

目录

管道机器人背景

Chen

摘要

希望以目前主流的常用的管道作为主要的管道机器人应用场景，从其不同管道应用场景的现有巡检方式的局限性出发，探讨管道机器人在这些管道中应用的可能性与潜力。并且对目前管道机器人在这些场景应用中所面临的技术缺陷进行分析，在此基础上提出可能的创新与改进方案以解决现有问题并提升管道机器人的效果。

第 1 章 管道的分类

主要根据管道的输送物质与检测巡检方式的角度进行考量，拟将管道分为以下几个类型：

1. **输水管道**：包括水利管道和市政供水管道。这类管道主要用于输送清水，如饮用水、灌溉水等 [?]
2. **废水处理管道**：用于运输废水，包括市政污水和工业废水。
3. **能源输送管道**：包括油气管道和热力管道。这些管道用于输送天然气、石油产品和热能。
4. **工业管道**：用于各种工业应用，如化工流体、蒸汽等的输送。

输水管道一般涉及输送清水，如饮用水、灌溉水等，其管道的直径不等，从家用水管的小直径到长距离输水管道的大直径都存在，其中随着输水的距离，输水管道可能需要承受不同的压力，例如在城市供水中则通常设计为中高压以保证水能到达所有用户，而长距离输水管道则可能需要中途增压站。一般输水管道所出现的问题在于由于水锤现象带来的压力突变导致的管道破裂等问题，需要重点检测管道破损泄露等问题。[?]

废水处理管道一般处理生活和工业废水，直径根据所需要处理的废水不同不等，材料一般基于耐腐蚀性和强度来选择包括 PVC、铸铁、混凝土等材料。由于废水处理管道运输的生活和工业废水可能包含固体废物、油脂或者杂物，可能会由于积聚而导致堵塞等问题。同样的由于废水中的化学残留，可能会加速管道腐蚀破损而导致其泄露，造成地下水污染或者环境问题。

工业管道的规格一般依照工业流程定制，材料则取决于输送介质的化学性质而决定，一般有不锈钢、特殊合金、塑料等。工业管道的运输介质，尤其是带有腐蚀性或者磨损性介质的时候，容易造成化学腐蚀或者磨损而导致泄露。同时在工业管道内需要对其温度和压力进行控制，避免影响管道完整性和化工工业工艺流程。

能源输送管道通常设计用于跨越长距离，从几十公里到几千公里不等，同时为了容纳大量的流体传输，直径通常较大，从几十厘米到几

米不等。而为了有效运输油气，通常使用高强度的钢材或者有特殊涂层的钢材，以应对管道内部的数百到上千巴的高压，以及油气对管道的腐蚀。由于长距离的高压油气传输，通常会出现由于机械损伤、焊接缺陷或者管道破损腐蚀带来的泄露。内部的腐蚀往往来自于输送介质，而外部可能来源于环境因素。而此类管道也容易出现裂缝、凹陷等物理损伤需要额外注意 [?]

第 2 章 管道巡检方法

一般来说管道检测与巡检方式包括：

1. **巡检机器人：**巡检机器人包含不同类型的机器人，如管道内部的巡检机器人，有类似无人车形式在管道内部移动，配备摄像头传感器等检测设备；或者在管道外部进行巡检的机器人，可沿管道外壁爬行检测；对于水下管道可能采用遥控或者自主式的水下无人潜水器配合摄像头来进行巡检。
2. **人工巡检：**在地面上的管道网络工作人员会沿管道路线行走，通过观察或者听声等方式检查；对于一些在井内的管道，尤其是市政管道，工作人员可能会进入检查井内部进行检查。
3. **无人机巡检：**对于油气管道或者长距离输水管道等长距离管道，可能其位置也在偏远或者难以进入的地区，则会使用无人机搭载摄像头或者红外传感器等设备进行外部视觉检查或者泄露检测。
4. **卫星和航空巡检：**利用卫星或飞机上的遥感技术，适用于长距离、大范围的管道巡检，如跨国油气管道。可监测管道走廊的环境变化，例如地面沉降、水体泄漏迹象等。
5. **声波检测：**通过分析通过管道的声波来检测泄漏或其他异常。常用于水管和天然气管道。
6. **压力和流量监测：**通过监控管道内的压力和流量变化来识别潜在问题。适用于几乎所有类型的管道系统。
7. **化学检测：**对于工业管道，可以通过化学分析监测特定化学物质的泄漏。

对于管道的检测与巡检方式的选择，会依照管道的位置，长度，内径、运送介质的属性以及其他因素分为不同的巡检方式。对于管道位置而言，若处于偏远或者难以接近的区域例如油气运输管道，则倾向于使用无人机或者卫星巡检，而在城市内的市政管道，可能使用地面巡检更加容易；对于管道长度而言，长距离运输管道，如跨国油气管

道，需要持续的检测和快速响应，可能会使用遥感技术和实时数据传输，而对于较短的工厂内的工业管道，则更多依赖于定期的现场检查 and 局部检测；大直径的管道可以容纳使用内部检测的设备，而小管径的管道可能需要更多的依赖于外部检测手段。

而对于不同的运输戒指，则需要重点关注不同的检测侧重点与环境要求。对于易燃易爆或者有毒介质管道，则需要严格的泄露检测以及防腐蚀措施，而市政供水或者废水管道则注重防止泄露与保证水质安全的问题。而对于一些特定类型的管道则有独特的风险因素，例如工业管道的化学反应风险或者废水管道的堵塞风险，都是在管道检查与巡查中需要关注的问题。

第 3 章 管道机器人相关应用

1. 定位/示踪方式

管内移动机器人在管道内完成检测、维修、清理等作业时，需要高度自治的控制系统，并且需要随时与外界进行通讯，将传感器采集到的数据及有关管道内部环境的信息传递给外部控制台。因此，要完善管内移动机器人在管道工程中的应用，示踪定位技术必不可缺。

所谓示踪定位技术，即指管内移动机器人通过其所携带的传感器确定自身所处的位置，并在管道外部通过技术确定管内移动机器人在管道内部的位置。当管内移动机器人的位置判断比较精确时称之为定位；反之，位置判断的精度比较低时称之为示踪 [?]

管道机器人的定位示踪技术有管外被动定位和管内自主定位两种方式，管内自主定位是机器人启动自身功能对自身或者检测目标定位；管外被动定位则是由作业人员在管道外利用搜寻设备定位管道机器人。因此管道机器人的定位实现需要配合使用多种传感器，运用网络协同的工作方式来实现机器人的定位。

对于管外示踪定位技术而言，主要分为有缆和无缆两种形式。传统的无缆示踪定位技术常采用**极低频电磁波定位技术**实现管道外部定位 [?]，因为极低频电磁波可以克服金属管道的屏蔽作用向外传播。或者也会采用 γ **射线技术**和**超声波技术**

管道外部定位多使用**极低频电磁波定位技术**实现管道外部定位，因为极低频电磁波可以克服金属管道的屏蔽作用向外传播。管道内定位的方法中比较传统的内定位方式是**轮式里程计定位**，主要使用的是采用轮式里程计来确定管道机器人位置。也可以通过在管道机器人或管道本身上安装 RFID 标签，通过无线射频识别（RFID）技术进行定位和数据收集，这样可以进行辅助定位。

2. 检测方式

管道机器人在管道中的主要任务是检测可能存在的缺陷。其中常用的是通过光学识别管道内缺陷的方式，可以通过对图像进行视觉识别进行管道缺陷检测。也可以通过激光扫描获取管道内的精确测量和

3D 图像，有助于识别管道的物理变化和潜在损伤。其次，超声波是无损检测中比较成熟的技术，由探头发出的超声波通过缺陷反射回探伤仪中，从而定位损伤部位以及类型。

第 4 章 管道机器人面临问题

1. 定位问题

对于管外示踪定位技术，有缆形式的定位示踪方式其问题在于随着检测长度的增加，电缆线在拖动过程中与管壁之间的摩擦阻力使机器人本身有效拖动力下降，同时电信号强度也随之不断的减弱。因此，采用有缆示踪定位技术限制了机器人在管道内行走的最大距离。

对于无缆示踪定位技术，传统的无缆示踪定位技术常采用 γ 射线技术，但是其放射性不仅对环境造成破坏，同时还会对操作人员的身体造成伤害。在采用超声波技术进行示踪定位时，由于超声波在遇到杂质或传播介质分界面处会产生明显的反射，而这种发射不是严格定义的具有散射性，因此会影响超声波传输距离，既而影响定位精度。而目前的极低频电磁波定位方式多采用建立接收基站的方式，沿管道线路建立接收站。这种方式不仅浪费空间资源和硬件器材，且传统传感器阵的设计笨重不方便移动。传统传感器阵排布方式单一导致接收信号类型单一，不利于定位效果的提高。

对于管内定位示踪技术，特别是轮式里程计定位方式，实际作业时就容易出现车轮打滑，导致计程错误、累计误差和破坏定位数据的现象，会导致误差无界的累积增长。

2. 作业问题

许多管道在工作时压力大、水流急，环境复杂，环境恶劣，无法进行人工检测；管道直径超大，管壁直径不统一，管道路径远超一般机器人的工作范围，一般的机器人或者无人车无法胜任，则需要能根据管壁直径、管壁路径的变化进行自适应调整。

同时对于一些排污或者运送液体中包含一定沉积杂质的管道，为防止杂质沉积堵塞管道，管道机器人工作的时候内部液体无法排干，且需要保存一定流速，因此机器人在运行时要承受一定的阻力，需要根据阻力情况对推进器进行合理选型，并对机器人进行水动力分析，保证方案的可行性。其次由于管道内可能存在沉淀物，能见度极差，且无法排干，无法通过一般的摄像机对管壁缺陷进行识别，需要对视觉

识别情况做具体分析与考虑 [?]

并且对于一些长距离管道，机器人在工作的时候如果发生故障滞留在管道内，则会导致堵塞管道，并且由于定位难度大，排空管道困难，很难通过外界介入将机器人从中救出，因此需要为机器人设计应急系统，使机器人具有一定的自救能力