

多旋翼飞行器飞行品质标准 研究报告

V1.0

资助单位：深圳市市场监督管理局

编制单位：深圳市标准技术研究院

2020年09月

—————本文受深圳标准领域专项资金资助—————

目录

1	研究背景.....	1
1.1	多旋翼飞行器.....	1
1.2	操控品质研究意义.....	3
1.3	国内外研究现状.....	4
1.3.1	无人机飞行品质规范.....	4
1.3.2	多旋翼飞行器操控品质规范研究.....	4
2	研究目标与研究内容.....	5
2.1	研究目标.....	5
2.2	研究内容.....	5
3	多旋翼飞行器飞行品质标准状况与需求分析.....	6
3.1	总体概况.....	6
3.2	多旋翼无人机标准.....	6
3.3	飞行品质标准.....	11
3.4	多旋翼飞行器企业对飞行品质标准的需求.....	13
4	四旋翼飞行器操控品质框架设计.....	13
4.1	评价内容选取.....	13
4.2	不同等级定义.....	14
5	预估评价指标和等级划分.....	17
5.1	预估评价指标选取.....	18
5.1.1	小幅/高频姿态变化指标——带宽和相位滞后.....	18
5.1.2	中幅/中低频姿态变化指标——快捷性指标.....	19
5.1.3	纵横向轴间耦合要求.....	19
5.2	预估评价指标等级划分.....	19
5.2.1	小幅/高频姿态变化指标等级划分.....	20
5.2.2	中幅/低频姿态变化指标等级划分.....	30
5.2.3	纵横向轴间耦合指标等级划分.....	36
5.3	评分表设计及预估评价流程总结.....	38
6	认定评价试验.....	40
6.1	认定评价试验评级原则.....	40
6.2	任务科目基元飞行试验.....	42
6.2.1	悬停.....	42
6.2.2	加速和减速.....	43
6.2.3	转向目标.....	44
6.3	评分表设计与认定评价流程.....	45
7	四旋翼飞行器操控品质评价流程.....	47
7.1	四旋翼飞行器操控品质评价流程.....	47
7.2	某四旋翼飞行器操控品质评价示范.....	48
7.2.1	待测四旋翼平台.....	48

7.2.2 飞行数据采集	49
7.2.3 数据分析与处理	52
7.2.4 认定评价飞行试验与评级	55
8 研究工作总结及后续工作建议	56

图

图 1-1 多旋翼飞行器飞行原理示意图	2
图 4-1 Cooper-Harper 等级认定准则	16
图 5-1 带宽和相位滞后获取方式	19
图 5-2 仿真软件设置界面	21
图 5-3 俯仰通道模型	22
图 5-4 设置开环输入点	22
图 5.5 设置开环输出点	22
图 5-6 辨识出的波特图	23
图 5-7 替换控制模型	23
图 5-8 3D 飞行界面	24
图 5-9 小幅姿态变化数据散点图	25
图 5-10 小幅姿态变化等级图	26
图 5-11 小幅姿态变化数据采集模型	26
图 5-12 遥控器模块	27
图 5-13 数据采集部分	27
图 5-14 CIFER 软件界面	28
图 5-15 频域响应图	29
图 5-16 辨识结果与等级图比对	30
图 5-17 $\Delta\theta_{pk}$ 和 $\Delta\theta_{min}$ 获取方式	30
图 5-18 俯仰通道模型	31
图 5-19 观测点设置	31
图 5-20 $\Delta\theta$ 和 q 的仿真曲线	32
图 5-21 仿真数据散点图	34
图 5-22 中幅姿态变化等级图	34
图 5-23 中幅姿态变化数据采集模型	35
图 5-24 飞行数据与等级图比对	36
图 5-25 轴间耦合数据采集模型	37
图 6-1 悬停飞行试验俯视图	42
图 6-2 悬停飞行试验飞控手视角图	43
图 6-3 加速减速飞行试验	44
图 7-1 操控品质评价流程图	47
图 7-2 Intel “Aero Ready to Fly Drone”	49
图 7-3 飞行日志数据文件	49
图 7-4 一次中幅姿态变化	51
图 7-5 一次轴间耦合	52

图 7-6 FRESPIID 频域辨识界面	53
图 7-7 CIFER 软件辨识结果	53
图 7-8 中幅姿态变化指标等级比对	54

表

表 4-1 部分多旋翼飞行任务科目基元	14
表 5-1 MATLAB 系统辨识获得的数据	24
表 5-2 各实验 CIFER 辨识结果	29
表 5-3 中幅姿态变化仿真数据	32
表 5-4 仿真飞行数据	35
表 5-5 轴间耦合指标和等级	37
表 5-6 不同类型四旋翼对预估评价的要求	38
表 5-7 预估评价评分表	38
表 6-1 各类型四旋翼对应任务科目基元	41
表 6-2 悬停飞行试验参考标准	43
表 6-3 加速减速飞行试验参考标准	44
表 6-4 转向目标参考标准	45
表 6-5 认定评价评分表	45
表 7-1 采集到的部分小幅姿态变化数据	50
表 7-2 采集到的部分中幅姿态变化数据	50
表 7-3 采集到的轴间耦合数据	52
表 7-4 中幅姿态变化指标	54
表 7-5 轴间耦合指标	55
表 7-6 悬停飞行试验评价	55

1 研究背景

1.1 多旋翼飞行器

多旋翼飞行器也称为多轴飞行器，是直升机的一种，它通常有3个以上的旋翼。飞行器的机动性通过改变不同旋翼的扭力和转速来实现。相比于传统的单水平旋翼直升机，它构造精简，易于维护，操作简便，稳定性高且携带方便。多旋翼飞行器相较于其它无人机飞行器具有得天独厚的优势，与固定翼飞机相比，它具有可以垂直起降，可以定点盘旋的优点；与单旋翼直升机相比，它没有尾桨装置，因此具有机械结构简单、安全性高、使用成本低等优点。常见的多旋翼飞行器，如：四旋翼，六旋翼和八旋翼，被广泛用于影视航拍、安全监控、农业植保，电力巡检等领域。在消费级领域，四旋翼无人机飞行器居多，主要是体积小，效率高，在工业级领域，六旋翼，八旋翼无人机飞行器则比较常见。本文的研究无特别说明，都以四旋翼飞行器为例为主体进行描述说明。

多旋翼飞行器主要由机架、电机、电调和桨叶组成，为了满足实际飞行需要，一般还需配备电池、遥控器及飞行辅助控制系统。多旋翼飞行器通过调节多个电机转速来改变螺旋桨转速，实现升力的变化，进而达到飞行姿态控制的目的。以四旋翼飞行器为例，飞行原理如下图1-1所示，电机1和电机3逆时针旋转的同时，电机2和电机4顺时针旋转，因此飞行器平衡飞行时，陀螺效应和空气动力扭矩效应全被抵消。与传统的直升机相比，四旋翼飞行器的优势：各个旋翼对机身所产生的反扭矩与旋翼的旋转方向相反，因此当电机1和电机3逆时针旋转时，电机2和电机4顺时针旋转，可以平衡旋翼对机身的反扭矩。

多旋翼无人机飞行器在飞行过程中需要不断地调整各个旋翼产生的升力来保持飞行姿态的平稳。常用改变升力的方式有两种。一种是发动机转速恒定，通过调整螺旋桨的螺距改变升力，称为变桨距方式；另一种是螺旋桨的螺距恒定，通过调整发动机转速改变升力，称为调速方式。变桨距，也称为变距、调距：优点是响应速度快。缺点是需要复杂的机械结构来调整桨距，造价成本高，维护费用也高。调速，也称为变转速、变速。优点是机械结构简单，调速多发直驱方式无传动结构，发动机直接驱动螺旋桨。造价成本较低，维护费用低。缺点是响应速度较慢。

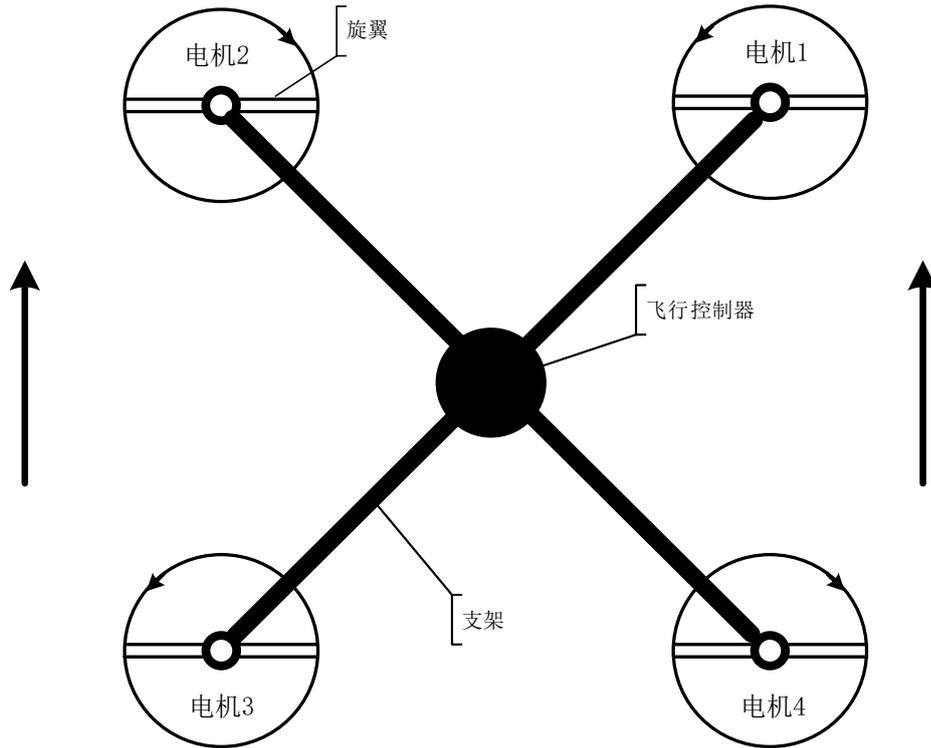


图 1-1 多旋翼飞行器飞行原理示意图

飞行品质始终是设计和操控方面最重要的问题，其在飞行器的设计、研发和使用过程中，始终有着举足轻重的作用。为了完成既定飞行任务，同时保障安全，好的飞行品质必不可少。无人机飞行品质的研究一直滞后于无人机的发展，随着无人机的迅猛发展，无人机的飞行品质研究工作根本得不到并行发展；而且多旋翼飞行器更是因其自身特点使得对其飞行品质的研究更为困难，对其评价体系的建立并不同于普通无人机。

1911年，《飞行稳定性》发表后，气动焦点应当在飞机重心之后才逐渐被人们知晓，确保了飞行的安全。最早的飞机规范等文件没有指导如何进行飞行器的设计。随后美国开始飞机飞行品质的研究，并于1943年发布了《飞机良好飞行品质要求》，随后又不断改进，推出MIL-F-8785文件（《Military Specification Flying Qualities Of Piloted airplanes》），这是美国空军有人驾驶飞机飞行品质规范。之后，飞机模态参数、Cooper-Harper等级量表等重要概念也不断被收录进规范性文件中。AFFDL-TR-76125文件（《无人机飞行品质设计规范》）是无人机飞行品质设计标准，但是其内容大多根据有人驾驶飞机的飞行品质规范修改而成，所以无人机难以完全适用。各类无人机中的多旋翼无人机，其机身结构和飞行方式虽然与旋翼机相近，但它与有人驾驶飞机的设计理念、研制周期、任务目标等方面差别巨大，有人驾驶飞机的飞行品质规范无法合

理反映出多旋翼飞行器的内在特征。国内外已经发布了多个飞行器飞行品质规范，其中，旋翼机中引用最多的是美军旋翼机飞行品质规范性文件ADS-33，而多旋翼飞行器的飞行品质规范尚未形成正式标准。近年来，多旋翼无人机发展迅速，并出现了许多高性能的多旋翼无人机。从每年举办的中国无人机展上，我们可以看到，从2014年开始，多旋翼无人机也已成为主流产品。虽然多旋翼无人机发展迅速，但也对其安全性、稳定性和操纵性提出了相应的要求，人们需要一个科学统一的检验标准以计算和提升多旋翼的稳定性和操纵性，需要科学统一的评价体系对四旋翼操控性能进行评价，以选择出合适的多旋翼产品，同时为多旋翼设计人员提供设计指导，以保障产品质量。

1.2 操控品质研究意义

多旋翼操控品质评价体系研究对于多旋翼工程设计及品质提升方面有着十分重要的作用。飞行品质主要是指飞行器的稳定性与操控性，在设计、研发、测试和使用中有非常重要的规范和指导作用。而飞行品质规范发展缓慢，对于无人机相关的飞行品质，特别是多旋翼飞行器飞行品质至今仍没有完善的系统理论和实践依据。飞行器在飞行过程中，会关涉到很多参数如平衡性、稳定性、操控性等，对于多旋翼飞行器来说，飞行器在操作人员的操纵下从一种飞行状态过渡到另一种飞行状态的能力即其操控性尤为重要。

飞行器操控品质的研究已有百年多历史，随着飞行器发展和对飞行器安全性、稳定性、操控性等方面要求的提高，操控品质评价及规范应运而生且不断改进发展，在飞行器设计过程及验收过程中，我们需要一套合理、完整、统一的规范标准用以参考、评价、以及提供改进方向。而近期发展迅速的多旋翼无人机目前在操控品质研究方面空白较多，需要提供一个完整且思路合理正确的多旋翼无人机操控品质评价框架雏形，以建立一个完整的评价体系，此评价规范可由他人丰富完善内容，不断改进。

其次，操控品质评价规范包含了多旋翼飞行器控制系统特性众多方面的规范要求，比如，姿态改变、响应类型、失效确定等，这些规范要求的详细系统特性参数在工程设计人员设计所需多旋翼时可以提供可信的参考标准，设计人员为得到所设计多旋翼正常飞行时响应参数可能会需要多次试验，会花费大量的时间和繁杂劳动，操控品质评价规范建立后可节省大量时间人力成本，而且，工程设计人员经由仿真和计算得到自己设计多旋翼的相应参数后，可通过与操控品质评价规范中对应参数对比得知所设计多旋翼是

否达到预期目标要求，从而决定是否要改进自身多旋翼设计。

再者，在多旋翼飞行器验收过程中，人们需要科学、统一的评价标准来区分鉴别多旋翼飞行器操控品质的好坏并判断其能否完成期望任务要求，在多旋翼飞行器操控品质规范研究中，根据 Cooper-Harper 等级评价准则建立完整认定评价规范，并详细规定了评价试验过程与评价等级线，通过详细的规范以明确得到多旋翼飞行操控的难易与好坏程度，以提升多旋翼产品品质。

1.3 国内外研究现状

1.3.1 无人机飞行品质规范

飞行品质主要指飞行器的稳定性与操纵性，在设计、研发、测试和使用中拥有非常重要的规范和指导作用。与无人机的繁荣发展形成鲜明对比的是，无人机飞行品质规范发展缓慢，无人机飞行品质的评价很大程度上依赖于有人驾驶飞机的飞行品质规范标准。当前仅有无人机飞行品质规范文件 AFFDL-TR-76125，这部美国空军制定的规范仍然依赖于 MIL-F-8785B 文件，难以适应当前和今后无人机的发展需要，而无人机中更为特殊的多旋翼无人机更难适用。我国无人机飞行品质评估主要采用 GJB-185-86 有人驾驶飞机（固定翼）飞行品质和国外的一些有人机的规范，尚未有适合的专门的标准规范。

无人机按照操控模式分为遥控与自控两种，建立了由操纵直接输入到飞行状态输出的系统模型，于此研究了飞行品质计算评价方法，其研究多是基于固定翼类无人机，虽然对多旋翼飞行器操控品质研究没有直接的影响作用，但其改进了基于任务科目基元（MTE）的飞行品质评价策略，提出的基于 MTE 品质表的飞行品质等级评价方式值得借鉴。

1.3.2 多旋翼飞行器操控品质规范研究

早在上个世纪中叶，多旋翼飞行器就已经受到了海外一些研究机构的瞩目，中国国内对多旋翼无人机的开发起步较晚。

目前，国内外有已许多飞行器飞行品质的相关研究，比如，基于 ADS-33 文件，直升机技术研究专家陈仁良（南京航空航天大学教授、博士生导师）等人建立了带宽和相位滞后、动稳定性及快捷性计算模型，给出了样例直升机纵向通道的操纵性品质等级计算，但并没有对无人飞行器的飞行品质规范提出正式标准，而无人飞行器中的多旋翼飞行器更无完整统一的评价规范，仅有部分较为分散的规范内容，且大都基于美军新航标

ADS-33E-PRF。飞行控制技术专家裴少俊等人通过对 ADS-33E-PRF 文件进行了适用性裁剪，并用这些指标评估了待测无人飞行器纵向俯仰通道悬停低速段的飞行品质，该无人机飞行器飞行品质特性研究与多旋翼飞行器关联较大，不过文章仅从预估评价方面进行了研究，并没有建立完整的多旋翼飞行器操控品质评价体系。

从以上调研情况可见，国内外针对多旋翼飞行器的操控品质研究空白较多，建议参考已有的成熟的飞行品质规范，根据相关评价思想与框架，建立适合多旋翼飞行器操控品质的评价体系，相比于固定翼飞行器，旋翼机与多旋翼无人机的飞行任务及飞行原理更为相近，因而可以根据美军旋翼机飞行品质规范文件 ADS-33 中的评价思想，建立适合多旋翼无人机的评价规范。

2 研究目标与研究内容

2.1 研究目标

研究旋翼机飞行品质规范标准，参考并建立完整四旋翼操控品质评价体系，测定获取部分评价内容等级指标并实际检验。

2.2 研究内容

1. 以四旋翼飞行器为研究代表，研究四旋翼飞行器操控品质框架建立：确定评价内容及评价等级划分，试验内容确立。

2. 选择评价指标。确定预估评价的指标，四旋翼飞行器的操纵性不可仅用灵敏度和反应时差来评价，转而使用带宽、相位滞后和快捷性等指标代替二者来评价四旋翼飞行器的操纵性能；认定评价的指标确定，比如用悬停时漂移的最大距离作为悬停试验的评价指标。

3. 获取指标。使用实验室建立的成熟多旋翼模型和半物理仿真平台进行试验，通过修改多旋翼控制器模型参数，得到不同控制响应，根据不同参数的仿真飞行效果进行等级划分，得到预估评价各指标不同等级划分的具体参数数值；多名飞控手根据以往操控经验，确立认定评价各指标不同等级划分的具体参数数值。最后通过仿真和实际试飞比对多旋翼飞行器的预估等级和认定等级，考虑两者产生差异的原因，再进行修改预估评价对应指标等级划分的参数数值。

4. 根据获得的预估评价等级指标和认定评价等级指标，综合出完整的多旋翼操控品

质评价体系流程。

3 多旋翼飞行器飞行品质标准状况与需求分析

3.1 总体概况

对无人机方面的飞行品质标准，从公开资料发现，关于无人机飞行品质的评估、规范、标准方面，主要都是在固定翼无人机方面的规范标准，尚未发布有针对多旋翼无人机和/或多旋翼飞行器的飞行品质和/或操控品质的相关标准规范。

无人机飞行品质规范发展缓慢，无人机飞行品质的评价很大程度上依赖于有人驾驶飞机的飞行品质规范标准。无人机飞行品质计算评价方法，研究多是基于固定翼无人机，目前规范标准并不能套用而适用于多旋翼无人机，但基于任务科目基元（MTE）的飞行品质评价策略，和基于 MTE 品质表的飞行品质等级评价方式值得借鉴。

美国空军于 1943 年 8 月颁发了他们第一部飞行品质规范。随后经多次修订，于 1980 年颁布了目前使用的军用飞机飞行品质规范（MIL-F-8785C）。现在英国、俄罗斯、法国、德国、瑞典等都制定了各自的军用飞机飞行品质规范，而对民用飞机则往往在适航性条例中有专门章节阐述其飞行品质要求。我国于 1972 年开始了研究飞行品质规范的编制工作，1982 年颁布了《军用飞机飞行品质规范（试用本）》，1986 年又颁布了国家军用标准《有人驾驶飞机（固定翼）飞行品质》。随着飞机飞行性能的不不断提高以及飞机操作系统日趋复杂（例如引入动力器、增稳装置、人工阻尼器、电传操纵系统等），对飞机飞行品质提出许多新的要求，因此飞行品质规范也要不断地增加以补充和修订。

3.2 多旋翼无人机标准

多旋翼无人机目前已公开发布的标准包括如下，包括国标、行标和团体标准，这些标准规范中并未发现有关于飞行品质相关的标准规范内容。

- DB 50/T 638-2015 农用航空器 电动多旋翼植保无人机

发布日期：2015-12-10，实施日期：2016-01-01

适用范围：本标准规定了农用航空器电动多旋翼植保无人机的一般要求、飞行性能要求、喷洒系统要求、安全性要求、试验方法、检验规则、标志、包装、运输和贮存的要求。

本标准适用于电动多旋翼植保无人机（其喷洒系统不含药液搅拌任务装置）

- **GA/T 1411.3-2017 警用无人驾驶航空器系统 第3部分：多旋翼无人驾驶航空器系统**
发布日期：2017-08-28，实施日期：2017-08-28
适用范围：本部分规定了多旋翼无人驾驶航空器系统的术语和定义、分类和代号、技术要求、试验方法、检验规则、包装、运输及贮存。
本部分适用于多旋翼无人驾驶航空器系统的研制、检验和订购。
- **GA/T 1382-2018 基于多旋翼无人驾驶航空器的道路交通事故现场勘查系统**
发布日期：2018-03-26，实施日期：2018-03-26
适用范围：本标准规定了基于多旋翼无人驾驶航空器的道路交通事故现场勘查系统的组成、技术要求、试验方法、检验规则等。
本标准适用于基于多旋翼无人驾驶航空器的道路交通事故现场勘查系统。
- **HB 8566-2019 多旋翼无人机系统通用要求**
发布日期：2019-12-24，实施日期：2020-07-01
适用范围：本标准规定了多旋翼无人机系统的性能、通用质量特性和验证等通用要求。
本标准适用于多旋翼无人机系统（以下简称多旋翼无人机）及部件的设计、制造、使用和维护。
- **GB/T 38058-2019 民用多旋翼无人机系统试验方法**
发布日期：2019-10-18，实施日期：2020-05-01
适用范围：本标准规定了民用多旋翼无人机系统及部件的试验方法。
本标准适用于民用轻小型（最大起飞重量在 150kg 以下）电动多旋翼无人机系统（以下简称无人机系统）及部件的设计、制造、检测和认证等；其他类型无人机系统亦可参照执行。
- **GB/T 38997-2020 轻小型多旋翼无人机飞行控制与导航系统通用要求**
发布日期：2020-07-21，实施日期：2021-02-01
适用范围：本标准规定了轻小型多旋翼无人机（以下简称“无人机”）飞行控制与导航系统的通用要求、验证试验及标识、包装、运输和贮存要求。
本标准适用于轻小型多旋翼无人机（起飞重量在 0.25kg~150kg 之间）的飞行控制与导航系统涉及与制造。其他无人机飞行控制与导航系统可参照执行。

- **T/SZUAVIA 005-2017 消防用多旋翼无人机系统技术要求**
发布日期：2017-07-21，实施日期：2017-08-10
适用范围：本标准规定了消防用多旋翼；无人机系统的术语和定义、功能要求、性能要求，环境适应性、安全性、电磁兼容，是设计、制造和检验消防用多旋翼无人机系统的基本依据。
本标准适用于消防用多旋翼无人机系统的设计、制造、运输、贮存、使用等过程。
- **T/SHFIA 000003-2018 消防用投送式多旋翼灭火无人机系统技术规范**
发布日期：2018-11-15，实施日期：2018-12-28
适用范围：本规范适用于电动力消防用投送式多旋翼灭火无人机系统，投送方式包括水平投送和垂直投送。
本标准是“消防用投送式多旋翼灭火无人机系统”通用技术标准。规定了“消防用投送式多旋翼灭火无人机系统”相关的术语和定义、分类，规定了“消防用投送式多旋翼灭火无人机系统”采用的消防无人机平台、控制站的技术要求和检验方法、评定规则等。
- **T/SZUAVIA 010-2019 多旋翼无人机系统安全性分析规范**
发布日期：2019-12-23，实施日期：2020-01-01
适用范围：本标准规定了多旋翼无人机系统安全性分析的实施步骤和细则，便于应用与广大生产厂商、销售商和用户的相关人员全面准确地使用和实施多旋翼无人机系统安全性分析标准。本标准适用于民用多旋翼无人机系统(非载人)的安全性分析。载人民用多旋翼无人机系统可参考本报准执行。
主要技术内容包括安全性分析步骤、危险识别、风险分析、安全性设计等。
- **T/SZUAVIA 011-2019 多旋翼无人机系统可靠性评价方法**
发布日期：2019-12-23，实施日期：2020-01-01
适用范围：本标准规定了多旋翼无人机系统的可靠性的基本概念，规定了多旋翼无人机系统的可靠性评价的相关术语和定义、抽样、试验方案、试验条件、故障判定、数据采集和指标评价等。本标准适用于多旋翼无人机系统的可靠性评价。
主要技术内容包括评价目标、抽样方法、试验方案、试验条件、故障判定、数

据采集、可靠性评价指标等。

- T/SZUAVIA 009.1-2019 多旋翼无人机系统实验室环境试验方法 第 1 部分：通用要求

发布日期：2019-12-23，实施日期：2020-01-01

适用范围：适用于多旋翼无人机系统。

主要技术内容包括多旋翼无人机系统实验室环境试验方法通用技术要求的术语和定义、通用要求。

- T/SZUAVIA 009.2-2019 多旋翼无人机系统实验室环境试验方法 第 2 部分：抗风试验

发布日期：2019-12-23，实施日期：2020-01-01

适用范围：适用于多旋翼无人机系统飞行器平台的内场抗风试验，其他结构与用途的无人机系统可参考使用。

主要技术内容包括多旋翼无人机系统抗风试验方法的术语和定义、试验条件、试验设备、试验方法、试验结果的评定。

- T/SZUAVIA 009.3-2019 多旋翼无人机系统实验室环境试验方法 第 3 部分：低气压试验

发布日期：2019-12-23，实施日期：2020-01-01

适用范围：多旋翼无人机系统低气压试验方法的术语和定义、试验条件、试验设备及仪器、试验方法、试验结果的评定。

主要技术内容包括多旋翼无人机系统飞行器平台的低气压试验，其他结构与用途的无人机系统可参考使用。

- T/SZUAVIA 009.4-2019 多旋翼无人机系统实验室环境试验方法 第 4 部分：低温试验

发布日期：2019-12-23，实施日期：2020-01-01

适用范围：适用于多旋翼无人机系统飞行器平台的低温试验，其他结构与用途的无人机系统可参考使用。

主要技术内容包括多旋翼无人机系统低温试验方法的术语和定义、试验条件、试验设备及仪器、试验方法、试验结果的评定及试验报告。

- T/SZUAVIA 009.5-2019 多旋翼无人机系统实验室环境试验方法 第 5 部分：高

温试验

发布日期：2019-12-23，实施日期：2020-01-01

适用范围：适用于多旋翼无人机系统飞行器平台的高温试验，其他结构与用途的无人机系统可参考使用。

主要技术内容包括多旋翼无人机系统高温试验方法的术语和定义、试验条件、试验设备及仪器、试验方法、试验结果的评定。

- T/SZUAVIA 009.6-2019 多旋翼无人机系统实验室环境试验方法 第 6 部分：湿热试验

发布日期：2019-12-23，实施日期：2020-01-01

适用范围：多旋翼无人机系统飞行器平台的湿热试验，其他结构与用途的无人机系统可参考使用。

主要技术内容包括多旋翼无人机系统湿热试验方法的术语和定义、试验条件、试验设备及仪器、试验方法、试验结果的评定。

- T/SZUAVIA 009.7-2019 多旋翼无人机系统实验室环境试验方法 第 7 部分：温度变化试验

发布日期：2019-12-23，实施日期：2020-01-01

适用范围：多旋翼无人机系统飞行器平台的温度变化试验，其他结构与用途的无人机系统可参考使用。

主要技术内容包括多旋翼无人机系统温度变化试验方法的术语和定义、试验条件、试验设备及仪器、试验方法、试验结果的评定。

- T/SZUAVIA 009.8-2019 多旋翼无人机系统实验室环境试验方法 第 8 部分：振动试验

发布日期：2019-12-23，实施日期：2020-01-01

适用范围：规定了多旋翼无人机系统的振动试验方法过程，用以确定无人机产品（下文称样品）经受振动的能力。

- T/SZUAVIA 009.9-2019 多旋翼无人机系统实验室环境试验方法 第 9 部分：冲击试验

发布日期：2019-12-23，实施日期：2020-01-01

适用范围：多旋翼无人机系统的冲击试验方法过程，用以确定无人机降落时承

受冲击后是否能继续工作的能力。

- **T/SZUAVIA 009.10-2019 多旋翼无人机系统实验室环境试验方法 第 10 部分：盐雾试验**
发布日期：2019-12-23，实施日期：2020-01-01
适用范围：规定了多旋翼无人机系统的盐雾试验方法过程，用以确定无人机在盐雾环境中否能正常持续工作的能力。
- **T/SZUAVIA 009.11-2019 多旋翼无人机系统实验室环境试验方法 第 11 部分：淋雨试验**
发布日期：2019-12-23，实施日期：2020-01-01
适用范围：多旋翼无人机系统淋雨试验条件、试验设备及仪器、试验方法、试验结果的评定。
- **T/SZUAVIA 009.12-2019 多旋翼无人机系统实验室环境试验方法 第 12 部分：砂尘试验**
发布日期：2019-12-23，实施日期：2020-01-01
适用范围：多旋翼无人机系统实验室砂尘试验的目的与应用、试验要求和结果分析与评定的内容。

3.3 飞行品质标准

针对飞行品质的标准，目前已发布的标准都集中在有人驾驶的飞机和直升机方面的飞行品质标准。

- **GB/T 26763-2011 波音和空客系列飞机飞行品质监控项目规范**
发布日期：2011-07-20，实施日期：2012-05-01
适用范围：本标准规定了空客系列和波音系列飞机各飞行阶段的飞行品质监控项目和要求。
本标准适用于空客 A300-600 系列、A310 系列、A319 系列、A320 系列、A321 系列、A330 系列、A340 系列，波音 B737 系列、B747 系列、B757 系列、B767 系列和 B777 系列飞机的飞行品质监控。
- **MH/T 2005.1-2007 飞行品质监控项目规范 第 1 部分：空客系列飞机**
发布日期：2007-02-07，实施日期：2007-05-01

适用范围：本部分规定了空客 A300-600、A310、A319、A320、A321、A330 和 A340 系列飞机各飞行阶段的飞行品质监控项目规范。

本部分适用于空客 A300-600、A310、A319、A320、A321、A330 和 A340 系列飞机。

- **MH/T 2005.2-2007 飞行品质监控项目规范 第 2 部分：波音系列飞机**

发布日期：2007-02-07，实施日期：2007-05-01

适用范围：本部分规定了波音 B737 系列、B747 系列、B757 系列、B767 系列和 B777 系列飞机各飞行阶段的飞行品质监控项目规范。

本部分适用于波音 B737 系列、B747 系列、B757 系列、B767 系列和 B777 系列飞机。

- **HB 6105-1986 军用直升机飞行品质规范**

发布日期：1986-11-04，实施日期：1987-01-01

目的和作用：编制本规范的主要目的是为有人驾驶军用直升机提供一套较系统的飞行品质要求，以保证直升机具有良好的飞行品质和安全飞行的能力。

本规定的各项要求是在分析了国内外有关资料及研究成果的基础上，总结我国的实践经验而制订的。本规范是航空工业部军用直升机研究、设计、试验、生产和试飞鉴定的一般要求。

订货方和承制方可以通过协助补充一些附加要求。本规范将根据试验实践适时予以修改完善。

- **MH/T 2010-2019 中国民航飞行品质监控系统数据传输规范**

发布日期：2019-01-19，实施日期：2019-05-01

适用范围：本标准规定了快速存取记录器及等效设备的数据传输基本要求、传输规范，飞行数据地面接收基站的数据接收与转发等要求。

本标准适用于中国民航飞行品质监控系统收集的民用航空器机载快速存取记录器及等效涉及的数据传输相关工作。

这些标准的内容均未涉及飞行品质方面的规范标准，我们开展多旋翼飞行器飞行品质的标准研究是可行的、非常必要的。参考已有的成熟的飞行品质规范，建立适合多旋翼飞行器操控品质的评价体系，建立适合多旋翼无人机的评价标准规范。

3.4 多旋翼飞行器企业对飞行品质标准的需求

不同类型的多旋翼飞行器生产制造企业，对飞行品质标准和检测平台的关注度会有差异。在与多旋翼飞行器制造企业的调研交流中了解到，大疆创新这样的龙头企业，他们的研发与生产制造，参照电子产品的研发与制造模式，形成了相对完善的产品品质的控制规范和流程；而对于中小型的无人机研发制造企业，则缺乏相关的标准规范指导，认为制定统一的标准规范是非常必要的，对无人机操控飞行品质标准的需求是迫切的，同时也希望能有相关的公共检测平台，可以在实验室进行飞行品质的相关测试，以减少外场产品试飞检测的工作量。

建立完整的多旋翼操控飞行品质评价体系，通过客观地对多旋翼飞行器在飞行品质上进行等级检测，在实验室就可以得出多旋翼飞行器在某性能上的优劣好坏；不仅如此，操控飞行品质评价体系的建立，对设计人员设计制作多旋翼也会有重要指导作用，可以节省大量时间和劳动成本。

在中小型无人机行业中，亟需建立多旋翼飞行器飞行品质相关的标准，以及建立飞行品质的评价检测平台。

4 四旋翼飞行器操控品质框架设计

4.1 评价内容选取

目前，四旋翼飞行器产品种类繁多，且表现各异，即便接触多旋翼较多的人，也难以根据多旋翼的实际飞行效果给出准确具体的操控优劣评价，推出完整准确的评价准则便会让此问题迎刃而解。多旋翼飞行器与固定翼飞行器的飞行原理相差较大，因而不可照搬已然成熟的固定翼飞行器飞行品质评价规范，需要建立适用于多旋翼的独特操控品质评价准则。

考虑多旋翼飞行器设计，将操控品质完整评价分为预估评价和认定评价。预估评价偏重通过计算控制响应特性来测得某些性能的好坏，认定评价是看实际飞行中完成指定动作（一个动作就是一个任务科目基元）的好坏。两者互不干扰，且每次评价都是对两者细分的每个内容进行评价。划分两大部分的原因：预估评价的内容相对具体单一，但对于整个飞行操控来说却十分重要，比如俯仰通道的输入输出变化对滚转通道带来的影响，即轴间耦合，影响大则操控较难，影响小则操控精确，这些单一却又重要的内容可

以通过计算来得到理论的代表其特性的指标，有了数值大小，就可以避免再从主观上进行模糊的评价。然而多旋翼的飞行过程是众多操作内容冗杂在一块的，预估评价这些单一的内容不能完全代表完成某次飞行的好坏，我们还需要查看完整飞行试验的效果如何，也就是需要进行认定评价。考虑时间及工作量，预估评价和认定评价内容都仅选取三个具体内容。

预估评价选取的内容为：小幅/高频姿态变化，中幅/中低频姿态变化，轴间耦合。小幅姿态变化响应考察多旋翼飞行器能否良好跟随快速变动的指令输入，中幅姿态变化考察四旋翼飞行器迅速改变姿态的能力，即从一个稳定姿态过渡到另一个稳定姿态能否快速完成。轴间耦合会使四旋翼飞行器的操控难度增大，不利于良好任务飞行。四旋翼飞行器的轴间耦合问题也是操控品质中非常重要的问题。

对于认定评价内容的选取，参考美军旋翼机飞行品质规范文件 ADS-33，其任务科目基元思想适用于多旋翼飞行器，针对四旋翼飞行器情况，选取三个认定评价飞行试验进行修改：悬停飞行试验、加速和减速飞行试验、转向目标飞行试验。

4.2 不同等级定义

参考美军旋翼机飞行品质评价规范文件 ADS-33E-PRF，多旋翼等飞行速度较低且小范围内灵活性较高的飞行器可根据其不同飞行动作划分出各个任务科目基元，见表 4-1，比如，悬停、着陆、悬停转弯、向心回转、横向位移、转向目标等等，在划分出各个任务科目基元后，我们不仅需要在多旋翼设计过程中通过计算仿真初步评价多旋翼飞行器，还要在验收过程中完成所设计多旋翼飞行器的最终评价，因此将多旋翼操控品质分为操控品质的预估评价和操控品质的认定评价。最终获得的操控品质评价等级，是对这两种评级进行综合所得出的结论。

表 4-1 部分多旋翼飞行任务科目基元

飞行任务科目基元	四旋翼类别		
	通用型	侦察型	运输型
悬停	√	√	√
着陆	√	√	√
横向移位	√		
瞬态转弯	√	√	

转向目标	√
.....

多旋翼操控品质的预估评价原本期望是在多旋翼设计过程中，由设计部门的工程技术人员做出的操控品质评价，其依据是分析计算或计算机仿真所得到的各项定量数据，将这些数据跟规范中的指标相对比，从而得到品质等级，但又考虑到实际情况，现实中很可能需要对已制造完成的四旋翼飞行器进行操控品质评价，然而预估评价内容是操控品质评价内容中的重要部分，它主要是通过评价控制器响应等多旋翼飞行器相关内部特性来判断其操控性能，因而不容忽视，所以需要增加预估评价的评价方式，以拓展其评价覆盖范围至已制作完成的四旋翼飞行器，具体方法会在后文提出。多旋翼操控品质的认定评价是飞控手对规定的任务科目进行飞行检验而给出的等级，它是对该多旋翼操控品质的综合的外部的直观定性的评价，飞控手在正确认识 Cooper-Harper 操控品质等级标准（HQR）的基础上，见图 4-1，以其为标准来评估多旋翼飞行器执行机动飞行试验和任务科目基元的能力，按完成任务的性能好坏得到认定评价等级，最后再与预估等级共同确定多旋翼操控品质的等级。

操作性能等级

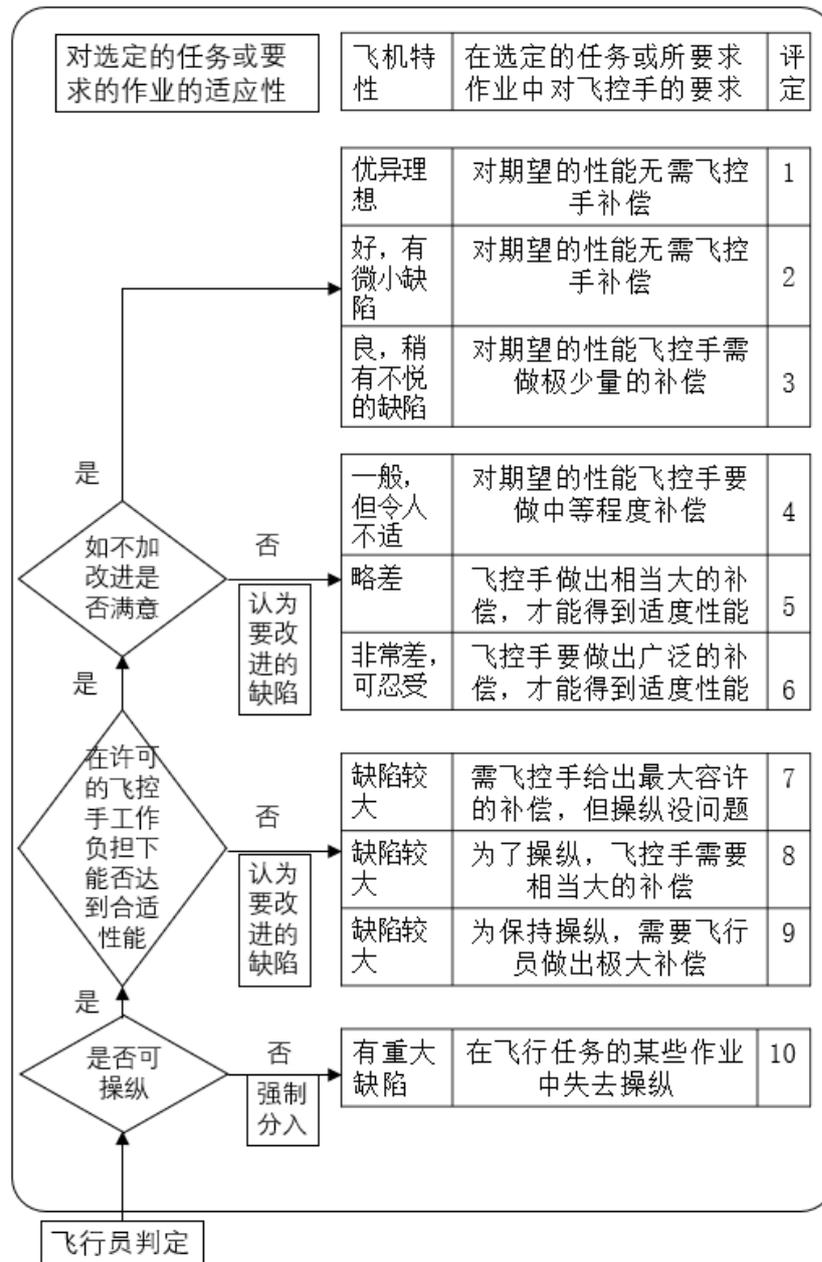


图 4-1 Cooper-Harper 等级认定准则

在这里需要对多旋翼操控品质的等级进行定义和区分, 参考有人驾驶飞行器飞行品质规范和美军旋翼机飞行品质规范文件 ADS-33, 飞行器飞行品质的等级区分标准为飞行器完成任务的顺利程度和带给操作人员的操作负担的大小, 下文定义的多旋翼操控品质等级基本沿用了已有的飞行品质等级划分定义。

等级 1: 多旋翼的评价等级全部达到等级 1 的标准, 认定等级所反映的 $HQR=1\sim3$, 即多旋翼能以满意的性能完成所要求的任务。

等级 2: 如果多旋翼预估的等级为 2 级或一种及一种以上任务科目基元的飞行性能指标能达到合格的性能, 则多旋翼的操控品质等级为 2 级。这意味着至少在使用飞行包线的某些区域和某些任务或某一任务的其中部分, 多旋翼飞行器有需要改进的缺陷, 即 $HQR=4\sim 6$ 。操控等级为 2 级的多旋翼飞行器还能完成期望的任务, 但仅能达到合格的性能。

等级 3: 如果多旋翼飞行器预估的等级为 3 级或一种及一种以上任务科目基元的飞行性能指标所对应的 $HQR=7\sim 8$, 则多旋翼的操控品质等级为 3 级, 这意味着至少某些任务或某一任务的其中部分没有达到合格的要求, 多旋翼飞行器有缺陷需要改进。操控品质为 3 级的直升机不能完成预期任务, 但对操作性不用怀疑。操控品质为等级 3 的多旋翼飞行器尽管是可操纵的, 但完成各类科目所需的精确程度和迅猛程度是不可接受的, 即操控品质为等级 3 的多旋翼飞行器不可能完成与缺陷有关的飞行科目, 但能够飞回原地。

比等级 3 更差的等级: 等级 3 多旋翼飞行器是可操纵的, 根据 HQR 等级标准, $HQR=9$ 是可操纵的, 但需要飞控手紧张的操纵补偿来保持对多旋翼飞行器的控制。 $HQR=9$ 并不包含在等级 3 中。任何低于等级 3 的多旋翼飞行器意味着在规定的飞行条件下会失去操纵。这种飞行状态应避免, 且亟需改进。

最终操控品质评价等级的判断是取预估等级和认定等级中较小一方的等级, 如预估等级为 1 级, 而认定等级为 2 级, 在无特殊情况下, 最终的操控品质评价等级为等级 2。四旋翼类型不同, 其被期望用来执行的任务也不同, 因而在某些对于其飞行任务内容而言不必要的预估评价内容和认定评价飞行试验中, 可以放低指标等级要求, 而其它关联程度较大的评价内容则以原标准要求评价即可, 文中所选评价内容, 比如预估评价中的小幅姿态变化针对需要高频输入小幅调整姿态的情况, 即需要精细的运动路径操作, 对于运动路径精度要求较低的四旋翼飞行器, 可以认为其等级 1 的指标等于原评价指标的等级 2, 本文对不同任务类型四旋翼飞行器的预估评价等级修改没有太多细化描述, 但此部分是非常重要的。

5 预估评价指标和等级划分

预估评价针对四旋翼飞行器更为精细具体的飞行器控制特性进行评价, 比如轴间耦合考虑的是四旋翼飞行器在飞行过程中操纵轴的输入对异轴输入的影响。飞行控制系统

的稳定是正常飞行的基础，倘若四旋翼飞行器因某部分的控制系统不稳定，而对稳定飞行产生恶劣影响，则其操控品质等级可以认为在等级 3 或等级 3 以下，无需进行其它操控品质评价。

5.1 预估评价指标选取

对于四旋翼飞行器预估评价内容的确立，可以借鉴 ADS-33 文件中旋翼机预估评价的设计思路，因为旋翼机与四旋翼飞行器布局 and 控制器设计差别巨大，所以在借鉴 ADS-33 文件时，需要对其内容进行四旋翼飞行器的适用性剪裁，并在此基础上对其进行改进，目前仅选择了四旋翼飞行器预估评价中的部分内容进行指标选取和等级划分，而仍有许多内容需要进行补充，以完善预估评价。以下是四旋翼飞行器适用性剪裁后的预估评价指标。

四旋翼飞行器俯仰通道里，输出为俯仰姿态角，输入为油门指令，其响应特性是重要的操控品质评价内容。ADS-33 文件预估评价内容中包含了，小幅/高频姿态变化、中幅/中低频姿态变化、大幅姿态变化、轴间耦合、纵横向稳定性等各个内容，且指标也已给出。考虑四旋翼飞行器俯仰（滚转）姿态角变化一般不会超过 45° ，因而选择参考 ADS-33 文件中小幅/高频姿态变化和中幅/中低频姿态变化的评估内容。

5.1.1 小幅/高频姿态变化指标——带宽和相位滞后

小幅（ $0^\circ \sim 10^\circ$ ）且高频（输入频率大于 1Hz）的姿态变化，四旋翼飞行器多用于调整精确的轨迹。小幅/高频姿态变化响应的评价指标选取为带宽和相位滞后，四旋翼飞行器的带宽越大，其跟随快速变化的输入的能力也就越强。带宽频率越高，表现控制系统复现快速变化的信号能力越强，失真越小，反应控制系统自身的惯性小，动态过程也就会愈加迅速，带宽过小的四旋翼飞行器不适合需要高频操纵的飞行任务。在读取指标之前，必须先得到控制系统传递函数对应的波特图，参考 ADS-33 文件，确定带宽大小的示意图如图 5-1 所示，其中，带宽的确定方式是近似估计得到的，其误差精度对评价要求的影响较低，以俯仰通道为例，带宽为 ω_{Bw} ，相位滞后由公式（5.1）求得。

$$\tau_p = \frac{\Delta\phi_{2\omega_{180}}}{2\omega_{180}} \quad (5.1)$$

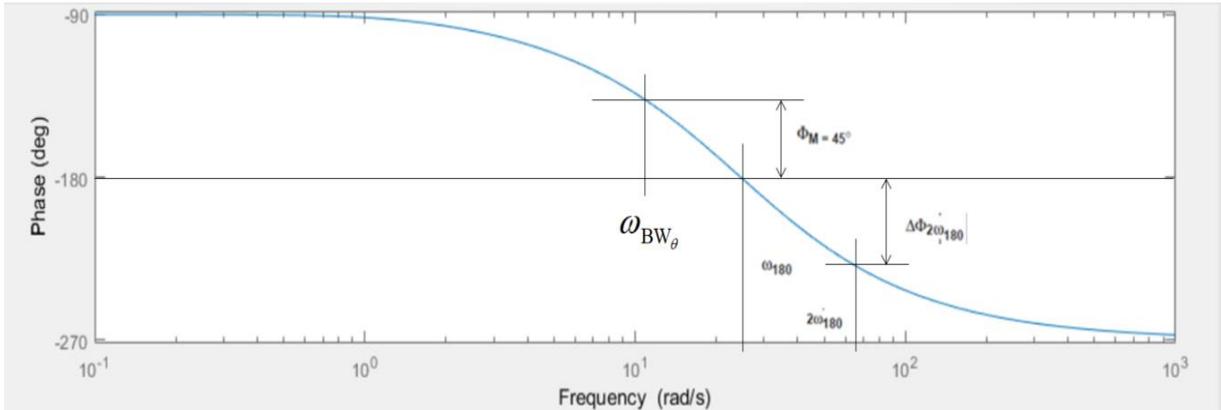


图 5-1 带宽和相位滞后获取方式

5.1.2 中幅/中低频姿态变化指标——快捷性指标

中幅/中低频姿态变化多用于考察四旋翼飞行器快速实现姿态改变的能力，其姿态角变化量较大（ $10^\circ \sim 45^\circ$ ），良好的中幅/中低频姿态变化响应保障飞行器在复杂地形中能迅速改变姿态，以实现规避，具体考察四旋翼飞行器从某一姿态角迅速改变至另一姿态角时是否迅速。中幅/中低频姿态变化响应的指标，选用角速度峰值与最大姿态变化量之比——快速性指标。

5.1.3 纵横向轴间耦合要求

轴间耦合会增加操纵四旋翼飞行器的负担，会影响其稳定良好的飞行，即损害其操控品质。轴间耦合是四旋翼飞行器预估评价中十分重要的一个内容。

在四旋翼飞行器飞行过程中，为实现一个轴上的响应而在操纵轴上施加的操纵输入，不得让异轴过分偏离原本的配平状态。在 ADS-33 文件中，轴间耦合的具体评价要求为，航向基本保持恒定，突然施加较大输入在俯仰（滚转）通道之后的 4s 内，导致异轴发生姿态角的最大变化量与俯仰（滚转）通道在第 4s 时的姿态角变化量之比，等级 1 不得超过 ± 0.25 ，等级 2 不得超过 ± 0.60 。

5.2 预估评价指标等级划分

对于预估评价而言，选取出能代表多旋翼飞行器具体操纵性能好坏的指标后，需要进一步知道指标数值的等级划分范围。四旋翼飞行器预估评价指标等级划分的原则：预估评价各项内容指标需要进行对应的性能测试，于四旋翼半物理仿真平台上进行多次多

人性能测试，根据四旋翼飞行器操控品质等级定义打分得到指标等级，再根据各个性能测试中，不同等级及其对应的指标绘制指标等级图。

5.2.1 小幅/高频姿态变化指标等级划分

评价指标：小幅（ $0^\circ \sim 10^\circ$ ）且高频（输入频率大于 1Hz）的姿态变化的两个评价指标，带宽和相位滞后，由控制系统传递函数对应的波特图确定，现实飞行的情况下，操纵四旋翼飞行器的飞控手在单通道输入的频率一般不会超过 3Hz。以俯仰通道为例，带宽为 ω_{BW_0} ，相位滞后由公式（5.1）求得，见图 5-1。

指标等级划分：根据之前的描述，现实评价过程中可能出现的情况可笼统的分为两种：第一种情况，预估评价在四旋翼飞行器的设计制作过程中，由设计人员进行，该情况下，一般已知控制器相关信息，可以直接计算或仿真求得等效传递函数，再根据波特图获得指标；第二种情况，需要对已有制成的四旋翼飞行器进行预估评价，该情况下，四旋翼飞行器内部控制器未知，为了获取预估评价的各个指标，需要进行系统辨识，通过设定好的飞行试验测得数据，进行频域响应辨识，得到波特图，读取指标。上述为获得某一架四旋翼飞行器对应指标的方法，为了完成指标等级划分，得到指标等级图，需要进行多次飞行实验，每次飞行实验中的四旋翼飞行器都互不相同，飞行器布局及质量、飞行器转动惯量、飞控系统、电池参数、桨叶参数、电机参数等都不尽相同，因为实物飞行器参数受限较大，无法灵活更改，因而选择使用灵活的仿真平台进行实验，仿真方法不唯一，能正确完成指标获取即可，本文使用实验室建立的成熟的四旋翼飞行器仿真平台，可以灵活更改四旋翼飞行器参数，图 5-2 为半物理仿真软件界面，可以修改四旋翼飞行器参数，且当参数设置不合理时会提示错误。

图 5-2 仿真软件设置界面

小幅/高频姿态变化具体等级划分过程共有两部分，一部分针对四旋翼信息已知的情况，另一部分对应现有四旋翼信息未知的情况。控制器等相关信息已知的情况下，便于得到准确的指标数据，因而其等级划分也更为准确，可以以其结果为等级划分标准，对于第二部分的情况则应当通过测得飞行数据，计算推出四旋翼的内部信息，因为飞行操作难以严格统一，其飞行数据推出的指标结果会有较大误差，所以考虑在第一部分内得到等级划分标准，而在第二部分内仿真飞行测得数据，计算出指标后，与第一部分得到的结果进行比对，检验所得到的等级划分标准是否合格，具体内容如下所示。

1. 由参数等相关信息已知的四旋翼飞行器获得指标划分

1) 指标获取

从已设计的四旋翼飞行器模型中提取出俯仰通道模型，滚转通道与俯仰通道的过程一致，便不再赘述滚转通道，图 5-3 为提取出的俯仰通道模型。

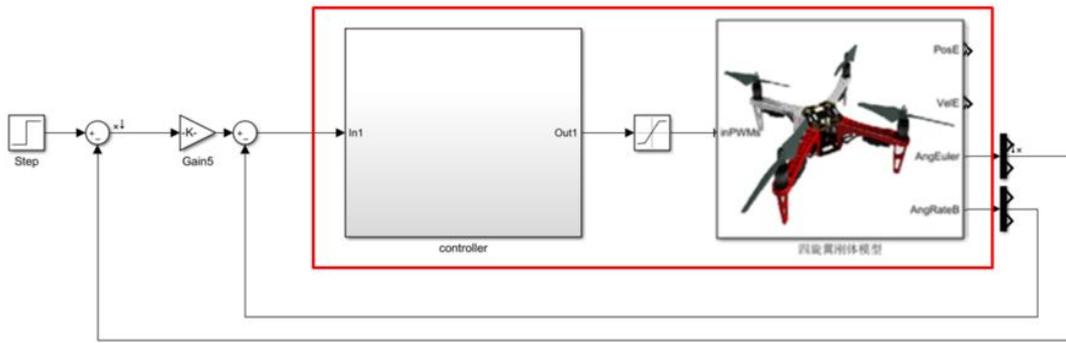


图 5-3 俯仰通道模型

模型包含了控制器模型和四旋翼刚体模型，可以通过修改这两个模型的内部参数以调整四旋翼飞行器，相关参数初始化完成后，准备进行系统辨识，图 5-4 为开环输入点的设置。输入为油门指令（期望俯仰角）。

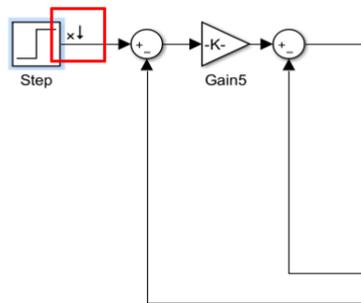


图 5-4 设置开环输入点

设置开环输出点如图 5-5，输出为俯仰角。

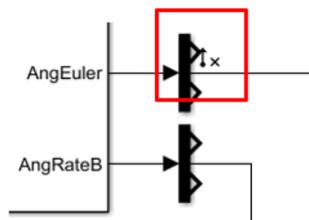


图 5.5 设置开环输出点

Simulink 编译模型完成后，使用 MATLAB 软件自带的系统辨识工具箱，辨识得到对应波特图，图 5-6，进而得到对应指标。

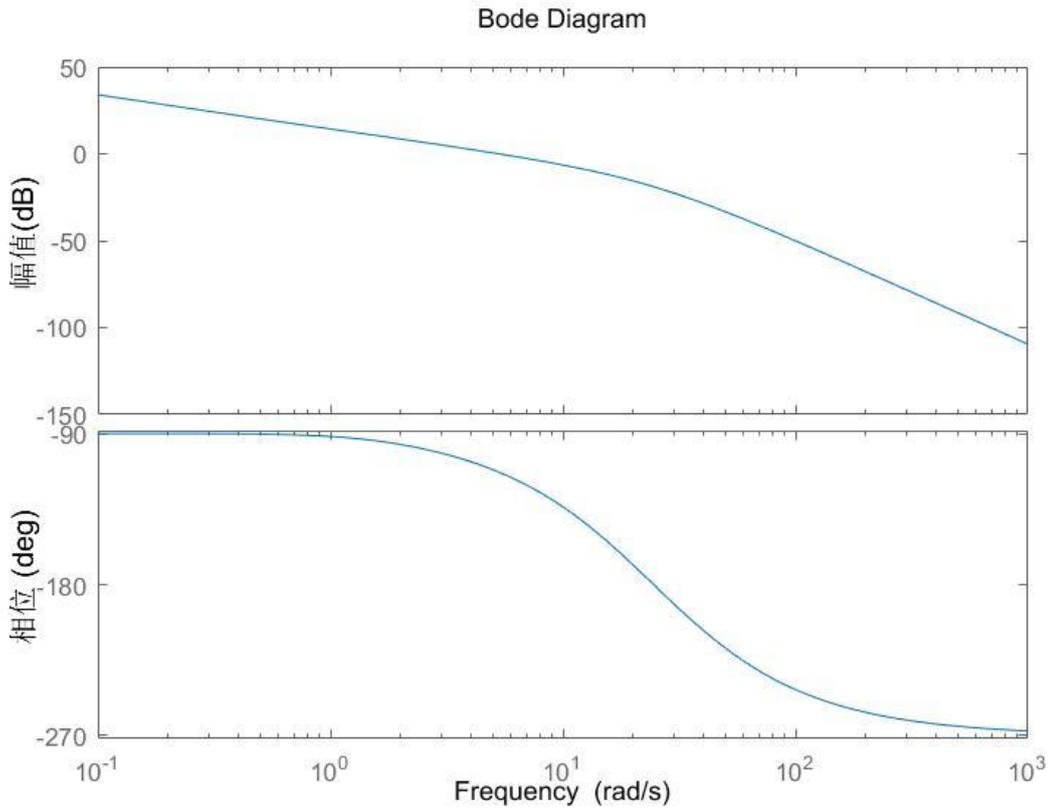


图 5-6 辨识出的波特图

2) 仿真实验评级打分

俯仰通道模型处理后加入完整四旋翼模型中替换完整四旋翼模型中的控制模型，并修改四旋翼飞行器刚体模型参数。

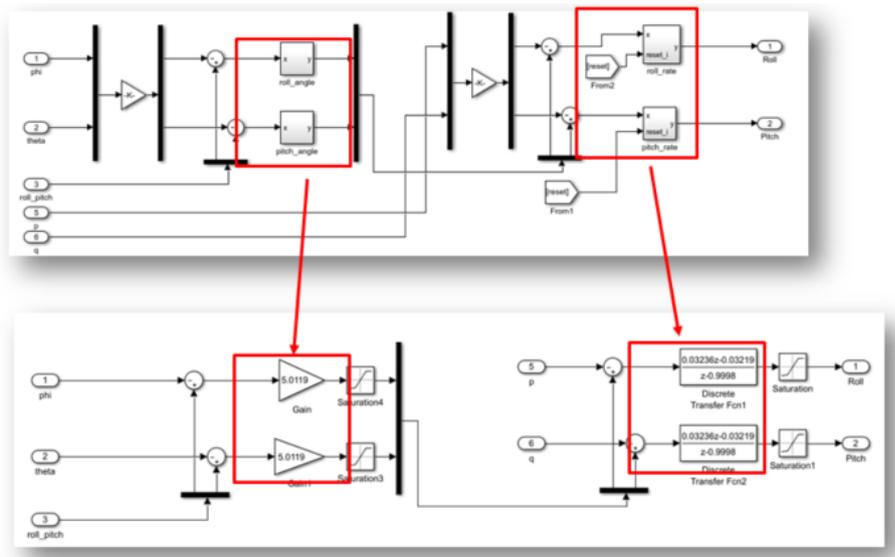


图 5-7 替换控制模型

将替换完的四旋翼飞行器模型烧录到 Pixhawk 自驾仪中，在半物理仿真平台上共

进行二十组仿真实验，仿真实验开始前，保存每组实验的四旋翼飞行器参数数据，仿真界面如图 5-8。



图 5-8 3D 飞行界面

小幅/高频姿态变化打分流程如下，每组实验共有十人参与打分评级，每个人操作要求为，待四旋翼飞行器稳定悬停后，来回拨动俯仰操纵杆，使俯仰角在 $-10^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 范围内正负变动，拨动的频率大约从 0.4Hz 开始逐渐增至 2.5Hz，观察显示界面里四旋翼飞行器能否快速跟随操纵杆输入，判断评级准则为 Cooper-Harper 品质评价准则，以能快速跟随的最大输入频率为最低判断的标准，等级 1 的最大输入频率不得低于 1Hz，等级 2 不得低于 0.5Hz，等级 3 不得低于 0.34Hz，记录每个人评价的等级，最终平均并近似处理所有等级，得到该组实验的最终评价等级。指标相差不大的四旋翼飞行器模型，其仿真飞行效果相近，没有明显等级差别，因而指标等级线上距离较远的两个点（两个不同的四旋翼飞行器）才会产生明显的等级差别，表 5-1 是小幅/高频姿态变化仿真实验的数据。

表 5-1 MATLAB 系统辨识获得的数据

组别	ω_{BW_0} (rad/s)	τ_p (s)	等级
1	21.5	0.63775	1
2	17.6	0.67647	1
3	15.6	0.69182	1
4	12.2	0.73529	1

5	10.3	0.75202	1
6	8.4	0.84577	1
7	7.9	0.87629	1
8	7.6	0.90124	1
9	7.5	0.91428	1
10	6.3	0.97973	1
11	6.2	1.37546	2
12	4.7	1.27451	2
13	3.87	7.142857	2
14	4.12	10.86956	2
15	3.56	5.34819	2
16	3.32	5.48527	3
17	3.12	4.64256	3
18	3.06	12.51431	3
19	2.97	15.14756	3
20	3.41	17.54579	3

绘制散点图，图 5-9，其中横坐标为带宽 ω_{BW} ，纵坐标为相位滞后 τ_p 。菱形点为等级 1，“*”形点为等级 2，“+”形点为等级 3。

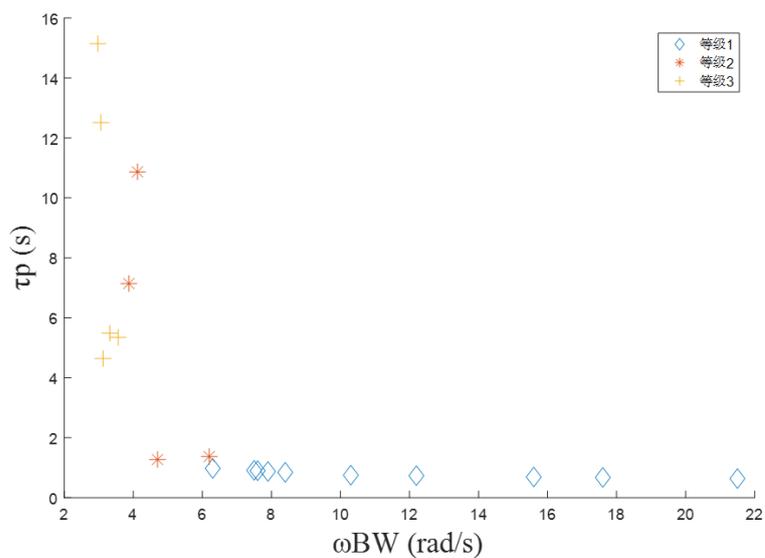


图 5-9 小幅姿态变化数据散点图

考虑带宽和相位滞后两个指标的意义，带宽越大、相位滞后越小的四旋翼飞行器，其跟踪指令输入就愈加快速，评价等级也就越好，结合上述散点图，可以大致画出等级曲线图，如图 5-10。

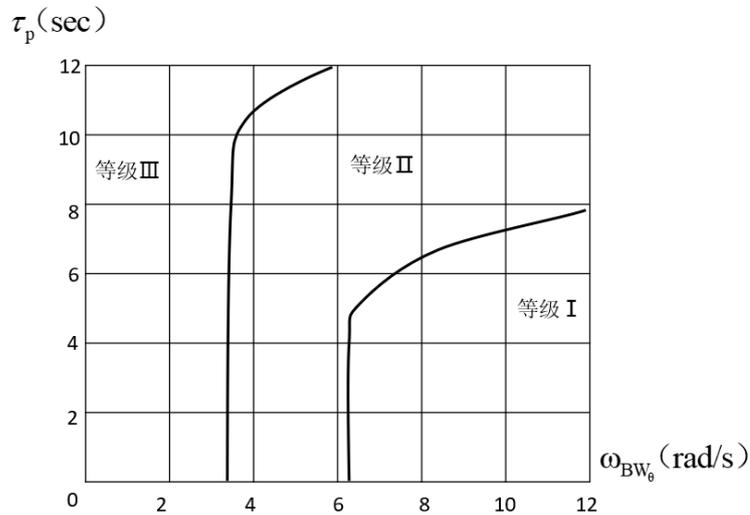


图 5-10 小幅姿态变化等级图

2. 仿真飞行测得数据进行验证

小幅/高频姿态变化评价需要获得的两个指标，可以通过测得四旋翼飞行器待测通道的扫频数据，用 CIPHER 软件进行系统辨识，得到频域响应辨识结果，进而读出指标。扫频数据可以通过手动遥控四旋翼飞行器获得，也可事先编写好扫频所需的油门变化指令，让四旋翼飞行器自动飞行记录数据。

1) 数据采集模型建立

搭建扫频数据采集模型如图 5-11。

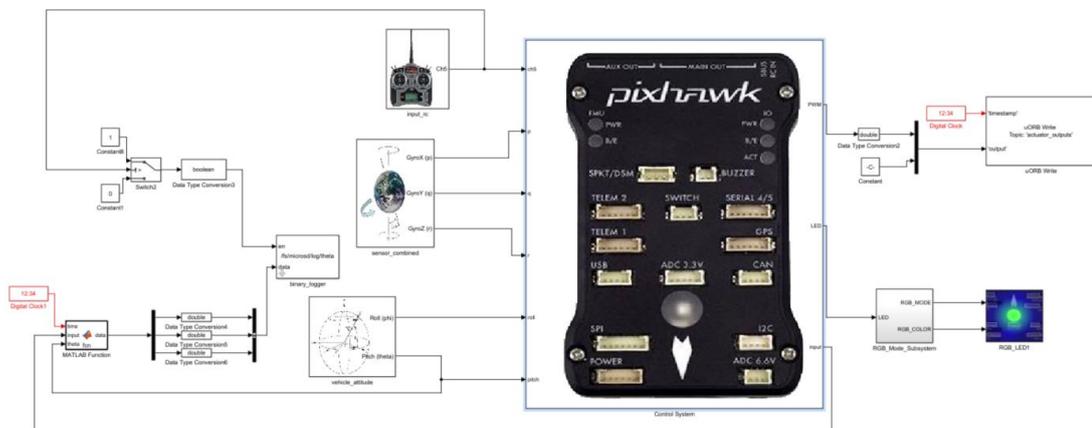


图 5-11 小幅姿态变化数据采集模型

其中，遥控器模块控制飞行，同时决定何时开始采集数据，如图 5-12。

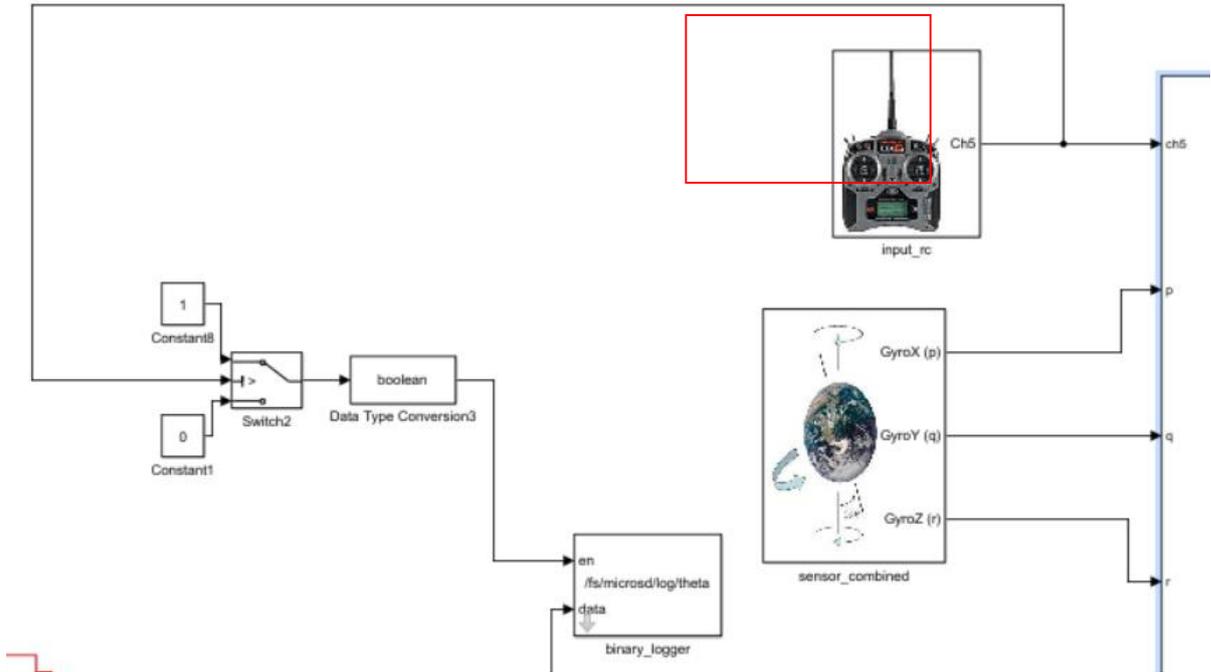


图 5-12 遥控器模块

数据采集部分将时钟信息及对应时刻的油门输入指令和俯仰姿态角一同保存到 Pixhawk 的内存卡中，俯仰姿态角由 Pixhawk 的姿态传感器测得，如图 5-13。

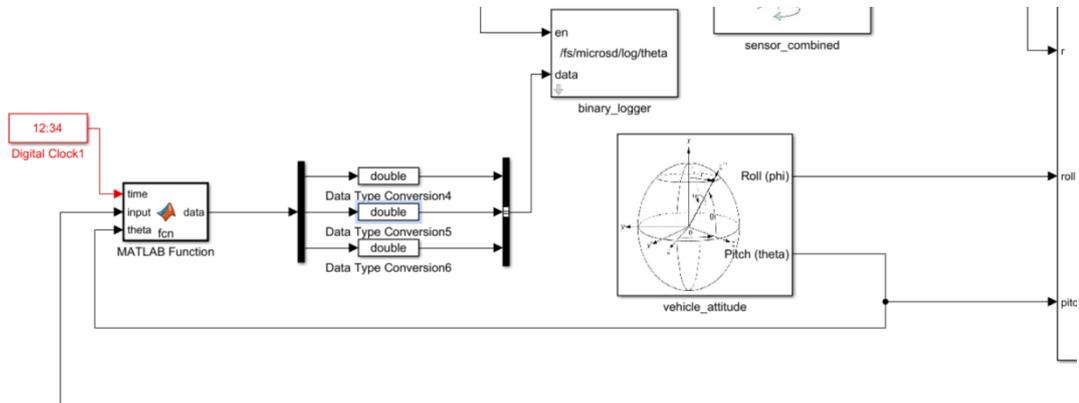


图 5-13 数据采集部分

为了与第一部分对应，即四旋翼信息已知的情况，数据采集模型中控制器模型和四旋翼模型的参数设置使用的是上文二十组数据中保存的四旋翼相关参数数值，这样可以避免重新进行评级，也就是相当于每架四旋翼飞行器进行了两种情况的实验。从理论上来说，两种情况得到的结果应当一致，但因为使用飞行测得的数据进行系统辨识，辨识出的结果会有一定误差，所以仅选择进行十组实验，CIFER 软件系统辨识后，验证结果与第一种情况贴合即可。

2) 仿真实验测得数据

数据采集模型编译后，将代码烧录进 Pixhawk 自驾仪中，使用四旋翼半物理仿真平台，具体仿真操作过程为：先将四旋翼飞行至合适高度，待稳定悬停后，拨杆开关（ch6）拨至最下，开始采集数据，此时拨动俯仰遥控杆，初始频率大约为 0.5Hz，控制四旋翼俯仰角在 -10° 到 10° 之间来回振荡，缓慢加快拨动频率，最终大约增大到 2Hz，将拨杆开关（ch6）拨回原状态，完成扫频数据采集。

取自驾仪中的内存卡，读取出采集的数据，在 MATLAB 中打开，读取到的三行数据分别对应时钟信息、油门输入、俯仰姿态角，转存为三个变量：time、input、pitch，把三个变量存在一个.mat 文件中，以便于下一步 CIPHER 系统辨识。

共进行十组实验，得到十个.mat 文件。

3) CIPHER 软件系统辨识

CIPHER 软件系统辨识主要流程：利用要辨识的飞行器或者模型生成单通道或者耦合通道的输入输出时间历程数据，对其进行预处理以规整数据，随后进行 FRESPID 频域响应辨识，如果是耦合通道则要继续进行多输入辨识响应（MISOSA），而在本实验中不需要多输入辨识响应。在得到初步的频域响应辨识结果后，还需要复合分窗（Composite）处理，以获得更为精确的频域响应辨识结果。CIPHER 软件界面如图 5-14。

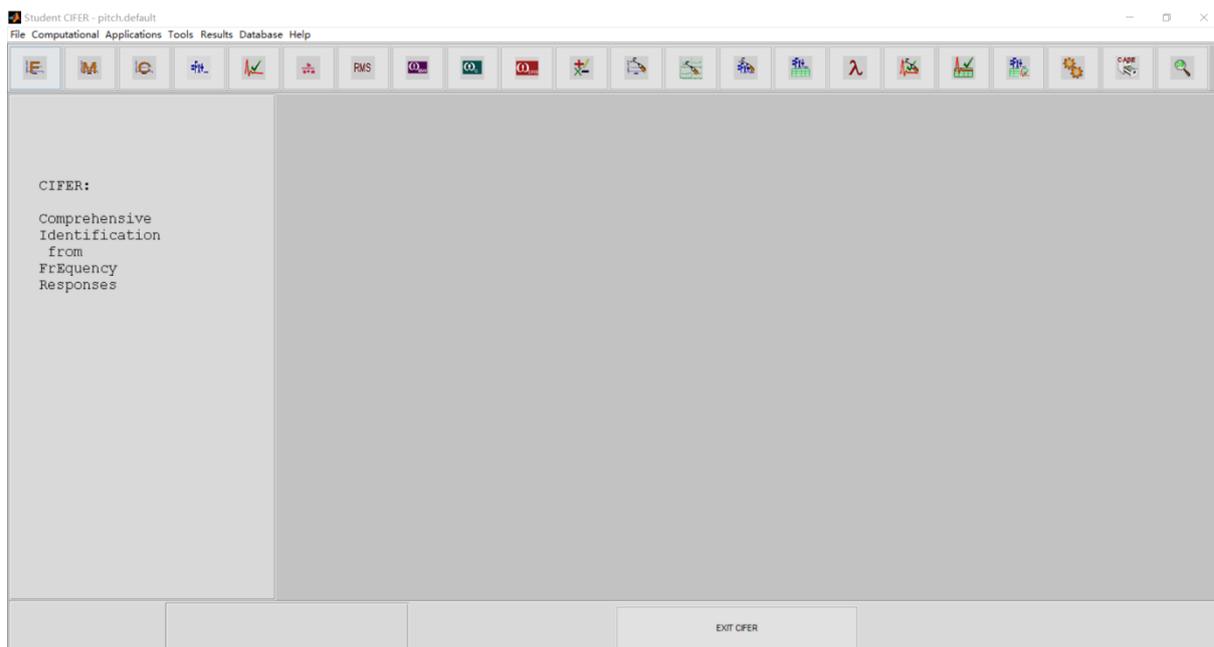


图 5-14 CIPHER 软件界面

按照CIPHER系统辨识流程，对所存.mat文件预处理后进行FRESPID频域响应辨识，

之后进行复合分窗处理，得到频域响应结果，如图5-15，可以获得带宽和相位滞后指标。

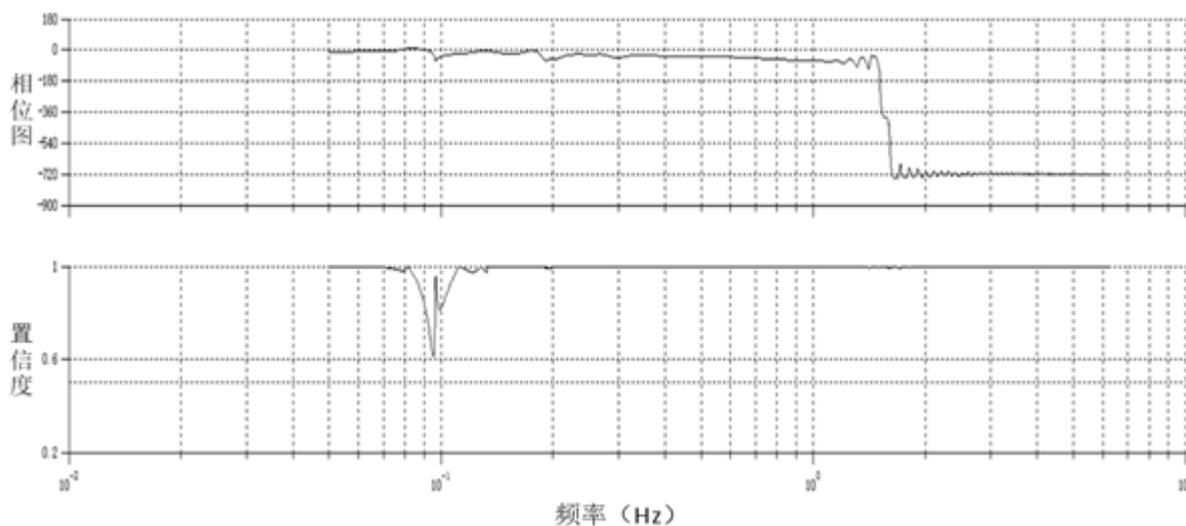


图 5-15 频域响应图

十组实验辨识的结果如表5-2所示。

表 5-2 各实验 CIFER 辨识结果

组别	ω_{BW_θ} (rad/s)	τ_p (s)	等级
1	19.7	0.628	1
2	16.2	0.619	1
3	11.2	0.717	1
4	9.7	0.774	1
5	8.0	0.813	1
6	6.4	9.954	2
7	5.3	8.993	2
8	3.01	12.381	3
9	3.15	9.524	3
10	2.87	26.6094	3

将数据结果与之前得到的对应数据进行比对，绘制散点图，与等级划分图比对，菱形点为等级1的数据，“*”形点为等级2的数据，“+”形点为等级3的数据，发现辨识结果符合等级划分，最终得到的指标等级图如图5-16。

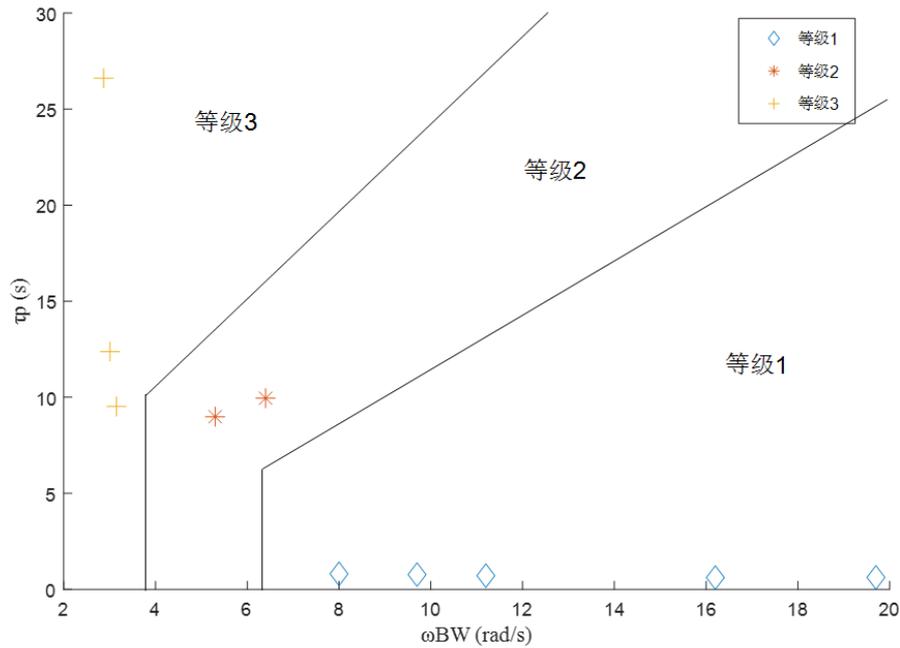
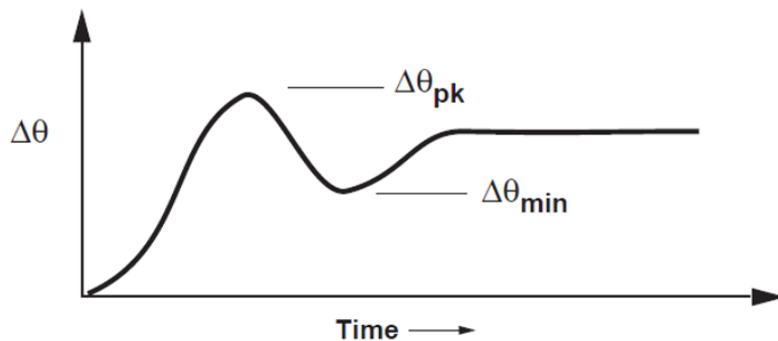


图 5-16 辨识结果与等级图比对

5.2.2 中幅/低频姿态变化指标等级划分

评价指标：中幅/中低频姿态变化多用于考察四旋翼飞行器快速实现姿态改变的能力。对于 ADS-33 文件使用快速性来评价中幅/中低频姿态变化。其快速性指标的定义为，在中幅/中低频姿态变化发生后，角速度峰值与最大姿态变化量之比，以俯仰通道为例，即 $\frac{q_{pk}}{\Delta\theta_{pk}}$ 。 $\Delta\theta_{pk}$ 和 $\Delta\theta_{min}$ 指标定义如图 5-17。

图 5-17 $\Delta\theta_{pk}$ 和 $\Delta\theta_{min}$ 获取方式

指标等级划分：评价中幅/中低频姿态变化时，需要测得角速度峰值、姿态角变化

量峰值和姿态角变化极小值。同小幅/高频姿态变化指标划分相近，中幅姿态变化可以通过仿真评价所设计的四旋翼，也可以通过分析飞行实验所测数据，获得指标。同小幅/高频姿态变化指标等级划分部分一致，第一部分由控制器等各参数已知的四旋翼模型仿真得到指标等级划分标准，其准确度较高，第二部分通过仿真飞行测得数据，计算得到指标，对第一部分得到的结果进行比对，验证其是否准确。以下是具体实验内容。

1. 用参数等相关信息已知的四旋翼飞行器划分等级

若四旋翼参数等信息已知，则可通过仿真获得评价指标，以 Simulink 仿真为例，共进行二十五组仿真实验。

1) 指标获取

仍可使用小幅/高频姿态变化中的俯仰通道模型进行仿真，其中，设置阶跃信号为油门输入，阶跃输入大小设置为 0.5 (rad)，图 5-18。

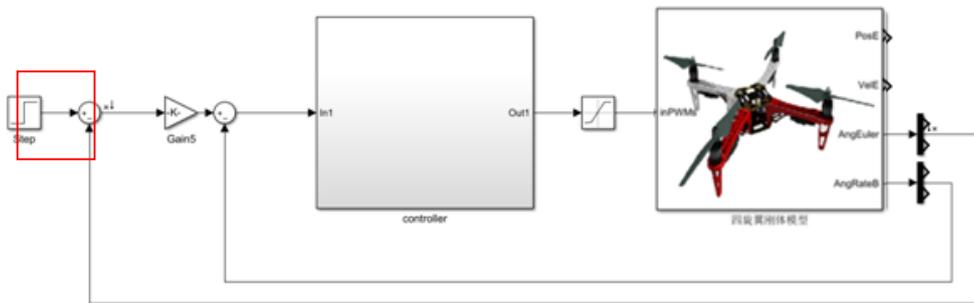


图 5-18 俯仰通道模型

设置数据观测点如图 5-19。

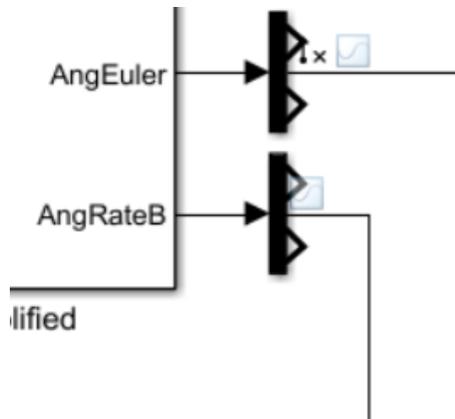


图 5-19 观测点设置

编译完成后开始仿真，仿真时间为 10 秒，打开 Simulation Data Inspector 界面，观察俯仰角和俯仰速率数据图，图 5-20，其中虚线为俯仰速率曲线，实线为俯仰角曲线。读图得到 $\Delta\theta_{pk}$ ， $\Delta\theta_{min}$ 和 q_{pk} ，记录每组指标。

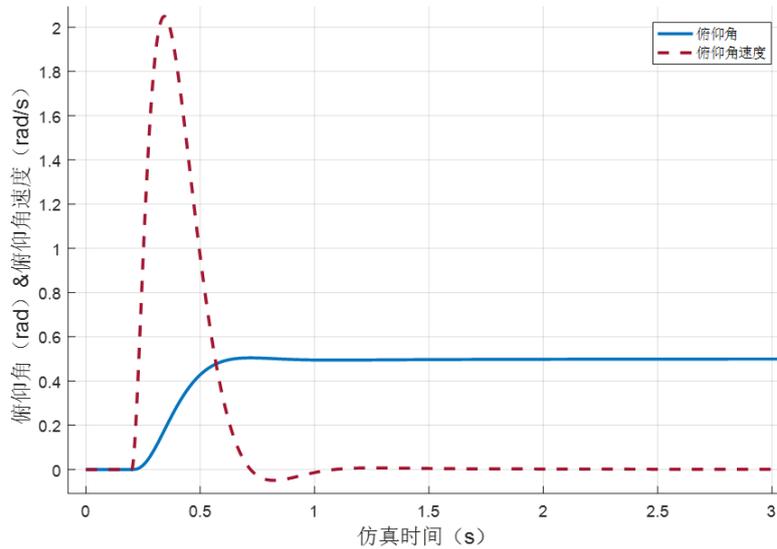


图 5-20 $\Delta\theta$ 和 q 的仿真曲线

2) 仿真实验

于半物理仿真平台上进行仿真实验，每组实验需要更改模型的控制参数和四旋翼刚体模型参数，且要求各系统稳定，记录保存每组实验的参数，先获取出每组实验指标，然后将上述俯仰通道模型添加至完整的四旋翼模型中，编译后，将模型烧录到自驾仪 Pixhawk 中。仿真平台准备完成后，开始仿真飞行，待四旋翼飞行器稳定悬停后，迅速大幅拨动俯仰杆（俯仰角最终应达到 $10^\circ \sim 45^\circ$ ），拨动后保持俯仰杆不动，观察四旋翼飞行器在输入姿态变化指令后，能否快速达到期望角度，根据其快速性对其打分评级，各等级的基本要求为：若在 2 秒内，姿态角变化未能稳定到达期望角度，则最高为等级 2，若在 4 秒内，姿态角变化未能稳定到达期望角度，则最高为等级 3。以下是仿真测得的数据和等级，表 5-3。

表 5-3 中幅姿态变化仿真数据

组次	$\Delta\theta_{min}/\text{rad}$	$\Delta\theta_{pk}/\text{rad}$	$q_{pk}/\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	$\frac{q_{pk}}{\Delta\theta_{pk}}$	等级
1	0.400	0.401	1.129	2.815461	1
2	0.323	0.323	1.546	4.786378	1

3	0.397	0.399	1.586	3.974937	1
4	0.243	0.244	0.754	3.090164	1
5	0.502	0.521	1.561	2.996161	1
6	0.405	0.408	1.93	4.730392	1
7	0.498	0.503	2.754	5.508	1
8	0.568	0.590	2.954	5.00678	1
9	0.358	0.358	0.942	2.631285	1
10	0.601	0.613	1.397	2.278956	1
11	0.554	0.576	0.771	1.338542	2
12	0.497	0.356	0.492	1.382036	2
13	0.351	0.352	0.56	1.590909	2
14	0.479	0.481	0.812	1.68815	2
15	0.518	0.428	0.477	1.115547	2
16	0.550	0.432	0.523	1.21115	2
17	0.267	0.267	0.426	1.595506	2
18	0.383	0.385	0.714	1.854545	2
19	0.534	0.546	0.874	1.600733	2
20	0.561	0.586	0.87	1.484642	2
21	0.508	0.512	0.412	0.804688	3
22	0.572	0.589	0.431	0.731749	3
23	0.447	0.451	0.234	0.518847	3
24	0.515	0.52	0.349	0.671154	3
25	0.499	0.501	0.314	0.626747	3

绘制散点图，图 5-21，其中，菱形点表示等级 1，“*”型点为等级 2，“+”型点为等级 3。

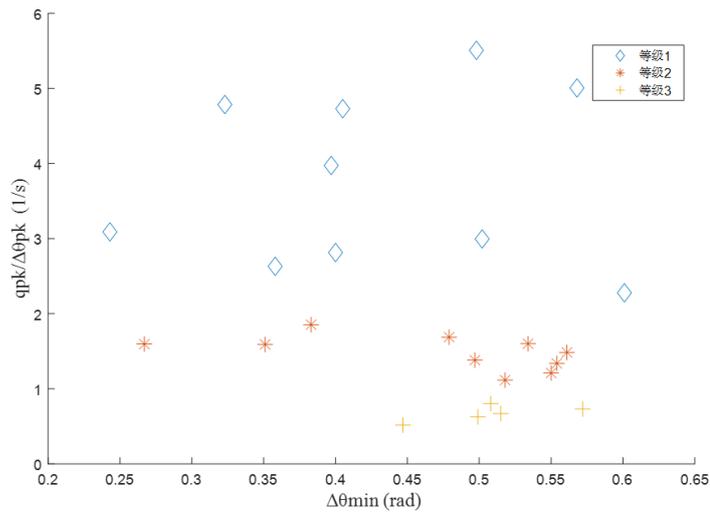


图 5-21 仿真数据散点图

近似画出中幅/中低频姿态变化的指标等级图，图 5-22。

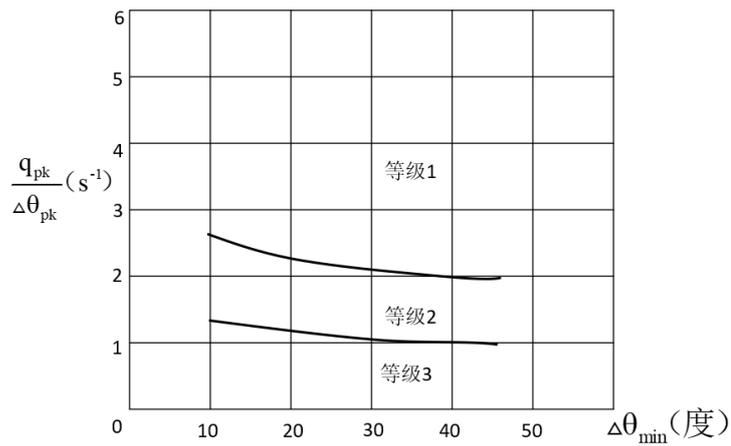


图 5-22 中幅姿态变化等级图

2. 仿真飞行测得数据进行验证

需要通过测得飞行数据，分析获得指标。

1) 采集模型修改

以俯仰通道评价为例，修改数据采集模型如图 5-23 所示，采集数据更改为：时钟信息、俯仰角变化、俯仰角速度。

0.499	0.500	0.234	0.468	3
-------	-------	-------	-------	---

将实验第一部分所测得的数据与指标等级图进行比对，其中，圆点等级为 1，菱形点等级为 2，“x”形点等级为 3。可以看出所测数据符合等级划分，中幅/中低频姿态变化指标等级图如图 5-24 所示。

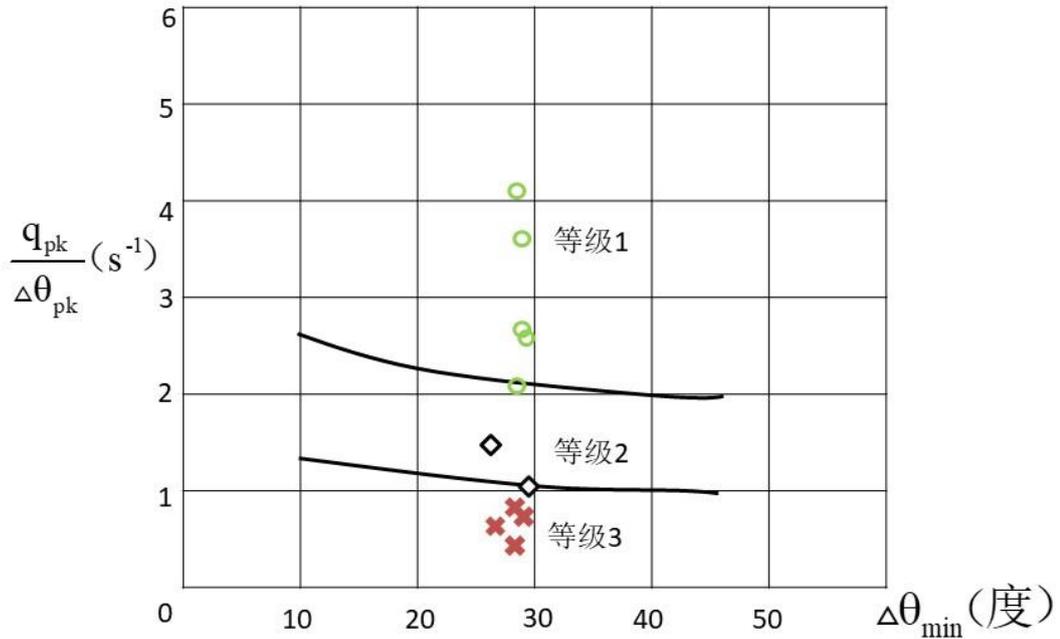


图 5-24 飞行数据与等级图比对

5.2.3 纵横向轴间耦合指标等级划分

评价指标：为实现一个轴上的响应而施加的操纵输入，不可以令异轴产生较大的偏离。轴间耦合选取的评价参数为突然施加俯仰（滚转）通道的阶跃操纵输入之后 4s 内，异轴偏离配平的姿态角变化峰值与操纵轴在第 4s 的姿态角变化之比，即

$$\Delta\theta_{pk}/\Delta\phi_4。$$

指标等级划分：对于轴间耦合指标等级划分，期望是通过飞行测得数据与飞行效果打分评价，仅进行仿真实验获得等级划分结果，而验证部分将在实物飞行实验中进行。评价轴间耦合时，需要测得异轴姿态角偏离的峰值、操纵轴输入第 4 秒时的姿态

角变化，仅选取俯仰通道对滚转通道的影响。参考 ADS-33 文件，轴间耦合评价内容：测试过程中航向基本保持恒定，突然施加较大输入在俯仰（滚转）通道之后的 4s 内，导致异轴发生姿态角的最大变化量与俯仰（滚转）通道在第 4s 时的姿态角变化量之比，等级 1 不可以超过 ± 0.25 ，等级 2 不可以超过 ± 0.60 ，考虑四旋翼飞行器情况，为了获得更为良好的操控品质，ADS-33 文件中轴间耦合的最低标准应当需要调整，故进行下述仿真实验。

将小幅/高频姿态变化数据采集模型修改为图 5-25 所示，采集数据为：时钟信息、俯仰姿态角、滚转姿态角。

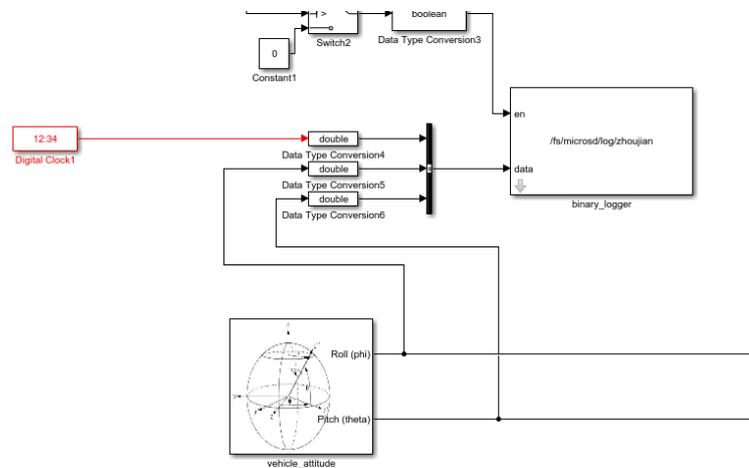


图 5-25 轴间耦合数据采集模型

编译模型，将代码烧录进自驾仪 Pixhawk 中，进行半物理仿真，仿真过程与中幅/中低频姿态变化相似：将四旋翼飞行至合适高度，待其稳定悬停后，向下拨动数据采集开关（CH6），开始采集数据，此时，迅速大幅拨动俯仰杆（俯仰角最终应达到 $10^\circ \sim 45^\circ$ ），拨动后保持俯仰杆不动，并保持 4 秒时间以上，期间还需观察四旋翼飞行器滚转角度是否有较大变化，完成打分评级后，关闭数据采集开关，取出内存卡，读取数据文件并寻找对应指标。以下是实验所测数据，表 5-5。

表 5-5 轴间耦合指标和等级

组次	$\Delta\theta_{pk} / \Delta\phi_4$	等级
1	0.075	1
2	0.129	1
3	0.155	1

4	0.191	1
5	0.256	2
6	0.291	2
7	0.332	2
8	0.429	3
9	0.481	3
10	0.517	3

ADS-33 文件中, 轴间耦合指标 $\Delta\theta_{pk}/\Delta\phi_4$, 等级 1 不可以超过 ± 0.25 , 等级 2 不可以超过 ± 0.60 , 结合实验数据, 修改四旋翼的轴间耦合指标等级标准为: 对于等级 1 不可以超过 ± 0.20 , 等级 2 不可以超过 ± 0.40 。

5.3 评分表设计及预估评价流程总结

在开始进行操控品质评价时, 首先需要根据待评价四旋翼的类型选择将要评价的内容, 预估评价内容的选择如下表, 其中, “+1” 表示该预估评价内容的指标等级大于等于等级 2 即可认为该预估评价内容为等级 1, “0” 表示指标等级标准不变, 认定评价内容的选择如表 5-6 所示。

表 5-6 不同类型四旋翼对预估评价的要求

四旋翼类型	通用型	侦察型	运输型
小幅/高频姿态变化	+1	0	+1
中幅/中低频姿态变化	0	0	+1
轴间耦合	0	0	0
纵横向稳定性	0	0	0
.....

以通用型四旋翼飞行器为例, 设计预估评价评分表如表 5-7 所示, 预估评价最终等级为实际等级中最低的等级。

表 5-7 预估评价评分表

四旋翼类型: 通用型	指标 1	指标 2	指标对应等级	等级标准	实际等级
小幅/高频姿态变化	ω_{BW_θ}	τ_p		+1	

中幅/中低频姿态变化	$\frac{q_{pk}}{\Delta\theta_{pk}}$	$\Delta\theta_{min}$	0
轴间耦合	$\Delta\theta_{pk}/\Delta\phi_4$	无	0
纵横向稳定性			0
.....
			最终等级

预估评价内容目前包括：小幅/高频姿态变化，中幅/中低频姿态变化，轴间耦合。

针对四旋翼飞行器内部参数是否已知的情况，共有两种方式进行预估评价，获取指标的方法不唯一。

若四旋翼飞行器内部参数已知，则可以直接通过仿真计算获取各项内容的指标。小幅/高频姿态变化指标的获取可以使用 4.2.1 中第一个情况介绍的方法，即从仿真模型提取出待测通道模型，使用更为便捷的系统辨识工具箱读取指标。中幅/中低频姿态变化则可以使用 4.2.2 中第一个情况介绍的方法，在待测通道模型中，通过输入较大阶跃信号，观察待测通道姿态角和角速度变化，便能读取指标。轴间耦合需要仿真测得操纵轴输入 4s 后异轴偏离的最大角度，即观察操纵轴输入后，其它轴的变化情况。

若四旋翼内部参数未知，则需要测得相关飞行数据，处理数据以获得指标。4.2.1 中第二个情况所用的方法，小幅/高频姿态变化需要飞行测得俯仰（滚转）角变化、油门指令输入和对应的时钟信息，通过 CIFER 软件进行频域响应辨识、复合分窗处理等一系列处理，获得辨识结果后读取指标。中幅/中低频姿态变化同样可以使用 4.2.2 中第二种情况的指标获取方式，只需测得飞行过程中待测通道的角速度变化、姿态角变化和对应的时钟信息。轴间耦合需要在飞行过程中记录操纵轴姿态角变化、它轴姿态角变化和对应的时钟信息。在获得所有预估评价指标后，对照等级划分图，填写预估评价表，得到预估指标等级。

以上分析研究了四旋翼飞行器预估评价的相关内容，预估评价描述的是四旋翼飞行器单一具体的飞行操作性能，其选取的指标需要充分表现出四旋翼飞行器在该性能方面的优劣程度，指标选取完成后，还应当根据不同指标的性能表现情况划分出不同等级，若四旋翼参数已知，则可直接通过设置测量点，仿真得到该四旋翼预估评价的各个指标，若四旋翼参数未知，则可通过飞行测得数据，处理数据以获得所需指标，理论上，对于

同一架四旋翼而言，两种方式所获得的各个指标应当相近，分别用两种方式进行实验，划分出指标等级，此时便可以对四旋翼飞行器进行预估评价，实际飞行测试记录所需数据，并对该四旋翼飞行器进行等级评价，分析处理记录的飞行数据，与所建立的指标等级图比对，检验等级是否一致。最后设计了预估评价的评分表，并总结了预估评价的完整流程。

6 认定评价试验

认定评价内容与四旋翼任务科目基元关联紧密，它是对四旋翼飞行器完成某一特定任务动作的优劣评价，比如认定评价内容中的转向目标，考察的是四旋翼飞行器能否快速改变朝向以追踪目标，认定评价的每个考察内容叫做任务科目基元，任务科目基元应当涵盖所有四旋翼飞行器的任务动作，不同类型的四旋翼飞行器需要选择对应的任务科目基元来进行认定评价，参考 ADS-33 文件中任务科目基元分类表，选择并修改典型且适合多旋翼的任务科目基元，每个任务科目基元需要设计对应的飞行试验来进行评价，目前选择设计飞行试验的任务科目基元为：悬停、加速和减速、转向目标。各飞行试验建立在 ADS-33 文件的飞行试验基础上，由多名飞控手提出建议修改成适合四旋翼飞行器。

ADS-33 文件中，旋翼机需要飞行试验测得认定等级，因为旋翼机俯仰通道和滚转通道控制原理不相同，其设计的飞行试验对两个通道的测试难度及内容也有所差别，然而四旋翼飞行器的俯仰通道和滚转通道控制原理相同，故在设计飞行试验时可以对两个通道进行同样难度和内容的测试。

每名飞控手主观打分时都会有自己的打分标准，且差异较大，评价标准的差异是因为关注点和个人操作水平不同等众多原因综合造成的，换一个角度来考虑，在允许的范围内，评价标准的差异会让主观评价更为全面，但为了避免他们的标准差异过大，每个飞行试验都需要设计参考标准，以统一其打分，而且完成评价的飞控手人数应当足够多，不然无法保证评价的全面与准确。

6.1 认定评价试验评级原则

认定评价的评级至少由三个飞控手完成，每个飞控手在进行飞行试验时必须严格遵守试验具体操作要求，飞控手在完成飞行试验后，按照 Cooper-Harper 等级认定准则，

对四旋翼完成该任务科目基元的能力进行评级，每个飞行试验会有各等级的最低评价参考指标，各评价必须满足评价参考指标。

根据四旋翼飞行器功能类型选择需要进行评价的任务科目基元，任务科目基元如表 6-1 所示，完成任务科目基元的飞行试验后，打分评级，取所有评价等级中最低的等级作为认定评价等级。

表 6-1 各类型四旋翼对应任务科目基元

飞行任务科目基元	四旋翼类别		
	通用型	侦察型	运输型
悬停	√	√	√
着陆	√	√	√
横向移位	√		
瞬态转弯	√	√	
转向目标		√	
斜面着陆	√	√	√
向心回转	√	√	√
“障碍滑雪” (Slalom)	√	√	√
滚转回动	√	√	
高“摇一摇” (High Yo-Yo)		√	
低“摇一摇” (Low Yo-Yo)		√	
急速侧跃		√	
急拉杆急推杆	√	√	
减速到冲刺	√	√	

垂直隐蔽	√
加速和减速	√

6.2 任务科目基元飞行试验

6.2.1 悬停

悬停是四旋翼飞行器的一种特殊的飞行动作，其飞行试验旨在考察四旋翼飞行器悬停的稳定性和进入悬停状态的快速性与协调性，飞行试验涉及到俯仰通道和滚转通道，所以飞行试验与旋翼机的飞行试验有所差别。

试验目标：检查四旋翼飞行器从低速飞行状态到稳定悬停的精确性和机动性，考察四旋翼飞行器悬停时的稳定性。

飞行描述：四旋翼飞行器稳定悬停于起始位置后，开始加速飞向目标位置，接近目标位置时开始悬停，悬停后保持位置不动，尽可能不让悬停位置与目标位置相距过远，但不可往目标位置回飞，目标位置与初始位置的连线与水平面的夹角为 45° ，且与多旋翼朝向夹角为 45° ，具体距离大小如图 6-1 和图 6-2 所示。不允许多旋翼飞至目标位置之前就已经几乎完成所有减速（95%），再缓缓停至目标位置，整个飞行过程中四旋翼不可以出现过于明显的振动。

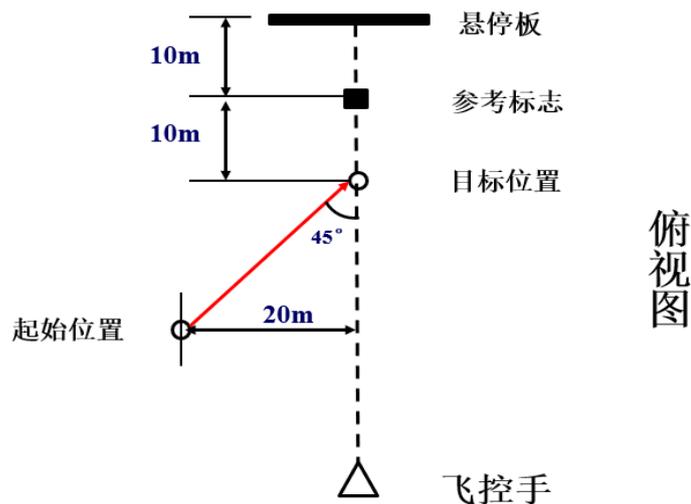


图 6-1 悬停飞行试验俯视图

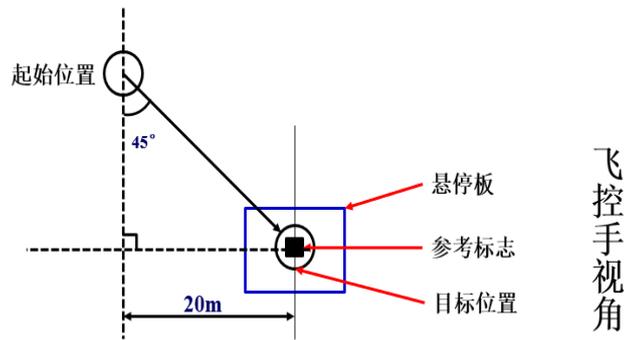


图 6-2 悬停飞行试验飞控手视角图

飞控手完成悬停飞行试验后，进行评价时的参考指标如表 6-2 所示。使用 Cooper-Harper 准则进行评级。

表 6-2 悬停飞行试验参考标准

参考指标	侦察型		通用型/运输型	
	良好	及格	良好	及格
从开始减速到稳定悬停所用时间	2s 内	5s 内	4s 内	5s 内
完成悬停试验所用时间	10s 内	10s 内	10s 内	10s 内
与目标位置的水平距离最大为	1m	1m	1m	1m
与目标位置的垂直距离最大为	0.67m	0.67m	0.67m	0.67m
朝向改变最大为	5°	5°	5°	5°

6.2.2 加速和减速

四旋翼飞行器通过改变姿态角，即改变机桨产生的拉力方向，从而产生水平方向的加速度，以实现水平方向上的加速和减速，此过程与旋翼机加速减速过程相似。加速和减速飞行试验旨在考察四旋翼飞行器加速和减速性能以及速度改变时的稳定性和协调性。

试验目标：检查俯仰通道的操纵品质，检查是否存在明显的纵横向间耦合，检查俯仰通道控制的协调性，检查电机能否对较频繁输入快速响应。

飞行描述：从稳定悬停状态开始，快速增加速度至最大值，飞行过程中，尽量保持高度不变，在到达四旋翼飞行最大速度时，迅速减速，并保持高度不变，稳定悬停并保持 5s，试验完成。试验俯视图如图 6-3。

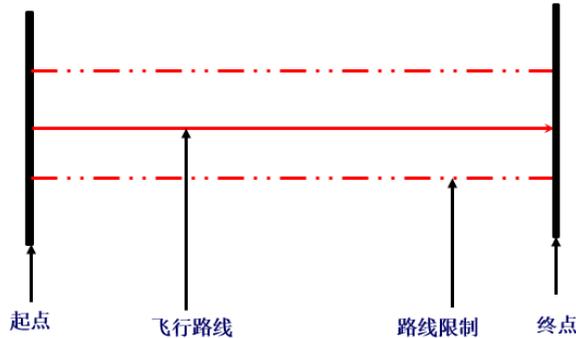


图 6-3 加速减速飞行试验

飞行试验完成后，飞控手进行认定评价时的参考指标如表 6-3 所示，按照 Cooper-Harper 准则得出认定等级。

表 6-3 加速减速飞行试验参考标准

参考指标	良好	及格
到达最大速度所用时间最低为	1.5s	3s
高度偏离最大为	10m	20m
朝向偏离最大角度为	10°	10°
减速所用时间最低为	3s	5s

6.2.3 转向目标

四旋翼飞行器通过改变角对称分布的两对电机的转速，在保持拉力和重力平衡的状态下，产生反扭力矩，从而完成偏航动作，航拍、追踪目标等功能类型的四旋翼飞行器对此飞行任务动作要求较高。转向目标飞行试验旨在考察四旋翼飞行器偏转性能，以及

偏转过程是否平稳和准确。

试验目标：检查大范围快速偏转的操控品质，检查是否能从快速偏转中恢复并保持准确的姿态，查看是否存在明显的轴间耦合问题。

飞行描述：四旋翼飞行器初始状态为稳定悬停，此时以最快速度顺时针方向（俯视四旋翼）完成 180° 偏航转向，悬停后再以最快速度逆时针方向（俯视四旋翼）完成 180° 偏航转向。

飞控手完成飞行试验后，进行认定评价时的参考指标如表 6-4 所示，认定等级按照 Cooper-Harper 评价准则得出。

表 6-4 转向目标参考标准

参考指标	良好	及格
转向后与初始悬停位置水平偏离	2m 内	4m 内
高度偏离最大为	1m	2m
最终朝向偏离初始朝向最大为	5°	10°
完成试验的最短时间	5s 内	10s 内

6.3 评分表设计与认定评价流程

认定评价的评分表如表 6-5 所示，该评分表由进行飞行试验的飞控手填写，填写顺序：每行从左至右，无需试验的表格内容不需要填写，最终的认定评价等级为所有任务科目基元评价等级中最低的等级。

表 6-5 认定评价评分表

四旋翼类型：	是否需 要试验	是否可操纵 是（√）/否 （×）	在许可负担下能否 达到合适性能 是（√）/否（×）	如果不加改进是否 满意 是（√）/否（×）	认定等级
悬停					

着陆
横向移位
瞬态转弯
转向目标
斜面着陆
向心回转
“障碍滑雪” (Slalom)
滚转回动
高“摇一摇” (High Yo-Yo)
低“摇一摇” (Low Yo-Yo)
急速侧跃
急拉杆急推杆
减速到冲刺
垂直隐蔽
加速和减速

认定评价中，每个任务科目基元需要至少三名飞控手分别完成，每个飞行试验都有相应要求和最低标准，在完成飞行试验后，各飞控手按照 Cooper-Harper 准则打分评级，填写认定评价表，各任务科目基元的等级为所有飞控手评级平均处理后四舍五入的值，认定评价等级为所有已完成的飞行试验中评价最低的等级。

作为四旋翼飞行器操控品质评价的重要部分，认定评价旨在评价四旋翼完成具体动作的能力，即完成任务科目基元的能力，每个任务科目基元可能涉及多个预估评价的内容，其评价等级不能仅用少数指标决定，而是需要飞控手通过飞行试验，综合飞行效果，根据 Cooper-Harper 认定准则做出全面评价。不同类型的四旋翼飞行器所需测试的任务科目基元不尽相同，每个任务科目基元都有对应的飞行试验。由于时间有限等原因，我们仅选取三个任务科目基元设计飞行试验：悬停、加速和减速、转向目标。按照具体要

求完成每个试验后，飞控手打分评级，得到该任务科目基元等级，最终综合所有等级，以最低的等级作为认定评价等级。

7 四旋翼飞行器操控品质评价流程

在预估评价的指标等级划分和认定评价飞行试验设计完成后，四旋翼飞行器操控品质评价体系便已建立完成，可以总结出完整四旋翼飞行器飞行品质评价流程及评价时可能出现的问题，然后将结合实物飞行实验，对已有四旋翼飞行器进行操控品质评价，以展示完整的操控品质评价流程，同时需要验证 4.2.3 中轴间耦合指标划分结果。

7.1 四旋翼飞行器操控品质评价流程

完整的操控品质评价应当包括预估评价和认定评价，预估评价和认定评价是两个完全不同的评价部分，二者从不同的角度对四旋翼飞行器进行评价，它们互为补充且有重叠，但不可互相替代。操控品质评价流程图如下图。

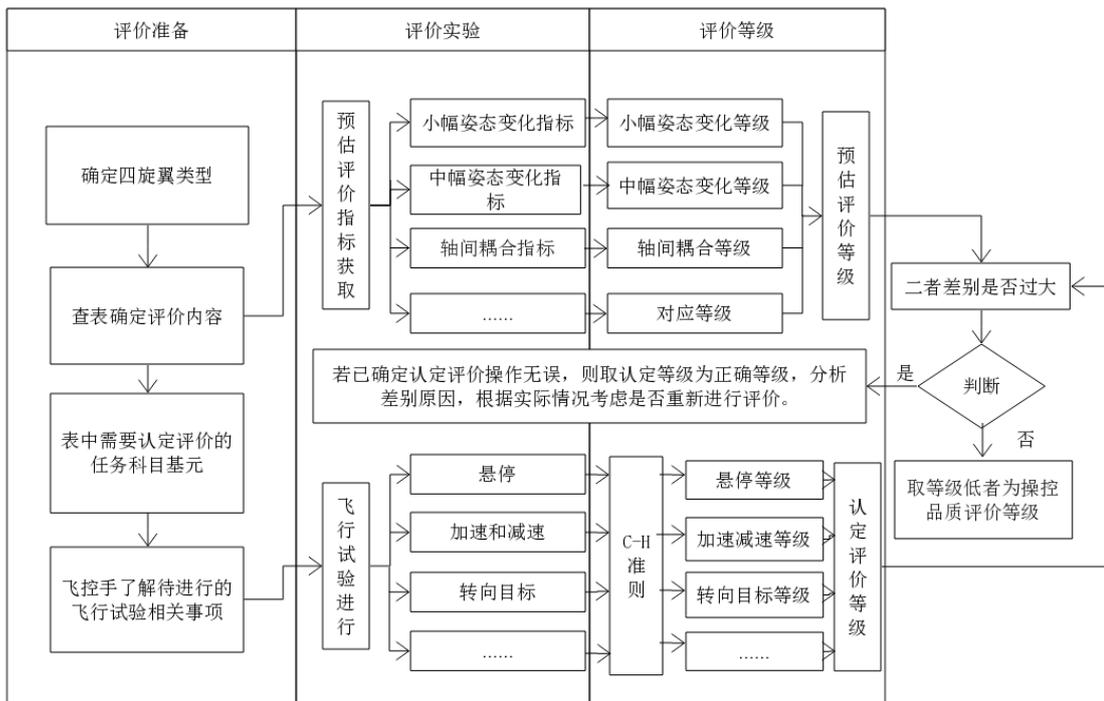


图 7-1 操控品质评价流程图

在评价一架四旋翼飞行器前，我们需要先确定其类型，四旋翼飞行器设计是为完成某些飞行任务而服务的，因此可根据其期望完成的飞行任务判断出其类型，在确定其类

型后，便可以查表选择出需要进行评价的内容。

选择出评价内容后开始进行评价，考虑到评价时的安全性，最好先进行预估评价的相关内容。进行预估评价时，若评价人员已知待测四旋翼飞行器的控制参数等相关信息或模型，可直接通过仿真测得预估评价的指标而不需要实际飞行。若四旋翼飞行器的参数和模型未知，则必须进行飞行测试获得用于计算出评价指标的飞行数据，再按照已给出的方式获得指标，比如，小幅姿态变化需要通过对待测通道输入输出系统辨识以测得带宽和相位滞后指标。获得所有预估评价的指标后，通过比对各预估评价内容的指标等级图得到各内容的等级，填写完评分表后，得到该四旋翼的预估评价最终等级。

预估评价完成后，开始进行认定评价。需要至少三名飞控手参与认定评价，在开始评价前，在评分表上勾选出需要进行的飞行试验，飞控手事先了解飞行试验的目标、内容、参考指标和注意事项，准备完成后进行认定评价。认定评价过程包含多个任务科目基元的飞行试验，飞控手轮流进行同一个飞行试验并做出自己的评价，然后按照 Cooper-Harper 准则得到该评价对应的等级，平均处理所有飞控手的评价等级，得到该任务科目基元的认定等级。完成所有需要评价的飞行试验后，评分表也应当填写完成。取其中等级最低者作为该四旋翼认定评价的最终等级。

在得到待测四旋翼预估评价和认定评价等级后，便可得到该四旋翼飞行器的操控品质评价等级，一般取等级低者作为操控品质等级即可。理论上，二者最后的等级应十分接近，若差别过大，则需要分析差别原因，在分析差别原因时需要将认定评价等级视为正确等级。

7.2 某四旋翼飞行器操控品质评价示范

按照上节 7.1 的评价流程顺序，首先进行预估评价，因滚转通道与俯仰通道评价过程相同，故仅进行了俯仰通道相关的预估评价，在无风的环境下，实物飞行测得数据。

7.2.1 待测四旋翼平台

选用的四旋翼飞行器为 Intel 公司的“Aero Ready to Fly Drone”，如图 7-2，其机身使用碳纤维制造，传感器配置齐全，且控制性能较好，飞行平稳且响应迅速。



图 7-2 Intel “Aero Ready to Fly Drone”

该四旋翼飞行器在飞行时会自行建立飞行日志，自动保存飞行数据，故只需在完成既定飞行操作后，从对应飞行日志中截取出所需数据即可。图 7-3 是读取出的部分数据文件。

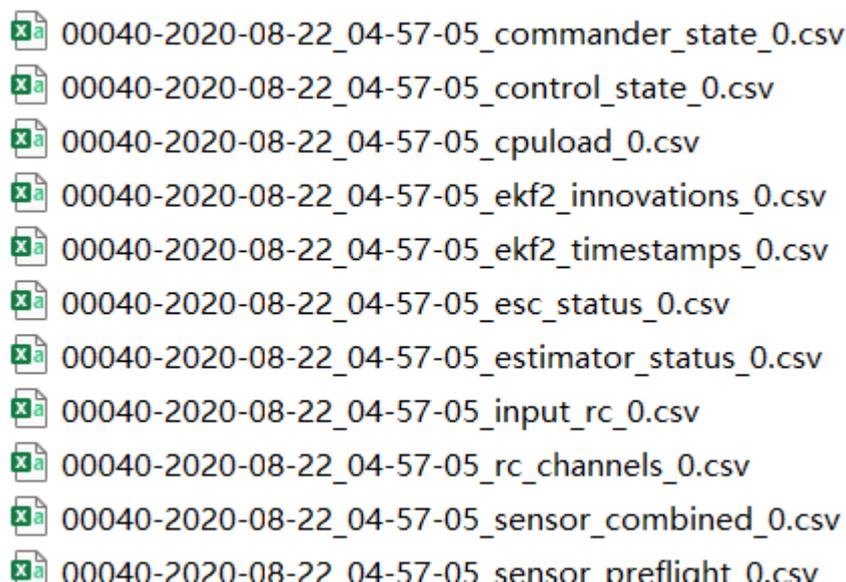


图 7-3 飞行日志数据文件

7.2.2 飞行数据采集

一共需要采集预估评价三个内容的飞行数据，每个内容对应的飞行操作不同。以下是每个内容的具体操作要求。

小幅/高频姿态变化：将四旋翼飞行器提升至合适高度，待其稳定悬停后，开始采集数据，此时拨动俯仰遥控杆，初始频率大约为 0.5Hz，控制四旋翼的俯仰角在 -10° 到 10° 之间来回振荡，缓慢加快拨动频率，最终大约增大到 2Hz，测试完成，重复操作三次以上。最终获得的数据，部分所示如表 7-1。

表 7-1 采集到的部分小幅姿态变化数据

Time (s)	input_rc	Picth (rad)
900.061913	1497	-0.00752
900.149699	1497	-0.00751
900.258241	1497	-0.00751
900.346125	1497	-0.0075
900.458679	1497	-0.00749
900.567753	1497	-0.0075
900.658367	1497	-0.00752
900.766993	1497	-0.00751
900.875016	1497	-0.00754
900.963400	1497	-0.00758
901.075270	1497	-0.0076

中幅/中低频姿态变化：飞控手将四旋翼飞行器提升至合适高度，待其稳定悬停后，开始采集数据，迅速大幅拨动俯仰杆（俯仰角最终应达到 10° ~ 45° ），测试中设置的角度最小为 20° ，拨动后保持俯仰杆不动，观察四旋翼飞行器在输入姿态变化指令后，能否快速到达期望角度，重复操作至少三次，飞控手根据其快速性对测试的四旋翼飞行器打分评级。最终记录的飞行数据，部分所示如表 7-2。

表 7-2 采集到的部分中幅姿态变化数据

Time (s)	q (rad/s)	Pitch (rad)
1312.484	0.065571	0.045955
1312.516	0.107366	0.046555
1312.548	-0.2322	0.044638
1312.58	0.055974	0.044791
1312.612	0.017809	0.046344
1312.644	0.108901	0.049338
1312.676	0.075616	0.052833
1312.708	0.266391	0.059117

1312.74	0.160157	0.064414
1312.772	-0.00445	0.067153
1312.804	0.021513	0.068147
1312.836	0.032585	0.068252
1312.868	-0.00407	0.068181
1312.9	-0.06244	0.066479
1312.929	0.052378	0.064141

绘制曲线图，图 7-4 为截取出来的一次中幅姿态变化的曲线图，其中，横坐标为时间 (s)，蓝色实线表示俯仰角速度 (rad/s)，红色虚线表示俯仰角变化 (rad)。

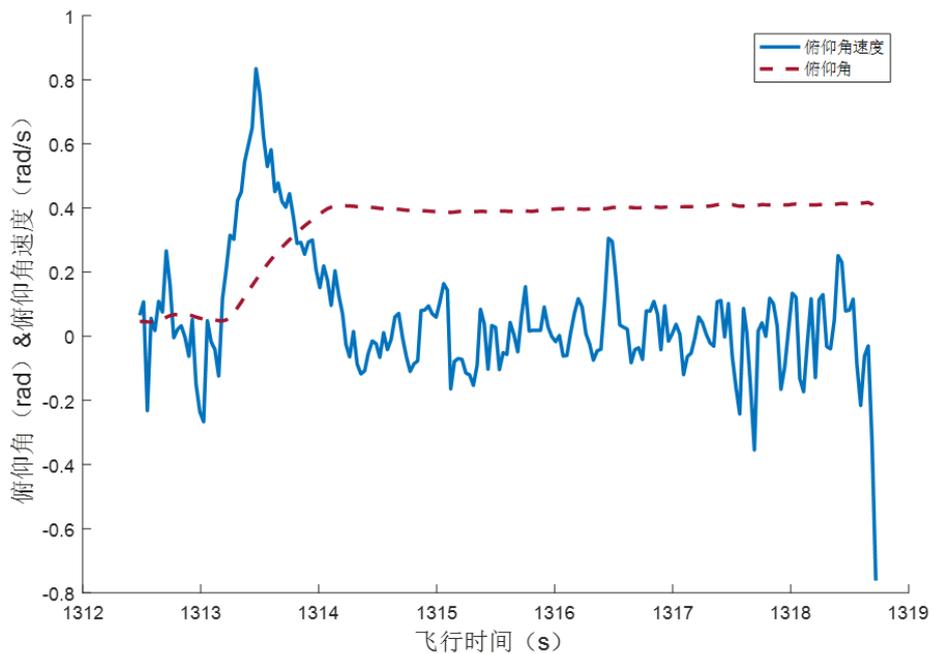


图 7-4 一次中幅姿态变化

轴间耦合：将四旋翼飞行至合适高度，待其稳定悬停后，开始采集数据，此时，迅速大幅拨动俯仰杆（俯仰角最终应达到 $10^\circ \sim 45^\circ$ ），测试中设置的角度最小为 20° ，拨动后保持俯仰杆不动，并保持 4 秒时间以上，期间还需观察四旋翼飞行器滚转角度是否有较大变化，重复操作至少三次。飞控手按照 3.2.3 中的等级判断标准进行打分，评分为等级 1，数据文件中部分数据如表 7-3 所示。

表 7-3 采集到的轴间耦合数据

Time (s)	Pitch (rad)	Roll (rad)
1300.245	-0.06006	-0.02163
1300.278	-0.0797	-0.02069
1300.341	-0.1187	-0.01911
1300.374	-0.13644	-0.01959
1300.405	-0.15266	-0.01965
1300.437	-0.17021	-0.02134
1300.469	-0.18689	-0.02205
1300.501	-0.20201	-0.02236
1300.533	-0.21649	-0.02284
1300.565	-0.23073	-0.0253

绘制轴间耦合曲线图，图 7-5 为截取的某次轴间耦合测试的姿态角变化曲线图，其中，横坐标为时间 (s)，蓝色实线代表俯仰角（操作轴）变化，单位：弧度 (rad)，红色虚线代表滚转角（异轴）变化，单位：弧度 (rad)。

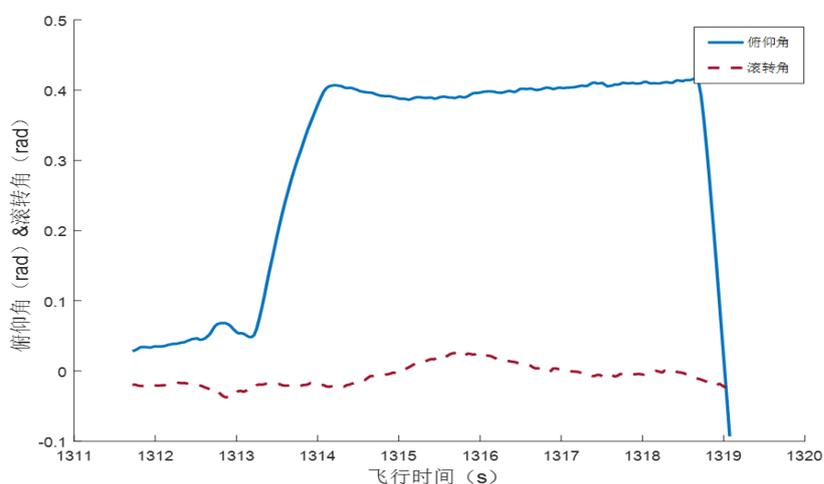


图 7-5 一次轴间耦合

7.2.3 数据分析与处理

1. 小幅/高频姿态变化：读取数据文件，将俯仰通道飞行扫频时的时钟信息、俯仰角

变化和油门指令截取并保存为.mat 文件，.mat 文件中，时钟信息变量命名为“time”，将该.mat 文件放入 CIFER 数据库文件夹中，使用 CIFER 软件进行系统辨识。先进行 FRESPID 频域辨识，图 7-6，需要设定好时间历程文件及输入输出，设置好窗口大小后，进行频域响应辨识。

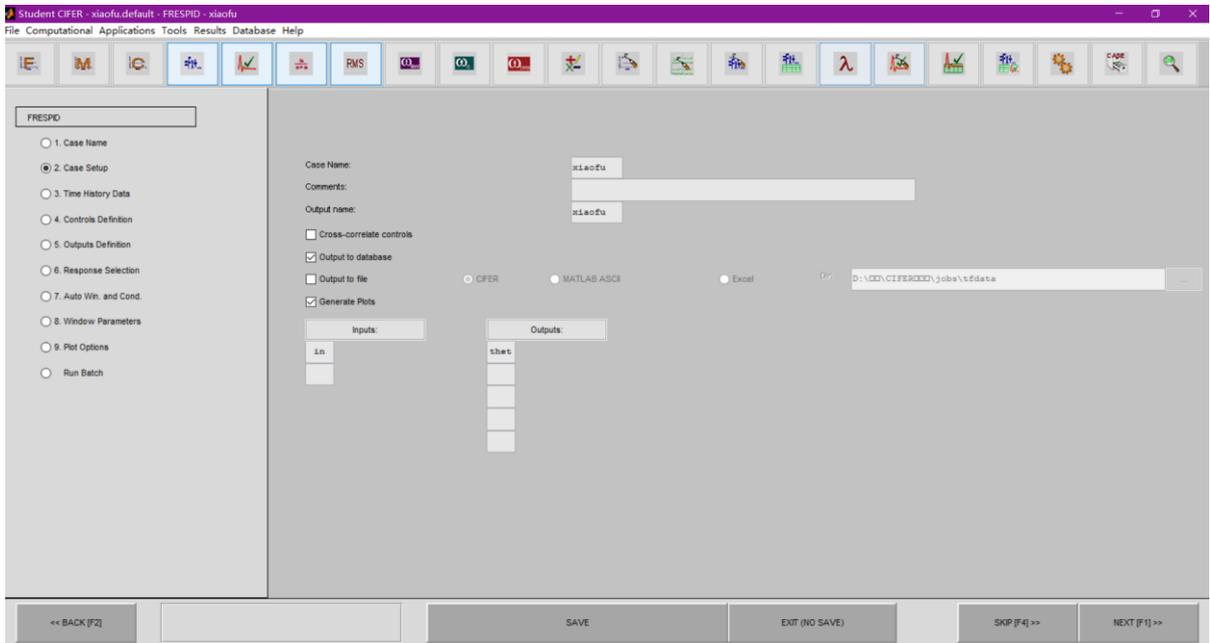


图 7-6 FRESPID 频域辨识界面

在得到初步辨识结果后，还需要进行复合分窗处理（COMPOSITE），最后得到辨识结果图，图 7-7。置信度大于 0.6 便可以说明辨识结果可信。

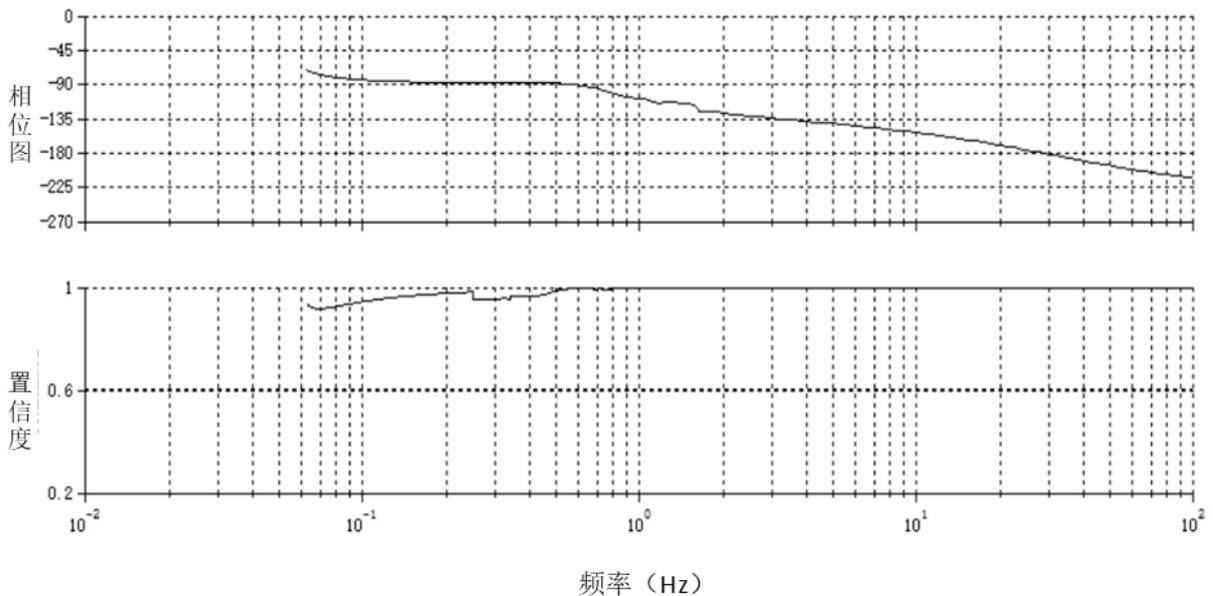


图 7-7 CIFER 软件辨识结果

可以读出小幅/高频姿态变化指标， $\omega_{BW_\theta}=18.84\text{rad/s}$ ， $\tau_p=0.3667\text{s}$ 。与小幅/高频姿态变化等级划分图上比对，位于等级 1 范围内，所以该四旋翼小幅/高频姿态变化内容为等级 1。

2. 中幅/中低频姿态变化：分析飞行数据，计算得到所有中幅姿态变化的指标，如表 6.4。

表 7-4 中幅姿态变化指标

组次	$\frac{q_{pk}}{\Delta\theta_{pk}} / (\text{s}^{-1})$	$\Delta\theta_{min} / \text{rad}$
1	2.555	0.388
2	2.168	0.526
3	2.659	0.408
4	3.760	0.444
5	2.421	0.421

与中幅/中低频姿态变化等级划分图比对，如图 7-8 中，指标恰好全部位于等级 1 范围内，该四旋翼飞行器中幅/中低频姿态变化等级为 1。

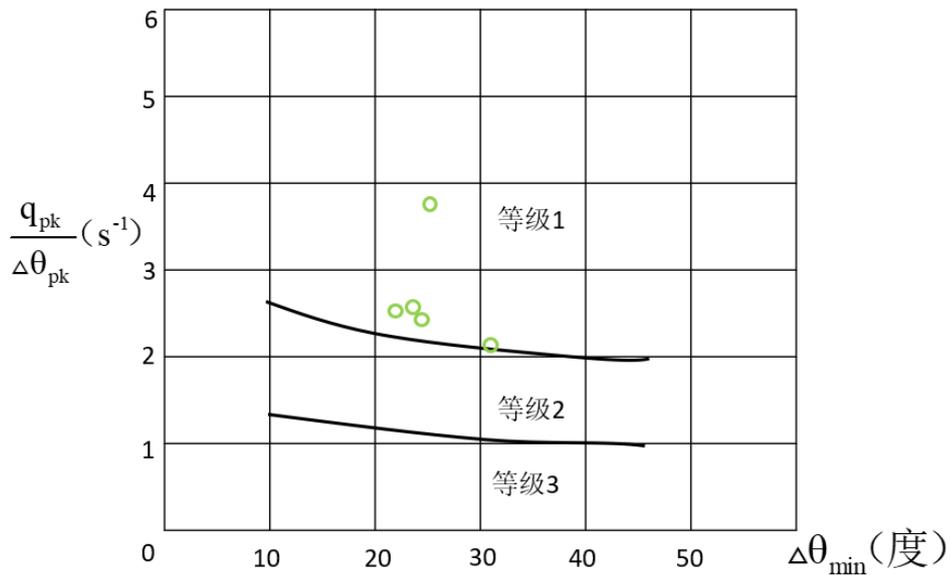


图 7-8 中幅姿态变化指标等级比对

3. 轴间耦合：计算得出所有轴间耦合操作的指标，如表 7-5。

表 7-5 轴间耦合指标

组次	1	2	3	4	5
roll/pitch	0.125	0.186	0.159	0.164	0.147

指标全部满足轴间耦合指标等级划分的等级 1 标准，故评价为等级 1。

4. 预估评价等级：三个预估评价内容全为等级 1，取等级最低者，得到该四旋翼飞行器预估评价为等级 1。

7.2.4 认定评价飞行试验与评级

所评价的四旋翼可分为通用型四旋翼，查表 6-1 得知，认定评价需要进行悬停飞行试验。

于静风环境中飞行试验，在了解了悬停飞行试验目的与具体操作后，具体测试过程如 6.2 所述，三个飞控手轮流使用待测四旋翼完成飞行试验操作，分别参考 Cooper-Harper 等级认定准则进行评价。三者做出的评价如表 7-6 所示。

表 7-6 悬停飞行试验评价

飞控手	个人评价	C-H 准则对应等级	认定评价等级
1	一般，需要较多的 补偿操作	4	2
2	良，需要偶尔调整 姿态以保持稳定	3	1
3	优，可稳定到达悬 停位置	2	1

平均处理认定评价等级后，得到悬停的认定评价等级为等级 1。

因为认定评价只需进行悬停内容的评价，故其认定评价最终等级与悬停内容的评价等级一致，为等级 1。

我们通过以对 Intel 公司的“Aero Ready to Fly Drone”四旋翼飞行器进行操控品质评价为例，介绍了四旋翼飞行器操控品质评价的具体操作流程。对待测四旋翼进行操控品质评价，需要首先进行预估评价，按照具体操作要求测得飞行数据，处理后获得各评价内容指标，和指标等级图比对后，得到各评价内容为等级 1，预估评价为等级 1。之

后进行认定评价，根据四旋翼类型选择需要评价的任务科目基元——悬停，飞控手按照飞行试验要求完成评价，得到认定评价为等级 1。该四旋翼飞行器的预估评价等级和认定评价等级都为等级 1，最终得到操控品质评价等级为等级 1。可以看出所设计的四旋翼操控品质评价体系以较为完整合理。

8 研究工作总结及后续工作建议

多旋翼飞行器因其结构简单、飞行灵活多变、成本较低等众多优点而广受大众喜爱，其发展热度逐年递增而鲜有衰减，虽然各式各样的多旋翼飞行器层出不穷，但却没有完整统一的评价体系对其操纵性能进行评价，众说纷纭，难免会有“王婆卖瓜，自卖自夸”的现象，倘若建立出完整的多旋翼操控品质评价体系，即测量多旋翼操控性能的“尺子”，便可以比对不同多旋翼飞行器在某性能上的优劣好坏，进而做出更为合适的选择。不仅如此，操控品质评价体系的建立，对设计人员设计制作多旋翼也会有重要指导作用，可以节省大量时间和劳动成本。

(1) 多旋翼飞行器的标准研究后续建议

随着多旋翼飞行器的发展，会有越来越多的企业参与多旋翼飞行器的研发、生产，使用多旋翼飞行器/无人机的人也会越来越多，如何评价各类多旋翼飞行器的飞行操控品质会变得越来越重要，相应标准的研究非常重要。在标准的研究方面，一定要加强与多旋翼研发、生产制造企业的联系，依据企业需求，完善评价指标，并依据不同企业的不同多旋翼无人机飞行器，测试获取更多的飞行数据，修正相应测试参数，更好地建立评价指标体系。

现在多旋翼飞行器/无人机的标准研究多是基于整体环境可靠性、安全性方面的研究，在飞行操控品质方面需要加强，这样才能更好地有助于多旋翼飞行器制造企业对多旋翼飞行器研发制造的促进作用，更好地有助于购买者通过相应指标体系获取多旋翼飞行器的性能购买到适合自己的产品。

此外，多旋翼飞行器标准研制也需要针对特殊使用场景，针对各类使用场景的特殊性，有针对性的研制相应的评价指标体系的标准，目前警用方面有开始研究自己的标准，但在操控飞行品质方面也是缺少的。在很多使用场景中的标准都亟需进行研究，如电力巡线、救灾探测、勘探测绘、人员搜救、快递流物等都是多旋翼飞行器广泛使用的场景，但相应的标准都亟需研究。

(2) 多旋翼飞行器飞行品质评价体系后续工作建议

多旋翼飞行器目前处于技术发展期，随着动力技术（新型电池、混合动力、地面供电、无线充电）、导航技术（定位技术、测速技术、避障技术、跟踪技术）、交互技术（手势控制技术、脑机接口技术）、通讯技术（5G 通讯技术、Wifi 通讯技术）、芯片技术、平台技术、空管技术等发展，多旋翼飞行器会越来越被普及，建立起完整的多旋翼操控品质评价体系也越来越必要！

我们借鉴旋翼机飞行品质评价的设计思想，结合多旋翼飞行器特性，建立了一套完整的四旋翼操控品质评价体系。建立的四旋翼操控品质评价由两个评价内容组成：预估评价与认定评价。四旋翼复杂的飞行也是由众多单一细小的飞行动作综合组成的，各姿态角变化的组合可令四旋翼做出各种飞行动作，预估评价便是对四旋翼完成这些基础变化及飞行的稳定性进行打分，且通过计算指标，定量比对以观察四旋翼是否满足性能要求。四旋翼飞行灵活多变，不同类型四旋翼可能需要做出不同的飞行动作，这些飞行动作较为复杂，难以像预估评价一样对四旋翼完成动作的好坏进行定量分析，故选择使用任务科目基元描述四旋翼的各种飞行动作，再由多名飞控手完成各任务科目基元的飞行试验，并按照 Cooper-Harper 认定准则进行打分评级。获得预估评价等级和认定评价等级后，该四旋翼操控品质评价便已完成，两者取其低者为操控品质等级。

考虑现实进行预估评价时，四旋翼的相关参数可能无法知晓，因此对参数是否已知的两种情况提出了不同的评价方法，若已知，则可以通过仿真计算得到所需指标；若未知，则需要飞行测得数据，利用系统辨识软件处理数据，辨识后，可读取指标。认定评价设计了详细具体的飞行试验，列写出了每个飞行试验评价的最低标准，飞控手在飞行测试前，需要仔细阅读每个飞行试验的目标及要求。

通过试验，我们初步建立了完整的四旋翼飞行器操控品质评价体系，针对飞行品质指标体系建立的研究，分别研究了预估评价和认定评价的方式方法，预估评价完成了三个评价内容：小幅/高频姿态变化、中幅/中低频姿态变化和轴间耦合。认定评价设计了三个任务科目基元的飞行试验：悬停、加速和减速、转向目标。

目前的不足是操控品质评价内容较少，四旋翼飞行器操控品质评价体系的完善还需要其它评价内容的等级划分和飞行试验设计等大量工作，此外基于四旋翼飞行器操控品质评价的多旋翼的操控品质评价体系仍需要多研究两者之间的差异，之后将其拓展到多旋翼操控品质评价。

(3) 多旋翼飞行器飞行品质评价体系平台建设展望

同时，依据对多旋翼飞行器飞行品质评价体系的研究成果，进一步建立完善的评价平台，服务于多旋翼飞行器相关的企业单位或个人。

多旋翼飞行器飞行品质评价体系平台的建立，有助于通过完整统一的评价体系对各类多旋翼飞行器的操纵性能进行客观的评价，在实验室就可完成比对不同多旋翼飞行器在某性能上的优劣好坏，进而做出更为合适的选择。操控品质评价体系平台的建立，对设计人员设计制作多旋翼飞行器也会有重要指导作用，可以节省大量时间和劳动成本。对中小型无人机企业的进一步扩大，可以取到很好的推动作用。