

看不見的成本—不同擠乳系統的能源帳單

畜試所北區分所 陳怡璇

在現代酪農場的飼養管理中，各類設備的能源消耗是一個關鍵且不易控制的營運成本項目。在愛爾蘭的乳牛場中，電力佔直接能源使用的60%，其中擠乳、生乳冷卻與水加熱佔全場電力消耗約73% (Upton et al., 2013)；德國的酪農場有56%至70%的總電力消耗用於擠乳和生乳冷卻 (Höhendinger et al., 2021)。2000年初期的研究指出，自動化擠乳系統(automatic milking system, AMS)較傳統擠乳更耗能，自動化擠乳系統雖可提升擠乳效率，使用的能源消耗會因系統種類、場內管理方式與使用的設備而有明顯差異。本文整理傳統擠乳系統與自動化擠乳系統相關文獻的耗能差異(如表1)，提供酪農朋友在設備選購與管理上的參考依據。

傳統擠乳與自動化擠乳系統(AMS)能耗的差異

AMS的整體能耗比傳統擠乳系統高出42%，表明自動化擠乳會增加牧場的用電量 (Calcante et al., 2016)。對於AMS而言，電力消耗是其最相關且難以控制的成本，佔其年度總營運成本的35%至40% (Calcante et al., 2016)。調查Lely Astronaut A3 Next、Lely Astronaut A4、Fullwood Merlin 4與Fullwood M2erlin系統的平均每

公斤生乳電能消耗分別約為24.4、20.7、24.3與19.2Wh/kg (Calcante et al., 2016; Höhendinger et al., 2021)。

一項針對傳統擠乳的研究發現，傳統擠乳的平均每公斤生乳電能消耗為48.91 Wh/kg (Buckley et al., 2023)。在愛爾蘭的傳統擠乳酪農場中，總直接用電量平均為42.34 Wh/L。其中，生乳冷卻佔30.8%，水加熱佔23.2%，擠乳操作佔19.9%。擠乳機器本身(包含真空泵和生乳泵)的電能消耗為8.44 Wh/L(表2, Upton et al., 2013)。

表2. 愛爾蘭的乳牛場每公升生乳生產的用電量細項及使用比例分布結構分析

項目	每公升生乳電力消耗 (Wh/L)	佔比 (%)
生乳冷卻 (Milk cooling)	13.02	30.8
水加熱 (Water heating)	9.83	23.2
擠乳 (Milking)	8.44	19.9
照明 (Lighting)	1.37	3.2
其他 (Other)	7.54	17.8
抽水 (Water pumping)	2.13	5.0
總計 (Total)	42.34	100

(Upton et al., 2013)

光泉廠農通訊(129)

<https://www.kuangchuan.com/FacInfo/Dairy>

表 1. 自動化擠乳系統（AMS）與傳統擠乳系統能源消耗比較

分類	項目	傳統擠乳系統	自動化擠乳系統（AMS）	文獻
整體能源消耗	每次擠乳平均耗電量	約 0.28 kWh	約 0.42 kWh（高 42%）	Höhendinger et al., 2021
	電力成本佔營運比重	無特別說明	可達 35–40%	Calcante et al., 2016
	擠乳與冷卻佔總能耗比	56–70%（德國）	類似，但總用電量更高	Höhendinger et al., 2021
	電力佔直接能源使用比	60%，其中 80%與生乳設備相關（愛爾蘭）	類似	Upton et al., 2013
擠乳機組（真空泵+生乳泵）	每公斤生乳耗電量	約 8.44 Wh/kg	4.0–5.8 Wh/kg，較低	Höhendinger et al., 2021; Upton et al., 2013
	真空泵技術	傳統固定速泵為主	可配備變頻控制（VSD），節能 40–60%	Buckley et al., 2023
空氣壓縮機	是否配備	通常無需或需求少	操作閘門與機械手臂必需	Höhendinger et al., 2021
	每日耗電（例）	無	A3 Next: 66.8%；A4: 36.6% Merlin 4: 10.75 kWh；M ² erlin: 6.75 kWh	Calcante et al., 2016; Höhendinger et al., 2021
清洗系統	能源需求	一般水洗	高溫蒸氣（例：A4 每日 51.5 kWh） 沸水清潔系統能耗穩定	Calcante et al., 2016; Höhendinger et al., 2021
能耗影響因素	牧場管理	受影響較小	對能源使用影響極大（如清洗方式、設備配置）	Calcante et al., 2016
	機械手臂驅動方式	無	電動（M ² erlin）能降低總能耗	Höhendinger et al., 2021
	擠乳效率影響	中度負相關	中度負相關	Buckley et al., 2023

（Buckley et al., 2023; Calcante et al., 2016; Höhendinger et al., 2016; Upton et al., 2013）

光泉廠農通訊(129)

<https://www.kuangchuan.com/FacInfo/Dairy>

大致上，現代 AMS 的每公斤生乳能耗（約 18-24 Wh/kg）似乎低於傳統擠乳系統的平均總能耗（約 42-49 Wh/kg）（Buckley et al., 2023; Calcante et al., 2016; Höhendinger et al., 2021）。單比較 AMS 系統中的真空泵和生乳泵的能耗，可能比傳統擠乳系統中這些部件的能耗更高，但這不代表 AMS 的總能耗更高，更近期的研究數據顯示，隨著技術的演進，現代 AMS 在每公斤生乳的能耗方面可能更具效率，且涵蓋更多自動化功能（Calcante et al., 2016）。

自動化擠乳系統（AMS）的技術演進如何影響其能耗

AMS 的技術演進顯著影響了其能源消耗和牧場生產效率，主要為設備的優化、驅動方式的改變以及管理模式的調整。

1. 機械手臂驅動的轉變

(1)從氣動到電動：早期的 AMS 系統，例如 Fullwood Merlin 4，其機械手臂多採用氣動驅動（Höhendinger et al., 2021）。（註：M2erlin 是 Fullwood 於 2014 年推出的第二代擠乳機器人，比 Merlin 4 更新型）。雖然電動驅動機械手臂本身會增加擠乳機器人的耗電量（M2erlin 擠乳機器人每公斤生乳耗電量是 Merlin 4 的兩倍，從 1.5 Wh/kg 增至 3.0 Wh/kg），但

它顯著降低了對空壓機的能源需求，這是因為電動驅動在可調節性和能量傳輸方面優於氣動驅動（Höhendinger et al., 2021），這種轉變帶來了能源效率的提升。

2. 真空泵技術的改進

(1)變頻控制（VSD）的應用：變頻控制的真空泵技術能夠將能耗降低 40%至 60%。根據研究，配備 VSD 的擠乳機每公斤生乳消耗 4.59 Wh，而未配備 VSD 的則多消耗 27% 的電力，平均為 5.82Wh/kg Milk（Buckley et al., 2023）。

(2)洩漏減少：有研究也指出，M2erlin 系統的真空供應耗電量有所降低，這可能歸因於乳杯附著更快或更精確，減少了真空洩漏（Höhendinger et al., 2021）。

3. 空壓機類型與尺寸的優化

(1)高效壓縮機：舊型號或過大的空壓機（例如 Lely Astronaut A3 Next 使用的轉子螺桿壓縮機）比新型或更高效的空壓機（例如 A4 使用的渦卷式壓縮機或 M2erlin 使用的活塞式壓縮機）能耗更高（Calcante et al., 2016）。活塞式壓縮機更適合處理較低且不穩定的壓縮空氣需求，因此在減少氣動驅動元件的 AMS 中更為節能（Höhendinger et al., 2021）。

4. 清潔系統的影響

(1) 蒸氣清潔：許多 AMS 配備了高溫蒸氣清潔系統 (hot steam, 150°C 蒸氣, 如 Lely 的 Pura 系統或沸水清潔系統 BWAC) (Calcante et al., 2016)。這類清潔方式雖然清潔效果好, 但比僅用常溫水沖洗的擠乳單元消耗更多電力 (Calcante et al., 2016)。例如, Lely A4 系統在禁用 Pura 系統的農場, 每 100 公升生乳的耗電量為 1.80 kWh, 而啟用 Pura 系統的農場則為 2.25 kWh。

5. 整體效能增加

(1) 設備的優化：儘管擠乳機器人能耗增加, 但空壓機的節能效果更為顯著, 使得電動手臂在整體擠乳過程的能源效率方面顯示出強大的優勢, M2erlin 系統的每日總能耗為 35.8 kWh, 顯著低於 Merlin 4 的 38.3 kWh (Höhendinger et al., 2021)。研究顯示, M2erlin 系統的成功擠乳總次數提高 (每日平均 162.3 次擠乳事件, 其中 151.4 次成功擠乳, 高於 Merlin 4 的 134.6 次擠乳事件和 119.9 次成功擠乳)、擠乳錯誤率降低 (從 0.72% 降至 0.24%)、平均擠乳流速提高 (從 1.38 kg/min 增至 1.67 kg/min), 這可能代表有較佳的乳房刺激效果, 都顯示電動驅動的 M2erlin 系統比氣動驅動的 Merlin 4 系統在生產性能上有所提升 (Höhendinger et al., 2021)。

其他哪些擠乳設備與管理因素會拉高電費？

除了上述技術演進影響 AMS 的耗電量, 其他的擠乳機耗電因素主要可分為設備類型以及畜舍管理與操作模式兩大類 (Calcante et al., 2016)。

1. 設備類型

1.1 生乳冷卻系統

(1). 預冷系統：使用板式預冷機 (plate cooler) 可顯著降低能耗 (Buckley et al., 2023)。有預冷機的牧場每公斤生乳消耗 9.68 Wh, 而無預冷機的牧場則為 13.20 Wh (Buckley et al., 2023)。

(2). 冷卻技術：直接膨脹式 (direct expansion) 生乳冷卻系統的效率通常高於儲冰式 (ice builder) 冷卻系統 (直接膨脹式平均 11.19 Wh/L, 儲冰式平均 19.22 Wh/L) (Upton et al., 2013; Buckley et al., 2023)。然而, 儲冰式系統可以將冷卻負荷從擠乳時間轉移到離峰時段, 但前提是設置和管理得當 (Upton et al., 2013)。

1.2 水加熱系統

(1). 熱回收系統 (heat recovery)：使用熱回收系統預熱水可大幅節省能耗 (Buckley et al., 2023)。使用熱回收系統的牧場每公斤生乳消耗 6.82 Wh, 比不使用的牧

場 (10.66 Wh/kg) 少 56% (Buckley et al., 2023)。

(2). 加熱方式 (heating)：使用電力加熱水的牧場每公斤生乳消耗 8.80 Wh，而使用燃氣或燃油加熱水的牧場則為 14.31 Wh，顯示電力加熱更節能 (Buckley et al., 2023)。

1.3 擠乳室類型

研究顯示，旋轉式擠乳室能源效率 (29.85 Wh/kg) 和擠乳效率 (每小時 152 頭牛) 均優於人字型擠乳室 (32.83 Wh/kg, 每小時 97 頭牛) (Buckley et al., 2023)。旋轉式擠乳室在處理大量牛隻時，能源消耗增加較不顯著 (Buckley et al., 2023)。

2. 牧場管理與操作模式

2.1 擠乳效率與頻率：

擠乳效率 (每小時擠乳頭數) 的提高與能源效率 (生產每公斤生乳的瓦時數) 的改善存在中度相關 (Buckley et al., 2023)。這意味著，更高的擠乳效率會提升能源效率。增加擠乳頻率會降低每次擠乳的產乳量，但可能提高牛隻的每日產乳量，進而影響每公斤生乳的能耗 (Höhendinger et al., 2021)。

2.2 牛隻數量與產乳量：

牛隻數量和每日總產乳量越高，整體能源消耗越大 (Buckley et

al., 2023)。然而，更大的牧場規模若能有效管理，有潛力實現更好的能源效率 (Buckley et al., 2023)，也就是提高能源效率 (生產每公斤生乳的瓦時數)。

2.3 清潔頻率：

擠乳系統的固定清潔週期 (例如每天三次的沸水清潔系統 boiling water cleaning system, BWAC) 會消耗穩定且大量的電力，且此部分能耗與產乳量或擠乳效率無關 (Höhendinger et al., 2021)。

2.4 擠乳時間與時段：

擠乳時間越長，能耗越高，但這通常與較高的產乳量相關 (Buckley et al., 2023)，建議換算成每公斤生乳的瓦時數較為客觀。愛爾蘭的研究顯示，超過 60% 的日常電力在電費較高的尖峰時段使用 (Upton et al., 2013)。將大型能源用戶 (如生乳冷卻和水加熱) 的操作時間，從尖峰時段轉移至離峰時段，是降低能源成本的有效策略 (Upton et al., 2013; Buckley et al., 2023)。

2.5 牛隻滯留時間：

牛隻在擠乳站中的平均滯留時間越長，相關的耗電量也會越高 (Calcante et al., 2016)。

結論

節約電力消耗具有環境效益，紐西蘭牧場型乳牛場的電力消耗佔總能源使用的 25% (Upton et al., 2013)。總結來說，優化設備技術(如採用變頻 VSD 真空泵、電動機械手臂、板式預冷機、熱回收系統)和實施高效的牧場管理實踐(如提高擠乳效率、在離峰時段進行高能耗操作、有效清潔)，是降低乳牛飼養管理中設備能耗的關鍵途徑。

參考資料：

Buckley, F., Murphy, M. D., Prendergast, R., Shalloo, L., & Upton, J. 2023. Factors affecting energy efficiency in herringbone and rotary milking parlours. *Heliyon*, 9 (11) .

Calcante, A., Tangorra, F. M., & Oberti, R. 2016. Analysis of electric energy consumption of automatic milking systems in different configurations and operative conditions. *Journal of Dairy Science*, 99(5), 4043-4047.

Höhendinger, M., Krieg, H. J., Dietrich, R., Rauscher, S., Stumpenhausen, J., & Bernhardt, H. 2021. Impacts of divergent moving drives on energy efficiency and performance of various AMS in operative conditions. *Agriculture*, 11(9),

806.

Upton, J., Humphreys, J., Koerkamp, P. G., French, P., Dillon, P., & De Boer, I. J. 2013. Energy demand on dairy farms in Ireland. *Journal of dairy science*, 96 (10) , 6489-6498.