

doi: 10.7690/bgzdh.2024.02.009

大型低速风洞尾撑机构研制

张德久¹, 徐剑英¹, 谢明伟², 蔡清青², 李进学¹

(1. 中国空气动力研究与发展中心低速所, 四川 绵阳 621000;

2. 中国空气动力研究与发展中心设备设计及测试技术研究所, 四川 绵阳 621000)

摘要: 尾撑机构是为大型低速风洞研制配套的多用途支撑设备, 其主要用途包括: 支撑战斗机模型完成大迎角状态测力、测压试验任务, 迎角连续变化范围 $-15^{\circ}\sim 90^{\circ}$, 侧滑角连续变化范围 $\pm 35^{\circ}$; 支撑大尺度模型(最大翼展达6 m)完成常规测力、测压、地效试验等任务, 满足迎角连续变化范围 $-10^{\circ}\sim 75^{\circ}$; 支撑特殊模型进行特种试验, 包括细长体模型、螺旋桨模型、动力模拟试验模型等。标模试验验证结果表明: 该机构刚性强, 模型支撑牢固, 运行灵活, 模型姿态变化定位精确, 可满足常规和大量特种模型支撑和姿态变化需要。

关键词: 尾撑机构; 低速风洞; 试验设备

中图分类号: TJ011; TP273 **文献标志码:** A

Development of Tail Support Mechanism for Large Low Speed Wind Tunnel

Zhang Dejiu¹, Xu Jianying¹, Xie Mingwei², Cai Qingqing², Li Jinxue¹

(1. Low Speed Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China;

2. Facility Design and Instrumentation Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: The tail support mechanism is a multi-purpose support equipment developed for a large low-speed wind tunnel. Its main uses include supporting the fighter model to complete the task of measuring force and pressure at high angles of attack, with the continuous range of angles of attack from -15° to $+90^{\circ}$ and the continuous range of sideslip angle from $\pm 35^{\circ}$; Support large-scale models (with a maximum wingspan of 6m) to complete conventional force measurement, pressure measurement, ground effect test and other tasks, and meet the continuous change range of angle of attack from -10° to $+75^{\circ}$; Support special models for special tests, including slender body models, propeller models, dynamic simulation test models, etc. The standard model test shows that the mechanism has strong rigidity, firm model support, flexible operation and accurate positioning of model attitude change, which can meet the needs of conventional and a large number of special model support and attitude change.

Keywords: tail support mechanism; low speed wind tunnel; test equipment

0 引言

大型低速风洞是为满足各种大飞机、直升机、无人机、大型运载火箭、高速列车、汽车、风力机等先进航空航天飞行器、地面交通工具及能源等领域的创新发展需要, 根据《国家重大科技基础设施建设中长期规划(2012-2030年)》要求而建设的一座性能先进的大型低速空气动力学和气动声学综合试验研究设施, 具有 $8\text{ m}\times 6\text{ m}$ 闭口、 $8\text{ m}\times 6\text{ m}$ 开口、 $9.5\text{ m}\times 9.5\text{ m}$ 闭口3个可更换试验段, 风洞的流场品质、背景噪声和综合性能均达到国际领先水平。尾撑机构是该风洞最主要、最关键和最常用的模型试验支撑设备, 它可在所有试验段配置中使用, 并满足模型尾撑、斜腹撑或斜背撑等支撑要求^[1-3]。

1 尾撑机构组成

尾撑机构由支撑系统、液压系统、控制系统以及辅助装置组成。

1.1 支撑系统

支撑系统由变角度机构和Y向机构组成, 具有迎角、侧滑角、Y向(铅垂方向)运动3个自由度, 各自由度运动互不耦合, 均采用高精度伺服油缸驱动。支撑系统3维总体结构如图1所示, 结构主体尺寸为(变角度机构位于风洞轴线): 25.5 m (高) \times 9.2 m (长) \times 4.9 m (宽), 重约490 t。Y向4根组合导轨及导轨座框架是整个尾撑机构的基础, 左、右导轨座框架各自重约120 t, 导轨及导轨座框架总高17.58 m, 高出地面3.5 m, 均以风洞轴线为中心左

收稿日期: 2023-10-18; 修回日期: 2023-11-25

第一作者: 张德久(1971—), 男, 四川人, 硕士。

右对称布置在长 6.26 m、宽 6.1 m、深 22 m 的地坑内，左、右导轨座框架通过前后共 10 根横梁相互固联，导轨座框架与地坑基础之间通过若干型钢螺栓以及浇筑的灌浆层凝固后而固连在一起。

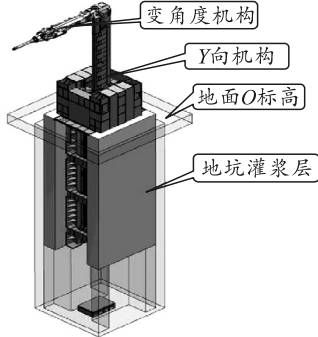


图 1 支撑系统 3 维总体结构

支撑系统具有以下特点：

- 1) 与试验段完全独立，无振动干涉问题。
- 2) 各机构相互独立，既可独立运动，又可组合联动。
- 3) 组合导轨及导轨座框架结构刚性强、稳定性好。
- 4) 系统适应能力强、应用潜力大。除可进行大迎角试验及大尺度模型试验外，还可支撑特殊模型进行特种试验，包括细长体模型、螺旋桨模型、动力模拟试验模型等。
- 5) 对支撑系统的安装调整、加固、灌浆施工、导轨精调以及检测等要求高^[4-5]。

1.1.1 变角度机构

变角度机构由迎角 α 、前侧滑角 β_1 、后侧滑角 β_2 机构组成，在零位时的最大外形尺寸为：7.81 m (长)×1.565 m (宽)×1.158 m (高)，重约 24 t。变角度机构 3 维结构如图 2 所示。

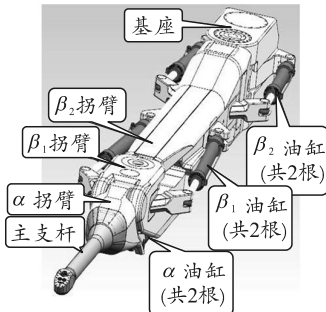


图 2 变角度机构 3 维结构

迎角、前/后侧滑角机构串联布置，均通过成对的圆锥滚子轴承及转轴相互连接。变角度机构前端连接模型主支杆，后端通过连接锥轴与 Y 向机构立柱型面组件相连接。

试验模型迎角与侧滑角的变化及组合通过迎角机构以及前/后侧滑角机构各 1 对伺服油缸的驱动来实现，且迎角和侧滑角机构相互独立。前、后侧滑角旋转半径不同，可以协调前后运动保证变侧滑角试验时模型中心始终保持在风洞轴线上。

迎角、前/后侧滑角机构本体及转轴均采用 30CrMnSiA 锻件材料整体加工成型，既保证了机构强度刚度，又控制了机构外形尺寸、机构堵塞度满足要求；机构本体表面喷碳化钨及抛光处理，既美观又达到防锈的效果。每根油缸均配备高精度、抗震能力强的内置磁致伸缩位移传感器，运行定位精度为 0.1 mm。

1.1.2 Y 向机构

Y 向机构主要由立柱型面组件、导轨(座)组件、滑动支撑组件、重载伺服油缸等组成，最大外形尺寸为：24.865 m (高)×5.28 m (长)×4.9 m (宽)，重约 460 t。Y 向机构 3 维结构如图 3 所示。

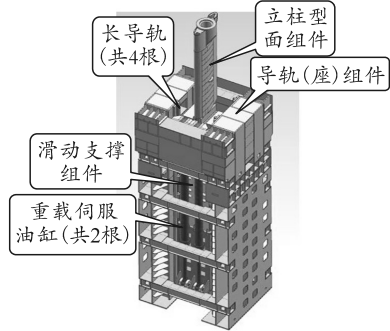


图 3 Y 向机构 3 维结构

立柱型面组件由立柱及型面盖板组成，其外表面为分块连接成的翼型形面，可减小机构堵塞度以及对流场的影响。盖板与立柱之间可敷设液压及控制管线。

导轨(座)组件由组合长导轨、导轨垫板、导轨座框架及连接梁组成。组合导轨由 4 根对称布置安装在左右导轨座框架上的长导轨组成；导轨座框架分左右 2 部分，对称布置。

滑动支撑组件主要由滑动框架及 20 个滑块、连接段组成。滑动框架下端与连接段通过螺栓上下连接，滑动框架上端与立柱型面组件通过螺栓和销钉连接，滑动框架两侧安装面与滑块通过垫板及螺钉连接。

重载伺服油缸下端与连接段底部相连，上端与顶部横梁相连。Y 向机构滑动支撑组件由 2 根重载伺服油缸驱动，通过组合长导轨导向，每根导轨布置 5 个滑块。2 根重载伺服油缸平行倒立布置安装

在变角度机构的同侧，既可以保证油缸在长行程下始终受拉力，防止压杆失稳，又可以有效抵消因变角度机构悬臂结构造成的附加弯矩，保证滑动支撑组件上下顺畅运行。

Y 向机构的功能是提供变角度机构的支撑，使变角度机构保持预定高度位置，并可在模型改变迎角试验时进行 Y 向运动补偿；使变角度机构下降至适当位置以便于试验段更换。

立柱为主要承载部件，立柱主体采用 40Cr 锻件材料整体加工成型，盖板采用轻质铝合金材料，立柱柱面组件表面整体喷碳化钨及抛光处理。导轨座框架及连接梁均采用箱型焊接结构，主材为 Q420D 板材，表面喷涂油漆处理。每根油缸的额定工作压力为 21 MPa，最高工作压力为 25 MPa，缸径/杆径为 320 mm/220 mm，均配备高精度、抗震能力强的内置磁致伸缩位移传感器。重载导轨采用力士乐 R1865 363 75，表面镀硬铬；滑块采用力士乐 R1863 323 60 重型加长型。

1.2 液压系统

尾撑机构液压系统是一套完全独立的系统，该系统由伺服系统、油源和蓄能器组成，其原理如图 4 所示。尾撑机构各对油缸均通过伺服系统对应的伺服比例阀来实现速度和位移的控制，从而实现迎角机构、前/后侧滑角机构、 Y 向机构的协调运动。

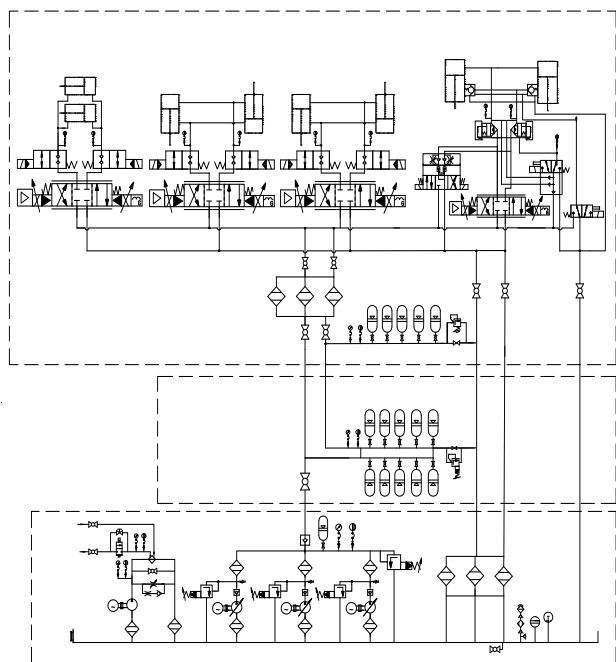


图 4 尾撑机构液压系统原理

油源通过 3 台电机分别带动 3 台恒压变量油泵工作，每台油泵流量为 270 L/min，最高工作压力为

35 MPa。油源压力由比例溢流阀进行调节，并实现远程控制。同时，对油液的温度、压力、油量以及固体颗粒度、含水量等采取了相应监控措施。

蓄能器组最大可提供 2 318 L/min 的瞬时流量，满足了机构快速运动时大流量需求；该蓄能器组同时具有稳压作用，也可以作为应急油源。

1.3 控制系统

控制系统主要控制迎角机构、前/后侧滑角机构、 Y 向机构的油缸动作，从而实现模型 α 、 β 的变化。控制系统采用协同机构联动的控制模式，即 Y 向机构与 α 机构联动运行，前侧滑角 β_1 机构与后侧滑角 β_2 机构联动运行实现 β 的组合运动；在“定 α 、变 β ”“变 α 、定 β ”“变 α 、变 β ”的运动控制过程中，相关机构均需协调联动。

尾撑各个机构的液压伺服驱动均采用 1 个伺服比例阀驱动 2 个油缸的方式。尾撑机构控制系统的控制对象主要包括 4 个伺服比例阀、8 个锁控阀、1 个换向阀、10 个供油管路压力传感器、6 个过滤器堵塞信号，另外还包括机构运行的安全联锁功能。

尾撑机构控制系统以西门子的 SIMOTION C240 作为核心运动控制器，SIMOTION C240 与上位机及风洞试验管理机采用实时以太网交换数据。运动控制器根据上位机下达的控制指令，完成尾撑机构各类运行工况的运动控制，将各种运行状态监测数据通过网络实时传送至上位机，并通过状态监测系统实时监控状态。

尾撑机构对模型安全防护同时采用 2 种方式实现：1) 通过软件进行模型空间位置计算来实现模型触壁保护；2) 在试验段 4 个壁面布置激光雷达，以防止模型在运行过程中碰到洞壁。

为方便现场人员对尾撑机构进行操作，在试验段中设置了移动控制面板，方便风洞模型更换及现场设备单动调节。

1.4 辅助装置

为便于对模型进行安装、调试以及搬运，尾撑机构研制中包含了 2 套辅助装置，分别是用于模型地面装配调试的尾撑模拟装置，以及用于将模型从尾撑模拟装置转运到尾撑机构进行辅助安装的模型转运平台。

2 主要性能指标

尾撑机构主要性能指标和重复性试验精度如表 1 和 2 所示。

表 1 尾撑机构主要性能指标^[1,6]

试验	模型参数			最大气动载荷					
	最大重量/kg	最大展长/mm	最大机翼面积/m ²	升力/N	阻力/N	侧力/N	俯仰力矩/Nm	偏航力矩/Nm	滚转力矩/Nm
大迎角试验	≤500	≤2 000	≤0.8	-10 000~20 000	0~20 000	±6 000	±7 000	±3 000	±3 000
常规试验	≤2 000	≤6 000	≤3	-15 000~55 000	-75 000~15 000	±13 000	±15 000	±15 000	±15 000

试验	机构运动特性					Y 向运行范围/mm	Y 向运行精度/mm	机构尺寸最大堵塞度/%
	迎角范围/(°)	侧滑角范围/(°)	角度运行精度/(°)	角度运行速度/(°/s)	Y 向运行精度/mm			
大迎角试验	-15~90	-35~35	≤0.012	0~1	-7 165~3 000(以风洞轴线为 0 位, 向上运行为正)	≤0.2	≤7	
常规试验	-10~75							

表 2 尾撑机构重复性试验精度^[7]

试验类型及指标	δ_{cy}	δ_{cx}	δ_{mz}	δ_{cz}	δ_{my}	δ_{mx}
CHN-T1 标模试验(大型低速风洞)	0.000 49	0.000 08	0.000 18	0.000 23	0.000 06	0.000 03
CHN-T1 标模试验(DNW-LLF 风洞)	0.001 40	0.000 38	0.000 30	0.000 26	0.000 08	0.000 03
GJB1061 合格指标	0.004 00	0.000 50	0.001 20	0.001 20	0.000 50	0.000 50
GJB1061 先进指标	0.001 00	0.000 20	0.000 30	0.000 30	0.000 10	0.000 10

3 标模试验验证

尾撑机构安装调试结束后, 在大型低速风洞 8 m×6 m 闭口试验段开展了 CHN-T1(大展弦比运输机)标模 1:6.4 全金属模型测力试验如图 5—11、表 2 所示。试验结果表明: 尾撑机构可牢固支撑模型, 具有良好的结构稳定性。采用尾撑机构进行标模测力试验, 试验重复性精度全部达到 GJB1061—1991 先进指标要求, 优于 DNW-LLF 风洞, 试验结果与国内外相关结果有较好的相关性。



图 5 CHN-T1 标模试验

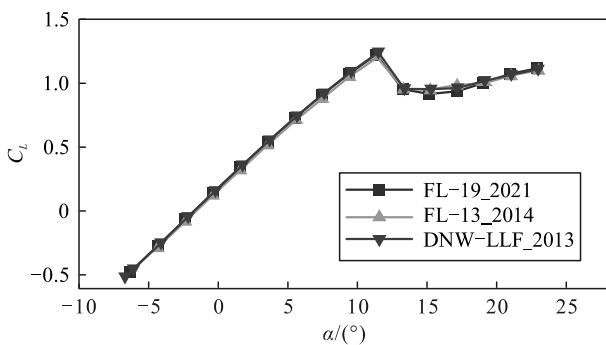


图 6 纵向相关性 $C_L \sim \alpha$ 曲线

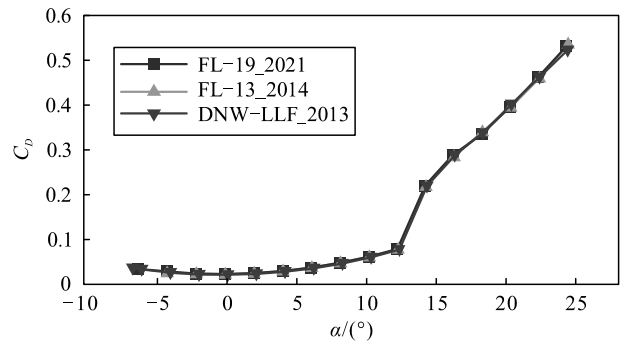


图 7 纵向相关性 $C_D \sim \alpha$ 曲线

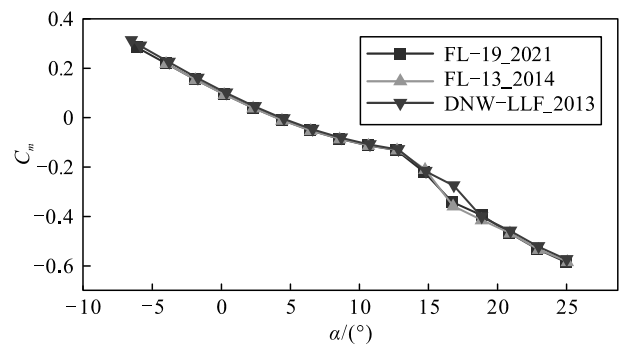


图 8 纵向相关性 $C_m \sim \alpha$ 曲线

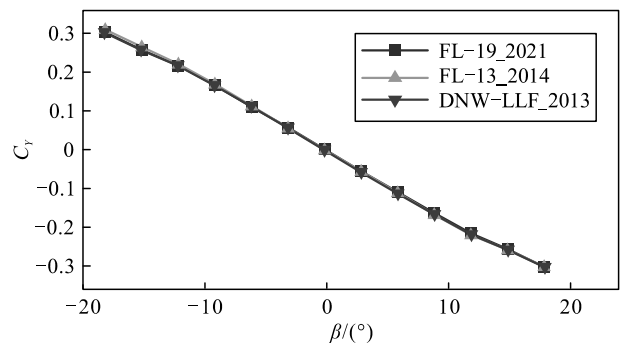


图 9 横航向相关性 $C_Y \sim \beta$ 曲线

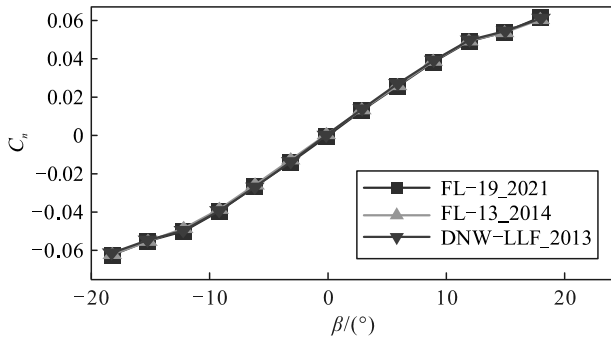


图 10 横航向相关性 $C_n \sim \beta$ 曲线

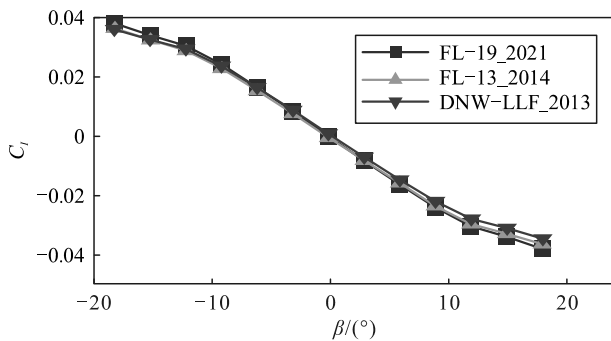


图 11 横航向相关性 $C_1 \sim \beta$ 曲线

4 结束语

1) 大型低速风洞尾撑机构可牢固支撑模型，具有良好的结构稳定性，适用于多种模型支撑方式，

(上接第 12 页)

2.4 柔性作业线的安全性探索

所有炮弹分解拆卸危险工序均采用人机隔离操作，计算机远程控制，工序工间传递窗采用有效防爆措施，分解设备达到本安型，并且设置一定的自我纠错能力，配套建设具备一定抗爆泄爆功能的弹药销毁工房工间，大大增强了作业线的安全性能。

3 结束语

将柔性生产技术与报废弹药分解拆卸作业线结合，采用先进的机械设计、防护设计、液压气动及自动控制等技术，把先进的物流设备、自动化拆解设备及控制系统运用到现有报废弹药分解拆卸作业线中^[7]，可实现报废弹药分解拆卸的自动化、连续化、安全化，有效提高作业线的适用性，提升场地利用率和自动化程度，降低劳动强度，可为报废弹

如尾撑、斜腹撑、斜背撑等；机构运行平稳，定位精确；采用该机构进行测力试验，试验精度达到国军标先进指标要求，优于国内外同类风洞。

2) 尾撑机构设计方案合理，加工安装质量符合要求，性能满足设计要求，达到预期指标，具备型号试验能力，可用于飞行器大迎角试验和常规迎角大模型大载荷试验。

参考文献：

- [1] 祝明红, 陈洪, 熊建军, 等. 大型低速风洞设计技术要求[R]. 绵阳: 气动中心低速所, 2017.
- [2] 甘小明. 大型低速风洞洞体机械系统尾撑机构设计[R]. 绵阳: 气动中心设备测试所, 2018.
- [3] 蔡青青. 尾撑变角度机构更改结构设计[R]. 绵阳: 气动中心设备测试所, 2021.
- [4] 李先锋. 模型支撑机构及配套装置外委设计制造安装技术任务书[R]. 绵阳: 气动中心设备测试所, 2018.
- [5] 张德久, 王子豪. 大型低速风洞尾撑机构制安工作总结报告[R]. 绵阳: 气动中心低速所, 2022.
- [6] 谢明伟. 尾撑机构调试报告[R]. 绵阳: 气动中心设备测试所, 2021.
- [7] 刘李涛, 吴福章, 王振昌, 等. CHN-T1 标模 (1: 6.4) 大型低速风洞测力试验报告[R]. 绵阳: 气动中心低速所, 2021.

药分解拆卸技术的发展及配套设备的更新提供参考。

参考文献：

- [1] 巩永校, 王宝全. 弹药处废技术[D]. 石家庄: 军械工程学院, 1996: 20-21.
- [2] 施洪杰, 向红军, 吕庆教, 等. 废旧弹药装药倒空现状与发展[J]. 兵工自动化, 2021, 40(12): 33-37.
- [3] 李金明, 雷彬, 丁玉奎. 通用弹药销毁处理技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 25-33.
- [4] 郑军强. 基于多点起爆的聚能射流销毁弹药技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- [5] 李金明, 王国栋, 张玉令, 等. 报废弹药拆卸销毁安全性探讨[J]. 工程爆破, 2016, 22(1): 46-48, 60.
- [6] 夏福君, 宋桂飞, 肖东胜, 等. 报废弹药绿色无害化处理技术发展思路探讨[J]. 兵工自动化, 2011, 30(5): 94-96.
- [7] 刘敏, 范志和, 王伟, 等. 海军干扰弹的销毁方法[J]. 四川兵工学报, 2011, 32(4): 17-19.