

## 近空间高速流场环境小目标探测分析与试验

郭惠楠, 马迎军\*, 王 华, 彭建伟

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

**摘 要:** 随着空间安全与应用探索的不断深入,近空间飞行器目标探测效能成为研究的核心问题。光学成像探测能够直观反映目标的形态、光谱与运动特性等多维度信息,因此成为空间探测感知的重要手段。在近空间大气密度、气压、对流等条件作用下,导致高速飞行器光学探测设备成像质量与探测性能衰减。采用以成像系统、大气传输系统和目标背景系统为要素的目标探测分析模型,根据气动光学效应理论,建立高速流场气动光学效应评价方程,对深空、近地等典型应用场景进行成像探测分析。设计了高速流场环境下目标探测地面验证试验,仿真测试结果表明,针对空间高速飞行目标,采用 900~1 700 nm 谱段短波红外探测器配合厚度 10 mm 以上石英窗口,对尾焰目标辐射具有良好观测效果;通过降低探测设备曝光时间、优化曝光控制策略及选用光学带通滤光片等方式,能够有效抑制背景杂光与气动光学效应影响。

**关键词:** 近空间; 目标探测; 气动光学效应; 高速流场

**中图分类号:** TP732.2      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA20220218

## Analysis and experiment of small target detection in high speed flow field of near space

Guo Huinan, Ma Yingjun\*, Wang Hua, Peng Jianwei

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** With the deepening of space security and application exploration, the target-detectability of space vehicle in near space has become a core issue of research. For some multi-dimensional information of target, such as shape, spectrum and motion characteristics, can be directly captured by optical imaging detection device, optical detection has become an important means of space imaging and target detection. Under the conditions of atmospheric density, pressure and atmospheric convection in near space, imaging quality and detection range of optical detection device installed in high-speed aircraft could be affected seriously. By using target detection model with three analysis elements (imaging system, atmospheric transmission system and target-background system) and the theory of aero-optical effect, evaluation equation of aero-optical effect for high speed flow field has been established, to analyze imaging performance of typical scenes such as earth and space background. A ground verification test of target detection in high speed flow field has also been designed. The experimental results show that it's an effective way for detecting plume flow of high-speed space targets by using short wave infrared detector (SWIR: 900-1 700 nm) with quartz window (with thickness of more than 10 mm). Meanwhile,

收稿日期:2022-03-21; 修订日期:2022-04-25

基金项目:陕西省重点研发计划(2018 ZDXM-SF-031)

作者简介:郭惠楠,男,高级工程师,硕士生导师,博士,主要从事航空航天器视觉测量、探测与智能感知信息处理方面的研究。

通讯作者:马迎军,男,工程师,硕士,主要从事航空、航天器光学系统设计方面的研究。

by reducing exposure time of camera, optimizing exposure control strategy and selecting optical filter, stray light in background and aero-optical effect can be effectively suppressed.

**Key words:** near space; target detection; aero-optical effect; high speed flow field

## 0 引言

近年来,随着各国对空间安全与应用研究的不断深入,近空间飞行器的探测手段及探测效能问题受到了广泛关注。近空间通常是指距地面 20~100 km 高度的近地空间。尤其在 20~50 km 的平流层空域,其相对稳定的大气对流状态及气压、密度等,为飞行器的高速飞行、长期驻留等提供了有利条件。在空间自感知与安全应用领域,光学成像探测能够提供目标的几何形态、运动状态、光谱特性以及空间位置能信息,因此成为探测感知的重要手段。然而,对于高速飞行器,其光学遥感探测设备的探测能力受限于图像传感器、光学系统、探测窗口、空气流场、目标特性以及环境背景等因素,从而影响探测距离及成像质量。尤其对于远距离小目标而言,高速飞行所导致的气动光学效应尤为突出<sup>[1]</sup>。因此,采用目标探测模型,解析各环节影响因素,通过地面高速流场验证试验,实现对空间高速飞行器探测能力的仿真与分析。

## 1 目标探测模型

对于空间高速飞行器本体部署的光学探测装置,远距离空间目标(探测距离大于 10 km)的探测能力受到了光电成像系统、大气传输系统以及目标背景系统的相互作用。

空间飞行器小目标成像探测模型如图 1 所示,成像系统光学视场内接收到的场景能量包含了目标辐射照度 $E_t$ (目标自身辐射能量和环境光在目标表面的反射能量),背景辐射照度 $E_b$ (环境光直接辐射能量或环境光照射大气粒子产生的散射能量),以及成像探测装置与目标、背景传输路径上大气辐射照度 $E_{tp} + E_{bp}$ 。根据光电成像系统作用距离及能量辐射定律<sup>[2-3]</sup>,光电探测器视场内捕获的场景辐射照度 $E_{cap}$ 为:

$$E_{cap} = \frac{1}{R^2} \cdot \frac{1-\theta^2}{F\#^2} \cdot \prod k \cdot \frac{1}{\sum \eta^2} \cdot \sum E \quad (1)$$

式中: $R$ 为探测距离; $F\#$ 为光学系统的 $F$ 数; $\theta$ 为孔径遮拦比。参数 $k$ 表示目标到探测器靶面传输路径上

各环节的透过率作用;参数 $\eta$ 表示光电成像系统、大气传输系统以及目标背景系统所造成的像点弥散系数;参数 $E$ 表示目标、背景以及传输路径上叠加的辐射照度和。 $\prod k$ 、 $\sum \eta^2$ 、 $\sum E$ 定义如下:

$$\begin{cases} \prod k = k_{filter} \cdot k_{opt} \cdot k_{air} \\ \sum \eta^2 = \eta_{sensor}^2 + \eta_{opt}^2 + \eta_{air}^2 + \eta_t^2 \\ \sum E = E_t + E_b + E_{tp} + E_{bp} \end{cases} \quad (2)$$

式中:参数 $k$ 下标分别表示滤光片、光学系统、大气的透过率; $\eta$ 下标分别表示由探测器积分时间、光学系统传函、大气抖动、目标运动导致的弥散参数; $E$ 下标分别表示到达探测器靶面的目标、背景、传输路径上大气的辐射照度值。

当探测距离一定时,成像质量与探测效果与探测器灵敏度(像元尺寸、满阱电荷数、光谱响应量子效率等)、光学系统传递函数 MTF 值以及目标、背景的表现对比度有关。假设光电成像系统参数一定的情况下,目标与背景的对比度成为了影响探测效果的主要因素。根据表现对比度 $C$ 定义<sup>[3-5]</sup>:

$$C = \frac{|\sum E_{target} - \sum E_{back}|}{\sum E_{back}} \quad (3)$$

分别求解目标与背景辐射照度,公式(1)代入公式(3)得:

$$C = \frac{|E_t - (E_b + E_{bp} - E_{tp})|}{E_b + E_{bp}} \quad (4)$$

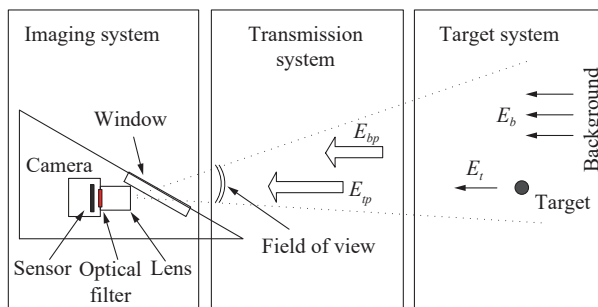


图 1 小目标成像探测模型

Fig.1 Imaging detection model for small target

其中,各参数定义如前述公式所示,不再赘述。可以看出,当光电成像系统与目标背景系统辐射各环节作用效能一定时,大气传输系统所造成的影响 ( $E_{tp}$ 、 $E_{bp}$ ) 最为关键。

## 2 气动光学效应影响分析

大气传输系统影响表现为气动光学传输效应与气动热辐射效应,统称为气动光学效应<sup>[1]</sup>。主要通过空间大气流场及探测设备观察窗口两类介质形成耦合作用,从而造成图像模糊、抖动、中心偏移、信号失真、信噪比降低等问题。直接影响目标探测感知效果,导致探测系统作用距离及灵敏度降低,影响目标测量精度。

为了进一步解析气动光学效应,将气动光学传输效应泛函 $\Psi(\cdot)$ 与气动热辐射效应泛函 $\Gamma(\cdot)$ 表示如下:

$$\begin{cases} \Psi(\cdot) = \Psi\{\delta(\delta_{sta}, \delta_{tra}), \xi(\xi_{imp}, \xi_{str})\} \\ \Gamma(\cdot) = \Gamma\{\delta(\delta_{com}, \delta_{den}, \delta_{imp}, \delta_{spd}), \xi(\xi_{imp}, \xi_{em}, \xi_{pro})\} \end{cases} \quad (5)$$

式中:函数 $\delta(\dots)$ 为空间流场作用函数;函数 $\xi(\dots)$ 为观察窗口作用函数。参数 $\delta_{sta}$ 、 $\delta_{tra}$ 、 $\delta_{com}$ 、 $\delta_{den}$ 、 $\delta_{imp}$ 、 $\delta_{spd}$ 分别表示流场的稳态分量、暂态分量、大气组分、大气密度、流场温度及相对速度;参数 $\xi_{imp}$ 、 $\xi_{str}$ 、 $\xi_{em}$ 、 $\xi_{pro}$ 分别表示窗口外表面温度、材料热应力、发射率以及外表面特性。在实际工程应用中,虽然很难得到上述泛函的准确、统一表达式,但可以有效地分析气动光学效应在不同介质中的作用效果<sup>[4-5]</sup>。

针对不同应用环境,结合气动光学效应理论,对目标与背景的表现对比度进行进一步分析。假设高速飞行器成像探测过程中始终受到气动光学效应作用,即: $E_{tp} \neq 0$ 且 $E_{bp} \neq 0$ ,则公式(4)所描述的表现对比度  $C$  具有最小值 ( $E_t = E_b + E_{bp} - E_{tp}$ )。当气动光学效应较小时, $E_{tp}, E_{bp} \rightarrow 0$ ,则 $E_t \doteq E_b$ ,  $C_{\min} \doteq 0$ ;当气动光学效应较大时(高速、高温流场与窗口热辐射作用较强), $E_{tp} \gg E_t$ 且 $E_{bp} \gg E_b$ ,则 $E_{tp} \doteq E_{bp}$ ,故 $C_{\min} = |E_{bp} - E_{tp}| / E_{bp} \doteq 0$ ,表明在目标与背景辐射能量趋于相同时,或在高速飞行过程中气动光学效应严重时,其表现对比度趋近于0,即目标与背景很难分辨。

对于成像视场内目标以深空环境为背景时,假设在阳照区探测作业视场规避日光直射,即 $E_b \rightarrow 0$ ,公式(4)近似为:

$$C = \frac{|E_t - (E_{bp} - E_{tp})|}{E_{bp}} \quad (6)$$

当气动光学效应较小时 ( $E_{tp}, E_{bp} \rightarrow 0$ ),  $C \doteq E_t / E_{bp}$ ,故目标在深空背景下表现对比度较高。当气动光学效应较大时,  $C \doteq |E_{bp} - E_{tp}| / E_{bp}$ ,由于高温流场与窗口热辐射作用较强,不能采用目标与背景能量表征表现对比度,故目标辐射能量已完全淹没于窗口外侧气动热辐射,无法实施成像探测。

对于成像视场内目标以近地环境为背景时,即 $E_b > 0$ ,当气动光学效应较小时 ( $E_{tp}, E_{bp} \rightarrow 0$ ),  $C \doteq |E_t - E_b| / E_b$ ,则目标表现对比度直接取决于目标与背景的辐射照度相对关系。当气动光学效应较大时,  $C \doteq |E_{bp} + E_{tp}| / E_{bp}$ ,其作用效果同前所述,故无法实施成像探测。

## 3 高速流场试验设计与仿真

根据工程经验,上述模型分析,能够较为真实地反映气动光学效应对于高速飞行器目标探测过程的影响。对于实际特定应用环境,还需要从技术要求出发,梳理成像系统、传输系统、目标背景系统等多个环节的实际因素<sup>[6-8]</sup>。为了验证高速流场气动效应对成像探测的实际影响,分析讨论各系统参量作用效果,以工程问题为背景,设计地面验证试验平台。

地面验证试验平台以风洞试验舱为核心,在其窗口处布设目标及观测装置,通过加载高速气流,验证光学气动效应中传输路径辐射对目标探测的影响;同时,采用对比实验方法,验证窗口材料在高速流场中的气动加热效果。

高速流场验证试验平台如图2所示。以探测空间远距离目标尾焰为仿真实验对象,采用涵盖短波红外波段 (SWIR: 900~1 700 nm) 光源与焦距 100 mm 平行光管作为准直光源,模拟无穷远处点目标;流场试验舱两侧壁设有观察窗口(截止波段: 300~1 900 nm),同时在一侧观察窗口附近部署可切入式石英窗口测试组件(窗口厚 12 mm);成像组件为宽谱段相机(响应谱段: 400~1 700 nm),配有截止滤光片(900~1 700 nm),光学镜头焦距 10 mm/F1.8。

首先,在无流场、无石英窗口条件下,相机加电并注入固定积分时间  $t_0=350 \mu\text{s}$ (增益 Gain=1),使对侧窗口外的点目标清晰成像。为验证弱目标成像效果,调

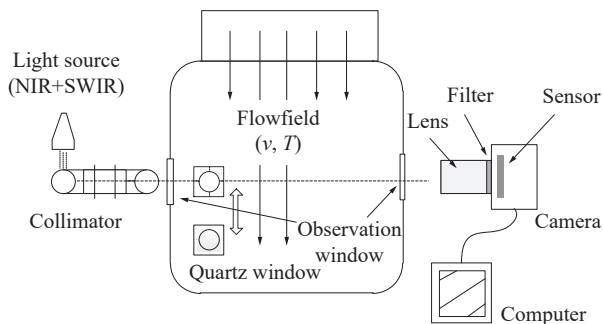


图 2 高速流场试验示意图

Fig.2 Diagram of high-speed flow field test

节光源照度 (初始值 500 lx, 调节范围 [0, 2 000] lx), 相机与光源探测距离约 5 m, 使探测器输出的目标灰度值小于 100(显示输出图像位深 8 bit), 如图 3(a) 所示。

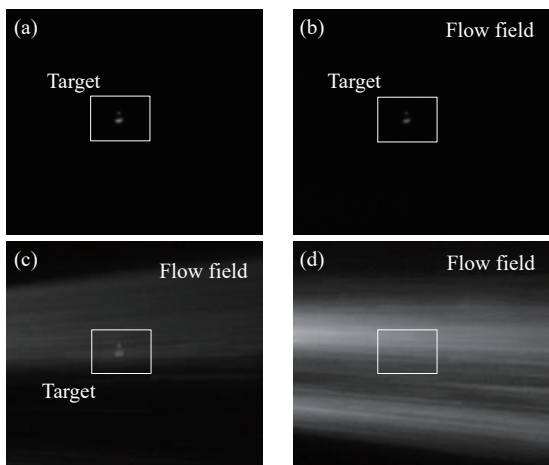


图 3 无窗口下小目标图像

Fig.3 Small target without window

其次, 开启高速流场 (流场温度约为 25 °C, 相对速度 5 Ma。), 待对流特性参数稳定后, 拍摄无石英窗口条件下图像; 同时, 调整相机积分时间, 在不同曝光值拍摄高速流场作用下点目标图像, 如图 3(b)~(d) 所示, 相机曝光时间依次为:  $t_1=280 \mu\text{s}$ ,  $t_2=720 \mu\text{s}$ ,  $t_3=1200 \mu\text{s}$ 。

最后, 在流场稳定状态下, 设定相机曝光时间为 280  $\mu\text{s}$ , 切入石英窗口并拍摄不同时刻点目标图像, 选取窗口组件温升过程典型图像, 如图 4 所示。

由于采用地面风洞模拟实验, 前述气动光学传输效应泛函与气动热辐射效应泛函所述参量中, 主要考虑气动光学效应的动态影响因素, 即流场温度与相对速度。该参数直接表征了大气传输系统对表现对比

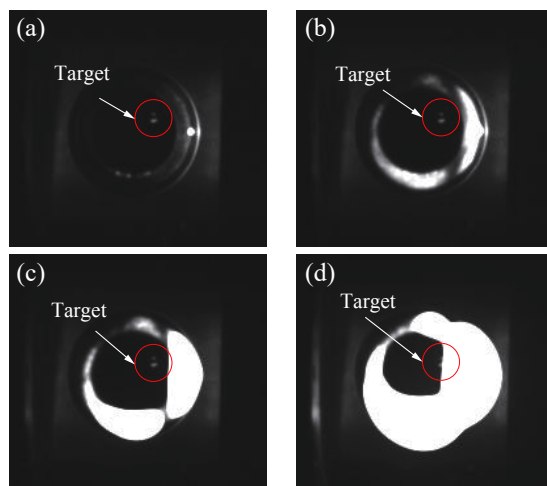


图 4 流场及窗口条件下, 不同时刻目标图像

Fig.4 Small target in flow field with window at different test time

度影响的作用程度。流场温度越高、相对速度越快时, 气动光学效应越剧烈。图 3 中, 当目标辐射能量与传输路径中流场辐射能量相近时, 目标的表现对比度趋近于 0, 因此对目标的观测造成较大影响。试验分析仅对测试系统内各环节变量进行讨论, 对于固定参量 (如相机增益、截止滤光片、镜头 MTF/成像视场/畸变、窗口特性等) 不展开分析, 以此阐述高速飞行器飞行过程中气动光学效应影响及各环节优化策略。

(1) 探测谱段选择: 对于近空间飞行器远距离探测, 常采用制冷型中/长波红外探测器, 能够高灵敏度获取目标本体或尾焰的热辐射特性。在低成本及窗口材料约束条件下, 可见光、近红外、短波红外探测器配合常规石英窗口成为了新的选择方向。参考文献 [9] 表明: 高速飞行器飞行中气动加热后本体温场近千摄氏度, 发动机尾焰温度逾 2000 °C。根据普朗克黑体辐射定律, 除材料表面发射率影响外, 该温度区间的热辐射, 采用短波红外 SWIR 探测器 (光谱响应范围: 900~1 700 nm) 响应更为灵敏。

(2) 曝光时间设定: 通过对图 3 中的目标、流场图像信息进行定量分析, 可以看出, 成像设备探测器积分时间的选择对于抑制流场和窗口辐射影响、背景杂光干扰等尤为重要。根据上述公式 (4) 对比度定义, 计算图中选框内目标平均灰度值 (即  $E_t+E_{tp}$ ) 及除目标外的背景平均灰度值 (即  $E_b+E_{bp}$ ), 其表现对比度如表 1 所示。在无流场时, 目标对比度最大; 当流场开启后, 随着曝光时间  $t$  增大, SWIR 探测器接收到的背景流场辐射能量增强。根据多次对比试验, 由于测试

中选取弱小目标为观测对象,在曝光时间调整增量较小时(曝光时间: $t+\Delta t$ ),目标对比度小幅增大(此时,流场辐射能量仍被抑制,图 3(b)所示);当曝光时间调整增量进一步增大时(曝光时间: $t+N\cdot\Delta t, N>1$ ),探测器所

捕获的流场辐射能量显著提升(如图 3(c)所示),从而导致目标对比度下降;若进一步增大曝光时间,则背景流场辐射完全淹没目标辐射信号(如图 3(d)所示),致使目标探测失败。

表 1 不同曝光时间目标与流场分析

Tab.1 Analyze for target and flow field with different exposure time

Image	a	b	c	d
Exposure time/ $\mu s$	350	280	720	1200
Gain	1	1	1	1
$E_t+E_{tp}$	55.14	47.43	76.14	-
$E_b+E_{bp}$	0.714	0.708	58.43	132.2
Contrast	76.23	65.99	0.303	-

上述试验表明,SWIR 探测器所接收的目标信号实质为目标自身辐射与背景、路径辐射的叠加;由于高速流场的热辐射效应,在曝光时间增大到一定程度时,流场路径辐射能够淹没目标信号。因此,在实际工程应用中,需要对空间环境的大气特性及飞行状态进行匹配仿真,选取最优曝光控制策略。

(3) 窗口辐射影响:参试窗口组件选用普通石英材料(ZS-2)并配合耐高温非金属材料及不锈钢结构件制成,实际工程应用中,通过改变窗口材料与表面特性、主动制冷等方式达到降低窗口热辐射的目标。参试石英窗口如图 5 所示。

(图中灰色饱和区域),探测器接收到的边缘结构件热辐射信号逐渐增大,直至饱和。

由于该试验成像设备与窗口距离较远,使得成像视场内包含较多窗口边缘结构,因此当来流侧结构件热辐射信号不断增大时,对视场内目标观测产生干扰。实际应用中,结合窗口主动制冷,尽量减小成像光学系统与观察窗口间距,能够较大幅度地降低窗口组件带来的热辐射影响。

### 4 结 论

针对近空间高速飞行器高速、高温流场环境下远距离目标探测,分析了以光电成像系统、大气传输系统及目标背景系统为要素的目标探测模型。结合气动光学效应及其影响因素,建立高速流场气动光学效应评价方程,并对深空、近地等典型目标探测场景进行成像质量评价。以工程应用为背景,设计高速流场环境下目标探测地面验证试验,仿真测试结果表明:对于近空间高速飞行目标,采用 900~1700 nm 谱段短波红外探测器配合厚度 10 mm 以上石英窗口,对目标尾焰辐射具有良好观测效果;在气动热效应作用下,成像探测设备通过降低曝光时间、优化曝光控制策略及选用光学带通滤光片等方式,达到对背景杂光与气动热辐射干扰的抑制效果。

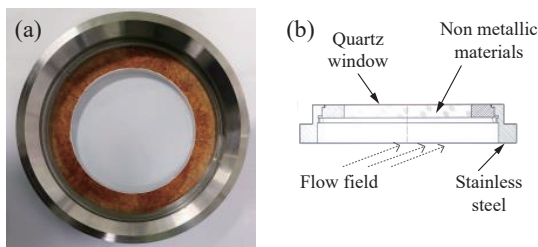


图 5 石英窗口及其结构图

Fig.5 Quartz window and structure diagram

通过图 4 试验可以看出,在高速流场作用下,随时间推移,窗口迎风面热能累积加剧;由于该不锈钢材料比热容(约 0.5 kJ/kg·K)小于石英窗口材料比热容(约 0.8 kJ/kg·K),从窗口温度测点读数得知,窗口边缘不锈钢结构件温度快速上升。因此,当 SWIR 相机以较低曝光值抑制流场热辐射的同时,随着窗口结构件材料温度急剧上升,结构件热辐射信号愈发明显

### 参考文献:

[1] Zhang Liqin, Fei Jindong. Study on aero-optical effect of the imaging detection system of high speed flight vehicle (Invited)

- [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 49(6): 20201016. (in Chinese)
- [2] Zhao Wencai. Some links affecting the working distance of a tracking and measuring television system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1994, 2(5): 28-34. (in Chinese)
- [3] He Ping, Wang Yingying, Fan Lei, et al. Operation range analysis of the infrared detector for hypersonic flight vehicles [J]. *Laser and Infrared*, 2020, 50(6): 682-690. (in Chinese)
- [4] Zhang Hongwen, Cao Guohua, Li Yanwei, et al. Thermal-optical evaluation to optical window of near space aerial remote sensor surrounding hypersonic [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 3958-3962. (in Chinese)
- [5] Wang Hui, Dang Fanyang, Zhang Rongda, et al. Influence of thickness of hemispherical dome on aerodynamic thermal radiation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(12): 1204002. (in Chinese)
- [6] Zhang Hailin, Zhou Lin, Zuo Wenbo, et al. Study on infrared radiation feature of near space hypersonic missile [J]. *Laser and Infrared*, 2015, 45(1): 41-44. (in Chinese)
- [7] Li Yihan, Hu Haiyang, Wang Qiang. Radiative transmission property of infrared window in hypersonic vehicle [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(4): 0404002. (in Chinese)
- [8] Jia Qinglian, Qiao Yanfeng, Deng Wenyuan. Analysis for point-target detection range of panoramic searching system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(4): 937-943. (in Chinese)
- [9] Wang Yifeng, Chen Jie. Infrared radiation signature of hypersonic vehicle and its infrared detection and early warning [J]. *Tactical Missile Technology*, 2011(2): 55-57. (in Chinese)