

ICS 35.240  
CCS V55

# T/SZUAVIA

团 体 标 准

T/SZUAVIA 001—2023

## 无人机数字孪生系统 通用要求

General requirements for the digital twin system of unmanned aircraft vehicle

2023 - 06 - 02 发布

2023 - 10 - 01 实施

深圳市无人机行业协会 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 通用要求 .....                  | 2  |
| 4.1 系统组成 .....                | 2  |
| 4.2 功能、性能 .....               | 2  |
| 4.3 环境适应性 .....               | 5  |
| 4.4 电磁兼容性 .....               | 6  |
| 4.5 可靠性 .....                 | 6  |
| 4.6 互换性 .....                 | 6  |
| 4.7 使用与维修 .....               | 6  |
| 5 验证试验 .....                  | 6  |
| 5.1 型式试验 .....                | 7  |
| 5.2 出厂检验 .....                | 7  |
| 5.3 试验项目 .....                | 7  |
| 6 标识、包装、运输和贮存 .....           | 8  |
| 6.1 标识 .....                  | 8  |
| 6.2 包装 .....                  | 8  |
| 6.3 运输 .....                  | 8  |
| 6.4 贮存 .....                  | 8  |
| 附录 A (资料性) 无人机数字孪生系统 .....    | 9  |
| A.1 无人机数字孪生系统工作原理 .....       | 9  |
| A.2 无人机数字孪生系统应用 .....         | 10 |
| 附录 B (资料性) 计算工作站性能参数推荐值 ..... | 11 |
| B.1 计算工作站性能参数 .....           | 11 |
| 图 1 无人机数字孪生系统组成 .....         | 2  |
| 图 2 数据传输装置工作过程 .....          | 3  |
| 图 3 通信包传输过程 .....             | 4  |
| 图 A.1 无人机数字孪生系统工作原理图 .....    | 9  |
| 图 A.2 无人机数字孪生系统应用图 .....      | 10 |
| 表 1 数据包结构 .....               | 3  |
| 表 2 信息包结构 .....               | 4  |
| 表 3 无人机数字孪生系统试验项目 .....       | 7  |

## 前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

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专利的责任。

本文件由深圳市无人机行业协会提出并归口。

本文件起草单位：工业和信息化部电子第五研究所、深圳市无人机行业协会、沈阳锐取科技有限公司、广西科技大学、深圳市优飞迪科技有限公司、广州中科云图智能科技有限公司、广州极飞科技股份有限公司、广东中科瑞泰智能科技有限公司、广州天海翔航空科技有限公司、广州市华科尔科技股份有限公司、深圳市科卫泰实业发展有限公司、广东汇天航空航天科技有限公司、武汉市安全技术防范行业协会。

本文件主要起草人：杨剑锋、杨金才、陈金勇、王远航、魏雅丹、刘文威、纪春阳、吴其琦、焦万中、李捷、王达、刘正坤、刘民生、陈世印、陈艳青、夏焯、李建生、宋健伟、林森才、蔡茗茜、吴和龙、陈虎、陈柏霖。

# 无人机数字孪生系统 通用要求

## 1 范围

本文件规定了无人机数字孪生系统的通用要求、验证试验以及标识、包装、运输和贮存要求。

本文件适用于无人机数字孪生系统产品的设计、制造、出厂检验与型式检验。其他装备的数字孪生系统产品的研制与生产可参照执行。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；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/T191—2008 包装储运图示标志
- GB/T 9254.1—2021 信息技术设备、多媒体设备和接收机 电磁兼容 第1部分：发射要求
- GB/T 17626.2—2018 电磁兼容 试验和测量技术 静电放电抗扰度试验
- GB/T 17626.3—2016 电磁兼容 试验和测量技术 射频电磁场辐射抗扰度试验
- GB/T 38924.2—2020 民用轻小型无人机系统环境试验方法 第2部分：低温试验
- GB/T 38924.3—2020 民用轻小型无人机系统环境试验方法 第3部分：高温试验
- GB/T 38924.4—2020 民用轻小型无人机系统环境试验方法 第4部分：温度和高度试验
- GB/T 38924.5—2020 民用轻小型无人机系统环境试验方法 第5部分：冲击试验
- GB/T 38924.6—2020 民用轻小型无人机系统环境试验方法 第6部分：振动试验
- GB/T 38924.7—2020 民用轻小型无人机系统环境试验方法 第7部分：湿热试验
- GB/T 38924.8—2020 民用轻小型无人机系统环境试验方法 第8部分：盐雾试验
- GB/T 41723—2022 自动化系统与集成 复杂产品数字孪生体系架构

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**无人机 unmanned aerial vehicle**

由无线电遥控、遥测或飞控计算机自主操作的无人驾驶飞机。

### 3.2

**无人机系统 unmanned aerial vehicle system**

无人机及与其配套的地面控制站、起飞（发射）回收装置以及综合保障设备的统称。

### 3.3

**数字孪生 digital twin**

由物理资产、虚拟镜像和用户界面组成的混合模型。

[来源：GB/T 41723—2022, 3.2]

### 3.4

**数字孪生系统 digital twin system**

基于数据驱动来实现目标实体与数字实体间各要素动态迭代的系统。

注：数字孪生系统由目标实体、数字实体、两者之间的数据连接以及数据连接过程中涉及的模型、数据和接口等要素组成。

## 4 通用要求

### 4.1 系统组成

无人机数字孪生系统由数据采集装置、数据传输装置、无人机数字孪生软件、计算工作站组成，见图1。

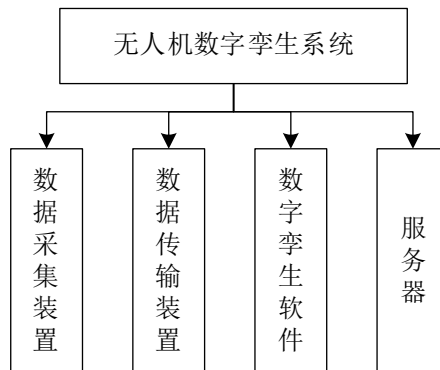


图1 无人机数字孪生系统组成

### 4.2 功能、性能

#### 4.2.1 数据采集

数据采集装置具备测试无人机结构应变、振动、温度、飞参的功能，具体要求如下：

- a) 应变信号采集频率为 2.5 ~ 4800 Hz，应变测量最大值高于 2000  $\mu\text{e}$ ，测量值分辨率优于 1  $\mu\text{e}$ ；
- b) 振动信号最高采样频率高于 4 kHz，加速度测量最大值高于 20 g，测量值分辨率优于 0.01 g，振动信号采集频率推荐选择 600 Hz、1200 Hz、2400 Hz、4800 Hz；
- c) 温度信号采样频率不低于 10Hz，测量点最大值高于 200 $^{\circ}\text{C}$ ，测量误差小于 1 $^{\circ}\text{C}$ ，测量值分辨率优于 0.5 $^{\circ}\text{C}$ ；
- d) 主要飞行参数包括：速度、空间位置、姿态角、加速度、角速度、磁场强度、气压等。

#### 4.2.2 数据传输

数据传输装置包括数据收集器和网络传输模块，将数据采集装置的数据发送到计算工作站，并将数字孪生软件产生的指令发送到飞控系统，工作过程见图2。

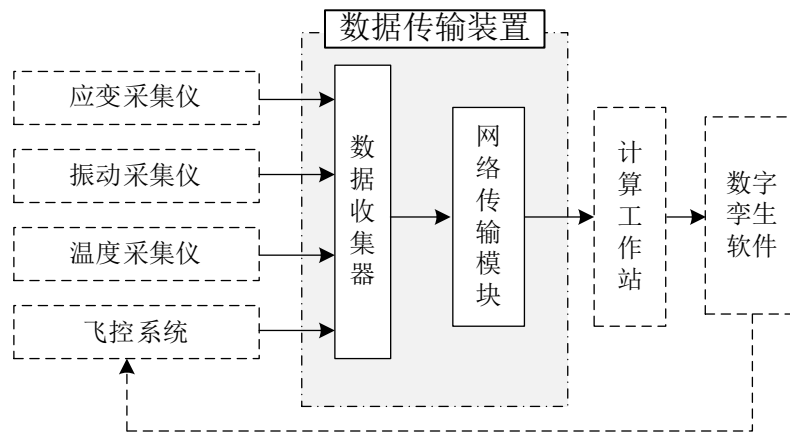


图2 数据传输装置工作过程

#### 4.2.2.1 数据收集器

数据收集器的功能、性能要求如下：

- 数据传输基于 Mavlink2 协议，支持同时接入 4 种类型以上数据源；
- 包含输入端口采用串行总线，传输波特率 1.2kbps ~ 921.6kbps，能够自动识别数据采集装置的波特率；
- 包含一个输出串口，波特率范围 9.6 kbps ~921.6kbps；
- 包含一个输出网口，速率为 10 Mbps /100Mbps，计算工作站 IP 地址与端口可配置；
- 具有断线续传功能，可确保测试数据的连续性；
- 具有数据检错与纠错功能。

#### 4.2.2.2 网络传输模块

网络传输模块的功能、性能要求如下：

- 包含一个串口，波特率范围 9.6kbps~921.6kbps；
- 包含一个网口，速率为 10Mbps /100Mbps，计算工作站 IP 地址与端口可配置；
- 通信网络支持 5G/4G/3G，支持断线重连功能；
- 工作电压范围 12V-26V，功耗小于 5W；
- 体积不大于 18×15×8cm，质量不大于 500g。

#### 4.2.2.3 传输协议

##### a) 协议的功能

传输协议需能灵活、高效、可靠地传输各类测试数据。数据类型、数据长度、数据速率等参数可以指定，额外数据占比小，具备数据纠错重传。

##### b) 通信协议

通信协议以Mavlink2协议为载体传输通信包，通信包为最小通信单位，包括数据包与信息包两种类型。数据包的内容是测量值，信息包的内容用于描述数据包的信息。

表1 数据包结构

| 要素  | 类型 | 长度 | 数量 | 编号 | 内容 |
|-----|----|----|----|----|----|
| 字节数 | 1  | 1  | 1  | 2  | 可变 |

| 要素   | 类型      | 长度    | 数量      | 编号        | 内容 |
|------|---------|-------|---------|-----------|----|
| 范围   | 0 ~ 255 | 1 ~ 4 | 1 ~ 100 | 0 ~ 65535 | 可变 |
| 发送顺序 | 第一      | 第二    | 第三      | 第四        | 第五 |

数据包由5个要素组成，类型表示数据是某一种测量值，如应变、振动或温度等；长度表示一个数据所占的字节数；数量表示数据包中包含测量值的个数；序号表示数据发送的编号，用于数据纠错；内容为测量值。字节数表示各个要素所占的字节个数；范围表示各个要素合理取值区间；发送顺序是各个要素发送时的先后次序。

表2 信息包结构

| 要素   | 类型      | 采样频率      | 单位       | 数量      | 比例 |
|------|---------|-----------|----------|---------|----|
| 字节数  | 1       | 2         | 8        | 1       | 可变 |
| 范围   | 0 ~ 255 | 1 ~ 65535 | 1 ~ 8个字符 | 1 ~ 100 | 可变 |
| 发送顺序 | 第一      | 第二        | 第三       | 第四      | 第五 |

信息包由5个要素组成，类型表示数据是某一种测量值，如应变、振动或温度等；采样频率表示数据每秒钟采集次数；单位是描述测量值的纲量；比例是测量数据与测量值之比。字节数表示各个要素所占的字节个数；范围表示各个要素合理取值区间；发送顺序是各个要素发送时的先后次序。

通信包的传输过程如下图所示，端口1-3先后分别收到包1-6，收到通信包后首先压入到FIFO缓冲区，当网口空闲时，取出通信包发送到网口中，否则一直暂存在缓冲区中。只要网口的平均带宽大于三个端口带宽之和，缓冲区中的内容都能及时发送。当只有一个采集器传输数据时，可以不经过收集器，直接把数据送至采集器与网络模块相连进行数据传输。

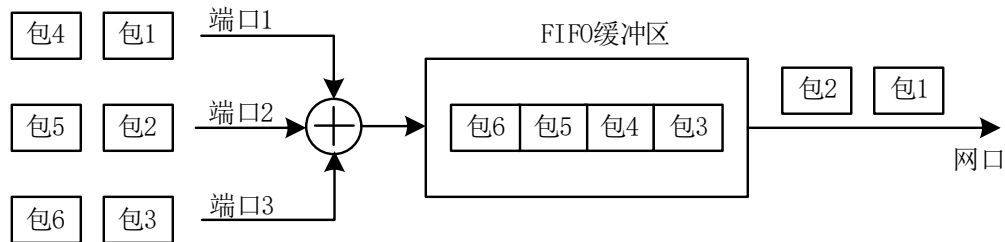


图3 通信包传输过程

### 4.2.3 数字孪生软件

#### 4.2.3.1 一般要求

数字孪生软件包括参数设置、飞行航线设置、飞行过程调控、实时仿真、数据管理、模型管理等功能。

#### 4.2.3.2 参数设置

可以设置预警参数、仿真参数、连接参数。

#### 4.2.3.3 飞行航线设置

用于设置无人机的飞行航线及起降航点，通过在飞行计划模块设置好无人机的飞行航线可以实现无人机的一键起降。

#### 4.2.3.4 飞行过程调控

用于无人机飞行途中，通过指令对无人机进行调控，可以进行起飞前的检查、碰撞报警、飞行状态参数的详细显示等。

#### 4.2.3.5 实时仿真

数字孪生软件的实时仿真功能包括：应力、应变实时解算，瞬态动力学计算、剩余寿命计算、飞行冲突实时解算等，可实时显示无人机的飞行状态（位置、姿态、飞行速度等）、剩余电量、GPS信号强度、通讯丢包率、通讯延迟、健康等级等。

##### a) 应力、应变实时解算

可基于测得的应变值进行实时应力、应变仿真计算，每次仿真计算时间小于5s。

##### b) 瞬态动力学计算

可基于测得的加速度值进行瞬态动力学仿真计算，每次仿真计算时间小于10s，计算误差均方根在20%之内。

##### c) 剩余寿命计算

可基于应力计算结果进行机体结构剩余寿命计算，每次仿真计算时间小于3s。

##### d) 飞行冲突实时解算

可通过图形化方式展现两架及以上无人机在不同时间间隔及不同有效规避时间内的飞行冲突概率大小。

##### e) 解算数据结构

所有解算结果应采用UFF（Universal File Format）格式输出。

#### 4.2.3.6 数据管理

用于记录和回放飞行过程。

#### 4.2.3.7 模型管理

用于管理数字孪生系统中无人机的相关信息，如无人机型号、尺寸参数等。

#### 4.2.3.8 数据记录

对传输到计算工作站的数据可进行解析，解析之后以每分钟一次的频率，将应力、振动、温度、飞参数据进行保存。以天为单位，同一天的数据存到同一个文件夹中，文件夹命名规则为：XXXX\_XX\_XX(年\_月\_日)。应力数据命名规则为：YL\_XXXX\_XX\_XX\_XX\_XX.csv(YL\_年\_月\_日\_时\_分)，振动数据命名规则为：ZD\_XXXX\_XX\_XX\_XX\_XX.csv(ZD\_年\_月\_日\_时\_分)，温度数据命名规则为：WD\_XXXX\_XX\_XX\_XX\_XX.csv(WD\_年\_月\_日\_时\_分)。

#### 4.2.4 计算工作站

计算工作站的计算性能应能满足数字孪生软件系统的算力需求，计算工作站性能参数的选择可参照附录B。

### 4.3 环境适应性

#### 4.3.1 低温试验

数字孪生硬件系统（除计算工作站外）按照GB/T 38924.2—2020进行试验，功能应正常。

#### 4.3.2 高温试验

数字孪生硬件系统（除计算工作站外）按照GB/T 38924.3—2020进行试验，功能应正常。



#### 4.3.3 温度和高度试验

数字孪生硬件系统（除计算工作站外）按照GB/T 38924.4—2020进行试验，功能应正常。

#### 4.3.4 冲击

数字孪生硬件系统（除计算工作站外）按照GB/T 38924.5—2020进行试验，功能应正常。

#### 4.3.5 振动

数字孪生硬件系统（除计算工作站外）按照GB/T 38924.6—2020进行试验，功能应正常。

#### 4.3.6 湿热

数字孪生硬件系统（除计算工作站外）按照GB/T 38924.7—2020进行试验，功能应正常。

#### 4.3.7 盐雾

数字孪生硬件系统（除计算工作站外）按照GB/T 38924.8—2020进行试验，功能应正常。

### 4.4 电磁兼容性

数字孪生系统的电磁兼容需考虑与无人机系统的匹配与兼容，应满足：

- a) 辐射骚扰应符合 GB/T 9254.1-2021 中 A 级要求；
- b) 静电放电抗扰度应符合 GB/T 17626.2-2018 中试验等级 3 级要求；
- c) 射频电磁场辐射抗扰度应符合 GB/T 17626.3-2016 中试验等级 3 级要求。

### 4.5 可靠性

- a) 无人机数字孪生软件的 MTBF 不小于 700h。
- b) 数字孪生硬件系统（除计算工作站外）的 MTBF 不小于 5000h。

### 4.6 互换性

无人机数字孪生系统中相同的组件应符合互换性要求，同一型号（或代号）的组件应具有互换性。

### 4.7 使用与维修

#### 4.7.1 版本管理

建立明确的版本号标识，V1.0.0向下延伸，建立时间轴，记录不同版本的发布日期，版本变化。

#### 4.7.2 固件升级

数字孪生硬件中的数据采集装置支持固件升级，升级方式支持本地升级与远程升级。要求如下：

- a) 本地升级。通过 USB 接口升级，把设备通过 USB 线连接电脑主机，执行升级命令实现升级。
- b) 远程升级。使用串口线把采集仪接到网络模块，在远程计算机中执行升级命令实现升级。

#### 4.7.3 用户调试与安装支持

数字孪生软件需要联合安装的其他程序较多，将需要联合安装的程序集中打包，每个程序安装部署配置的流程整理图文成册，方便用户安装。

## 5 验证试验

## 5.1 型式试验

### 5.1.1 试验概述

型式试验是为了验证无人机数字孪生系统能否满足产品规范的全部要求所进行的试验。

型式试验一般在产品设计定型、生产定型或转产时进行，但在产品的主要设计、工艺及材料有重大改变而影响产品的重要性能，使原来的鉴定结论不再有效时，也应进行型式试验。

### 5.1.2 合格判据

型式试验合格判据包括：

- a) 满足全部要求时，判定型式试验合格；
- b) 若其中任一试验项目不符合要求，允许排除故障后再次提交试验；若检验合格仍可判定为型式试验合格。

## 5.2 出厂检验

出厂检验是指研制单位在无人机数字孪生系统出厂之前为保证出货产品满足用户品质要求所进行的检验。出厂检验可采用抽样检验的方式。

## 5.3 试验项目

表3 无人机数字孪生系统试验项目

| 序号 | 分类      | 试验项目         | 型式试验 | 出厂检验 |
|----|---------|--------------|------|------|
| 1  | 专用特性试验  | 应变测试结果试验     | √    | /    |
| 2  |         | 温度测试结果试验     | √    | /    |
| 3  |         | 振动测试结果试验     | √    | /    |
| 4  |         | 飞行参数测试结果试验   | √    | /    |
| 5  |         | 通信性能测试       | √    | /    |
| 6  |         | 应力实时解算性能测试   | √    | √    |
| 7  |         | 应变实时解算性能测试   | √    | √    |
| 8  |         | 模型准确度验证      | √    | /    |
| 9  |         | 瞬态动力学解算性能测试  | √    | /    |
| 10 |         | 剩余寿命计算性能测试   | √    | /    |
| 11 |         | 飞行冲突实时解算性能测试 | √    | /    |
| 12 |         | 数据记录测试       | √    | √    |
| 13 |         | 数字孪生软件基本功能测试 | √    | √    |
| 14 |         | 电磁兼容测试       | √    | /    |
| 15 |         | 外观检查         | √    | √    |
| 16 | 环境适应性试验 | 低温试验         | √    | /    |
| 17 |         | 高温试验         | √    | /    |
| 18 |         | 温度和高度试验      | √    | /    |
| 19 |         | 冲击试验         | √    | /    |
| 20 |         | 振动试验         | √    | /    |
| 21 |         | 湿热试验         | √    | /    |
| 22 |         | 盐雾试验         | √    | /    |

| 序号 | 分类    | 试验项目  | 型式试验 | 出厂检验 |
|----|-------|-------|------|------|
| 23 | 可靠性试验 | 可靠性试验 | √    | /    |

## 6 标识、包装、运输和贮存

### 6.1 标识

标识应清晰易读。独立销售的无人机数字孪生系统应标明：

- a) 产品名称、型号；
- b) 适用电压；
- c) 接口标识；
- d) 产品序列号；
- e) 制造商或商标；
- f) 其他必要的标识。

### 6.2 包装

产品应与包装标识一致，产品包装应满足如下要求：

- a) 包装标识满足 GB/T 191—2008 中的相关规定，在规定的流通条件与流通过程中和在规定的贮存条件与贮存期内，不因运输和自然条件的影响而褪色或脱落；
- b) 减少包装材料用量和降低包装成本，有效地利用资源，减少包装废弃物，降低对环境的影响；
- c) 清洁、干燥、无有害气体；
- d) 在正常的流通过程中，可抵御规定环境条件的影响而不发生破损或损坏；
- e) 根据产品的特性及搬运、装卸、运输、仓储等流通条件，可防震、防雨、防潮、防霉、或防尘；
- f) 内装必备的随机文件，这些随机文件应至少包括合格证、物品清单、使用说明书和其他有关的技术文件，若有关用户所须知的信息未在随机文件中充分描述而需要查阅相关电子文件时，在随机文件中应清晰说明所须知的电子文件信息和正式的获取途径。

### 6.3 运输

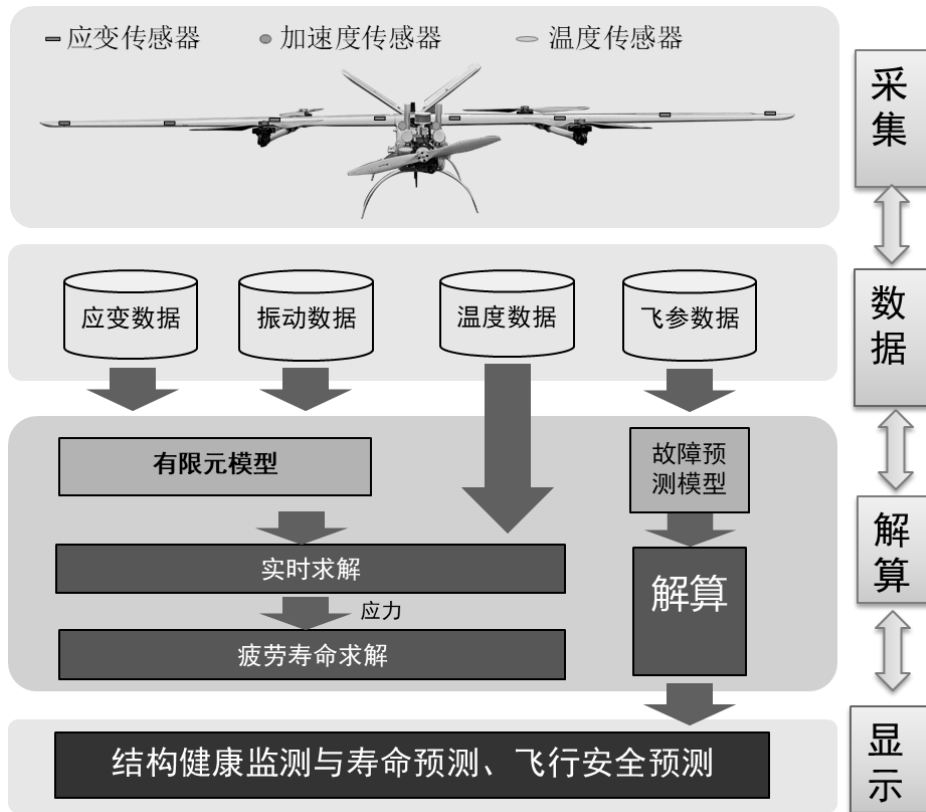
在公路、铁路、水路和空运等规定的运输条件下，应不会造成产品故障和包装严重破损。

### 6.4 贮存

贮存环境应有良好的通风，远离可能的热源、火源、强电场、强磁场和强电磁场。

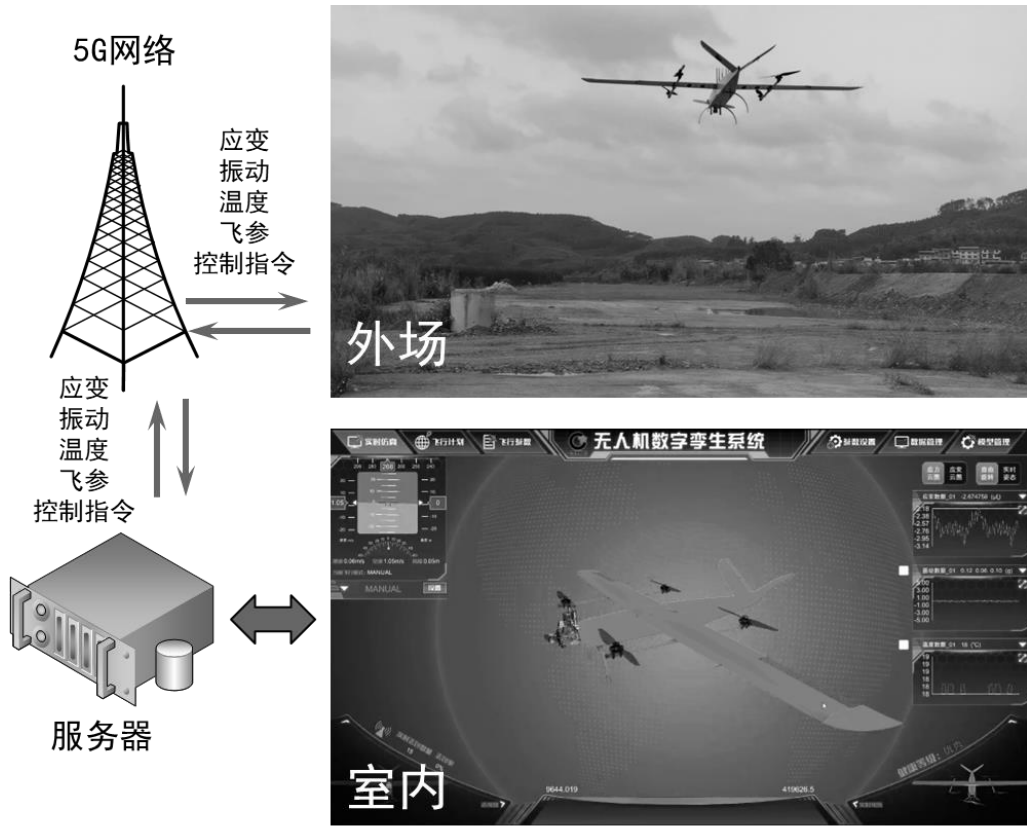
附录 A  
(资料性)  
无人机数字孪生系统

A.1 无人机数字孪生系统工作原理



图A.1 无人机数字孪生系统工作原理图

A.2 无人机数字孪生系统应用



图A.2 无人机数字孪生系统应用图

附录 B  
(资料性)  
计算工作站性能参数推荐值

B.1 计算工作站性能参数

a) 处理器

32 核, 64 线程, 2.0G。

b) 存储

2Tb。

c) 扩展插槽

8 个 PCIe 4.0, 2 个 OCP 3.0。

d) 网卡

2 个集成千兆以太网接口。

e) 支持操作系统

64 位 windows 操作系统。

f) 显卡

1) GPU 显存: 4 个 16GB GDDR6。

2) GPU 显存带宽: 4 个每秒 232GB。