

# 管道内防腐补口机器人的研发改进及应用

徐志侃 钱凯 许杨健

(江苏兴安建设集团有限公司 张家港 215600)

**摘要:** 本文介绍了一种管道内防腐补口机器人的研制过程以及该设备在江苏扬子江国际化学工业园化工生产废水收集管网工程的成功应用, 分析了市场同类产品在使用过程中的缺点, 介绍了该设备的功能特点, 并期望能为其他项目提供服务。

**关键词:** 化工生产废水 管道内防腐补口机器人 研发

**中图分类号:** TB472

## 1 项目背景

### 1.1 化工园区的生产废水收集

当前国内化工园区的可持续发展面临许多挑战, 特别是健康安全环保压力大, 本文提及的江苏扬子江国际化学工业园是张家港保税区的配套区, 是世界知名的、国内一流的化工工业园。随着园区的发展及环保要求的提高, 按照江苏省政府办公厅相关文件要求: “化工园区内企业废水经企业预处理达到污水处理厂接管标准后, 方可接入区域污水处理厂集中处理; 生产废水原则上应经专用明管输送至集中式污水处理厂, 并设置在线监控装置、视频监控系统和自动阀门”。园区规划建设了 80KM 生产废水管网配套工程, 管网采用钢管, 由于园区化工生产废水成分复杂, 对钢管防腐特别是内防腐质量有较高要求。

### 1.2 工程概况

江苏扬子江国际化学工业园化工废水收集管网工程包含焊接钢管 80KM, 有 DN150、DN200、DN600 三种规格, 长度分别约 40KM, 20KM, 20KM。钢管外壁防腐涂料采用 SIGMACOVER620, 环氧漆 620, 涂层干膜厚度不小于 400  $\mu\text{m}$ ; 钢管内壁防腐涂料采用 NOVAGUARD840, 无溶剂环氧酚醛漆 840, 涂层干膜厚度不小于 300  $\mu\text{m}$ 。计算防腐补口需求  $80000/12 > 6500$  条, 管道主要采取架空敷设, 最长直段管线达到 600 米。施工工期为三

个月。为保证内防腐质量，建设单位要求本工程管道内防腐补口不得采用人工作业，必须采用专业管道内防腐补口设备。

## 2 管道内防腐补口设备调研

### 2.1 手动型补口机

手动型补口机造价低廉，通常最大补口长度为 12 米（一根钢管的长度），采用焊好一道口后立即补口方式。缺点：防腐补口操作和管道焊接操作逐条焊缝交替进行，大大影响工程进度，不能满足本工程要求。

### 2.2 智能型补口机（管道内防腐补口机器人）

通过考察管道内防腐补口机器人生产厂家后发现，有的厂家只提供设备，有的厂家提供现场作业服务，不同的设备还可能有以下不同的缺陷：

- （1）部分型号采取有线控制，操作不便。
- （2）设备笨重，作业效率低。
- （3）关键部件工作效果不佳，除锈喷涂质量不稳定。
- （4）续航能力不足，连续工作时间短，需频繁充电影响施工进度。
- （5）远程操控功能不强，管内工作距离短。
- （6）数据处理能力低。
- （7）设备价格高昂，服务费用不菲。

### 2.3 自研管道内防腐补口机器人的可能性

针对化工废水收集管网对钢管内防腐质量的高要求，建设单位对该项目的质量监检和工作记录也提出了相应要求，由此我们设想管道内防腐补口机器人需要具备以下功能：

- （1）远程视频传输，快照功能。
- （2）远程操控功能，包括快进，快退，慢进，慢退，点动等操作。
- （3）可以无气源刷漆。
- （4）无需外接动力电源。

(5) 高速打磨，高速前进情况下机器人仍能保持姿态稳定。

(6) 精准定位（焊缝定位误差不应大于 2mm）

(7) 工作参数可调，包括打磨宽度、刷漆宽度、漆膜厚度等。

(8) 工作参数实时可查，工作数据可以以工作报表形式上传到控制台，也可以从控制台下载设备运行参数，实现智能化管理。

要实现上述功能，我们认为可以通过采用性能强大而发热量很小的 ARM 芯片来制作的主机，和与海康威视定制开发的基于狭小空间的视频采集及数据传输方案，再加上特定的程序来实现，同时市场调研时我们发现各类管道内防腐补口机器人机械组成都相对简单，零部件采购或定制较方便，加上我们公司下属工厂有完备的机械设计、电子电器设计专业团队，嵌入式软件开发专业团队，具备需求分析、研发、制造、维修保养的综合性能力，由此萌生了自行研制管道内防腐补口机器人的想法。

### 3 试制管道内防腐补口机器人

#### 3.1 开发思路与部件设置

设备开发思路如图：

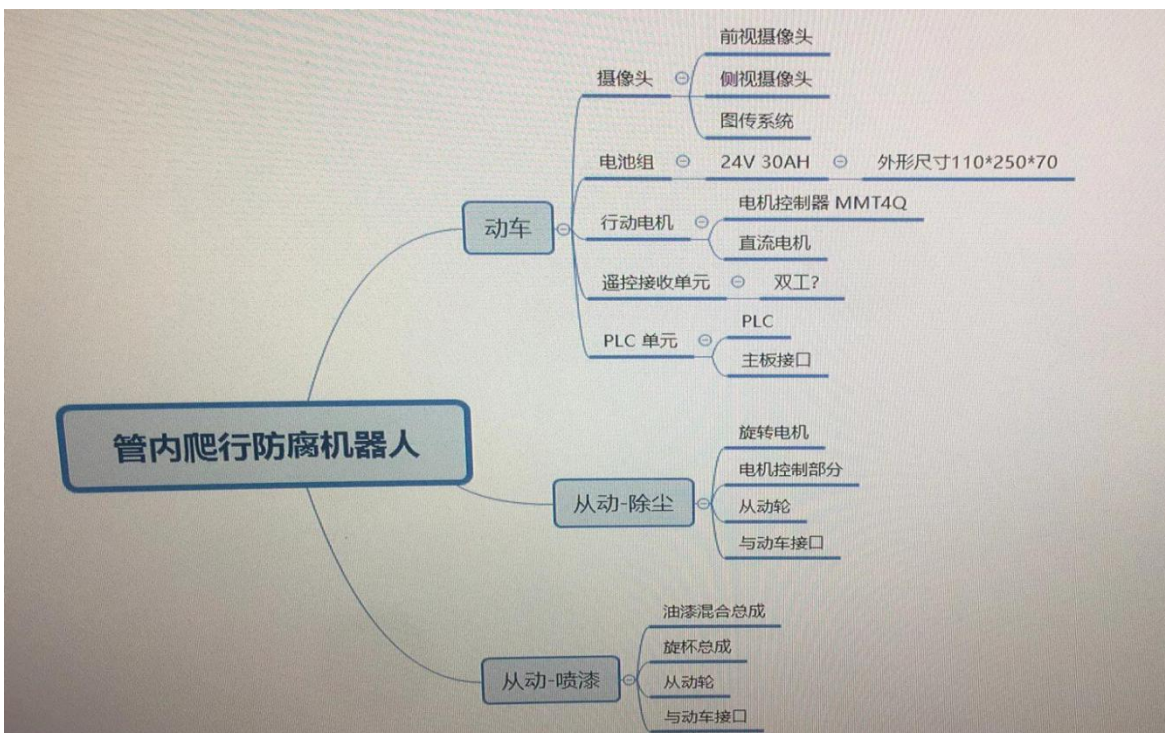


图 1 开发思路

借鉴市场上的成熟产品，管道内防腐补口机器人包含以下五个部分：

- (1) 动力机构：驱动小车，由电池供电，承担与其他机构的挂接牵引。
- (2) 打磨机构：除锈作业车。
- (3) 刷漆机构：喷漆作业车。
- (4) 电控主机：位于驱动小车后部，实现为其他机构提供动力的功能。
- (5) 通信主机：位于驱动小车后部，实现无线通信，图像传输功能。



图 2 内补口机器人主要机构示意图

### 3.2 动力机构试制

(1) 车身主体采用矩形设计，对应 DN150 管道，车身对角线尺寸为 133mm，DN150 和 DN200 可通用，对应 DN600 管道，车身对角线尺寸为 450mm。

(2) 电控部分和各其他机构电机用电由车身内置 24V 动力锂离子电池提供，DN150 小车采用 56 颗 18650 动力锂离子电池电芯组成的电池，实际供电范围 22V-29V，能完成行走、打磨、刷漆 80 次左右，DN600 小车采用两组上述电池，能完成行走、打磨、刷漆 100 余次，电池设计生命周期为 1000 个充电循环，若按照每天充满一次电计算，电池可使用三年左右。

(3) 实验之初，采用了普通直流电机，使用 PWM 脉冲输入控制行走距离的方式，对管道焊缝前后要求的 150MM 进行测试，发现累计误差大于 30mm，后改用 PWM 控制步进电机的

方式进行，经反复测试，累计精度误差小于 2mm（此误差来源于管道内壁尺寸不均匀导致），同时由于精准控制和步进电机大扭力的特性，爬坡能力由原来的 5 度，提升到了 12 度，同时满足了行进精准度和爬坡能力的要求。

（4）每个规格的管道小车采用对应的车轮和轴距，车轮的形状和材质经过了实测检验。



图 3 驱动小车原型

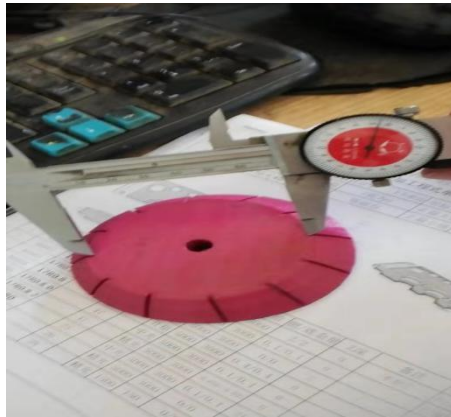


图 4 3D 打印车轮试制

### 3.3 打磨机构试制

（1）DN600 除锈车采用四组碗型钢丝轮对称布置在车头，钢丝轮有张紧装置保证与管壁的接触力，从而保证了除锈效果。

（2）受管径限制，DN150/200 规格的除锈车采用旋转刷头沿管道圆周旋转打磨的方式除锈，在打磨过程中，高速旋转大扭力打磨的方式容易造成小车侧翻，后借鉴直升机上双旋翼对转机构，设计出打磨时打磨头分两组向相反方向进行旋转，彼此抵消对小车主体的扭力，从而保证在高速，大扭力的状态下不会侧翻。





图 5 DN600 除锈车试制现场

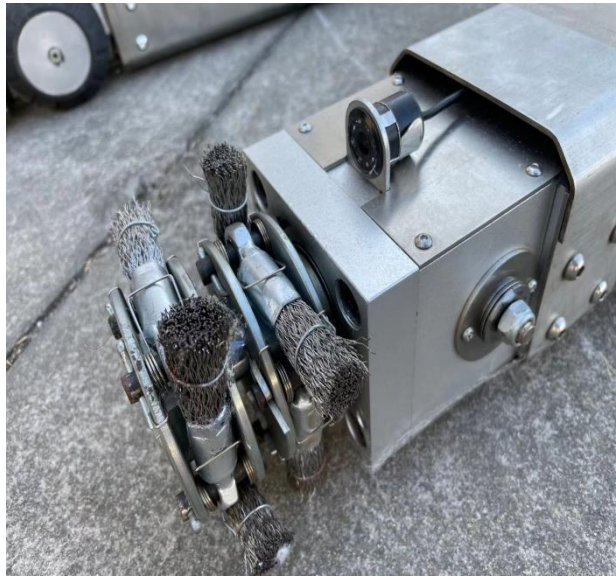


图 6 DN150 除锈车原型

### 3.4 刷漆机构试制

刷漆机构承担油漆储存，油漆混合，以及将油漆均匀喷射到管壁的功能。由于不具备使用压缩空气介质喷涂的条件，受到喷涂行业内成熟的高速旋杯静电喷涂方式的启发，选择能在 12000-20000 RPM 下将油漆均匀雾化的旋杯，喷幅均匀，上漆效率高。为保证漆膜厚度符合设计要求，试制期间确定了速度、时间等与膜厚相关的工作参数。



图 7 喷漆车原型

### 3.5 通信与控制的实现

(1) 采用 2.4G/5GHz 双模通信方式，与主机进行通信，在钢管内，从外部发射的无线信号衰减严重，几乎无法到达管子内部，另外，在金属管道中，使用传统的 300-400Mhz 频率无线电通信手段由于管壁对无线电波的多次反射，300-400Mhz 会形成信号叠加，信号接收器解码要求比较高，传统使用专用的解码器对信号进行滤波，本项目中使用的四路高清视频也对通信带宽有相当大的需求，再加上远程遥控的上行数据，使用传统的 300-400Mhz 频率无线电的方案需要替换成目前已成熟的 2.4G/5G 11bgn 无线协议方案，通信带宽可达 300Mbps，极大程度上满足了视频传输和反控的需求。使用时，我们将长度约为 120MM 的八木天线置于管口，对准小车前进方向。

(2) 遥控操作时，结合安装在驱动小车上的无线图传控制系统，位于除锈和刷漆小车前部的摄像头图像能实时传输到操作员的终端上，我们采用海康威视定制的视觉系统，与步进电机进行“手眼协作”，操作员只需在屏幕上点前进，后退，快进，快退，暂停，点动等按钮将焊缝进行精准定位，定位后只需一键，即可启动打磨和刷漆过程。终端同时显示其他辅助信息，包括小车当前电量、管道内温度、电机温度、主板温度等。

(3) 考虑到可能的通信失败问题，在操作终端和主机失联后 5 分钟后仍未连接成功，机器人将会从管道内自动退出，避免机器人失联后需要人工干预的情况

## 4 产品应用

### 4.1 现场应用

由于对研发难点要点研究透彻，对原理分析彻底，同时借鉴了市场上的同类产品，我司研发制造管道内防腐补口机器人从设计到制造测试完成，仅用了一个月的时间，得以及时在江苏扬子江国际化学工业园化工生产废水收集系统项目上进行实战检验，目前项目已接近尾声，使用结果表明该设备性能完全达到了设计要求，使用平稳，控制灵活，其可靠性和稳定性经过了数千条焊缝的考验，项目施工过程中未发生任何电器机械故障。



图 8 作业现场

## 4.2 产品推广

鉴于自研管道内防腐补口机器人在项目上的成功应用，使我们有了将其市场化的信心，经过精心准备，于今年 9 月成功参加了《2020（第六届）管道新型防腐涂装工艺技术施工与材料应用展》，吸引了一批潜在客户，目前该产品已有了自来水公司等新客户。



图 9 参加《管道新型防腐涂装工艺技术施工与材料应用展》展览现场

## 5 结语

我们研发的管道内防腐补口机器人利用最新的软硬件技术，硬件配置强，控制系统架构合理，操作性能可靠。希望能凭借产品的优良性能继续为其他项目提供服务。



徐志侃 江苏兴安建设集团有限公司 总工 高级工程师

地址：张家港市长兴路悦丰路交界兴安大厦 215600

电话：13962456600 邮箱：751491655@qq.com