

旋转弹框架式导引头动力学模型及分析

崔大朋^{1,2}, 张建坤^{1,2}, 徐松^{1,2}, 苏建平^{1,2}

(1. 上海航天控制技术研究所, 上海 201109;

2. 中国航天科技集团公司红外探测技术研发中心, 上海 201109)

摘要:分析了旋转弹框架式位标器内、外框和消旋机构的惯性张量及惯量耦合;通过第二类拉格朗日方程,建立了旋转弹导引头的动力学模型,并对导引头动力学的影响因素进行了分析。

关键词:惯性张量;耦合;动力学模型

本文引用格式:崔大朋, 张建坤, 徐松, 等. 旋转弹框架式导引头动力学模型及分析[J]. 四川兵工学报, 2015(6):38-40.

Citation format: CUI Da-peng, ZHANG Jian-kun, XU Song, et al. Dynamic Modeling and Analysis on Gimbal Seeker Mounted on Rotary-Missile[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2015(6):38-40.

中图分类号:TJ761.1

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2015)06-0038-04

Dynamic Modeling and Analysis on Gimbal Seeker Mounted on Rotary-Missile

CUI Da-peng^{1,2}, ZHANG Jian-kun^{1,2}, XU Song^{1,2}, SU Jian-ping^{1,2}

(1. Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109, China;

2. Research & Development Center of Infrared Detection Technology CASC, Shanghai 201109, China)

Abstract: Inertial tensor and inertia coupling between internal-gimbal, external-gimbal and despun mechanism were studied. Dynamic model of seeker mounted on rotary missile was built based on the second lagrange equation, and the influence factors on the dynamics of seeker were analyzed.

Key words: inertial tensor; coupling; dynamic model

导弹在对目标自主搜索、跟踪的飞行过程中,受到发动机的振动、高速气流的冲击以及气动力的扰动,使得弹体在飞行过程中总是处于复杂的振动和摆动状态,同时,对

于旋转弹上的框架式稳定平台,还有消旋平台的消旋运动和各框架的转动,这些复杂的运动之间相互耦合,并最终通过与弹体连接的零部件耦合到导引头的探测跟踪系统,使得导引头的动力学特性更加复杂,系统控制也更加困难,严重影响导引头视线的稳定和对目标的跟踪,也影响了导弹的制导精度^[1-5]。因此,分析旋转框架式位标器系统内的惯量耦合,并建立系统精确的动力学方程,是提高系统控制精度和制导精度的关键。

绕弹轴(x 轴)方向以 $\dot{\alpha}$ 旋转,位标器的消旋机构以相同的速度 $\dot{\alpha}$ 绕负 x 轴方向旋转,以确保位标器框架平台在惯性空间中保持不变,同时位标器内、外框绕各自轴旋转。

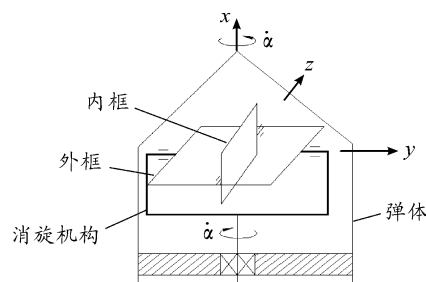


图1 框架位标器示意图

1 坐标系建立

旋转框架式位标器结构如图1所示,弹体在飞行过程中

根据相互运动关系,建立如图2所示坐标系。以框架转动中心 O 为坐标原点,建立不随弹体自旋转的半弹体坐标系

$OX_f Y_f Z_f$ 以及与弹体固连的弹体坐标系 $OX_d Y_d Z_d$, 其中 X 轴正向沿着弹体的轴线指向目标方向, OY_f 轴在弹体垂直面内向上, OZ_f 复合右手原则, 弹体坐标系 $OX_d Y_d Z_d$ 由半弹体坐标系绕着 OX_f 轴顺时针转动(由 X 轴负方向朝正方向看, 后文类似) α 角后得到; 消旋坐标系 $OX_j Y_j Z_j$ 与消旋机构固连, 与弹体有相反的转动关系, 其转动角速度与弹体旋转角速度相等, 从惯性空间中看消旋坐标系是静止不旋的, 并与半弹体坐标系 $OX_f Y_f Z_f$ 重合, 由弹体坐标系绕着 OX_d 轴逆时针转动 α 角后得到; 外框坐标系 $OX_o Y_o Z_o$ 由消旋坐标系绕着 OY_j 轴转动 β 得到, 内框坐标系 $OX_i Y_i Z_i$ 由外框坐标系绕着 OZ_o 轴转动 γ 角后得到。

由上述可得弹体坐标系 $OX_d Y_d Z_d$ 向半弹体坐标系 $OX_f Y_f Z_f$ (或消旋坐标系 $OX_j Y_j Z_j$) 的坐标转换为

$$T_{jd} = T_{fd} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}$$

消旋坐标系 $OX_j Y_j Z_j$ 向外框坐标系 $OX_o Y_o Z_o$ 的坐标转换为

$$T_{oj} = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix}$$

外框坐标系 $OX_o Y_o Z_o$ 向内框坐标系 $OX_i Y_i Z_i$ 的坐标转换为

$$T_{io} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2 惯量耦合

导引头在实际工作过程中, 多种运动耦合在一起, 各运动部件的惯量并不是常数, 而是各轴转角的函数, 彼此之间存在耦合。设内框自身惯性张量为 J_i , 外框自身惯性张量(不含内框)为 J_o , 消旋机构自身(不含内外框)的惯性张量为 J_j , 弹体惯性张量(不含消旋机构和内外框)为 J_d , 并设上述各转动体相对于以框架转动中心 O 为原点的坐标系对称, 其惯性张量都是关于各自坐标系的对角阵, 即: $J_k = \text{diag}(J_{kx}, J_{ky}, J_{kz})$, (其中 $k = i, o, j, d$, 分别代表内框、外框、消旋机构和弹体)。

1) 外框惯性张量

内框惯性张量 J_i 映射到外框上的惯性张量 J_{io} 为

$$J_{io} = (T_{io})^{-1} \cdot J_i \cdot T_{io} = \begin{pmatrix} (J_{ix} \cos^2 \gamma + J_{iy} \sin^2 \gamma) & (J_{ix} - J_{iy}) \sin 2\lambda / 2 & 0 \\ (J_{ix} - J_{iy}) \sin 2\lambda / 2 & J_{ix} \sin^2 \gamma + J_{iy} \cos^2 \gamma & 0 \\ 0 & 0 & J_{iz} \end{pmatrix}$$

外框惯性张量(包括内框转动惯量 J_i 的映射 J_{io}) J_o^* 为

$$J_o^* = J_o + J_{io} = \begin{pmatrix} J_{ox} + J_{ix} \cos^2 \gamma + J_{iy} \sin^2 \gamma & (J_{ix} - J_{iy}) \sin 2\lambda / 2 & 0 \\ (J_{ix} - J_{iy}) \sin 2\lambda / 2 & J_{oy} + J_{ix} \sin^2 \gamma + J_{iy} \cos^2 \gamma & 0 \\ 0 & 0 & J_{oz} + J_{iz} \end{pmatrix}$$

2) 消旋机构惯性张量

外框惯性张量 J_o^* 映射到消旋机构上的惯性张量 J_{oj} 为

$$J_{oj} = (T_{oj})^{-1} \cdot J_o^* \cdot T_{oj}$$

消旋机构惯性张量(包含外框惯量 J_o^* 的映射 J_{oj}) J_j^* 为

$$J_j^* = J_j + J_{oj} = \begin{pmatrix} J_{jx}^* & J_{jxy}^* & J_{jxz}^* \\ J_{jyx}^* & J_{jy}^* & J_{jyz}^* \\ J_{jzx}^* & J_{jzy}^* & J_{jz}^* \end{pmatrix}$$

其中:

$$J_{jx}^* = J_{jx} + \cos^2 \beta (J_{ox} + J_{ix} \cos^2 \gamma + J_{iy} \sin^2 \gamma) + \sin^2 \beta (J_{oz} + J_{iz})$$

$$J_{jy}^* = J_{jy} + J_{oy} + J_{ix} \sin^2 \gamma + J_{iy} \cos^2 \gamma$$

$$J_{jz}^* = J_{jz} + (J_{oz} + J_{iz}) \cos^2 \beta + (J_{ox} + J_{ix} \cos^2 \gamma + J_{iy} \sin^2 \gamma) \sin^2 \beta$$

$$J_{jxz}^* = J_{jzx}^* = (J_{oz} - J_{ox} + J_{iz} - J_{ix} \cos^2 \gamma - J_{iy} \sin^2 \gamma) \sin^2 \beta / 2$$

$$J_{jxy}^* = J_{jyx}^* = (J_{ix} - J_{iy}) \sin 2\gamma \cdot \cos \beta / 2$$

$$J_{jzy}^* = J_{jyz}^* = (J_{iy} - J_{ix}) \sin \beta \cdot \sin 2\gamma / 2$$

3) 弹体惯量耦合

不含消旋机构的弹体惯性张量 J_d 映射到半弹体坐标系 $OX_f Y_f Z_f$ (或消旋坐标系 $OX_j Y_j Z_j$) 的惯性张量 J_{dj} 为

$$J_{dj} = (T_{dj})^{-1} \cdot J_d \cdot T_{dj} = T_{jd} \cdot J_d \cdot (T_{jd})^{-1} = \begin{pmatrix} J_{dx} & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 \alpha \cdot J_{dy} + \sin^2 \alpha \cdot J_{dz} & \sin 2\alpha (J_{dy} - J_{dz}) / 2 \\ 0 & \sin 2\alpha (J_{dy} - J_{dz}) / 2 & \cos^2 \alpha \cdot J_{dz} + \sin^2 \alpha \cdot J_{dy} \end{pmatrix}$$

则弹体总的惯性张量 J_d^* (包含消旋机构惯性张量 J_j^*) 为

$$J_d^* = J_j^* + J_{dj} =$$

$$\begin{pmatrix} J_{dx} + J_{jx}^* & J_{jxy}^* & J_{jxz}^* \\ J_{jyx}^* & \cos^2 \alpha \cdot J_{dy} + \sin^2 \alpha \cdot J_{dz} + J_{jy}^* & \sin 2\alpha (J_{dy} - J_{dz}) / 2 + J_{jyz}^* \\ J_{jzx}^* & \sin 2\alpha (J_{dy} - J_{dz}) / 2 + J_{jzy}^* & \cos^2 \alpha \cdot J_{dz} + \sin^2 \alpha \cdot J_{dy} + J_{jz}^* \end{pmatrix}$$

3 动力学方程

系统的动力学方程根据拉格朗日方程来建立

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_k} + \frac{\partial U}{\partial q_k} = Q_k$$

式中: T 为系统的动能, 是广义速度 \dot{q}_k 的函数; U 为势能, 是广义坐标 q_k 的函数; Q_k 是非有势力的广义力。

设旋转弹的质量为 M , 其飞行速度为 v , 弹体和消旋机构绕 x 轴的旋转速度为 $\dot{\alpha}$, 弹体绕过弹体质心 C 且平行于过框架转动中心的 OY_f 和 OZ_f 轴的扰动速度为 $\dot{\lambda}_y, \dot{\lambda}_z$, 框架绕内、外框轴的转动速度分别为 $\dot{\gamma}, \dot{\beta}$, 框架转动中心 O 到弹体质心 C 的距离为 d 。则内框绕内框轴旋转动能 T_i 为

$$T_i = J_{iz} \cdot \dot{\gamma}^2 / 2$$

外框绕外框轴旋转动能 T_o 为

$$T_o = (J_{oy} + J_{ix} \sin^2 \gamma + J_{iy} \cos^2 \gamma) \cdot \dot{\beta}^2 / 2$$

消旋机构和弹体绕 x 轴方向旋转动能 T_j, T_d 分别为

$$T_j = J_{jx}^* \cdot \dot{\alpha}^2 / 2, T_d = J_{dx} \cdot \dot{\alpha}^2 / 2$$

弹体绕过质心且平行于 OY_f 和 OZ_f 轴扰动的动能 $T_{d_{yz}}$ 为

$$T_{d_{yz}} = (\cos^2 \alpha \cdot J_{dy} + \sin^2 \alpha \cdot J_{dz} + J_{jy}^* - M \cdot d^2) \cdot \dot{\lambda}_y^2 / 2 + (\cos^2 \alpha \cdot J_{dz} + \sin^2 \alpha \cdot J_{dy} + J_{jz}^* - M \cdot d^2) \cdot \dot{\lambda}_z^2 / 2$$

弹体飞行动能为

$$T_{d_v} = M \cdot v^2 / 2$$

弹体总动能 T 为

$$T = T_i + T_o + T_j + T_d + T_{d_{yz}} + T_{d_v}$$

3.1 内框动力学模型

内框拉格朗日方程

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\gamma}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \gamma} = M_{d_i} - \frac{\partial \Delta}{\partial \dot{\gamma}} - M_{z_i}$$

式中: M_{d_i} 为内框电机驱动力矩; M_{z_i} 为内框线缆干扰力矩和内框不平衡力矩; Δ 为瑞利耗散函数。在仅考虑动摩擦情况下^[1-2] (内、外框各 4 个轴承, 消旋方向 2 个轴承)

$$\Delta = 2\mu_i d_i F_i |\dot{\gamma}| + 2\mu_o d_o F_o |\dot{\beta}| + \mu_j d_j F_j |\dot{\alpha}|$$

式中: μ_i, μ_o, μ_j 分别为内框、外框和消旋机构轴承摩擦系数; d_i, d_o, d_j 分别为内框、外框和消旋轴承内径; F_i, F_o, F_j 分别为内框、外框和消旋轴承的载荷。

由内框拉格朗日方程得内框动力学方程:

$$J_{iz} \cdot \ddot{\gamma} - \frac{1}{2} \sin 2\gamma \cdot (J_{ix} - J_{iy}) [\dot{\beta}^2 + \dot{\lambda}_y^2 - \cos^2 \beta \cdot \dot{\alpha}^2 -$$

$$\sin^2 \beta \cdot \dot{\lambda}_z^2] = M_{d_i} - 2\mu_i d_i F_i - k \cdot m_i g \cdot l_i \cos \gamma - k_{is} \cdot \gamma$$

式中: k 为过载系数; m_i 为内框负载; l_i 为内框偏心量; k_{is} 为内框线缆力矩系数。

由内框动力学方程可知, 内框的运动规律除了与作用于内框的驱动力矩、轴承摩擦力不平衡力矩和线缆力矩等各种力矩有关外, 外框运动状态、消旋转动角速度以及弹体扰动速度都会耦合到内框运动上^[6-9], 但是外框及消旋机构的惯量并没有耦合到内框运动上。

3.2 外框动力学模型

外框拉格朗日方程

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\beta}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \beta} = M_{d_o} - \frac{\partial \Delta}{\partial \dot{\beta}} - M_{z_o}$$

式中: M_{d_o} 为外框电机驱动力矩; M_{z_o} 包括外框不平衡力矩 M_{o-g} 和外框线缆柔线力矩 M_{o-f}

$$M_{o-g} = m_o \cdot k \cdot g \cdot l_o \cdot \cos \beta$$

$$M_{o-f} = k_{os} \cdot \beta$$

式中: m_o 为外框负载; l_o 为外框偏心量; k_{os} 为外框线缆力矩系数。

外框动力学方程

$$(J_{oy} + J_{ix} \sin^2 \gamma + J_{iy} \cos^2 \gamma) \cdot \ddot{\beta} + (J_{ix} - J_{iy}) \sin 2\gamma \cdot \dot{\beta} \cdot \dot{\gamma} -$$

$$\frac{\sin 2\beta}{2} [J_{iz} + J_{oz} - J_{ox} - J_{ix} \cos^2 \gamma - J_{iy} \sin^2 \gamma] \cdot \dot{\alpha}^2 -$$

$$\frac{\sin 2\beta}{2} [J_{ox} - J_{oz} - J_{iz} + J_{ix} \cos^2 \gamma + J_{iy} \sin^2 \gamma] \cdot \dot{\lambda}_z^2 =$$

$$M_{d_o} - 2\mu_o \cdot d_o \cdot F_o - m_o \cdot k \cdot g \cdot l_o \cdot \cos \beta - k_{os} \cdot \beta$$

由外框动力学方程可知, 外框的运动规律除了与作用在外框上的各种力矩有关外, 内框惯性张量、内框运动状态、消旋机构角速度以及弹体绕 Z 轴的扰动速度都耦合到外框运动上^[10-13]。

3.3 消旋轴动力学模型

由消旋轴拉格朗日方程

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \alpha} = M_{d_D} + M_{d_x} - \frac{\partial \Delta}{\partial \dot{\alpha}} - M_{f_D}$$

可得消旋轴动力学方程

$$(J_{jx} + J_{dx} + J_{ox} \cos^2 \beta + J_{oz} \sin^2 \beta + J_{ix} \cos^2 \beta \cos^2 \gamma + J_{iy} \sin^2 \gamma \cos^2 \beta + J_{iz} \sin^2 \beta) \cdot \ddot{\alpha} +$$

$$[(J_{oz} + J_{iz} - J_{ox} - \cos^2 \gamma J_{ix} - \sin^2 \gamma J_{iy}) \sin 2\beta \cdot \dot{\beta}] + (J_{iy} - J_{ix}) \sin 2\gamma \cos^2 \beta \cdot \dot{\gamma} \cdot \dot{\alpha} -$$

$$\frac{1}{2} (J_{dz} - J_{dy}) \sin 2\alpha \cdot \dot{\lambda}_y^2 - \frac{1}{2} (J_{dy} - J_{dz}) \sin 2\alpha \cdot \dot{\lambda}_z^2 =$$

$$M_{d-x} + M_{d-D} - u_j d_j F_j - M_{f-D}$$

式中: M_{d-x} 为消旋电机驱动力; M_{d-D} 为弹体发动机驱动力矩; M_{f-D} 为弹体气动力矩。

由消旋轴动力学方程知: 沿 x 轴方向的运动规律除了与作用在消旋机构及弹体上的力矩外, 内外框转动惯量及其运动状态, 以及弹体扰动的状态都耦合到消旋轴的运动上, 影响到消旋轴方向的运动规律。

4 结论

通过对位标器系统各框架的惯量分析以及之间的耦合分析, 推导出惯量耦合方程, 利用拉格朗日方程建立了各轴的 dynamics 模型, 对系统的机械设计和控制设计提供基础, 为框架结构惯性平台的稳定性研究提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 鲍文亮, 黄显林, 卢鸿谦. 多框架光电平台动力学建模及耦合分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2009, 30(8): 893-897.
- [2] 阴蕊, 房建成, 钟麦英. 航空遥感用三轴惯性稳定平台动力学建模与仿真[J]. 中国惯性技术学报, 2011, 19(6): 676-680.
- [3] 董小萌, 张平. 极坐标捷联式视觉导引平台的机电建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(1): 262-265.
- [4] 周瑞青, 吕善伟. 捷联式天线稳定平台动力学建模与仿真分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(9): 953-957.
- [5] 单家元, 王肇敏, 魏华梁. 内旋三轴转台框架系统建模[J]. 计算机仿真, 2002, 19(3): 5-7.
- [6] 张云超, 刘昆. 三框架惯性稳定平台动力学分析[J]. 硅谷, 2011(20): 145-147.
- [7] 王武义, 陈志刚, 赖一楠. 三维转动装置惯量耦合和动力学耦合研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2005, 10(4): 11-15.
- [8] 梅晓榕, 陈明, 张卯瑞. 三轴仿真转台的建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2001, 13(3): 278-279.

参考文献:

- [1] Jaekel Bernd W. Description and classification of electromagnetic environments-revision of IEC 61000-2-5[C]//IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2008:1-4.
- [2] 万克军. 地面防空兵基地化训练复杂电磁环境构建研究[J]. 空军靶场试验与训练, 2009(3):31-35.
- [3] 代合鹏, 苏东林. 电磁环境复杂度定量分析方法研究[J]. 微波学报, 2009(3):25-27.
- [4] 何祥, 许斌, 王国民. 基于模糊数学的电磁环境复杂程度评估[J]. 舰船电子工程, 2009(3):157-159.
- [5] 王志刚, 何俊. 战场电磁环境复杂性定量评估方法研究[J]. 电子信息对抗技术, 2008(2):52-53.
- [6] 张智南, 刘增良, 陶源. 基于有向图的电磁环境复杂度度量算法[J]. 电视技术, 2009(6):1-4.
- [7] 陈利虎, 张尔扬. 一种新的定量评估电磁环境复杂度量

- 方法[J]. 电子对抗, 2009(2):6-9.
- [8] 刘丽明, 黄文亮, 孙璐璐. 海战场复杂电磁环境构建方法[J]. 舰船电子对抗, 2010(4):15-17.
- [9] 谢小林. 复杂电磁环境下海军作战与训练[M]. 南京:海军指挥学院, 2007.
- [10] 李瑞军. 分数阶四翼超混沌系统的控制与同步[J]. 重庆工商大学学报:自然科学版, 2014, 31(12):11-17.
- [11] 王汝群. 战场电磁环境[M]. 北京:解放军出版社, 2006.
- [12] 牛纪海, 张友华. 复杂电磁环境构建需把握的几个问题[J]. 信息对抗学术, 2007(5):39-41.
- [13] 刘义, 赵晶, 刘佳楠, 等. 基于作战效能的战场电磁环境分级描述方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011(5):1059-1062.
- [14] 刘伟涛, 顾鸿, 李春洪. 基于德尔菲法的专家评估法在海战效能评估中的应用[J]. 海军学术研究, 2011(5):31-33.

(责任编辑 周江川)

(上接第 40 页)

- [9] 黄卫权, 刘文佳. 三轴仿真转台耦合问题的研究[J]. 弹箭与制导学报, 2009, 29(1):99-103.
- [10] 江华, 刘利. 三轴仿真转台系统的动力学建模与耦合分析[J]. 弹箭与制导学报, 2005(S1):7-9.
- [11] 高进, 段哲民. 三轴稳定跟踪平台建模分析[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(11):127-129.

- [12] 曾庆双, 王茂, 刘升才. 三轴转台框架间动力学耦合及解耦研究[J]. 中国惯性技术学报, 1997, 5(3):44-49.
- [13] 毕永利. 多框架光电平台控制系统研究[D]. 长春:长春光学精密机械与物理研究所, 2003.

(责任编辑 周江川)

(上接第 47 页)

参考文献:

- [1] 时党勇, 李裕春, 张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA8.1 进行显式动力分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2005:130-150.
- [2] 张波, 盛和太. ANSYS 有限元数值分析原理与工程应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2005:365-369.
- [3] 何涛, 杨竞, 金鑫. 非线性有限元分析实例指导教程

- [M]. 机械工业出版社, 2007:308-323.
- [4] 苏文周. EFP 侵彻钢靶板过程的光滑粒子法数值模拟研究[J]. 四川兵工学报, 2013(34):20-25.
- [5] 赵海鸥. LS-DYNA 动力学分析指南[M]. 北京:兵器工业出版社, 2003.
- [6] 王丰, 姜大立, 甘明. 信息化战争军事物流[M]. 北京:中国物资出版社, 2009.

(责任编辑 周江川)