

面向任务的无人侦察机航线规划算法

乔明^{1,2}, 赵晓林^{1*}, 谢文俊¹, 余超¹

(1.空军工程大学航空航天工程学院,西安,710038;2.航空电子系统综合技术重点实验室,上海,200233)

摘要 针对高空长航时无人侦察机航线规划问题,引入图像质量方程来预测待侦察目标的图像质量,设计了一种综合考虑目标成像质量、所受威胁因素以及侦察航线路径长度的无人机航迹性能评价函数作为粒子群的适应度函数,利用粒子群算法求出 Pareto 解集,通过加权确定 Pareto 解集中的最优解。仿真结果表明:考虑图像质量因素的无人侦察机航迹规划,能够很好地满足无人侦察机成像侦察任务需求。

关键词 航迹规划;粒子群算法;通用图像质量方程

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.02.009

中图分类号 V235;TP3 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)02-0038-05

A Mission Oriented Path Planning Algorithm for Unmanned Reconnaissance Air Vehicles

QIAO Ming^{1,2}, ZHAO Xiao-lin^{1*}, XIE Wen-jun¹, YU Chao¹

(1. School of Aeronautics and Astronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an, 710038, China; 2. Key Laboratory of Science and Technology on Avionics Integration Technologies, Shanghai, 200233, China)

Abstract: Aiming at the path planning of URAV, the GIQE (general imagery quality equation) was introduced to forecast image quality of targets. An evaluation function comprehensively considering the image quality of targets, the length of reconnaissance route and threatening factors was designed as a fitness function for particle swarm. The Pareto set can be gained through particle swarm algorithm, thus the optimal solution will be determined by weighting objectives. The simulation results showed that the UAV reconnaissance path planning considering the factor of image quality can better meet the demands of imaging reconnaissance missions.

Key words: path planning; PSO; general image quality equation

航线规划作为实施远程精确打击,提高飞行器作战效能的有效手段,广泛应用于各类飞行器的任务规划系统中^[1-2]。由于无人侦察机(下文中简称为无人机)执行任务对航迹规划依赖程度远远高于有人侦察机,航迹规划优劣直接决定了无人机的作战效能,所以遂行任务前的航线规划对于侦察型无人

机具有重要的现实意义。

国内外学者在航线规划领域取得了一系列的研究成果^[1-8],这些方法推动了无人机的应用,但是这些方法忽略了图像判读人员对于图像质量的要求,所以并不适应以获取目标高清晰图像为目的的成像侦察特点。为了解决这一问题,文献[9]提出了基于

收稿日期:2014-08-08

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2014JQ8331,2012JQ8010);航空科学基金资助项目(20145596024)

作者简介:乔明(1978—),男,山西运城人,硕士生,主要从事无人机视觉导航技术研究.E-mail:zhaoxiaolin00@mails.tsinghua.edu.cn

*通信作者:赵晓林(1982—),男,讲师,主要从事无人机视觉导航技术研究.E-mail:zhaoxiaolin00@mails.tsinghua.edu.cn

引用格式:乔明,赵晓林,谢文俊,等.面向任务的无人侦察机航线规划算法[J].空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(2):38-42. QIAO Ming, ZHAO Xiaolin, XIE Wenjun, et al. A Mission Oriented Path Planning Algorithm for Unmanned Reconnaissance Air Vehicles[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(2): 38-42.

图像质量的无人侦察机航线规划方法,将图像质量作为航线优化的一个约束,并采用遗传算法进行航迹优化,但是该算法收敛速度较慢,且易陷入局部极值。针对此问题,本文设计了一种综合考虑目标成像质量、所受威胁因素及航线路径长度的航迹评价函数,并用粒子群优化算法求取最优航迹。

1 基于通用图像质量方程的目标图像质量评价与预测

借助基于参数的通用图像质量方程(General Image Quality Equation, GIQE),可预测得到侦察图像的 National Imagery Interpretability Rating Scales(NIIRS)等级,从而实现预先对成像过程进行评价^[10-11]。GIQE 根据地面采样分辨率(Ground Sample Distance, GSD)、边缘锐度和信噪比(Signal Noise Ratio, SNR)预测最终传感器获取图像的 NIIRS 等级。适用于可见光图像的 GIQE 模型^[11]为:

$$\text{NIIRS} = 10.251 - a \lg \text{GSD}_{\text{GM}} + b \lg \text{RER}_{\text{GM}} - 0.656 H_{\text{GM}} - 0.334 \left(\frac{G}{\text{SNR}} \right) \quad (1)$$

式中: RER_{GM} 为归一化相对边缘相应的几何平均值; GSD_{GM} 为地面采样距离的几何平均值; H_{GM} 为调制传递函数补偿(modulation transfer function compenstion, MTFC)引起的几何平均高度过冲; G 为 MTFC 引入的噪声增益; SNR 为信噪比; 式中常数为经验数值。

可见光 GIQE 模型 NIIRS 对参数 GSD_{GM} 和 RER_{GM} 的变化敏感^[10-11], RER_{GM} 在侦察过程中为常数; 传感器像素间距在地面上的投影记为 GSD 。传感器像素间距和焦距分别定义为 p, f 。 R 为传感器光心距目标距离, θ 为传感器主光轴俯仰角。 H 和 L 分别为传感器相对地面高度及传感器与目标的水平距离。在飞行方向与传感器方向相垂直的情况下, GSD_{GM} 为 $\text{GSD}_x, \text{GSD}_y$ 的几何平均, 则:

$$\text{GSD}_{\text{GM}} = \sqrt{\text{GSD}_x \text{GSD}_y} = \frac{\sqrt{p_x p_y}}{\cos \theta} = \frac{p}{f} \frac{H^2 + L^2}{H} \quad (2)$$

式中: p_x, p_y 为传感器的固有参数, 为 x 轴、 y 轴方向上的像素间距。高空长航时无人机在拍摄时 f, H 固定, 式(2)可简化为式(3), 其中 c 为常数:

$$f_{\text{NIIRS}}(L) = cL^2 \quad (3)$$

在目标特性、大气环境以及传感器参数等因素不变的条件下, 可用式(3)近似反映图像质量。

2 航迹规划理论

成像侦察载荷对于成像距离、角度等特殊要求致使飞行航线与传感器的成像侦察效果紧密耦合, 无人机航线应优先考虑通过能够获取最佳成像质量的位置。

无人机成像侦察航迹规划空间是一个预先设定好分布着待侦察目标区(本文仅讨论点目标成像侦察)、敌防空雷达探测以及火力威胁区域。在执行任务时, 无人机受到的威胁 f_{AT} 可定义为敌防空火力击中飞机的概率 A_j 和雷达探测概率 P_{detect} 的乘积^[7], 即:

$$f_{AT} = A_j P_{\text{detect}} = \max_{j=1}^Q \frac{A_j p_{\text{detect}}^j}{D_j^4} = \max_{j=1}^Q \frac{k_j}{D_j^4} \quad (4)$$

公中: $k_j = A_j p_{\text{detect}}^j$; D_j 为无人机距离第 j 个威胁源的距离; 威胁源的总数记为 Q 。

航线规划问题可视多约束条件下多目标优化问题^[7]。设待侦察目标集合为 $O = \{o_1, o_2, \dots, o_M\}$, M 为目标个数; 无人机完成对所有目标侦察的航线的总航程为 L_{path} , 对获取的每个待侦察目标的图像质量的要求下限为 $E_{\text{req}} = \{e_{\text{req}}^1, e_{\text{req}}^2, \dots, e_{\text{req}}^M\}$ 。

对于高空长航时无人机, 航线规划问题的优化目标是, 在满足成像质量需求、安全性等约束条件下找出最佳或近似最佳的航线。

3 粒子群算法

粒子群优化算法是一种基于群体智能的启发式全局搜索算法^[12]。设粒子数目为 N 的粒子群在 H 维空间中搜索, 其中第 i 个粒子记为:

$$X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iH}), i = 1, 2, \dots, N$$

粒子 i 的速度记为:

$$V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iH}), i = 1, 2, 3$$

p_{best} 为粒子 i 搜索到的最优位置, 称为个体极值, 记作:

$$p_{\text{best}} = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iH}), i = 1, 2, \dots, N$$

g_{best} 是整个粒子群搜索到的最优位置, 称为全局极值, 记作:

$$g_{\text{best}} = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gH})$$

每个粒子更新自身的速度和位置^[11]:

$$v_{ih} = wv_{ih} + c_1 r_1 (p_{ih} - x_{ih}) + c_2 r_2 (p_{gh} - x_{ih}) \quad (5)$$

$$x_{ih} = x_{ih} + v_{ih} \quad (6)$$

式中: c_1 和 c_2 为学习因子; r_1 和 r_2 为 $[0, 1]$ 范围内的均匀随机数; v_{ih} 为粒子速度, $v_{ih} \in [-v_{\text{max}}, v_{\text{max}}]$, v_{max} 为常数。

4 基于图像质量的无人侦察机航迹规划算法

4.1 航迹评价函数与威胁规避

高空长航时无人侦察机往往以等高、匀速直线运动方式对目标进行倾斜成像侦察。设图 1 中圆心为目标点,圆的半径为传感器最大作用距离。在侦察过程中无人机一般不进行大机动,见图 1,侦察航线可简化为直线。 S 点为任务起点, A 点与 B 点分别为成像起点与终点, E 点为退出侦察区域点。

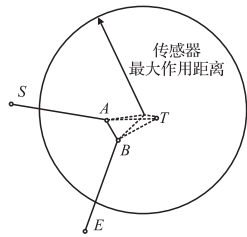


图 1 待侦察目标区域无人机侦察过程

Fig.1 The rout of UAV in reconnaissance target area

如图 1 可知: $\angle ATB \leq \alpha$, $AT = BT$, $AT \leq H \tan \beta$ 。其中 α, β 分别为传感器水平与垂直视场角,单个目标侦察航线的长度 $L_{\text{path},i}$ 为:

$$L_{\text{path},i} = SA + AB + BE \quad (7)$$

完成对 M 个目标侦察任务的航线长度为:

$$L_{\text{path}} = \sum_{i=1}^M L_{\text{path},i} \quad (8)$$

4.2 适应度函数

利用 PSO 算法进行航迹规划时,通过计算适应度函数可以评价航迹规划的优劣。应着重考虑以下几个因素:

1) 图像质量约束。假定要求获得目标 i 的图像质量为 e_{req}^i , 相对应的 f_{NIIRS} 值记为 $f_{\text{NIIRS}}(L_{\text{req},i})$; 预测获取的目标图像质量为 e_{pre}^i , 相对应的 f_{NIIRS} 值记为 $f_{\text{NIIRS}}(L_{\text{pre},i})$, 必须满足:

$$e_{\text{pre}}^i \geq e_{\text{req}}^i \quad (9)$$

即

$$f_{\text{NIIRS}}(L_{\text{pre}}^i) \leq f_{\text{NIIRS}}(L_{\text{req}}^i) \quad (10)$$

因此目标 $\max(E_{\text{pre}})$ 转化为:

$$\min(\sum \omega_i f_{\text{NIIRS}}(L_i)) \quad (11)$$

式中: ω_i 为第 i 个目标的图像质量的加权系数,用以保证重点目标的图像质量。

2) 航迹长度。由于续航能力的限制,无人机有最大的航迹长度,所以要规划出小于最大航迹长度尽可能短的航迹,即:

$$\min L_{\text{path}} = \sum_{i=1}^M L_{\text{path},i} \quad (12)$$

3) 规避威胁约束。威胁信息包括威胁的坐标、威胁区域半径及威胁强度。规避威胁要求无人侦察机尽量在威胁较小的区域飞行,假定所有威胁源威胁度相同,则应满足:

$$\min f_{AT} = \max_{j=1}^Q \frac{1}{\sum_{j=1}^Q d_j^4(x_i)} \quad (13)$$

式中: $d_j(x_i)$ 为航迹节点 x_i 到与威胁源 j 的距离。

由前文可知,航线的评价因素分别为:①航线的总长度 $f_1(X) = L_{\text{path}}$; ②遂行完侦察任务总得图像质量 $f_2(X) = \sum \omega_i f_{\text{NIIRS}}(L_i)$; ③遂行完任务受到的总的威胁 $f_3(X) = T_{\text{threat}}$ 。

对于以上 3 个目标,本文采用加权的方法定义最终的优化目标函数,对 Pareto 解集进行计算,得到最优的航线。加权优化的目标函数为:

$$\min F(X) = \lambda_1 f_1(X) + \lambda_2 f_2(X) + \lambda_3 f_3(X) \quad (14)$$

$$\text{s.t. } \lambda_1 \geq 0, \lambda_2 \geq 0, \lambda_3 \geq 0, \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$$

式中: X 代表候选航迹点集, X 在规划空间 S_0 中取值; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 为 3 个加权因子,可以根据决策者不同的战略,战术意图取值。

5 仿真实验

5.1 规划空间模型

建立一个 $1\,200\text{ km} \times 1\,200\text{ km}$ 的方形区域,航迹最小步长 L_{min} 设为 5 km 。无人侦察机从某基地 S 出发,对 3 个目标 $O = \{o_1, o_2, o_3\}$, 所需的图像质量等级为 $E_{\text{req}} = \{e_{\text{req}}^1, e_{\text{req}}^2, e_{\text{req}}^3\}$ 进行侦察,结束后从 E 点退出,飞行高度为 18 km 。传感器的最大探测范围为 80 km , 目标信息见表 1。

表 1 目标坐标及所需成像质量等级

Tab.1 Targets coordindtes and required NIIRS

序号	目标坐标/km	成像所需 NIIRS 等级
1	(380, 870)	5
2	(480, 700)	5
3	(750, 400)	5

5.2 规划空间中威胁的设置

假设敌方远程防空火力有效作用半径为 80 km , 近程防空火力有效作用半径为 30 km 。威胁源 $K = \{k_1, k_2, k_3\}$, 威胁源信息见表 2。

表 2 威胁源坐标及威胁范围

Tab.2 Threats coordinates and threatening area

序号	目标坐标/km	威胁范围/km
1	(400, 900)	80
2	(500, 700)	30
3	(800, 500)	80

5.3 仿真分析

本文对 2 个情形进行仿真验证,实验仿真采用 Matlab 2009, Intel 双核 2.4 G CPU, 文献[9]中优化算法程序无法得到,由本文作者编程实现。仿真结果如下。

情形 1:时间与油量充足,想要获取战场目标高清晰度图像,给出权值 $\lambda = \{0.2, 0.6, 0.2\}$ 。仿真得到的规划结果见图 2,结果表明如果任务期望得到高分辨率的目标图像,可以通过设置较大的图像质量权重,选择靠近目标的最优航线。

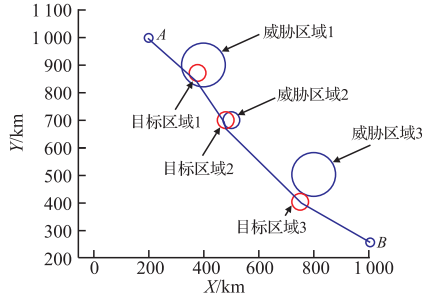


图 2 情形 1 对应的最优航线

Fig.2 The optimal rout corresponding to condition 1

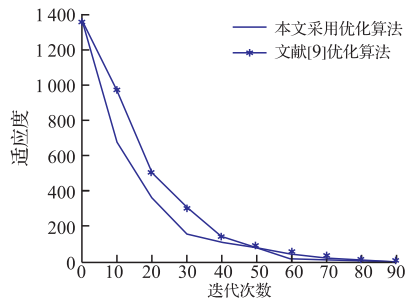


图 3 情形 1 本文算法与文献[9]算法收敛速度对比

Fig.3 The comparison of our algorithm with algorithm poosed in paper[9]under condition 1

情形 2:时间与油量充足,要求保证无人机的安全,给出权值 $\lambda = \{0.2, 0.2, 0.6\}$ 。计算得到规划结果与算法收敛速度对比见图 4~5。结果表明:在保证无人机安全性的条件下,为威胁度赋予较大权重,可以得到满足无人机安全的同时成像质量最佳的航迹。

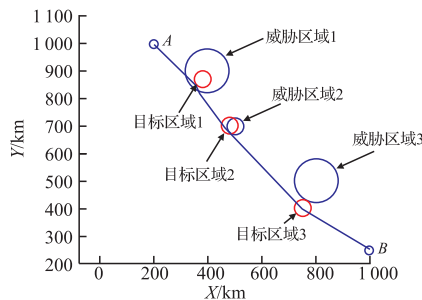


图 4 情形 2 选择的最优航线

Fig.4 The optimal rout corresponding to condition 2

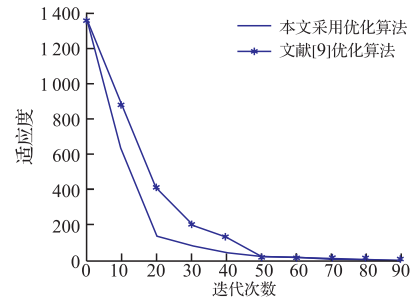


图 5 情形 2 本文算法与文献[9]算法收敛速度对比

Fig.5 The comparison of our algorithm with algorithm poosed in paper[9]under condition 2

其中图 3 与图 5 中迭代结果为 50 实验次平均值,由于本文采用的优化算法相比于文献[9]中的优化方法减少了交叉和变异操作,而且优化过程中当前最优位置信息单向传递给其它粒子,所以收敛速度更快。本文采用的粒子群算法并行化性能要优于文献[9]中优化算法,所以在更为复杂的条件下本文算法具有更大优势。

6 结语

本文结合高空长航时无人侦察机的特点,研究了威胁条件下面向成像侦察任务的多目标航线规划方法,并充分考虑了侦察图像质量需求,提高了成像侦察航线规划结果的实用性,并应用 PSO 算法对航迹进行了优化。利用 Matlab 仿真结果表明,该方法符合无人侦察机以任务为中心的特点,考虑了高空长航时无人侦察机在侦察作战中图像判读人员的需求,且收敛速度较快。文中的规划方法忽略了飞行平台的机动性能约束,后续工作将完善规划算法,提高算法的实用性。

参考文献(References):

[1] 郑昌文,严平,丁明跃,等. 飞行器航迹规划研究现状与趋势[J]. 宇航学报, 2007, 28(6):1141-1146.
ZHENG Changwen, YAN Ping, DING Mingyue, et al. Research Status and Trend of Route Planning for Flying Vehicles[J], Journal of Astronautics, 2007, 28(6):1141-1146. (in Chinese)

[2] 王维平,刘娟. 无人飞行器航迹规划方法综述[J]. 飞行力学, 2010, 28(2):6-10.
WANG Weiping, LIU Juan. Introduction to Unmanned Air Vehicle Route Planning Methods [J]. Flight Dynamics, 2010, 28(2):6-10. (in Chinese)

[3] 陈前洋. 飞行器并行航迹规划算法研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2005.
CHEN Qianyang. Research on Parallel Route Planning Algorithm for Air Vehicle[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2005. (in Chinese)

- [4] Anderson E P. Real-Time Dynamic Trajectory Smoothing for Unmanned Air Vehicles[J]. IEEE Transactions on control systems technology, 2005, 5(3):471-477.
- [5] 胡中华, 赵敏, 姚敏. 无人机三维航路规划技术研究及发展趋势[J]. 技测技术, 2009, 29(6):6-9.
HU Zhonghua, ZHAO Min, YAO Min. Research and Development Trend of 3-D Route Planning for UAV[J]. Metrology and Measurement Technology, 2009, 29(6):6-9. (in Chinese)
- [6] 赵锋, 杨伟, 杨朝旭, 等. 无人机三维航路动态规划及导引控制研究[J]. 计算机工程与应用, 2014, 50(2):58-64.
ZHAO Feng, YANG Wei, YANG Zhaoxu, et al. UAV Three-Dimensional Dynamic Route Planning and Guidance Control Research[J]. Computer Engineering and Applications, 2014, 50(2):58-64. (in Chinese)
- [7] 曹晖, 王瑾, 李寰宇, 等. 基于改进粒子群算法的对地攻击最优航迹规划[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2013, 14(1):20-24.
CAO Hui, WANG Jin, LI Huanyu, et al. Air to Ground Attack Route Planning by Using Method of PSO[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2013, 14(1):20-24. (in Chinese)
- [8] 王铀, 赵辉, 臧守飞, 等. 考虑多约束的UCAV对地攻击轨迹规划[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2012, 13(6):6-10.
WANG You, ZHAO Hui, ZANG Shoufei, et al. Research on Air-to-ground Trajectory Planning for UCAVs Considering Multi-restriction[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2012, 13(6):6-10. (in Chinese)
- [9] 黄丁才, 牛轶峰, 沈林成, 等. 基于图像质量的无人侦察机航线规划[J]. 微计算机信息, 2010, 26(9):186-188.
HUANG Dingcai, NIU Yifeng, SHEN Lincheng, et al. A Path Planning Based on the Image Quality for Unmanned Reconnaissance Air Vehicles[J]. Microcomputer Information, 2010, 26(9):186-188. (in Chinese)
- [10] FAS. FAS Intelligence Resource Program national Imagery Interpretability Rating Scales[EB/OL] (2008-02-01)[2014-07-01]. <http://www.fas.org/irp/imint/niirs.html>.
- [11] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization [C]//In Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Neural Networks. Piscataway: IEEE Service Center, 1995:1942-1948.
- [12] Ling S H, Iu H C F, Leung H F, et al. Improved Hybrid Particle Swarm Optimized Wavelet Neural Network for Modeling the Development of Fluid Dispensing for Electronic Packaging [J]. IEEE Trans Ind Electron, 2008, 55(9):3447-3460.

(编辑:徐敏)

+++++
(上接第 18 页)

参考文献(References):

- [1] 黄仰贤.路面分析与设计[M].余定选,齐诚,译.北京:人民交通出版社,1998.
Huang Y H. Pavement Analysis and Design [M]. YU Dingxuan, QI Cheng, translated. Beijing: China Communication Press, 1998. (in Chinese)
- [2] Huang Y H. Chart for Determining Equivalent Single-Wheel loads [J]. Journal of Highway Division [J]. ASCE, 1968, 94:115.
- [3] Huang Y H. Influence Charts for Two Layer Elastic Foundations [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division [J]. ASCE, 1969, 95:709.
- [4] Gerrard C M, Harrison W J. A Theoretical Comparison of the Effects of Dual-Tandem and Dual-wheel Assemblies on Pavements [J]. Australian Road Research Board, 1970, 5(4):112.
- [5] ICAO. Aerodrome Design Manual (Part 3): Pavements [M]. 2nd ed. Montreal: International Civil Aviation Organization, 1983.
- [6] 中华人民共和国行业标准.民用机场沥青混凝土道面设计规范(MH 5010-1999)[S].北京:中国民用航空总局, 2000.
Ministry of Transport of the People's Republic of China MH 5010-1999 Specification of Civil Airport Concrete Pavement Design [S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2000. (in Chinese)
- [7] John Knapton. The Structural Design of Heavy Duty Pavement for Ports and Other Industries [M]. 3rd edition. London: British Precast Concrete Federation, 1996.
- [8] John Knapton. Heavy Duty Pavement for Ports and Other Industries [M]. 4th edition. UK: Interpave, 2007.
- [9] Leigh Wardle, Ian Rickards, John Lancaster, et al. Heavy Duty Industrial Pavement Design Guide [M]. MINCAD Systems, 2007.
- [10] 胡洪龙, 谈至明, 袁静波. 港区铺面结构的当量单轮荷载 [J]. 中国港湾建设, 2014, 5:21.
HU Honglong, TAN Zhiming, YUAN Jingbo. Equivalent Single Wheel Load of Pavement Structure in Harbour District [J]. China Harbour Engineering, 2014, 5:21. (in Chinese)

(编辑:徐敏)