

# 新型喷灌装备

---

## 设计理论与技术

■ 袁寿其 李红 施卫东 等著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

# 新型喷灌装备设计 理论与技术

袁寿其 李 红 施卫东 等著



机械工业出版社

本书是作者多年从事新型喷灌装备设计理论与技术研究工作的总结。全书共七章,包括隙控式全射流喷头理论与设计、变量喷洒技术、射流式自吸喷灌泵的理论与设计方法、新型井用潜水泵的理论与设计方法、轻小型喷灌机组优化设计理论与技术、智能控制轻型移动喷灌机组以及喷灌和软管灌溉两用轻小型机组。

本书可供从事喷灌技术和节水灌溉工程研究工作的工程技术人员及高等学校相关专业的师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

新型喷灌装备设计理论与技术/袁寿其等著 —北京:机械工业出版社, 2011 8

ISBN 978-7-111-35629-5

I ①新 II ①袁… III. ①喷灌机—设计 IV ①S277.9

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第164216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:蔡开颖 责任编辑:蔡开颖 张丹丹

版式设计:霍永明 责任校对:李秋荣 责任印制:乔宇

三河市国英印务有限公司印刷

2011年9月第1版第1次印刷

184mm×260mm·15印张·368千字

标准书号 ISBN 978-7 111-35629-5

定价 39.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

销售二部:(010)88379649

教材网:<http://www.cmpedu.com>

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

# 前言

我国是一个农业大国，又是一个水资源严重短缺的国家。农业用水供需矛盾日益突出，一方面农业缺水，另一方面用水浪费现象又普遍存在。农田灌溉水有效利用系数仅40%~45%，先进国家已达到80%以上。农田水分生产率不足 $1.0\text{kg}/\text{m}^3$ ，先进国家已达到 $2.0\text{kg}/\text{m}^3$ 以上。发展节水灌溉不仅成为缓解我国水资源紧缺矛盾的战略选择，也是我国农业可持续发展的一项长期战略任务。

2011年中央一号文件提出的指导思想是把水利作为国家基础设施建设的优先领域，把农田水利作为农村基础设施建设的重点任务，力争通过5~10年时间，基本建成水资源合理配置和高效利用体系，灌溉水有效利用系数提高到55%以上。“十二五”期间将新增农田有效灌溉面积4000万亩，大力发展节水灌溉，推广渠道防渗、管道输水、喷灌滴灌等技术，扩大节水、抗旱设备补贴范围等。

喷灌是先进的节水灌溉方式，节水增产效果明显，能大幅度减轻劳动强度，提高农业劳动生产率，是提升农田灌溉水平及实现农业机械化和现代化的重要手段，是我国目前和今后一段时间推广应用的主要节水灌溉方式之一。

新型喷灌装备的研制开发是喷灌技术推广的重要保障。近年来，尤其是“九五”、“十五”、“十一五”期间，依托国家重大项目，已开发出全射流系列喷头、高效低能耗轻小型移动式喷灌机组、智能化自走式喷灌机组等一批适合我国国情的重大节水产品与设备。

本书是部分“十五”国家高技术研究发展计划（863计划）项目“新型喷滴灌系统关键设备的研制与产业化开发（2004AA2Z4010）”、“十一五”国家高技术研究发展计划（863计划）项目“变量喷洒低能耗轻小型灌溉机组（2006AA100211）”及国家农业科技成果转化资金项目“新型射流式节水灌溉设备的完善与中试（2006GB2C100098）”等研究成果的总结。全书包括隙控式全射流喷头理论与设计、变量喷洒技术、射流式自吸喷灌系的理论与设计方法、新型井用潜水泵的理论与设计方法、轻小型喷灌机组优化设计理论与技术、智能控制轻型移动喷灌机组以及喷灌和软管灌溉两用轻小型机组。本书采用理论分析、数值模拟和试验研究相结合的方法，建立了相关新型喷灌装备的设计理论与技术，研制开发了系列新型喷灌装备及产品。希望本专著的出版能为研制开发新型喷灌装备提供设计理论和技术基础，为提高我国灌溉装备的设计水平提供帮助。

本书由江苏大学主持撰写，参加单位有中国农业机械化科学研究院、中国农业科学院农田灌溉研究所。撰稿人员与分工为袁寿其、向清江、王超（第一章），李红、刘俊萍、汤跃（第二章），施卫东、刘建瑞（第三章），陆伟刚、施卫东、周岭（第四章），朱兴业、王新坤、蔡彬（第五章），钱一超、侯永胜、严海军（第六章），范永申、黄修桥、段福义（第七章）。全书由袁寿其、李红、施卫东统稿，由金兆森、李世英审定。

由于灌溉装备设计内容丰富、发展迅速，有待进一步研究的内容很多，加之撰写时

间仓促，书中不当之处，请读者批评指正。在本书撰写过程中，参考和引用了大量国内外相关文献，在此对这些文献的作者一并表示感谢。最后，向对本书相关研究工作作出贡献的全体课题组成员和参与撰写、审稿工作的专家表示真诚的感谢。

**袁寿其**

于江苏大学

# 目 录

## 前言

## 第一章 隙控式全射流喷头理论与设计

### 计 ..... 1

#### 第一节 概述 ..... 1

#### 第二节 隙控式全射流喷头设计理论 ..... 8

#### 第三节 全射流喷头测试系统和试验研究 ..... 16

#### 第四节 全射流喷头射流元件内部流场数值模拟 ..... 26

#### 第五节 隙控式全射流喷头射流元件设计方法 ..... 34

#### 参考文献 ..... 37

## 第二章 变量喷洒技术 ..... 40

#### 第一节 概述 ..... 40

#### 第二节 变域喷洒的实现 ..... 45

#### 第三节 新型变量喷洒喷头产品 ..... 52

#### 第四节 新型变量喷洒喷头试验 ..... 61

#### 第五节 变频机组变量喷洒技术 ..... 65

#### 第六节 变量喷洒组合技术及应用 ..... 72

#### 参考文献 ..... 76

## 第三章 射流式自吸喷灌泵的理论设计与方法

### 计方法 ..... 79

#### 第一节 概述 ..... 79

#### 第二节 射流式自吸喷灌泵的设计理论与水力设计方法 ..... 81

#### 第三节 射流式自吸喷灌泵水力设计实例 ..... 93

#### 第四节 射流式自吸喷灌泵内部流动的数值模拟 ..... 101

#### 第五节 射流式自吸喷灌泵喷嘴的射流原理及结构形式 ..... 118

#### 第六节 射流式自吸喷灌泵回流阀的工作原理及结构形式 ..... 124

#### 参考文献 ..... 131

## 第四章 新型井用潜水泵的理论与设计

### 方法 ..... 133

#### 第一节 概述 ..... 133

#### 第二节 新型井用潜水泵理论与设计 ..... 134

#### 第三节 新型井用潜水泵的设计实例及型谱 ..... 141

#### 参考文献 ..... 147

## 第五章 轻小型喷灌机组优化设计理论与技术

### 与技术 ..... 149

#### 第一节 概述 ..... 149

#### 第二节 轻小型喷灌机组管路水力计算方法 ..... 153

#### 第三节 轻小型喷灌机组优化设计 ..... 157

#### 第四节 组合喷灌技术 ..... 164

#### 第五节 轻小型喷灌机组水力性能试验 ..... 174

#### 参考文献 ..... 179

## 第六章 智能控制轻型移动喷灌机组

#### 第一节 机组研发背景与特点 ..... 182

#### 第二节 机组主要技术参数及设计要点 ..... 185

#### 第三节 灌水器配置原理及计算方法 ..... 194

#### 第四节 机组试验研究 ..... 205

#### 参考文献 ..... 213

## 第七章 喷灌和软管灌溉两用轻小型机组

### 机组 ..... 215

#### 第一节 概述 ..... 215

#### 第二节 机组结构设计及工作原理 ..... 218

#### 第三节 机组系统配套及性能分析 ..... 220

#### 第四节 机组水力性能试验研究 ..... 227

#### 第五节 机组运行及适用条件 ..... 229

#### 参考文献 ..... 230

# 第一章 隙控式全射流喷头理论与设计

## 第一节 概 述

喷灌系统一般由水源工程、水泵及动力设备、输水管道系统和喷头部分组成。喷头将压力水通过喷嘴喷射到空中，形成细小的水滴，均匀地喷洒在作物和土壤表面<sup>[1-2]</sup>。喷头是实施喷灌的关键设备，除了满足力学性能等基本要求外，还必须满足喷灌的水力性能技术要求。因此，喷头的水力性能和结构在很大程度上决定了喷灌系统的灌溉质量。

灌溉用喷头结构形式可分为旋转式喷头和固定式喷头两种，其中，旋转式喷头较为常见。根据驱动机构的特点，旋转式喷头又可分为摇臂式喷头、反作用式喷头和叶轮式喷头三种形式。目前摇臂式喷头使用最多，应用最为广泛<sup>[3-4]</sup>。

全射流喷头是我国独创、拥有自主知识产权的节水节能新产品，属于反作用式喷头的一种。全射流喷头利用水流附壁原理设计射流元件，具有结构简单、水力性能好的优点。在不改变其他结构的情况下，可通过调整射流元件的安放角、导管长度等途径实现喷头射程、雾化性能等的改变，因而也是一种多功能喷头，适应了目前喷头向多功能、节能方向发展的趋势，具有广阔的应用前景。

### 一、摇臂式喷头与全射流喷头的结构及特点

#### （一）摇臂式喷头的结构及特点

我国喷头的研究始于 20 世纪 50 年代，发展过程大致分为两个阶段<sup>[4]</sup>：第一阶段从 20 世纪 50 年代至 80 年代初期，经历了仿制、自行试制、试点推广、联合设计和技术攻关阶段，开发了 PY<sub>1</sub> 型系列金属摇臂式喷头，并进行了试验研究；第二阶段从 20 世纪 80 年代初期到现在，主要是进行摇臂式喷头产品整顿、质量完善及科学研究，在 PY<sub>1</sub> 型系列金属摇臂式喷头的基础上开发了 PY<sub>2</sub> 型系列喷头，引进和开发了 ZY 型系列喷头，并制定了一系列喷灌机具国家标准。

根据结构形式和工作原理不同，摇臂式喷头又可分为水平摇臂式喷头和垂直摇臂式喷头<sup>[3,5]</sup>。

#### 1. 水平摇臂式喷头

水平摇臂式喷头有单喷嘴和双喷嘴两种形式，分别如图 1-1 和图 1-2 所示，其结构包括流道、旋转密封机构、驱动机构、换向机构等。驱动机构由摇臂、摇臂轴、摇臂弹簧、弹簧座等零件组成。摇臂式喷头的工作过程大体上分为摇臂脱离射流阶段、摇臂减速阶段、摇臂回摆阶段、摇臂切入射流阶段、碰撞阶段和反转阶段等。

水平摇臂式喷头具有射程较远、比较容易推广应用的优点。其主要缺点为：一是在有风条件下和回转面不平时旋转速度不均匀，造成喷头的两侧喷灌强度不一致，影响了喷洒的均匀性；二是由于喷头的工作原理使其不能经受较大的振动，一般避免在手扶拖拉机、柴油机、水泵、喷头直联机组上使用。要求喷头相应的零件耐冲击，因此对尺寸较大的喷头，在

冲击部位都设置橡胶打击垫,以改善受力情况。随着喷头结构尺寸的增大,反向时受力过大,反向机构不可靠,容易失效。同时,由于摇臂式喷头靠摇臂敲击喷管(或喷体)来实现喷头的转动与反向,摇臂弹簧工作频繁,工作寿命远远低于喷头其他部件的工作寿命。随着材料科学的发展,弹簧的工作寿命已有很大的提高,但这仍是大型摇臂式喷头推广应用中的瓶颈。另外,摇臂式单喷嘴喷头的近处水量靠摇臂导流器拍击水流使水滴散落于近处,导致喷头水量分布不均匀,中间少,呈马鞍形分布。同时,由于其出水为三维自由射流,水束的分散破碎主要靠空气扰动和自身重力,喷灌质量(如喷洒水滴直径、水量分布性能及其雾化指标等)有待提高。而安装副喷嘴不仅会加大喷头的制造难度和成本,也会降低喷头的射程。

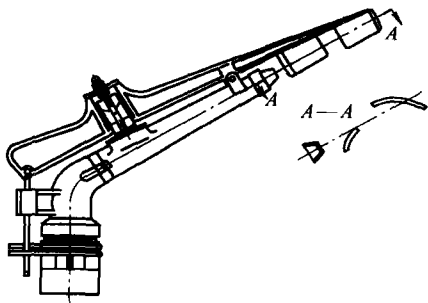


图 1-1 单喷嘴摇臂式喷头

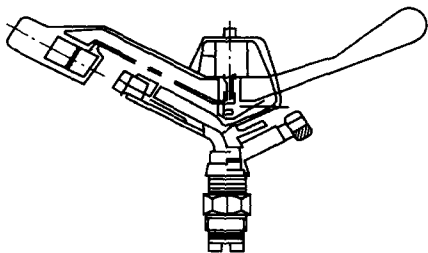


图 1-2 双喷嘴摇臂式喷头

## 2. 垂直摇臂式喷头

垂直摇臂式喷头是一种反作用式喷头,基本结构包括流道、旋转密封机构、驱动机构、换向机构和限速机构等。驱动机构由正转臂、导游器、配重铁、反转臂、摇臂轴等组成。其典型结构有 1005M—DC 型和 PYC50 型两种,分别如图 1-3 和图 1-4 所示。垂直摇臂式喷头依靠改变水流运动方向产生的反作用力推动其间歇转动,摇臂的运动过程可分为摇臂脱离射流阶段(获能阶段)、摇臂减速阶段(蓄能阶段)、摇臂回摆阶段(释能阶段)和摇臂切入射流阶段(增能阶段)。

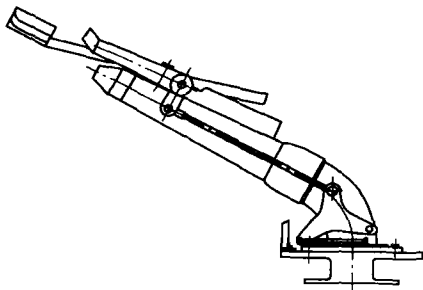


图 1-3 1005M—DC 型垂直摇臂式喷头

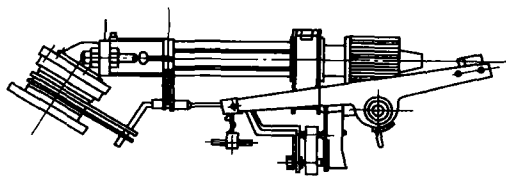


图 1-4 PYC50 型垂直摇臂式喷头

垂直摇臂式喷头的主要优点是受力情况比水平摇臂式喷头好,原因是其摆臂不直接撞击喷管,正转时摆臂配重和摆臂轴处配重在运动过程中与摆臂轴的作用力方向相反,可以抵消部分撞击力。同时,由于摆臂在与喷管近于平行的平面里运动,摆臂运动的作用力和射流运

动产生的作用力相反, 也产生一个平衡力矩, 因此驱动较为平稳。主要缺点是结构笨重、体积庞大和换向器工作不可靠等。为降低喷头流道内部水力损失, 提高喷头的射程, 此类喷头的喷管一般较长, 须达到喷管直径的 8 倍以上。主喷管过长易导致喷头重心不稳, 从而降低了喷头工作的稳定性。在我国, 随着其制造尺寸的增大, 垂直摇臂式喷头换向器工作可靠性得不到提高, 这也是一直制约我国大流量远射程大中型旋转式喷头发展的技术难题。

## (二) 全射流喷头的结构及特点

全射流喷头<sup>[3,6]</sup>是通过水流的反作用力获得驱动力矩, 利用水流的附壁效应改变射流方向的旋转式喷头。当喷灌的压力水通过安装在喷管出口处的射流元件时, 射流元件不但要完成均匀的喷洒任务, 而且要完成驱动喷头正、反转的任务。由于所有工作都是利用射流本身的特性来实现的, 所以称为全射流喷头。

### 1. 全射流喷头的结构形式

全射流喷头于 1975 年由水利部立项开发, 中国科学院力学研究所和江苏大学 (原镇江农业机械学院) 分别为组长单位和副组长单位, 承担系统的研究开发。由于种种原因, 后来的全射流喷头研究开发工作在全国分为三个课题组分别进行, 最终形成几种不同形式的全射流喷头。

(1) 反馈式步进全射流喷头 由江苏大学研究开发的 PSF 型反馈式步进全射流喷头的结构及水射流元件分别如图 1-5 及图 1-6 所示。1984 年 PSF 型反馈式步进全射流喷头曾获原机械工业部科技进步二等奖。

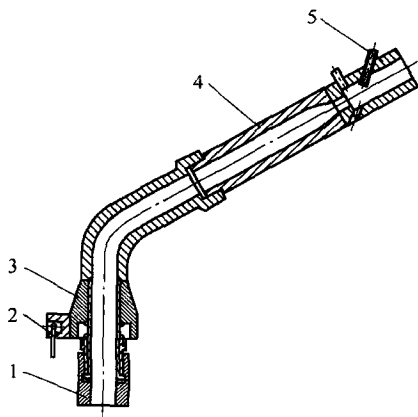


图 1-5 PSF 型反馈式步进全射流喷头结构图

1—旋转密封机构 2—换向机构  
3—喷体 4—喷管 5—水射流元件

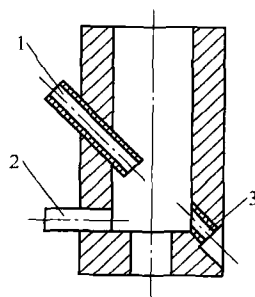


图 1-6 反馈式步进全射流

喷头水射流元件

1、2—接嘴 3—反向接嘴

(2) 自控步进式全射流喷头 由江苏大学研究开发的 PSBZ 型自控步进式全射流喷头元件结构如图 1-7 所示。

(3) 连续式全射流喷头 由江苏大学研究开发的连续式全射流喷头, 喷头元件结构如图 1-8 所示。

(4) 互控步进式全射流喷头 由浙江省嵊县研究开发的 PSH 型互控步进式全射流喷头元件结构如图 1-9 所示。

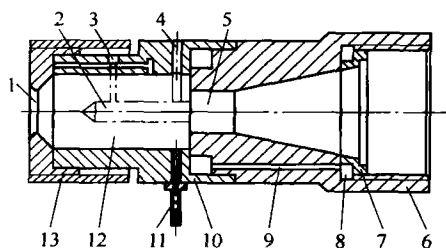


图 1-7 自控步进式全射流喷头元件结构图

- 1—出口 2—容室 3—补齐孔 4—抽负孔  
5—喷嘴 6—元件接头 7—O形密封圈  
8—防砂圈 9—信号源孔 10—附壁件  
11—接嘴 12—相互作用区 13—防砂罩

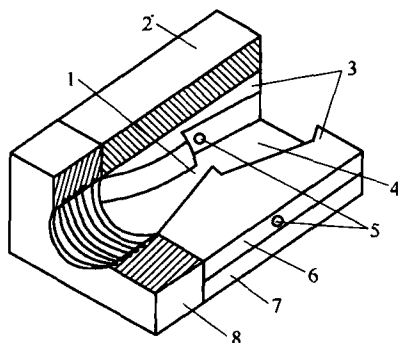


图 1-8 连续式全射流喷头元件结构图

- 1—喷嘴 2—元件上盖板 3—元件板  
4—元件相互作用区 5—控制孔 6—元  
件下盖板 7—胶垫 8—元件接头

## 2. 全射流喷头的特点

以上几种全射流喷头虽然结构形式不同，但工作原理是基本相同的，即都有一个射流元件，利用射流两侧的压差产生“附壁效应”，使射流改变方向驱动正转和反转。全射流喷头的优点主要有：

1) 元件结构简单，用一个简单的水射流元件取代了摇臂式驱动的一套复杂机构，无撞击部件，喷洒性能较好。

2) 反向机构采用负压原理，巧妙去除弹簧，无连续撞击件，使用寿命大大提高。

3) 由于全射流喷头的喷嘴为长圆形或矩形（非圆形），并且在射流元件内部有空气掺入，因此雾化性能好。

4) 在不改变其他结构的情况下，可通过调整射流元件的安放角、导管长度等实现喷头射程、雾化性能等的改变，成为一种多功能喷头。

全射流喷头的缺点主要为：射流元件加工难度大，控制孔不易加工，运行的可靠性和稳定性有待进一步提高。

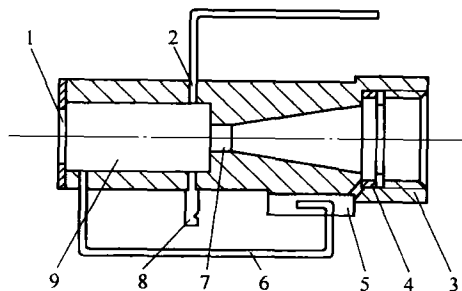


图 1-9 PSH 型互控步进式全射流喷头元件结构图

- 1—出口 2—连接换向器的塑料管 3—主  
元件 4—防砂圈 5—副元件 6—回水塑  
料管 7—喷嘴 8—水斗 9—主元件  
相互作用区

## 二、喷头水力性能和主要结构参数

### (一) 喷头水力性能参数

喷头水力性能参数主要包括喷头的工作压力、流量，以及喷头的射程、喷灌强度、水滴打击强度及水滴直径、水量分布特性、雾化指标等<sup>[3-8]</sup>。

#### 1. 射程

喷头射程  $R$  即喷洒湿润圆半径, 根据我国标准, 其实验测定值是指喷头在正常条件下运转时, 喷灌强度为  $0.25\text{mm/h}$  (对流量大于  $0.075\text{m}^3/\text{h}$  的喷头) 或  $0.13\text{mm/h}$  (对流量小于或等于  $0.075\text{m}^3/\text{h}$  的喷头) 的那一点至喷头旋转中心的距离。一般来说, 喷头喷射水流的形式与弹道运动相类似, 其理论射程公式为

$$R = \frac{v^2}{g} \sin 2\alpha = 2\mu^2 h_p \sin 2\alpha \quad (1-1)$$

式中  $R$ ——喷头射程 (m);

$v$ ——水流从喷嘴射出的速度 (m/s),  $v = \mu \sqrt{2gh_p}$ ;

$\alpha$ ——喷管与水平之间的夹角 ( $^\circ$ );

$\mu$ ——流量系数, 可取  $0.85 \sim 0.95$  估算;

$h_p$ ——喷头工作压力水头 (m)。

从式 (1-1) 中可以看出, 当  $\alpha = 45^\circ$  时, 射程达到最大值。实际上, 由于空气阻力、地球引力及水流裂变等因素的影响, 喷头的最大射程并不在  $45^\circ$  时。实践证明, 在无风和喷头安装高度为  $1.2\text{m}$  的条件下, 喷管与水平面夹角  $\alpha$  在  $32^\circ \sim 35^\circ$  时可获得最大射程。

喷头的射程一般由试验测得。根据我国《旋转式喷头》(GB/T 22999—2008) 标准<sup>[8]</sup> (以下简称《标准》), 喷头射程的测试最好在室内试验场进行。如果在室外测量, 应在无风的条件下进行, 因为风对射程的影响非常大。

## 2. 喷头的喷灌强度

喷灌强度是指单位时间内喷洒到单位面积上的水深, 或单位时间的喷洒水深, 单位为  $\text{mm/h}$  或  $\text{mm/min}$ 。在喷灌系统的规划中, 确定喷灌强度是一项至关重要的工作。喷灌强度过大, 地面将积水或产生径流, 土壤结构被破坏, 不利于保土保肥; 喷灌强度过小, 会产生水分漂移等现象, 降低喷水效率, 同时加大投资和运行成本。

由于喷洒时的水量分布常常是不均匀的, 因此喷灌强度表示的概念有三种: 点喷灌强度  $\rho_i$ 、平均喷灌强度  $\bar{\rho}$  (面积和时间都平均) 以及计算喷灌强度  $\rho$ 。

(1) 点喷灌强度  $\rho_i$  在一块小面积 (应足够小, 小到在该面积上的降水深度都相同) 上所接受的水深  $\Delta h$  与相应的时间增量  $\Delta t$  (应足够短, 短到在  $\Delta t$  内喷洒受到其他因素影响都可以忽略) 之比, 称为该点处的点喷灌强度, 用  $\rho_i$  表示, 即

$$\rho_i = \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (1-2)$$

(2) 平均喷灌强度 平均喷灌强度是指控制面积内各点喷灌强度的平均值, 可按各点所代表的面积用加权法求得, 此时平均喷灌强度可表示为

$$\bar{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i \rho_i)}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (1-3)$$

式中  $A_i$ —— $i$  点所代表的面积 ( $\text{m}^2$ );

$n$ ——点数。

平均喷灌强度主要用来计算喷灌均匀度, 也用来校核规划设计的喷灌是否符合实际。

(3) 计算喷灌强度 计算喷灌强度是喷灌系统在单位面积上的喷洒水量, 可表示为

$$\rho = 1000 \frac{q_p}{A} \quad (1.4)$$

式中  $\rho$ ——计算喷灌强度 (mm/h);

$q_p$ ——喷头流量 (m<sup>3</sup>/h);

$A$ ——喷洒面积 (m<sup>2</sup>)。

### 3. 水滴打击强度及水滴直径

水滴打击强度是指单位受水面积内, 水滴对土壤或作物的打击动能, 它取决于水滴质量、降落速度和密度等因素。水滴打击强度一般用水滴直径或雾化指标来表征。

实践表明, 水滴过大, 对作物打击较大, 易造成土壤板结, 影响水分向土壤的渗透, 形成径流及冲蚀土壤。水滴过小, 虽对作物有益, 但消耗能量多, 影响射程, 易被风吹走, 同时蒸发损失严重。实验研究表明, 喷头射程末端的水滴直径在 1~3mm 之间为宜。

在使用喷头或设计喷灌系统时多用雾化指标法, 即以—个雾化指标  $P_d$  来反映喷射水流的粉碎程度和打击强度, 即

$$P_d = \frac{h_p}{d} \quad (1.5)$$

式中  $h_p$ ——喷头的工作压力水头 (m);

$d$ ——喷嘴直径 (m)。

### 4. 水量分布特性

喷洒范围内, 各点的喷灌强度与相应点位置之间的关系, 常用水量分布曲线表示<sup>[8-10]</sup>, 如图 1-10 所示。

#### (二) 喷头主要结构参数

喷头的主要结构参数包括进水口直径、喷嘴直径、喷头仰角和流道结构尺寸等<sup>[3,5]</sup>。

##### 1. 进水口直径

进水口直径是指喷头空心轴或进水口管道的内径。一般从减少水力损失和结构紧凑等方面来决定进水口直径的大小。进水口直径确定之后, 其结构尺寸和喷头流量也基本确定。我国经常以进水口公称直径来命名喷头型号。

##### 2. 喷嘴直径

喷嘴直径是指喷嘴出口流道等截面段的直径。喷嘴直径反映喷头在一定工作压力下通过水流的能力。压力相同和在一定范围内, 喷嘴直径越大, 喷头流量越大, 射程越远, 但雾化程度要相对下降; 反之亦然。对非圆形喷嘴, 用当量直径, 即按其流量折算的喷嘴直径来表示。

##### 3. 喷头仰角

喷头仰角是指喷嘴出口处射流轴线与水平面的夹角。在相同工作压力和流量下, 喷头的喷射仰角是决定其射程和喷洒水量分布情况的主要因素。喷射仰角的变化不直接影响喷灌机

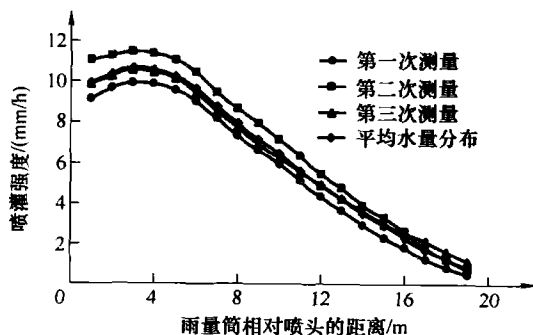


图 1-10 喷洒水量分布曲线

组的生产率和功率消耗,但适宜的喷射仰角能获得最大的射程,从而可以降低喷灌强度,增大喷灌管道间距,降低管道式喷灌系统中的管道投资。

#### 4. 流道结构设计

流道结构设计主要包括空心轴和稳流器的设计。

(1) 空心轴的设计 空心轴的内径  $B$  即是喷头进水口直径,通常根据流量的大小来确定,即

$$B = \sqrt{\frac{4q_p}{3600\pi v}} \quad (1-6)$$

式中  $v$ ——喷头进口流速 (m/s);

$q_p$ ——喷头流量 (m<sup>3</sup>/h)。

$v$  为经济流速,一般  $v=1\sim3$  m/s,既使水流的能量损失最小,又不至于使空心轴的结构庞大。为了减少进口的水流阻力,可在空心轴进口加一倒角并设计成喇叭口形。

(2) 稳流器的设计 水流通过弯头时,所造成的涡流和横向二次流要在相当长的时间内才能稳定下来。为了尽快消除横向二次流和缩短喷管长度,常常在喷管中安装稳流器。

稳流器一方面能增加流道中横向水流的碰壁机会,使横向水流尽快消失;另一方面,由于喷管断面被分隔成许多小部分,各部分水流横向尺寸减小,雷诺数降低,使水流状态接近于层流,使流向射流元件体的水流湍流程度降低,从而提高射程。

稳流器的设计主要考虑:①稳流器的合适结构;②稳流器的最适宜长度;③稳流器的安放位置。

### 三、喷头发展趋势

喷头是影响喷灌技术灌水质量的关键设备,世界主要发达国家一直致力于喷头的改进及研究开发,其发展趋势是向多功能、节能、低压等综合方向发展<sup>[11-16]</sup>。如美国先后开发出不同摇臂形式(水平摇臂、垂直摇臂)、不同仰角(7°、11°、15°、23°、27°)及适用于不同目的的多功能喷头,具有防风、多功能利用、低压工作等显著特点<sup>[16]</sup>。

从现有的喷灌相关标准来看,喷头的评价指标包括水力性能(如射程、流量、喷灌强度、水量分布特性、雾化指标等)和力学性能(如密封性、转动均匀性、耐压性和耐久性等等)。随着喷灌事业的发展,喷灌的进一步应用,喷灌质量正越来越受到人们的重视,喷洒水力性能的要求越来越高,除了考核喷头的射程、流量和喷灌强度外,喷洒的水滴大小、水量分布及雾化指标也将成为喷头的考核评价指标<sup>[17-18]</sup>。

随着世界人口的增长和能源、水资源危机的加剧,高效节能、变量喷洒、精确灌溉、综合利用将是灌溉设备今后的发展趋势。因此,提高技术与设备的可靠性、配套性和先进性,加大关键设备的研究与技术集成,改进和完善产品性能,优化产品结构,开发出多功能、多用途、配套水平高、性能优良的系列化、标准化产品,是喷头产品亟待解决的关键问题<sup>[19]</sup>。

## 第二节 隙控式全射流喷头设计理论

### 一、隙控式全射流喷头的工作原理及总体结构<sup>[6,20-22]</sup>

#### (一) 隙控式全射流喷头的结构特点

全射流喷头是指通过水流的反作用力获得驱动力矩, 利用水流的附壁效应改变射流方向的旋转式喷头。喷头的射流元件既是喷洒作业的喷头出口零件, 又是自控完成直射、步进、反向的控制零件。隙控式全射流喷头结构如图 1-11 所示, 射流元件结构如图 1-12 所示。

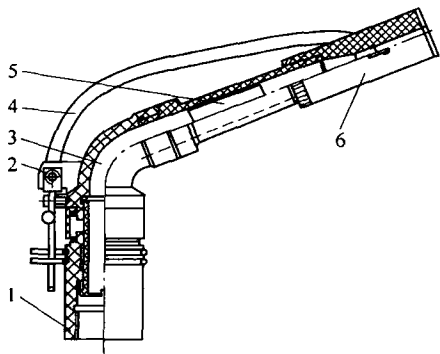


图 1-11 隙控式全射流喷头结构示意图

1—旋转密封机构 2—换向机构 3—喷体  
4—反向塑料管 5—喷管 6—水射流元件

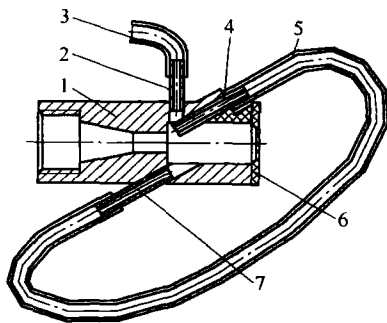


图 1-12 隙控式全射流喷头射流元件结构示意图

1—元件体 2—反向接嘴 3—反向塑料管  
4、7—接嘴 5—软塑料管 6—出口盖板

#### (二) 隙控式全射流喷头工作原理

根据隙控式全射流喷头的工作过程, 其工作原理分为以下三部分:

(1) 直射状态 如图 1-13a 所示, 水射流元件左侧的反向接嘴 2 敞开, 由此向左腔补气, 元件右侧出口处与水束之间的间隙也补入空气。由于补气的压力损失大于左腔, 左右腔略有压差, 此压差不足以推动主射流产生附壁, 主射流呈直射状态。同时, 接嘴 1 在水束的左侧边缘上取得信号水, 由于左右腔略有压差存在, 这些信号水在传输管中向接嘴 3 方向流动。

(2) 步进状态 如图 1-13b 所示, 信号水通过接嘴 3 进入元件右腔, 间隙 C 越来越小, 最终被堵死, 左右腔的压差将主射流推向右侧, 产生附壁, 整个元件及喷头在附壁力作用下向右转动。在附壁状态下, 由于主射流的弯曲, 接嘴 1 与主射流脱开, 不能取到信号水, 但可取到空气。空气由反向接嘴 2 传到接嘴 3, 给右腔补气, 最终左右腔的压差消失, 恢复直射状态, 喷头向右的转动停止。间隙 C 又重新生成, 并向右腔补气, 如此往复循环, 完成喷头的直射、步进动作。

(3) 反向状态 如图 1-13c 所示, 通过反向开关拨杆关闭反向接嘴 2, 左腔中不再有空气补入, 而右腔中仍有空气从间隙 C 补入, 左右腔形成压差, 主射流向左侧弯曲而附壁。接嘴 1 与主射流脱开, 取不到信号水, 左右腔压差持续存在, 喷头向左连续反向转动。直到反向开关拨杆转向, 反向接嘴打开, 空气进入左腔, 与右腔的压差相平衡, 反向运转才终

止，恢复直射。

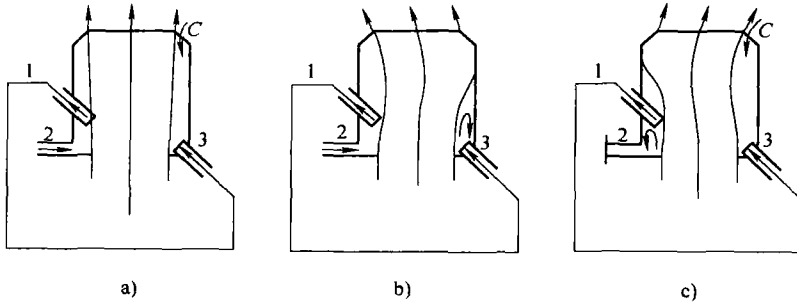


图 1-13 喷头射流元件工作原理示意图

1、3—接嘴 2—反向接嘴 C—出口处间隙

从以上工作原理可以看出，由于出口间隙的闭合或打开，造成左右腔压差的产生或消除，以控制喷头的附壁或直射，“隙控式全射流喷头”由此得名，射流元件水力结构如图 1-14 所示。

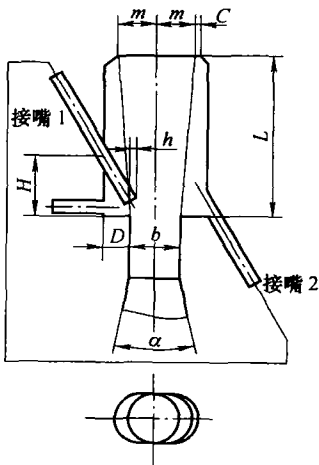


图 1-14 射流元件水力结构示意图

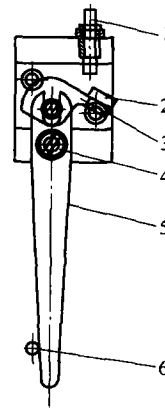


图 1-15 反向机构结构示意图

1—接嘴 2—堵头 3—摆块  
4—轴 5—拨杆 6—限位杆

### (三) 全射流喷头的反向机构

反向机构包括摆块形式的突变挡销、拨杆、限位装置和反转部件，如图 1-15 所示。限位装置由两个带有长短臂的圆环组成，如图 1-16 所示。

工作过程为：摆块只受重力作用时，摆块上的橡胶堵头能离开接嘴，实现喷头正转。且由于摆块的特殊设计，能实现喷头的连续正转。摆块在限位杆作用下，改变位置，使橡胶堵头堵住接嘴，实现喷头反转。且在喷头反转过程中，利用摆块的特殊设计以及射流喷头产生的负压，连续堵住接嘴，实现连续反转运动。

全射流喷头的反向机构通过图 1-15 中接嘴 1 的开启和闭合

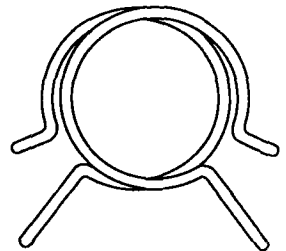


图 1-16 限位装置

及射流喷头产生的负压来控制喷头的正转和反转，因此在喷头运转过程中，不需要传动弹簧及反转钩，整个机构不承受反复的冲击负荷。反向机构结构简单，运转可靠，不再是限制喷头使用寿命的关键因素。带反向机构的全射流喷头使用寿命能达到 2000h 以上。

二、隙控式全射流喷头性能参数

由于隙控式全射流喷头的结构特点，喷头的雾化性能优于摇臂式喷头，但喷头射程受到一定影响，略小于摇臂式喷头。喷头出口盖板为接近于圆形的长圆形，若取全射流喷头喷嘴基圆直径  $b$  为喷嘴直径，喷头流量将略大于相应的摇臂式喷头的流量。隙控式全射流喷头的性能参数见表 1-1。

表 1-1 隙控式全射流喷头的性能参数

| 喷头型号  | 进水口公称直径<br>$B/\text{mm}$ | 基圆直径<br>$b/\text{mm}$ | 当量直径<br>$b_0/\text{mm}$ | 额定工作压力<br>$p/\text{kPa}$ | 流量<br>$Q/(\text{m}^3/\text{h})$ | 射程<br>$R/\text{m}$ (仰角 $30^\circ$ ) |
|-------|--------------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| PXH10 | 10                       | 4.0                   | 4.04                    | 250                      | 0.92                            | 11.8                                |
| PXH15 | 15                       | 6.0                   | 6.06                    | 300                      | 2.27                            | 17.5                                |
| PXH20 | 20                       | 8.0                   | 8.10                    | 350                      | 4.38                            | 21.0                                |
| PXH30 | 30                       | 10.0                  | 10.16                   | 400                      | 7.36                            | 25.5                                |
| PXH40 | 40                       | 14.0                  | 14.13                   | 450                      | 15.10                           | 32.0                                |
| PXH50 | 50                       | 18.0                  | 18.17                   | 500                      | 26.32                           | 39.5                                |

注：当量直径的取值及计算方法见中华人民共和国国家标准 GB/T 22999—2008。

三、隙控式全射流喷头射流元件的设计

(一) 附壁射流理论分析<sup>[23-26]</sup>

1. 附壁点模型

由附壁点模型，当射流抵达侧壁，但未与侧壁碰撞时，射流的动量为  $J$ ， $J$  与侧壁的夹角为  $\theta$ 。设碰撞结束时一部分顺侧壁向下游流去，其动量为  $J_1$ ，其余部分沿侧壁逆回流低压涡流区，其动量为  $J_2$ ，动量之间则有如下关系，即

$$J\cos\theta = J_1 - J_2 \tag{1-7}$$

如图 1-17 所示，从侧壁与射流中心线延线的交点到附壁流线的垂线长度用  $y_r$  表示，则动量  $J_1$ 、 $J_2$  为

$$J_1 = \int_{-y_0}^{y_r} \rho u^2 dy, J_2 = \int_{y_r}^{y_0} \rho u^2 dy \tag{1-8}$$

式中  $u$ ——射流速度；  
 $y_0$ ——离开速度为零位置的射流中心线的距离。

2. 控制面模型

由控制面模型，动量之间则有如下关系，即

$$J\cos\theta = J_1 \tag{1-9}$$

附壁点模型与控制面模型的区别在于，附壁点模型中不考虑压差  $p_a - p_b$ ，而在控制面模型中虽考虑这一压差，但不考虑因卷吸作用向低压涡流区域传送的动量  $J_2$ 。

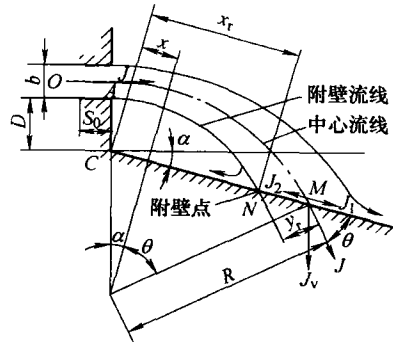


图 1-17 附壁点模型

### 3. 附壁流动分析

如图 1-18 所示, 自由湍流射流的速度分布为

$$u = \left[ \frac{3J\sigma}{4\rho(s + s_0)} \right]^{\frac{1}{2}} \left[ 1 - \tanh^2 \left( \frac{\sigma y}{s + s_0} \right) \right] \quad (1-10)$$

式中  $s$ ——沿射流中心线至喷嘴出口的距离 (m);

$s_0$ ——射流假想原点至喷嘴出口的距离 (m);

$\rho$ ——流体密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$y$ ——至射流中心线的垂直距离 (m);

$\sigma$ ——扩散系数。

$$\text{定义} \quad t_r = \tanh \frac{\sigma y_r}{s_+ + s_-} \quad (1-11)$$

式中  $s_r$ ——从喷嘴出口到射流中心线的延线与侧壁交点的距离 (m)。

$$\frac{s_r}{b} = \frac{\sigma}{3} \left( \frac{1}{t^2} - 1 \right) \quad (1-12)$$

$$\frac{y_r}{b} = \frac{1}{3t^2} \tanh^{-1} t_r \quad (1-13)$$

$$\frac{R}{b} = \frac{s_r}{b(\alpha + \beta + \theta)} \quad (1-14)$$

式中  $\alpha$ ——侧壁倾斜角 ( $^{\circ}$ );

$\beta$ ——由控制流而引起的主射流的倾斜角 ( $^{\circ}$ )。

当侧壁倾斜角为  $\alpha$ , 射流中心线弯曲半径为  $R$ , 位差为  $D$ , 则附壁点距离  $x$  为

$$\frac{D}{b} = \frac{R}{b} \frac{\cos(\alpha + \beta) - \cos\theta}{\cos(\alpha + \beta)} - \frac{1}{2} \quad (1-15)$$

$$\frac{x_r}{b} = \frac{R}{b} \frac{\sin(\alpha + \beta + \theta)}{\cos(\alpha + \beta)} + \frac{\left(\frac{D}{b} + \frac{1}{2}\right) \sin \beta}{\cos(\alpha + \beta)} - \frac{y_r}{b \sin \theta} \quad (1-16)$$

### 采用附壁点模型

$$\cos\theta = \frac{3}{2}t_r - \frac{1}{2}t_r^3$$

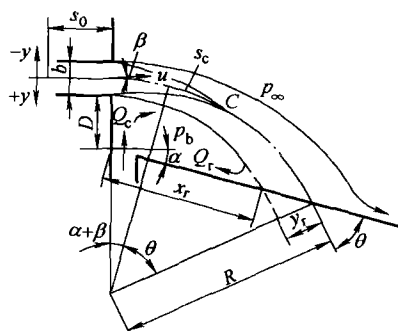


图 1-18 附壁射流的分析模型

因此

$$t_r = 2 \cos \frac{\theta + \pi}{3} \quad (1-17)$$

### 采用控制面模型

$$\cos\theta = \frac{1}{2} + \frac{3}{4}t_r - \frac{1}{4}t_r^3 \quad (1-18)$$

详细推导内容见参考文献。

#### 4. 附壁点距离计算

根据理论分析,虽然射流元件内水流的流动是一种非常复杂的有限空间内流动,但水流沿  $x$  轴的核心区流动仍可借用自由射流及附壁射流流动理论来分析元件内的流动。根据附壁