

文章编号:0559-9350(2018)04-0439-07

地埋式自升起喷灌装置设计原理分析

谢崇宝¹, 张国华¹, 彭文启², 王伟杰²

(1. 中国灌溉排水发展中心, 北京 100054; 2. 中国水利水电科学研究院 水环境研究所, 北京 100038)

摘要: 地埋式自升起喷灌装置能够解决固定管道式喷灌妨碍耕作、影响收获和拆装费工等问题。基于湿润土壤抗剪强度降低的原理, 系统分析了装置破土过程中所需克服的最大阻力和有效推动力, 推导形成了多类型土壤条件下的最小进水压强公式, 研究了管径大小对破土的影响。研究结果表明, 输水压强需达到0.7 MPa才能保证无出流的灌溉设备在所有类型土壤中实现破土, 远大于喷灌的实际工作压力; 灌溉设备顶部有出流的情况下, 输水压强仅需达到0.15 MPa就可以顺利破土而出; 当管径在0.01~0.09 m范围变化时, 破土所需的最小进水压强随着伸缩管管径的增大而减小, 当管径超过0.09 m, 破土所需的压强基本不变。由此可知, 本文针对地埋式自升起喷灌装置提出的设计原理分析方法, 可为水力驱动自升降灌溉设备的结构优化与设计提供依据。

关键词: 地埋式; 自升起; 一体化喷灌设备; 设计原理分析

中图分类号: S275.5, TV93

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slx.20170908

1 概述

目前, 美国、欧洲等发达国家和地区大多采用大型喷灌机和绞盘式喷灌机等既节约劳力、又有利于规模化灌溉的喷灌技术^[1-4], 较少采用固定管道式喷灌这种影响农田机械化耕作和收割的灌溉方式。而在我国, 固定管道式喷灌是推进高效节水灌溉发展的重点之一, 因此解决其影响耕作、频繁拆卸、仓储损耗等问题具有十分重要而又紧迫的现实意义。

园林绿化中常用的埋藏式喷头和大田中常用的摇臂式喷头, 均不能直接接触土壤。埋藏式喷头, 需要一个直达地表的保护管, 将喷头安装在这个保护管内, 防止外部土壤和杂物进入管内堵塞喷头。但若将其用于农田灌溉中, 因种植农作物的土地需要季节性翻耕, 这个保护管会对耕作活动造成障碍, 不利于农业机械化、规模化耕作。摇臂式喷头, 自身结构的限制只能安装在地面以上, 需要灌溉时进行逐个安装, 农作物收割前或土层翻耕时需要将其逐个拆卸并放回仓库中, 不仅影响耕作, 而且工作强度和工作量巨大, 工作效率低, 用工成本高, 不符合农业现代化的发展需求。

为此, 作者基于理论和实践有机融合的设计理念, 以不影响耕作为目标, 以将喷头直接埋入土中的方法来解决固定喷灌影响机械化耕作问题的设想, 分析得出这种喷头不仅要能够实现喷洒而且要具备破土功能的实际需求和设计思路, 成功研发了地埋式自升起喷灌装置^[5-7]。本文基于该设备实际破土过程中的阻力和推动力分析, 重点研究地埋式自升起喷灌装置的顶出机理。

收稿日期: 2017-07-04; 网络出版日期: 2018-04-13

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20180413.1431.005.html>

基金项目: 水利部技术示范项目(SF-201621); 中国水利水电科学研究院创新领军人才建设项目(环基本科研 ky1758)

作者简介: 谢崇宝(1965-), 男, 湖北人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事节水灌溉技术与设备研究。

E-mail: xchb@263.net

通讯作者: 张国华(1980-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事节水灌溉技术与设备研究。E-mail: zgh311133@163.com

2 地埋式自升起喷灌装置受力结构分析

地埋式自升起喷灌装置要同时具备破土和喷洒功能，必须在结构设计上寻求技术突破。图1为地埋式自升起喷灌装置的核心部件图，侧端出水口实现喷洒功能，顶端出水口实现破土功能，从而实现一种设备“地下为钻头、地上为喷头”的双重功能且能够自动切换。本文重点研究装置的破土机理，有关喷头的结构优化与水力设计参数问题，将另文研究。

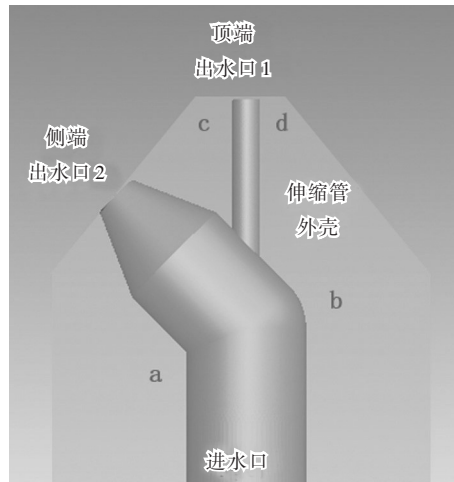


图1 喷头模型

地埋式自升起喷灌装置依托内部水压形成向上破土推动力，同时受到埋深(即埋设设备顶部在耕作土壤中的深度)土的自重力、土体对管道侧壁的摩擦力以及土体抵抗剪切破坏的3种力的作用。埋设设备向上破土受力如图2所示。建立坐标系：以套管上沿为基准，设定 $z=0$ ，即伸缩管向上顶土的起始位置，图中为伸缩管顶土高度为 z 时的示意图。设埋设装置在耕作土壤中的埋深为 $h=0.4\text{m}$ ，伸缩管直径 $d=0.05\text{m}$ ，垂向方向顶土的面积 $S_1 = \frac{1}{4}\pi d^2$ ，伸缩管侧面积 $S_2 = \pi dz$ 。

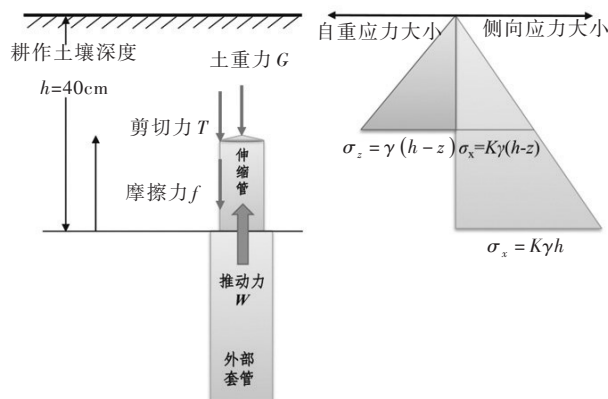


图2 地埋式自升起喷灌装置顶土过程受力分析

2.1 有效推动力 破土有效推动力 W 推导如下：系统底部的输水压强 P_0 ，喷头出水而损失的压强即管内局部损失 P_s ，伸缩管内水柱的压强 P_w 三者相减即为作用在伸缩管顶部的有效压强，再乘以伸缩管的截面积 S_1 ，得到伸缩管道的向上推力。设定伸缩管自身的重量为 G_p ，最终得到破土的有效推动力 W 为

$$W = S_1(P_0 - P_s - P_w) - G_p \quad (1)$$

根据局部损失室内实验分析测定^[8], 换算出不同工况条件下水平喷头处的实际顶推压强, 以及压强损失量 P_s , 如表 1 所示。

表 1 不同进口流量压力下装置的有效压强换算

进口压力 P_0 /MPa	顶推力/N	顶管处有效压强(P_0-P_s)/MPa	压强损失 P_s /MPa
0.20	217.782	0.11	0.09
0.19	221.706	0.11	0.08
0.18	217.782	0.11	0.07
0.16	127.530	0.06	0.10
0.12	112.815	0.06	0.06

由最优线性拟合可以得到有效压强 P_0-P_s 与进口压强 P_0 的关系式为(单位 Pa)

$$(P_0 - P_s) = 0.7931 \times P_0 - 43398 \quad (2)$$

从装置底部到伸缩管顶部的高度约为 1.3 m, 则水柱最大高度为 1.3 m, 则伸缩管水柱的压强 $P_w = 12\,740$ Pa, 式(1)可表示为:

$$W = S_1[(0.7931 \times P_0 - 43398) - P_w] - G_p \quad (3)$$

2.2 重力 在垂向方向土的自重应力为:

$$\sigma_z = \gamma(h - z) \quad (4)$$

由式(4)可知随着埋深越大, 土的自重应力越大, σ_z 为土的自重应力(N/m²), γ 为土的容重(N/m³), 则管道在破土过程中($0 \leq z \leq h$)所受到土体重力作用为:

$$G = \gamma(h - z)S_1 \quad (5)$$

伸缩管道在最底部(即 $z = 0$ 处)受到土体最大重力, 其表达式为:

$$G_{\max} = \frac{1}{4}\gamma h \pi d^2 \quad (6)$$

2.3 摩擦力 在破土过程中, 由于土体侧向压力的存在, 管道侧壁与土体产生相对滑动时, 将会受到土体对其的摩擦阻力作用。

首先分析伸缩管道受到的侧向应力, 从图 1 可以看出, 随着埋深越大, 侧向应力也随之越大, 伸缩管道顶部 z 处的侧向应力为:

$$\sigma_x = K\gamma(h - z) \quad (7)$$

$z = 0$ 处的侧向应力为:

$$\sigma_x = K\gamma h \quad (8)$$

式中: σ_x 为侧向应力, N/m²; K 为土的侧向应力系数。如图 1 的右侧受力分析所示, 侧向应力呈线性分布, 可得伸缩管道受到的平均应力为:

$$\bar{\sigma}_x = \frac{1}{2}K\gamma(2h - z) \quad (9)$$

则伸缩管道受到的压力 N 为:

$$N = \frac{1}{2}S_2K\gamma(2h - z) \quad (10)$$

根据摩擦定理, 破土过程中($0 \leq z \leq h$)管道受到的摩擦力 N 为:

$$f = \mu N = \mu \left[\frac{1}{2} \pi d z K \gamma (2h - z) \right] \quad (11)$$

当伸缩管刚开始顶出地面(即 $z = h$), 管道受到最大的侧向应力, 即受到最大摩擦力 F 为:

$$f_{\max} = \frac{1}{2} \pi d \mu K \gamma h^2 \quad (12)$$

2.4 剪切力 在伸缩管工作的过程中, 土体被逐层剪切破坏。根据摩尔-库伦破坏准则, 对于黏性土

壤，抗剪强度公式为：

$$\tau_f = c_f + \sigma \tan \varphi \quad (13)$$

式中： τ_f 为土壤的抗剪强度； c_f 为土壤的黏聚力； σ 为滑动面上的法向应力； φ 为土壤的内摩擦角，即为抗剪强度线的倾角。

对伸缩管顶部土体进行受力分析，如图3所示，侧向应力为 σ_x ，垂向应力为土重力加上顶管对土体施加的力 $\sigma_z + \sigma_T$ ，根据应力圆与土体抗剪强度公式的关系，可得将土体剪切破坏所需要满足的关系式为：

$$\sigma_z + \sigma_T = \sigma_x \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) + 2c_f \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (14)$$

由于最初破土阶段所需的剪切力是最大的，故 σ_z 和 σ_x 取埋深 $h=40$ cm处的土重力和侧向应力。

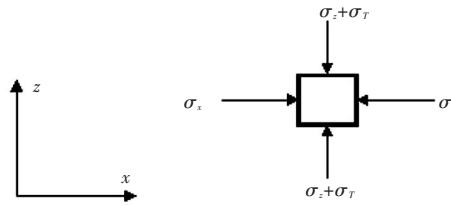


图3 未浸润土体在伸缩管作用下的受力图

则将土进行剪切破坏所需的最大剪切力为：

$$T_{\max} = \sigma_T \left(\frac{1}{4} \pi d^2 \right) \quad (15)$$

2.5 阻力合力 为了简便起见，要实现灌溉设备的破土过程，需克服土体最大重力 G_{\max} 、最大摩擦力 f_{\max} 以及最大的土体剪切破坏力 T_{\max} ，即：

$$G_{\max} + f_{\max} + T_{\max} = \frac{1}{4} \gamma h \pi d^2 + \frac{1}{2} \pi d \mu K \gamma h^2 + \sigma_T \left(\frac{1}{4} \pi d^2 \right) \quad (16)$$

考虑有不确定因素存在，例如灌溉设备中内外套管之间存在的摩擦阻力等，为保证管道可以顺利破土而出，设定阻力余量系数为 $\beta = 1.05$ ，可得破土所需克服的最小阻力 F_{\min} 为

$$F_{\min} = \beta (G_{\max} + f_{\max} + T_{\max}) \quad (17)$$

3 地埋式自升起喷灌装置顶出分析

3.1 最小进水压强计算公式 破土所需要的条件为破土推动力大于或等于其受到的阻力，即

$$W \geq F_{\min} \quad (18)$$

将式(3)代入上式，即可得到系统输入压强要满足的条件，而所有的动力均来源于管道输水压力：

$$P_0 \geq \left(\frac{F_{\min} + G_p}{S_1} + P_w + 43398 \right) / 0.7931 \quad (19)$$

故最小的输水压强为：

$$P_{0_min} = \left(\frac{F_{\min} + G_p}{S_1} + P_w + 43398 \right) / 0.7931 \quad (20)$$

实际情况中的耕种土壤有多种类型，或是多种土壤类型的混合。为了理论分析，这里选用均匀松砂、均匀紧砂、有机质软黏土以及压实情况下的有机质软黏土为研究对象，分析推求不同类型土壤对灌溉装置的阻力，以及破土所需的最小输水压强。

3.2 无出流的顶管破土所需最小进水压强 为了研究顶管出流对地埋式自升起喷灌装置破土能力的影响，本文计算了顶管不出流工况下的最小进水压强，计算结果见表1。

由于顶管顶部土体未被浸润，故土体的重度选用干重度；摩擦力系数取 0.5；对于砂土的侧向应力系数取 0.3 ~ 0.5，对于黏土的侧向应力系数取 0.5 ~ 1.0，而压实状态的黏土取 0.5 ~ 3.0；砂土的黏聚力为零，黏土的黏聚力取 20 ~ 60 kPa，砂土的内摩擦角取 36° ~ 45°，黏土的内摩擦角取 30° ~ 45°，另外顶管自重为 20 N。综合考虑各种因素的影响，各参数取值如表 2 所示。

表 2 无出流的管道破土所需的最小进水压强计算

土的种类	均匀松砂		均匀紧砂		有机黏土		压实有机黏土	
土重度 $\gamma/(\text{N}/\text{m}^3)$	14994	14994	17738	17738	10388	10388	10388	10388
侧向应力系数 K	0.3	0.5	0.3	0.5	0.5	1.0	0.5	3.0
摩擦力系数 μ	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
黏聚力 c/Pa	0.00	0.00	0.00	0.00	20000	60000	20000	60000
土体内摩擦角 $I(^{\circ})$	36	45	36	45	30	45	30	45
土体最大重力 G_{max}/N	11.08	11.08	13.39	13.39	7.16	7.16	7.16	7.16
最大摩擦力 f_{max}/N	26.60	44.33	32.14	53.57	28.63	57.26	28.63	171.79
最大剪切力 T_{max}/N	1.72	21.22	2.08	25.64	139.61	603.40	139.61	686.84
需克服的合力 F_{min}/N	41.38	80.47	50.00	97.23	184.17	701.21	184.17	909.08
重力所占百分比/%	28	14	28	14	4	1	4	1
摩擦力所占百分比/%	68	58	68	58	16	9	16	20
剪切力所占百分比/%	4	28	4	28	80	90	80	79
破土需要的最小进水压强/MPa	0.110	0.135	0.116	0.146	0.202	0.534	0.202	0.667

根据表 2，采用式(17)计算可得，在均匀松砂情况下，破土所需要的阻力最小，为 41.38 N；而在压实情况下的有机黏土(极端情况)，破土所需要的力最大，为 909.08 N。对于均匀松砂，破土所需要的最小进水压强为 0.11 MPa，对压实的有机黏土情况下，破土所需要的输水压强竟然高达 0.667 ≈ 0.7 MPa，远高出喷灌实际工作压力。并且从上表中可以看出，从松砂到紧砂，从一般有机黏土到压实的有机黏土，剪切力所占的百分比逐步增加；对于有机黏土而言，剪切力占合力 79 % ~ 90 %，说明要在黏土中实现破土而出，主要需要克服土体的剪切力。

3.3 有出流的顶管破土所需最小进水压强 针对地理设备的有出流的伸缩管，由于破土过程中土体在水流的作用下逐渐丧失黏聚力^[9]，所以破土所需要的水压相比传统顶管会大幅减小。对于黏性土壤，地理设备破土过程中的喷水，使得土体的黏聚力随着含水量的增加而迅速减小^[10-11]，砂土的黏聚力为零，为计算方便，土壤的黏聚力取 15 kPa^[12-13]，则根据式(15)可得将土进行剪切破坏所需的剪切力为 58.9 N。

对于土体重度，由于顶管出流将使其周围的土体趋于饱和，而远离顶管的土体受其影响较小，所以这里采用 80 % 的干重度加上 20 % 的饱和重度作为破土过程中土体的综合重度。对于摩擦系数，试验研究表明，不同类型、不同含水量状态下的土壤对不同材料间的摩擦系数有着显著差异，地理设备的材质为超高分子量聚乙烯，其摩擦系数介于 0.3 ~ 0.5 之间。对于侧向应力系数，由于土体含水量在顶管出流的作用下迅速增加，土体接近饱和液化，侧向应力系数也会比通常情况小，这里采用 0.1 ~ 0.2，对于压实有机黏土的侧向应力系数最大取到 0.4；另外顶管自重为 20 N。综合考虑各种因素的影响，各参数取值如表 3 所示。

根据表 3，采用式(17)计算可得，在均匀松砂情况下，破土所需要的力最小，为 18.3 N；而在压实情况下的有机黏土(极端情况)，破土所需要的力最大，为 97.82 N。从表 2 中可以看出：对于均匀松砂，破土所需要的最小进水压强为 0.095 MPa，对压实的有机黏土情况下，即地理设备破土最为不利的状态，当输水压强达到 0.146 MPa 时，该地理设备可以顺利破土而出，达到正常工作状态。也就是，在最不利的土壤条件下，只要灌溉输水压强达到 0.15 MPa 以上即可满足地理式自升降高效节水灌溉设备的正常工作。

表3 有出流的管道破土所需的最小进水压强计算

土的种类	均匀松砂		均匀紧砂		有机黏土		压实有机黏土	
综合土重度 $\gamma/(N/m^3)$	14994	14994	17738	17738	10388	10388	10388	10388
侧向应力系数 K	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.4
摩擦力系数 μ	0.3	0.5	0.3	0.5	0.3	0.5	0.3	0.5
黏聚力 c_i/Pa	0	0	0	0	15000	15000	15000	15000
土体最大重力 G_{max}/N	11.78	11.78	13.93	13.93	8.16	8.16	8.16	8.16
最大摩擦力 f_{max}/N	5.65	18.84	6.69	22.29	3.92	13.05	3.92	26.11
最大剪切力 T_{max}/N	0.00	0.00	0.00	0.00	58.90	58.90	58.90	58.90
需克服的合力 F_{min}/N	18.30	32.15	21.65	38.03	74.52	84.12	74.52	97.82
重力所占百分比/%	68	38	68	38	11	10	11	9
摩擦力所占百分比/%	32	62	32	62	6	16	6	28
剪切力所占百分比/%	0	0	0	0	83	74	83	63
破土最小进水压强/MPa	0.095	0.104	0.098	0.108	0.131	0.138	0.131	0.146

同时,从上表可以看出:由松砂到紧砂,由一般黏土到压实黏土,各个阻力所占百分比也在发生变化。对于黏性土壤,剪切破坏力所占的比重在60%~80%之间,起到决定性作用。从另一角度而言,对于黏土能否顺利破土,主要取决于剪切破坏力;对于砂质土壤能否顺利破土,主要克服土体重力和摩擦力。

4 伸缩管径大小对破土的影响分析

当伸缩管管径发生变化时,各种土质能够破土所需要的最小进水压强见表4。从表中可以看出,当管径在0.01~0.09 m范围变化时,对于均匀松砂、均匀紧砂、一般有机黏土和压实有机黏土而言,破土所需的最小进水压强随着管径的增大而减小。

从中分析可以得到:当管径增加时,破土的推动力在增加,同时受到的阻力也在增加,如伸缩管上部土体的重力以及摩擦力都在增加,并且推动力增加程度远大于伸缩管的阻力增加的程度,所以管径越大,破土所需要的进水压强越小。

由此可知,当管径在0.01~0.09 m范围变化时,破土所需的最小进水压强随着伸缩管管径的增大而减小,当管径足够大时(超过0.09 m),破土所需的压强基本不变。

表4 不同伸缩管管径下所需最小进水压强

(单位: MPa)

土的种类	伸缩管径/m				
	0.01	0.03	0.05	0.07	0.09
均匀松砂	0.463	0.136	0.104	0.094	0.090
均匀紧砂	0.476	0.141	0.108	0.097	0.092
有机黏土	1.434	0.237	0.138	0.109	0.097
压实有机黏土	1.478	0.252	0.460	0.116	0.102

5 结语

(1)本文通过理论分析与实验室模拟相结合的方式,构建了地理式自升起喷灌装置水压作用破土过程的分析方法,推导形成了多类型土壤条件的最小进水压强公式。

(2)分析得到了无出流的灌溉设备难以破土而出的原因,通过理论计算得到无出流的灌溉设备输水压强需达到0.7 MPa才能保证在所有类型土壤中实现破土,远大于喷灌的实际工作压力。

(3)顶管顶部设计的出水口,在破土过程中起到浸润周围土体的作用,使土体结构的凝聚力减

小,大幅降低了破土所需的输水压强,使得破土过程更加高效省力。在最不利条件下,如压实有机黏土,输水压强仅需达到0.15 MPa就可以顺利破土而出。

参 考 文 献:

- [1] AYARS J E, PHENE C J, HUTMACHER R B, et al . Subsurface drip irrigation of row crops: a review of 15 years of research at the Water Management Research Laboratory[J] . Agr . Water Manage . , 1999, 42(1): 1-27 .
- [2] CLEMMENS A J. Measuring and improving irrigation system performance at the field level [M]. Irrigation Association of Australia, Melbourne . 2000 .
- [3] MEIS C H, SIEKMEIER D A, ZIMMERER A L . Center pivot irrigation system[P] . U.S. Patent 4,011,990 .
- [4] VARNER J P . Irrigation system and fluid dispersion nozzle [P]. U.S. Patent 4, 1977, 228 .
- [5] 李仰斌, 谢崇宝, 张国华, 等 . 地理式自动升降型一体化喷灌设备研发[J] . 节水灌溉, 2014(7): 75-78 .
- [6] 李仰斌, 谢崇宝, 张国华, 等 . 地理式自动升起型取水设备研发[J] . 节水灌溉, 2014(6): 75-77 .
- [7] 张国华, 谢崇宝, 鲁少华, 等 . 基于钢珠驱动的全地理式喷灌装置研发[J] . 农业工程学报, 2016, 32(12): 102-106 .
- [8] ZHANG G H, XIE C B, LAI H J, et al . Buried lifting sprinkling irrigation device[J] . Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2018, 144(1): 04017058 .
- [9] TERZAGHI K, PECK R B, MESRI G . Soil Mechanics in Engineering Practice[M] . 3rd ed . Wiley, New York, 1996 .
- [10] FREDLUND D G, RAHARDJO H . Soil Mechanics for Unsaturated Soils[M] . Wiley, New York, 1993 .
- [11] WHITLOW R . Basic Soil Mechanics[M] . 2nd ed. Longman Scientific and Technical, Harlow, UK, 1990 .
- [12] LAMBE T W, WHITMAN R V . Soil Mechanics SI Version[M] . Wiley, New York, 2008 .
- [13] 陈惠华 . 汕头市饱水细粒土黏聚力分析[J] . 广州建筑, 2003(6): 6-9 .
- [14] von BERNUTH R D, 康风君 . 有风条件下喷射仰角对喷头性能的影响[J] . 喷灌技术, 1991(2): 36-40 .

The design theory analysis of the buried lifting integrated sprinkling irrigation device

XIE Chongbao¹, ZHANG Guohua¹, PENG Wenqi², WANG Weijie²

(1. China Irrigation and Drainage Development Center, Beijing 100054, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstracts: Traditional fixed pip sprinkler irrigation has a series of problems such as obstructing cultivation and harvest. A new buried lifting integrated sprinkling irrigation device can solve these kinds of problems and save disassembling time. Based on the principle of shear strength decreasing of wet soil, the maximum resistance, which is needed by the device during its rising processed, and effective driver, are analyzed in the paper. Apart from that, the minimum inlet pressure formula under multi-type soil conditions is given after derivation, and the impact of pipe size on its rising processed is analyzed. The results show that the water pressure in the integrated irrigation equipment without outflow, which ensures that the soil is broken in all types of soil, is 0.7MPa, and the value is far greater than the actual working pressure of sprinkler irrigation. When there is outflow at the top of the sprinkler, the soil is easily broken when the water pressure is only 0.15MPa. With flow out of the top, the minimum water pressure required for breaking ground is inversely related to the diameter of the extension pipe when it is less than 90mm, and the pressure is almost constant when the diameter exceeds 90mm, which provides a theoretical basis for the optimization and design of the water-driven irrigation equipment.

Keywords: buried; lifting; integrated sprinkling irrigation device; design theory analysis

(责任编辑: 李福田)