ICS 29.240.01
CCS F 25

DL

中华人民共和国电力行业标准

DL/T 2119—2020

架空电力线路多旋翼无人机飞行控制系统通用技术规范

General technical specification for multi rotor UAV flight control system of overhead power lines

2020-10-23 发布　　2021-02-01 实施

国家能源局 发布

目　　次

前　言……Ⅱ
1　范围……1
2　规范性引用文件……1
3　术语和定义……1
4　技术要求……3
5　试验方法……12
6　检验规则……19
附录 A　（规范性附录）　Crc16 校验格式……21
附录 B　（规范性附录）　JSON 航线存储文件格式……23
附录C　（资料性附录）USB TYPE-C接口接插件规格……26
附录 D　（资料性附录）　XT30 接插件规格……27
附录 E　（资料性附录）　UART 接插件规格……28
附录 F　（资料性附录）　PWM 接插件规格……29
附录 G　（规范性附录）　地面站 UI 设计……30

前　言

本标准依据 GB/T 1.1-2009《标准化工作导则　第 1 部分：标准的结构和编写》给出的规则起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由全国架空线路标准化技术委员会线路运行分技术委员会（SAC/TC 202/SC 1）归口。

本标准负责起草单位：中国电力科学研究院有限公司。

本标准参加起草单位：国家电网有限公司、国网湖北省电力有限公司、国网安徽省电力有限公司、国网江苏省电力有限公司、广东电网有限责任公司电力科学研究院、国网湖南省电力有限公司、国网天津市电力公司、国网陕西省电力公司、深圳市科比特航空科技有限公司、江苏久飞智能科技有限公司、中移（成都）信息通信科技有限公司、中国电子科技集团公司第五十四研究所、深圳市大疆创新科技有限公司、咸亨国际（杭州）航空自动化有限公司。

本标准主要起草人：邵瑰玮、彭江、刘壮、王剑、付晶、彭波、蔡焕青、马建国、严波、王永强、文志科、周玎、郭可贵、戴永东、陈怡、麦晓明、王峰、李学刚、胡攀峰、李兴旺、张丽华、邓文斌、凡启康、苏郁、冯超英、高翔、张晓莉。

本文件在执行过程中的意见或建议反馈至中国电力企业联合会标准化管理中心（北京市白广路二条一号，100761）。

架空电力线路多旋翼无人机飞行控制系统通用技术规范

1 范围

本标准规定了架空电力线路多旋翼无人机飞行控制系统配置和接口技术要求、试验方法和检验规则等。

本标准适用于对交直流架空电力线路进行巡视、检测和检修的多旋翼无人机。无人直升机和固定翼无人机可参照采用。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 14911 测绘基本术语

DL/T 1482 架空输电线路无人机巡检作业技术导则

DL/T 1578 架空输电线路无人直升机巡检系统

3 术语和定义

GB/T 14911、DL/T 1482和DL/T 1578界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

多旋翼无人机 multi rotor unmanned aerial vehicle

具有多个旋翼轴的无人飞行器（不包括带尾桨型式），通常有四旋翼、六旋翼和八旋翼等结构。

3.2

多旋翼无人机巡检系统 multi rotor unmanned aerial vehicle inspection system

利用多旋翼无人机搭载可见光、红外等任务设备，完成架空电力线路巡检任务的作业装置。

3.3

多旋翼无人机飞行控制系统 multi rotor unmanned aerial vehicle mechatronic systems

由多旋翼无人机搭载，可实现飞行控制功能的子系统或子模块组成的系统集合。通常包括飞行姿态控制、导航定位和数据链等子系统，且具有唯一设备识别码。

3.4

飞行数据记录模块 flight data record module

通过唯一设备识别码与飞行控制系统数据交互，采集飞行状态参数并可独立获取实时位置信息的装置。

3.5

外挂附加荷载 extra payload

除可见光、红外任务设备外，搭载在多旋翼无人机上用于架空电力线路检测和检修等作业的设备或装置。

3.6

实时动态定位 Real-Time Kinematic

一种基于载波相位观测值的实时性、高精度的动态定位技术，可实时提供多旋翼无人机在指定坐标系中的位置信息。

3.7

惯性测量单元 inertial measurement unit

测量多旋翼无人机三轴姿态角（或角速率）及加速度的装置，一般包含三个单轴的加速度计和三个单轴的陀螺仪。

3.8

航点信息 waypoint information

由多旋翼无人机位置信息（经纬度和高度）及该位置处动作信息等组成，以指示多旋翼无人机在指定位置完成指定动作。其中，动作信息包括航向、速度和姿态调整等飞行控制相关指令及任务设备俯仰、偏转、拍摄等操作相关指令。

3.9

历史航线 historical route

对巡检过程中记录并存储的航点信息进行编辑、组合所生成的可供调用的航线。

3.10

机体坐标系 body coordinate system

以多旋翼无人机定位中心为原点 O_b 建立的三维正交直角坐标系 O_b-$X_bY_bZ_b$。X_b 轴在多旋翼无人机参考平面内平行于机身轴线并指向机头方向，Z_b 轴与 X_b 轴垂直并指向机身下方，Y_b 轴与 Z_b 轴和 X_b 轴构成右手正交坐标系。

3.11

地面坐标系 earth coordinate system

以地面某一点为原点 O_e 建立的三维正交直角坐标系 O_e-$X_eY_eZ_e$。X_e 轴在水平面内并指向正北方向，Y_e 轴在水平面内并指向正东方向，Z_e 轴垂直于水平面并指向地心。

3.12

相对位置坐标系 relative position coordinate system

以起飞点为原点 O_r 建立的三维正交直角坐标系 O_r-$X_rY_rZ_r$。X_r 轴在水平面内并指向正北方向，Y_r 轴在水平面内并指向正东方向，Z_r 轴垂直于水平面并指向地心。

3.13

2000 国家大地坐标系 China Geodetic Coordinate System 2000；CGCS2000

采用 2000 参考椭球，以地心为原点 O 建立的三维正交直角坐标系 O-XYZ。Z 轴为国际地球旋转局参考极方向，X 轴为国际地球旋转局的参考子午面与垂直于 Z 轴的赤道面的交线，Y 轴与 Z 轴和 X 轴构成右手正交坐标系。

4 技术要求

4.1 一般要求

4.1.1 飞行控制系统的惯性测量单元、导航定位模块和电子罗盘等关键组部件宜采用冗余设计。

4.1.2 飞行控制系统应具有唯一设备识别码，且可通过该码与飞行数据记录模块进行交互认证。

4.1.3 飞行控制系统在正确接收飞行数据记录模块的解锁指令后，方可控制多旋翼无人机开

始工作。

4.1.4 飞行控制系统应按规定的格式生成姿态信息数据包、地理信息数据包和登录信息数据包，各信息数据包格式分别见表 1、表 2 和表 3，其余类型数据包可自定义。

表 1　姿态信息数据包格式

起始偏移	含义	类型/编码	长度 字节	描述
0	起始字节	0xAA	1	数据包起始标志
1	包长度	uint8_t	1	长度包括起始字节和校验位
2	包序列	uint8_t	1	从 0~255 依次循环
3	协议版本号	uint8_t	1	指示当前协议版本，从 0 开始递增。
4	数据包类型码	0x01	1	指示本数据包类型为姿态信息数据包
5	翻滚角 roll	int16_t	2	O_b-$X_bY_bZ_b$ 坐标系下，Z_b 轴与过 X_b 轴铅垂面的夹角，单位为°。当 Y_b 轴的正轴位于过原点 O_b 的水平面之下时取正值，精度为小数点后 2 位。
7	俯仰角 pitch	int16_t	2	O_b-$X_bY_bZ_b$ 坐标系下，X_b 轴与水平面的夹角，单位为°。当 X_b 轴的正轴位于过原点 O_b 的水平面之上时取正值，精度为小数点后 2 位。
9	偏离角 yaw	int16_t	2	O_b-$X_bY_bZ_b$ 坐标系下，对多旋翼无人机飞行过程中的任意一点，将其飞行航线和 X_b 轴同时投影在水平面上，在飞行航线投影上作从当前点至下一点的连线 L，此时 X_b 轴投影与连线 L 的夹角即为多旋翼无人机在该点的偏离角，单位为°。连线 L 位于 X_b 轴的正轴逆时针方向时取正值，精度为小数点后 2 位。
11	X_e 轴方向速度 V_X	int16_t	2	O_e-$X_eY_eZ_e$ 坐标系下，多旋翼无人机在 X_e 轴方向的运动速度，单位为 m/s。运动方向与 X_e 轴的正轴方向一致取正值，精度为小数点后 2 位。
13	Y_e 轴方向速度 V_Y	int16_t	2	O_e-$X_eY_eZ_e$ 坐标系下，多旋翼无人机在 Y_e 轴方向的运动速度，单位为 m/s。运动方向与 Y_e 轴的正轴方向一致取正值，精度为小数点后 2 位。
15	Z_e 轴方向速度 V_Z	int16_t	2	O_e-$X_eY_eZ_e$ 坐标系下，多旋翼无

				人机在 Z_e 轴方向的运动速度，单位为 m/s。运动方向与 Z_e 轴的正轴方向一致取正值，精度为小数点后 2 位。
17	电池电压	uint16_t	2	电池当前电压值，单位为 Volt，精度为小数点后 2 位。
19	剩余电量	uint16_t	2	电池当前电量与满电状态时电量的比值，单位为%，精度为小数点后 1 位。
21	飞行时间	uint16_t	2	一次飞行过程中，从离开地面开始计起，至当前时刻，多旋翼无人机在空中停留的时间，单位为 s，精度为小数点后 1 位。
23，24	校验位	uint16_t	2	Crc16 校验，检验范围为 0~22。
注：Crc16 校验格式见附录 A。				

表 2　地理信息数据包格式

起始偏移	含义	类型/编码	长度 字节	描述
0	起始字节	0xAA	1	数据包起始标志
1	包长度	uint8_t	1	长度包括起始字节和校验位
2	包序列	uint8_t	1	从 0~255 依次循环
3	协议版本号	uint8_t	1	指示当前协议版本，从 0 开始递增。
4	数据包类型码	0x02	1	指示本数据包类型为地理信息数据包
5	纬度	int32_t	4	CGCS2000 坐标系下，多旋翼无人机定位中心投影在参考椭球面的纬度，单位为°。投影位置位于北纬时取正值，精度为小数点后 7 位。
9	经度	int32_t	4	CGCS2000 坐标系下，多旋翼无人机定位中心投影在参考椭球面的经度，单位为°。投影位置位于东经时取正值，精度为小数点后 7 位。
13	高度	int16_t	2	CGCS2000 坐标系下，多旋翼无人机定位中心沿参考椭球面的法线至椭球面的距离，单位为 m。定位中心位于参考椭球面外时取正值，精度为小数点后 2 位。
15	X_r 轴方向相对起飞点位置	int16_t	2	O_r-$X_rY_rZ_r$ 坐标系下，多旋翼无人机定位中心投影在 X_r 轴上的值，单位为 m，精度为小数点后 2 位。

17	Y_r 轴方向相对起飞点位置	int16_t	2	O_r-$X_rY_rZ_r$ 坐标系下，多旋翼无人机定位中心投影在 Y_r 轴上的值，单位为 m，精度为小数点后 2 位。
19	Z_r 轴方向相对起飞点高度	int16_t	2	O_r-$X_rY_rZ_r$ 坐标系下，多旋翼无人机定位中心投影在 Z_r 轴上的值，单位为 m，精度为小数点后 2 位。
21，22	校验位	uint16_t	2	Crc16 校验，检验范围为 0~20。

表 3　登录信息数据包格式

起始偏移	含义	类型/编码	长度 字节	描述
0	起始字节	0xAA	1	数据包起始标志
1	包长度	uint8_t	1	长度包括起始字节和校验位
2	包序列	uint8_t	1	从 0~255 依次循环
3	协议版本号	uint8_t	1	指示当前协议版本，从 0 开始递增。
4	数据包类型码	0x03	1	指示本数据包类型为登录信息数据包
5	唯一设备识别码	char[32]	32	指示飞行控制系统唯一设备识别码
37	用户名	char[32]	16	当前使用者账号
53	自定义	char[32]	16	其它必要信息
69，70	校验位	uint16_t	2	Crc16 校验，检验范围为 0~68。

4.1.5 按给定航线记录航点信息生成历史航线后，在调用历史航线飞行过程中，与给定航线的飞行控制偏差水平方向不大于 1m、标准差不大于 0.5m；垂直方向不大于 1m、标准差不大于 0.5m。

4.1.6 飞行控制系统应在航线执行结束后生成完成状态数据包，完成状态数据包格式见表 4。

表 4 完成状态数据包格式

起始偏移	含义	类型/编码	长度 字节	描述
0	起始字节	0xAA	1	数据包起始标志
1	包长度	uint8_t	1	数长度包括起始字节和校验位
2	包序列	uint8_t	1	从 0~255 依次循环
3	协议版本号	uint8_t	1	指示当前协议版本，从 0 开始递增。
4	数据包类型	uint8_t	1	指示本数据包类型为完成状态数据包
5	航线完成状态	uint8_t	1	指示多旋翼无人机执行当前航线的结果。0 表示航线未执行完成，1 表示航线执行完成。
6	多旋翼无人机飞行状态	uint8_t	1	指示航线执行结束后多旋翼无人机的飞行状态。0 表示悬停，1

				表示返航，2 表示已返航降落，其他多旋翼无人机飞行状态可自定义。
7，8	校验位	uint16_t	2	Crc16 校验，检验范围为 0~6。

4.2 自主巡检功能要求

4.2.1 多旋翼无人机可搭载可见光或红外任务设备进行自主巡检作业，飞行控制系统可通过手动方式记录作业过程中的航点信息。

4.2.2 搭载可见光任务设备作业时，记录的航点信息内容要求见表 5。搭载红外任务设备时，多旋翼无人机位置和动作信息见表 5，载荷动作等信息参照表 5 自定义。

表 5　可见光任务设备航点信息内容要求

序号	信息类型	内容	描述
1	航点编号		对航点进行标识的编号，以阿拉伯数字 0,1,2,...,n 作为编号。
2	多旋翼无人机位置	纬度	CGCS2000 坐标系下，多旋翼无人机定位中心投影在参考椭球面的纬度，单位为°。投影位置位于北纬时取正值，精度为小数点后 7 位。
3		经度	CGCS2000 坐标系下，多旋翼无人机定位中心投影在参考椭球面的经度，单位为°。投影位置位于东经时取正值，精度为小数点后 7 位。
4		高度	CGCS2000 坐标系下，多旋翼无人机定位中心沿参考椭球面的法线至椭球面的距离，单位为 m。定位中心位于参考椭球面外时取正值，精度为小数点后 2 位。
5	多旋翼无人机动作	偏离角	O_b-$X_bY_bZ_b$ 坐标系下，对多旋翼无人机飞行过程中的任意一点，将其飞行航线和 X_b 轴同时投影在水平面上，在飞行航线投影上作从当前点至下一点的连线 L，此时 X_b 轴投影与连线 L 的夹角即为多旋翼无人机在该点的偏离角，单位为°。连线 L 位于 X_b 轴的正轴逆时针方向时取正值，精度为小数点后 2 位。
6		动作准备时间	从到达航点计起，至可见光任务设备开始执行动作指令的时刻，多旋翼无人机在该航点停留的时间，单位为 s，精度为小数点后 1 位。
7		飞行速率	从当前航点飞至下一航点的平均速度大小，单位为 m/s，精度为小数点后 2 位。若当前航点为最终航点，则飞行速率为 0m/s。
8	载荷动作[]	动作序号	对可见光任务设备动作进行标识的序号，以阿拉伯数字 0,1,2,...,n 作为序号，第一个动作序号为 0。
9		工作模式	可见光任务设备在当前航点的工作模式，为以下模式中的一个：空闲、拍照、开始录像；其他工作模式可自定义。
10		云台俯仰角	O_e-$X_eY_eZ_e$ 坐标系下，可见光任务设备主光轴与水平面间的夹角，单位为°。以任务设备镜头光心指向镜头前方为主光轴的正轴，当主光轴的正轴位于过光心的水平面之上时取正值，精度为小数点后 2 位。
11		云台偏转角	O_b-$X_bY_bZ_b$ 坐标系下，可见光任务设备主光轴与 X_b 轴间的夹角，单位为°，当主光轴的正轴位于 X_b 轴的正轴顺时针方向时取正值，精度为小数点后 2 位。
12		等效焦距	可见光任务设备在当前航点的等效焦距，单位为 mm，精确到个位。
13		拍摄张数	可见光任务设备在当前航点连续拍照的张数（拍照间隔时间由可见光任务设备性能确定）。

14		录像持续时间	一次录像的持续时间，从开始录像时刻计起，至停止录像时刻之间的时间间隔，单位为 s，精度为小数点后 1 位。
15		自定义	根据应用需求可自定义，包括但不限于可见光任务设备在当前航点拍摄部件的类型、曝光时间、光圈大小等信息。
16	采集时刻		当前航点采集完成的时刻，UTC+8 时间（北京时间），格式为 YYYYMMDDHHMMSS。
注 1：若同一航点有多组载荷动作，则载荷动作采用数组形式记录。 注 2：航点信息存储的文件格式为 JSON，且可通过地面站软件导出 Excel 报表。			

4.2.3 可在地面站中选取已存储的航点，根据需要对航点排序生成历史航线。航点序号以阿拉伯数字 0,1,…,n 作为标记。地面站中可存储的历史航线数量不少于 500 条，每条历史航线可容纳的航点数量不少于 99 个。航线信息存储的文件格式为 JSON，见附录 B。

4.2.4 地面站可检索和调用历史航线。调用历史航线工作时，应按航点序号顺序执行航点信息中记录的多旋翼无人机动作和载荷动作等指令。

4.2.5 进入航线起点的方式、到达航线终点后退出历史航线的方式可设置。

4.2.6 调用历史航线飞行时，对同一目标物拍摄的可见光照片中，图像中心点位置偏移不大于 1.5m，且目标物中心点像素偏移水平方向不大于 10%、垂直方向不大于 10%。

4.2.7 多旋翼无人机位置及偏离角、云台俯仰角及偏转角等信息可记录至可见光照片属性中。

4.3 接口要求

4.3.1 飞行数据记录模块接口要求

4.3.1.1 飞行控制系统应具有至少 1 个 USB TYPE-C 接口，用于接插飞行数据记录模块。飞行数据记录模块尺寸应不大于 70mm×70mm×20mm（长×宽×高）；质量宜小于 60g，最大不应超过 80g。

4.3.1.2 USB TYPE-C 接口的接插件规格参见附录 C。

4.3.1.3 USB TYPE-C 接口的接插件位置应合理设置，在接插飞行数据记录模块后，不影响多旋翼无人机巡检系统的性能。接插件附近应预留安装空间，以利于飞行数据记录模块的安装和固定。

4.3.1.4 USB TYPE-C 接口输出电压范围应为 4.4V~5.25V，最大驱动电流应不小于 800mA。

4.3.1.5 USB TYPE-C 接口应支持 OTG、USB2.0 或 USB3.0 通信协议。

4.3.1.6 飞行数据记录模块采用请求应答机制通过 USB TYPE-C 接口与飞行控制系统通信。飞行数据记录模块向飞行控制系统请求唯一设备识别码数据包格式见表 6，飞行控制系统返回唯一设备识别码数据包格式见表 7，飞行数据记录模块向飞行控制系统发送解锁指令数据包格式见表 8。

表 6　飞行数据记录模块请求唯一设备识别码数据包格式

起始偏移	含义	类型/编码	长度 字节	描述
0	起始字节	0xAA	1	数据包起始标志
1	数据包长度	uint8_t	1	长度包括起始字节和校验位
2	包序列	uint8_t	1	从 0~255 依次循环
3	协议版本号	uint8_t	1	指示当前协议版本，从 0 开始递增。
4	数据包类型	0x04	1	指示本数据包类型为飞行数据记录模块请求唯一设备识别码数据包
5，6	校验位	uint16_t	2	Crc16 校验，检验范围为 0~4。

表 7　飞行控制系统返回唯一设备识别码数据包格式

起始偏移	含义	类型/编码	长度 字节	描述
0	起始字节	0xAA	1	数据包起始标志
1	数据包长度	uint8_t	1	长度包括起始字节和校验位
2	包序列	uint8_t	1	从 0~255 依次循环
3	协议版本号	uint8_t	1	指示当前协议版本，从 0 开始递增。
4	数据包类型	0x05	1	指示本数据包类型为飞行控制系统返回唯一设备识别码数据包
5	唯一设备识别码	char[32]	32	指示飞行控制系统唯一设备识别码
37，38	校验位	uint16_t	2	Crc16 校验，检验范围为 0~36。

表 8　飞行数据记录模块返回解锁指令数据包格式

起始偏移	含义	类型/编码	长度 字节	描述
0	起始字节	0xAA	1	数据包起始标志
1	数据包长度	uint8_t	1	长度包括起始字节和校验位
2	包序列	uint8_t	1	从 0~255 依次循环
3	协议版本号	uint8_t	1	指示当前协议版本，从 0 开始递增。
4	数据包类型	0x06	1	指示本数据包类型为飞行数据记录模块返回解锁指令数据包
5	解锁指令	uint8_t	1	指示飞行数据记录模块与唯一设备识别码交互认证返回的结果，以判断飞行控制系统是否可以解锁多旋翼无人机开始工作。值为 0 时，表示认证通过，可以解锁；值为 1 时，表示认证未通过，不可解锁；值为 2 时，表示飞行数据记录模块故障，不可解锁；返回其余值时可自定义。
6，7	校验位	uint16_t	2	Crc16 校验，检验范围为 0~5。

4.3.1.7 飞行数据记录模块请求数据包格式见表 9，飞行控制系统应答数据包格式见表 10。

表 9　飞行数据记录模块请求数据包格式

起始偏移	含义	类型/编码	长度 字节	描述
0	起始字节	0xAA	1	数据包起始标志
1	数据包长度	uint8_t	1	长度包括起始字节和校验位
2	包序列	uint8_t	1	从 0~255 依次循环
3	协议版本号	uint8_t	1	指示当前协议版本，从 0 开始递增。
4	数据包类型	uint8_t	1	指示飞行数据记录模块请求飞行

				控制系统返回应答数据包的类型。值为 0x01 时，请求返回姿态信息数据包；值为 0x02 时，请求返回地理信息数据包；值为 0x03 时，请求返回登录信息数据包，请求返回其余数据包类型时可自定义。
5	应答数据包传输频率	uint16_t	2	指示飞行控制系统返回应答数据包的频率，单位为 Hz，精度为小数点后 1 位。
7，8	校验位	uint16_t	2	Crc16 校验，检验范围为 0~6。

表 10　飞行控制系统应答数据包格式

起始偏移	含义	类型/编码	长度 字节	描述
0	起始字节	0xAA	1	数据包起始标志
1	包长度	uint8_t	1	长度包括起始字节和校验位
2	包序列	uint8_t	1	从 0~255 依次循环
3	协议版本号	uint8_t	1	指示当前协议版本，从 0 开始递增。
4	数据包类型	uint8_t	1	指示飞行控制系统返回的应答数据包类型。值为 0x01 时，返回的为姿态信息数据包；值为 0x02 时，返回的为地理信息数据包；值为 0x03 时，返回的为登录信息数据包，返回其他类型的数据包时可自定义。
5	数据段	自定义	n	飞行控制系统返回的应答数据包类型所对应的数据段内容，其格式应符合表 1、表 2 和表 3 规定。
(n+5)，(n+6)	校验位	uin16_t	2	Crc16 校验，检验范围为 0~(n+4)。

4.3.2 外挂附加荷载接口要求

4.3.2.1 多旋翼无人机可根据应用需求选择搭载外挂附加荷载。飞行控制系统应具有至少 1 个满足 4.3.2.2~4.3.2.7 要求的机械、电气和通信接口，用于挂接外挂附加荷载。

4.3.2.2 机械接口位置应合理设置，附近应预留安装空间，在挂接外挂附加荷载后，不影响多旋翼无人机巡检系统的性能。

4.3.2.3 电气接口应采用 XT30 接插件，输出电压为直流 12V~28V，纹波系数小于 5%；额定功率不小于 24W。XT30 接插件规格参见附录 D。

4.3.2.4 通信接口应采用通用异步收发传输器（Universal Asynchronous Receiver Transmitter，以下简称“UART”），UART 串口采用 RS-232 接口或 RS-422 接口。UART 接插件规格参见附录 E。

4.3.2.5 宜支持脉冲宽度调制控制（Pulse Width Modulation，以下简称“PWM”）信号，

PWM 脉冲宽度应在 0μs ～2000μs 内连续可调，至少支持 50Hz 信号频率，输出通道不少于 4 路。PWM 接插件规格参见附录 F。

4.3.2.6 外挂附加荷载采用请求应答机制通过 UART 或 PWM 与飞行控制系统通信。飞行控制系统应提供串口通信协议。串口通信协议采用 8 个数据位、1 个起始位、1 个停止位，无奇偶校验；通信波特率应可调，至少包括 115200bps、57600bps 和 9600bps。

4.3.2.7 飞行控制系统可根据航点中相关信息生成外挂附加荷载动作控制指令，动作控制指令数据包格式见表 11。外挂附加荷载接收飞行控制系统发出的荷载动作控制指令后，应返回执行结果，执行结果数据包格式见表 12。飞行控制系统应将执行结果数据包发送至地面站。

表 11　外挂附加荷载动作控制指令数据包格式

起始偏移	含义	类型/编码	长度 字节	描述
0	起始字节	0xAA	1	数据包起始标志
1	包长度	uint8_t	1	长度包括起始字节和校验位
2	包序列	uint8_t	1	从 0~255 依次循环
3	协议版本号	uint8_t	1	指示当前协议版本，从 0 开始递增。
4	数据包类型码	uint8_t	1	指示本数据包类型为外挂附加荷载动作控制指令数据包
5	荷载动作控制指令	uint16_t	64	外挂附加荷载应执行的动作指令，可为单独一条动作指令，也可为一系列动作指令。
69	荷载返回执行结果最大时间	uint16_t	2	指示荷载响应动作控制指令并返回执行结果的最大时间，单位为 ms，精确到个位。若超过该最大时间，荷载仍未返回执行结果，则飞行控制系统判定动作控制指令失败。
71，72	校验位	uint16_t	2	Crc16 校验，检验范围为 0~70。

表 12　外挂附加荷载执行结果数据包格式

起始偏移	含义	类型/编码	长度 字节	描述
0	起始字节	0xAA	1	数据包起始标志
1	包长度	uint8_t	1	数长度包括起始字节和校验位
2	包序列	uint8_t	1	从 0~255 依次循环
3	协议版本号	uint8_t	1	指示当前协议版本，从 0 开始递增。
4	数据包类型码	uint8_t	1	指示本数据包类型为外挂附加荷载执行结果数据包
5	载荷响应结果	uint8_t	1	指示外挂附加载荷响应动作控制指令的执行结果。0 表示未响应动作控制指令，1 表示响应但动

				作执行未成功，2 表示响应且动作执行成功，响应其他动作控制指令的执行结果可自定义。
6	载荷响应结果传输方式	uint8_t	1	指示外挂附加载荷返回执行结果数据包的方式。0 表示仅返回 1 次执行结果数据包，1 表示按设置的传输频率周期性返回执行结果数据包。
7	载荷响应数据包传输频率	uint16_t	2	指示外挂附加载荷返回执行结果数据包的频率，单位为 Hz，精度为小数点后 1 位。
9	数据位	uint16_t	64	保留字节
73，74	校验位	uint16_t	2	Crc16 校验，检验范围为 0~72。

4.3.2.8 搭载外挂附加荷载作业时，飞行控制系统可通过手动方式记录当前航点信息。多旋翼无人机位置和动作信息见表 13，载荷动作等信息可自定义。

表 13　外挂附加荷载航点信息内容要求

序号	信息类型	内容	描述
1	航点编号		对航点进行标识的编号，以阿拉伯数字 0,1,2,...,n 作为编号。
2	多旋翼无人机位置	纬度	CGCS2000 坐标系下，多旋翼无人机定位中心投影在参考椭球面的纬度，单位为°。投影位置位于北纬时取正值，精度为小数点后 7 位。
3		经度	CGCS2000 坐标系下，多旋翼无人机定位中心投影在参考椭球面的经度，单位为°。投影位置位于东经时取正值，精度为小数点后 7 位。
4		高度	CGCS2000 坐标系下，多旋翼无人机定位中心沿参考椭球面的法线至椭球面的距离，单位为 m。定位中心位于参考椭球面外时取正值，精度为小数点后 2 位。
5	多旋翼无人机动作	偏离角	O_b-$X_bY_bZ_b$ 坐标系下，对多旋翼无人机飞行过程中的任意一点，将其飞行航线和 X_b 轴同时投影在水平面上，在飞行航线投影上作从当前点至下一点的连线 L，此时 X_b 轴投影与连线 L 的夹角即为多旋翼无人机在该点的偏离角，单位为°。连线 L 位于 X_b 轴的正轴逆时针方向时取正值，精度为小数点后 2 位。
6		动作准备时间	从到达航点计起，至外挂附加荷载开始执行动作指令的时刻，多旋翼无人机在该航点停留的时间，单位为 s，精度为小数点后 1 位。
7		飞行速率	从当前航点飞至下一航点的平均速度大小，单位为 m/s，精度为小数点后 2 位。若当前航点为最终航点，则飞行速率为 0m/s。
8	载荷动作[]	动作序号	对外挂附加荷载动作进行标识的序号，以阿拉伯数字 0,1,2,...,n 作为序号，第一个动作序号为 0。
9		自定义	记录的自定义载荷动作见表 11。
10	采集时刻		当前航点采集完成的时刻，UTC+8 时间（北京时间），格式为 YYYYMMDDHHMMSS。
注 1：若同一航点有多组载荷动作，则载荷动作采用数组形式记录。 注 2：航点信息存储的文件格式为 JSON，且可通过地面站软件导出 Excel 报表。			

4.4 导航定位功能要求

4.4.1 导航定位子系统应至少支持北斗卫星导航系统和全球定位系统（Global Positioning System，以下简称“GPS”）。

4.4.2 应支持实时动态定位（Real-Time Kinematic，以下简称“RTK”）功能，定位精度水平方向不低于 10cm、垂直方向不低于 20cm。

4.5 数据链功能要求

4.5.1 数据链子系统的无线电频率及其无线电发射设备应符合《中华人民共和国无线电管理条例》等规定，且取得无线电发射设备型号核准证（SRRC）。其中，工作频段和等效全向辐射功率见表 14。

表 14　数据链子系统要求

工作频段 MHz	等效全向辐射功率 dBm
840.5~845	≤46
1430~1444	≤42
2400~2483.5	≤27
5725~5850	≤33

4.5.2 数据链子系统宜具有自动跳频抗干扰功能。在同一区域（目视范围内）可容纳至少两套同型多旋翼无人机巡检系统同时工作，且相互无干扰。

4.5.3 数据链子系统当前工作频率可在地面站上实时显示。

4.6 地面站软件性能要求

4.6.1 飞行控制系统可记录地面站上人员登录信息，登录信息至少包括登录账号和密码。

4.6.2 飞行控制系统可记录电池电压、放电电流、剩余电量、剩余飞行时间和充放电循环次数等参数，并在地面站上显示。

4.6.3 地面站软件 UI 界面设计见附录 G。

5　试验方法

5.1 交互认证功能试验

试验样品、试验设备、试验步骤和试验结果如下：

a） 试验样品：组装好的多旋翼无人机巡检系统 1 套（按作业要求，所有设备安装、调试完毕）。

b） 试验设备：满足 4.3.1 要求的飞行数据记录模块两个（分别记为模块 A 和模块 B）。

c） 试验步骤：

1） 将模块 A 安装于试验样品上。

2） 将试验样品通电，完成自检，处于待机工作状态。

3） 通过模块 A 采集试验样品飞行控制系统唯一设备识别码，待认证通过后对试验样品进行控制操作，观察试验样品状态。

4） 将试验样品断电，在不改变试验样品其它任何配置情况下，取下模块 A，将模块 B 安装于试验样品上。

5） 将试验样品通电，完成自检，处于待机工作状态。

6） 通过模块 B 采集试验样品飞行控制系统唯一设备识别码，对试验样品进行控制操作，观察试验样品状态。

d） 试验结果：模块 A 认证通过后，试验样品可正确响应各操控指令；换装模块 B 后，

试验样品无法通过交互认证，不响应各操控指令。

5.2 与飞行数据记录模块接口适配试验

5.2.1 电气接口适配试验

试验样品、试验设备、试验步骤和试验结果如下：

a） 试验样品：组装好的多旋翼无人机巡检系统 1 套（按作业要求，所有设备安装、调试完毕）。

b） 试验设备：电子负载。

c） 试验步骤：

1） 将电子负载连接在试验样品 USB TYPE-C 接口电源输出端，如图 1 所示。

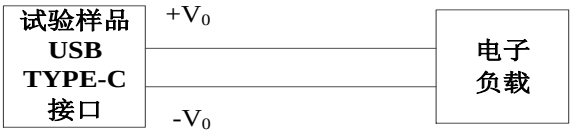


图 1　电气接口试验布置图

2） 将试验样品通电，调节电子负载功率为飞行数据记录模块的额定功率，记录电子负载电压读数 U。

3） 调节电子负载功率为飞行数据记录模块的满载功率，记录电子负载电流读数 I。

d） 试验结果：电压读数 U 和电流读数 I 满足 4.3.1.4 要求。

5.2.2 通信接口规约试验

试验样品、试验设备、试验步骤和试验结果如下：

a） 试验样品：组装好的多旋翼无人机巡检系统 1 套（按巡检作业要求，所有设备安装、调试完毕）。

b） 试验设备：满足 4.3.1 要求的飞行数据记录模块。

c） 试验步骤：

1） 将飞行数据记录模块安装于试验样品 USB TYPE-C 接口上。

2） 将试验样品通电，在地面站上输入登录信息，完成自检，处于待机工作状态。

3） 控制试验样品起飞，通过飞行数据记录模块读取飞行控制系统应答数据包内容。

d） 试验结果：通过飞行数据记录模块读取的飞行控制系统应答数据包格式和内容满足表 1、表 2 和表 3 要求。

5.3 与外挂附加荷载接口适配试验

5.3.1 电气接口适配试验

试验样品、试验设备、试验步骤和试验结果如下：

a） 试验样品：组装好的多旋翼无人机巡检系统 1 套（按作业要求，所有设备安装、调试完毕）。

b） 试验设备：示波器、电子负载。

c） 试验步骤：

1） 将示波器和电子负载分别连接在试验样品 XT30 接插件接口的电源输出端，如图 2 所示。

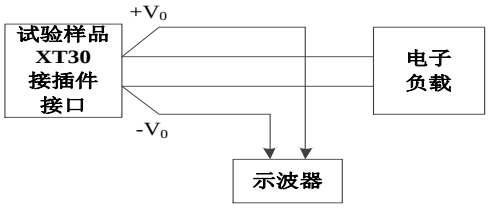


图 2　电气接口试验布置图

2） 将试验样品通电，调节电子负载为空载状态，设置示波器带宽为 20MHz，从示波器读取并记录电源输出电压 U_1 和纹波电压 ΔU_1。

3） 调节电子负载功率为试验样品标称的最大输出功率，从示波器读取并记录电源输出电压 U_2 和纹波电压 ΔU_2。

4） 调节电子负载功率为 24W，从示波器读取并记录电源输出电压 U_3 和电流 I_3。

d） 试验结果：按式（1）～式（3）分别计算空载和满载状态下纹波系数 η_1 和 η_2，电源输出额定功率 P_3：

$$\eta_1=\Delta U_1/U_1 \tag{1}$$

$$\eta_2=\Delta U_2/U_2 \tag{2}$$

$$P_3=U_3\cdot I_3 \tag{3}$$

η_1 和 η_2 均应小于 5%。U_1 和 U_2 均应在 12V~28V 范围内，P_3 应不小于 24W。

5.3.2 通信接口规约试验

试验样品、试验设备、试验步骤和试验结果如下：

a） 试验样品：组装好的多旋翼无人机巡检系统 1 套（按作业要求，所有设备安装、调试完毕）。

b） 试验设备：满足 4.3.2 要求的外挂附加荷载。

c） 试验步骤：

1） 将外挂附加荷载安装于试验样品接口上。

2） 将试验样品通电，完成自检，处于待机工作状态。

3） 在地面站中输入规定的动作控制指令，通过地面站或遥控手柄控制外挂附加荷载按规定的动作控制指令执行。

4） 观察外挂附加荷载指令执行情况，并通过地面站查看飞行控制系统读取的外挂附加荷载执行结果数据包内容。

d） 试验结果：外挂附加荷载应可按规定的动作控制指令执行动作，且通过地面站查看飞行控制系统读取的外挂附加荷载执行结果数据包格式和内容满足表 12 要求。

5.4 导航定位功能试验

5.4.1 导航系统适配功能试验

试验样品、试验设备、试验步骤和试验结果如下：

a） 试验样品：组装好的多旋翼无人机巡检系统 1 套（按作业要求，所有设备安装、调试完毕）。

b） 试验设备：电磁屏蔽室、GPS/北斗信号发生器。

c） 试验布置：将试验样品和 GPS/北斗信号发生器布置在电磁屏蔽室内合适位置，GPS/北斗信号发生器放置于多旋翼无人机前方 2m 处，关闭电磁屏蔽室门。

d） 试验步骤：

1） 将试验样品通电，完成自检，处于待机工作状态，观察试验样品卫星定位信息。

2） 接通 GPS/北斗信号发生器，在 CGCS2000 坐标系下设定模拟定位坐标 1，记录其经度 E_1、纬度 B_1 和高度 H_1。

3） 设置 GPS/北斗信号发生器发出北斗信号，静置 2min 后在地面站或遥控手柄上观察试验样品卫星定位情况，并记录其位置坐标（包括经度 x_{B1}、纬度 y_{B1} 和

高度 z_{B1}）。

4） 设置 GPS/北斗信号发生器发出 GPS 信号，静置 2min 后在地面站或遥控手柄上观察试验样品卫星定位情况，并记录其位置坐标（包括经度 x_{G1}、纬度 y_{G1} 和高度 z_{G1}）。

5） 按步骤 2）～步骤 4）的方法，分别在 CGCS2000 坐标系下设定模拟定位坐标 2 和 3，记录其经度 E_i、纬度 B_i 和高度 H_i（i=2,3）。在地面站或遥控手柄上观察试验样品卫星定位情况，并记录其位置坐标（包括经度 x_{Bi}、纬度 y_{Bi} 和高度 z_{Bi}，以及经度 x_{Gi}、纬度 y_{Gi} 和高度 z_{Gi}，i=2,3）。

e） 试验结果：GPS/北斗信号发生器发出北斗信号时，试验样品接收北斗信号正常；发出 GPS 信号时，试验样品接收 GPS 信号正常。按式（4）～式（7）分别计算水平偏差 u_{Bi}、u_{Gi} 和垂直偏差 v_{Bi}、v_{Gi}。

$$u_{Bi}=\sqrt{(x_{Bi}-E_i)^2+(y_{Bi}-B_i)^2}\qquad (i=1,2,3) \tag{4}$$

$$u_{Gi}=\sqrt{(x_{Gi}-E_i)^2+(y_{Gi}-B_i)^2}\qquad (i=1,2,3) \tag{5}$$

$$v_{Bi}=\left|z_{Bi}-H_i\right|\qquad (i=1,2,3) \tag{6}$$

$$v_{Gi}=\left|z_{Gi}-H_i\right|\qquad (i=1,2,3) \tag{7}$$

u_{Bi} 和 u_{Gi} 均应不大于 1.5m，v_{Bi} 和 v_{Gi} 均应不大于 3m。

5.4.2 “RTK”定位精度试验

试验样品、试验布置、试验步骤和试验结果如下：

a） 试验样品：组装好的多旋翼无人机巡检系统 1 套（按作业要求，所有设备安装、调试完毕）。

b） 试验布置：在户外场地上以相互不小于 20m 的间距布置 10 个测量点，在 CGCS2000 坐标系下记录各个测量点的经度 E_i、纬度 B_i 和高度 H_i（i=1,2,...,10），坐标精度不低于 5cm。

c） 试验步骤：

1） 利用“RTK”基准站采集基准点定位信息，采集时间为 5min。

2） 将多旋翼无人机放置在坚硬平坦地面上，测量其“RTK”定位模块距地面高度，记为 H_0（单位为 m，精确到小数点后 1 位）。

3） 将多旋翼无人机放置在点 1 位置，使其水平面中心与点 1 重合。将试验样品按正常工作要求进行布置和接线，通电，完成自检，在地面站上读取并记录位置坐标（包括经度 x_1、纬度 y_1 和高度 z_1）。

4） 按步骤 3）方法，将试验样品依次放置在点 2 至点 10 上进行测量和记录。

d） 试验结果：

按式（8）和式（9）计算水平偏差 u_{ai} 和垂直偏差 v_{bi}。

$$u_{ai}=\sqrt{(x_i-E_i)^2+(y_i-B_i)^2}\qquad (i=1,2,...,10) \tag{8}$$

$$v_{bi}=\left|z_i-H_0-H_i\right|\qquad (i=1,2,...,10) \tag{9}$$

u_{ai} 不大于 10cm， v_{bi} 不大于 20cm。

5.5 数据链功能试验

5.5.1 信号频率检测功能试验

试验样品、试验设备、试验步骤和试验结果如下：

a） 试验样品：组装好的多旋翼无人机巡检系统 1 套（按作业要求，所有设备安装、调试完毕）。

b） 试验设备：频谱分析仪

c） 试验布置：将频谱分析仪置于试验样品前方，频谱分析仪与试验样品的距离不大于 1.0m。

d） 试验步骤：

1） 接通频谱分析仪电源，处于正常工作状态。

2） 将频谱分析仪的检测频段设置为试验样品数据链工作频率左右各 10MHz 带宽范围。

3） 将试验样品通电，完成自检，处于待机工作状态。

4） 通过地面站或遥控手柄控制多旋翼无人机旋翼转动和任务设备动作，观察频谱分析仪上信号变化情况。

5） 将试验样品断电，观察频谱分析仪上信号变化情况。

e） 试验结果：试验样品通电后，控制多旋翼无人机旋翼转动和任务设备动作，频谱分析仪上均应出现快速变化的峰值信号，且该峰值信号对应的频率满足表 13 要求；断电后，频谱分析仪上的峰值信号消失。

5.5.2 跳频功能试验

试验样品、试验设备、试验布置、试验步骤和试验结果如下：

a） 试验样品：组装好的多旋翼无人机巡检系统两套（分别记为试验样品 A 和试验样品 B，按作业要求，所有设备安装、调试完毕）。

b） 试验设备：射频信号发生器、频谱分析仪

c） 试验布置：将试验样品 A 和试验样品 B 同时放置在目视范围内的指定区域，两者之间的距离不小于 50m。试验样品 A 与射频信号发生器、频谱分析仪的距离均不大于 1.0m。

d） 试验步骤：

1） 在指定区域将试验样品 A 和试验样品 B 同时通电，完成自检，处于待机工作状态。

2） 通过地面站或遥控手柄，控制试验样品 A 和试验样品 B 的任务设备同时动作，观察试验样品响应情况及回传至地面站或遥控手柄的遥控遥测信号和影像。

3） 接通射频信号发生器和频谱分析仪电源，处于正常工作状态。

4） 将频谱分析仪的检测频段设置为试验样品 A 当前工作频率左右各 10MHz 带宽范围。

5） 通过射频信号发生器对试验样品 A 当前工作频率施加强度为 20dBm 的射频干扰信号（等效全向辐射功率，带宽 10MHz），同时通过地面站或遥控手柄控制试验样品 A 的任务设备动作。

6） 在频谱分析仪上观察信号变化情况，并在地面站或遥控手柄上观察遥控遥测信号和影像传输质量。

e） 试验结果：试验样品 A 和试验样品 B 分别响应各自设备的操控指令，不出现遥控遥测信号和影像相互干扰等串频现象；对试验样品 A 当前工作频率施加射频干扰信

号时，频谱分析仪在干扰频率处出现持续峰值信号，遥控遥测信号不出现传输中断或丢失、无响应等现象，影像不出现迟滞或中断、马赛克、雪花、条纹、重影等影响辨识的现象。

5.6 航点记录和航迹调用功能试验

试验样品、试验布置、试验步骤和试验结果如下：

a） 试验样品：组装好的多旋翼无人机巡检系统 1 套（按作业要求，所有设备安装、调试完毕）。

b） 试验布置：

1） 应在户外场地进行，面积满足多旋翼无人机巡检系统飞行试验要求，不小于 30000m^2。

2） 布置有数字化测量系统，可对场地内多旋翼无人机空间位置进行测量和解算，该数字化测量系统的任一组成部分均应与试验样品不相关，其安装布置、结构关联和数据处理等方面均应完全独立于试验样品。数字化测量系统各方向测量精度均不低于 0.5m。

3） 场地上应有 500kV 及以上电压等级输电线路或模拟输电线路，线路杆塔类型包括耐张塔和直线塔，总数量不少于 3 基。每基杆塔上应至少架设导地线、绝缘子串、金具等设备。

4） 每基杆塔布置不少于 3 个拍照目标物，耐张塔上目标物应布置在耐张绝缘子串、金具、导地线和杆塔主材等处，直线塔上目标物应布置在悬垂绝缘子串、V 型绝缘子串、金具和导地线等处。所有的目标物应分布在杆塔两侧和档中，其中，绝缘子串和金具上的目标物总数均不少于 3 个，导地线和杆塔主材上的目标物总数不少于 2 个，且目标物中心点应明显标注。在目标物的 4 个方位（可为上、下、左、右，或左上、右上、右下、左下等），由近及远每隔一定距离（0.5m～1.0m）设置 1 个刻度标识。刻度标识尺寸为 5cm*5cm，其上清晰标注与目标物中心点的距离。每个方位上的刻度标识数量不少于 6 个，且最远端刻度标识与目标物中心点的距离不小于 4m。布置示意图如图 3 所示。

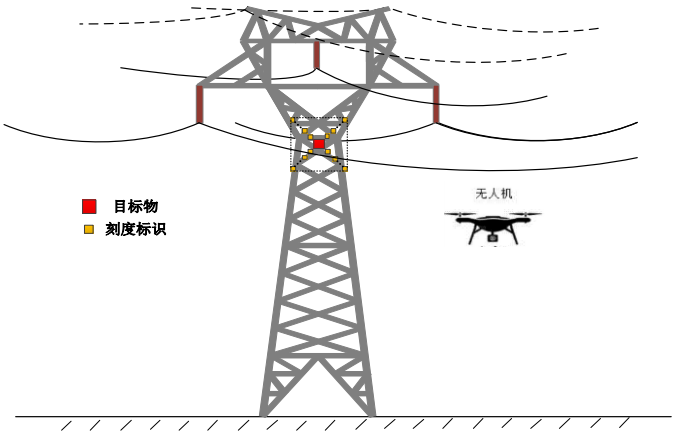


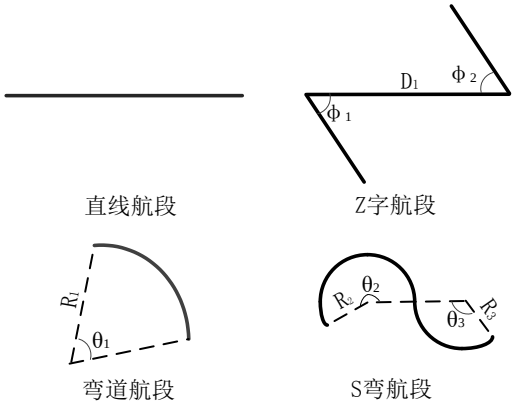
图 3　目标物和刻度标识布置示意图

c） 试验步骤：

1） 对试验场地距地面 2m 高的环境风速进行持续 5min 的测量。若测量期间最大瞬时风速始终不大于 3m/s，则可按如下步骤开始试验。试验期间应始终测量环境风速，若瞬时风速大于 3m/s，应中止试验，重新开始。

2） 以不低于 10cm 的精度在场地上规划给定航线，给定航线与周边障碍物距离应满足飞行安全要求，多旋翼无人机与目标物的拍摄距离设置为 6m～8m。给定

航线宜封闭，应包括直线航段、弯道航段、S 弯航段和由 3 个以上 Z 字航段组成的连续折线航段，高度应覆盖 15m～30m 区间，各航段示意见图 4。其中，直线航段总长度不小于 1000m，且有不小于 400m 的长度距线路边导线距离不大于 10m；连续折线航段总长度不小于 300m；弯道航段数量不少于 3 个；S 弯航段数量不少于 1 个



说明：
（1）30°≤Φ1、Φ2≤90°，D1≥20m。
（2）30°≤θ1≤90°，3m≤R1≤6m。
（3）180°≤θ2≤270°，45°≤θ3≤180°。
（4）3m≤R2、R3≤10m，且1.3≤R2/R3≤1.8。

图 4　航段示意图

3） 在指定起降区域将试验样品通电，完成自检。利用“RTK”基准站采集基准点定位信息，采集时间为 5min。

4） 将多旋翼无人机放飞至给定航线起点悬停，确认状态稳定后，以增稳飞行模式沿给定航线飞行，并利用数字化测量系统对多旋翼无人机空间位置进行持续测量和记录。

5） 飞行过程中，在地面站上以手动方式记录多旋翼无人机当前航点信息。在对目标物进行拍摄时，调节任务设备，使地面站中影像边沿在最外侧刻度标识框内（见图 3 中虚线框）。依次对每个目标物拍摄 1 张照片。

6） 控制试验样品降落至指定起降区域，在地面站中查看对目标物拍摄的照片和记录的航点信息。

7） 通过地面站编辑步骤 5）中记录的航点信息并生成历史航线，控制多旋翼无人机以全自主飞行模式沿历史航线工作，利用数字化测量系统对多旋翼无人机空间位置进行持续测量和记录。

8） 在地面站中查看沿历史航线工作时对目标物拍摄的照片，并与步骤 5）中拍摄的照片进行比对。

d） 试验结果：可以手动方式记录多旋翼无人机当前航点信息，在地面站中存储的航点信息内容应满足表 9 要求。调用历史航线工作时，多旋翼无人机巡检系统应按航点序号顺序执行航点信息中记录的多旋翼无人机动作和载荷动作等指令，与给定航线的飞行控制偏差、所有照片的图像中心点位置偏移和目标物中心点像素偏移均应满足 4.2.6 要求，且可在地面站上查看多旋翼无人机飞行状态和航线完成状态等信息。

5.7 地面站软件 UI 验证试验

试验样品、试验布置、试验步骤和试验结果如下：

a） 试验样品：组装好的多旋翼无人机巡检系统 1 套（按作业要求，所有设备安装、调试完毕）。

b） 试验布置：应在户外场地进行，面积满足多旋翼无人机巡检系统飞行安全要求，不小于 30000m^2。

c） 试验步骤：

1） 在场地上规划飞行航线，航线与周边障碍物距离应满足飞行安全要求。

2） 在指定起降区域将同型号、电压略高于预设告警电压的电池安装在多旋翼无人机上，将试验样品通电，完成自检。

3） 将多旋翼无人机放飞，沿规划航线持续飞行。

4） 飞行过程中，控制任务设备转动和拍照。在地面站中查看数据链子系统当前工作频率，电池电压、放电电流、剩余电量、剩余飞行时间和充放电循环次数等动力电池相关信息。

5） 当电池电压低于告警电压后，控制多旋翼无人机返航并降落至指定起降区域。告警和返航期间，查看地面站软件 UI。

d） 试验结果：地面站软件 UI 界面应至少包括飞行模式、异常状态报警（低电压报警）、卫星定位信号、电池电量、数据链信号、飞行状态显示、多旋翼无人机紧急控制、飞行参数设置和航线规划、地图和影像显示窗口。可在地面站上显示数据链子系统当前工作频率，电池电压、放电电流、剩余电量、剩余飞行时间和充放电循环次数等参数。

6 检验规则

6.1 型式试验

有下列情况之一应进行型式试验：

a）新产品投产或老产品转厂生产的试制定型。

b）产品结构、材料、设计、工艺以及元器件等有较大改动时。

c）产品停产一年及以上，恢复生产时。

d）抽样试验结果与上一次型式试验结果有较大差异时。

e）上一次型式试验已超过 3 年时。

f）国家质量监督机构提出进行型式试验要求时。

型式试验项目见表 15。

表 15 试验项目

序号	试验项目		型式试验	出厂试验	抽样试验
1	交互认证功能试验		√	—	—
2	与飞行数据记录模块接口适配	电气接口试验	√	—	—
		通信接口试验	√	—	—
3	与外挂附加荷载接口适配	电气接口试验	√	√	√
		通信接口试验	√	√	√
4	导航定位功能	导航系统适配功能试验	√	√	√
		“RTK”定位精度试验	√	√	√
5	数据链功能	信号频率检测功能试验	√	—	√
		跳频功能试验	√	—	√
6	航点记录和航迹调用功能试验		√	√	√
7	地面站软件 UI 验证试验		√	√	√
注：“√”表示进行的项目，“—”表示不进行的项目。					

6.2 出厂试验

出厂试验项目见表 15。生产厂家可根据用户要求，双方协商后可增加试验项目。

6.3 抽样试验

抽样试验项目见表 15。

生产厂家可根据用户要求，双方协商后可增加试验项目。抽样样品任一项试验结果不满足要求，则认为该样品不合格。

抽样试验的抽样数量、抽样方案和判别规则见表 16。

表 16 抽样试验的抽样方案及判别规则

产品数量 n 套	抽样数量 套	不合格样品数量 套	
		允许接受	拒绝接收
0＜n≤15	1	0	≥1
15＜n≤30	2	0	≥1
30＜n≤45	3	0	≥1
45＜n≤75	5	0	≥1

附录 A
（规范性附录）
Crc16 校验格式

Crc16 校验格式如下所示：

```
//Crc16 校验码表
static unsigned short const wCRC16Table[256] = {
    0x0000, 0xC0C1, 0xC181, 0x0140, 0xC301, 0x03C0, 0x0280, 0xC241,
    0xC601, 0x06C0, 0x0780, 0xC741, 0x0500, 0xC5C1, 0xC481, 0x0440,
    0xCC01, 0x0CC0, 0x0D80, 0xCD41, 0x0F00, 0xCFC1, 0xCE81, 0x0E40,
    0x0A00, 0xCAC1, 0xCB81, 0x0B40, 0xC901, 0x09C0, 0x0880, 0xC841,
    0xD801, 0x18C0, 0x1980, 0xD941, 0x1B00, 0xDBC1, 0xDA81, 0x1A40,
    0x1E00, 0xDEC1, 0xDF81, 0x1F40, 0xDD01, 0x1DC0, 0x1C80, 0xDC41,
    0x1400, 0xD4C1, 0xD581, 0x1540, 0xD701, 0x17C0, 0x1680, 0xD641,
    0xD201, 0x12C0, 0x1380, 0xD341, 0x1100, 0xD1C1, 0xD081, 0x1040,
    0xF001, 0x30C0, 0x3180, 0xF141, 0x3300, 0xF3C1, 0xF281, 0x3240,
    0x3600, 0xF6C1, 0xF781, 0x3740, 0xF501, 0x35C0, 0x3480, 0xF441,
    0x3C00, 0xFCC1, 0xFD81, 0x3D40, 0xFF01, 0x3FC0, 0x3E80, 0xFE41,
    0xFA01, 0x3AC0, 0x3B80, 0xFB41, 0x3900, 0xF9C1, 0xF881, 0x3840,
    0x2800, 0xE8C1, 0xE981, 0x2940, 0xEB01, 0x2BC0, 0x2A80, 0xEA41,
    0xEE01, 0x2EC0, 0x2F80, 0xEF41, 0x2D00, 0xEDC1, 0xEC81, 0x2C40,
    0xE401, 0x24C0, 0x2580, 0xE541, 0x2700, 0xE7C1, 0xE681, 0x2640,
    0x2200, 0xE2C1, 0xE381, 0x2340, 0xE101, 0x21C0, 0x2080, 0xE041,
    0xA001, 0x60C0, 0x6180, 0xA141, 0x6300, 0xA3C1, 0xA281, 0x6240,
    0x6600, 0xA6C1, 0xA781, 0x6740, 0xA501, 0x65C0, 0x6480, 0xA441,
    0x6C00, 0xACC1, 0xAD81, 0x6D40, 0xAF01, 0x6FC0, 0x6E80, 0xAE41,
    0xAA01, 0x6AC0, 0x6B80, 0xAB41, 0x6900, 0xA9C1, 0xA881, 0x6840,
    0x7800, 0xB8C1, 0xB981, 0x7940, 0xBB01, 0x7BC0, 0x7A80, 0xBA41,
    0xBE01, 0x7EC0, 0x7F80, 0xBF41, 0x7D00, 0xBDC1, 0xBC81, 0x7C40,
    0xB401, 0x74C0, 0x7580, 0xB541, 0x7700, 0xB7C1, 0xB681, 0x7640,
    0x7200, 0xB2C1, 0xB381, 0x7340, 0xB101, 0x71C0, 0x7080, 0xB041,
    0x5000, 0x90C1, 0x9181, 0x5140, 0x9301, 0x53C0, 0x5280, 0x9241,
    0x9601, 0x56C0, 0x5780, 0x9741, 0x5500, 0x95C1, 0x9481, 0x5440,
    0x9C01, 0x5CC0, 0x5D80, 0x9D41, 0x5F00, 0x9FC1, 0x9E81, 0x5E40,
    0x5A00, 0x9AC1, 0x9B81, 0x5B40, 0x9901, 0x59C0, 0x5880, 0x9841,
    0x8801, 0x48C0, 0x4980, 0x8941, 0x4B00, 0x8BC1, 0x8A81, 0x4A40,
    0x4E00, 0x8EC1, 0x8F81, 0x4F40, 0x8D01, 0x4DC0, 0x4C80, 0x8C41,
    0x4400, 0x84C1, 0x8581, 0x4540, 0x8701, 0x47C0, 0x4680, 0x8641,
    0x8201, 0x42C0, 0x4380, 0x8341, 0x4100, 0x81C1, 0x8081, 0x4040};

//Crc16 校验函数
//函数功能：Crc16 校验
//输入参数：pDataIn：数据地址
//          iLenIn：数据长度
//输出参数：pCRCOut：2 字节校验值
```

```
void CRC16(const unsigned char* pDataIn, int iLenIn, unsigned short* pCRCOut)
{
        unsigned short wResult = 0;
        unsigned short wTableNo = 0;
        int i = 0;
      for( i = 0; i < iLenIn; i++)
      {
            wTableNo = ((wResult & 0xff) ^ (pDataIn[i] & 0xff));
            wResult = ((wResult >> 8) & 0xff) ^ wCRC16Table[wTableNo];
      }

      *pCRCOut = wResult;
}
```

附录 B
（规范性附录）
JSON 航线存储文件格式

搭载可见光任务设备进行自主巡检作业时，生成的航线存储文件格式如下所示。搭载其他任务设备作业时，多旋翼无人机位置和动作信息参照执行，载荷动作等信息可自定义。

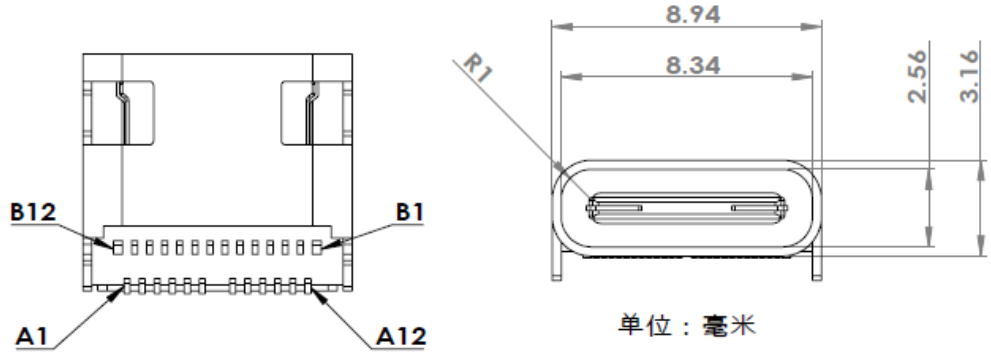
```
{
"mission_time":          //当前航线生成的时刻，UTC+8 时间，格式为 YYYYMMDDHHMMSS
"mission_index":          //任务序号
"mission_name":          //航线名称
"version":          //json 数据格式版本号
"wy_count":          //航线中包含的航点数量
"items":[
                {
                    "index":          //航线中的航点序号，从 0 开始递增
                    "wy_num":          //航点编号，以阿拉伯数字 0,1,2…,n 作为编号
                    "latitude":          //纬度，单位°，精度为小数点后 7 位
                    "longitude":          //经度，单位°，精度为小数点后 7 位
                    "altitude":          //椭球高度，单位°，精度为小数点后 2 位
                    "yaw":          //偏离角，单位°，精度为小数点后 2 位
                    "delay_time":          //动作准备时间，单位 s，精度为小数点后 1 位
                    "speed":          //飞行速率，单位 m/s，精度为小数点后 2 位
                    "actions_count":          //当前航点载荷动作数量
                    "actions":[          //载荷动作数组
                        {
                            "action_index":          //载荷动作序号，从 0 开始递增
                            "action_mode":          //工作模式，0 表示空闲模式，1 表示拍照模式，2 表示开始录像，其余模式可自定义
                            "cam_pitch":          //云台俯仰角，单位°，精度为小数点后 2 位
                            "cam_yaw":          //云台偏转角，单位°，精度为小数点后 2 位
                            "focal":          //等效焦距，单位 mm，精确到个位
                            "photo_count":          //拍摄张数
                            "recoder_time":          //录像持续时间，工作模式为“开始录像”时有效
                            "param_0":          //自定义字段 0
                            "param_1":          //自定义字段 1
                            "param_2":          //自定义字段 2（若有更多自定义字段，可继续增加）
                        },
                        {
                            "action_index":          //载荷动作序号
                            "action_mode":          //工作模式
                            "cam_pitch":          //云台俯仰角
                            "cam_yaw":          //云台偏转角
                            "focal":          //等效焦距
```

```
                    "photo_count":          //拍摄张数
                    "recoder_time":         //录像持续时间，工作模式为开始录像时有
效
                    "param_0":          //自定义字段 0
                    "param_1":          //自定义字段 1
                    "param_2":          //自定义字段 2
                }
            ],
            "sample_time":          //当前航点采集完成的时刻，UTC+8 时间，格式为
YYYYMMDDHHMMSS
        },
        {
            "index":          //航线中的航点序号
            "wy_num":          //航点编号
            "latitude":          //纬度
            "longitude":          //经度
            "altitude":          //椭球高度
            "yaw":          //偏离角
            "delay_time":          //动作准备时间
            "speed":          //飞行速率
            "actions":[          //载荷动作数组
                {
                    "action_index":          //载荷动作序号
                    "action_mode":          //工作模式
                    "cam_pitch":          //云台俯仰角
                    "cam_yaw":          //云台偏转角
                    "focal":          //等效焦距
                    "photo_count":          //拍摄张数
                    "recoder_time":         //录像持续时间，工作模式为开始录像时有
效
                    "param_0":          //自定义字段 0
                    "param_1":          //自定义字段 1
                    "param_2":          //自定义字段 2
                },
                {
                    "action_index":          //载荷动作序号
                    "action_mode":          //工作模式
                    "cam_pitch":          //云台俯仰角
                    "cam_yaw":          //云台偏转角
                    "focal":          //等效焦距
                    "photo_count":          //拍摄张数
                    "recoder_time":         //录像持续时间，工作模式为开始录像时有
效
                    "param_0":          //自定义字段 0
```

```
                    "param_1":          //自定义字段 1
                    "param_2":          //自定义字段 2
                }
            ],
            "sample_time":          //当前航点采集完成的时刻
        }
    ]
}
```

附录 C
（资料性附录）
USB TYPE-C 接口接插件规格

USB TYPE-C 接口接插件规格参见图 C.1。



A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12
GND1	TX1+	TX1-	VBUS1	CC1	D1+	D1-	SBU1	VBUS2	RX2-	RX2+	GND2
B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
GND3	TX2+	TX2-	VBUS3	CC2	D2+	D2-	SBU2	VBUS4	RX1-	RX1+	GND4

图 C.1　USB TYPE-C 接口接插件规格

附录 D
（资料性附录）
XT30 接插件规格

XT30 接插件规格参见图 D.1。

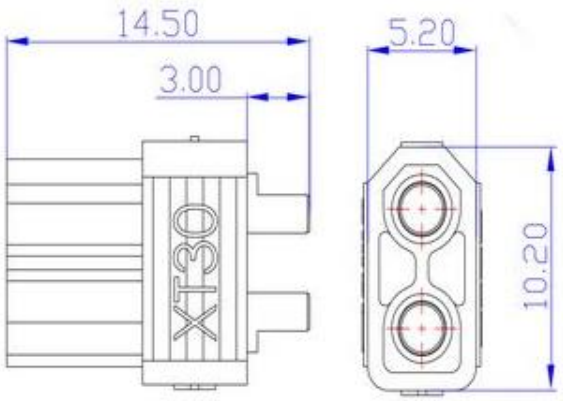


图 D.1　XT30 接插件规格

附录 E
（资料性附录）
UART 接插件规格

UART 接插件规格参见图 E.1。

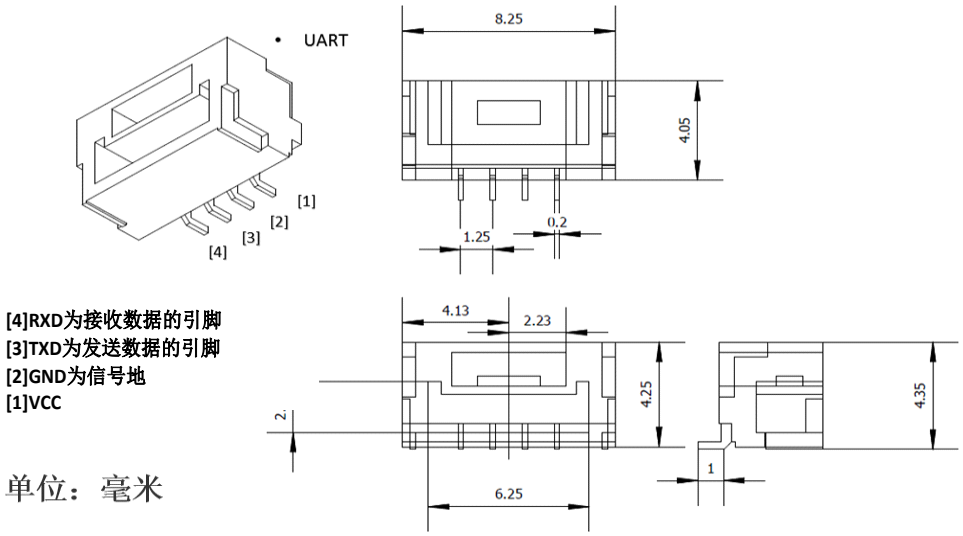


图 E.1　UART 接插件规格

附录 F
（资料性附录）
PWM 接插件规格

PWM 接插件规格参见图 F.1。

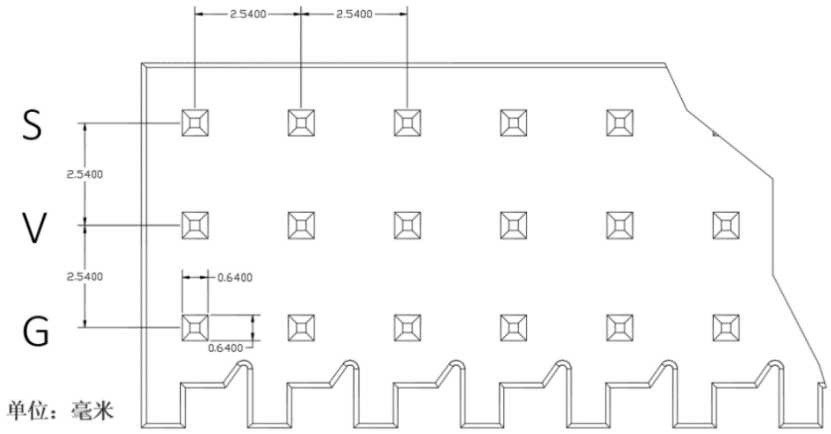
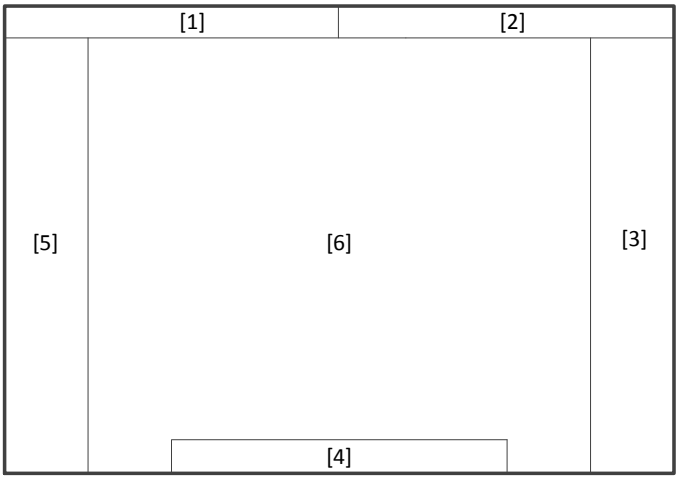


图 F.1　PWM 接插件规格

附录 G
（规范性附录）
地面站 UI 设计

地面站 UI 设计见图 G.1。



[1] 飞行模式、异常状态报警；

[2] 卫星定位信号、电池电量、数据链信号；

[3] 飞行状态显示，至少包括经纬度、飞行高度、飞行速度、姿态球；

[4] 多旋翼无人机巡检系统紧急控制，如一键返航、链路中断返航等；

[5] 飞行参数设置和航线规划；

[6] 地图和影像显示窗口，显示多旋翼无人机巡检系统实时位置和影像数据。其中，影像显示窗口宜采用浮窗形式。

图 G.1　地面站 UI 设计