

DOI: 10.11779/CJGE2015S2036

基于灰色系统及验证试验的黏性土分散机理分析

赵高文^{1, 2}, 樊恒辉³, 石美⁴, 马小莉², 李玉根², 韦峰²

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 榆林学院建筑工程系, 陕西 榆林 719000; 3. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 4. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 分散性土发现至今, 对其产生分散性的机理一直存在争议。应用灰色系统理论对实际工程 123 组土样的物理、化学和矿物学性质以及土体分散性试验结果进行分析, 得到各因素与分散性之间的关联度, 从而评价各因素与分散性的紧密程度, 并结合验证试验结果进行机理分析。结果表明, 化学因素与土体分散性关系最为密切; pH 与分散性关联度最大, 钠离子含量以及蒙脱石含量则关联较低; 土体产生分散性本质条件为高酸碱度和高交换性钠离子百分比, 且需同时具备; 不能利用单纯钠离子含量或蒙脱石总量来预测和评价土体的分散性。

关键词: 灰色系统理论; 分散性土; 物理性质; 化学性质; 矿物成分; 分散机理

中图分类号: TV443 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)S2-0186-05

作者简介: 赵高文 (1988-), 男, 陕西榆林人, 博士研究生, 助教, 研究方向为特殊性土的工程性质及荒漠化治理。

E-mail: fulov@163.com.

Dispersion mechanism of soils revealed by grey system theory and verification tests

ZHAO Gao-wen^{1, 2}, FAN Heng-hui³, SHI Mei⁴, MA Xiao-li², LI Yu-gen², WEI Feng²

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Architecture Engineering,

Yulin University, Yulin 719000, China; 3. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest A&F University,

Yangling 712100, China; 4. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The dispersion mechanism of cohesive soils has not been fully understood because of the complex nature of system. In this study, dispersivities of 123 field engineering soil samples are analyzed and correlated to their major influencing factors (physical properties, mineral properties and chemical properties) using the grey system theory and laboratory certification tests to understand the dispersion mechanism of associated soils. The grey system analysis shows that the chemical properties (e.g. pH of soils) have the highest correlation intensity with the soil dispersivity, with less impacts due to soil sodium and montmorillonite contents. The soils with high dispersivity are routinely observed to have a rich exchangeable sodium content and high pH values. The dispersivity of cohesive soils can not be predicted solely by their sodium or total montmorillonite contents.

Key words: grey system theory; dispersive soil; physical property; chemical property; mineral composition; dispersion mechanism

0 前言

分散性土在低含盐量水中 (或纯净水中) 细颗粒之间的黏聚力大部分甚至全部消失^[1-3], 所以其抗冲蚀能力很低, 危害性极大。Ingles^[4]等发现, 分散性土中的黏土矿物大部分为蒙脱石, 且具有高含量交换性钠离子; Sherard^[5]认为土颗粒表面的电化学性质是导致分散性的重要因素; Holmgren^[6]认为分散性土中 Na^+ 含量偏高; 蒋国澄^[7]和刘杰^[8]认为分散性土具备蒙脱石类较多、 Na^+ 高及胶结物少三个条件; 裴孟辛^[9]认为蒙脱石以及较高含量可交换性钠就可导致分散性。樊

恒辉等^[10-11]提出较高含量 Na^+ , pH 呈强碱性, 两个条件缺一不可。鉴于分散性土发现较晚以及目前研究成果的局限性, 对于其机理一直存在争议。

本文对新疆、陕西、甘肃、青海等地及国外工程中 123 组土样的物理、化学和矿物学指标以及土样的分散性程度进行研究分析, 以期得到各性质指标与分散性的关联度, 并利用新疆某在建水电站 8 组土样对

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51379177); 榆林学院博士、硕士科研启动基金项目 (14KG29); 陕西省教育厅基金项目 (14JK1861); 榆林市产学研合作项目 (2014cxy-05)
收稿日期: 2015-03-26

分析结果进行验证, 进一步揭示黏性土的分散机理。

1 资料来源及分析方法

1.1 资料来源

本文收集了新疆、陕西、甘肃、青海、黑龙江等地以及国外部分工程中 123 组土样的分散性判别结果, 选定颗粒相对密度、液限、塑限、塑性指数以及黏粒含量等 7 项物理性质指标, 易溶盐总量、碳酸根、碳酸氢根、氯离子、硫酸根、钙离子、镁离子、钠离子、钾离子、中溶盐、难溶盐、有机质以及 pH 等 13 项化学指标, 黏土矿物中伊利石、高岭石、绿泥石、蒙脱石以及全土矿物中伊利石和蒙脱石等 6 项矿物学指标作为分析指标。

1.2 分析方法

本文选定灰色系统理论中的灰关联分析法作为定量评价的分析方法。选定各土样的分散度作为分析的参考序列, 设参考序列为 $X_0 = \{X_0(k) | k=1,2,\cdots,n\}$, 选定各项性质指标作为比较序列并将比较序列设为 $X_i = \{X_i(k) | k=1,2,\cdots,n\}, i=1,2,\cdots,m$, 为消除数据之间差异, 首先通过除以各列第一个数据对各序列进行初始化, 得到初始化数据矩阵, 之后将初始化矩阵各参考序列与对比序列做差并取绝对值计算参考序列与对比序列的接近度, 得数据接近度矩阵, 在接近度矩阵中找到最小值 $\min_i \min_k \Delta_i(k)$ 和最大值 $\max_i \max_k \Delta_i(k)$, 并取分辨系数 $\rho=0.05$, 得到关联系数矩阵, 关联系数定义为^[12]:

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k \Delta_i(k) + \rho \max_i \max_k \Delta_i(k)}{\Delta_i(k) + \rho \max_i \max_k \Delta_i(k)}, \quad (1)$$

式中, $\Delta_i(k) = |X_0(k) - X_i(k)|, i = 1,2,\cdots,m, \rho \in (0,+\infty)$

表 1 土样物理性质指标及分散度 (部分)

Table1 Physical indices and dispersivities of soil specimens

土样编号	颗粒相 对密度	液限	塑限	塑性 指数	颗粒组成 (%)			分散度
					砂粒	粉粒	黏粒	
1	2.72	27.9	16.2	11.7	20.0	66.0	14.0	74.0
2	2.66	34.8	21.4	13.4	14.0	58.5	27.5	39.0
3	2.71	29.4	12.8	16.6	29.0	59.0	12.0	74.0
4	2.64	38.0	24.2	13.8	9.0	64.0	27.0	15.0
5	2.66	33.5	20.8	12.7	12.0	58.0	30.0	15.0
6	2.70	29.0	15.5	13.5	23.0	57.0	20.0	47.0
7	2.71	27.0	16.1	10.9	21.0	63.0	16.0	74.0
8	2.70	24.3	15.6	8.7	26.0	56.0	18.0	74.0

表 2 物理性质指标与黏性土分散性之间关联度

Table2 Correlation between physical indices and dispersivities

物理性质 指标	颗粒相 对密度	液限	塑限	塑性 指数	砂粒含量	粉粒含量	黏粒含量
关联度	0.4740	0.3829	0.4105	0.3566	0.4660	0.4712	0.2020

称为分辨系数。

最后根据上述关联系数矩阵, 求得土样各项指标与黏土分散性之间的关联度, 计算公式如下^[12]:

$$\gamma_{i0} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad . \quad (2)$$

所得关联度数值越大则关联程度越高, 对黏土分散性影响越大; 反之, 则影响较小或没有影响。

1.3 分辨系数的选定

研究表明^[12], 分辨系数 ρ 的取值大小关键在于控制 $\xi_i(k)$ 的散布范围, 当 $\rho \leq 0.05263$ 时, 较容易观察关联度的分辨率的变化, 故通常应取值 $\rho = 0.05$, 以保证 $\xi_i(k) \in [0.0476, 1]$ 。

2 分析结果与讨论

鉴于分析样本数据量庞大, 文中直接给出部分原始数据以及分析计算后最终关联度。

2.1 物理性质分析结果

部分土样的物理性质见表 1, 计算得到 7 项物理性质参数与黏土分散性之间关联度, 见表 2。从表 1, 2 可见, 物理性质指标的关联度普遍较低, 关联度均低于 0.5, 因此物理指标对于土体分散性的预测并无实际参考意义。

2.2 化学性质指标分析结果

部分土样化学性质见表 3, 计算得出土样化学性质指标因素与黏土分散性之间关联度见表 4。由结果可见, 13 项化学指标的关联度普遍较高, 且主次顺序为: pH>难溶盐>有机质> $\text{CO}_3^{2-}>\text{Ca}^{2+}>\text{HCO}_3^{-}>\text{中溶盐}>\text{Mg}^{2+}>\text{总量}>\text{K}^{+}>\text{Cl}^{-}>\text{SO}_4^{2-}>\text{Na}^{+}$ 。

表 3 土样化学性质指标及分散度(部分)

Table 3 Chemical indices and dispersivities of soil specimens

(g/kg)

编 号	易溶盐								中溶 盐	难溶盐	有机 质	pH	分散 度	
	总量	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺						
1	2.289	0.029	0.179	0.920	0.379	0.093	0.057	0.607	0.025	4.84	167.00	2.92	8.99	82.0
2	1.719	0.058	0.237	0.283	0.579	0.040	0.029	0.472	0.020	5.67	147.64	3.38	9.39	91.0
3	2.056	0.029	0.209	0.152	1.019	0.044	0.044	0.532	0.027	1.67	165.86	1.95	9.17	64.0
4	1.990	0.029	0.209	0.568	0.520	0.057	0.039	0.545	0.024	2.86	157.89	3.95	9.15	64.0
5	2.574	0	0.194	0.786	0.773	0.065	0.120	0.610	0.027	2.15	135.11	2.07	8.79	74.0
6	2.732	0.018	0.191	0.454	1.221	0.176	0.100	0.540	0.033	3.21	151.05	4.69	8.93	86.5
7	1.896	0.029	0.179	0.378	0.686	0.048	0.034	0.514	0.027	0.77	162.06	3.32	9.25	91.0
8	1.819	0.059	0.178	0.435	0.531	0.032	0.023	0.539	0.022	0.54	165.10	2.39	9.43	91.0

表 4 化学性质指标与黏土分散性之间关联度

Table 4 Correlation between chemical indices and dispersivities of clay

化学 性质	总量	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	中溶盐	难溶盐	有机质	pH
关联度	0.8341	0.9718	0.9190	0.7585	0.6167	0.9346	0.8603	0.5546	0.8065	0.8880	0.9924	0.9836	0.9930

2.3 矿物学性质指标分析结果

部分土样矿物学性质见表 5, 计算得出各矿物学性质指标与黏土分散性之间关联度见表 6。由表可见, 6项矿物学指标的关联度均低于 0.5, 即关联极不显著, 其中蒙脱石与黏土分散性关联程度最低。

2.4 综合比较及讨论

通过分析计算, 最终得出三大类性质指标的关联度平均值见表 7。由表可见, 三大类性质指标关联度差异明显, 化学性质指标与黏土分散性关联度最高, 物理性质指标次之, 关联度最低的是矿物学性质指标。

将物理性质指标作为评价和预测土体分散性的参考指标。

3.2 化学指标与分散性

从计算结果看出, 在 13 项化学性质指标中, 只有钠离子含量的关联度小于 0.6, 即关联程度较低; 其他指标关联度较高, 尤其是 pH 和黏土分散性之间的关联度接近 1, 有直接关联性, 说明碱性环境对黏土分散性具有决定性影响; 难溶盐及有机质的存在将对土颗粒之间的黏结具有较大的贡献, 黏结物较多则对分散性具有抑制作用, 与前人研究成果相符。

Na⁺含量与分散性关联程度低, 然而有些学者认为 Na⁺含量越高, 黏土分散性越高。阳离子的存在对黏土颗粒表层水膜的厚度影响较大, 且 Na⁺较高价态的阳离子表层吸附的水分子更多。一般而言, 水膜越厚, 土颗粒趋于分散的程度越大, 越容易产生互相剥

3 机理讨论与分析

3.1 物理性质与分散性

由表 1, 2 可见, 物理性质指标与黏土分散性关联度均小于 0.5, 即关联不显著, 参考价值有限, 不建议

表 5 土样矿物学性质指标及分散度(部分)

Table 5 Mineral property indices and dispersivities of soil specimens

土样编号	黏土矿物含量/%						全土中伊利石、蒙脱石估算值/%	分散度
	伊—蒙混层 (I/S)	伊利石 (I)	高岭石 (K)	绿泥石 (C)	伊利石 (I)	蒙脱石 (S)		
1	6.0	11.3	1.8	3.1	14.9	2.4	74.0	
2	12.1	18.6	3.0	4.2	25.9	4.8	39.0	
3	6.3	13.3	2.0	3.5	17.1	2.5	74.0	
4	10.1	20.5	3.0	3.7	27.1	3.5	15.0	
5	9.7	23.8	2.8	4.0	30.1	3.4	15.0	
6	9.8	14.8	2.8	4.1	20.7	3.9	47.0	
7	6.6	10.5	1.5	2.8	14.5	2.6	74.0	
8	8.0	11.9	2.3	3.6	16.7	3.2	74.0	

表 6 矿物学性质指标与黏土分散性之间关联度

Table 6 Correlation between mineral indices and dispersivities of clay

矿物指标	黏土矿物含量/%				全土中伊利石、蒙脱石估算值/%	
	伊—蒙混层 (I/S)	伊利石 (I)	高岭石 (K)	绿泥石 (C)	伊利石 (I)	蒙脱石 (S)
关联度	0.3049	0.4532	0.4145	0.4275	0.4527	0.2654

表 7 物理、化学、矿物学性质指标关联度平均值

Table 7 Average values of correlation of physical, chemical and mineral properties

关联度	性质指标种类		
	物理	化学	矿物学
平均关联度	0.3947	0.8549	0.3863

离, 但在阳离子与土颗粒吸附的过程中, 高价态的阳离子容易将 Na^+ 从土颗粒表面置换下来, 从而在不改变表观离子浓度的情况下, 减小水膜的厚度, 增强土颗粒之间的黏结力, 削弱其趋于分散的能力, 因此在土中测出的 Na^+ 含量不足以评判土体的分散能力, 需要测出吸附于土颗粒表层的 Na^+ 含量(交换性钠百分比)方能预测其分散性。 H_2CO_3 为弱酸, 故以碳酸为母体的 CO_3^{2-} , HCO_3^- 在水溶液中将会发生水解, 导致溶液中 OH^- 显著增多, 使得溶液显碱性, pH 升高, 为黏土的分散产生有利的碱性环境; Cl^- , SO_4^{2-} 强酸根离子则与黏土分散性关联度较小。

高价态阳离子 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的存在与黏土分散性关联度较高, 较高含量的 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 会与黏土颗粒表面 Na^+ 发生交换, 减少黏粒表面 Na^+ 数量, 影响土颗粒双电层厚度, 从而减弱黏土分散趋势, 达到抑制效果。

3.3 黏土矿物与分散性

蒙脱石类属于 2:1 型矿物, 硅氧四面体和一个铝氧八面体之间无 K^+ 联结, 水可以进入片层之间, 具有较大的分散潜力。因此, 有学者认为分散性土中含有较多量的蒙脱石。按照结合的阳离子不同, 蒙脱石可以分为钠基蒙脱石及钙基蒙脱石, 赵高文^[13]研究发现, 两种蒙脱石工程性质截然不同, 其中钙蒙脱石碱性较弱, 几乎没有遇水膨胀的现象且没有分散现象; 钠蒙脱石本身碱性较强, 遇水后体积膨胀明显, 分散性极强, 能完全分散并且分散后的颗粒能长时间悬浮于水中(见图 1, 图 2), 因此需要测出钠基蒙脱石的含量方能对分散性具有预测意义。

3.4 三类性质指标的比较分析

通过分析计算并对三类性质指标进行比较, 得关联程度: 化学性质指标>物理性质指标>矿物学性质指标, 与部分学者的观点存在分歧, 究其原因, 在分析过程中发现, 目前对于参数的测定数据较为笼统, 并未将关键因素如钠离子百分比、蒙脱石种类等参数单独进行测定, 这正是分散性土鉴定过程中对于参量选取与测定中的偏差所在。化学组成是决定土体性质的主要因素, 所以关联程度最高, 其中较高的交换性钠离子百分比以及高酸碱度是分散性土的典型特点, 不能笼统的认为 Na^+ 含量越高, 分散性越强; 蒙脱石应该按吸附阳离子区分, 不能一概而论。



图 1 钠基蒙脱石试验结果

Fig. 1 Dispersive results of Na-montmorillonite

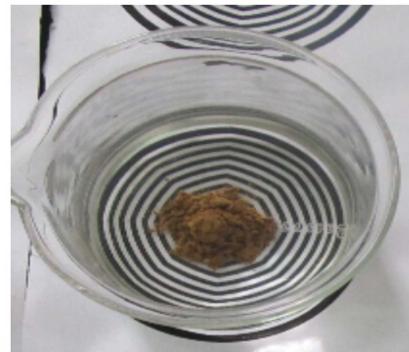


图 2 钙基蒙脱石试验结果

Fig. 2 Dispersive results of Ca-montmorillonite

3.5 验证试验

本水电站工程位于新疆维吾尔自治区阿克苏市阿克苏河一级支流——库玛拉克河中下游温宿县与乌什县交界处(左岸为温宿县, 右岸是乌什县), 试验结果见表 8。

表 8 验证试验结果

Table 8 Results of verification tests

土样 编号	pH	Na^+ $(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	蒙脱 石/%	交 换 性 钠 离 子 百分比	分 散 性 判 定
1	8.51	2.689	1.0	20.34	分散性土
2	8.23	6.151	0.8	10.84	过渡性土
3	8.71	1.031	1.4	17.48	过渡性土
4	8.87	0.436	1.2	6.07	过渡性土
5	8.41	2.795	0.7	20.38	分散性土
6	9.37	0.520	1.3	21.06	过渡性土
7	8.68	0.292	4.6	2.95	非分散性土
8	8.73	0.277	4.1	2.77	非分散性土

本试验所取的 8 组土样中, 1、3、4、6、7、8 号土样 pH 相对较高, 1、2、3、5、6 号土样的交换性钠离子百分比相对较高, 因此, 可利用 pH 与交换性钠离子百分比推断 1、2、3、5、6 具有分散性的可能性更大, 分散性判定试验的结果也证实了上述的推断准确性较高; 并且发现, 7、8 号土样虽然 pH 较高, 但由于其交换性钠离子百分比较小, 土样仍为非分散性土, 说明单一的高 pH 条件不足以引起土体的分散性, 应同

时具备较高的交换性钠离子百分比；由表 8 中土样数据及分散性的判定结果可见，利用 Na^+ 含量以及蒙脱石的总量则难以对土样的分散性做出准确的推断。

4 结 论

(1) 在影响土体分散性的物理、化学和矿物学性质指标中，起决定性因素的是土体的化学指标。

(2) 高 pH 以及较高的交换性钠离子百分比是黏土产生分散性需要同时具备的条件，单纯的高浓度 Na^+ 并不是土体产生分散性的充分条件，不能单纯的将 Na^+ 含量作为预测与评价土体分散性的指标。

(3) 不同基团蒙脱石性质差异极大，因此蒙脱石总量不能作为评价土体分散性的指标。

参 考 文 献：

- [1] 王观平, 张来文, 阎仰中, 等. 分散性黏土与水利工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999: 1 - 2. (WANG Guan-ping, ZHANG Lai-wen, YAN Yang-zhong, et al. Dispersive soil and water conservancy project[M]. Beijing: China Water Power Press, 1999: 1 - 2. (in Chinese))
- [2] SL251—2000 水利水电工程天然建筑材料勘察规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000. (SL251—2000 Specification on investigation of natural building material for water conservancy and hydropower engineering[S]. Beijing: China Water Power Press, 2000. (in Chinese))
- [3] CHARLES H McElory. The use of chemical additives to control the erosive behavior of dispersed clays[C]// Engineering Aspects of Soil Erosion, Dispersive Clay sand Loess. New York: ASCE, USA. 1987: 1 - 16.
- [4] INGLES G O AITCHISON G D. Soil-water disequilibrium as cause of subsidence in natural soils and earth embankments [C]// Proceedings of the Tokyo Symposium on Land Subsidence. Tokyo, 1969: 342 - 353.
- [5] SHERARD J L, DECKER R S, RYKEN R L. Piping in earth of dispersive clay[C]// Proceedings of the ASCE Specialty Conference on the Performance of Earth-supported Structure. West Lafayette, Purdue University, 1972: 589 - 626.
- [6] HOLMGREN G J GS, FLANAGAN C P. Factors affecting spontaneous dispersion of soil materials as evidenced by the crumb test[M]// Dispersive Clays, Related Piping, and Erosion in Geotechnical projects, ASTM STP 623. SHERARD J L, DECKER R S, Eds. Chicago USA: American Society for Testing and Material, 1977: 218 - 239.
- [7] 蒋国澄. 黏性土的结构稳定性及其某些特殊性土的性状. 岩土工程学报, 1986, 8(4): 70 - 75. (JIANG Guo-cheng. Structure stability of clay and properties of some special soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 8(4): 70 - 75. (in Chinese))
- [8] 刘杰. 土石坝渗流控制理论基础及工程经验教训[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 2006. (LIU Jie. Seepage control of earth-rock dams theoretical basis, engineering experiences and lessons[M]. Beijing: China Water Power Press, 2006. (in Chinese))
- [9] 裴孟辛. 钠蒙脱石对土的稳定性影响[C]// 科学研究论文集 第 20 集(岩土工程). 北京: 中国水利水电科学研究院, 1984: 120 - 126. (QIU Meng-xin. Influence of Na-montmorillonite on stabilization of soil[C]// Scientific Proceedings Episode 20 (geotechnical engineering). Beijing: China Water Resources and Hydropower Research Institute, 1984: 120 - 126. (in Chinese))
- [10] 樊恒辉, 李洪良, 赵高文. 黏性土的物理化学及矿物学性质与分散机理[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(9): 1740 - 1745. (FAN Heng-hui, LI Hong-liang, ZHAO Gao-wen. Relation among dispersive mechanism, physical-chemical and mineral properties of clayey soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(9): 1740 - 1745. (in Chinese))
- [11] 赵高文, 樊恒辉, 陈华, 等. 影响黏性土分散性的化学因素及机制分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(6): 202 - 206. (ZHAO Gao-wen, FAN Heng-hui, CHEN Hua, et al. Influence of chemical factors on dispersivity of clayey soil and the dispersive mechanism[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2013, 41(6): 202 - 206. (in Chinese))
- [12] 申卯兴, 薛西峰. 灰色关联分析中分辨系数的选取[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2003, 4(1): 68 - 70. (SHEN Mao-xing, XUE Xi-feng. Determination of discrimination coefficient in grey incidence analysis[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2003, 4(1): 68 - 70. (in Chinese))
- [13] 赵高文, 樊恒辉, 陈华, 等. 蒙脱石对黏性土分散性的影响[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10): 1928 - 1932. (ZHAO Gao-wen, FAN Heng-hui, CHEN Hua, et al. Influence of montmorillonite on dispersivity of clayey soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(10): 1928 - 1932. (in Chinese))

(本文责编 明经平)