

功率射流技术的进展

[英] Sheffield 大学 R. F. Boucher

提要 综述了功率射流装置及系统近 10 来实际应用的进展。核工业和水利工程两大领域提供了最引人注目的例子。在核工业中，已将其成功地用于空调控制和液体泵送。在水利工程中，对各种情形的暴雨雨水控制已形成了小型的射流技术工业。

关键词 功率射流技术

1. 引言

本文讨论功率射流技术的进展。确切地讲，论述了近 10 年来除军事应用之外几乎所有功率射流技术的成功应用。两个最显著的应用领域是核工业和水利工程。在这两大领域里，射流技术已达到了 25 年前它的创始者们所期望的，在恶劣的环境中具有的高度可靠性。在某些场合下要想具有这样的功能，非射流装置不可。除上述两大领域之外，还讨论了一些令人感兴趣的次要的应用，以及给出了某些业已证明可行的能开辟一些新的应用领域的资料。

II. 涡流二级管和节流阀

涡流二级管似乎是最简单的射流元件。它仅有一个无源二出口通道，可是，却有着惊人的功能。Zobel (1936) 首先对它作了精辟的阐述，即便是今天，Zobel 的设计仍具有性能和实际几何形状的最好的组合。在相同压降下，来流与回流之比的这种性能，称为“二极管性”。作为阀门使用时（例如在泵中），尽管也试图改善二极管性，但在应用中，最显著的进展还是作为节流阀来使流动仅仅沿一个（“回流”）方向流动。其道理很简单，但很重要。对给定的流阻，涡流节流阀具有比别的装置更大的流动面积。图 1 示出涡流节流阀和别的阀门的比较 (Brombach & Elalfy 1976)。这种装置已广泛地用于较小的下水道系统的

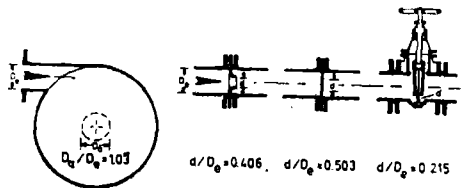


图 1 相同阻力下的喷嘴尺寸 (Brombach & Elalfy 1976)

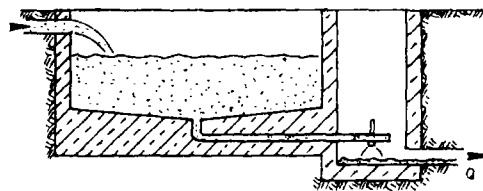


图 2 污水处理厂中用节流阀控制雨水出流

暴雨溢流管中。暴雨之后，储水池中水位升高，在这种情况下，必须用节流阀去控制污水处理厂的出流量，然后流进河道，如图 2。对一个小系统，节流阀应当有 100mm 长的管道。

由于管道会受内部粗糙度的影响，可以用一个口径为 200mm 或者稍小一点的涡流二极管来代替。尽管涡流二极管的尺寸较大，但当发生堵塞时，涡室中涡流的强度就会减弱。结果导致流量增加，流体势必冲出涡室。所以，这必然使得涡室具有很好的自清洗作用。在 Sheffield 附近安装有这种设备，其中，节流阀管道被污水中的化纤之类的垃圾堵塞，每周多达 3 次。该设备已运行 3 年，还没有出现什么问题。（Brombach 1985）也在德国装有许多这种设备。

涡流节流阀一个有趣的甚至令人误解的特性是所谓的超二次性，即压降随速度的变化幂高于 2 次。这种特性在普通节流阀中仅仅出现在小雷诺数的一个极窄区域内，而在涡流节流阀中，则在整个运行区域内都存在。超二次性意味着欧拉数随着雷诺数的增大而增大，亚二次性则相反（Boucher & Tippetts 1982）。欧拉数增大带来一个意想不到的结果——粘性增加导致流量增加，反之亦然！这种特性应当可以利用，它完全可以作为粘性传感系统的一种补偿。对此，笔者曾作过口头报告，介绍了在 Alfa-Laval 公司从离心机中生产奶油和别的产品稠度控制使用情况。

1. 锥形节流阀 涡流节流阀一个最大进步，是由于 Brombach (1983) 引进了锥形。这种装置是倾斜的，也就是说，其底部不完全水平（图 3）。在低阻状态，形成转角流动。在



图 3 锥形涡流节流阀及流动状态 (Brombach 1985)

高水头形成高阻抗时，产生涡流，其特征曲线见图 4。这种现象对暴雨雨水溢流节流阀是有好处的。涡流提供了大口径装置所需的阻力。低水头时，流动波将沉淀物冲刷掉而带进污水

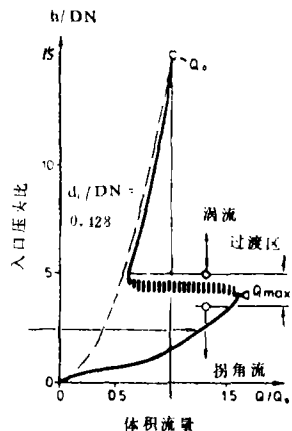


图 4 锥形节流阀的特征曲线 (Brombach 1985)

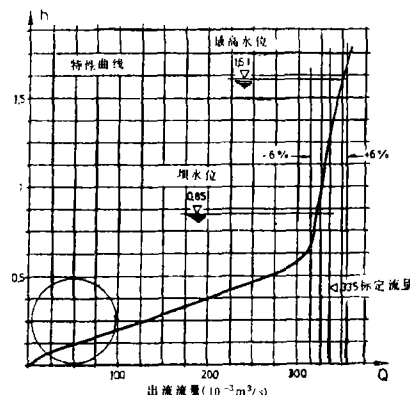


图 5 修改型锥形节流阀的特征曲线

处理厂，之后，清水在高水头作用下从储水池坝的一端溢流进入河道。Brombach (1985) 安装了许多这样的装置。

用几何修正法可将图4的S型曲线展平,即从拐角流到涡旋流的变化更为平缓,如图5所示。可以看出,当水头从0.62m变到1.59m时,流动为常量(偏差在±6%内)。这就为暴雨雨水溢流提供了方便。通常,溢流坝必须建得足够长,即使特大暴雨,坝址处的水位也并不显著增高。另一方面,通过节流阀到污水处理厂的流量会迅速增大。在Sheffield附近使用了这种修改型的节流阀(图5),水位能够从坝址处的0.85m升高0.76m,达到1.61m的高度,因此,只需在管道的另一端(装上栅屏设备)建造一座短坝。坝的最初设计不但很长,而且每一端的溢流都不得通过地下管道流入河中。可以预料,这种装置还将在另外一些水利工程中找到用途,比如灌溉和洪水控制。

2. 其他应用 Grant (1977) 介绍了涡流二极管在回流保护方面的作用。特别是,即使管道破裂,二极管也能限制其泄漏率,这既为处理事故赢得了时间,也避免了设备遭到更大的破坏。例如气冷核反应堆主冷却管破裂的情况。为此目的,射流二极管被装在两座英国先进气冷反应堆(AGR)中。

水利工程方面, Gspan (1979) 报道,将直径8m的涡流二极管安装在水电站的调压室里作为单向阻尼器。

III. 涡流放大器 and 涡流阀

由于涡流放大器(VA)在流动控制方面的潜力,它成了一种最令人感兴趣的射流元件。当然,多年来这种潜力还没有被充分挖掘。其主要原因似乎是,节流性能好的装置都具有双稳的趋势,并且当和线路连接时,许多涡流放大器具有噪音和不稳定性。但是这些缺陷已在核工业和水利工程两大应用领域中得到了克服。

1. 核工程中的空调控制 有时需要在略低于大气压之下保持具有放射性的环境,换句话说,空气不是排出核电站,而是被吸进去。典型的例子是手套箱,图6所示为普通控制式和射流控制式(Grant 1977)。在正常状态,一股小气流从小孔A连续进入箱体,箱体内为 $-2\text{in}(-50\text{mm})$ 水压。相对应地,从大气中来的高压控制流在涡流放大器中形成强大的涡旋,使之能高度节流。如果更多的空气进入箱体(例如破了的手套),其结果是真空度降低,涡旋放大器的源压增高。这种附加的源压降低了涡旋强度,进而导致通过系统的供流量大大增加。特征曲线见图7,其空压机真空度(I_v)为 1.5 kN/m^2 。流量约为 $1.5\text{ m}^3/\text{min}$

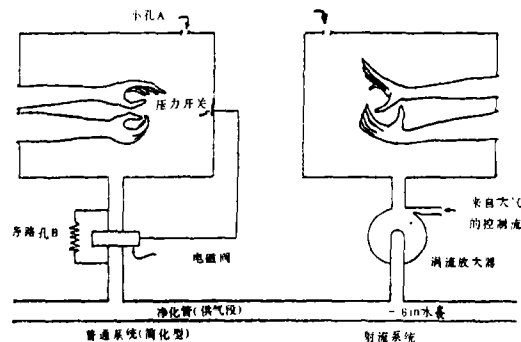


图6 普通控制式和射流控制式手套箱

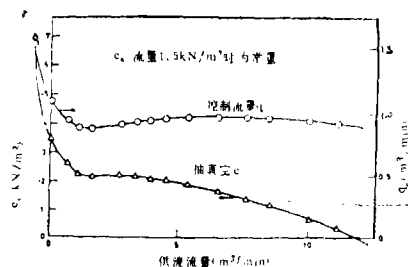


图7 典型空调控制涡流放大器特征曲线

时,额定可控真空度(I_v)为 0.2 kN/m^2 。对于这种装置,流量增加将近10倍。图8为典型结构图。

涡流放大器在核工程应用中的前提是，要求在了解其动力学和考虑各种形式的不稳定性方面有一个显著的进展。某些时刻流场的不稳定性，Boucher *et al* (1973) 已有过研究，但它仅引起低振幅（通常是周期性的）噪音，除非激起了系统的共振。当实验在恒定源压下进行，不少人报道（如 Owen & Syred 1980），流动具有负阻抗“跳跃”。第三种不稳定性是由于内部时间延滞，Tippetts (1981) 将其鉴别并与另外两种形式加以区别。他还给出了实用的解。如果想在设计核电站时避免上述这些不稳定性，那就必须将涡流放大器的动力学模型与空调网络中的动力学模型相结合。这些网络可加以扩充，图 9 是一个简单例子。Kitsios & Boucher (1985 A) 基于 Anderson (1972) 的工作，提出了和实测得的动力学量非常相似的一个动力学模型。该模型已用于线路的模拟，以预测结构的稳定与否，其结果良好 (Kitsios & Boucher 1985 B)。

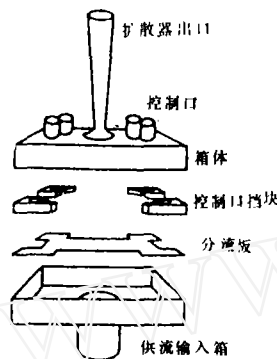


图8 核空调涡流放大器的结构（英国原子能管理局）

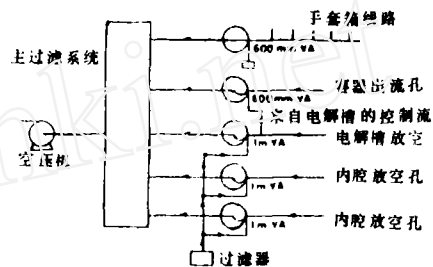


图9 核工程空调线路一例

当图 7 的压力特征曲线有一段随来流流量的增加而上升时，负阻抗也增加。其不稳定性很容易分析 (Kissanc & Boucher 1984)。这些不稳定性很难消除。当用恒定源压时，这类不稳定性引起涡流放大器高频运转时的不连续性（双稳性）。通过消除上升段或 S 形特征曲线来消除这种现象的一种新颖方法，已由 Blanchard & Duthie (1984) 提出。图 10 是在强旋流下引起控制流流动的一种装置。由于较好的静力学模型增进了对涡流放大器功能的了解，所以这种方法和其他特征线法将把涡流放大器的应用大大扩展到如下的一些领域：在恒定源压等情况下需要涡流放大器有较好的性能和连续的控制作用。

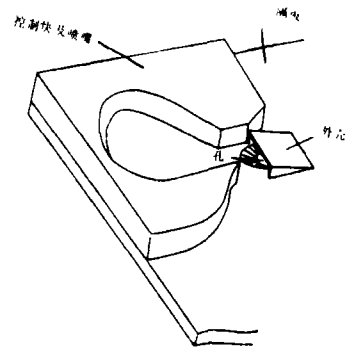


图 10 用于清除负阻抗的元件外形图 (Blanchard & Duthie 1984)

涡流放大器用来控制相对于作用到控制口处参考压力的相对压力。利用射流泵提供这一参考压力，在核空调系统中使用了这种压力调节器。同样的元件还用来提供压力降 (Tippetts *et al* 1978)。

2. 水利工程的应用和其他应用 具有新颖设计和功能的一种涡流放大器已用于洪水控制 (Brombach 1981)。如图 11，这种锥形阀的一个显著特点，是 900mm 直径的输入输出通道在一直线上，这使得由于泥石杂物所引起堵塞的可能性减到最低限度。具有这种特性的

一对装置被安装在一个洪水滞流池中，如图 12 所示。下部的输入控制流对涡流放大器起调节作用，因此，当水位上升时，水流排泄量最大 ($8\text{m}^3/\text{s}$)。如遇特大暴雨，水位达到最高 (179.8m)，这时，涡流放大器的第二个控制道起作用，同第一个控制道相对应，使水位降低。所以，这是一种应急的高排泄装置。

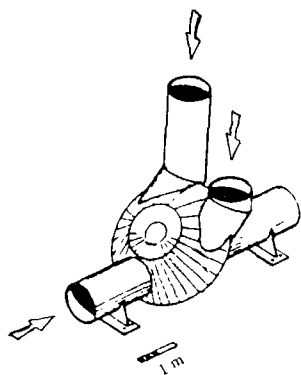


图 11 用于洪水控制的锥形涡流放大器 (Brombach 1981)

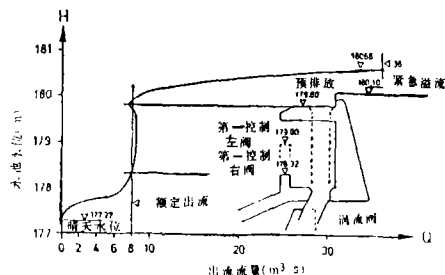


图 12 用于洪水控制系统的二维节流阀的特征曲线 (Brombach 1981)

涡流放大器作为一种开关装置，已使用于含尘炉中 (Owen & Syred 1980)，交替关闭含尘炉从流化床燃烧室来的热燃气流，然后清洗下游的过滤设备。用一股涓涓细流去控制来势猛烈的汹涌洪流，已引起人们的注意。Brodersen & Papadopoulos (1981) 报道，Martin-Marietta 公司应用了轴向控制式的涡流放大器。

3. 射流泵 射流泵在核工业中的进一步应用，已取得了令人瞩目的成就 (Tippetts et al 1981)。在该领域中，已安装并运转着很多具有重要功能的系统，来处理特别有害的液体，例如含 50% 固体碎片的废液。

用于核工业的射流泵必须具备尽可能简单的结构，以便进行制造和射线照相检查。供气系统也必须有高度的可靠性和耐用性。射流二极管桥式泵 (McGuigan & Boucher 1972) 完全能达到这一要求。Tippetts (1974) 发明了一种锥形可逆分流器 (RFD)，见图 13，并已用于效能泵中。二泵结构图如图 14。为控制某动作，排代容器需要交替地加压和抽真空。

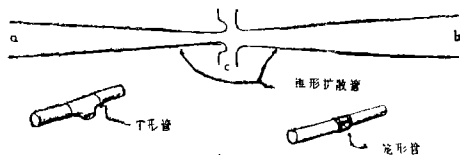


图 13 锥形可逆分流器 (RFD)

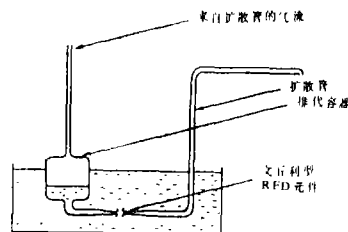


图 14 简单 RFD 结构图

一种方法是由电磁阀控制的两个射流泵提供，如图 15。其扬程为 7m ，流量为 $40\text{l}/\text{min}$ 。然而，一种巧妙的射流装置已由 Tippetts et al (1981) 设计出来，见图 16。这种装置用一个 Coanda 振荡器和一个涡流放大器来控制射流泵，从而给排代容器提供压缩空气。

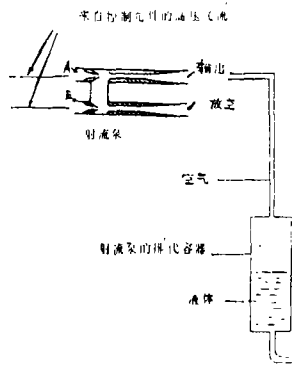


图 15 单作用泵控制装置

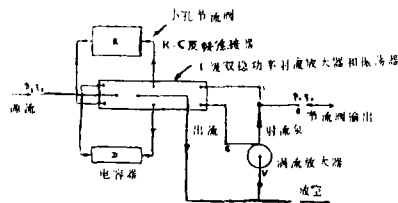


图 16 全射流单作用泵控制器

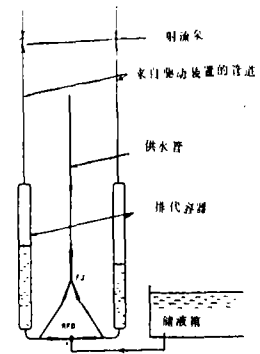


图 17 双作用 FJ-RFD 泵

单作用的 RFD 泵具有脉冲输出。在核工业的几种应用中，安装有一种连续输出泵，它由射流元件 (FJ) (Tippetts 1975) 和 RFD 组合控制 (图 17)。这种 FJ-RFD 泵问世引起了人们的兴趣，因为它仅仅在标准 RFD 上加一个极简单的元件。泵的安装指标为：流量 18 l/min 时，扬程 4m；流量 2 l/min 时，扬程 15m。将泵串联使用，扬程超过 22m 是极易达到的 (Tippetts et al 1981)。这种 FJ-RFD 泵需要一台合适的空压机交替地给每个排代容器加压。不必再抽真空。压缩空气可由普通的电磁阀直接从空气源提供给排代容器。如果重新充气时空气排放不必通过机械阀，那就也可以由射流泵提供。Tippetts 还设计出一种有很高可靠性的全射流装置 (图 18)。它利用了通过 RFD 泄流的特殊的涡流放大器。第一个涡流放大器没有旋流运动，从涡流放大器来的流体经由 RFD 给排代容器加压。第二个涡流放大器具有旋流运动，小的输出流通过 RFD 排出，使得排代容器的空气倒流，也通过 RFD 排出。

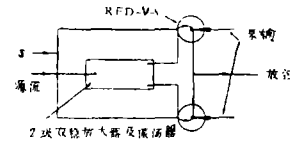


图 18 双作用全射流泵控制器

射流泵的使用和发展都取得了极大的成功，并赢得了设计师们的信任。毫无疑问，这些系统今后还会在工程中找到更为广泛的应用。

IV. 流量测量

从射流流量计问世 (Boucher & Royle 1973; Adams 1974) 至今，其实际应用是令人失望的，但也不无一些新的前景。

射流器件具有突出的性能 (Boucher et al 1975)，但是对于大管道，器件的尺寸会变得很大。一种具有互补作用的涡流冲洗器 (Boucher & Royle 1973) 已在这方面得到成功的应用。在小尺寸管道中 (小于 25mm)，射流器件具有特殊的作用。但是由于太小，以致难以找到可用的场所，因为只有在极低雷诺数 (换句话说，流速和粘性应很低) 的流体中才能工作。很明显，尚待开拓的应用领域是：家用煤气，石油，分区供暖和医疗流量测量。所以，实际应用中，特别需要扩大雷诺数的范围。

Brombach (1985) 将涡流节流阀作为压差流量计来调节污水流动。涡室的特点仍是由于旋流运动使之能起清洗作用并避免堵塞，且没有象孔板流量计那样的临界边缘，这意味着对不规则流动具有持久的稳定性能。这种流量计对低速流具有良好的自调功能，因为低速流的压力反馈信号常含有泥石等固体渣滓。如果阀门发生堵塞，反馈信号将使流量计开启，直至清洗干净为止。

V. 结论

功率射流的应用在近10年来已取得了显著的进展。尤其是, 涡流装置由于具有独特的流动调节功能, 已获得了肯定性的成功。注意到以下事实是十分有趣的, 即这些成功的应用都是由于灵活地利用了传统的原理的结果。核工程空调系统利用具有源流的涡流放大器, 其源流随“输入”而变, 并不是控制流动。Brombach 的涡流放大器不服从控制压必须大于输入压的规律。已经探明, 涡流二极管主要作为节流阀使用, 而很少考虑其二极管功能。迄今为止, 最成功的射流泵并没有很明显地当作二极管阀门使用, 而是以极新奇和成功的方式充实了动力阀(RFD)和Y型元件(FJ)的内容。人们还发现, 被广泛研究且著名的 Counda 仪也具有功率射流的作用, 例如许多应用领域里的分流器。而它最成功的应用或许应当是振荡式流量计。

不可能在这篇简短的综述中涉及所有功率射流的应用, 或者进行深刻的研究。这些不足之处, 也许可以通过参考 Boucher & Tippetts(1982)的有关综述以及 Tippetts et al(1981)对核工业应用和 Priestman & Tippetts(1982)对加工工艺应用方面的综述来多少加以弥补。

参 考 文 献

- Anderson, W.W. (1972), Dept. Mech. Eng., MIT., ScD Thesis.
- Blanchard, A., and Duthie, J.C. (1984), ASME paper 84-WA/DSC-22.
- Boucher, R.F., Asquith, R.W. and Royle, J.K. (1973), Inst.Measurement and Control, Symposium on Power Fluidics for Process Control.
- Boucher, R.F. and Tippetts, J.R. (1982), Aero.Res.Inst.Sweden (FFA), Report FFA TN 1982-25.
- Brodersen, R.K. and Papadopoulos, J. (1981), IEEE Trans.Aut.Control, AC-26(3):625.
- Brombach, H. and Elalfy, Y. (1976), Korrespondenz Abwasser, 23:295.
- Brombach, H. (1985), UFT publications, Steinstrasse 7, 6990 Bad Mergentheim.
- Brombach, H. (1981), ASME, J.Dyn.Sys.Meas.Control, 103:338.
- Gspan, J. (1979), Wasserwirtschaft, 69(12)
- Grant, J. (1977), CRC Critical Reviews of Environmental Control, 4:353.
- Kissane, M. and Boucher, R.F. (1983), J.Fluid Control, 15(4):63.
- Kitsios, E.E. and Boucher, R.F. (1985A), ASME, J.Dyn.Sys.Meas.Control, (Sept)
- Kitsios, E.E. and Boucher, R.F. (1985B), ASME Winter Annual Meeting.
- MacGregor, S.A. and Syred, N. (1982), Joint Auto.Cont.Conf.
- McGuigan, J.A.K., and Boucher, R.F. (1972), 5th Fluidics Conf., (BHRA Cranfield), paper X10.
- Owen, I. and Syred, N. (1980), Proc.Symp.20th Anniv.Fluidics(ASME), 187.
- Priestman, G.H. and Tippetts, J.R. (1982), Chem.Eng.Res.Design, 62(2):67
- Sobel, R. (1936), Mitt.Hydr.Inst.Munich, 8:1.
- Tippetts, J.R. (1974), 6th Fluidics Conf. (BHRA Cranfield), paper F3.
- Tippetts, J.R. (1975), Inst.Meas.Control, Symp.Process Control by Power Fluidics.
- Tippetts, J.R., Rimmer, E., Higginson, J. and McGuigan, J.A.K. (1978), Fluidics Quarterly, 10(3):67.
- Tippetts, J.R. (1981), 6th Fluid Power Symp. (BHRA Cranfield), paper F3.
- Tippetts, J.R., Priestman, G.H. and Thompson, D. (1981), ASME J.Dyn.Sys.Meas. Control, 103:342.

姜松邦 彭小方译自: Int. Symp. on Fluid Control and Measurement, Tokyo (1985). (康振黄校)