

声定位系统中的弹道波信号分析及弹道矢量计算

吴松林¹, 杨杰², 林晓东³, 宋波¹

(1. 西京学院机电工程系, 陕西 西安 710123; 2. 西安陆军学院, 陕西 西安 710108;
3. 空军工程大学工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要: 轻武器射击点的声定位系统中, 准确获取弹道波信号、枪口冲击波信号的时间特征值是实现精确定位的关键。根据空气动力学原理, 在阐述超音速弹丸的弹道(激)波特性的基础上, 通过详细分析实测的声信号, 提出了弹道波信号和枪口冲击波信号的小波分解和重构方法, 提取了利用正四面体探测基阵进行声源定位和弹道矢量计算的特征参数, 获得了满意的实验结果。另外还研究了利用正四面体探测基阵确定射击点空间位置坐标和弹道矢量的计算方法。

关键词: 声定位; 激波; 弹道矢量

中图分类号: TP216 **文献标志码:** A **文章编号:** 1008-1194(2009)02-0054-05

Calculation of Trajectory Vector and Analysis of Shock Wave Signals in Acoustic Positioning System

WU Song-lin¹, YANG Jie², LIN Xiao-dong³, SONG Bo¹

(1. The Faculty of Mechanical & Electrical Engineering Xijing University, Xi'an 710123, China; 2. Xian Army University, Xi'an 710108, China; 3. The Institute of Engineering Air force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: In acoustic position system of light-armed gun shooting point, the key for precise position is to get the accurate time characteristics of shock wave signal from both trajectory and muzzle. On the basis of shock wave characteristic of the supersonic projectile and the detailed analysis of measured data, a method of decomposing and reconstructing the trajectory shock wave signal and muzzle blast wave signal is proposed and the characteristic parameters for positioning sound source and calculating trajectory vector with regular tetrahedron detection array are extracted. Additionally, the method to determine position coordinate and trajectory vector of the shooting point with detection array is also studied in this paper.

Key words: acoustic position; shock wave; trajectory vector

0 引言

声定位技术在许多领域中有着广泛的应用, 如战场目标声侦察系统、反武装直升机武器系统、反巡航导弹声学监测系统^[1]等。近年来, 在狙击手探测系统的研制方面, 声探测与定位技术始终是重点研究的内容之一。如法国的 PILAR 反狙击手声探测系统, 美国的 Boomerang 系统^[2]等, 通过 4 个声传感器组成的声探测基阵接收声信号, 经处理可准确确定声源的空间位置坐标及弹道俯仰角等。基本原理

是利用正四面体声探测基阵, 监测、识别声场中的枪口冲击波、弹道激波信号, 根据微时间间隔测试技术、声定位原理, 并进行数据融合计算。其中, 弹道波与枪口冲击波图像识别、时间特征值获取、弹道波空间矢量分析、计算是实现精确定位的关键^[1-3]。

轻武器射击点的声定位系统中, 准确地获取弹道波信号与枪口冲击波信号的时间特征值是实现精确定位的关键^[4]。根据空气动力学原理, 本文阐述了弹道激波的几何特征, 研究了利用正四面体探测基阵在自由声场环境下确定武器射击点空间位置坐

* 收稿日期: 2008-08-11

作者简介: 吴松林(1960—), 男, 江苏涟水人, 博士, 副教授, 研究方向: 智能诊断及声定位系统研究。E-mail: slw60215@sina.com。

标和弹道矢量的计算方法。通过实验,详细分析了轻武器射击试验获得的声信号特征,提出了弹道激波信号和枪口冲击波信号的小波分解和重构方法,提取了利用正四面体探测基阵进行声源定位和弹道矢量计算的时间特征参数。

1 弹道激波分析与弹道波信号分析实验

空中高速飞行的弹丸,由于弹丸动能向空气中的能量传递,在弹丸头部产生一脱体激波即**弹道激波** H 。该激波的波前波后轨迹形成一个如图1所示的顶点在弹丸头部的锥体,波前呈一锥面,在垂直于波前方向以声速运动,锥面的半角 $\mu = \sin^{-1}(1/M_{ap})$ 取决于超音速弹丸的马赫数 M_{ap} 。当弹丸激波扫过检测点时,其空气压力迅速从静态压力 P_0 增到超压 $P_0 + P_1$,并随时间和空间衰减到次压 $P_0 - P_2$,最后恢复到 P_0 ,形成如图2所示的**N波信号**。其复杂的干扰可能涉及3或4次的压力波动。N波的幅值和两幅值间的宽度取决于弹丸的特性、弹速以及**弹道到检测点的法线距离**等^[4]。

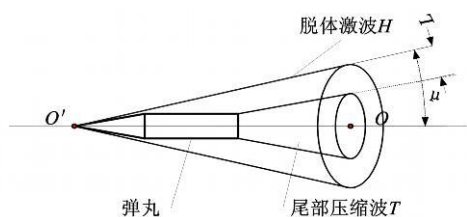


图1 弹丸空气动力学模型

Fig. 1 The pill aerodynamics model

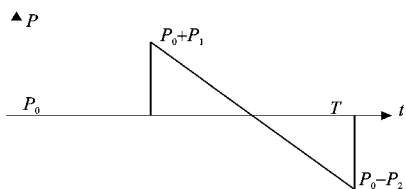


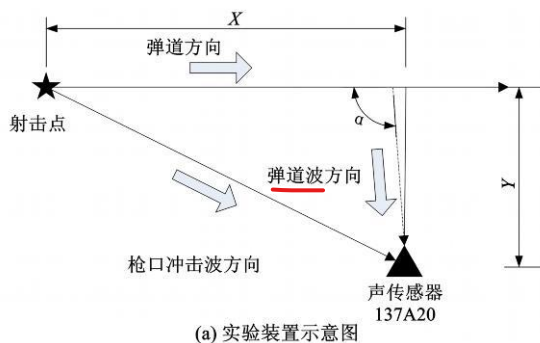
图2 N波信号

Fig. 2 The N wave signal

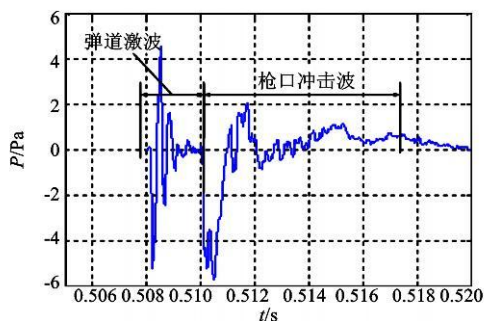
以下通过实验详细研究了弹道激波信号和枪口冲击波信号的识别和分析方法,利用小波滤波器获得了理想的弹道波和枪口冲击波信号,为进一步的系统实验研究奠定了基础。

如图3所示,实验采用81-1自动步枪,7.62 mm

的子弹以接近710 m/s的速度(710 m/s为子弹初速度)掠过传感器。传感器与射击点平行距离 X 约50 m,弹道距传感器(脱靶量) Y 约38.2 m。图3(a)为实验时射击点和传感器设置示意图,其中 $\alpha \approx 90^\circ$ 。图3(b)为获得的弹道激波和枪口冲击波的信号,可明显地看出其中的弹道激波和枪口冲击波波形。



(a) 实验装置示意图



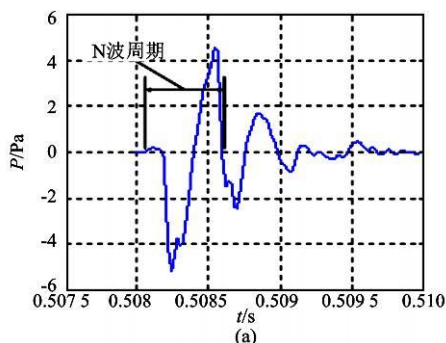
(b) 实验得到的弹道激波与枪口冲击波

图3 实验装置示意图和实验得到的弹道激波与枪口冲击波

Fig. 3 Schematic representation of the experiment and the trajectory and the gunpoint shock wave

假设当地声速为340 m/s,弹道激波到达时间与枪口冲击波到达时间的差值关系 Δt 可用公式(1)近似计算。由到达时间差值关系 Δt 可实现两图像的分割,如图4、图5所示。

$$\Delta t \approx (X/710) + Y/340 - (\sqrt{X^2 + Y^2}/340) \quad (1)$$



(a)

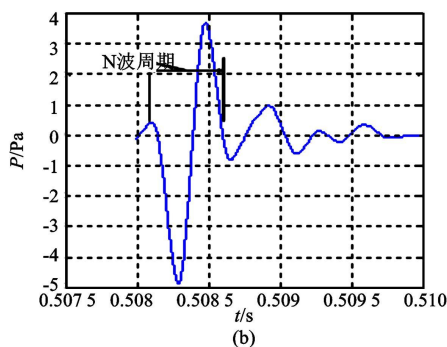


图 4 经过时间分离处理和滤波处理得到的弹道激波

Fig. 4 The trajectory shock wave gained by time abruption and filtering

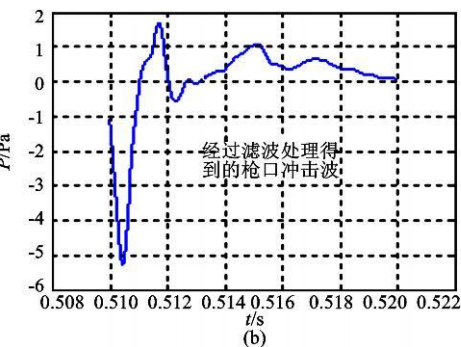
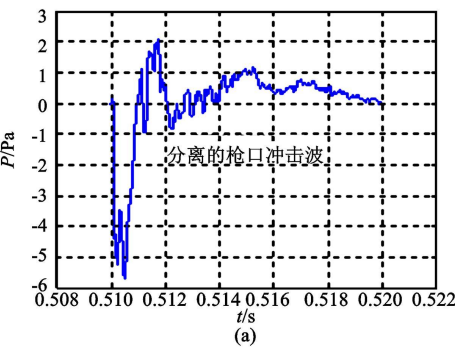


图 5 经过时间分离处理和滤波处理得到的枪口冲击波

Fig. 5 The gunpoint shock wave gained by time abruption and filtering

图 4(a)和图 5(a)上分别是经过时间分割处理得到的弹道激波和枪口冲击波图像。图 4(b)和图 5(b)下是经过小波分解、重构分别获得的弹道激波和枪口冲击波图像。

实验采用 Biorthogonal 小波(bior6.8)对原始信号进行分解和重构,如图 4、图 5 所示。经过分析获得的弹道波的 N 波周期 $T = 0.000\,434\,\text{s}$,弹道波到达的时间与枪口冲击波到达的时间分别为 $t_q = 0.508\,22\,\text{s}$, $t_s = 0.510\,54\,\text{s}$ 。

通过信号的时间分析、小波分析,较理想地分离了弹道激波和枪口冲击波信号,并获得了有关的参数。利用所获得的弹道波到达时间值及三点定位原理^[5-8],进行了 81-1 自动步枪平面靶弹着点的定位仿真实验,结果如表 1 所示。

表 1 定位坐标真值(x, y)与仿真得到的估计值(x₁, y₁)

Tab. 1 Coordinate(x, y) and its estimate (x₁, y₁)

through the simulation		
样本编号	真值(x, y)	估计值(x ₁ , y ₁)
1	(0.01 0.02)	(0.008 1.0.018 3)
2	(0.02 0.04)	(0.018 8.0.042 5)
3	(0.02 0.08)	(0.020 9.0.080 7)
4	(0.04 0.16)	(0.042 4.0.156 1)
5	(0.25 0.38)	(0.248 7.0.377 9)
6	(0.31 0.12)	(0.306 5.0.122 2)
7	(0.40 0.23)	(0.402 3.0.233 3)
8	(0.19 0.27)	(0.196 9.0.274 6)
9	(0.45 0.11)	(0.448 3.0.112 3)
10	(0.50 0.41)	(0.501 5.0.416 4)

由仿真结果可得出坐标 x 的平均定位误差为 $\Delta x = 3.6\,\text{mm}$,坐标 y 的平均定位误差为 $\Delta y = 3.2\,\text{mm}$ 。定位坐标具有较高的精度,可满足射击点空间位置的定位需求。

2 弹道轨迹方向的确定

基于弹道波的 N 波特征,设计了一种确定弹道轨迹的阵列。如图 6 所示,过四面体的两个顶点建立坐标系,探测基阵由等边四面体四个角上安装的传感器 S₁、S₂、S₃、S₄ 组成,其坐标分别为: (x_i, y_i, z_i) (i = 1, 2, 3, 4) ^[9-10]。

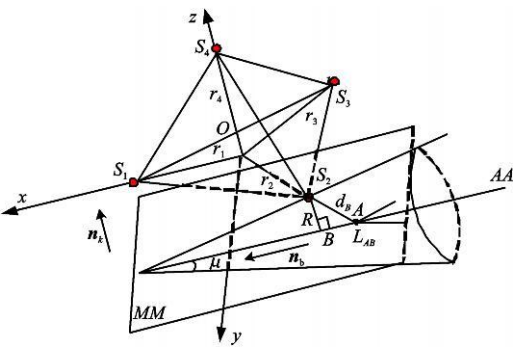


图 6 探测基阵及其坐标系

Fig. 6 The detect array and its coordinate system

通过测量弹道激波掠过四个传感器的时间差 τ_i 来计算激波的入射方向 \mathbf{n}_k (单位矢量)。

设传感器架为正四面体, 传感器分布在正四面体的四个顶点上, 如图 6 所示, 在 $t = 0$ 时刻, 弹道激波锥体上的母线 AA 首先遇到传感器 S_2 , 设声源 A (位于弹道上并产生该激波的声源点) 产生的激波最先到传感器 S_2 , \mathbf{n}_k 为激波的传播方向的单位向量。用平面近似代替一部分锥面, 该平面为包括母线 AA 在内的弹道激波圆锥面的切面 (MM)。

设 S_1 点在 X 轴上, S_4 在 Z 轴上, 正四面体的边长为 2 个长度单位, 则各测点的坐标为:

$$\begin{cases} S_1(x_1, y_1, z_1) = (\frac{2\sqrt{3}}{3}, 0, 0) \\ S_2(x_2, y_2, z_2) = (-\frac{\sqrt{3}}{3}, 1, 0) \\ S_3(x_3, y_3, z_3) = (-\frac{\sqrt{3}}{3}, -1, 0) \\ S_4(x_4, y_4, z_4) = (0, 0, \frac{2\sqrt{6}}{3}) \end{cases}$$

设弹道方向的单位向量为: $\mathbf{n}_b = \{n_{bx}, n_{by}, n_{bz}\}$, 则求解弹道矢量的步骤如下:

1) 确定弹道激波的入射方向的单位向量 $\mathbf{n}_k = \{n_{kx}, n_{ky}, n_{kz}\}$ 。

在 $t = 0$ 时刻, 各测点到平面 MM 的距离为:

$$L_i = \mathbf{r}_{2i} \circ \mathbf{n}_k \quad (\text{"}\circ\text{" 表示数量积, } i = 1, 3, 4)$$

激波到达各测点的时间为:

$$\tau_i = L_i / v_k = \mathbf{r}_{2i} \circ \mathbf{n}_k / v_k \quad (2)$$

式中, v_k 是平面 MM 的传播速度(假设平面 MM 以声速传播, 即 $v_k = c$)。

$$\begin{cases} \mathbf{r}_{12} = \{-\sqrt{3}, 1, 0\} \\ \mathbf{r}_{32} = \{0, 2, 0\} \\ \mathbf{r}_{42} = \{-\frac{\sqrt{3}}{3}, 1, -\frac{2\sqrt{6}}{3}\} \end{cases}$$

令 $\mathbf{n}' = \mathbf{n}_k / v_k = \{n'_x, n'_y, n'_z\}$, 则求解 \mathbf{n}' 的方向数的方程变为:

$$\begin{vmatrix} -\sqrt{3} & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ -\frac{\sqrt{3}}{3} & 1 & -\frac{2\sqrt{6}}{3} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} n'_x \\ n'_y \\ n'_z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \tau_1 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \end{vmatrix} \quad (3)$$

式中, $\tau_i (i = 1, 3, 4)$ 表示声源 A 的声信号到达传感器 S_i 和 S_2 的时差。求解该式得到:

$$\begin{cases} n'_x = \frac{\sqrt{3}}{6}\tau_3 - \frac{\sqrt{3}}{3}\tau_1 \\ n'_y = \frac{1}{2}\tau_3 \\ n'_z = \frac{\sqrt{6}}{12}\tau_3 - \frac{\sqrt{6}}{4}\tau_4 + \frac{\sqrt{6}}{12}\tau_1 \end{cases} \quad (4)$$

则弹道激波的入射方向的单位向量 \mathbf{n}_k 为

$$\mathbf{n}_k = \frac{n'(\mathbf{n}'_x, \mathbf{n}'_y, \mathbf{n}'_z)}{|\mathbf{n}'|} \quad (5)$$

2) 求弹道上产生该激波的声源点 A 的坐标

(x_A, y_A, z_A)。

之所以采用正四面体定位阵列是因为可以保证传感器 S_1, S_2, S_3, S_4 接收到的信号对应同一声源点产生的信号, 故可以采用时差来计算声源点 A 的坐标。用 $r_{2i} (i = 1, 3, 4)$ 表示目标的声信号到达传感器 S_i 和 S_2 的距离差, 用 c 表示声速, 则有:

$$r_{2i} = AS_i - AS_2 = \tau_i \circ c (i = 1, 3, 4)$$

根据模型的几何关系可得如下方程组:

$$\begin{cases} (x_A - x_2)^2 + (y_A - y_2)^2 + (z_A - z_2)^2 = r_2^2 \\ (x_A - x_1)^2 + (y_A - y_1)^2 + (z_A - z_1)^2 = (r_2 + r_{12})^2 \\ (x_A - x_3)^2 + (y_A - y_3)^2 + (z_A - z_3)^2 = (r_2 + r_{32})^2 \\ (x_A - x_4)^2 + (y_A - y_4)^2 + (z_A - z_4)^2 = (r_2 + r_{42})^2 \end{cases} \quad (6)$$

式中, r_2 表示声源点 A 到传感器 S_2 的距离。

通过求解方程组(6)就可以确定声源点 A 的坐标(x_A, y_A, z_A)。

3) 确定弹道轨迹方向的单位向量 $\mathbf{n}_b \{n_{bx}, n_{by}, n_{bz}\}$ 。

为了确定弹道的单位向量 $\mathbf{n}_b \{n_{bx}, n_{by}, n_{bz}\}$, 该向量从 P_m 点指向武器射击点的方向为正。弹道激波半锥角 $\mu = \arcsin(1/Ma)$, 式中 Ma 为弹丸飞行的马赫数。则

$$\mathbf{n}_b \circ \mathbf{n}_k = |\mathbf{n}_b| \circ |\mathbf{n}_k| \circ \cos(\frac{\pi}{2} - \mu) = \sin \mu \quad (7)$$

式中, $|\mathbf{n}_k| = 1, |\mathbf{n}_b| = 1$ 。

如图 6, 过 S_2 作垂直于弹道的直线交弹道线于 B 点, 现通过 A 点坐标求 B 点坐标(x_B, y_B, z_B)。

由 $r_2 = \sqrt{(x_A - x_2)^2 + (y_A - y_2)^2 + (z_A - z_2)^2}$ 可得 A 点与 B 点的距离

$$L_{AB} = r_2 \sin \mu \quad (8)$$

由于单位向量的方向余弦为它本身, 所以, 可得 B 点坐标(x_B, y_B, z_B)为:

$$\begin{cases} x_B = x_A + L_{AB}n_{bx} \\ y_B = y_A + L_{AB}n_{by} \\ z_B = z_A + L_{AB}n_{bz} \end{cases} \quad (9)$$

由 B 点的坐标可以确定 $BS_2 = \{(x_2 - x_B), (y_2 - y_B), (z_2 - z_B)\}$, 由 $BS_2 \perp \mathbf{n}_b$ 可得

$$(x_2 - x_B)n_{bx} + (y_2 - y_B)n_{by} + (z_2 - z_B)n_{bz} = 0 \quad (10)$$

由以上关系, 可以确定向量 \mathbf{n}_b 的三个方程:

$$\begin{cases} (x_2 - x_B)n_{bx} + (y_2 - y_B)n_{by} + (z_2 - z_B)n_{bz} = 0 \\ n_{bx}n_{kx} + n_{by}n_{ky} + n_{bz}n_{kz} = \sin \mu \\ n_{bx}^2 + n_{by}^2 + n_{bz}^2 = 1 \end{cases} \quad (11)$$

由此, 弹道矢量(单位向量) $\mathbf{n}_b = (n_{bx}, n_{by}, n_{bz})$ 。

3 结论

通过空气动力学原理及枪口冲击波到达各传感器的时间差, 利用正四面体探测基阵可实现空间任意射击点空间位置坐标的计算及弹道方向的数值分析。本文详细分析了相关的计算方法, 经过小波分解和重构方法得到了弹道波信号和枪口冲击波信号的时间特征值, 实验验证了该特征值的准确性和有效性。因此, 通过适当的时间分析、小波分析可以获得实现上述原理、计算方法的时间特征参数, 为进一步的系统实验研究奠定了基础。

有必要进行计算得到的弹道轨迹方向与实际的弹道轨迹方向的对比实验研究, 以验证所述计算方法的有效性。

参考文献:

[1] 肖峰, 李惠昌. 声, 武器和测量[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.

[2] Joe Brassard, WingSiu. Sniper detection using wireless sensor networks[Z]. EE-194WIR: Wireless Sensor Networks Presentation #2, 2005.

[3] 李京华, 施坤林. 空气中被动声测系统的误差分析[J]. 探测与控制学报, 1999, 21(1): 29-34.

LI Jing-hua, SHI Kun-Lin. Error analysis of a passive acoustic detecting direction system in air[J]. Journal of Detection & Control, 1999, 21(1): 29-34.

[4] 张飞猛, 马春茂. 对空射击声学靶脱靶量测试系统的精度分析[J]. 兵工学报, 2000, 21(1): 23-26.

ZHANG Fei-meng, MA Chun-mao. Accuracy analysis for the measuring system of target deviation for projectiles shooting an acoustic target[J]. Acta Armamentarii, 2000, 21(1): 23-26.

[5] Mumolo, Enzo. Algorithms for acoustic localization based on microphone array in service robotics[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2003, 42(2): 69-88.

[6] Satoshi Kagami, Hiroshi Mizoguchi. Microphone array for 2D sound localization and capture[J]. Springer Tracts in Advanced Robotics, 2006, 21(1): 45-54.

[7] 顾晓辉, 王晓鸣. 用双直角三角形阵对声目标定位的研究[J]. 声学技术, 2003, 22 (1): 44-47.

GU Xiao-hui, WANG Xiao-ming. Location of acoustic target with dual right-triangles array[J]. Technical Acoustics, 2003, 2 (1): 44-47.

[8] Danicki E. The shock wave-based acoustic sniper localization[J]. Nonlinear Analysis, 2006, 65(5): 956-962.

[9] Morrissey R P, Ward J. Passive acoustic detection and localization of sperm whales in the tongue of the ocean[J]. Applied acoustics, 2006, 67(11): 1 091-1 105.

[10] 孙书学, 顾晓辉. 用正四棱锥形阵对声目标定位研究[J]. 应用声学, 2006, 25(2): 102-107.

SUN Shu-xue, GU Xiao-hui. Study on location of acoustic target with a rectangular pyramid array[J]. Applied Acoustics, 2006, 25(2): 102-107.

欢迎订阅 2009 年《探测与控制学报》

《探测与控制学报》是由西安机电信息研究所、机电工程与控制国家重点实验室、中国兵工学会联合主办的一个国内武器工业类中文核心期刊。本刊 1979 年创刊以来, 共出版发行了 100 多期, 不仅在国内产生了较大的影响, 而且在国外也有一定的影响, 已经成为国内引信及相关探测与控制领域内不可缺少的一块学术园地。本刊是综合性的学术技术刊物, 旨在为引信及相关探测与控制技术领域的科研、生产和教学服务, 开展学术交流。重点刊载的技术范畴是: 机、电接触探测; 无线电、红外、激光和磁近程探测; 信号处理、超小型电源、安全与解除保险装置、测试仿真等。

《探测与控制学报》双月刊(共 6 期), 每期 80 页, 订刊费全年 60 元。刊号: ISSN 1008—1194 CN 61—1316/ TJ, 欢迎各单位及广大读者订阅。

通信处: 西安市 121 信箱学报编辑部 邮 编: 710065 电 话: 029—88156204 联系人: 庞彦波