

## 长波红外离轴三反光学系统设计

于晓辉<sup>1</sup>, 包睿<sup>2</sup>, 乔鑫<sup>3</sup>, 梁冰<sup>3</sup>

(1. 中国人民解放军海军驻洛阳地区航空军事代表室, 河南 洛阳 471000; 2. 陆航驻洛阳地区军代表机构, 河南 洛阳 471000; 3. 中国人民解放军空军驻北京地区军事代表局, 北京 100009)

**摘要:**介绍了一种基于像差理论的离轴三反光学系统初始结构的求解方法,使用此方法设计了一个适用于空间遥感系统的离轴三反光学系统。该系统的工作波段为7.7~10.3 μm,焦距为1000 mm,系统F数为2,视场角为1°,给出了其具体的优化过程并进行了性能分析。设计结果表明,该系统满足空间遥感光学系统要求的长焦距、大口径、成像良好、结构紧凑等特点,验证了该方法的正确性和可行性。

**关键词:**长波红外; 离轴三反光学系统; 像差理论; 遥感系统

**中图分类号:** V271.4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-637X(2016)10-0096-04

## Design of a Three-Mirror Long-Wave Infrared Off-Axis Optical System

YU Xiao-hui<sup>1</sup>, BAO Rui<sup>2</sup>, QIAO Xin<sup>3</sup>, LIANG Bing<sup>3</sup>

(1. Military Aviation Representative Office of the Navy in Luoyang District, Luoyang 471000, China;  
2. Military Representative Organization of the Army Aviation in Luoyang District, Luoyang 471000, China;  
3. Military Representative Bureau of PLA Air Force in Beijing District, Beijing 100009, China)

**Abstract:** A method for calculating the initial structure of off-axis optical system with three mirrors based on aberration theory is introduced, and a three-mirror off-axis optical system is designed with this method, which is adaptable for space remote sensing system. The system has a wave band of 7.7~10.3 μm, effective mirror length of 1000 mm, F-number of 2, and the full FOV is 1°. The detailed optimization process is presented. It shows that the system has the advantages of long focal length, large diameter, high image quality and compact structure, which can meet the requirements of the space remote sensing system.

**Key words:** long-wave infrared; three-mirror off-axis optical system; aberration theory; remote sensing system

### 0 引言

无论是军用还是民用,空间遥感技术的应用受到诸多国家重视。通常,要求空间遥感系统的光学系统具有高的空间分辨率、大口径、长焦距、体积紧凑、轻量化等特点<sup>[1-3]</sup>。离轴三反光学系统以其自身的诸多优势,如无色差、无中心遮栏、通光口径大、便于轻量化设计、光学系统可折叠结构更紧凑,受到了空间光学遥感系统的青睐<sup>[4]</sup>。

离轴三反光学系统因非对称的复杂结构,尤其对于大口径系统,其主镜的尺寸和离轴量很大,加工难度

非常大,加之离轴与倾斜反射面的装配难度也很大,故必须采用先进的加工、装调、检测等一系列技术作为支撑<sup>[2]</sup>。随着金刚石车削技术、二次曲面元件的无像差检测技术、计算全息图(CGH)补偿技术、计算机辅助装调技术等的发展,离轴三反光学系统的应用范围将越来越广泛。

由于红外光学系统具有全天时工作、被动探测、透雾能力强等优点,在空间对地遥感技术中的作用显得越来越重要。非制冷红外探测器与制冷型探测器相比,具有价格低廉、维护成本低、环境适应性强等优势,随着成像性能的不断提高,在军、民用领域中的使用量越来越大。

目前,在有关离轴三反光学系统的文献中,已有学者提出了离轴三反光学系统初始结构的不同求取方

法<sup>[5-7]</sup>,但针对大面阵长波红外非制冷的离轴三反光学系统的设计分析与讨论的文献却并不多。本文介绍了一种基于像差理论的离轴三反光学系统初始结构的求解方法,并使用该方法设计了一个基于非致冷长波红外探测器的结构紧凑、重量轻、成像质量好、环境适应性强的离轴三反光学系统。

### 1 设计方法

目前,没有直接求解离轴三反系统初始结构的计算方法,一种可行的设计方法是:先求解同轴三镜消像散光学系统的初始结构<sup>[8-9]</sup>,该结构易于获得较好的成像效果;在此基础上,通过光阑离轴、视场倾斜或镜面偏心等手段在光学设计软件中进行优化,在保证像质的前提下,实现离轴无遮拦设计。

基于像差理论的同轴三镜消像散光学系统初始结构的求解方法是一种简单而有效的方法<sup>[4]</sup>。同轴三镜消像散光学系统的变量为三镜的半径  $r_1, r_2$  和  $r_3$ , 三镜间的间隔  $d_1$  和  $d_2$ , 镜面的二次曲面系数  $e_1^2, e_2^2$  和  $e_3^2$ , 共 8 个。通常,镜子的间隔与系统的体积尺寸有关,而表面半径与单个镜子的 F 数有关,为了有利于后续像差的优化, F 数既不能太小也不能太大。因此,镜子间隔和表面半径并不能随意选择,能够有效利用的变量只有 3 个镜子的二次曲面系数,而 3 个变量仅能解 3 个方程。根据以往经验,场曲可以在选择表面半径时兼顾,同轴畸变在离轴优化时会发生较大变化且在长焦时畸变值通常较小,因此选择球差、彗差和像散 3 个方程进行求解。

赛德尔像差理论的单色像差球差、彗差和像散的表达式为

$$\begin{cases} S_1 = \sum hP + \sum h^4 K \\ S_2 = \sum yP - J \sum W + \sum h^3 yK \\ S_3 = \sum \frac{y^2}{h} P - 2J \sum \frac{y}{h} W + J^2 \sum \Phi + \sum h^2 y^2 K \end{cases} \quad (1)$$

假定:物体位于无穷远,即  $l_1 = \infty, u_1 = 0$ ;入瞳位于主镜上,即  $x_1 = 0, y_1 = 0$ 。光学系统光路如图 1 所示。

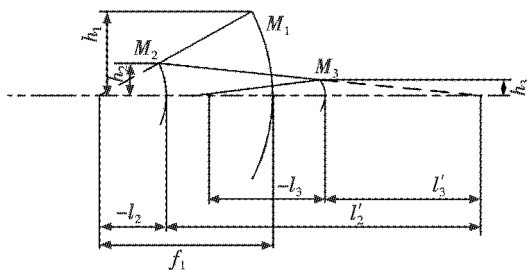


图 1 同轴三反射镜结构图

Fig. 1 Systematic structure of the three-mirror system

其中,次镜对主镜的遮拦比  $\alpha_1$ ,三镜对次镜的遮拦比  $\alpha_2$ ,次镜对主镜的放大率  $\beta_1$ ,三镜对次镜的放大率  $\beta_2$  为

$$\begin{cases} \alpha_1 = l_2/f_1' \approx h_2/h_1 \\ \beta_1 = l_2'/l_2 = u_2/u_1' \\ \alpha_2 = l_3/l_2' \approx h_3/h_2 \\ \beta_2 = l_3'/l_3 = u_3/u_2' \end{cases} \quad (2)$$

利用几何光学成像关系,结构参数  $r, d$  可用遮拦比和放大率表示为

$$\begin{cases} \alpha_1 = 1 - 2d_1/r_1 \\ \beta_1 = -r_2/(r_2 - r_1 + 2d_1) \\ \alpha_2 = 1 - 2d_2(r_1 - 2d_1 - r_2)/[r_2(r_1 - 2d_1)] \\ \beta_2 = r_3/(\beta_1 r_1 - 2\beta_1 d_1 - 2d_2 - r_3) \end{cases} \quad (3)$$

对于反射系统,镜子的折射率为  $n_1 = n_2' = n_3 = 1, n_1' = n_2 = n_3' = -1$ 。归一化处理,令边缘光线入射高度  $h_1 = 1$ ,系统等效焦距  $f' = 1$ ,当光阑位于主镜时

$$\begin{cases} y_1 = 0 \\ y_2 = (\alpha_1 - 1)/\beta_1\beta_2\beta_3 \\ y_3 = [\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)]/\beta_1\beta_2\beta_3 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} K_1 = \frac{e_1^2}{4} \beta_1^3 \beta_2^3 \beta_3^3 \\ K_2 = -\frac{e_2^2(1 + \beta_1)^3 \beta_2^3 \beta_3^3}{4 \alpha_1^3} \\ K_3 = \frac{e_3^2(1 + \beta_2)^3 \beta_3^3}{4 \alpha_1^3 \alpha_2^3} \end{cases} \quad (5)$$

此外可以算得

$$\begin{cases} h_1 = 1 \\ h_2 = \alpha_1 \\ h_3 = \alpha_1 \alpha_2 \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} P_1 = -\beta_1^3 \beta_2^3 \beta_3^3 / 4 \\ P_2 = [\beta_3^3 \beta_2^3 (1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2] / 4 \\ P_3 = -[\beta_3^3 (1 - \beta_2)^2 (1 + \beta_2)] / 4 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} W_1 = \beta_1^2 \beta_2^2 \beta_3^2 / 2 \\ W_2 = [\beta_3^2 \beta_2^2 (1 + \beta_1)(1 - \beta_1)] / 2 \\ W_3 = [\beta_3^2 (1 - \beta_2)(1 + \beta_2)] / 2 \end{cases} \quad (8)$$

将以上各参数代入式(1),令 3 种单色像差为零,可整理成如下线性方程组为

$$\begin{bmatrix} h_1^4 & h_2^4 & h_3^4 & h_4^4 \\ h_1^3 y & h_2^3 y & h_3^3 y & h_4^3 y \\ h_1^2 y^2 & h_2^2 y^2 & h_3^2 y^2 & h_4^2 y^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

通过求解式(9)线性方程组,可得到 3 个镜子的二次曲面系数,此时即可确定一个同轴三反射镜光学系统的初始结构。

## 2 设计实例

### 2.1 光学系统设计参数

下面给出一个设计实例,系统设计参数如表1所示。

表1 光学系统设计参数

Table 1 Design parameters of the optical system

波长/ $\mu\text{m}$	焦距/mm	F数	视场/ $(^\circ)$	像元尺寸/ $\mu\text{m}$	像元数	系统轴向长度/mm
7.7 ~ 10.3	1000	2	1	24	640 × 480	< 400

### 2.2 光学系统初始结构求解及优化

根据以上理论及方法,计算得到同轴三反系统的初始结构,如表2所示。

表2 三反系统的初始参数

Table 2 The initial parameters of the three-mirror system

	半径/mm	间隔/mm	二次曲面系数
主镜	-888.9	-311.1	-1.06
次镜	-200	400	-0.26
三镜	-685.7		0.16

为保证主镜易于加工与检测,将主镜设为抛物面,采用光学设计软件 CodeV 进行初步优化,得到一个成像良好的同轴三反消像散光学系统,如图2所示。

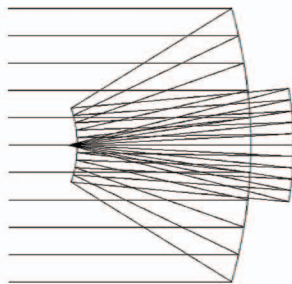


图2 三反消像散系统的结构

Fig. 2 The structure of three-mirror anastigmat system

优化后的结构参数如表3所示,对比表3和表2可知,优化后的光学系统轮廓参数及二次曲面系数变化不大,这表明计算出的初始结构参数可较大程度地缩短设计周期。

表3 三反消像散系统的参数

Table 3 The parameters of the three-mirror anastigmat system

	半径/mm	间隔/mm	二次曲面系数
主镜	-888.9	-311.1	-1
次镜	-200	376.0	-0.25
三镜	-665.1		-0.019

为设计实现无遮拦的高轴三反射镜光学系统,可加入光瞳偏心或者镜面偏心与倾斜进行优化,然而镜面偏心与倾斜的加入会显著增大装配难度。为便于装

配,在本系统中仅通过光瞳偏心的方式实现光线无遮拦,通过加入离轴限制条件,利用光学设计软件 CodeV 进一步优化,得到一个成像质量好、无遮拦的离轴三反射镜光学系统,最终优化的光学系统如图3所示。本系统工作在红外长波段且系统的焦距较长,红外杂散辐射主要来自系统内部,结构设计时需避免将发热器件置于光路视场中。

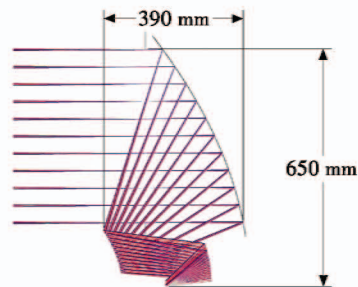


图3 离轴三反光学系统布局

Fig. 3 Off-axis three-mirror optical system layout

最终优化的光学系统面型参数如表4所示。其中,主镜采用凹抛物镜面,次镜为高次非球面,三镜为凹双曲面;主镜和三镜可采用自准直的方法,用激光干涉仪进行面型检测,次镜为高次非球面,需加工补偿镜来进行面型检测。

表4 光学系统的面型参数

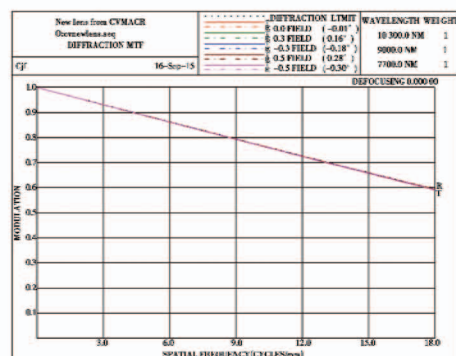
Table 4 The surface type parameters of the optical system

	半径/mm	非球面系数	面型
主镜	-914.36	$K = -1.0$	抛物面
次镜	-211.33	$K = -2.2829, B = -4.7348E-14$	高次非球面
三镜	-351.77	$K = -2.2957$	双曲面

### 2.3 性能分析

探测器像元尺寸为  $24 \mu\text{m}$ ,其特征频率为  $20.8 \text{ lp/mm}$ ,取  $21 \text{ lp/mm}$  进行评价,光学传递函数 MTF 如图4所示。在  $20 \text{ lp/mm}$  处,所有视场 MTF 最小值约为 0.58,成像质量接近衍射极限。

光学系统点列图分布中,最大弥散斑的直径小于  $6.3 \mu\text{m}$ ,小于一个像元的尺寸,也小于爱里斑物理尺寸 ( $43.92 \mu\text{m}$ )。



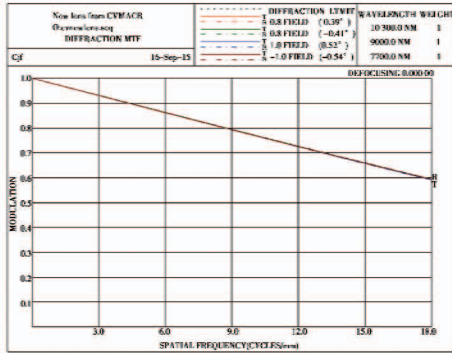


图 4 光学系统 MTF 图

Fig. 4 The MTF curves of optical system

单个像元  $24\ \mu\text{m}$  的能量会聚度如图 5 所示,全视场大于 78.8%,满足实际使用要求。光学系统畸变如图 6 所示,最大畸变量约为 0.19%,满足遥感图像拼接的需求。采用现有加工、装配精度在 codeV 软件里对该系统进行了公差分析,公差分析结果如图 7 所示。

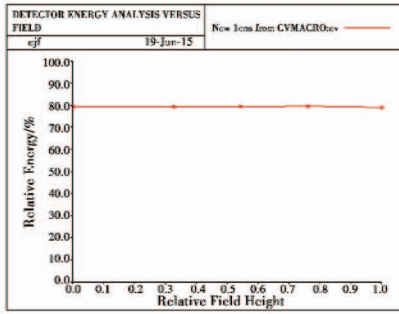


图 5 光学系统探测器能量

Fig. 5 The detector energy of the optical system

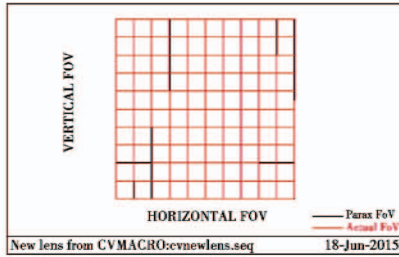


图 6 光学系统畸变图

Fig. 6 The distortion of optical system

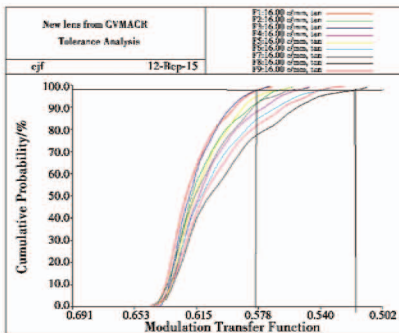


图 7 光学系统公差分析

Fig. 7 The tolerance analysis of optical system

由图 7 可知,系统公差有 97.7% 的概率使系统 MTF 下降小于 0.09,这表明系统公差不敏感,满足现有加工装配条件。

### 3 结论

离轴三反光学系统因具有高的空间分辨率、大口径、长焦距、体积紧凑、轻量化等特点,受到空间光学遥感系统的青睐。本文采用一种基于像差理论的同轴三镜消像散光学系统初始结构的求解方法,设计了一个焦距为 1000 mm、F 数为 2、工作波段为  $7.7 \sim 10.3\ \mu\text{m}$ 、视场角为  $1^\circ$ 、适用于空间遥感系统的离轴三反光学系统,并给出了具体的优化过程。设计结果表明,该系统具有成像质量好、结构紧凑等优点,验证了该方法的正确性。

### 参考文献

- [1] 林晶,崔庆丰,朱浩.宽幅离轴三反光学系统研究[J].光学学报,2013,33(7):1-4. (LIN J, CUI Q F, ZHU H. Research of broad width off-axis three mirror optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7):1-4.)
- [2] 李荣刚,张兴德,孙昌锋,等.离轴反射式光学系统的研究进展与技术探讨[J].激光与红外,2013,43(2):128-130. (LI R G, ZHANG X D, SUN C F, et al. Development and analysis of off-axis reflection optical system[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(2):128-130.)
- [3] DALTERA A G. Wide angle reflective optical systems for infrared applications[C]//SPIE, 1992:817-824.
- [4] 薛栋林,郑立功,张峰.基于光学自由曲面的离轴三反光学系统[J].光学精密工程,2011,19(12):2814-2819. (XUE D L, ZHENG L G, ZHANG F. Off-axis three-mirror system based on freeform mirror[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(12):2814-2819.)
- [5] 庞志海,樊学武,陈钦芳,等.失调三反消像散光学系统像差特性[J].红外与激光工程,2013,42(3):653-656. (PANG Z H, FAN X W, CHEN Q F, et al. Misalignment induced aberration characteristic of TMA optical system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(3):653-656.)
- [6] 张庭成,廖志波,宗肖颖,等.结合矢量像差理论的离轴三反红外光学系统设计[J].红外与激光工程,2012,41(9):2450-2452. (ZHANG T C, LIAO Z B, ZONG X Y, et al. Design of off-axis reflective infrared optical system using vector aberration theory[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(9):2450-2452.)
- [7] NAKANO T, TAMAGAWA Y. Configuration of an off-axis three-mirror system focused on compactness and brightness[J]. Applied Optics, 2005, 44(5):776-779.

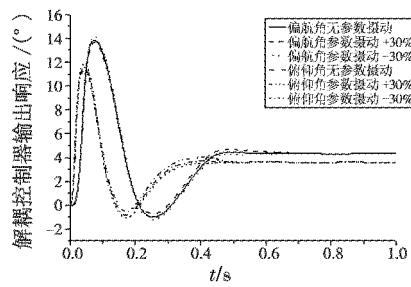


图 4 控制器阶跃响应曲线

Fig. 4 The controller step response curve

#### 4 结束语

本文分析研究了一种针对制导炮弹周期性滚转产生的俯仰和偏航通道之间的交叉耦合效应实现解耦的方法。引入相对增益判定耦合度,采用前馈补偿法进行解耦,设计 PID 控制器,两者相结合设计出系统的解耦控制系统,从而实现俯仰和偏航通道之间的静态解耦控制。通过仿真验证了解耦控制系统能够在强耦合和参数扰动下,实现对指令的精确跟踪,具有强鲁棒特性,满足实际的工程需求。

#### 参考文献

- [1] 郭广明,罗琴.侧向运动耦合对导弹稳定裕度的影响[J].飞行力学,2013,31(3):250-254. (GUO G M, LUO Q. Impact of coupling of lateral movement on missile stability margin[J]. Flight Dynamics, 2013, 31(3):250-254.)
  - [2] 谢浩怡,赵良玉,石忠佼.旋转弹解耦控制方法综述[J].战术导弹技术,2015(1):73-78. (XIE H Y, ZHAO L Y, SHI Z J. Review on decoupling control methods for spinning missiles [J]. Tactical Missile Technology, 2015 (1):73-78.)
  - [3] YAN X Y, YANG S X. Coning motion of spinning missiles induced by the rate loop [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2010, 33(5):1490-1499.
  - [4] 范世鹏.双通道控制滚转导弹的控制技术研究[D].北京:北京理工大学,2015. (FAN S P. Research on control technologies for self-spinning missiles with double-channel actuator[D]. Beijing:Beijing Institute of Technology, 2015.)
  - [5] 杨立峰,闫晓勇.一种旋转导弹解耦控制方法[J].现代防御技术,2011,39(4):19-25. (YANG L F, YAN X Y. One method of decoupling for spinning missiles [J]. Modern Defence Technology, 2011, 39(4):19-25.)
  - [6] 孙瑞胜,薛晓中,沈坚平.小直径炸弹俯仰/偏航通道解耦控制与仿真[J].弹道学报,2010,22(2):35-38. (SUN R S, XUE X Z, SHEN J P. Decoupling control and simulation between pitching and yawing channels for small diameter bomb[J]. Journal of Ballistics, 2010, 22(2):35-38.)
  - [7] LI K, YU Y, ZHAO L. Three loop topologies scheme of spinning missiles with decoupling control [C]//International Conference on Automatic Control and Artificial Intelligence, 2012:2209-2212.
  - [8] 刘召娜.多变量线性控制系统解耦与控制方法的仿真[D].青岛:中国石油大学,2010. (LIU Z N. Decoupling and control methods simulation of multivariable linear system [D]. Qingdao:China University of Petroleum, 2010.)
  - [9] 钱杏芳,林瑞雄,赵亚男.导弹飞行力学[M].北京:北京理工大学出版社,2012. (QIAN X F, LIN R X, ZHAO Y N. Missile flight mechanics [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2012.)
  - [10] 史金光,王中原,孙洪辉,等.制导炮弹滑翔弹道优化设计方法研究[J].南京理工大学学报,2011,35(5):610-613,620. (SHI J G, WANG Z Y, SUN H H, et al. Optimization design method for glide trajectory of guided projectiles [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2011, 35(5):610-613, 620.)
  - [11] 赵凤姣,厉虹. PID 控制器改进方法研究[J].控制工程,2015(3):425-431. (ZHAO F J, LI H. Research on improved methods of PID controller [J]. Control Engineering of China, 2015(3):425-431.)
- 
- (上接第 99 页)
- [8] 潘君骅.光学非球面的设计、制造与检验[M].苏州:苏州大学出版社,2004. (PAN J H. The design, manufacture and test of the aspherical optical surfaces [M]. Suzhou: Suzhou University Press, 2004.)
- 
- (上接第 107 页)
- using analytical redundancy [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1985, 8(6):673-682.
  - [7] GOPISETTY S W M. Failure detection and identification; application to aircraft control [D]. Princeton: Princeton University, 2000.
  - [8] LI X R, WANG L. Fault detection using sequential probability ratio test [C]//IEEE, 1999. doi:10.1109/PESW.1999.747296.
  - [9] XIA G H. Failure detection, isolation and compensation [D]. Los Angeles: University of California, 1982.
  - [10] TUULA R. Nonlinear filtering techniques for failure detection in dynamic systems [D]. Boca Raton: Florida Atlantic University, 1989.