战斗机过失速机动特征指标的量化评估

张 力 王立新 付 泱

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院，北京 100191) (成都飞机设计研究所，成都 610041)

摘 要：战斗机采用过失速机动动作能够有效地提高空战效能和生存能力.利用四元数法建立了带推力矢量的飞机大迎角全量运动方程,依据过失速机动的主要目的"改变机头指向",结合战斗机的机动性和敏捷性,分析了在过失速机动过程中主要运动参数的变化规律,提出了分析评估飞机过失速机动性能优劣的4个指标,即最大配平迎角、从平飞状态拉起到机动迎角和从机动迎角恢复至初始平飞状态的时间、在机动迎角下绕速度矢量滚转并截获90°倾斜角的时间和过失速空战周期,并针对这4个指标开展了相应的全量仿真和量化评估研究,结果表明提出的指标可对过失速机动动作做出有效评估.

关 键 词：过失速机动；推力矢量；四元数；机头指向

中图分类号：V 212.13

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2008)09-1053-04

Quantitative evaluation on characteristic index of post-stall maneuvers fighter

Zhang Li Wang Lixin

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Fu Yang

(Chengdu Aircraft Design & Research Institute, Chengdu 610041, China)

Abstract: The post-stall maneuver can effectively improve the fighter's ability of air-combat and survival. The dynamic equations of high angle of attack with thrust vector using quaternion method were built. According to the purpose of post-stall maneuver -changing nose pointing, and combining maneuverability and agility, the changing law of primary parameter of post-stall maneuver process was analyzed. Four indexes evaluating the post-stall maneuver quality were proposed, including maximal trim angle of attack, the time taken to change from level flying to maneuver angle of attack and the time taken to change from maneuver angle of attack to initial level flying, the time taken to roll around velocity vector and reach 90° angle of bank at maneuver angle of attack, and the period of post-stall air-combat. The simulation and quantitative evaluation research was carried out, and the results show that these indexes brought forward can lead to convincible evaluation of post-stall maneuver.

Key words: post-stall maneuver; thrust vector; quaternion; nose pointing

制空权的争夺是一场战争能否取胜的关键,近距格斗仍是现代空战的主要模式之一.大量空战模拟结果表明,采用过失速机动动作,飞机可实现机头指向与飞行轨迹的解耦控制,极大地提高了机头指向目标的速度,显著增加了战斗机在格斗中的攻击机会.以往对机动性和敏捷性的研究更多地局限于常规机动性能的研究,而对于大迎角过失速区的研究较少,而且主要的研究工作仍停留在定性分析阶段[1].为建立飞机过失速机动与其空战效能间的量化关系,有必要提出量化评

收稿日期：2007-08-30

作者简介：张 力(1982—),男,山东菏泽人,硕士生,zhangli_34@163.com.

估飞机大迎角过失速机动性能优劣的指标，并对飞机在过失速机动过程运动参数进行量化分析.

本文针对战斗机过失速机动飞行的整个过程，提出了衡量战斗机进入、绕速度矢量滚转和改出性能优劣的4项技术指标，并进行了较全面的仿真和量化评估研究.

1 非线性运动方程的建立

为了使建立的模型能够充分反映飞机进行过失速机动飞行的特性，采用以下简化假设：飞机为刚体；假设地球为平面大地；忽略飞行过程中的燃油消耗；飞机的气动外形和质量分布均匀.

选取具有第三代作战飞机特征的某型飞机[2]为研究对象，并加入了单发推力矢量模型[3]. 该推力矢量模型可以提供俯仰、偏航方向的力矩，从而有效地提高飞机的操纵效能.

当飞机做大机动飞行时，为避免俯仰角 θ 接近90°时方程出现的奇异情况，可采用四元数法来描述飞机绕质心转动的运动学方程[4].

2 特征指标的提出及评估

2.1 最大配平迎角 α_{max}

现代空战表明，飞机大迎角或过失速飞行能够提高战机的空战效能. 在攻击模式中，高盘旋速率、小的转弯半径的机动动作可使战机获得更多的攻击机会；在防御模式中，大迎角能使飞机更快地减速，迫使实施攻击的飞机快速掠过，防御方能够转换为攻击方[5].

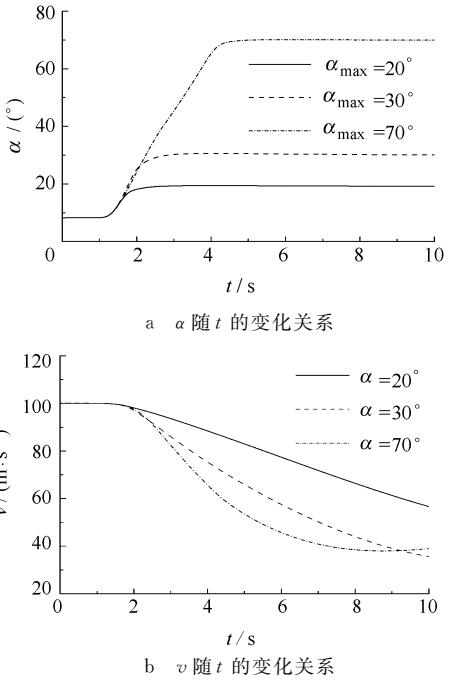
当最大配平迎角 α_{max} 不同时，飞机飞行过程的迎角 α、速度 v 随时间 t 的仿真曲线如图1所示. 可以看出，随着 α_{max} 的增大，飞机的速度快速降低，飞机可以利用速度降低的优势使飞机绕速度矢量滚转，使机头指向目标实施攻击.

图2为随着 α 的变化(配合绕速度矢量的滚转)机头指向所覆盖的截面面积的增大情况.

由表1可见，随着配平迎角的增大，飞机利用过失速机动绕速度矢量滚转可以攻击的角度范围大大增加，空战优势得到有效体现. 因而最大配平迎角可作为评估飞机在过失速区机动飞行能力的首要指标.

表1 α_{max} 不同时空战优势体现

α_{max}/(°)	双方相距水平距离/m	可攻击的横截面面积/m²
20	800	2.6636×10^5
30	(假设飞机可以绕速度	6.70×10^5
70	矢量滚转360°)	1.5177×10^7



a α 随 t 的变化关系

b v 随 t 的变化关系

图1 α_{max} 不同时的仿真曲线

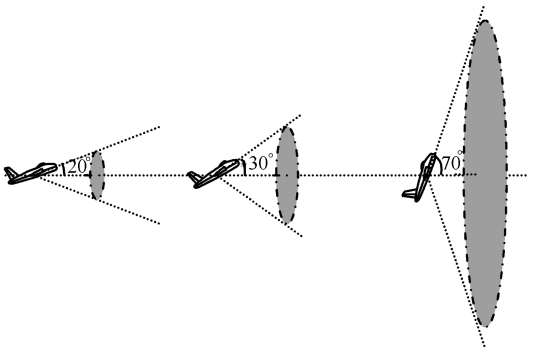


图2 α_{max} 不同时飞机攻击界面示意图

2.2 $t_{max\alpha.+}$ 和 $t_{max\alpha.-}$

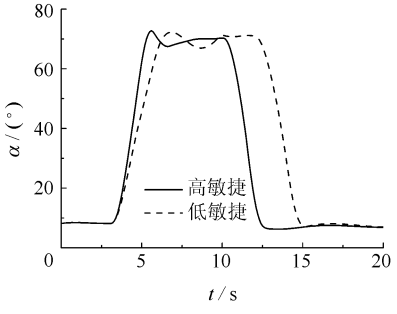
进入过失速机动的目地是获得大迎角以利用良好的减速性实现最快的机头指向，因而将从平飞状态拉起到机动迎角的时间 $t_{max\alpha.+}$ 和从机动迎角恢复初始平飞状态的时间 $t_{max\alpha.-}$ 作为评价飞机进入和改出过失速机动能力的尺度.

过失速机动的主要特征是要使迎角截获并稳定在某一角度，在此定义机动迎角为70°，之后飞机要完成绕速度矢量滚转等机动动作实现机头的转向. 对高、低敏捷性状态的飞机仿真结果见图3. 高、低敏捷性分别表示加入了推力矢量和未加推力矢量的2种状态.

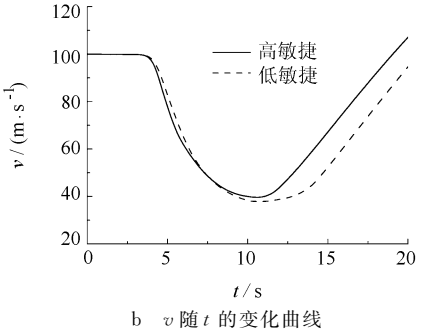
对两种敏捷性等级飞机进入和改出过失速机动指标的列表统计如表2所示. 其中 $\alpha_{max.+}$ 和 $\dot{\alpha}_{max.-}$ 分别表示迎角增加时的最大角速度、迎角减小时的最大角速度.

由表2可见，高敏捷性飞机达到最大迎角的时间短，只有2.5 s，虽然超调量较大，但振荡也较

快能够很快衰减并稳定于 70°;低敏捷性飞机达到最大迎角的时间则相对较长,达到 3.8 s,虽然超调量稍小一些,但需要振荡较长时间才能稳定于 70°.



a　α 随 t 的变化曲线



b　v 随 t 的变化曲线

图 3　高、低敏捷性仿真结果

表 2　高、低敏捷性状态迎角仿真结果对比

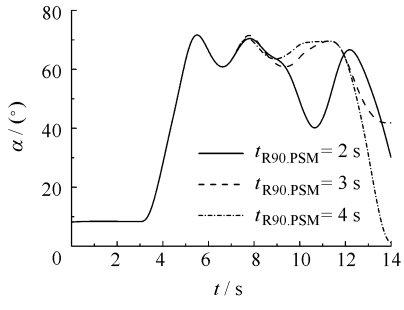
等级	$t_{\max\alpha.+}$/s	$\dot{\alpha}_{\max.+}$/((°)·s^{-1})	$t_{\max\alpha.-}$/s	$\dot{\alpha}_{\max.-}$/((°)·s^{-1})
高敏捷性	2.5	38.6	2.5	−43.7
低敏捷习惯	3.8	25.3	3	−35.8

现代战斗机在空中格斗时,既要具有高的上仰敏捷性又要具有高的下俯敏捷性的特征,而 $t_{\max\alpha.+}$ 和 $t_{\max\alpha.-}$ 这一时间参数比较符合这一特征,可以用来表征战斗机过失速机动的敏捷性性能.因此这个参数可以用来衡量战斗机过失速机动的性能优劣.

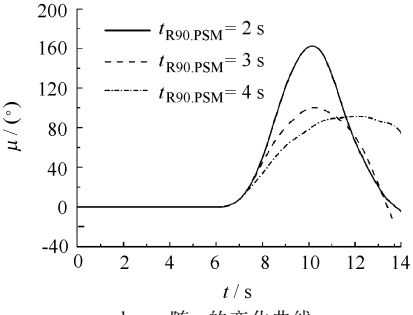
2.3　绕速度矢量滚转并截获 90°倾斜角的时间

实际空战中,由于绕体轴的滚转会使迎角转换到侧滑角,这将减小升力以致降低飞机的机动能力.因此,这样一个平面的转换应采用绕速度矢的滚转来完成,其中 μ 为绕速度矢量的滚转角.

为评估战斗机在过失速机动飞行中绕速度矢量的滚转特性,提出了飞机在大迎角下绕速度矢量滚转并截获 90°倾斜角所需时间 $t_{\mathrm{R90.PSM}}$ 作为衡量其滚转性能优劣的尺度.操纵全过程为,飞机从平飞拉起到大迎角,之后绕速度矢量滚转并截获目标,发射导弹,最后推杆改出.绕速度矢量滚转并截获 90°倾斜角所需要的时间分别为 2 s,3 s,4 s 时的仿真结果如图 4 所示.



a　α 随 t 的变化曲线



b　μ 随 t 的变化曲线

图 4　$t_{\mathrm{R90.PSM}}$ 不同时的仿真曲线

由仿真结果可以看出,当 $t_{\mathrm{R90.PSM}}=3$ s 时,飞机的操纵效能可以较好的使绕速度矢量的滚转角截获 90°倾斜角;当 $t_{\mathrm{R90.PSM}}=2$ s 时,由于系统操纵效能的不足,绕速度矢量的滚转角不容易截获 90°倾斜角;当 $t_{\mathrm{R90.PSM}}=4$ s 时,相对 $t_{\mathrm{R90.PSM}}=3$ s 时绕速度矢量滚转并截获 90°倾斜角的时间长,不利于快速机头指向.因此要根据飞机的实际操纵效能来选择一个折衷的参数.

在机动迎角下,绕速度矢量滚转到需用角度的时间越短,战机取胜的概率则越大,因此可以利用绕速度矢量滚转并截获 90°倾斜角的时间这个指标来评估飞机过失速机动动作的性能优劣.

2.4　过失速空战周期 T_{PST}

一个典型的过失速空战过程为,飞机从正常飞行状态拉起至过失速状态,绕速度矢量滚转 90°截获敌机并发射导弹,之后绕速度矢量反向滚转 90°恢复到大迎角平飞状态,压杆使飞机迎角减小至正常飞行状态并加速到初始速度.过失速空战周期 T_{PST} 定义为飞机完成上述典型过失速空战过程的总时间,如图 5 所示.

图 5 中 1−2 段表示飞机从正常飞行状态拉起进入过失速状态;2−3 段表示飞机绕速度矢量滚转 90°截获敌机并发射导弹,之后绕速度矢量反向滚转 90°恢复到大迎角平飞状态;3−4 段表示驾驶员压杆使飞机迎角减小至正常飞行状态;4−1段表示飞机改出后平飞加速到初始速度.t_1,t_2,t_3,t_4 之和为一过失速空战周期时间.

一个典型的过失速空战周期响应如图 6 所

示，该过失速空战周期时间为 15 s. 显然，过失速空战周期时间越短越好，它反映了飞机能尽快地攻击并准备好下一次攻击的能力.

在许多空战中，飞机将迅速改变机头指向以达到首先向敌机开火的目的，而后在下一次攻击前要恢复能量. 在整个作战过程中，这一周期会反复出现，而空战周期相当于一次进攻的全过程的时间历程. 因此，过失速空战周期可以综合评估飞机在这一过程中的能量损失、改变机头指向能力、能量获得能力等，它是衡量战斗机过失速机动性能的一个很好的综合尺度.

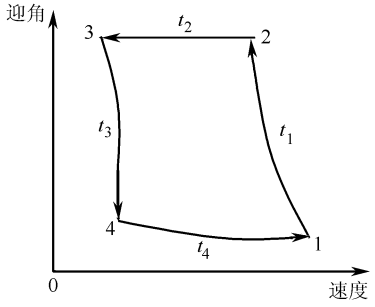
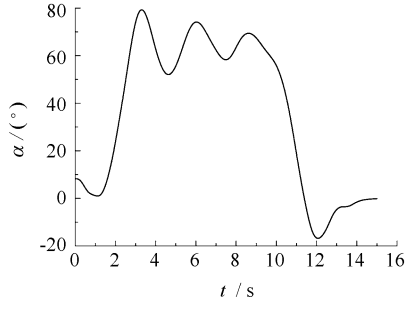
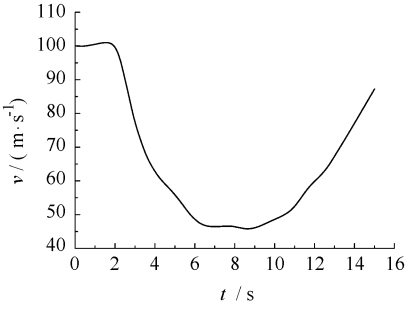


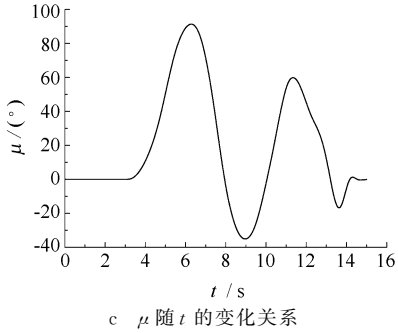
图 5 过失速空战周期



a v 随 t 的变化曲线



b α 随 t 的变化曲线



c μ 随 t 的变化关系

图 6 T_{PST} 仿真曲线

3 结 论

1) 加入推力矢量可以有效地减小飞机进入和改出过失速机动的时间，提高空战优势.

2) 要改变机头指向首先要使飞机达到所需迎角，然后再绕速度矢量滚转，在操纵效能满足的前提下可以使机头指向空间的某一目标.

3) 提出的 4 项量化指标可以有效地评估过失速机动的飞行性能的优劣，即战斗机从平飞状态进入大迎角、在大迎角下绕速度矢量滚转、攻击完毕后从大迎角状态改出至初始状态的能力.

参考文献（References）

[1] 刘昶. 敏捷性、过失速机动、飞行品质和推力矢量控制新进展[J]. 南京航空航天大学学报，1998，30(1)：76－84
Liu Chang. Development on agility, post-stall maneuver, flying qualities and thrust vector control[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 1998, 30(1):76－84(in Chinese)

[2] Nguyen L T, Ogburn M E, Gilbert W P, et al. Simulator study of stall/post-stall characteristics of a fighter airplane with relaxed longitudinal static stability[R]. NASA Technical Paper 1538, 1979

[3] 高彦玺，王衍洋，金长江. 推力矢量控制与过失速机动仿真研究[J]. 飞行力学，1997，15(1)：23－29
Gao Yanxi, Wang Yanyang, Jin Changjing. A study on the thrust vectoring control and aircraft's post stall maneuver [J]. Flight Dynamics, 1997, 15(1): 23－29(in Chinese)

[4] 方振平，陈万春，张曙光. 航空飞行器飞行动力学[M]. 北京：北京航空航天大学出版社，2005：182－183
Fang Zhenping, Chen Wanchun, Zhang Shuguang. Air-craft flight dynamics [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2005:182－183(in Chinese)

[5] 聂海涛，谢品. 超常规机动的应用——对未来空战的探讨之一[J]. 国际航空，1996(10)：27－28
Nie Haitao, Xie Pin. Super-conventional maneuver in close air-fight—discussion of future air combat (Part 1)[J]. International Aviation, 1996(10): 27－28(in Chinese)

（责任编辑：张 嵘）