

有压瞬变流反问题研究综述

于永海, 索丽生

TV135

(河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 给出有压瞬变流反问题的定义, 在分析有压瞬变流系统的组成及其特点的基础上, 依求解目的的不同将有压瞬变流反问题划分为五类, 分别阐述其问题的提法、主要研究内容并举例说明. 介绍常用的求解方法及已有的研究成果, 并提出有待解决的问题.

关键词: 工程水力学; 水力过渡过程; 有压瞬变流; 反问题; 专题综述

中图分类号: TV135 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-7647(2000)05-0017-06

随着对各类自然现象认识的深入, 人们不再仅仅满足于对客观对象的较精确的分析预测, 而试图通过各种手段实现主动的控制, 使得系统按照指定的方式运行. 如果称对系统中的某种现象或过程的分析预测为研究解决正问题(forward problem), 则对系统中的现象或过程的主动控制就是研究解决反问题(inverse problem). 目前在不同领域的反问题研究方兴未艾^[1-3], 流体输送系统中的有压瞬变流(fluid transients)反问题研究也不例外.

有压瞬变流简称水锤、水击, 也称有压非恒定流、水力过渡过程等. 对流体的非恒定流动的研究可以上溯到 19 世纪中叶. 自 20 世纪初阿列维、儒可夫斯基等学者为水锤理论奠基以来, 有压瞬变流研究经历了解析法、图解法、数值计算法等阶段, 已经发展成为流体工程中一个比较成熟的学科分支. 目前可以说人们已经具有了很强的有压瞬变流的分析预测能力. 与此同时, 为了使流体工程中具有不同复杂程度的流体输送系统都能够可靠、安全、灵活地运行, 国内外学者同样饶有兴致地对有压瞬变流反问题特别是结合具体的工程进行了有益的探讨和研究, 并取得了不少具有理论意义和实用价值的成果.

1 定义及分类

1.1 系统组成

一般来说, 有压瞬变流系统由若干管道和若干系统元件组成. 有压瞬变流系统往往是比较复杂的, 其复杂性表现在两个方面: 一方面是系统的几何参数复杂, 系统中常含有不止一根管道, 并且不同管道之间有串联、并联以及分岔联接等不同的连接方式, 常常

以管网的形式存在. 另一方面是系统元件的特性比较复杂. 系统元件可有不同的分类方法. 若按照元件可控性能可分为不可控元件和可控元件. 控制水轮机导叶关闭规律的调速器、电动或液压启闭闸门、可调速或调角水泵机组等为可控元件. 不可控元件主要是指流体瞬变防护装置如开敞式调压室、逆止阀、水锤消除器、空气室、安全阀等, 也包括不可调速调角水泵机组、水库、管道终端的盲头、固定管嘴等. 按照元件所处的位置可分为终端元件和中间元件. 按照表达元件变量水头 H 和流量 Q 之间的关系式性质可分为动力型和非动力型元件. 关系式全部为代数式的为非动力型元件, 如水库、往复泵、定转速运行的离心泵、固定孔口、可调节阀门、启动运行中的离心泵等. 关系式中包括微分方程的则为动力型元件, 如空气室、气垫式调压室、阻抗式调压室、进气阀、排气阀、逆止阀、缓闭阀、水泵、水轮机、水泵水轮机等.

1.2 正问题与反问题

据有压瞬变流理论, 若近似认为摩擦阻力可用恒定流 Darcy-Weisbach 阻力计算公式表达, 在某一棱柱形管道内, 如果流体的可压缩性较低(如水、油等), 则有压瞬变流控制方程可表示为以水头 $H(x, t)$ 和流量 $Q(x, t)$ 为因变量的一维拟线性双曲型偏微分方程组:

$$gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{Q}{A} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} - \frac{Q}{A} \sin \alpha + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

式中: H 为水头; Q 为流量; a 为水击波速; f 为 Darcy-Weisbach 摩阻系数; A 为管道断面面积; D 为管径;

g 为重力加速度; α 为管线与水平面的倾角。

方程(1)和(2)与相应的初始条件、边界条件构成了数学上的适定问题。一般采用特征线法由特征线相容方程求解管道内点,管端则由元件特性关系式或管路连接情况决定的关系式与特征线相容方程联立求解。对于不止一条管道的系统,对其中每一根管道根据管端连接情况和元件特性均可列出相应的方程,当管端为动力型元件等复杂元件,在管端求解时较复杂,常常需要联立方程迭代求解。求解适定问题,得到因变量 $H(x, t)$ 和 $Q(x, t)$ 在空间的分布和随时间演化的规律,实现对因变量 $H(x, t)$ 和 $Q(x, t)$ 的预测,称其为有压瞬变流正问题。正问题求解要求系统元件的组成布置和管路的连接方式均是确定的;控制方程中各项的形式及其系数必须是确定的;初始条件是确定的;边界条件即系统元件的特性包括可控元件的调节规律也是确定的。也就是说从组成布置确定的系统初始状态根据控制方程和边界条件顺时间可推求下一时刻的系统状态,该过程可一直进行下去,直到认为获得了系统过渡过程中的全部信息即获得了系统在两个不同状态之间的过渡特性为止。如果将有压瞬变流正问题的某种必须已知的确定因素变为未知的待求解的变量,而将正问题的求解目标(未知的因变量 $H(x, t)$ 和 $Q(x, t)$)的一部分或全部作为已知的必须满足的条件,就构成了某类反问题。需要指出的是,为了保证反问题解的存在性,往往需要附加与正问题求解目标有关的某些信息,称之为附加条件。

以上是在时间域讨论的,在有压瞬变流中,水力振动问题通常在频率域中讨论。与时间域中的定义类似,已知系统组成和布置,进行系统自由振动和强迫振动分析是解决正问题。如果事先设定系统的自振频率特性或复频特性,反求系统组成或布置(如确定管道的长度、理想的元件特性等),这是解决反问题。

1.3 反问题分类

目前,对于由偏微分方程控制的系统中的反问题的分类,不同的研究者从不同的角度有不同的分类方法。文献[4]将数学物理方程中的偏微分方程反问题分为算子识别问题、逆时间过程问题、边界控制问题和几何反问题;文献[1]从工程水力学的角度将由偏微分方程控制的系统中的反问题分为参数控制、源项控制、边界条件控制、初始条件控制和形状控制反问题;而文献[3]则从工程的角度将反问题分为综合、控制及识别等几类。虽然有压瞬变流系统的控制方程也是偏微分方程,但有其自身的特点。尽管有压瞬变流系统千差万别,简单的系统如水库-单管-阀门系统,复杂的系统可以包括成百上千个管道和元件,但是为

了使得不同的系统在瞬变过程中都能安全可靠地运行,可以比较明确地确定几类控制目标和要求,它们也就是求解反问题的目的所在。本文根据求解目的的不同对有压瞬变流反问题进行分类。

1.3.1 限压控制反问题

控制系统瞬变流避免由于过高的水击压力而给系统带来的危害是研究有压瞬变流的主要目的。求解限压控制反问题以控制水击峰值为其目的,它可描述为在某一系统中给定水击允许峰值,反求能够有效控制瞬变流的参变量如水击波速、初始流速、可控元件的调节规律、系统元件参数等。例如:文献[5]结合核工业中流体输送系统的特点,研究了给定水击允许峰值反求水击波速或流速初值的两个反问题。

例如:水电工程中水力机械导叶优化控制规律问题^[6-12]。水力机械是一个复杂元件,一般来说,其流量特性与其转速有关。在水力过渡过程如混流式水轮机组甩负荷过程中,通过合理地设定导叶调节规律既能有效地控制水轮机蜗壳进口水击压力上升值又能控制水轮机转速上升率。求解以优化可控元件控制规律来控制水击压力峰值的反问题,具有实用性和经济性。对于一个系统,如果能合理地设计可控元件的控制调节规律,将能大大提高系统的动态特性。同一个系统,不同的调节规律,系统的瞬变过程不一样,系统中的水击压力不一样。也就是说在一种调节规律下,系统可以安全可靠,但在另一种调节规律下可能会造成系统的危害而不得不增加防护措施来提高管道的承载能力。因此合理地设计可控元件的控制调节规律,可以降低对系统的动态要求,常常可以减少防护措施,省去通常要求设置的某些保护装置,起到节约工程费用的作用。

例如:图1所示的系统,要求在水泵失电过渡过程中图中的A点处不发生水柱分离,确定在B处的空气室的尺寸及结构。这是一个反问题。水击峰值包括正水击和负水击峰值。控制负水击峰值就是使系统中的压力不小于流体汽化压力,避免出现水柱分离现象。若出现水柱分离,管道可能压瘪,而当水柱重新汇合时将产生非常大的正水击压力,有时足以致使管道破裂。以给定的水击峰值反求系统元件参数这个反问题,显然具有重要实用价值。

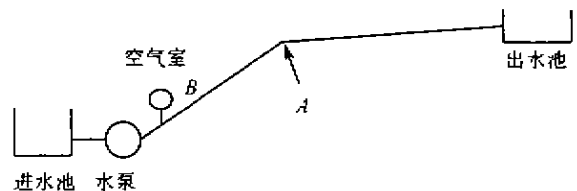


图1 限压控制反问题实例

1.3.2 限时控制反问题

限时控制反问题也是不少流体输送系统提出的问题,该问题可表述为如何调节可控元件实现在规定时间内系统运行工况的平稳过渡,一般要求在调节结束时即达到新的稳定工况,而不残留瞬变。

例如:抽水蓄能电站工况多、切换频繁而且要求在有限的时间(由电力系统的调节要求和电站机组组成的系统特性决定)完成工况切换,比如应该如何调节导叶使得在有限的时间内在电站由初始的稳定运行工况(水泵工况)切换到新的稳定工况(发电工况),就是其中一个限时控制反问题。

例如:输水、输油系统的工况切换,该工况的切换往往是通过多个阀门在有限的时间联合调节来实现的,如图2所示的系统初始工况是将流量 $3.0\text{m}^3/\text{s}$ 的油由管道1和2恒定输运至阀门C;管道3中无初始流量,要求通过切换阀门C和D使得最终工况为流量 $2.0\text{m}^3/\text{s}$ 由管道1和3恒定输运至阀门D;管道2中无流量,该问题可以按限时控制反问题求解,而得到在整个调节过程中两阀门的调节规律,使得调节过程结束瞬变过程也结束,达到新的稳定工况。

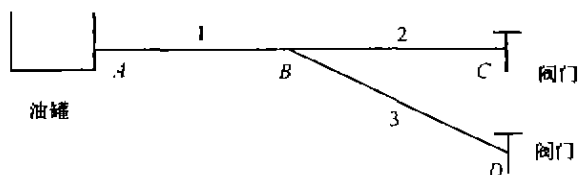


图2 限时控制反问题实例

1.3.3 系统辨识反问题

选定系统中的测试点,通过实时监测或测试,得到这些测试点在瞬变过程中的各有关参变量如水轮机导叶开度、转速、流量、压力等的瞬变过程,根据这些数据资料,分析辨识系统元件的特性如阀门的流量特性、管道渗漏点的位置及其渗漏流量等,构成了一类有压瞬变流反问题,称之为系统辨识反问题。

在求解有压瞬变流正问题时,元件特性常用静态特性代替动态特性进行分析计算,从而在一定程度上造成了计算结果与实际过程之间的偏差,如果通过对模型、原型测试数据资料的分析,可以辨识得到元件的动态特性,那将是一条研究元件动态特性的有效途径,例如可以沿着该思路探求水力机械动态特性,需要指出的是到目前为止对于水力机械动态特性的研究仍是一个热门的研究方向^[13]。

研究解决渗漏检测问题,就是求解系统辨识反问题,其目的是能够比较准确地确定流体输送系统中渗漏点的位置及其渗漏流量,为系统的运行、维护及检修创造比较有利的条件,该问题广泛存在于长距离管道输油输气工程、市政工程中,据有关资料,

城市给水管网中的渗漏量非常大,在有些城市,渗漏量甚至可占到总用水量的40%~50%^[14],管道流体输送工程的渗漏地点不仅可在节点(阀门、三通管接头等)而且可在管道中(管道破裂),流体渗漏不仅浪费能源、降低输送质量,严重的可以造成管道工程瘫痪、管道沿线出现地陷、环境污染等事故,因此,理所当然投入比较大的人力、物力对该问题进行研究,渗漏检测的常用方法有听声法、红外检漏法等,但它们均有明显缺点,听声法费工费时、经验性非常强;红外检漏法基于流体静力学原理且检测时需要切断系统的一部分,很不方便,一个比较简单且准确的渗漏检测方法无疑具有很大的经济意义,为便于运行管理,一些工程建立了繁简不一的SCADA(supervisory control and data acquisition)系统来进行实时监测和控制,如果能通过对SCADA系统有关的监测数据进行分析来解决渗漏检测问题,将是一个简便的方法,对于未建立SDACA系统的工程,需要在有关测试点处安装监测仪器,经通讯组网与数据分析处理计算机一起,组成渗漏检测系统,目前,很多学者基于该思路研究了渗漏检测问题,总括起来有两个方向:一个方向建立在恒定流理论基础上^[15,16];另一个方向建立在有压瞬变流原理基础上^[17,18],前一个方向自然有其局限性,因为实际的管网无时无刻不处于非恒定流状态;后一个方向应该能较好地解决该问题,对系统中若干采集点采集的数据根据有压瞬变流原理分析求解系统中未知的渗漏点的位置以及渗漏流量,是一类有压瞬变流反问题,深入研究该问题具有较高的经济性和实用意义。

1.3.4 整体可控性反问题

在调节过程中系统处于瞬变过程,系统调节结束希望瞬变也同时结束而在整个系统中不残留瞬变,这就是说系统具有整体可控性。

在管道布置基本确定的前提下,布设系统元件时更多考虑的是系统要实现的功能、系统运行管理的方便,在设计系统时考虑到系统的安全可靠性,也需要布设一些元件实现水锤防护,元件的选择、布设一般并不会影响系统的总体功能,但常常会影响系统的整体可控性,实际上不少系统并不具有整体可控性,如图3所示的系统就是一例,在调节过程结束时,管道3中可能残留瞬变。

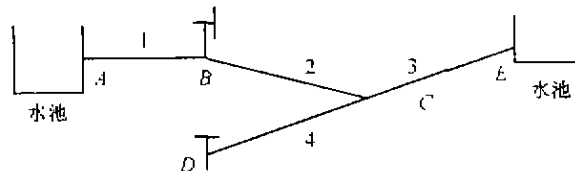


图3 整体可控性反问题实例

给定一个系统,如何判断它的整体可控性?如果系统整体不可控,对原来系统附加怎样的条件就可实现系统的整体可控?研究解决这些问题,就是求解整体可控性反问题.在上述研究基础上,可将其中的研究成果应用到系统设计中,即根据系统中的管道联接方式选择性地布置系统元件实现系统整体可控的目标.分析研究系统元件特性对系统的整体可控性的影响也属于该类反问题的研究范畴.

1.3.5 抑制水力共振反问题

水力振动是有别于水击波动、质量波动(如调压室水位波动)的非恒定流现象.它是系统中可压缩水体所发生的流量变幅较小、压力变幅很大、频率较高的周期性振荡.水力共振可分为强迫振动引起的水力共振和自激共振.水力共振将会对系统造成很大的危害.目前水力共振的分析预测方法已比较成熟^[19].人们自然要问能否通过合理地设计系统抑制水力共振,这就是反问题.自激共振主要是由一些水力元件的特性引起的,可以通过改善元件水力特性(如改进阀门的密封性能)、尽量使系统运行在水力稳定区(如尽量不在水泵水轮机的“S”形区运行)等措施来抑制自激共振.强迫共振发生于扰动源频率等于或接近系统的自振频率时.分析系统可能的扰动源频率范围,确定较理想的系统自振频率特性,由此出发设计系统.这是求解该类反问题的思路.更多的情况是系统组成和布置基本确定,要求在此基础上抑制强迫共振.实践证明通过对系统的稍许改变如改变某些管道长度、在一些地方加装谐振短管等能改变系统的水力阻抗从而改变系统的自振频率,避开强迫共振发生的频率点或范围,从而有效地抑制水力共振.

2 求解方法

就目前发展状况而言,反问题的求解方法还远未成熟^[4,20,21].由于数学上对反问题解的存在性、唯一性和稳定性尚未给出一般证明,普适的求解方法很难建立.对某些反问题适用的方法未必能推广到其它反问题,从而导致人们只能对特定的反问题去寻求特定的求解方法.有压瞬变流反问题的求解也是沿着该方向发展的.目前,国内外学者经过研究和探讨,特别是结合各自需要解决的有压瞬变流反问题,得到了不少经实践证明行之有效的求解方法.下面介绍其中常见的、应用范围较广的求解方法,大致可分为基于阀门程控(valve stroking)概念方法、最优化方法、基于现代控制理论方法、脉冲响应法、尝试法等.

2.1 基于阀门程控概念方法

文献[22,23]详细阐述了阀门程控的概念.阀门

程控是一种可以推求控制装置的动作使得系统的瞬变过程按照事先给定的方式进行的综合设计方法.应用该方法可求解不少有压瞬变流反问题,如限压控制反问题、限时控制反问题、系统辨识反问题中的渗漏检测问题等.该方法突出强调了调节结束后系统中不残留瞬变.

基于阀门程控概念方法实质上是基于沿空间方向的特征线法,即计算时可以已知上游参数求下游参数,也可以已知下游参数求上游参数.数学物理方程理论认为,以双曲型方程描述的物理过程具有双方向波动性.有压瞬变流的控制方程为双曲型,其求解方法——特征线法具有方向可逆性,因此计算可以顺时也可以逆时进行.该特点为基于阀门程控概念方法提供了理论基础.

应用该方法求解限时控制反问题,步骤比较简单,就是沿空间方向的特征线法的运用.如果调节元件在下游,则已知或设定上游在规定时间内瞬变参数,推求调节规律.此时可以使系统在规定时间内从一个恒定状态到另一个恒定状态,调节停止的同时瞬变消失.

应用该方法求解限压控制反问题,仍运用沿空间方向的特征线法,但其中使用了明晰的有压瞬变流物理概念(以管道最大压力限制为例).首先,使调节元件的压力在 $2L/a$ (L 为管长, m ; a 为波速, m/s) 内线性增加到最大压力限制值,在时间 $t = 2L/a$ 时压力管道内形成均匀流和直线型反向压力坡度线;然后,调节元件处保持最大压力值,让反向压力坡度线和管道阻力共同使管道中的均匀流减速,最先达到流速最终稳态值的是上游末端,再经 L/a 整个管道的流体达到最终稳态值,也就是调节元件停止动作的时刻;其中在调节元件停止动作前 $2L/a$,应使调节元件处的压力开始降低,当调节元件停止动作时,调节元件处的压力恰好降低到最终稳态值.

文献[23]介绍了应用该方法确定管道中渗漏地点及其渗漏量的原理并经实验验证了该方法解决渗漏检测问题的有效性.

目前,不少学者将该方法已成功地运用到不同的流体输送系统中,如石油和天然气输送系统、泥浆输送系统、柴油机燃料喷射系统、混流式机组水电站导叶最优关闭规律^[11]、泵系统阀门最优关闭程序^[24]等.可以预见,该方法的应用场合将会越来越多,与此同时,也将会有不少应用中的具体问题有待解决.

2.2 最优化方法

最优化方法是求解反问题的有效方法.有压瞬变流反问题中的限压控制反问题可用最优化方法探求满足给定的理想压力过程线或要求瞬变过程中水击

压力最小的最优可控元件调节规律.以给定的理想压力过程线或瞬变过程中水击压力最小为目标函数,描述瞬变过程的控制方程及可控元件的特性约束等作为约束条件,用最优化方法求解该问题就得到了最优调节规律.这里控制方程通常是特征线相容代数方程,有时也用其它形式,如可用状态方程描述水电站水力-机械过渡过程.诸如蝶阀的可控角不大于 90° 、阀门开度不大于1等拟作为可控元件的特性约束.常用的最优化方法是单纯形法、外推内插法等.

文献[25]用单纯形法决策寻优结合特征线法研究了泵系统中蝶阀在总关闭时间一定的前提下两阶段关闭规律的优化问题.以泵系统水锤压力最小为目标函数,快关时间和快关角作为优化变量,特征线法形成的代数方程以及蝶阀特性约束和水泵倒转转速约束,一起组成约束条件,用单纯形法求解.单纯形法的基本思想是先寻求一个可行解,然后由此出发,通过换基迭代,不断改进,直至最终得到最优解,即满足目标函数和约束条件的最优决策.最优解对应的快关时间和快关角即为所求的蝶阀两阶段优化关闭规律.

文献[12]提出了一种导叶完善关闭规律的数值计算方法.机组甩负荷时要求蜗壳进口压力过程线呈理想的梯形,此乃目标函数.以描述大波动过渡过程的状态方程等作为约束条件,导叶关闭速率作为优化变量,用外推内插法优化.

目前看来,最优化方法主要应用在限压控制反问题中.从最优化原理看,它的应用场合不应仅仅限于此,有待进一步研究.

2.3 基于现代控制理论方法

现代控制理论建立在状态空间基础上.有压瞬变流系统为分布参数系统.文献[26,27]系统阐述了分布参数系统的稳定性、能控性和能观性、最优控制理论等控制论的主要内容.但目前理论上还处于发展阶段.由于直接针对分布参数系统进行研究比较复杂,人们往往对分布参数系统在时间或空间上离散,以纳入到理论上比较成熟的集中参数控制系统的控制论研究框架中去研究,不过此时要注意离散后的系统与原系统之间可能发生的性质差异.

文献[28]用特征线法将有压瞬变流控制方程沿特征线离散,得到集中参数控制系统的状态方程,再由现代控制理论方法推证了一种阀门关闭规律,能够实现最短的时间内将流量从初始值调节到设定的最终值,称之为“quick stroking”.

基于现代控制理论解决有压瞬变流反问题,至今应用尚少.但从有压瞬变流控制方程、系统特点和反问题的提法来看,可以预见该方法的应用前景是

广阔的,作者认为至少在限压控制反问题、限时控制反问题、整体可控性反问题等几类反问题中可以应用该方法.

2.4 脉冲响应法

脉冲响应法是系统辨识的常用方法.脉冲响应法的理论基础是一个系统的动态特性可以由系统对脉冲的响应来反映.因此,为了辨识系统,最直接的办法显然是给系统输入脉冲,然后监测系统的响应.但这样一个思路行不通,因为脉冲极易被干扰信号所“淹没”.不过可以利用伪随机二位式序列信号(PRBS)用互相关的方法得到一个系统的脉冲响应.该结论基于一个线性系统的定理:对一个线性系统,以一宽频带信号作为系统的输入,该信号与输出的互相关正比于系统的脉冲响应.PRBS可以作为较理想的宽频带信号.

文献[29]对水力机组动态模型进行了在线辨识.在本文所列的五类有压瞬变流反问题中,该方法最直接的应用应该是系统辨识反问题中的渗漏检测问题.文献[18]给出了具体的应用阐述.

2.5 尝试法

用尝试法求解有压瞬变流反问题,就是将待求的未知量赋以猜测值,将反问题转化为正问题求解,然后将解答结果代入控制目标视其是否得到满足,如果不满足,则修改猜测值,重解正问题,如此循环,直到控制目标得到满足为止,此时的猜测值即为所求的反问题的解答.

尝试法概念简单,缺点是费时、经验性很强.可以说研究反问题解法的目的就是尽量不使用该方法,但对一些目前尚难求解的反问题,尝试法将是可以考虑采纳的求解方法.当然在求解过程中,可以根据已进行的一系列猜测值求解的正问题结果,经分析判断较合理地给出下一个猜测值,避免太大的盲目性或者给出某些判别式对结果直接判断以利于较快得到反问题的解答结果.文献[5]就采用了建立在判别泛函基础上的尝试法求解解压控制反问题中的反求流速初值和波速的问题.

3 待研究解决的问题

虽然国内外学者对有压瞬变流反问题的研究已取得了不少有价值的成果,但仍有不少问题有待解决.一方面按照本文的分类方法,可以肯定随着有压瞬变流反问题应用范围的不断扩大,与本文所列五类反问题求解目的不同的反问题将会被提出,对此要作相应的研究;另一方面在本文所列五类反问题中,有的类别的反问题研究目前尚未见报导或研究成果尚少,如整体可控性反问题、抑制水力共振反问

题,目前的研究成果基本上集中在其它三类反问题上.即便如此,由于有压瞬变流系统的复杂性,已有成果也远未达到完善的程度,尚有不少问题需要深入研究.总之,至少可针对以下问题作探讨研究.

a. 摄动法是不少领域中求解反问题的一种有效方法.这种方法作为有压瞬变流反问题的求解方法的有效性如何?与本文列举的求解方法相比,这种方法的优点在哪里,最适合求解的是哪类反问题?当有压瞬变流系统具有何特点时,应优先选用该方法求解?

b. 如何判别一个有压瞬变流系统的整体可控性?系统元件特性对整体可控性的影响及其影响范围?若系统整体不可控,采取何措施可以使得该系统整体可控?

c. 对一个运行中的有压瞬变流系统,若在其中有水力共振现象,如何综合出一个具体可行的方法,使得系统的自振频率偏离扰动源频率范围?在设计系统时,在充分考虑管路沿线的地形、地质等限制因素的前提下,如何通过合理地改变管长、管径或设置一些结构简单但很有效的元件,就可使系统不发生强迫共振?关键问题是这样一个反问题:根据对扰动源频率的分析,确定出系统的自振频率的理想范围,反求系统中的部分管道的几何参数或加装元件的主要参数.

d. 如何用系统辨识的方法推求出系统元件特别是水力机械的动态特性?

4 结 语

有压瞬变流广泛出现在水利电力、航空航天、石油化工、液压传动等领域,对有压瞬变流的分析预测固然重要,但人们不会满足于此,希望有压瞬变流能按照指定的方式运行,希望能够主动控制或识别系统特性.而这正是有压瞬变流反问题研究的强大动力和重要意义所在.

本文按照求解有压瞬变流反问题的目的进行分类,介绍了常用的求解方法及已有的研究成果,提出了有待解决的问题.可以相信,随着对有压瞬变流反问题研究的深入,有压瞬变流系统运行的可靠性、安全性和灵活性将会得到比较大的提高.

参考文献:

- [1] 金忠青,周志芳.工程水力学反问题[M].南京:河海大学出版社,1997.1~15.
- [2] 杨文采.地球物理反演的理论与方法[M].北京:地质出版社,1997.
- [3] Simonian S S. Inverse problems in structural dynamics—I, Theory[J]. Int J Num Meth Engrg, 1981, 17:357~365.
- [4] 刘家琦.数学物理方程反问题的分类及不适定问题求解[J].应用数学与计算数学,1983(4):43~65.
- [5] 何三昱.水锤反问题与水锤控制[J].水动力学研究与进展 A 辑,1989,4(1):633~639.
- [6] 常近时.水力机械过渡过程[M].北京:机械工业出版社,1991.
- [7] 沈祖诒.水轮机调节[M].第三版.北京:中国水利水电出版社,1998.
- [8] Petry B, Mehdi A. Controlling water hammer at small hydro plants by valve stroking[J]. Int J Hydropower and Dams, 1996, 3(4):56~61.
- [9] 常近时.水轮机运行[M].北京:水利电力出版社,1983.
- [10] 严亚芳.水力机组暂态特性及参数优化[M].北京:中国水利水电出版社,1996.
- [11] 谢庆涛.混流式水轮机甩负荷过程导叶关闭规律的优化计算[J].水利学报,1987(8):68~73.
- [12] 陈乃祥,梅祖彦.导水叶完善关闭规律的数值计算方法[J].水力发电学报,1985(3):59~69.
- [13] 索丽生.国外有压瞬变流研究进展[J].河海科技进展,1991,11(2):9~15.
- [14] Tucciarelli T, Criminisi A, Termini D. Leak analysis in pipeline systems by means of optimal valve regulation[J]. J Hydr Engrg, ASCE, 1999, 125(3):277~285.
- [15] Altman T, Boulos P F. Solving flow-constrained networks: inverse problem[J]. J Hydr Engrg, ASCE, 1995, 121(5):427~431.
- [16] Pudar R S, Liggett J A. Leaks in pipe networks[J]. J Hydr Engrg, ASCE, 1992, 118(7):1031~1046.
- [17] Liggett J A, Chen L C. Inverse transient analysis in pipe networks[J]. J Hydr Engrg, ASCE, 1994, 120(8):934~955.
- [18] Lion C P. Pipeline leak detection by impulse response extraction[J]. J Fluids Engrg, ASME, 1998, 120(4):833~838.
- [19] 索丽生,周建旭,刘德有.水电站有压输水系统的水力共振[J].水利水电科技进展,1998,18(4):12~14;22.
- [20] Tikhonov A N. 不适定问题的解法[M].王秉忱译.北京:地质出版社,1979.
- [21] 金忠青.流体力学反问题:从预测到控制[J].河海大学科技情报,1989(1):1~12.
- [22] 怀利 E B,斯特里特 V L.瞬变流[M].清华大学流体传动与控制教研组译.北京:水利电力出版社,1983.
- [23] Wylie E B, Streeter V L, Suo L. Fluid transients in systems[M]. Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.
- [24] 蒋劲.确定泵系统阀门最优关闭程序的 VS 法研究[J].武汉水利电力大学学报,1994(5):481~486.
- [25] 刘光临,蒋劲,易钢敏.泵系统水锤最优阀调节研究[J].流体工程,1992(5):40~46.
- [26] 林伟,刘明扬,陈云烽,等.分布参数控制系统[M].北京:国防工业出版社,1981.
- [27] 张学铭.分布参数系统最优控制过程数学理论[M].济南:山东科学技术出版社,1980.
- [28] Goldberg D E, Karr C L. Quick stroking: design of time-optimal valve motions[J]. J Hydr Engrg, ASCE, 1987, 113(6):780~795.
- [29] 徐枋同,陈健.水力机组动态模型在线辨识[J].水利学报,1988(3):28~36.

(收稿日期:1999-10-25 编辑:马敏峰)