临高启明”是不是敵人(美國, 日本, 台獨)安插在我們中間的啊？我認為這個可能不能排除, 但也不是說一定有這個可能, 總之令人懷疑. 網路上一直有人攻擊中共用五毛控制輿論, 我可以肯定的說, 長久以來美日台獨就已經用類似雇用五毛的手法控制引導或將某些別有居心的看法加入輿論. 就算這個“临高启明”不是敵人, 還是有很多人, 可一概稱之為敵人, 不希望我們知道真相, 包括電磁炮的真相.

“

我前提過Hanlon's Razor，這裏提醒你一下：“Never attribute to malice that which is adequately explained by stupidity.” 也就是“能用愚蠢來好好解釋的，就不須要搞陰謀論”。不過我一直懷疑電磁炮原本就是美國人的忽悠。

潇潇

2018-02-06 21:42:00

这几天美国跟中国不停打嘴炮，美帝一会要更新核武库，降低核武使用门槛；一会蒂勒森又认证中国变成帝国主义列强了（中国网民听到这个消息，热内盈眶）~~好热闹~~ 与此同时，昨天中国又在境内进行中段反导试验，这对美帝核武政策调整具体的回应点在哪呢？距离上一篇讲反导试验的文章过去快4年了，不知道这几年间老共技术精进几何？

“

中共的這個中段反導，大約相當於美軍未來的THAAD-ER，強於THAAD，弱於GMD。不過因為GMD還不可靠，共軍其實和美軍在同一層次，即使有落後，也不嚴重。

Hhh

2018-02-07 04:47:00

唉，這個，王先生，你這個還沒考慮彈丸外型，跟高彈道狀況，要飛的遠，就把彈丸打到平流層之上，等彈丸落下時的終端速度也很可觀了！

“

都考慮了。

一觉睡到解放前

2018-02-07 07:20:00

一直追閱格主的更新，也對格主的認真嚴謹的風格極為欣賞。這次一定要出來讚佩一下，因為王學長在這裏表現出來的跨學科知識的淵博！我是流體力學專業的，是力學大師錢學森倡導，郭永懷等58年創建的。激波，卡門渦街等力學知識一出校門就早已還給老師們了（一畢業就轉行電信

了)。學長本是物理出身，居然仍能把流體的專業知識信手拈來，實在佩服！學長說要介紹卡門渦街，很期待。

“

我一直覺得物理教育的最大意義，在於學習如何處理實驗資料，然後以最高的效率去蕪存菁，整理出一個簡單可用的近似理論。現代高能物理那些人反其道而行，面對很簡單的資料（標準模型），整出無限複雜的超弦，純粹就是為製造論文而製造論文，居然還一造就是幾十萬篇；這是我對他們反感的來源之一。至於流體力學，我只是個好奇的業餘人士，你也知道它實際上有多麼複雜和困難。正是因為如此，我從來沒有找到簡單易讀的科普。這次我能寫出一篇精確的半專業討論，對一個重要話題提出解答，而且還是一般理工科的讀者都應該能看出頭緒的文章，是個我很自豪的創舉。

軌道炮射程與巴黎炮計算 王孟源博士您寫這一份科普文章，內容對想知道火炮 2018-02-07 08:25:00
外彈道特性的理工人而言，有相當的幫助，只不過臨高启明先生對超高初速火炮曲射射程的相關計算，也是有所本的，證據在哪呢？因為對於炮口初速達到接近馬赫5 (1701 m/s)的火炮系統，人類在100年前已經造了出來，也就是1918年三月21日投入實戰的巴黎炮。其初速根據戰後考據資料為馬赫4.82 (1640 m/s)，實戰中達到的最大射程約為120 km，而且炮彈並非長桿低阻力型式而為高爆彈體，其相關計算可見 http://www.vcsp.info/Chapter_8/Application_to_Long-Range_Artillery_-_Shelling_Paris_in_WW1/Shell_Trajectory_in_Atmosphere_on_a_Rotating_Earth.aspx 不過此一計算似乎把炮彈的阻力係數設到只有0.18，可能跟王博士您的設定 $k=0.3$ 低了不少，基於對於事實和邏輯的追求，在這裡想找一下還有哪一個環節的計算可以讓最後的結果有所差異。

“

沒有錯啊，那篇文章說初速Mach 5，射高42公里，最大射程130公里。我的Excel電子表格如果用 $k = 0.17$ ，初速Mach 5，得到射高43公里，最大射程127公里。這個電子表格是我花了幾分鐘隨便搞出來的，只保證誤差在10%以下，像是地球自轉、表面曲率、重力變化、大氣溫度和音速改變這些高次項全部忽略，所以我自己覺得實際誤差大概在5%左右。這裏的真正重點是為什麼巴黎炮的速度衰減係數只有0.17。巴黎炮原本口徑是211毫米，彈丸質量是106千克。後來口徑擴增到238毫米，對應的彈丸質量沒有資料，但是我們可以很簡單地按比例放大，求得估計值為152千克。這樣的彈丸比我討論的120+毫米高爆彈大7倍。速度衰減係數隨尺寸增加而減低，所以從0.3降到0.17很正常。我在前一篇文章也暗示過，要用Mach 5把彈丸送出100+公里，做到8寸就行了。若是能做到16寸，那麼說不定 k 會降到0.13（這必須靠實驗才能確定），我的Excel說射程會是160公里。但是電磁炮能隨意增加彈丸質量嗎？22千克Mach 5的彈丸，動能是32MJ；152千克Mach 5的彈丸，動能卻是220MJ。美國人連做夢都只敢做到64MJ。而且152千克的巴黎炮彈，裝藥只有6千克，和41千克的155炮彈一樣，你覺得這划算嗎？

Hhh

2018-02-07 09:06:00

王博，阻力跟空氣密度有關，所以單純指考慮低空的狀況，對於我們航太相關系所畢業的人，會覺的很怪，火箭增程砲彈，也是很成熟的東西，對於傳統砲彈，至少增加30-40%的射程！

“

我算曲射的時候，空氣密度的變化自然是Leading Term（首項？）。火箭增程30-40%，的確是很普通的技術了，但是美國電磁炮的廠商要增程300%，這其中的貓膩很是可觀。

漁翁

2018-02-07 10:01:00

@滿滿 我想中共的中端攔截試驗應該是做給北韓看的；因為我很同意沈志華這篇訪談裡所提到北韓對中共的態度。 <http://talk.dwnnews.com/news/2018-02-05/60039252.html> 為了不離題，雖然是文科生，但我對電磁炮的感覺是；科研人員時常會劍走偏鋒鑽牛角尖；也就是習慣性的為了研究而研究，其實所探究的並沒有實用價值，只能留在紙面上。前面有網友提到把彈丸投射到平流層，那我就在想；為了達到摧毀的目的，那這個彈丸應該有制導還有大小(爆炸威力)還有整個系統超強電力供應等等的問題。這麼搞下去，相較於一般的導彈恐怕是划不來的。所以我認為這是馬曉明在電磁彈射的突破後，中共花開多枝，以忽悠對忽悠。(ycdesertfox@gmail.com)

“

平流層並沒有什麼魔術，它的特別處只在於天氣現象（如暴風雨）不能鬧到那個高度。對

我們的話題（自由彈道）來說，它也就是空氣密度很低罷了，這個效應已經被我的Excel電子表格完全量化包含了。

noman

2018-02-08 03:29:00

电磁炮是不是可以配合无人机用，发射无人机到轨道，然后随时准备投弹(xpure@foxmail.com)

“

無人機不需要Mach 5的初速，也不能承受高g力，所以不該用軌道炮發射，而是電磁彈射器。軌道炮和電磁彈射器，在電力供應系統上有共通，但是實際發射機制是不一樣的。

愚公

2018-02-08 13:37:00

感谢王先生的耐心解释，虽然我有几个公式没看懂，但是大概能理解先生说的“无论初速度多高、弹丸形状如何改变，最远射程不会超过40公里”了。电磁发射技术可能更多的用来辅助发射，比如电磁弹射。但是最近露面的电磁炮样机的最后结局是怎样，估计还要过几年才有结论吧。

“

軌道炮的好處只有初速高，偏偏助推發射就是不需要那樣的高速，所以用的必然是綫圈，那是不一樣的技術，共通的只有電力供應和管理系統。參見我對前一條留言的答復。

xpure

2018-02-09 21:36:00

会不会是用来发射火箭的？中国首创电磁火箭技术，弹射到空中点火，技术领先猎鹰9_搜狐军事_搜狐网: <http://t.cn/RRwEiar> (xpure@foxmail.com)

“

又一個科盲在做夢。大型火箭是很脆弱的東西，要加固到能用電磁彈射，增加的死重得不償失。

果粉之一

2018-02-10 23:52:00

請教王博士，40公里內平射小破壞力電磁砲是否正好可以用在海警船威嚇用呢？如果南海諸島12海哩外圍近海或是釣魚台海域以電磁砲高初速平射性能也許適合以電腦精準計算彈著點造成敵方最小人員傷亡避免擴大糾紛又可形成嚇阻作用。根據您的分析說不定正好有電磁砲特性可以發揮的用途，再請教您的看法？感謝您的耐心回答！

“

海警船沒有足夠的電力供應和船艙空間。電磁砲很可能還是會被用在055A或055B上，但是背後的考量很複雜，我正在寫另一篇文章。

tobin

2018-02-22 07:45:00

有个关于炮弹的问题请教您，看过一篇科普文，说高尔夫球并不是光滑的，而是四周坑坑洼洼。这种设计考虑了空气动力学，可以使球的飞行距离比光滑的球长一倍。我的问题是，炮弹是不是也可以考虑这种坑坑洼洼的设计？使飞行距离变长？谢谢您

“

高爾夫球的速度，在亞音速的低端，主導的空阻效應完全不同。

lastman

2018-03-12 09:05:00

to: tobin，因为高尔夫球的坑洼表面破坏其飞行时表面的边界层，它的飞行速度正好在一个平流到湍流的转换区间，所以能减小阻力系数Cd，高速情况反而会增大阻力 博主我想做个ODE的RK4数值积分看看到底能飞多远，假设M5, M32J,22kg, 考虑密度高度变化 Cd按你图里SS109取，炮

弹面积怎么取?125mm直径？

“

用專業的數值計算軟件會比我的Excel Spreadsheet精確些，但是因為忽略了其他的高次效應，我覺得誤差還是會在2%左右。 122毫米的高爆彈重量剛好很接近22千克。

[返回索引页](#)