

文章编号:1674-8190(2017)04-401-07

基于能力验证的武装直升机飞行品质试飞设计与评估

张宏林

(中国飞行试验研究院 飞机所,西安 710089)

摘要: 依据作战任务和使用要求进行基于能力验证的试飞设计与评估是适应新的军事变革背景下航空武器装备试验工作转型的重要方向。为了探索基于能力的航空装备试验鉴定模式,以某型武装直升机为研究对象,根据其作战使命任务要求和作战能力,开展试飞设计、试飞结果分析及飞行品质等级评定等研究,提出基于作战能力验证的武装直升机飞行品质试飞设计思路和方法,并给出有效的试飞结果评估方式。所获得的试飞结果真实体现了武装直升机贴地突防和机动规避等能力,该试飞设计思路 and 试飞方法可以指导后续军用直升机的试飞设计工作。

关键词: 武装直升机;飞行品质;飞行试验;作战任务

中图分类号: V221

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2017.04.006

Capabilities-based Army Helicopter Flying Quality Demonstration Flight Test Designing and Evaluation

Zhang Honglin

(Aircraft Flight Test Technology Institute, Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract: According to the operational mission and requirement, carrying on the capabilities-based flight test and evaluation is an important direction of aviation equipment test verification to adapt the new military reform. For exploring the mode of capabilities-based aviation equipment flight test, an army helicopter is taken as research subject. Based on the army helicopter operational mission and capability requirement, the research of flight test designing, flight test result analysis and evaluation and so on are conducted. A train of thought and method about capabilities-based army helicopter flying quality, demonstration flight test designing are presented. And a valid flight test evaluation mode is given. The flight test results really reflect the capacity of this army helicopter about penetration at ground level and avoidable maneuver. The proposed thought and flight test method can be used to direct the subsequent military helicopter flight test designing.

Key words: army helicopter; flying quality; flight test; operational mission

0 引言

直升机广泛用于执行各种军事和民用任务,但对于某些特定任务,并非所有直升机均能够胜任^[1],例如,稳定性好但操纵性、机动性差的直升机无法满足侦察和攻击任务的要求,而操纵性好但稳定性差的直升机也难以完成吊挂和运输等精确操

纵任务。良好的飞行品质是保证飞行员能够安全操纵直升机并顺利完成指定任务的重要保障因素^[2]。

飞行试验是在真实大气环境下进行科学研究和试验的过程^[3],通常分为调整试飞、鉴定和定型试飞、使用试飞。在《美国旋翼航空适航性验证手册》中明确指出了开展基于能力试飞验证的必要性^[4]。对于军用航空装备,美国很早就开展了基于能力的试飞研究和应用,而我国进行的相关研究较少,主要以调整试飞和定型试飞为主。随着航空技术的发展和军队需求的逐步提高,我国的航空装备

试验鉴定体系也逐渐向美国的试验鉴定体系靠拢^[5]。该试验鉴定体系要求飞行试验应尽快实现由基于指标的试验鉴定模式向基于能力和任务的试验鉴定模式转变,并尽快突破关键试飞技术,以适应新形势的需要。

对于基于能力验证的鉴定和定型试飞,依据直升机作战任务和使用要求进行基于能力验证的试飞设计与评估是直升机飞行品质试飞的核心和关键。本文以某型武装直升机为研究对象,从完成任务的能力出发,依据该型直升机的作战任务对环境适应能力、响应特性的要求,将作战任务分解成不同的作战单元进行飞行品质试飞设计,把作战任务构想转化为与任务紧密结合的试飞科目;并通过对作战单元的飞行品质指标进行综合评定,给出满足作战任务要求的试飞结果,使试飞结果能够真实体现该武装直升机的作战能力,以期能够为后续直升机定型试飞或使用试飞提供参考。

1 某型武装直升机及作战任务

我国自行研制的某型武装攻击型直升机,其飞行品质设计按照国外最新的飞行品质规范要求 ADS-33E 进行。该标准体现了当代高性能直升机的飞行品质要求,提出了不良目视环境、响应类型等一系列新要求。武装直升机在陆军三维立体攻防作战体系中承担着对地攻击和对空攻击的作战使命,要求飞机应具有很强的对地对空攻击能力;能够携带空-地导弹、空-空导弹等多种武器;能够贴地飞行或利用复杂地形、地物隐蔽接近目标并实施攻击,为地面部队提供直接火力支援;可直接攻击敌方直升机等低空飞行目标,参与夺取超低空制空权以及为我方直升机护航等。

2 飞行品质设计思路

直升机的飞行品质可分为内部属性和外部属性两部分,内部属性通常指直升机的操纵响应特性、座舱环境、操纵和显示等;外部属性指直升机作战时所处的外部环境、要求的任务能力、飞行员的紧张水平等^[6]。以任务为导向的飞行品质将直升机的内部特性与外部环境有机结合,体现了飞行品质的最终目的是保证直升机能够顺利完成任务的宗旨。直升机飞行品质的定义包含:飞行员要求的或操纵指令所期望的直升机响应、飞行员和直升机

所处的环境、要执行的任务、直升机自身特性和其在飞行中的表现等。以任务为导向的飞行品质如图 1 所示。



图 1 以任务为导向的飞行品质示意图

Fig. 1 Schematic diagram of mission oriented flight quality

在进行飞行品质试飞设计时,应从直升机的作战使命出发,以验证作战能力为核心和主基线,贯穿飞行试验的整个过程,包含研制试飞、初始使用试飞和使用试飞等各个阶段^[7]。飞行品质试飞的结论应包含设计的符合性结果和完成任务能力的验证结果。试飞设计应从作战任务的角度出发,分为作战任务对直升机环境适应能力、本体响应特性以及分解的作战单元指标要求进行综合飞行品质验证,突出对作战能力指标的验证与考核。基于能力验证的直升机飞行品质试飞设计的思路如图 2 所示。

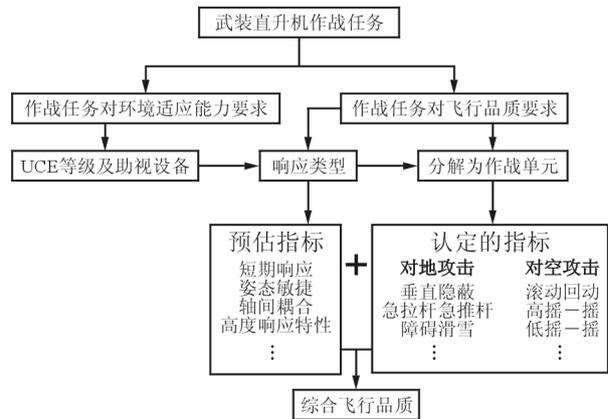


图 2 飞行品质试飞设计思路

Fig. 2 Flight test thought designing of helicopter flying quality

2.1 作战使用环境要求分解

进行飞行试验的目的—是验证设计与研制规范的符合性,二是不断修正计算模型^[8],为了确保数据的有效性、方便进行计算模型的对比,飞行试验通常应在规定的试验环境下进行,例如特定的风速、温度等。同时,通过飞行试验还可验证飞机在真实作战环境下的作战能力^[9],对军用直升机作战使用环境

的验证是作战能力验证的一项重要内容,在初始使用试飞和使用试飞阶段,飞行试验环境必须尽可能覆盖陆军航空兵所能遇到的真实使用环境。

武装直升机的作战使用环境要求相对严苛,包括极端的自然环境、复杂的电磁环境和地面/空中火力攻击的战场环境等。武装直升机的使用要求主要包括:①自然环境:能在高原、山区、丛林中飞行,能在野外草地、砂土地、有限面积的区域及斜坡着陆,能在昼夜间简单及复杂的气象条件下飞行;②气象条件:能在雨、雪、结冰、雾、穿云、大气紊流和阵风等条件下正常飞行和使用;③大风条件:能在直至 23 m/s 的风中起降和悬停;④敌方威胁环境:能在复杂电磁环境和战场环境(例如被敌方导弹跟踪或锁定)下使用。

上述使用环境中,能直接影响直升机的气动特性和飞行品质的环境要素包括:23 m/s 的风、良好或不良的目视环境、斜坡着陆等。以斜坡着陆为例,其主要受直升机操纵极限、桨盘载荷、起落架载荷等限制。而某些环境要求对直升机的飞行品质影响不大,例如复杂电磁环境等。因此,在进行直

升机飞行品质试飞设计时,应重点考虑野外草地、砂土地、有限面积的区域及斜坡着陆,昼夜间简单及复杂气象条件飞行等环境要求。

2.2 作战任务和作战单元分解

良好的飞行品质是飞行员操纵直升机安全、顺利地完成任务的重要保障,进行直升机飞行品质试飞设计时应从其作战任务的角度出发,将作战任务分解成不同的小作战单元,再将作战单元继续分解成不同的作战指标和飞行品质指标进行验证^[10]。

ADS-33E 规范体现了以作战任务为导向的飞行品质要求和评定的思想,通过进行规范中明确定义的任务科目及其组合的飞行试验,全面评价飞行品质等级,进而评价直升机完成预定作战使命任务的能力。将作战单元组合起来形成直升机的作战任务谱或作战程序,例如,国外某型攻击直升机通过典型任务科目的组合形成的任务程序如表 1 所示^[11]。

表 1 某型攻击直升机任务程序
Table 1 Mission program of one attack helicopter

单元	场 地	作战动作和任务	对应任务科目
1	农场场地中心	在离地 25 ft 的高度悬停、在河谷进行定点悬停转弯	悬停回转
2	沿河谷向北飞行	保持 25~30 ft 的高度、速度 30~50 节,沿弯曲的河谷飞行	障碍滑雪
3	第一个村庄	进入村庄,减速至悬停,然后定点悬停转弯进行建筑物侦察	悬停回转、加速和减速
4	河右岸的第一个灌木丛	转弯至沿河谷做贴地飞行,然后快速减速至悬停并隐蔽于树冠之内	加速和减速
5	河右岸的第一个灌木丛	垂直跃升侦察教堂,然后垂直跃下于树冠之内	垂直机动、垂直隐蔽
6	河右岸的第一个灌木丛	移向右侧,侦察周围地形,然后再回到树冠之内	快速侧移
7	沿河谷向北飞行	从树冠内出发,执行向左快速侧移,快速转弯,然后恢复沿河谷的贴地飞行	快速侧移、悬停回转
8	第二个村庄	快速减速至悬停,隐蔽在建筑物高度之下	加速和减速
9	第二个村庄	垂直跃升侦察教堂,然后垂直跃下至建筑物高度之下,再垂直跃升去接近并搜寻建筑物	垂直机动
10	第二个村庄	转弯并沿河谷快速撤回	悬停回转、加速和减速、障碍滑雪

武装直升机的作战任务主要包括对地攻击和对空攻击。典型的对地攻击任务为:贴地突防飞行,接近敌区后利用地形隐蔽并实施武器攻击,攻击方式包括悬停发射、平飞发射和俯冲发射,完成攻击后进行机动规避并返回。典型的对空攻击任务为:通常采用高摇一摇(水平跟踪后爬升转弯再低头发射空空导弹)攻击敌方直升机,采用低摇一摇(水平跟踪后俯冲转弯再抬头发射空空导弹)攻

击敌方低速固定翼飞机,攻击后机动规避。以典型对地攻击作战任务为例,依据武装直升机对地攻击作战任务的使用要求,按照不同的作战任务阶段,分解为若干个作战任务单元(MTE),再根据执行每个任务单元时对飞行品质的要求进行考核。对地攻击作战任务可以分解为贴地突防机动、武器攻击、战术规避等。贴地突防机动可以继续分解为侧滑进动至悬停、障碍滑雪、急拉杆和急推杆、减速到

冲刺等作战单元,每个作战单元按照规定的指标进行考核。战术规避任务中的垂直隐蔽单元示意图如图3所示,其作战要求如表2所示。

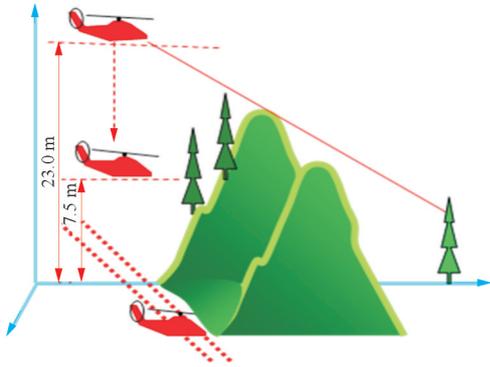


图3 垂直隐蔽作战单元示意图

Fig. 3 Schematic diagram of vertical concealment mission element

表2 垂直隐蔽作战单元性能指标

Table 2 Performance index of vertical concealment mission element

垂直隐蔽性能要求	满意性能	合格性能
在机动科目开始后6 s内,到达多高或更低的高度/m	8	—
在初始稳定悬停、垂直下降及最终稳定悬停期间,相对于地面参考点的纵向和横向位置偏差不应超出的范围/m	± 2.5	± 4
隐蔽之后以及横向移动过程中高度偏差不应超出的范围/m	± 3	$-5 \sim 3$
横向地面轨迹不应超出的范围/m	± 3	± 5
航向偏差不应超出的范围/ $^{\circ}$	± 10	± 15
到达最终悬停位置后多长时间内应实现稳定悬停/s	5	10
机动科目开始后多长时间内建立最终的隐蔽稳定悬停/s	15	25

2.3 飞行品质试飞科目

ADS-33E规范要求使用预估等级和认定等级两种不同的方法来确定直升机的飞行品质等级。预估指标为定量指标,是直升机设计的依据;认定指标为预估指标在实战中的综合应用。预估品质等级可通过计算、仿真和飞行试验获得的飞行品质参数与直升机使用要求的边界值相比较而获得,试飞的目的是验证设计符合性。预估品质等级是从作战任务中分解出来的相互独立的单一指标,其操纵协调问题不能确保所有的任务科目都满足要求^[12]。认定等级由执行贴近作战任务科目的试飞

给出,指标包括任务科目的定量指标与试飞员库珀哈珀评分。认定等级通过完成指定任务单元的工作负荷和任务性能指标获得,虽更贴近实战应用,但有一定的个人主观性。从作战任务角度出发,根据武装直升机的作战任务和使用要求,分别进行预估和认定飞行品质试验,综合评定武装直升机的作战能力。预估飞行品质和认定飞行品质的试飞试验矩阵,即典型对地攻击作战任务的飞行任务单元科目分别如表3~表4所示。

3 飞行品质试飞结果评定

飞行品质试飞结果包括两部分:一是与任务相关的预估飞行品质指标结果,二是反映真实作战能力的认定飞行品质指标结果。预估飞行品质试飞科目的结果按照飞行品质规范要求进行等级评定,该等级作为直升机飞行品质的预估等级。任务科目试飞的飞行品质等级作为武装直升机飞行品质的认定等级。任务科目的等级评定包括定量指标和试飞员的定性评定,即库珀哈珀评分。如果任务科目达到满意的要求,其飞行品质等级按试飞员的库珀哈珀评分确定的等级;如果任务科目仅能达到合格的要求,其飞行品质等级按试飞员的库珀哈珀评分确定的等级降低一级。选取三组不同水平的试飞员进行任务科目试飞,取库珀哈珀评分的平均值作为试飞结果。由于任务科目与武装直升机作战任务和使用要求直接相关,当预估等级与认定等级不一致时,应当以认定等级为准。

有关武装直升机对地攻击任务相关的任务科目试飞认定等级与预估等级一致性分析情况如表5所示,可以看出:减速到冲刺、垂直跃上和跃下、瞬态转弯三个科目的预估等级与认定等级不一致,其他科目均一致;减速到冲刺科目试飞时在高温环境下进行,发动机的功率达不到规范要求,故该科目只能达到合格的性能指标,由于发动机快速加速时排气温度超温情况严重,试飞员难以完成该科目试飞,故库珀哈珀评价较低,该科目的飞行品质等级按认定等级确定;垂直跃上和跃下科目的预估等级有2级,但认定等级为1级,表明等级2的悬停和低速时的总距—偏航耦合对该科目的执行影响较小,该科目的飞行品质等级按认定等级确定;瞬态转弯科目相关的开环条款要求均达到了等级1,但试飞员评价为等级2,该科目的飞行品质等级按认定等级确定。

表 3 预估飞行品质试飞矩阵
Table 3 Predicted flying quality flight test matrix

序号	试飞科目	构 型	飞控状态	高度速度	环境条件
1	悬停和低速平衡特性	对地构型 无外挂构型	FCS 接通和断开	地效内、外高度,0 km/h; 离地 50~100 m,60 km/h	GVE
2	悬停和低速中等周期响应				
3	悬停和低速短期响应		RCAH		
4	悬停和低速姿态敏捷		RCAH ACAH		
5	悬停和低速大幅姿态变化				
6	悬停和低速轴间耦合				
7	悬停和低速总距操纵响应				
8	前飞纵向静稳定性	对地构型 对空构型 无外挂构型	FCS 接通和断开	气压高度 1 000 m,130,200 km/h 和最大巡航速度; 气压高度 3 000 m,130,200 km/h	
9	前飞横侧静稳定性				
10	前飞中等周期响应				
11	前飞短期响应		RCAH ACAH		
12	前飞俯仰操纵功效				
13	前飞滚转姿态敏捷				
14	前飞大幅姿态变化				
15	前飞轴间耦合				
16	滚转一侧滑耦合				

表 4 认定飞行品质试飞矩阵
Table 4 Assigned flying quality flight test matrix

作战任务	包含的 MTE	MTE 动作描述	MTE 目的	对应的开环飞行品质条款
贴地突防	侧滑进动至悬停	近地低速侧滑飞行,至目标点悬停	检验以精确及适当迅猛程度操纵自平移状态过渡到稳定悬停状态的能力	悬停和低速时的平衡特性、中等周期响应特性。
			检查直升机在不利风向中保持精确位置、航向及高度的能力	
	障碍滑雪	平飞开始进行一系列左右平滑转弯	检验前飞中相对于地面目标作迅猛机动的能力	前飞时的横向和航向姿态敏捷、俯仰-滚转耦合、滚转-一侧滑耦合。
			检验前飞时中等迅猛机动中的转弯协调	
			检验前飞时中等迅猛机动中是否有不良的轴间耦合	
	急拉杆和急推杆	平飞开始,对称拉杆获得连续的正过载后,对称推杆过渡到持续的负过载	检验在大过载和小过载情况下以及在大小过载间转换过程中的驾驶品质	前飞时的俯仰操纵功效、机动稳定性、俯仰-滚转耦合。
检验前飞时迅猛机动中俯仰、滚转和偏航是否有不良耦合				
检验在高速贴地飞行中避让障碍物的能力				
武器攻击	垂直跃上和跃下	在山包后悬停隐蔽,突然垂直跃升悬停攻击敌方目标,垂直跃下再次隐蔽	检验垂直阻尼是否适当	悬停和低速时的总距操纵响应、垂直阻尼、总距-偏航耦合。
			检验垂直操纵功效是否适当	
			检验总距操纵与俯仰、滚转及偏航是否有不良耦合	
			检验垂直操纵器特性	
	转向目标	近地完成 180°悬停回转后瞄准	检验在最费力的快速悬停回转中的驾驶品质	悬停和低速时的偏航姿态敏捷、中等周期响应特性。
			检验从快速悬停回转中改出到有足够精度发射武器的能力	
向心回转	近地悬停开始,机头始终指向目标点,绕该点横向移动,回到起始点悬停	检验同时对俯仰、滚转、偏航及垂直轴精确操纵的能力	悬停和低速时的中等周期响应特性、俯仰-滚转耦合、总距-偏航耦合。	
		检验在和风中精确操纵直升机连续改变航向的能力		
		检验在多轴机动中是否有不良的动态特性		
机动规避	瞬态转弯	在低高度大速度开始快速完成 180°转弯后平飞	确认在所有轴上迅猛机动时,品质等级不降低	前飞时的滚转大幅姿态变化、滚转-一侧滑、俯仰-滚转、总距-俯仰耦合。
			检验迅猛机动飞行中俯仰、滚转和偏航之间是否有不良耦合	
	悬停回转	近地悬停开始完成 180°回转	检验在中等迅猛程序的悬停回转中的驾驶品质	悬停和低速时的偏航姿态敏捷、中等周期响应特性。
			检验以合适的精度由悬停回转中改出的能力	
			检验是否有不良的轴间耦合	
垂直隐蔽	悬停开始垂直下降隐蔽,然后迅速侧飞在另一位置悬停	检验完成迅猛垂直下降接近地面的能力	悬停和低速时的总距操纵响应、垂直阻尼、姿态敏捷、俯仰-滚转、总距-偏航耦合。	
		检验综合运用垂向和横向迅猛机动的能力以便在垂直跃升过程中躲避所发现的敌方火力		

表5 对地攻击任务相关的任务科目试飞认定与预估等级
Table 5 Predicted and assigned level of attack ground MTE flight test

作战任务	任务科目	对应的开环飞行品质条款	预估等级	认定等级	一致性	
贴地突防	侧滑进动至悬停	悬停和低速时的平衡特性	1	1	一致	
		悬停和低速时中等周期响应	1			
	障碍滑雪	前飞时的横向和航向姿态敏捷	1	1	一致	
		俯仰—滚转耦合	1			
		滚转—侧滑耦合	1			
	急拉杆和急推杆	前飞时的俯仰操纵功效	2	2	一致	
		机动稳定性	1			
俯仰—滚转耦合		1				
武器攻击	减速到冲刺	前飞时的俯仰操纵功效	2	3	不一致	
		前飞时的俯仰—滚转耦合	1			
		前飞时的总距—俯仰耦合	1			
		前飞时的总距操纵响应	1			
		前飞时的纵向中等周期响应特性	1			
	垂直跃上和跃下	悬停和低速时的总距操纵响应	1	1	不一致	
		悬停和低速时的垂直阻尼	1			
		悬停和低速时的总距—偏航耦合	2			
	转向目标	悬停和低速时的偏航姿态敏捷	1	1	一致	
		悬停和低速时的中等周期响应特性	1			
	向心回转	悬停和低速时的中等周期响应特性	1	2	一致	
		悬停和低速时的俯仰—滚转耦合	1			
		悬停和低速时的总距—偏航耦合特性	2			
	机动规避	瞬态转弯	前飞时的滚转大幅姿态变化	1	2	不一致
			前飞时的机动稳定性	1		
前飞时的滚转—侧滑耦合			1			
前飞时的俯仰—滚转耦合			1			
前飞时的总距—俯仰耦合			1			
悬停回转		悬停和低速时的偏航姿态敏捷	1	1	一致	
		悬停和低速时的中等周期响应特性	1			
垂直隐蔽		悬停和低速时的总距操纵响应	1	1	一致	
		悬停和低速时的垂直阻尼	1			
		悬停和低速时的滚转姿态敏捷	1			
		悬停和低速时的中等周期响应特性	1			
		悬停和低速时的俯仰—滚转耦合	1			
	悬停和低速时的总距—偏航耦合	2				

4 结 论

(1) 依据武装直升机作战使命任务和使用环境要求,将其作战任务构想转化为与作战剖面紧密结合的任务科目,并选取作战使用要求的构型、重

量、飞控、高度、速度等飞行状态进行试飞设计,所得试飞结果体现了该型直升机在真实战场环境下贴地突防和机动规避作战能力。

(2) 依据开环科目预估和任务科目认定的飞行品质试飞结果进行综合评定,是武装直升机飞行

品质试飞评估的进步,它改变了传统的飞行品质试飞评估方式;所获得的飞行品质试飞结果更全面,能真实地反映出武装直升机作战需要的飞行品质特性。

参考文献

- [1] 高正,陈仁良. 直升机飞行动力学[M]. 北京:科学出版社,2003.
Gao Zheng, Chen Renliang. Helicopter flight dynamic[M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)
- [2] ADS-33E-PRF Handling qualities requirements for military rotorcraft[S]. US Army Aviation and Missile Command, Redstone Arsenal, 2000.
- [3] 周自全. 飞行试验工程[M]. 北京:航空工业出版社,2010.
Zhou Ziquan. Flight test engineering[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [4] USNTPS-FTM-No.106 U. S. Naval test pilot school flight test manual-Rotary wing performance[S]. USA: Naval Air Warfare Center Patuxent River, Maryland,1996.
- [5] Ham J A, Butler C P. Flight testing the handling qualities requirements of ADS-33C-lessons learned at ATTC [C]. Proceedings of the 47th Annual National Forum of the American Helicopter Sociefy, Phoenix: 1991.
- [6] Gareth D Padfield. Helicopter flight dynamics[M]. Blackwell Publishing Ltd. , 2007.
- [7] ADS-51-HDBK Rotorcraft qualification handbook[S]. USA: Aviation Research and Development Center, 1996.
- [8] Roger H Hoh, Chris L Blanken. Test guide for ADS-33-E [M]. Aviation and Missile Development and Engineering Center, 2008.
- [9] Alastair K Cooke, Eric W H, Fitzpatrick. Helicopter test and evaluation[M]. Blackwell Publishing Ltd. , 2012.
- [10] American Ferderal Department of Defense. ADS-33E-PRF Performance specification, handling qualities requirements for military rotorcraft[S]. USA: US Army Aviation System Command, 1999.
- [11] Christensen K T, Campbell K G. Flight control development for the ARH-70 armed reconnaissance helicopter program[C]. American Helicopter Society 63rd Annual Forum, Virginia Beach, VA, 2007.
- [12] Fletcher J W, Cherepinsky I. UH-60M upgrade fly-by-wire flight control risk reduction using the RASCAL JUH-60A in-flight simulator[C]. American Helicopter Society 64th Forum, Montreal, Canada, 2008.

作者简介:

张宏林(1979—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:直升机飞行品质试飞技术。

(编辑:马文静)