

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2017.08.007

直升机姿态指令 / 姿态保持响应类型试飞验证技术研究

杨文凤*, 尹建峰, 宋攀

中国飞行试验研究院, 陕西 西安 710089

摘要:对直升机 ACAH 响应类型和 RATE 响应类型进行了分析比较, 对 ADS-33E 中的直升机 ACAH 响应类型验证要求进行了分析研究, 说明了 ACAH 响应类型在不良目视环境下使用的较强稳定性, 给出了 ACAH 响应类型的试飞方法及某型直升机 ACAH 响应类型验证的试飞评定结果和分析。试验结果表明, 该方法适用于直升机 ACAH 响应类型的验证。

关键词: 响应类型; RATE; ACAH; 直升机; 试飞; ADS-33E

中图分类号: V217+.33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-5453 (2017) 08-0007-05

研制直升机所采用的响应类型应该根据直升机所要执行的任务、使用环境条件和所要求的品质等级来确定。一般来说, 速率 (RATE) 响应类型对于良好目视下的任务科目来说已经足够, 它可以迅速改变速度或轨迹, 适合于快速机动要求, 而当目视环境较差时或者需要精确控制直升机的姿态或速度时, 则需选择姿态指令 / 姿态保持 (ACAH) 响应类型, 该响应类型是指驾驶杆的操纵对应于本轴的姿态角响应, 飞行员停止操纵后, 直升机保持此时驾驶杆对应的姿态角, 这样直升机飞行状态更稳定, 便于精确控制。

NH-90^[1] 直升机装有全权限电传飞控系统, 在悬停和低速飞行阶段, 俯仰和滚转轴完成了 ACAH 响应类型的实现与验证试飞, 加上自动飞行控制系统中的高度保持和位置保持功能, 就保证了 NH-90 在不良目视条件下可达到等级 1 的飞行品质。UH-60M^[2] 针对不良目视环境设计了 ACAH、速率指令 / 方向保持 (RCDH) 等响应类型, 并对其进行了试飞验证, 在设计的响应类型下, 直升机在不良目视环境下飞行品质达到等级 1。国内, ACAH 响应类型在直升机上的工程应用仍处于起步阶段, 并且品质规范 GJB902 对响应类型没有做出相关规定。因此, 直升机 ACAH 响应类型验证的试飞评定技术尚为空白, 亟待开发。

本文对 ACAH 和 RATE 响应类型进行了分析比较, 说明了 ACAH 在不良目视环境下的较强稳定性, 给出了 ACAH 响应类型试飞验证方法及某型直升机 ACAH 响应类型验证的试飞评定结果和分析。

1 ACAH、RATE 响应类型分析比较

1.1 从驾驶员操纵角度分析比较

对于 RATE 响应类型, 驾驶员输入对应本轴上的角速度, 驾驶员要获得一定的姿态, 在达到期望的姿态之前应该提前去掉操纵或反向操纵才能达到该姿态; 对于 ACAH 响应类型, 驾驶员输入对应本轴上的姿态角, 驾驶员在达到期望的姿态角后固持操纵即可^[3]。图 1 为同样增速条件下, RATE、ACAH 两种响应类型之间的操纵输入区别。

为了增加速度, 首先要低头产生加速度, 最后俯仰角稳定在较高速度时对应的新姿态角上。如图 1 所示, 对于速率指令, 驾驶员首先需要推杆产生一个初始的低头角速率, 达到期望的俯仰角速率后停止输入, 反向输入产生抬头角速率, 最后在期望的新的配平姿态停止操纵输入; 对于姿态指令, 驾驶员需要推杆产生基本成正比的期望俯仰角, 当达到目标速度后, 将驾驶杆回到新的配平俯仰角对应的位置。由

收稿日期: 2017-04-24; 退修日期: 2017-05-23; 录用日期: 2017-07-12

* 通讯作者. Tel.: 029-86839714 E-mail: yangwenfeng717@163.com

引用格式: YANG Wenfeng, YIN Jianfeng, SONG Pan. Flight test technology research of ACAH response type on helicopter [J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 28 (08): 07-11. 杨文凤, 尹建峰, 宋攀. 直升机姿态指令 / 姿态保持响应类型试飞验证技术研究 [J]. 航空科学技术, 2017, 28 (08): 07-11.

此可以看出,速率指令下驾驶员的操纵步骤相比姿态指令要复杂,导致驾驶员的工作负荷增加,因此,不良目视环境下通常选用 ACAH 响应类型。

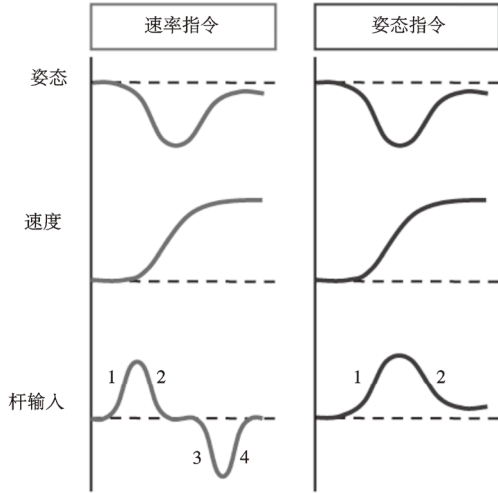


图1 同样增速下两种响应类型的操纵输入区别

Fig.1 The different control inputs of two response types to the same speed increase

1.2 不良目视环境下驾驶品质等级和目视信息等级角度分析比较

Hoh^[4]建立了驾驶员品质等级 (HQR) 和目视信息等级 (VCR) 之间的函数关系,并将执行任务的注意力需求 (AD) 和 HQR 联系起来,最终得到 AD 和 VCR 之间的关系。Hoh 首先将驾驶员工作负荷量化,假设:

$$AD + SA = 1 \quad (1)$$

式中:SA 是对周围环境的感知。式 (1) 说明当执行任务时,驾驶员所需的注意力较多时,对环境的感知就会较弱;当对周围环境的感知不足时,发生事故的概率会增加。

对于 RATE 响应类型, Hoh 给出不良目视 (DVE) 环境下 HQR 和 VCR 之间的关系:

$$(HQR)_{DVE} = (HQR)_{GVE} + 0.65 - 1.02VCR_{\theta} + 0.468VCR_{\theta}^2 - 0.084VCR_X + 0.257VCR_X^2 - 0.303VCR_{\theta}VCR_X \quad (2)$$

式中: VCR_{θ} 为姿态的目视信息等级, VCR_X 是水平和垂直两维线速度目视信息等级中最差的一个, $(HQR)_{DVE}$ 为不良目视环境下的驾驶员品质等级, $(HQR)_{GVE}$ 为良好目视 (GVE) 环境下的驾驶员品质等级。HQR 和 AD 之间的关系如下:

$$AD = \frac{(HQR - 1)}{8.33} \quad (3)$$

由式 (2) 和式 (3) 可以得出:

$$(AD)_{DVE} = \frac{(HQR)_{GVE} - 1}{8.33} + 0.078 - 0.122VCR_{\theta} + 0.056VCR_{\theta}^2 - 0.010VCR_X + 0.031VCR_X^2 - 0.036VCR_{\theta}VCR_X \quad (4)$$

$(AD)_{DVE}$ 是 DVE 环境下的注意力需求,由式 (2)、式 (4) 可知当 $VCR > 2.8$, 驾驶员品质就会降级到等级 2, 同时驾驶员注意力需求会明显增加,对环境的感知降低,发生事故概率增加。

对于 ACAH 响应类型, HQR 和 VCR 之间的关系如下:

$$(HQR)_{ACAH} = 1.696 + 0.022VCR_{\theta} + 0.370VCR_X \quad (5)$$

代入式 (5) 可得:

$$(AD)_{ACAH} = 0.084 + 0.0026VCR_{\theta} + 0.044VCR_X \quad (6)$$

将式 (5)、式 (6) 和式 (2)、式 (4) 进行比较,可以看出 ACAH 响应类型相比 RATE 响应类型少了 VCR_{θ} 、 VCR_X 的平方项以及交叉相乘项,这样 HQR 和 AD 的数值大幅减小,驾驶员品质等级提高,驾驶员注意力需求减小,对环境感知增加,发生事故概率降低。由此可知, ACAH 响应类型稳定性强于 RATE 响应类型,当视觉环境降级时, ACAH 可以大幅减小驾驶员执行任务的注意力需求,而 RATE 响应类型下,驾驶员注意力需求会随着目视信息等级变差而快速增加,导致高风险的出现,如图 2 所示。

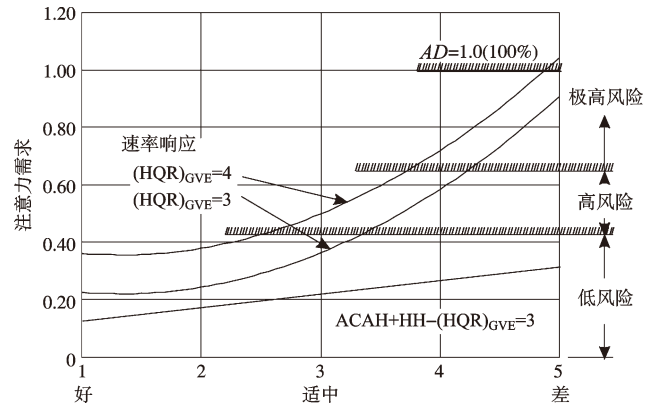


图2 VCR 对 AD 的影响 (假设 $VCR_{\theta} = VCR_X$)

Fig.2 The effect of VCR on AD (Assume $VCR_{\theta} = VCR_X$)

1.3 从根轨迹角度分析

以一个简单的位置反馈闭环回路来说明 ACAH 响应类型相较 RATE 响应类型稳定性方面的优越性,闭环回路如图 3 所示。从图 3 中可以看出, RATE 响应类型中从杆到位置输出之间有 3 个积分环节,而 ACAH 响应类型只有两个。分别画出 RATE 响应类型和 ACAH 响应类型的根轨迹如图

4 所示,可以看出 ACAH 响应类型是稳定的,而 RATE 响应类型是不稳定的,这是由于 RATE 响应类型多出来的一个积分环节造成了 90° 的相位滞后,从而导致了不稳定。

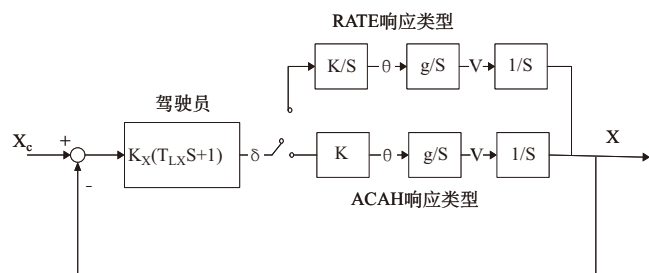
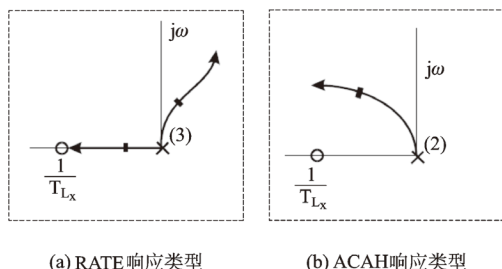


图3 位置反馈闭环回路
Fig.3 Position feedback loop



(a) RATE 响应类型 (b) ACAH 响应类型

图4 根轨迹示意图
Fig.4 Diagram of root locus

2 ACAH 响应类型验证

2.1 规范要求^[5]

姿态指令响应特征应满足以下要求:对于座舱纵向(横向)操纵机构的阶跃力输入,在6s内应产生成正比的俯仰(滚转)姿态变化,在阶跃输入后6~12s之间,姿态应基本保持不变;如果由此产生的对地纵向(横向)移动加速度是常值,或其绝对值是减小并趋于常值,则在阶跃输入后6~12s之间姿态可以发生变化;应有独立的配平机构,使驾驶员在任何可实现的稳定姿态将座舱操纵力配平至零。

姿态保持的脉冲输入响应如图5所示,具体要求为:脉冲输入应直接施加于操纵执行机构,除非可以证明座舱操纵机构的脉冲输入能产生同样的响应;在脉冲输入后,俯仰姿态角应在20s内(目视感示环境 UCE=1)或10s内(UCE>1)恢复至最大偏离量的10%或 1° 以内,取两者中的较大值;滚转姿态和方向则应在10s内恢复到最大偏离量的10%或 1° 以内,取两者中的较大值;等级1要求姿态或方向应在规定的范围内至少保持30s,该项试验中,姿态和方向响应的最大偏移量应从勉强可感觉到的程度变化到至少 10° 。

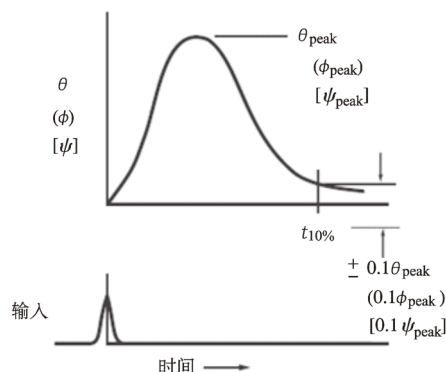


图5 姿态保持响应类型的脉冲响应
Fig.5 Impulse response of AH response type

对于姿态保持响应的验证,其目的是从配平位置扰动直升机,并在输入切除后观察直升机的响应,给出其需要保持的精度指标;对于 ACAH 响应类型,由于座舱操纵输入试验不会改变直升机的配平位置,因此,姿态保持响应的要求可由座舱操纵输入试验。

2.2 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,将驾驶员的操纵指令、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姿态控制。该试飞对象纵向、横向设计为 ACAH 响应类型。

2.3 试飞方法

根据规范要求,针对姿态指令响应类型,设计座舱纵向(横向)阶跃输入动作,阶跃持续时间12~15s(如图6所示);针对姿态保持响应类型,符合规范要求的试验方法(如图7所示)有两种:一是在不改变姿态基准的情况下,驾驶员利用座舱操纵输入施加脉冲输入来获得直升机响应特性;二是利用信号发生器直接向飞控系统的执行机构输入脉冲动作信号激励直升机响应,为防止发生危险,脉冲幅值应从小到大,逐次逼近要求的最大变化状态。

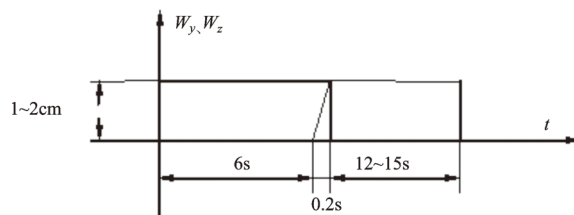


图6 阶跃操纵输入示意图
Fig.6 Diagram of step manipulation input

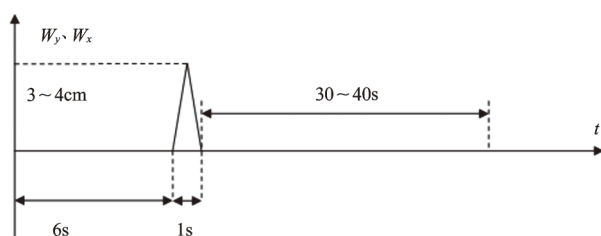


图7 脉冲操纵输入示意图

Fig.7 Diagram of pulse manipulation input

2.4 试飞结果

图8给出了试验机横向姿态指令响应类型验证的时间历程图,图中 V_{gy} 为侧向地速, p 为滚转角速度, W_x 为横向操纵输入, ϕ 为滚转角,从时间历程曲线可以看出,在座舱横向阶跃输入后6s内,产生了与之形状相符的、幅值基本成正比的滚转姿态响应,且在6~12s之间滚转姿态基本稳定,表明试验机横向具有姿态指令响应类型。

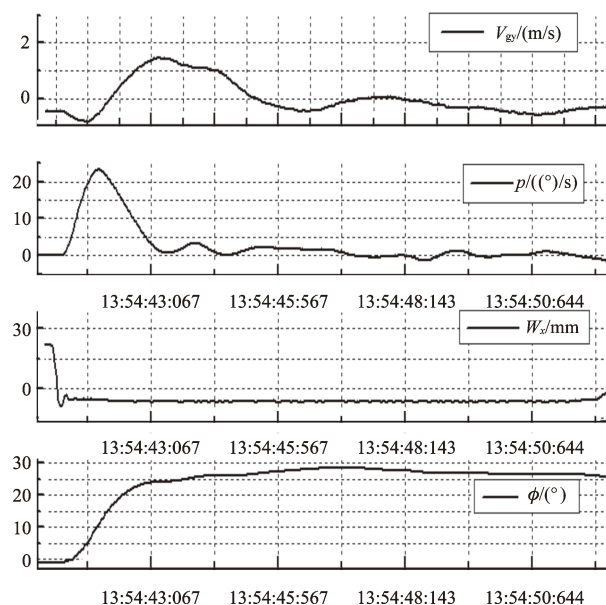


图8 姿态指令响应类型时间历程图

Fig.8 Time history of AC response type

根据图8对试验机姿态指令操纵后的姿态保持响应进行分析,利用式(6)计算横向阶跃输入后滚转角的保持精度:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (6)$$

式中: σ 为标准差, N 为阶跃输入后姿态保持时间段内的采样数据点数, x_i 为姿态保持时间段内的滚转角值, μ 为姿态保持时间段内所有滚转角的平均值。计算得到横向阶跃输入后滚转角的保持精度为 0.57° ,满足飞控系统通用规范中

姿态保持的技术指标要求。

图9给出了试验机横向姿态保持响应类型验证的时间历程图,图中 W_x 为横向操纵输入, ϕ 为滚转角, ϕ_g 为滚转角基准,从时间历程曲线可以看出,在脉冲输入后,姿态基准 ϕ_g 为 -0.59° ,最大偏离量为 -17.9° ,则滚转角最大偏离量的10%为 1.79° ,滚转姿态角在6.5s回复到 $-0.59^{\circ} \pm 1.79^{\circ}$ 范围内,且在该范围内保持了30s,满足品质规范中关于姿态保持响应类型等级1的要求,表明试验机具有姿态保持响应类型。

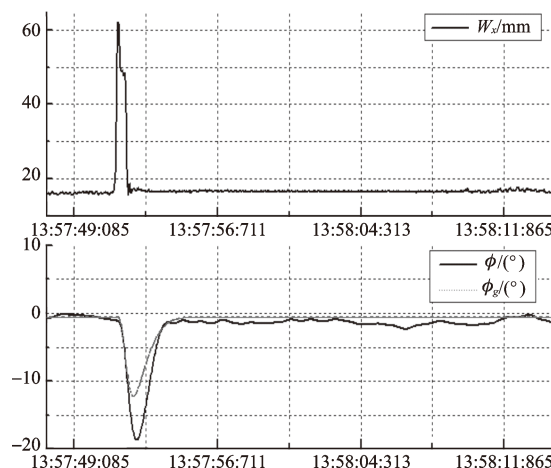


图9 姿态保持响应类型时间历程图

Fig.9 Time history of AH response type

利用式(6)计算可得到横向脉冲输入后滚转角的保持精度为 0.43° ,满足飞控系统通用规范中姿态保持的技术指标要求。综上所述,试飞结果表明该试验机横向具有ACAH响应类型。

3 结论

本文通过对ACAH响应类型和RATE响应类型的分析比较,说明了ACAH响应类型在不良目视环境下使用的较强稳定性。对ADS-33美国军用直升机飞行品质规范要求进行分析,总结出了直升机ACAH响应类型验证试飞技术,并在型号试飞中得以成功应用。试验结果表明,该试验机横向具有ACAH响应类型,且满足规范规定的等级1的要求。

本项研究为开展ADS-33E规范的背景研究、后续我国新的飞行品质规范的背景材料的编写以及后续直升机型号响应类型试飞提供了经验和技术支持。

AST

参考文献

- [1] Benquet, Pausder, Rollet P, et al. Tailoring of ADS-33 for the

- NH-90 Program [C]// Proceedings of the AHS 52nd Annual Forum, 1996.
- [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] Johnson W. Helicopter theory [M]. New Jersey: Princeton University Press, 1980.
- [4] Hoh R. ACAH augmentation as a means to alleviate spatial disorientation for low speed and hover in helicopters [C]// American Helicopter Society International Conference on Advanced Rotorcraft Technology and Disaster Relief. Heli Japan, 1998.
- [5] Barry J B. ADS-33E-PRF Aeronautical design standard performance specification handling qualities for military rotorcraft [S]. American Federal Department of Defense, 2000.
- (责任编辑 黄贞静)
- ### 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
- 尹建峰 (1972—) 男, 硕士, 特级飞行员。主要研究方向: 直升机试飞。
- 宋攀 (1986—) 男, 硕士, 工程师。主要研究方向: 飞行品质。

Flight Test Technology Research of ACAH Response Type on Helicopter

YANG Wenfeng*, YIN Jianfeng, SONG Pan

Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China

Abstract: Compared the ACAH response type with the RATE response type on a helicopter, analyzed the flight test technology of ACAH response type of ADS-33E, illuminated the better stability of ACAH used in the degraded visual environment, and finally presented the method of ACAH flight test, described the ACAH flight test result and analyzed on a helicopter. The flight test results show that the method is suitable for the validation of the ACAH response type on a helicopter.

Key Words: response type; RATE; ACAH; helicopter ; flight test; ADS-33E

Received: 2017-04-24; Revised: 2017-05-23; Accepted: 2017-07-12

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