

Finite Element Seismic Analysis by Time-History Method between Metro Tunnel and Existing Buildings

Guangchao Zhang

Northeast Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Shenyang Liaoning
Email: 304122199@qq.com

Received: Jul. 1st, 2019; accepted: Jul. 18th, 2019; published: Jul. 25th, 2019

Abstract

Considering the effect on one of the metro tunnel close to some important buildings in Shenyang Line 4, in this paper, the elastic time-history method was used to analyze the effect on the metro tunnel structure during the aseismatic design in running period. The time history curve in the seismic fortification intensity case of the maximum principal stress, the minimum principal stress, as well as the relative horizontal displacement of the open-cut and bored structures were obtained. On this basis, this paper analyzed the seismic action affect between the metro tunnel in running period and important buildings nearby. It showed that the maximum principal stress and the minimum principal stress were far less than the the design strength of the metro structures and the whole structural deformation had a linear change during the defending earthquake. The structures presented a terse and clear bearing behavior without any weak portion. Hence, the metro tunnel structures met the requirements of Aseismatic Design Code of China.

Keywords

Metro Tunnel, Aseismatic Design, Time-History Method, Midas GTS

临近重要建筑物的地下结构抗震时程分析

张广超

中国建筑东北设计研究院有限公司, 辽宁 沈阳
Email: 304122199@qq.com

收稿日期: 2019年7月1日; 录用日期: 2019年7月18日; 发布日期: 2019年7月25日

摘要

针对沈阳地铁四号线某临近重要建筑物区间, 本文采用弹性有限元时程分析的方法对地铁结构进行抗震分析, 得到设防烈度情况下地铁暗挖结构、明挖结构最大主应力、最小主应力及水平相对位移的时程曲线, 分析地震作用对临近建筑物的地铁区间安全运营的影响。分析结果表明: 结构的最大主应力及最小主应力均小于隧道结构混凝土的设计强度; 结构整体变形近似线性变化, 结构传力途径简捷、明确, 无结构薄弱部分, 区间结构满足抗震设计要求。

关键词

地铁区间, 抗震设计, 时程分析, Midas GTS

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国各大、中城市地下轨道交通的迅猛建设, 尤其是在中心城区地铁建设中, 经常会遇到周边民(商)用建筑、城市市政管线等建(构)筑物与地铁结构距离过近的问题, 这一问题在我国快速、大规模城市建设中屡见不鲜[1]。而在地铁施工与运营期间如何保证建(构)筑物安全稳定及地铁施工期间自身的安全也成为地铁建设工作中不可避免的重难点问题[2] [3]。

地震, 这一足以毁灭人类文明的大灾害, 亦是地铁建设者们不可避免需要面对的难题。经过几十年的发展, 现如今对地下结构的抗震分析大体可分为拟静力法及动力分析法[4]。拟静力法将地震作用看作单一方向的动力加速度作用于结构中, 其物理意义明确且计算简洁而受到追捧, 但此法基于弹性理论, 并未考虑时间因素对结构的影响, 也未对进入塑性变形阶段的结构做过多考虑[5]。而动力时程分析方法全面考虑了地震动的振幅、频谱和持时的影响, 能够详细分析结构弹塑性地震反应的全过程[6] [7]。

地铁结构周边存有建筑物时, 常会因自重及如风荷载、地震作用等偶然荷载通过土体传递至地铁结构中, 危及地铁运营安全。但现有常规地铁结构设计过程中, 这一问题并未真正得到充分的重视也未对此类风险工程制定相应的控制标准[8]。基于此, 针对沈阳地铁四号线某临近重要建筑物区间, 本文采用弹塑性有限元时程分析的方法对地铁结构进行抗震分析, 并获得地震作用对临近建筑物的地铁区间安全运营的影响, 为今后类似工程的风险评价及控制结构安全提供一定的参考。

2. 工程概况

2.1. 地铁区间概况

沈阳地铁四号线某区间单洞单线隧道结构, 邻近重要建筑物(7层砖混结构, 条形基础), 采用矿山法+盖挖法施工, 线间距为15 m, 双线结构净距仅6 m, 其结构外侧与邻近建筑最小距离为8.1 m。区间覆土约7 m, 矿山法断面为马蹄形, 净宽5.08 m, 净高5.28 m; 盖挖法断面为矩形, 净宽8.0 m, 净高10.5 m。矿山法结构及盖挖结构衬砌厚度分别为0.4 m、0.6 m(图1)。

区间场地沉积相地层从上至下依次为第四系全新统和更新统黏性土、砂类土及碎石类土组成, 其下

基岩为前震旦系混合花岗岩体。场地为非液化场地，属抗震一般地段。

2.2. 场地地震效应

“沈阳地铁四号线”工程场地处在活动性较强的郟庐断裂带所涉及的范围內，地质构造复杂，所在区域的地震活动比较频繁，最大地震为2013年1月23日在辽阳灯塔市柳条寨镇发生的5.1级地震。

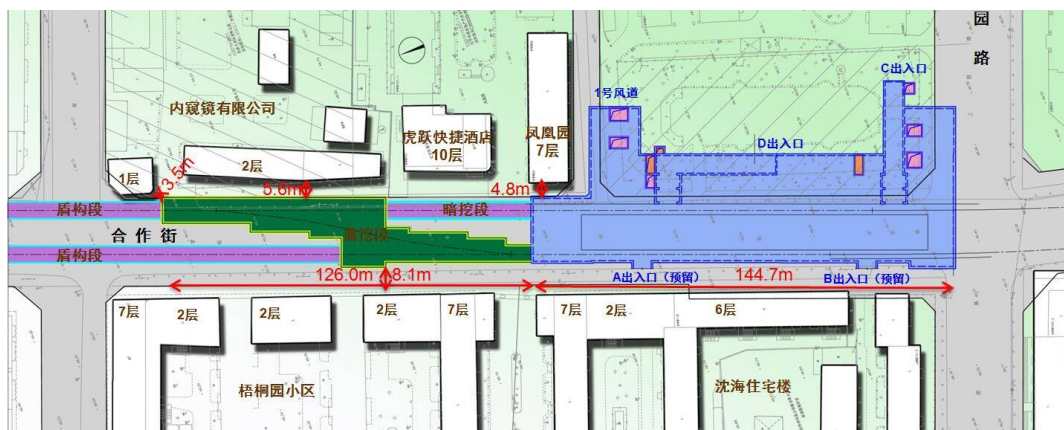


Figure 1. The location of important buildings near metro tunnel
图1. 区间及邻近重要建筑物区位图

场地设计地震分组为第一组，抗震设防烈度为7度，设计基本地震加速度值为0.10 g；场地特征周期值为0.45 s，属III类场地，在VII度(0.10 g)、VIII度(0.20 g)情况下均不会液化，可不考虑地震地表断错的影响。

3. 有限元模型建立

3.1. 分析原则及计算动参数

本文应用Midas GTS程序，对区间结构抗震性能进行有限元时程分析。由于邻近建筑物结构区间隧道横断面符合平面应变原则，因此采用二维模型进行简化分析，将横断面等效为宽度为单位长度的梁体系进行平面计算，将组成结构的各段梁柱分成梁单元，各单元之间以节点相连，纵向长度按1米计。出于安全考虑，本文采用设防地震(50年超越概率10%)的基岩加速度应谱作为地震反应分析所需的基岩地震动时程，其基岩水平峰值加速度为123 gal，如图2所示。

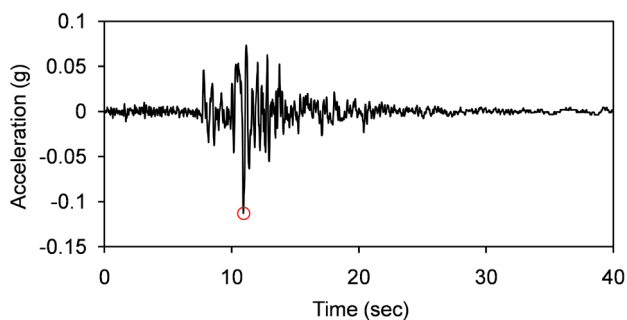


Figure 2. The earthquake motion acceleration time-history curve of bedrock
图2. 基岩地震动加速度时程曲线

3.2. 模型参数

计算采用地层结构整体时程分析, 该分析是把地震运动视为一个随时间变化的过程, 并将地下结构和周围土体介质视为共同受力变形的整体, 通过直接输入地震加速度记录, 在满足变形协调的前提下分别计算结构物和土体介质在各个时刻的位移, 速度, 加速度以及应变和内力, 据以验算场地的稳定性。

模型中土体的本构关系采用 Mohr-Coulomb 模型, 邻近建筑物及区间结构采用常规混凝土弹塑性本构模型。参考相关规范的分析经验, 竖向地震加速度确定为水平向的 0.75 倍。各土层参数如表 1 所示:

Table 1. Parameters of soils

表 1. 土层参数表

土层	层厚(m)	重度 (kN/m ³)	水平基床系数 Ks(MPa/m)	垂直基床系数 Kc(MPa/m)	静止侧压力系数 K ₀
杂填土①	3.5	17	/	/	/
粉质黏土⑤-1-0	18.6	20.2	35	30	0.33
粉细砂⑤-2-0	1.4	18.8	15	15	0.42
中粗砂⑤-3-0	3.9	20.0	27	25	0.39

综合考虑地震波、覆盖层厚度及边界效应的影响, 设置计算模型宽度为 300 m, 高度为 55 m, 模型上表面取至实际地表。对于范围有限的计算区域, 波动能量将在人工截取的边界上发生反射, 使波发生震荡, 导致模拟失真。因此, 模型边界条件采用弹性吸收边界[9]。粘弹性边界不仅可以较好地模拟地基的辐射阻尼, 而且也能模拟远场地球介质的弹性恢复性能, 定义粘性边界需计算土体 x、y、z 方向上的阻尼比。阻尼计算采用如下公式:

$$C_p = \rho \cdot A \cdot \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} = c_p \cdot A \quad (1)$$

$$C_s = \rho \cdot A \cdot \sqrt{\frac{G}{\rho}} = c_s \cdot A \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (3)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4)$$

其中, λ : 体积弹性系数(kN/m²); G : 剪切弹性系数(kN/m²); E : 弹性模量(kN/m²); ν : 泊松比; A : 截面积(m²)。

本文建立的有限元模型如图 3 所示:

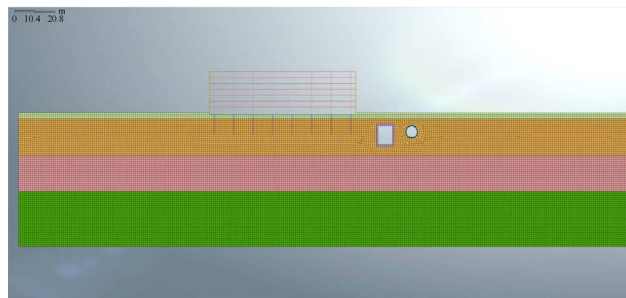


Figure 3. The FEM model using viscous-spring boundary
图 3. 粘弹性边界有限元计算模型

4. 计算结果分析

4.1. 最大/最小主应力时程分析

明挖及暗挖区间结构最大/最小主应力时程曲线列于图 4 和图 5。从图中可知,主应力大小随时间波动剧烈,明挖及暗挖结构最大/最小主应力对应的时间大体相同。对比图 2,最大主应力出现在地震加速度急剧增加的时间点;最小主应力出现在地震加速度达到峰值的时间点;最大主应力先于最小主应力出现。

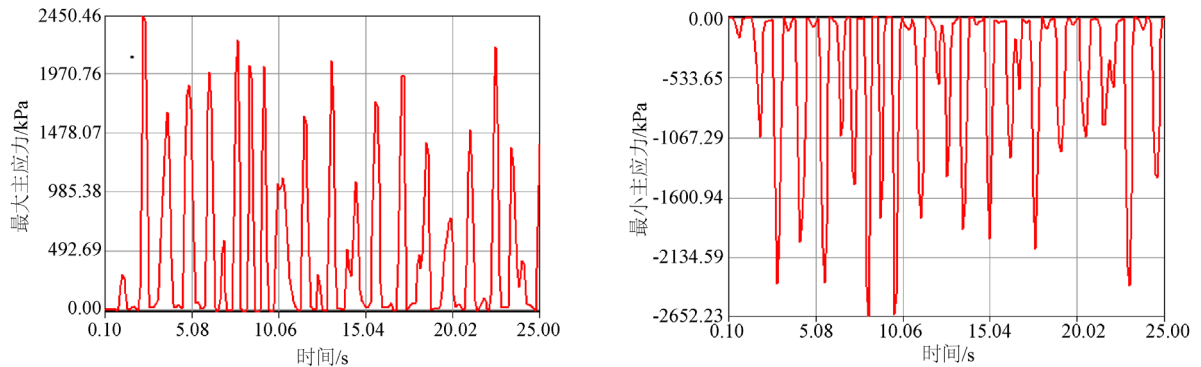


Figure 4. The maximum/minimum stress time-history curve of the cut-and-cover tunnel

图 4. 明挖区间最大/最小主应力时程曲线

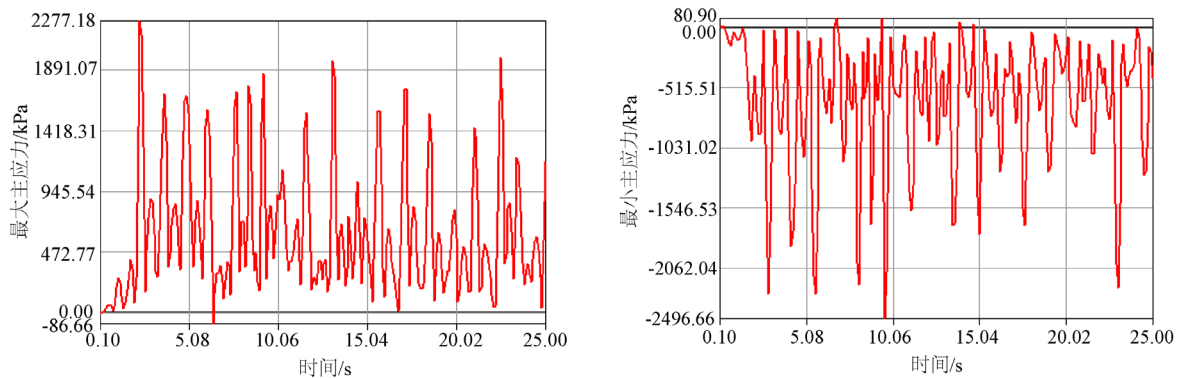


Figure 5. The maximum/minimum stress time-history curve of the undercutting tunnel

图 5. 暗挖区间最大/最小主应力时程曲线

4.2. 最大/最小主应力峰值分析

取最大/最小主应力达到峰值的时间点,对结构进行内力分析,得到最大/最小主应力峰值云图,见图 6 和图 7。对比相关规范所列计算实例[10],结构位移模式相同,计算结构合理有效。从图中可知,明挖结构最大/最小主应力出现在临近建筑物一侧的底角节点处;暗挖结构最大/最小主应力出现在拱顶处,无论明挖亦或暗挖结构,主应力峰值大小均小于混凝土材料的抗压强度。因此,结构设计中采用常规抗震措施即可满足构造措施的要求。

4.3. 结构相对位移时程分析

在考虑了动力时程曲线情况下,区间隧道结构顶部相对水平位移见图 8 和图 9。明挖区间相对水平位移峰值 14.78 mm,暗挖区间相对水平位移峰值为 9.04 mm,二者均满足现行规范的要求[10]。

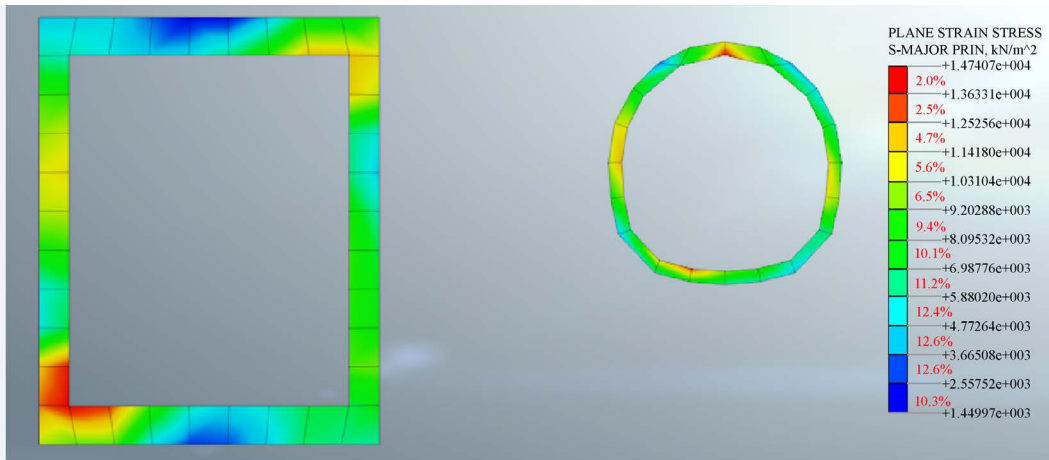


Figure 6. The cloud chart of the maximum principal stress
图 6. 最大主应力云图

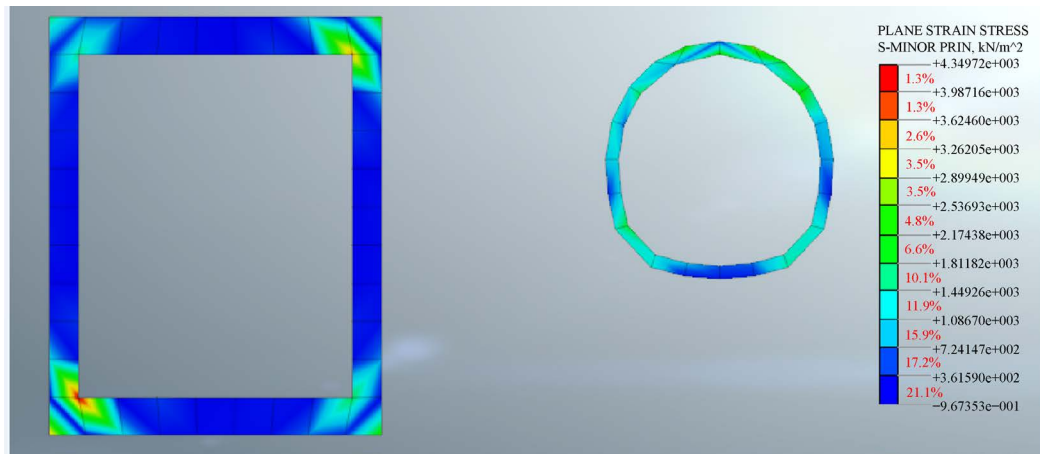


Figure 7. The cloud chart of the minimum principal stress
图 7. 最小主应力云图

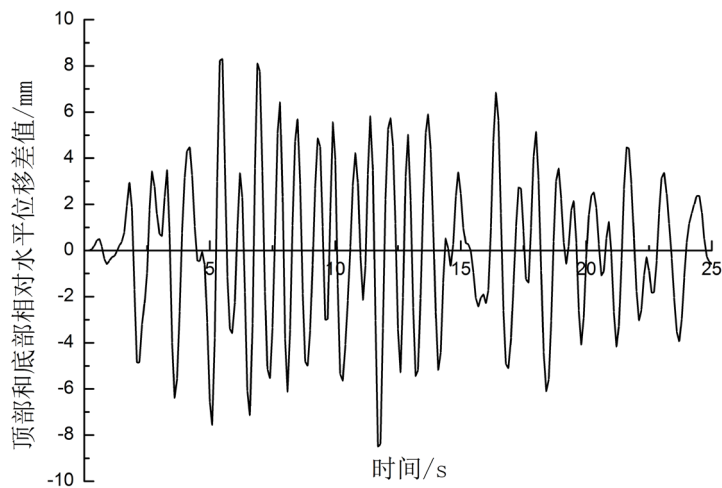


Figure 8. The relative lateral displacement of the cut-and-cover tunnel between top and bottom of the structure
图 8. 明挖区间隧道顶部和底部相对水平位移差值

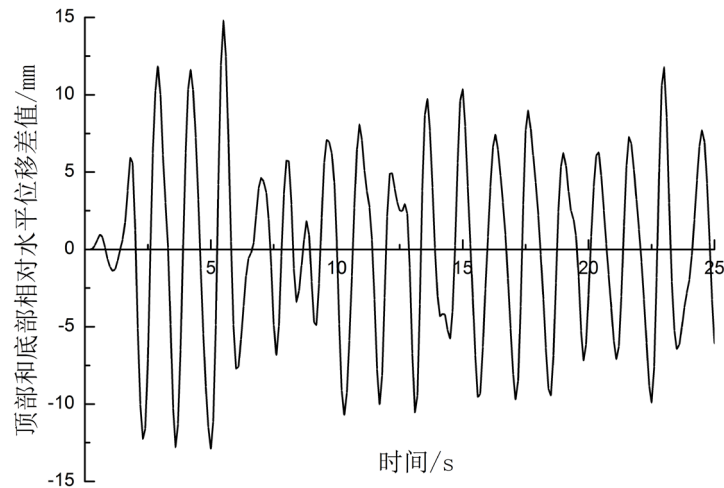


Figure 9. The relative lateral displacement of the the undercutting tunnel between top and bottom of the structure

图 9. 暗挖区间隧道顶部与底部相对水平位移差值

5. 结语

- 1) 主应力大小随时间波动剧烈，明挖及暗挖结构最大/最小主应力对应的时间大体相同。
- 2) 最大主应力出现在地震加速度急剧增加的时间点；最小主应力出现在地震加速度达到峰值的时间点；最大主应力先于最小主应力出现。
- 3) 明挖结构最大/最小主应力出现在临近建筑物的底角节点处；暗挖结构最大/最小主应力出现在拱顶处，二者主应力峰值大小均小于混凝土材料的抗压强度，采用常规抗震构造措施即可满足要求。

基金项目

感谢中建股份科技研发基金(项目编号 CSCEC-2015-Z-40)对本文的资金及相关技术支持。

参考文献

- [1] 徐凌, 陈格际, 刘帅. 基于 FLAC3D 的深基坑开挖与支护数值模拟应用[J]. 沈阳工业大学学报, 2016, 38(1): 91-96.
- [2] 任建喜, 杨锋, 朱元伟. 邻近建筑物条件下西安地铁盾构施工风险评估[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(7): 88-93.
- [3] 汪智慧. 既有建筑与基坑相互影响的有限元分析[J]. 大连交通大学学报, 2017(4): 155-159.
- [4] 陈卫忠, 宋万鹏, 赵武胜, 等. 地下工程抗震分析方法及性能评价研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2017(2): 54-69.
- [5] 李勤熙, 蒋树屏, 林志, 等. 基于性能的隧道抗震设计研究现状[J]. 公路隧道, 2016(1): 1-5.
- [6] 施有志, 华建兵, 李秀芳, 等. 反应位移法在地下综合管廊抗震设计中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2018, 48(6): 179-190.
- [7] 禹海涛, 张正伟. 地下结构抗震设计和分析的反应剪力法[J]. 结构工程师, 2018, 34(2): 138-148.
- [8] 杜修力, 康凯丽, 许紫刚, 等. 地下结构地震反应的主要特征及规律[J]. 土木工程学报, 2018(7): 11-21.
- [9] Zhang, J. and Liu, T. (2018) *P-S V-Wave Propagation in Heterogeneous Media: Grid Method*. *Geophysical Journal International*, **136**, 431-438. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1999.tb07129.x>
- [10] 50011-2010. 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网首页：<http://cnki.net/>，点击页面中“外文资源总库 CNKI SCHOLAR”，跳转至：<http://scholar.cnki.net/new>，搜索框内直接输入文章标题，即可查询；
或点击“高级检索”，下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2326-3431，即可查询。
2. 通过知网首页 <http://cnki.net/>顶部“旧版入口”进入知网旧版：<http://www.cnki.net/old/>，左侧选择“国际文献总库”进入，搜索框直接输入文章标题，即可查询。

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ojtt@hanspub.org