

慣性與動量概念的發展簡史

高英倫*

(Dated: December 29, 2017)

在教物理的經驗中，經常遇到對於「慣性」或「動量」概念感到莫名其妙的同學。不想沒事，仔細一想，發現我也漸漸對這些概念感到莫名其妙了。所以，為什麼有慣性？甚至，我們不清楚該如何進一步說明心中的「到底什麼是慣性？」疑惑。當然，動量也是如此，怎麼會有人想到這種概念？這篇文章，就是為了解答這些疑惑而存在的。當然，這背後還有非常多的學問，所以我也無法真的回應到所有可能的問題，但我想這篇文章應該能給大家一些啟發與指引。

I. 力與物質概念的誕生

在蘇格拉底時期，人們的自然觀與當代最大不同之處就在於它們尚未抱持「心物二元論」的觀點。這也是為何我們都說科學起源於宗教，而宗教又起源於神話的原因。這些都是人們逐漸將物體與心靈切割開來的信念建立過程。在人們意識到生命特有的思考、感知、意志力的特有功能以前，人們也是至少將物體視為一種有靈魂的存在物。如果要說沒有靈魂，那好歹也有所謂的「目的」。等到人們成功區分出物體與非物體以後，我們才有以下的因果關係。

「生命」為何運動？因為其意志。

「物體」為何運動？因為其外力。

其實這也是為什麼愛因斯坦的同事，Max Jammer 於《Concepts of force》提到，

「force」一詞最初的意義並不是現代的「影響物體運動的原因」，而只是神或上帝的道德力、自然力。

「上帝、神」為何如此這般地...？因為其意志。

「所有東西（包含人與現代意義下的“物體”）」為何如此這般地運動、變化？因為上帝與神的道德力與自然力。

II. 萬物皆靈的自然觀（泛靈論：ANIMISM）

對柏拉圖而言，物體的運動就如同蘇格拉底的死，都是其意志的展現。我們會如何解釋蘇格拉底的死呢？我們會說是因為他的手、頭髮長度或身體大小、形狀嗎？不會的，我們會說，這是因為蘇格拉底的「意志」而使得他做出相當於「自殺」的行為。所以，物體的運動也應是來自於靈魂。

III. 亞里斯多德物理學

柏拉圖的弟子亞里斯多德認為，所有運動都需要原因。動植物的運動是來自其靈魂，也就是說，這是所謂

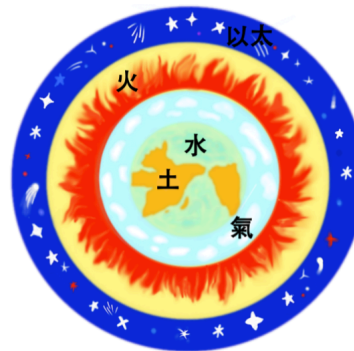


FIG. 1. 亞里斯多德物理學的形上學

的「自我運動」（self-movement），但非生物的運動必然與生物不同，所以他提出了「自然位置」（proper place）來解釋物體的運動。首先，根據相當繁雜的形上學論證，亞里斯多德認為萬物都由四種元素—土、水、火、氣—組成（天體由以太組成），每一種元素都具有其自然位置，如圖一所示。

由於蘋果的土元素較多，所以會往土的自然位置（地心）靠近。由於火的自然位置在天空中，所以火會往上運動。以此類推。因此，這種回到自然位置的運動（蘋果自然下落、火自然往上飄等）都被稱為「自然運動」（natural motion）。然而，當你將蘋果往上拿時，這顯然是「強迫」蘋果作不自然的運動，所以這種運動不僅被稱為「強迫運動」（violent motion），也因此而說「只有物體作強迫運動時，物體才需要受到外力」。

IV. 亞里斯多德物理學遇到的困難

試著想想，如果你將棒球丟了出去。那麼在你手仍握著棒球時，棒球沒有下落即可用「強迫運動」來作解釋。但離開手掌之後呢？為什麼棒球還能作曲線運動，而不是開始作「自然運動」，直接朝向地心作直線運動？由於亞里斯多德認為自然厭惡真空，或者說大自然本身不存在著真空，因此空間本身就是物質，空間是「實在的」（Space is a plenum）：空間就像是個「塞滿大球與小球的箱子」。

如果這箱子裡面的球能夠運動，那麼前提就是球必須作「循環運動」（circular motion），也就是說，有顆球前進時，它會擠壓到前面的球，而這個球又進而擠壓「周遭」的球，最後使得這顆球後方的球也往前方運

* 現為全職物理家，即將就讀台灣大學電子工程學研究所。已有台灣大學物理學系、化學工程學系雙學士學位。個人網站：www.ethanideas.url.tw

動，填補最初運動的球所佔據的空間。

因此，當棒球開始在空中運動時，亞里斯多德認為既然棒球已脫離手，並且受迫運動又必有一原因，而且它又認為原因與結果必須在空間中毫無距離，所以他說棒球前方的空氣被擠壓，因而循環推擠使得球後方的空氣往前補滿剛空出來的空間（真空），進而推動棒球繼續向前運動。

V. 慣性的誕生與亞里斯多德物理學的末日

西元5世紀的斐洛波諾斯（John Philoponus）替亞里斯多德的辯護是，他認為手在丟擲棒球時，手也同時將一種「無形體的衝勁（incorporeal motive）」傳遞給棒球。然而，棒球在運動的過程中，這個衝勁就自發地消散掉了。在史丹福的哲學百科上（Stanford Encyclopedia of Philosophy），這位斐洛波諾斯被稱為是擊敗亞里斯多德物理學的先驅。其實他的衝勁就是我們所謂的動量（但不完全是，因為當代的動量不會自發消散）。而物體承載或擁有此衝勁的能力，就是物體的「慣性」[1]。也就是說，亞里斯多德物理學裡頭是不存在著慣性的。什麼是慣性？在這裡我們可以稍微作個小結論：

慣性就是物體承載「無形之衝勁」的能力。

西元11世紀時，波斯博物學家伊本西納（Ibn Sina）將斐洛波諾斯的理論發展得更加完善。他認為這個「無形的衝勁」應該不是自發地消散，而是分散到周圍的空氣裡。如果各位有注意到的話，那麼會發現這根本就是當代「動量守恆定律」的由來，不過此時仍無法寫出動量的具體形式，同時，「力量」與「能量」也仍是混淆不清的詞（法拉第也分不清楚）。

不過，亞里斯多德過了一千年後就被人徹底打臉了。14世紀的布理丹（Jean Buridan）提出個簡單的反例。如果物體真的是在做受迫運動，那麼為什麼陀螺可以一直轉動呢？陀螺不像是棒球，會在空間中佔據著不同的空間，使得氣體能夠如亞里斯多德所說地作循環運動然後推動棒球作曲線運動，陀螺一直都在原地打轉。根據亞里斯多德的理論，陀螺離開繩子後應該會開始作自然運動，亦即往下傾倒，所以亞里斯多德物理學就此被徹底擊垮。物體運動的原因究竟是什麼？關於物體運動背後的理論就此開始重新建立。

不僅如此，布理丹更進一步提出，上述的衝勁是「物質的量」與「速度」的乘積。所以，我們就此可開始用「衝勁的累積」來理解物體的加速現象。

VI. 伽利略的圓周慣性

課本都會提到伽利略對慣性的貢獻，但卻沒特別提及其實他所謂的慣性跟我們學到的慣性是不同的。根據他的斜面實驗，在理想光滑軌道上，從高處滑下的物體必會滑到同高處的位置。因此，將物體滑下的斜面固定，但持續將讓物體上滑的斜面傾斜角調整得越來越小，直到水平。由於物體已經找不到斜面它回到相同高度，所

以物體將持續運動下去。伽利略在1612年的一封論太陽黑子的信提到他的慣性定律：

在一個與地球同心的球面上的物體，在我們移除所有可能的運動阻礙之後，將會無視它的靜止與運動狀態，持續地沿著任何切面前進。並且，它會維持在原先它被放置、設定的狀態裡；就是說，如果物體原本處在靜止狀態，那麼它會一直維持靜止；如果是被設定在向西前進的運動狀態，那麼它會持續維持如此這般的運動。

但由於地球是圓形的，所以伽利略所說的一直「向西前進」本質上就是圓周慣性（circular inertia）[2]。

VII. 笛卡兒的慣性定律：動量守恆定律的終極版本

由於笛卡兒認為「靜止」與「運動」，如同「冷與熱」、「暗與亮」、「多與少」，都是互相對立的性質、狀態，所以它們之間不應該自發地互相轉化。因此，靜止者應就其自身而言是恆靜止的，運動者也是就其自身而言地恆運動，而且是同方向的運動。所以，他反對伽利略的恆改變運動方向的圓周慣性[3]。

1. 笛卡兒第一定律：任何物體都會以它自己的能力，一直維持在同樣的狀態；並且，當它被推動之後，它就會持續地運動。
2. 笛卡兒第二定律：所有運動，就其本身而言，都是沿著直線運動。（換句話說，一旦改變運動方向，那就是不同的運動。）
3. 笛卡兒第三定律：當一物與較大運動的物體接觸時，它的運動並不因此而損失；但是，若它與較弱運動的物體接觸，那麼它會將本身的運動傳遞給較弱的物體。

雖然笛卡兒提出的前兩大定律與牛頓慣性定律極為類似，但本質上仍不同，因為牛頓並不將靜止與運動視為對立的狀態。此外，第一、二定律處理的是物體自身的定律，但第三定律就是處理平常物體間의 交互作用的定律——碰撞。另外，笛卡兒也提到，

不過，此時我們必須謹慎地注意到每個物體對其他物體所施的力量，這力量是用來抵抗其他運動所存在的運動。也就是說，每個物體都會盡它所能地維持在前述第一、二定律提及的運動狀態。我們不僅需要物體的大小與面積來測量物體的運動，也需要它本身的運動速率、以及各種與他物接觸的方式。

由於笛卡兒的運動定律，他認為在碰撞過程中所維持不變的量必須由相當複雜的「物體大小」（考慮體積與接觸面積）與物體的「運動速率」所組成。這個「量」被笛卡兒稱為「運動」或者「運動量」（Quantity of Motion）。在歷史上，這是非常重要的「守恆量」的里程碑。例如，一個大小為 3、速率為 5 的物體，與大小為 2、速率為 4 的物體相碰撞，那麼總共的運動量（Quantity of Motion）就是 $3 \times 5 + 2 \times 4 = 23$ 。

VIII. 笛卡兒之運動量守恆定律的應用——上帝的開球

笛卡兒這麼說道：

顯然，當上帝創造這世界時，他不僅僅是用各種方式使世界的各個成分都動了起來，而且也「造成」各個世界的成分都互推彼此，將它們本身的「運動量」傳遞至其他物體。所以這個世界是以上帝創造時所連帶創造的定律與作用方式運作下去。上帝使得運動

量守恆；運動量並不總是在物體的某部分守恆，有時會以它與其他物體碰撞的方式將運動量傳遞出去。

最後，牛頓很可能就是拿笛卡兒的動量來談牛頓第二定律的。牛頓在《自然哲學與數學原理》裡面只用短短兩三行的篇幅就定義完動量（Quantity of Motion），然後就交待「物體的受力正比於其動量的變化」（不是經尤拉升級過後的 $F = ma$ ）。

[1] Aydin Sayili (1987), “Ibn Sīnā and Buridan on the Motion of the Projectile“, *Annals of the New York Academy of Sciences* 500 (1): 477–482

[2] Drake, S. (1970). *Galileo studies*.

[3] Garber, D. (1992). *Descartes' metaphysical physics*. University of Chicago Press.