航空科学技术
Aeronautical Science & Technology
May. 25 2019 Vol. 30 No.05 42-45

修正人-机耦合的直升机轴间耦合试飞技术

田磊*，张超，杨文凤
中国飞行试验研究院，陕西 西安 710089

摘　要：轴间耦合指标是直升机飞行品质的重要指标。本文结合某型直升机的飞行试验，对直升机人-机耦合条件下的轴间耦合的特性进行了分析。通过模型辨识及数值分析，提出了一种基于模型的轴间耦合试飞方法。通过飞行试验证明该方法可有效获得人-机“开环”条件下的轴间耦合定量指标，对直升机轴间耦合的指标考核和品质试飞具有一定的指导意义。

关键词：直升机；飞行品质；参数辨识；轴间耦合

中图分类号：V212.4　　**文献标识码**：A　　DOI：10.19452/j.issn1007-5453.2019.05.008

直升机轴间耦合是指直升机在某一轴上的操纵输入所产生的其他轴上的响应。轴间耦合使直升机产生不期望的响应，影响执行任务的精确性，并使驾驶操纵复杂化，增大飞行员的工作负荷，是损害直升机飞行品质的主要因素之一。但是由于直升机旋翼既是升力面又是操纵面，加之旋翼的摆振和挥舞的运动特点，直升机操纵响应的轴间耦合是必然存在的[1]。为了使直升机具有良好的飞行品质，必须在设计上及飞控系统中采取有效措施予以限制。因此，在直升机的控制律设计调参及试飞验证中，必须将解耦控制作为考虑重点。

目前，国内针对直升机轴间耦合控制律的设计及优化的研究有许多，但主要集中在理论模型及数值仿真等方面[2-4]，而很少考虑实际飞行中人-机耦合对直升机轴间耦合特性的影响。本文结合实际型号飞行试验，基于直升机的姿态响应模型，对直升机人-机耦合条件下的轴间耦合特性进行了研究，对后续直升机轴间耦合的控制律调参及飞行试验具有重要意义。

1 规范要求

滚转引起的俯仰耦合和俯仰引起的滚转耦合是直升机一种典型的耦合类型，在大幅机动中这种不期望的耦合响应往往需要飞行员分配注意力去修正，增大飞行员工作负荷。国内轴间耦合的飞行试验考核主要依据GJB 902—1990及GJB 902B—2017飞行品质规范。在GJB 902—1990中，对轴间耦合仅规定了定性的要求，无具体指标要求[5]。GJB 902B—2017飞行品质规范是我国最新的飞行品质规范，该规范相比GJB 902—1990更加强调现代直升机飞行试验考核特点。本文主要根据GJB 902B—2017规范中的条款要求，对直升机轴间耦合特性进行分析。

GJB 902B—2017军用直升机飞行品质规范中对滚转引起的俯仰和俯仰引起的滚转耦合提供了纵向和横向响应之间交叉耦合程度的明确要求。通过测量离轴响应峰值与本轴上响应峰值之比对直升机的轴间耦合程度进行定量考核。在突然施加纵向（横向）阶跃操纵之后4s内，异轴偏离配平的姿态变化量的峰值与操纵轴在第4s的姿态变化量之比，即$\Delta\phi_{pk}/\Delta\theta_4$（$\Delta\theta_{pk}/\Delta\phi_4$），等级1要求不应超过±0.25；等级2要求不应超过±0.60[6]。

2 飞行试验与结果分析

以某型直升机为试验机，进行轴间耦合特性飞行试验。该型机安装有数字式飞控系统，飞行员通过操纵中央周期变距杆将采集的飞行员操纵指令、直升机响应等信号传递

收稿日期：2019-02-28；退修日期：2019-03-08；录用日期：2019-04-15
*通信作者. Tel.：13484472690　　E-mail：461413609@qq.com
引用格式：Tian Lei, Zhang Chao, Yang Wenfeng. Modified helicopter man-machine inter-axis coupling flight test technology[J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(05): 42-45. 田磊，张超，杨文凤. 修正人-机耦合的直升机轴间耦合试飞技术[J]. 航空科学技术，2019，30(05)：42-45.

给计算机，飞控计算机处理后会计算出适当的指令控制舵机运动对直升机耦合进行补偿，实现对直升机的飞行状态控制，这样就可以在不同飞行状态下均具有良好的解耦操纵效果[7]。

试验选取起飞重量（质量）为基本设计重量，试验高度选择为地效外，在直升机稳态配平状态下进行推、拉杆快速纵向阶跃操纵输入，要求阶跃动作的持续时间不大于0.2s、操纵幅值为2~3cm，为了获得稳定的姿态角，动作时间一般选择保持4~6s。试验过程中可通过改变幅值来获得不同大小的俯仰角改变量。

图1和图2为直升机阶跃操纵输入下的轴间耦合试飞响应曲线，图中前推杆为正，左压杆为正，图1为推杆阶跃轴间耦合响应结果，图2为拉杆阶跃轴间耦合响应结果。其中实线代表本轴的俯仰参数，虚线代表离轴的滚转参数，该曲线表征了典型的直升机轴间耦合响应。基于上述输入方法重复多次后得到直升机的轴间耦合飞行试验结果为表1中修正前试验结果。

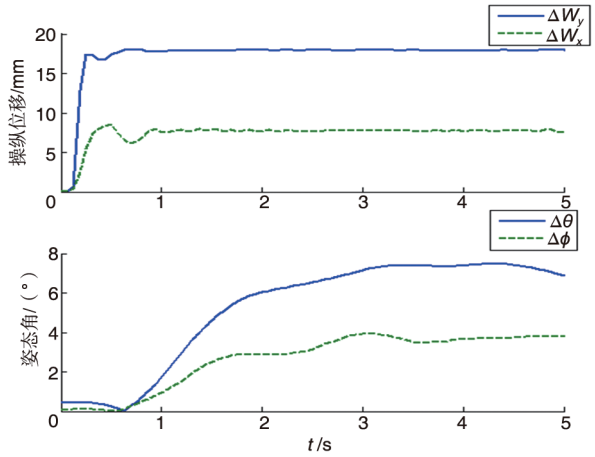

图1 推杆直升机轴间耦合响应曲线

Fig.1 The inter-axis coupling response curve of helicopter with pushing

由图1、图2及表1可知，在直升机轴间耦合试飞过程中，前推杆易形成左压杆，后拉杆阶跃过程中易形成右压杆，修正前直升机轴间耦合试飞结果0.09~0.53，结果存在较大的差异，难以对直升机轴间耦合特性进行定量评估。对应幅值关系见表1，离轴输入幅值比最小16%，最大达到47%。这主要是由于人体对于中央周期变距杆的位置关系导致的，而ACAH响应本质上是围绕着姿态响应的指令回路，直升机产生的姿态响应与操纵位移成比例输入。但在实际飞行试验中，由于飞行员缺乏对单轴快速操纵控制的位移感示，难以区分俯仰和滚转的操纵输入，易产生输入耦合。国外研究表明，对于直升机可以通过飞控系统设置不同方向的控制输入比例来减小输入耦合，但彼此之间的比例需要大量经验数据支撑[8]。

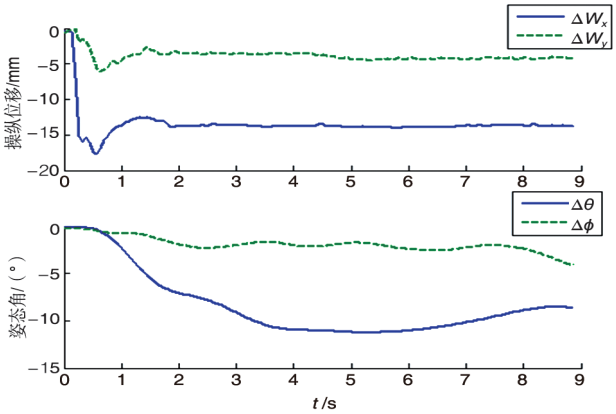

图2 拉杆直升机轴间耦合响应曲线

Fig.2 The inter-axis coupling response curve of helicopter with pulling

表 1 直升机轴间耦合试飞结果

Table 1 The result of helicopter inter-axle coupling

序号	$\Delta\theta_{min}$/(°)	$\Delta\phi_{pk}/\Delta\theta_4$		$\frac{\Delta Wx}{\Delta Wy}$
		修正前“闭环”结果	修正后“开环”结果	
1	6.32	0.09	0.07	0.22
2	7.78	0.26	0.10	0.16
3	5.98	0.17	0.13	0.30
4	5.75	0.26	0.10	0.32
5	5.18	0.53	0.15	0.47

为消除人—机耦合操纵对直升机轴间耦合特性的影响，本文根据直升机的响应特性，选取单自由度二阶等效系统对直升机姿态响应进行建模，获得阶跃条件下直升机响应方程与姿态响应。以纵向为例，如式(1)所示：

$$\Delta\theta(s)=\frac{M_{Wy}\cdot\Delta Wy}{s^2-M_q s-M_\theta} \tag{1}$$

即：

$$M_q=-1/T_s$$
$$M_\theta=-K_pK_\delta/T_s$$
$$M_{Wy}=K_pK_\delta K_s$$

式中：K_p为反馈增益；K_s为前馈增益；T_s为角速率响应时间常数；k_δ为速率响应增益。单位阶跃条件下直升机响应方程与姿态响应对应关系的推导已在之前的研究中做过详细的论述[9,10]。将实际轴间耦合飞行试验中的离轴输入代入理论模型，通过模型辨识可得到直升机轴间耦合飞行试验

中人–机输入耦合造成的离轴姿态响应。将得到的人–机输入耦合响应结果代入实际直升机耦合响应曲线，根据所得离轴响应对实际飞行试验结果进行修正，即可得到消除人–机耦合后实际“开环”直升机轴间耦合特性结果，具体流程如图3所示。修正处理后结果如表1及图4所示，修正后直升机轴间耦合试飞结果为0.07~0.15，达到直升机轴间耦合等级1的要求。相比修正前试验结果，修正后轴间耦合结果明显具有较高的一致性，满足“开环”条件下直升机轴间耦合考核要求。

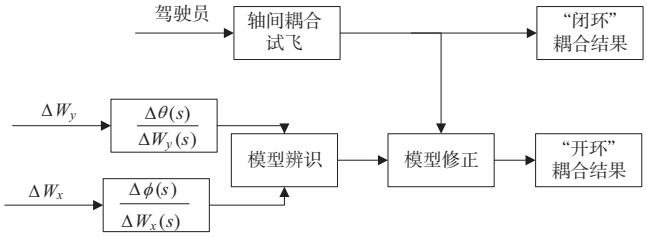

图3 直升机轴间耦合试飞修正流程

Fig. 3 The modified flight test process of helicopter inter-axis coupling

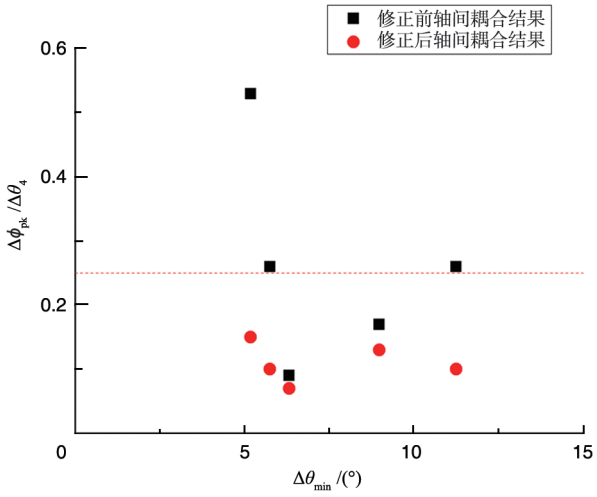

图4 直升机轴间耦合试飞结果

Fig.4 The flight result of helicopter inter-axis coupling

3 结论

本文结合飞行试验结果，对直升机的轴间耦合特性进行了分析，可以得到以下结论：

(1)给出了人–机耦合在直升机轴间耦合特性试飞过程中的操纵响应，指导直升机的解耦控制律调参，直升机解耦应适当考虑人–机耦合的因素。

(2)给出了基于直升机响应模型的轴间耦合试飞技术，通过飞行试验对该方法的有效性进行了验证。试验结果表明该方法可以最大化消除因操纵带来的耦合响应，给出人–机“开环”条件下的直升机耦合特性，对直升机轴间耦合特性的试飞验证具有指导意义。

参考文献

[1] 高正，陈仁良. 直升机飞行力学[M]. 北京：科学出版社,2003.
Gao zheng, Chen Renliang. Helicopter flight dynamics [M]. Beijing: Science Press,2003. (in Chinese)

[2] 刘宇亮, 卢京潮. 基于ADS–33E的直升机解耦控制律设计与仿真[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(3):723-726.
Liu Yuliang, Lu Jingchao. Helicopter decoupling control law design and simulication based on ADS–33E[J]. Computer Measurement & Control,2014, 22(3):723-726.(in Chinese)

[3] Wang Haowen, Gao Zheng. A new eromech - anical stability analysis methodologu for coupled rotor / fuselage system of helicopters[J]. Transactions of Nanjing University of Aero - nautics & Astronau,2001(01):47-52.

[4] 宋庆国. 直升机悬停及低速飞行阶段轴间耦合试飞技术[J]. 飞行力学, 2004, 22(3): 69-72.
Song Qingguo. Research on flight test technique for the armed helicopter inter-axis coupling during Hover & Low speed phases[J]. Flight Dynamics,2004,22(3) :69-73. (in Chinese)

[5] 国防科技工业委员会.GJB 902—1990 军用直升机飞行品质规范 [S]. 北京：国防科工委军标出版发行部,1990.
National Defense Science and Technology Commission. GJB 902—1990 Military helicopter flying qualities specification [S]. Beijing: National Defense Military Standard Publishing Department, 1990. (in Chinese)

[6] 中央军委装备发展部.GJB 902B—2017 军用直升机飞行品质规范 [S]. 北京：国家军用标准出版发行部,2017.
Equipment Development Department of the Central Military Commission. GJB 902B–2017 Military helicopter flying qualities specification [S] . Beijing:National Military Standards Publishing and Distribution Department,2017. (in Chinese)

[7] 宋翔贵. 电传飞行控制系统[M]. 北京：国防工业出版社, 2003.
Song Xianggui. Fly-By-Wire flight control system[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2003. (in Chinese)

[8] Mouritsen S. Investigation of the effects of pitch-roll (De)

coupling on helicopter handling qualities[R]. Moffett Field: Army Aviation Research and Technology,1995.

[9] 田磊, 张宏林, 朱宇. 基于参数辨识的直升机姿态敏捷试飞技术[J]. 飞行力学, 2017, 35(3):85-88.
Tian Lei, Zhang Honglin, Zhu Yu. Parameter identification based helicopter attitude agility flight test technology [J]. Flight Dynamics，2017，35（3）：85-88.（in Chinese）

[10] 田磊, 张宏林, 杨文凤. 直升机滚转侧滑耦合的响应分析[J]. 航空科学技术, 2018,29(1)：63-66.
Tian Lei, Zhang Honglin, Yang Wenfeng. Response analysis of helicopter rolling sideslip coupling[J]. Aeronautical Science & Technology, 2018，29 (1) :63-66.（in Chinese）

（责任编辑 王为）

作者简介

田磊（1988— ）男，硕士，工程师。主要研究方向：直升机试飞技术。
Tel：13484472690
E-mail：461413609@qq.com

Modified Helicopter Man-machine Inter-axis Coupling Flight Test Technology

Tian Lei*, Zhang Chao, Yang Wenfeng
Chinese Flight Test Establishment, Xi' an 710089, China

Abstract: Inter-axis coupling index is an important indicator for helicopter flight quality. Combined with the result of the helicopter flight test, this paper presented a research of the helicopter and studied the helicopter inter-axis coupling under the condition of man-machine. Through model identification and numerical analysis, an inter-axis coupling model-based flight test method was proposed. Flight tests show that this method can effectively obtain the quantitative indexes of inter-axis coupling under the condition of man-machine "open-loop". It provides a guidance for the helicopter inter-axis coupling and flight quality test.

Key Words: helicopter; flight quality; parameter identification; inter-axis coupling

Received: 2019-02-28； **Revised:** 2019-03-08； **Accepted:** 2019-04-15
***Corresponding author.Tel. :** 13484472690 **E-mail:** 461413609@qq.com