



趙丰曾任美國航太總署哥達德太空飛行中心的太空測地實驗室主任、中央大學地球科學院院長，現任中央研究院地球科學研究所所長；研究專長為地球與行星動力學、重力學、地球物理與地震學等。

太空垃圾知多少

垃圾漫天飛？那是個什麼樣的恐怖場景！沒錯，我們地球的外邊就是個垃圾漫天飛舞的垃圾場。

太空垃圾當然不是普通的生活垃圾，它們都是曾經風光一時的太空高科技遺留下來的拋棄物。它們也不是漫天亂飛，而是「乖乖」地沿各自的軌道在天上運行。麻煩的是：它們數量千千萬萬，並且越來越多；它們飛速極快，碰著就遭殃；它們不聽使喚，你拿它們沒轍。

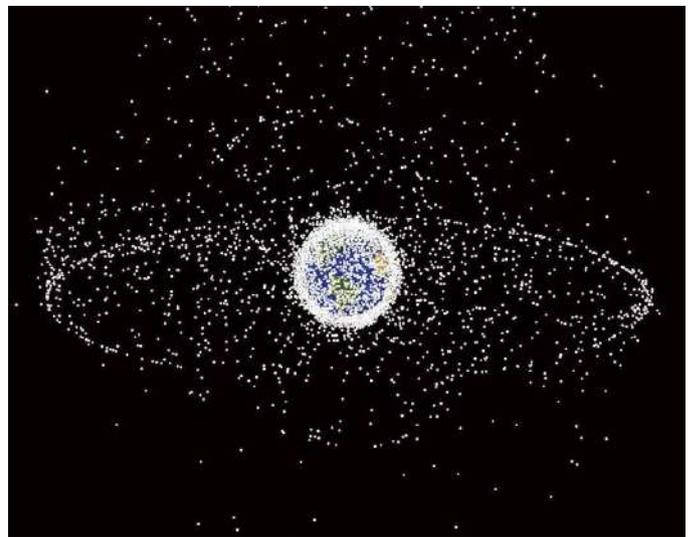
哪來的？既然是垃圾，一概是人為造成的。來源林林總總，有壽終的人造衛星、有把衛星送入軌道時剩下的末節火箭，後者還往往自行爆裂成碎塊，還有太空軍事試驗產生的爆裂物、各種包裝或屏罩材料，甚至還有太空人執行任務時不慎掉了的工具、照相機。

人造衛星「壽終」是啥意思？運行在軌道上的人造衛星，死活之差幾稀焉——只在於它理不理你而已。它不理你的原因可多了：電池、陀螺儀、電腦、天線、通訊連接、太陽能板、主儀器等，在太空那嚴酷的環境裡（見右頁〈地科教室〉），壞掉、失靈只是遲早的問題——遲則十年、八年，早則三年、五年。人造衛星死後哪裡去了？哪也不去，它仍在原來的軌道上繼續繞地球飛行，可是已列名為垃圾了。

打從美國第一個入軌的人造衛星探險者一號變身為榜上有名的太空垃圾一號，半個多世紀以來，相對於眼前約1000顆「活著」的人造衛星，人造的太空垃圾有多少？超過10公分的垃圾算大塊頭級，多年來美國空軍的北美空防司令部（NORAD）用光學或雷達方法偵測並追蹤這些遨遊太空的物體（還包括可能闖入地球附近的小遊星及彗星）；被他們收錄進黑名單的大塊頭，目前據說多達兩萬個。小於1公分的則屬小塊，碎屑、殘漆片等，多不勝數又無從確知，大概幾千萬粒吧；不大不小的也應有幾百萬件。太空垃圾的總重量倒是不難由記錄來估計：所有壽終的人造衛星及末節火箭等進入軌道的物件重量加總，扣除已掉回地球的總量，估計目前有5000多公噸，約相當於台北市民三天的垃圾量。

它們都在哪？相較於地球半徑的6371公里，人造衛星軌道按照離地面的高度可分為三群。絕大多數是低軌道（LEO）衛星，高度通常不超過1000公里，繞地週期約一小時半；但為了脫離大氣層，高度也不能低於三、四百公里。另一群運行在赤道上空、軌道半徑4萬2164公里的地球同步軌道（GEO）衛星，24小時繞地球一週，在通訊、氣象監測等實際用途上非常有用。高度介於兩者之間的中軌道（MEO）衛星比較少，全球定位系統的衛星陣列（30顆）是最有名的例子。那麼，太空垃圾當然也就遵循著這樣的分佈（見下圖）。

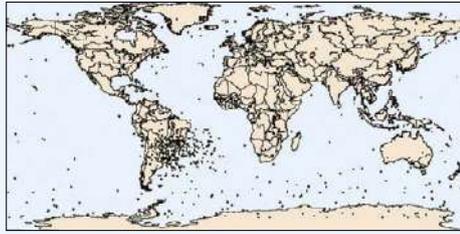
低軌道衛星需要每秒約八公里的高速飛行（音速的20多倍！），其離心力才夠大到克服地球重力，維持在軌道運行不墜。在這樣的速度下，衛星體多少仍受到身邊極稀薄的高層大氣的些微摩擦阻力，而越繞越低，所以每十天半個月，地面控制台總要指示它耗費一些備用的噴氣，以



太空垃圾數量之多，大抵呈三群分佈（如同人造衛星）：地球周邊像蜂群一樣的近地低軌道區、赤道上空像一大串項鍊的地球同步軌道，以及高度介於之間的中軌道區。圖中白點代表已知的、大塊的垃圾物個別的軌道「遠地」點。

地 科 教 室

除了人為的太空垃圾，在太空裡當然也少不了天然物的轟擊——都是些小傢伙，例如所謂的微隕石，除了來路不明、散兵游勇式的太陽系內星際塵埃、小粒隕石外，最常遇的是彗星在軌道上一路留下的彗尾物質。有些彗星軌道碰巧和地球繞日軌道相交，那麼每年某固定日子，地球進入其範圍時，我們就看到流星雨啦。對衛星而言，這是躲不掉的威脅。



每當人造衛星飛越地磁場較弱的地區上空時，攜帶電粒子的轟擊較劇；上圖的黑點為某衛星儀器一生中「重新開機」以恢復運作的地點記錄，南美洲大西洋磁弱區是「重災區」。

自然現象的太陽風、宇宙射線這些高速帶電粒子，對人造衛星還造成另類的威脅。雖然地球的磁場對之有相當好的屏蔽作用，衛星的精密儀器也備有嚴密的防護，但都非百分之百，所以衛星及其儀器仍時時刻刻受到或多或少的帶電粒子轟擊，尤其當衛星飛越地球某些地磁場「防護層」較弱地區的上空時，電子儀器遭轟擊的可能性大增，往往需要「重新開機」來恢復（見上圖）。太陽11年週期中活動較強的年份、軌道較高的衛星尤然。

同時，太陽活動較強的年份裡，地球稀薄的高層大氣會整個稍微膨脹，加劇了其對低軌道衛星的空氣阻力，相對於太陽安靜期可以大上好幾倍，這對衛星軌道的維持很不利。

恢復軌道高度。這情況在太陽活動較強的年份尤其重要（見上方〈地科教室〉）。至於壽終的低軌道衛星或太空垃圾，都只好聽任它越繞越低，最終墜落入大氣層，這是所有低軌道物件都逃不掉的最終宿命。它們墜落時「迴光返照」，一路劇烈摩擦至灼熱狀態，小塊的在路途中成為「人造流星」而燒毀，灰燼隨風飄散；較大塊的往往先在空中碎裂，來不及燒毀的部份最後直接撞擊地球表面，成為「人造隕石」。

太空垃圾成為人造流星、人造隕石的事例，其實三天兩頭並不少見。後者撞擊的確實地點不到最後階段是難以預測的，只要是在南北緯度低於該物軌道傾角的任何地區，都有可能中獎——當然多數是掉進海裡（畢竟地球表面七成以上是海洋），而傷人舍的機率和天然隕石砸到人舍的機率是一樣低的，免驚啦。前一陣子UARS號遙測衛星殘體，是特別大的一件，重達半公噸多，墜落於太平洋中心地區。事前被媒體炒得人心惶惶，讓民眾順帶小上了一課，增長了見識。

中軌道衛星數量較少，場域則大為寬廣，然而這裡的垃圾是十足的萬年垃圾，因為沒有空氣摩擦，它們不會像低

軌道衛星那樣被地球回收。同步軌道則又是另一番景象：幾百顆衛星像一串項鍊珠一樣挨次在同一個軌道上行進，雖然不至於摩肩擦踵，但如能讓它在生命尾聲利用最後一口噴氣將自身提高到軌外「無人區墳場」，亦不失為善終。

那麼多漫天遨遊、不受節制的高速太空物件，彼此互撞也在所難免，相對互撞速度在每秒10公里的量級上（相當於砲彈的爆炸），這對活著的衛星而言不啻是嚴峻的生存威脅。為了應付眾多的小粒垃圾，衛星上一般裝設有儀器幕罩來保護關鍵的儀器，但對大塊垃圾就沒招了。於是多年來就曾發生過多起疑似、或證實互撞的不幸案例，活衛星被不明物體或已知垃圾撞壞、撞碎。最近有名有姓的一例，是2009年一顆已死的俄羅斯Kosmos通訊衛星，撞壞了美國一顆使用中的鈹陣列通訊衛星，自己則碎成一大堆垃圾，光是大塊的就超過2000塊。載人飛行的大傢伙國際太空站為了閃避該互撞事件產生的大塊垃圾物，近來有好幾次必須稍事噴氣，調整行徑。此外太空梭也曾經有過數次類似的避撞記錄；事實上，每艘太空梭歷經多次太空之旅，細察之下，混身表膚傷痕累累，細微的百孔千瘡都是小粒垃圾的傑作，這是不為人知的小內幕。

太空垃圾的數量還在持續增加中，一旦數量多到可引發撞擊的連鎖反應（如同核子爆炸反應），就一發不可收拾了，這是令人擔心的「凱斯勒效應」（Kessler effect）。國際上雖有要求各國自律的呼聲，但效果不彰。例如中國於2007年試驗太空飛彈，以自屬一顆已死的氣象衛星為標靶，炸出不計其數的垃圾，大塊的就多達3000多塊。清除垃圾的想法不乏在技術面說得頭頭是道者，但牽涉到國際政治、軍事、經費、責任種種問題，也多滯礙難行。

太空就在那兒。從人類的主觀而言，太空是屬於全人類的。當人們逐漸重視生活周遭的垃圾問題時，太空環境裡的垃圾問題則是日趨惡化。人類有足夠的遠見和智慧來面對、處理嗎？

太空就在那兒。從人類的主觀而言，太空是屬於全人類的。當人們逐漸重視生活周遭的垃圾問題時，太空環境裡的垃圾問題則是日趨惡化。人類有足夠的遠見和智慧來面對、處理嗎？

SA