

深大基坑施工变形的智能控制技术

Intelligent control of deformation during excavation for large and deep foundation

袁金荣¹, 王文明², 孙 钧³

(1. 上海市隧道工程轨道交通设计研究院, 上海 200070; 2. 中原油田, 山东 东明 274511; 3. 同济大学, 上海 200092)

摘 要: 利用神经网络(ANN)和模糊控制(FC)理论, 采用预测控制的思想, 建立了一套集基坑施工变形预测和控制于一体的智能化施工控制系统, 该系统由神经网络预测器和模糊控制器组成。神经网络预测器对基坑变形进行连续滚动的多步预测, 模糊控制器根据预测结果对施工参数进行决策控制。在 MATLAB 5.2 平台支持下, 研制了相应的基坑变形控制软件系统。实际应用结果表明, 该智能控制系统对深基坑的安全施工过程具有较好的控制效果, 真正做到了施工过程的实时、动态、智能化控制。软件系统操作界面简单、直观, 便于实际工程应用。

关键词: 深基坑; 模糊控制; 神经网络; 智能控制; MATLAB; 软件系统

中图分类号: TU 47

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2002)04-0460-05

作者简介: 袁金荣(1967-), 男, 贵州习水人, 博士, 工程师, 主要从事地下结构设计及地下工程施工变形的智能预测控制研究。

YUAN Jin-rong¹, WANG Wen-ming², SUN Jun³

(1. Shanghai Tunnel Engineering & Rail Transit Design and Research Institute, Shanghai 200070, China; 2. Zhongyuan Oilfield, Dongming Shandong 274511, China; 3. Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: This paper discusses application of artificial neural networks and fuzzy logical theory to control the deformation of diaphragm wall and ground settlements during excavation for large deep foundation. Based on MATLAB 5.2, an intelligent control system for safety of large foundation excavation was developed. The system has been tested on a large soft soil foundation excavation project in Shanghai. The results showed that the control system is very effective as a means of intelligent control for deformation of soil and diaphragm wall during foundation excavation.

Key words: deep excavation; fuzzy control; artificial neural networks; intelligent control; MATLAB; software system

1 引 言*

城市地下交通运输网和高层大楼的大量兴建, 使得城市建筑密集地区的大型深基坑工程越来越多, 由此引起的环境土工公害问题也十分突出。如何在保证工程自身稳定的同时, 有效地控制基坑周围土体移动以保证周围环境的安全, 已成为人们共同关注的问题。由于土体固有力学性状的复杂性以及施工过程中的种种不确定因素, 基坑的实际变形很难用统一的公式进行描述, 其变形量更表现出相当程度的随机性, 为设计和施工带来很大的难度, 为此, 愈来愈多的学者和工程技术人员认识到现场监测的重要性, 并提出了信息化施工方法。

目前已有研究者从系统论和控制论着手进行研究, 将岩土介质和与之相互作用的结构物视为统一系统, 并应用系统学理论和方法来研究岩土系统的发展演化规律。刘维宁^[1]等运用系统论和控制论方法, 建立了城市地下工程施工环境影响的控制理论体系, 提出了地下工程环境动态最优控制策略制定程序; 冯夏庭等^[2]应用人工智能、神经网络理论, 提出了地下工程力学综合集成智能的分析方法; 张清等^[3]利用神经网络对岩石的力学性态进行了预测。以上研究多在岩石力学方面开展, 应用于软土工程的研究相对较少, 同济大学熊

祚森^[4]利用非线性动力学理论对基坑系统变形及其稳定性进行了反演分析; 袁金荣等^[5]利用神经网络对深基坑墙体位移进行了动态预测, 取得了较好的结果。

袁金荣^[6]针对地下工程施工特点和存在的问题, 研究了地下工程施工变形的智能预测与控制方法。本文在笔者博士论文基础上, 进一步讨论深基坑施工变形的智能控制技术, 利用神经网络和模糊控制理论, 建立一套集基坑施工变形预测和控制于一体的智能化施工控制理论和方法, 并将其用于工程实践。

2 基坑施工地层移动预测及变形控制措施

基坑施工变形的预测方法较多, 有回归分析、灰色预测、时间序列分析、神经网络分析等, 但研究表明^[5, 6, 7], 神经网络是解决基坑施工变形预测的最有效方法之一, 只要有充分可靠的监测数据, 选择合适的神经网络模型有望使目前的岩土工程研究突破传统方法的瓶颈。

预测基坑施工过程中的变形, 并不是最终目的, 为

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59978034)

收稿日期: 2001-10-24

了保证基坑自身的稳定和周围环境的安全,必须将施工产生的变形控制在一定的容许范围内,这就是变形控制问题,也是人们最终关心的问题。

目前掌握的基坑变形控制手段有以下几种:

(1) 预注浆:即在基坑开挖前对基坑周围土体进行注浆处理,以改良土性,达到控制变形的目的。

(2) 跟踪注浆:基坑开挖施工时,若发现某处地层位移过大,出现危象,立即进行跟踪注浆,加固土体。

(3) 工后注浆:施工完成后,由于土体流变效应,变形仍在继续发展,此时可通过工后注浆阻止土体的进一步变形。

(4) 调整施工参数:以上三种(三阶段)控制方法都属于被动控制,需要花费大量的注浆费用,而且要延长工期,为此,提出一种主动控制策略:调整施工参数。它是在基坑施工过程中,对关键部位进行实时监测,根据监测数据对未来开挖步或未来几天的变形进行动态预测,根据预测结果与变形警戒值作比较,若预测结果小于变形警戒值,则不需要改变施工参数,按目前施工步序和参数继续施工;若预测值达到变形警戒值,则通过某种控制策略,调整适当的施工参数,从而控制后续施工的变形。

对于长条形(如地铁车站基坑)深基坑,最主要的施工参数有^[8]:①分层开挖的层数 N (每支撑一排为一层);②每层开挖的深度 h (分层厚度,基本上为上下排支撑的竖向间距);③每层开挖的步长 L (每两个支撑的宽度为一开挖步);④基坑挡墙内的被动区土体,在每层土方开挖后,挡墙未有支撑前的最大暴露时间 T_r 。

上述四个施工参数中,每一个都对基坑的变形有一定影响,但其影响程度不同,研究表明^[6]:无支撑暴露时间 T_r 对基坑变形的影响最大,为了减小变形量,首先考虑减小无支撑暴露时间 T_r ,其次是减小开挖步长 L 和分层厚度 h ,由于分层开挖的层数 N 与分层厚度有密切的关系,减小分层厚度即意味着增加分层开挖的层数,所以,把施工参数分层数舍去。这样,得到实际的施工控制参数为无支撑暴露时间 T_r 、开挖步长 L 和分层厚度 h 。

3 预测控制的基本思想

预测控制是一种基于模型的控制,它是70年代发展起来的一种新的控制方法,具有预测模型、滚动优化和反馈校正等特点^[9]。

预测控制对模型的要求不同于其他传统的控制,它强调的是模型的功能而不是结构,只要模型可利用过去已知的数据预测未来的系统输出行为就可以作为

预测控制的模型。预测控制是一种优化控制算法,但它与通常的离散最优控制算法不同,不是采用一个不变的全局最优化目标,而是采用滚动式的有限时域优化策略,也就是说,优化过程不是一次离线完成,而是反复在线进行。这种局部的有限时域的优化目标使它只能获得全局的次优解。但是由于优化过程反复在线进行,而且能更为及时地校正因模型失配、时变和干扰等引起的不确定性,始终把优化过程建立在从实际过程中获得的最新信息的基础上,因此可以获得鲁棒性较满意的结果。

由于实际系统存在着非线性、时变、模型失配和干扰等不确定因素,使得基于模型的预测不可能准确地沿某个参考轨迹达到预期的设定值。在预测控制中,通过系统的预先设定值与模型的预测值相比较,得出模型的预测误差,通过极小化某个目标函数导出未来的控制序列,这个控制序列使未来的预测序列沿某个参考轨迹逐步达到设定值,从而使系统演化朝着预期的方向发展。正是这种由模型预测再加反馈校正的过程使预测控制具有很强的抗干扰和克服系统不确定性的能力。观测控制的结构框图如图1。

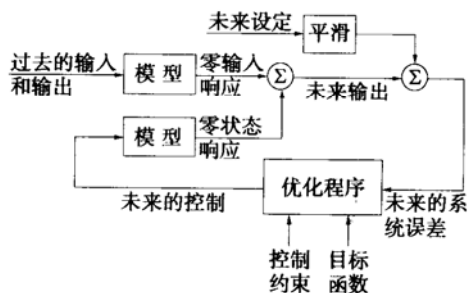


图1 预测控制的基本结构

Fig. 1 Structure of the predictive control

预测控制算法如下:

(1) 设定期望的未来输出序列 $y_r(t+j)$, $j=1, 2, \dots, N$ 。设定值序列 $\{y_r(t+j)\}$ 可能是一个已知的时间序列,也可能在一个相当长的时间长度内始终等于某个常数值 y_{r0} 。例如 $y_{r0} = y_r(t+1) = y_r(t+2) = \dots = y_r(t+N)$ 。

(2) 借助某个预测模型,产生预测输出 $y(t+j|t)$, $j=1, 2, \dots, N$ 。

(3) 计算预测结果与设定值的误差 $e(t+j) = y_r(t+j) - y(t+j|t)$ 。

(4) 求性能判据 J 的最小值,得最优控制序列 $u(t+j)$, $j=1, 2, \dots, N$ 。

预测控制中常常采用增量控制来代替全值控制,当经历 N_u 个未来控制后,控制增量将变为零。参量 N_u 称为控制长度。在当前时刻 t ,仅对过程施加当前

控制, 当前控制增量 $\Delta u(t) = u(t) - u(t-1)$ 。

(5) 采用 $\Delta u(t)$ 作为第一个控制信号。

(6) 将所有序列平移, 准备进行下次采样, 在下次采样后, 重复上述各步, 以便根据最新实测数据更新未来的控制序列, 即实现滚动优化。

上述控制结构, 由一个预测器和一个控制器组成。本文研究的基坑施工变形的预测控制, 采用神经网络作为预测器对墙体位移和周围关键部位地面沉降进行多步预测, 再根据预测结果与变形警戒值之间的差值和当前变形速率, 采用模糊控制作为控制器作出控制决策, 调整适当的施工参数, 以减小后续施工过程中的变形, 达到控制变形的目的, 从而实现基坑施工变形的智能控制。

3.1 基坑施工变形的神经网络多步预测

如前所述, 神经网络由于独特的非线性处理能力和自学习功能, 在基坑施工变形预测中显示了很强的优越性。但基于神经网络的时间序列预测均为单步预测方法, 每次只能对下一时间步进行预测, 而在基坑施工过程中, 常需要对未来一段时间连续进行可靠预测。笔者曾提出了基坑施工变形的神经网络多步预测方法^[10], 本文研究的预测器采用神经网络多步预测方法实现。

3.2 基坑施工变形模糊控制

在理论方面, 采用模糊控制而不是其它控制算法的原因在于: 第一, 模糊控制是基于规则的, 既可以利用误差等数据信息, 也可以利用专家的经验知识, 这就为设计合适的控制策略提供了灵活性; 第二, 模糊控制无需建立被控对象的数学模型, 由于控制面对的是某种形式的预测系统, 对这样的控制对象建立精确的数学模型是非常困难的; 第三, 模糊控制是非线性控制, 而被控的预测模型和预测对象(变形曲线)都是非线性的, 对其进行误差反馈修正, 调节器应该是非线性的。模糊控制器是万能的非线性控制器, 合理的设计和调节, 可以得出理想的预测误差修正机制。

在实用方面, 采用模糊控制的原因在于: 第一, 方便易懂, 模糊控制不同于越来越复杂化的其它控制理论, 它模仿人的控制策略, 同时也易于随时在控制中加入新的经验规则, 改善系统性能, 这样的控制便于工程技术人员理解和自行设计; 第二, 执行简便, 本文使用的模糊控制是最基本而又最常用的查表式模糊控制, 易于实现和调节, 而且运行速度很快, 可以满足各种实时性要求; 第三, 容易开发, 随着模糊控制应用的迅速普及, 现成的软件开发工具不难得到(如 MATLAB 等), 这为今后采用更优化的模糊控制方案提供了便捷的开发方式。

4 基坑施工变形智能控制的实现

每天的监测数据进入神经网络预测器, 由预测器刷新此后 10 d 的变形预测值, 系统在给出目前的变形速率和未来 10 d 的墙体位移和地面沉降预测值的同时, 自动转入模糊控制器, 由控制器根据预测值作出下一步施工决策, 发出施工指令, 施工人员根据该指令进行施工参数的调整, 进行后续施工, 同时, 后续监测数据又进入 ANN 预测器, 再预测—控制, 如此向前滚动, 直至施工结束。从而保证施工过程中的变形不会超过允许值, 真正做到信息化施工和变形的实时控制。

模糊控制器的一个输入为警戒值与预测值之差 E , 另一个输入为当前实测日变形速率 C (即当天累计变形量与前一天累计变形量之差)。输出即为后续施工的控制策略(施工参数的变化), 决策控制量的控制策略取值为: {U1(正常) = “变形正常, 请继续”, U2(轻微异常) = “变形趋势可能超过警戒值, 请减小分层厚度 h ”, U3(较危险) = “变形趋势超过警戒值, 请减小开挖步长 L ”, U4(危险) = “变形趋势超过警戒值, 请减小无支撑暴露时间 T_r ”, U5(紧急注浆) = “变形已超过警戒值, 且变形速率仍在快速发展, 请立即注浆以加固地基!”}。由 U1 到 U5, 基坑变形的危险程度逐渐增加, 也即随着基坑变形预测值与警戒值的临近, 控制器自动给出相应的需要调整的施工参数, 施工人员按照控制器的指令进行操作, 即可保证基坑的变形得到有效控制, 使基坑开挖施工正常进行。控制量 U5 实际上是一种极端情况, 在控制器中很难碰到, 因为在给出 U5 指令前, 系统已多次给出 U1 到 U4 之间的施工参数调节指令, 而施工人员一旦按指令作出调整后, 后续施工过程中的基坑变形将会相应减小, 此时控制量指针将朝着 U1 方向而不是 U5 方向偏移, 因而, 通常情况下不会出现 U5 的情况。

将输入的精确量的变化范围重新定标到某一个范围(即论域)内。实际应用中, 一般把输入量 E , C 的范围设定在 $[-6, +6]$ 之间连续变化, 利用式(1)将原精确量 E , C 的值定标到 $[-6, +6]$ 之间。

$$x_1 = -6 + \left(\frac{x_0 - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \right) \times 12 \quad (1)$$

式中 x_0 为原精确输入量; x_1 为定标后输入量; $x_{\max}$, $x_{\min}$ 分别为原精确输入量的最大、最小值。

对于本文研究的模糊控制器, 其输入量 E 的变化范围根据实际情况可取为 $[-60, +60]$, 若在运行过程中发现实际输入值大于 60, 则将其取为 60, 若小于 -60, 则取 -60。而输入量 C 的变化范围取为 $[-10, +10]$ 。

论域确定后, 将其离散化为 13 个等级, 即 $E, C \in$

$\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, 再将 $[-6, +6]$ 之间连续变化的量分成 5 档, 记为 PB(正大) PS(正小) 0(零) NS(负小) NB(负大), 将输出 U 的论域确定为 $[1, 5]$, 再将该论域分成 5 档, 记为 $U1$ (正常) $U2$ (轻微异常) $U3$ (较危险) $U4$ (危险) $U5$ (紧急注浆)。根据实际系统, 分别写出各档的隶属函数。本文取为三角形函数。根据实际施工和专家经验, 总结出该模糊控制器的控制规则如表 1。

表 1 模糊控制规则集

Table 1 Control rules of FC

C	E				
	PB	PS	0	NS	NB
PB	U1	U2	U4	U4	U5
PS	U1	U1	U4	U4	U4
0	U1	U1	U1	U2	U3
NS	U1	U1	U1	U1	U3
NB	U1	U1	U1	U1	U3

经过模糊推理合成, 得到模糊控制器的输出, 即基坑后续施工的控制策略(施工参数控制量)。由于该控制策略最终要由施工人员根据现场情况加以实施, 因此, 控制量的值不需要反模糊化, 而直接以模糊量给出。

5 工程实例

为了验证本系统的可行性, 现以上海某基坑工程为例, 对基坑施工过程中的变形进行智能预测与控制, 变形的预测和控制包括墙体的水平位移和关键位置的地面沉降。

5.1 工程概况

该基坑位于道路密集的市区, 施工场地狭小复杂。基坑平面是组合矩形, 如图 2, 尺寸为 $86\text{ m} \times 16\text{ m}$, 开挖深度 20.43 m , 端头井部分深达 24.46 m , 围护结构为地下连续墙, 深度为 36 m , 宽 1.0 m 。采用钢支撑与钢筋混凝土支撑相结合的支撑形式。沿基坑四周布设了 9 处墙体水平位移监测点, 在基坑四周不同地点共设了 34 个地面沉降观测点, 以便在施工过程中对基坑四周的地面沉降和墙体水平位移进行监测。选取基坑西侧墙体水平位移监测点 C2 和 S10, S11, S12, S23, S25, S27, S32 等 7 个沉降观测点(其位置见图 2)的监测结果利用本文的智能预测控制系统进行预测并实施控制。

5.2 基坑施工变形的智能控制结果

根据基坑的周围环境条件和基坑变形控制保护等级标准^[8], 该基坑变形控制保护等级确定为一级, 其控制要求为: 地面最大沉降量 $\leq 0.2\%H$, 围护墙最大水平位移 $\leq 0.3\%H$ 。基坑最大开挖深度 24.46 m , 则地

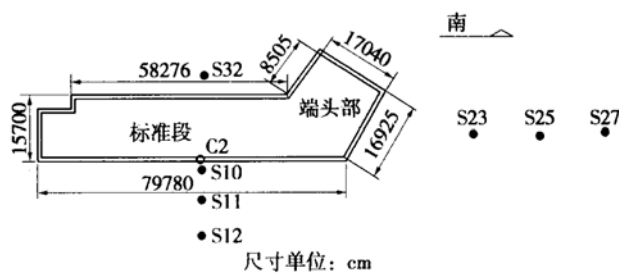


图 2 基坑平面示意图

Fig. 2 Foundation pit

面允许最大沉降量为 48.92 mm , 墙体最大水平位移警戒值为 73.38 mm , 此值即为基坑变形警戒值。

基坑开挖在 2 月 4 日以前, 预测控制系统作出的预测均在警戒值以内, 给出的施工指令为: $U1$ (“变形正常, 请继续”)。至 2 月 4 日开始, 监测结果表明, 最大墙体水平位移已达 72.21 mm , 地面沉降最大达到 43.17 mm , 当天的最大墙体水平位移速率为 2.11 mm , 沉降速率为 -0.35 mm 。神经网络预测器预测认为此后第 2 天(即 2 月 6 日)的最大墙体位移为 74.25 mm , 第 7 天(即 2 月 11 日)将达到 80.33 mm , 均超过警戒值, 预测的最大地表沉降在第 7 天(即 2 月 11 日)将达到 49.2 mm , 也超过警戒值, 模糊控制器根据预测结果和当日变形速率, 自动作出下步施工决策, 根据墙体水平位移预测值作出的决策响应为 $U2$ (较危险) = “变形趋势超过警戒值, 请减小开挖步长 L ”, 而根据地表沉降预测值作出的决策响应为 $U2$ (轻微异常) = “变形趋势可能超过警戒值, 请减小分层厚度 h ”。由于开挖步长 L 比分层厚度 h 对变形更加敏感, 因此, 模糊控制器最终给出的施工参数调节指令为“减小开挖步长 L ”。现场技术人员根据控制器给出的指令, 调整施工方案, 将开挖步长由 6 m 减为 3 m , 并做到随挖随撑, 这一措施使每步开挖中的暴露宽度减小 50% , 并将每步开挖的无支撑暴露时间由原来的 24 h 减为 16 h 。

施工方案调整后, 后续监测位移和沉降的日变形速率随之减小, 实测结果表明, 2 月 11 日的地表沉降为 45.94 mm , 墙体最大水平位移实测值为 76.99 mm , 当日墙体位移速率为 0.35 mm , 地表沉降速率为 0.02 mm , 有效控制了变形的发展。控制效果如图 3 所示。此后每天根据监测结果反馈预测控制系统, 不断进行预测—控制—再预测—再控制, 直到整个施工过程结束, 终于按要求控制了墙体位移和地表沉降, 达到了保护环境安全的要求。

6 结论与讨论

基坑施工过程作为形成工程项目实体的阶段, 必须严格地进行系统过程的控制, 因为这个阶段有许多

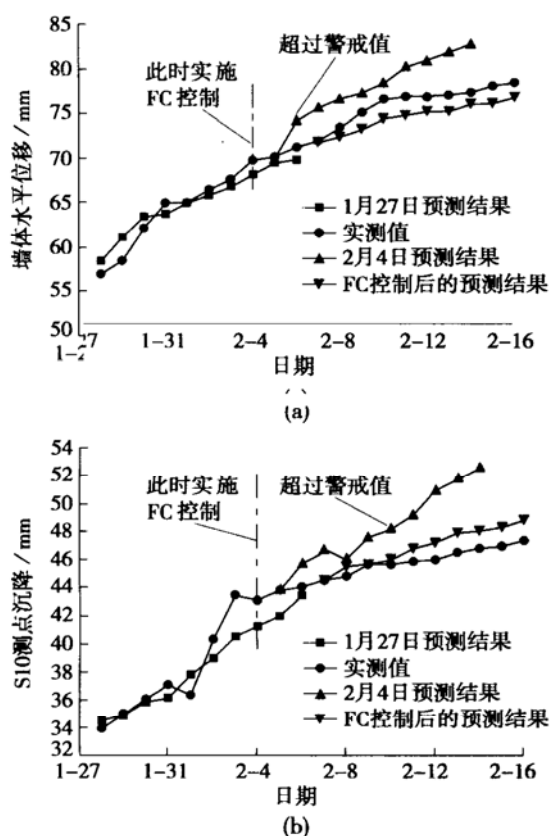


图3 某深基坑墙体水平位移和地表沉降控制效果

Fig. 3 The control effects on D/wall displacement and ground settlement

特点,比如资金投放大、暴露问题最多、持续时间长、动态性强、存在众多影响因素等,不得不采用特殊的控制方法——预测控制,在施工过程中不断跟踪施工活动,对基坑周围关键部位进行连续变形监测,将监测信息及时反馈给预测控制系统,系统根据反馈信息预测出下步施工过程中的变形,并根据预测变形,由模糊控制器自动给出施工参数调整指令。该预测控制过程是一个动态过程,将伴随整个施工过程。采用模糊控制器

实现变形控制一方面充分利用了专家的经验知识,另一方面克服了神经网络控制中学习样本不够而造成的不足,而且模糊控制简单易懂,执行简便。本文研究结果表明,利用模糊控制器对基坑施工变形进行智能控制,具有较好的实用效果。

本系统是在 MATLAB 5.2 支持下实现的,软件设计过程中充分利用了 MATLAB 的可视化技术、图形用户界面(GUI)、神经网络工具箱和模糊控制工具箱函数,使得该预测控制器界面非常友好、操作简单,便于实际工程中应用。

参考文献:

- [1] 刘维宁,张 弥,邝 明.城市地下工程环境影响的控制理论[J].土木工程学报,1997,30(5):66-74.
- [2] 冯夏庭,王泳嘉,林韵梅.地下工程力学综合集成智能分析的理论和方法[J].岩土工程学报,1997,19(1):30-35.
- [3] 张 清,朱家蓉.利用神经网络预测岩石或岩石工程的力学动态[J].岩石力学与工程学报,1992,11(1):35-43.
- [4] 熊祚森.基坑系统动态模式的非线性反演及稳定性分析[D].上海:同济大学,1998.
- [5] 袁金荣,池毓蔚,刘学增.深基坑墙体位移的神经网络动态预测[J].同济大学学报,2000,29(3):282-286.
- [6] 袁金荣.地下工程施工变形的智能预测与控制[D].上海:同济大学,2001.
- [7] 廖野澜.监测位移的灰色预报[J].岩石力学与工程学报,1996,15(3):269-274.
- [8] 刘建航,侯学渊.基坑工程手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [9] 蔡自兴.智能控制——基础与应用[M].北京:国防工业出版社,1998.199-201.
- [10] 袁金荣,陶华山,孙 钧.基坑施工变形的神经网络多步预测方法[A].第七届全国岩土力学分析与解析方法讨论会论文集[C].大连:大连理工大学出版社,2001.440-443.

欢迎阅读《岩土工程师》

《岩土工程师》创办于1989年,是一份面向国家经济建设、理论与实际紧密结合的专业性刊物。

《岩土工程师》综合刊登岩土工程方面的研究报告、设计与施工、经验总结、专题评述、工程实录、试验与监测以及技术通讯等方面的文章和报道,还设有岩土工程界、国外译文、问题讨论、研究生园地以及学术活动与会议信息等栏目,形式多样,内容丰富。

《岩土工程师》为季刊,A4开本,每期正文56页。编辑部自迁至同济大学地下建筑与工程系以来,得到学校和系领导的高度重视和关怀。在同济大学地下建筑与工程系强大的专业优

势支撑下,《岩土工程师》正以健康向上的精神向前发展。编辑部将一如既往地为广大同行读者服务,欢迎广大新老读者积极踊跃投稿,继续关心、帮助我们,共同把《岩土工程师》办得更好。

有需要《岩土工程师》的单位和个人,请与《岩土工程师》编辑部联系。

联系地址:上海市四平路1239号,邮编:200092,电话:021-65982774,传真:021-65985210, E-mail: edoge@tongji.edu.cn 或 tjgenetb@online.sh.cn,联系人:郑慧娟。