

气动垃圾回收系统阀门控制策略研究

宫成文, 程维明, 李 扬, 卞家家

(上海工程技术大学 机械工程学院, 上海 201620)

摘要: 为实现气动垃圾回收系统的实际应用, 阀门控制策略方案的设计与验证十分重要; 分析系统运行过程, 抽象出系统运行参数并建立数学模型, 确定系统“自下而上”的基本控制逻辑; 设计分析了以单层循环式排空策略为代表的三种控制方案, 确定单元式阀门控制为最优选择, 并以数值模拟的方式对研究内容进行了验证; 该方案使得系统执行排空动作时阀门开启次数较少, 系统设备成本降低, 安全性提高。

关键词: 垃圾回收; 气动阀门; 控制策略; 数值模拟

Valves Control Strategy of Pneumatic Waste Collection System

Gong Chengwen, Cheng Weiming, Li Yang, Bian Jijia

(School of Mechanical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: To achieve practical application of pneumatic waste collection system, the design and test of valves control strategy are important. Analyze the working process of the system, try to present operational factors of system and create the numerical model. The project defines the essential control strategy as “from the bottom up”. There are three control schemes including single loop evacuation strategy and the three layers unit is the best, which can be proved by numerical simulation. In this way, the system can achieve less valves opening, less system equipment cost and more safety.

Keywords: waste collection; pneumatic valves; control strategy; numerical system

0 引言

随着生活居住环境水平的提升, 城乡居民每日产生的生活垃圾也越来越多, 垃圾的回收问题也越来越被房地产开发企业和物业管理公司所重视。特别是在国家大力支持推进绿色环保型产业的背景下, 气动垃圾分类回收逐渐进入人们的视野。

阀门是气动垃圾回收系统中所用的关键部件, 垃圾自投放口进入管道系统后, 可落至阀门上方临时堆积存储, 待系统检测垃圾存储已满时打开阀门, 完成垃圾的排空动作。而阀门的应用数量与安装位置, 垃圾存储设定的排放阈值, 及排放过程中阀门开启的控制逻辑, 是系统运行的关键性问题。

文献 [1] 主要研究以 AT89C51 单片机作为主处理器的硬件电路与软件编程, 实现阀门的自动开闭, 具有智能化控制、集成度高、抗干扰能力强的优点^[1], 为系统气动阀门的自动控制提供了依据。文献 [2] 中介绍了一种厨余垃圾回收系统, 其阀门控制为简单的“自上而下”形式^[2], 垃圾在排空过程中垃圾直接由上层落入下层阀门, 层层累积, 应用于高层住宅时由于垃圾累积值较大极易造成阻塞的现象。

现有的文章专著里, 大多在控制理论的层面以优化传

递函数的方式研究控制策略^[3], 这在气动垃圾回收系统的研究中并不适用。本文着力于研究气动垃圾回收系统中气动阀门和传感器数量与安装位置的多种方案, 分别制定各个方案下阀门开关顺序逻辑, 进行对比分析, 目标为减少阀门开启次数, 提高垃圾收集效率。

1 控制策略分析

1.1 研究对象

本文中所研究的气动垃圾回收系统, 是面向智能化高层楼盘小区的设备装置, 为高层住宅小区提供设备、安装、运行及控制等全套解决方案。与传统小区的垃圾处理模式相比, 可以降低人工成本, 提高小区的自动化运行效率, 减少垃圾在传统收集运输过程中带来的繁琐问题与污染现象, 提高小区的整体管理与运行品质。同时, 这样的智能化系统也满足时代发展需求, 将垃圾进行回收, 实现垃圾资源化。图 1 为高层住宅建筑中所应用的气动垃圾回收系统中的管路示意图, 其大体上可以分为三个功能部分。垃圾回收管道与过渡斜管为系统实现指定功能的管道基础部分, 为方便加工安装及运输, 国内管道常见运输规格为 6 米, 主体直管与过渡斜管为焊接连接形式。垃圾投放口门板及其控制系统是系统的重要部分, 应用现有刷卡式门锁安装于投放门板处, 降低人为因素破坏系统的可能性。用户可以将打包好的垃圾自投放口门板投入垃圾回收系统中, 垃圾经由过渡斜管进入垃圾收集管道内部。管道内安装一定数量的气动阀门与传感器, 用以控制垃圾的存储与排空动作, 是垃圾回收系统的关键部分, 也是本文着重研究的内容。其设备采用市场上常见的阀门与传感器, 基于单片机的硬件电路进行控制。^[4]

收稿日期: 2018-06-19; 修回日期: 2018-07-16。

作者简介: 宫成文(1992-), 男, 陕西西安人, 在读硕士, 主要从事机械电子工程、环保设备开发与的方向研究。

程维明(1955-), 男, 浙江宁波人, 工学博士, 教授, 主要从事精密检测技术方向的研究。

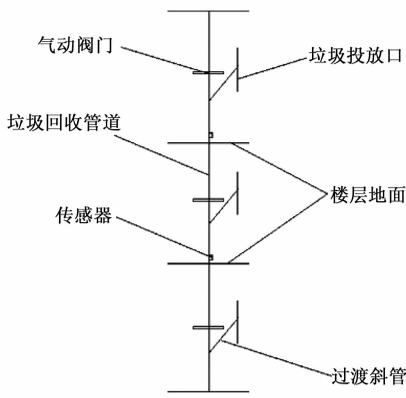


图 1 高层气动垃圾回收系统管路示意图

当阀门关闭时，垃圾落至阀门上方进行堆积存储。传感器实时监测管道内垃圾的积累数量，当垃圾量过大时，系统执行气动阀门的开启动作，对垃圾进行排空，并在排空后对阀门进行复位。^[5]至于垃圾落至地下汇集管道后的进一步输送处理，本文不具体涉及。

在检测管道系统内垃圾存储的量时，需要用到传感器，适合于该系统的常用传感器有光电传感器与红外传感器。

光电传感器通常是由光源、光学通路和光电元件三部分所组成。其以光电效应为基本原理，由检测到的光信号的变化反应被测量的相关变化，再借助光电元件将检测到的光信号转化为电信号，传输至系统中枢进一步分析处理。

具体工作过程如下：光源发射器对准目标发射光束，发射器一般采用半导体光源，如发光二极管、激光二极管以及红外发射二极管等。光束发射至光源接收器，接收器主要由光电二极管、光电三极管、光电池所组成。在接收器前方，应当装有透镜及光圈等光学元件。接收器后相连的，应当为光电检测电路，它能够滤出有效信号并对信号进行进一步处理。考虑到实际应用情况与成本，采用对射式光电传感器以满足系统要求。

1.2 系统运行参数

系统在运行过程中，相关结构设计及功能尺寸是系统设计的关键部分，影响系统运行的主要参数有：

1) 每层管道系统中实时存储的垃圾量，记为 $Q(n)$ ， n 表示层数。 $Q(n)$ 值在现有系统体系架构中并不能直接测量体现，主要在理论分析与数值模拟仿真的过程中用以表现系统内部当前垃圾量的多少，是系统的运行指标之一；

2) 上层阀门开启垃圾落入下层后的累积量，记为 $T(n)$ ， n 表示层数。 $T(n)$ 值与 $Q(n)$ 值一样，在系统中并不能直接检测得到，在数值模拟过程中可以通过算法程序在计算机中进行累加与计算。其主要意义在于，假设任一垃圾存储空间内存储的垃圾实际量大于其最大空间时管道发生堵塞， $T(n)$ 值的大小可用以判断垃圾在排空过程中相邻两个存储空间内的垃圾累积是否会产生上述故障情况，是系统稳定运行

的基本评判标准；

3) 系统中安装气动阀门的数量，记为 R 。每一个气动阀门与垃圾收集管道共同构成了一个垃圾临时存储区域，存储区域越多，垃圾在系统整体的存储量越大，系统总体排空次数越小。同时，气动阀门的安装数量与其控制逻辑关联性较大，需确定具体控制方案后确定阀门的应用数量；

4) 垃圾积累过程中对阀门的压力（包含冲击与静态压力），记为 P 。垃圾自投放口投入管道系统过程中，垃圾下落至阀门上部并对阀门产生直接的冲击作用，静止的垃圾在阀门上方堆积时同样有重力作用，需要对阀门的强度进行分析和计算；

5) 传感器判断垃圾已满的阈值，记为 k 。阈值的设定，与具体的控制方案相关，且实际阈值的设定参数是由阀门和传感器的安装位置确定；

6) 管道内临时存储空间垃圾存储最大量，记为 E 。 E 值的大小，与垃圾收集管道与临时存储区域的设计尺寸相关，同时其又受到居民楼内部建筑实际规划所限，在满足使用条件的情况下，不应过大；

7) 阀门开启次数，记为 s 。

整个系统中， s 为关于 $Q(n)$ ， $T(n)$ ， R ， k 的函数，其具体数学关系无法具体表达，记为：

$$s = f(Q(n), T(n), R, k)$$

在数值模拟的过程中 $Q(n)$ 值为有界随机变量，其计量单位为包，即以垃圾包为计量标准，并将所有垃圾包视为等大等量。当其平均值增大时， s 值增大。 $T(n)$ 值是判断系统是否发生堵塞的参数，若其值大于 E ，则系统管道极易发生堵塞，这在实际应用过程中是不被允许的，方案不可行；当 $T(n)$ 值小于或等于 E 值时，系统在垃圾排空的过程中不会出现累积过满的情况，管道堵塞可能性较低，方案可行。 R 值增大，表明系统中阀门数量增多，一定条件下会使得 s 值增大，但临时存储区域的增多，在部分条件下会使得 s 值减小，其对 s 值的具体影响，针对不同的阀门开启逻辑会有不同的结果，具体在后文中详解。 k 值作为系统判断阀门开启的依据，当其增大时，若系统整体的垃圾量不变，则 s 值降低。但由系统管道结构所限， k 值不得超过 E 值。

1.3 基本控制逻辑

为将楼层内部的垃圾进行集中回收处理，需要将垃圾疏导排放至地下汇集管道，再经由气力输送系统将垃圾回收至中转站。为降低系统运行过程中垃圾在管道内堵塞的可能，楼层内部垃圾排空时需采用“自下而上”的控制逻辑，整个系统采用递归式运行方式运行。如图 2，从最底层

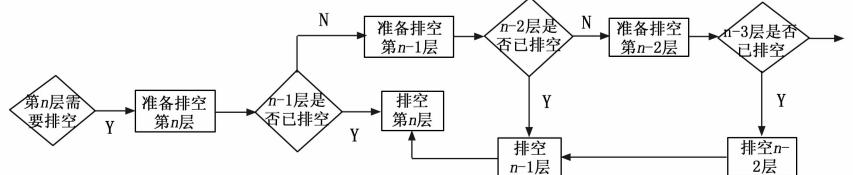


图 2 系统基本控制逻辑

开始依次向上排空, 从而降低临时存储区域内垃圾累积量, 降低堵塞可能。

2 设计方案

由实际设备所限, 气动阀门选用气动闸板式阀门, 运行过程中仅有“全关”与“全开”两种状态, 与独立气源相接, 阀门通径与系统管路口径一致。^[6] 传感器选用对射式光电传感器, 当临时存储区域内垃圾达到感应高度, 传感器发出控制信号实现垃圾排空过程。^[7]

垃圾由高处向低处下落时, 除了会对管道及阀门产生自身的重力影响, 还有加速运动后对其产生冲击作用。因此, 在排空系统内存储垃圾的过程中, 不能简单地将所有气动阀门同时打开, 以避免垃圾落差过大对系统产生较强冲击, 同时规避大量垃圾落至底层造成管道内垃圾堵塞及阀门无法复位的问题。

2.1 单层循环式排空策略

在高层住宅中每层相同位置处统一安装气动阀门, 其位置位于过渡斜管连接处上方 0.4 米处, 与垃圾回收管道相接, 其上部安装光电传感器, 且相对高度固定。不考虑垃圾包形变影响, 管路内垃圾从上到下为线性排列, 如图 3 所示。在理想状态下, 垃圾包彼此不产生粘连与吸附, 垃圾包直径大小与回收管路相当, 不发生卡壳与过度摩擦等现象。气动阀门开启与关闭过程迅速, 不与垃圾包发生刮擦, 垃圾包视为刚体, 不存在形变过程。

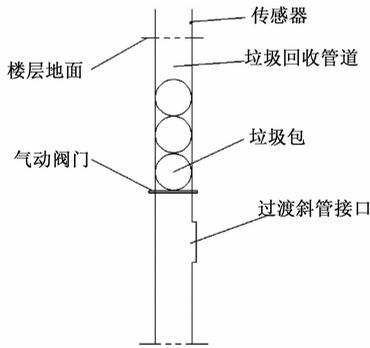


图 3 垃圾堆积方案示意图

图 4 为单层循环式排空策略基本流程算法, 当系统检测到第 n 层垃圾已满, 则传感器向控制系统发出信号, 系统进行响应, 响应的过程与图内流程算法一致。由底层开始, 分别开启阀门对相应存储空间内的垃圾进行排空, 并以垃圾已满状态下的最高层排空为程序结束条件, 则系统开启阀门的次数有:

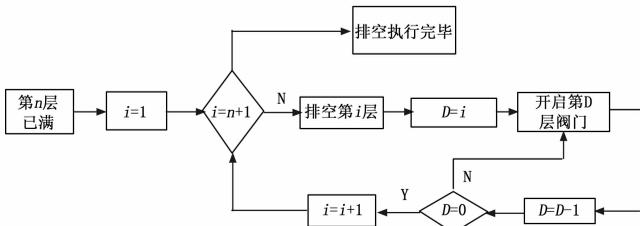


图 4 单层循环式排空策略

$$s = \frac{n^2 + n}{2}$$

整个流程为单层循环, 每个楼层设置一个垃圾临时存储空间, 在排空过程中, 上层与下层的垃圾不进行累积, 所以 $T(n)$ 值不需核算。同时, 若同一时刻有多层传感器检测到垃圾已满的信号, 只需将已满楼层中的最高层的层数作为启动参数 n 即可。这在系统整体设计程序中是可以实现的。

2.2 双层循环式排空策略

图 5 为双层循环式排空策略流程, 对比单层循环策略, 本方案自下而上将相邻两层分为一组, 组内垃圾可以直接进行累积, 即引入参数 $T(n)$, 其值不大于参数 E 。举例说明, 若系统检测到第 4 层垃圾已满, 而其它层数的垃圾存储量均未达到排空阈值时, 此时第四层阀门开启, 第四层临时存储区域内的垃圾落至第三层区域合并, 此时位于第三层的垃圾达到排放阈值, 需要向下排放, 而下层第一与第二临时存储区域内自行将垃圾合并。为保证 $T(n)$ 值不超过 E 值, 则必须减小阈值 k 才能保证系统稳定运行。若第 n 层垃圾已满, 阀门开启次数 s 为:

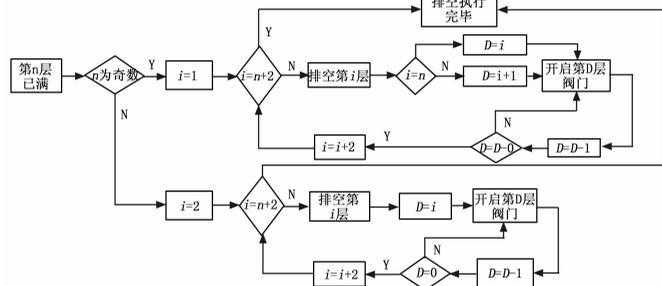


图 5 双层循环式排空策略

$$s = \frac{n^2 - n}{2} + 1 \quad (n \text{ 为奇数})$$

$$s = \frac{n^2 + n}{2} \quad (n \text{ 为偶数})$$

2.3 以三层为单元安装气动阀门与传感器

以三层为单元安装气动阀门与传感器, 是指将整栋楼自下而上每三层整合为一个单元, 不重复地分组, 在每个单元的最底层(即第一、四、七……层)安装气动阀门, 如图 6, 单元内部垃圾投放至单元最下层, 此方案下系统仅检测安装气动阀门楼层的垃圾存储情况。

与上文中两种排空策略分析方法类似可得到, 若第 n 层垃圾已满, 计算阀门开启次数 s 得:

$$s = \frac{1}{18}n^2 + \frac{7}{18}n + \frac{5}{9}$$

三种控制设计方案依次减少了系统中安装的气动阀门数量, 系统所花费的成本依次递减, 但若使用较少的阀门, 容易使得一个单元中上层垃圾落至阀门处的冲击效应变大, 需要对系统运行的过程中的一些参数进行具体测算, 主要考虑: (1) 垃圾落下时对阀门的冲击; (2) 垃圾累积对阀门的影响。^[8]

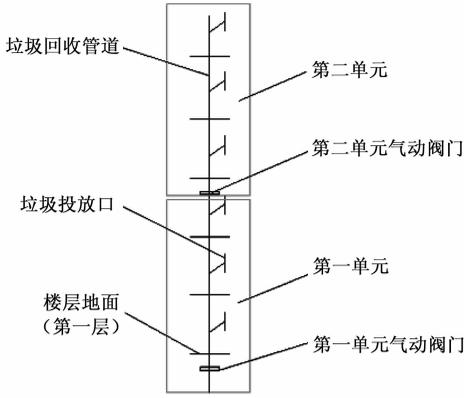


图 6 三层单元式排空方案示意图

$$MV = fT$$

$$\frac{1}{2}mv^2 = mgh$$

$$F = \frac{m\sqrt{2gh}}{t}$$

$$T = F + Mgh$$

其中： m 为一包垃圾的重量，统一取为 2 kg； v 为垃圾落到阀门前的末速度，单位为 m/s； F 为垃圾落下时对阀门的冲击力，单位为 N； t 为垃圾落下时的接触时间，考虑垃圾质地较软，取值为 0.5 s； T 为阀门所受总压力，包含下落冲击力与垃圾累积重力值，单位为 N。

设定垃圾包直径大小为 0.4 米，同时忽略其形变，此时可设定阈值 k 为 7 当 h 值大于 1.25 米时，垃圾下落冲击力对阀门影响比垃圾静压力显著。阀门上方最多可同时容纳七包垃圾，则阀门所受总压力最大值为 169.31 N。在选择气动阀门时，需要注意相关参数确保能够正常运行。^[9]

3 数值模拟分析

设定高层住宅为三十层，去除一天之中凌晨 0 点至 6 点（此时间段 $Q(n)$ 几乎无增量），每隔一小时输入随机变量 $Q(n)$ 值，比较分析系统在三种控制策略方案下系统的运行次数与阀门的开启次数与 $Q(n)$ 的关系。由于 $Q(n)$ 值在实际系统运行情况下有很大波动，因此在数值模拟过程中，将其变化范围限定在合理区间内，并将变化上限分情况模拟，以保证得到的数值模拟数据和结果具有可信度。

图 7 为单层循环控制策略数值模拟仿真结果， $Q(n)$ 上限值取 3， k 值取 6，仅列出三条代表性曲线表示排空后各层垃圾的堆积情况。仿真时出现多层垃圾同时已满的情况，只需考虑垃圾已满的最高层层数进行排空，这是三种方案均具备的优势。层数较低的楼层垃圾累积较少，且系统排空基本由高层决定。系统运行次数在合理范围内，阀门开启次数与理论计算基本吻合。

将 $Q(n)$ 最大值调整为 6，其它参数均不变，做上述控制策略数值模拟仿真实验，结果如图 8 所示，由于 $Q(n)$ 值上限增大，投入系统的垃圾量有很大的增长，则楼层数较低的（左图中为第 10 层）临时存储区域在系统排空后垃圾余量基本一直维持在 0 的水平，触发系统排空条件的 n 值

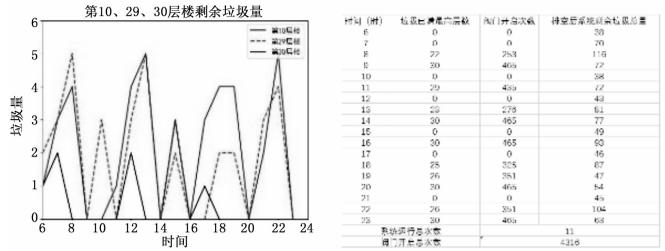


图 7 单层循环控制策略仿真结果 ($Q(n)$ 值最大为 3)

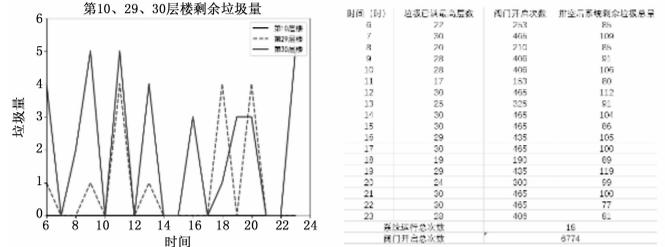


图 8 单层循环控制策略仿真结果 ($Q(n)$ 值最大为 6)

基本在高层楼层数中选择，系统运行与阀门开启次数有较大增长。

采用双层循环式控制策略，系统 k 值不得过大，取为最大值 3，系统排空次数明显增多。设定 $Q(n)$ 值上限为 3，得到图 9 数值模拟仿真结果，对比图 7 中相同垃圾量的情况下，系统的运行总次数与阀门开启次数都有较大增长，控制品质降低，整体控制逻辑的步骤与过程比单层循环式排空策略复杂，但并没有得到更好的系统控制效果，该方案劣于单层循环式控制策略，在实际设计应用过程中舍弃该方案。因此，在相同的阀门单元划分方案中，选取单层循环式控制策略为基本控制模式，是合理的。

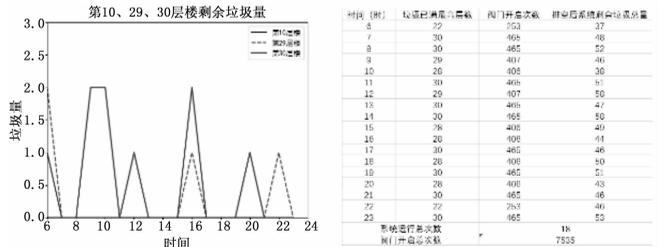


图 9 双层循环控制策略仿真结果

采用三层单元式控制策略，可以减少系统所有气动阀门与传感器使用量的三分之二，且其阈值系数 k 可以取单层层上限值 7，如图 10，其 $Q(n)$ 值上限取为 3，对比单层循环式控制策略，系统运行次数略有提升，但阀门开启次数显著降低，排空后系统剩余垃圾量较少，若实际使用时选用的气动阀门性能能够满足，该策略为三种方案中的首选。

若采用五层单元式的控制策略，可以进一步降低系统在排空过程中的阀门开启次数，但此时垃圾对阀门作用的冲击力可达 190 N 以上，且 k 值设定不得超过 1，这在实际应用过程中是极度不合理的，因此在当前实际应用与仿真分析条件下，三层单元式控制策略为最优的控制解决方案。