



作者：徐業良(2010-12-12)；推薦：徐業良(2010-12-12)。

附註：本文發表於汽車購買指南雜誌，2011年一月號，史丹福專欄。

把馬達裝在車輪裡—談輪內馬達

前一陣子讀到一段保時捷跑車創始人費德南保時捷(Ferdinand Porsche)的生平故事。保時捷先生 1875 年出生於現在的捷克境內的小城 Maffersdorf，從小便展現了過人的機械天分，但沒有機會接受正式的工程教育，上了幾年技術學校之後，18 歲便開始在維也納一家電機公司工作。1898 年時 23 歲的保時捷先生轉到維也納一家汽車公司 Jakob Lohner & Co 工作，開始在汽車界嶄露頭角，一生著名的汽車作品包括 Mercedes-Benz SSK 跑車、福斯金龜車 Beetles、二次世界大戰德軍犀利的「虎式戰車」，當然還有跑車迷至今仍鍾愛不已的第一部保時捷跑車 Porsche 356。

噢，這個月的史丹福專欄不是要和大家討論保時捷跑車，而是想從保時捷先生的第一個汽車作品開始談起。

您知道，保時捷先生的第一個汽車作品，是一部電動車。

1897 年保時捷先生還在維也納的電機公司工作時，便開始構思把電動馬達裝置在車輪輪轂內來直接驅動車輪，1898 年保時捷轉到汽車公司工作後開發的第一部汽車便採用這樣的設計，兩個前輪各用一顆輪內馬達(in wheel motor)，或者稱作輪轂馬達(wheel hub motor)。汽車在當時仍是非常稀有的商品，1900 年巴黎世界博覽會展出了這部由電池供電的電動車，叫作“Lohner Porsche”，可說是大為轟動，隨後幾年一共賣出了 300 部給富有的買主。

二十世紀在汽車工業剛剛萌芽，年輕的保時捷先生已經有許多現在看來都十分前衛的想法。當時汽車動力系統發展主流已經逐漸趨向以內燃機引擎經由傳動系統驅動車輪，但是保時捷認為以輪內馬達直接驅動車輪的機械效率，遠高於內燃機引擎系統，他的第一部汽車作品仍堅持發展使用輪內馬達的電動車。當然保時捷也碰上了現代電動車最大的問題—電池蓄電量不足，當年這部 Lohner Porsche 需要搭載 1800 公

斤重的鉛酸電池。保時捷先生對這個問題的解答是，混合動力電動車！1901 年保時捷開發了一部名為“Mixte”的混合動力電動車，以一個內燃機引擎驅動發電機對一組小型電池充電，帶動兩只使用輪內馬達驅動的前輪。

這個保時捷先生早年的故事似乎不常被提起（至少我是第一次讀到），但讀過之後覺得實在是太酷了，110 年前，保時捷先生已經發明了現代最流行的序列式混合動力電動車，用的還是輪內馬達！

從古老的黑白照片看來，這部 Lohner Porsche 外型像一部沒有馬的馬車，可完全沒有跑車的意象，但是當年這部電動車的時速可以「高達」56 公里，打破了當時好幾項汽車速度的紀錄。隨後內燃機引擎動力大幅提升，彌補、超越了輪內馬達在傳動效率上的優勢，汽車動力技術走向內燃機大一統，直到一百年後的今天電動汽車才再度崛起。

當年保時捷先生發明的輪內馬達技術，也回到睡美人城堡裡沉睡，一睡就是一世紀…

二十一世紀汽車動力技術緩步但穩定地走向電動車，輪內馬達技術也才再次受到重視。說實在的，目前大部份的電動車設計，還是在從內燃機引擎汽車緩緩演化的過程當中，整體的設計思考還是依循內燃機引擎汽車的模式，只是把動力源從內燃機引擎轉換成電動馬達。內燃機引擎當然不太可能裝在輪轂內，不過改用電動馬達的話，回復到一百年前保時捷先生的概念，採用輪內馬達直接驅動車輪，卻應該是再自然不過的思考。

採用輪內馬達直接驅動車輪，最明顯的好處是動力傳輸的路徑大幅縮短，能量損失減少，傳輸的效率相對也大幅提高。除了動力傳輸效率之外，輪內馬達也可以減少大量傳動元件，省下成本、重量之外，更讓車室內空間加大，設計的自由度大幅提高。此外動力源移到車輪上，汽車的「引擎室」裡不再要裝置引擎（混合動力電動車可能還是要裝置內燃機引擎驅動的發電機），車頭的造型設計、空氣動力學曲線設計、乃至於結構補強設計，都可以有更大的彈性。

從車輪驅動控制的觀點來看，採用輪內馬達也有許多先天的優勢。如果四個車輪都安裝了輪內馬達，這部車立刻變成 4WD 四輪驅動車，而且各個車輪的動力還是完全獨立控制，哪一個車輪需要動力時，馬達控制器可以直接提高輸出電流、提升特定車輪驅動馬達動力；當感測到某一個輪胎開始打滑時，馬達控制器也可以調整電流輸出，降低特定車輪驅動馬達動力。四輪獨立動力控制可以完全用軟體程式控制的方式

輕鬆但精確地達成，不需要像傳統機械式的傳動系統，得靠差速器複雜又有些勉強地對車輪作動力分配。

剎車控制也是如此，輪內馬達可以提供 ABS 剎車動作及四輪剎車力道的獨立控制之外，而當車輛減速或是下坡行駛，輪內馬達就變成發電機，開始對電池充電，回收剎車時汽車損失的動能。

輪內馬達，一百多年前的發明，這會兒卻嗅到現代汽車革命性改變的可能性。

其實輪內馬達早就已經被大量應用在電動腳踏車或電動機車上，特別是在中國。您在中國城市的馬路上基本上是看不到使用汽油引擎的機車，馬路上跑的幾乎都是電動機車，如果您看到機車後輪輪軸部位有一個大大的金屬圓盤，那就是輪內馬達了。

如果您家中的電動腳踏車或電動機車，還是在車架上掛了一個笨重的電動馬達，用鏈條驅動車輪，Mmm，不夠先進噢…

台灣的技術自然也不落人後。輪內馬達技術上最主要的困難，就是怎麼樣把電動馬達壓縮裝置在車輪輪轂小小、圓形的空間裡面，傳統馬達的定子、轉子與線圈的形狀和佈置都得要「輪圈化」，作成圓餅形狀，馬達的重量、厚度更需要輕薄短小。台灣工研院機械所今年（2011 年）發表了一款「超薄型輪內馬達」，重量僅僅 2.1 公斤、厚度 1 英吋，單位重量產生的扭力有 6Nm/kg，算是非常先進的技術，目前主要的應用對象是電動自行車。台灣一向是自行車王國，以外銷導向的台灣自行車，已在全球市場具有高知名度，這款超薄型的輪內馬達使得新一代電動自行車產品設計的可能性大增，引起自行車業界很大的震撼。目前工研院的研究團隊正繼續開發電動機車使用的薄型輪內馬達，希望擴大技術的應用層面與影響力。

輪內馬達在汽車應用上，國外各大汽車廠動作最積極、最有具體成果的，應該算是日本三菱汽車 Mitsubishi Motors 了。三菱汽車選擇輪內馬達和鋰離子電池作為其下一代電動車開發的兩項核心技術，早在 2007 年三菱汽車就已經發表了一款 MIEV 概念車，全名就是「三菱輪內馬達電動車(Mitsubishi In-wheel motor Electric Vehicle)」。三菱汽車正全力將他們的 MIEV 概念車落實在新一代的 Colt EV 上，這部小型電動車後兩輪由輪內馬達驅動，目前正在進行深入的實車行駛測試。

在汽車動力學上有一個專有名詞叫作「未懸載質量(unsprung mass)」，指的是輪圈、輪胎等沒有被懸載彈簧所支撐的質量。一般來說，汽車的未懸載質量希望越輕越好，汽車才能有較佳的抓地力和行路舒適性（這也是為什麼汽車要採用輕量化的鋁合金輪圈的重要原因）。使用輪內馬達造成的一個特殊問題是，馬達裝置在輪圈內，大

幅提高了汽車的未懸載質量，此外輪內馬達要隨著汽車輪胎跋山涉水，振動、塵土、浸水，工作環境遠比裝在汽車引擎室裡惡劣許多，因此輪內馬達的可靠性和耐久性也是重要問題。這兩個輪內馬達的特殊問題，也正是三菱汽車在 Colt EV 實車行駛測試的重點。

輪胎公司對於輪內馬達技術的重視，可能還更超過汽車廠。輪胎技術深究起來其實也挺複雜的，但是技術層面總是不太受注意，大部分車主買新輪胎時也只是問價格多少，壽命長不長之類的問題。輪內馬達技術的發展，應該是輪胎公司成為汽車技術鎂光燈焦點最好的機會。

普利司通(Bridgestone)輪胎公司幾年前就發表過一款輪內馬達原型，馬達的設計和三菱汽車採用的輪內馬達相同，是一個環形的無軸馬達，外環是馬達轉子(rotor)固定在車輪輪轂和輪圈內緣隨著車輪旋轉，內環是馬達定子(stator)，和車架與懸載系統連結。普利司通的特殊設計是在輪圈內又增加了一組彈簧和減震筒，把額外增加的輪內馬達重量給懸載起來，希望能解決前面提到輪內馬達造成未懸載質量增加，影響汽車抓地力和行路舒適性的問題。

另一個輪胎大廠米其林(Michelin)也很投入在輪內馬達的開發，他們發表的「主動式車輪技術(Active wheel Technology)」採用的輪內馬達設計概念，倒是和三菱汽車、普利司通環形的輪內馬達完全不同。米其林的主動式車輪基本上就是一個標準的車輪，輪轂內裝了兩個馬達，一個馬達驅動車輪，另一個馬達則是一個主動式懸載系統的驅動器，用來改善行車舒適性、操控性、和穩定性。照片上看來輪轂裡裝了這兩個馬達已經很擠了，但是據稱這個主動式車輪還是可以裝上標準的剎車碟。

米其林開發的主動式懸載系統的驅動馬達，可以根據行路狀況控制調整減震筒的軟硬程度，來調整行路過程中車體在各個方向晃動的動作，米其林很自豪的是這個主動式懸載系統調整的反應時間只要千分之三秒。米其林在這個系統的研發已經投入很多年，但公司宣稱要真正商品化還有一段時日。

Mmm，看起來輪內馬達在汽車上的實務應用還沒那麼簡單，未懸載質量的問題似乎不容易解決。有一說是輪內馬達可以全面改採“Brake by wire”，捨去傳統的碟式剎車盤，直接用電動馬達剎車，這樣一加一減，重量的影響就小很多了。

輪內馬達在汽車應用上的開發，國內汽車廠還沒聽到動靜，倒是軍方的中山科學研究院花費 2 年時間，成功開發出高功率輪內馬達及驅動器，在七月份發表，最大功率可達 50KW，是國內第一台自主研发及製造的高功率輪內馬達及驅動器。

噢，如果您有些好奇的話，從未上過大學的費德南保時捷先生後來獲得了兩個名譽博士學位，還得到當時納粹德國最高榮譽的「德國國家工藝與科技獎(German National Prize for Art and Science)」，二次大戰前在汽車技術發展的成就和聲望如日中天。二次大戰後，保時捷先生被法國政府當作戰犯抓了起來（應該是因為協助納粹德國發展戰車的緣故），沒有審判便在監獄裡關了 20 個月，1949 年才落魄地回到德國重整汽車事業。故事最後結局是，這位汽車奇才在 1951 年因心臟病過世，1999 年被選為「世紀汽車工程師(Car Engineer of the Century)」。

