

敏捷性和过失速机动

胡兆丰 赵震炎

(北京航空航天大学, 北京, 100083)

AGILITY AND POST-STALL MANEUVER

Hu Zhao-feng, Zhao Zhen-yan

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, 100083)

摘要 对目前深受重视的敏捷性和过失速机动问题作了扼要介绍。内容包括:问题的提出;敏捷性的定义及其量度;非常规机动的形式;敏捷性与空战效率和飞行品质的关联;以及敏捷性与飞机设计的关联等。

关键词 敏捷性, 过失速机动, 超机动性, 空战效率, 飞行品质

Abstract The problems of agility and post stall maneuver, which have received extensive attention in recent years, are briefly depicted in this paper, including the presentation of these problems, the definition and metrics of agility, the main forms of unconventional (vectored) maneuver, the relationships between agility, combat effectiveness and flying qualities, the relationship between agility and aircraft design, etc.

Key words agility, post stall maneuver, supermaneuverability, combat effectiveness, flying qualities

70年代以前的空战策略强调“速度就是生命”,因此,进入空战的速度多半在较大的 Ma 数范围;缠斗则在角点速度(对应最大瞬时转弯率)附近进行。采用空空弹作战时,一般在视距外(BVR)发射,要求的机动过载在 $4g$ 左右。随着武器及火控系统的发展,出现全方位近距离作战的空空弹,加上新一代飞机的外形及推重比演变(采用低翼载及高推重比),允许空战在低于角点速度甚至在失速范围进行,以期获得某些战术上的收益。这就使空战的飞行速度范围逐渐向低端扩大。空战策略也考虑由视距外作战过渡到视距内(WVR)作战的方式^[1]。根据大量空战模拟试验的数据分析表明,采用全方位武器攻击的战术,促使交火双方的飞机正面接火的机会大大增加。由导弹发射良机频率分布与攻击方位角的关系,已获知前半球进攻的好处胜过以往那种咬住尾巴的攻击方式^[2]。正面攻击造成双方都处于受对方攻击的地位,提高生存率的唯一办法就是抢先采取攻势。一次正面交锋失败就尽快转入另一次交锋。这就要求飞机具有高转弯率和高加、减速能力。鉴于全方位攻击交火时间短,因此,特别注意飞机的瞬时机动能力。从而提出了飞机能否快速改变其机动状态和机动平面的所谓敏捷性问题^[3]。数值计算和有人驾驶的模拟飞行结果都表明在过失速区(即超过最大升力系数的大迎角飞行区)内,只要能始终保持对飞机的三轴有效控制,战术收益会更明显。这样也就提出了利用过失速度(PST)机动的要求。现代及未来的近距空战趋势便使飞行包线向过失速区扩展^[4](图1)。

1992年7月25日收到,1993年4月12日收到修改稿

航空研究院资助课题

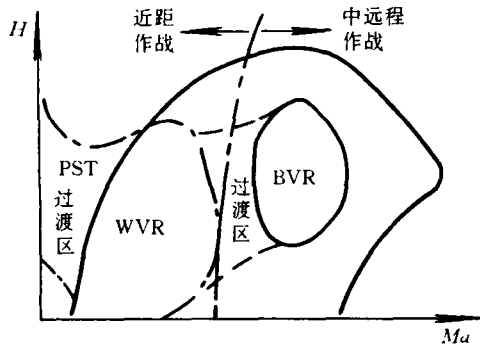


图1 空战飞行包线的扩展

众所周知,过失速机动飞行速度较低,一般情况,气动力操纵面效率下降或甚至失去有效控制能力。这就促使要利用几乎可以不受环境影响的推力矢量(TV)控制(配置有适用于过失速区的进气道设计)来替代部分或全部气动力操纵面的作用。可以预期未来作战飞机多半会利用推力矢量控制作为保证飞机具有相当程度敏捷性的一项技术措施。

当然敏捷性问题并非只限于近距离作战,视距外作战同样要求飞机能很快占据有利发射位置,但对敏捷性的要求没有近距离作战那样突出。另外,视距外作战一次未能命中敌机时,往往很快就过渡到近距离作战。因此,本文只限于介绍与近距离作战有关的问题。

1 敏捷性及其量度

1.1 敏捷性的一般定义及量度^[5]

关于敏捷性的确切定义至今仍存在着争议。多数人的看法是:敏捷性与飞机能否快速完成某类任务有关,或者说敏捷性与飞机从一种飞行状态转移到另一种飞行状态的瞬态特性有关^[6]。Eggold等人则提出一个较为明确的定义^[7],即“敏捷性是飞机迅速和可控地从一种机动状态转移到另一种飞行状态的能力”。目前国外已有四个单位提出各自认为较完整的有关敏捷性的定性及定量涵义(参见表1)

(1) Messerschmitt-Baum-Bovery (MBB)定义敏捷性是机动状态矢量的时间导数。有三个组成部分:①纵向敏捷性 A_l ——沿速度矢方向;②曲率敏捷性 A_k ——位于机动平面内;③扭转敏捷性 A_t ——反映机动平面绕速度矢的转动。

进一步的分析发现 A_l 与纵向过载变化率 \dot{n}_x 相当; A_k 与法向过载变化率 \dot{n}_z 相当;而 A_t 则与绕速度矢的滚转加速度 \dot{P}_{stab} 相当。

(2) Eidetics International (EI)定义敏捷性是飞机点性能和机动性的高阶函数。也分成:①沿飞行路径的加减速;②垂直飞行路径的对称转弯;③绕速度矢滚转以调整飞机指向。

表1 各种敏捷性定义

提出单位	定性	定量
MBB	机动状态的变化率	$A_T: \Gamma$ $A_\omega: T\dot{\omega} + \omega\dot{T}$ $A_\mu: \mu - \gamma \sin\gamma - \chi \cos\gamma$
EI	加速度变化 俯仰率 升力矢量偏转	$\Delta P_s / \Delta t$ 改变 Δg 所需时间 $TR(\text{转弯率}) / t_{\phi=90}$
AFFTC	机动状态的变化	截获(capture)一定俯仰角的时间 截获一定滚转角的时间
GD	机动状态的变化	转弯率-能量消耗率(Bleed rate)(减速度)

*注: μ 是绕速度矢的滚转角, γ 及 χ 是速度矢的俯仰角及方位角。

他们提出所谓动态能量机动性图^[4], 以能量率 $\Delta P_s / \Delta t$ 与扭转敏捷性 $TR / t_{\phi=90}$ 关系表示。此处 ΔP_s 是单位剩余功率的变化, Δt 是发动机自空转到最大加力所需用的时间, TR 是转弯率, $t_{\phi=90}$ 是飞机在该 TR 下滚转并停在 90° 处所花的时间。具有最高的 $\Delta P_s / \Delta t$ 和 $TR / t_{\phi=90}$ 的飞机便是高敏捷飞机。EI 还提出俯仰敏捷性的量度由拉到一定过载(通常为人体能经受的极限值 9g)并随即卸载到 0g 停住所花的时间表征。

(3) Air Force Flight Test Center(AFFTC) 定义两种性质的敏捷性: 功能(Functional)敏捷性; 瞬态(Transient)敏捷性。前者反映在获得飞机最终所需状态所花的时间上, 例如截获希望的过失速俯仰角所花的时间; 后者反映加减速快慢, 例如发动机的瞬态响应(推力增长率及减小率)。他们也将敏捷性分成三个组成部分: ①俯仰敏捷性——截获一定的方位角或俯仰角(ψ 或 θ)所需时间; ②侧向敏捷性——用滚过一定角度所花的时间随空速及过载变化的关系表示; ③轴向敏捷性——以不同的初始飞行速度和过载, 加速到最终要达到的速度所花去的时间来表征。因此, 高敏捷飞机应具有高的稳态过载和过载增长率、带有过载的高滚转率、使用包线内的大剩余推力和快的发动机瞬态响应。

(4) General Dynamics(GD) 定性地定义敏捷性为飞机具有快速瞄准、持续高转弯率机动和卸载、加速快的能力。这种能力是由飞机的机动性和操纵性决定的。据此, 高敏捷飞机应具有高机动能力并有驾驶员能接受的控制及响应特性。GD 的定量要求用转弯率对减速度关系的所谓动态快速转弯图表征。

综上所述, 尽管各家提出的定量要求有所不同, 但基本概念却是相似的。总起来说, 敏捷性包含通常的机动性及操纵性, 但更强调飞行状态的瞬变能力。严格地讲, 敏捷性不光是飞机本体(包括发动机)的特性, 还包括航空电子设备、武器系统甚至驾驶员特性等因素。任何一种因素的不良反应(如延迟), 都将影响飞机的总体敏捷性。以上介绍的敏捷性量度侧重于飞机的本体敏捷性。

敏捷性要求主要由如下一些考虑确定：① 近距离空中，要能先于敌方发起攻击，即具有快速调转机头并先敌开火的能力；② 具有长时间保持高转弯率的能力以完成防御或多次开火；③ 快速直线增速以脱离战区或重新获得追击敌机的飞行速度。

1.2 敏捷性的实用性定义

根据作战性能要求，国外普遍同意敏捷性可以分成下面三个组成部份进行度量：

(1) 纵向 / 轴向敏捷性——沿速度矢方向的加减速率。纵向减速快，容易到达最大瞬时转弯状态；加速快，有利重新获得能量优势。

(2) 俯仰 / 曲率敏捷性——沿升力 / 机动平面，拉到一定过载并回复到 0g 的时间。时间越短敏捷性越好。它与人体及结构能忍受的最大过载及控制的有效性有关。

(3) 滚转 / 扭转敏捷性——表示升力矢量 / 机动平面绕速度矢滚转的能力。敏捷性好表示改变航迹反应快。

根据上述归纳，文献 [5] 提出了一个敏捷性的实用性定义（参见表 2）。这一定义实际上采用了 MBB 的观点。前已指出 V 与 \dot{n}_x 相当； $\dot{\omega}$ 与 \dot{n}_z 相当，因此，对敏捷性的试飞测量可以由过载变化率来定，这在实践中会感到方便。

表 2 敏捷性的实用性定义

轴	状态	机动性	敏捷性
纵向 (轴向)	V	\dot{V}	V
曲率 (俯仰)	γ, χ	ω	$\dot{\omega}$
扭转 (滚转)	μ	P_{stab}	\dot{P}_{stab}

$\omega = \sqrt{\dot{\gamma}^2 + \dot{\chi}^2 \cos^2 \gamma} \quad \dot{\mu} \approx P_{stab}$

值得指出的是后来美国 Kansas 大学的 Liefer 等人进一步认为目前比较通用的一些敏捷性量度，可以按时间尺度来分类^[8]。表 3 是他们建议的分类形式。

表 3 敏捷性量度的两种(时间尺度和运动变量)分类间关系

	瞬变(1~5s)	功能(>5s)	与 t 无关的量度
横向	$t_{\phi=90}$ 扭转敏捷性	滚转反向敏捷性参数	横向敏捷性判据
纵向	扭转敏捷性 T_{maxg} T_{unload} 过载变化率	指向目标角度 差即瞄准裕度	俯仰敏捷性判据 敏捷性潜力
轴向	$\frac{\Delta P_s}{\Delta t} = \frac{P_{sf} - P_n}{t_f - t_s}$	作战周期时间，动态快速转弯，相对能量状态	敏捷性潜力

表中所列的一些量度除扭转敏捷性兼跨横向、纵向和敏捷性潜力 $[(T/W)/(W/S)]$ 指

推重比与翼载之比]兼跨纵向、轴向外,都可构成量度矩阵的一个元素。有些量度在此作一说明:

- (1) $t_{\varphi=90}$ ——开始滚转到停在 90° 倾斜角变化所需的时间;
- (2) 扭转敏捷性—— $TR_{\varphi=90}$;
- (3) $T_{\max g}$, T_{unload} ——拉到最大过载的时间及卸载到零过载的时间;
- (4) 过载变化率—— \dot{n}_z ;
- (5) $\Delta P_s / \Delta t = (P_{s_f} - P_{s_i}) / (t_f - t_i)$ —— P_s 指单位剩余功率;脚注 i 及 f 分别指初始及终了,此量度分两种情况即功率增长及功率损失,前者初始状态为最小功率/最大阻力,终了状态为最大功率/最小阻力;后者正好相反;
- (6) 滚转反向敏捷性参数——完成转弯反向所需时间乘以此过程中的横向位移;
- (7) 横向及俯仰敏捷性判据——操纵面偏转产生的横向及俯仰力矩除以机翼面积、展长或弦长以及相应的惯矩。

2 非常规机动

大量的空战模拟表明,具有推力矢量控制(TVC)的飞机,在飞行速度低于角点速度时,结合非常规机动的应用,可以获得较快的机头瞄准能力。从而占有先敌开火的优势,提高对敌的杀伤率和增强自身的生存率^[9]。

非常规机动大体有过失速机动(PST)、纯侧滑机动(PSM)、快速机头转向瞄准和开火(RaNPAS)及上述机动的各种组合。

(1) 过失速机动

过失速机动是通过推力矢量或纵向操纵面控制,使飞机迎角以高迎角变化率增大到 90° 左右,随即或维持一段时间再回复到正常迎角。这种技术主要用来增强机头瞄准能力;或藉以减速在角点速度附近获得高转弯率;或用作机动以甩脱敌方的攻击等等。

大量较为真实的空战模拟结果表明,目前飞机利用过失速机动是为了取得某些战术上的好处,而并非真正一定在过失速区作战。然而未来的作战飞机很可能也会在过失速区作战。

(2) 纯侧滑机动

纯侧滑机动指不变机头指向,飞机也不滚转只作侧向位移的机动动作。利用推力矢量控制,可以很容易地实现此类机动。

(3) 快速机头转向、瞄准和开火

采用推力矢量控制很容易获得快速机头转向所需的偏航力矩。

(4) 过失速-快速机头转向、瞄准和开火-航迹回转机动(PST-RaNPAS-TB)

图2为本机动的示意图。飞机与敌迎头遭遇,在(A)处初速度相当 Ma_1 ,利用推力矢量控制使飞机作过失速机动,迎角迅速增加到 90° 左右(C),然后采用快速机头转向机动(D),使机头转过 180° (E),机头朝下利用重力加速度加速下滑实现航迹回转,直到增速到起始飞行速度(F)。这类机动也可用于躲避地对空导弹的袭击。图3给出某机利用推力矢量控制实现 PST-RaNPAS-TB 机动时的迎角及飞行速度变化曲线。图中还给出同类飞

机但未装有推力矢量控制，在相同的初始速度 / 能量状态下完成类似的航迹回转机动的迎角、速度变化情况。由图可知装有推力矢量控制的飞机恢复初始速度 / 能量状态比没有推力矢量控制的飞机快 3.6s。

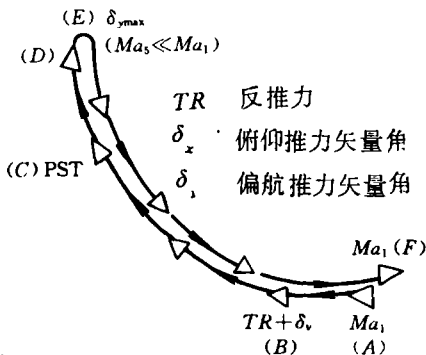


图 2 PST-RaNPAS-TB 机动示意图

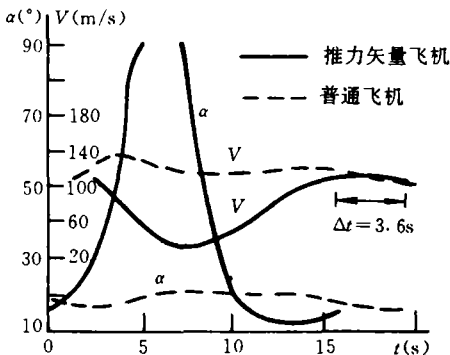


图 3 PST-RaNPAS-TB 机动中的迎角及飞行速度变化

非常规机动在未来作战飞机的战术地位占有明显的优势。某些非常规机动利用主动控制技术便能实现，但有些则不能。不过只要采用推力矢量控制，问题均可迎刃而解。

3 敏捷性与空战效率及飞行品质之间的关联

如前所述，敏捷性包含了机动性和操纵性；空战效率着重机动性效果；飞行品质则侧重于操作品质(Handling quality)。因此，敏捷性与空战效率，敏捷性与飞行品质间必然有相互联系之处。对于飞机设计人员来说，一般根据飞行品质要求确定飞机外形及操纵面设计，以及对飞机的试飞、验收作出评价。如果对敏捷性和空战效率也能找出与之有关的飞行品质要求，无疑会使飞机设计人员感到方便。

文献[10]是这方面尝试的一份报告。

3.1 敏捷性与空战效率的联系

传统的空战效率是用能量机动性来衡量的。绘制两架飞机的单位剩余功率 P_s 对转弯率 TR 的曲线，便可以比较出各自的空战效率。随后出现了角度攻击和能量攻击的区别。前者追求获得位置优势而不计能量耗损；后者追求获得能量优势，在适当时机转换成位置优势。典型的角度攻击是在近乎一定高度上，使飞机尽快接近角点速度以获得小的转弯半径及高转弯率，寻机对敌发起攻击。典型的能量攻击则采用交替左右滚转(Rolling scissors)机动也称剪刀差机动，寻机对敌发起攻击。利用能量机动性图，可以确定出诸如命中率、交换比(Exchange Ratio, ER)等定量值。交换比定义为

$$ER = \frac{\text{红机被击落数}}{\text{兰机被击落数}}$$

图 4 表示空战效率（用总交换比表征）随空战规模及兰机性能增强（提高其敏捷

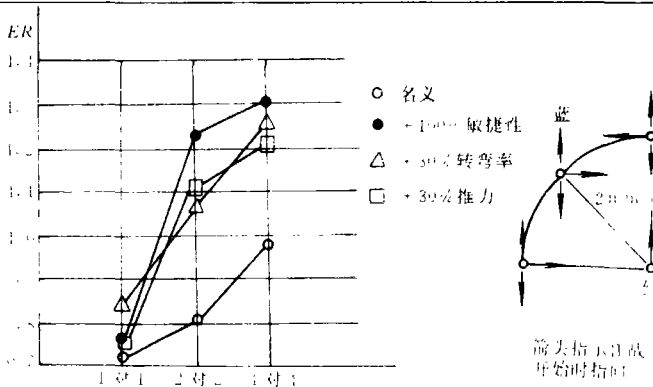


图4 说明空战效率与敏捷性关联的图

性)的变化关系。一共包括9种开始作战的情景(scenarios)。红机为与F-16相当的飞机,蓝机为与F-16相当或性能增强的飞机。作战中蓝机的角色由防御→中立→攻击,总交换比用以衡量蓝机在从防御到攻击不同战术地位中的空战效率。由图4看到的主要结果是,增加100%的瞬态敏捷性(俯仰、滚转、轴向)的收益类似于增加30%的转弯率或增加30%的推力的收益。并且这种收益随着空战规模从1对1到4对4加大而增加。仔细分析还发现,滚转敏捷性所起的作用较其它两个敏捷性更重要。

3.2 敏捷性与飞行品质指标的联系

就轴向敏捷性而言,并无现成对应的飞行品质指标。轴向敏捷性主要体现快速改变推力及阻力的能力,与发动机加速性及减速装置打开的快慢有关。现有的发动机从空转到最大加力的加速时间已降至2.5~3s。反推力装置作动时间和/或减速板张开的时间越短,以及飞机快速低头减小迎角(与俯仰敏捷性有关)的能力越强,则轴向敏捷性越好。

与俯仰敏捷性有关的飞行品质指标是操纵期望参数CAP。分析表明,俯仰角速度首次达到稳态值的时间 Δt 可表成 $\Delta t = \frac{g}{V \cdot CAP}$ 而最大俯仰率和到达一定迎角的时间等,则是CAP及飞机纵向短周期模态阻尼比 ζ 的函数。具体关系需要进一步研究。应当指出的是由于敏捷性问题突出瞬态机动能力,因此,分析研究时需考虑气动力的非正常及非线性性质。

虽然早期对飞机着陆构形提出过滚转—停住的时间指标,这多少有点象扭转敏捷性中的 $t_{\varphi=90}$ 。但由于试飞确定有一定困难,后来的飞行品质指标中就没有这样的要求,而代之以各种飞行情况下的滚转时间要求。不过文献的结果显示利用简单的线性模型以及低阶模态处理,可以获得与复杂模型结果相近的滚转到一定 φ 所花时间随迎角变化的特性。这对今后研究与扭转敏捷性有关的飞行品质指标定量化工作有一定帮助。

文献[11]通过有人驾驶的模拟试验结果表明,如果飞机的机动性差($t_{\varphi=90}$ 大),则适当增加滚转率及减小滚转模态时间常数,便可使 $t_{\varphi=90}$ 减小。如飞机机动性好($t_{\varphi=90}$ 已取中等值)则需大大增加滚转率和减小滚转模态时间常数,以进一步减小 $t_{\varphi=90}$ 。此外,研究还表明飞机滚转动态特性有一个上限,超过这个上限,增加机动性反使敏捷性变坏。说明了敏捷性的改善也存在一定的限制。

4 敏捷性与飞机设计的关联

文献[12]提出另外一些敏捷性指标，它们是：

(1) 瞄准裕度 PM

瞄准裕度定义为敌机机头指向与我机视线(line of sight)间的夹角。

(2) 相对能量状态 V/V_c

V_c 是角点速度，在该速度飞行可以获得最大瞬时转弯率， V 是飞机转过一定角度后的飞行速度。如 $V/V_c < 1$ ，则一次攻击无效时，飞机先得加速到 V_c ；如 $V/V_c > 1$ ，则需进一步减速到 V_c ，才能充分利用飞机的最大瞬态机动能力。

(3) 作战周期时间 CCT

作战周期时间指图 5 中 t_1 、 t_{21} 、 t_{22} 、 t_3 、 t_4 的总和。

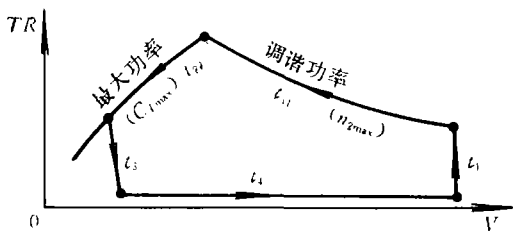


图 5 (CCT) 的组成

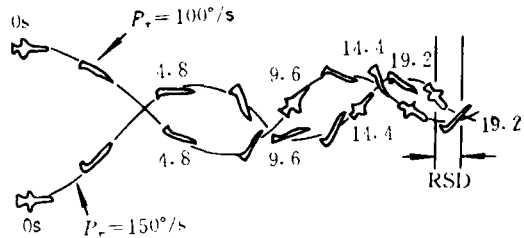


图 6 用 RDS 体现滚转敏捷性的差异

(4) 后部分隔距离 RSD

前已提到空战中绕速度矢的滚转机动即扭转敏捷性(或滚转敏捷性)是三轴向敏捷性中最重要的一个组成部分。Tamrat 提出用 RSD 来体现滚转敏捷性。基本想法是通过绕速度矢的滚转机动使自己能位于敌机后方一定间隔距离(参见图 6)，以取得战术上的有利位置。

飞机设计参数：翼载(W/S)、最大法向过载($n_{z,max}$ 、机翼平面特性、推重比(T/W)等与上述敏捷性指标间的关联^[12]是：

- (1) 飞机机头指向用较短时间便能瞄准敌机是设计未来高敏捷飞机的主要指标之一；
- (2) 必须结合 V/V_c 及最短的 CCT 来考虑机头指向的收益；
- (3) RSD 是衡量滚转敏捷性的良好尺度。利用此一尺度发现增加绕速度矢的滚转率与增加最大迎角对滚转敏捷性所起的作用相似。

文献[12]还就设计具有过失速能力的战斗机问题进行了分析，着重指出利用动升力(Dynamic lift)改善 PST 战斗机的想法完全不可取。

结 束 语

- (1) 根据航空技术发展水平和空战策略的演变，敏捷性已成为第四代作战飞机的主要

标志,而非常规机动能力是决定近距作战胜负的关键因素;

- (2) 敏捷性含义已逐步取得一致认识,但确切定义及量值指标有待进一步研究;
- (3) 敏捷性与空战效率及飞行品质间有一定关联,但内在联系目前认识仍不充分;
- (4) 实现高敏捷飞机看来得依靠推力矢量控制及飞控-火控-飞机-发动机一体化设计。

参 考 文 献

- 1 Skow A M. Agility as a Contribution to Design Balance. AIAA 90-1305.
- 2 Herbst W B. Dynamics of Air Combat. J Aircraft, 20(7);
- 3 GalOr B. Vectored Propulsion, Supermaneuverability and Robot Aircraft. N Y. Heidelberg: Springer Verlag, 1990.
- 4 Skow A M, *et al.* Advanced Flight Agility Metrics. AIAA 85-1779.
- 5 Bitten R. Qualitative and Quantitative Comparison of Government and Industry Agility Metrics. AIAA 89-3389-CP.
- 6 Cord T J. A Standard Evaluation Maneuver Set for Agility and the Extended Flight Envelope——An Extension to HQDT. AIAA 89-3357-CP.
- 7 Eggold D P, *et al.* The Measurement and Improvement of the Lateral Agility of The F-18. AIAA 91-2880-CP.
- 8 Liefer R K, *et al.* Fighter Agility Metrics, Research and Test. J Aircraft, 1992, (5~6);
- 9 赵震炎, 胡兆丰. 推力矢量和二元喷管. 北京航空航天大学学报, 1992, (4);
- 10 Hodgkinson J, *et al.* Relationships between Flying Qualities, Transient Agility and Operational Effectness of Fighter Aircraft. AIAA 88-4329.
- 11 Riley D R, *et al.* An Experimental Investigation of Torsional Agility in Air-to-Air Combat. AIAA 83-3388-CP.
- 12 Tamrat B F. Fighter Aircraft Agility Assessment Concepts and their Implication on Future Agile Fighter Design. AIAA 88-4400.