

⑦在化工、电站、生产过程自动控制方面应用的有：检测温度、压力、重量和位置的传感器、计算机控制、程序控制、分流阀、自动配料装置、水处理控制装置、巡回检测装置和控制机等。

⑧在医疗设备方面应用的有：人工呼吸器、人工心脏、人工肾脏、气垫控制装置等。

⑨在计算机方面的应用：目前利用射流元件制成的小型专用计算机已在应用、还有发展的可能。作为电子计算机的辅助设备有：穿孔卡阅读器、显示器、与直接数字控制系统配合使用的数字调节器以及自动计数器、积分器、微分器等。

⑩在农业方面的应用有：控制灌溉用的分流阀、旋转喷灌器等。

三 射流技术的现状

射流技术在近十年来的发展，一方面表现于大量的应用，同时还表现于以下几个方面。

1. 射流元件

射流元件是控制线路中的基本单元，基本上分为比例式和数字式两大类，多属利用附壁效应、动量交换、紊流流动、剥离和湍流五类不同的作用原理制成。自从1959年第一个附壁式元件问世以来，在元件方面有了很大的进展，研制出了多种形式的元件。已经得到应用的比例式元件有紊流式、偏向性比例式、湍流式、对冲式、双弯流式。属于数字式的有附壁式、聚流式、计数元件、紊流式、引流式、哨音式、振荡

元件、“与”、“或”、“非”、“或非”、双稳等。但目前国外应用最广泛的是附壁式元件和偏流式元件，应用较为广泛的是紊流式元件和湍流式元件。膜片式（半射流式）元件在欧洲和苏联应用较多，近年来由于混合应用的发展，膜片式应用有增加的趋势。现在液压射流元件也逐渐被人们所注意。另外，由于超声速元件具有反应速度快和特性易于掌握的特点，也得到了发展并在计算装置中得到了应用。

目前已经不局限于原来的单一作用原理的元件，而运用空气动力学原理，利用新的物理现象或原来的单一作用原理的结合研制出了湍流反馈性元件、层流“或非”元件、紊流阶状管元件、湍流形放大元件（压力恢复可达80%，并具有良好的稳定性和动态特性）等新式元件。还有一种分流式的新型元件，用水作试验压力恢复达到95%。对利用声学信号、拍动晶体产生信号、加热法、电火花法、离子流法等现象来制作的新型元件（亦可看作转换元件）也在研制中。

射流元件的主要缺点是反应速度慢和消耗功率大。日本神钢电机厂真空堆积机控制装置，用了85个射流元件，消费气源功率500瓦，而以前采用接点继电器控制装置消耗功率180瓦。目前射流元件一般功率为1瓦上下。如何降低元件功率消耗是一个很重要的问题。所以降低元件功率消耗是新型元件的研制方向之一。

减低功率消耗和提高反应速度，就要求向小型化发展，缩短连接管。元件小型化的指标是喉阻断面。据称美国鲍尔斯公司新生产的元件

比原来的大大缩小了断面，已投入成批生产的定型元件的喷嘴断面为 0.23×0.4 毫米，近来用钢板腐蚀方法制成 0.2×0.2 毫米的喷嘴断面。有的喷嘴宽度甚至小到 0.102 毫米的小型元件。

目前已成功地使用塑料、金属（包括钢、铸铁、铅、铜合金、铝合金等）、玻璃、陶瓷等制造射流元件，今后可能应用合成材料如塑料—金属薄片、陶瓷的金属材料等。为适用于燃气轮机及火箭等控制的特殊要求，元件採用錳、碳化物的超硬合金制作，此外选用陶瓷材料能耐 $1500^{\circ}\text{C} \sim 2000^{\circ}\text{C}$ 的高温，并能受50个重力加速度的冲击。

现在已经进入到元件的第四代，即在箱横断面装有结合器，形成类似电子线路印刷板那样的插入式元件。第一代元件是单体元件，它的形式是在元件的几个面上安装有立脚。第二代元件与第一代类似，即在一侧（一般在上面）有开口端，用堆积方法积层组配。第三代元件为插入式元件。

射流元件也易于集成化，经过照相腐蚀、电火花加工等方法，均能在很小面积的金属板上容纳相当数量的元件。据报导在 1吋^3 范围内可集成1000只元件。美国斯泰霍脱研究所 (Stanford Research Institute) 的集成元件，用压力使照相薄片叠成，薄片厚度为 $2.5 \sim 12.5$ 微米，喷嘴宽度为 50 微米，这是超小型元件。还有一种元件厚度为 $4/1000$ 吋。

除元件小型化和集成化外，为减少功率消耗还向低压化（即降低供气
~10~

源压力)方面发展。

目前射流元件可以作到功率消耗小于1毫瓦,而可大到1.5兆瓦。供源压力从几十毫米水柱到数百大气压。有的低压动作阀能感受0.25毫米水柱的微弱信号。一般信号元件的切换时间为1毫秒左右,可作到0.01~5毫秒,频率响应为1000赫左右。元件的扇出数可达32。

比例放大器也有较大的进展,现在已经进入它的第二代,即运算放大器。该放大器由五级单放大器和反馈线路组成一整体,其压力增益为2000,输入阻抗为400 K秒/吋² (单放大元件输入阻抗为20 K秒/吋²),输出阻抗较低,噪音水平较低,幅频特性平坦,放大性能好,能够完成电子放大器的很多作用(如放大、微分、积分、整形、加法等)并在实际中得到了应用。

现在比例放大器的信噪比可达到1500。

除膜片式气动逻辑元件外,对活动部件的其他气动逻辑元件也作了大量研究,如英国新制成的一种新型元件,压力增益大于20,有无限的扇出能力,高带宽(具有6毫米的传输线时,1千赫),起升时间(10%—90%)约0.5毫秒,只在关的情况下消耗气源,体积0.5吋³。

此外,对与电子计算机和直接数字控制(DDC)联用的高频率计数器,模—频率转换器和各种气液电转换装置作了大量的研制。

在第二届国际自动控制联盟(IFAC)射流技术会议上,很注意发

展新型元件和新型装置,探求新的作用原理。会上提出了磁—射流脉冲发生器 (Fluidics Pulse shoster), 对冲型液体运算放大器、脉冲宽度调制 (P W M) 型伺服放大器、振荡双稳流体放大器的流量计、无放空孔双稳元件的流量测量等新型装置。对在射流中加引导部件 (如丝、针) 并利用引导部件的导电、导磁性质来偏转射流的现象作了研究, 通过实验提出了可以利用这种方法制作元件的证据。对于利用沿曲壁流动的层流中, 其流动偏向依赖于温度的现象制作电—射流转换装置也作了研究。

2. 传感器

实际表明, 射流传感器在很多地方比其等效的传感器如光电管、电子接近传感器等都优越、简便、可靠、便宜。现在利用不同作用原理制成的传感器如温度、压力、流量、位置、转速、角速率、检测、发动机燃料空气混合比等传感器在各个部门有着广泛的应用。最近所研制的某一温度传感器 (由 Von Karman Institute 研制, 利用射流振荡器的频率随温度而变的原理) 有着高的精确度, 反应快, 可用于测量高温, 传感器对气源的波动不敏感, 而产生的信号有足够的强度传输到较远的距离。在燃气轮机控制中所用的温度传感器, 可以可靠的工作到 3000 F 以上, 而动态性能比热电偶还好。在应用较为广泛的位置和距离传感器中, 可以传感千分之几吋直到几呎的距离。同时, 射流传感器有着很高的精确度, 如利用换能原理作成的传感器用于测量滚珠直径, 在测量

频率高于100赫时，可准确到0.25微米。

传感器方面的资料也佔相当大的比重。在库兰菲尔第四届国际会议的72篇论文中有14篇是关于传感器的。在第二届国际自动控制联盟射流技术会议的38篇论文中有7篇是关于传感器的。

3. 线路

射流制作线路，上面已提到。为减少功率消耗，提高反应速度，向小型化发展，并缩短和利用细的连接管路。集成化很易于满足这两方面的要求。此外，在线路中尽量採用并连，可提高反应速度。一般较复杂的控制线路都包括百个元件以上。现在已经成功的集成200个元件的功能块，并在实际中得到了应用。

纯射流元件的工作介质不能切断，致使流体消耗增加。现在逐渐趋向纯射流元件同活动元件结合使用克服这一现象。另外射流元件同电子技术、气动式油压技术结合更能发挥线路特点。如导弹控制系统（Societe Europeenne de propulsion制作）、射流—电子压力比计算器（Princeton Fluidics Corporation制作）就是射流技术同电子技术结合较好的例子，如液动位置伺服系统和气动位置伺服系统（均系G、E、C O为AVLABS研制）就是射流技术同液动技术和气动技术结合较好的例子。纯射流装置同带活动部件装置组成的半射流装置系统的一个有趣的应用，即控制钻床的自适应射流控制系统（Adaptive fluidic Control^{钻头}）。该系统能根据感受的温度，扭矩和工件的振动而自动

进行调整。所以纯射流装置系统的概念将会愈来愈淡薄。

对半射流装置系统的研究表明，可利用简单的、便宜的混合式而不牺牲纯射流装置的可靠性，能达到很高的精度。有一个半射流装置其工作频率为50周/秒，已运转了两年，超过了20亿次的考验，并无发生故障，其特性只有很小的变化。现在半射流装置的差压检测器(DPD)已被广泛的用来作为放大器的输入装置。

在以前几乎是数字控制佔主要地位，由于比例元件的发展，模拟控制也开始增多。有人估计模拟控制比数字控制落后3年，到1978年会达到各佔50%的状况。为减少噪音和零点漂移，也有的採用交流调制技术。

射流专业计算机同数字控制或模拟控制结合使用也逐渐增多。如在测量发动机的压力比和透平进口温度的传感器系统(Mc Donnell Aircraft Company 研制)中就包括了射流混合式数—模压力比计算机，象这种例子还很多。

在线路的设计中，由于缺乏元件的特性数据和线路处理中的复杂性，主要靠试验调整或根据简单的小信号等效回路法进行近似的计算。

4 理论和实验

射流技术的基本理论，从一开始就引起了人们的注意，但由于射流装置中流体流动的复杂性，一直没有很好解决，这也是流体力学和气体动力学方面的一个薄弱环节，现在依然是一个难题。现在研制射

流元件主要的还是靠试验、修改的多次反复。在理论方面主要集中于射流元件内流体流动的近似分析，在模拟元件可视化和测试基础上阐明流动的物理现象，研究元件几何尺寸变化、背压变化对元件性能的影响。

(1) 附壁射流的研究

1932年柯安达发现了附壁现象，这是一个重要的发现，它是射流数字元件的基本动作原理。1938年米特拉尔 (Metrel) 发表了论述柯安达效应的论文。1955年英国剑桥大学对紊流射流向邻近壁的附壁问题作了理论和试验工作。1960年鲍尔库 (Bourque) 和纽曼 (Newman) 作了不可压缩流体向近壁附壁的初次近似理论计算。赛依尔 (Sawyer) 提出了混合系数因曲率原因而不同，作了近似计算，以后又发展了这种方法，预示了紊流射流对异形档板的附壁性。彼德逊 (Pederson) 修正了赛依尔 (Sawyer) 的动量方程，考虑了控制量一项。1962年奥尔逊 (Olsen) 等人研究了流体的粘性和可压缩性的自由射流 (包括了对附壁射流的研究)，并把分析结果同试验数据作了比较。这一研究比前人的计算前进了一步。

以上所列举的方法，因为都假定分离区的压力恒定而受到了限制。

1965年约恩斯 (Jones) 提出步进式 (即把分离区分为许多小体积) 的计算方法，假定分离区的速度分布，计算沿附壁的压力分布。

1967年和1968年鲁斯 (Lush) 进一步发展了赛依尔计算大尺寸模型元件切换时间的方法。

但是附壁式元件中分离区周围的几何形状比单一挡板要复杂得多，而在元件输出端有负载时，对于分离区压力恒定的假设是不能成立的。

1968年弗斯特尔 (Foster) 研究了下游压力升高对附壁射流的影响，他于1965年就对于附壁紊流元件的几何尺寸对于特性的影响作了研究，这对于定性的认识附壁式元件很有帮助。

1969年到现在，虽然又有许多研究人员 (如 M. Epstein) 对于附壁射流的研究作了一些工作，最近瓦达 (Wada T.) 对于射流向小偏距倾斜平板的附壁问题作了试验研究，西布 (Hibs M.) 提出了利用差分法直接介绍维一斯道克方程的方法，克姆拉 (Kimura M.) 等研究了附壁装置的开关性能等工作。但没有什么重大的进展，仍然是提出各种假设和实验常数 (这些数是很不准确的)，假定往往偏离真实现象很远 (如采用大尺寸模型，用二维分析)。

在理论的发展中，到目前为止，虽然都未能作出符合实际情况的分析，但是提供了对附壁过程的一些定性说明，阐明了几何尺寸和参数的变化对附壁过程的影响，例如通过近似的分析，指明了分离区的压力和长度对于负载很灵敏。

(2) 偏向性射流的研究

偏向性射流是偏向性比例放大器的流体理论基础。由于偏向性比例放大器的发展，不少人对于偏向性射流作了理论和试验研究。

1962年培培伦 (Peperone) 等人把流体当作二维不可压

缩流体。把主射流当作不变形的壁，利用动量交换方法分析研究主射流的偏向角、理论增益等问题。戴克特 (Dexter) 采用“淹没模型”。1964年莫尼翰 (Moynihan) 等人利用“自保持模型”研究三个射流相互作用的问题。1968年查尔曼 (Zalmanson) 等人对单控制偏向性比例放大器进行了分析，不考虑气体粘性，但是不适用于作为主射流与控制射流比值的连续函数的偏转角的计算。

1970年萨布克 (Sarpkaya) 提出用“自由流线”法来分析偏向性射流。假定沿流线的速度和压力为常数，另外假定主射流与控制射流的界面压力和速度是连续的。文中提到分析结果和实验数据是一致的。

克便尔 (Kirshner) 全面地研究了影响偏向性比例放大器的静态和动态的各种因素，其中包括各种形式的放空孔、接受通道、相互作用区、主喉阻、深宽比、静动态特性和噪音等，并指出作用于主射流的压力和动量密度、几何尺寸的变化对增益有很大的影响。此外，有很多研究工作进一步对比例放大器的动态特性作了深入的试验研究，频率响应作到3000赫。

对比例放大器中的噪音也作了很多研究。克莱 (Kelley) 通过试验得出结论：噪音主要是在400赫以下严重，因之可发展交流调制技术克服噪音影响。洛福曼 (G. Roffman) 详细研究了放大器中的噪音源，并阐明了放大器参数对噪音的影响，讨论了减低噪音的方

法,对高频与低频噪音的耦合也作了分析。

最近薩布克 (Sarpkaya T.)、麻申 (Masson R.) 等人,也研究了比例放大器中的噪音和噪音的测量问题,并在第二届国际自动控制联盟射流会议上宣读了他们的论文。

(5) 湍流射流的研究

由于湍流阀在实际中的应用,对湍流射流也作了很多研究。但由于湍流射流的复杂性,目前主要的是实验研究。周×× (S. K. Chow) 对湍流阀特性作了详细的试验研究,其试验参数范围比较广,并用边界层动量积分方程方法对实验结果作了分析。这一研究给出了湍流阀设计的参考数据。

奧特薩普 (Otsap) 对一种新型湍流压力放大器作了试验研究,对于元件的静态特性和动态特性作了详细的研究,给出了有参考价值的数据。

渥木萊 (N. Wormley) 提出了工作于不可压缩范围内湍流放大器的设计方法,研究指出:放大器的无因次特性在很大的范围内实质上同最大流量雷诺数、湍流室高度和供压口面积无关,无因次特性基本上依赖于湍室输出口直径同湍室直径的比值和控制口面积对输出口面积的比值。

最近斯雷 (Syred N.) 也指出,湍流阀输出口直径高度比,输出口前断面,输出口的扩散度和输出口区域,径向的对称性等参数对

湍流阀的性能有直接的影响。

门叶尔 (E A Mayer) 指出：湍流式压力调节器同气动调节器可具有同样静态特性，但动态特性要好得多。该型调节器用于仪表，在 170° 范围内另点漂移 0.6 磅/吋²。在他设计的另一可调湍流压力调节器中输出压力可以保持在 0.1 磅/吋² 范围内，并有较宽的调节范围。

从湍流阀的特点看来，今后它会有较大的发展。

(4) 其他方面的研究

对于射流二极管，对冲性射流（如 W. A. Lederman, P. V. Derai 等），信号传输等各个方面也作了很多研究。

总之，虽然过去在理论的研究方面有一定的进展，但是这一进展是很缓慢的，目前的理论水平还是相当落后的，射流技术还是一个尚未形成理论体系的领域。目前只能作到根据实验结果和近似的理论分析定性的说明部分的射流器件中的流动现象。小型化低压化元件中的流体理论问题还没开始研究。

在实验技术方面，目前还一般作不到对小型元件的直接测试，多采用放大模型的办法。在流体参数测量方面的有效工具即热线风速仪和压电传感器。热线风速仪的感受部分可用 $0.0001 \sim 0.0002$ 吋直径的涂钨铂金丝制成，测量频率上限可到 400 千赫，测量速度范围从 4 吋/秒—音速。压电传感器的压电晶体直径可小到 1.5 毫米。

流动可视化的有效方法，仍然是用阴影仪、纹影仪和干涉仪等光学方法，现在有人提出用电火花追踪法和用紫外线吸收进行可视化研究。

为更易于可视化，有的单位採用水台模拟。一般只能作定性研究。

随着元件的小型化、低压化，对实验技术提出了更高的要求，目前还缺乏对元件特性、线路特性、漏气检查等的检测工具。这个问题不解决，对于上百个元件的线路的调试、检测、修理影响很大。

5. 辅件和气源净化问题

目前辅件的研制是落后的，在线路中所用的辅件多属沿袭下来的气动或液动装置的辅件，不是根据射流技术的特点而配制的。

气源的净化依然是一个问题。有的地方使用无油气泵再用滤网过滤的方法来解决。

三 射流技术的发展趋势

目前国外射流技术的发展，正在从军工部门的广泛应用逐渐向民用工业部门扩展，从产品的研制逐渐向产品转移。在射流元件、线路方面正在向小型化、低压化、集成化、混合化方向发展。射流技术与电子技术、液压技术、气动技术等结合使用，尽量发挥各类技术的特点，这是最理想的也是控制线路的研制方向。因之，也就要求对于界面（中间）装置进行大力研制。尤其是关于气电转换装置。此外小型气动逻辑元件亦有发展的趋势。由于比例放大器的发展，在生产过程中採用模拟控制也有增加的趋势。为克服放大器的噪音，零点漂移等影响也有可能发展