

DOI: 10.15892/j.cnki.djzdx.2016.02.006

目标强机动对中远程空空导弹可攻击区的影响^{*}

张安柯^{1,2}, 孔繁峨², 贺建良²

(1 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471000;

2 洛阳光电设备研究所, 河南 洛阳 471000)

摘 要: 针对目标机动对导弹效能的影响, 首先介绍了典型的目标强机动类型并对其进行数学建模, 并基于某型中远程空空导弹数学模型(气动模型、运动模型、导引率模型等), 利用改进的二分法仿真计算了目标强机动下的导弹攻击区变化趋势; 分析了不同发射条件下目标强机动对导弹命中概率的影响。仿真表明: 目标强机动能够有效缩小导弹迎头攻击距离, 并且能够规避在导弹最大可攻击区和不可逃逸区之间发射的导弹。

关键词: 目标强机动; 导弹可攻击区; 命中概率

中图分类号: TJ765.4 **文献标志码:** A

Effect of Strong Maneuver Target on Attacking Area of Long-range Air-to-air Missile

ZHANG Anke^{1,2}, KONG Fan'e², HE Jianliang²

(1 Science and Technology on Electro-Optical Control Laboratory, Henan Luoyang 471000, China;

2 Luoyang Institute of Electro-optical Equipment, Henan Luoyang 471000, China)

Abstract: In order to study effect of target maneuver on missile effectiveness, strong maneuver type and mathematic model of target were presented firstly. The missile attacking area in environment of strong maneuver target was calculated by the improved dichotomy based on the mathematic model of an air-to-air missile, and the effect of strong maneuver on hit probability of missile under different launch conditions was analyzed. The simulation results indicate the strong maneuver of target can markedly reduce missile head-on attack distance, and the strong maneuver target can avoid missile attack being launched between maximum attack area and non-escaped zone.

Keywords: strong maneuver target; missile attacking area; hit probability

0 引言

空空导弹从1958年首次投入实战,在越南战争中大量使用,至今已经在海湾战争等近20次局部战争中发挥了重要作用^[1]。20世纪70年代后期,具有高机动过载能力、发射后不管、“三全能力”、大射程的第四代空空导弹问世,其最大过载加速度提高到30~40g,响应速度减小到0.15s,可以对目标实施全向攻击。在马岛和海湾战争中,其击毁概率据称达到60%,而其靶场击毁概率甚至达到90%。这说明:对付现代的空空导弹,只靠飞机的机动性是远远不行的。但飞机通过机动动作来规避空空导弹的可能性是否已经不存在了呢?这个问题的关键在于目标强机动下导弹可攻击区的变化趋势。

目前,对导弹攻击区的研究取得了一定成果,但对强机动下攻击区变化趋势和不同发射条件和目标机动情况下导弹命中概率的分析较少。文献[2]提出了基于四种目标机动的不可逃逸区计算方法;文献

[3]通过建立飞机敏捷性矢量估算模型分析了目标和载机敏捷性矢量对攻击区的影响;文献[4]分析了不同发射条件下对导弹命中概率的影响。文中在文献[2-4]的基础上,引入几种典型的飞机机动类型并进行建模,重点分析目标强机动对导弹攻击区的影响,具体内容如下。

1 导弹可攻击区问题描述

空空导弹可攻击区是指作战过程中空空导弹发射时刻能够命中目标的空间区域。当以目标为中心描述时,由相对于目标的远边界(最大发射距离)、近边界(最小发射距离)所构成的封闭区域。图1是典型的以目标为中心的三线攻击区。

1.1 空空导弹攻击区模型

空空导弹攻击区模型^[5]为:

$$R_{\max} = R_{\max}(h, h_T, V, V_T, n_{\max}, n_T, q_T, q, N_1, N_2, \dots)$$

* 收稿日期: 2015-06-13

作者简介: 张安柯(1992-),男,河南周口人,硕士研究生,研究方向: 航空火力控制。

$$R_{\min} = R_{\min}(h, h_T, V, V_T, n_{\max}, n_T, q_T, q, N_1, N_2, \dots) \quad (1)$$

式中: R_{\max} 、 R_{\min} 分别表示空空导弹发射时刻导弹的最大可攻击区、最小可攻击区; n_{\max} 、 V 、 h 、 q 分别表示导弹的最大过载、发射时刻载机的速度、高度、飞行偏角; n_T 、 V_T 、 h_T 、 q_T 表示目标的机动过载, 目标在导弹发射时刻的速度、高度和进入角; N_1 、 N_2 、 \dots 为其他约束条件, 如目标 RCS, 各子系统的随机误差和干扰。

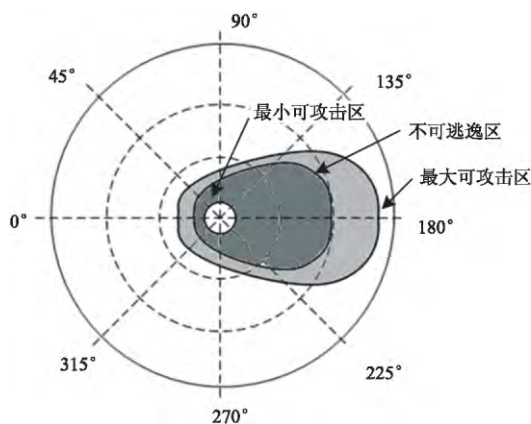


图1 空空导弹可攻击区

从上式可以看出, 影响攻击区的主要因素有载机高度、载机速度、目标高度、目标速度、导弹发射偏角及目标进入角, 此外还要受到导弹性能、平台性能、目标隐身性能以及战场其他因素的影响。

1.2 空空导弹攻击区约束条件

导弹攻击区计算约束条件主要有以下几种[6]:

- 1) 高度限制。空空导弹飞行高度在 0 ~ 28 km 之间。
- 2) 速度限制。发动机停车后空空导弹最小飞行速度 350 m/s, 否则导弹失控。
- 3) 截获概率限制。导引头截获概率不低于 0.95。
- 4) 导弹飞行时间限制。飞行时间不得大于弹上能源工作时间。
- 5) 引信遇靶速度限制和解锁时间限制等。

2 目标数学模型

2.1 目标运动模型

目标运动微分方程^[7]为:

$$\begin{cases} \dot{V}_T = A_{Tx} & \dot{\theta}_T = \frac{A_{Ty}}{V_T} & \dot{\psi}_T = -\frac{A_{Tz}}{V_T \cos \theta_T} \\ \dot{x}_T = V_T \cos \theta_T \cos \psi_T \\ \dot{y}_T = V_T \sin \theta_T \\ \dot{z}_T = -V_T \cos \theta_T \sin \psi_T \end{cases} \quad (2)$$

其中: A_T 表示目标在弹道坐标系下的机动加速度;

V_T 、 θ_T 、 ψ_T 分别为目标在弹道坐标系的速度、弹道倾角、弹道偏角; x_T 、 y_T 、 z_T 为目标在弹道系的坐标。通过建立目标加速度 (A_{Tx} 、 A_{Ty} 、 A_{Tz}) 随时间变化的函数, 即可产生特定类型的目标机动轨迹。

2.2 目标机动类型

在空中, 飞机的作战过程可以看作是由一系列基本的机动动作构成。这些基本机动动作主要包括: 平飞机动、盘旋机动、急转机动、俯冲机动、跃升机动、桶滚机动、筋斗翻转机动、上升转弯机动、高摇摇 (YO-YO)、低摇摇 (YO-YO)、蛇形机动等。文中选取其中典型的 5 种机动类型, 分别是:

- 1) 平飞机动: 飞机保持当前飞行速度和方向。
- 2) 桶滚机动: 飞机绕纵轴滚转, 同时以一定的半径绕一虚拟纵轴做滚转的机动。
- 3) 水平 S 机动: 飞机弹道偏角周期性连续变化, 变化幅值在一定范围内。
- 4) 水平急转弯: 飞机向与视线方向成 90° (或 270°) 的方向进行急转弯, 转弯完成后进入平飞。
- 5) 垂直 S 机动: 与水平 S 机动类似, 发生在铅垂面内。

- 6) 俯冲机动: 飞机以一定俯冲角向下俯冲, 飞机高度低于某特定值时拉平进入平飞。

在本仿真中, 目标最大机动过载设为 6 ~ 9 g, 文中仅考虑目标强机动对导弹攻击区的影响, 不考虑飞行员的生理承受极限。通过建立上述 6 种机动的数学模型, 即可得到典型的目标运动弹道轨迹。导弹运动模型、目标运动模型、发动机推力模型、大气数据模型等详见文献[8-9], 此处不再赘述。

3 基于目标强机动的攻击区计算模型

3.1 导弹攻击区计算

基于目标强机动的空空导弹攻击区计算方法如下: 基于三自由度的目标和导弹运动模型, 设定目标机动类型和机动开始时间, 给定弹目初始距离, 然后采用四阶龙格库塔法对目标和导弹弹道进行积分, 根据约束条件判断导弹能否击中目标。如果不能击中目标, 调整弹目距离初值, 直到能够击中为止。针对递推法速度慢、二分法容易受到仿真建模误差影响的缺点, 仿真核心部分采用二分法和递推相结合。

为了便于比较强机动下导弹攻击区的变化趋势, 仿真中同时计算最大可攻击区及不可逃逸区并与目标强机动下的攻击区进行比较。

3.2 仿真流程

仿真流程如下: 首先, 确定目标、导弹参数信息,

给定攻击区边界搜索范围 $[R_{\max}, R_{\min}]$, 计算并赋弹目距离初值 $D = (R_{\max} + R_{\min}) / 2$; 然后采用四阶龙格库塔法对导弹和目标弹道进行积分, 根据第1节中所述约束条件判断是否命中目标, 如果命中目标, 则令 $R_{\min} = D$; 如不能命中, 令 $D = D + D_{\min}$ (弹道距离计算步长), 重新进行弹道积分并判断是否命中目标, 如果命中目标, 则令 $R_{\min} = D$; 如仍不能命中, 则令 $R_{\max} = D$; 重新循环计算, 直到 $R_{\max} - R_{\min} < D_{\min}$, 输出当前可攻击距离值 D 。通过设立不同的目标、导弹参数, 就可求出不同条件下的攻击距离值。

4 仿真结果分析

4.1 数值仿真计算条件

数值仿真条件为: 目标速度 250 m/s, 高度 8 000 m, 载机发射速度 300 m/s, 发射高度 8 000 m, 发射偏角 0° , 发射倾角 0° ; 目标机动类型有平飞、桶滚、水平 S 机动、水平急转弯、垂直 S 机动、俯冲, 目标最大过载为 $6g$, 其运动轨迹如图2所示。

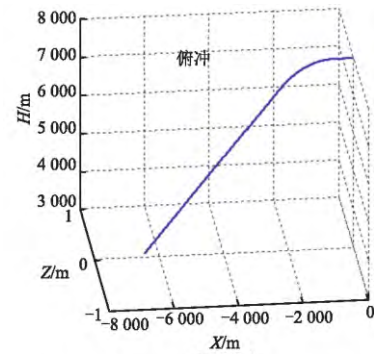
4.2 仿真结果及分析

图3为不同目标机动下的导弹可攻击区与导弹最大可攻击区、不可逃逸区的比较。从中可以看出, 目标机动对攻击区的影响非常显著, 具体如下:

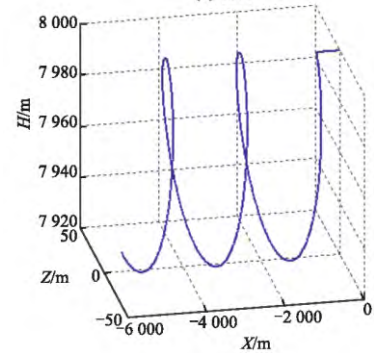
1) 在迎头攻击时, 目标采取上述机动能够显著缩小导弹迎头可攻击距离, 其中, 俯冲的效果最为显著, 因为俯冲能够显著降低高度, 从而增大空气密度, 导致动压和阻力过大, 导致导弹有效射程缩短。但需要注意的是, 不管何种类型机动, 都不能将导弹迎头最大可攻击距离减小到不可逃逸距离, 也就是说在不可逃逸距离内攻击迎头目标, 目标几乎无法规避;

2) 在侧击时, 目标采取垂直面机动的效果要优于水平面机动的效果, 除水平急转弯外, 其它四种机动都能缩小侧击时导弹可攻击距离。因为水平急转机动的定义是与视线方向形成 90° 夹角, 而侧击时速度与视线方向为 90° 左右, 所以目标飞行参数不发生变化, 这导致侧击时水平急转机动并不能够缩小导弹可攻击距离;

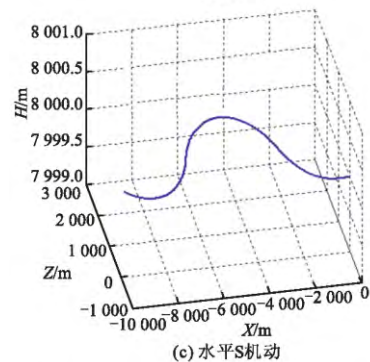
3) 在尾击时, 除水平急转机动外, 其他4种机动能够小范围的缩小最大可攻击距离, 甚至能够规避不可逃逸区发射的导弹。这是因为尾击时目标采取机动能够使导弹随之机动, 而根据能量空战理论, 机动就会造成能量损失。而不可逃逸区是指目标进行置尾机动后直线飞行, 末段进行机动, 因其引起的导弹能量损失较少。所以尾击时目标持续机动能够比纯逃逸机动更有效。



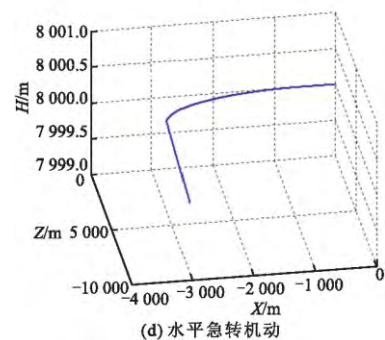
(a) 俯冲



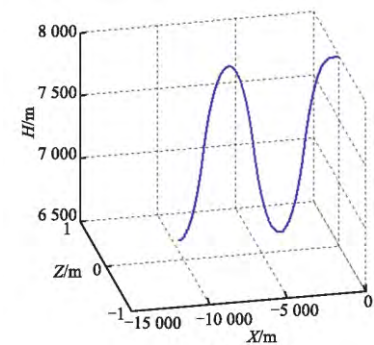
(b) 桶滚



(c) 水平S机动



(d) 水平急转机动



(e) 垂直S机动

图2 目标机动轨迹

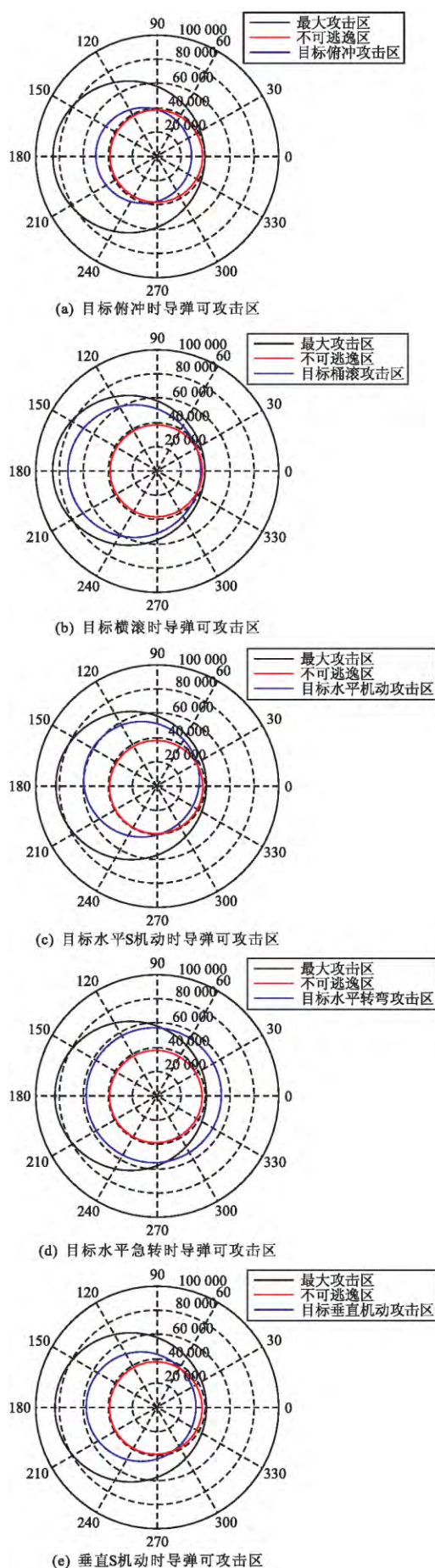


图3 不同机动下的可攻击区

4.3 不同发射条件下的导弹命中概率

由于最大可攻击距离的计算是假设目标做匀速直线运动,而实际空战对抗中目标会采取机动,所以在最大可攻击区内发射的导弹命中目标的概率并不高;在不可逃逸区内发射的导弹命中率极高,但发射条件极为苛刻。如果假设目标采取某种机动(介于纯逃逸机动和平飞之间),并计算导弹对该机动目标的可攻击距离,在该距离内发射导弹,就可以削弱目标强机动对导弹效能的影响,从而既可提高命中概率,又可放宽发射条件。

通过分析目标强机动对导弹攻击区的影响可知,目标机动主要影响目标进入角 $90^\circ \sim 270^\circ$ 时的攻击距离。所以文中假设目标做 90° 逃逸机动,其机动策略为:当目标进入角在 $[90^\circ, 270^\circ]$ 之间时,目标采取水平急转机动;当目标在 $[0^\circ, 90^\circ] \cup [270^\circ, 360^\circ]$ 之间时,目标执行平飞。导弹对该 90° 逃逸机动目标的攻击区如图4所示。

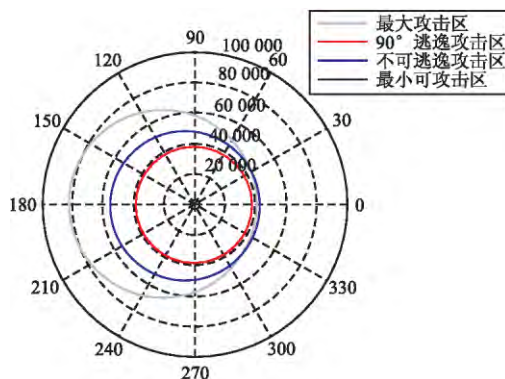


图4 四线攻击区

空战时飞行员需要根据目标距离采取发射决策,所以下面给出3种发射条件的定义:

- 1) 不完全可靠发射条件: 当目标在导弹最大攻击区和不可逃逸区之间时即发射导弹;
- 2) 可靠发射条件: 当目标在不可逃逸区内时即发射导弹;
- 3) 强化不完全可靠发射条件: 当目标在不可逃逸区与 90° 逃逸攻击区之间时即发射导弹。

为了判断在这三种发射条件下目标机动对导弹效能的影响,随机产生20个目标,统计发射次数和成功命中次数。目标状态参数范围如下:

$$D \in (10, 90) \text{ km}$$

$$V_T \in (200, 400) \text{ m/s}$$

$$q_T \in (0^\circ, 360^\circ)$$

$$H_T \in (3000, 13000) \text{ m}$$

其中: D 为弹目初始距离; V_T 为目标速度; q_T 为

目标进入角; H_T 为目标高度。导弹发射时刻目标采取平飞, 随后采取机动, 目标机动类型从上文所述 6 种机动类型中随机选择(0-平飞, 1-桶滚, 2-水平 S 机动, 3-水平急转, 4-垂直 S 机动, 5-俯冲)。载机高度和速度均固定, 分别为 6 000 m 和 300 m/s, 导弹发射离轴角为 0° 。表 1 为 20 个随机目标的状态参数。将目标状态参数赋予弹道计算初值, 通过弹道积分并与约束条件对比便可得到导弹攻击效果。

表 1 目标状态参数

D/km	$q/(^\circ)$	$V/(\text{m/s})$	H/km	机动类型
68	129	293	8.5	4
40	201	242	7	3
89	267	220	7.2	2
48	153	365	4.8	2
63	155	235	5.6	1
31	45	233	3.2	2
47	9	303	1.2	4
31	104	379	9.5	4
73	114	303	12.3	4
59	235	341	4.6	3
51	344	231	12.2	5
52	277	391	11	5
44	165	308	8.8	2
50	87	316	7.4	
78	210	207	5.6	4
19	273	362	10.5	3
43	267	350	5.3	2
41	268	224	9.6	5
52	68	305	10.7	1
28	245	265	9.7	3

仿真结果如表 2 所示, 进一步分析数据可知, 在最大可攻击区和 90° 逃逸攻击区之间发射导弹次数为 6 次, 仅命中目标 1 次, 命中概率 16.7%。

表 2 仿真效果

发射条件	满足发射 条件次数	命中 次数	命中概率 /%
不完全可靠发射	12	4	33
可靠发射	6	6	100
强化不完全可靠发射	6	3	50

从仿真结果中可以得出如下结论:

- 1) 可靠发射命中概率最高, 但发射条件苛刻;
- 2) 不完全可靠发射命中率较低, 但条件宽松;

3) 强化不完全可靠发射命中率和发射条件均介于二者之间; 也就是说, 在考虑了目标强机动对攻击区变化影响的攻击区内发射导弹, 能够提高导弹命中概率(相对于不完全可靠发射), 并放宽发射条件(相对于可靠发射)。

在空战中, 飞行员可以根据空战态势来判断在何种条件下发射导弹。

5 结束语

文中仿真了典型目标强机动下的导弹攻击区变化趋势; 分析了在 3 种发射条件下, 目标强机动对导弹命中成功率的影响。通过分析目标强机动对导弹可攻击区和导弹命中成功率的影响, 得到如下结论:

1) 在迎头攻击时, 目标强机动能够显著减小导弹可攻击距离, 但在侧击和尾击情况下, 目标机动的效果并不明显, 错误的机动甚至能够增加导弹可攻击距离。

2) 在导弹不可逃逸区内发射的导弹命中成功率很高, 目标的机动收效甚微; 但在导弹不可逃逸区和最大可攻击区之间发射的导弹命中概率较低, 目标可以通过俯冲、S 机动、置尾机动等进行规避。

3) 在考虑了目标机动的攻击区内发射导弹, 命中概率得到提高。

第四代中远程空空导弹具有极高的机动性和射程, 在先进机载传感器(相控阵雷达、敌我识别系统等)和数据链的辅助下, 必将促使超视距作战成为空战主要形式。但超视距作战不会成为空战的终结, 在某些空战态势下, 飞机通过合适的强机动并配合电子干扰, 可规避超视距下中远程空空导弹的攻击。

参考文献:

- [1] 张伟. 机载武器 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2008: 9-11.
- [2] 张安, 刘岗. 空空导弹不可逃逸区仿真研究 [J]. 航空兵器, 2000(2): 8-10.
- [3] 王志刚, 陈士鲁, 胡小君. 飞机敏捷性与空空导弹攻击区综合研究 [J]. 飞行力学, 1998, 16(4): 1-6.
- [4] 杨晓红, 姜玉宪. 远程空空导弹发射问题的研究 [J]. 电光与控制, 2005, 12(1): 12-17.
- [5] 吴胜亮. 众多导弹协同作战制导控制的研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- [6] 刁兴华, 方洋旺, 伍友利, 等. 双机编队空空导弹协同发射区模拟仿真分析 [J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(3): 370-376.
- [7] 王志刚, 张宁, 李伟. 一种空空导弹攻击区的快速解算方法 [J]. 固体火箭技术, 2014, 37(4): 448-452.
- [8] 樊会涛. 空空导弹方案设计原理 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2013: 40-132.
- [9] 周志刚. 机载火力控制系统分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 260-272.