



上海納卡什瑪液壓技術有限公司

Nakashima Hydraulics Technology Co., Ltd.

Add: Plant 3#, No. 86-150 Pingbei Rd. Zhuangqiao, Minhang District, Shanghai, China 201108
Tel: 400-021-9112 86-21-64901276/2276/3476 Fax: 86-21-64902590
Website: www.nakashima.cn E-mail: sales@nakashima.cn

電液伺服閥的發展過程、研究現狀及趨勢

摘要：本文對伺服閥產品的發展歷史作了簡單回顧，介紹了目前伺服閥產品的市場情況及研究現狀，並對將來伺服閥的發展趨勢作了扼要探討。

關鍵字：電液伺服閥、研究現狀、發展趨勢

一 概述

電液伺服閥是電液伺服控制中的關鍵元件，它是一種接受模擬電信號後，相應輸出調製的流量和壓力的液壓控制閥。電液伺服閥具有動態響應快、控制精度高、使用壽命長等優點，已廣泛應用於航空、航太、艦船、冶金、化工等領域的電液伺服控制系統中。

二·發展過程

液壓控制技術的歷史最早可追溯到西元前 240 年，當時一位古埃及人發明瞭人類歷史上第一個液壓伺服系統——水鐘。然而在隨後漫長的歷史階段，液壓控制技術一直裹足不前，直到 18 世紀末 19 世紀初，才有一些重大進展。在二戰前夕，隨著工業發展的需要，液壓控制技術出現了突飛猛進地發展，許多早期的控制閥原理及專利均是這一時代的產物。如：Askania 調節器公司及 Askania-Werke 發明及申請了射流管閥原理的專利。同樣，Foxboro 發明瞭噴嘴擋板閥原理的專利。而德國 Siemens 公司發明瞭一種具有永磁馬達及接收機械及電信號兩種輸入的雙輸入閥，並開創性地使用在航空領域。

在二戰末期，伺服閥是用螺線管直接驅動閥芯運動的單級開環控制閥。然隨著控制理論的成熟及軍事應用的需要，伺服閥的研製和發展取得了巨大成就。1946 年，英國 Tinsley 獲得了兩級閥的專利；Raytheon 和 Bell 航空發明瞭帶回饋的兩級閥；MIT 用力矩馬達替換了螺線管使馬達消耗的功率更小而線性度更好。1950 年，W.C.Moog 第一個發明瞭單噴嘴兩級伺服閥。1953 年至 1955 年間，T.H.Carson 發明瞭機械回饋式兩級伺服閥；W.C.Moog 發明瞭雙噴嘴兩級伺服閥；Wolpin 發明瞭幹式力矩馬達，消除了原來浸在油液內的力矩馬達由油液污染帶來的可靠性問題。1957 年 R.Atchley 利用 Askania 射流管原理研製了兩級射流管伺服閥。並於 1959 年研製了三級電回饋伺服閥。

1959 年 2 月國外某液壓與氣動雜誌對當時的伺服閥情況作了 12 頁的報導，顯示了當時伺服閥蓬勃發展的狀況。那時生產各種類型的伺服閥的製造商有 20 多家。各生產廠家為了爭奪伺服閥生產的霸權地位展開了激烈地競爭。回顧歷史，可以看到最終取勝的幾個廠家，大多數生產具有回饋及力矩馬達的兩級伺服閥。我們可以看到，1960 年的伺服閥已具有現代伺服閥的許多特點。如：第二級對第一級回饋形成閉環控制；採用幹式力矩馬達；前置級對功率級的壓力恢復通常可達到 50%；第一級的機械對稱結構減小了溫度、壓力變化對零位的影響。同時，由早期的直動型開環控制閥發展變化而來的直動型兩級閉環控制伺服閥也已出現。當時的伺服閥主要用於軍事領域，隨著太空時代的到來，伺服閥又被廣泛用於航太領域，並研製出高可靠性的多餘度伺服閥等尖端產品。

與此同時，隨著伺服閥工業運用場合的不斷擴大，某些生產廠家研製出了專門使用於工業場合的工業伺服閥。如 Moog 公司就在 1963 年推出了第一款專為工業場合使用的 73 系列伺服閥產品。隨後，越來越多的專為工業用途研製的伺服閥出現了。它們具有如下的特徵：較大的體積以方便製造；閥體採用鋁材（需要時亦可採用鋼材）；獨立的第一級以方便調整及維修；主要使用在 14MPa 以下的低壓場合；儘量形成系列化、標準化產品。然而 Moog 公司在德國的分公司卻將其伺服閥的應用場合主要集中在高壓場合，一般工作壓力在 21MPa，有的甚至到 35MPa，這就使閥的設計專重於高壓下的使用可靠性。而隨著伺服閥在工業場合的廣泛運用，各公司均推出了各自的適合工業場合用的比例閥。其特點為低成本，控制精度雖比不上伺服閥，但通過先進的控制技術和先進的電子裝置以彌補其不足，使其性能和功效逼近伺服閥。1973 年，Moog 公司按工業使用的需要，把某些伺服閥轉換成工業場合的比例閥標準介面。

Bosch 研製出了其標誌性的射流管先導級及電回饋的平板型伺服閥。1974 年，Moog 公司推出了低成本、大流量的三級電回饋伺服閥。

Vickers 公司研製了壓力補償的 KG 型比例閥。Rexroth、Bosch 及其他公司研製了用兩個線圈分別控制閥芯兩方向運動的比例閥等等。

三 國內外的現狀

1、市場情況

目前，國內生產伺服閥的廠家主要有：航空工業總公司第六〇九研究所、航空工業總公司六一八研究所、航空工業總公司秦峰機床廠、北京機床研究所、中國運載火箭技術研究院第十八研究所、上海航太控制工程研究所及中國船舶重工集團公司第七〇四研究所。

國外生產伺服閥的廠家主要有：美國 Moog 公司、英國 Dowty 公司、美國 Team 公司、俄羅斯的“祖國”設計局、沃斯霍得工廠等，此外美國 Park 公司、EatonVickers 公司、德國 Bosch 公司、Rexroth 公司等亦有自己的伺服閥產品。

電液伺服閥一般按力矩馬達型式分為動圈式和永磁式兩種。傳統的伺服閥大部分採用永磁式力矩馬達，此類伺服閥還可分為噴嘴擋板式和射流式兩大類。目前國內生產伺服閥的廠家大部分以噴嘴擋板式為主。生產射流管式伺服閥形成規模及系列的只有中國船舶重工集團公司第七〇四研究所。國外情況亦類似，原專業生產射流管式伺服閥的廠家美國 Abex 公司也已被 Park 公司所吞併。然而，由於射流管式伺服閥具有抗污染性能好、高可靠性、高解析度等特點。有些生產廠家也在研製或已推出自己的射流管式產品，如航空工業總公司第六〇九研究所、中國運載火箭技術研究院第十八研究所、美國 Moog 公司及俄羅斯的有關廠家等。美國 Moog 公司還在 2006 年 7 月召開了產品推廣會，推出了射流管式的 D660 系列產品，並認為該產品代表了今後伺服閥的發展趨勢。

當前國內在研究、生產及使用伺服閥方面雖然形成了一定的規模。然而生產的產品主要用於航空、航太、艦船等軍品領域，在民品市場佔有率不大。同時，由於各生產單位各自為戰、缺少合作、力量分散，很不利於伺服閥的進一步發展，也無法形成強大的競爭力與國外產品進行競爭。現國外產品在國內市場佔有率最大的為 Moog 公司，它的產品佔據了國內絕大部分的民品市場。

2 研究現狀

當前電液伺服閥的研究主要集中在結構及加工工藝的改進、材料的更替及測試方法的改變。

1) 在結構改進上，目前主要是利用冗餘技術對伺服閥的結構進行改造。由於伺服閥是伺服系統的核心元件，伺服閥性能的優劣直接代表著伺服系統的水準。另外，從可靠性角度分析，伺服閥的可靠性是伺服系統中最重要的一環。由於伺服閥被污染是導致伺服閥失效的最主要原因。對此，國外的許多廠家對伺服閥結構作了改進，先後發展出了抗污染性較好的射流管式、偏導射流式伺服閥。

而且，俄羅斯還在其研製的射流管式伺服閥閥芯兩端設計了雙冗餘位置感測器，用來檢測閥芯位置。一旦出現故障信號可立即切換備用伺服閥，大大提高了系統的可靠性，此種兩餘度技術已廣泛的應用於航空行業。而且，美國的 Moog 公司和俄羅斯的沃斯霍得工廠均已研製出四餘度的伺服閥機構用於航太行業。我國的航太系統有關單位早在 90 年代就已進行三餘度等多餘度伺服閥機構的研製，將伺服閥的力矩馬達、回饋元件、滑閥副做成多套，發生故障可隨時切換，保證系統的正常工作的。此外多線圈結構、或在結構上帶零位元保護裝置、外接式濾器等型式的伺服閥亦已在冶金、電力、塑膠等行業得到了廣泛的應用。

2) 在加工工藝的改進方面，採用新型的加工設備和工藝來提高伺服閥的加工精度及能力。如在閥芯閥套配磨方法上，上海交通大學、哈爾濱工業大學均研製出了智慧化、全自動的配磨系統。特別是哈爾濱工業大學的配磨系統改變了傳統的氣動配磨的模式，採用液壓油作為測量介質，更直接地反應了所測滑閥副的實際情況，提高了測量結果的準確性與精度。在力矩馬達的焊接方面，中船重工第 704 研究所與德國知名廠家合作，採用了世界最先進的焊接工藝取得了良好的效果。另外，哈爾濱工業大學研製出智慧化的伺服閥力矩馬達彈性元件測量裝置。解決了原有手動測量法中存在的測量精度低、操作複雜、效率低等問題。對彈性元件能高效完成剛度測量、得到完整的測量曲線，且不重複性測量誤差不大於 1%。

3) 在材料的更替上方面。除了對某些零件採用了強度、彈性、硬度等機械性能更優越的材料外。還對特別用途的伺服閥採用了特殊的材料。如德國有關公司用紅寶石材料製作噴嘴擋板，防止因氣蝕造成擋板和噴嘴的損傷，而降低動靜態性能，使工作壽命縮短。

機械回饋杆頭部的小球也用紅寶石製作，防止小球和閥芯小槽之間的磨損，使閥失控，並產生尖叫。航空六〇九所、中船重工第七〇四研究所等單位均採用新材料研製了能以航空煤油、柴油為介質的耐腐蝕伺服閥。此外對密封圈的材料也進行了更替，使伺服閥耐高壓、耐腐蝕的性能得到提高。

4) 在測試方法改進方面，隨著電腦技術的高速發展，生產單位均採用電腦技術對伺服閥的靜、動態性能進行測試與計算。某些單位還對如何提高測量精度，降低測量儀器本身的振動、熱雜訊和外界的高頻干擾對測量結果的影響，作了深入的研究。如採用測頻/測周法、尋優信號測試法、小波消噪法、正弦輸入法及數位濾波等新技術對伺服閥測試設備及方法進行了研製和改進。

四 發展趨勢

當前，新型電液伺服閥技術的發展趨勢主要體現在新型結構的設計、新型材料的採用及電子化、數位化技術與液壓技術的結合等幾方面。

1 新型結構的設計

在 20 世紀 90 年代，國外研製直動型電液伺服閥獲得了較大的成就。現形成系列產品的有 Moog 公司的 D633、D634 系列的直動閥、伊頓威格士 (EatonVickers) 公司的 LFDC5V 型、德國 Bosch 公司的 NC10 型、日本三菱及 KYB 株式會社合作開發的 MK 型閥及 Moog 公司與俄羅斯期沃斯霍得工廠合作研製的直動閥等。該類型的伺服閥去掉了一般伺服閥的前置級，利用一個較大功率的力矩馬達直接拖動閥芯，並由一個高精度的閥芯位移感測器作為回饋。該閥的最大特點是無前置級，提高了伺服閥的抗污染能力。同時由於去掉了許多難加工零件，降低了加工成本，可廣泛使用於工業伺服控制的場合。國內有些單位如中國運載火箭技術研究院第十八研究所、北京機床研究所、浙江工業大學等單位也研製出了相關產品的樣機。特別是北京航空航太大學研製出轉閥式直動型電液伺服閥。該伺服閥通過將普通伺服閥的滑閥滑動結構轉變為滑閥的轉動，並在閥芯與閥套上相應開了幾個與軸向有一定傾角的斜槽。閥芯閥套相互轉動時，斜槽相互開通或相互封閉，從而控制輸出壓力或流量。由於在工作時閥芯閥套是相互轉動的，降低了閥工作時的摩擦阻力，同時污染物不容易在轉動的滑閥內堆積，提高了抗污染性能。此外，Park 公司開發了“音圈驅動(Voice Coil Drive)”技術 (VCD)，以及以此技術為基礎開發的 DFplus 控制閥。所謂音圈驅動技術，顧名思義，即是類似於揚聲器的一種驅動裝置，其基本結構就是套在固定的圓柱形永久磁鐵上的移動線圈，當信號電流輸入線圈時，在電磁效應的作用下，線圈中產生與信號電流相對應的軸向作用力，並驅動與線圈直接相連的閥芯運動，驅動力很大。線圈上內置了位移回饋感測器，因此，採用 VCD 驅動的 DFplus 閥本質上是以閉環方式進行控制的，線性度相當好。此外，由於 VCD 驅動器的運動零件只是移動線圈，慣量極小，相對運動的零件之間也沒有任何支承，DFplus 閥的全部支承就是閥芯和閥體間的配合面，大大減小了摩擦這一非線性因素對控制品質的影響。綜合上述的技術特點，配合內置的數位控制模組，使 DFplus 閥的控制性能佳，尤其在頻率響應方面更是優越，可達 400Hz。從發展趨勢來看，新型直動型電液伺服閥在這些行業有替代傳統伺服閥特別是噴嘴擋板式伺服閥的趨向，但它的最大問題在於體積大、重量重，只適用於對場地要求較低的工業伺服控制場合。如能減輕其重量、減小其體積，在航空、航太等軍工行業亦具有極大的發展潛力。

另外，近年來伺服閥新型的驅動方式除了力矩馬達直接驅動外，還出現了採用步進電機、伺服電機、新型電磁鐵等驅動結構以及光液直接轉換結構的伺服閥。這些新技術的應用不僅提高了伺服閥的性能，而且為伺服閥發展開拓了思路，為電液伺服閥技術注入了新的活力。

2 新型材料的採用

當前在電液伺服閥研製領域的新型材料運用，主要是以壓電元件、超磁致伸縮材料及形狀記憶合金等為基礎的轉換器研製開發。它們各具有其自己的優良特性。

2.1 壓電元件

壓電元件的特點是“壓電效應”：在一定的電場作用下會產生外形尺寸的變化，在一定範圍內，形變與電場強度成正比。壓電元件的主要材料為壓電陶瓷（PZT）、電致伸縮材料（PMN）等。比較典型的壓電陶瓷材料有日本 TOKIN 公司的疊堆型壓電伸縮陶瓷等。

PZT 直動式伺服閥的原理是：在閥芯兩端通過鋼球分別與兩塊多層壓電元件相連。通過壓電效應，使壓電材料產生伸縮驅動閥芯移動。實現電-機械轉換。PMN 噴嘴擋板式伺服閥則在噴嘴處設置一與壓電疊堆固定連接的擋板，由壓電疊堆的伸、縮實現擋板與噴嘴間隙的增減，使閥芯兩端產生壓差推動閥芯移動。目前壓電式電-機械轉換器的研製比較成熟並已得到較廣泛的應用。它具有頻率回應快的特點，伺服閥頻寬甚至能達到上千赫茲，但亦有滯環大、易漂移等缺點，制約了壓電元件在電液伺服閥上的進一步應用。

2.2 超磁致伸縮材料

超磁致伸縮材料（GMM）與傳統的磁致伸縮材料相比，在磁場的作用下能產生大得多的長度或體積變化。利用 GMM 轉換器研製的直動式伺服閥是把 GMM 轉換器與閥芯相連，通過控制驅動線圈的電流，驅動 GMM 的伸縮，帶動閥芯產生位移從而控制伺服閥輸出流量。該閥與傳統伺服閥相比不僅有頻率回應高的特點，而且具有精度高、結構緊湊的優點。目前，在 GMM 的研製及應用方面，美國、瑞典和日本等國處於領先水準。國內浙江大學利用 GMM 技術對氣動噴嘴擋板閥和內燃機燃料噴射系統的高速強力電磁閥，進行了結構設計和特性研究。從目前情況來看 GMM 材料與壓電材料和傳統磁致伸縮材料相比，具有應變大、能量密度高、回應速度快、輸出力大等特點。世界各國對 GMM 電-機械轉換器及相關的技術研究相當重視，GMM 技術水準快速發展，已由實驗室研製階段逐步進入市場開發階段。

今後還需解決 GMM 的熱變形、磁晶各向異性、材料腐蝕性及製造工藝、參數匹配等方面的問題，以利於在高科技領域得到廣泛運用。

2.3 形狀記憶合金

形狀記憶合金（SMA）的特點是具有形狀記憶效應。將其在高溫下定型後，冷卻到低溫狀態，對其施加外力。一般金屬在超過其彈性變形後會發生永久變形，而 SMA 卻在將其加熱到某一溫度之上後，會恢復其原來高溫下的形狀。利用其特性研製的伺服閥是在閥芯兩端加一組由形狀記憶合金繞制的 SMA 執行器，通過加熱和冷卻的方法來驅動 SMA 執行器，使閥芯兩端的形狀記憶合金伸長或收縮，驅動閥芯作用移動，同時加入位置回饋來提高伺服閥的控制性能。從該閥的情況來看，SMA 雖變形量大，但其回應速度較慢，且變形不連續，也限制了其應用範圍。

與傳統伺服閥相比，採用新型材料的電-機械轉換器研製的伺服閥，普遍具有高頻響、高精度、結構緊湊的優點。雖然目前還各自呈在某些關鍵技術需要解決，但新型功能材料的應用和發展，給電液伺服閥的技術發展發展提供了新的途徑。

3 電子化、數位化技術的運用

目前電子化、數位化技術在電液伺服閥技術上的運用主要有兩種方式：其一，在電液伺服閥類控制元器件上加入 D/A 轉換裝置來實現其數位控制。隨著微電子技術的發展，可把控制元器件安裝在閥體內部，通過電腦程式來控制閥的性能，實現數位元化補償等功能。但存在類比電路容易產生零漂、溫漂，需加 D/A 轉換介面等問題。其二，為直動式數位控制閥。通過用步進電機驅動閥芯，將輸入信號轉化成電機的步進信號來控制伺服閥的流量輸出。該閥具有結構緊湊、速度及位置開環可控及可直接數位控制等優點，被廣泛使用。但在即時性控制要求較高的場合，如按常規的步進方法，無法兼顧量化精度及回應速度的要求。浙江工業大學採用了連續跟蹤控制的辦法，消除了兩者之間的矛盾，獲得了良好的動態特性。此外還有通過直流力矩電機直接驅動閥芯來實現數位控制等多種控制方式或伺服閥結構改變等方法來形成眾多的數位化伺服閥產品。

隨著各項技術水準的發展，通過採用新型的感測器和電腦技術研製出機械、電子、感測器及電腦自我管理（故障診斷、故障排除）為一體的智能化新型伺服閥。該類伺服閥可按照系統的需要來確定控制目標：速度、位置、加速度、力或壓力。同一台伺服閥可以根據控制要求設置成流量控制伺服閥、壓力控制伺服閥或流量/壓力複合控制伺服閥。並且伺服閥的控制參數，如流量增益、流量增益特性、零點等都可以根據控制性能最優化原則進行設置。伺服閥自身的診斷資訊、關鍵控制參數（包括工作環境參數和伺服閥內部參數）可以及時回饋給主控制器；可以遠距離對伺服閥進行監控、診斷和遙控。在主機調試期間，可以通過匯流排下載或直接由上位機設置伺服閥的控制參數，使伺服閥與控制系統達到最佳匹配，優化控制性能。而伺服閥控制參數的下載和更新，甚至主機運轉時也能進行。而在伺服閥與控制系統相匹配的技術應用發展中，嵌入式技術對於伺服閥已經成為現實。按照嵌入式系統定義為：“嵌入到對象體系中的專用電腦系統”。“嵌入性”、“專用性”與“電腦系統”是嵌入式系統的三個基本要素。它是在傳統的伺服閥中嵌入專用的微處理晶片和相應的控制系統，針對客戶的具體應用要求而構建成具有最優控制參數的伺服閥並由閥自身的控制系統完成相應的控制任務（如各控制軸同步控制），再嵌入到整個的大控制系統中去。從目前的技術發展和控制系統對伺服閥的要求看，伺服閥的自診斷和自檢測功能應該有更大的發展。

4 結束語

當前的液壓伺服控制技術已經能將自動控制技術、液壓技術與微電子有機的結合起來，形成新一代的伺服閥產品。而隨著電子設備、控制策略、軟體及材料等方面的發展與進步，電液控制技術及伺服閥產品將在機、電、液一體化獲得長足的進步。

作者：李其朋 丁凡