

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2017.10.024

直升机中等幅度滚转姿态敏捷指标与障碍滑雪任务科目的相关性研究

杨文凤*, 宋攀, 田磊

中国飞行试验研究院, 陕西 西安 710089

摘 要: 以速率响应类型为例, 对 ADS-33E 中直升机中等幅度滚转姿态敏捷指标进行分析研究, 通过对国外不同直升机以及滚转姿态敏捷相关的任务科目试飞结果进行分析, 表明滚转姿态敏捷指标评价和与其相关的闭环任务科目指标评价具有良好的一致性。同时给出了滚转姿态敏捷试飞方法及某型直升机滚转姿态敏捷以及障碍滑雪科目试飞的结果和分析, 验证了滚转姿态敏捷指标和障碍滑雪任务科目指标的一致性。

关键词: 滚转; 姿态敏捷; 任务科目; ADS-33E; 直升机

中图分类号: V217+33

文献标识码: A

文章编号: 1007-5453 (2017) 10-0024-05

姿态敏捷性指标是直升机的一项重要指标, 尤其对武装直升机而言, 良好的姿态敏捷性指标可以让直升机快速地从一种稳定的姿态变化到另一种稳定的姿态, 能够顺利地完成障碍规避、地形跟踪及侦察攻击等各类复杂的任务^[1]。中等幅度滚转姿态敏捷性指标是对直升机产生滚转速率来获得滚转姿态变化能力的一种度量^[2]。

ADS-33E 使用两种不同的方法确定飞行品质等级, 分为预估飞行品质等级和认定飞行品质等级。预估等级根据定量指标确定, 这些定量指标以飞行试验和地面仿真获得的飞行品质评定数据为基础。任务科目指标是试飞员对规定的任务科目进行飞行检验而给出的等级, 它是对该机飞行品质的综合定性的评价, 称为认定飞行品质等级。直升机最终确定的飞行品质等级是对这两种评级进行综合所得出的结论, 预估飞行品质最终能否与任务科目指标一致成为飞行品质设计成败的关键。

ADS-33E 是美国军用直升机飞行品质规范将开环试验得到的中等幅度滚转姿态敏捷性指标作为预估飞行品质等级的依据, 同时与相对应的如障碍滑雪、侧移等任务科目的闭环

试验结果结合起来, 综合评定直升机飞行品质等级, 强调直升机综合使用性能^[3]。滚转姿态敏捷性指标和障碍滑雪、侧移等任务科目指标的一致性成为飞行品质评价的关键。

本文对 ADS-33E 中的滚转姿态敏捷性规范要求进行了深入研究和分析, 表明了滚转姿态敏捷性指标是通过不同直升机针对障碍滑雪任务科目的典型问题进行了大量飞行试验以及飞行仿真得到的, 验证了滚转姿态敏捷性和任务科目指标一致性的问题, 并利用某型直升机飞行试验对其一致性进行了验证。

1 规范要求

中等幅度滚转姿态敏捷性规范要求^[4]: 滚转角速度峰值与滚转角变化量峰值之比, 即 $p_{pk}/\Delta\phi_{pk}$ 应满足图 1 中的要求。从一个稳定滚转姿态过渡到另一个稳定滚转姿态所需的姿态角改变应尽可能快地完成, 且相对配平位置不应有明显的座舱操纵反向。符合本要求的滚转角的变化应在 10° 到使用飞行包线边界或滚转角改变 60° (取较小者) 的范围内, 如图 1 所示的参数定义。对只适用于 UCE=2 或 UCE=3 的响应类型, 不必满足本要求。

收稿日期: 2017-07-27; 退修日期: 2017-08-07; 录用日期: 2017-08-30

* 通信作者: Tel.: 029-86839714 E-mail: yangwenfeng717@163.com

引用格式: YANG Wenfeng, SONG Pan, TIAN Lei. Research of relevance between roll moderate amplitude attitude quickness and slalom mission task on a helicopter[J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 28(10): 24-28. 杨文凤, 宋攀, 田磊. 直升机中等幅度滚转姿态敏捷指标与障碍滑雪任务科目的相关性研究[J]. 航空科学技术, 2017, 28(10): 24-28.

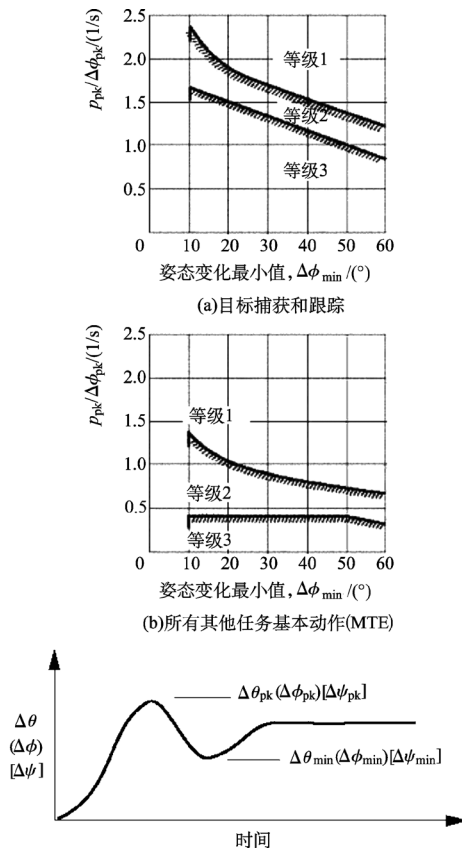


图1 中等幅度滚转姿态敏捷性要求
Fig.1 Roll attitude quickness criteria

该要求对于明确指定使用 UCE=2 或 UCE=3 的响应类型不适用。例如,如果旋翼机有可选择自动飞控系统 (AFCS) 模式、Rate 和姿态控制/姿态保持 (ACAH) 响应类型,通常指定速率响应类型应用于良好目视条件且需满足中等幅度姿态敏捷要求。而 ACAH 响应类型通常被指明应用于 UCE>1 或者分配注意力的情况下。对于 UCE>1 的飞行,ACAH 响应类型强调稳定性并且认为高敏捷性是不必要的。

障碍滑雪机动科目试飞方法如下:使直升机机头对准跑道地标中心线,以 $V_1=110\text{km/h}$,离地高度 30m 稳定平飞,如图 2 所示要求在 30m 标志点的范围内完成长度间隔为 150m 的平滑转弯,转弯中心线为 15~30m,在中心线上方以平飞结束动作。

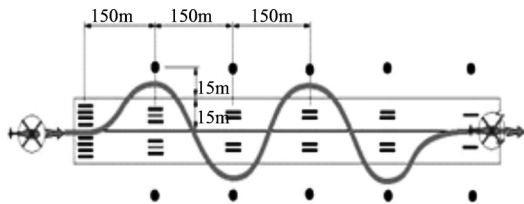


图2 障碍滑雪示意图
Fig.2 Diagram of slalom

2 滚转姿态敏捷性指标分析

敏捷性指标是针对速率响应类型要求,横向速率响应类型可以写为下式一阶系统^[5]。

$$\dot{p} - L_p p = L_{W_x} \cdot W_x = -L_p p_s W_x \quad (1)$$

式中: p 为滚转角速率, W_x 为横向操纵, L_p 为滚转阻尼。对于横向阶跃操纵,滚转角速率将会使指数增长到一个稳定值 p_s 。

假设横向操纵输入为持续时间为 t_1 的脉冲,将会产生一个姿态改变 $\Delta\phi$,滚转角速率和滚转角的响应可以分为脉冲输入中和脉冲输入后两个阶段,方程为:

$$\begin{cases} t \leq t_1: p = p_s (1 - e^{-L_p t}) W_x, \frac{n!}{r!(n-r)!} \\ \phi = \frac{p_s}{L_p} (1 + L_p - e^{-L_p t}) W_x \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} t > t_1: p = p_s e^{-L_p t} (e^{-L_p t_1} - 1) W_x, \\ \phi = \phi(t_1) - \frac{p_s}{L_p} (e^{-L_p t} - 1) (e^{L_p(t-t_1)} - 1) W_x \end{cases} \quad (3)$$

从上面两个方程可以得到姿态敏捷性的指标,简化可以得到:

$$\frac{p_{pk}}{\Delta\phi} = -\frac{L_p}{\hat{t}_1} (1 - e^{-\hat{t}_1}) \quad (4)$$

式中: $\hat{t}_1 = -L_p t_1$ 。图 3 给出了根据滚转阻尼正则化的敏捷性曲线。

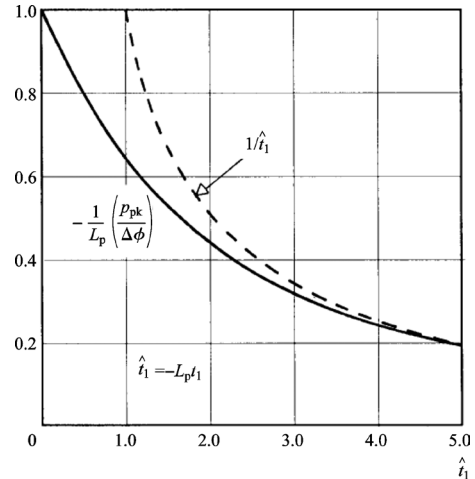


图3 滚转阻尼正则化的敏捷性曲线

Fig.3 Variation of normalized quickness with manoeuvre time ratio

当脉冲输入时间足够短时,敏捷性近似于滚转阻尼:

$$\hat{t}_1 \rightarrow 0, \quad \frac{p_{pk}}{\Delta\phi} \rightarrow -L_p \quad (5)$$

如果脉冲输入时间持续增加,敏捷性会和输入时间成反比:

$$\hat{t}_1 \rightarrow \infty, \quad \frac{p_{pk}}{\Delta\phi} \rightarrow \frac{1}{t_1} \quad (6)$$

3 滚转姿态敏捷指标与“障碍滑雪”任务科目指标一致性分析

图4给出了“山猫”直升机在障碍滑雪任务科目中横向操纵输入、滚转角以及角速度的时间历程曲线^[6]。这个机动动作可以分解为一系列的姿态改变,每个姿态改变和一个特定的角速度峰值相关联,将其画在相平面上,如图5所示,对于“山猫”直升机,滚转轴是速率控制,所以滚转速率可以很好地跟随操纵,图6(a)给出了障碍滑雪中和姿态改变相对应的角速率峰值。每个点代表了以特定程度机动性完成的姿态改变。同一条射线上的点代表了飞行员同等程度的机动性,这种机动性就是我们所说的敏捷性。

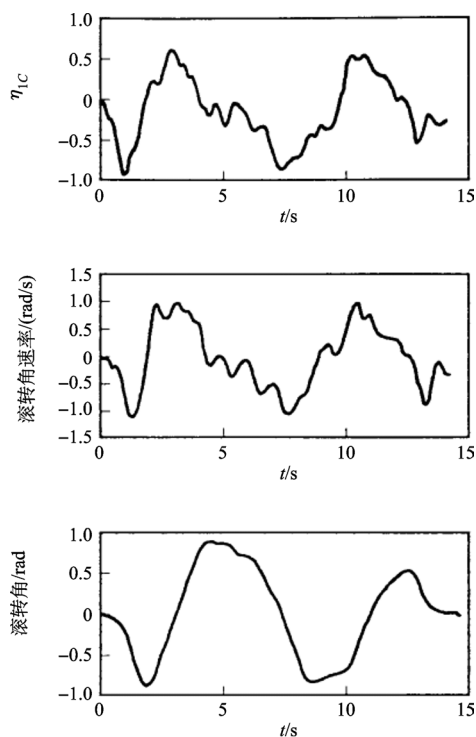


图4 “山猫”直升机障碍滑雪时间历程图

Fig.4 Time histories for Lynx helicopter flying slalom

除障碍滑雪科目涉及滚转轴敏捷性外,侧移科目也能反映直升机滚转敏捷性,为此,国外通过“山猫”直升机分别以有限机动、中等机动、迅猛机动进行侧移科目试飞,得到不同机动程度下的滚转轴敏捷性^[7],如图7所示。

不同直升机的滚转阻尼不同,敏捷性也有所不同,为此,国外还通过BO105直升机进行敏捷性飞行试验^[8],如图8所示。

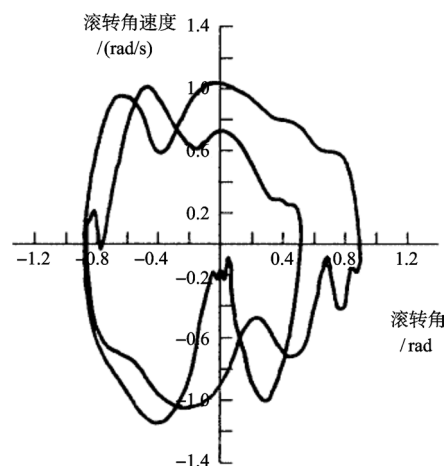
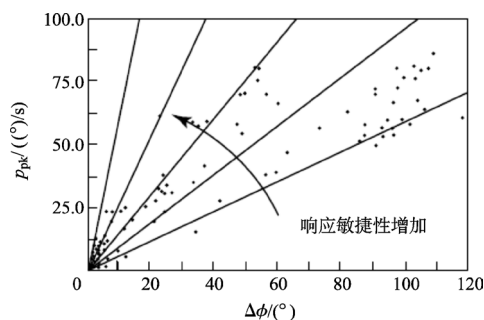
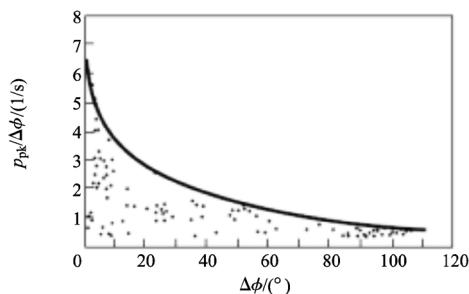


图5 “山猫”直升机障碍滑雪相平面图

Fig.5 Phase plane portrait for Lynx helicopter flying slalom



(a) 障碍滑雪的滚转速率峰值与姿态变化



(b) 障碍滑雪的滚转姿态敏捷性

图6 障碍滑雪滚转响应

Fig.6 Roll response for slalom

综合不同直升机、不同科目的敏捷性飞行试验,最终形成目标捕获与跟踪及所有其他任务基本动作MTE的敏捷性定量指标,如图1所示。由此可见,由于滚转姿态敏捷开环定量指标是根据仿真计算和MTE试飞数据确定的,所以其一致性良好。按预估定量指标设计的飞行品质能基本满足任务科目的性能要求,由预估的飞行品质等级和认定的飞行品质等级综合评定所得的结果基本会取得一致的品质等级评价。

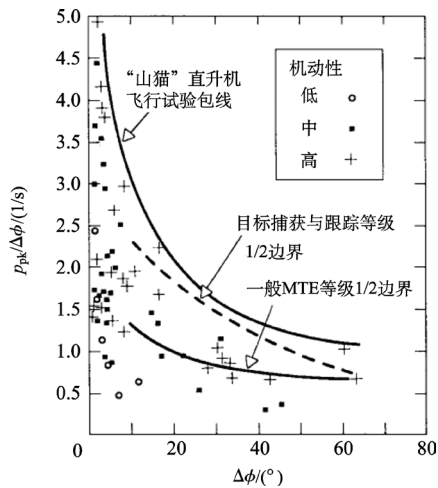


图7 侧移科目中的滚转姿态敏捷性
Fig.7 Roll attitude quickness for lateral sidestep

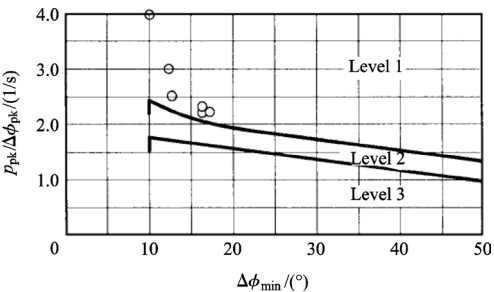


图8 BO105 滚转姿态敏捷
Fig.8 Roll attitude quickness on BO105

4 试飞验证

4.1 试飞对象

试飞对象为一架单旋翼带尾桨布局直升机,旋翼旋转方向为逆时针(俯视),尾桨位于机身右侧。该直升机采用数字式飞控系统,通过传感器采集将飞行员的操纵指令、直升机运动量等各种信号传递给飞控计算机,由飞控计算机处理后控制主、尾桨舵机运动,最终将指令传递到主、尾桨叶等操纵面,实现对直升机的飞行状态控制。该试飞对象横向设计为 ACAH 响应类型。

4.2 试飞方法

滚转姿态敏捷试飞方法为:根据规范要求,针对横向 ACAH 响应类型,设计姿态敏捷的输入方式为不同幅值的座舱横向阶跃输入动作,阶跃持续时间 6~8s。障碍滑雪机动科目试飞按照规范要求执行。

4.3 试飞结果及分析

在试飞过程中,选取气压高度 1000m 为试验高度,在稳定平飞状态下,进行横向左、右压杆阶跃操纵输入。试验过

程中为了得到不同大小的最小滚转角 $\phi_{\min}$,通过改变操纵输入幅值来实现。图 9 给出了前飞滚转姿态敏捷性试飞结果,从图 9 的试飞结果可知,该型直升机在 ACAH 响应类型下前飞滚转姿态敏捷满足等级 2 的要求。

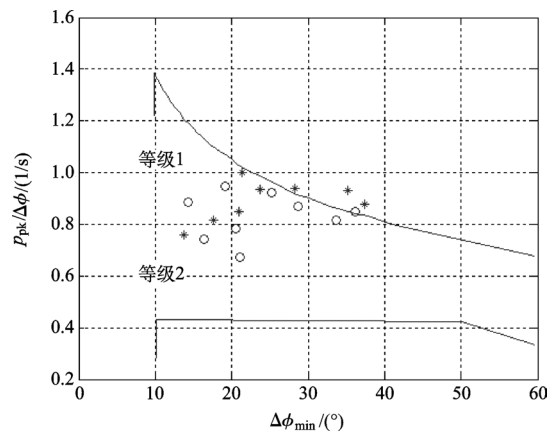


图9 滚转姿态敏捷结果
Fig.9 Roll attitude quickness results

障碍滑雪科目试飞结果见表 1。从表 1 可知,障碍滑雪科目的试飞结果达到了满意性能,飞行员库珀-哈珀评价为 4,即飞行员需要做适当的驾驶补偿才能达到满意的性能,综合可知其障碍滑雪科目试飞结果为等级 2,与前飞滚转姿态敏捷指标等级相一致,即滚转姿态敏捷开环定量指标与障碍滑雪闭环任务科目指标一致性得到验证。

试验机横向为 ACAH 响应类型,该响应类型主要应用于不良目视下的精确操纵,横向增益较小、阻尼较大、稳定性较强,因此导致敏捷性指标降低,前飞滚转姿态敏捷指标为等级 2。障碍滑雪闭环任务科目要求至少以 110km/h 的空速在 30m 标志点的范围内完成长度间隔为 150m 的平滑转弯,需要直升机对横向操纵能做出较快的角速率和姿态响应,而试验机横向增益小、阻尼大,导致直升机响应迟钝,飞行员为了快速精确地转弯,达到满意的性能,工作负荷增加,需要做出适当的补偿,因此,障碍滑雪任务科目试飞结果为等级 2。由此可见,试验机滚转姿态敏捷开环指标和障碍滑雪任务科目指标具有一致性,均和横向通道增益和阻尼相关。

表 1 障碍滑雪试飞结果
Table 1 Flight results of slalom

动作要求	规范指标		试飞结果	试飞员 HQR 评定
	满意	合格		
在整个路线中空速至少保持 X km/h	110	75	满意 速度保持 $V=123$ km/h	4
在 X m 的参考高度以下完成该机动科目	30	30	满意 高度保持在 29m 以下	

5 结论

以速率响应类型为例,分析研究了滚转姿态敏捷性指标,表明滚转姿态敏捷和滚转阻尼以及脉冲输入时间相关。通过对国外不同直升机在滚转姿态敏捷相关的任务科目试飞结果分析,表明滚转姿态敏捷指标评价和“障碍滑雪”闭环任务科目指标评价具有良好的一致性,并在型号试飞中对其进行了验证。本项研究为我们开展 ADS-33E 规范的背景研究以及后续我国新的飞行品质规范的背景材料编写提供了依据,同时为后续直升机型号飞行品质试飞提供了经验和技术支持。 **AST**

参考文献

- [1] Blanken C L, Hoh R H, Mitchell D G, et al. Test guide for ADS-33E-PRF [R]. HOH Aeronautics, Inc. HAI-TR-1130-1, AMR-AF-08-07, 2008.
- [2] 杨松山. 直升机机动飞行时的响应特征和评定要求 [M]. 西安: 中国飞行试验研究院, 2002.
YANG Songshan. The response characteristics and evaluation requirements of helicopter maneuvering flight[M]. Xi'an: Chinese Flight Test Establishment, 2002. (in Chinese)
- [3] 国防科技工业委员会. 军用直升机飞行品质规范背景材料和使用说明 [M]. 北京: 航空工业出版社, 1986.
COSTIND. Background materials and instructions of handling

qualities requirements for military helicopter[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1986. (in Chinese)

- [4] Baskett B J. Aeronautical design standard performance specification, handling qualities requirements for military rotorcraft[M]. USA: Unite States Army Aviation and Missile Command, 2000.
- [5] Padfield G D. Helicopter flight dynamics[M]. UK: Blackwell Publishing, 2007.
- [6] Padfield G D, Jones J P, Charlton M T, et al. Where does the workload go when pilots attack manoeuvres? An analysis of results from flying qualities theory and experiment[C]// European Rotorcraft Forum, 1994.
- [7] Charlton M T, Padfield G D. Helicopter agility in low speed maneuvers[C]//European Rotorcraft Forum, 1987.
- [8] Ockier C J. Flight evaluation of the new handling qualities criteria using the Bo105[C]// The 49th Annual Forum of the American Helicopter Society, 1993. (责任编辑 樊丹丹)

作者简介

杨文凤 (1987—) 女, 硕士, 工程师。主要研究方向: 直升机飞行品质。

Tel: 029-86839714 E-mail: yangwenfeng717@163.com

Research of Relevance between Roll Moderate Amplitude Attitude Quickness and Slalom Mission Task on a Helicopter

YANG Wenfeng*, SONG Pan, TIAN Lei

Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China

Abstract: In this paper, mainly analyzed the roll moderate amplitude attitude quickness criterion requirement in the performance standards of apiece ADS-33E with the rate response as an example, through the analyzing on flight results of different helicopters and different mission tasks related to roll attitude quickness, described the consistency between moderate amplitude attitude quickness and mission task criterion requirement and finally presented the method of roll moderate amplitude attitude quickness, described the flight test result and analysis of roll moderate amplitude attitude quickness and slalom. Validated the consistency between moderate amplitude attitude quickness and slalom mission task criterion requirement.

Key Words: roll; attitude quickness; mission task; ADS-33E; helicopter

Received: 2017-07-27; Revised: 2017-08-07; Accepted: 2017-08-30

*Corresponding author. Tel. :029-86839714 E-mail: yangwenfeng717@163.com