

# 一种遥感卫星动量轮容错控制的方法研究

柴伟杰<sup>1</sup>, 董诗音<sup>2</sup>, 陈金勇<sup>1</sup>, 张超<sup>1</sup>, 陈韬亦<sup>1</sup>

(1. 中国电子科技集团 第五十四研究所, 石家庄 050000;

2. 哈尔滨工业大学 航天学院, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 针对低轨遥感卫星动量轮故障频发影响姿态稳定的情况, 对以动量轮为执行器的低轨遥感卫星进行容错控制研究, 提出一种结合卡尔曼滤波及模糊 PID 控制率的容错控制方法; 首先建立低轨遥感卫星动量轮故障模型, 应用卡尔曼滤波算法进行噪声滤除, 然后根据卡尔曼滤波的结果, 设计模糊 PID 容错控制器, 并与传统 PID 容错控制器进行仿真对比实验, 在闭环姿态控制系统的容错控制领域验证了该方法的较强自适应性和较强鲁棒性的优点。

**关键词:** 遥感卫星; 动量轮; 模糊 PID; 容错控制

## A Method for Fault Tolerant Control of Momentum Wheel in Remote Sensing Satellite

Weijie Chai<sup>1</sup>, Shiyin Dong<sup>2</sup>, Chen Jinyong<sup>1</sup>, Zhang Chao<sup>1</sup>, Chen Taoyi<sup>1</sup>

(1. China Electronics Science and Technology Group Fifty-fourth Research Institute, Shijiazhuang 050000, China;

2. College of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** In view of the stability of the momentum wheel in the low orbit remote sensing satellite, the fault tolerant control of the low orbit remote sensing satellite with momentum wheel as the actuator is studied. A fault tolerant control method combining Kalman filter and fuzzy PID control rate is proposed. First, the momentum wheel fault model of the low orbit remote sensing satellite is established, and the Kalman filter algorithm is used to filter the noise. Then, the fuzzy PID fault tolerant controller is designed according to the results of Kalman filter. The simulation comparison experiment with the traditional PID fault tolerant controller is carried out, and the method is verified in the closed loop attitude control system fault tolerant control field. Strong adaptability and strong robustness.

**Keywords:** digital watermark; wavelet packet; adaptive; feature of texture

## 0 引言

低轨遥感卫星由于任务需求, 往往需要在失重、高低温和强辐射的恶劣环境中频繁的机动, 暴露出的在轨问题愈发显著。文献 [1] 记录了 1988~2014 年的遥感卫星在轨故障数据, 统计发现低轨遥感卫星由于应用广泛、在轨数量多等原因, 其故障频率远高于高轨遥感卫星, 约为高轨遥感卫星的 6 倍。其中, 控制分系统 37.5% 的故障频率为各分系统中故障最高的。控制分系统的失效将严重影响卫星的在轨运行, 5% 的控制分系统的在轨故障为致命故障, 高于其他分系统的致命故障占比。而动量轮由于使用寿命长、控制精度高等优点, 在控制分系统中是十分重要的组成部分。然而, 对于长时间在轨的卫星来说, 高速旋转的动量轮的寿命和可靠性受到限制, 一旦动量轮发生故障, 卫星将因为姿态不稳定而无法实现对地定向、对日定向等基础设置, 即使其他部件正常, 也会对原有任务造成巨大影响。综上所述, 对于低轨遥感卫星, 动量轮是其卫星控制分系统的重要组成部分, 也是其卫星正常运行的基本保

障。因此, 针对低轨遥感卫星进行动量轮容错控制研究是很有必要的。

到目前为止, 针对卫星动量轮进行容错控制研究的主要困难, 还是其模型高度非线性和系统故障非线性导致的非线性控制问题。针对这两方面问题, 卫星动量轮控制方面的研究中模糊 PID 控制在解决模型非线性问题上表现突出, 文献 [2-3] 设计了自适应调节参数、有出色的鲁棒性的三轴稳定零动量轮模糊 PID 控制器, 调节时间减小明显; 航天器容错控制方面, 相似思想方法的控制理论也有很多, 例如自适应控制方法, 自适应控制的核心在于不需要知道干扰和不确定性的界, 而是由自适应学习策略自动确定时变的控制增益<sup>[4-5]</sup>。文献 [6] 针对航天器执行机构(动量轮)故障的姿态控制问题, 提出基于线性变参数(LPV)系统的鲁棒变增益 PID 容错控制。文献 [7] 针对航天器执行机构发生失效故障且故障信息未知的容错控制问题, 提出了基于自适应滑模控制器的容错控制策略。

本文建立姿态控制系统高精仿真模型, 应用卡尔曼滤波除敏感器模型产生的噪声, 实现对姿态控制系统的精准监测。而后根据对模型的分析 and 调试规律总结, 设计模糊 PID 容错控制器, 并与传统 PID 容错控制的效果进行对比, 经仿真验证可知, 相较之下该模糊 PID 容错控制器的控制精

收稿日期:2018-09-07; 修回日期:2018-10-30。

作者简介:柴伟杰(1984-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事航天对地运控系统、任务规划调度技术方向的研究。方向的研究。



表 1 动量轮常见故障模式

| 故障类别 | 故障现象  | 故障内因                                      |
|------|---|---|
| 卡死   | 输出力矩发生短暂的反向跳跃至很大的值,而后迅速回归为零                     | 转子启动失败、电路烧毁、电机转子或定子抱死、转轴断裂                |
| 空转   | 飞轮的转速几乎不变(在摩擦力的作用下缓慢减小),输出力矩近似于为零,不能响应正常的控制力矩指令 | 电子线路、驱动电机或是电源供应等故障                        |
| 摩擦增大 | 摩擦力矩增大而导致飞轮输出力矩与飞轮期望输出力矩的差异增大,影响控制效果            | 轴承润滑不好、轴承温度增高、轴承保持架不稳定、壳体泄露而内部真空密封失效、飞轮压降 |
| 跳变   | 飞轮速度不断地增加或减少,导致不依赖于控制器指令力矩的反作用力矩                | 总线电压故障或是电机存在间歇的时变故障                       |
| 增益下降 | 飞轮输出力矩相对期望力矩比例减小                                | 驱动电机故障、温度的变化,元器件老化等因素                     |

(2) 空转故障

$$\tau = \begin{cases} \tau_c & 0 < t < t_\rho \\ 0 & t \geq t_\rho \end{cases} \quad (8)$$

(3) 摩擦力矩增大

$$\tau = \begin{cases} \tau_c & 0 < t < t_\rho \\ \tau_c - \tau_{fc} & t \geq t_\rho \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $\tau_{fc}$  为额外的动量轮故障摩擦力矩 (N \* m)。

(4) 跳变故障

$$\tau = \begin{cases} \tau_c & 0 < t < t_\rho \\ \tau_c + \delta(t) & t_\rho < t < t_\rho + \Delta t \\ \tau_c & t > t_\rho + \Delta t \end{cases} \quad (10)$$

(5) 增益下降

$$\tau \begin{cases} \tau_c & 0 < t < t_\rho \\ \rho(t) * \tau_n & t \geq t_\rho \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $\rho(t)$  为故障程度,即动量轮故障增益。

根据上述故障表现和数学模型进行分析:

1) 首先可以很容易看出,卡死故障和空转故障,在故障程度上无疑是最严重的,当这类故障一旦发生,除了重启、切换这些保守而传统的措施,基本没有容错控制的余度。这类故障的相关研究方向应该更多地着眼于故障早期预测,所以本文并不对此进行深入研究。

2) 其次是摩擦力矩增大,由于摩擦分为两部分,即库仑摩擦和粘性摩擦。库仑摩擦主要与表面受力有关,所以当库仑摩擦力矩增大时,往往是结构不稳等不可逆故障所导致,所以讨论的余度不大。而粘性摩擦,则与飞轮的转速、轴承的稳定和润滑效果等因素相关,所以当粘性摩擦力矩增大时,即使是由于润滑油挥发等不可逆故障所引起的,也可以通过调整飞轮转速,从而达到容错的效果。而如果是由于动量轮轴承温度过高、轮盘角速度过大,则是直接与动量轮转速相关,自然可以通过动量轮转速进行容

错控制。所以,可以得出结论,针对摩擦力矩增大的故障,可以进行故障诊断及容错控制设计。但是,由于本文所选取的动量轮模型中,不涉及动量轮轴承温度的信息,所以并不针对动量轮摩擦力矩增大的故障模式进行研究。

3) 而后的是跳变故障,表现形式为冲击型故障,由于这类故障时间短且随机、幅值不定,所以对其的容错控制类似于有一定初值的姿态稳定问题。

4) 最后增益下降的故障模式,其故障表现形式与摩擦力矩增大的表现形式十分类似,其故障原因往往是控制电路老化等引起的控制电压增益改变,导致同等控制电压驱动得到的输出力矩低于预期力矩。所以,可以通过改变控制电压对下降的增益进行补偿。

故而综上所述,本文最终选取增益下降故障作为研究对象,并结合动量轮高精模型的内部机理,得到具体的故障设置模型如下:

$$\tau = \begin{cases} k_t * I_m & 0 < t < t_\rho \\ C * k_t * I_m & t > t_\rho \end{cases} \quad (12)$$

C 为驱动电机故障、由于温度的变化,元器件老化等因素导致的力矩控制系数变化倍率,通常情况下  $C < 1$ 。

### 3 基于 KF 的模糊 PID 动量轮容错控制方法

#### 3.1 卡尔曼滤波实现

目前卡尔曼滤波算法的理论日趋成熟,对于噪声具有鲁棒性,是一种广泛使用的故障诊断方法。目前大部分的卡尔曼滤波算法实现都基于线性模型,然而实际的动量轮是较为复杂的非线性系统,高精仿真模型中自然也包涵非线性项。具体实现时,考虑到时间层面的可行性,将数学模型线性化。具体内容如下:

建立基于单个动量轮仿真模型的状态空间模型如下:

$$\begin{cases} \dot{X} = f(X) + BU \\ Y = X \end{cases} \quad (13)$$

对式 (13) 的非线性动量轮系统模型进行线性化近似,可以得到:

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = FX(t) + BU(t) \\ Y(t) = X(t) \end{cases} \quad (14)$$

矩阵  $F$  写为:

$$F = \begin{bmatrix} -\frac{R_A}{L_A} & -\frac{\psi}{L_A} \\ -\frac{\psi}{J} & -\frac{M_f}{J} \end{bmatrix}$$

式中,  $L_A$  代表电机线圈电感;  $R_A$  代表电机线圈电阻;  $\Psi$  代表电机的磁通量

对式 (14) 进行卡尔曼滤波设计,从而获得状态空间的估计方程。基于卡尔曼滤波五大基本方程的更新方程为:

$$\begin{cases} \hat{X}(n | n-1) = F_d(n) * X(n-1) \\ \hat{X}(n) = \hat{X}(n | n-1) + K(n) * (Y(n) - C * X(n | n-1)) \\ K(n) = P(n) * C * Q_2(n) = \\ P(n | n-1) * C^T * (C * P(n | n-1) * C^T + Q_2(n))^{-1} \\ P(n | n-1) = F_d(n-1)P(n-1)F_d^T(n-1) + B * Q_1(n)B^T \\ P(n) = (I - K(n) * C) * P(n | n-1) \end{cases} \quad (15)$$

更新的初值为：

$$\begin{cases} X(1|0) = E(X(1)) \\ P(1,0) = E[(X(1) - E(X(1))) * (X(1) - E(X(1)))^T] \end{cases} \quad (16)$$

式中,  $\hat{X}(n|n-1)$  代表卡尔曼滤波状态估计;  $K(n)$  代表卡尔曼滤波增益;  $Q_1(n)$  代表状态噪声方差矩阵;  $Q_2(n)$  代表测量噪声方差矩阵;

### 3.2 模糊 PID 控制器设计

模糊 PID 控制器通过模糊化、知识库 (数据库与规则库)、模糊推理和去模糊化这 4 个部分的相互作用, 以控制变量作为输入, 在不需要被控对象精确的数学模型的情况就可以实现对系统较为理想的控制。

#### 3.2.1 输入输出及隶属度函数

根据卫星动量轮模型特性和姿态稳定的控制需求, 选择角速度矢量偏差  $w_e$  和角度矢量  $\sigma_e$  作为控制输入, PID 控制器  $K_p$ 、 $K_d$ 、 $K_i$  的调整量作为输出。根据卫星动量轮相关参数, 经预实验确定输入部分  $w_e$  和  $\sigma_e$  的基本论域分别为  $[-0.04, 0.04]$  和  $[-0.04, 0.04]$ 。模糊论域均选取  $[-1, 1]$ , 并划分为  $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$  7 个等级。比例因子均为  $K=0.04$ 。对应的隶属度函数如图 2 所示。

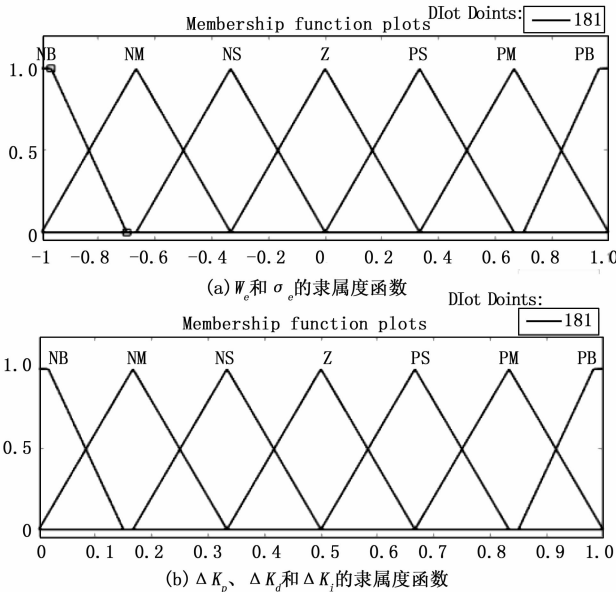


图 2 隶属度函数图

同理再确定输出部分,  $K_p$  的基本论域分别为  $[0, 100]$ ,  $K_d$  的基本论域分别为  $[0, 10]$ ,  $K_i$  的基本论域分别为  $[0, 1]$ , 模糊论域选择  $[0, 1]$ , 模糊子集也选择  $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ 。则比例因子  $K_p=0.01$ ,  $K_d=0.1$ ,  $K_i=1$ 。对应的隶属度函数如图 2 所示。

#### 3.2.2 模糊规则与模糊推理

模糊规则主要是根据工程人员或是专家的经验来总结并按照人的思维方式来进行语言表达的一种规则形式。下表是基于仿真调试总结的  $K_p$ 、 $K_d$ 、 $K_i$  增量的模糊规则。

按照表 1 和表 2 在 Matlab 中的 fuzzy 工具箱逐条输入 “If 条件, Then 结果” 的语句形式的控制规则。选择最为常用并且易于用图形进行解释的 Mamdani 推理法作为模糊逻辑推理方法。

表 2 比例系数  $\Delta K_p$  增量的模糊规则

| $w_e$ | NB | NM | NS | ZO | PS | PM | PB |
|-------|----|----|----|----|----|----|----|
| NB    | PB | PB | PM | PM | PS | PS | ZO |
| NM    | PB | PB | PM | PM | PS | ZO | ZO |
| NS    | PM | PM | PM | PS | ZO | NS | NM |
| ZO    | PM | PS | PS | ZO | NS | NM | NM |
| PS    | PS | PS | ZO | NS | NS | NM | NM |
| PM    | ZO | ZO | NS | NM | NM | NM | NB |
| PB    | ZO | ZO | NS | NM | NM | NB | NB |

表 3 比例系数  $\Delta K_i$  增量的模糊规则

| $w_e$ | NB | NM | NS | ZO | PS | PM | PB |
|-------|----|----|----|----|----|----|----|
| NB    | NB | NB | NB | NM | NM | ZO | ZO |
| NM    | NB | NB | NM | NM | NS | ZO | ZO |
| NS    | NM | NM | NS | NS | ZO | PS | PS |
| ZO    | NM | NS | NS | ZO | PS | PS | PM |
| PS    | NS | NS | ZO | NS | PS | PM | PM |
| PM    | ZO | ZO | PS | NM | PM | PB | PB |
| PB    | ZO | ZO | PS | NM | PB | PB | PB |

表 4 比例系数  $\Delta K_d$  增量的模糊规则

| $w_e$ | NB | NM | NS | ZO | PS | PM | PB |
|-------|----|----|----|----|----|----|----|
| NB    | PS | PS | ZO | ZO | ZO | PB | PB |
| NM    | NS | NS | NS | NS | ZO | PB | PB |
| NS    | NB | NB | NM | NS | ZO | PS | PM |
| ZO    | NB | NM | NM | NS | ZO | PS | PM |
| PS    | NB | NM | NS | NS | ZO | PS | PS |
| PM    | NM | NS | NS | NS | ZO | PS | PS |
| PB    | PS | ZO | ZO | ZO | ZO | PB | PB |

#### 3.2.3 去模糊化

去模糊化的目的是将推理决策得到的模糊量回复为可用于系统进行控制的精确的数值。本文采用加权平均法作

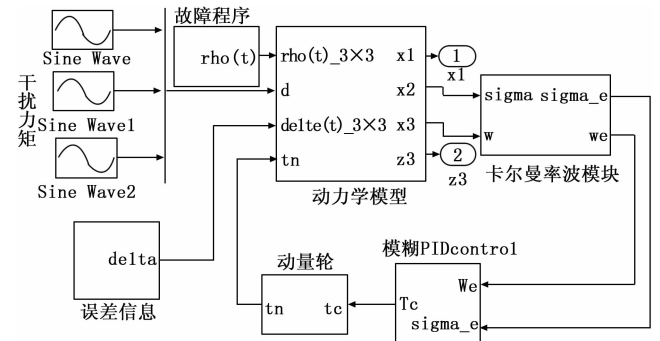


图 3 模糊 PID 容错控制模块示意图

为去模糊化的方法。将  $K_p$ 、 $K_d$ 、 $K_i$  系数原始值分别与模糊推理得到的其对应的增量值相加, 得到最终的  $K_p$ 、 $K_d$ 、 $K_i$  系数。从而实现了模糊控制对常规 PID 控制器系数的调整。综上, 得到模糊 PID 容错控制器。

### 4 仿真结果及分析

针对设计的容错控制器进行仿真实验, 验证其效果, 并设置 PID 控制器作为仿真对照实验。参数设置如表 5 所示。

表 5 仿真参数初值表

|           |       |   |
|-----------|-------|---|
| PID 控制器参数 | $K_p$ | $\text{diag}([1; 1; 1] * 150)$  |
|           | $K_d$ | $\text{diag}([1; 1; 1] * 10)$   |
|           | $K_i$ | $\text{diag}([0.4000; 0.0600; 0.100] * 5)$  |
| 故障参数      | $p$   | $[0.2, 0.3, 0.3]^T$   |
|           | $d$   | $[0.05 * (\sin(0.8t)), 0.05 * (\sin(0.5t + \pi/4)), 0.05 * (\sin(0.3t + \pi/4))]$ |

模糊控制器的增减量, 基于 PID 容错控制器参数, 作为对照。

PID 仿真结果如图 4~11 所示。

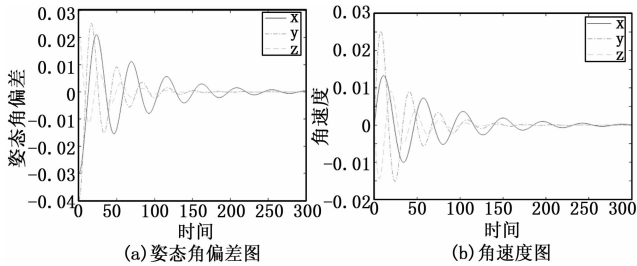


图 4 故障 & 干扰 PID 控制

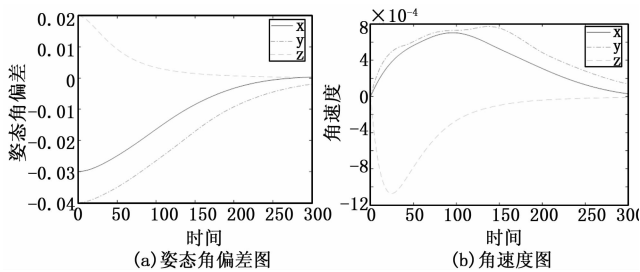


图 5 故障 & 干扰模糊 PID 控制

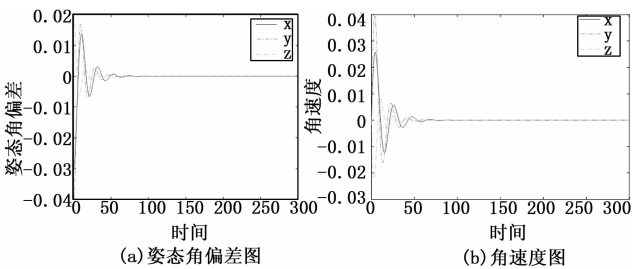


图 6 无故障 & 干扰 PID 控制

根据上述仿真结果分析可得, PID 控制下  $x$  轴姿态角偏差第一次量约为初始偏差的 70%,  $y$  轴姿态角偏差的超

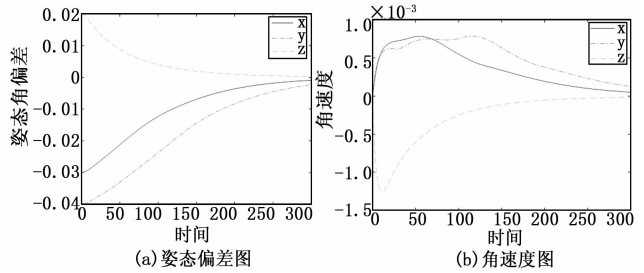


图 7 无故障 & 干扰模糊 PID 控制

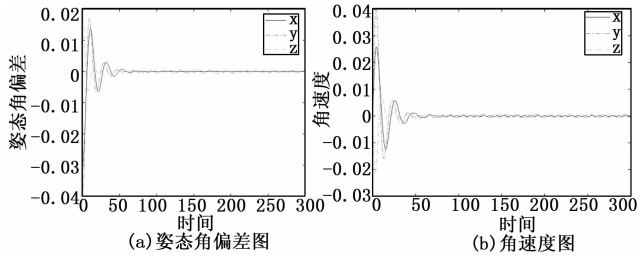


图 8 无故障 & 无干扰 PID 控制

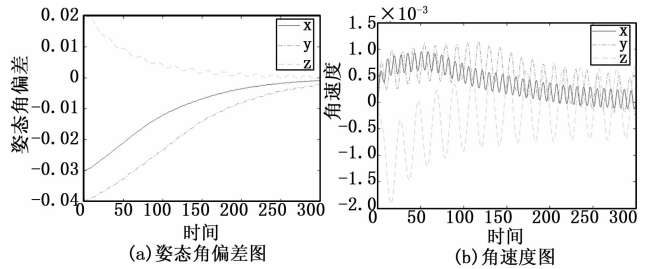


图 9 无故障 & 无干扰模糊 PID 控制

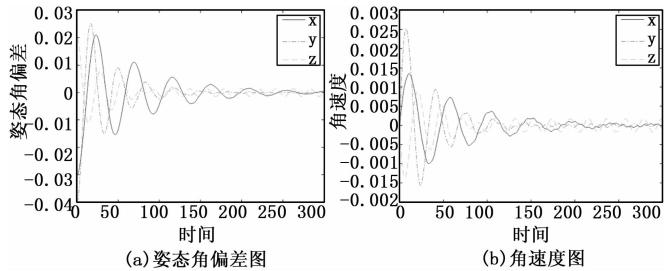


图 10 故障 & 无干扰 PID 控制

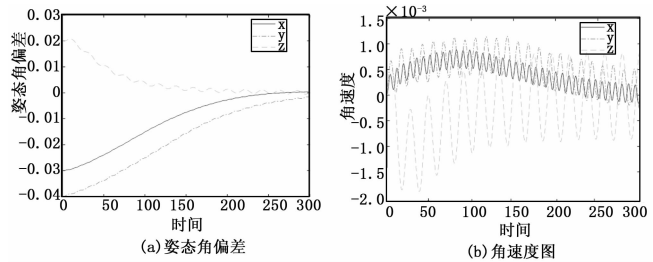


图 11 故障 & 无干扰模糊 PID 控制

调量约为初始偏差的 87.5%,  $z$  轴姿态角偏差的超调量约为初始偏差的 30%, 控制时间约为 250 s, 三个轴姿态角偏差 (下转第 88 页)