文章编号:1672-3317(2019)01-0063-06

结合可靠度的自压树状管网管径优化研究

岳春芳1, 刘小飞1, 王 健2, 母 利2

(1.新疆农业大学 水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052;

2.新疆生产建设兵团勘测规划设计研究院,乌鲁木齐 830052)

摘要:在自压输水系统中,管道投资占系统的比例较大,管径既是管道系统的一个基本技术参数,也是影响管道经济性的一个重要因素。【目的】合理地选取管径,节约工程投资、降低能耗、保证系统供水安全。【方法】以管网投资和运行管理费用最小为目标函数,管网节点水量可靠度指标、水压、流速等为约束条件,建立了自压树状管网管径优化模型,以新疆苏巴什河自压输水灌区为例进行分析,采用PSO算法与SAPSO算法优化求解模型。【结果】对比相同节点水量可靠度下的目标函数费用,SAPSO算法均低于PSO算法,其优化结果更好;对节点水量可靠度R=0.7下SAPSO算法的计算结果与最优解的相对偏差统计分析可知,小于10%的概率达到97%,其所建模型稳定,计算精度较高。【结论】考虑管网可靠性,所建模型能够较为系统地反映自压输水管网在全寿命周期的运行情况,运行结果的可靠性高;利用SAPSO算法优化求解模型,优化结果更为精确可靠,该方法能为类似工程的管网管径优化问题提供借鉴。 关键词:管网;管径;可靠度;算法 中图分类号:S274.2 文献标志码:A doi:10.13522/j.cnki.ggps.20170059

岳春芳,刘小飞,王健,等.结合可靠度的自压树状管网管径优化研究[J].灌溉排水学报,2019,38(1):63-68.

0引言

自压输水系统因充分利用地形落差,采用管道输水灌溉,其水利用系数高达0.95以上,具有节水效益显 著、土地利用率高、对地形适应性强、输水速度快、灌溉效益高、运行管理方便、便于自动化控制等特点10,已 在新疆大面积推广运用。新疆克拉玛依大农业区、皮墨垦区等地均采用自压输水系统进行高效节水灌溉。 管网系统设计时,常重点研究其经济性,然而管网作为灌溉系统的主体,其经济性、功能性等必须建立在安 全的基础上,研究管网系统可靠性对保证管网供水安全意义深远¹²国内外众多学者对此展开了一系列研 究, Tanyimboth等印运用水力模型模拟管道发生的故障, 计算输水管道的可靠性; Gheisi等印运用多目标决策 模型(Water-Distribution Systems, WDS)布局进行排序,分析输水系统的可靠性;何忠华等⁵⁹提出将剩余能量 '熵作为可靠性度量指标,建立管网多目标优化模型,应用NSGA-II求解模型,提高了管网应对故障的能力。 在工程设计阶段,当管道路径确定后,管径优化是节约工程投资、确保管网安全有效运行的重要保证。传统 的管径优化方法主要有试算法、线性规划法、动态规划法等,往往存在工作量大、计算误差大且精度低等问 题。随着计算机技术和人工智能技术的快速发展,国内外学者开始将人工智能算法引入到管径优化设计 中,并取得了一系列研究成果。周荣敏等60应用改进的遗传算法对环状管网管径优化设计,解决了编码的冗 余问题,提高了算法的实用性和计算效率,能在较大解空间范围内获得最优管径组合方案,节约了管网投 资;付玉娟等¹⁷采用图论理论和列队竞争算法对环状管网进行优化设计,工程实例验证表明,该方法不用初 设管段流量,输入参数少,收敛速度快,能够得到系统最优的管径组合方案和管段计流量,优化效果明显。 王新坤®利用模拟退火算法优化解的不可行度来处理约束条件,克服遗传算法中罚函数系数的设计问题,在 全局空间下搜索管径优化问题的全局最优解:孙明月等⁶⁰以管网连接状态及各管段管径作为粒子群个体,采 用整数编码,通过不断更新粒子的位置来搜索最优的管网结构及管径,实现了对管网布置形式及管径的同 时优化;朱成立等109考虑管网设计的经济性条件和运行性条件,建立优化模型,利用蚁群算法求解模型,实现

收稿日期:2017-12-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51569032);"兵团英才"选拔培养工程项目;自治区产学研联合培养研究生示范基地项目(xjaucxy-yis-20152029) 作者简介:岳春芳(1972-),女,陕西长安人。副教授,博士,主要从事水资源管理方面的研究。E-mail:mycf12@sina.com

不规则树状管网布置及管径同步优化设计。

以往研究对管网系统可靠性的研究多集中在城市供水、供热与供暖管网中,而在农田管网涉及较少。 人工智能算法的引入已在管网优化设计研究中显示出其优越性,然而各类算法都有其局限性与适应性,采 用融合而成的混合算法解决复杂的管网优化问题已成为今后的研究热点。为此,针对自压输水管网中存在 的突出问题,引入节点水量可靠度作为约束条件,建立了农田管网管径优化模型,采用融合的模拟退火粒子 群算法优选管网管径,以期为工程管网设计提供一定技术支持。

1 建立数学模型

以管网投资和运行管理费用年折算值最小为目标函数,管网水力性能和管网可靠性为约束条件,构建 自压树状管网管径优化模型,通过模型求解,寻求最优的管径设计方案。

1.1 目标函数

在满足需水和供水可靠性的前提下,寻求一定年限内管网投资和运行管理费用最小时的管线直径,即 经济管径,在经济管径下管网系统的费用函数计算式为:

$$\min F(d) = \left[\frac{i_0(1+i_0)^T}{(1+i_0)^T - 1} + \frac{P}{100}\right] \sum_{j=1}^j (a+bd_j^c) l_j , \qquad (1)$$

式中:F为管网费用函数(万元);d为管径变量(m);i₀为年利率,取10%;T为管网的投资偿还期(年),取50a; P为管网每年大修基金的提存率,以管网建造费用的百分比计算,给水工程为2.2%;j为管段序号;a、b、c为 给水管道造价参数,通过最小二乘法求得;l为管段长度(m)。

1.2 约束条件

设给水管网系统中有j个管段,i个节点(包括水源节点)。

1)水力约束条件。对于树状管网水力计算结果必须满足连续性方程,即对任一节点流向节点的流量必须等于该节点的流出量,表示为:

$$\sum q_j + Q_i = 0 , \qquad (2)$$

式中: q_i 为节点i相连的各管段的流量管段j的流量(m³); Q_i 为节点i的流量(m³)。

2)节点水压约束条件。管网中各个节点的自由水头不应小于该点正常所需的服务水头且不超过允许的最高水头。其数学表达式为:

$$H_{\min} \leqslant H_i \leqslant H_{\max} , \qquad (3)$$

式中:*H*_{min}为节点*i*正常所需服务水头(m);*H_i*为节点*i*的实际水头(m);*H*_{max}为节点*i*允许的最高水头(m)。 3)管径约束条件。

$$\begin{cases} d_i \ge d_{\min} \\ d_i \in D = \{D_1, D_2, \cdots, D_z\} \end{cases},$$
(4)

式中:*d*;为节点*i*的实际管径(m);*d*_{min}为节点*i*所要求的最小管径(m);*D*为市场可购产品的管径集合。 4)节点流速约束条件。

$$u_{\min} \! \leqslant \! u_i \! \leqslant \! u_{\max} \,, \tag{5}$$

式中:*u*min为节点*i*正常所需的最小流速(m³/s);*u*_i为节点*i*的实际流速(m³/s);*u*max为节点*i*允许的最高流速(m³/s)。 5)节点水量可靠度约束条件。通常以节点水量可靠度来衡量管网对水量和水压的需求情况^[11],解析式为:

$$R_{i} = \begin{cases} 1, & h_{i}^{\text{avl}} \ge h_{i}^{\text{req}} \\ \frac{q_{i}^{\text{avl}}}{q_{i}^{\text{req}}}, & h_{i}^{\text{req}} > h_{i}^{\text{avl}} > h_{i}^{\text{min}} \\ 0, & h_{i}^{\text{min}} > h_{i}^{\text{avl}} \end{cases}$$
(6)

式中: R_i 为节点i的水量可靠度; h_i^{avl} 、 h_i^{req} 、 h_i^{req} 、 h_i^{req} 分别为节点i的实际可用水头、需水头和最小允许水头(m); q_i^{avl} 、 q_i^{req} 分别为节点i的实际可用水量和需水量(m³/s)。

当*h_i^{avl}≥h_i^{req}* 时,节点*i*供水正常,完全满足需水要求,*R_i*取1;当*h_i^{min}>h_i^{avl}*时,节点*i*无可用流量,供水完全故障,*R_i*取0;当*h_i^{req}>h_i^{avl}>h_i^{min}*时,节点*i*的需水量得到部分满足,供水部分故障,*R_i*取*q_i^{avl}/q_i^{req}*,为满足最低水量的

供水需求,实际供水量按需水量的70%的规定处理^[12],所以当节点实际可用水量低于节点所需水量的70%时,该节点的可靠度可视为0,即节点水量可靠度必须满足:

$$0.7 \leq R_i \leq 1$$

2 实例仿真

2.1 工程概况

苏巴什河灌区高效节水灌溉工程位于新疆阿克苏地区柯坪县,其灌溉水源全部引自苏巴什河,苏巴什 河灌区配套水利工程包括沉砂调节池工程、连接管和减压池3部分,沉砂调节池进水渠总长度1200m,设计 流量为2m³/s,设计总容积235万m³,连接管长1180m,减压池池容610m³。截至2015年底,苏巴什河灌区 高效节水灌溉面积达到2713.33 hm²,年引水总量为2350.09万m³,其中自压滴灌用水1839.02万m³,占总引 水量的78.25%。

2.2 基本数据

以苏巴什河灌区高效节水灌溉工程中的自压树状管网为例进行仿真计算。管网布置、节点、管段编号和管段流量如图1所示,管道管径及单价见表1,节点地面高程及最低服务水头见表2,水源水面高程为1228 m,减压池水面高程1201 m,管材采用玻璃钢管,耐压等级0.6 MPa,刚度 SN5000。



表1 管道管径及单价										
管径/mm	160	200	250	315	400	600	800) 1	000 1 2	00 1 400
单价	150	170	180	195	256	460	730) 1	050 15	50 2 100
表2节点地面高程及最低服务水头										
节点序号	地面高程/m	最低服务水	×头/m	节点序号	地面高程/m	最低服务水	头/m	节点序号	地面高程/m	最低服务水头/m
水源	1 228			Н	1 188	30		Q	1 208	24
减压池	1 201			Ι	1 184	28		S	1 195	21
А	1 197	22		J	1 182	25		Т	1 194	25
В	1 197	34		Κ	1 176	26		U	1 194	23
С	1 195	26		L	1 220	25		V	1 193	25
D	1 194	22		М	1 219	20		Х	1 197	18
Е	1 192	26		Ν	1 219	25		Y	1 196	24
F	1 191	27		0	1 213	26		Z	1 192	26
G	1 189	29		Р	1 208	22				

图1 管网布置示意图 表1 管道管径及单价

按照《喷灌工程技术规范》和《微灌工程技术规范》,喷、微灌工程干管沿程水头损失可表示为:

$$h_{\rm f} = \frac{f \times Q^m \times L}{d^b} ,$$

式中:f为摩阻系数,取值94800;m为流量指数,取值1.77;b为管径指数,取值4.77。其中管道局部水头损失按沿程水头损失的10%计算。

(8)

2.3 控制参数选取

使用粒子群算法(PSO)与模拟退火粒子群算法(SAPSO)解决自压树状管网干管管径的优化问题,因算法涉及的控制参数较多,其中种群规模和迭代步数的选取对计算结果的精度有较大的影响,故对2个参数进行组合分析以确定最优值,对种群规模及迭代步数设置9种组合方案:(30,30)、(30,50)、(30,100)、(50,30)、(50,50)、(50,100)、(100,30)、(100,50)、(100,100),进行对比分析;小种群在固定权重时,惯性因子ω 宜为0.5,学习因子c₁=c₂=2,退火常数*lamda*=0.5。

输入1行10列的管径矩阵,应用PSO与SAPSO算法,调用方式为 $[x_m, f_v]$ = SimuAPSO(@fitness, N, c_1, c_2 , lamda, M, D),修改相关控制参数进行优化计算,求得的不同种群规模及迭代步数运行结果见表3。

衣 5 不阿什叶就快及远代少数运行结本 77.										
种群规模及	迭代步数	(30,30)	(30,50)	(30,100)	(50,30)	(50,50)	(50,100)	(100,30)	(100,50)	(100,100)
目标函数值 f,	SAPSO算法	756.5	716.6	760.8	747.3	743.8	739.1	767.1	733.7	776.7
	PSO算法	768.6	725.7	759.1	766.8	752.9	742.1	779.6	742.3	756.6

由表3可知,在分别对比SAPSO与PSO算法相同种群规模与不同迭代步数及不同种群规模与相同迭代步数的运行结果可得,其目标函数值的优化结果好坏与种群规模和迭代步数均不存在正向或负向关系。当种群规模为30,迭代步数取50时,SAPSO与PSO算法的目标函数值均达到最优,其优化结果最为合理。

2.4 优化结果分析

选取粒子种群规模 N=30,迭代步数 M=50,时空间维数 D=24,惯性因子 ω=0.5,学习因子 c₁=c₂=2,退火常数 lamda=0.5,对比不同节点水量可靠度下,SAPSO与 PSO 算法的优化结果,其优化结果见表4。

管段序号	管长m		SAPSO 算法		PSO 算法				
		R,=0.7管径	R=0.8管径	R≓0.9管径	<i>R</i> ≓0.7管径	R≓0.8管径	<i>R</i> ≓0.9管径		
L	2 322	1	1	1	1	1	1		
М	781	1	1	0.8	1	1	1		
Ν	853	0.8	0.8	0.6	0.8	0.8	0.8		
О	936	0.6	0.6	0.4	0.6	0.6	0.8		
Р	867	0.4	0.4	0.4	0.4	0.6	0.6		
Q	51	0.4	0.315	0.315	0.315	0.4	0.4		
Х	5 283	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2		
Y	339	1.2	1	1.2	1	1	1.2		
Z	508	1	1	1	1	1	1		
S	556	1	1	1	1	1	1		
Т	2 907	1	1	1	1	1	1		
U	1 506	0.8	1	1	0.8	0.8	1		
V	625	0.6	0.8	1	0.6	0.8	0.8		
А	4 315	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2		
В	405	1	1	1.2	1	1.2	1.2		
С	706	0.8	0.8	1	0.8	1	1		
D	541	0.6	0.6	0.8	0.6	0.8	0.8		
Е	918	0.4	0.4	0.6	0.4	0.6	0.6		
F	162	0.315	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4		
G	580	0.315	0.315	0.315	0.4	0.4	0.4		
Н	583	0.25	0.25	0.25	0.315	0.315	0.315		
Ι	405	0.25	0.2	0.2	0.25	0.25	0.315		
J	497	0.2	0.2	0.2	0.25	0.25	0.25		
K	988	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.25		
<i>f</i> ,/万元		712.2	728.6	742.9	734.3	751.5	768.8		

表4 管径优化计算结果

m

由表4可知,随着节点水量可靠度R,的不断增大,其目标函数的费用f,也在不断增加,即为保证较高的节 点水量可靠度其所需费用也在不断提高;对比相同节点水量可靠度下的目标函数费用,SAPSO算法均低于 PSO算法,SAPSO算法的优化结果更好,且随着R,的不断增大,目标函数差值也在不断增大,其节约资金效果 越明显,当R=0.9时差值达到最大为25.9万元;对比SAPSO算法下不同节点水量可靠度下的目标函数费用, 当R=0.7时目标函数最小值为712.2万元,较R=0.9时减少了30.7万元,但其节点水量可靠度R≥0.7均能满足 最低水量下对节点可靠度的要求。管段直径等级决定了所在管段的造价及节点水量可靠度的大小,分析可 知,在各分支一级管段上(L号、X号、S号和A号)所取管径大小一致,而在二级管段上管径的直径相差较大, 集中表现在M号、Y号、T号和B号管段上所取直径等级不一致,导致后续管段管径不一致。因此在满足一定 供水可靠度的情况下兼顾节约投资,宜采用节点水量可靠度*R=*0.7对自压树状管网干管管径进行优化计算。

为克服随机因素对算法求解性能评估的干扰,对节点水量可靠度 R=0.7下将 SAPSO算法程序独立运行100次,比较计算结果与最优解的相对偏差,结果见表5。

表5 计算结果与最优解的相对偏差

1 ·	最优解/万元	相对偏差/%	<1	<3	<5	<8	<10	>10	
F .	712.2	出现次数	12	51	77	85	97	3	

通过100次运算,相对偏差小于5%的概率达到77%,小于10%的概率达到97%,说明SAPSO算法收敛性稳定,计算精度较高,能满足实际工程的要求。

3 结 论

1)考虑管网目标函数的资金时间价值以管网投资和运行管理费的年折算值最小作为目标函数,引入管 网节点水量可靠度作为管网可靠性的约束条件,所建模型能够客观反映自压输水管网在全寿命周期内的实 际运行情况,运行结果可靠性高。

2)利用 SAPSO 算法优化求解模型,不仅改进了 PSO 算法易发散、不收敛等问题,以更高的效率解决问题,而且融合后的 SAPSO 算法能概率性地跳出局部最优并趋于全局最优,高效搜索能力有利于得到多约束条件下的最优解,优化结果更为精确可靠。通过对 SAPSO 算法控制参数的组合分析,缩小了 SAPSO 算法随机性对计算结果精度的影响。

3)针对自压树状管网的供水问题,在保证一定节点水量可靠度与一系列约束条件的情况下,得到使目标函数达到最优解下的管径组合方案,对管网优化设计具有可观的经济效益和重要的实用价值。

对于农田自压树状管网考虑其可靠性,将经济性与可靠性有机结合是今后研究的热点,如何将经济性和 可靠性的目标函数有机结合起来,解决其相互之间的量纲关系、合理分配权重是今后研究的难点问题。

参考文献:

- [1] 刘波,刘福胜,刘栋梁,等.基于枚举法和遗传算法的农田有压管道系统优化设计[J].节水灌溉,2017(8):92-95,100.
- [2] 龚时宏,中达雄,田中良和.管网安全性水力评价指标的研究[J].灌溉排水学报,2003,22(1):67-69.
- [3] TANYIMBOTH T T, SIEW C, SALEH S, et al. Comparison of surrogate measures for the reliability and redundancy of water distribution systems[J].
 Water Resources Management, 2016, 30(10):3 535-3 552.
- [4] GHEISI A, NASER G. Multistate reliability of water-distribution systems: comparison of surrogate measures[J]. Journal of Water Resources Planning & Management, 2015, 141(10):04015018.
- [5] 何忠华, 袁一星. 基于剩余能量熵的供水管网可靠性优化设计[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(7):1188-1194.
- [6] 周荣敏,林性粹.用基于整数编码的改进遗传算法进行环状管网优化设计[J].灌溉排水,2001,20(3):49-52.
- [7] 付玉娟, 蔡焕杰, 张旭东.基于图论和列队竞争算法的环状管网优化设计[J].灌溉排水学报, 2008, 27(4):81-84.
- [8] 王新坤.基于模拟退火遗传算法的自压树状管网优化[J].水利学报, 2008, 39(8):1 012-1 016.
- [9] 孙明月,许文斌,邹彬,等.基于整数编码粒子群算法的树状供水管网优化[J].水资源与水工程学报,2012,23(6):168-171.
- [10] 朱成立,谢志远,柳智鹏.基于蚁群算法的灌溉管网布置与管径优化设计研究[J].江西农业学报,2015,27(3):93-96.
- [11] 何忠华, 袁一星. 基于剩余能量熵的供水管网可靠性优化设计[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(7):1188-1194.
- [12] 何忠华.供水管网剩余能量熵及可靠性评价研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.

Optimization Research Combined Reliability of Pipe Diameter of Self-pressure Tree-type Pipe Network

YUE Chunfang¹, LIU Xiaofei¹, WANG Jian², MU Li²

(1.College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agriculture University, Urumqi 830052, China; 2.Xinjiang Formation of Production and Construction Investigation, Design & Research Institute, Urumqi 830052, China)

Abstract: [Objective] In the self-pressure water conveyance system, the pipe investment accounts for a large proportion of the system. The pipe diameter is not only a basic technical parameter of the pipeline system, but also an important factor affecting the economy of the pipeline. Therefore, how to choose the diameter reasonably is of great significance for saving investment, reducing energy consumption and ensuring the safety of water supply. [Method] Minimize the cost of investment and operation management was taken as the objective function, water

reliability index, water pressure and flow velocity of pipe network node were as constraint conditions, and on the basis of this, the optimization model of the self-pressurized tree tube network pipe diameter was established. The PSO algorithm and the SAPSO algorithm were used to solve the model under an example of analyzing the SUB-ASHI river water irrigation in Xinjiang. [Result] Comparing with the objective function cost under the same node water reliability, the SAPSO algorithm is lower than the PSO algorithm, and the optimization result is better. The statistical analysis of the relative deviation between the calculated results and the optimal solution of the SAPSO algorithm when the node's water reliability R=0.7 can be found that the probability of less than 10% is 97% and so the model is stable and the precision is high. [Conclusion] With considering the reliability of the pipeline network, the model can systematically reflect the operation of the self-pressure water delivery network in the whole life cycle, and the reliability of its operation result is high. And when the SAPSO algorithm is used to optimize the model, the optimization results will be more accurate and reliable. In a word, this method can provide reference for the pipe diameter optimization of similar projects.

Key words: network; pipe diameter; reliability; algorithm

责任编辑:白芳芳

(上接第20页)

CH₄ and N₂O Emission from Paddy Field in Cold Region is Impacted by Irrigation Methods

WANG Changming¹, ZHANG Zhongxue^{1*}, LYU Chunbo², ZHENG Ennan¹, YUN Ninghan¹
(1. School of Water Conservancy & Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;
2.Water Conservancy Management Center of Heilongjiang, Harbin 150001, China)

Abstract: [Objective] Microbial activities involved in biochemical reactions that emit greenhouse gases are modulated by soil moisture and the purpose of this paper is to examine how irrigations affect these biochemical processes in paddy field with a view to provide a guidance for managing paddy filed in cold region in Heilongjiang province. [Method] The field experiment compared three irrigation methods: control irrigation, intermittent irrigation and flood irrigation. In each treatment, we measured the change in CH4 and N2O emission, as well as their warming potential using the static chamber-gas chromatograph technique. [Result] ①In all treatments, CH₄ emitted mainly during the tillering booting and flowering stages. Compared to flood irrigation, control and intermittent irrigation both significantly reduced CH₄ emission (P < 0.01), with the control irrigation reducing by 56.29% and the intermittent irrigation by 26.59%. 2 The drying period during the dry-wet alternation and one week after the third nitrogen fertilization were the main emission period of N_2O , and there was a negative N_2O emission during the seeding establishment period. The N₂O emission in control irrigation peaked after the third nitrogen fertilization, which was six days earlier than the time it peaked under the intermittent and flood irrigation. Compared with flood irrigation, the control and intermittent irrigation increased N2O emission by 55.6% and 56.0% respectively. (3) There was a significant correlation between CH_4 emission and 5 cm soil temperature under flooded irrigation (P < 0.01), while under control irrigation the N₂O emission was significantly correlated with 15 cm soil temperature (P<0.01). Soil temperature profile and atmospheric temperature combined to significantly affect CH₄ and N₂O emission under intermittent irrigation, while CH₄ and N₂O emissions under flood irrigation was significantly regulated by soil temperature. [Conclusion] Irrigations do affect CH₄ and N₂O emission from paddy field in cold region, and our results showed that control irrigation not only reduces the warming potential but also increases grain yield.

Key words: paddy field; irrigation; greenhouse gas emission; global warming potential