

非侵彻条件下猪体和明胶靶内压力衰减试验研究

曾鑫¹, 周克栋¹, 赫雷¹, 金永喜², 崔海林², 王浩圣², 李兵仓³

(1. 南京理工大学 机械工程学院, 南京 210094; 2. 中国兵器第二〇八研究所, 北京 102202;
3. 第三军医大学 大坪医院野战外科研究所, 重庆 400042)

摘要: 为研究某小口径弹丸非侵彻条件下机体内的压力传递, 采用压力动态采集系统, 通过某小口径弹丸以不同撞击速度对长白猪和明胶靶标进行非侵彻防护射击试验, 得到了靶内不同位置处的压力值。试验结果表明: 弹丸速度越大, 靶内产生的压力峰值越高, 且压力峰值随距撞击点距离呈指数衰减; 长白猪体内的压力衰减速度大于明胶靶标中的压力衰减速度; 皮肤的吸能能力与撞击速度有很大的关系。该试验结果对伤员的救治、建立损伤标准及枪弹设计改型具有重要意义。

关键词: 防护; 压力衰减; 非侵彻; 明胶靶标; 长白猪; 试验研究

中图分类号: TJ012.4

文献标志码: A

DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2014.08.017

Test for pressure attenuation in targets of Landrace and gelatin under non-penetration condition

ZENG Xin¹, ZHOU Ke-dong¹, HE Lei¹, JIN Yong-xi²,

CUI Hai-lin², WANG Hao-sheng², LI Bing-cang³

(1. School of Mechanical Engineering, NUST, Nanjing 210094, China;

2. No. 208 Research Institute of China Ordnance Industries, Beijing 102202, China;

3. Institute of Surgery Research, Daping Hospital, Third Military Medical University, Chongqing 400042, China)

Abstract: To investigate the internal pressure transmission in human-body caused by small caliber projectiles under condition of non-penetration, the non-penetration firing tests with small caliber projectiles were conducted with different impact velocities and different protected targets of Landrace and gelatin to measure the pressure value in the targets at different locations using a dynamic pressure acquisition system. The results showed that the larger the velocity of projectiles, the higher the pressure; the peak pressure decays exponentially with the distance between an impact point and a measured position; the pressure attenuation speed in Landrace target is greater than that in a gelatin target; the energy absorption ability of skin is greatly related to impact velocity. The test results were significant for wound treatment, injury standard establishment, and bullet design modification.

Key words: protection; pressure decay; non-penetration; gelatin target; Landrace; experimental study

现代战争和反恐中, 人体因为子弹的穿通伤会造成重要脏器的损伤或是大出血, 导致作战人员即刻死亡或是完全丧失作战能力, 使用防弹衣及防弹头盔后, 穿透伤而伤亡的人员数得到有效的减小, 但会因防弹衣瞬间变形而高速撞击人体, 产生能量传递而造成胸腹部器官钝性损伤, 因高速撞击所产生的压力波也会对远高撞击点人体组织造成损伤^[1-6], 由于此类创伤机理非常复杂, 很难清晰阐述此类创伤的力学机制, 救治中也很难处理, 因此有必要对相应的人体压力响应

特点进行试验探讨。近年来, 国内外学者对创伤领域的试验研究主要借助于动物或明胶靶标等来进行试验^[1,7-10], 由于猪的胸腔内容物在生理和解剖上较接近于人, 因此国内外学者在防弹衣钝挫伤实验研究中通常以猪作为人体的替代靶标^[11-14]。本文以某小口径弹丸侵彻长白猪和明胶靶标时, 距离撞击点不同位置处的最大压强为研究对象进行试验研究, 探讨高速弹丸对有防护下机体内的压力响应和能否以明胶靶标作为生物的替代物进行压力响应试验, 为进一步研究受高速撞击时防护后的机体损伤机理的研究提供试验支撑。

收稿日期: 2013-04-16 修改稿收到日期: 2013-08-01

第一作者 曾鑫 男, 博士, 1986年2月生

通信作者 周克栋 男, 教授, 博士生导师, 1964年5月生

1 试验方法

压力试验原理如图 1 所示,主要由发射系统、光电测速靶、靶标系统和测压系统组成,发射系统主要包括某小口径弹道枪和枪弹,通过调节枪弹装药量来控制弹丸撞击防护材料的速度;触发器用来触发测速靶和测压系统进行数据采集,光电测速系统记录弹丸撞击靶标系统前的速度;靶标系统用来模拟穿着防弹衣的人体,靶标系统主要分为长白猪(麻醉状态下)+防护材料和明胶靶标+防护材料,防护材料均为 NIJ III 级防弹插板+警用 II 级防弹材料,将防护材料和靶标连接,然后把整个靶标系统置于试验台上,如图 2 所示;测压系统由 PCB113B24 压电式压力传感器(测量量程为 5

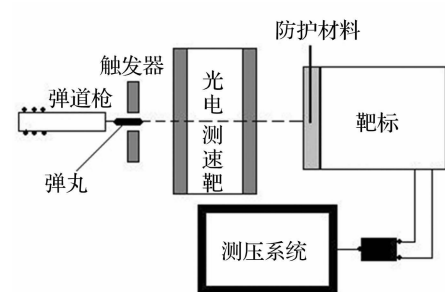


图 1 压力试验原理示意图

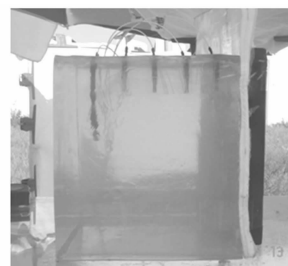
Fig. 1 The schematic diagram of pressure test

MPa,测量精度为 0.5 级)、数据连接线和 PXI-6133 数据采集系统(最高采样率是 2.5 MS/S,14BIT 分辨率)组成,传感器在靶标内的埋置如图 2 所示,利用靶标内不同位置处的压力传感器记录不同位置处的压力值。

本文试验分为生物试验和非生物试验,生物试验中所用靶标为健康长白猪(麻醉状态下),体重 60 ± 5 kg,长白猪体内埋置 4 个压力传感器,传感器埋置于皮下、心、肺、肝脏等易受损脏器位置,4 个传感器距撞击点距离分别为 80 mm、100 mm、120 mm、160 mm,射击点为脊柱;非生物试验中所用靶标为 10% 浓度的明胶靶标,规格为 300 mm × 300 mm × 300 mm,明胶内埋置 5 个压力传感器,传感器埋置状态如图 2(b) 所示,每个传感器水平方向上相距 50 mm,射击点为靶标中心。



(a) 长白猪+防护材料



(b) 明胶靶标+防护材料

图 2 靶标系统

Fig. 2 The target system

2 试验结果

所有试验在室温下进行,保证弹丸为垂直撞击或接近垂直撞击,弹丸撞击前姿态由高速摄影系统观测并记录。试验发现:在冲击波反射之前,边界对压力波传递的影响可以忽略,可以假定压力波在靶标内的传递为球形波传递,每个传感器到撞击点的距离就假定为它们两点之间的直线距离。预定撞击速度为 600 m/s、750 m/s、900 m/s,撞击速度由弹丸装药量控制,并由光电测速系统检测并记录。

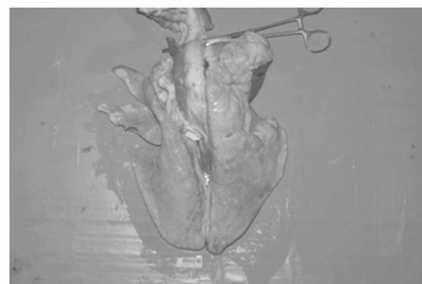
非侵彻条件下明胶靶标的损伤情况主要表现在材料的屈服变形和失效,无明显的损伤现象,而肌肉的损伤伴随着出血等较明显的现象,故本文中只给出长白猪易受损部位的损伤情况,如图 3 所示。

由图 3 可以发现:① 弹丸没有贯穿防弹材料;② 距撞击点较近的皮肤有明显的出血现象,而距撞击点稍远处的肺部,只有少许的点片状出血。

试验结果可以发现,明胶靶标试验结果重复性较好,这是因为明胶靶标熬制过程相同、浓度相同,故明胶靶标材料属性基本相同,而且传感器的埋置简单、精确;生物体是个很复杂的机体,即使是同一批次的健康长白猪、个体差异不大,但不同个体之间的“材料”属性差异较大,而且生物体内的传感器埋置复杂、固定较



(a) 皮肤损伤



(b) 肺部损伤

图 3 长白猪易受损部位损伤图

Fig. 3 The wounding diagram of the vulnerable parts of Landrace

难,导致传感器测量不准甚至未触发,这样就需要进行多次试验。如果两次试验结果相近则完成该组试验,若两次试验结果差异较大,则再进行重复试验,每组试验取两次相近的试验结果,如表 1 和表 2 所示。表中

V_1 表示预定速度, V_2 表示实际速度, E 表示弹丸的动能。

拟合曲线如图5所示。

表1 长白猪试验压力峰值结果

Tab.1 The peak pressure results in Landrace test

编号	$V_1/$ ($m \cdot s^{-1}$)	$V_2/$ ($m \cdot s^{-1}$)	$E/$ J	不同位置处的压力峰值/MPa			
				80 mm	100 mm	120 mm	160 mm
1	600	594	732.1	0.283	0.107	0.021	0.015
2	600	608	767.1	0.307	0.116	0.020	0.012
3	750	746	1154.8	0.575	0.308	0.044	0.032
4	750	759	1195.4	0.608	0.313	0.050	0.039
5	900	895	1662.1	1.672	0.707	0.064	0.044
6	900	914	1733.5	1.676	0.766	0.065	0.040

表2 明胶靶标试验压力峰值结果

Tab.2 The peak pressure results in gelatin garget test

编号	V_1 ($m \cdot s^{-1}$)	V_2 ($m \cdot s^{-1}$)	$E/$ J	不同位置处的压力峰值/MPa				
				80 mm	110 mm	140 mm	180 mm	220 mm
7	600	590	722.3	1.211	0.813	0.542	0.356	0.151
8	600	598	742.0	1.172	0.821	0.549	0.367	0.145
9	750	752	1173.4	1.390	1.051	0.801	0.512	0.371
10	750	757	1189.1	1.350	1.011	0.749	0.512	0.378
11	900	895	1662.1	1.691	1.366	1.231	1.010	0.771
12	900	907	1707.0	1.694	1.302	1.191	0.980	0.758

由表1和表2发现:不同速度的弹丸侵彻长白猪或明胶靶标试验得到的距撞击点80 mm处的压力峰值相差较大:撞击速度为600 m/s时,压力相差400%,撞击速度为750 m/s时,压力相差200%,而当撞击速度达到900 m/s时,压力峰值近似相同。分析发现:长白猪实验和明胶靶标试验中,造成距撞击点80 mm处的压力峰值有较大差异最主要的原因是长白猪肌肉外有一层皮肤,压力波在肌肉中传递之前必须先经过皮肤中的传递,此过程使压力峰值得到衰减。由表1及表2可知:弹丸的撞击速度较低时,弹丸传递给靶标的总能量相对较少,皮肤对压力传递的损失所占总能量的比例就越高;弹丸的撞击速度很高时(900 m/s),弹丸传递给靶标的总能量相对较高,皮肤对压力传递的损失所占总能量的比例就越低。而这种现象在明胶靶标试验中是体现不出来的。

对长白猪试验及明胶靶标试验所测得的压力峰值数据进行曲线拟合,分析发现当用指数曲线模型 $P = a \times e^{b \times L}$ 进行拟合时,拟合曲线精度最高,各组实验结果的拟合参数如表3所示。

由表3可知,六次长白猪试验结果的拟合曲线的最小相关系数 R^2 为0.962,查询相关系数与置信度关系的检验表^[15]可知:拟合曲线的置信度为95%,长白猪试验结果的拟合曲线如图4所示;六次明胶靶标试验结果的拟合曲线的最小相关系数 R^2 为0.981,查表可知拟合曲线的置信度为99%,明胶靶标试验结果的

表3 曲线拟合参数

Tab.3 The parameters of the curve fitting

编号	a/MPa	b/mm^{-1}	R^2
1	19.082	-0.053	0.992
2	22.186	-0.053	0.992
3	16.580	-0.042	0.962
4	18.373	-0.042	0.969
5	104.701	-0.052	0.981
6	86.180	-0.049	0.973
7	3.507	-0.013	0.996
8	3.265	-0.013	0.993
9	3.011	-0.010	0.999
10	2.868	-0.010	0.999
11	2.566	-0.005	0.991
12	2.474	-0.005	0.981

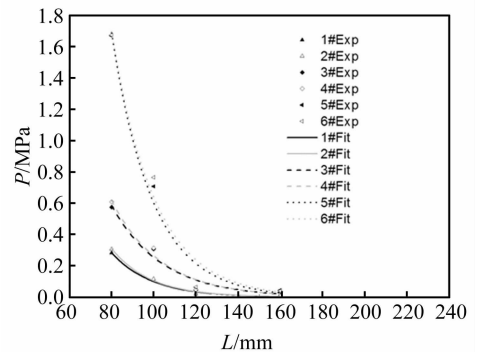


图4 长白猪试验压力峰值拟合曲线图

Fig.4 The peak pressure fitting curve in Landrace test

(注:图中 Exp 表示实验值,Fit 表示拟合曲线,且图5、图6中也一样)

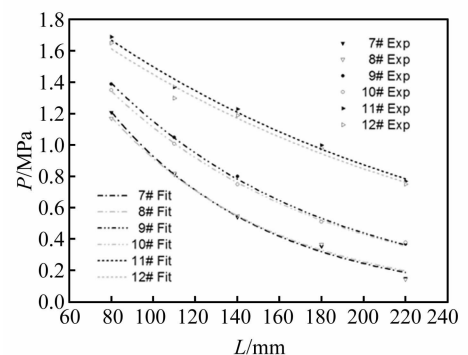


图5 明胶靶标试验压力峰值拟合曲线图

Fig.5 The peak pressure fitting curve in gelatin target test

由表1和表2可知,某小口径弹丸侵彻同一靶标(长白猪或明胶靶标),当撞击速度相近时:①距撞击点相同距离处的压力峰值基本相同;②由图4和图5可以看出,不同位置处的压力峰值拟合曲线吻合较好,这说明本文中的试验重复性较好,测试结果的可靠性高。

由图4和图5不难看出,距离撞击点相同位置处,撞击速度越高,压力峰值越大;撞击速度相同时,距离撞击点越远,压力峰值越小。

弹丸以相同速度撞击不同靶标系统,距撞击点不同距离处的压力峰值如图6所示,图6(a)、(b)、(c)分别表示预定撞击速度为600 m/s、750 m/s和900 m/s时,距撞击点不同距离处的压力峰值拟合曲线。由图中可以发现,1#、2#试验压力峰值衰减大于7#、8#试验,3#、4#试验压力峰值衰减大于9#、10#试验,5#、6#试验压力峰值衰减大于11#、12#试验;由于长白猪试验压力

峰值衰减较快,距撞击点距离160 mm处,1#—6#试验的压力峰值都趋向于零,而对应的明胶靶标试验中对应位置处还有较高的压力峰值,造成此现象的主要原因是长白猪有皮肤、脏器、神经纤维、血管、骨头等,这些组织都会对压力波的传递产生影响,故长白猪试验中,压力峰值传递衰减率是随距离、时间而发生变化的,而压力峰值在明胶靶标内的传递相对来说较稳定。

由上面的分析可以看出:文中描述的压力测试实验中,弹丸侵彻明胶靶标时所测得的压力值,不能直接用来评估相同弹丸侵彻生物靶标时所造成的创伤。

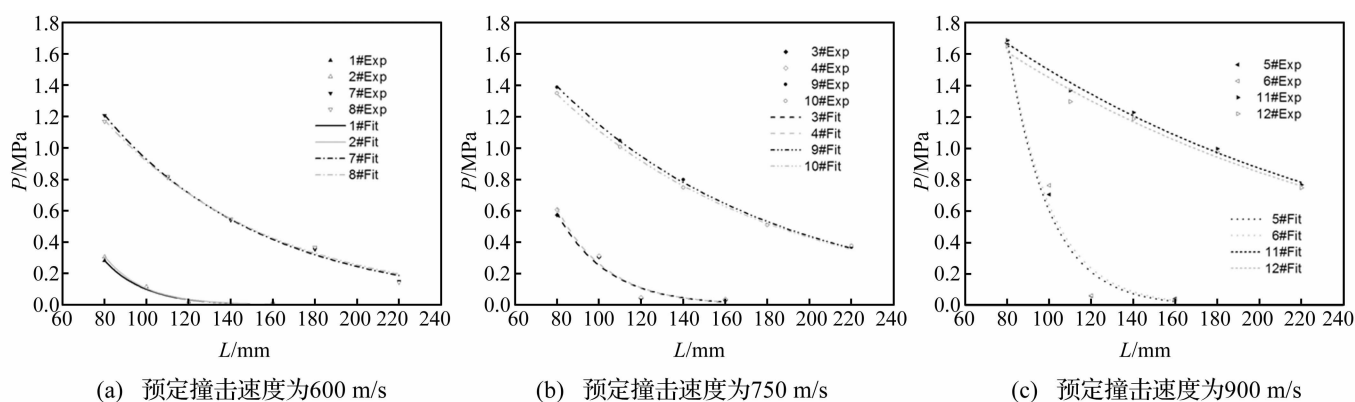


图6 相同撞击速度下靶内压力峰值拟合曲线

Fig. 6 The peak pressure fitting curve under same impact velocity

3 结论

采用弹道枪发射装置及动态信号采集系统对非侵彻防护下目标内的压力进行了试验研究,得到如下结论:

(1) 试验结果良好的一致性表明本文中试验结果的可靠性,结果数据可以用来指导伤员的救治和损伤机理的研究。

(2) 有防护、非侵彻撞击下,长白猪、明胶靶标内的压力峰值随距撞击点距离的增加呈指数关系衰减,压力峰值在长白猪体内的衰减速率明显大于在明胶靶标内的衰减速率。

(3) 针对相同靶标系统,弹丸速度越大,所产生的压力峰值越大。

(4) 皮肤吸收能量的能力,与撞击速度有很大的关系,撞击速度越低,皮肤对压力传递的损失率就越高。

(5) 本文所描述的压力测试实验,弹丸侵彻明胶靶标时所测得的压力值,不能直接用来评估相同弹丸侵彻生物靶标时所造成的创伤。

参考文献

[1] 刘荫秋,王正国,马玉媛. 创伤弹道学[M]. 北京:人民军

医出版社,1991.

[2] Suneson A, Hansson H A, Seeman T. Peripheral high energy missile hits cause pressure changes and damage to the nervous system: Experimental studies on pigs [J]. J Trauma, 1987, 27(7):782-789.

[3] Philips Y Y, Yelverton Jt, Richmond D R, et al. Cloth ballistic vest alters response to blast[C]. Presented at Fifth International Symposium on Wound Ballistics. Goteburg, Sweden June, 1985.

[4] 杨志焕,张均奎,王正国,等. 复合材料对冲击伤防护效应的试验研究[J]. 西南国防医学,1994,4(3):129-130.
YANG Zhi-huan, ZHANG Jun-kui, WANG Zheng-guo, et al. Protective effects for composite materials on blast injuries in dogs [J]. Medical Journal of National Defending Forces in Southwest China, 1994,4(3):129-130.

[5] Roberts J C, Merkle A C, Biermann P J, et al. Computational and experimental models of the human torso for non-penetrating ballistic impact [J]. J Biomech, 2007, 40(1):125-136.

[6] 咸兴平,刘禄胜,于静. 防弹衣的防护机理及防护性能分析[J]. 中国个体防护装备,2007(2):22-28.
XIAN Xing-ping, LIU Lu-sheng, YU Jing. Analysis of protective mechanism and protective property of bulletproof clothes [J]. China Personal Protection Equipment, 2007(2):22-28.

(下转第114页)

的关联维数也逐步增大,这表明关联维数可以很好地应用于这种非线性故障的特征提取与定量诊断。

4 结论

本文建立了考虑滚动轴承内外圈波纹度、径向间隙和非线性赫兹力作用下的滚动轴承-转子系统非线性动力学模型,分析了轴承表面波纹度最大幅值对系统的非线性振动的影响。结果表明不同的波纹度类型对应着不同的故障特征频率,而在相同的故障类型下,在系统处于混沌时,从频谱图上找不到明显的特征信息以识别表面波纹度的严重程度的情况时,本文采用G-P算法计算了系统在不同最大波纹度幅值时的关联维数,研究发现随着故障程度的增加,关联维数逐渐增大。

参考文献

- [1] 闻邦椿,武新华,丁千,等. 故障旋转机械非线性动力学的理论与试验[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [2] 黄文虎,夏松波,焦映厚,等. 旋转机械非线性动力学设计基础理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2006.
- [3] Tiwari M, Gupta K, Prakash O. Effect of radial internal clearance of a ball bearing on the dynamics of a balanced horizontal rotor[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2000, 238(5): 723-756.
- [4] Tiwari M, Gupta K, Prakash O. Dynamic response of an unbalanced rotor supported on ball bearings[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2000, 238(5): 757-779.
- [5] 殷玉枫,张闯. 表面波纹度激励下的滚动轴承非线性接触噪声分析[J]. *噪声与振动控制*, 2011, 31(1): 43-47. YIN Yu-feng, ZHANG Chuang. Analysis of noise due to surface-waviness induced nonlinear contact in rolling bearing[J]. *Noise and Vibration Control*, 2011, 31(1): 43-47.
- [6] Harsha S P, Kankar P K. Stability analysis of a rotor bearing system due to surface waviness and number of balls[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2004, 46(7): 1057-1081.
- [7] 张耀强,陈建军,邓四二,等. 考虑表面波纹度的滚动轴承-转子系统非线性动力特性[J]. *航空动力学报*, 2008, 23(9): 1731-1736. ZHANG Yao-qiang, CHEN Jian-jun, DENG Si-er, et al. Nonlinear dynamic characteristics of a rolling bearing-rotor system with surface waviness[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2008, 23(9): 1731-1736.
- [8] Harris T A. *Rolling bearing analysis* [M]. New York: Wiley, 2001.
- [9] Grassberger P, Procaccia I. Measuring the strangeness of strange attractors [J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 1983, 9(1-2): 189-208.
- [10] 杨绍普,申永军. 滞后非线性系统的分岔与奇异性[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [7] 陈兴武,王慧君,赵卫东,等. 人头部力锤冲击试验的生物力学研究[J]. *中国临床解剖学杂志*, 2005, 23(3): 298-302. CHEN Xing-wu, WANG Hui-jun, ZHAO Wei-dong, et al. Biomechanical study on the impact tests conducted on human dead with hammer [J]. *Chinese Journal of Clinical Anatomy*, 2005, 23(3): 298-302.
- [8] 朱青安,欧阳钧,王守森. 人体头部承受正面和侧向冲击的颅骨应力分析[J]. *中国临床解剖学杂志*, 1995, 14(2): 140-148. ZHU Qing-an, OUYANG Jun, WANG Shou-sen. Stress analysis of human skull during sagittal and lateral impact [J]. *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 1995, 14(2): 140-148.
- [9] Axelsson H, Hjelmpvist H, Medin A, et al. Physiological changes in pigs exposed to a blast wave from a detonating high-explosive charge [J]. *Mil. Med*, 2000, 165(2): 119-126.
- [10] Irwin R J, Lerner M R, Bealer J F, et al. Shock after blast wave injury is caused by a vagally mediated reflex [J]. *J Trauma*, 1999, 47(1): 105-110.
- [11] Prat N, Rongieras F, Vioglio E, et al. Intrathoracic pressure impulse predicts pulmonary contusion volume in ballistic blunt thoracic trauma [J]. *J. Trauma*, 2010, 69(4): 749-755.
- [12] Fackler M L, Kneubuehl B P. Applied wound ballistics: what's new and what's true [J]. *J. Trauma*, 1990, 6(2): 32-37.
- [13] Bowyer G W, Cooper G J, Rice P. Small fragment wounds: biophysical and pathophysiology [J]. *J. Trauma*, 1996, 40(3): 159-164.
- [14] Jussila J, Kjellström B T, Leppäniemi A. Ballistic variables and tissue devitalisation in penetrating injury-establishing relationship through meta-analysis of a number of pig tests [J]. *Injury*, 2005, 36(2): 282-292.
- [15] 郭福星,戴俭华. *概率论与数理统计* [M]. 上海:上海科学技术出版社,1991年.

(上接第99页)