

# 气力输送工程

杨 伦 谢一华 主编

机械工业出版社

本书以气力输送的技术设计和工程应用为前提,系统地分析了近年来国内外在气力输送方面的试验研究与应用成果,以及气力输送技术现状与发展趋势。书中内容分为理论基础、装置类型、运行技术、工程应用四个部分,共 15 章。

全书的第一部分(第一章至第三章)是气力输送装置的设计基础,包括气力输送装置的特点与类型,粉粒体的基本性能和气固两相流体力学。第二部分(第四章至第八章)详细介绍了吸送、压送、栓流、特种气力输送装置的系统组成、技术特点、结构形式、设计程序、计算方法及主要部件的性能特点和产品规格等,供设计选用参考。第三部分(第九章)阐述了气力输送的运行技术,包括装置的安装、调试、操作、维护、技术参数检测及自动控制。第四部分(第十章)介绍了气力输送技术在现代工程上的应用等内容。

本书可供从事气力输送系统应用及相关的理论研究、技术设计、工程管理的技术人员使用,也可供大专院校有关专业的师生参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

气力输送工程 杨伦, 谢一华主编 北京: 机械工业出版社, 1999

ISBN 7-111-02810-9

I 气... II 杨...②谢... III 气力输送机 基本知识  
IV 气

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 12345 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 余茂祚

责任编辑: 余茂祚 版式设计: 冉晓华 责任校对: 姚培新

封面设计: 马精明 责任印制: 洪汉军

北京京丰印刷厂印刷

1999 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/32 印张 2.5 千字

1999 年 1 月第 1 版

定价: 12.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68995100

封面无防伪标均为盗版

# 序

人类在古代就已认识到运动的空气（即风力）可以作为驱动和移动物体的动力，例如风可以驱动风车舂米磨面，利用风帆船运输物资等等，这是最原始的空气利用。随着技术和工业的发展，于 15 世纪末和 16 世纪初就出现了管道气力输送，开始只是输送单件的轻便物体，到 18 世纪初叶，在美国、俄罗斯、德国和欧洲许多国家气力输送邮件得到广泛应用。随着科学技术和工业的发展，生产力的不断提高，运输量也在迅速增长，就要求研究和应用新的先进技术和工艺，使生产过程日臻完善。

当代社会几乎所有的工业生产过程都含有粉粒体的处理工艺过程，因此，对粉粒体输送设备的选择、设计和使用以及系统的操作管理必将对其经济的合理性和工作的可靠性带来显著的影响。粉粒体输送设备的种类虽很多，但归纳起来主要可分为机械、流体和容器三大输送方式，如何正确选择输送方式则应根据物料特性。气力输送首先应满足其工艺过程的要求，力求结构简单，布置灵活、合理，使用可靠，耗能低，公害少，管理方便，并易于实现自动化等。

由于气力输送比机械输送具有许多明显的优点，故其在实际应用中发展很快，已成为比较理想的输送方式之一，近一二十年我国在交通运输、港口装卸、冶金、采矿、电力、化工、铸造、建材、粮食、轻纺等工业中应用甚为广泛。对其输送模型、流动过程研究、压力损失计算、系统设计、组部件的结构以及操作管理等方面均已有一定的研究深度和经验积累。但是，随着科学技术的进步，已有数十年发展应用历史的稀相悬浮气力输送呈现出较难克服的缺点，即由于其风速高而带来的能耗大，管道磨损快，输送物料易破碎，除尘较困难，噪声大等问题。因此，人们就试从低风速高浓度中来寻求解决的新途径。这样，在 19 世纪 50 年代栓流气力输送就应运而生了。但这种输送方式也有其较大的局限性，其生产率较小，目前最大生产率也不过每小时几十吨而已，不能适应大生产率的要求，而悬浮气力输送方式恰好具有大生产率的优点，如荷兰、德国、日本等国在港口谷物卸船方面，单管作业每小时数百吨至 1000 吨，悬浮气力输送的吸粮机被广泛应用。此外，气力输送应用的广泛性已越来越引起人们的重视，它已涉足于城市环境保护和公用事业，如用集装箱管道输送邮件、试样、图书资料以及城市垃圾等。而近年来气力输送又有了新发展，大有方兴未艾之势。

气力输送的研究和管道气力输送装置的出现，虽有近两百年的历史，但它仍是一门年轻的学科。管道中物料运动的多相流理论涉及到流体力学（空

气动力学)、颗粒学、机械学、热力学、电子学等多学科的基础,是一门较复杂的边缘学科,有许多理论问题和应用技术需要深化研究。

本书定名为气力输送工程。它是由国内有关专家组织起来而撰写的。深信这本专著的问世,必将在我国今后气力输送工程技术的发展过程中发挥出博采约取、承前启后、触类旁通、推陈出新的积极作用。

交通部水运科学研究所

中国机械工程学会原物料搬运学会

物料搬运学会原气力输送学组

前所长

理事

组长



# 前 言

随着新世纪的到来，作为人类文化物质文明的主要标志之一，物流、人流和信息流的重要性越来越显得突出，它们流动的范围、速度与力度与日俱增。管道物料输送是一种重要的物流手段，而其中最早被人们所采用的就是气力输送。由于它具有通常机械输送方式所不具备的一些独特的优点，已越来越受到各领域的重视，在运输机械中占据了不可忽视的重要地位。

近年来，随着建设事业和科学技术的高速发展，各类工矿企业、科研和设计部门在气力输送应用与研究中取得了长足的发展。本着以工程应用为主，理论与实践相结合的原则，编写一本新的气力输送书籍，可谓众望所归。气力输送作为一门应用性科学，必须保证它有稳定而可靠的实用性能，以及较低的能耗。同时作为一项复合的工程技术，必须对其相关的学科，如颗粒学、气固两相流体力学、机械学、自动控制、检测技术等方面加以研究和实践，以便使气力输送得以更好的应用与发展，更好地服务于现代建设事业。

本书由国内多年从事气力输送教学、科研、设计、生产、应用的专家、教授、学者等参加了讨论和编写工作。他们积极地发挥了各自学术专长，集思广益，通力合作，针对目前国内外气力输送领域中所产生和关注的问题，做了进一步的研究与探讨，并针对传统的气力输送作了部分技术改良，以使其更加适应现代市场的需求。全书由杨伦教授、谢一华高级工程师任主编。具体分工如下：苏宁、陈宏勋研究员编写第一章，杨伦教授编写第二、六章和第三章的第七至九节，李诗久教授编写第三章的第一至六节，张慎衷、苏炳坤研究员编写第四章和第八章的第一至第四节，谢一华高级工程师编写第五、七、十章，倪光裕教授编写第八章的第五节，魏福清高级工程师编写第九章的第一节，杨家灿研究员编写第九章的第二至四节。全书由赵克法教授级高工和孙武亮教授主审。

本书在组织撰写与审稿过程中曾得到前中国物料搬运学会气力输送学组的专家们，以及中国物流学会管道物料输送技术专业委员会的程克勤、王仁柞、潘仁湖、张勋、余洲生、孙宝森、郑培培、陈守康、施铁矛、周诚、蔡阿端、严福民、王加信、周云、夏辉等专家的热情关注和积极支持，同时得到了机械工业出版社余茂祚教授级高工和江阴华澳机电设计研究所有限公司谢田经理、程继斌工程师的大力支持，借此机会表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限，书中如有错误或有待进一步讨论改进之处，恳请广大读者给予批评指教。

# 主要符号表

粤	面积, 振幅	杂	体积比表面积
葬	加速度	栽	热力学温度 (单位 运)
遭	短径	贼	时间, 切线方向
悦	阻力系数, 粉尘浓度, 粘附力	灾	容 (体) 积, 颗粒体积
阅	管径	灾 <sub>槽</sub>	颗粒间持液量
阅 <sub>槽</sub>	孔流直径	壤	沉降速度, 悬浮速度
茵, 茵 <sub>槽</sub>	粒径	壤	气流速度
茵 <sub>槽</sub>	中位径	壤	临界流化速度
茵 <sub>槽</sub>	等体积球当量直径	宰	功, 压缩功, 质量孔流量, 重量
茵 <sub>槽</sub>	等表面积球当量直径	$\delta$	壁厚, 有效内摩擦角
耘	弹性模量、曝光量	$\varepsilon$	空隙率, 粗糙度
藻	复原系数	$\zeta$	局部阻力系数
云	作用力, 粘附力	$\eta$	效率
云 <sub>槽</sub>	颗粒间吸引力	$\theta_{静}$	静堆积角
云 <sub>槽</sub>	流体阻力	$\theta_{动}$	动堆积角
枣	频率, 摩擦因数	$\theta_{蚤}$	粉体内摩擦角
藕	开放屈服强度	$\theta_{槽}$	壁摩擦角
云	流动函数	$\Lambda$	加速度比
葵	流动因数	$\lambda$	沿程阻力系数, 附加压损系数
耶	输送能力、输送量、质量流量	$\mu$	(动力) 粘度, 泊松比
早	重力加速度	$\nu$	运动粘度
澡	高度, 压头、扬程, 毛细管上升高度	$\xi$	加速压损系数, 综合压损系数, 阻力系数
陨	冲量	$\rho$	密度、电阻率
运	系数, 动力指数, 侧压系数	$\rho_{遭}$	堆密度
蕴	管长	$\sigma$	压应力, 抗压强度, 表面张力
造	长径, 栓长	$\sigma_{表}$	颗粒分布密度
皂	质量、质量流量、混合比 (负荷比)	$\tau$	剪应力
灶	个数、分布系数、转速、法线方向	$\phi$	固气速度比, 料斗半顶角, 累积筛下质量百分数
孕	功率	$\phi_{杂}$	表面积形状系数
责	压力, 正应力	$\phi_{灾}$	体积形状系数
$\Delta$ 责	压力降、压力损失、压力差	$\omega$	角速度
匝	体积流量	下角标	
砸	曲率半径, 累积筛上质量百分数	葬	空气的
则	压缩比, 球半径	遭	松散的、弯管的
砸 <sub>槽</sub>	水力半径	糟	临界的、计算的
杂	颗粒表面积		
杂	质量比表面积		

蕴	流体的	燥	初始的
邛	重力的	(燥	冲击前的
蚤	入口的	则	相对的
皂	最终的、最大的、极限的	泽	物料的、颗粒的

# 目 录

序	
前言	
主要符号表	
第一章 气力输送的特点与类型	员
第一节 气力输送的特点	员
一、散料输送装置的分类和比较	员
二、气力输送的优点和缺点	源
第二节 气力输送的发展简史	缘
第三节 气力输送装置的类型	苑
一、吸送式气力输送装置	苑
二、压送式气力输送装置	愿
三、混合式气力输送装置	愿
四、各类气力输送装置的比较	愿
第四节 气力输送状态的类型	愿
一、铅垂管气力输送状态	愿
二、水平管气力输送状态	愿
三、气力输送状态的分类	愿
第二章 粉粒体的基本性质	缘
第一节 颗粒的几何形态学	远
一、粒径	远
二、粒度分布	愿
三、颗粒形状	愿
第二节 颗粒填充层的结构性质	愿
一、颗粒填充层的几何结构性质	愿
二、颗粒填充层内的液相结构性质	愿
三、颗粒填充层的流体透过阻力	猿
四、粉体力学	愿
第三节 粉体的重力流动	愿
一、孔流量	愿
二、整体流设计原理	愿
三、偏析	缘
四、助流	缘
第四节 磨损性质	缘
一、磨损机理	缘
二、磨损因素	缘
第五节 粘附(凝聚)性质	愿
一、粘附(凝聚)机理	愿
二、粘附(凝聚)力的测定	远
三、影响粘附(凝聚)的因素	愿
第六节 静电性质	愿
一、静电发生机理	愿
二、粉体的带电量	缘
三、带电粘附与临界粒径	远
四、带电的防止	远
第七节 粉尘爆炸	愿
一、危害性与对策	愿
二、粉尘的爆炸特性	愿
三、防爆措施	苑
第三章 气固两相流体力学	猿
第一节 物体的运动阻力和悬浮速度	猿
一、附面层	猿
二、运动物体的阻力及阻力系数	愿
三、球形单颗粒的自由悬浮速度	愿
四、不规则形状颗粒群的悬浮速度	愿
第二节 流态化原理	愿
一、理想流态化过程与似流体特性	愿
二、实际流化过程	愿
三、临界流化参数	愿
第三节 单颗粒在管道内的自由悬浮运动方程	愿
一、管道内单颗粒悬浮机理	愿
二、倾斜管内单颗粒自由悬浮运动微分方程	愿
三、单颗粒运动速度与距离的关系方程	愿

四、单颗粒运动速度与运动时间的 关系曲线 .....	282	一、类型 .....	282
第四节 悬浮颗粒群在管道内的运动 方程 .....	282	二、系统组成 .....	282
一、倾斜管内颗粒群的运动微分方程 .....	282	三、技术特点 .....	282
二、水平管内颗粒群的运动方程 .....	282	第二节 供料装置 .....	282
三、铅垂管内颗粒群的运动方程 .....	282	一、吸嘴 .....	282
四、颗粒群运动的最终速度及速度比 .....	282	二、喉管 .....	282
第五节 气固两相管流的压力 损失及临界风速 .....	282	第三节 系统的设计计算 .....	282
一、气固两相管流的各项压力损失 .....	282	一、设计的原始条件 .....	282
二、等速段的附加压损系数 .....	282	二、设计程序 .....	282
三、弯管附加压损的离心沉降理论 .....	282	三、计算方法 .....	282
四、输料直管压力损失与临界风速 .....	282	第五章 压送式气力输送 .....	282
五、输料直管堵塞的临界条件 .....	282	第一节 类型和特点 .....	282
第六节 高压差气力输送的气固两相流 及压力损失 .....	282	一、低压压送和高压压送 .....	282
一、等温气固两相管流的运动方程 .....	282	二、给料法和给气法 .....	282
二、高真空吸送输料管的压力损失 .....	282	三、技术特点 .....	282
三、高真空吸送含尘管道的压力损失 .....	282	四、增压器 .....	282
四、高压压送输料管的压力损失 .....	282	第二节 喷射式给料气力输送 .....	282
第七节 管内气固两相流运动的三维化 分析 .....	282	一、低压喷射式给料器 .....	282
一、气固两相管流运动分析方法进展 .....	282	二、高压喷射式给料器 .....	282
二、颗粒三维运动的基本行为 .....	282	三、回转式给料器 .....	282
三、颗粒三维运动方程和附加压力 损失 .....	282	第三节 螺旋泵气力输送 .....	282
四、数值分析 .....	282	第四节 发送罐式(仓式泵)气力 输送 .....	282
第八节 模型方法及其应用 .....	282	一、涡流式发送罐 .....	282
一、模型对过程的概括和简化 .....	282	二、推压式发送罐 .....	282
二、模型化的步骤 .....	282	三、差压式发送罐 .....	282
三、序贯实验设计 .....	282	四、推送式发送罐 .....	282
四、模型方法对气力输送工程的实用 意义 .....	282	五、沸腾式发送罐 .....	282
五、数值分析在数学模型中的应用 .....	282	六、发送罐组合 .....	282
第九节 气力输送工程的操作优化 .....	282	七、发送罐结构设计参数 .....	282
一、气力输送条件 .....	282	第五节 系统设计计算 .....	282
二、风量变化对输送能力的影响 .....	282	一、设计的原始条件 .....	282
三、加料的波动性 .....	282	二、设计程序 .....	282
四、输送管道直径放大后的操作 条件改变 .....	282	三、计算方法 .....	282
第四章 吸送式气力输送 .....	282	四、变管径系统的设计 .....	282
第一节 类型和特点 .....	282	第六章 栓流气力输送 .....	282
		第一节 栓流作用机理 .....	282
		一、低速密相与动力指数 .....	282
		二、栓流的类型和特性 .....	282
		三、颗粒料特性与密相气力输送 类型的关系 .....	282

第二节 成栓装置形式 .....	圆怨	四、管的连接 .....	圆质
一、始发直接供料可控成栓方式 与装置 .....	圆怨	五、输料管路的布置和选择 .....	圆圆
二、非控旁通气流的不稳定栓流 .....	圆圆	第二节 物料分离器 .....	圆缘
三、可控旁通气流的准稳定栓流 .....	圆缘	一、类型及其选择 .....	圆缘
第三节 脉冲气力式栓流气力输送系统 .....	圆苑	二、容积式分离器 .....	圆缘
一、装置组成和性能 .....	圆苑	三、离心式分离器 .....	圆苑
二、管路系统与栓流稳定化 .....	圆愿	四、惯性式分离器 .....	圆圆
三、气力 .....	圆怨	五、组合式分离器 .....	圆猿
四、发送罐尺寸与主要技术参数 .....	圆圆	第三节 除尘器 .....	圆缘
第四节 振动对栓流气力输送的作用 .....	圆源	一、类型及其选择 .....	圆缘
一、振动场的粉体力学 .....	圆源	二、重力式除尘器 .....	圆远
二、振动对栓流操作的影响 .....	圆远	三、惯性式除尘器 .....	圆苑
三、振动直管栓流的临界空气压力 .....	圆苑	四、离心式除尘器 .....	圆苑
四、栓流的振动效果 .....	圆愿	五、袋式除尘器 .....	圆园
第五节 栓流压力降数学模型 .....	圆怨	六、湿式除尘器 .....	圆远
一、附加压力降模型 .....	圆起	七、分离—除尘组合式装置 .....	圆远
二、单一栓作用力模型 .....	圆质	第四节 卸料(卸灰)器 .....	圆愿
第七章 特种气力输送 .....	圆起	一、叶轮式卸料器 .....	圆愿
第一节 空气槽 .....	圆起	二、阀门式卸料器 .....	猿源
一、作用原理 .....	圆起	第五节 压气机械 .....	猿源
二、布置形式及结构 .....	圆起	一、空气压缩过程原理 .....	猿源
三、性能参数 .....	圆质	二、往复式压气机械 .....	猿愿
四、特点及使用范围 .....	圆源	三、回转式压气机械 .....	猿怨
五、空气槽的布置 .....	圆缘	四、离心式压气机械 .....	猿圆
第二节 集装箱气力输送 .....	圆远	五、降噪技术 .....	猿远
一、类型和特点 .....	圆远	第九章 气力输送的运行技术 .....	猿圆
二、系统类型和组成 .....	圆苑	第一节 操作和维护 .....	猿圆
三、集装箱气力输送的理论计算 .....	圆缘	一、安装和调试 .....	猿圆
第三节 铅垂提升气力输送 .....	圆质	二、操作要点 .....	猿猿
一、输送原理及结构 .....	圆质	三、故障及其对策 .....	猿源
二、影响铅垂提升气力输送的因素 .....	圆圆	四、保养和维护 .....	猿苑
三、铅垂提升热气流干燥器 .....	圆圆	第二节 基本参数的测量 .....	猿愿
第四节 混凝土气力输送 .....	圆猿	一、压力测量 .....	猿愿
一、结构 .....	圆猿	二、流量的测量 .....	猿苑
二、参数的选择 .....	圆源	三、混合比和粉尘浓度的测量 .....	猿源
第八章 主要部件 .....	圆远	第三节 气固两相流检测技术的 发展与应用 .....	猿圆
第一节 管道和管件 .....	圆远	一、激光干涉测速仪(简称)测量颗粒的 速度与粒度 .....	猿圆
一、直向输料管 .....	圆远	二、激光照相法测量颗粒的粒度分布、 速度及加速度 .....	猿猿
二、转向的输料管和管件 .....	圆园	三、电容噪声法检测粉体流量 .....	猿源
三、风管 .....	圆愿		

四、消光法测量激波松弛区颗粒的 浓度及阻力系数 .....	猿缘	应用 .....	猿源
五、高速摄影技术的测量应用 .....	猿愿	一、聚氯乙烯(孕悦)连续脉冲气力 输送 .....	猿缘
六、栓流气力输送的测量 .....	猿怨	二、炭黑气力输送系统 .....	猿缘
第四节 气力输送的自动控制 .....	猿远	第四节 气力输送技术在港口的应用 .....	猿苑
一、压送式气力输送的自动控制 .....	猿远	一、码头散装水泥的气力卸料系统 .....	猿苑
二、脉冲式气力输送的自动控制 .....	猿质	二、港口吸卸粮食用的气力吸粮机 .....	猿怨
第十章 气力输送技术在现代工程 上的应用 .....	猿缘	第五节 气力输送技术在粮食系统的 应用 .....	源员
第一节 气力输送技术在铸造行业的 应用 .....	猿缘	第六节 气力输送技术在冶金行业的 应用 .....	源猿
一、造型材料气力输送的特点 .....	猿缘	一、高炉煤粉气力喷吹技术 .....	源猿
二、多种形式的气力输送系统 .....	猿缘	二、电炉气力喷炭技术 .....	源源
第二节 气力输送技术在电力发电厂 的应用 .....	猿愿	第七节 气力输送技术在铁路工程中的 应用 .....	源缘
一、负压气力除灰与分选一体化系统 .....	猿怨	第八节 气力输送技术在矿山的应用 .....	源远
二、正压气力除灰系统 .....	猿园	第九节 集装箱气力输送在 工程中的应用 .....	源愿
三、双套管紊流气力除灰输送系统 .....	猿园	一、无轮集装箱气力输送的应用 .....	源愿
四、电厂喷钙脱硫、石灰石粉的气力 输送 .....	猿园	二、有轮集装箱气力输送的应用 .....	源园
第三节 气力输送技术在化工行业的		参考文献 .....	源缘

# 第一章 气力输送的特点与类型

## 第一节 气力输送的特点

### 一、散料输送装置的分类和比较

散料输送是我们日常所遇到的大宗运送货物的输送方式之一，例如矿石、煤炭、谷物、砂石、水泥以及各种工业原料等的粉粒体物料输送。现使用的散料输送装置有多种方式，按其输送原理大致可分为机械输送方式、流体管道输送方式和容器输送方式三大类，如图 1-1 所示。

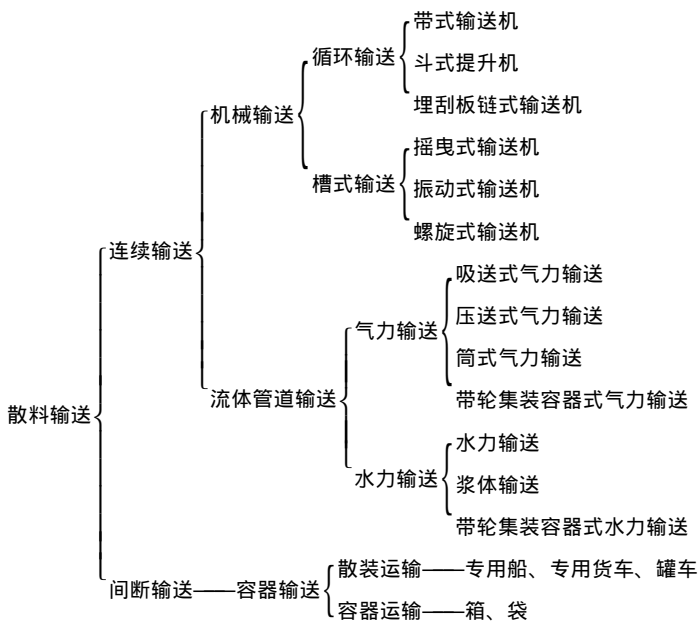


图 1-1 各种散料输送方式

流体管道输送方式是一种正在被应用和很有发展前途的效率高、占地少、成本低、公害小的现代化输送方式之一。图 1-2 是目前正在开拓并应用于各行业的货用流体管道输送系统。由图中可见，其应用范围之广、涉及学科之多、足以说明其具有广阔的应用发展前景。无疑，气力输送属于该输送系统并在其中占有重要的地位。

# 圆 气力输送工程

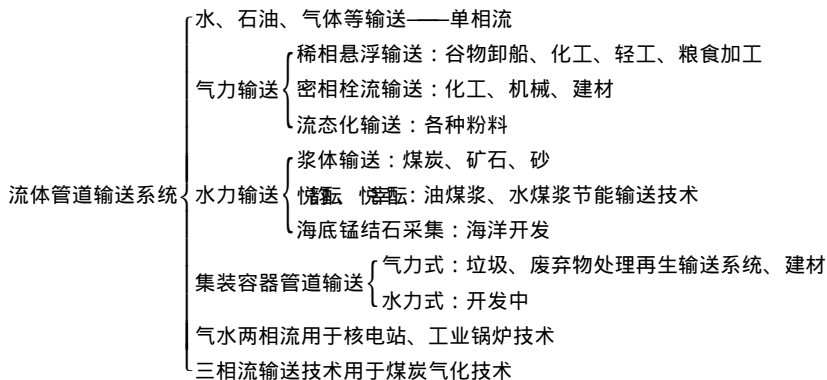


图 1-10 流体管道输送系统

上述多种输送方式均具有各自的特点。表 1-11 是气力输送与其他一些输送方式的特点比较。

表 1-11 气力输送与其他一些输送方式比较

比较项目 \ 种类	气力输送	空气槽	水力输送	带式输送机	链式输送机	螺旋输送机	斗式提升机	振动输送机
被输送物料粒径范围	约 0.1~100mm	—	约 0.1~100mm	无特别限制	约 0.1~100mm	约 0.1~100mm	约 0.1~100mm	约 0.1~100mm
被输送物料的最高温度	150℃	100℃	100℃	普通胶带 100℃ 耐热胶带 150℃	100℃	100℃	100℃	100℃
输送管线倾斜角 (°)	任意	向下 0~15°	任意	0~15°	0~15°	0~15°	15°	0~15°
最大输送能力 (t/h)	100~1000	100~1000	100~1000	100~1000	100~1000	100~1000	100~1000	100~1000
最大输送距离 (m)	100~1000	100~1000	100~1000 以上	100~1000	100~1000	100~1000	100~1000	100~1000
所需功率消耗	大	小	大	小	大	中	小	大
最大输送速度 (m/s)	15~25	10~15	10~15	15~25	10~15	10~15	10~15	—
输送物料飞扬	无	无	无	有可能	无	无	无	有可能
异物混入及污损	无	无	无	有可能	无	无	无	无
输送物料残留	极少量	极少量	无	无	有	少量	有	有
管线配置灵活度	自由	直线	自由	直线	直线	直线	直线	直线
分流的可能	容易	可能	容易	可能	困难	不能	不能	困难
断面占据空间	小	中	小	大	大	中	大	大
主要检修部位	弯管、阀	—	弯管、阀	托滚、轴承	链、轴承	全面	链、轴承	全面

在选择和确定散料输送方式装置时，首先应满足输送量、输送距离等主要输送条件参数的要求，且同时要考虑能耗和经济性等问题。图 猿猿和图 猿原分别为多种散料输送装置的输送能力和输送距离以及输送规模和功率消耗之间的关系图。表 猿是多种散料输送装置的单位功率消耗比较。装置的单位功率消耗固然也是重要的因素之一，但应根据被运送物料的物性、输送路线的配置要求、前后的工艺流程衔接以及维护检修、环保卫生安全等要求综合择优确定。图 猿为择定气力输送方式的一般程序步骤。

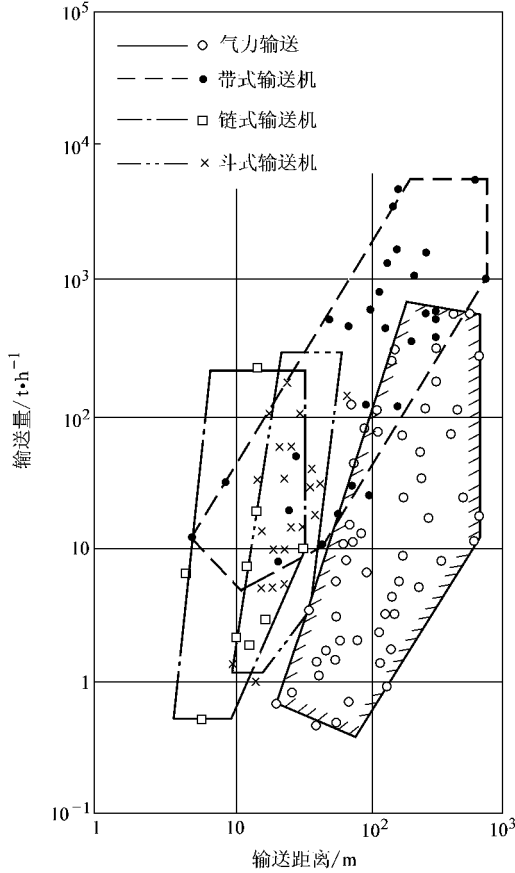


图 猿猿 散料输送装置的输送量和输送距离之间的关系

表 猿 散料输送装置的单位功率消耗比较

输送方式	气力输送			机械输送			
	稀相		密相 栓流	带式 输送机	振动 输送机	斗式 提升机	埋刮板输送机、 螺旋输送机
	压送	吸送					
单位功率消耗 瓩 噪 (瓩) 原 (瓩) 皂 (瓩)	园~园 ~ 园	园~猿 ~ 员	园~员 ~ 园	园~园 ~ 园	园~园 ~ 园	园~园 ~ 园	园~员 ~ 园

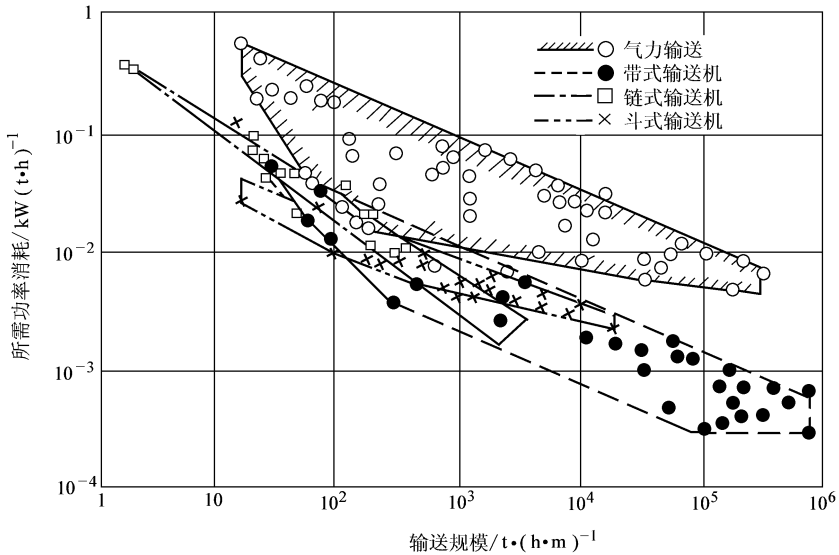


图 1 散料输送装置的输送规模和功率消耗之间的关系

## 二、气力输送的优点和缺点

从气力输送的输送机理和应用实践均表明它具有一系列的优点：输送效率较高，设备构造简单，维护管理方便，易于实现自动化以及有利于环境保护等。特别是用于工厂车间内部输送时，可以将输送过程和生产工艺过程相结合，这样有助于简化工艺过程和设备。为此，可大大地提高劳动生产率和降低成本。

概括起来，气力输送有如下的优点：

① 输送管道能灵活地布置，从而使工厂设备工艺配置合理。

② 实现散料输送，效率高，降低包装和装卸运输费用。

③ 系统密闭，粉尘飞扬逸出少，环境卫生条件好。

④ 运动零部件少，维修保养方便，易于实现自动化。

⑤ 能够避免物料受潮、污损或混入其他杂物，可以保证输送物料的质量。

⑥ 在输送过程中可以实现多种工艺操作，如混合、粉碎、分级、干燥、冷却、除尘和其他化学反应。

⑦ 可以进行由数点集中送往一处或由一处分散送往数点的远距离操作。

⑧ 对于化学性能不稳定的物料，可以采用惰性气体输送。

然而，与其他输送形式相比，其缺点是动力消耗大，由于输送风速高，易产生管道磨损和被输送物料的破碎。当然，上述不足之处在低输送风速、高混合比输送情况下可得到显著地改善。此外，被输送物料的颗粒尺寸也受到一定的限制，一般，当颗粒尺寸超过  $100\mu\text{m}$  或粘结性、吸湿性强的物料其输送均较困难。

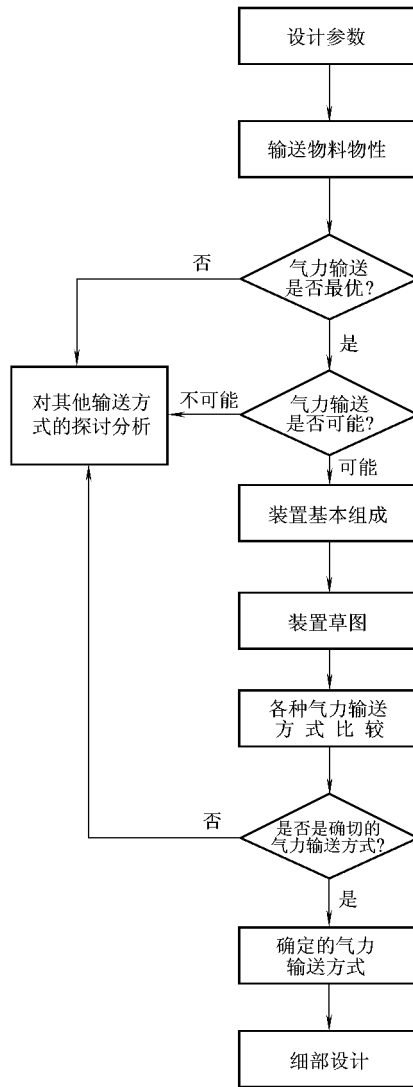


图 1-1-1 择定气力输送方式的一般程序步骤

## 第二节 气力输送的发展简史

当人们从自然界风力吹石卷尘和日常生活中常见的吮吸现象获得启示之后，就设想利用气流在管道中来运送物料。基于这个设想，早在 1829 年英国 化学家 就提出了利用管道将邮件作气力输送的方案。因此，气力输送技术乃始于成件物品的筒式输送。数十年后气力输送才开始用来卸送谷物、棉花和砂等散状物料，出现了第一台浮船式气力卸船设备以及固定式的吸粮机设备。这些气力卸船设备问世之后曾在欧洲各国，特别是当时的粮食输入国，如英国、荷兰、德国获得了应用和普及。但限于当时的制造技术水平，气力输送技术在较长的一段时间内几乎无多大进展，装置均是基于低混合比悬浮输送原理设计的。直到 19 世纪初

才将其应用范围扩大到车间内部的物料运输。就气力输送理论和实验的系统研究在世界上要数 1909 年由德国 普朗特 发表的研究报告了,他所提出的附加压损系数法,至今仍用于稀相气力输送的设计计算中。近数十年来,气力输送技术的应用发展异常迅速。就稀相悬浮输送来说,其输送模型、流动状态分析、压力损失设计计算、组成装置和系统的各种部件结构以及操作管理均已有一定的研究深度和经验的积累。随着科学技术的进步,由稀相悬浮气力输送呈现出本质上的缺陷,即其输送风速高带来能耗大、管道磨损、输送物料的破碎和分离除尘造成困难等问题,人们就试以从低输送风速、高浓度中来寻找新的途径,开发新的装置。1951 年原联邦德国 拜耳 公司的内套管式气力输送装置开发成功,同年瑞士 苏尔寿 公司的外旁通管式装置,1952 年英国 辛那 杂磁 试验所的脉冲气刀式气力输送装置相继问世。这些引人注目的研究成果,受到了世界各国的普遍重视,使粉粒体的气力输送技术进入了一个崭新的阶段,此后又相继出现了日本日曹公司的成栓器脉冲式、小松制造公司的球式等粉体设备,使气力输送技术日臻完善。在此期间对稀相悬浮输送技术由于计算及测试技术、材料技术的进步,在其理论研究和应用技术上也有了长足的提高。例如,运用电子计算机对设计计算过程的数据分析、模拟计算和优化设计;对测试数据的处理;对弯管的耐磨结构、材料和供料、卸料机构的防卡机构;从物性的角度来探讨装置输送的适用性;运用放射性同位素、光导纤维测定技术对物料运动参数的测定等。

作为气力输送最初应用的筒式输送装置也有了新的发展。1954 年在原联邦德国汉堡建造了两条管径为 100mm、长度为 100m 和 200m 的邮件输送实用管线。由于上述装置输送成功的激发,有轮集装箱管道输送技术的研究在前苏联、美国、加拿大、日本又活跃了起来。前苏联设有这类装置的管线最长达 3000m,每年运送矿石 100 万吨,还计划建造几条更大的矿产品输送线,最大管径为 1000mm。日本由新日铁和大福机工合作研制的集装箱管道输送系统已在新日铁室兰厂输送热石灰和石灰石中起到重大的作用,输送管径为 1000mm,年输送能力为 10 万吨。目前,世界上对碎石、砂、城市废弃物、农产品的集装箱管道输送提出了不少方案和经济可行性论证,可以预见,筒式输送技术将作为流体管道输送技术中的一个重要分支而受到重视和发展。

近年来,气力输送技术在以往低压气力输送和高压气力输送技术的基础上进一步开拓应用。例如,将粉料喷吹送入高温熔化的液态金属中;将粉状燃料喷入熔化炉和锅炉中去的技术;利用港口吸卸谷物的吸粮机的原理将气力输送技术用于高温熔渣的吸出清理;对以往难以输送物料的输送技术;磨损性大的物料的输送技术以及塑料成形体中物件的输送技术等。作为气力输送技术对新应用领域的开拓最为社会重视的是气力输送用于垃圾的回收输送系统,如图 1-1 所示。人们已将上述系统称之为垃圾的“下水道”。由于气力输送技术在环保、安全卫生上的显著优点,近年来在将其小型多功能化上也作了有实用价值的开拓。

气力输送是气固两相流。其流动模型、流变分析、压力损失计算、测试技术等与固液、气液两相流具有一定的共性,为推动学术理论和技术应用的发展,从多相流角度加以综合研究,最近在世界先进国家受到了重视。从两相流到多相流的研究进展意味着技术进步与研究深化。用现代行之有效的先进技术来研究多相流也进而促进两相流理论和应用研究的提高。

我国从 1954 年就在港口对气力输送技术进行研究试验并应用于卸船,其他各行业也开发了多种形式气力输送装置,在生产上获得了应用,如建立了风送系统的面粉厂,气力输送烟丝,铸造车间型砂气力输送技术也逐渐发展起来。此后研制成功生产率为每小时 1000 吨的大型吸粮机以及为