

——蔡榮暉——

淺談未來單兵負重輔助裝置發展前景

提要

- 一、當前世界上許多國家，為了應對不斷變化的軍事變革，都在大力強化並提升自己的單兵作戰能力；而欲達此目的，則需仰賴配備各式先進的武器系統或攜行更多的戰鬥輜重，也使得單兵的作戰負重大大地增加，無形中亦加大了作戰難度並形成了作戰弱點。
- 二、未來單兵負重輔助裝置系統的開發及應用將扭轉這種局面，它不但可以增強單兵的負重能力，而且是一個非常不錯的武器搭載平臺，如果未來能將飛行能力也整合到負重輔助裝置系統中，這將大大提高單兵的機動能力。因此，單兵透過穿戴負重輔助裝置系統完成了體能上的超越，進而達到提升單兵作戰或後勤輜重補給能力之目標。
- 三、單兵負重輔助裝置系統就現階段而言，屬於一項尖端的科技，俟其技術開發成熟後勢必能在未來戰場上發揮很大的作用，且其發展與應用前景也是非常具有潛力的。

關鍵詞：軍事變革、單兵負重輔助裝置系統、機動能力、負重能力

圖片來源：Lockheed Martin



壹、前言

以美軍為代表的西方國家軍事理念核心是：戰場上應充份運用高科技武器裝備，以減少作戰人員的傷亡，從而贏得國內輿論對戰爭的理解和支持。近年來這一理念呈現出新的發展趨勢，即武器裝備逐步朝向無人化發展。¹ 在這樣的軍事概念下，如何有效地減輕單兵在未來戰場上的行動負荷，進而提高單兵在戰場上的機動力與存活率，就顯得格外的重要了。本文所探討的「單兵負重輔助裝置」，其概念可從科幻電影「鋼鐵人」的盔甲服，以及電影「阿凡達」中反派傭兵所駕乘的巨型AMP (Amplified Mobility Platform suit) 裝甲，或是好萊塢巨星湯姆·克魯斯的電影「明日邊界」中所穿著戰鬥裝甲服等輔助裝備中，可以得到一些較清晰的聯想與輪廓；而本文「單兵負重輔助裝置」係針對現階段各國在軍事上致力研發的「機器人 (Robots)」、「動力外骨骼裝置 (Powered Exoskeleton)」或是「穿戴式外骨骼裝置 (Wearable Exoskeleton)」等負重輔助系統為著眼進行探討，藉由這些單兵負重輔助裝置，可使單兵能在第一線戰場上的激戰中，輕易有效地完成裝填炮彈作業，在二線戰場上

進行長距離奔襲，或是後勤部隊在運送傷兵或輜重補給等行動過程中，能夠增強自身的機動力、耐力和負荷能力，同時能夠降低單兵自身的能量消耗，最大限度地保存本身的體能，提高單兵在戰場上的生存能力，進而強化部隊的戰鬥力。²

近期美國軍方報導已有十幾種機器人輔助裝置已經運用於伊拉克戰場，其中包括在單兵作戰或是後勤輜重補給方面，均可看到其蹤跡。美國國會規定，到西元2015年前，三分之一的地面戰鬥將使用機器人士兵；於此同時，美軍深知機器人無法完全替代人在戰場上的作用，為此投入大量精力，希望通過裝備大幅度提升人的生理機能從而提升作戰能力；因此，美國自西元2000年由國防部制定了「增強人體機能的穿戴式輔助外骨骼」專案的計畫，把穿戴式輔助外骨骼裝備的研製納入軍隊裝備研發的重點。³ 實際上負重輔助外骨骼系統之研發，涵蓋了軍事仿生學、人因工程、軍事體育學、材料物理學、自動控制等學科理論，期藉由輔助外骨骼裝備與人體間進行智慧化控制結合，以提升整體作戰能力。因此，本文從軍事仿生學的角度切入，並運用文獻歸納方式，淺談目前各國單兵負重輔助裝置發展現況與未來發展願景。

- 1 牛貴君，〈美軍外骨骼裝備研究及應用〉《軍事體育學報》（中國大陸），第32卷第3期，西元2013年7月，頁93-95。
- 2 王海蓮、張小棟、李華聰，〈士兵可穿戴下肢外骨骼機器人多元感知方法研究〉《計算機測量與控制》（中國大陸），第23卷第10期，西元2015年10月，頁3506-3507。
- 3 同註1。

貳、本文

一、軍事仿生學簡介

人類從會直立行走以來，就不斷挑戰體能極限，希望能夠跳得更高，跑得更快，承受更大的重量；為了克服人類的體能極限而開始著手研究獨角仙、螞蟥、螃蟹等節肢生物，因為這些生物有一層包覆在身體組織外面的骨骼系統用來支撐與保護身體，加上富含幾丁質的外骨骼有部分附著於肌肉中，無形間增強了這些生物的體能，故往往可以背負起比自己身體重許多倍的東西，例如：獨角仙可以抬起比體重大850倍的物體，螞蟥可以搬運比自己重70倍的東西；⁴ 因此，仿生學相關理論與科技也就應運而生了。

仿生學(Bionics)是模仿生物特殊本領的一門科學，由美國學者J.E.Steele於西元1960年首先提出，他認為「仿生學是研究模仿生物系統工作方式或模擬類似生物系統特徵方式的系統科學」。仿生學主要是觀察、研究和模擬自然界生物各種各樣的特殊本領，包括生物本身結構、原理、行為、各種器官功能、體內的化學作用、能量的供給、記憶與傳遞等，進而將這些原理融入科學技術中，以提供新的設計思想、工作原理和系統架構的技術科

學。⁵

仿生學亦是一門交織科學，與之密切相關的理論有物理學、生物學、軍事學、人體工程學、材料力學等，而軍事仿生學是仿生學的一個重要分支，也是一個極具影響力和生命力的研究領域；它主要是透過模仿生物系統的原理和特殊功能，將之融入軍事科技中，進而達到提升武器裝備的性能與提高單兵戰鬥力的目的。⁶ 就人類負重輔助外骨骼裝置而言，其原理實際上就是從仿生的角度切入，實現模仿節肢生物外骨骼負重能力，進而輔助並突破人體各項體能限制，其涉及機械、物理、電子、電腦、人體工程學等科技領域，是一種智慧型高科技產物。

以美軍為例，美軍要求士兵具有超強的作戰及偵察能力，但是這種能力的提升，往往需藉由攜行各種先進武器裝備或是完整後勤輜重所產生；然而，現階段單兵作戰系統或各類補給品重量普遍負荷過重，使單兵在遂行作戰或後勤補給等任務時常無法順利達成，超負荷情事亦成為了阻礙單兵作戰能力提升的一個重要因素。因此，美軍針對武器裝備如何塑造成小型化、輕量化等相關議題進行研究，並由美國科學院國家研究委員會提交的一份報告指出：解決這個問題最好

4 包家蔚，〈機械群焦點報〉《龍騰文化事業股份有限公司》（臺北），第4期，民國104年12月，頁4。

5 大科普網，http://www.ikepu.com/biology/biology/branch/bionics_total.htm，檢索日期：西元2017年6月1日。

6 天陽、周俊良、姚敏，〈淺談仿生學在軍事發展中的應用〉《藝術教育》（中國大陸），第12卷，西元2008年12月，頁133。

的方法，就是發展單兵負重輔助技術裝備，即「單兵負重輔助外骨骼系統」，以大幅度提高單兵之身體機能。

二、各國單兵負重輔助裝置研究發展現況

未來戰爭越來越趨近小型化、特種化，因此單兵作戰能力就顯得越來越重要，且未來戰場上要求單兵需具備強大的作戰能力及偵查能力，但是有時候受到地形、負重等因素的限制，人體機能的極限已經無法適應瞬息萬變的戰場情況；在這種情況下，發展負重輔助外骨骼裝備系統，提高單兵身體負重極限，就成為解決這個問題的最好方案。

目前，我國針對負重輔助外骨骼技術之相關研究，仍僅限於民間醫療復健輔助用途階段，尚未研發運用於軍事用途上，例如由國內工研院所研發的「行動輔助機器人」，已經與臺灣大學合作進入臨床研究，後續研究目標是開發重量小於20公斤(kg)、最高行走速度達1公尺/秒(m/sec)、續航力超過3小時的行動輔助外骨骼機器人，可提供脊椎損傷病友坐、站、平地、階梯、斜坡行走等完整行動輔助；⁷就研發軍用單兵負重輔助外骨骼技術方面，目前比較先進且技術發展成熟的國家非美國莫屬；而在其他國家我們也不難覓得負重輔助外骨骼系統的身影，但由於受到特定之政治、信仰或技術等複雜因素的限制，使得這些負重輔助外骨骼系統的功能特點，

往往朝向民間用途進行研發，較少直接投入軍事用途發展；因此，大多數國家對於軍用單兵負重輔助外骨骼研究都尚處於初步實驗階段。以下就負重輔助裝置發展沿革及目前各國發展現況作一文獻歸納與探討。

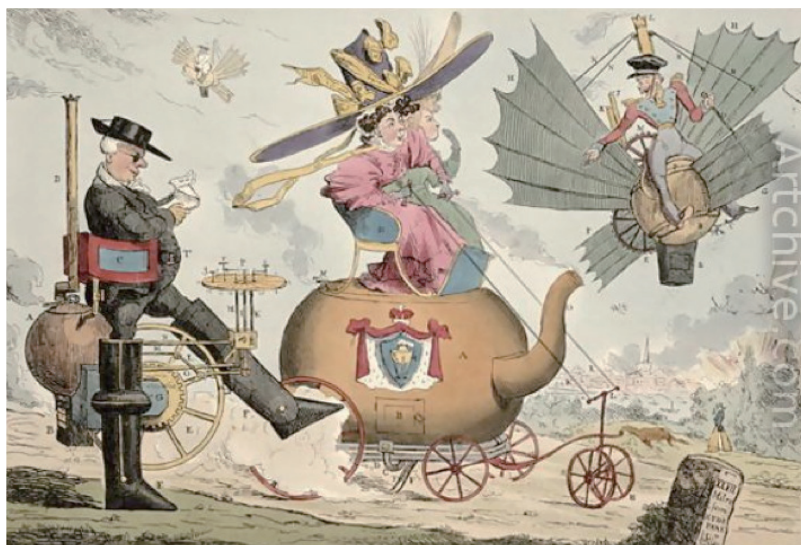
(一) 單兵負重輔助裝置發展沿革

有關負重輔助裝置系統的起源可以追溯到19世紀；有趣的是，它並非源於科學發明家，而是出自英國著名插畫家Robert Seymour於西元1830年所繪的「Walking By Steam」（如圖一所示）。自此，以蒸汽為動力的行走輔助裝置啟迪了無數科學工作者對這一概念的探索，也成為了當代動力外骨骼技術的雛形。到了西元1890年，一位來自俄羅斯的天才少年尼古拉斯·亞金發明了一套可以輔助人們行走、奔跑和跳躍的外骨骼裝置。但由於這一裝置的構造過於簡單，僅僅有鋼板彈簧和氣囊式氣壓閥，因此它仍需要人的行走來驅動它，並不能提供額外的動力，所以它仍不能算是真正意義上的動力外骨骼系統。⁸但即便如此，這些藝術家與發明家依然為後人留下了寶貴的借鑑價值。於是，更加成熟的構思與創造在20世紀的美國開花結果。

西元1917年，美國發明家萊斯利·凱利提出了一部名為「Pedomotor」的行動輔助裝置，由蒸汽驅動的它奠定了現代動力外骨骼

7 同註4。

8 每日頭條網，<https://kknews.cc/zh-tw/military/vo92jy.html>，檢索日期：西元2016年3月2日。



圖一「Walking By Steam」畫作⁹

的研發基礎，也率先還原了英國畫家Robert Seymour的「Walking By Steam」作品。但由於在實際使用上，穿戴者必須背負一臺小型蒸汽機，然而「Pedomotor」系統的設計過於簡單，無法完美地隨人體完成複雜的結構變形，因此最終被無奈擱置。

近半個世紀後到了西元1958年，此時正值冷戰時期，美國為了在軍備、科技與太空領域全面超越前蘇聯，成立了曾經發明過網際網路、GPS等偉大技術的美國國防部高等研究計畫署（Defense Advanced Research Projects Agency，以下簡稱DARPA）。而DARPA在成立一年後，被譽為「美國科幻黃金時期的四大才子」之一的羅伯特·海因萊出版了經典科幻小說《星船傘兵》，並首次提及了

「增強裝甲」的概念；而這種聽起來似天方夜譚的傘兵動力裝甲概念卻深植於美國發明家的思維中。西元1960年，或許是受《星船傘兵》科幻小說的啟發，在美國科學家Nail Mizen的帶領下，使DARPA開啟了當代史上第一次真正的動力外骨骼研發，也使得動力外骨骼首次軍事化；但遺憾的是，這一動力外骨骼裝置由於

供能不足，無法維持長久的續航，因此被認為噱頭大於實用的它卻乏人問津。

直到西元1965年，美國軍方和通用公司聯合研發了一部名為「哈迪曼(Hardiman)硬頂人」的動力外骨骼裝置（如圖二所示）。哈迪曼透過液壓和電機驅動結構，一改DARPA供能不足的問題，配合力覺反饋感應系統，哈迪曼包含28個關節及2個可用來抓取的手臂，不僅能夠感受穿戴者的動作意圖，還能將用戶的力量放大25倍，強調舉起150公斤(kg)的重物就像舉起6公斤(kg)一樣輕鬆，而且最高可抬起680公斤(kg)的重物，所以軍方稱它為「人類表現增強系統」。這一切看似完美，但整機重達650公斤(kg)的它根本無法讓穿戴者自如行走，而且在執行

9 Cyberneticzoo, <http://cyberneticzoo.com/steammen/1830c-walking-by-steam-robert-seymour-british/>, retrieve 2 May 2017.

動作時的穩定性太差，加上過於耗電，因此最終只停留在實驗階段而沒有繼續發展下去。¹⁰儘管「哈迪曼」系列最終被改進成為一部機械手臂，但最終還是因操作困難而黯然落幕，這也標誌美國在20世紀對動力外骨骼的研究最後以失敗告終。這是一個時代的終結，但並不代表著動力外骨骼裝備系統自此無人問津，更不代表著美國就此停止對這一新興領域的探索。



圖二 哈迪曼(Hardiman) 硬頂人¹¹

(二) 美國單兵負重輔助裝置發展現況

1. 伯克萊大學研發的BLEEX系統

有了哈迪曼硬頂人的開發經驗，美國軍方之後便致力於其它動力輔助裝置的發展，DARPA也開始資助類似裝置的研發，目的就是為了讓單兵可以背負幾百磅的軍用品而不感覺到重，連續行走多日而不感覺到累，而且抬得動通常必須好幾個人才能扛得起來的武器裝備。因此，西元2000年時DARPA斥資5,000萬美元投資加州伯克萊大學進行動力輔助裝置研發計畫，並研製出了「Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (伯克萊下肢外骨骼系統，簡稱BLEEX系統)」(如圖三所示)。

它主要由燃料供給、發動機系統、控制檢測系統、液壓傳動系統及外骨骼機構等構成，穿戴者要通過傳動帶將自身的腿與機械外骨骼的腿相連，背上要背一個裝有發動機、控制系統的大背包，穿戴者進行運動的時候，位於腿部的感測器會搜集運動信號，並即時做出反應，透過液壓系統為外骨骼系統提供動力，從而達到運動輔助的功能，此裝置的最大負重是32公斤(kg)，但是對於穿戴者來說，他只感到背負了2公斤(kg)一樣，如此可以大大提升單兵的負重能力。¹²但是對

10 張力山，〈未來行動輔助裝置—超越人體極限的機器人外骨骼〉《科學月刊》(臺北)，第43卷第2期，民國101年2月，頁122-128。

11 Robert Bogue, "Exoskeletons and robotic prosthetics: a review of recent developments," *Industrial Robot: An International Journal*, Vol. 36, Number 2009, p. 421-427.

12 Andrew Chu, "Design of the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton(BLEEX)," (the degree of Doctor of Engineering-Mechanical Engineering, University of California, Berkeley), Spring 2005, p. 5.



圖三 BLEEX系統¹³

於戰場使用來說，這個裝置體積過大，對使用者的行動與使用環境有所限制，且裝備可靠性和續航能力仍有待提升，因此還是無法有效滿足軍事需求。

2. 美國雷神公司的XOS2系統

西元2006年位於美國猶他州名為「Sarcos」的科研企業在接受了DARPA的訂單之後也開始研究外骨骼系統，並完成了首部成品，命名XOS系統。XOS系統機械外骨骼裝備一改以往裝備巨大、笨重的缺點，且具有可以像人一樣自由運動的特點。實際上這是外骨骼裝備研究領域的革命，意味著機械外

骨骼裝備從研發領域朝向實際應用領域邁出了重要的一步。XOS系統具備前所未有的動作靈敏度，緊貼身體表面的傳感器能夠直接感應到穿戴者的動作幅度和力度，通過電腦計算後，XOS可以輸出相同的幅度和6倍的力度。¹⁴不過遺憾的是，XOS初代原型機的續航時間僅有40分鐘。

西元2007年美國雷神

公司收購了「Sarcos」，並於西元2010年研發出了XOS2動力外骨骼系統（如圖四所示）。XOS2重量較XOS輕了10%（淨重約68公斤），電力消耗降低了50%，力增比達到了驚人的17:1。XOS2系統由一系列結構、感測器、傳動裝置以及控制器構成，由高壓液壓驅動，相對於伯克萊大學研發的BLEEX系統來說，這個系統更像是一個全身外骨骼。借助XOS2，穿戴者可輕鬆將90公斤（kg）的重物舉起幾百次，同時不會感到疲勞，此外還可重複擊穿約合7.62公分（cm）厚的木板。¹⁵除此之外，穿戴者還能靈活運動，可以進行諸如俯臥

13 葛水平、楊陳君、陳耀凱，〈單兵外骨骼裝備技術簡介〉《New Technology & New Products of China》（中國大陸），第7期，西元2016年7月，頁6-7。

14 Xinyu Guan, Linhong Ji and Rencheng Wang, “Development of Exoskeletons and Applications on Rehabilitation,” MATEC Web of Conferences 40, Spring 2016, 02004-p. 2.

15 Withington, Thomas, “The Incredible Hulks,” Armada International, Oct/Nov 2010, p. 33.

撐、爬樓梯、踢足球等複雜運動。但它最大的缺陷就是因為耗電量高，且無高效能蓄電裝置，故必須依靠外接電源線來提供所需的電力，所以能夠使用的場所就被限制住。所以就軍事用途而言，系統電源供應及蓄電問題仍需要改進克服。

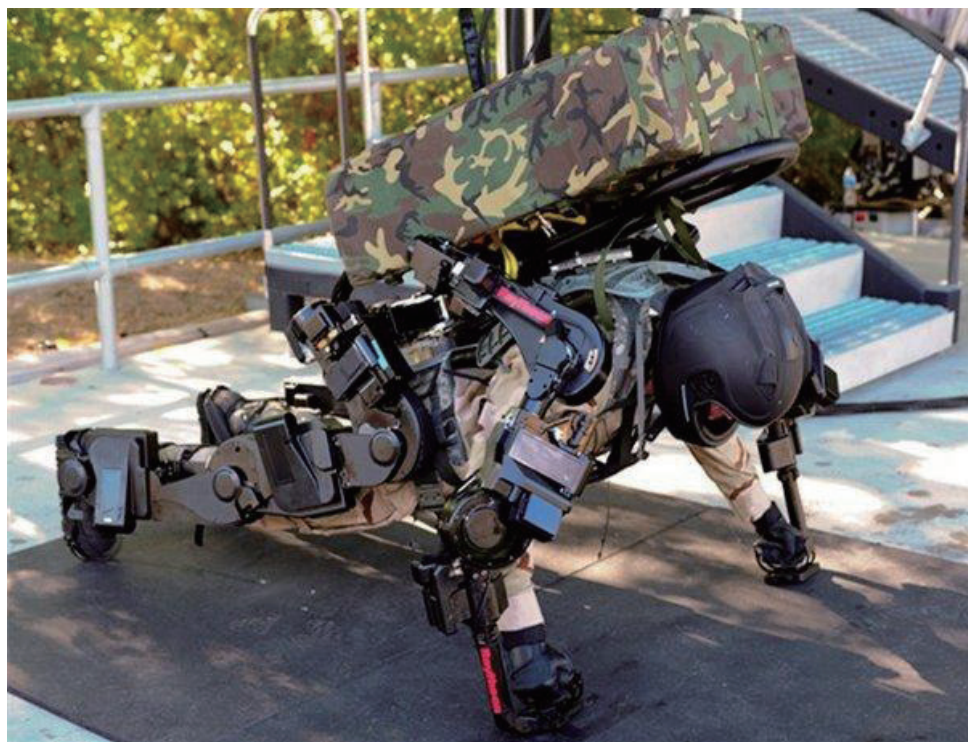
3.美國洛克希德·馬丁公司的HULC系統

HULC (Human Universal Load Carrier，人類負重外骨骼)系統是於西元2011年由美國最大軍火製造商：洛克希德·馬丁公司所研發完成(如圖五所示)。第一代HULC系統

突破性地進行了人因工程設計，本體使用鈦金屬材料以達輕量化目的，使得穿戴者在無負重感的條件下以接近16公里/時(km/hr)的衝刺速度疾行；其次，HULC系統可提供大約91公斤(kg)的負重，這些負重全部由背上的托盤承擔，然後透過機械腿直接傳遞到地面，讓穿戴者幾乎感覺不到任何重量，此外，HULC系統採用了模組化的設計理念，機械腿和背部的托盤可以分開使用，當不需要背負重物時，可以只裝備機械腿。

此外，HULC系統使用可攜式微型電腦

對裝備進行細節控制，可以使其與單兵們的運動保持高度協調一致。在電源供應方面，HULC系統由所配備的鋰電池可以在正常行走速度下持續工作1小時；在穿戴便利性方面，HULC系統具備可調節高度設計，適用於身高約為162~187公分，而單兵只需將腿伸進靴子下方的足床，然後用皮帶綁住腿部、腰部以及肩部即可，脫下裝備也很容易，穿戴方便只需花費30秒。經過洛克希德·馬丁公司的不斷研究，改良配備成燃料電池後，最新一代的



圖四 XOS2系統¹⁶

16 Engadget, <https://www.engadget.com/2010/09/28/raytheons-sarcos-xos-2-military-exoskeleton-just-does-the-heavy/>, retrieve 25 May 2017.

HULC在加滿燃油後不僅擁有72小時的超長續航，還能夠完美同步單兵的複雜動作，其中包括深蹲、匍匐等；¹⁷HULC系統是一個非常不錯的平臺，未來可以在這個平臺上裝備很多適合戰場作戰的單兵裝備或後勤輜重，如此不僅可使單兵火力得到大幅提升，其防護水準也將大大增強，同時還可克服困難的地形障礙，高速前進不會產生疲勞感，且不需考慮過多的負重給單兵帶來的影響；換言之，

HULC系統已是最接近實戰需要的單兵負重輔助外骨骼裝備，未來量產後預定單價為2萬5,000美元（約新臺幣76萬元），且目前已少量的裝備於美軍現役部隊。

（三）日本單兵負重輔助裝置發展現況

日本在負重輔助外骨骼動力裝置的研發工作也投注了很多心力，而且在進展上並沒有比美國落後；只不過日本的研發較著重於生活及日常活動上的實際應用，而不是軍



圖五 HULC系統¹⁸

17 李會營、王惠源、張鵬軍、趙鑫、李傳才，〈外骨骼裝備在未來單兵系統中的應用前景〉《機械設計與製造》（中國大陸），第3期，西元2012年3月，頁275-276。

18 John Mchale, "Exoskeleton technology reduces soldier fatigue and injury," MILITARY & AEROSPACE ELEC-TRONICS, Vol. 21, No. 6(2009), p. 12.

事用途。西元1997年日本名為「Cyberdyne」的公司開始了對負重輔助裝置「動力外骨骼」進行全面研究，並開發推出了HAL (Hybrid Assistive Limb, 人體輔助義肢)。首部HAL骨骼增強原型機由日本筑波大學研發，在結合了電腦控制和電池供電系統後，HAL的整體重量不足25公斤，即便在今日看來也非常輕便。但也正是因為材料密度和硬度的不足，和軍用標準相距甚遠的它自問世起，便著重被應用於民用負重及醫療領域，負責幫助殘障傷患者行動或復健。¹⁹

經過近10年的改良，HAL輔助義肢已被開發至第5代，重量也由25公斤(kg)縮減到10公斤(kg)，進一步滿足常人的承受力。通過感測體表的一些生物信息，例如肌肉的運動還有神經電流的改變，HAL可以模擬穿戴者的動作，並且在平行的方向上增強穿戴者的力量和耐久。目前HAL已於西元2014年在日本小規模上市，被認為是最成熟的民用負重輔助外骨骼裝置系統，未來希望HAL可以支援工廠內較吃重的工作，或是在災難現場協助救援工作的進行。

(四) 俄羅斯單兵負重輔助裝置發展現況

西元2009年俄羅斯國防部第3中央研究所所長弗拉基米爾·博伊科宣布，他們將於西元2015年斥資3,500萬美元完成研製出「勇士

-21」可穿戴式外骨骼機械作戰服，並宣稱它能让步兵在攜行重物的情況下高速飛奔，在動力耗盡時快速脫下，並將配有火力攻擊、防護、控制、生命和能源等系統，這將有效提高單兵作戰與防護能力，並給俄陸軍帶來革命性轉變，而目前電源供應方面仍存在部分關鍵性問題待解決與突破——即無法有效提供功率強大，且無噪音的長續航力燃料電池供應。²⁰

(五) 中共單兵負重輔助裝置發展現況

西元2013年由南京軍區總醫院博士工作站研發的首部負重輔助外骨骼裝置正式亮相，被定義為「單兵負重輔助系統」，朝向軍用領域且專注於壓縮負重，並能夠快速同步穿戴者的動作。儘管它被認為是目前中共較完善的負重外骨骼裝置，但其功能相對單一，且負重能力以及設計結構仍有待提升。此外，由中共中科院常州先進所設計研發的EXOP-1外骨骼系統已於西元2014年正式進入調校階段，本體全部由航空鋁合金打造的，它配備了22個感知器、6個驅動器和1個控制器，造價約在30萬元人民幣（約新臺幣150萬）左右。相較於在南京亮相的軍用負重外骨骼系統和國外先進的負重外骨骼裝備，EXOP-1雖然同樣能夠減輕穿戴者的負重，但它的體積相對笨重，仍有很大改善空間，因

19 Zhao Yanjun, Zhang Wanqing, and Ge Wenqing, "Finite Element Simulation of Soldier Lower Extremity Exoskeleton," JOURNAL OF MULTIMEDIA, Vol. 8, No. 6, Dec. 2013.

20 互動百科, <https://www.baike.com/>, 檢索日期: 西元2017年5月25日。

此難以在短期內投入使用。

此外，西元2015年由大陸兵器集團202研究所研製的單兵負重輔助外骨骼系統（如圖六所示），它的額定負重是35公斤（kg），最大負重是50公斤（kg）；在背負35公斤（kg）的情況下，平地以時速4.5公里/時（km/hr）可持續行走20公里（km）而不覺疲備。藉助這套系統，普通單兵可輕易背負35公斤（kg）軍需輜重物資箱，並且跨越「彈坑」，將其運送到前方200公尺的戰壕只需要2分鐘。²¹由兵器集團202研究所研製的這套新一代單兵負重外骨骼系統，未來將裝備於大氣環境較嚴荷的高原邊防部隊以及特種部隊使用，俾利在高原地區進行徒步武裝巡邏，由於高原氧氣較稀薄，故在裝備了單兵負重輔助外骨骼系統後，這一困境將得到較大的改善；另在特種作戰環境下，新型單兵負重輔助外骨骼系統也適用於遠程徒步滲透作戰。

綜上，以下就各國單兵負重輔助裝置研究發展現況綜彙如表一。

三、單兵負重輔助裝置的結構簡介與基本作動原理



圖六 中共單兵負重輔助外骨骼系統系統²²

（一）單兵負重輔助裝置結構簡介

單兵負重輔助外骨骼裝置主要由6大系統所構成：即仿生機械外框架結構、智能感測系統、控制系統、通信計算系統、驅動執行機構和能源供應系統（結構示意如圖七所示）。²³以下就各個系統結構逐一簡介說明：

1. 仿生機械外框架結構

利用仿生技術和先進製造技術打造出的機械負重輔助骨骼外框架，能與人體完美結合，且具備高強度、質量輕等優點；為實現材質輕量化與堅韌之目的，主要係運用高強度多功能一體化的複合材料，此類材料具備綜合力學性能、可設計性強及一次成型等優點。舒適性方面，依照仿生學原理，並根據人因工程設計出合適的外形結構，使穿戴者在

21 壹讀-環球華文資訊站網，<https://read01.com/amJNz7.html>，檢索日期：西元2017年5月25日。

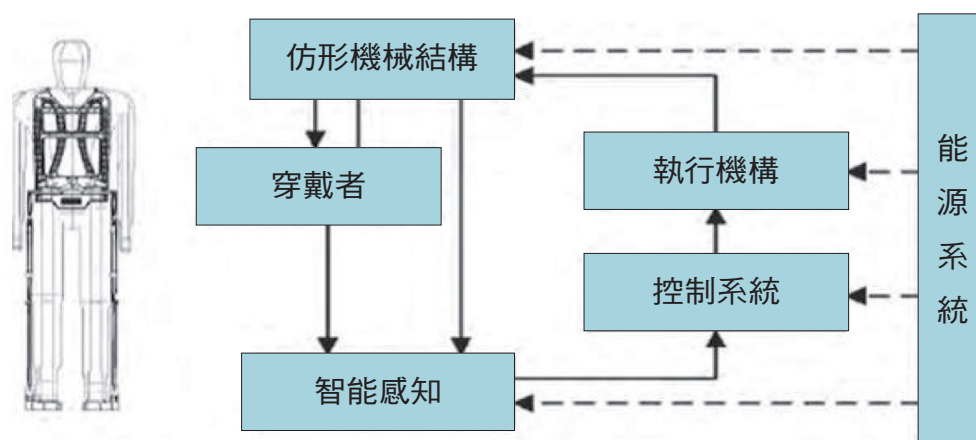
22 同註21。

23 王人成，〈國內外助行動力外骨骼研究進展〉《清華大學摩擦學國家重點實驗室智能生物機械分室-機械設計與製造》（中國大陸），第2期，西元2014年3月，頁201926-927275。

表一 各國單兵負重輔助裝置發展現況主要性能綜彙表

項目	輔助裝置名稱		各國單兵負重輔助裝置研究發展現況	
			主要性能	精進空間
1	美國	BLEEX系統（伯克萊大學研發）	透過液壓系統為外骨骼系統提供動力，此裝置的最大負重是32公斤（kg），但是對於穿戴者來說，他只感到背負了2公斤（kg）	這個裝置體積過大，對使用者的行動與使用環境有所限制，且裝備可靠性和續航能力仍有待提升
2		XOS2系統（雷神公司）	淨重約68公斤（kg），可輕鬆將90公斤（kg）的重物舉起幾百次，此外還可重複擊穿約合7.62公分（cm）厚的木板	耗電量高，且無高效能蓄電裝置，必須依靠外接電源線來提供所需的電力，所以能夠使用的場所易被限制住
3		HULC系統（洛克希德·馬丁公司）	穿戴方便只需花費30秒。配備燃料電池並擁有72小時的續航力，能夠完美同步單兵的複雜動作，係目前最接近實戰需要的單兵負重輔助外骨骼裝備	人機控制與驅動執行系統協調性及耦合性不足，仍有精進空間
4	日本	HAL系統（Cyber-dyne公司）	穿戴重量輕，可以同步模擬穿戴者的動作，並且在平行的方向上增強穿戴者的力量和耐久	主要用於民間醫用途，因為材料密度及硬度不足，目前尚無法運用於軍事用途
5	俄羅斯	勇士-21	俄國防部宣稱它能讓步兵在攜行重物的情況下高速飛奔，在動力耗盡時快速脫下，並將配有火力攻擊、防護、控制、生命和能源等系統	無法有效提供功率強大，且無噪音的長續航力燃料電池供應
6	中共	EXOP-1外骨骼系統	本體由鋁合金打造，能減輕穿戴者負重，並能夠快速同步穿戴者的動作	體積相對笨重，且功能相對單一，負重能力以及設計結構仍有待提升
7		兵器集團202研究所的單兵負重輔助外骨骼系統	在背負35公斤（kg）的情況下，平地以時速4.5公里/時（km/hr）可持續行走20公里（km）而不覺疲備	未來係運用於高原地區進行徒步武裝巡邏，功能相對單一，然電源供應仍有待提升

資料來源：本研究整理

圖七 單兵負重輔助裝置系統結構示意圖²⁴

24 同註23。

運動時感受到最小化之約束感，同時負重外骨骼應有應急保護機制，在出現故障時能輕鬆脫下。

2.智能感測系統

透過多個智慧型感測器和資料整合系統，感測穿戴者的運動姿態和生理狀態，同時能準確預測穿戴者的運動意圖，因為人體的運動狀態是非常複雜的，且無時無刻都不停的在變化，所以需要智能感測系統能夠快速且精準地感受當前的運動狀態，因此，每具負重輔助外骨骼裝置需要綜合使用多種感測器，例如腦電感測器、慣性感測器、肌電感測器、薄膜感測器和光纖感測器等。

3.控制系統

對各種感測器檢測回傳的資料進行處理，並針對穿戴者的運動需求，透過連動控制技術實現外骨骼的多自由度運動與倍增助力運動之目的。就控制系統而言，不僅能準確快速地分析多種感測回傳信號，識別出穿戴者當時的運動狀態，並且能夠根據外在環境做出相對應的動作回應，以有效對穿戴者行動進行精準的預測。

4.通信計算系統

為嵌入式電腦系統，針對智慧感測系統與控制系統等回傳信號提供計算與通信處理平臺，主要負責計算並提供各種判斷信號參數。

5.驅動執行機構

依據控制系統傳來的參數信號，結合關節動力學，並透過電機、液壓或氣壓等綜合驅動方式，實現高功率的驅動助力；此外，亦可仿人體肌肉的運動模式，開發新型自動化高效驅動助力。

6.能源供應系統

為各個系統提供能源，負重輔助外骨骼裝備要求能源系統需具備高效蓄能、體積小、攜行便利等特性。目前主要能源提供方式有：鋰電池、高效能燃料電池等，未來亦可朝多種混合式替代能源方向開發，如風能、太陽能、可攜式核能等。²⁵

(二)單兵負重輔助裝置基本作動原理

單兵負重輔助外骨骼裝置基本作動原理為：根據仿生學、動力學、機構學及機械設計等原理，完成負重輔助骨骼外框架之研製，並在穿戴者和負重輔助骨骼外框架中安裝各類型感測器，如在負重外骨骼系統的各個關節部位安裝角度傳導感測器、在足底等支撐位置安裝壓力感測器等，同時在穿戴者皮膚上安裝生理信號感測器，藉以即時感測穿戴者的運動資訊和生理等相關信號，然後再藉由各種智慧感測器將所測得之各類信號傳輸到控制系統嵌入式電腦中，電腦運用預判演算法，針對各種回傳資訊進行綜合分析運算，並對穿戴者姿態與行為提供相對應之信號參

25 Ryan Steger, "Control Scheme and Networked Control Architecture for the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton," CA 94720, USA, University of California, Berkeley, June 2006.

數，控制系統再將電腦所計算出之各種信號參數轉化為連動控制參數，透過各種電機或液壓執行機構以驅動負重外骨骼框架實施多自由度目標運動。²⁶

簡言之，單兵負重輔助外骨骼裝置系統主要就是藉由各種智能感測系統隨時追蹤穿戴者運動，並即時對穿戴者運動進行連動行為預判，以適時提供高效能的倍增負重助力，最終期能達到人機一體化之目標。

四、現階段單兵負重輔助裝置發展技術瓶頸

目前全球已經有許多國家都已研發出自己的負重輔助外骨骼裝置，但實際用於軍事用途且研發技術較為成熟的國家，仍然以美國為主要代表。儘管如此，單兵負重輔助裝置若要進入大批量產服役階段，在相關技術上面仍面臨諸多瓶頸需要去克服：如美國BLEEX系統裝置仍存在大量耗能及穿戴者長時間使用會導致膝蓋不適等問題；XOS2系統因為電池續航力約40分鐘，仍存在電源供應及蓄電等問題，至今尚未投入量產服役。因此，以下針對現階段單兵負重輔助外骨骼裝置所面臨的相關問題，提出歸納探討：

（一）能源供應續航力不足

為滿足戰場上各種複雜作戰環境，單兵

負重輔助外骨骼裝置對能源續航力的要求甚高，因此電源供應需具備高效、持久、輕便及安全的能源供應特性，惟現階段的能源供應技術尚無法完全滿足上述各項要求，後續電源供給方面仍需朝向續航時間長、功率比高及安全性高之專用動力能源方向進行設計開發，²⁷另一方面則需持續精進智慧感測系統精準度，以減少不必要的機械能量損失，進而提高整體能源使用效能。

（二）機械結構舒適性不足

負重輔助外骨骼機械結構的設計需兼顧質輕、舒適、堅韌和承載力等嚴格條件，就目前最成熟的單兵負重輔助外骨骼HULC系統而言，係以鈦金屬複合材料作為外骨骼的主要框架，雖然目前可滿足上述質輕、堅韌和承載力高之條件需求，然而在穿戴輔助外骨骼框架後對於整體舒適性的感受上仍略顯不足；²⁸因此，在外骨骼機械結構設計方面，除了需考量穿脫便利性外，如何減少人體在各種運動狀態下的約束感以有效提升整體舒適感，仍是未來機械設計工藝上的一大考驗。

（三）人機控制系統協調性不足

負重輔助外骨骼裝置的核心技術就是要達成人機一體完美的結合，而此核心技術之關鍵，就是要能準確地感測到穿戴者的運

26 同註17。

27 同註2。

28 Gopura RARC and Kiguchi K, “based control of an exoskeleton robot for human forearm and wrist motion assist,” IEEE International Conference on Robotics and Automation, June 2008, p. 731-736.

動和運動趨勢，並在短時間內做出反應，實現控制系統對外部機械結構的高精度控制和多動作模式間的流暢切換，以提高負重輔助系統的整體協調性。由於人體的關節系統非常複雜，除了需要應用大量的感測器外，還需要依靠先進的演算法快速做出分析並做出反應，以真正達到人機一體之最佳化狀態。²⁹考量穿戴式負重輔助外骨骼裝置作為單兵作戰系統的一個子系統，常常需要在複雜地形和極端環境下工作，其動作模式比起一般醫療助行輔助機器人更加多樣和複雜；然而，現階段單兵負重輔助裝備系統在人機控制系統協調性方面仍顯不夠精確與完善，故其協調性部分仍存在持續精進與改善之空間。

（四）驅動執行系統耦合性不足

驅動技術就好比外骨骼的「肌肉」，是外骨骼裝備中提供驅動力的裝置，需要綜合運用液壓、氣壓和電動等多種驅動方式。因此，除了智能感測與控制系統必須要保證多動作模式間的流暢切換和較高精度的人機協調性外，末端驅動執行系統於接收到各種控制信號後，亦需發揮快速且精準之反應驅動能力，以達到驅動外骨骼機械並產生人機高耦合性連動助力，同時避免因人機動作的不

協調而產生對人體的運動傷害。³⁰而現階段單兵負重輔助裝備系統在驅動執行系統耦合能力方面，仍缺乏多種驅動模式整合與人機耦合自我調整能力，難以完成高隨意性的多動作模式切換控制。

五、未來單兵負重輔助裝置發展前景

（一）增強體能，使單兵各項能力大幅度提高

就目前全球單兵負重輔助裝置技術發展最成熟的美軍而言，美軍認為現階段增強單兵作戰能力的途徑有兩種，一種是單純的增加單兵裝備數量及品質，通過增強單兵的火力來增加戰鬥力，二是穿著如「大地勇士 (Land Warrior) 單兵戰鬥服裝 (著重於資訊化戰場C4ISR連線)」這樣的裝備，以增強綜合作戰能力。³¹然而，這兩種增強單兵作戰能力方式所共同面臨的問題是單兵的體能有限，在攜帶相關裝備後行動力大打折扣，不但沒有增強戰鬥力，反而會因為行動力大大減弱而成為敵人的戰場活靶；因此美軍致力研發負重輔助外骨骼裝備，就是為了解決由於單兵裝備數量和質量的增加而導致單兵行動力減弱的問題。

現階段美軍單兵負重輔助外骨骼裝備的研製，主要是從提高單兵負重能力和行動力兩個方面著手；動力方面，美軍希望能夠透

29 He Kiguchi and Horikawa E, "A study on lower-limb muscle activities during Daily lower," International Journal of Bio electromagnetism, Sep. 2008, p. 131.

30 同註29。

31 同註1。

過槓杆原理等方法，使得外骨骼裝備盡可能的擺脫對電池的依賴，但現階段技術還不成熟，還需要完全依靠電池提供動力，透過驅動裝置才能夠達到增強人體支持力、增加負重能力、耐力及提高單兵行動力的目的。實驗證明，單兵穿戴負重輔助外骨骼裝備在負重90公斤(kg)的情況下，可以時速4.8公里/時(km/hr)的速度行進20公里(km)，最快速度可達16公里/時(km/hr)。與此同時，負重輔助外骨骼裝備使單兵在體能大幅度提升之基礎上並沒有犧牲太多的靈活性，穿戴負重輔助外骨骼裝備的單兵不僅可以輕易完成下蹲、跳躍、匍匐等多種動作，還可以使單兵瞬間爆發力大大增強，如果未來能將飛行能力也整合到負重輔助外骨骼裝備中，這將大大提高單兵的機動能力。因此，單兵透過穿戴負重輔助外骨骼裝備完成了體能上的超越，從而大幅提高單兵作戰或後勤輜重補給能力，對未來戰場上之運用是有非常大的發展前景。

(二) 智慧控制，使單兵與裝備深層次融合

傳統意義上的人裝結合，實際上是透過人的學習和對技能訓練來完成的，其主要原因是因為人體生理機能與裝備操作功能無法建立內在聯繫。美軍研究人員透過對人體運動過程中肌肉的變化進行深入研究，使得負重輔助外骨骼裝備可以根據人體肌肉微小的變化感受穿戴者的運動趨勢，從而做出相應的動作，基本實現了意識控制。當單兵穿戴

負重輔助外骨骼裝備時，其肌肉活動狀況、運動、受力等參數分別透過分布於小腿、膝蓋和腰部、肩部等部位的智慧型感測器接受並輸入到控制系統中。而後透過微型電腦，分析穿著者的運動趨勢，從而控制機械外骨骼保持與穿著者肢體的同步，使單兵穿戴負重輔助外骨骼裝備時無需考慮如何操縱，就像平時走路、跑步一樣完成所想動作即可。這種意識控制型裝備實際上是人的生理機能與裝備操作功能智慧相融合的典範，此類人與裝備深層次融合的方式將成為未來「人機一體」的發展方向。

受此啟發，各大民間醫療研究機構對此種「人機一體」方式非常感興趣，也因此引發了人體行動輔具的革命。雖然此種方式的「人機一體」已經與傳統意義上的人裝結合相比邁出了跨越性的一步，但是其原理還是基於對穿戴者的肌肉的微小變化來判斷運動趨勢的。美軍認為更深層次的人裝融合應該是完全的意識控制，這也是美軍正在研究的重要方向。

(三) 彌補弱點，強化系統作戰能力

一直以來，美軍尋求通過數位化單兵系統達到陸、海、空、航太、電子、網路力量一體融合，從而實現美軍未來部隊的構想。美軍未來部隊的重要成員就是配備「大地勇士」數位化單兵系統的數位化士兵，「大地勇士」數位化單兵系統包括武器系統、綜合頭盔系統、電腦／無線電系統、軟體系統、防護

服與單兵設備系統，配備此系統的士兵具備強大的單兵作戰能力和通信、引導能力。可是自此系統問世以來，如何使其小型化、輕型化一直是困擾美軍的重要難題，也是現階段還沒有普及到美軍作戰部隊的一個重要原因。因其裝備重量達50公斤(kg)，士兵配備此系統行動力大打折扣，沒有因為其先進的技術而使得單兵作戰能力得到提升，反倒成為了作戰體系的弱點。

然單兵負重輔助外骨骼裝備研製成功，使上述問題得以緩解。因為負重輔助外骨骼裝置可作為各式先進武器系統一種很好的配備載臺，穿戴後能夠使士兵輕易地配備「大地勇士」數位化單兵系統，且可以充分發揮單兵「指、管、通、情、監、偵」的能力，彌補美軍未來部隊作戰構想中的弱點，全面提升系統作戰能力與後勤輜重補給能力。未來可以預見，隨著負重輔助外骨骼裝備技術的不斷突破發展，並與數位化單兵系統在更大範圍、更深程度的結合，穿戴負重輔助外骨骼裝備的單兵，將具備更強背負力、機動力、耐力及強大的火力等優勢，從而使得單兵作戰能力步入一個新的境界。

參、結論

負重輔助外骨骼裝置儼然成為可以改變單兵戰場生存環境的一種新科技，或許因為它的出現，使未來的戰爭形式將發生根本性

的改變。目前負重輔助外骨骼裝備技術在國際上發展迅速，作為未來戰場環境的必備科技，各國都在加緊研究各種單兵負重輔助外骨骼技術，並將其和全方位之單兵指管數位化作戰系統進行整合，以提高單兵作戰能力進而提升整體部隊的戰力。

未來我國如果在國防預算許可下，亦可編列相關研究預算，並與民間（如工研院或中科院）進行國防科研合作計畫，在國內現有的醫療行動輔助機器人的科技基礎下，著手進行軍用單兵負重輔助外骨骼裝置系統之研發，以實現我國陸軍與後勤補給部隊單兵數位化作戰能力提升之目標。雖然負重輔助外骨骼裝置還有很多技術上的瓶頸有待解決，但隨著科技水準和軍事技術的不斷提升，可以預測單兵負重輔助外骨骼裝置必將成為世界各國未來單兵裝備科技的發展方向。

作者簡介

蔡榮暉中校，中正理工學院90班，後校後勤正規班95-1期，國防大學理工學院車輛及運輸工程研究所98年班，曾任排長、後勤官、裁判官、研究教官、中隊長，現任陸軍後勤訓練中心管理教官組主任教官。