

基于正交试验的迷宫流道灌水器参数化设计研究

张俊¹, 洪军^{1,2}, 赵万华¹, 卢秉恒¹

(1. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 中国科学院水土保持研究所, 712100, 杨凌)

摘要: 采用正交试验设计方法, 取三角形迷宫流道灌水器的关键参数为因素, 利用光固化快速成形技术制作出各参数组合的灌水器与外管一体化结构原型, 并进行了灌水器水力性能的试验研究. 流量和流态指数的极差和方差分析结果均显示出流道转角对流态指数的影响最显著, 而流道单元数对灌水器流量的影响最大, 这一结果有助于解决流道经优化后带来的流量增大问题. 应用多元线性回归法拟合出灌水器流量系数和流态指数与参数的关系式, 进而得到了流量与压力的回归方程. 验证试验结果表明, 回归方程能较好地预测迷宫流道灌水器流量与压力的关系, 从而实现了灌水器参数化的结构设计.

关键词: 正交试验; 灌水器; 参数化设计; 快速成形

中图分类号: TH16; S275.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2006)01-0031-05

Parameterized Design of Labyrinth Channel Emitters Based on Orthogonal Experiments

Zhang Jun¹, Hong Jun^{1,2}, Zhao Wanhua¹, Lu Bingheng¹

(1. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, China Academy of Sciences, Yangling 712100, China)

Abstract: Stereolithography technology is adopted to fabricate the integral structure of emitters and outer pipes, and the experiments of emitter hydraulic performance are carried out with orthogonal design method, where the key parameters of triangle channel are distinguished. The results obtained from range analysis and variance analysis show that the channel turning angle is the most important factor affecting the flow index, and the flow rate is seriously influenced by the number of channel units, which facilitates settling the problem of increscent flow rate due to the structural optimization. A model is established between structural parameters and hydrodynamic behaviors according to the linear multivariable regression method, which is verified being able to forecast the relationship between the flow rate and pressure loss for the emitters with triangle labyrinth channels.

Keywords: orthogonal experiment; emitter; parameterized design; rapid prototyping

迷宫流道灌水器利用流道复杂的边界使其中的水流紊乱, 由于具有良好的消能效果和一定的压力补偿性等优点而在滴灌系统中得到了广泛应用, 但迷宫流道结构较为复杂, 迄今为止仍没有成熟的理

论来指导它的结构设计, 因而试验研究是探索其规律的主要手段. 王瑞环^[1]等对不同流道宽度和单元数的梯形流道灌水器进行了试验研究, 初步定性地得出了这2个参数对灌水器水力性能的影响. 姚彬^[2]

收稿日期: 2005-05-25. 作者简介: 张俊(1978~), 男, 博士生; 赵万华(联系人), 男, 教授, 博士生导师. 基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2002AA2Z4081, 2005AA2Z4040); 国家自然科学基金资助项目(50275119); 教育部高等学校全国优秀博士学位论文专项基金资助项目(200026).

等通过试验研究了齿形流道灌水器的流道长度对流量系数和流态指数的影响,拟合出流道长度与灌水器流量之间的关系式.从以往的研究来看,对灌水器的水力性能分析不是停留在定性上,就是考虑的因素比较单一,如要在这两方面都有所深入研究,采用通常的试验方案就会由于试验次数过多而造成成本耗费过大.正交试验设计作为一种科学的计算方法,具有“整齐可比,均匀分散”的特点,可以在较少的试验次数下迅速得出各因素的主效应^[3].

本文基于正交试验的设计方法,利用光固化成形技术快速制作出试验所需的灌水器原型^[4],对其进行压力与流量试验,研究三角形迷宫流道的关键参数对灌水器水力性能的影响,并通过回归分析,得出了流量系数和流态指数与关键参数的关系式,从而得到面向流量的三角形迷宫流道灌水器的设计公式.

1 灌水器的快速成形制造

为便于进行灌水器的水力性能试验,将灌水器 and 外管设计成一体化结构,然后按照系统默认的弦高和角度把 CAD 模型转换成三角面片(STL)格式,采用 RPdata 软件进行分层(厚度为 0.1 mm)后输入到 SPS600B 激光固化快速成形机中,制作出一体化的灌水器树脂原型(见图 1).在制作过程中,成形机的相关工艺参数为:填充扫描速度 $v_1 = 3\text{ m/s}$;轮廓扫描速度 $v_2 = 2\text{ m/s}$;跳跨速度 $v_3 = 12\text{ m/s}$;光斑直径 $D_1 = 0.2\text{ mm}$;激光光源采用 He-Cd 激光器.

每次试验完后均将灌水器与外管分开,并采用 V H-8000 光学显微系统进行精度测量,测得的尺寸偏差均控制在 5%之内,完全符合灌水器标准^[5,6]中对机械性能试验所规定的精度.

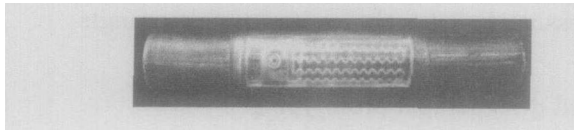


图 1 一体化结构的灌水器树脂原型

2 灌水器流道关键参数对水力性能的影响

2.1 正交试验设计

本文以三角形流道为研究对象(见图 2),取 W 、 L 、 θ 等 3 个结构参数和流道单元数 N 为关键参数

(以下简称 4 参数).由于流道通常都处在弧面上,其上下边界的深度有所不同,因此不考虑深度的影响(设其为定值).应用正交试验设计的原理将以上 4 参数作为因素(见表 1),假定各因素之间不存在交互作用,根据实际应用的灌水器流道尺寸,利用统计分析软件 SPSS 完成正交表的构造.对每组参数分别进行了灌水器的结构设计、制造和水力性能试验,并相应得到其性能指标流态指数 x 、流量系数 k 和灌水器的实际流量 Q (100 kPa 压力下),试验方案及结果如表 2 所示.

表 1 因素及其水平值

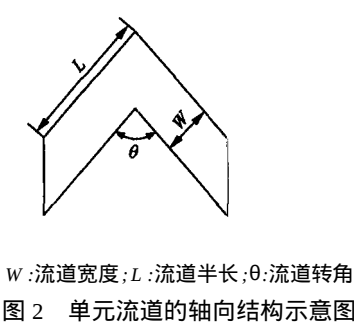
水平	W/mm	L/mm	$\theta/^\circ$	N
1	0.6	1.5	60	16
2	0.7	2.0	80	24
3	0.8	2.5	90	36
4	1.0	3.0	110	48

表 2 正交试验方案及灌水器水力性能参数

试验 编号	W/mm	L/mm	$\theta/^\circ$	N	x	k	$Q/L \cdot \text{h}^{-1}$
1	0.6	1.5	60	36	0.498 5	0.154 0	1.55
2	0.6	2.0	80	16	0.591 6	0.203 7	3.10
3	0.6	2.5	110	48	0.667 8	0.101 5	2.20
4	0.6	3.0	90	24	0.792 7	0.061 4	2.30
5	0.7	1.5	110	16	0.589 1	0.302 1	4.55
6	0.7	2.0	90	36	0.595 1	0.152 4	2.36
7	0.7	2.5	60	24	0.530 1	0.215 0	2.45
8	0.7	3.0	80	48	0.556 3	0.156 3	2.10
9	0.8	1.5	90	48	0.512 9	0.195 6	2.05
10	0.8	2.0	110	24	0.604 3	0.243 9	4.00
11	0.8	2.5	80	36	0.652 5	0.124 9	2.52
12	0.8	3.0	60	16	0.520 0	0.274 0	3.05
13	1.0	1.5	80	24	0.510 9	0.373 4	4.00
14	1.0	2.0	60	48	0.456 4	0.221 6	1.80
15	1.0	2.5	90	16	0.569 6	0.184 5	2.55
16	1.0	3.0	110	36	0.591 3	0.165 6	2.47

2.2 关键参数对 x 和 Q 影响的定性分析

从表 2 的正交试验结果中可以看出,由不同水



平值组合得出的流道结构,其表现出来的 k 、 x 和 Q 都相差较大. k 反映了流量的波动,其值越小,灌水器的流量变动也就越小. x 反映了灌水器的流态特征即流量对压力水头变化的敏感程度. 在实际的理论分析和工程应用中,常将 x 作为评价灌水器水力性能优劣的指标. 将各因素在不同水平下的流态指数均值 $\bar{x}$ 和流量均值 $\bar{Q}$ 用因素-指标图表示(见图 3,图 4),即采用极差分析法进行因素的影响度分析. 各因素在不同水平下试验结果的最大值与最小值的差(即极差 R)反映了该因素的影响程度, R 值越大,改变因素的水平就会引起指标发生越大的变化,所以该因素对指标的影响就越大,反之,影响就越小. 对于 x , θ 对其影响最大,其次是 W ,影响最小的是 N ,而对 Q 影响最大的是 N ,其次是 θ .

由于极差分析法本身只提供整个系统的总体情形,不将变异分解成重复性和再现性,因此不能以此来判断因素对 x 的影响程度是否显著,如表 3、表 4 的方差分析^[7]所示. 一般采用 F 值来评价因素对指标的影响程度,从表 3、表 4 中各因素的 F 值看到,按显著水平 $\alpha=0.05$ 检验时, $F_{0.95}(3,3)=9.28$, θ 和 N 对 Q 的影响是高度显著的 ($F_{\theta}(3,3)>9.28$, $F_N(3,3)>9.28$). 如按显著水平 $\alpha=0.1$ 检验时, $F_{0.90}(3,3)=5.39$, θ 对 x 的影响是显著的 ($F_{\theta}(3,3)>5.39$). 对于 W 、 L ,无论是按哪种显著水平,其对 x 和 Q 都无显著影响.

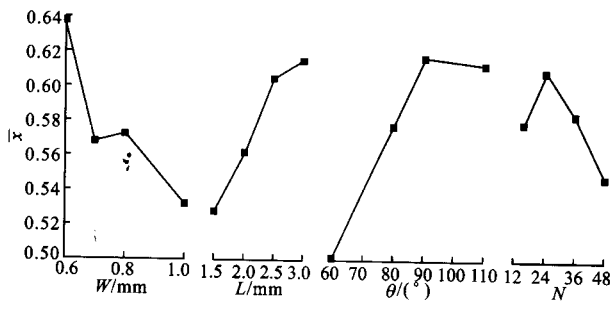


图 3 关键参数与 x 的因素指标

表 3 流道关键参数对 x 的方差分析

来源	100S	f	100V	F
W	2.323	3	0.774	3.870
L	1.951	3	0.650	3.250
θ	3.476	3	1.159	5.795
N	0.808	3	0.269	1.345
误差	0.600	3	0.200	
总计	9.158	15		

注:S 为平方和;f 为自由度;V 为均方和;F 为各因素均方和与误差均方和的比值.

表 4 流道关键参数对 Q 的方差分析

来源	S	f	V	F
W	0.795	3	0.265	2.236
L	1.053	3	0.351	2.960
θ	3.327	3	1.109	9.354
N	5.377	3	1.792	15.121
误差	0.356	3	0.119	
总计	10.098	15		

对极差和方差分析的结论有助于解决流道结构优化后流量增大的问题. 由于灌溉水中通常含有一些颗粒,如灌水器流道结构不合理就很有可能因此而发生堵塞,故在流道的结构定型前通常会对其进行流场的数值模拟^[8],如图 5 所示,并根据流道内水流的速度场分布特点对结构进行改进,尽量消除速度死区和低速区. 结构优化后(见图 6),在流道单元的转角处,其速度场得到了改善,但由于流道的局部阻力减小,从而导致了灌水器流量的增加(相同大小的压力入口). 因此,为保持灌水器较好的水力性能(较低的 x 值). 同时,又能达到设计流量,根据极差和方差的分析结果,此时应在其他关键参数不变的情况下,通过增加 N 来解决这一问题.

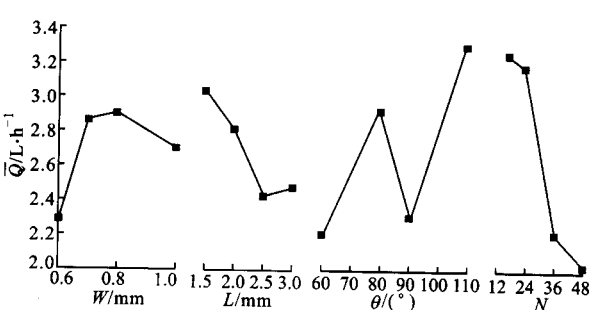


图 4 关键参数与 Q 的因素指标

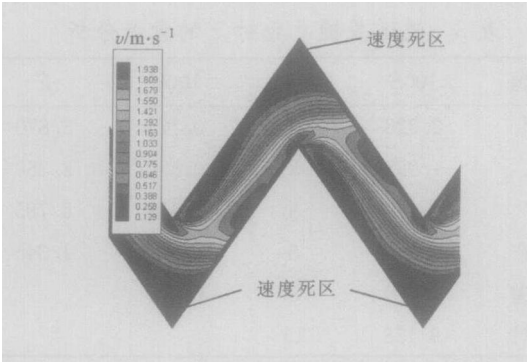


图 5 流道结构优化前的速度云图分布

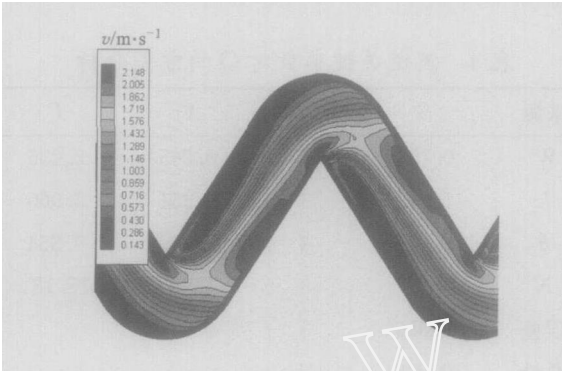


图 6 流道结构优化后的速度云图分布

3 关键参数与灌水器流量压力关系的回归分析

3.1 回归模型的建立

从表 2 可以明显看出,4 参数对灌水器的 k 和 x 的影响程度不同,现假设 k 和 x 均与 4 参数呈多元线性关系,形式如下

$$\left. \begin{aligned} k &= \beta_{k0} + \beta_{k1}W + \beta_{k2}L + \beta_{k3}\theta + \beta_{k4}N \\ x &= \beta_{x0} + \beta_{x1}W + \beta_{x2}L + \beta_{x3}\theta + \beta_{x4}N \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: β_{ki} 、 β_{xi} ($i=0,1,2,3,4$) 为回归系数.采用 SPSS 软件对表 2 的 16 组数据进行多元线性回归分析^[9],得到 k 和 x 的计算表达式

$$\left. \begin{aligned} k &= 0.284 + 0.317W - 0.085L - \\ &\quad 0.021\theta - 0.003N \\ x &= 0.459 - 0.330W + 0.084L + \\ &\quad 0.123\theta + 1.333 \times 10^{-6}N \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

令式(2)中的 $k = F_k(W, L, \theta, N)$, $x = F_x(W, L, \theta, N)$,将其代入灌水器水力性能公式 $Q = kH^x$ 中,其中 H 为工作压力,即可得 Q 和灌水器流道关键参数的表达式

$$Q = F_k(W, L, \theta, N) H^{F_x(W, L, \theta, N)} \quad (3)$$

本文试验的样本总数为 16,自变量数为 4,试验数据自由度为 (4,11),由文献[7]中的 F 分布表得到线性相关程度达 95 %的自由度为 (4,11) 的 F 值, $F_{0.95}(4,11) = 3.36$.从表 5 中容易得出, $F_k > F_{0.95}(4,11)$ 且 $F_x > F_{0.95}(4,11)$,故 2 个回归函数式的回归效果都比较显著.

表 5 回归系数和线性相关参数的计算结果

性能指标	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	R	F
k	0.284	0.317	- 0.085	- 0.021	- 0.003	0.868	9.896
x	0.459	- 0.330	0.084	0.123	1.333×10^{-6}	0.839	7.721

3.2 回归模型的验证

为了验证回归模型的正确性和可行性,特设计 $W = 0.9 \text{ mm}$, $L = 1.5 \text{ mm}$, $\theta = 70^\circ (1.22 \text{ rad})$, $N = 30$ 的三角形迷宫流道灌水器进行试验验证.将此灌水器制作成一体化原型,在水力性能试验台上测得在 50 ~ 150 kPa 工作压力内的一系列 Q 值,并拟合出

$$Q = 0.3224 H^{0.4325} \quad (4)$$

根据试验数据回归方程式(2),将与灌水器相关的参数代入,可计算出 k 和 x ,得到的 $Q-H$ 为

$$Q = 0.3262 H^{0.4381} \quad (5)$$

如图 7 所示,根据计算可得 Q 的回归模型预测值与验证试验所测值的平均偏差为 3.79 %,因此回归模型可用于针对流量需求的三角形迷宫流道灌水器的参数化设计中.

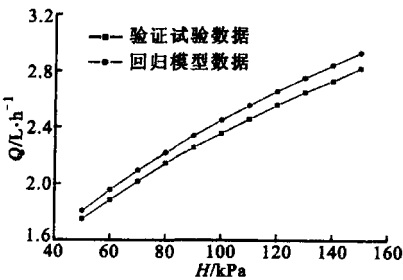


图 7 回归模型的 $Q-H$ 关系验证曲线

4 结 论

(1) 本文利用光固化快速成形技术和正交试验设计方法,不仅降低了分析具有多因素影响的迷宫流道灌水器水力性能的复杂程度,而且大大提高了灌水器水力性能的分析效率.

(2) 由极差和方差分析的结果均可看出,流道转角对灌水器流态指数的影响程度最显著,影响最小的是流道单元数,而对于实际流量,流道单元数的影响最显著.这一结论有助于解决流道结构优化后出现流量增大的问题.

(3) 利用多元线性回归方法拟合出了灌水器流量系数和流态指数与 4 参数的关系式,并通过试验验证了它的可行性和准确性,因此为研究设计流道结构的灌水器提供了理论依据.

参考文献:

- [1] 王瑞环,赵万华,杨来侠,等. 基于快速成形技术滴头的结构试验研究[J]. 西安交通大学学报,2003,37(5): 542-545.
- [2] 姚 彬,刘志烽,张建萍. 流道长度对内镶贴片式滴头性能参数影响的初步研究[J]. 节水灌溉,2003,28(5): 38-39.
- [3] Zhou J G, Herscovici D, Chen C C. Parametric process optimization to improve the accuracy of rapid prototyped stereolithography parts[J]. Int J of Machine Tools & Manufacture,2000,40(3):363-379.
- [4] Wei Z Y, Tang Y P, Zhao W H,et al. Rapid development technique for drip irrigation emitters[J]. Rapid Prototyping Journal,2003,9(2):104-110.
- [5] GB/ T 17187-1997. 滴头技术规范 and 实验方法[S].
- [6] SL/ T 67. 1-1994. 微灌灌水器[S].
- [7] 朱勇华,邵淑彩,孙韞玉. 应用数理统计[M]. 武汉:武汉水利电力大学出版社,1999. 215-287.
- [8] 孟桂祥,张鸣远,赵万华,等. 滴灌滴头内流场的数值模拟及流道优化设计[J]. 西安交通大学学报,2004,38(9):920-924.
- [9] 余建英,何旭宏. 数据统计分析与 SPSS 应用[M]. 北京:人民邮电出版社,2003. 204-211.

(编辑 管咏梅)

《机械科学与技术》2005 年第 3 期目次选登

- 基于规则和事例混合推理的冲突解决技术研究 丁毓峰,胡业发,盛步云,周祖德(256)
- $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ 基无铅压电陶瓷的研究进展 张昌松,郭晨洁,高峰,田长生(265)
- 基于偏最小二乘回归(PLSR)方法的铣削力模型系数辨识研究 尹 力,刘 强(269)
- 面向产品生命周期的产品信息模型在 PDM 中的实现 吴含前,姜澄宇,王宁生,袁 信(279)
- 随机参数板梁组合结构的动力特性分析 梁震涛,陈建军,马洪波,王德周,邹 谊(286)
- Terfenol-G 磁致伸缩微小驱动器磁路设计 杨斌堂,陶 华,M. Bonis,C. Prella,F. Lamarque(293)
- 微扑翼飞行器静电驱动机构的机电耦合特性研究 侯 宇,方宗德,刘 岚,傅卫平(303)
- 空间 4R 冗余度机器人的混沌自运动研究 刘朝晖,张登材,李 立(307)
- 用于蒙皮外表面空气流测量的 MEMS 微型压力传感器 陈 爽,李晓莹,马炳和,苑伟政(312)
- 仿生微扑翼飞行器的翅翼设计与优化 刘 岚,方宗德,侯 宇,傅卫平,吴立言(330)
- 一种改进的面向对象的虚拟装配建模方法 宋荆洲,孙汉旭,贾庆轩,施法中(335)
- 旋量理论与矢量积法相结合求解雅可比矩阵 叶 平,孙汉旭,谭月胜,张秋豪,许彦峰(353)
- 旋转机械故障窄带信号的循环平稳特征分析 杨龙兴,应文良,贾民平(357)
- 体素模型表面优化提取方法及图形显示 侯增选,张定华,杨海成,王增强,F. L. Krause,高新瑞(361)
- 冗余度机械臂容错操作中关节速度突变的影响因素分析 田军霞,赵 京(371)