

深基坑工程系统分析方法及应用研究

朱瑞钧¹, 高谦¹, 袁爱平¹, 齐干²

(1. 北京科技大学土木与环境工程学院, 100083, 北京; 2. 中国矿业大学力学与建筑工程学院, 100083, 北京)

摘要: 运用工程系统分析方法对浙江某基坑工程进行了稳定性评价分析, 通过工程系统二元机理、机理网络路径和结构矩阵计算分析, 形成了实际工程系统耦合矩阵。结合工程实践和系统耦合矩阵, 分析了变量间及系统变量间的相互影响, 并对工程系统稳定性进行了具体的评价分析。经过系统耦合分析发现, 基坑开挖深度、支护桩变形、周边地面沉降和土压力对基坑系统的稳定性影响较为显著, 工程中可采取优化这些系统变量的措施, 达到改善基坑稳定性的目的。工程系统耦合分析方法对合理的基坑支护优化设计具有现实意义。

关键词: 深基坑; 工程系统; 二元机理; 网络路径; 耦合矩阵

中图分类号: TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)01-0082-05

Engineering System Analysis Method with Application to Deep Foundation Pit

Zhu Ruijun¹, Gao Qian¹, Yuan Aiping¹, Qi Gan²

(1. Civil and Environmental Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Mechanics and Civil Engineering School, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: A foundation pit stability of a foundation pit engineering in Zhejiang, China, is evaluated and analyzed with the engineering system analyzing method. The engineering system fully-coupled matrix is established via calculating system binary mechanism, mechanism network paths, and binary mechanism matrix. Combining engineering practice with system fully-coupled matrix, the interactions among the variables in practice and system are discussed, furthermore the engineering system stability is evaluated. According to the fully-coupled system analysis, it is found that the foundation pit excavation depth, retaining pile deformation, surrounding earth settlement and soil pressure affect obviously the stability of foundation pit system. Thus the optimized system variables can be taken to improve foundation pit stability.

Keywords: deep foundation pit; engineering system; binary mechanism; network path; fully-coupled matrix

深基坑在施工过程中各要素相互影响, 呈现动态的变化过程, 例如基坑开挖将引起围护结构、主动土压力、地下水位等要素的变化。这些要素构成了复杂的工程系统, 每一要素是工程系统的变量, 各变量的变化都将引起其他系统变量和整个系统的变化^[1]。系统变量间的相互作用是耦合的过程, 变量间

通过一定机理相互影响^[2]。工程实践表明, 影响基坑安全稳定的关键系统变量主要有围护结构变形、主动土压力、基坑开挖深度、地下水位、支护桩嵌入深度等。合理分析工程问题的基础是正确选取系统分析变量。Natau 认为, 变量的选择首先要能反映特有的工程环境和条件, 其次有利于解决工程实际问

题^[3]. 工程系统分析方法的优势在于它能动态分析复杂的工程问题,可通过形成系统耦合矩阵来分析变量间及系统和变量间的相互影响,并对基坑系统的稳定性进行评价分析. 工程中可运用工程系统分析方法优化系统变量,达到改善基坑稳定性的目的. 本文将结合工程实例对此进行详细的分析.

1 工程系统分析方法及原理

1.1 系统变量二元机理

二元机理是系统变量关系的基本形式. Andrew^[4]通过图1对二元机理进行了形象的描述,并对图1中的机理路径作出如下假定. 设 $G=(X,U)$ 代表一个路径网络图,其中 X 表示网络路径节点的集合, U 表示系统变量作用弧线的集合, $u(i,j) \in U$. G 的二元相互作用关系函数式为 a_{ij} , 矩阵是一个 n 阶方阵,其表达式为

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & u(i,j) \in U \\ 0 & u(i,j) \notin U \end{cases} \quad (1)$$

式中: $u(i,j)$ 中的 i, j 表示关系弧线的两个端点. 图1中的箭头表示两变量间的作用关系,如果从点 i 到 j 发生作用,则 $u(i,j)=1$, 否则 $u(i,j)=0$. 由图1可见,点2和3构成了一个循环路径. 如果作用的始点和终点相重合,说明此关系路径是闭合回路. 系统中任意两变量间的二元机理为 $K_{ij}=f_{ij}(x_i)$, K_{ij} 表示点 i 对 j 的作用.

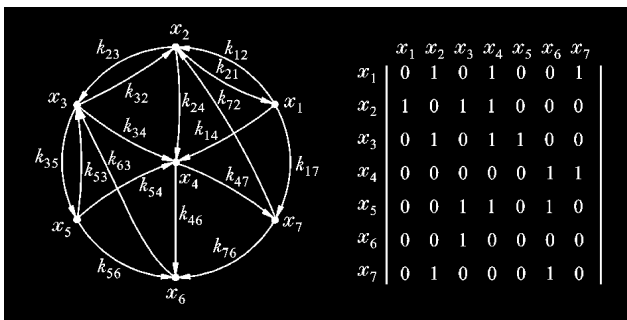


图1 工程系统二元机理关系图

1.2 工程系统二元结构矩阵

二元结构矩阵 M_{BI} 包含了工程系统中所有变量间的相互作用关系. 式(2)中的第 i 行为对应的第 i 变量 x_i 与其他系统变量间的作用关系, 第 i 列表示所有其他系统变量对变量 x_i 的影响. 矩阵中 $f_{12}(x_1)$ 表示变量 x_1 对 x_2 影响的关系式, 即二元机理, 而 $f_{21}(x_2)$ 为变量 x_2 对 x_1 的影响.

$$M_{BI} =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & f_{12}(x_1) & \cdots & f_{1i}(x_1) & \cdots & f_{1n}(x_1) \\ f_{21}(x_2) & 0 & & f_{2i}(x_2) & \cdots & f_{2n}(x_2) \\ \vdots & & \ddots & & & \vdots \\ f_{i1}(x_i) & f_{i2}(x_i) & & 0 & & f_{in}(x_i) \\ \vdots & \vdots & & & \ddots & \\ f_{n1}(x_n) & f_{n2}(x_n) & \cdots & f_{ni}(x_n) & & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

1.3 工程系统耦合矩阵

运用系统耦合原理分析工程稳定性问题时,首先要合理选取系统变量. 确定变量间的作用机理后,可形成二元机理矩阵,然后按其作用关系描绘出机理网络. 由二元机理的导数可标定机理网络,由此形成二元结构矩阵 M_{BI} , 也就是 $A^{(0)}$. 接下来,由第一个变量开始,对任意一对变量进行部分耦合,并依次逐个进行. 通过系统耦合,形成矩阵 $A^{(1)}, A^{(2)}, A^{(3)}, \dots, A^{(n)}$, 最终形成系统耦合矩阵 M_{GI} , 即 $M_{GI}=A^{(n)}$, 其中 n 代表系统变量的总数. M_{GI} 反映了系统的总体反应和循环递归过程,其表达式为

$$M_{GI} = \begin{bmatrix} G'_{11} & G'_{12} & \cdots & G'_{1i} & \cdots & G'_{1n} \\ G'_{21} & G'_{22} & \cdots & G'_{2i} & \cdots & G'_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ G'_{i1} & G'_{i2} & \cdots & G'_{ii} & \cdots & G'_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ G'_{n1} & G'_{n2} & \cdots & G'_{ni} & \cdots & G'_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

1.4 工程系统关键机理路径分析

系统耦合矩阵的每一项体现了一系统变量到另一系统变量总的相互作用. 可以通过关键机理路径分析(CMPA)方法来了解两个变量间的所有机理路径中,哪一条路径对系统影响最为显著. CMPA 是从二元结构矩阵开始,逐个节点递归的过程,最后找出两变量间相互作用最关键的机理路径. 分析过程为

$$a_{kk}^{(k)} = (a_{ij}^{(k-1)})^* = 1 + a_{kk}^{(k-1)} + (a_{kk}^{(k-1)})^2 + \cdots + (a_{kk}^{(k-1)})^l + \cdots \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} a_{jk}^{(k)} &= a_{jk}^{(k-1)} a_{kk}^{(k)} \quad (i \neq k) \\ a_{kj}^{(k)} &= a_{kk}^{(k)} a_{kj}^{(k-1)} \quad (j \neq k) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} a_{ij}^{(k)} &= \max(a_{ij}^{(k-1)}, a_{jk}^{(k-1)} a_{kk}^{(k)} a_{kj}^{(k-1)}) \\ a_{ij}^{(k)} &= \max(a_{ij}^{(k-1)}, a_{jk}^{(k-1)} a_{kk}^{(k)}, a_{kk}^{(k-1)} a_{kk}^{(k)} a_{kj}^{(k-1)}) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: $a_{ij}^{(k)} = \max(a_{ij}^{(k-1)}, a_{jk}^{(k-1)} a_{kk}^{(k)} a_{kj}^{(k-1)})$ 适用于 $a_{ij}^{(k-1)}$ 和 $a_{kk}^{(k-1)}$ 两条路径间没有共同节点, 且 $i \neq k, j \neq k$ 的情况; $a_{ij}^{(k)} = \max(a_{ij}^{(k-1)}, a_{jk}^{(k-1)} a_{kk}^{(k)}, a_{kk}^{(k-1)} a_{kk}^{(k)} a_{kj}^{(k-1)})$

$a_{ik}^{(k-1)} a_{kk}^{(k-1)} a_{kj}^{(k-1)}$)适用于 $a_{ij}^{(k-1)}$ 与 $a_{kk}^{(k-1)}$ 有共同节点,且 $i \neq k, j = k$ 的情形. 在每个递归过程建立关键路径矩阵 $\mathbf{P}^k$ 和效果矩阵 $\mathbf{C}^k$, 当递归过程完成时, $\mathbf{C}^k$ 和 $\mathbf{P}^k$ 又被更新, 最后得到 CMPA 的分析解. $\mathbf{C}^n$ 中的每一项代表一变量对另一变量的影响程度, 其中 n 是系统变量的总数. 运用 CMPA 能确定出对系统影响最为关键的路径, 并可求其影响程度

$$\mathbf{C}^k \mathbf{C}^n; \quad \mathbf{P}_{k \rightarrow n}^k = \mathbf{P}^n \quad (7)$$

2 工程实例分析

2.1 工程概况

浙江某大厦基坑工程位于温州市开发区, 占地面积 2 300 m², 上部结构设计 14 层, 紧邻基坑周边有 2 座 12 层的商住楼, 地下水位位于地表下 1 m, 埋深较浅. 土体的物理力学指标见表 1. 由于本工程淤泥质类土层分布较厚, 土体的渗透性较强, 为了顺利进行基坑施工, 设计单位经综合考虑, 采用水泥搅拌桩支护方案. 基坑设计开挖深度 6.95 m, 桩径设计为 $\varnothing 600$ mm, 支护桩嵌入坑底土层深度 12.1 m.

2.2 基坑工程系统分析变量的选取

Zimmerman 认为, 系统变量的选取要合乎工程实际, 同时有利于问题的分析^[5]. Smith 指出, 工程系统分析主要解决 3 个问题: ①合理选择对工程有影响的系统变量; ②确立变量间的作用关系及建立目标分析函数; ③对系统及参数进行优化, 使其合乎设计及安全要求^[6]. 结合工程实践, 本研究选取的系统变量有土压力、地下水位、基坑开挖深度、支护桩嵌入深度、土体裂隙、支护桩变形和地面沉降. 基坑系统变量见图 2.

2.3 基坑系统二元机理及路径分析

结合工程实践及系统分析方法, 本基坑工程的机理网络路径图如图 3 所示. 随开挖加深, 作用于支护桩上的主动土压力逐渐增大, 导致支护桩水平位移和地面沉降加大, 进而引起桩后土体裂隙扩张, 土体裂隙扩张又影响到地下水位, 由此形成二元机理

路径 $H-P-S-D-H_w$. 由图 3 可见, 机理网络路径中有一个反馈回路 $S-D-H_w$, 这是因为地面沉降会引起土体裂隙扩张和地下水位下降, 而地下水位下降后土层中的有效应力将增加, 进而引起地面新的沉降.

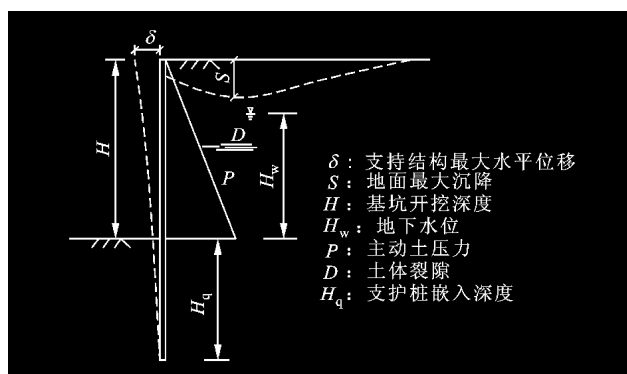


图2 基坑工程系统变量分布图

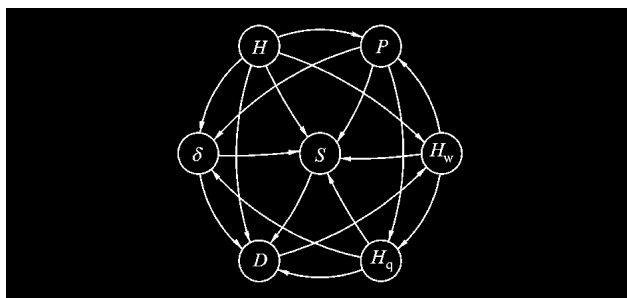


图3 系统变量二元机理网络路径图

2.4 基坑系统耦合矩阵的形成

工程系统中每一变量的变化将对其他系统变量和整个系统造成影响. 系统变量间的相互作用及系统总体反应可通过二元结构矩阵 $\mathbf{M}_{\text{BI}}$ 和系统耦合矩阵 $\mathbf{M}_{\text{CI}}$ 清晰地描述出来. 在这 2 个矩阵中, 各行、列的变量排序依次为: 1— H , 2— P , 3— δ , 4— H_w , 5— H_q , 6— D , 7— S . 通过工程数据监测和经验公式计算, 可确定变量间的二元机理, 并由此得出反映本工程系统变量间作用关系的 $\mathbf{M}_{\text{BI}}$. 根据耦合矩阵分析方法, 在形成 $\mathbf{M}_{\text{BI}}$ 的基础上, 开始对经过第 1 个变量的机理网络路径进行耦合分析, 得到受变量 H 影响

表1 土体的物理力学指标

地层名称	层号	土层厚度 h/m	含水量 $w(\text{H}_2\text{O})/\%$	密度 $\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	内聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$
杂填土	1	1.25		18.7	4	3.7
黏土	2	1.10	35.8	18.3	26	12.3
淤泥	3	6.30	60.9	16.5	11	8.0
淤泥质黏土	4	6.50	50.7	17.3	12	8.5
含黏性土圆砾	5	1.40	52.4	17.5	5	18.0
淤泥质黏土	6	5.70	43.0	18.0	26	10.5

的任意一对变量间的影响效果矩阵 $A^{(1)}$, 然后依次逐个对变量进行循环递归, 分别得到受变量 $P, \delta, \dots, S$ 影响的系统变量间的影响效果矩阵 $A^{(2)}, A^{(3)}, \dots, A^{(7)}$. 每次递归过程完成时, 变量间的影响效果都会得到更新调整. 当对所有系统变量递归结束后, 得到系统耦合矩阵 M_{GI} , 即 $A^{(7)} = M_{GI}$. 具体结果见式(8)、式(9), M_{GI} 中每一列表示系统变量单位变化后, 基坑系统对该序列变量的影响, 每一行为该序列变量单位变化后对基坑系统的影响.

$$M_{GI} = \begin{bmatrix} 0 & 0.7 & 0.3 & -0.2 & 0.18 & 0.2 & 0.4 \\ 0.18 & 0 & 0.15 & 0 & 0 & 0 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.3 & 0.45 \\ 0 & 0.1 & 0 & 0 & -0.2 & 0 & 0.2 \\ 0.14 & 0 & -0.16 & 0 & 0 & -0.17 & -0.2 \\ 0.12 & 0.15 & 0 & -0.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$M_{GI} = \begin{bmatrix} 1 & 0.92 & 0.47 & -0.46 & 0.32 & 0.68 & 0.74 \\ 0 & 0.73 & 0.28 & 0.34 & 0.27 & -0.21 & 0.56 \\ 0.04 & 0 & 0.95 & 0.12 & 0.06 & 0.62 & 0.45 \\ 0.08 & 0.41 & 0.13 & 1.03 & -0.3 & 0.27 & 0.2 \\ 0.03 & 0.1 & 0.15 & -0.08 & 0.87 & 0.2 & -0.46 \\ 0.02 & 0.06 & 0.16 & -0.3 & 0.26 & 0.79 & -0.15 \\ 0.03 & 0.15 & 0.24 & -0.13 & 0.31 & 0.57 & 1.12 \end{bmatrix} \quad (9)$$

3 基坑工程系统稳定性评价分析

结合工程系统分析方法和工程背景, 得出反映本工程系统变量相互影响的系统耦合矩阵 M_{GI} , 通过 M_{GI} 可详细地分析变量间及系统与变量间的相互作用和影响. 以下结合工程实践对本基坑工程的系统稳定性进行评价分析.

3.1 支护桩变形评价分析

矩阵 M_{GI} 中第 3 列为系统变量单位变化后, 基坑系统对支护桩水平位移的影响. 由图 4 可见, 基坑开挖深度和主动土压力对支护桩水平位移影响较明显, 影响系数分别为 0.47 和 0.28. 基坑开挖后周边土体出现滑动剪切破坏, 随开挖深度增加, 支护桩的变形逐渐加大, 而主动土压力增加将导致支护桩上的作用力和弯矩增大, 支护桩的变形随之加大. 基坑开挖深度和主动土压力对基坑变形的影响主要是通过桩后土体来实现的, 工程中可通过有效保护周边土体和采用好的支撑材料来控制基坑变形, 确保基

坑的安全稳定.

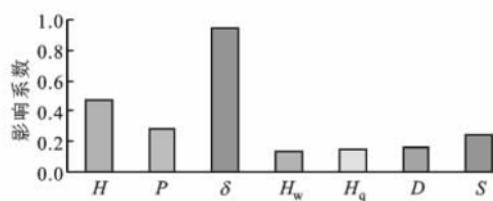


图4 系统变量单位变化对支护桩水平位移的影响

3.2 支撑系统稳定性评价分析

图 5 为系统变量单位变化后, 基坑系统对支护桩根部稳定性的影响, 可见基坑开挖深度、主动土压力、土体裂隙和地面沉降对支护桩根部稳定性有明显的负面影响, 它们的影响系数分别为 0.32、0.27、0.26 和 0.31. 随开挖深度增加, 主动土压力增大, 支护桩上的弯矩逐渐增加. 地面沉陷和土体裂隙扩张将使坑底土体变得松软, 它们共同作用削弱支护桩根部的稳定性. 图 5 中地下水位的影响系数为 -0.3. 地下水位下降后, 土体的黏聚力增加, 性能得以改善, 有利于支护桩的稳定.

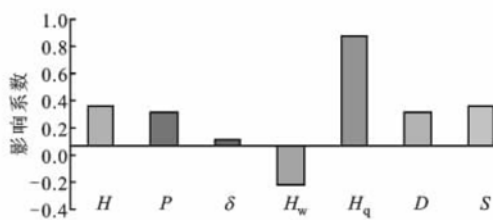


图5 系统变量单位变化对支护桩根部稳定性的影响

3.3 基坑周边土层稳定性评价分析

图 6 为系统变量单位变化后, 基坑系统对地面沉降的影响, 可以看出支护桩变形和基坑开挖深度对地面沉降影响最为明显, 其影响系数为 0.74 和 0.56. 在基坑开挖过程中, 周边土体因受到扰动而变得松软, 加之支护桩变形后周边出现土体损失, 从而导致周边土层沉降. 由图 6 可见, 支护桩嵌入深度能限制地面沉降, 其影响系数为 -0.46, 支护桩嵌入加深可增强其稳定性, 保护基坑周边土体, 限制基坑周边地面沉降.

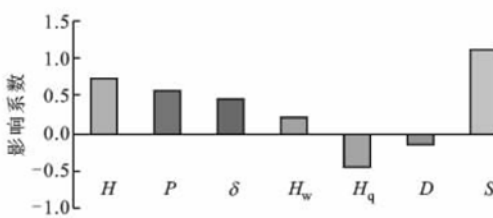


图6 系统变量单位变化对地面沉降的影响

3.4 基坑系统整体稳定性评价分析

图 7 为系统变量单位变化对基坑稳定性的影响

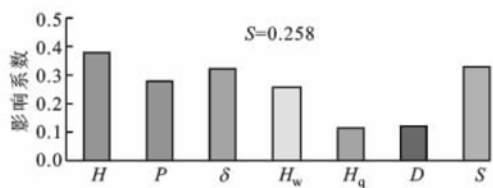


图7 系统变量单位变化对基坑稳定性的影响

程度.各变量的影响效果为 M_{Gi} 相应行中各项系数的平均值,而变量对系统总的影响效果为各变量影响效果的平均值.当总的影响值小于1时,系统是稳定的,否则不安全.由图7可见:系统变量对系统总的影响值 $S=0.258$,说明此工程的整体稳定性较好;基坑开挖深度、支护桩变形、地面沉降对基坑工程系统的影响较为显著,影响系数分别为0.381、0.32和0.327;相对来说,支护桩嵌入情况、土体裂隙的影响较微弱,影响系数分别为0.116和0.12.随开挖加深,支护桩变形增大,支护桩根部的稳定性降低.支护桩变形将导致周边土层沉陷,而地面沉降又会加剧支护桩变形和土体裂隙扩张,它们均可大幅度影响到基坑系统的稳定性.工程中可采取以下措施:减小基坑开挖深度和采用大刚度支护材料限制基坑变形,开挖过程中减轻对周边土体的扰动,减小地面沉降,以此确保基坑的稳定性.

4 结 论

(1)工程中系统变量间是相互影响的,各变量的变化都将引起其他系统变量和整个系统的变化,系统变量间通过二元机理相互作用.

(2)工程系统分析方法是分析复杂工程问题的

有效手段,基坑工程中可通过形成系统耦合矩阵来分析变量间及系统与变量间的相互影响,并对基坑系统的稳定性进行评价分析.

(3)通过工程系统分析并结合工程实践发现,基坑开挖深度、支护桩变形、周边地面沉降和主动土压力对基坑系统的稳定性影响较为显著,工程中可采取优化这些系统变量的措施来改善工程效果.

参考文献:

- [1] Millar D L, Jiao Y, Arnold P N, et al. A rock engineering systems approach to risk assessment [M]// Risk Assessment in the Extractive Industries. Exeter, UK: Academic Press, 1994: 47-52.
- [2] Bennett R J, Chorley R J. Environmental systems philosophy analysis and control [M]. London: Methuen & Co. Ltd. Press, 1978: 156-158.
- [3] Natau O. Scale effects in the determinational length of rock masses [C]// Proc 1st Int Workshop on Scale Effect in Rock Masses. London: University of London Press, 1990: 77-80.
- [4] Andrew P S. Methodology for large scale systems [M]. New York: McGraw-Hill, 1977: 126-130.
- [5] Zimmerman R W, Chen D W, Long J C S, et al. Hydromechanical coupling between stress stiffness and hydraulic conductivity of rock joints and fractures [C]// Proc Int Symp on Rock Joints. London: University of London Press, 1990: 571-577.
- [6] Smith A A, Hinton E, Lewis R W. Civil engineering system analysis and design [M]. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 1983: 74-76.

(编辑 葛赵青)

本刊主编陶文铨院士荣获何梁何利科学与技术进步奖

2006年度何梁何利科学与技术奖颁奖大会于2006年11月15日下午在人民大会堂新闻厅举行,国务委员陈至立等领导同志以及何梁何利基金会代表出席了颁奖大会,并给59位获奖人员颁奖.我校能源与动力工程学院教授、《西安交通大学学报》主编陶文铨院士荣获技术科学类的科学与技术进步奖.

2006年度的何梁何利奖获奖人员是从300多位全国有关部委上报的候选人中经过专家们的认真评审而产生的,其中39位获得“科学与技术进步奖”,20位获得“科学技术创新奖”.今年的获奖人员平均年龄为61岁多,比以往13届的平均年龄有较大幅度的下降.两院院士获奖的比例也由以往13届的平均75%而下降到51%.

何梁何利科学与技术进步奖分布于数学力学、物理学、化学、天文学、气象学、地球科学、生命科学、农学、医学药学以及技术科学10个领域,成立12年来,我校先后有陈学俊院士、姚熹院士、谢友柏院士、郑南宁院士获得过这一殊荣.

(黄忠德)