

Application of the Theory of Inventive Problem Solving (TRIZ) to Creative Engineering Design for the Motor Cooling System of an Electric Vehicle

Yung-Jin Weng* and Dun-Yan Wu

Department of Mechanical and Energy Engineering, National Chiayi University,
Chiayi City, Taiwan

*Corresponding author, E-mail: yjweng@mail.ncyu.edu.tw

(Received 10 November 2016; final version received 27 April 2017)

Abstract

This paper aims to apply the tool of the Theory of Inventive Problem Solving (TRIZ) to the creative engineering design and discussion of the motor cooling system of the electric vehicle, and the permanent magnet motor cooling problem is used as the principal axis of the creative engineering design of this study. During the process of this study, the TRIZ tool is used to solve the possible cooling problems and energy efficiency issues caused by a running motor, and is intended to improve cooling efficiency and effectively avoid the problem of the accumulation of thermal energy, which causes constant increasing temperature and further causes the motor and surrounding mechanisms to be damaged. This paper uses the design and discussion of function analysis, with 76 standard solutions, 39 engineering parameters, and 40 invention principles in the TRIZ tool to design and discuss the possibility of improving cooling efficiency and creative design, which is expected to provide help and reference direction for the research and development of electric vehicles in the future.

Keywords: TRIZ, electric car, motor cooling, creative engineering design

References

- A., Hawkins, D., & Goss, J. (2015, March). Modern heat extraction systems for electrical machines-A review. In *Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD)*, 2015 IEEE Workshop on (pp. 289-296). IEEE.
- Christie, R., Dubois, A., & Derlaga, J. (2016). Cooling of Electric Motors Used for Propulsion on SCEPTOR.
- Chong, W. T., Hew, W. P., Yip, S. Y., Fazlizan, A., Poh, S. C., Tan, C. J., & Ong, H. C. (2014). The experimental study on the wind turbine's guide-vanes and diffuser of an exhaust air energy recovery system integrated with the cooling tower. *Energy Conversion and Management*, 87, 145-155
- Mann, D. (2002). *Hands on systematic innovation*.
- Putra, N., & Ariantara, B. (2017). Electric motor thermal management system using L-shaped flat heat pipes. *Applied Thermal Engineering*.
- Sheu, D.D. (2010). *Development of Systematic Innovation Process and Tools: Step Forward and Trends*. Source: Ministry of Science and Technology, R.O.C
- Xiong, J. J., & Zhou, L. T. (2015). The Research and Development of Motor Cooling Control System Based on Electronic Parking Brake Test Bench. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 733, pp. 674-679). Trans Tech Publications.
- Ye, L., Tao, F., Wei, S., Qi, L., & Xuhui, W. (2016, September). Experimental research on the oil cooling of the end winding of the motor. In *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2016 IEEE (pp. 1-4). IEEE.

TRIZ 發明性問題解決理論進行電動車馬達散熱系統之創意性 工程設計

作者：翁永進^{1,*}，和吳敦晏²

¹ 國立嘉義大學機械與能源工程學系副教授

² 國立嘉義大學機械與能源工程學系專題生

*通訊作者 E-mail：yjiweng@mail.ncyu.edu.tw

摘要

本研究致力於利用 TRIZ 發明性問題解決理論部分工具，進行電動車馬達散熱系統的創意性工程設計與探討，並以永磁馬達散熱問題，作為本研究創意工程設計主軸。研究過程中透過對馬達運轉造成的散熱性問題以及所帶來的能源使用效率等問題進行利用 TRIZ 工具進行可能的問題解決，希望能夠提升散熱效率並且有效避免因為熱能的累積，造成溫度不斷上升，進而導致馬達與周遭機構造成損壞的問題。本文分別經由 TRIZ 工具中的：元件功能分析(Function analysis)設計探討、76 標準解以及 39 工程參數和 40 發明原則等設計，探討提升散熱效率創新設計的可能，並期望能對未來電動車的研究發展能有所助益與參考方向。

關鍵詞： TRIZ、電動車、馬達散熱、創意性工程設計

7. 電動車馬達散熱性問題與現況分析

本研究主要探討之電動車，並設定其環境參數是的使用在熱帶或亞熱帶地區作為探討對象。經研究者觀察，熱帶與亞熱帶地區冬季平均溫度為攝氏 20 度，夏季平均溫度為攝氏 30 度，一般馬達在持續運轉情況下，若無適當冷卻系統，將可達到非常高的溫度，然而倘若在有冷卻系統的狀況下，一般馬達的溫度，依舊有機會達攝氏 70~80 度範圍以上。因此，馬達在高溫的狀況下，許多問題也將隨之而來，例如：導電效率下降、馬達壽命下降、軸承壽命下降，等等...。因此，對於行駛過程中，馬達因過熱造成的損壞將有甚大的機會，也將提高對行車駕駛帶來交通危險性，所以馬達的散熱性是一個值得重視的問題(Hawkins, 2015; Christie, 2016; Chong, 2014; Putra, 2017; Xiong, 2015; Ye, 2016)。

針對馬達散熱問題，目前一般的散熱方式有：氣冷式、水冷式以及整合式水冷系統等三種。其中最常見的即是氣冷式，該冷卻方式主要是利用行車速度所帶來的空氣來進行冷卻；其次水冷式則是利用液態水進行散熱；最後整合水冷式則是以空氣進行熱交換或排掉液態水作為冷卻方式。綜整以上三者，共通點是利用空氣來進行熱交換，但在熱帶與

亞熱帶地區的空气溫度介於攝氏 20 度到攝氏 30 度之間，利用空氣進行散熱，其效率仍然有限。在此，本文將先針對行駛距離長且時間久的狀況下與利用高效率的永磁馬達為主，以發明問題解決理論工具進行散熱效率創意工程設計之探討，最後再提出整合後的綜合性評估。

2. 發明性問題解決理論工具

2.1 76 標準解設計

圖 1 為本研究的問題模型為 76 標準解中 1.2 消除有害的作動關聯。其中，電力提供給銅線做產生磁能，然而因電阻等問題，造成銅線圈發燙，進而降低馬達壽命。而解決模型則採用解決模型 A、B(如圖 1)，對於場-物質模型給予消除、破壞或化解系統內有害作用之類型。希望能夠透過外加冷卻系統或一個場來提高散熱效率，進而阻斷過多的熱能造成馬達本身的危害。

(a)

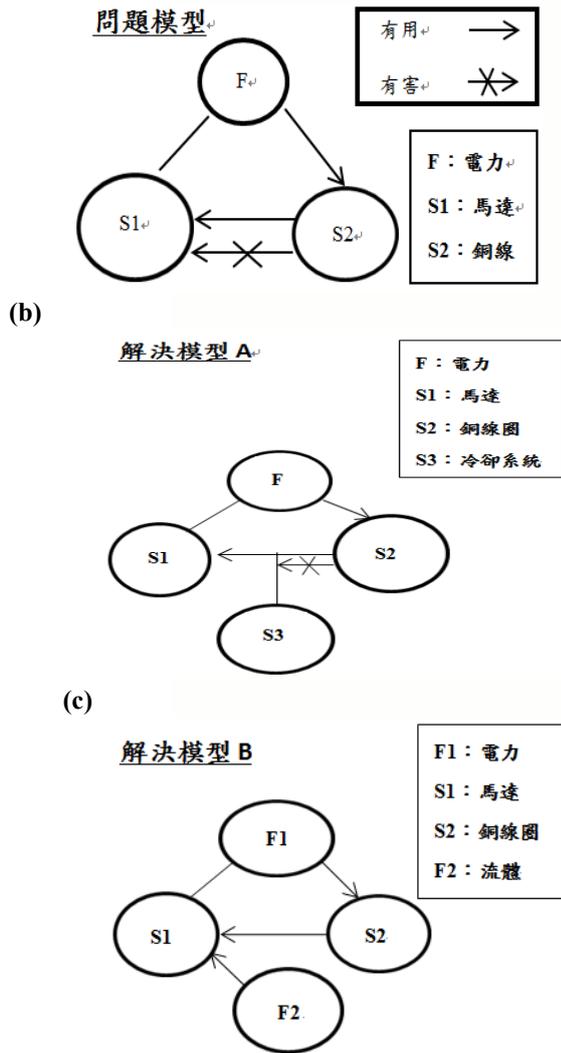


圖 1. 問題模型與解決模型

利用 76 標準解(圖 1)可以讓我們快速了解到散熱的重點與方法，是一個快速簡單的創新設計方式。利用此方法，我們發現可能進行創新的方法有 A 與 B 解決模型，分析如下：

利用解決模型 A：分析發現要避免馬達過熱就是利用冷卻系統把熱能吸收。本研究可以利用管線將冷氣流或液態水注入管線，讓其直接與發熱源接觸與作用。如圖 2 所示。

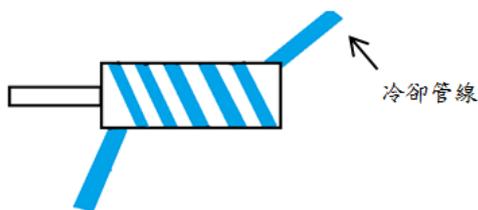


圖 2. 冷卻管線包覆馬達

利用解決模型 B：分析發現可以利用空氣動力場來進行改善，在馬達尾部裝上小型電風扇或是加壓器將空氣快速在其內部進出以利進行熱交換。再者，本研究可以透過化學力進行吸熱反應，在馬達表面加入兩個管線，讓內容物接觸進行化學反應來進行吸熱，如圖 3、圖 4 所示。

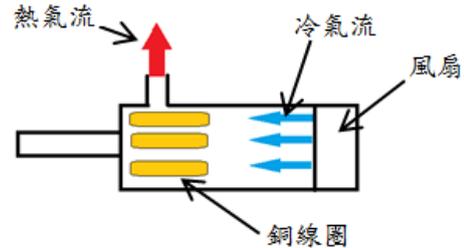


圖 3. 氣流快速進出入馬達內部

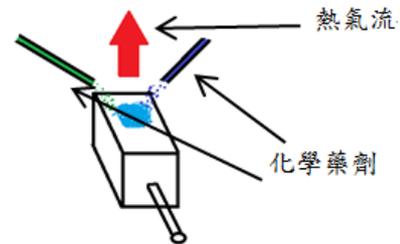


圖 4. 在表面利用化學反應進行吸熱反應

2.2 元件功能分析(Function analysis)設計

本部分首先針對馬達本身與冷卻系統的整體運作進行分析。初步將整體分成子系統(Sub-system)、系統(System)、與超系統(Super system)之分類，如表 1。並將其分類為系統：馬達外殼、銅線圈、馬達轉子；子系統：電力、負載；超系統：冷卻系統。利用分類以便於我們找出散熱問題產生之關聯性，如表 2、圖 5、6 所示：

表 1. 子系統、系統、超系統

子系統(Sub-system)	電力、負載
系統(System)	馬達外殼、銅線圈、馬達轉子
超系統(Super system)	冷卻系統

表 2. 系統各部元件作用情況分析

	電力	銅線圈	馬達轉子	馬達外殼	負載	冷卻系統	外界
電		o	x	x	x	o	x

力							
銅線圈	o		o	o	x	x	o
馬達轉子	x	o		o	o	x	o
馬達外殼	x	o	o		x	o	o
負載	x	x	o	x		x	o
冷卻系統	o	x	x	o	x		o
外界	x	o	o	o	o	o	

o：有相互作用 x：無相互作用

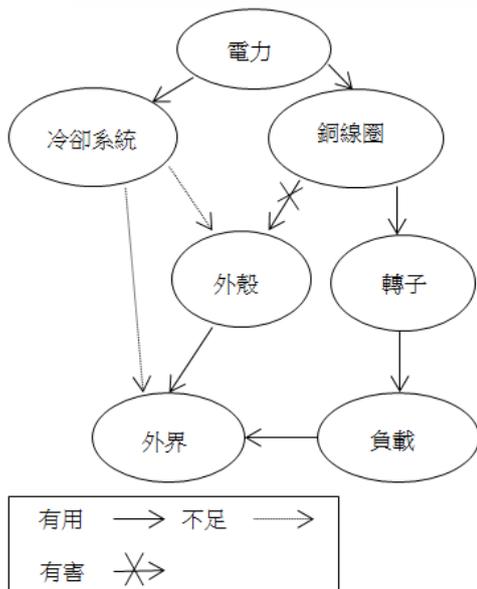


圖 5.藉由表 2 進行圖示分析

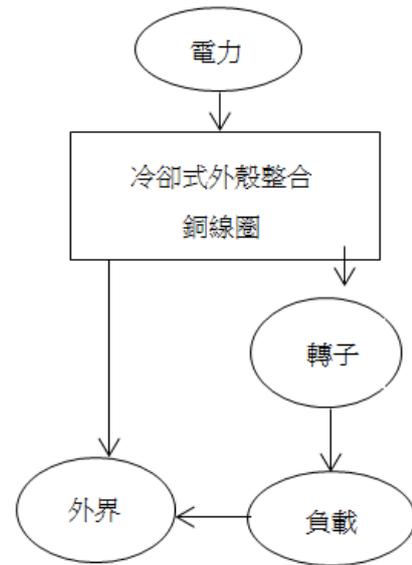


圖 6.簡約設計

經由系統功能分析後，再進行簡約的設計。預期將冷卻系統與馬達外殼緊密結合。希望讓馬達外殼本身的結構上也能進行有效的散熱，降低對冷卻系統的依賴性。另外，在外殼的內部結構設置凸槽，以便銅線圈放置。此凸槽內有鑲入冷卻系統以便快速散熱。

2.3 39 工程參數和 40 發明原則設計

本章節主要是使用創意性問題解決理論之 39 工程參數和 40 發明原則(Mann, 2002;許棟樑, 2010)。本研究希望解決的問題是提高散熱效率，而解決的方法是加裝冷卻系統，快速降低馬達內部溫度，但出現新問題會是增加了重量、體積等，如表 3 所示。所以本研究欲改善參數為：溫度(17)、功率(21)、物體產生有害因素(31)；惡化參數為：固定件重量(2)、固定件體積(8)、能源損失(22)、溫度(17)，如表 4。利用以上參數進行衝突矩陣以找尋創新的可能，如表 5 所示。

表 3. 問題、解決方法與新問題

問題	馬達線圈通電時，會因為銅線圈的內電阻造成電力的損失，進而發熱。
解決方法	加裝冷卻系統以加速散熱速度以及提高銅線圈通電效率。
新問題	加裝冷卻系統會增加重量、體積，也會因為額外加裝壓縮機而產生額外的熱能與能量損失。

表 4.改善與惡化工程參數

改善	溫度、功率、物體產生有害因素
惡化	固定件重量、固定件體積、能源損失、溫度

表 5.矛盾矩陣表

惡化 \ 改善	2. 固定件重量	8. 固定件體積	22. 能源損失	17. 溫度
17. 溫度	22,35,32 22. 將有害變有利 35. 參數改變 32. 改變顏色	35,6,4 35. 參數改變 6. 萬用 4. 非對稱	21,17,35,38 21. 快速作用 17. 移至新空間 35. 參數改變 38. 強氧化劑	
21. 功率	19,26,17,27 19. 週期性運動 26. 複製 17. 移至新空間 27. 拋棄式	30,6,25 30. 彈性膜和薄膜 6. 萬用 25. 自助	10,35,38 10. 預先作用 35. 參數改變 38. 強氧化劑	2,14,17,25 2. 分離 14. 曲度 17. 移至新空間 25. 自助
31. 物體產生有害因素	35,22,1,3,9 35. 參數改變 22. 將有害變有利 1. 分割 39. 惰性環境	30,18,3,5,4 30. 彈性膜和薄膜 18. 機械震動 35. 參數改變 4. 非對稱	21,35,22,2 21. 快速作用 35. 參數改變 22. 將有害變有利 2. 分離	22,35,2,24 22. 將有害變有利 35. 參數改變 2. 分離

在大自然的世界中，我們不難發現到生物都需要進行熱交換以便散熱，主要有增大表面積以及相轉變這兩種方法進行散熱。增大表面積有助於增加散熱接觸面積，例如：植物葉片背面的散熱機制等。相轉變則是利用某一物質的溶沸點進行吸熱反應，進而把過多的熱帶走，例如：人類透過汗水進行散熱、透過泡水進行降溫等，原理如下式(式 1)。

$$Q = KA\Delta T/L \quad (1)$$

其中，Q：傳導散熱量；

K：導熱係數；

A：導體橫截面積；

ΔT ：傳熱路徑兩端溫差；

L：傳熱路徑長度；

由上述公式佐證可得知，在馬達外殼材質不變下，提高表面積以及傳熱路徑兩端溫差有助於提高傳導散熱量。經矛盾矩陣的分析，以下是經由發明原則提出之設計方向，發現可能進行創新改良的發明原則有：35.參數改變、17.移至新空間、1.分割、22.將有害變有利。其中，原則 35.改變參數：原本的水冷式散熱法主要是利用水並加入冷卻劑來達成散熱目的，不過水的溫度仍然無法達成我們所需的要求。在管線裡面加入加壓氮氣，利用高壓氮氣可使我們得到更低溫的方式將馬達過多的熱帶走；原則 17.移至新空間：普遍的馬達外殼都是屬於四方形的平面，表面散熱效率並不高。本研究在表面加裝鰭片用來增加表面積以提高散熱效率；原則 1.分割：將管線裝入馬達內並讓管線線路散開，使銅線圈與銅線圈之間都有管線碰觸，藉以增加散提升熱效率，並且可解決降低高溫儲存在馬達太久所帶來的損壞；原則 22.將有害變有利：利用賽貝克效應 (Seebeck effect)，俗稱熱電效應。在馬達表面裝上 N-P 型電晶體進行熱電效應，利用熱來產生電能。但是其目前的轉換率大約 5 到 10 個百分比，可以輕易地發現能量轉換效率並不高。

3.馬達散熱創新之高壓氮氣整合式冷卻系統與綜合性評估

經由 76 標準解、元件分析探討、及 39 工程參數和 40 發明原則設計探討這三種創意性工具進行討論後，利用水冷管線結合加壓氮氣管線擴散在馬達線圈周圍，並讓外殼嵌滿致冷晶片，透過行車氣流將致冷晶片的熱量帶走，以達成散熱目的。

本設計是快速將熱量快速帶走，以達成快速散熱目的。透過高壓氮氣可獲得較低溫冷卻管線，而透過加裝致冷晶片此一技術，可不用過多的設備(例如：壓縮機等)來進行冷卻，可減輕整體重量又可快速冷卻。本文概念設計圖，如圖 7~ 10 所示。

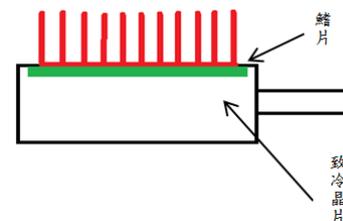


圖 7.在外殼上裝滿致冷晶片

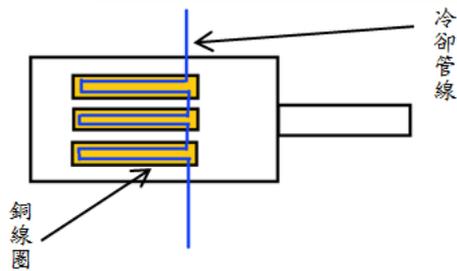


圖 8.冷卻管線導入馬達內部

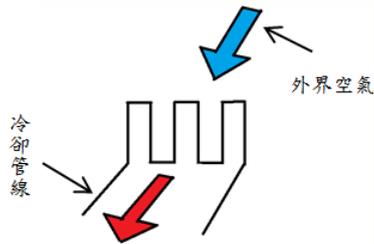


圖 9.管線與外界進行熱交換

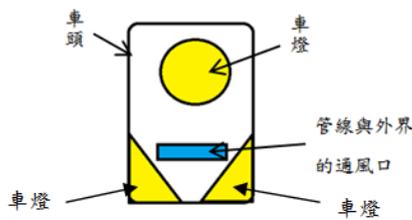


圖 10.通風口的位置

4.總結與未來展望

本研究 TRIZ 發明性問題解決理論進行電動車馬達散熱系統之創意性工程設計，主要致力於利用三種 TRIZ 常用的創意性發明技巧工具，進行提高馬達散熱效率之設計。過程中，充分了解馬達內部構造以及現今的散熱系統原理，並充分運用三種創意性工具輔助設計，進而獲得相關具有創意性之產品，分別是：a.利用 76 標準解快速了解問題癥結點並經過分析，獲得導入冷卻管線降溫、利用小型電風扇讓空氣快速在馬達內部快速進出入、在馬達外殼進行化學反應中的吸熱反應，以上共三種改良方式；b.利用元件功能分析設計探討後，簡化了冷卻系統以及馬達外殼，讓這兩個系統結合方式，降低外殼對於冷卻系統的依賴性；c. 39 工程參數和 40 發明原則設計後，獲得四種發明原則(35.改變參數、17.移至新空間、1.分割、22.將有害變有利)，並分別提出其可能的解決方式。最後，整合了元件分析與 39 工程參數和 40 發明原則設計，並獲得了高壓氮氣整合式冷卻系統，具有相當創新與可行性。經由以上

操作，發現 TRIZ 創意性工程理論確實能用來解決問題並創新，可以獲得更妥善的改良方式與建議。

參考文獻

許棟樑，(2010)。系統化創新流程與工具發展：步進改善與趨勢。

References

- A., Hawkins, D., & Goss, J. (2015, March). Modern heat extraction systems for electrical machines-A review. In *Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), 2015 IEEE Workshop on* (pp. 289-296). IEEE.
- Christie, R., Dubois, A., & Derlaga, J. (2016). Cooling of Electric Motors Used for Propulsion on SCEPTOR.
- Chong, W. T., Hew, W. P., Yip, S. Y., Fazlizan, A., Poh, S. C., Tan, C. J., & Ong, H. C. (2014). The experimental study on the wind turbine's guide-vanes and diffuser of an exhaust air energy recovery system integrated with the cooling tower. *Energy Conversion and Management*, 87, 145-155
- Mann, D. (2002). Hands on systematic innovation.
- Putra, N., & Ariantara, B. (2017). Electric motor thermal management system using L-shaped flat heat pipes. *Applied Thermal Engineering*.
- Sheu, D.D. (2010). Development of Systematic Innovation Process and Tools: Step Forward and Trends. Source: Ministry of Science and Technology, R.O.C
- Xiong, J. J., & Zhou, L. T. (2015). The Research and Development of Motor Cooling Control System Based on Electronic Parking Brake Test Bench. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 733, pp. 674-679). Trans Tech Publications.
- Ye, L., Tao, F., Wei, S., Qi, L., & Xuhui, W. (2016, September). Experimental research on the oil cooling of the end winding of the motor. In *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2016 IEEE* (pp. 1-4). IEEE.

作者簡介



翁永進博士自 2013 年以來在國立嘉義大學當任教職。在此之前，他在開南大學、中央大學與台灣科技大學機械系等學術單位分別擔任專兼任教職。翁教授從台灣大學獲得工學博士學位後、持續致力於創新研究與微系統製程開發為主要研究主題。他的研究領域包括微奈米壓印、精微與創新性之塑膠成型技術、微元作成形製程、TRIZ 研究。



吳敦晏目前就讀於國立嘉義大學機械與能源工程學系專題生。對於創新研究方法領域很感興趣，曾參加過第九屆海峽兩岸創新方法研討會並進行口頭論文發表，目前正積極朝系統性創新此方向領域邁進。