

面對氣候變遷-在減少溫室氣體排放上 可靠性工程師角色

◎李麗女 編譯

事實真相：

- 隨著組織提高環境、社會和治理(ESG)績效的壓力不斷加大，重工業部門承擔著支持減少溫室氣體排放和實現碳中和等措施的重責大任。
- 作者討論了設備資產依賴型行業降低能源消耗的方法。他還定義了工廠可靠性工程師在解決附加摩擦損失、逸散排放損失和電熱損失方面的角色。

可持續發展以及環境、社會和治理(ESG)績效是常見的新聞標題。對氣候變化、衝突金屬和其它具有重大社會意義的問題的擔憂持續上升，工業公司提高ESG績效的壓力持續加大。所有行業的高階執行者和經理對於該主題都非常感興趣並且也感到非常重要。製造、加工、採礦和金屬行業也不例外。

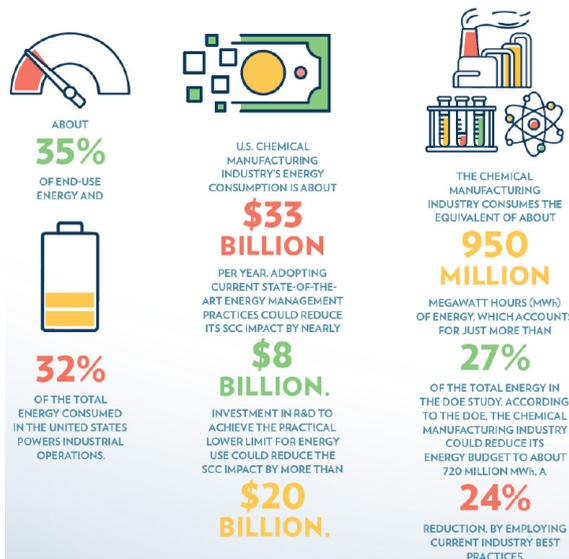
加劇氣候變遷的溫室氣體(GHG)排放尤其令人關注。投資者的行動呼籲很明

確：如果您想生存，就減少溫室氣體排放並提高ESG績效。

淨零碳排是一項廣受歡迎的行動呼籲。作為能源的主要用戶，重工業部門對支持這些目標負有重大責任。本文探討了在設備資產依賴型行業中減少能源消耗的機會，並定義了工廠可靠性工程師在針對附加摩擦損失、逸散排放損失和電熱損失方面的作用。只要集中努力，所有這些都是高度可控制的。除了減少工廠的溫室氣體影響外，減少這些損失還可以降低營運成本並提高營運可用性。

工業節能

美國約35%的終端能源和32%的能源消耗為工業營運提供動力。根據美國能源部(DOE)的說法，工業部門的能源消耗本質上是低效率的。



例如，在DOE的研究中化學製造業消耗約9.5億兆瓦時(MWh)的能源，僅佔能源部研究中總能源的27%以上。根據DOE所稱，通過採用當前的行業最佳實務，化學製造業可以將其能源預算減少至約7.2億兆瓦時，即減少24%。

美國能源部估計，透過研發的投資在實務上可實現最低360兆瓦時的發電量，從

而將能源消耗減少一半。假設一個工業能源成本為0.066美元/千瓦時，採用當前最先進的能源管理實務每年可單獨為美國化學製造行業節省150億美元的能源成本，研發投資每年可節省高達380億美元。

石油精煉、採礦、紙漿和造紙行業也存在類似的機會（表1）。這些行業占美國所有工業能源消耗的80%以上。

表1. 部分重工業按行業降低能源消耗的潛力

	Chemical manufacturing	Petroleum refining	Mining and minerals	Pulp and paper
Study year	2015	2015	2007	2015
Current consumption in TWh-eq (10 ¹² Wh)	944	931	365	618
State of the art in TWh-eq (10 ¹² Wh)	720	808	289	482
Practical minimum in TWh-eq (10 ¹² Wh)	362	575	170	439
Current energy cost (U.S.\$ billions @ \$0.066/kWh)	\$62.3	\$61.4	\$24.1	\$40.8
Savings with current state-of-the-art practices (U.S.\$ billions @ \$0.066/kWh)	\$14.8	\$8.1	\$5	\$9
Savings with R&D to achieve practical minimum (U.S.\$ billions @ \$0.066/kWh)	\$38.4	\$23.5	\$12.9	\$11.8
Current carbon emissions (millions of mt of CO ₂ -e)	667.6	658.1	258.2	437.2
Reduced carbon emissions with current state-of-the-art practices (millions of mt of CO ₂ -e)	158.7	87	53.5	96.3
Reduced carbon emissions with R&D to achieve practical minimum (millions of mt of CO ₂ -e)	411.7	251.3	138.2	126.8
Current social cost of carbon (U.S.\$ billions at \$50/mt)	\$33.4	\$32.9	\$12.9	\$21.9
SCC savings/year: current consumption to state of the art (\$ billions @ \$50/mt)	\$7.9	\$4.4	\$2.7	\$4.8
SCC savings/year: current consumption to practical minimum (\$ billions @ \$50/mt)	\$20.6	\$12.6	\$6.9	\$6.3

從碳排放和相關的碳社會成本(SCC, Social Cost of Carbon)的角度考慮這個機會。根據DOE的數據，二氧化碳當量單位(CO₂-e)約為0.707 kg/kWh。對於化學工業來說，這相當於每年約6.68億公噸二氧化碳的碳足跡當量。SCC的估價差異很大，但最低廉的SCC估價是50美元/公噸。

SCC對美國化學製造業能源消耗的影響每年大約為330億美元。採用當前最先進的能源管理實務可以將SCC影響減少近80億美元。為實現能源使用的實際下限而進行的研發投資可以減少超過200億美元的SCC影響。將此推論到整個美國工業部門，通過實施現有的最先進實務，SCC每年可減少大約270億美元，而通過研發投

資每年可減少約500億美元，這些被避免的SCC影響是除了直接經濟節省之外的數值。

提高設備資產密集型行業的能源效率是實現組織儀表板上所有目標的特殊機會，改善能源消耗帶來的節省直接轉化為利潤。一般來說，設計、運作和維護更好的電力系統本質上比效率較低的溫室氣體系統更安全。當然，能源是溫室氣體排放的主要驅動力。將工業能源消耗降低到當前最佳實務將使全國溫室氣體排放量減少4%以上；對工業能源管理研發的投資可以使美國的碳足跡減少10%以上。

“放眼全球，行動本地”這句話通常被認為是20世紀初由蘇格蘭世紀城市規劃

師帕特里克·吉德斯(Patrick Geedes)所說的⁶。對於負責管理製造或加工廠或任何其他設備資產密集型行業中的實物資產的可靠性工程師來說，此聲明相當於管理附加摩擦、逸散排放和電熱損失。工廠的可靠性工程師在實現這一目標方面發揮著關鍵的作用。

管理附加摩擦損失

機械系統轉換和傳遞能量以完成工作，機械部件有多種類型。例如，電動機將電能轉換成旋轉機械能；內燃機將化學能轉化為旋轉機械能；齒輪減速器創造機械優勢，而齒輪增速器創造速度優勢；聯軸器和皮帶傳動通過機械連接傳遞能量，而液壓和氣動系統通過流體動力機構傳遞能量。機械驅動系統的目標是盡可能有效地轉換能量並傳輸能量以完成工作，例如破碎、泵送、輸送或吹送。

摩擦學領域是“相對運動中相互作用的表面的科學和工程。它包括摩擦、磨損和潤滑的原理⁷。”工業設備中的非生產性附加摩擦損失約佔工業總能源預算的7.5%^{8,9}；該數字約佔工業能源損失總量的三分之一，美國能源部估計，通過部署現有的行業最佳實務可以恢復這些能源損失。

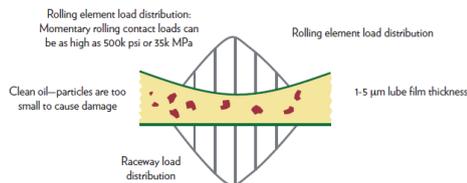
有幾種相對簡單、易於實施且經過驗證的措施可用於管理工業廠房和工廠中附加摩擦引起的能量損失。作為對設備所有者的好處，通過主動管理附加摩擦損失來減少能源消耗和相關的溫室氣體，還可以最大限度地減少設備磨損，並且通常可以提高設備的可靠性和可用性。

這些成果是通過關注幾個簡單的原則來實現的：緊固件、潤滑、對準和平衡^{10,11}。如果機器以機械方式固定，軸和滑輪對齊並且旋轉組件精確平衡，則機器振動引起的摩擦就會減少。正確潤滑機器還可以最大限度地減少附加摩擦損失。

在微觀層面上，機械系統中的能量傳遞取決於機器元件(例如軸承的滾動元件和滾道)通過很少超過5微米的關鍵潤滑油膜的分離(μm 微米)厚度，這小於紅血球的直徑，軸承中或牽引齒輪齒節線處的臨界潤滑油膜上的瞬時載荷可達500,000 psi (35k MPa)。潤滑油具有特殊的特性，其粘度會隨著壓力的變化而彈性(暫時性的)增加。在操作負荷下，粘度增加導致油膜強度增加，這就是因為油是優良潤滑劑的原因之一。然而，該薄膜的強度是有限的，並且可能會因潤滑劑降解、污染或兩者兼而有之而受到損害(參見圖1)。

圖1. 潤滑劑分離負載的機器表面

A blood cell-sized film of lubricant separates loaded machine surfaces, which reduces friction, wear and energy

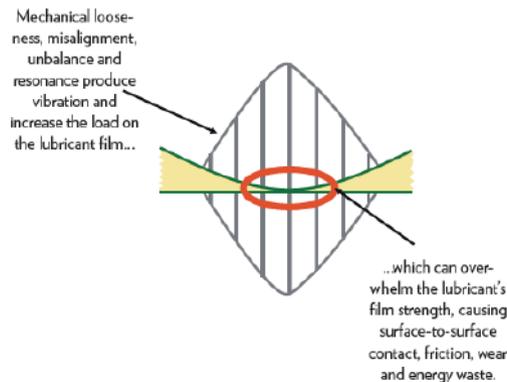


Source: Drew D. Troyer, Focus on FLAB With Proactive and Precision Maintenance—Coursebook, Sigma-Reliability Solutions/T.A. Cook Consultants, 2014-2020.

機器的基座和地基通常旨在作為單一質量的移動，未擰緊、缺失和繃緊不當的緊固件會造成機械移動。此外，機器的不同部件（例如馬達、變速箱和唧筒）必須精確對齊以避免晃動。同樣地，旋轉機器元件必須精確平衡，以確保旋轉組件圓周周圍的質量分佈均勻。

機械鬆動、中心點沒對準和不平衡單獨或組合所有的這些情況都會導致機器振動，從而增加微觀關鍵潤滑油膜上的負載。如果該薄膜強度被振動引起的動態力所淹沒，則會發生表面與表面的接觸，並導致附加摩擦能量損失及增加機器的磨損（參見圖2）。

圖 2. 機械振動



Source: Drew D. Troyer, *Focus on FLAB With Proactive and Precision Maintenance—Coursebook*, Sigma-Reliability Solutions/T.A. Cook Consultants, 2014-2020.

在許多行業中，皮帶輪和V型皮帶用於將馬達驅動器連接到風扇、唧筒、輸送機、破碎機和類似設備。三角帶繃緊不當會導致打滑和摩擦能量損失。

我最近對8台皮帶驅動圓錐破碎機進行了皮帶打滑研究，這些破碎機由380 kW馬達驅動，每台在80%的負載下運行，每年運行7,000小時。驅動系統的平均皮帶打滑率為15%，而同類最佳的最大皮帶打滑率為2%。這些驅動器上的V型皮帶維護不當導致的摩擦損失每年超過200萬千瓦時的損失。按0.06美元/千瓦時計算，這相當於浪費120,000美元的能源成本和近1,500 噸二

氧化碳當量的每年排放量。

對於所研究的8台破碎機來說，與滑移相關的SCC影響每年為72,000美元。消除這些摩擦損失還將使工廠能夠將運行中的破碎機從八台減少到七台，而不會造成生產損失，並為工廠留下閒置產能，從而提高生產可靠性。

除了控制振動之外，還必須正確選擇潤滑劑本身並進行適當維護，以確保潤滑劑膜強度的完整性。粘度是潤滑劑最重要的特性，因為它提供了運動表面之間的尺寸分離。如果粘度太低，潤滑劑缺乏分離機器表面所需的油膜強度；但如果粘度過

大，摩擦液攪拌會產生能源浪費。潤滑油添加劑—特別是防止金屬與金屬粘附且能進一步減少機器摩擦和磨損的摩擦改進添加劑—也必須謹慎選擇¹²。

潤滑油健康的另一個重要面是污染控制，最常見的污染物是污垢顆粒和水。然而，發動機也會受到煙灰、防凍劑和燃油稀釋污染物的影響。懸浮在油中的顆粒污染物會產生數百萬個瞬時摩擦微接觸。顆粒數在5到15之間 μm 尺寸範圍特別有害，因為它們數量眾多，潤滑劑不容易沉降，並且尺寸完美以橋接潤滑劑膜。

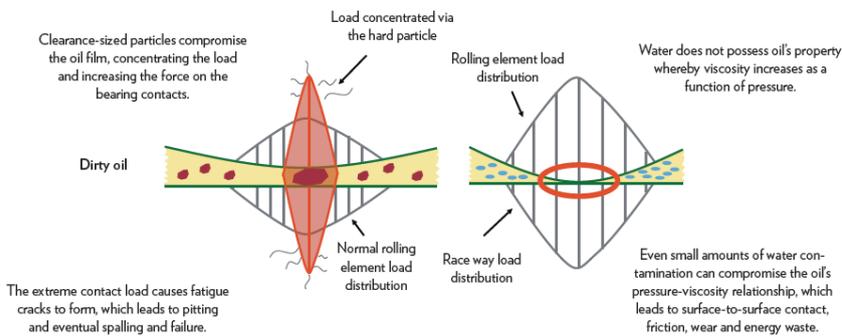
這種現象會在機械系統的配合表面之間產生顯著的應力集中(圖3)。回想一下，接觸表面之間的典型接觸載荷可達 500,000

psi (35k MPa)。如果顆粒將該力集中到十分之一的表面積上，則力會增加到500萬psi (350k MPa)。這會在滾動接觸中產生大量的摩擦和接觸疲勞磨損，在滑動接觸中產生大量的磨料和粘著磨損。單獨而言，這些摩擦微接觸不會消耗大量能量，但總的來說，損失卻很大。

潤滑劑中水污染的存在有著類似的問題。如上所述，在接觸負載的壓力下，油的粘度急劇且彈性地增加，這是潤滑劑油膜強度的主要組成部分，水不具備這種性質。此外，當水污染潤滑劑時，即使是極少量的水，也會損害油的壓力-粘度關係。這會導致表面接觸、摩擦、能源浪費和機器磨損，如圖3所示¹³。

圖 3. 汙染

Particle and water contamination increase friction in mechanical systems



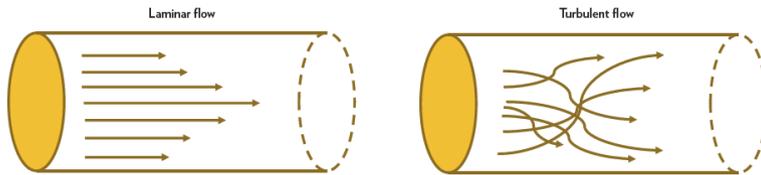
Source: Drew D. Troyer, *Focus on FLAB With Proactive and Precision Maintenance—Coursebook*, Sigma-Reliability Solutions/T.A. Cook Consultants, 2014-2020.

流體輸送管道和軟管的適當尺寸和設計是其他機會以顯著減少摩擦能量損失的；通常，希望盡量減少管道和軟管系統中的湍流。當流態為層流而非湍流時，流體輸送系統的能源效率最高(圖4)。流態

具有由無因次量雷諾數的特性，2,000或更低的雷諾數可產生相對有效的層流。雷諾數為4,000或更高時將產生低能效的層流。2,000到4,000之間的範圍稱為過渡流。雷諾數越低，流體流動的能量效率越高。

圖 4. 層流VS.層流湍流

Visual comparison of laminar and turbulent flow regimes



通過確保管道的內徑足以適應流體流速而不產生過多的湍流來實現層流。例如，水以每分鐘600加侖的速度流經內徑6英寸的線性管道1,000英尺所需的能量，幾乎是流經8英寸直徑管道所需能量的4倍，是流經10英寸直徑管道所需能量的12倍以上。還建議盡量減少管道中的急轉彎，尤其是大於90度的轉彎，因為它們也會產生消耗能量的湍流¹⁴。

超越機械摩擦損失

雖然減少機械系統中的附加摩擦損失為減少能源消耗和相關溫室氣體提供了絕佳機會，但減少加壓和壓縮流體的無組織排放、優化鍋爐和發動機的燃燒效率以及提高電氣系統的能源效率也不容忽視。

當壓縮或加壓流體洩漏時，用於壓縮或加壓它們的能量就會消失。壓縮空氣系統的洩漏率達到20%或更高的情況並不罕見。機載超聲波分析儀等技術可以輕鬆發現通常發生在輪緣、連接器、閥門和其他緊固點的洩漏，從而易於修復和消除。當甲烷和其他揮發性有機化合物(VOC)排放時，對環境的影響更大。例如，甲烷作為溫室氣體的效力比二氧化碳強25至80倍。此外，VOC排放因其易燃性而造成安全隱患。

管理鍋爐、噴氣發動機和往復式發動機的燃燒效率是提高能源效率和減少溫室氣體排放的必要條件。煤炭、柴油和其他

碳氫化合物燃料的燃燒效率已經很低。當燃燒系統沒有正確調整和維護，或者燃料質量受到影響時，情況會變得更糟。

由於電氣通路上的電阻過大(I^2R 損失)，電能不必要地轉化為熱量，從而被浪費。為防止這些損失的巨大機會¹⁵，包括：

- 選擇高效率的馬達。
- 設計電路並確定其尺寸，以最大限度地減少電加熱。
- 使用變頻驅動器。(注：必須考慮交流到直流轉換和直流到交流逆變損耗。)
- 減少電壓和電流諧波失真。
- 保持電氣平衡(相位間)：電壓、電流、電感和電阻。

雙重方法

應對氣候變化必須從供給面和需求面兩方面著手。顯然，在供給面，我們必須努力創造零或接近零碳的能源。但我們也必須通過減少消費來管理需求面。製造和加工行業可以通過瞄準附加機械摩擦損失、與無組織排放相關的損失和電加熱損失來顯著減少能源消耗及其相關的碳足跡。這些好處是在不損失生產量的情況下實現的。

在美國，工業能源管理實踐可以合理地使能源消耗和相關溫室氣體排放總體減少6%或更多。通過對實際可實現的能源效率實踐技術進行一些投資，該數字可以增加至15%。

參考文件:

- 1.U.S. Energy Information Administration (EIA), “The United States Uses a Mix of Energy Sources,” EIA, www.eia.gov/energyexplained/us-energy-facts.(<http://www.eia.gov/energyexplained/us-energy-facts>)
- 2.Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, “Energy Analysis, Data and Reports: Bandwidth Studies on Energy Use and Potential Energy Saving Opportunities-Multiple Heavy Industries,” www.energy.gov/eere/amo/energy-analysis-data-and-reports(<http://www.energy.gov/eere/amo/energy-analysis-data-and-reports>).
- 3.Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, “Bandwidth Studies on Energy Use and Potential Energy Saving Opportunities-Chemical Manufacturing,” 2015,www.energy.gov/sites/default/files/2015/08/f26/chemical_bandwidth_report.pdf(http://www.energy.gov/sites/default/files/2015/08/f26/chemical_bandwidth_report.pdf).
- 4.EIA, “U.S. Energy Explained: Energy Use in Industry,” www.eia.gov/energyexplained/use-of-energy/industry.php (<http://www.eia.gov/energyexplained/use-of-energy/industry.php>).
- 5.EIA, “U.S. Energy-Related Carbon Dioxide Emissions, 2019,” www.eia.gov (<http://www.eia.gov>).
- 6.Daniel Tarantola, “Thinking Locally, Acting Globally?” American Journal of Public Health, Vol. 103, No. 11, 2013, p. 1,926.
7. H. Peter Jost, “Lubrication (Tribology): A Report on the Present Position and Industry’s Needs,” Department of Education and Science, H.M.Stationery Office, 1966.
- 8.Ibid.
- 9.H. Peter Jost and Schofield, J. “Energy Saving Through Tribology: A Techno-Economic Review,” proceedings, Institution of Mechanical Engineers, Vol. 195, No. 1, 1981, pp. 151-173.
- 10.Drew D. Troyer, Focus on FLAB With Proactive and Precision Maintenance-Coursebook, Sigma-Reliability Solutions/T.A. Cook Consultants (2014-2020)
- 11.Drew D. Troyer, “Look to Tribology to Reduce Climate Change Impact,” RAM Review, <https://theramreview.com/look-to-tribology-to-reduce-climate-change-impact>.
- 12.Jim Fitch and Drew Troyer, Oil Analysis Basics, Noria Publishing, 2010.
13. Ibid.
- 14.Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, “Energy Tips-Pumping Systems,” October 2005, www.energy.gov/sites/prod/files/2014/05/f16/reduce_pumping_costs.pdf.(http://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/05/f16/reduce_pumping_costs.pdf)
- 15.Howard Penrose, Electrical Motor Diagnostics, second edition, Success by Design, 2008.

作者 :

Drew D. Troyer is a principal director with Accenture in Tulsa, OK. He received a master’s degree in sustainability and environmental management from Harvard University in Cambridge, MA. A senior member of ASQ, Troyer is an ASQ-certified reliability engineer.

資料來源:

Quality Progress, May 2023, pp36~43
Reprinted with permission from Quality Progress© 2023 AQS, www.asq.org
All rights reserved. No further distribution allowed without permission.

