

显微成像系统的多参数自适应优化技术

王洪伟^{1,2} 陈果¹ 李爱¹ 陈立波²

1. 南京航空航天大学, 南京, 210016 2. 北京航空工程技术研究中心, 北京, 100076

摘要: 在基于显微磨粒图像处理的磨损故障诊断系统中, 图像质量是保证磨粒分析的关键。而磨粒显微图像的成像质量与摄像机参数、光源参数有非常大的关系。采用遗传算法, 对摄像机参数和光源参数进行了6个参数自动优化, 利用标准图像与某参数下的图像差异构造了适应度函数, 通过实数编码、赌轮选择、算术交叉和均匀变异等遗传算法操作, 最终得到了一组最优的摄像机和光源参数。在该组参数下, 磨粒图像与标准图像达到了最佳的逼近。最后, 通过实验验证了该方法的正确有效性。

关键词: 遗传算法; 自适应调整; 显微图像; 磨粒分析

中图分类号: TP183

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2014.24.014

An Adaptive Adjustment Technique of Multi-parameters in Microimaging System

Wang Hongwei^{1,2} Chen Guo¹ Li Ai¹ Chen Libo²

1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016

2. Beijing Aeronautical Technology Research Center, Beijing, 100076

Abstract: Image quality was a key link to ensure the analysis for wear particle in the wear fault diagnosis system which was based on micro-image processing. However, the micro-image quality of wear particle was related to camera parameters and light source parameters. Herein GA was used to adjust 6 parameters of camera and light source automatically. A fitness function was constructed to describe the difference between the standard image and the image under certain parameters. A group of optimal parameters of the camera and light source were obtained by means of the GA method operational procedure, such as real coding, roulette wheel selection, arithmetic crossover and uniform mutation operation. Finally, the new method was verified through the experiments, and the results show that the GA method is very effective for adaptive adjustment of multi-parameters in micro-imaging system.

Key words: genetic algorithm(GA); adaptive adjustment; microscopic image; wear particle analysis

0 引言

油液监测技术^[1-3]是航空发动机故障诊断的重要方法之一, 通过对发动机润滑系统中的润滑油进行检测分析, 可提前预报发动机异常磨损故障, 保障航空发动机的安全使用, 减少灾难性事故的发生。

常见的航空发动机油液监测技术^[4]有光谱分析、铁谱分析、污染度检测、自动磨粒分析等, 这些方法各有所长。光谱分析^[5-6]可以检测油液中金属磨损微粒的材料成分和浓度, 但不能准确检测油液中因轴承疲劳失效产生的较大尺寸颗粒(直径大于 $10\ \mu\text{m}$), 也不能判别磨损金属的磨损类型。铁谱分析^[7-8]可以检测分析磨损颗粒的形貌、大小、数量, 但操作复杂, 分析结果严重依赖操作者的经验, 同时存在定量化、自动化及误差控制较差等问题^[9]。污染度检测^[10]仅能判断当前系统的污染水平, 无法准确判断航空发动机的实际磨损情况。自动磨粒分析综合应用激光成像技术和人工智能技术表征磨损颗粒, 能够对磨粒的磨损

类型、数量和变化趋势做出判断^[11], 但常见的自动磨粒分析仪器只能检测油液中直径 $20\ \mu\text{m}$ 以上的磨粒, 且由于采用单透射遮光原理, 故对于油液中的石墨封严碎片、橡胶碎片等非金属容易误识别为金属磨粒, 会直接影响故障诊断结果。

为更有效地诊断航空发动机轴承疲劳失效故障, 自动检测油液中直径大于 $10\ \mu\text{m}$ 的磨损颗粒, 专门设计开发了基于磨粒图像分析的多功能油液磨粒智能检测与诊断系统(multiple intelligent debris classifying system, MIDCS)。MIDCS采用了数字化图像分析技术, 通过自动检测油液特征磨粒的尺寸、颜色、形貌、类型和数量等信息, 能准确评价发动机磨损故障的严重程度和失效类型。

在MIDCS中, 图像质量是油液磨粒分析的关键。通常的调节方法是手动对每个图像影响参数进行逐一调整。由于图像影响参数较多, 手动调整非常困难, 故难以满足实际需要。

遗传算法^[12-13]是一种优化算法, 它通过模拟生物适者生存的遗传进化原理来得到解空间的全局最优解。遗传算法具有优良的全局优化能力和天生的隐含并行性, 能够实现多参数自动优化, 且不

需要事先知道目标函数及其导数,已广泛应用于解决各工程应用中的优化问题。基于此,本文提出了一种基于遗传算法的显微成像系统的自适应调整技术,用以解决 MIDCS 中的图像成像质量标准化的问题,最后通过实验进行了验证。

1 MIDCS 简介

MIDCS 由硬件和软件组成。硬件主要包括高速摄像机、透射光源、反射光源、成像光学组件、油液样品池、电路控制系统等。为提高磨粒图像识别效率,硬件采用了透反射双光路系统,可增加磨粒目标的表面颜色信息,大大丰富了磨粒图像的数字信息。仪器内部透反射双光路成像系统结构图见图 1。系统工作原理图见图 2,主要由精密样品池、光学成像系统、电路控制系统和图像采集与分析处理部分组成。在 MIDCS 的流体通道中,管路里的油液在蠕动泵的驱动下通过精密样品池,透射光源和反射光源照射油液样品池中的颗粒,并经过光学成像系统实时动态成像,由高速摄像机获取图像信息,经图像采集后由系统软件进行分析,对颗粒的形貌特征进行识别,通过专家系统软件自动判断颗粒类型、数量和颗粒污染度,实现航空发动机系统的磨损状态监控、故障趋势分析和诊断。

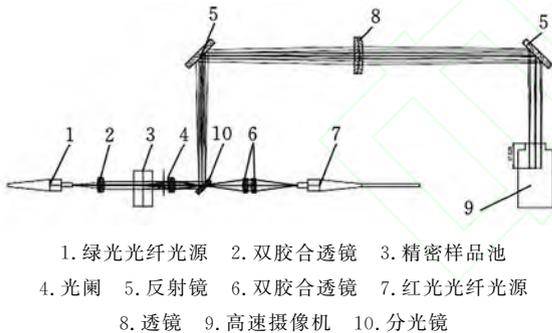


图 1 光路成像系统结构

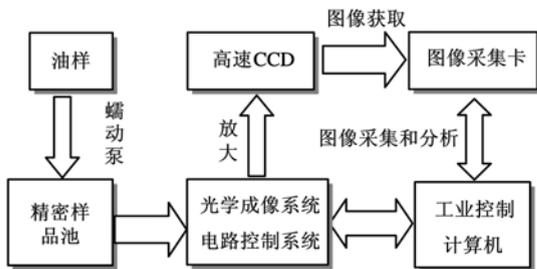


图 2 系统工作原理图

MIDCS 可对油液中直径大于 $4\ \mu\text{m}$ 的颗粒进行计数,计算固体颗粒污染度等级;对直径大于 $10\ \mu\text{m}$ 的颗粒进行分析判断,将颗粒识别为金属和非金属,同时对金属颗粒进一步识别为切削磨

粒、严重滑动磨粒、疲劳磨粒,对非金属颗粒进一步区分为气泡、纤维、其他非金属颗粒等。

2 图像成像质量的影响因素分析

在 MIDCS 中,使用的数字摄像机为 Allied Vision Technologies GmbH 公司的 MARLIN-F033C,每秒可采集 30 幅以上的高速动态图像;2 个光源分别为绿色和红色 LED(light-emitting diode)。影响图像成像质量的因素主要为光源强度和摄像机参数。光源强度参数包括透射绿光光强 Q_G 和反射红光光强 Q_R ,摄像机参数包括增益 G_N 、快门 ST 、白平衡 UB 、白平衡 VR 、亮度 BR 和锐化 SP 等。亮度 BR 和锐化 SP 这 2 个参数对图像质量的影响不明显,无须进行调整。各参数的原始调整范围如表 1 所示。

表 1 各参数的原始调整范围

参数名称	增益 G_N	快门 ST	白平衡 UB	白平衡 VR	绿光光强 Q_G	红光光强 Q_R
原始范围	0~680	0~4095	0~568	0~568	0~4095	0~4095

各参数的调节规律如下:

(1)绿光光强 Q_G 和红光光强 Q_R 分代表代表绿灯和红灯的亮度。

(2)调节摄像机增益 G_N 时,图像亮度和噪声也随之变化。当 G_N 较低时可以获得比较清晰的图像,但图像亮度也相对变低;增益增加时,图像的亮度和图像噪声均会随之增加。

(3)快门 ST 变大时,图像亮度会增加,但图像容易拖尾,颗粒目标不清晰。 ST 调小时,图像亮度明显减弱。

(4) UB 和 VR 为白平衡调节参数。调整白平衡,实际上是调整整个图像的红绿蓝三色的强度,修正光线所造成的误差,使摄像机获取的目标颜色尽量呈现原色状态。 UB 和 VR 分别调节图像的绿色和红色强度。

根据多次对比实验数据,获取了一幅标准图像(图 3),作为调节的目标图像,其参数取值为增益 $G_N=450$,快门 $ST=5$, $UB=200$, $VR=390$, $Q_G=1204$, $Q_R=587$ 。当分别单独调节 G_N 、 ST 、 UB 、 VR 、 Q_G 、 Q_R 时,各个影响参数均对图像调节有明显影响。显然,难以用手动方式对这 6 个参数进行调整。由此需要寻找一种方法,自动获取一组摄像机参数和光源参数,使摄像机的图像与标准图像达到最佳的相似度。遗传算法具有全局性的快速搜索能力,可同时对多参数同时实现优化,比穷举搜索更有效率。为此,本文考虑使用遗传算法来对显微图像进行自适应调整,代替手工



图 3 标准图像

调整参数,提高图像调整的准确性。

3 基于遗传算法的显微图像自适应调整

将遗传算法应用于显微图像的自适应调整,其基本原理是:寻找最后优化参数 QG 、 QR 、 GN 、 ST 、 UB 、 VR ,使得组合参数显示的图像与标准图像之间的差别最小。基于此,本文基于遗传算法的显微图像自适应调整方法基本流程如图 4 所示。

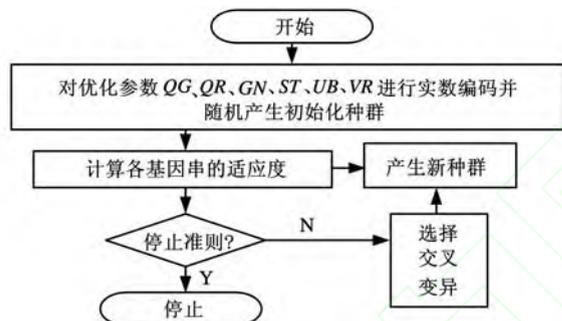


图 4 遗传算法流程

(1) 编码。选定优化参数为: QG 、 QR 、 GN 、 ST 、 UB 、 VR ,采用实数编码。实数编码的关键是要确定每个参数的取值范围,范围取得合适,将大大减小遗传算法的搜索空间,提高识别精度和计算效率。

①绿光和红光光强由脉冲控制,其取值范围为 $0 \sim 4095$,对应实际电路的 $0 \sim 5 \text{ V}$ 。

②增益较小时将大大降低图像亮度,因此根据调整经验,增益范围设置为 $[424, 680]$ 。

③快门值应能满足拍照的基本条件,使图像清晰不拖尾,其值变化不宜过大,因此将快门 ST 范围确定为 $[4, 5]$ 。

④ UB 和 VR 将分别影响图像的绿色和红色强度,对图像颜色影响较大,其范围不宜设置过宽。颜色信息是图像分析诊断的重要依据之一,为了更好地区分颗粒类型,设置 UB 的范围为 $[200, 208]$, VR 的范围为 $[390, 398]$ 。

(2) 适应度函数设计。根据动态 K-L 变换法得到一组适用于多种彩色图像分割的正交特征

I_1, I_2, I_3 ^[14]。即

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= (R+G+B)/3 \\ I_2 &= (R-B)/2 \\ I_3 &= (2G-R-B)/4 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中, R, G, B 为颜色分量值, I_1, I_2, I_3 为 R, G, B 的线性变换, I_1 实际上反映了图像的灰度特征, I_2 和 I_3 反映了图像的彩色特征。因此,定义遗传算法的适应度函数为

$$F = \frac{3N}{\sum_{i=1}^N (|\Delta I_1(i)| + |\Delta I_2(i)| + |\Delta I_3(i)|)} \quad (2)$$

式中, N 为像素点数; $\Delta I(i)$ 为调整图像与标准图像之间第 i 个像素点的正交特征值的差。

显然,适应度函数值越大,表明被调整的图像与标准图像之间的差别就越小。

(3) 选择。采用比例选择算法,即赌盘选择法进行选择,同时利用最优保存策略。即当前群体中适应度最高的个体不参与交叉和变异运算,而是用它替换本代群体中经过交叉、变异等遗传操作产生的适应度最低的个体。设群体大小为 M ,个体 i 的适应度为 F_i ,则个体 i 被选中的概率 p_{is} 为

$$p_{is} = \frac{F_i}{\sum_{i=1}^M F_i} \quad (3)$$

(4) 交叉。采用算术交叉法,假设在两个个体 $X_A^{(t)}, X_B^{(t)}$ 之间进行算术交叉,则交叉运算后所产生的两个新个体为

$$\left. \begin{aligned} X_A^{(t+1)} &= \alpha X_B^{(t)} + (1-\alpha) X_A^{(t)} \\ X_B^{(t+1)} &= \alpha X_A^{(t)} + (1-\alpha) X_B^{(t)} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中, α 为参数,如为常数,则为均匀交叉,如为变化的数,则为非均匀交叉,这里采用均匀交叉,选择 $\alpha = 0.1$ 。

(5) 变异。采用均匀变异,假设染色体中的某基因 x_k 为变异点,其取值范围为 $[U_{\min}^{(k)}, U_{\max}^{(k)}]$,在该点对该染色体进行均匀变异操作后,新的基因因为

$$x'_k = U_{\min}^{(k)} + r(U_{\max}^{(k)} - U_{\min}^{(k)}) \quad (5)$$

式中, r 为服从 $[0, 1]$ 均匀分布的随机数。

(6) 其他参数。交叉率为 0.75,变异率为 0.05。

4 实验验证

本文将新方法应用于 MIDCS 系统,对摄像机和光源系统的 6 个参数进行自适应优化。为验证基于遗传算法的显微图像自适应调整技术的有效性,分别将种群数设为 30、100,遗传代数设为 50、100、200,利用本文方法对 MIDCS 系统进行显微

成像系统自动参数调整。

图 5~图 10 为适应度函数最大值、适应度函数平均值、适应度函数最小值随遗传代数的增加的变化规律。从图中可以看出,当种群数为 30 时,分别经过 38、67、80 代进化后,适应度函数达到了最大值 0.34;当种群数为 100 时,分别经过 15、14、24 代进化后,适应度函数分别达到了最大

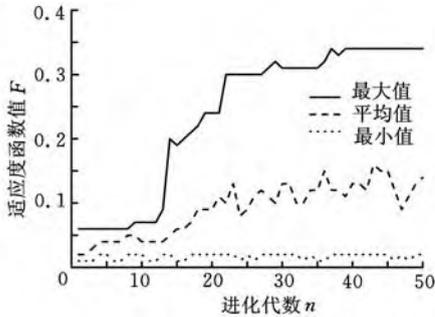


图 5 进化代数为 50,种群数为 30 时的适应度函数值

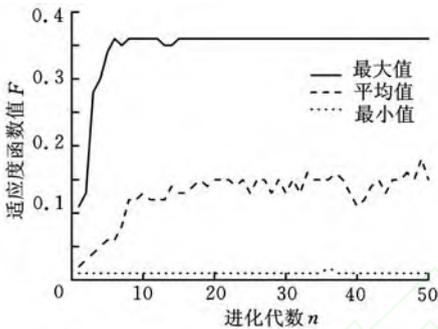


图 6 进化代数为 50,种群数为 100 时的适应度函数值

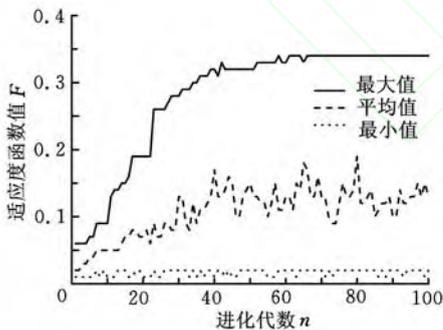


图 7 进化代数为 100,种群数为 30 时的适应度函数值

值 0.36。由此可见,种群数越大,遗传算法搜索到的最优值越接近全局最优值,而且获取最优值所需要的进化代数越少。通常,在实际应用中,种群数选择为 100,遗传代数选择为 50,可以得到较好的结果。表 2 为不同遗传代数以及不同种群数的自适应调整参数结果,与标准图像参数取值均较为接近。从调整结果来看,这几种不同遗传代数以及不同种群数的自适应调整图像结果与标准

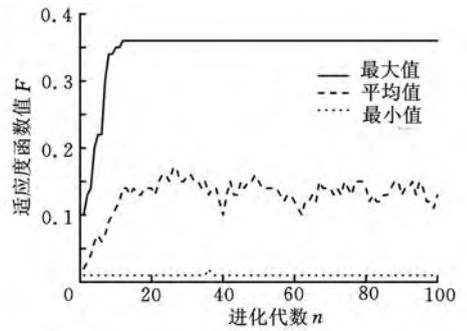


图 8 进化代数为 100,种群数为 100 时的适应度函数值

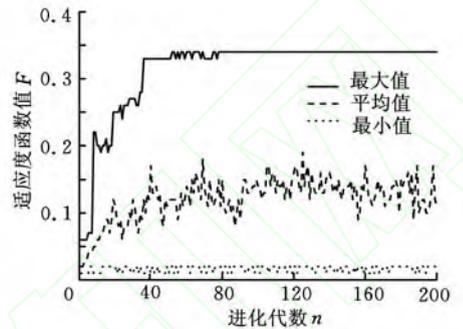


图 9 进化代数为 200,种群数为 30 时的适应度函数值

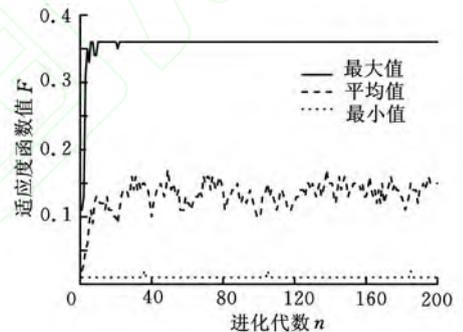


图 10 进化代数为 200,种群数为 100 时的适应度函数值

图像均能达到一致,表明算法是有效和正确的。另外,当种群数更多时,遗传算法收敛的速度更快,因此,在实际应用中需要适当考虑更大的种群数。

表 2 不同进化代数和种群数自适应调整得到的最优值

序号	进化代数	种群数	增益 GN	快门 ST	白平衡 UB	白平衡 VR	绿光光强 QG	红光光强 QR	适应度函数最大值
1	50	30	490	5	200	390	1011	507	0.34
2	50	100	432	5	200	392	1297	636	0.36
3	100	30	487	5	200	391	1023	512	0.34
4	100	100	432	5	200	394	1314	631	0.36
5	200	30	482	5	200	391	1062	528	0.34
6	200	100	472	5	200	392	1094	542	0.36

5 结束语

本文提出了基于遗传算法的显微成像系统多

参数自适应调整的新方法,在遗传算法中构造了反映图像差异的适应度函数,采用实数编码、赌轮选择、算术交叉和均匀变异算法操作,避免了传统的试探法或穷举搜索法,大大提高了系统成像质量的稳定性和自动化程度,最后对该方法进行了验证,结果证明了算法的正确性和有效性。该方法已应用于基于磨粒图像分析的多功能油液磨粒智能检测诊断系统,大大提高了该系统的智能化水平。

参考文献:

- [1] 张英堂,任国全. 油液监测技术的现状与发展[J]. 润滑与密封,2000,25(2):65-66.
Zhang Yingtang, Ren Guoquan. The Present Condition and Development of Oil Monitoring Technique [J]. Lubrication Engineering, 2000, 25(2): 65-66.
- [2] 姜旭峰,费逸伟,李华强,等. 航空发动机滑油综合监测技术研究[J]. 润滑与密封,2005,30(2):110-112.
Jiang Xufeng, Fei Yiwei, Li Huaqiang, et al. Study on the Lubricant Oil Integrative Analysis Technique for Aero-Engine Failure Diagnoses [J]. Lubrication Engineering, 2005, 30(2): 110-112.
- [3] Adams M J, Romeo M J, Rawson P. FTIR Analysis and Monitoring of Synthetic Aviation Engine Oils [J]. Tribology International, 2007, 73: 629-634.
- [4] 陈立波,宋兰琪,陈果. 航空发动机滑油综合监控中的磨损故障融合诊断研究[J]. 航空动力学报, 2009, 24(1): 169-175.
Chen Libo, Song Lanqi, Chen Guo. Study on Fusion Diagnosis Techniques of Wear Faults in Synthesized Monitoring of Aero-engine [J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(1): 169-175.
- [5] 杨虞微,陈果. 光谱油样分析监测技术中的神经网络预测方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2004, 25(8): 1339-1343.
Yang Yuwei, Chen Guo. Artificial Neural Network Forecasting Method in Monitoring Technique by Spectrometric Oil Analysis [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2005, 25(8): 1339-1343.
- [6] 李爱,陈果. 基于 SVM 的航空发动机油样光谱诊断界限值制定[J]. 航空动力学报, 2011, 26(4): 771-778.
Li Ai, Chen Guo. Establishment of the Threshold of Oil Spectrum Analysis in the Aircraft Engine Based on SVM [J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(4): 771-778.
- [7] 孔宪梅,熊募,汪家道. 计算机图像处理在铁谱分析中的应用[J]. 润滑与密封, 2002, 27(2): 23-26.
Kong Xianmei, Xiong Ao, Wang Jiadao. The Application of Computer Image Processing in Ferrography Analysis [J]. Lubrication Engineering, 2002, 27(2): 23-26.
- [8] Macian V, Payri R, Tormos B, et al. Applying Analytical Ferrography as a Technique to Detect Failures in Diesel Engine Fuel Injection Systems [J]. Wear, 2006, 260(4/5): 562-566.
- [9] 卜英勇,张怀亮,秦雅琴. 铁谱磨粒形态特征提取的新进展与适用范围[J]. 中国有色金属学报, 1998, 8(3): 547-550.
Bu Yingyong, Zhang Huailiang, Qin Yaqin. New Development and Application of Characteristic Morphology Extraction of Ferrography Wear Particle [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1998, 8(3): 547-550.
- [10] 程健云,牛天梅. 油液污染度检测技术现状及面临的变化[J]. 液压与气动, 2007, 10: 36-39.
Cheng Jianyun, Niu Tianmen. The Status and Change Faced on Fluids Contamination Testing Technology [J]. Chinese Hydraulics and Pneumatics, 2007, 10: 36-39.
- [11] 徐金龙,易如娟. 基于自动磨粒分析技术的直升机在用发动机油界限值的研究[J]. 润滑与密封, 2012, 37(2): 110-116.
Xu Jinlong, Yi Rujuan. Study on the Limits for Change of Engine Oil Used in Helicopter with Laser Fines [J]. Lubrication Engineering, 2012, 37(2): 110-113.
- [12] Musharavati F, Hamouda A S M. Modified Genetic Algorithms for Manufacturing Process Planning in Multiple Parts Manufacturing Lines [J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(9): 10719-11998.
- [13] 葛继科,邱玉辉,吴春明,等. 遗传算法研究综述[J]. 计算机应用研究, 2012, 25(10): 2911-2916.
Ge Jike, Qiu Yuhui, Wu Chunming, et al. Summary of Genetic Algorithms Research [J]. Application Research of Computers, 2012, 25(10): 2911-2916.
- [14] 陈果,李爱. 航空器检测与诊断技术导论[M]. 南京:航空工业出版社,2012.

(编辑 袁兴玲)

作者简介:王洪伟,男,1979年生。南京航空航天大学民航学院博士研究生,北京航空工程技术研究中心工程师。主要研究方向为航空发动机机械故障诊断与油液监控技术。陈果,男,1972年生。南京航空航天大学民航学院教授、博士研究生导师。李爱,女,1987年生。南京航空航天大学民航学院博士研究生。陈立波,男,1972年生。北京航空工程技术研究中心博士、高级工程师。