

# 盾构近距离施工的 IMC-PID 控制模型研究

廖少明<sup>1</sup>, 汪敏<sup>2</sup>, 侯学渊<sup>1</sup>

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 上海市市政工程设计研究总院, 上海 200092)

**摘要:** 针对盾构近距离施工中变形控制的特点, 以变形控制为目标, 采用系统控制论的思想和方法, 提出一种基于内模控制的 IMC-PID 参数整定方法的盾构施工控制方法。分析研究盾构施工控制中正面土压力和盾尾注浆两个关键参数对相邻隧道变形影响的全过程控制模型 APLOC。仿真结果显示, 此控制模型具有很好的稳定性和鲁棒性。实际控制效果明显, 相邻隧道变形控制在 5 mm 之内。

**关键词:** 隧道工程; 盾构; 近距离施工; 变形; IMC-PID 控制

**中图分类号:** U 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2006)增 2 - 4132 - 07

## STUDY ON IMC-PID CONTROL MODEL OF SHIELD ADJACENT CONSTRUCTION

LIAO Shaoming<sup>1</sup>, WANG Min<sup>2</sup>, HOU Xueyuan<sup>1</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;  
2. Shanghai Municipal Engineering Design General Institute, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** According to the features of control in shield adjacent construction, the control model of the whole process—APLOC has been established based on IMC-PID controller with consideration of the effects of earth balance pressure at workface and shield tail grouting parameter on ground deformation. The influences of the earth pressure and the grouting parameter on the ground and the adjacent tunnel settlement have been studied and analyzed by APLOC. Simulation results show that the proposed controller model has the features of excellent stability and robustness. The maximum settlement of the adjacent tunnel is successfully controlled within 5 mm making use of this control model.

**key words:** tunnelling engineering; shield; adjacent construction; deformation; IMC-PID control

## 1 引言

土木建筑工程施工控制的概念, 是由 J. T. P Yao<sup>[1]</sup>于 1972 年提出的, 其基本思想是依靠结构物与控制系统间的优化匹配, 从强度控制上共同抵御外荷载, 进而控制其变形、位移在允许的限值以内。事实上, 这也是当前土木建筑工程各个领域进行施工控制的基本出发点。在我国, 地下工程施工控制的研究始于 20 世纪 90 年代, 主要是围绕东部沿海

城市深基坑开挖引起土工公害等环境效应问题而展开的, 尤以上海饱和软黏土为地质背景的地下工程施工控制为最, 经历了强度控制、变形控制与系统控制 3 个阶段<sup>[2]</sup>。强度控制, 指对各种支护结构、改良地基土等辅助工法的设计与研究。变形控制, 其基本思想是要求支护结构在满足强度安全的前提下, 还要满足变形、位移限值等使用要求, 常用方法包括经验公式法、安全系数法、数值分析法以及反分析法。系统控制是将地质、工程与环境视为一个相互作用的系统, 应用控制论、系统论等理论方

**收稿日期:** 2005 - 11 - 21; **修回日期:** 2006 - 04 - 20

**作者简介:** 廖少明(1966 -), 男, 博士, 1988 年毕业于同济大学地下建筑与工程系, 现任副教授、硕士生导师, 主要从事地铁盾构隧道设计优化及信息化施工控制方面的教学与研究工作。E-mail: liaosm@online.sh.cn

法达到满足施工控制的目的<sup>[3]</sup>。

目前有关智能控制的定义、理论、结构等尚无统一的系统描述。1971 年著名学者 K. S. Fu 从发展学习控制的角度正式提出智能控制这个新兴的学科领域。随着智能控制的广泛应用, 一些学者对盾构法工程的智能控制进行了研究。九井邦登等(1987 年)将卡尔曼滤波理论应用于盾构控制, 使用的数学模型是建立在统计的基础上的自回归模型, 由于计算非常繁杂, 并且要进行大量的回归工作, 它的适用性受到很大限制。桑原洋等(1988 年)讨论了模糊控制在盾构掘进中的适用性, 在以往工程经验的基础上得到模糊控制规则, 并提出了“单向推进度”的概念。国内部分学者<sup>[3, 4]</sup>以上海软土隧道施工的经验为基础, 研制开发了面向盾构掘进对周围环境影响和防治的专家系统, 在工程实践中取得了良好的效果。李建华<sup>[5]</sup>采用模糊-随机理论预测盾构施工引起的地层移动, 基于随机场理论、随机有限元、模糊概率测度和数理统计方法, 对软土隧道工程中的不确定性问题进行了较深入的探讨。

白李妍和张 弥<sup>[6]</sup>以地表最大允许沉降值作为目标控制值, 采用系统优化方法设计了一个用于制定隧道工程环境影响控制策略(施工技术措施)的动态优化模型, 但仍以力学数值模型为基础, 是一种间接控制。

## 2 控制对象模型分析

在目前盾构施工变形的人工控制中, 工程技术人员根据以往的实践经验, 已明确了以下两点基本的控制策略:

- (1) 调整盾构土仓压力值来稳定开挖面, 从而对盾构正面稳定性及前方的变形起到控制作用;
- (2) 调整盾构尾部的同步注浆参数(注浆量和注浆压力)来弥补由于盾尾建筑空隙等原因产生的地层损失, 从而减小盾尾附近的沉降值。

为了实现盾构施工变形控制, 必须根据事先监测到的数据, 通过反馈调整盾构施工参数来实现对变形的控制。考虑到土压力与注浆参数的相对独立性, 可以将控制系统简化为两个单输入单输出的子系统及一个系统协调控制器, 即盾前变形控制器、盾后变形控制器及协调控制器。

首先研究前两个单输入单输出控制对象。针对盾构施工的特点, 以隧道环号为横轴(即采样周期为

一环), 测点处的变形为纵轴, 这样就可以将盾构施工的对象转化为传递函数模型, 并用时域方法进行分析。

根据盾构近距离穿越施工的不同阶段(穿越前、穿越时和穿越后)分别建立相应阶段的土压力差(实测土仓压力与通过理论计算得到的基准土压力之间的差值)、同步注浆参数与临近隧道变形的控制模型, 从而为模糊控制器的论域分割和控制器参数设计打下基础。

### 2.1 控制对象模型及参数辨识

单输入单输出模型的系统结构如图 1 所示。

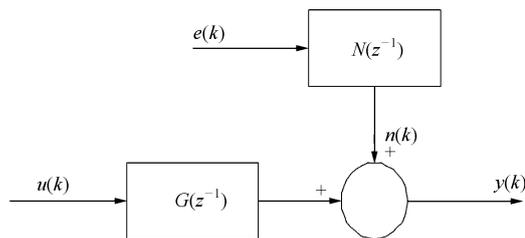


图 1 单输入单输出模型结构

Fig.1 Model structure with single input and output

图中输入  $u(k)$  和输出  $y(k)$  是可观测的, 其过程模型为

$$G(z^{-1}) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \tag{1}$$

其中,

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + a_3 z^{-3} + \dots + a_n z^{-n}$$

$$B(z^{-1}) = b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_n z^{-n}$$

$e(k)$  为噪声序列, 它可以表示为

$$n(k) = N(z^{-1})e(k) \tag{2}$$

式中:  $N(z^{-1})$  为噪声模型, 可以表示为

$$N(z^{-1}) = \frac{D(z^{-1})}{C(z^{-1})} \tag{3}$$

其中,

$$C(z^{-1}) = 1 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + c_3 z^{-3} + \dots + c_n z^{-n}$$

$$D(z^{-1}) = d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2} + \dots + d_n z^{-n}$$

系统模型参数的辨识方法一般采用梯度算法和最小二乘法两类。由于许多用于系统辨识的方法都可演绎成最小二乘法, 因此可以通过最小二乘法将许多辨识方法统一起来。

设  $n$  阶系统的输入输出方程为

$$y(k) + a_1 y(k-1) + \dots + a_n y(k-n) = b_1 u(k-1) + b_2 u(k-2) + \dots + b_n u(k-n) + n(k) \quad (4)$$

写为最小二乘格式，即

$$Y(k) = \mathbf{h}^T(k)\boldsymbol{\theta} + n(k) \quad (5)$$

其中，

$$\mathbf{h}(k) = \{-y(k-1), -y(k-2), \dots, -y(k-n)\},$$

$$u(k-1), u(k-2), \dots, u(k-n)\}^T$$

当  $k = 1, 2, \dots, L$  时，式(5)可构成如下方程组：

$$\mathbf{Y}_L = \mathbf{H}_L \boldsymbol{\theta} + \mathbf{n}_L \quad (6)$$

其中，

$$\mathbf{Y}_L = \{y(1), y(2), \dots, y(L)\}^T$$

$$\mathbf{n}_L = \{n(1), n(2), \dots, n(L)\}^T$$

$$\mathbf{H}_L = \{h(1), h(2), \dots, h(L)\}^T$$

设各待定参数估计值为  $\hat{a}_i, \hat{b}_i (i = 1, 2, \dots, n)$ ，那么在时刻  $k$  的模型输出值  $y_m(k)$  可按式求得：

$$y_m(k) = -\hat{a}_1 y(k-1) - \hat{a}_2 y(k-2) - \dots - \hat{a}_n y(k-n) + \hat{b}_1 u(k-1) + \hat{b}_2 u(k-2) + \dots + \hat{b}_n u(k-n) + n(k) \quad (7)$$

估计值  $y_m(k)$  和系统输出观测值  $y(k)$  之残差  $e(k)$  为

$$e(k) = y(k) - y_m(k) \quad (8)$$

写成向量形式：

$$\mathbf{e}(k) = \mathbf{y}(k) - \mathbf{h}(k)^T \hat{\boldsymbol{\theta}}(k) \quad (9)$$

其中，

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(k) = \{\hat{a}_1, \dots, \hat{a}_n, \hat{b}_1, \dots, \hat{b}_n\}^T$$

衡量误差大小的准则函数为

$$J(\hat{\boldsymbol{\theta}}) = \sum_{i=1}^L [\mathbf{y}(k) - \mathbf{h}^T(k)\hat{\boldsymbol{\theta}}]^2 = \sum_{i=1}^L \mathbf{e}^T \mathbf{e} \quad (10)$$

将准则函数写为矩阵形式：

$$\mathbf{J}(\hat{\boldsymbol{\theta}}) = (\mathbf{Y}_L - \mathbf{H}_L \hat{\boldsymbol{\theta}})^T (\mathbf{Y}_L - \mathbf{H}_L \hat{\boldsymbol{\theta}}) \quad (11)$$

设  $\hat{\boldsymbol{\theta}} = \hat{\boldsymbol{\theta}}_{LS}$ ，则  $J(\hat{\boldsymbol{\theta}})$  最小，即

$$\left. \frac{\partial J(\hat{\boldsymbol{\theta}})}{\partial \hat{\boldsymbol{\theta}}} \right|_{\hat{\boldsymbol{\theta}}_{LS}} = \mathbf{0} \quad (12)$$

将式(11)代入式(12)可得，当  $\mathbf{H}_L^T \mathbf{H}_L$  非奇异时，有

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_{LS} = (\mathbf{H}_L^T \mathbf{H}_L)^{-1} \mathbf{H}_L^T \mathbf{Y}_L \quad (13)$$

由此就可得到控制对象各待定参数的估计。下文以上海轨道交通明珠二期张杨路一浦电路区间隧道施工为工程背景，通过实测数据对各控制对象进行具体分析和参数识别。

### 2.2 土压力差与地表变形的输入输出(IO)模型

为了研究土压力差对已建隧道变形的影响，对于已建的隧道分别选取穿越前、穿越时和穿越后 3 个测点进行研究，并获得相应的 3 个控制对象模型。

(1) 盾构穿越前(approach object, AO)控制模型

选取邻近隧道穿越前测点 X CJ20(对应工况为 151 环)为观测点，其土压力差与邻近隧道变形的关系实测数据如图 2 所示。

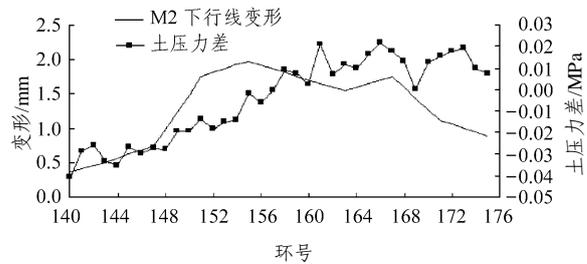


图2 盾构穿越前测点 X CJ20 处土压力差与邻近隧道变形实测图

Fig.2 Unbalanced pressure and tunnel deformation of measuring point X CJ20 before shield arrival

选取 140~167 环的土压力差为模型输入，邻近隧道变形为输出。利用系统辨识，可以得到 AO 控制模型为

$$A(z)y(t) = B(z)u(t) + e(t)$$

$$A(z) = 1 - 1.82z^{-1} + 0.8304z^{-2}$$

$$B(z) = 1.605z^{-1} - 0.01523z^{-2}$$

设采用零阶保持器，将此离散模型转化为连续模型：

$$\left. \begin{aligned} A(s)y(t) &= B(s)u(t) + C(s)e(t) \\ A(s) &= s^2 + 0.18580s + 0.01133 \\ B(s) &= 0.7674s + 1.927 \\ C(s) &= s^2 + 1.624s + 1.097 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中： $C(s)$  为误差模型，下同。

以相对于起点 140 环的环数差为横轴(以下同)，

纵轴为变形相对于均值的差值，则可以得到图 3 所示结果。

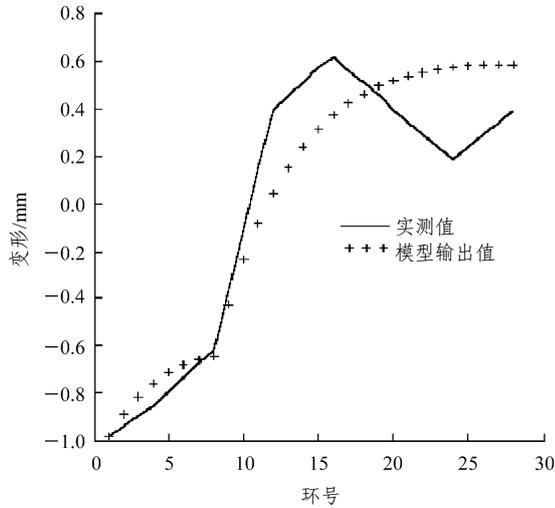


图 3 隧道变形实测与 AO 模型输出比较  
Fig.3 Measured data and output results of AO model

(2) 盾构穿越中(pass object, PO)控制模型

选取邻近隧道穿越时测点 X CJ24(对应工况为 158 环)为观测点，选取 139~175 环的土压力差为模型输入，邻近隧道变形为输出，依上同理可得 PO 连续模型为

$$A(s)y(t) = B(s)u(t) + C(s)e(t)$$

$$A(s) = s^2 + 0.28340s + 0.02919$$

$$B(s) = 0.8626s + 2.281$$

$$C(s) = s^2 + 1.688s + 1.151$$

(3) 盾构离开(leave object, LO)控制模型

选取邻近隧道穿越后测点 X CJ30(对应工况为 168 环)为观测点，选取 147~179 环的土压力差为模型输入，可以得到 LO 连续模型为

$$A(s)y(t) = B(s)u(t) + C(s)e(t)$$

$$A(s) = s^2 + 0.07882s + 0.01790$$

$$B(s) = 0.7485s + 1.001$$

$$C(s) = s^2 + 1.549s + 1.041$$

对以上这几个模型进行阶跃测试，可得到图 4 所示响应曲线。图 4 中对象 1~3 分别指土压力差对已建下行隧道穿越前、穿越中和穿越后的控制对象模型 AO, PO, LO(简称 APL)。由图可知，在盾构不同穿越阶段，模型有较大差别，因此对于不同模型，其对应的 PID 参数亦会有较大差别。

2.3 同步注浆与邻近隧道变形的 IO 模型

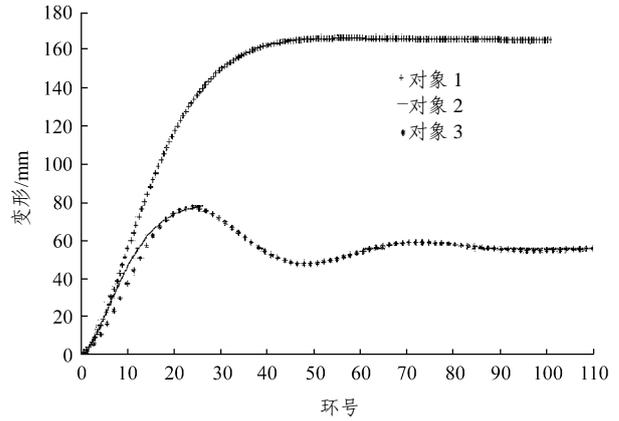


图 4 模型阶跃测试响应曲线  
Fig.4 Step response curves of models

选取盾尾后 14 环内最大沉降为对象，其与注浆压力间的关系如图 5 所示。

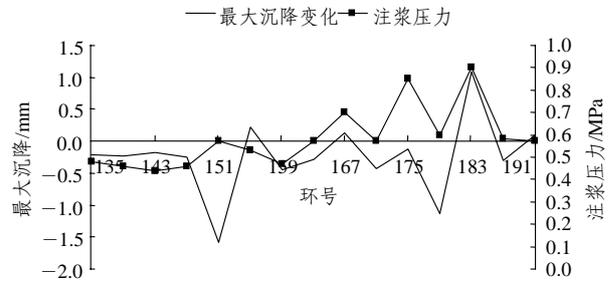


图 5 同步注浆压力与盾尾最大沉降关系图  
Fig.5 Measured maximum settlement vs. grouting pressure

以环内下行隧道最大沉降为输出，利用系统辨识，得到其离散模型为

$$A(z)y(t) = B(z)u(t) + e(t)$$

$$A(z) = 1 + 0.2473z^{-1} + 0.1266z^{-2}$$

$$B(z) = -1.795z^{-1} + 1.329z^{-2}$$

将此离散模型转化为连续模型:

$$A(s)y(t) = B(s)u(t) + C(s)e(t)$$

$$A(s) = s^2 + 2.067s + 4.776$$

$$B(s) = -8.512s - 1.618$$

$$C(s) = s^2 + 2.123s + 3.476$$

结果如图 6 所示。

对此模型进行阶跃测试，其响应曲线如图 7 所示。

3 内模控制系统参数整定和仿真

3.1 基于内模控制的 PID 参数整定方法

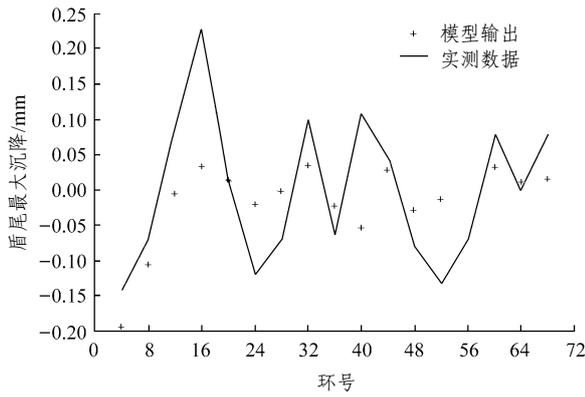


图 6 模型输出值与实测盾尾最大沉降比较

Fig.6 Model output result vs. the measured maximum settlement of shield tail

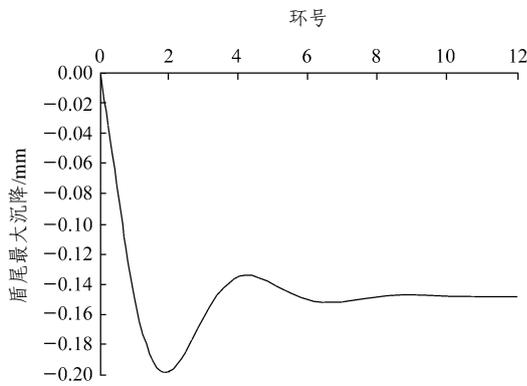


图 7 同步注浆压力与盾尾最大沉降关系图

Fig.7 Grouting pressure vs. the maximum settlement of shield tail

内模控制(IMC)的主要优点是通过简单地选择一个稳定的内模控制器就可以保证闭环系统的稳定性。图 8 是 IMC 回路的方块图,其中  $g_p(s)$  为对象,其情况无法精确知道;  $\tilde{g}_p$  为  $g_p(s)$  的标称模型;  $q(s)$  为控制器;  $u(s)$  为控制器的输出。将如图 8 所示 IMC 结构进行变换,可以将其转化为如图 9 所示反馈控制结构。图中,  $g_c(s)$  即为标准的 IMC 控制器。这样根据内模控制的原则设计  $g_c(s)$ , 再将其转换成 PID 控制器的形式, 这就是基于内模控制的 PID 整定方法。IMC-PID 控制器的设计步骤如下:

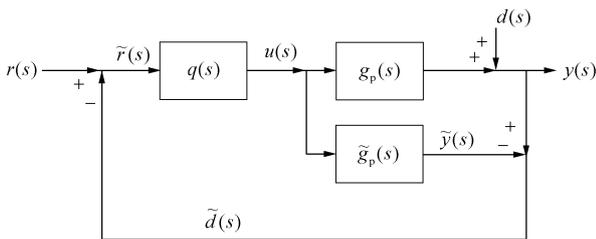


图 8 IMC 结构图

Fig.8 IMC structure

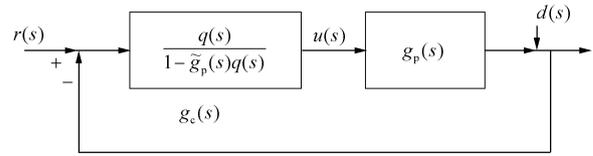


图 9 反馈控制方块图

Fig.9 Feedback control diagram

(1) 将模型分解

将  $\tilde{g}_p$  分解成两部分, 一部分为  $\tilde{g}_{p+}$ , 另一部分为  $\tilde{g}_{p-}$ :

$$\tilde{g}_p = \tilde{g}_{p+} \tilde{g}_{p-} \tag{15}$$

式中:  $\tilde{g}_{p-}$  为最小相位部分。

(2) 求内模控制器及反馈控制器

内模控制器及反馈控制器可通过下式求得:

$$\tilde{q} = \tilde{g}_{p-}^{-1} \tag{16}$$

$$q = \tilde{q}f \tag{17}$$

$$f = \frac{1}{\lambda S + 1} \tag{18}$$

$$g_c = \frac{q}{1 - \tilde{g}_p q} \tag{19}$$

(3) 将反馈控制器转化为选定的 PID 控制器

(4) 整定滤波器常数  $\lambda$

根据本文控制对象的特点和规律, 选用第三类二阶系统<sup>[5]</sup>:

$$G_p = \frac{k_p(-\beta S + 1)}{\tau^2 S^2 + 2\xi\tau S + 1}$$

其 PID 参数如下:

$$\left. \begin{aligned} K_p &= \frac{1}{k_p} \frac{2\xi\tau}{(\lambda + \beta)} \\ K_I &= 2\xi\tau \\ K_D &= \frac{\tau}{2\xi} \end{aligned} \right\} \tag{20}$$

式中:  $\lambda$  为滤波器系数, 即闭环的时间常数, 下文同。  $\lambda = 1$ , 即推到下一环时达到控制目标<sup>[5]</sup>。

对于积分加滞后的对象:

$$G_p = \frac{k_p}{S} e^{-\alpha s}$$

其 PID 参数如下:

$$K_p = \frac{1}{k_p} \frac{2}{\left(\lambda + \theta \frac{3\lambda + \theta}{4\lambda + \theta}\right)}, \quad K_I = 2\lambda + \frac{\theta}{2}, \quad K_D = \frac{\theta}{2}$$

### 3.2 控制器结构

根据上文得到的模型，将控制器分为盾前变形控制器和盾后变形控制器，其结构分别如图 10, 11 所示。

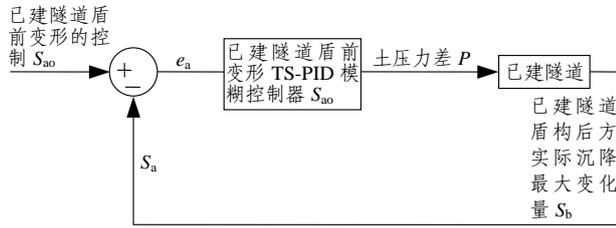


图 10 盾前变形控制器

Fig.10 Deformation controller before shield arrival

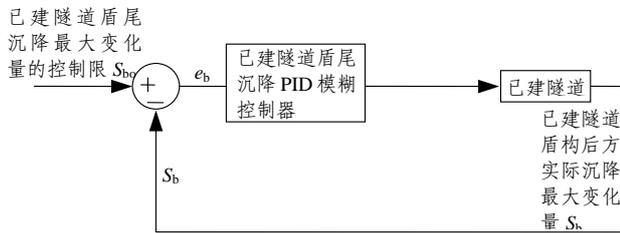


图 11 盾后变形控制器

Fig.11 Deformation controller after shield tail

#### 3.2.1 盾前变形控制器

由于土压力差增加，已建隧道变形将增大，所以盾前变形 PID 控制器为正作用控制器。选取 AO, PO, LO 三个不同的模型，根据内模控制的 PID 整定方法，得到其对应的 PID 参数。

穿越邻近隧道前的 PID 模型为

$$G(s) = \frac{B(s)}{A(s)}$$

$$A(s) = s^2 + 0.18580s + 0.01133$$

$$B(s) = 0.7674s + 1.927$$

其 PID 参数为:  $K_p = 0.160228$ ,  $K_I = 16.398940$ ,

$K_D = 5.382112$ 。

穿越邻近隧道过程中的 PID 模型为

$$G(s) = \frac{B(s)}{A(s)}$$

$$A(s) = s^2 + 0.28340s + 0.02919$$

$$B(s) = 0.8626s + 2.2810$$

其 PID 参数为:  $K_p = 0.199803$ ,  $K_I = 9.708804$ ,

$K_D = 3.528582$ 。

穿越邻近隧道后的 PID 模型为

$$G(s) = \frac{B(s)}{A(s)}$$

$$A(s) = s^2 + 0.07882s + 0.01790$$

$$B(s) = 0.7485s + 1.001$$

其 PID 参数为:  $K_p = 0.312158$ ,  $K_I = 4.403352$ ,

$K_D = 12.68714$ 。

#### 3.2.2 盾后变形控制器

盾后变形控制器为已建隧道盾尾沉降 PID 控制器。由于注浆压力增加，已建隧道的沉降将减小，所以它为反作用控制器。根据基于内模控制的 PID 整定方法，可以得到其对应的 PID 参数如下。

同步注浆与已建隧道变形的模型为

$$G(s) = \frac{B(s)}{A(s)}$$

$$A(s) = s^2 + 2.067s + 4.776$$

$$B(s) = -8.512s - 1.618$$

其 PID 参数为:  $K_p = 1.72826$ ,  $K_I = 0.432789$ ,

$K_D = 0.483793$ 。

上述两个控制器统称为 APLOC 过程控制模型。按照上述方法，根据相应各施工阶段代表性测点的响应模型，利用 PID 参数整定方法求出其 PID 参数，就可以根据模糊算法算出所有其他测点所对应的 PID 参数(限于篇幅，此处从略)，这样就完成了整个控制器的设计。

### 3.3 控制器仿真测试

以盾前变形控制器仿真为例，设控制限为 0.4 mm，分别在穿越上行和下行线前后附近加入 0.5~0.2 的阶跃干扰，仿真结果如图 12 所示。

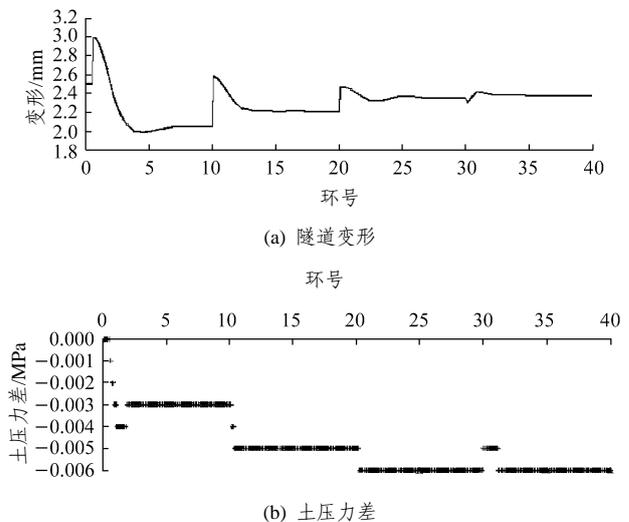


图 12 盾前变形控制器阶跃干扰仿真结果

Fig.12 Step interference simulation results of deformation controller before shield arrival

当模型失配(将仿真模型的增益增大 1 倍)时,可以得到如图 13 所示的仿真结果。

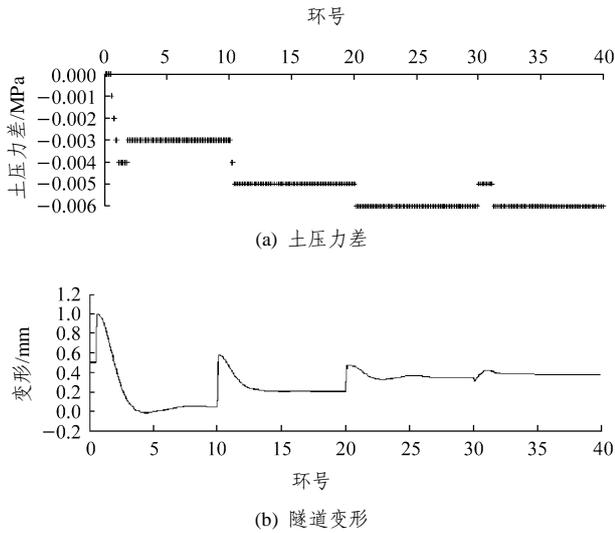


图 13 盾前变形控制器模型失配仿真结果

Fig.13 Mismatch simulation results of deformation controller before shield arrival

以上阶跃测试仿真表明,系统在干扰条件下仍具有较好的稳定性,可知此控制器具有很好的鲁棒性,因此,盾构施工过程中即使有较大干扰和施工条件发生变化时,仍具有良好的控制性能。

## 4 结 论

针对盾构近距离施工控制特点,结合上海典型工程实例,分析并研究了盾构掘进控制中土仓压力和注浆两个关键参数对临近隧道变形的控制模型。在此基础上,基于内模控制 PID 参数整定方法得到了盾构近距离掘进中,盾前变形 3 个阶段及盾尾变形阶段的 4 个控制模型,并分别进行了仿真模拟测试。仿真的结果显示,此结构控制器具有很好的稳定性和鲁棒性,实际控制效果明显,相邻隧道变形

控制在 5 mm 之内。

为了进一步加强鲁棒性,可以采用在线辨识的方法修正控制器系数,即当模型预测值与实测值大于一定阈值的时候,激活在线辨识器,修正控制器参数。值得说明的是,本文限于篇幅,没有介绍两个独立控制器之间的协调控制模块。

## 参考文献(References):

- [1] Yao J T P. Concept of structural control[J]. Journal of Structure Division, ASCE, 1972, 98: 1 567 - 1 573.
- [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 - 36.(Feng Xiating, Wang Yongjia, Lin Yunmei. Integrated intelligent modeling on underground engineering mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(1): 30 - 36.(in Chinese))
- [3] 廖少明, 侯学渊. 盾构法隧道信息化施工控制[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2002, 30(11): 1 305 - 1 310.(Liao Shaoming, Hou Xueyuan. Information construction control of shield tunneling[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2002, 30(11): 1 305 - 1 310.(in Chinese))
- [4] 周文波, 吴惠明. 盾构法隧道施工智能化辅助决策系统[J]. 城市道桥与防洪, 2004, (1): 65 - 69.(Zhou Wenbo, Wu Huiming. Intelligent auxiliary policy-making system of tunnel construction by shield construction[J]. Urban Roads Bridges and Flood Control, 2004, (1): 65 - 69.(in Chinese))
- [5] 李建华. 盾构法隧道施工引起地层移动的模糊随机理论预测与控制研究[博士学位论文][D]. 上海: 同济大学, 1995.(Li Jianhua. Research on the fuzzy-stochastic prediction and control theory of ground movements due to shield tunneling[Ph. D. Thesis][D]. Shanghai: Tongji University, 1995.(in Chinese))
- [6] 白李妍, 张 弥. 隧道工程环境影响的动态优化控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 393 - 397.(Bai Liyan, Zhang Mi. Dynamic optimization control of the effect on environment of tunneling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(3): 393 - 397.(in Chinese))