排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2016 年 11 月 Nov. 2016 | 第 34 卷 第 11 期 Vol. 34 No. 11
doi:10.3969/j.issn.1674-8530.15.1107

变频调速分级恒压灌溉自动控制系统及应用


何武全

何武全[1,2]，张华[3]，何欣烨[1]，张宇峰[1]
（1.西北农林科技大学水利与建筑工程学院，陕西 杨凌 712100；2.旱区农业水土工程教育部重点实验室，陕西 杨凌 712100；3.渭南市石堡川水库灌溉管理局，陕西 澄城 715200）

摘要：为解决机电泵利用工频电源(50 Hz)作恒速运转条件下，灌溉面积或地形高差变化较大的管道式喷微灌系统灌水均匀度不能满足灌溉要求的问题，提出了一种变频调速分级恒压灌溉自动控制系统，该系统将变频技术和自动化技术相结合，具有变频调速和全自动闭环控制功能的机电一体化智能设备，可同时对1台或多台三相380 V，50 Hz水泵电动机进行自动控制.该系统设计了多段压力设置转换电路，可根据预先设定的压力控制值自动进行压力等级切换，并对管网的电磁阀开启、关闭进行控制，实现分级恒压自动供水灌溉.通过工程实例分析表明，采用水泵工频控制时喷灌系统水头最大差值为12.89 m，采用变频分级恒压控制时喷灌系统水头最大差值为3.38 m，满足设计压力变幅不大于4.00 m的要求.同时该系统具有节水、节能、自动化程度高、运行管理方便以及保证管网和水泵安全运行等功能，能够根据灌溉分区进行分级恒压自动供水灌溉，满足灌水均匀度要求.

关键词：喷微灌；变频调速；分级恒压；自动控制；灌水均匀度
中图分类号：S277.9　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2016)11-1003-05

何武全，张华，何欣烨，等.变频调速分级恒压灌溉自动控制系统及应用[J].排灌机械工程学报,2016,34(11):1003-1007.
HE Wuquan, ZHANG Hua, HE Xinye, et al. Variable frequency and adjustable constant pressure automatic control irrigation system and its application[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME), 2016,34(11):1003-1007.(in Chinese)

Variable frequency and adjustable constant pressure automatic control irrigation system and its application

HE Wuquan[1,2], *ZHANG Hua*[3], *HE Xinye*[1], *ZHANG Yufeng*[1]
(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Shibaochuan Reservoir Administration Bureau in Weinan City, Shaanxi Province, Chengcheng, Shaanxi 715200, China)

Abstract: In a sprinkler irrigation system with long pipe, there is a constant frequency (50 Hz) motor to derive the pump for delivering water. If the irrigating area or elevation change greatly in an irrigation field, the sprinkler irrigation uniformity will become unsatisfactory. In order to solve this problem, a variable frequency and adjustable constant pressure automatic control irrigation system is proposed. In the system, frequency conversion and automation technique are combined, and it is a kind of mechatronic-intelligent device with variable frequency motor and closed-loop fully automatic control function, and it can control for one or more AC 380 V, 50 Hz pump motors automatically at the same time. An

收稿日期：2015-03-10；**网络出版时间**：2016-11-14
网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20161114.1444.026.html
基金项目：“十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAD24B02)
作者简介：何武全(1967—)，男，陕西合阳人，副教授(hewuquan1967@sina.com)，主要从事节水灌溉理论与技术研究.
张华(1977—)，男，陕西大荔人，高级工程师(690742529@qq.com)，主要从事灌溉工程建设与管理.

electrical circuit is designed for setting different constant pressure levels. As a result, the system can vary the pressure in a pipe network automatically according to the pressure levels prescribed, by opening and closing the electromagnetic valves installed in the network; eventually, an automatically adjustable constant pressure water supply irrigation process is realized. Through the analysis of an engineering project, it is shown that the maximum difference in sprinkler system head is 12.89 m while the pump operating at 50 Hz, by using variable frequency adjustable constant pressure control system, however, the maximum difference in the sprinkler head is 3.38 m, which has met the requirement on pressure variation. Also, this system has a few advantages, such as water saving, energy saving, high degree of automation, convenient operation and management, guaranteeing safe operation of pipe network and pump. It allows a pump to supply water to the sprinkler under a prescribed pressure level according to an irrigation field partition, thus the irrigation uniformity of sprinkler is favourable and satisfactory.

Key words: spray-micro irrigation; frequency control of motor speed; hierarchical constant voltage; automatic control; uniformity of irrigation

喷微灌(喷灌和微灌)是目前世界上应用最广泛的节水灌溉工程技术之一,具有节水、增产、节地、适应性强等优点,并向着低能耗、精准灌溉、自动化控制、多目标利用等方向发展[1-3]. 据统计截至2014年底,中国节水灌溉工程总面积为290 190 km^2,其中喷微灌面积为78 440 km^2,占总节水灌溉工程面积约27%[4]. 灌水均匀度是喷微灌工程设计中衡量灌水质量的重要参数,对灌溉作物增产及节水效果具有重要的影响[5-6]. 利用机电泵加压条件下的管道式喷微灌系统,当管网布置及灌水器确定后,管网系统的压力变化是影响灌水均匀度的关键因素. 但是,水泵电动机通常是利用工频电源(50 Hz)作恒速运转,水泵的运行特性不能适应田间管网流量和压力的变化,当控制灌溉面积较大或地形高差变化较大时,采用调压罐、调压阀等传统的控制调节措施均有一定的局限性,很难满足灌水均匀度的要求. 因而有必要进行变频调速分级恒压灌溉自动控制系统的研究.

目前,变频调速技术在电动机调速控制方面已得到广泛应用[7]. 文献[8-9]研究了利用变频器调节水泵电动机转速来改变输出流量和压力;殷佳琳等[10]结合实际工程提出了基于PLC及变频调速技术的恒压供水自动控制系统设计方法,李浩等[11]提出了一种基于PLC的微灌变频控制系统的设计方法. 但是,针对灌溉面积较大或地形坡度较大的喷微灌系统,使用一个恒定的管网压力不能满足整块田地的灌水均匀度要求,如何根据灌溉分区进行分级恒压灌溉仍须进一步研究.

文中提出一种变频调速分级恒压灌溉自动控制系统,根据灌溉分区预先设定的压力控制值自动进行压力等级切换,实现分区分级恒压自动供水灌溉,满足灌水均匀度要求,以提高喷微灌系统的灌水质量.

1 变频调速恒压控制原理

变频调速恒压供水是通过变频器调节水泵电动机转速来实现恒压供水,其恒压控制原理是由水泵特性决定的. 图1为水泵变频调速运行时的流量Q与扬程H的关系曲线,N_1,N_2为不同转速n_1,n_2下的流量Q与扬程H的特性曲线.

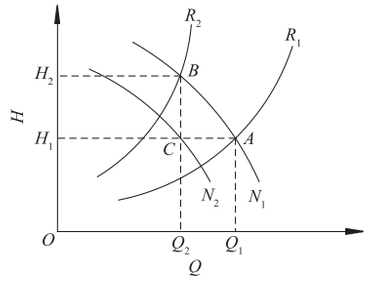


图1 水泵变频调速恒压控制原理

Fig. 1 Control principle of variable frequency adjustable constant pressure water pump

由图1可知,如果在n_1转速下,通过控制阀门等调节措施将流量从Q_1减小到Q_2,压力将沿曲线N_1由点A升高到点B,可以看出,在减少流量的同时提高了压力水头(H_2-H_1). 如果利用变频器调节水泵转速,当转速由n_1减少到n_2,流量就从Q_1减小到Q_2,而压力恒定不变. 这种特性表明,在一定范围内,利用变频调速技术改变水泵电动机转速来调节出水流量,能够保持出水压力恒定不变,实现恒压供水. 如果预先设定不同的压力控制等级,即可实现分级恒压供水.

2　变频调速分级恒压灌溉控制系统

2.1　系统组成

变频调速分级恒压灌溉自动控制系统由变频器（内含 PID 控制器）、可编程控制器（PLC）、可编程时控开关、远传压力表及相关电气控制部件组成，可同时对 1 台或多台三相 380 V，50 Hz 水泵电动机进行自动控制，是一种具有变频调速和全自动闭环控制功能的机电一体化智能设备. 系统设计了多段压力设置转换电路，能根据灌溉分区（或不同灌溉方式）设定的压力要求自动进行压力等级切换，实现分级恒压自动供水灌溉，保证灌溉的均匀度.

2.2　系统工作原理

该系统工作原理是通过远传压力表检测管网控制点压力，并转换成电信号，反馈给 PID 控制器，PID 控制器将压力反馈信号与压力给定信号相比较，经调节后得到频率给定信号，控制变频器的工作频率，从而控制水泵的转速和流量，实现管网流量变化时控制点的压力恒定不变. 同时，PID 控制器将不同压力等级的压力上下线控制信息提供给 PLC，通过多段压力设置转换电路自动进行压力等级切换，按照设定的灌溉分区和压力等级要求进行自动供水灌溉. 变频调速分级恒压灌溉自动控制系统的工作原理如图 2 所示.

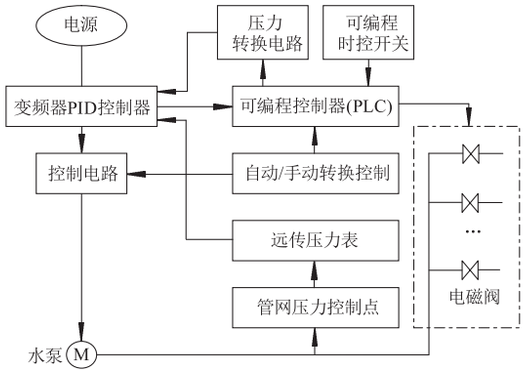


图 2　变频调速分级恒压供水控制系统原理框图

Fig. 2　Block diagram of control principle of variable frequency adjustable constant pressure water pump

2.3　系统功能

系统功能如下：

1）设有多段压力设置转换电路，能根据要求的灌溉分区（或不同灌溉方式）自动进行压力等级切换，并对电磁阀开启、关闭进行控制，进行分区分级恒压供水灌溉.

2）设有手动/自动切换电路，当切换至自动位置时，系统可根据出口压力变化，自动调节水泵的转速，以维持管网压力恒定. 当变频控制电路出现故障时，可切换至手动位置，使水泵直接在工频下运行，保证正常供水.

3）能够按照设定的灌溉制度进行自动灌溉.

4）利用 PLC 控制水泵全循环软启动，同时具有故障显示及报警、缺相、短路、过载、瞬时断电保护等电气保护功能.

2.4　系统适用范围

系统适用范围如下：

1）灌溉面积较大. 当喷微灌控制面积较大时，采用轮灌工作制度，往往各轮灌组要求水泵提供的流量（轮灌组面积不同）和压力（管道阻力损失不同）不同，需要采用变频调速分级恒压灌溉自动控制系统.

2）地形高差变化较大. 当喷微灌控制区域的地形高差变化较大时，各灌水器要求水泵提供的压力不同，应根据设计允许压力变幅，划分灌溉分区. 各灌溉分区要求水泵提供的流量（灌溉面积不同）和压力（地形高程不同）不同，需要采用变频调速分级恒压灌溉自动控制系统.

3）一机多用. 对于同一水源的灌溉区域，当采用不同的灌溉方式时，如一个水源井控制区域，果树采用滴灌，小麦采用喷灌，要求水泵提供的流量和压力不同，需要采用变频调速分级恒压灌溉自动控制系统.

3　系统分级压力等级的确定

确定喷微灌系统分级压力等级时，首先要确定灌溉系统设计允许压力变幅，在传统喷微灌系统设计方法的基础上，将灌溉系统划分成若干个灌溉分区，要求每一灌溉分区内任意 2 个灌水器的工作水头差必须在系统设计允许压力变幅内[12-13]，即

$$\frac{h_{i\max}-h_{i\min}}{h_{\mathrm{d}}}\leqslant 20\%\,, \tag{1}$$

式中：$h_{i\max}$ 为第 i 灌溉分区灌水器最大工作水头，m；$h_{i\min}$ 为第 i 灌溉分区灌水器最小工作水头，m；h_{d} 为灌水器设计工作水头，m.

灌溉分区确定后，需要确定管网系统的压力控制点. 喷微灌工程设计中，为了管理方便，一般管网压力控制点选在管网首部枢纽处，当灌溉面积较大时，也可将压力控制点选在各个灌溉分区管网入口

处. 根据管网系统布置和灌水器的设计水头和流量,按照式(2),(3)可以计算出各灌溉分区在压力控制点的压力等级值[14],即

$$H_i = h_d + h_{ik} + Z_i, \tag{2}$$

$$h_{ik} = \sum_{j=1}^{n} \frac{K f_j L_j Q_{ij}^m}{D_j^m}, \tag{3}$$

上述式中:H_i 为第 i 灌溉分区在压力控制点的压力等级值,m;h_{ik} 为第 i 灌溉分区工作时最不利灌水器到管网压力控制点的水头损失,m;Z_i 为第 i 灌溉分区最不利灌水器与压力控制点的高差,m;K 为考虑局部水头损失的扩大系数,$K \geqslant 1$;f_j 为第 j 管段的摩阻系数;L_j 为第 j 管段的长度,m;Q_{ij} 为第 i 灌溉分区工作时第 j 管段的流量,m^3/s;D_j 为第 i 灌溉分区工作时第 j 管段的管径,m;m 为流量指数.

传统的喷微灌工程设计中,一般轮灌组是按照水泵额定流量的大小进行划分,当灌溉面积较大或地形高差变化较大时,很难满足灌溉均匀度的要求. 采用变频调速分级恒压供水控制系统,轮灌组可根据灌溉田块大小和地形进行划分,并且可以将灌溉系统划分成若干个灌溉分区,使规划设计更加灵活,并能保证灌水均匀度和灌水质量要求,运行管理也更方便.

4 工程实例

某草坪灌溉工程规划从一蓄水池引水,利用水泵加压进行灌溉,灌水方式为固定式喷灌,喷头选用美国雨鸟公司的 15SQ 埋藏式散射矩形喷头,设计工作压力 0.2 MPa,流量为 0.78 m^3/h,射程为 6.4 m×6.4 m,喷头组合方式为矩形布置,全圆喷洒,地块边角采用可调角度喷头,扇形喷洒,喷头间距和支管间距均为 5 m,并按实际地形进行适当调整. 由于该草坪所处田块地形坡度较大,最大高差 13.31 m,地块形状很不规则,并且要求灌溉时不能产生地面径流. 水泵采用工频控制方式,传统的喷灌设计方法,喷灌系统水力计算结果如表 1 所示,表中 h_{min} 为最小水头,h_{max} 为最大水头,$h_{轮灌组差值}$ 为轮灌组水头差值,$h_{系统差值}$ 为系统水头差值,$h_{变幅}$ 为压力变幅. 从表中可以看出,每个轮灌组压力变幅满足要求,但整个喷灌系统最大压力变幅为 12.89 m,不能满足设计允许压力变幅(≤4.00 m)要求. 因此,采用水泵工频控制的喷灌系统,不能满足灌水均匀度的要求,并且灌溉过程中会产生地面径流.

表 1 水泵工频控制条件下喷灌系统水力计算结果

Tab. 1 Sprinkling irrigation system pressure estimated at 50 Hz m

控制方式	轮灌组	h_{min}	h_{max}	$h_{轮灌组差值}$	$h_{系统差值}$	$h_{变幅}$
工频控制	1	26.64	29.05	2.41	12.89	4.00
	2	26.10	29.01	2.91		
	3	24.07	24.48	0.41		
	4	21.81	22.78	0.97		
	5	17.80	19.34	1.54		
	6	16.16	18.68	2.52		

采用变频调速分级恒压自动供水控制系统,将灌溉系统划分为 3 个灌溉分区,采用不同的压力等级分级恒压控制,压力控制点位于管网首部,压力等级分别为 0.30,0.35,0.39 MPa,喷灌系统水力计算结果如表 2 所示,其中 p 为压力等级,$h_{设计差值}$ 为设计水头差值. 从表中可以看出,喷头的工作压力差最大为 3.38 m,在设计允许压力变幅(≤4.00 m)以内,满足灌水均匀度要求. 同时,各轮灌组利用电磁阀控制,采用间歇循环自动控制灌溉,灌溉过程中不产生地面径流. 经现场试验,1 个轮灌组 1 次喷灌时间为 5 min,循环灌溉直到满足设计灌溉制度的要求,轮灌组、灌溉分区以及不同压力等级的切换均为自动控制.

表 2 水泵变频控制条件下喷灌系统水力计算结果

Tab. 2 Sprinkling irrigation system pressure estimated at variable frequency

控制方式	灌溉分区	轮灌组	p/MPa	h_{min}/m	h_{max}/m	$h_{轮灌组差值}$/m	$h_{系统差值}$/m	$h_{设计差值}$/m
变频控制	Ⅰ	1,2	0.30	19.10	22.05	2.95	3.38	4.00
	Ⅱ	3,4	0.35	19.81	22.48	2.67		
	Ⅲ	5,6	0.39	19.16	22.34	3.18		

5 结 论

1) 利用机电泵加压的喷微灌系统工作时,机电泵通常是利用工频电源(50 Hz)作恒速运行,无法调节泵的运行特性与管网实际变化的运行状况相适应. 当灌溉面积较大或地形坡度较大时,使用 1 个恒定的管网压力不能满足整块田地的灌溉均匀度要求.

2) 在喷微灌系统传统设计方法的基础上,按照压力等级进行灌溉分区,各分区采用不同的压力等级分级恒压自动控制,实现分级恒压自动供水灌

溉，能够满足灌水均匀度要求.

3）通过工程实例分析表明，采用水泵工频控制时喷灌系统水头最大差值为 12.89 m，不能满足设计要求；采用变频分级恒压控制时喷灌系统水头最大差值为 3.38 m，满足设计压力变幅不大于 4.00 m 的要求.

参考文献(References)

[1] 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.
GONG Shihong，LI Jiusheng，LI Guangyong. Present situation and development tendency of spray irrigation and micro-irrigation technology[J]. China water resources，2012(2)：66－70.(in Chinese)

[2] 袁寿其，李红，王新坤. 中国节水灌溉装备发展现状、问题、趋势与建议[J]. 排灌机械工程学报，2015，33(1)：78－92.
YUAN Shouqi，LI Hong，WANG Xinkun. Status，problems，trends and suggestions for water-saving irrigation equipment in China[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering，2015，33(1)：78－92.(in Chinese)

[3] STAMBOULI T，FACI J M，ZAPATA N. Water and energy management in an automated irrigation district[J]. Agricultural water management，2014，142(6)：66－76.

[4] 中华人民共和国水利部. 中国年水资源公报(2014)[M]. 北京：中国水利水电出版社，2015.

[5] LÓPEZ－MATA E，TARJUELO J M，JUAN J A D，et al. Effect of irrigation uniformity on the profitability of crops[J]. Agricultural water management，2010，98(1)：190－198.

[6] SALMERON M，URREGO Y F，ISLA R，et al. Effect of non-uniform sprinkler irrigation and plant density on simulated maize yield[J]. Agricultural water management，2012，113(10)：1－9.

[7] 王廷才，屈保中，黄长春. 变频调速系统设计与应用[M]. 北京：机械工业出版社，2012.

[8] HANSON B，WEIGAND C，ORLOFF S. Performance of electric irrigation pumping plants using variable frequency drives[J]. Journal of irrigation & drainage engineering，1996，122(3)：179－182.

[9] BURT C M，PIAO X，GAUDI F，et al. Electric motor efficiency under variable frequencies and loads[J]. Journal of irrigation & drainage engineering，2008，134(2)：129－136.

[10] 殷佳琳，王舒华，张文君. 基于 PLC 的变频恒压供水系统设计[J]. 控制工程，2014，21(S1)：309－311.
YIN Jialin，WANG Shuhua，ZHANG Wenjun. Design of frequency conversion and constant pressure water supply system based on PLC[J]. Control engineering of China，2014，21(S1)：309－311.(in Chinese)

[11] 李浩，李金山，段福义，等. 基于 PLC 的微灌变频控制系统的设计与应用[J]. 中国农村水利水电，2015(4)：22－25.
LI Hao，LI Jinshan，DUAN Fuyi，et al. Design and application of frequency conversion control system for micro-irrigation based on PLC technology[J]. China rural water and hydropower，2015(4)：22－25.(in Chinese)

[12] 中华人民共和国住房和城乡建设部，中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 微灌工程技术规范：GB/T 50485—2009[S]. 北京：中国计划出版社，2009.

[13] 中华人民共和国建设部，中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 喷灌工程技术规范：GB 50085—2007[S]. 北京：中国计划出版社，2007.

[14] CARRIÓN F，MONTERO J，TARJUELO J M，et al. Design of sprinkler irrigation subunit of minimum cost with proper operation. application at corn crop in Spain[J]. Water resources management，2014，28(14)：5073－5089.

（责任编辑　谈国鹏）