

doi: 10.7690/bgzdh.2021.08.011

# 飞机外挂物投放风洞试验控制及测量系统

雷红胜, 李征初, 卢翔宇

(中国空气动力研究与发展中心气动噪声控制重点实验室, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 随着现代作战飞机外挂物内置以及挂载装备式样的增多, 对风洞投放试验技术提出更高的要求。结合新需求, 研制一套飞机外挂物投放试验控制及测量系统。搭建 4 路投放、助推控制回路, 引入现代测试技术和同步高速摄影进行测量。结果表明, 该系统能实现 4 路外挂物的单投、齐投、连投的精确控制和轨迹记录, 对于开展投放试验是可行的。

**关键词:** 低速风洞; 外挂物; 投放控制

**中图分类号:** TJ06 **文献标志码:** A

## Aircraft External Hanging Jettison Control & Measuring System for Wind Tunnel Test

Lei Hongsheng, Li Zhengchu, Lu Xiangyu

(Key Laboratory of Aerodynamic Noise Control, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** With the development of modern combat aircraft, more external hanging are put inside and more types of external hanging are mounted, which requires higher technology for the wind tunnel jettison test. According to the new requirements, the control and measuring system of jettison test in low speed wind tunnel is developed. Establish 4-loop jettison and boosting control loop, and use modern test technology and synchronization high-speed camera measurement. The results show that the system can realize precise control and trajectory analysis for the single, simultaneous and continuous jettison of the four-loop external stores, and it is feasible to carry out the jettison test in wind tunnel.

**Keywords:** low speed wind tunnel; external hanging; jettison control

### 0 引言

现代作战飞机通常具有大航程、隐身、高机动性、高速以及作战形式多样等特点, 对飞机气动外形、机电动力、武器挂载等要求越来越高。从挂载的角度来说, 外挂物种类和数量增多, 比如常见的副油箱、炸弹、导弹等。为了提升飞机隐身性能、减少空气阻力、增加航程等, 将部分外挂物内置, 投放时舱门快速打开, 弹射发射, 已被国外多种先进战机采用<sup>[1]</sup>, 其一般采用液压或者气动方式作为动力源, 通过复杂的内置投放装置实现安全投放<sup>[2]</sup>。从母机上投放或发射的初始阶段均处在复杂的干扰流场中, 投放物与母机分离的运动特性跟在均匀流场中大不相同。不良的投放分离特性不仅影响作战效能的发挥, 更重要的是会危及母机的安全。为了判定外挂物从母机上投放的安全性和可靠性, 通常采用在风洞里进行模型外挂分离特性预测试验。动力相似模型投放试验就是常用方法之一<sup>[3]</sup>。国内相关单位均有一定技术储备, 如气动中心低速所在

1972 年具备了投放试验能力, 前期主要采取熔断康铜丝以及多次曝光频闪技术的方式进行投放和轨迹记录; 中国航天空气动力技术研究院早期通过转盘曝光法, 近年采用高速相机拍摄的方式进行轨迹记录, 并开展了高速弹射试验技术研究<sup>[2]</sup>; 南航空气动力研究所采用高压气体推动作动筒切割磁力线方式进行投放<sup>[4]</sup>等。

随着试验要求的提高以及武器装备的建设发展, 对风洞投放试验要求越来越高, 如外挂物内置投放的安全性、多路不同要求的投放、投放轨迹全程不同角度的高清解析等。传统自由投放、高频拍摄等方式已不能满足任务需求, 亟需结合新技术, 如精确时序控制、高速摄影、现代测试手段等实现多路投放的精确控制和轨迹判读分析, 并实现内置外挂物的助推可控。

### 1 任务目标及实现关键

风洞投放控制系统的核心任务在于实现外挂物的可靠投放。结合多对象和多方式投放实际需求,

收稿日期: 2021-04-22; 修回日期: 2021-05-11

作者简介: 雷红胜(1981—), 男, 湖北人, 硕士, 工程师, 从事风洞控制技术及应用研究。E-mail: 27404220@qq.com。

投放控制及测量系统需要达到以下任务目标：

- 1) 多达 4 路投放控制主回路的实现；
- 2) 多达 4 路助推控制主回路的实现；
- 3) 多达 4 路自由/助推的单投、连投、齐投等任意组合方式的毫秒级时序控制投放；
- 4) 投放轨迹的不同角度全程高清多维解析；
- 5) 投放助推力的高频测量和可靠性验证。

由于整个投放过程只有 0.4 s 左右，试验中的外挂物脱离母机时刻、助推控制、摄像机开启和助推力测量等要求是有精确的时序控制。

该系统的关键在于既要满足各主要功能的实现，又要整体考虑以保证投放各环节毫秒级的精确时序控制和测量。

## 2 系统设计

### 2.1 系统总体设计方案

如图 1，系统主要包括工控机、计数器板卡以及投放回路、助推回路、摄像系统、测量装置等。该系统以工控机和计数器板卡为控制核心，在各系统准备就绪后，按试验要求，在系统软件的准确设置下，依次触发计数器板卡相应端口的计数器产生脉冲信号，为外围控制板卡和电路提供输入条件，从而触发外挂物释放、助推力开启、摄像机运行等一系列事件按照设定时序发生，保证外挂物投放试验的顺利进行。助推力测量装置在投放开始瞬间即接收触发信号，从而实现测力的同步采集。

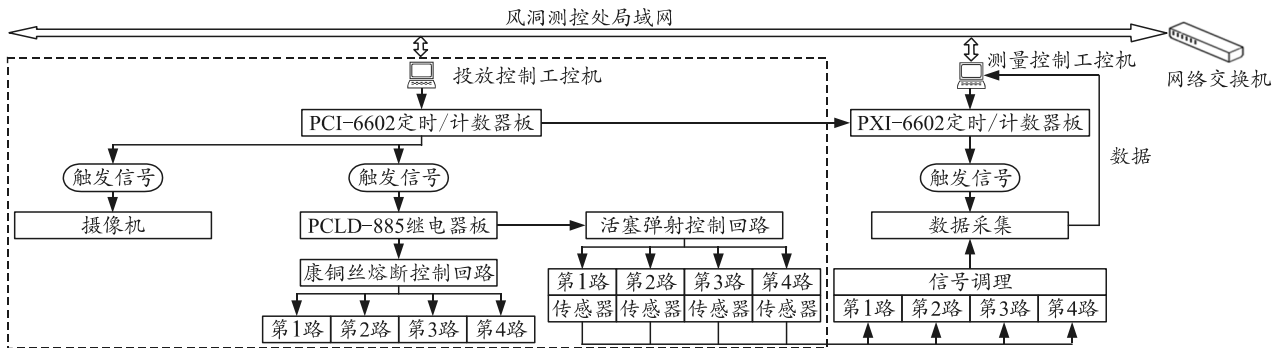


图 1 投放控制及测量系统框图

### 2.2 系统配置与功能

#### 2.2.1 投放控制板卡

多路投放控制的核心在于时序控制的实现，以免各投放对象相互干涉，影响投放安全或者达不到预期投放目标。本系统采用 NI 的计时/计数器板卡 PCI6602 作为时钟基准，通过选取合适的源频率进行计数即可达到高精度的时序控制。

计数器板卡：NI PCI6602 作为时序控制的核心部分，其性能直接关系到控制系统的精度指标。该板卡具有如下主要指标：1) 最多 8 路 32 位计数器/定时器；2) 有 100 kHz、20 MHz、80 MHz 3 种源频率可供选择(带预定标器可高达 125 MHz)；3) 数字防抖动过滤与短时脉冲干扰消除；4) 5 V TTL/CMOS 兼容 8 条专用数字 I/O 线。该计数器可以产生单脉冲、单触发脉冲、脉冲序列等多种脉冲形式。其以源频率为时间基准，脉冲延迟和脉冲宽度由源频率输入周期数决定，其可控时间精度达到微秒级，且 8 路定时器相对独立，可同步工作。其产生的脉冲可直接触发相应的继电器输出板卡，同时也可直接用于摄像同步触发和测量装置触发信号，定时精度高。

继电器输出板 PXL-885：由于定时/计数器板的数字 I/O 端口输出的 TTL 电平，驱动能力很弱，无法直接作用于各控制回路。在计数器板卡和被控设备之间加入中间单元继电器输出板卡，由其直接控制外接电路。该板卡为 16 路单刀单掷(SPST)常开(NO)继电器板，触点容量为 5 A/250VAC 或 5 A/30VDC。而且该板具有继电器动作指示，变阻器保护，采用螺钉连接方式与外线连接，较为方便、安全，可以满足投放试验各种电源控制需求。

#### 2.2.2 投放回路

投放回路主要配套外挂物释放控制装置。外挂物与母机之间的连接方法通常有 3 种：1) 采用康铜丝连接，当外挂物较重时，利用合适的挂钩，投放时熔断康铜丝，实现外挂物的释放；2) 通过高压气体推动作动筒运动切割模型挂线实现；3) 磁性连接，投放前电磁铁吸住，投放时断电<sup>[5]</sup>。本装置采用熔断康铜丝实现外挂物释放。如图 2 所示，通过设计的直流蓄电装置，利用可控硅作为熔断主回路导通与否的关键部件，其导通触发信号由主控机控制继电器板卡相应的通道闭合提供，开关响应时间达到微秒级。由于涉及高电压大电流，各主回路通

过接触器实现控制的相对独立，互不影响，同时投放结束后利用接触器切断主回路，保证模型操作人员的安全。在试验前，针对不同规格的康铜丝开展熔断试验，确定快速熔断的电源条件，为直流电源蓄电提供基本依据。在模型设计时要注意绝缘，关键部位采用耐高温耐高压聚酰亚胺薄膜材料，确保熔断回路与挂架和试验模型绝缘。

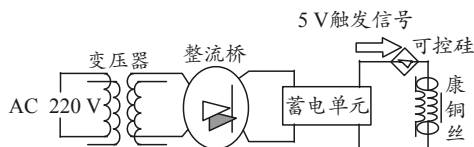


图 2 康铜丝熔断主回路

### 2.2.3 助推回路

助推回路主要用于内置式外挂物的投放，以避免自由投放与飞机之间的干涉，影响安全飞行，同时也可用于需要弹射投放的场合。其关键在于给外挂物施加所需要的瞬间助推力。助推力控制主要由高压气源（氮气瓶或者高压气源站）、减压阀、高压电磁阀、专用作动筒（活塞）以及相应管路组成。通过调节到所需压力，当康铜丝熔断的瞬间，打开电磁阀，高压气体推动作动筒施加给外挂物一个冲击力，从而实现弹射投放。助推管路系统主要由通往模型的高压软管、电磁阀、作动筒等组成，根据需要布局多达 4 路。在模型投放终端最近的合适位置布置缓冲罐，有助于助推压力稳定，为控制和测量提供准确输入条件。

### 2.2.4 投放瞬时力测量装置

如图 3 所示，助推瞬时力的测量由力传感器、同步信号触发器、信号调理、同步数据采集卡以及采集分析软件组成。其中传感器选用 ENDEVCO 的用于振动测量的高频响应的力传感器。考虑到其输出信号与 NI A/D 采集卡 PXI-6123 的匹配性以及提高精度，通过 SCXI-1143 信号调理卡进行放大处理。该测量系统仅接收一个来自投放控制系统的触发信号，其他功能相对独立。所需压力根据试验要求，提前标定，外挂物上安装 2 个传感器，如图 4 所示，当康铜丝熔断前，由 PCI 6602 提供一个高电平触发信号给测量装置的 PXI 6602，从而同步采集瞬时碰撞力。考虑到传感器和时间很短，为了数据完整性，常规采集时间设为 3 s，多路投放时可以适当延长，采样率大于 10 kS/s，将作用到外挂物上的力传感器信号经过处理显示在如图 5 所示的软件界面上，并进行数据存储，通过相应换算关系即可计

算出推力值。

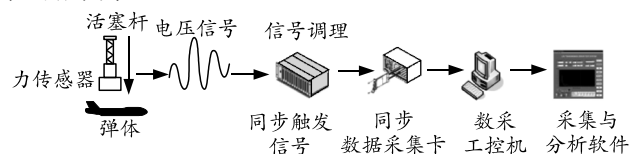


图 3 助推力测量系统

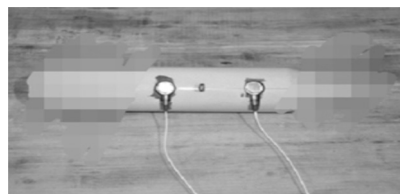


图 4 传感器安装实物

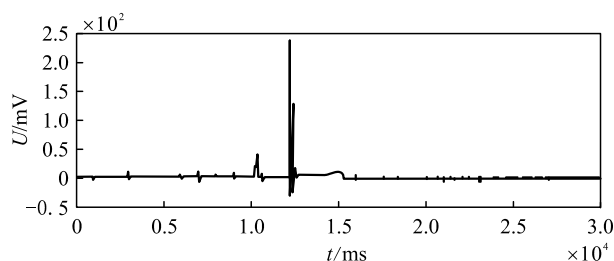


图 5 碰撞发生波形

### 2.2.5 高速摄影系统

投放分离轨迹常用多次曝光摄影或者高速摄影获得。由于现代高速摄影以及同步控制技术的发展，轨迹记录采用该项技术。如图 6 所示，为了保证多角度轨迹记录，采用 3 台高速数字摄像机，布置于风洞试验段中心正前方、正下方和侧方位置（可根据试验需要进行数量和位置调整），通过与摄像机配套的同步组件保证其同步工作。同步摄像触发信号由工控机进行控制。该摄像机在分辨率为 1 504×1 128 时达到 1 000 帧/s，记录时长超过 5 s。通过图像分析软件进行轨迹判读。

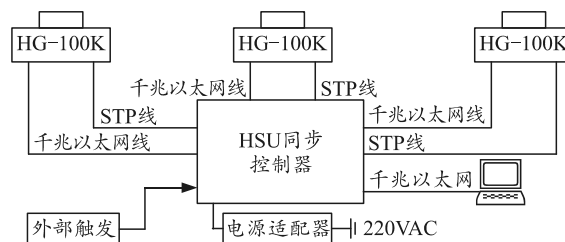


图 6 高速摄像系统

### 2.2.6 其他

多路直流电源主要为继电器板、电磁阀提供工作电压以及为可控硅提供触发信号。这里不作详细介绍。

投放控制及测量系统主要由以上部分组成，系统的协调工作由工控机编程实现，PCI6602 计数器

板卡的各个计数器工作相对独立，可保证各触发动作互不影响，保证了各路投放以及相关触发信号的时序准确控制。

### 2.3 系统软件设计

系统软件包括投放控制程序、瞬时力测量程序以及图像分析软件 3 套，软件相对独立。其中瞬时力测量程序主要用于助推力的数据采集、显示、存储和计算，以验证助推方案的可靠性和准确性。后续试验中，由于空间或者实际需求，部分场合不适宜安装传感器，不再赘述。图像分析软件采用相机自带程序，可以提供最高达 6 维的轨迹分析结果。笔者重点介绍系统投放控制软件。该软件采用 VC++ 编写<sup>[6]</sup>、标准的 WINDOWS 界面，通过对 NI PCI 6602 计数器板进行配置，使相应的计数器工作，产生单脉冲，触发继电器板以及测量装置，从而控制摄像机开启、投弹、助推以及测量采集等信号。程序界面简单明了，操作性强。当外围电路一切准备就绪时，启动投放控制程序，其设计流程如图 7 所示。

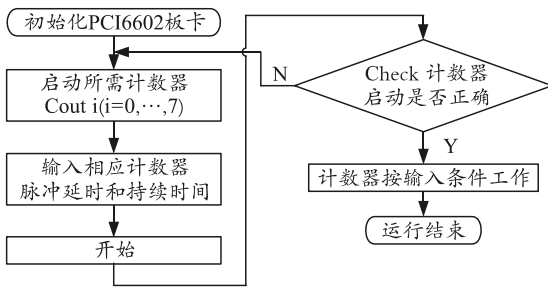


图 7 程序运行执行流程

计数器启动以及脉冲产生延时根据试验要求予以设定，保证各环节的有序运行，时序控制如图 8 所示。在程序设计上根据试验具体控制要求，选择相应的投放回路和投放方式(有无助推)，按照时序进行时间设置，从而触发采集装置(摄像机、测量装置)运行，以及投放实施。如图 9 所示，整个程序界面简洁明了，同时可根据需要实时调整功能模块，以满足更广泛的任务需求。

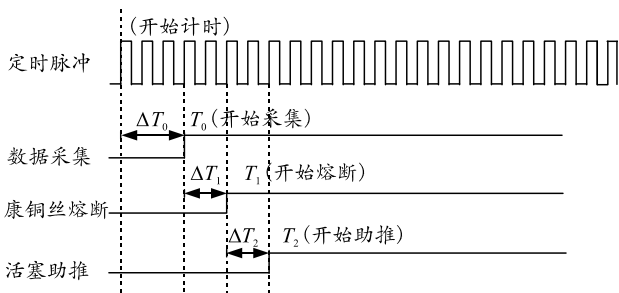


图 8 时序控制



图 9 投放控制软件界面

### 3 测试结果

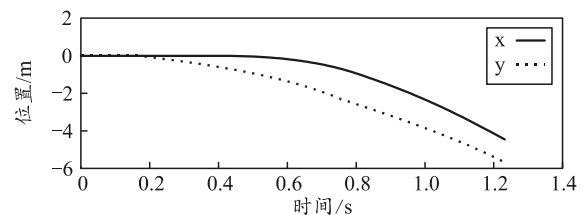
多路投放控制在某型试验中已得以验证。这里对助推测量和轨迹记录结果进行分析。

在作动筒活塞面积、传感器系数(对应关系)、助推输出压力已知的前提下，采用传统计算方法和测量换算部分的瞬时助推力数据比较结果见表 1，可以看到：助推受力达到预期目标要求，该方案的可靠性和准确性得以验证。特别注意，传感器安装时位置很重要，其感应面应保持与活塞杆垂直方向。

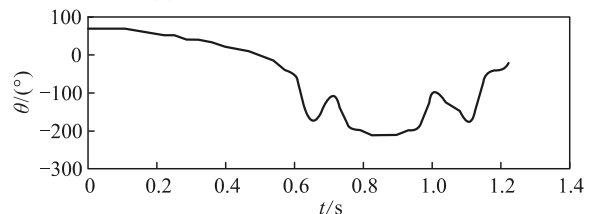
表 1 助推测力对比

助推 气压/MPa	传统计算 结果/N	测量 电压/mV	测量计算 结果/N
2	100.53	250.79	102.38
3	150.80	378.69	154.59
4	201.06	494.06	201.69

通过高速摄影对投放轨迹进行记录，采用图像分析软件可以实现典型状态的图像分析和轨迹判读，从而得到典型试验状态的分离轨迹数据。图 10 给出了某外挂物投放分离的轨迹曲线，包括位置、姿态等，通过分析对于投放改进和优化具有极大参考意义。



(a) 某外挂物轨迹位置曲线



(b) 某外挂物投放轨迹旋转角度曲线

图 10 某外挂物投放轨迹曲线