

基于风险的桥梁抗灾性能设计方法

陈艾荣, 杨延凯, 马如进

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 基于风险思想, 提出了考虑灾害危险性和桥梁多级性能水平的抗灾设计方法. 根据桥梁结构灾害下的性能要求, 定义量化的桥梁性能目标, 结合易损性分析, 获得灾害下各性能水平的易损性曲线. 通过易损性曲线与灾害危险性模型的卷积, 获得桥梁各性能水平的概率模型, 随后进一步考虑性能水平的损伤比, 实现综合失效风险分析. 以一斜拉桥桥塔为例, 利用建立的方法对地震灾害中桥梁进行了多性能水平分析.

关键词: 桥梁; 风险; 抗灾性能; 设计方法

中图分类号: TU318⁺.1

文献标志码: A

Risk-based Design Method of Disaster-resistance Performance for Bridge

CHEN Airong, YANG Yankai, MA Rujin

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A disaster-resistance design method for bridge based on risk is developed by taking account the hazard model and the multi-level performance of bridge. Considering quantitative performance objects, fragility curves of every performance level are obtained through fragility analysis. The failure risk is determined by considering the failure probability, which is calculated by convolving the fragility curve with the hazard model and the damage ratio of every performance level. A tower of cable-stayed bridge in seismic district is provided to illustrate the method.

Key words: bridge; risk; disaster-resistant performance; design method

桥梁在公路网中占有重要的角色, 同时也最容易受到地震、飓风、冲刷以及船撞等灾害的威胁, 一旦遭到破坏, 不但其自身要面临损失, 整个交通网络

的使用功能也会受到影响^[1]. 因此, 充分考虑灾害对桥梁的影响, 是明确区域性交通畅通的重要条件. 对于当前桥梁设计规范^[2], 各种灾害的设计方法都是基于灾害一致思想发展而来, 这种方法需要明确的是, 当前设计的结构在给定灾害荷载水平下满足给定性能要求, 这种方法应用简单, 并能够给出明确的结果. 但确定的分析方法不能充分体现灾害自身的随机性以及结构损伤和破坏的不确定性. 所以, 从概率的角度考虑桥梁结构在灾害条件下的损伤水平是当前桥梁抗灾设计方法研究的重要方向, 也是基于性能设计思想发展的基础.

风险概念在现实中被广泛地应用于各种灾害, 很多风险准则已经得到应用^[3-7]. 从风险角度考虑桥梁结构面对的各种灾害, 是当前桥梁抗灾设计方面的一个重要方向^[8-10]. 根据风险概念, 采用不同的风险指标来评价结构性能已经逐渐成为共识. Zhu等^[11]以结构可靠度、冗余度和风险指标作为结构的性能指标对结构进行了评价. Wang等^[12]从风险角度对冲刷条件下桥梁的地震响应进行研究, 把地震和冲刷 2 种灾害都以风险的形式呈现, 并基于此提出了合理设计冲刷深度. Ettouney等^[13]从风险角度考虑桥梁结构各种灾害, 并进行了成本分析. Ghosn等^[14]基于 Ferry-Borges 模型和 Monte Carlo 方法对公路桥梁面对的多种极端灾害, 如地震、大风、冲刷和船撞等, 都从风险角度进行了分析. 以上研究虽然从风险思想对结构灾害分析方法进行了研究, 但没有结合性能设计提出统一的抗灾设计方法.

本文基于风险思想, 采用风险一致原则, 根据桥梁结构灾害下的性能要求, 定义量化的桥梁性能目标. 通过易损伤性分析获得各性能水平的易损性曲线和灾害危险性模型在灾害域上的积分, 得出桥梁各性能水平的超越概率. 随后通过性能水平的损伤度, 结合可靠度标准对结构失效概率的要求, 实现综

收稿日期: 2015-09-11

基金项目: “十二五”交通运输部重大科研专项(2011318494160); “十二五”国家科技支撑计划(2014BAB16B05)

第一作者: 陈艾荣(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为桥梁结构设计理论. E-mail: a.chen@tongji.edu.cn

通讯作者: 马如进(1978—), 男, 副研究员, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为桥梁结构设计理论. E-mail: rjma@tongji.edu.cn

合失效风险分析.以一斜拉桥的桥塔地震灾害为例,对以上方法进行说明.

1 风险思想的基本理论

1.1 风险一致准则

当前,风险^[15]是指事件发生的概率与引起后果的乘积,一般表示为

$$R = Pc \quad (1)$$

式中: R 表示风险指标; P 表示事件发生的概率; c 表示事件发生引起的后果.

风险一致准则^[12]建立在灾害危险性模型的基础上,考察的是灾害整体,结构损伤概率是在整个灾害强度的全域上进行评价,而不是只针对个别水平的灾害强度进行评价,如图 1 所示.

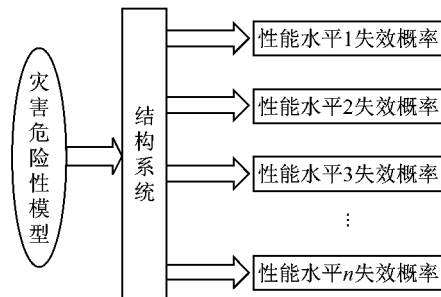


图 1 风险一致思想示意图

Fig. 1 Sketch of risk-consistent theory

风险一致准则,不是片面地只针对个别灾害强度进行评价,结构需求需要表达为灾害强度的函数,如下所示:

$$S_D = H(m) \quad (2)$$

式中: S_D 为结构需求; m 为灾害强度; $H(\cdot)$ 为 S_D 和 m 之间的函数关系.结合结构自身能力模型,就可明确结构性能水平与灾害强度 m 的关系.如果考虑灾害危险性,可得到结构在当前灾害模型下性能水平的超越概率,也就得到了图 1 中结构每个性能水平的失效概率.这就完成了灾害全域上性能评价.

1.2 桥梁工程中的灾害风险

桥梁工程面对各种各样的灾害,当把灾害对结构的破坏问题看成风险时,风险发生的概率主要由两部分组成:第 1 部分是灾害发生的概率,由灾害概率模型给出;第 2 部分是不同灾害强度造成结构不同损伤程度的超越概率,由易损性分析得到.两者在灾害域上的积分^[12,16-17]得到风险发生的概率,可表示为

$$P_{D_i} = \int P(D_i | m) f(m) dm \quad (3)$$

式中: P_{D_i} 为结构损伤水平 D_i 的概率; D_i 为结构在当前灾害下的损伤等级,根据桥梁性能要求提出具体的损伤等级描述; $f(m)$ 是灾害强度 m 的概率密度函数,表示年发生 m 强度等级灾害的概率,一般通过概率累积函数描述,如对于地震灾害,灾害危险性一般认为符合极值分布,本文研究基于我国实际的地震烈度分布情况; $P(D_i | m)$ 表示在给定灾害强度 m 下结构发生损伤等级 D_i 的超越概率,通过易损性分析得到.需要说明的是,这里得到的是超越概率,不是各性能水平的失效概率,每个性能水平的失效概率需要作相减处理.

风险后果可以是关注的各种参数,如经济损失、时间损失、人员伤亡和环境影响等,但这种独立的指标不利于做出决定,特别是对于工程保险情况,所以当前通常的方法是把以上各种参数都转化为经济指标,通过统一的经济指标做出评价.

本文关注结构的性能水平,以每个损伤状态的损伤比表征性能水平的后果.损伤比的概念是用来评价结构能力损失的量,介于 0 和 1 之间,0 意味着结构没有损伤,1 表示结构完全破坏.根据文献^[18]中对桥墩损伤比的定义,轻微损伤、中等损伤和严重损伤的损伤比分别为 3%、8% 和 25%.因此,结构每个性能水平所代表的结构完全失效风险为

$$R_i = P_i c_i \quad (4)$$

式中: R_i 表示性能水平 i 所代表的失效风险; P_i 表示性能水平 i 的失效概率; c_i 表示性能水平 i 的损伤比.因此,考虑所有性能水平的失效概率为

$$R = \sum_{i=1}^n P_i c_i \quad (5)$$

这里失效风险的实质是由不同性能水平转换得到的失效概率,可以通过其与可靠度标准中的结构失效概率进行比较,来指导抗灾设计.

2 灾害危险性和结构易损性分析

2.1 灾害危险性

灾害危险性模型是用来描述桥梁所在位置不同强度某种灾害发生概率的曲线.本文以地震灾害为例,地震灾害危险性一般以给定场地发生大于指定强度 m 的概率来表达,地震强度一般以地震动峰值加速度(PGA)或者指定周期的谱加速度 s_a 表示.根据我国地震烈度调查及研究成果,地震危险性用极值 III 型分布来拟合地震烈度的概率分布,分布函数^[19]表达为

$$F(m) = \exp\left(-\frac{1}{T}\left(\frac{\omega-m}{\omega-\epsilon}\right)^k\right) \quad (6)$$

式中: $F(m)$ 为地震烈度 m 的年累积概率函数; ω 为烈度上限值,一般地震烈度取为 12 度; ϵ 为烈度众值,即在一定时期内超越概率为 $1 - e^{-1} = 0.632$ 的烈度值; k 为形状参数,具体取值方法参考文献[19],设计参数根据桥梁所处位置,设防烈度为 8 度,烈度众值为 5.45, k 为 6.87; T 为明确地震危险性分布参数的结构设计基准期,取 50 年.通过对上式微分得到地震危险性的概率密度方程为

$$f(m) = \frac{k(\omega-m)^{k-1}}{T(\omega-\epsilon)^k} \exp\left(-\frac{1}{T}\left(\frac{\omega-m}{\omega-\epsilon}\right)^k\right) = \frac{(12-m)^{5.87}}{10^6} \exp\left(-\frac{1}{50}\left(\frac{12-m}{5.55}\right)^{6.87}\right) \quad (7)$$

烈度与 PGA 的关系^[19]如下所示:

$$PGA = 10^{(m \cdot \text{Log} 2 - 0.01)} \quad (8)$$

式中:PGA 的单位为 g ;Log 是以 10 为底数的对数函数.

这样就获得了地震危险性及其概率密度方程,考虑 PGA 为地震强度指标的地震危险性曲线在对数坐标系中的表达如图 2 所示.

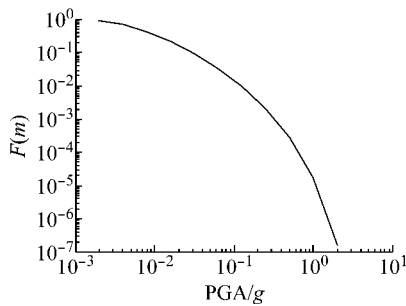


图 2 地震危险性曲线

Fig.2 Earthquake hazard curve

2.2 易损性分析方法

结构易损性是指桥梁结构在某种灾害不同水平强度下,发生不同损伤程度的可能性,或者说桥梁结构达到某一极限状态或者性能水平的超越概率.桥梁结构的地震易损性分析是当前研究较为广泛的一种方法^[19-22],主要分为超越损伤状态的频数统计法、直接回归概率需求模型的线性拟合法和能力需求比模型的曲线拟合法^[22].第 1 种方法是对大量数据的直接统计,需要大量的样本,但随着计算机能力的不断提高,结合神经网络方法,大样本已经越来越容易实现^[19,23-25];后 2 种方法是采取拟合方法.考虑到易损性曲线函数需要结合灾害危险性函数进行积分运算,本文采取最后一种能力需求比拟合方法,如下所示:

$$\mu = a(\ln(\text{PGA}))^2 + b\ln(\text{PGA}) + c \quad (9)$$

$$\sigma = \sqrt{S_r/(n-2)} \quad (10)$$

$$P_f = P_f\left[\frac{S_D}{S_c} \geq 1\right] = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(1) - \mu}{\sigma}\right) = \Phi\left(\frac{\mu}{\sigma}\right) \quad (11)$$

式中: a 、 b 和 c 为回归参数; S_c 为结构能力; $\mu = S_D/S_c$ 为对数坐标系下回归得到的能力需求比均值; σ 为标准差; S_r 为回归分析的残差平方和; n 为回归样本个数; Φ 为标准正态分布累积函数; P_f 为对应性能水平的失效超越概率.本文选取文献[19]中远场Ⅲ类场地 56 条地震波,进行基于增量动力分析 (IDA),得到桥塔关键截面的易损性曲线.

除地震灾害的易损性分析外,其他灾害的易损性分析也可参考这种方法进行.Seo 等^[26]在基于性能的抗风设计研究中,就采取频数统计方法对桥梁在风灾害下的易损性进行了研究.

3 实例与分析

本文以一斜拉桥桥塔地震灾害下的性能分析为例来说明以上方法.本文桥梁采用某超大跨径斜拉桥,桥塔高度为 300 m.采取开源有限元软件 Opensees 对桥梁结构进行地震时程分析.全桥模型中,上部主梁和拉索采用弹性单元,桥塔塔身采用考虑材料强度的非线性单元,采用纤维截面考虑钢筋和混凝土应变,塔横梁采用弹性单元.塔底采取固结处理,只分析桥塔纵向地震效应.桥塔有限元模型如图 3 所示.采取 Matlab 软件对计算结果进行拟合分析及数值积分.

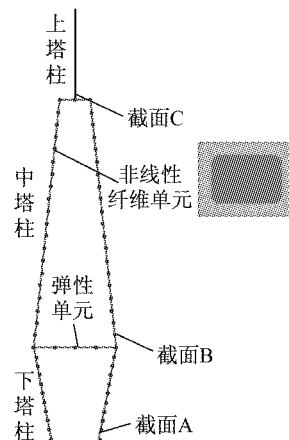


图 3 桥塔有限元模型

Fig.3 Finite element model of the tower

3.1 性能水平定义

明确结构的失效或者损伤状态,需要定义结构

单元的能力. 根据桥梁结构构件的重要性程度、对桥梁使用功能的影响以及维修费用, 不同的构件采用不同的方式定义损伤状态. 例如, 桥墩桥塔或者基础的破坏会直接影响桥梁竖向和横向的承载能力, 严重的破坏直接导致桥梁的倒塌. 本文只考虑桥梁最重要桥塔结构的损伤状态, 不考虑支座的失效及损伤. 假定桥梁为纵飘体系, 桥塔不限制主梁的纵向位移和绕横桥方向转动的自由度, 其他 4 个自由度完全限制.

对于钢筋混凝土柱, 由不同的指标来评估结构的损伤状态, 如层间位移比、位移延性和曲率延性等^[27]. 截面曲率直接反映截面内不同位置钢筋和混凝土的应力应变情况^[28], 所以本文采用混凝土材料和钢筋材料不同应变情况下对应的峰值截面曲率来定义结构的损伤状态, 如表 1 所示^[22].

表 1 截面损伤等级及对应参数

Tab. 1 Section damage level and the corresponding parameters

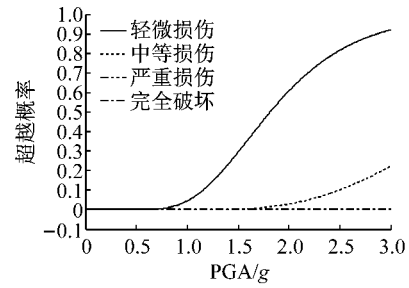
损伤状态	材料应变定量表达
无损伤(完全弹性)	$\epsilon_s \leq \epsilon_y$
轻微损伤(总体保持弹性)	$\epsilon_y < \epsilon_s \leq \epsilon_{sh}$ 且 $\epsilon_c \leq 2\epsilon_{co}$
中等损伤(可修复损伤)	$\epsilon_{sh} < \epsilon_s \leq 0.55\epsilon_{su}$ 且 $2\epsilon_{co} < \epsilon_c \leq 0.75\epsilon_{ccu}$
严重损伤(倒塌控制损伤)	$0.55\epsilon_{su} < \epsilon_s \leq \epsilon_{su}$ 且 $0.75\epsilon_{ccu} < \epsilon_c \leq \epsilon_{ccu}$
完全破坏(倒塌)	$\epsilon_s > \epsilon_{su}$ 或 $\epsilon_c > \epsilon_{ccu}$

注: 各符号参见文献[22], 其中, $\epsilon_{sh} = 0.015$, $\epsilon_{su} = 0.09$, $\epsilon_{co} = 0.002$.

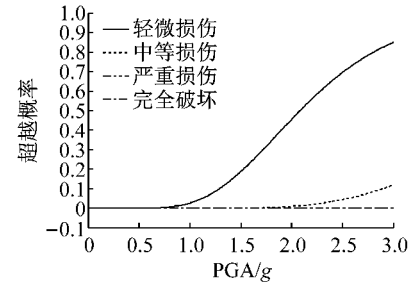
3.2 结果及分析

根据易损性分析方法, 考虑桥梁纵向地震, 分别对图 3 中的 3 个截面(截面 A~C)进行地震易损性分析^[23]. 最大 PGA 取为 3g, 不考虑截面能力的随机性, 分别考虑 4 个损伤状态的易损性, 即式(3)中的 $P(D_i | m)$. 截面 A 和 C 的易损性曲线如图 4 所示. 从图中可以看出, 桥塔纵向地震易损性主要集中在轻微损伤和中等损伤, 严重损伤和完全破坏的超越概率很小. 由于截面 B 损伤概率明显很小, 这里不再给出. 对于桥塔结构, 可以按照串联体系考虑, 截面 A 和 C 的易损性比较, 如图 5 所示. 根据比较结果, 截面 A 也就是塔底截面, 更容易受到损伤, 塔底截面的性能水平控制桥塔的抗震性能.

考虑桥塔处地震危险性模型, 按照式(3)经过积分计算, 4 个性能状态的年失效概率如图 6 所示. 可以看出, 轻微损伤的年失效概率超过 10^{-6} , 为最大值, 接着是中等损伤, 严重损伤和完全破坏明显更小. 这与结构性能设计的初衷—越严重损伤发生概率越小相符. 对于大跨径桥梁, 要求桥塔在地震灾害



a 截面 A 易损性曲线



b 截面 C 易损性曲线

图 4 桥塔易损性曲线

Fig. 4 Fragility curves of tower

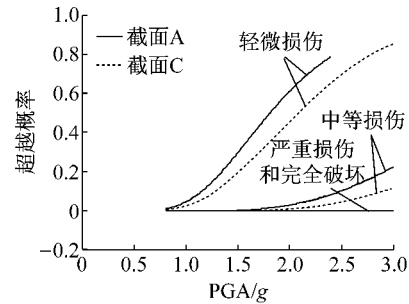


图 5 塔身两个不利位置易损性曲线

Fig. 5 Fragility curves of two key sections

下需要保持弹性, 本文的计算结果表明, 对于进入需要修复的中等损伤之后, 年失效概率均小于 10^{-6} , 从可靠度的角度满足设计要求. 考虑每个性能水平的损伤比, 根据式(4), 其对应的结构失效风险, 如图 7 所示. 4 个水平性能对应的年失效风险都小于 10^{-6} (约对应可靠度 4.7), 且轻微损伤对应的失效风险最大, 其次是中等、严重损伤和完全破坏, 总体失效风险(见式 5)主要受轻微损伤控制, 也小于 10^{-6} . 因此, 对于本文分析的大跨桥梁桥塔, 轻微损伤和中等损伤是结构要面对的主要性能水平, 采取改善两者的措施可有效提高结构地震灾害下的整体性能水平.

4 结语

本文基于风险思想, 依据风险一致准则, 提出了一个桥梁抗灾设计的新方法. 由于桥梁所面对灾害

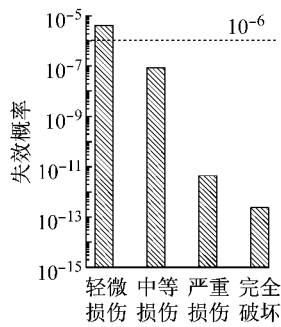


图 6 4 个性能水平失效概率

Fig.6 Failure probability of four performance levels

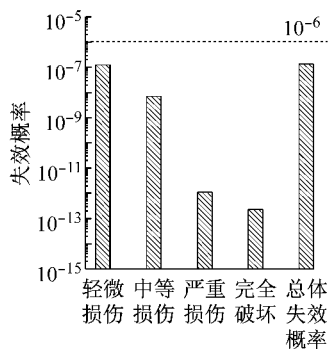


图 7 失效风险

Fig.7 Risk of failure

的随机性,不能片面地只明确有限灾害强度下结构的性能,需要全面考虑灾害对结构性能的影响.本文在结构易损性分析的基础上,结合灾害危险性模型,量化了桥梁灾害条件下各性能水平的失效概率,并基于风险的思想对结构每个性能水平和总体失效风险进行了评价,通过与给定结构可靠度对应的失效概率比较,来评估结构的御灾能力.

本文提出的方法可以应用到桥梁结构面对的各种灾害,对结构的给定性能水平和综合失效风险能给予评价,与现有可靠度设计方法有效结合.同时从风险思想来考虑灾害,可为桥梁的多灾害设计中风险组合和结构成本优化分析提供理论支撑.

参考文献:

[1] Chen S R, Wu J. Modeling stochastic live load for long-span bridge based on microscopic traffic flow simulation [J]. Computers & Structures, 2011, 89(9/10): 813.

[2] 中华人民共和国交通运输部. JTG/T B02-01—2008 公路桥梁抗震设计细则 [S]. 北京:人民交通出版社, 2008. The Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG/T B02-01—2008 Guidelines for seismic design of highway bridges [S]. Beijing: China Communications Press, 2008.

[3] Biondini F, Frangopol D M, Malerba P G. Uncertainty effects on lifetime structural performance of cable-stayed bridges [J].

Probabilistic Engineering Mechanics, 2008, 23(4): 509.

[4] Dec A, Bocchini P, Frangopol D M. A probabilistic approach for the prediction of seismic resilience of bridges [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2013, 42(10): 1469.

[5] Dec A, Frangopol D M. Life-cycle risk assessment of spatially distributed aging bridges under seismic and traffic hazards [J]. Earthquake Spectra, 2013, 29(1): 127.

[6] Frangopol D, Lin K, Estes A. Life-cycle cost design of deteriorating structures [J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(10): 1390.

[7] Frangopol D M. Life-cycle performance, management, and optimisation of structural systems under uncertainty: accomplishments and challenges [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2011, 7(6): 389.

[8] Lee K H, Rosowsky D V. Fragility analysis of woodframe buildings considering combined snow and earthquake loading [J]. Structural Safety, 2006, 28(3): 289.

[9] Yin Y-J, Li Y. Probabilistic loss assessment of light-frame wood construction subjected to combined seismic and snow loads [J]. Engineering Structures, 2011, 33(2): 380.

[10] Ellingwood B R. Risk-informed condition assessment of civil infrastructure: state of practice and research issues [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2005, 1(1): 7.

[11] Zhu B, Frangopol D M. Reliability, redundancy and risk as performance indicators of structural systems during their life-cycle [J]. Engineering Structures, 2012, 41:34.

[12] Wang Z, Padgett J E, Dueñas-Osorio L. Risk-consistent calibration of load factors for the design of reinforced concrete bridges under the combined effects of earthquake and scour hazards [J]. Engineering Structures, 2014, 79: 86.

[13] Ettouney M M, Alampalli S, Agrawal A K. Theory of multihazards for bridge structures [J]. Bridge Structures, 2005, 1(3): 281.

[14] Ghosn M, Moses F, Wang J. NCHRP report: design of highway bridges for extreme events [R]. Washington D C: Transportation Research Board of the National Academics, 2003.

[15] 阮欣, 陈艾荣, 石雪飞. 桥梁工程风险评估 [M]. 北京:人民交通出版社, 2008. RUAN Xin, CHEN Airong, SHI Xuefei. Risk assessment of bridge engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2008.

[16] Hossain M R, Ashraf M, Padgett J E. Risk-based seismic performance assessment of Yielding Shear Panel Device [J]. Engineering Structures, 2013, 56:1570.

[17] Padgett J E, Dennemann K, Ghosh J. Risk-based seismic life-cycle cost: benefit (LCC-B) analysis for bridge retrofit assessment [J]. Structural Safety, 2010, 32(3): 165.

[18] Bocchini P, Frangopol D M, Ummenhofer T, et al. Resilience and sustainability of civil infrastructure: toward a unified approach [J]. Journal of Infrastructure Systems, 2014, 20(2): 04014004.

[19] 冯清海. 特大桥梁地震易损性与风险概率分析 [D]. 上海:同济大学, 2008.