



基于模糊PID的长输管道调节阀 压力控制系统研究与仿真





报告内容

第一部分 研究背景

第二部分 技术应用

第三部分 工作原理

第四部分 整定方法

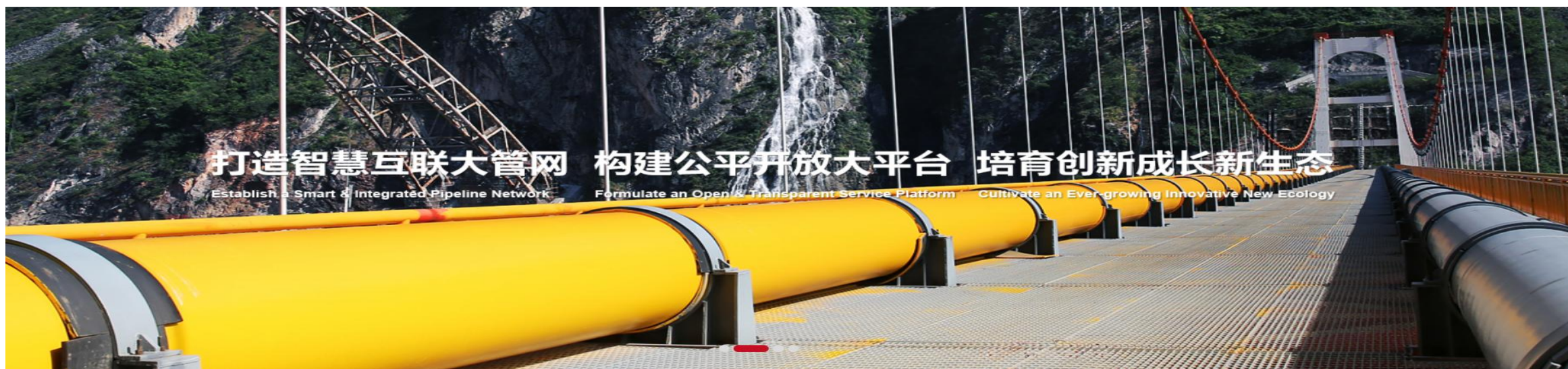
第五部分 算例验证

第六部分 未来展望

第一部分 研究背景

研究背景

随着长输管道自动化技术的不断进步，管道运行控制模式已经从**站控**到**中控**并向**管网联控**发展，但依然存在部分管道企业的控制逻辑相对落后的问题，不能满足管道安全运行的需要。某成品油管道自投产以来已运行多年，但一直未投用PID控制器进行自动控制，虽然SCADA系统设置有相应的操作切换界面，但调度员往往根据个人经验手动设定变频泵转速和调节阀开度，通过**人工干预**的方式来进行压力调节，而不是采用自动控制手段按调节逻辑进行控制，压力发生波动后，调度员根据**个人经验**对设备进行应急反应式调节控制，这在时间上相对滞后且难免会出错。



第一部分 研究背景

研究背景

究其原因：一是缺乏既懂工艺又懂自控的复合型人才，调度员往往选择相对熟悉的人工手动调节方式，但对于PID控制原理无所适从；自控专业人员虽然熟悉运行控制系统，但对管道工艺运行缺乏应急处置经验。二是管道投产前PID控制器参数设定相对粗糙，管道投产后未及时有效进行参数整定，以致投用PID自动控制时调节阀的**调节时间长、执行机构动作相对频繁**，加之**参数整定不合理**将会导致控制效果非常不理想，影响设备的**可靠性**和管道运行的**安全性**。因此有效的管道控制系统是长输管道安全高效运行的重要保障，可以规避人为风险，减少主观误判，且对缩短应急处置时间、最大限度减少经济损失、提高长输管道的智能化水平具有十分重要的意义。





报告内容

第一部分 研究背景

第二部分 技术应用

第三部分 工作原理

第四部分 整定方法

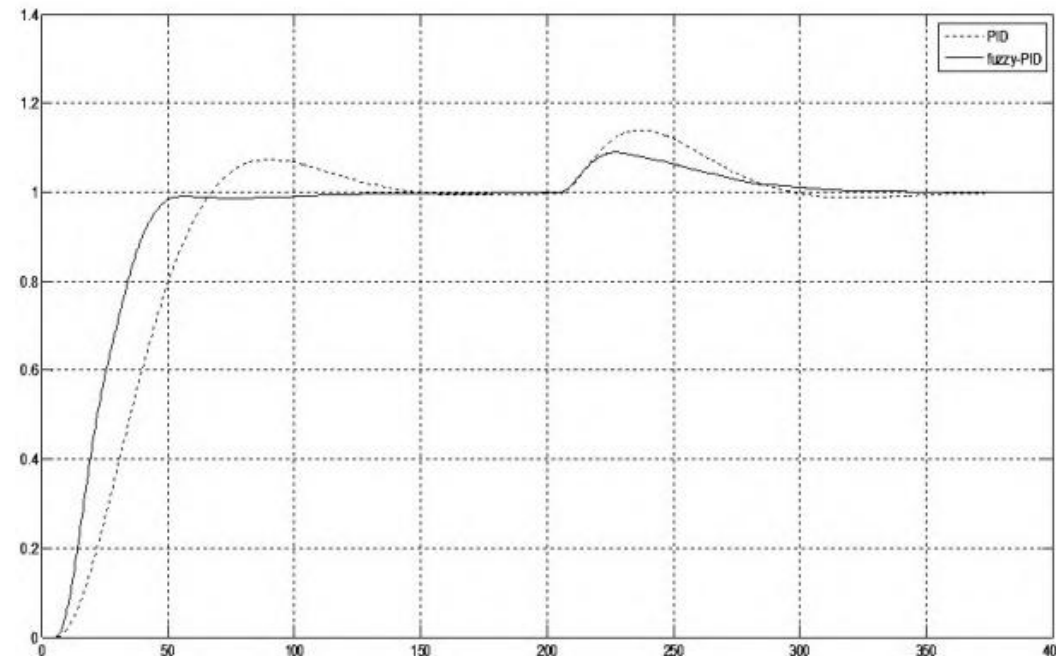
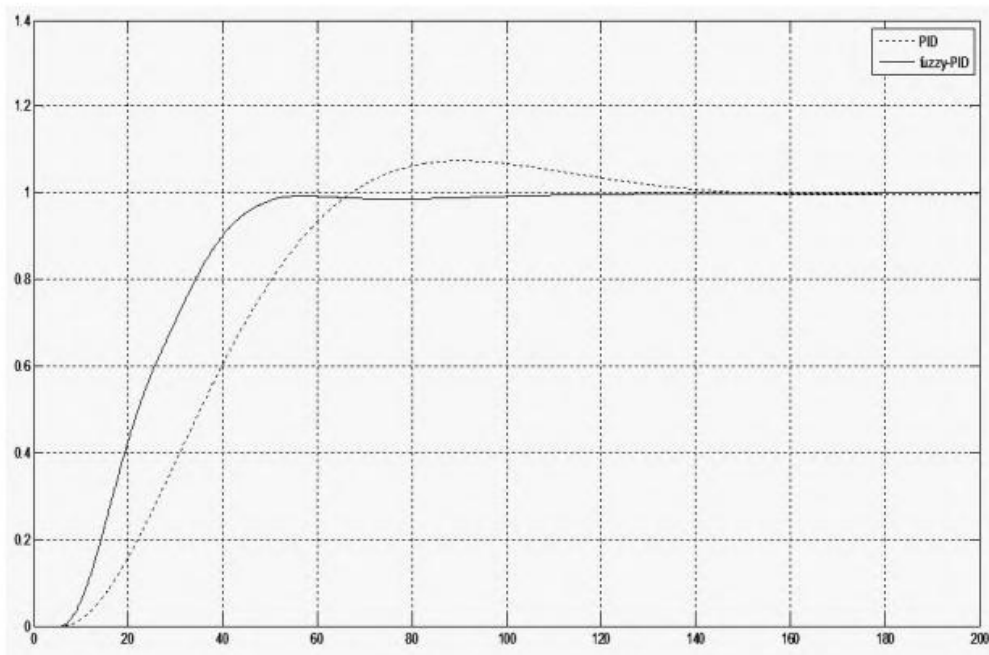
第五部分 算例验证

第六部分 未来展望

第二部分 技术应用

技术应用

管道实现**智能调控**是发展智慧管网的重要基础之一，而被广泛应用于长输管道系统的PID控制技术可以有效保证管道压力发生波动后尽快趋于新稳态。PID控制是一种对设定值与被调量二者之间存在的**偏差**进行持续检测使得控制向**减小偏差**的方向发展，并且通过**负反馈**的结果差值作为调节控制器的输入量进行运算，从而不断修正输出量的控制策略。





第二部分 技术应用

技术应用

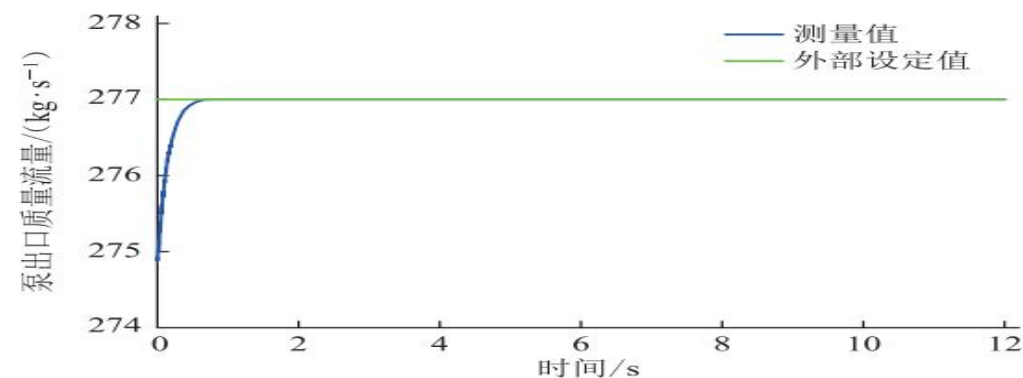
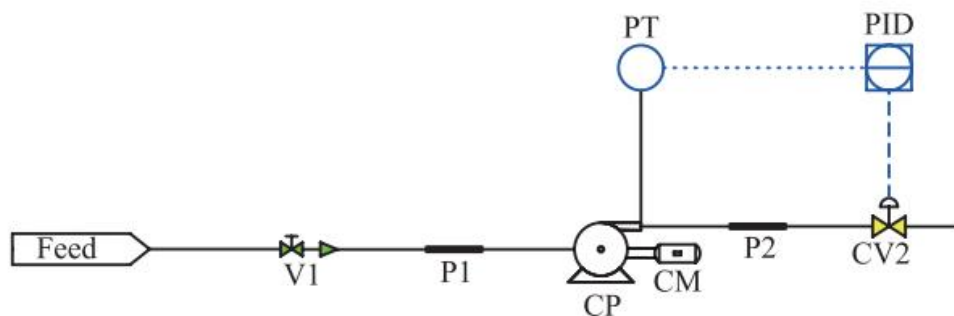
对于自动阀门而言，PID控制就是将管道设定的压力值与实际检测的压力值之间的偏差作为控制器的输入量对其进行P、I、D运算，将控制器的计算结果转换为输出指令去相对精确控制执行机构，进而调节阀门的开度，实现管道压力达到期望值的目的。其**优点**是操作方便、结构简单、鲁棒性好、可靠性高、适用范围广、对模型依赖少且稳态无静差，为现场工程设计人员所熟悉，所以PID控制作为**基本控制方式**在工业过程控制领域中的应用最为广泛。

目前已有部分学者取得成果，姜礼斌分析了阀门的水力特性和力学特性，针对管道阀门的控制过程详细说明了PID控制原理与控制方法的实现过程，以现场实测数据为支撑进行限制压力的PID参数控制仿真，通过结果分析总结了相应的阀门关闭规律，进而阐释了阀致水击的控制问题。**魏亮**通过分析长输管道PID控制系统工作原理，结合PID控制对调节阀压力响应、油品泄漏异常工况的识别等方面的影响，对长输管道系统投用PID后存在的风险进行辨识，并针对不同的风险提出相应的防控措施。**郝勇**结合油气管网运行中发现的问题，研究PID控制在长输成品油管道中的应用，利用水力仿真模拟软件SPS对前沿PID调节技术进行模拟，依据个人在长输成品油管道调控的经验，通过在SPS软件中建模、编程开发出PID手自动控制无扰切换和无扰自动切泵程序。

第二部分 技术应用

技术应用

温凯等分别通过SPS软件和K-Spice软件对同一单管泵阀进行物理建模，随后对所建立的模型进行PID仿真，经分析对比后得出K-Spice软件的PID控制模型仿真过程相比较于SPS软件则更加灵活直观更加智能、模拟结果则更为合理的结论，所做的工作可为K-Spice软件后续在更为复杂的管网模型仿真控制研究方面提供更多的思路与参考。任亮以某多起伏大落差的山区成品油管道作为研究对象，通过SPS建模并采用遗传算法对PID控制参数进行自整定寻优，将参数整定结果应用到模型中，通过SPS和MATLAB软件进行仿真模拟，从而验证管道控制逻辑的合理性。林永刚等以阿独乌鄯原油管道系统为研究对象，采用工程整定法对调节阀PID参数进行重新整定，整定后压力调节时间有所缩短且震荡波动较小，实现了进站调节阀在应急工况发生时的快速控制，但该研究仅限于某一特定的PLC的控制模块，普适性有待于进一步验证。





报告内容

第一部分 研究背景

第二部分 技术应用

第三部分 工作原理

第四部分 整定方法

第五部分 算例验证

第六部分 未来展望

第三部分 工作原理

根据控制器的输入偏差修正控制量的闭环过程即**反馈**，反馈是自动控制理论的核心思想，反馈控制分为正反馈和负反馈。其中，修正的控制量使得偏差减少即**负反馈**，修正的控制量使得偏差增大即**正反馈**。正因为PID控制器是以设定的期望值SV（Setpoint Variable）与经过模数（A/D）转换后的被调量的实测值PV（Process Variable）二者不断进行比较形成的控制偏差作为输入信号，由控制器处理经数模（D/A）转换形成的信号传递给执行元件，人们最终期待的**理想控制结果**是实测值接近设定值甚至等于设定值，使得偏差不断减小甚至趋近于0，所以PID控制实际上是一种**负反馈控制**。

PID控制律即偏差信号经比例、积分、微分运算后其线性组合可以构成连续型PID控制器的输出信号。

$$u(t) = K_P \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right]$$

第三部分 工作原理

对上式的两边进行拉氏变换后可得

$$U(s) = (K_P + K_I \frac{1}{s} + K_D \cdot s) \cdot E(s)$$

整理得到闭环系统PID控制器的传递函数 (Transfer Function) :

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D \cdot s$$

为便于表示, 将偏差用 $e(t) = \Delta$ 进行代替, 采样周期为 ΔT , 若每秒进行一次数据采集, 则 $\Delta T = 1s$, 此时将积分项 I 进行离散, 即:

$$I = \frac{1}{T_I} (\Delta_0 + \Delta_1 + \Delta_2 + \dots + \Delta_n) \Big|_{t=n}$$

第三部分 工作原理

于是上式离散后得出以差分方程形式表示的第n次输出信号

$$u_n = K_P \left[\Delta_n + \frac{1}{T_i} \sum_{i=0}^n \Delta_i + T_D (\Delta_n - \Delta_{n-1}) \right]$$

位置式PID算式

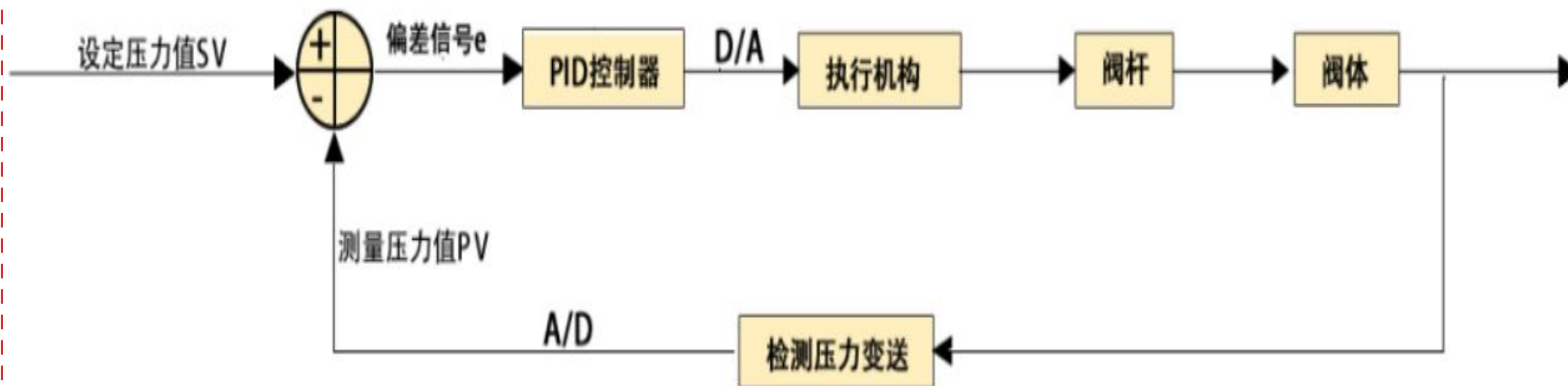
可得出本次采样时刻输出信号与前次采样时刻输出信号的变化

$$\Delta u_n = u_n - u_{n-1} = K_P \left[(\Delta_n - \Delta_{n-1}) + \frac{1}{T_i} \Delta_n + T_D (\Delta_n - 2\Delta_{n-1} + \Delta_{n-2}) \right]$$

增量式PID算式

第三部分 工作原理

PID算式中三个常数决定了各项对控制系统的影响力。**比例控制**是最基本的控制作用，而积分控制和微分控制可起到增强比例控制作用。其中，**微分控制**对测量信号的要求较高，若采样时信号被干扰，微分由于对噪声过于敏感会产生很多意想不到的控制动作，引发不可预计的严重后果。因此为避免不必要的麻烦，**工业上慎用微分控制**，尤其对于长输管道系统而言，因其属于**大时滞系统**具有延迟滞后的特性，通常不用微分进行控制。在工程实践中，比例-积分（PI）控制则是最常见的控制组合。





报告内容

第一部分 研究背景

第二部分 技术应用

第三部分 工作原理

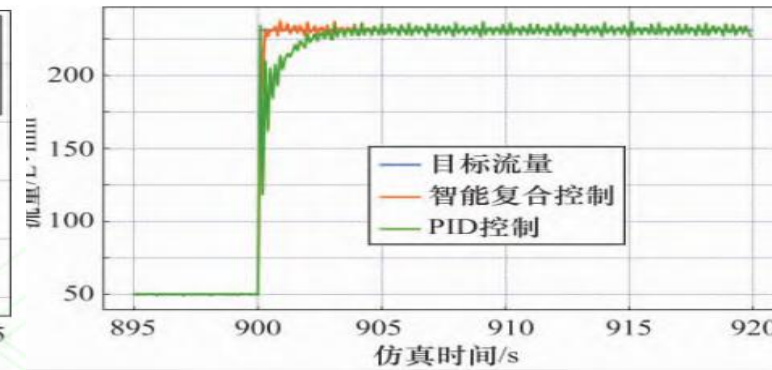
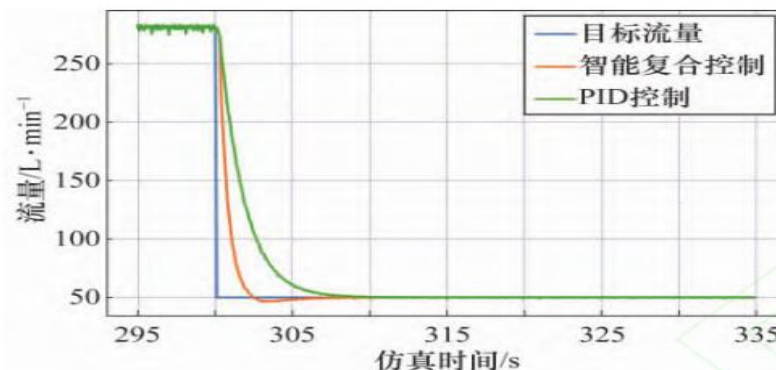
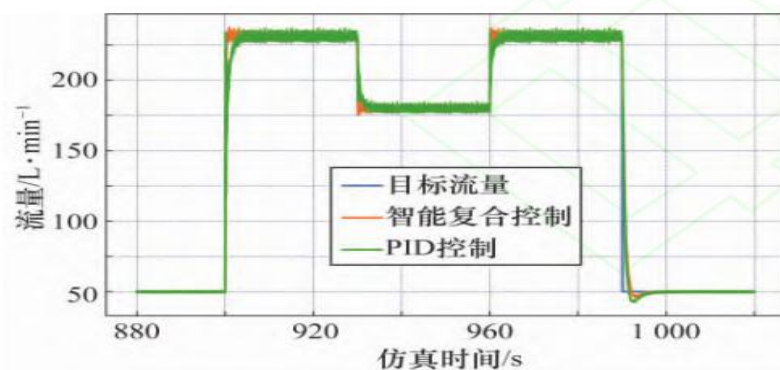
第四部分 整定方法

第五部分 算例验证

第六部分 未来展望

第四部分 整定方法

PID控制器**参数整定**即在控制系统中采用恰当方法对三个关联参数进行动态调整以确定最优的PID控制参数，即用连续果断的控制动作使得系统响应达到稳定时所耗费的时间最短，同时使得超调量最小。**传统**的控制理论中控制器参数整定的方法通常有两种：一是**理论计算整定法**，包括时域分析法、频率频域特性分析法、根轨迹法等，属于经典控制方法；二是**工程整定法**，包括经验试凑法、动态特性参数法、稳定边界法或临界比例度法、响应曲线法、衰减振荡法等，属于人工离线的整定方法，给PID的参数选择提供了一定的参考。传统控制理论制定控制算法和控制策略基于被控系统严密的数学推理并需建立精确的系统数学模型，通过实验法或机理法建立的模型越精确，得到的控制效果越理想。然而工程实践中受多方面复杂因素的影响，缺乏有效的针对不稳定系统的建模手段，很难将所研究问题通过数学推理抽象出非常精准的数学模型，通过在线调整PID参数从而使其能够满足实时控制的要求，**智能PID控制方法**应运而生得到诸多学者的关注。





第四部分 整定方法

智能PID控制是将人工智能技术或其他先进算法和传统的PID控制器相结合组成多种形式的智能PID控制器，同时具备上述二者的基本特性，具有**自组织、自适应、自学习**的功能。常见的有**专家智能自整定PID控制器、模糊PID控制、神经网络PID控制**等，另外还有不少新兴智能算法也在探索和PID控制器的结合。由于操作人员以及专家的经验难以非常精准描述，控制过程中各种信号量和评价指标不易被量化表示，模糊PID控制显示出了无可比拟的优势。**模糊PID控制**基于语言型控制规则，融合了PID控制和模糊控制的优点，是一种根据业界行业相关专家和学者对问题处理方法的认知和对问题解决途径的理解并结合现场操作人员控制经验模拟人的思维方式而整合的知识库对受控对象进行智能控制的方法，当输入量发生变化时调整控制量的输出。模糊PID控制以其设计简单便于应用的特点使得机理与策略更容易被人们理解和接受，具有较好的鲁棒性和稳定性，在长输管道系统应用前景十分广阔。

服务国家战略

Serve National Strategy

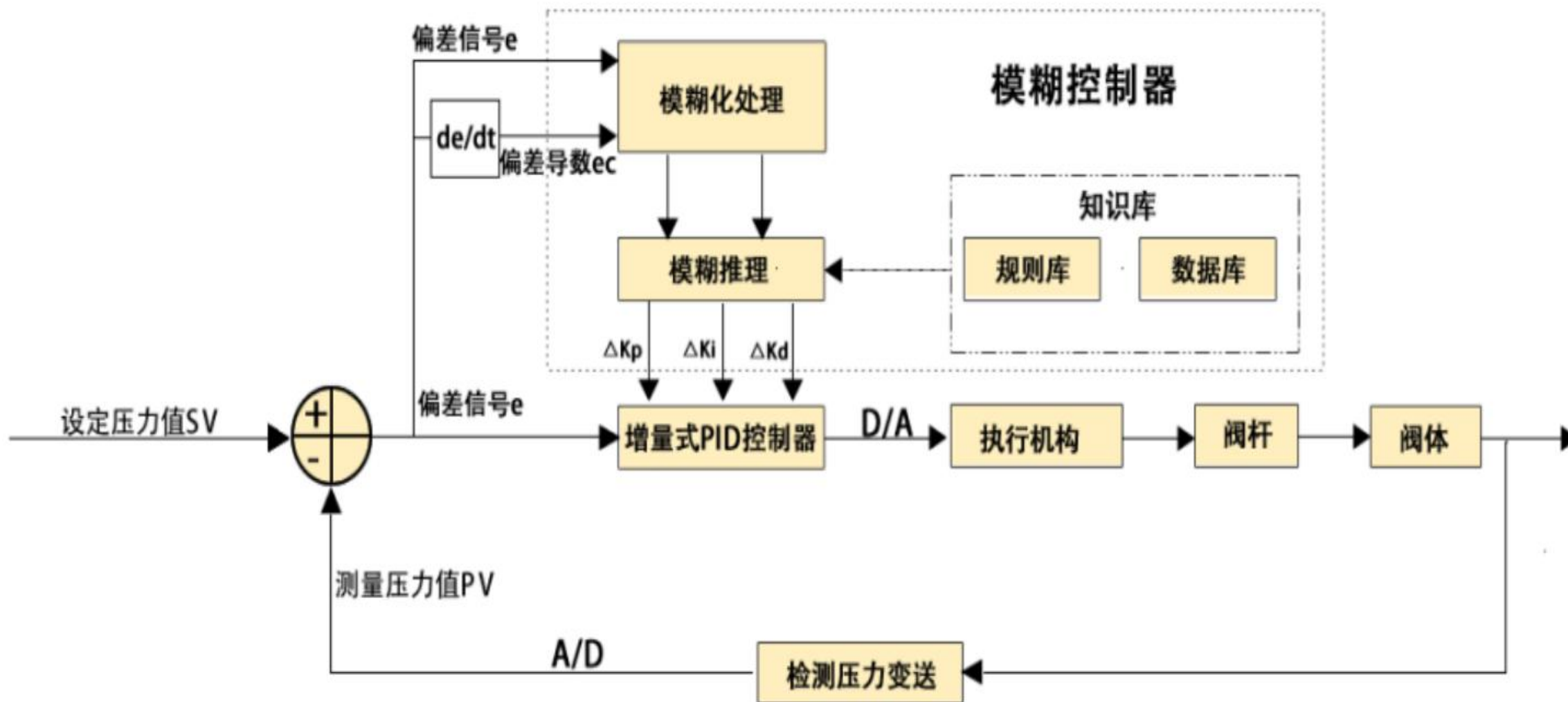
服务人民需要

Serve People's Needs

服务行业发展

Serve Industry Development

第四部分 整定方法





报告内容

第一部分 研究背景

第二部分 技术应用

第三部分 工作原理

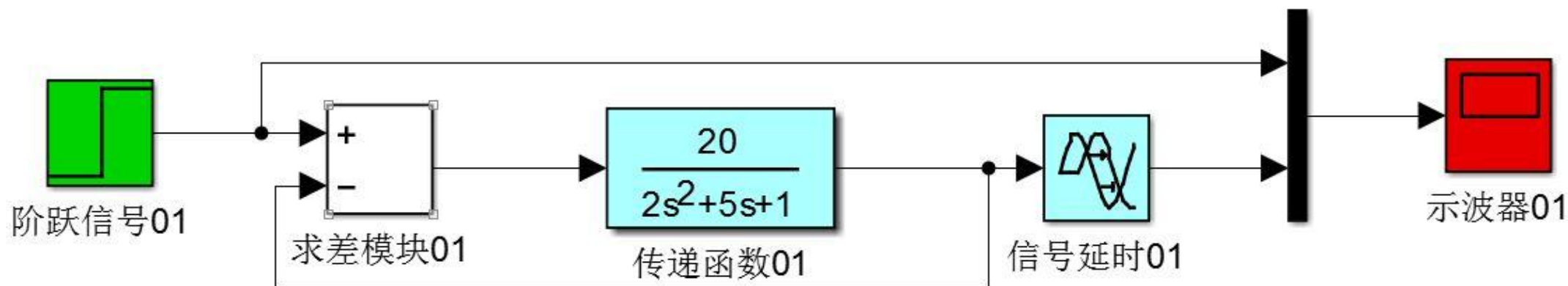
第四部分 整定方法

第五部分 算例验证

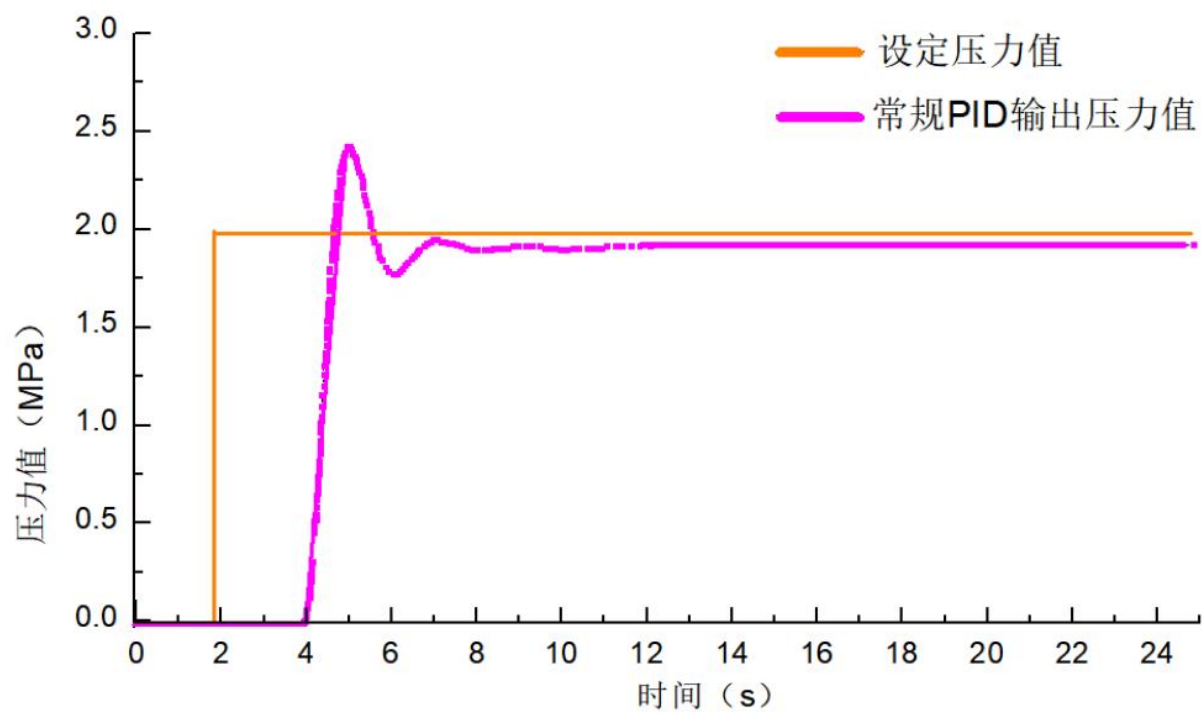
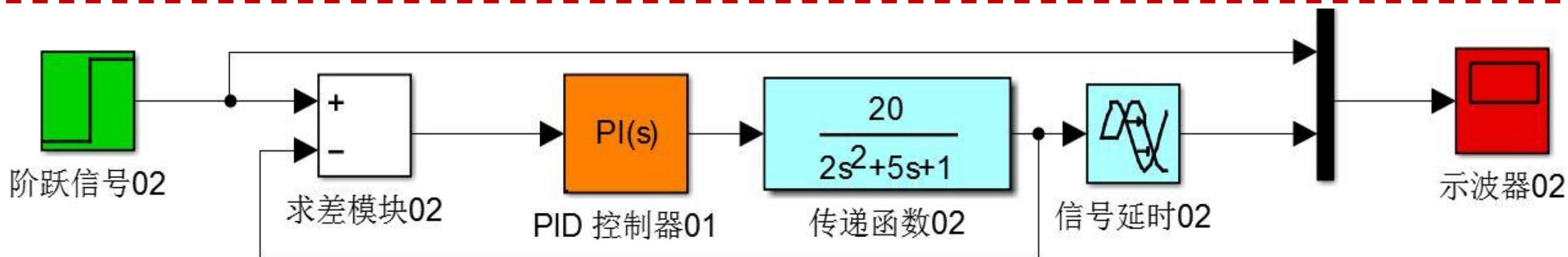
第六部分 未来展望

取传递函数为

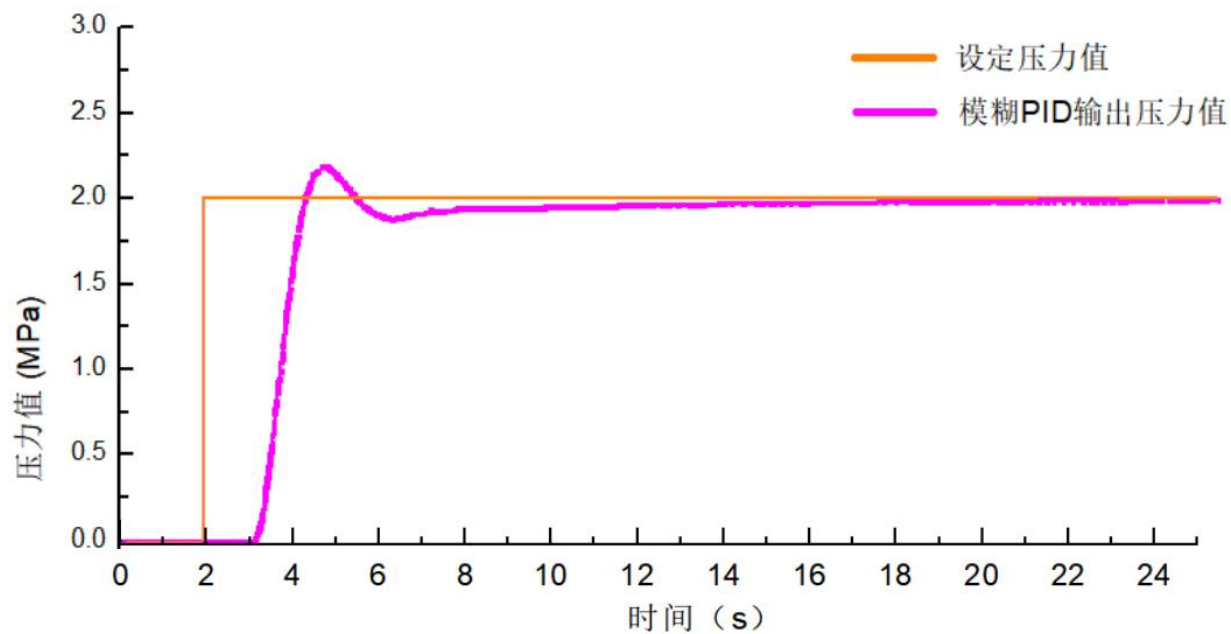
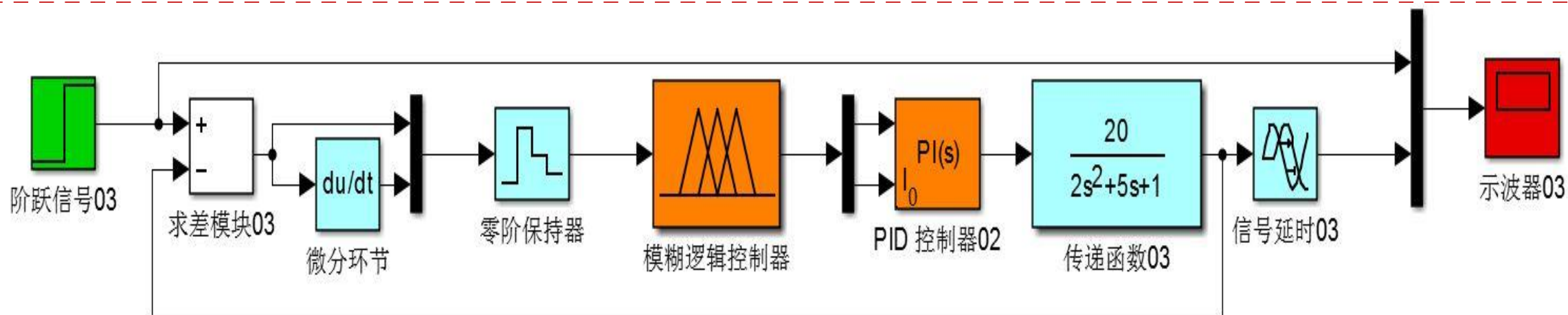
$$G(s) = \frac{20e^{-2s}}{2s^2 + 5s + 1}$$



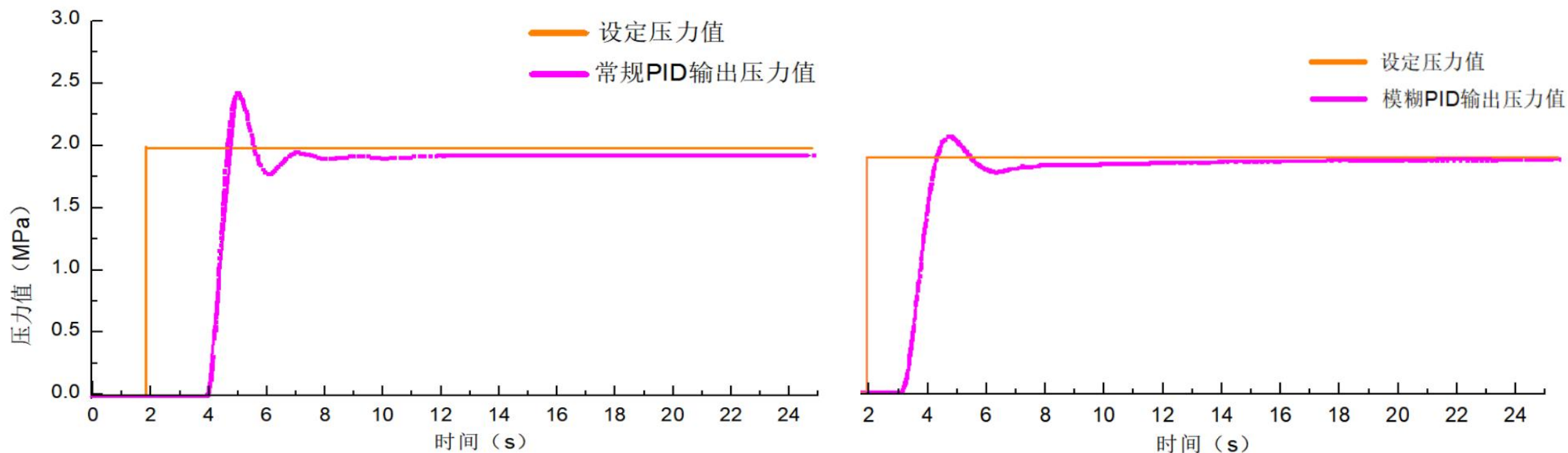
第五部分 算例验证



第五部分 算例验证



第五部分 算例验证



仿真结果表明：模糊PID控制较常规PID控制缩短了过渡时间，加快了响应速度，降低了超调量，提高了抗干扰能力。



报告内容

第一部分 研究背景

第二部分 技术应用

第三部分 工作原理

第四部分 整定方法

第五部分 算例验证

第六部分 未来展望



第六部分 未来展望

通过以上研究可知，PID调节控制在长输管道上应用较早，但目前学者对管道系统的PID参数整定研究相对较少且采用的整定方法有限。

通过对调节阀PID控制系统进行了较深层次研究，在建立传递函数模型的基础上引入了**模糊控制理论**，并对长输管道调节阀模糊PID控制器应用数学计算软件MATLAB进行了仿真模拟，仿真结果表明将模糊控制理论应用到长输管道调节阀的压力调节中具有十分优异的表现，为今后长输管道压力调节控制的系统优化和工程实践提供了理论指导和可靠依据。今后若能将更多的智能算法应用到PID参数整定中将有效减少超调和震荡，特别是将专家智能自整定PID控制、神经网络PID控制、模糊PID控制等智能调节技术应用于复杂山区液体管道的运行控制，作为控制严重水击事故发生的辅助调节手段，从而更好的保证管道的安全运行，可作为今后研究的重要方向。

建成中国特色世界一流的能源基础设施运营商

Build a World-Class Energy Infrastructure Company with Chinese Characteristics





中国石油大学(北京)
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM



国家管网
PipeChina

敬请各位批评指正

Thanks for your attention!