

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.12.014

承压水地层悬挂止水帷幕坑内降水 引起地表沉降解析

孙大朋¹, 吴云涛², 汪鹏程²

(1. 中铁建设集团有限公司, 北京 100040; 2. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:在含水层厚度较大时,从经济性考虑通常采用悬挂式止水帷幕降水。文章基于构建深基坑墙-井渗流系统,将降水引起的作用力等效为施加在上覆土层和承压含水层交界面处的附加力,引入 Mindlin 位移解,提出悬挂式止水帷幕条件下深基坑群井降水引起的地表沉降计算公式,适用于止水帷幕插入比大于 0.6 且抽水井插入深度相对较短的情形,探究了止水帷幕插入比、基坑内水头降深、基坑半径与承压含水层厚度之比对地表沉降值的影响。研究结果在合肥某高铁站站房工程承压水地层深基坑降水问题中得到较好的实际应用,为其他类似工程降水方案优化提供了参考。

关键词:承压水;止水帷幕;群井降水;Mindlin 位移解;地表沉降

中图分类号:TU463 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)12-1679-06

Analysis of surface settlement caused by group wells dewatering in suspended waterproof curtain for deep foundation pit under confined aquifer conditions

SUN Dapeng¹, WU Yuntao², WANG Pengcheng²

(1. China Railway Construction Group Co., Ltd., Beijing 100040, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: When the thickness of the aquifer is large, the suspended waterproof curtain is usually used for economic consideration. Based on the construction of the wall-well seepage system of deep foundation pit, the force caused by dewatering is equivalent to the additional force exerted on the interface of overlying soil layer and confined aquifer, and the Mindlin displacement solution is introduced to put forward the calculation formula of the surface settlement caused by the deep foundation pit group wells dewatering under the condition of suspended waterproof curtain. It is suitable for the situation where the curtain insertion ratio is greater than 0.6 and the pumping well insertion depth is relatively shallow. The influence of curtain insertion ratio, the depth of water head in foundation pit, the ratio of foundation pit radius to the thickness of confined aquifer on the surface settlement value is investigated. The research results have been well applied in the dewatering problem of deep foundation pit with confined aquifer in the station building project of a high-speed railway station in Hefei City, and provide reference for the optimization of dewatering schemes in other similar projects.

Key words: confined aquifer; waterproof curtain; group wells dewatering; Mindlin displacement solution; surface settlement

收稿日期:2023-05-19;修回日期:2023-06-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51979068)

作者简介:孙大朋(1983—),男,河南襄城人,中铁建设集团有限公司高级工程师。

0 引 言

含水层可以分成非承压含水层和承压含水层,当其顶板和底板均为弱透土层,且其中水压力高于静水压力的含水层称为承压含水层。合肥地区的粉质黏土层或粉土层中普遍含有承压水,对该地区的深基坑工程、地铁车站等地下结构工程施工具有较大影响。地下工程在承压含水层中进行基坑工程施工存在坑底管涌、突水等重大安全风险。坑底管涌突水风险随着深大基坑开挖时承压含水层上覆土压力的减小而更为明显^[1-2]。为防止基坑突水和管涌事故发生,往往需要在基坑开挖前对承压含水层进行降压处理。但承压层降水在降低承压水水头的同时,还会引起地表沉降^[3-5]。

目前已有许多学者深入研究了承压含水层降水对地表沉降的影响。文献[6]在假定一维竖向固结的条件下得出由承压水减压引起的固结沉降计算方法;文献[7]将降水影响范围内的附加荷载积分求和,等效成一集中力求解地表任意一点的沉降,但这种简化方法的计算结果存在较大误差;文献[8]把降水影响范围内的附加荷载看成作用在承压层顶板上的非均匀面力,在 Mindlin 解的基础上,推导完整单井抽水下的地表沉降公式;文献[9]考虑采水层及上覆黏土层的层间耦合作用机制,将地表沉降简化为深部抽水层因应力重分布不断发生变形沉降并逐渐传递至地表的过程,推导出完整单井抽水下的地表沉降公式;文献[10-11]考虑因水位降低引起的有效应力增加和摩阻力导致的有效应力减少,应用线性微分方程叠加原理论证非承压含水层和承压含水层单井抽水时地表沉降和距离遵循 $s-\ln r$ 的线性关系;文献[12-13]推导出群井抽水下地表沉降和距离同样遵循 $s-\ln r$ 的线性关系,但其理论仅适用于求解距离降水中心一定距离以外的地表沉降。

综上所述,现有诸多理论研究仅涉及单井抽水导致的地表沉降,而群井抽水导致的地表沉降理论研究仍然有较多空白,原因是群井降水中土层的渗流状态复杂而难以描述,如何构建群井抽水渗流模型是问题的关键。工程中为防止群井抽水对周边地表产生过大沉降而设置止水帷幕隔断,实践证明效果良好。理论上来说止水帷幕长度应该穿过含水层嵌入到隔水层,但实际工程中如果含水层厚度特别大而难以做到施工完整止水帷幕或设置完整止水帷幕特别不经济时,往往将

止水帷幕设计成悬挂式。采用悬挂式止水帷幕时,坑内坑外仍有水力联系,坑内抽水时坑外一定范围内地表必然有沉降,目前对于悬挂式止水帷幕条件下基坑降水减压后地表沉降理论解的研究仍然不多。

本文研究了合肥某高铁站站房工程涉及到的承压水地层深基坑降水问题。为保证承压水降水方案的有效性、安全性和良好的经济性,确保基坑工程顺利实施,需对承压水地层降水问题进行针对性研究。基于此,本文建立深基坑墙-井渗流系统,结合承压含水层非完整井的稳定渗流计算,引入 Mindlin 位移解,推导悬挂式止水帷幕条件下深基坑群井降水引起的地表沉降公式,分析地表沉降规律,为此类工程提供优化降水方案、评估降水对周边环境的影响、保证工程安全。

1 承压水群井降压引起的附加力

1.1 深基坑墙-井渗流系统

圆形深基坑承压含水层有止水帷幕群井降水模型的平面及监测点布置如图 1 所示。坑内抽水群井完全内包于止水帷幕。基坑降水过程为坑外水流绕过止水帷幕进入基坑内,并于基坑底部垂直向上渗流,然后径向流入抽水井内。本文作如下假定:①承压含水层均质各向同性,水平等厚,侧向无限延伸;②承压含水层抽水时地下水服从 Darcy 定律;③承压含水层的顶底板均为严格的隔水层,无越流和竖向补给;④基坑内群井抽水工作,坑内承压水头线简化为水平线;⑤群井插入承压含水层深度较浅,可等效为抽水点位于承压含水层顶部;⑥不考虑止水帷幕厚度的影响。

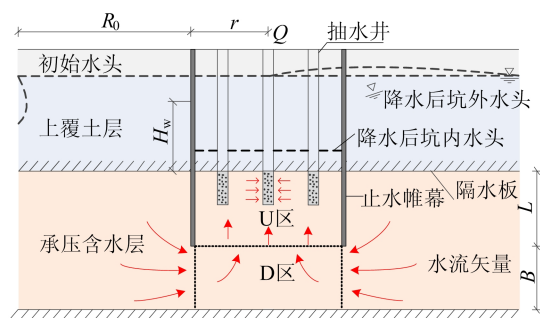


图 1 平面及监测点布置

参考文献[14]的墙-井渗流系统,将渗流场以假想的虚线分为上部渗流场 U 区和下部渗流场 D 区,由于抽水井插入承压层深度相对止水帷

幕插入深度较小,可等效 U 区内仅发生竖直向上的渗流。若忽略渗流方向变化的水头损失,则上部渗流场通过 U 区的水流流量 Q_1 为:

$$Q_1 = k_v s \frac{H_w - h_0}{2L} \quad (1)$$

其中: k_v 为承压含水层的竖直渗透系数; s 为基坑的平面面积; H_w 为坑外井边水头; h_0 为坑内水头; L 为上部渗流场 U 区厚度,也为止水帷幕插入承压含水层的深度。

当止水帷幕插入比 L/M 较大时,可将该模型简化为井壁进水的承压含水层非完整井,则下部渗流场通过 D 区的水流流量 Q_2 可通过文献[15]的大井计算公式求得:

$$Q_2 = \frac{2\pi k_h M(H - H_w)}{\ln(R_0/r) + f_0} \quad (2)$$

$$f_0 = \frac{B}{L} \ln\left(1 + \frac{L}{M} \frac{B}{r}\right) \quad (3)$$

其中: H 为承压含水层初始水头; H_w 为坑外井边水头; h_0 为坑内井中水头; k_h 为水平渗透系数; r 为大井半径; R_0 为大井的减压影响半径; M 为承压含水层厚度; B 为下部渗流场 D 区厚度; f_0 为不完整井插入比 $L/M < 1.0$ 时所引起附加阻力的局部阻抗,为无量纲值。式(3)形式简单、精度高,适用范围较广。

令式(1)与式(2)相等,即可求得坑外井边水头 H_w 为:

$$H_w = h_0 + \alpha(H - h_0) \quad (4)$$

参数 α 为:

$$\alpha = \frac{2\pi M \frac{k_h}{k_v}}{2\pi M \frac{k_h}{k_v} + \frac{S}{2L} \left[\ln \frac{R_0}{r} + \frac{B}{L} \left(1 + \frac{LB}{Mr} \right) \right]} \quad (5)$$

文献[14]通过有限元计算分析验证了在止水帷幕插入比 $L/M > 0.6$ 、基坑半径与承压含水层厚度之比 $r/M < 2.0$ 时式(5)具有较好的精度。

已知坑外井边水流流量 Q_2 和坑外井边水头 H_w ,由式(2)可反求坑外水头曲线为:

$$H_R = \frac{Q_2 [\ln(R/r) + f_0]}{2\pi k_h M} + H_w \quad (6)$$

其中, R 为基坑中心到边界的长度。

1.2 降压对上覆土层产生的附加力

承压层降压前充满承压水,此时承压水对上覆土层存在顶托力。降压后承压层水头降低,承压水对上覆土层的顶托力大幅下降,相当于在上覆土层底部的不透水界面上施加一个与水头降落

高度成正比的附加应力,该附加应力会使上覆土层产生形变,导致地表发生沉降。深基坑在止水帷幕作用下群井降水产生的附加应力如图 2 所示,基坑内在群井作用下水头变化为水平线,因此坑内产生的附加应力为一恒定值 f_1 。基坑外作用力的分布和承压层水头下降分布相同,附加力 f_2 和力的作用点离基坑的距离呈对数函数关系,表达式为:

$$\begin{cases} f_1 = \gamma_w(H - h_0); \\ f_2 = \gamma_w \left[H - \frac{Q_1 \ln(R/r) + f_0}{2\pi k_h} - H_w \right] \end{cases} \quad (7)$$

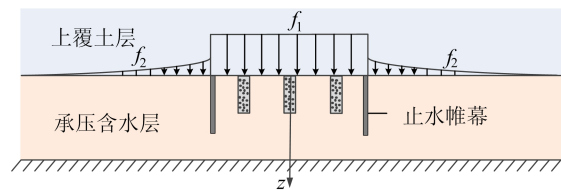


图 2 降水在上覆土层中产生的作用力

2 地表沉降计算

为求解不透水界面上施加的附加应力引起的地表沉降,本文引入针对均质半无限空间的 Mindlin 位移解。Mindlin 解给出了位于半无限空间体内 $O(0,0,h)$ 点处的集中力 F 的作用下,在半无限体内 $M(x,y,z)$ 点处产生的竖向位移可表达式为:

$$w = \frac{F(1+\mu)}{8\pi E(1-\mu)} \left[\frac{3-4\mu}{R_1} + \frac{8(1-\mu)^2 - (3-4\mu)}{R_2} + \frac{(z-h)^2}{R_1^3} + \frac{(3-4\mu)(z+h)^2 - 2hz}{R_2^3} + \frac{6hz(z+h)^2}{R_2^5} \right] \quad (8)$$

其中: E 为土的弹性模量; μ 为土的泊松比; h 为集中力作用点深度; $R_1 = \sqrt{x^2 + y^2 + (z-h)^2}$;
 $R_2 = \sqrt{x^2 + y^2 + (z+h)^2}$ 。

同样,根据 Mindlin 解,位于半无限空间内每一点 (ϵ, γ, h) 的集中力 F 作用下,在半无限体内 $M(x,y,z)$ 点产生的竖向总位移为:

$$w = \iiint_{\Omega} \frac{F(\epsilon, \gamma, h)(1+\mu)}{8\pi E(1-\mu)} \left[\frac{3-4\mu}{R_1} + \frac{8(1-\mu)^2 - (3-4\mu)}{R_2} + \frac{(z-h)^2}{R_1^3} + \frac{(3-4\mu)(z+h)^2 - 2hz}{R_2^3} + \frac{6hz(z+h)^2}{R_2^5} \right] dh d\epsilon d\gamma \quad (9)$$

其中: $R_1 = \sqrt{(x-\epsilon)^2 + (y-\gamma)^2 + (z-h)^2}$; $R_2 = \sqrt{(x-\epsilon)^2 + (y-\gamma)^2 + (z+h)^2}$; $F(x, y, h)$ 为作用在均质半无限空间内任意一点的三维体力。

为求解集中力 $F(x, y, h)$ 在地表任意点 $P(R, 0, 0)$ 处产生的竖向位移, 做移轴变换, 如图 3 所示, 此时 $R_1 = R_2 = [(x-R)^2 + y^2 + h^2]^{1/2}$, 根据式(9) 可求得地表位移为:

$$w = \iint_{\Omega} \frac{F(x, y, h)(1+\mu)}{2\pi E} \left[\frac{2(1-\mu)}{R_1} + \frac{h^2}{R_1^3} \right] dx dy \quad (10)$$

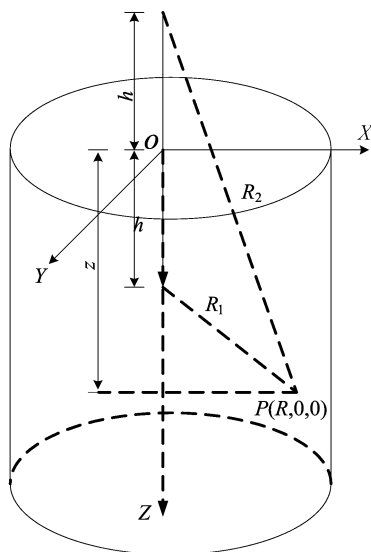


图 3 移轴变换示意图

将式(7) 代入式(10), 可求得止水帷幕作用下群井降水产生的地表沉降 S 为:

$$S = \iint_{\Omega_1} \gamma_w (H - h_0) \frac{(1+\mu)}{2\pi E} \left[\frac{2(1-\mu)}{R_1} + \frac{h^2}{R_1^3} \right] dx dy + \iint_{\Omega_2} \gamma_w \left\{ H - \frac{Q_2 [\ln(R/r) + f_0]}{2\pi k_h M} - H_w \right\} \frac{(1+\mu)}{2\pi E} \left[\frac{2(1-\mu)}{R_1} + \frac{h^2}{R_1^3} \right] dx dy \quad (11)$$

其中: Ω_1 为 $0 < x^2 + y^2 < r^2$; Ω_2 为 $r^2 \leq x^2 + y^2 < R_0^2$ 。

3 算例分析及数值验证

对某群井降压工程进行计算, 假设降水后周边渗流稳定不变, 根据公式求解承压含水层降水至顶板下引起的地表沉降, 选取土层参数: 上覆土层(隔水层) 厚度 $h = 20$ m; 承压含水层厚度 $M = 40$ m; 水平渗透系数 $k_h = 50$ m/d; 竖直渗透系数 $k_v = 15$ m/d; 上覆土层模量 $E = 100$ MPa; 上覆

土层泊松比 $\mu = 0.3$; 承压含水层初始水头 $H = 18$ m; 坑内井中水头 $h_0 = 5$ m; 大井基坑半径 $r = 25$ m; 基坑面积 $S_0 = 1\,963.5$ m²; 大井的减压影响半径 $R_0 = 300$ m; 止水帷幕插入深度 $L = 25$ m; 下部渗流场厚度 $B = 15$ m。止水帷幕插入比 $L/M = 0.625 > 0.6$, 基坑半径与承压水含水层厚度之比 $r/M = 0.625 < 2.0$, 满足精度使用条件。

将土层参数代入式(4)、式(5) 可求得基坑外井边水头高度 $H_w = 16.78$ m。将土层参数代入式(12) 求得地表沉降曲线如图 4 所示。地表沉降最大值 5.6 cm 出现在基坑中心处, 并在距离基坑中心 600 m 范围内呈对数型减小。

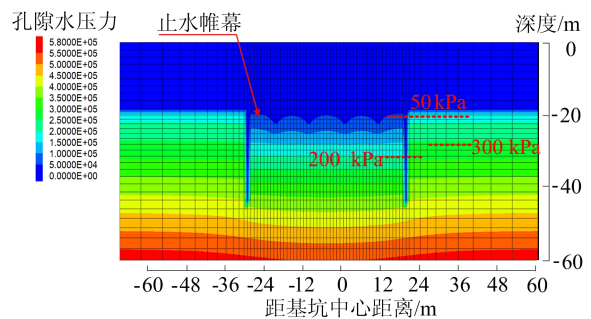


图 4 基坑降水在稳态条件下承压含水层孔隙水压

为验证本文理论公式的准确性和合理性, 将理论计算结果与数值模拟计算结果进行比较。数值模拟采用 FLAC3D 三维有限差分程序, 模型平面尺寸为 $1\,200$ m \times $1\,200$ m \times 60 m, 降水中心区域采用小网格划分, 较远区域采用放射增大划分。模型土体视为半无限空间弹性均质体, 采用弹性本构模型。土体密度 $\rho = 1.8$ g/m³ 的细砂, 体积模量 $K = 83$ MPa, 剪切模量 $G = 38.5$ MPa, 泊松比 $\mu = 0.3$ 。基坑内群井降水使基坑内承压含水层水头降至 5 m 并达到稳态, 经 FLAC3D 模拟计算, 基坑 60 m 范围内, 基坑降水后 S 变化曲线如图 5 所示。

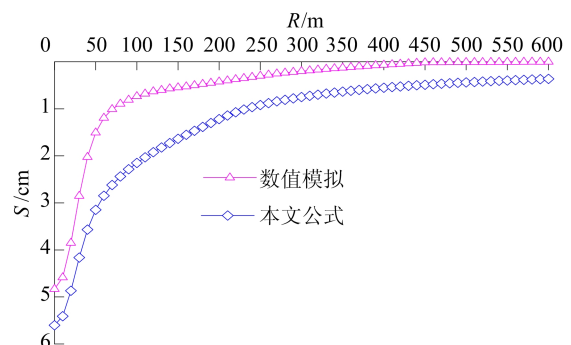


图 5 基坑降水后 S 变化曲线

从图 5 可以看出,基坑内降压效果明显,且水头等值曲线在基坑内呈水平分布,证明本文等效基坑内上部渗流场仅发生竖直向上的渗流是符合的。模型采用流固耦合相互作用分析,计算后得地表沉降曲线。相比于理论计算的沉降曲线,数值模拟的沉降曲线变化速率快一些,地表沉降影响范围稍小。原因是 Mindlin 位移解是假设研究对象为均质半无限空间体,推导时抽水含水层和上覆黏土层均为有限厚度的缘故,且忽略了止水帷幕对地表沉降的阻挡作用,故本文理论公式所求结果偏大。

4 参数影响分析

以工程实例为基础对理论公式进行参数影响分析, S 随 L/M 变化的曲线如图 6 所示。从图 6 可以看出,随着止水帷幕插入比增大,基坑降水产生的地表沉降影响越小。原因是止水帷幕插入深度越深,坑外水头降深越小,由坑外水头降低造成的地表沉降影响越小。但随着止水帷幕插入深度不断增长,带来的收益并非愈大,图 6 中在止水帷幕插入深度等差增长时,地表沉降变化率呈负相关关系,因此实际工程中可根据工程效益合理设置止水帷幕插入深度。

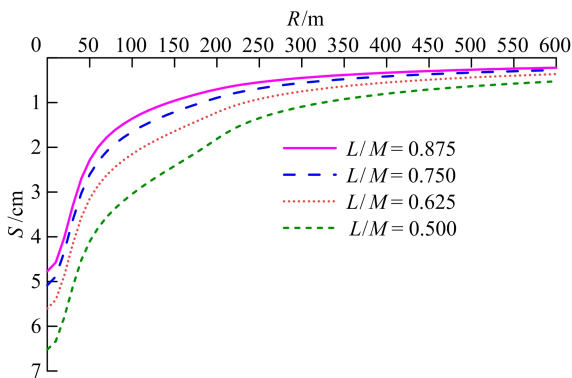


图 6 S 随 L/M 变化的曲线

S 随 h_w 变化的曲线如图 7 所示。从图 7 可以看出,坑内水头降深越大,地表沉降值越大,但 h_w 的变化引起 S 的变幅较小,沉降影响半径变化较小,说明止水帷幕在限制了坑外水头降深的同时,也有效地减小了由坑外水头降深产生的地表沉降。

S 随 r/M 变化的曲线如图 8 所示。在参数影响分析中,文献[14]通过有限元分析和理论计算发现当 r/M 增大时,基坑单位面积抽水量呈现先增后减再趋于稳定的趋势。但当承压含水层厚度

不变时, r 越大,基坑群井抽水所导致的 S 越大。原因是虽然基坑单位抽水量会减小,但基坑总抽水量和抽水影响半径在增大。从图 8 还可以看出, r/M 越大,地表沉降的增长速率越快。

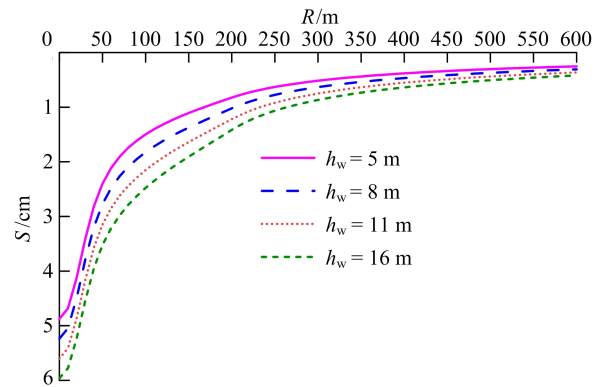


图 7 S 随 h_w 变化的曲线

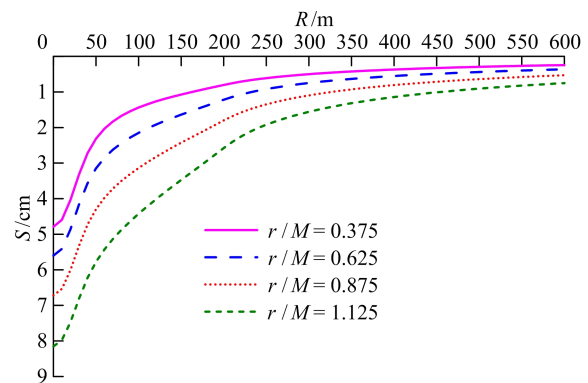


图 8 S 随 r/M 变化的曲线

5 结 论

1) 结合墙-井渗流系统模型,引入 Mindlin 位移解,给出止水帷幕作用下深基坑群井降水引起的地表沉降公式,能够估算抽水影响范围内任一点的地表沉降大小。

2) 通过工程实例说明本文地表沉降公式表现为对数型曲线,与有限差分数值模拟结果相比,沉降分布规律相同,但本文公式计算结果稍大。

3) 止水帷幕插入比 L/M 、基坑内水头降深、基坑半径与承压水含水层厚度之比 r/M 的大小对地表沉降有较大的影响。止水帷幕插入比 L/M 越大,地表沉降越小,但两者增长率为负相关关系,可综合考虑工程造价和地表沉降控制值来合理设置止水帷幕插入深度。基坑内水头降深、基坑半径与承压水含水层厚度之比 r/M 越大,引起的地表沉降越大,工程中应合理控制两者大小以防地表产生较大沉降。

[参 考 文 献]

- [1] 刘国彬,王洪新. 上海浅层粉砂地层承压水对基坑的危害及治理[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(6): 790-792.
- [2] 蔡来炳,周红波. 城市轨道交通深基坑工程承压水风险与控制研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2015, 35(5): 617-623.
- [3] 曾超峰,薛秀丽,宋伟伟,等. 开挖前降水引发基坑变形机制模型试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(9): 2963-2972, 2983.
- [4] ZHOU N Q, VERMEER P A, LUO R X, et al. Numerical simulation of deep foundation pit dewatering and optimization of controlling land subsidence[J]. Engineering Geology, 2010, 114(3): 251-260.
- [5] ZHU L, GONG H L, CHEN Y, et al. Effects of water diversion project on groundwater system and land subsidence in Beijing[J]. Engineering Geology, 2020, 276: 105763.
- [6] 骆冠勇,潘泓,曹洪,等. 承压水减压引起的沉降分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊 2): 196-200.
- [7] 王春波,丁文其,刘文军,等. 非稳定承压水降水引起土层沉降分布规律分析[J]. 同济大学学报, 2013, 41(3): 361-367.
- [8] 龚晓南,张杰. 承压水降压引起的上覆土层沉降分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(1): 145-149.
- [9] 狄胜同. 地下水开采导致地面沉降全过程宏观演化机理及趋势预测研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [10] 杨建民,隋颜阳,纪森林. 抽水引起的土层与地面沉降规律[J]. 铁道建筑, 2018, 58(2): 92-99.
- [11] 杨建民,张辉. 承压层抽水试验中地面沉降曲线斜率的确定[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(增刊 2): 925-933.
- [12] 杨建民,纪森林. 抽水导致区域性地面沉降中的 $s-\ln r$ 线性关系[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(9): 1606-1614.
- [13] 杨建民,霍王文. 线状和面状群井抽水导致场外地面沉降呈 $s-\ln r$ 线性关系[J]. 岩土力学, 2018, 39(10): 3565-3572.
- [14] 李瑛,陈东,刘兴旺,等. 悬挂式止水帷幕深基坑减压降水的简化计算方法[J]. 岩土力学, 2021, 42(3): 826-832, 862.
- [15] 沙金焯. 不完整井渗流的近似计算[J]. 岩土工程学报, 1985, 17(5): 36-48.

(责任编辑 闫杏丽)

(上接第 1628 页)

[参 考 文 献]

- [1] BOUZAKIS K D, LILI E, MICHAELIDIS N, et al. Manufacturing of cylindrical gears by generating cutting processes; a critical synthesis of analysis methods[J]. CIRP Annals Manufacturing Technology, 2008, 57(2): 676-696.
- [2] 田晓青. 柔性电子齿轮箱设计及精度控制方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014.
- [3] SUN D, TONG M C. A Synchronization approach for the minimization of contouring errors of CNC machine tools[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2009, 6(4): 720-729.
- [4] TSAO T C, TOMIZUKA M. Zero phase error tracking algorithm for digital control[J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1987, 109(4): 349-354.
- [5] YEH S S, HSU P L. An optimal and adaptive design of the feedforward motion controller[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 1999, 4(4): 428-439.
- [6] TORFS D, SCHUTTER J D, SWEVERS J. Extended bandwidth zero phase error tracking control of nonminimal phase systems[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 1992, 114(3): 347-351.
- [7] KOREN Y. Cross-coupled biaxial computer control for manufacturing systems[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1980, 102(4): 265-272.
- [8] 韩江,吴路路,田晓青,等. 电子齿轮箱同步耦合控制方法[J]. 中国机械工程, 2016, 27(7): 877-881, 887.
- [9] HAN J, JIANG H, TIAN X Q, et al. Online gear hobbing error estimation based on shaft vibration signal analysis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 167: 108559.
- [10] DENG F, TANG Q, LI X, et al. Study on mapping rules and compensation methods of cutting-force-induced errors and process machining precision in gear hobbing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 9: 3859-3871.
- [11] SUN S L, WANG S L, WANG Y W, et al. Prediction and optimization of hobbing gear geometric deviations[J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 120: 288-301.
- [12] HOU Y H, YAN C P, CHEN J L, et al. Research on geometric error prediction of high speed dry cutting gear hobbing based on MPGA and BPNN[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1939(1): 012110.
- [13] 韩京清. 一类不确定对象的扩张状态观测器[J]. 控制与决策, 1995, 10(1): 85-88.
- [14] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 19-23.
- [15] YAO J Y, DENG W X. Active disturbance rejection adaptive control of hydraulic servo systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(10): 8023-8032.
- [16] STANKOVIC M R, MANOJLOVIC S M, SIMIC S M, et al. FPGA system-level based design of multi-axis ADRC controller[J]. Mechatronics, 2016, 40: 146-155.

(责任编辑 胡亚敏)