

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.016

# 我国压力补偿灌水器的研究进展\*

魏正英 苑伟静 周兴 赵光喜

(西安交通大学机械制造系统国家重点实验室, 西安 710049)

**摘要:** 概述了近十年来,国内外压力补偿灌水器的应用情况及研究进展,在综合数值模拟、快速成型技术、可视化试验平台等多种先进技术手段的基础上提出了压力补偿灌水器比较完善的开发路线,并对该路线中涉及的关键问题进行了讨论。补偿机理的研究是压力补偿灌水器设计研发的核心,本文通过课题组已完成的部分工作,指出采用流固耦合方法进行数值模拟,获得灌水器内部压力速度分布及膜片变形情况,结合可视化试验是阐明压力补偿灌水器补偿原理、加快压力补偿灌水器研究的有效途径。

**关键词:** 压力补偿灌水器 滴灌系统 开发路线 流固耦合

**中图分类号:** S277.9\*5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)01-0094-08

## 引言

灌水器是整个滴灌系统的核心和关键部分<sup>[1-2]</sup>,其结构的优劣对灌水均匀性、系统的抗堵塞能力及寿命影响很大<sup>[3-6]</sup>。特别是在大坡度地形条件下,灌水均匀度不一致,已成为当前制约滴灌产业发展的技术瓶颈问题<sup>[7]</sup>。压力补偿灌水器具有补偿性能好、灌水均匀、铺设长度长、适应范围广等优点,特别适用于起伏地形、系统压力不均衡和毛管较长的情况,同时顺应当今发展低压滴灌系统的趋势<sup>[8-9]</sup>,已成为世界各国研究的热点。2011年底我国节水灌溉面积达2 917.9万hm<sup>2</sup>,约占全国总灌溉面积的40%<sup>[10]</sup>,节水灌溉发展还处于较低水平阶段。而我国压力补偿灌水器起步较晚,研究相对滞后。因此,全面认识压力补偿灌水器,弄清楚其补偿原理,设计出适合我国国情的不同规格的压力补偿灌水器成为当务之急。本文对国内外压力补偿灌水器的应用情况及研究进展进行阐述,并指出采用流固耦合方法是加快压力补偿灌水器研究的有效途径。

## 1 压力补偿灌水器原理

压力补偿灌水器是一种能在一定压力范围内实现恒流出水的滴灌末端装置,主要由消能迷宫流道、弹性膜片和压盖3部分组成。其工作原理是,借助水流压力使弹性膜片改变出水流道断面的大小,从而调节灌水器的流量<sup>[11]</sup>。当压力小到一定程度时,

膜片脱离底座,灌水器流量增大,此时便转为冲洗状态,可以将杂质粒子冲出<sup>[12]</sup>。压力补偿灌水器根据与滴灌管连接方式的不同,主要有管上式和内镶式两种;从补偿原理上分有孔口补偿式和流道补偿式<sup>[13]</sup>,见图1、图2。

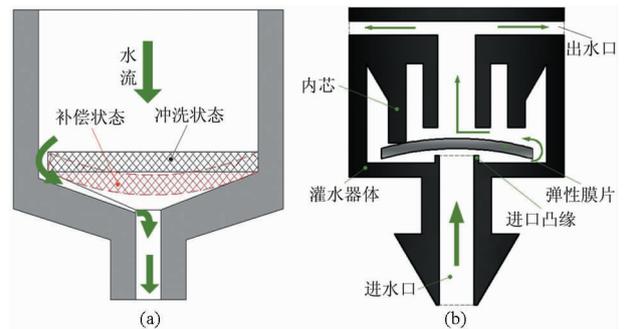


图1 孔口型压力补偿灌水器

Fig. 1 Working principle of orifice-type PCE



图2 流道补偿型灌水器

Fig. 2 Working principle of PCE with long channel

## 2 压力补偿灌水器发展现状

自滴灌技术产生以来,国内外有关研究人员花费了大量的精力和物力致力于灌水器的研发<sup>[14-15]</sup>,

收稿日期: 2013-04-14 修回日期: 2013-06-04

\* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2011AA100507-04)

作者简介: 魏正英,教授,博士生导师,主要从事灌水器堵塞机理、结构优化和快速开发研究, E-mail: zywei@mail.xjtu.edu.cn

但是滴灌系统整体价格仍然很高。压力补偿灌水器更是由于技术含量高、开发难度大,成为鉴别各国滴灌设备生产厂商技术水平的主要标志<sup>[16]</sup>。

国外压力补偿灌水器已经广泛使用;由于价格昂贵,在国内使用量有限<sup>[17]</sup>。目前国内企业大多生产销售的是管上式压力补偿灌水器,由于生产工艺的困难,内镶式压力补偿灌水器则很少<sup>[18]</sup>。2000年时,内镶式压力补偿滴灌管和重力滴灌管在国内尚属空白<sup>[19]</sup>。国产滴灌产品性能与国外差距较大,使用寿命短,普遍存在自适应性能差的问题,造成灌水器易堵塞、滴水不均匀<sup>[18,20]</sup>。

国内滴灌设备制造企业已近 600 家,并呈现不断扩大趋势,但真正实现专业化、系列化生产的企业不超过 20 家<sup>[20]</sup>,且缺乏行业龙头企业,产品主要以引进与仿制为主,缺乏设计知识的积累和自主设计能力,压力补偿灌水器开发研制步伐缓慢。

### 3 压力补偿灌水器的研究进展

压力补偿灌水器仿制和开发的一般技术流程如图 3 所示。

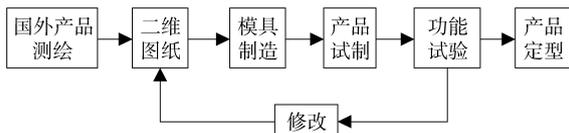


图 3 压力补偿灌水器的一般研制流程

Fig. 3 General development route for PCE

一个产品的定型,需要若干次反复修改。这一过程周期长(一般需要 4~5 个月)、费用高(尤其在模具加工阶段),制约了新产品的开发,且无法实现设计知识的积累,产品精度较低。刘小民<sup>[21]</sup>、王尚锦<sup>[22]</sup>等,将数值计算引入到圆柱迷宫灌水器内部流场的微观分析中,对三维立体的迷宫流道进行平面展开,首次实现了灌水器内部流动状态的可视化。2001 年,雷显龙<sup>[23]</sup>将分形理论应用到灌水器研究中,提供了一种新的流道设计方法,可以设计出各种复杂程度的迷宫流道。2003 年,魏正英等<sup>[24]</sup>将快速原型/快速模具技术用于压力补偿灌水器新型产品的快速研制中,使试制的灌水器可直接用于性能试验,大大缩短了新型灌水器的研制时间。2004 年,卢勇<sup>[25]</sup>通过流体力学相似试验,用激光多普勒测速仪探测了迷宫流道内部流场,验证了漩涡区与低速区的存在,实现了灌水器真正意义上的可视化。2005 年,李云开等<sup>[26]</sup>在流道内的流动研究中引入改进的 PIV 图像全场测速技术,通过构建圆柱型灌水器的平面模型,观测了流道内的速度分布。2007 年,张俊等<sup>[27]</sup>、芦刚等<sup>[28]</sup>、王文娥等<sup>[29]</sup>将两相流数

值模拟方法应用到新型灌水器设计中,揭示了流道堵塞机理,为流道结构优化提供了理论依据。2009 年,武永安等<sup>[30]</sup>将流固耦合数值模拟技术用于压力补偿灌水器的研究中,利用数值方法代替传统水力性能试验,减少了试验次数,提高了开发效率。

综合以上提到的技术手段,可知比较完善的压力补偿灌水器的研发路线如图 4 所示。

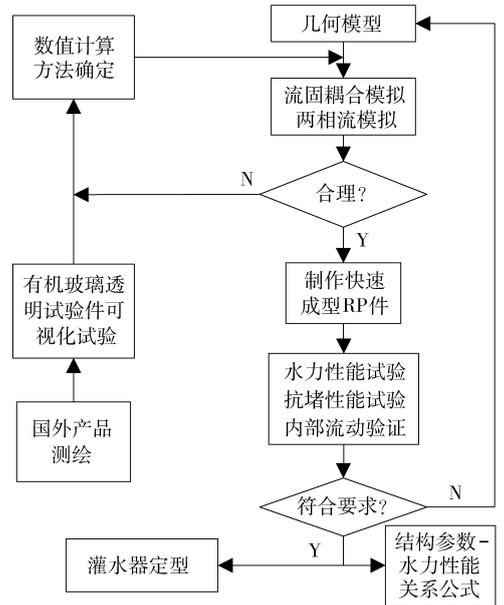


图 4 改进的压力补偿灌水器研发路线

Fig. 4 Improved development route for PCE

#### 3.1 几何模型

测量方法的选择在几何模型的获得中非常重要。张俊<sup>[31]</sup>在 VH-8000 型光学显微系统下对灌水器结构尺寸进行了测量,深度方向尺寸则由激光微型轮廓测量仪获得。武永安<sup>[30]</sup>借助大行程立科 3D 测量仪器测绘出灌水器实际尺寸,测量精度为  $1\ \mu\text{m}$ 。西安交通大学的 OLYMPUS OLS4000 型激光共聚焦显微镜,能够扫描出三维立体表面,具有  $0.01\ \mu\text{m}$  的 Z 轴分辨率,可以获得良好的深度尺寸。

#### 3.2 压力补偿灌水器水力性能研究

通过对压力补偿灌水器水力性能的数值模拟,宏观上可以获得其压力-流量关系,微观上可以获得内部水流速度、压力分布以及膜片的压力-变形关系。数值模拟包括几何模型的简化、物理模型的选取、边界条件设置、计算方法选择等方面,这些都对最后的模拟精度有较大影响。在非压力补偿灌水器中,计算流体动力学(CFD)方法已被广泛应用<sup>[32-34]</sup>,Palau<sup>[35]</sup>、魏正英<sup>[36]</sup>、张俊等<sup>[37]</sup>验证了这种方法预测灌水器流量的可行性。但由于压力补偿灌水器的结构复杂,不仅有起消能作用的迷宫流道,还有起流量调节作用的压力补偿腔;随压力变化而变化的既有流体,又有结构体弹性膜片,灌水器内的弹

性膜片在荷载作用下需考虑结构非线性变形,单纯从流体力学或固体力学角度很难得到压力补偿灌水器的性能,是典型的流固耦合问题。故对压力补偿灌水器的数值模拟分两部分进行:一部分为迷宫流道模拟,另一部分为压力补偿腔模拟。

### 3.2.1 迷宫流道数值模拟

一般认为灌水器迷宫流道尺寸为微尺度范围或介于微尺度与宏尺度之间<sup>[38]</sup>, Eringen<sup>[39]</sup>、Ariman<sup>[40]</sup>、Tukerman 和 Pease<sup>[41]</sup>等指出微通道内的流动与传统方程的描述不同,会产生不同于宏观尺度下的一些现象和问题。近年来, Jiann-Cherng Chu、Jyh-Tong Teng 等<sup>[42~43]</sup>通过试验与数值模拟相比较,发现宽 0.1 ~ 0.5 mm 的弯曲矩形微流道,雷诺数  $Re$  在 80 ~ 876 范围内时,基于经典 N-S 方程的数值模拟与试验结果吻合良好。王福军等<sup>[38]</sup>提出经典的 N-S 理论虽能够分析微流道中流体的运动特性,但部分参数应修正。

目前,关于弯曲微流道的试验研究,各试验的基础条件不同,得出的结论也相差很大,王福军等<sup>[38]</sup>指出测试仪器的精度及流道的壁面粗糙度都会影响试验结果,所以试验中应首先保证精度水平。

微流道理论上的争议造成灌水器内部水流流态的判别标准不统一。一般灌水器的雷诺数在 100 ~ 2 000 之间,早期关于这方面的研究都是按照传统的“ $Re \leq 2\ 300$  为层流”的标准,采用层流模型进行模拟;后期的研究认为,由于流道强转折,其内水流的转折雷诺数远小于 2 300,所以应采用湍流模型计算。部分学者采用不同流态模型进行计算并与试验结果对比,来提高模拟精度。张俊等<sup>[37]</sup>通过分别采用层、紊流模型对带强转折的锯齿形迷宫流道灌水器进行计算,发现采用紊流模型预测的流量更接近试验值。金文等<sup>[44]</sup>通过 4 种数值模拟方案下计算出的灌水器的速度场与 Micro PIV 试验结果相对比,得出在微尺度通道壁面合理设置多孔介质模拟壁面粗糙元,再配合 realizable  $k-\varepsilon$  模型进行数值模拟是一种有效的微尺度化计算方法。聂磊等<sup>[45]</sup>用 FLUENT 自带的 5 种湍流模型对灌水器流道内水流进行了数值模拟,与试验结果对比发现, $k-\omega$  模型比  $k-\varepsilon$  模型的模拟精度要高。但是计算结果与试验结果的差异,也可能是由二者条件不完全相同引起的,并不一定是因为湍流模型的差异。

### 3.2.2 压力补偿腔数值模拟

由于弹性膜片与流体区域的相互作用,压力补偿腔中存在典型的流固耦合问题。流固耦合动力学是研究可变形固体在流体作用下的各种行为以及固体变形对流体影响这二者相互作用的一门学科<sup>[46]</sup>,

即流体的作用力施加到结构上,结构的变形反过来影响流体区域。在耦合界面上,流体动力及固体的运动只有在求解了整个耦合系统后才能明确。流固耦合的数值计算问题,早期是从航空领域的气动弹性问题开始的,目前在航空、航天、水利、建筑、石油、化工以及生物领域都有广泛的应用<sup>[47~48]</sup>。

流固耦合数值计算需要分别建立流体和结构体的模型,然后通过 2 个模型的耦合求解,得到流场和结构场的各种结果。在流固耦合界面上,满足的基本条件是运动学条件和动力学条件。耦合求解方法按照对流体方程和结构方程处理方式的不同,可以分为迭代耦合法和直接耦合法<sup>[49]</sup>。

在压力补偿灌水器中,耦合作用仅发生在两相交界面上<sup>[48]</sup>,流固耦合界面明确,属于简单双向耦合问题<sup>[50]</sup>,可以用迭代耦合法得到较为精确的结果<sup>[51]</sup>。

目前,针对压力补偿灌水器补偿腔的数值模拟尚不多见。近年来,武永安等<sup>[52]</sup>使用 ANSYS + CFX 进行流体与固体建模,通过 Multi-Field Solver 将其结合进行流固耦合求解,采用稳态计算,得出了 7 个压力水平下的灌水器流量,但是没有考虑固体变形对流体区域的影响,只进行了单向流固耦合分析,计算结果可信度存在问题。王静等<sup>[53]</sup>使用 ANSYS + FLUENT 对压力补偿灌水器水力特性进行了稳态数值模拟,得到了该灌水器的压力-流量关系、流体速度压力分布及膜片变形量,但是在工作压力范围(50 ~ 200 kPa)内,弹性膜片的变形量一直有较大幅度的变化,与实际不相符。魏正英等<sup>[8]</sup>用试验分析和 FLUENT 模拟的方法,对流道补偿式灌水器进行了模拟,假设膜片的变形情况,比较计算得到的流量和试验测得的结果,认为偏差在允许范围内,但是膜片的变形是基于假设的,与实际情况有差别。王立朋等<sup>[46]</sup>提出了一种分步计算方法,简化了膜片受力情况,由 ANSYS 分析出膜片的变形,对流体压力补偿区进行相应的 FLUENT 建模和数值计算,同样存在与实际情况有差别的问题。

流固耦合商业软件主要有 LS-DYNA、ADINA、COSMIC-NASTRAN、STAR-CD、FLUENT 和 COMSOL Multiphysics 等<sup>[54]</sup>。本课题组已用 ADINA 流固耦合模块初步模拟了 Netafim 的一种管上式压力补偿灌水器内部流场,并用水力性能试验验证了该方法的可行性。图 5 为入口压力为 90 kPa 时灌水器内部压力分布,图 6 为灌水器的压力-流量关系曲线。

### 3.2.3 压力补偿灌水器宏观水力性能验证

对计算模型水力性能的验证,首先要解决试验件制作的问题。压力补偿灌水器由于尺寸较小、结

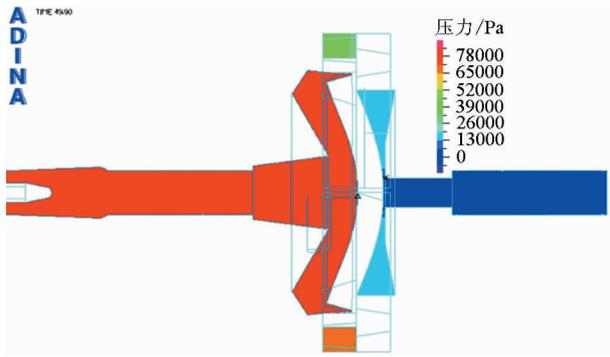


图 5 Netafim 管上式压力补偿灌水器内部压力分布  
Fig. 5 Pressure distribution in a Netafim PCE

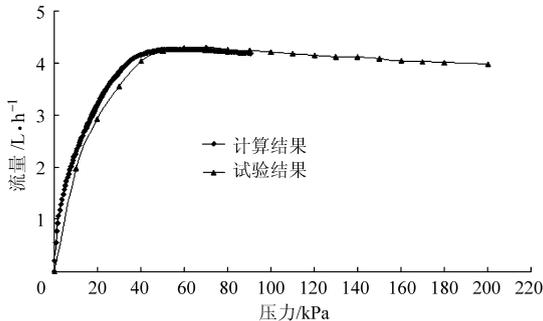


图 6 Netafim 管上式压力补偿灌水器压力-流量关系  
Fig. 6 Relationship between pressure and flow rate of a Netafim PCE

构复杂,利用传统方法很难制造。而利用光固化快速成型(RP)技术,可以将任意复杂结构的灌水器模型转化为树脂试验件,RP技术引入灌水器产品的快速开发以来,大大缩短了灌水器的开发周期,但由于RP技术本身的精度问题,也在一定程度上限制了灌水器研究水平的提高。倪径达等<sup>[55]</sup>分析了RP原型样件制作和成型精度的影响因素,指出扫描速度为6000 mm/s,后固化时间为30 min时,尺寸误差达到最小值。刘洁等<sup>[56]</sup>分析了带涡体流道的插杆式滴箭灌水器RP原型样件表面质量与成型方向的关系,发现当样件的制造平面与成形高度方向的夹角为40°时,成形样件的表面粗糙度较小。

利用RP原型灌水器直接进行水力性能试验,存在的问题有尺寸精度低、表面粗糙度大、材料吸水等,为解决这些问题不可避免的要降低RP方法的快捷性。其中针对尺寸精度低的问题,可以采用添加尺寸补偿因子的方法提高尺寸精度;针对表面粗糙度大的问题,则需要选取正确的成型方向,采用Z轴成型精度高的快速成型机,采用合适的激光功率、光斑大小、扫描速度、扫描间距、扫描方式等<sup>[57]</sup>;针对材料吸水的问题,芦刚<sup>[28]</sup>提出采用RP/RT复合法完成小批量试验用灌水器的快速制造:制出RP原型后,利用原型制作硅橡胶模具,保证了样件材料与注塑产品的一致性。

对于灌水器快速原型试验件能否直接用于水力性能试验,可以在保证试验件尺寸精度和表面粗糙度的前提下,与产品实物进行水力性能的对比,最后对试验件的水力性能予以修正,以获取较可靠的流量值,从而充分利用RP技术的快捷性。

### 3.2.4 压力补偿灌水器内部流动试验验证

目前关于灌水器内部流动的试验研究主要集中在流道区。对非压力补偿灌水器,李永欣等<sup>[58]</sup>模拟了灌水器放大(10倍)模型的内部压力分布,在放大模型的不同位置利用8个测压孔测量流道内压力值作为试验对比。魏正英等<sup>[59]</sup>用激光多普勒测速仪测量了迷宫流道放大模型中的速度分布。魏正英等<sup>[60]</sup>利用PIV技术,选用平均粒径5 μm的中空铝粉,测量了实际尺寸微流道中的流场,得到的流线与CFD分析结果非常相似。李云开等<sup>[26]</sup>在流道内的流动研究中引入改进的PIV图像全场测速技术,构建了圆柱型灌水器的平面模型,观测了流道内的速度分布。这些流场测量技术都为压力补偿灌水器的内部流动验证提供了基础条件,但是压力补偿灌水器内部为三维流场,较非压力补偿灌水器更不易观测。

目前压力补偿灌水器的相关文献[8, 46, 52~53]均仅选用宏观参量即压力-流量关系对模拟结果进行试验验证。建议采用等大有机玻璃透明模型(避免以往放大模型引入更大的误差)进行速度分布的观测与膜片变形的测量,与流固耦合数值模拟的结果进行对比,一方面验证数值模拟方法的可行性,另一方面更加清晰地观测压力补偿灌水器的工作过程。

## 3.3 压力补偿灌水器抗堵性能研究

### 3.3.1 数值模拟

对于两相流模型的选择,一般认为灌水器内部粒子体积分数低于5%,为稀相流,多采用离散相<sup>[61]</sup>或欧拉模型<sup>[62]</sup>进行模拟。魏正英等<sup>[8]</sup>通过对一种流道补偿式灌水器的流道补偿区采用欧拉-拉格朗日两相流模型(离散相模型)进行数值模拟,揭示了内部粒子的运动规律及其堵塞原理,发现流道齿角处产生漩涡,容易产生堵塞。王静等<sup>[63]</sup>对一种管上式压力补偿灌水器综合运用流固耦合与欧拉液固两相流的数值模拟方法,发现随着入流颗粒粒径及体积分数的增大,滴头出流量略有减少(约5%),颗粒在环形流道入口处及流道外侧浓度增大,容易产生沉积。不同形式的压力补偿灌水器易堵塞位置也不同,因此有必要对不同形式的压力补偿灌水器进行抗堵性能分析。

### 3.3.2 试验研究

2003年颁布的ISO《灌水器抗堵性能测试方

法》中列出了2种测试方法,一种是“长周期”测试方法,一种是“短周期”测试方法<sup>[64]</sup>。仵峰等<sup>[65]</sup>研究了运行8年的地下滴灌灌水器,发现小微粒和细小毛状物的粘附和发育是灌水器堵塞的主要原因,并据堵塞状况提出了针对性的防治理论。其余文献大多参照“短周期”测试方法进行灌水器抗堵性能试验,然后通过PIV可视化试验观察内部颗粒的黏附位置,由此改进结构,提高灌水器的抗堵性能。刘霞等<sup>[66]</sup>分别对矩形、三角形和梯形迷宫流道进行了抗堵性能的PIV可视化试验,发现黏附现象较易发生的位置为流道单元外侧拐角处。魏正英等<sup>[59]</sup>认为灌水器流道中存在流动滞止区,水中微小颗粒会在此沉积滞留并引起微生物滋长,应针对流道中存在的流动滞止区进行优化,据此提出了迷宫流道主航道抗堵设计方法,并通过PIV试验,证明流道内的低速区和漩涡区是造成堵塞的主要原因<sup>[67]</sup>。

压力补偿灌水器的抗堵性能测试,目前尚无其他标准可参照,而采用一般的“短周期”测试方法争议较大,无法得到粒子累积结果,建议采用“长周期”测试方法,或者参照仵峰等提到的方法,进行产品的性能跟踪。

#### 4 压力补偿灌水器性能影响因素探讨

压力补偿灌水器的水力性能,亦即压力补偿性能,一般由起调点和流态指数来评价。抗堵性能,主要由抗堵试验获得,而张俊等<sup>[31]</sup>提出在数值计算中采用粒子通过率进行定量描述。

姚彬等<sup>[68]</sup>通过试验研究了流道断面尺寸、出水台阶高度、出水槽过水断面和膜片性能等因素对内镶贴片式补偿灌水器水力性能的影响。何静<sup>[69]</sup>通过理论分析,确定了压力补偿区影响灌水器水力性能的主要参数有4个,即补偿区断面的宽度、出水口凸台的高度、弹性膜片的厚度及硬度,但是把弹性膜片的变形简化为圆弧形,忽略了灌水器内定位台阶对膜片的影响。魏正英等<sup>[8]</sup>通过正交试验,研究了补偿区结构参数对流动补偿式灌水器水力性能的影响,发现补偿区流道单元个数和剪切深度对其性能有显著影响。武永安<sup>[30]</sup>探讨了弹性膜片参数对灌水器水力性能的影响,建立了压力补偿灌水器性能与弹性膜片厚度和硬度之间的二元线性回归方程。除了研究压力补偿灌水器本身结构及膜片厚度硬度对其性能的影响外,还有学者讨论了外界因素对压力补偿灌水器性能的影响。李刚等<sup>[70]</sup>讨论了地下滴灌中不同土壤质地对压力补偿灌水器出流的影响,试验表明,在压力补偿范围内,土壤对灌水器流量影响很小;在非压力补偿范围内,土壤质地越重,

灌水器流量越小。

由上可见,目前对于压力补偿灌水器水力性能影响因素的探讨多集中在试验上,即使理论分析也是基于简单的变形假设,建议结合流固耦合数值模拟和可视化试验,更加真实地获得弹性膜片的变形情况,并分析补偿机理。

#### 5 存在问题

压力补偿灌水器补偿原理复杂,目前除试验外很难获得起调点及压力补偿区间等信息,对这种流固耦合问题的研究还存在很多问题。

(1)一般压力补偿灌水器补偿腔中都有尺寸很小的结构来获得比较平稳的水力性能曲线,并且本课题组通过试验发现,这个小结构对灌水器的补偿性能有很大影响,主要影响补偿区间和流态指数。因此,要提高我国压力补偿灌水器的性能,首先要保证小尺寸结构的加工精度。

(2)本课题组通过更换Netafim压力补偿灌水器的膜片,即保证灌水器外壳不变的情况下,将内部的膜片换为相同尺寸相同硬度的国产膜片,发现水力性能有明显改变,主要是流态指数发生变化,因而生产出均一性更好的弹性膜片也是我国制造业现在面临的一大问题。

(3)在压力补偿灌水器的流固耦合数值计算中,将要进入压力补偿区间的时候,变形的膜片会非常贴近出口,而压力补偿区间的获得,须保证较好的位移压力计算精度,此区域流体网格必须画得非常小(小于0.03 mm,与周围网格差距很大),压力加载量必须很小,导致计算难度增大,计算时间大大增长,计算结果准确性降低。因此,探讨一种准确度高、计算时间又不长的计算方法很有必要。

(4)通过可视化试验可以发现,进入压力补偿区后,虽然随压力增大膜片仍在变形以稳定流量,但是膜片上表面基本是贴在出水口下表面的,小的变形仅存在于出水孔外侧开的小槽中,也就是膜片通过微小的变形改变过水断面面积来调节灌水器流量,此时即使利用放大镜头观测透明试验件也较难观察到挤入小槽中的膜片的变形情况。

#### 6 结束语

目前关于压力补偿灌水器的研究还较少,对于补偿机理的研究则更少,压力补偿灌水器的研制只能通过低效率的试制—试验—改进—再试验的方法。本文在综合数值模拟、快速成型技术、可视化试验平台等多种先进技术手段的基础上提出了压力补偿灌水器比较完善的开发路线。探讨了在压力补偿

灌水器研究中涉及的主要问题,如几何模型的获得、水力性能的数值模拟与试验、抗堵性能数值模拟与试验,以及压力补偿灌水器性能的影响因素等。通过本课题组已完成的部分任务,指出采用高精度的

流固耦合数值计算,得到比较准确的内部流场分布和膜片变形,结合透明试验件可视化试验实现压力补偿灌水器工作过程的可视化,是今后研究压力补偿灌水器补偿机理的重要途径。

### 参 考 文 献

- 1 罗金耀. 节水灌溉理论与技术[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.
- 2 赵万华. 滴灌系统关键技术研究[J]. 中国农业科技导报, 2007, 9(1): 21~25.  
Zhao Wanhua. The key technology of drip irrigation system[J]. Review of China Agricultural Science and Technology, 2007, 9(1): 21~25. (in Chinese)
- 3 Glaad Y K, Klous L Z. Hydraulic and mechanical properties of drippers[C]//Proceedings of the 2nd International Drip Irrigation Congress, 1976.
- 4 戈德堡 D, 戈内特 B, 里蒙 D. 滴灌原理与应用[M]. 薛克宗, 西世良, 等, 译. 北京: 中国农业机械出版社, 1984.
- 5 李云开, 杨培岭, 任树梅. 滴灌灌水器流道设计理论研究若干问题的综述[J]. 农业机械学报, 2006, 37(2): 145~149.  
Li Yunkai, Yang Peiling, Ren Shumei. General review on several fundamental points of design theory about flow path in drip irrigation emitters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(2): 145~149. (in Chinese)
- 6 Chieng S, Ghaemi A. Uniformity in a micro-irrigation with partially clogged emitter[C]//2003 ASAE Annual Meeting. ASAE Paper 032097, 2003.
- 7 王栋. 内镶扁平紊流压力补偿式滴头的研制[J]. 节水灌溉, 2007(1): 36~37.
- 8 魏正英, 唐一平, 程应社, 等. 一体式压力补偿灌水器快速设计新方法[J]. 中国机械工程, 2008, 19(12): 1387~1405.  
Wei Zhengying, Tang Yiping, Cheng Yingshe, et al. A new method for rapid design of the integral pressure-compensating emitter[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(12): 1387~1405. (in Chinese)
- 9 龚时宏, 李久生, 李光永. 喷微灌技术现状及未来发展重点[J]. 中国水利, 2012(2): 66~70.
- 10 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴—2012[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012.
- 11 姚振宪, 何松林. 滴灌设备与滴灌系统规划设计[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 21~38.
- 12 程先军, 许迪. 地下滴灌专用滴头的研制及初步应用[J]. 农业工程学报, 2001, 17(2): 51~54.  
Cheng Xianjun, Xu Di. Research and development of emitter for subsurface-drip-irrigation (SDI) and its preliminary application[J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(2): 51~54. (in Chinese)
- 13 何静, 李光永, 刘志峰. 典型压力补偿滴头结构分析[J]. 节水灌溉, 2006(5): 29~34.  
He Jing, Li Guangyong, Liu Zhifeng. Analysis on the structure of typical pressure compensating emitters[J]. Water Saving Irrigation, 2006(5): 29~34. (in Chinese)
- 14 杨培岭, 雷显龙. 滴灌用灌水器的发展及研究[J]. 节水灌溉, 2000(3): 17~18.  
Yang Peiling, Lei Xianlong. Developments and study situations of drip irrigation emitters[J]. Water Saving Irrigation, 2000(3): 17~18. (in Chinese)
- 15 韩权利, 赵万华, 丁玉成. 滴灌用灌水器的现状及分析[J]. 节水灌溉, 2003(1): 17~18.
- 16 李光永. 压力补偿灌水器的研究新进展与使用中应注意的几个问题[J]. 节水灌溉, 2000(3): 19~21.
- 17 胡菊香. 大流量压力补偿式滴头的开发研制[D]. 北京: 北京工业大学, 2006.
- 18 魏正英, 唐一平, 李涤尘, 等. 节水滴灌灌水器发展状况及其快速开发技术研究[C]//国际旱地节水农业研讨会论文集. 杨凌, 2001: 159~166.
- 19 王留运, 叶清平, 岳兵. 我国微灌技术发展的回顾与预测[J]. 节水灌溉, 2000(3): 3~7.
- 20 王栋. 浅谈国内滴灌产业现状及建议意见[C]//第八届全国微灌大会论文汇编. 酒泉, 2009: 210~216.
- 21 刘小民. 粘性可压缩与不可压缩流动有限元数值计算方法及其应用[D]. 西安: 西安交通大学, 1999.
- 22 王尚锦, 刘小民, 席光, 等. 农灌用新型迷宫式滴头内流动特性分析[J]. 农业工程学报, 2000, 16(4): 61~63.  
Wang Shangjin, Liu Xiaomin, Xi Guang, et al. Flow characteristics in labyrinth emitter used for agricultural irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(4): 61~63. (in Chinese)
- 23 雷显龙. 滴头分形流道设计及其水力特性的试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2001.
- 24 魏正英, 王伊卿, 卢秉恒. RP/RT技术在迷宫型滴头快速研制中的应用[J]. 西安理工大学学报, 2001, 17(3): 257~260.  
Wei Zhengying, Wang Yiqing, Lu Bingheng. Application of RP/RT technique in rapid development of labyrinth dripper[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2001, 17(3): 257~260. (in Chinese)
- 25 卢勇. 滴灌滴头迷宫式流道内水力损失和流场的实验研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2004.
- 26 李云开. 滴头分形流道设计及其流动特性的试验研究与数值模拟[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
- 27 张俊, 魏公际, 赵万华, 等. 灌水器内圆弧形流道的液固两相流场分析[J]. 中国机械工程, 2007, 18(5): 589~593.  
Zhang Jun, Wei Gongji, Zhao Wanhua, et al. Numerical analysis on liquid-solid two-phase flows in arc-type channel of the emitter[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 18(5): 589~593. (in Chinese)

- 28 芦刚, 史玉升, 魏青松, 等. 基于两相流模拟的高抗堵滴灌水器开发方法[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2007, 35(7): 118 ~ 121.  
Lu Gang, Shi Yusheng, Wei Qingsong, et al. A development method for high anti-clogged drip emitters based on two-phase flow simulations[J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology: Nature Science Edition, 2007, 35(7): 118 ~ 121. (in Chinese)
- 29 王文娥, 王福军. 片状迷宫滴头中悬浮颗粒浓度分布规律数值分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(3): 1 ~ 6.  
Wang Wen'e, Wang Fujun. Numerical analysis of the distribution rule for suspended granule concentration in labyrinth integrated emitter[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(3): 1 ~ 6. (in Chinese)
- 30 武永安. 压力补偿滴头流道流场的数值模拟与补偿元件分析[D]. 北京: 北京化工大学, 2009.
- 31 张俊. 迷宫流道灌水器水力与抗堵性能评价及结构优化研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2009.
- 32 Wu Dan, Li Yunkai, Liu Haisheng, et al. Simulation of the flow characteristics of a drip irrigation emitter with large eddy methods[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2013, 58(3 ~ 4): 497 ~ 506.
- 33 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.  
Meng Guixiang, Zhang Mingyuan, Zhao Wanhua, et al. Numerical flow simulation and optimum channel design of drip irrigation emitter[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(9): 920 ~ 924. (in Chinese)
- 34 王尚锦, 刘小民, 席光, 等. 迷宫式滴头内流动的有限元数值分析[J]. 农业机械学报, 2000, 31(4): 43 ~ 46.  
Wang Shangjin, Liu Xiaomin, Xi Guang, et al. Numerical simulation of flows inside a drip faucet by finite element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(4): 43 ~ 46. (in Chinese)
- 35 Palau S G, Arviza V J, Bralts V F. Hydraulic flow behavior through an in-line emitter labyrinth using CFD techniques [C] // 2004 ASAE Annual Meeting. ASAE Paper 042252, 2004.
- 36 魏正英. 迷宫型滴灌灌水器结构与快速开发技术研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2003.
- 37 张俊, 赵万华, 醋强一, 等. 基于计算流体动力学的迷宫型灌水器流量预测[J]. 机械工程学报, 2007, 43(4): 159 ~ 162.  
Zhang Jun, Zhao Wanhua, Cu Qiangyi, et al. Prediction for discharges of labyrinth-channel emitters based on computational fluid dynamics[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(4): 159 ~ 162. (in Chinese)
- 38 王福军, 王文娥. 滴头流道 CFD 分析的研究进展与问题[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 188 ~ 192.  
Wang Fujun, Wang Wen'e. Research progress in analysis of flow passage in irrigation emitters using computational fluid dynamics techniques[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(7): 188 ~ 192. (in Chinese)
- 39 Eringen C A. Simple microfluids[J]. International Journal of Engineering Science, 1964, 2(2): 205 ~ 217.
- 40 Ariman T, Turk M A, Sylvester N D. Microcontinuum fluid mechanics—a review[J]. International Journal of Engineering Science, 1973, 11(8): 905 ~ 930.
- 41 Tuckmann D B, Pease R F W. Optimized convective cooling using micromachined structures[J]. Electrochemical Society, 1981, 129(3): 98 ~ 100.
- 42 Chu Jianncherng, Teng Jyhtong, et al. Characterization of frictional pressure drop of liquid flow through curved rectangular microchannels[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2012, 38: 171 ~ 183.
- 43 Chu Jianncherng, Teng Jyhtong, et al. Experimental and numerical study on the flow characteristics in curved rectangular microchannels[J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(13): 1 558 ~ 1 566.
- 44 金文, 张鸿雁. 微尺度内流流场数值模拟方法及实验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(3): 67 ~ 71.  
Jin Wen, Zhang Hongyan. Numerical simulating approaches and experiment on micro-scales flow field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3): 67 ~ 71. (in Chinese)
- 45 聂磊, 史玉升, 魏青松, 等. 基于灌水器流量的湍流模型适应性研究[J]. 节水灌溉, 2008(1): 13 ~ 17.  
Nie Lei, Shi Yusheng, Wei Qingsong, et al. Research on adaptability of different turbulent models based on flow discharge of the drip emitters[J]. Water Saving Irrigation, 2008(1): 13 ~ 17. (in Chinese)
- 46 王立朋, 魏正英, 邓涛, 等. 压力补偿灌水器分步式计算流体动力学设计方法[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11): 86 ~ 92.  
Wang Lipeng, Wei Zhengying, Deng Tao, et al. Step-by-step CFD design method of pressure compensating emitter [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(11): 86 ~ 92. (in Chinese)
- 47 Dettmer W, Perić D. A computational framework for fluid-structure interaction: finite element formulation and applications [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2006, 195(13 ~ 16): 1 633 ~ 1 666.
- 48 邢景棠, 周盛, 崔尔杰. 流固耦合力学概述[J]. 力学进展, 1997, 27(1): 19 ~ 28.  
Xing Jingtang, Zhou Sheng, Cui Erjie. A survey on the fluid-solid interaction mechanics[J]. Advances in Mechanics, 1997, 27(1): 19 ~ 28. (in Chinese)
- 49 ADINA R&D Inc. ADINA theory and modeling guide volume III; ADINA CFD & FSI[M]. Watertown, MA: ADINA R&D. Inc., 2010: 238 ~ 266.
- 50 周兴, 魏正英, 苑伟静, 等. 压力补偿灌水器流固耦合计算方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(2): 30 ~ 36.  
Zhou Xing, Wei Zhengying, Yuan Weijing, et al. Fluid-structure interaction analysis method for pressure compensating emitter

- [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(2): 30~36. (in Chinese)
- 51 Joris Degroote Klaus-Jurgen Bathe, Jan Vierendeels. Performance of a new partitioned procedure versus a monolithic procedure in fluid-structure interaction[J]. Computers and Structures, 2009, 87(11~12): 793~801.
- 52 武永安, 陈卫红, 吴大明. 压力补偿滴头内流场的数值模拟[J]. 塑料, 2010, 39(1): 107~109.  
Wu Yong'an, Chen Weihong, Wu Daming. Numerical flow simulation of pressure compensating emitter[J]. Plastics, 2010, 39(1): 107~109. (in Chinese)
- 53 王静, 王文娥, 胡笑涛, 等. 基于流固耦合方法的压力补偿滴头水力特性研究[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(3): 107~109.  
Wang Jing, Wang Wen'e, Hu Xiaotao, et al. Hydraulic characteristics of pressure compensating emitters based on fluid structure interaction[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(3): 107~109. (in Chinese)
- 54 王征, 吴虎, 贾海军. 流固耦合力学的数值研究方法的发展及软件应用概述[J]. 机床与液压, 2008, 36(4): 192~195.  
Wang Zheng, Wu Hu, Jia Haijun. The development of numerical approach method of fluid-structure interaction mechanics and the application of commercial softwares[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2008, 36(4): 192~195. (in Chinese)
- 55 倪径达, 魏正英, 唐一平, 等. 微压滴灌灌水器结构设计及快速开发[C]//第八届全国微灌大会论文汇编. 酒泉, 2009: 210~219.
- 56 刘洁, 芦刚, 魏青松, 等. 微细结构灌水器水力试验样件的制造误差研究[C]//第七次全国微灌大会论文汇编. 北京, 2007: 201~209.
- 57 史玉升, 黄树槐, 周祖德, 等. 影响 SLS 成形件性能的主要因素分析[C]//特种加工技术——2001 年中国机械工程学会年会暨第九届全国特种加工学术年会论文集. 北京, 2001: 323~327.
- 58 李永欣, 李光永, 邱象玉, 等. 迷宫滴头水力特性的计算流体动力学模拟[J]. 农业工程学报, 2005, 21(3): 12~16.  
Li Yongxin, Li Guangyong, Qiu Xiangyu, et al. Modeling of hydraulic characteristics through labyrinth emitter in drip irrigation using computational fluid dynamics[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(3): 12~16. (in Chinese)
- 59 魏正英, 赵万华, 唐一平, 等. 滴灌灌水器迷宫流道主航道抗堵设计方法研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(6): 1~7.  
Wei Zhengying, Zhao Wanhua, Tang Yiping, et al. Anti-clogging design method for the labyrinth channels of drip irrigation emitters[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(6): 1~7. (in Chinese)
- 60 魏正英, 唐一平, 温聚英, 等. 灌水器微细流道水沙两相流分析和微 PIV 及抗堵实验研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 1~9.  
Wei Zhengying, Tang Yiping, Wen Juying, et al. Two-phase flow analysis and experimental investigation of micro-PIV and anti-clogging for micro-channels of emitter[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(6): 1~9. (in Chinese)
- 61 葛令行, 魏正英, 唐一平, 等. 迷宫流道内沙粒-壁面碰撞模拟与 PTV 实验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(9): 46~50.  
Ge Lingxing, Wei Zhengying, Tang Yiping, et al. Simulation and experimental analysis on sand-wall collisions in labyrinth channel emitter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(9): 46~50. (in Chinese)
- 62 于勇. FLUENT 入门与进阶教程[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2008: 156~157.
- 63 王静, 王文娥, 胡笑涛. 压力补偿滴头抗堵塞性的数值模拟研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2012, 40(4): 217~222.  
Wang Jing, Wang Wen'e, Hu Xiaotao. Numerical simulation of anti-clogging performance of pressure compensating emitter[J]. Journal of Northwest A&F University: Nature Science Edition, 2012, 40(4): 217~222. (in Chinese)
- 64 ISO. Resolution No 279—Report of ISO/TC 23/SC 18/WG5—clogging test methods for emitters[R]. ISO, 2006.
- 65 仵峰, 范永申, 李辉, 等. 地下滴灌灌水器堵塞研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 80~83.  
Wu Feng, Fan Yongshen, Li Hui, et al. Clogging of emitter in subsurface drip irrigation system[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(1): 80~83. (in Chinese)
- 66 刘霞, 魏正英, 王立朋, 等. 采用能量平衡黏附理论的灌水器泥沙-壁面黏附特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(10): 115~121.  
Liu Xia, Wei Zhengying, Wang Lipeng, et al. Particle-wall adhesion behavior in labyrinth emitter obeying energy balanced adhesion theory[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(10): 115~121. (in Chinese)
- 67 魏正英, 唐一平, 赵万华, 等. 迷宫型灌水器水沙两相流场分析及结构改进[J]. 机械工程学报, 2009, 45(8): 89~94.  
Wei Zhengying, Tang Yiping, Zhao Wanhua, et al. Visualized experimental analysis of water-sand flow behaviors for labyrinth emitters[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(8): 89~94. (in Chinese)
- 68 姚彬, 刘志烽, 张建萍. 内镶补偿贴片式滴头水力性能的初步研究[J]. 节水灌溉, 2004(4): 21~22.
- 69 何静. 压力补偿滴头设计机理研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2006.
- 70 李刚, 白丹, 王晓愚. 地下滴灌中压力补偿式滴头水力要素试验研究[C]//中国农业工程学会农业水土工程专业委员会第五届全国学术会议论文集, 2008: 151~155.

# FDR Probe Structure Influence on the Soil Dielectric Spectrum Measurement

Xu Jinghui<sup>1,2</sup> Ma Xiaoyi<sup>2</sup> Sally D Logsdon<sup>3</sup> Robert Horton<sup>4</sup>

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. National Laboratory for Agriculture and the Environment, USDA-ARS, Ames IA 50011-3120, U. S. A.

4. Department of Agronomy, Iowa State University, Ames IA 50011, U. S. A. )

**Abstract:** The soil dielectric spectrum are related to the soil physical properties, and those are affected by the structure of the probe too. In order to determine how the probe structure influence the soil dielectric spectrum measurement, the two kinds of soils were measured at four water content level by 10 mm and 14 mm spacing needle at 28 mm probe length, 28 mm and 45 mm length needle at 10 mm spacing. It has been confirmed that the probe spacing has no effect on the soil dielectric spectrum measurement above 31.2 MHz by comparing the dielectric spectrums, and the length of the probe can affect the real or imaginary part of the soil dielectric spectrum in the range of 0.001 ~ 3 GHz. The research shows that the spacing of needle is not the key factor to the soil dielectric property measurement within a certain spacing, and the length of the probe has a greater influence on the soil dielectric property measurement. The smaller of the probe length, the larger of the dielectric relaxation frequency. Therefore, the probe length is the important factor that affect soil dielectric measurements. The FDR probe should be shorter, it is good to improve the measurement accuracy and environmental adaptation.

**Key words:** Soil FDR Probe structure Dielectric spectrum

(上接第 101 页)

## Research Progress of Pressure Compensating Emitters in Micro-irrigation Systems in China

Wei Zhengying Yuan Weijing Zhou Xing Zhao Guangxi

(State Key Lab for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** With superior hydraulic performance, the pressure compensating emitter (PCE) has extensive application in mountain and hill regions where the hydraulic pressure in irrigation systems often changes greatly. Because of the complicate structure, PCE design mechanism is still not clear. There's a big difficulty in developing new types of PCE products even with high cost, which also makes it almost impossible to popularize PCE in China. The application and research status of PCE in both China and foreign countries was overviewed in order to supply a clear understanding to the readers. An improved development route for PCE was proposed on the base of combining several advanced techniques including numerical simulation, rapid prototyping (RP) and visualization experiment. Then the key problems involved in this route were discussed. And problems proposed in some early papers were solved. For the compensating mechanism is the key problem in PCE design and development, through part work of our team, it was pointed out that numerical simulation with fluid-structure interaction method, which provides us with pressure and velocity distribution, was an effective way to solve this problem.

**Key words:** Pressure compensating emitter Irrigation system Development route Fluid-structure interaction