

规则弯剪型隔震结构等效模型计算方法

于德湖¹, 付伟庆^{2,3}, 王焕定⁴

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033; 2. 中国地震局 工程力学研究所, 哈尔滨 150080;
3. 黑龙江大学 建筑工程学院, 哈尔滨 150086; 4. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090)

摘要: 隔震技术不仅广泛应用在中低层建筑中, 近来又被用于高层建筑结构的减震设计。对于高层隔震结构, 隔震上部结构需考虑多阶振型影响, 且因结构高宽比较大, 总变形中存在的弯曲变形部分也应同时考虑。现有的两质点剪切型模型不能很好地反映实际结构的变形特点, 一些学者提出的三质点模型, 尚缺乏实际的操作性。为此, 在已进行研究基础上, 根据等效准则, 通过对模型结构的计算分析, 给出了针对弯剪变形类型规则型隔震结构等效模型的计算方法, 利用该等效模型可较为方便对原隔震结构最大反应进行手工计算, 从而提高了隔震设计的效率。计算实例表明, 文中提出的计算方法是可行和可信的, 等效模型与原结构地震反应具有很好等效性, 且计算过程也较为简便。

关键词: 隔震结构; 等效准则; 等效模型; 计算方法; 地震反应

中图分类号: TU352.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2009)06-0022-05

Calculation Method for Equivalent Model of Regular Isolated Structure with Bend-shear Deformation

YU De-hu¹, FU Wei-qing^{2,3}, WANG Huan-ding⁴

(1. School of Civil Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, Shandong, P. R. China; 2. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, P. R. China; 3. Architecture and Civil Engineering Institute, Heilongjiang University, Harbin 150086, P. R. China; 4. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, P. R. China)

Abstract: Isolation technique was not only applied for middle or low buildings, but also recently it was applied to high-rise buildings. For high-rise buildings, multi-order vibration should be considered for upper structure isolation and bend deformation should be taken into account in gross deformation because of large height to width ratio. On the basis of previous studies, calculation method of equivalent model for regular isolated structure with bend-shear deformation characteristic was proposed according to equivalent criteria after the analysis for some model structures. With the proposed model, handwork calculation of earthquake response for isolated structure can be simply completed and design efficiency of isolation structure was improved. Based on the case studies, the equivalency of proposed model was approved.

Key words: isolated structure; equivalent rule; equivalent model; calculations; seismic response

作为一种成熟有效的减震措施, 隔震技术已广泛应用于中低层建筑的抗震设计中。据不完全统计

收稿日期: 2009-09-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50578045); 住房和城乡建设部研究开发项目(2009-K3-23); 黑龙江省教育厅面上项目(11521218)

作者简介: 于德湖(1975-), 男, 副教授, 博士, 主要从事结构抗震设计研究, (E-mail) yudehu-qtech@yahoo.com.cn。
付伟庆(联系人), 男, 副教授, 博士后, 主要从事结构振动控制研究, (Email) fuweiqing@hlju.edu.cn。

计,我国已建成的隔震建筑达400余栋。近年来,隔震技术又被用到高层建筑中,其突出的优点是可以提高性价比。日本大成、竹中和藤田等建筑公司在1998年后陆续开始兴建了20层左右的高层隔震建筑。竹中公司还于2002年开始建设42层高度138m的超高层隔震建筑。国内在山西省建成了一幢地面17层,局部19层的隔震建筑^[1]。

在隔震结构设计研究方面,对于中低层隔震结构,Kelly和周锡元等人提出一种双自由度等效模型,用于结构的最大地震反应预测^[2-4]。文献^[5-10]还对该模型进行改进。但对于大高宽比的高层隔震结构,该模型将不再适用。文献^[11]提出用三质点模型来等效大高宽比高层隔震结构,但其没有给出可操作的模型参数计算公式。文献^[12]基于上部结构周期、总基底剪力、顶点位移相等的等效准则给出了弯曲型和剪切型隔震结构等效模型的计算公式,但没有给出两种变形类型之间的弯剪变形类型隔震结构等效模型计算公式。

简化计算模型和设计计算方法已被证明在工程结构初步设计、方案论证、地震反应快速计算分析等方面具有较大的优势,不需要时程分析即可获得较为精确的地震反应分析结果,因此能够节省大量的计算时间。为此,该文在文献^[12]研究基础上,研究给出可用于弯剪变形特点的规则型隔震结构等效模型的计算方法,利用该等效模型可对原结构地震最大反应进行预测,从而提高隔震结构设计的效率。

1 三质点等效模型的组成与结构参数的推导

隔震结构等效三质点模型由隔震上部结构等效两质点和隔震层单质点组成,隔震层单质点结构参数取隔震层刚度和质量,上部等效两质点的结构参数分别为 m_1 、 m_2 、 $\overline{\delta_{12}}$ 、 $\overline{\delta_{11}}$ 、 $\overline{\delta_{22}}$,根据以下2等效准则:

1)等效模型上部两自由度结构总基底剪力等于原隔震上部多自由度结构考虑多振型影响的总基底剪力 F 。

2)等效模型上部两自由度顶点总位移等于原隔震上部多自由度考虑多振型的总顶点位移 Δ 。

可得到上部等效两质点的质量参数 m_1 、 m_2 ,再由公式(1)和(2)可得等效两质点的柔度参数 $\overline{\delta_{12}}$ 、 $\overline{\delta_{11}}$ 、 $\overline{\delta_{22}}$,具体推导过程可参见文献^[8]:

$$\overline{\delta_{12}} = \overline{\delta_{21}} = \frac{\beta(\lambda_1 - \lambda_2)}{2\sqrt{m_1 m_2}} \quad (1)$$

$$\overline{\delta_{11}} = \frac{1}{2m_1} [\lambda_1 + \lambda_2 \mp (\lambda_1 - \lambda_2) \sqrt{1 - \beta^2}] \quad (2)$$

$$\overline{\delta_{22}} = \frac{1}{2m_2} [\lambda_1 + \lambda_2 \pm (\lambda_1 - \lambda_2) \sqrt{1 - \beta^2}] \quad (3)$$

其中 λ_1 、 λ_2 为多自由度结构前两阶频率,在公式推导中,使用了参数 β 。该参数实质是对等效后的上部两个质点间柔度和质量的比值进行调节,其取值与结构的变形特点有关。在文献^[12]中对弯曲型结构模型计算发现, β 取值在0.85附近时,等效模型两质点的结构参数值均是较为合理的。

接着对其它设计出的模型结构计算发现, β 取值在0.85附近时,等效模型两质点的结构参数值也是较为合理的,为计算简便,对其它变形类型结构的 β 取相同计算值0.85。

2 弯剪型结构等效模型参数的计算方法

在文献^[12]中,通过计算已经得到规则型模型纯弯曲结构和剪切结构等效模型结构参数的简化计算公式。但是对两种变形类型之间的弯剪型结构尚未进行等效模型的分析研究,而此部分结构占常规隔震结构绝大部分,此部分结构的前两阶频率比在0.16~0.33之间^[14]。该文继续对弯剪变形类型结构的等效简化模型计算公式进行研究,目标是通过弯剪变形特点模型结构的分析,得到其对应等效模型结构参数的计算方法。

2.1 模型结构的设计

前两阶频率比在0.16~0.33之间弯剪型变形结构的等效模型分析,可考虑采取对其中若干比值点进行研究,接着可认为在该比值点附近所取比值与该比值点计算结论相同的方法。为达到使比值研究点分布均匀的要求,拟采用的比值插值点为0.32、0.29、0.26、0.23、0.20、0.17,各比值点临近两个点取该研究点相同结论。接下来,就是要设计出两阶频率比为上述给定值满足规范要求的规则性结构。

用《砌体结构设计软件包MSSP》设计了满足规范要求的2个规则型配筋砌体结构^[15],2个计算模型结构平面图如图1和图2所示,图1层高3.3m,图2层高3m,对每个计算模型结构又设计了一组不同层数结构,通过计算分析可得到对各个模型结构的频率比值如表1和表2所示。

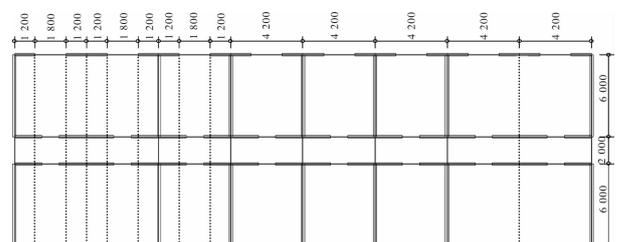


图1 模型结构1平面图

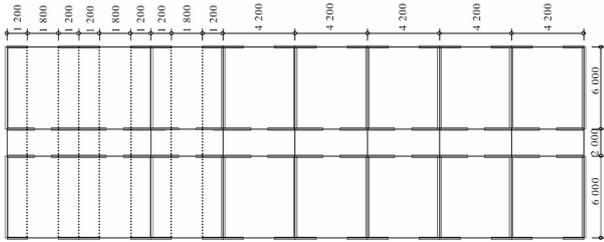


图 2 模型结构 2 平面图

表 1 模型结构 1 结构参数(层高 3.3 m)

结构号	结构层数	两阶频率比	M_T/M	$\overline{\delta_{11}}/\overline{\delta_{12}}$
1	7	0.191 9	0.915 3	0.415 2
2	8	0.185 5	0.885 9	0.402 3
3	9	0.180 8	0.875 0	0.392 3
4	10	0.177 2	0.867 8	0.384 5
5	11	0.174 5	0.854 7	0.378 3
6	12	0.172 3	0.840 2	0.373 2
7	13	0.170 6	0.825 1	0.368 9
8	14	0.169 2	0.812 4	0.365 4
9	15	0.168 0	0.803 4	0.362 4
10	16	0.167 1	0.799 4	0.360 0

表 2 模型 2 结构参数(层高 3 m)

结构号	结构层数	两阶频率比	M_T/M	$\overline{\delta_{11}}/\overline{\delta_{12}}$
1	3	0.313 2	0.971 4	0.674 7
2	4	0.288 1	0.970 1	0.576 7
3	5	0.267 3	0.957 3	0.517 9
4	6	0.249 9	0.944 8	0.478 9
5	7	0.235 7	0.932 2	0.451 4
6	8	0.224 0	0.929 8	0.431 4

其中 M_T 为等效模型上部两质点总质量, M 原隔震上部结构总质量

2.2 等效模型结构参数的计算

2 种模型中,模型结构 1 变形较柔偏弯曲线型,模型结构 2 较刚偏剪切型。对 2 模型在各自变形特点对应频率比变化范围内,各取不同层数结构进行分析,得到满足上述频率比各插值点的等效模型总质量与原结构总质量之比 M_T/M 和 $\overline{\delta_{11}}/\overline{\delta_{12}}$ 值,得出的参考值再经变换模型结构层高度数值后的结构进行计算验证,观察在频率比各插值点附件,已得到的质量和柔度系数两比值的变化程度。

分析时发现,在以偏弯曲变形的区间(频率比为 0.16~0.19),质量比值 M_T/M 变化较快,这个变化的 2 质量比值将对等效模型的结构参数计算产生较大影响,因此在这一区间对频率比进行细分;而在弯

剪变形和剪切变形区间(频率比为 0.20~0.33),2 质量比值变化较缓慢,因此对频率比临近的区间,可认为质量比和比值 $\overline{\delta_{11}}/\overline{\delta_{12}}$ 取值相同,经计算具体数值可见表 3 所示。

表 3 不同频率比下的等效模型与原结构质量比及等效模型柔度系数比取值

两阶频率比	M_T/M	$\overline{\delta_{11}}/\overline{\delta_{12}}$
0.16	0.80	0.36
0.17	0.82	0.37
0.18	0.87	0.39
0.19~0.21	0.92	0.42
0.22~0.24	0.93	0.45
0.25~0.27	0.95	0.50
0.28~0.30	0.97	0.60
0.31~0.33	1	0.70

2.3 等效模型结构参数的计算方法

按表 3 中数据,代入等效模型结构参数计算公式,可得等效模型参数的简化计算公式。其中对剪切型和弯剪型变形区间,由于相邻频率比的变化对等效模型结构参数的影响较小,因此取相邻频率比变化的中间值,例如对于频率比在 0.25~0.27 之间,代入公式的频率比是 0.26。经计算可得如下针对不同频率比结构的 2 质点等效模型参数表。

表 4 不同频率比结构的 2 质点等效模型参数表

两阶频率比	m_1	m_2	$\overline{\delta_{11}}$	$\overline{\delta_{12}}, \overline{\delta_{21}}$	$\overline{\delta_{22}}$
0.16	0.60	0.20	0.429	1.191	3.801
0.17	0.61	0.21	0.425	1.150	3.635
0.18	0.63	0.24	0.414	1.060	3.240
0.19~0.21	0.65	0.27	0.410	0.976	2.882
0.22~0.24	0.65	0.28	0.425	0.944	2.785
0.25~0.27	0.65	0.30	0.447	0.894	2.556
0.28~0.30	0.61	0.36	0.497	0.828	2.147
0.31~0.33	0.58	0.41	0.541	0.773	1.882

下面以 6 层模型结构 2 的等效模型结构参数计算为例,说明整个计算过程,表中其它数值也是对其它各结构经相同计算过程得到。

上述 6 层模型结构的频率比 0.25,由表可知,对于前两阶频率比在 0.25~0.27 的结构,其变形应为弯剪型,等效结构与原结构的结构参数特点是 $M_T/M=0.95$, $\overline{\delta_{11}}/\overline{\delta_{12}}=0.5$,代入计算公式中的频率比可取上述频率比值范围的中间值 0.26,等效模型参数的具体计算过程如下:

取 $\overline{\delta_{11}}/\overline{\delta_{12}} = \frac{a_3}{a_1} \sqrt{\frac{m_2}{m_1}} = \frac{0.288}{0.394} \sqrt{\frac{m_2}{m_1}} = 0.5$, 所

以 $m_1/m_2 = 2.116$ 由此得

$$m_2 = 0.95M/2.188 = 0.304M \approx 0.3M \quad (4)$$

$$m_1 = (0.95 - 0.3)M = 0.65M \quad (5)$$

$$\overline{\delta_{11}} = \frac{a_3}{m_1} = \frac{0.288}{\omega_1^2 \times 0.65M} = \frac{0.447}{\omega_1^2 M} \quad (6)$$

$$\overline{\delta_{12}} = \overline{\delta_{21}} = \frac{a_1}{\sqrt{m_1 \times m_2}} = \frac{0.396}{\omega_1^2 \times \sqrt{0.65 \times 0.3} \times M} = \frac{0.894}{\omega_1^2 M} \quad (7)$$

$$\overline{\delta_{22}} = \frac{a_2}{m_2} = \frac{0.779}{\omega_1^2 \times 0.3M} = \frac{2.556}{\omega_1^2 M} \quad (8)$$

其中 a_1, a_2, a_3 为推导过程中引入的参数,参见文献[12]。综上得出等效模型上部两质点的质量和柔度

矩阵为

$$\overline{\mathbf{M}} = \begin{bmatrix} 0.65 & 0 \\ 0 & 0.3 \end{bmatrix} M \overline{\delta} = \begin{bmatrix} 0.447 & 0.894 \\ 0.894 & 2.556 \end{bmatrix}$$

$$\frac{1}{\omega_1^2 M} \approx \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 6 \end{bmatrix} \frac{0.4}{\omega_1^2 M}$$

该两质点模型加隔震层单质点,共同组成了与原隔震结构等效的三质点等效模型。

3 计算实例

3.1 隔震上部结构的计算

为验证上述等效模型计算公式的正确性,仍取上述 10 层的模型结构 1 和 6 层的模型结构 2。表 5 表 6 列出了原结构结构参数及其等效模型的结构参数,其中等效模型参数由上述计算过程得到。

表 5 原结构结构参数

结构号	层高/m	层质量/(10 ³ kg)	弯曲刚度/(10 ⁹ kN·m ⁻¹)	剪切刚度/(10 ¹¹ kN·m ⁻¹)
结构 1	3.3	748.2	1.099 0	1.008 9
结构 2	3	648.2	3.897 2	1.403 9

表 6 等效模型的结构参数

	周期/s	前两阶频率比	$m_1/(10^6 \text{ kg})$	$m_2/(10^6 \text{ kg})$	$\overline{\delta_{11}}/(10^{-11} \text{ m} \cdot \text{N}^{-1})$	$\overline{\delta_{12}}, \overline{\delta_{21}}/(10^{-11} \text{ m} \cdot \text{N}^{-1})$	$\overline{\delta_{22}}/(10^{-11} \text{ m} \cdot \text{N}^{-1})$
结构 1	0.867	0.1807	4.72	1.80	105.34	269.72	824.43
结构 2	0.186	0.2499	2.53	1.17	9.01	18.02	54.07

下表 7 列出了对两结构及其对应等效结构应用振型分解反应谱法计算得到的结构最大地震反应,其中地震影响系数 $\alpha_{\max} = 0.5$,为 7 度罕遇地震下取值。通过对比分析可以看到,原结构与其等效结构较好地满足了顶层最大位移及基底最大剪力相等的等效准则,对比误差均在 5% 以内。两质点对上部结构的很好等效,为接下来三质点对原隔震结构的等效奠定了很好的基础。

表 7 原结构与其等效结构最大地震反应值对比

	模型结构 1		模型结构 2	
	原结构	等效结构	原结构	等效结构
顶层最大位移/mm	60.3	60.1	6.0	5.7
基底最大剪力/(10 ⁷ kN)	1.315	1.323	1.68	1.69

3.2 隔震结构的计算

接着对两结构进行隔震层设计,其中对模型结构 1 配置了 16 个 LRB600 隔震支座,经计算得隔震层总屈服力为 1 537.6 kN,屈服位移为 11.7 mm,屈服后刚度与屈服前刚度比为 12.5%,隔震层竖向面压为 14 MP,小于设计面压 15 MP;对模型结构 2

配置了 12 个 LRB600 隔震支座,经计算得隔震层总屈服力为 1 153.2 kN,屈服位移为 11.7 mm,屈服后刚度与屈服前刚度比为 12.5%,隔震层竖向面压为 12.9 MP,也小于设计面压 15 MP。

使用三维隔震计算程序 3D-BASIS-TABS1.1 对隔震结构和其等效简化模型结构进行结构地震反应的分析,向程序中输入上述结构参数、隔震支座参数及选定地震波,可输出结构的地震反应数据。表 8 列出了两模型结构原结构与其等效简化模型地震反应的差异。程序中选用加速度峰值为 0.6 g 的 ElCentro 波(1940),计算程序同时考虑了隔震上部结构的弯曲和剪切变形的影响。

表 8 原结构与其等效结构最大地震反应值对比

	隔震模型结构 1		隔震模型结构 2	
	原结构	等效结构	原结构	等效结构
顶层最大位移/mm	0.620	0.568	0.691 5	0.598 3
基底最大剪力/(10 ³ kN)	3 022.617	3 091.229	2 252.705	2 271.632
隔震层最大位移/mm	105	109	104	105

从上表中可以看出,隔震后两结构及其等效模

型结构的隔震层最大位移反应,基底最大剪力、上部结构最大位移是接近的,因此可用等效模型代替原结构,进行地震最大反应的预测计算^[16-18]。相对于原多质点结构,三质点模型显然要简单的多,对其应用手工就能计算的振型分解反应谱法就可求出最大反应。其概念清晰、计算简单、可不依靠计算机方便求解。另外,隔震层最大位移分别是 105 mm 和 109 mm,均小于 LRB600 支座的设计标准位移 124 mm,因而是安全的^[19-20]。图 3—6 分别是 2 结构及其等效结构隔震层反应时程图,从图中也可看到,等效结构可很好地反应原结构的地震反应。

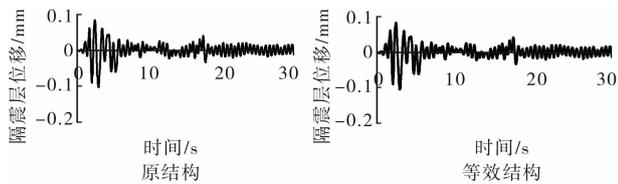


图 3 结构 1 原隔震结构及其等效结构隔震层位移时程图

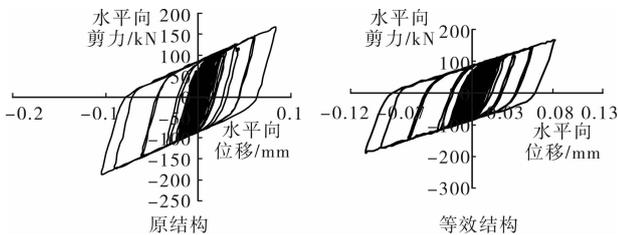


图 4 结构 1 原隔震结构及其等效结构
隔震层单个支座的滞回曲线

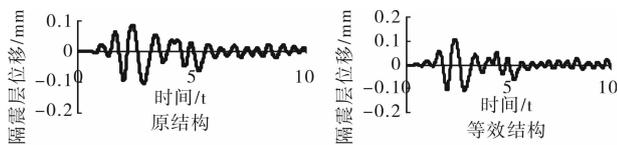


图 5 结构 2 原隔震结构及其等效结构隔震层位移时程图

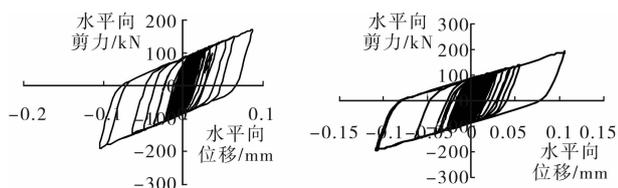


图 6 结构 2 原隔震结构及其等效结构隔震层位移时程图

4 结 论

在文献[12]的基础上,继续研究给出了针对弯剪变形特点规则型隔震结构等效模型的计算方法,应用该计算方法可以较为方便的得出给定隔震结构的等效计算模型,对等效模型进行振型分解反应谱法的手工计算,即可对原结构进行隔震设计和验算,

因此能够节省大量的计算时间,进而提高了隔震设计的效率。文中通过计算实例表明,提出的等效方法是可行和可信的,等效结构较好地反应了原结构的地震反应特点。

参考文献:

- [1] MORISHITA M, INOUE K, FUJITA T. Development of three-dimensional seismic isolation systems for fast reactor application[J]. Journal of Japan Association for Earthquake Engineering, 2007, 4(3): 305-310.
- [2] KELLY J M. Earthquake resistant design with rebber [M]. Springer: Verlag London Limited, 1997.
- [3] 李中锡,周锡元. 规则型隔震房屋的自振特性和地震反应分析方法[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(2): 33-41.
- [4] LI ZHONG-XI, ZHOU XI-YUAN. Vibration property and earthquake response analysis method for regular isolated building[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(2): 33-41.
- [5] KELLY J M. The role of damping in seismic isolation [J]. Earthquake Engineering and Structure Dynamic, 1999, 28(1): 3220-3221.
- [6] ALFONSO VULCANO. Comparative study of the earthquake and wind dynamic responses of base-isolated buildings [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2006, 751-764.
- [7] MATSUZAKI H, SAKEI S. The observation of earthquake on building with high damping rubber bearing and lead damper [C]// Summaries of Technical Papers of Annual Meeting. Japan: Architectural Institute of Japan, 2008(B-2): 565-566.
- [8] DU YONG-FENG, LI HUI, SPENCER. Effect of non-proportional damping on seismic isolation [J]. Journal of Structural Control, 2002(3): 205-236.
- [9] NAKAJIMA K, LEMURA H, TAKAHASHI Y. Pseudo dynamic tests and Implementation of sliding bridge isolators with vertical motion [C]// 12WCEE, Auckland, New Zealand, 2000: 1365-1372.
- [10] Japan Society of Seismic Isolation. Introduction to base isolation system [R]. Omusha, Tokyo, 1995.
- [11] HU HAIYAN. Proceedings of the 5th International Conference on Vibration Engineering [C]// Beijing: China Aviation Industry Press, 2002: 26-32.
- [12] 王焕定,付伟庆. 规则型隔震结构等效简化模型的研究 [J]. 工程力学, 2006, 23(8): 138-143.
- [13] WANG HUAN-DING, FU WEI-QING. Research on equivalent simplified model of regular isolated structure [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(8): 138-143.

(下转第 80 页)