

基于地震损伤指数的地震人员伤亡预测方法

何明哲, 周文松

(哈尔滨工业大学 土木工程学院, 150090 哈尔滨, zhouwensong@hit.edu.cn)

摘要: 为弥补 HAZUS 方法在损伤中值确定中存在的主观性等不足, 引入 Park - Ang 损伤模型中的地震损伤指数概念, 采用 HAZUS 方法的理论框架, 提出基于地震损伤指数的地震人员伤亡预测方法. 通过对某 6 层钢筋混凝土框架进行地震人员伤亡分析, 表明提出的方法在地震人员伤亡预测中的科学性和可行性.

关键词: HAZUS 方法; 地震损伤指数; 地震人员伤亡预测

中图分类号: P315.9; TU313.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367 - 6234(2011)04 - 0023 - 05

Prediction of seismic casualties based on the seismic damage index

HE Ming-zhe, ZHOU Wen-song

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China, zhouwensong@hit.edu.cn)

Abstract: For making up the insufficiency of HAZUS method, that is the determination of damage mean value in the HAZUS method is subjective and fuzzy, the Seismic Damage Index (SDI) in Park-Ang damage model is introduced to describe the structural damage status. Combining the theoretical frame of HAZUS method, a SDI-based prediction method of seismic casualties was proposed, and a six-floor concrete frame structure was analyzed with the proposed method. Results show the feasibility of the proposed method.

Key words: HAZUS method; seismic damage index; prediction of the seismic casualties

现有的有关地震人员伤亡预测的方法主要可分为不考虑和考虑易损性参数两大类^[1]. 不考虑易损性参数的伤亡预测方法主要考虑了地震震级、烈度、震发时间、人口密度等因素与人员伤亡率的关系, 通过统计分析得到相关经验公式. 该方法理论性较差, 但公式简洁、概念明确, 在地震人员伤亡预测中多次被采用. 考虑易损性参数的伤亡预测方法可分为确定性方法和概率性方法. 后者采用概率的方法描述结构在地震动作用下的各环节及其相互联系, 代表性方法有 ATC - 40 方法^[2]、HAZUS 方法^[3]以及 PEER 方法^[4]. 其中, HAZUS 方法以其划分详细、采用地震动参数进行地震动评估等特点代表着该领域的最高水平. 然而, HAZUS 方法不能对结构损伤状态进行定量化描述与划分, 影响了其预测效果. 为此, 将地震损伤指数的概念引入 HAZUS 方法, 并提出基于地震

损伤指数的地震人员伤亡预测方法.

1 预测地震人员伤亡的 HAZUS 方法

1.1 HAZUS 方法的基本思想

HAZUS 方法根据实际要求对诸多涉及到人员伤亡的数据进行搜集、分类、统计. 主要考虑以下因素^[5]: 人员伤亡等级; 震发时间; 人口分布情况; 房屋分类; 损伤状态; 损伤模型中伤亡比的数据分类. 在此基础上, 通过地震危险性分析或者是用户输入得到特定区域的地震动反应谱, 并将其转化为相应的地震需求谱, 接着将区域内各个类型结构的能力以 Pushover 曲线的形式表示, 并将其转换为相应的能力谱. 进而通过能力谱与需求谱的交点求得结构的性能点作为易损性分析的输入, 得到结构在各个离散损伤状态下的破坏概率, 最后通过各个损伤状态的损失比计算出相应损失.

1.2 HAZUS 方法中的结构易损性分析

HAZUS - AEBM 模块中对于易损性函数采用

收稿日期: 2009 - 10 - 26.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2007CB714200).

作者简介: 何明哲(1982—), 男, 硕士研究生.

了正态分布的假定. 给定谱位移(或其他结构响应参数, 本文采用顶点目标位移)的条件下, 结构超越某一特定损伤状态的条件概率可由下式求得^[3]:

$$P[D_s \geq d_s | S_d] = \Phi\left[\frac{1}{\beta_{ds}} \ln\left(\frac{S_d}{\bar{S}_{d,ds}}\right)\right]. \quad (1)$$

式中: S_d 为结构谱位移(或其他结构响应参数)平均值; $\bar{S}_{d,ds}$ 为各损伤状态中值; β_{ds} 为相应标准差, 文献[3]建议取 2.5; $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数.

1.3 HAZUS 方法中的地震人员伤亡模型

采用考虑诸多因素的事件树模型, 见图 1^[3], 其中, 第 1 列表示人口分布; 第 2 列表示房屋(桥梁)结构类型; 第 3 列表示结构易损性, 由式(1)计算; 第 4、5 列均为人员伤亡状态. 事件树模型中, 每个节点处有不同分支, 分支事件的概率之和为节点前事件的概率, 依此类推. 按此方法对室内人员伤亡进行预测.

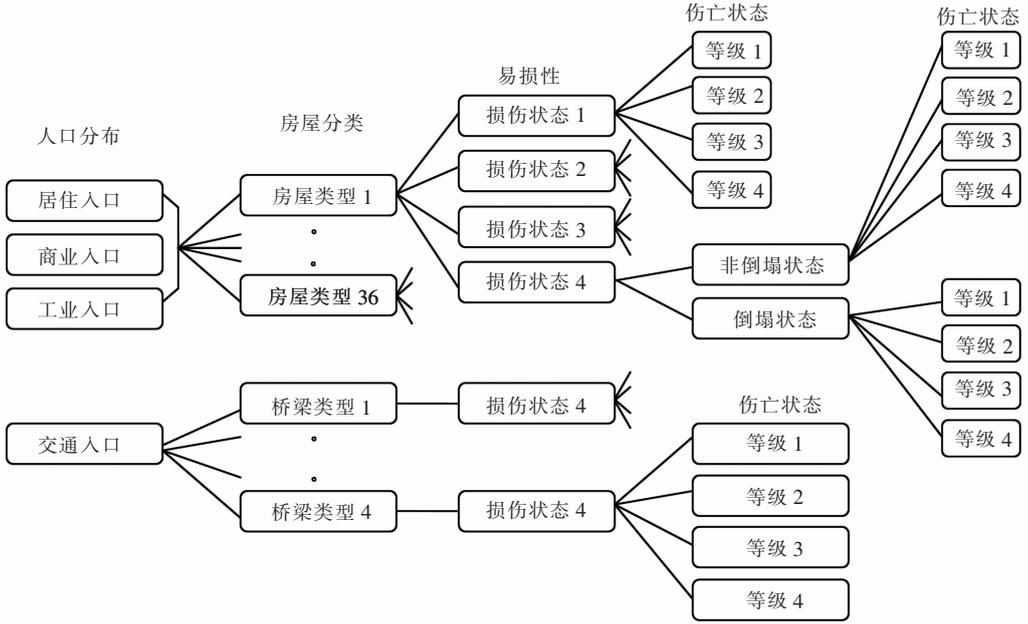


图 1 HAZUS 室内人员伤亡预测的事件树模型

1.4 HAZUS 方法的评价

HAZUS 方法对结构类型、使用功能、使用特点、房屋破坏等级、人员伤亡等级划分详细, 且基于地震动参数进行地震损伤评估, 摒弃了传统的基于烈度的评估方法, 从而避免了因基于烈度评估造成的模糊性等问题. 也正是因为以上诸多优点, 从某种意义上说 HAZUS 方法代表着目前国际震害预测的最高水平. 然而, HAZUS 方法也有一定的不足, 具体体现在作为界定结构损伤状态的损伤中值的确定具有较大的主观性. HAZUS - AEBM 模块建议以由 Pushover 分析得到的能力曲线为主要信息源, 在保持与 HAZUS - MH 手册中给出的结构各个损伤状态的宏观描述相一致的前提下, 依据所提供的指导性原则, 去确定结构各个损伤状态的中值. 但其对各个损伤状态的描述很模糊, 一般为定性描述, 这样就意味着针对同样结构不同用户得到的损伤中值会有较大差异, 从而导致各个损伤状态中值的确定具有主观性和模糊性. 鉴于此, 引入地震损伤模型中地震损伤指数的概念对 HAZUS 方法进行完善, 并提出基于地震损

伤指数的地震人员伤亡预测方法.

2 基于地震损伤指数的地震人员伤亡预测方法

2.1 地震损伤指数

2.1.1 地震损伤模型

为了更合理地反映强震往复作用下结构的弹性变形和低周疲劳效应对结构地震损伤的影响, Park 和 Ang^[6] 提出如下钢筋混凝土构件最大变形与累积滞变耗能线性组合的地震损伤模型:

$$DM = \frac{x_m}{x_{cu}} + \nu \frac{E_{hs}}{F_y x_{cu}}. \quad (2)$$

式中: x_{cu} 为构件在单调加载下的破坏位移; F_y 为构件屈服剪力; x_m 为构件在地震作用下最大变形; E_{hs} 为构件在地震作用下的累积滞变耗能; ν 为构件耗能因子.

Fajfar^[7] 引入正规化累积滞变耗能参数 γ_h 描述结构累积滞变耗能, 即

$$\gamma_h = \frac{1}{\mu_m} \sqrt{\frac{E_{hs}}{F_y x_y}}. \quad (3)$$

式中 μ_m 为地震作用下构件的最大位移延性系数, $\mu_m = x_m/x_y$, x_y 为构件的屈服位移。

应用正规化累积滞变耗能参数 γ_h , 式(2)可表示为

$$DM = (1 + \nu\gamma_h^2 \mu_m) \frac{\mu_m}{\mu_{cu}} \quad (4)$$

式中 μ_{cu} 为构件极限破坏延性系数, $\mu_{cu} = x_{cu}/x_y$. ν 对于普通结构取 0.1^[8]; γ_h 可按文献[9]取 0.8.

μ_{cu} 可表示为^[10]

$$\mu_{cu} = (1 - 0.4n_0) \left(\frac{5.0f_c}{f_y} + 90\rho_w + 0.6\lambda + \frac{0.2}{n_0^2 + 0.05} \right) \quad \lambda < 2.0, \quad (5)$$

$$\mu_{cu} = (1 + 0.15\lambda) (0.125 + 1.34 \sqrt{100\rho_w}) / (n_0 + 0.143) \quad \lambda \geq 2.0. \quad (6)$$

由以上各式可以得到构件的损伤指数或者层剪切结构的层损伤指数。

2.1.2 结构整体地震损伤指数

欧进萍等^[11]考虑到下部楼层具有相对的重要性以及结构损伤较为严重的楼层对整体损伤贡献更大的特点,提出结构整体地震损伤可根据结构楼层地震损伤加权平均计算,即

$$GDM = \sum_{i=1}^n \lambda_i DM_i \quad (7)$$

式中: λ_i 为权系数, $\lambda_i = \frac{(n+1-i)DM_i}{\sum_{j=1}^n (n+1-j)DM_j}$; DM_i

为结构第 i 层地震损伤指数; n 为结构总层数。

2.2 基于地震损伤指数的地震人员伤亡预测方法

与关在静力弹塑性分析过程中,根据加载过程中各个构件的变形,分别应用式(4)、(7)计算出各个构件的损伤指数和结构整体损伤指数,并表示为如下函数关系^[12]:

$$GDM = \Phi[x_1, \phi, (a_g, v_g, t_D), (\lambda, n_0, \rho_w, f_c, f_y), Z_1(T_n, T_c, T_D)].$$

式中: ϕ 为结构的第一振型; x_1 为结构顶点位移。

通过 Pushover 曲线与结构损伤指数的关系,可将结构地震损伤指数同 HAZUS 方法中的谱输入联系起来,由此得到了在特定损伤指数下的谱位移、顶点目标位移,进而由式(1)计算出结构处于某种损伤状态的概率。现将基于地震损伤指数的 HAZUS 方法步骤详述如下:

- 1) 建立结构的模型;
- 2) 对结构的模型进行 Pushover 分析,得到基底剪力-顶点位移关系曲线;
- 3) 坐标变换,将 Pushover 分析得到的能力曲

线转化为 $a-D$ 格式的反应谱曲线;

4) 结合结构所处场地类型等因素,建立用于该模型的弹性反应谱曲线;

5) 利用 Chopra 改进能力谱方法 A, 采用 Krawinkler-Nassar 模型的 $R_y - \mu - T_n$ 关系式,求出弹塑性反应谱曲线与能力谱曲线的交点,即性能点;

6) 按照式(4)计算构件的损伤指数 DM_i , 进而按式(7)计算出结构整体损伤指数;

7) 结合结构地震损伤指数和 Pushover 分析得到的能力曲线,做出结构整体损伤指数-顶点目标位移关系曲线;

8) 结合损伤状态的损伤指数划分,确定处于不同损伤状态的顶点目标位移,即损伤中值;

9) 将所得损伤中值,代入式(1)中,得到结构处于某损伤状态的超越概率,进而得到结构处于某种损伤状态的概率,代入 HAZUS 人员伤亡模型,得到人员伤亡概率(人员伤亡比)。

3 基于地震损伤指数的钢筋混凝土框架地震人员伤亡分析

3.1 工程概况

考虑某 6 层钢筋混凝土结构^[13]. 该建筑高 23.32 m, 平面为 24.40 m × 58.56 m (图 2、3). 场地类型为 IV 类. 梁柱混凝土设计强度为 34 N/mm², 纵向钢筋强度为 413 N/mm², 箍筋强度为 413 N/mm². 结构顶层质量为 1.229 × 10⁶ kg, 1~5 层质量分别为 1.367 × 10⁶ kg.

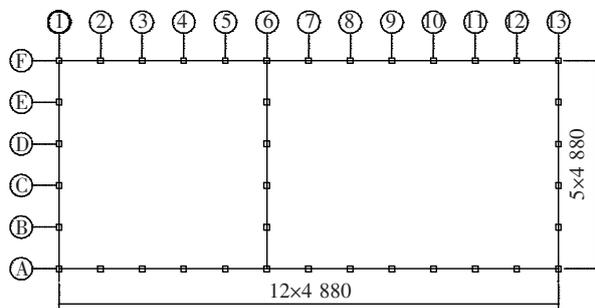


图2 结构平面图

3.2 基于地震损伤指数的地震人员伤亡预测

采用力控制,应用 IDARC2D5.0 程序对该结构进行倒三角加载模式下的 Pushover 分析,得到等效单自由度体系基底剪力-顶点位移曲线,如图 4 所示. 根据美国 FEMA273 中建议,将上述所得 Pushover 曲线进行二折线的拟合,并转化为 $a-D$ 格式的能力谱曲线,如图 5 所示。

采用 Krawinkler-Nassar 提出了基于双线性体系的弹塑性谱,以八度烈度(罕遇地震 $\beta_{max} =$

0.90) 为例, 根据 Chopra 改进能力谱方法 A, 确定等效单自由度体系的延性系数 $\mu = 2.78$, 以及顶点目标位移 $\delta_t = 76.8 \text{ mm}$, 如图 6 所示.

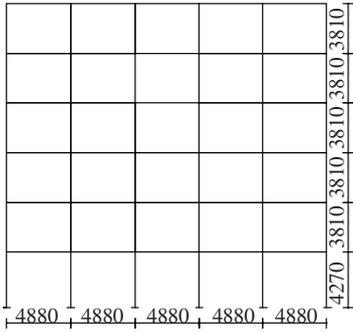


图 3 结构立面图

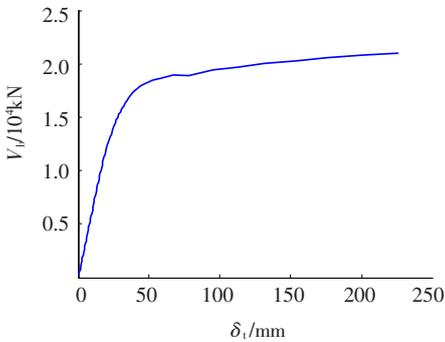


图 4 Pushover 分析曲线

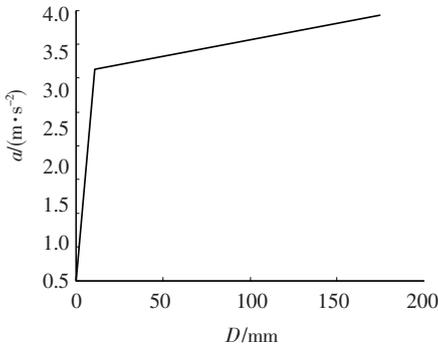


图 5 折线化的能力谱曲线

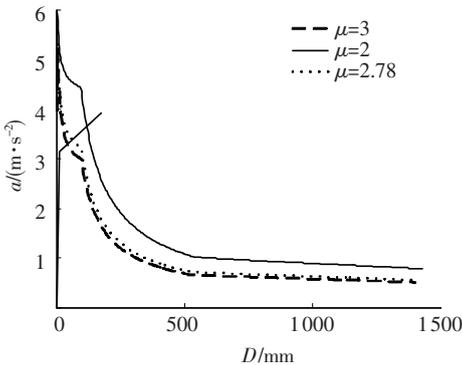


图 6 八度烈度下能力 - 反应图

式(4) $\nu = 0.1$, 并由式(5)得到结构各层的破坏延性系数 μ_{cu} , 同时得到各层屈服位移, 见表 1.

同样, 对于结构 Pushover 分析的某个位移状

态, 很容易确定该状态下各层层间位移, 进而得到相应的最大位移延性系数 μ_m .

由式(4)可得在八度烈度下的结构层损伤指数, 见表 2. 由式(7)计算出八度烈度下结构整体损伤指数 $GDM = 0.546$.

表 1 结构各层破坏延性系数

层数	μ_{cu}	层间屈服位移/mm
第 1 层	2.41	13.210
第 2 层	2.64	10.512
第 3 层	3.13	10.212
第 4 层	4.09	9.600
第 5 层	4.23	9.497
第 6 层	4.23	9.497

表 2 八度烈度下结构层损伤指数

层数	第 1 层	第 2 层	第 3 层	第 4 层	第 5 层	第 6 层
DM	0.594	0.641	0.515	0.349	0.261	0.147

同样可得出六度、七度和九度烈度下的结构整体损伤指数 GDM 与顶点目标位移 δ_t , 进而得到两者关系曲线, 如图 7 所示.

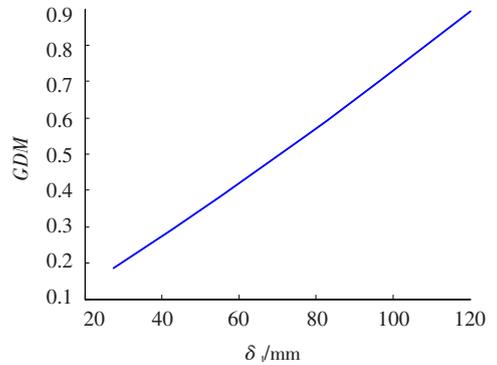


图 7 结构整体损伤指数 - 顶点目标位移关系

结构整体损伤指数从数量上反映了结构破坏的程度, 国内外对不同损伤程度的损伤指数界定开展了一系列的研究. 文献[5]中介绍了 Ghobarah 提出的各损伤等级对应的损伤指数变化范围, 见表 3. 结合图 7 确定出此例中对应于不同损伤程度的损伤中值, 分别为 22.35、43.83、108.8 mm.

表 3 不同损伤程度的损伤指数范围

损伤程度	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	倒塌
损伤指数范围	0 ~ 0.15	0.15 ~ 0.30	0.30 ~ 0.80	> 0.80

下面以八度罕遇地震为例, 对结构进行易损性分析. 由式(1)代入相关数据, 计算在给定位移下结构处于不同损伤状态的超越概率分别为 0.689 3、0.588 6、0.444 7. 从而, 结构处于不同破坏状态的概率分别为: $P_S = 0.330 7$, $P_M = 0.100 7$, $P_E = 0.143 9$, $P_C = 0.444 7$.

根据上述分析做出的事件树模型见图 8。

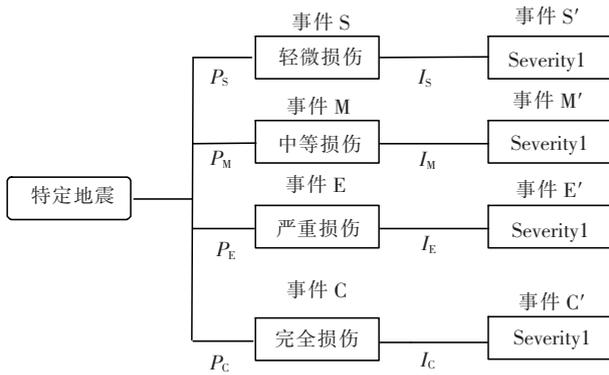


图 8 人员伤亡预测的事件树模型

HAZUS - MR 手册建议^[3]的不同损伤状态下人员伤亡比如表 4 所示。下面以 Severity1 状态为例计算人员伤亡比。分别以 I_S 、 I_M 、 I_E 、 I_C 表示特定损伤状态下人员伤亡比,由事件树模型得 $P_{Severity1} = P_S I_S + P_M I_M + P_E I_E + P_C I_C$,代入相关数值得 $P_{Severity1} = 2.409%$,同理得 Severity2、Severity3、Severity4 状态下的人员伤亡比分别为 0.462%、0.00459%、0.00459%。

表 4 混凝土框架结构不同损伤状态下人员伤亡比 %

损伤程度	Severity1	Severity2	Severity3	Severity4
轻微损伤	0.05	0	0	0
中等损伤	0.25	0.030	0	0
严重损伤	1	0.1	0.001	0.001
完全破坏	5	1	0.01	0.01

4 结 论

1)首次将 Park - Ang 地震损伤指数概念引入 HAZUS 方法中,通过建立结构整体地震损伤指数与顶点目标位移的关系,并结合相关标准,确定用于 HAZUS 方法的损伤中值,与以往经验性方法相比,具有一定的科学性和合理性,弥补了 HAZUS 方法不能对结构损伤状态进行量化描述与划分的缺陷,使得该预测地震人员损伤的方法更为合理。

2)本文提出的方法也有一定的适用范围。本文方法以 Pushover 分析为基础,Pushover 分析的适用条件势必对本方法的应用造成一定的影响。如 Pushover 分析只适用于层数不高和相对规则的结构等,此类因素制约着本文方法的应用;由于存在各种不同的地震损伤指数计算方法,对同一损伤状态计算得到的地震损伤指数不尽相同,也将对本方法的应用具有一定影响。

参考文献:

[1] 马玉宏,谢礼立. 地震人员伤亡估算方法研究[J].

地震工程与工程振动, 2000, 20(4): 140 - 147.

[2] CORMACK T C M C, RAD F N. An earthquake loss estimation methodology for buildings based on ATC - 13 and ATC - 21 [J]. Earthquake Spectra, 1997, 13 (4): 605 - 621.

[3] National Institute of Building Science. HAZUS - MH MR1 technical manual, 2003 [R]. Washington D. C.: The Federal Emergency Management Agency, 2003: 1 - 22.

[4] KRAWINKLER H. Van Nuys Hotel building tested report: exercising seismic performance assessment. pacific earthquake engineering research center [R]. Berkeley, California; University of California at Berkeley, 2005.

[5] CHANDLER A M, MENDIS P A. Performance of reinforced concrete frames using force and displacement based seismic assessment methods [J]. Engineering Structures, 2000, 22(4): 352 - 363.

[6] PARK Y J, ANG H S A. Mechanistic seismic damage modal for reinforced concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1985, 111(4): 722 - 739.

[7] FAJFAR F. Seismic design methodologies for the next generation of code [C] // Proceedings of the International Workshop on Seismic Design Methodologies for the Next Generation of Codes. Bled, Slovenia: [s. n.]: 1997: 1 - 68.

[8] VALLES R E. IDARC2D version 4.0: a computer program for the inelastic damage. analysis of buildings. Report No. NCCER - 96 - 0010 [R]. Buffalo: State University of New York at Buffalo, 1996.

[9] 刘光明. 基于新规范的八、九设防烈度区 RC 框架地震反应特征及损伤分析 [D]. 重庆: 重庆大学土木工程学院, 2004.

[10] 压弯剪构件性能专题研究组. 钢筋混凝土压弯剪构件抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 1992, 12(2): 2 - 10.

[11] 欧进萍, 何政, 吴斌, 等. 钢筋混凝土结构的地震损伤控制设计 [J]. 建筑结构学报, 2000, 21(1): 63 - 70.

[12] 侯纲领. 结构可靠指标矢量、概率 Pushover 分析与体系可靠度 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学土木工程学院, 2001.

[13] ANDERSON J C, BERTERO V V. Seismic performance of a six story reinforced concrete building UCB/ EERC - 93/01 [R]. Berkeley: College of Engineering University of California at Berkeley, 1997.

(编辑 刘 彤)