

结冰风洞试验段上壁面自动顶盖装置设计与应用

熊建军, 梁 鉴, 郭 龙, 赵 照, 冉 林

(中国空气动力研究与发展中心 结冰与防除冰重点实验室, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为了解决模型进出试验段安装和拆卸问题, 提出在结冰风洞试验段上顶部设计自动开闭顶盖, 利用行车吊装模型进出的方法, 研制了外形超 12 m^2 、重近 5 t 、定位精度 1 mm 的移动顶盖自动开闭装置; 在结冰风洞试验段上壁板中心设计与移动顶盖同尺度的开孔, 移动顶盖安装在提升机构的下端, 通过四轴同步提升机构垂直升降, 用于打开或关闭上壁板开孔; 平移机构带动提升机构和移动顶盖, 沿试验段上框架顶部龙门结构的两侧支撑轨道的滑轨水平移动, 使移动顶盖从风洞上壁面中心移动到过渡扩散段顶部; 研制了升降、平移两轴伺服控制系统, 实现了大载荷移动顶盖自动升降和平移控制, 解决了移动顶盖结构设计、大载荷四轴同步提升时丝杠间相互别劲、高精度定位控制等问题; 系统达到设计指标, 已经应用到结冰风洞试验中, 提高了试验模型更换效率。

关键词: 结冰风洞; 移动顶盖; 倒锥圆台; 提升机构; 平移机构

Design and Application of the Automatic Removable upper Test Section Wall in Icing Wind Tunnel

Xiong Jianjun, Liang Jian, Guo Long, Zhao Zhao, Ran Lin

(Key Laboratory of Icing and Deicing, China Aerodynamics Research & Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to solve the problem of installation and disassembly of the model in and out of the test section, the design of automatic opening and closing removable section wall in the top face icing tunnel test section was put forward, an automatic opening and closing device of mobile with shape over 12 m^2 , weight of nearly 5 t and positioning accuracy of 1 mm was developed by the crane hoisting model in and out of the test section. At the top in the center of the icing wind tunnel on the chamber wall design and mobile roof openings with scale, mobile head installed on the lower end of the hoisting mechanism, through the four vertical elevating axis synchronous hosting mechanism, used to open or close the hole on the wall; translational mechanism in promoting mechanism and moving head, along the test section on both sides of the frame at the top of gantry structure support rail with slide horizontally, moving a cover from the wind tunnel wall center moved to the transition diffusion section at the top; two-axis servo control system of lifting and translating was developed, which realized the automatic lifting and leveling control of moving top cover under large load, and solved the problems of structural design of moving top cover, mutual difference between lead screws when lifting with large load and 4-axis synchronously, and high-precision positioning system. The system meets the design target and has been applied to the icing wind tunnel test to improve the efficiency of model replacement.

Keywords: icing wind tunnel; removable test section wall; upside truncated cone; lifting mechanism; translation agencies

0 引言

风洞是进行空气动力试验最常用、最有效的工具之一, 一般包括低速风洞、高速风洞、超高速风洞等多种类型, 低速风洞通常指试验段风速马赫数小于 0.4 左右的风洞, 试验段是低速风洞的核心部件, 各种试验模型安装在此处进行试验。试验段一般有开口或闭口两种形式。型号试验用低速风洞, 试验段尺寸一般在 4 米量级左右, 开口试验段虽然安装模型比较方便, 但开口试验段能量损失较大, 因此现代很多大型低速风洞都不采用开口的型式, 一般采用闭口试验段。由于试验模型重量较大, 如何方便试验模型进出安装和拆卸是闭口试验段必须解决的技术问题。国

内外通常做法是在闭口试验段的上壁面中心开孔, 设计可吊装的盖板, 试验期间使盖板嵌入试验段的上壁面中; 安装模型期间, 用试验大厅行车将试验段上壁面的盖板吊开, 将盖板放置到固定位置, 再将模型从上壁面开口吊装到试验段中心安装, 待试验模型安装就位后, 再将盖板吊装到上壁面回位, 通过多颗螺钉紧固在上壁面^[1-3]。整个过程通过手动操作行车吊装完成, 对操作人员要求较高, 自动化程度低, 安装精度低。

结冰风洞是一种性能复杂的大型特种风洞, 2013 年我国首座大型结冰风洞— $3 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 结冰风洞建成, 填补了国内空白。结冰风洞试验段安装在驻室内, 受驻室空间限制, 无法在驻室顶部安装行车吊车模型。试验段更换模型时, 先用气浮系统将试验段移到试验大厅平台, 将模型从试验段入口或出口进入, 待模型安装就位后再将试验段移动到驻室定位。国外同规模结冰风洞的模型安装方法类似, 没有设计移动顶盖^[4]。结冰风洞试验模型通常为 $1:1$ 的截断

收稿日期: 2020-04-11; 修回日期: 2020-05-15。

作者简介: 熊建军(1971-), 男, 四川广安人, 高级工程师, 主要从事风洞测量与控制、高低压变配电方向的研究。

模型或实物,外形尺寸和重量都较大。如果模型安装和拆卸采用传统的吊装上壁板盖板方法,自动化程度低,安装调试效率低。本文以结冰风洞次试验段为基础,设计了一种试验段移动顶盖自动开闭装置,解决了大尺度、重载荷、高精度移动顶盖结构设计难题,实现了移动顶盖自动升降、平移,提高了试验模型更换效率,具有载荷大、定位精度高、自动化程度高、操作效率高等特点^[5]。

1 设计技术要求

根据结冰风洞现场特点和试验需求,移动顶盖自动开闭装置设计技术要求如下:

1) 风洞试验段上壁面移动顶盖实现一键自动提升、平移到指定位置;

2) 移动顶盖外形长 4 m、宽 3 m 量级,重量近 5 t;

3) 移动顶盖提升机构行程 745 mm,平移机构行程 4 750 mm,定位精度 1 mm;

4) 移动顶盖从关闭状态到提升、平移就位,操作时间不超过 6 min;

5) 移动顶盖关闭和提升并移开后,上壁面框架最大形变量小于 1 mm;

6) 移动顶盖提升、平移均具备手动点动/自动功能,自动化程度高。

2 移动顶盖设计

结冰风洞试验段包括试验段和过渡扩散段两部分,采用框架支撑的壁板结构。试验段框架采用两边为箱形纵梁主承力梁,其余为工字钢梁结构,框架通过螺栓连接、定位销定位并承受剪切力。试验段壁板采用槽钢焊接成井字梁结构组成整体框架,主要由壁板框架、不锈钢窗框、观察窗玻璃和连接螺栓等组成;各壁板框架通过支架连接固定在整体框架上,安装玻璃观察窗的不锈钢窗框通过螺钉固定在壁板框架上。为便于模型进出试验段,充分利用试验大厅行车吊装模型,移动顶盖基于试验段上壁面设计,顶盖中心与试验段下壁面转盘中心在一条轴线。试验段上壁面包括上壁板和上框架两部分,根据上壁板和上框架的结构强度,以及试验段进出模型常用尺寸,确定试验段上壁面开孔尺寸为长 4 m、宽 2.7 m、厚 0.3 m。由于开孔尺寸较大,结构上必须保证上壁面的连接强度,保证移动顶盖关闭和打开前后上壁面力学性能和安全性不变;移动顶盖关闭时试验段上壁面内部的平整性和密封性;移动顶盖打开时,顶盖与试验段无任何机械干涉。移动顶盖外形尺寸为长 3.85 m、宽 2.68 m,与上壁板开孔基本一致,顶盖四周焊接一圈钢板,便于顶盖关闭时的密封性;顶盖顶部焊接一圈台阶面,顶盖关闭到位后依靠顶部台阶面悬挂在上壁板框架上。上壁板与顶盖的接触面设计有导引锥度,便于顶盖关闭操作时的精确定位。通过力学分析,顶盖打开后提升到位、提升后平移到位、关闭到位三种状态,主要受力点最大应力远远小于材料的屈服强度,最大形变量 0.15 mm,其中顶盖关闭到位后最大应力和形变最小。试验段上壁面开孔

和移动顶盖如图 1 所示,移动顶盖三种状态主要受力点最大应力和形变的米塞斯等效应力云图如图 2 所示。

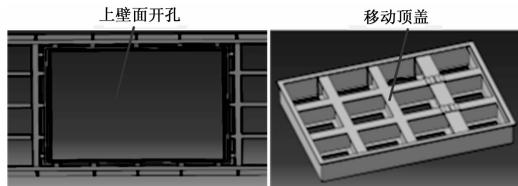


图 1 试验段上壁面开口和移动顶盖

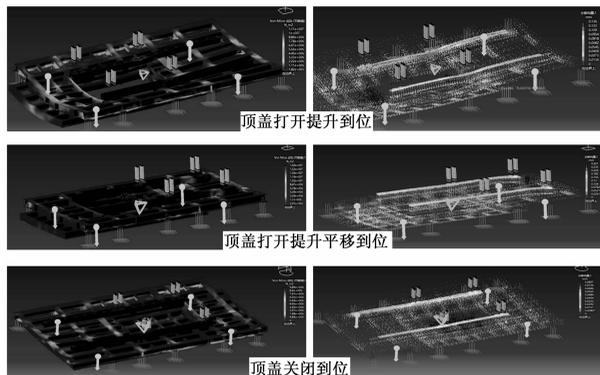


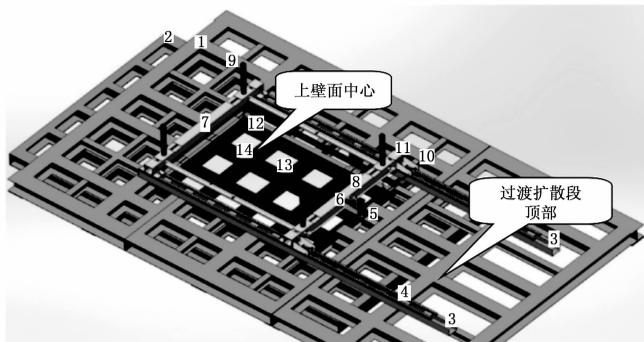
图 2 移动顶盖三种状态等效应力云图

3 移动机构设计

顶盖移动机构用于实现顶盖关闭/打开,包括两个动作:一是顶盖提升,在无机干涉条件下,提升机构将顶盖打开后垂直提升到固定高度,从试验段上壁面开孔处移出,避开试验段上壁面机械干涉,便于顶盖平移;二是顶盖平移,平移机构将顶盖从试验段上壁面中心水平平移到过渡扩散段顶部,将试验段上壁面开孔作为模型进出吊装口。考虑顶盖负荷较大,为保证机构的稳定性和平整度,在试验段上壁面左右两侧设计了双支撑轨梁的龙门结构,支撑轨梁上安装线性直线滑轨,移动顶盖通过 4 根丝杠悬挂在提升机构。提升机构可以使移动顶盖垂直升降,打开或关闭试验段上壁面吊装口;提升机构支撑在平移机构上,通过平移机构的作用,使移顶盖垂直提升到一定高度后再平移到过渡扩散段顶部,或者从过渡扩散段顶部移动到风洞上壁面吊装口^[5-6]。顶盖移动机构组成如图 3 所示。

3.1 提升机构设计

移动顶盖外形尺寸大,重量超过 3 t。提升机构包括提升电机、锥齿轮减速机、水平长轴、T 型 1:1 直角齿轮箱、两侧长轴、螺旋升降机、倒锥圆台等。因为顶盖跨度较大,考虑到稳定性和长期工作在低温高湿度环境,机构采用四台不锈钢螺旋升降机同步提升,机械传动部件全部采用 316 不锈钢材质。提升电机通过锥齿轮减速机实现换向减速增扭,锥齿轮两侧输出轴与水平长轴连接,通过 T 型直角齿轮箱实现换向传动,再通过两侧长轴,机械同步驱动四轴螺旋升降机同步转动,从而实现顶盖垂直升降,使移动顶盖按照设定位移、设定速度沿垂直方向移动。螺旋升降机带自锁功能,保证断电后顶盖不会自动坠落。提升机构原理



1. 上框架; 2. 上壁板; 3. 支撑轨梁; 4. 直线滑轨; 5. 平移电机; 6. 提升电机; 7. 主梁; 8. 副梁; 9. 提示丝杠; 10. 齿轮齿条; 11. 换响器; 12. 倒锥圆台; 13. 移动顶盖; 14. 螺旋升降机同步轴。

图 3 顶盖移动机构组成

如图 4 所示。

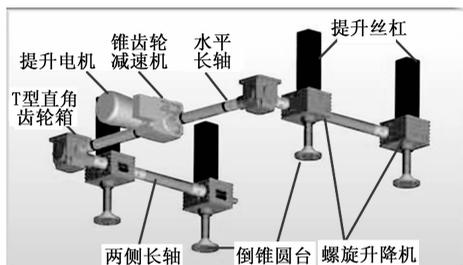


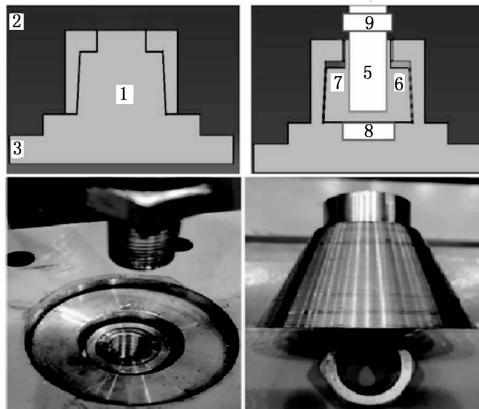
图 4 提升机构原理图

为解决四轴同步提升时丝杠间相互别劲问题, 在螺旋升降机四根丝杠下端设计了圆台结构的倒锥, 安装到顶盖连接块的圆台空腔内。倒锥圆台外形尺寸略小于连接块内的圆台空腔。装配时, 先将带有圆台空腔的 4 个连接块通过螺钉固定到螺旋升降机四根丝杠轴向对应顶盖的位置, 再将倒锥圆台放入连接块的圆台空腔内, 依次将螺旋升降机四根丝杠末端从顶盖的连接块上方插入倒锥圆台中心螺丝孔, 在倒锥圆台正下方设计一扳手着力部件, 丝杠末端丝杠带一螺母, 通过扳手上下对拧, 将丝杠和倒锥圆台拧紧, 确保丝杠与倒锥圆台间不松动。倒锥圆台结构原理与样件如图 5 所示。

螺旋升降机带动顶盖提升时, 伺服电机驱动多台螺旋升降机机械同步旋转, 丝杠和倒锥圆台带动顶盖垂直升降。由于倒锥圆台与连接块内圆台空腔有一定间隙, 各丝杠垂直度有一定的调整量。顶盖关闭时, 在自身重力和圆台空腔导向下准确定位, 顶盖依靠四周的导引锥度下沉到上壁面开孔框架内。顶盖关闭到位后依靠顶部台阶面悬挂在上壁面框架上, 丝杠末端连接的倒锥圆台从圆台空腔间隙内移开, 不再额外受力, 从而延长螺旋升降机寿命; 同时在顶盖与上壁面框架间设置密封圈, 保证顶盖关闭后试验段上壁面平整性和密封性。

3.2 平移机构设计

平移机构采用双驱双轨直线导轨结构, 包括主梁、副



1. 圆台空腔; 2. 升降平台; 3. 连接块; 4. 丝杠末端; 5. 提升丝杠; 6. 倒锥圆台; 7. 圆台螺纹孔; 8. 着力部件; 9. 锁紧螺母。

图 5 倒锥圆台结构原理与样件

梁、平移驱动机构等。主梁和副梁平行布置, 与试验段上框架龙门结构的双轨梁支撑垂直, 增加平移机构的受力面积和平稳性。两侧支撑轨梁上设计了线性直线滑轨, 支撑轨梁内侧下端安装有齿条。平移机构带动提升机构和移动顶盖通过多个滑块压在滑轨上, 可以在直线滑轨上移动。主梁和副梁分别穿过两根提升机构的丝杠, 将顶盖悬挂在平移机构正下方。平移驱动机构包括伺服电机、锥齿轮、长轴、齿轮等, 伺服电机通过锥齿轮实现换向减速增扭, 锥齿轮两侧输出轴分别与长轴连接, 长轴两端齿轮与支撑轨梁内侧下端齿条啮合, 保证平移机构在支撑轨梁两侧的直线滑轨同步移动。平移机构结构如图 6 所示。



图 6 平移机构结构

当顶盖提升到固定位置后, 平移电机驱动提升机构带动移动顶盖沿直线滑轨水平移动, 使移动顶盖从风洞上壁面中心移动到过渡扩散段顶部, 为模型吊装留出足够空间; 待模型安装完毕, 再将移动顶盖能从过渡扩散段顶部移动到风洞转盘中心关闭。

4 顶盖控制系统设计

顶盖提升和移动分别采用独立的驱动系统, 由伺服驱动器控制永磁同步交流伺服电机, 分别组成顶盖提升和平移两个速度闭环控制系统^[6-7]。控制系统以 S7-1200PLC 为控制核心, 完成外部控制信号接入、程序存储、运动控制等功能。伺服驱动器选用 MDX61B 系列, 选配 DFE32B 通用型现场总线接口, 通过以太网与 PLC 控制器和触摸屏通

讯。伺服驱动器安装在控制柜内，完成两台伺服电机转速闭环控制；触摸屏安装在控制柜面，用于现场人机交互操作；伺服电机安装在试验段上壁面移动顶盖，工作在低温、潮湿环境，最低环境温度 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。提升机构选用 SEW 锥齿轮伺服减速电机，型号为 K47 CMP71L/PK/RH1M/SM1/OS1，减速比 4.64 : 1，额定输出扭矩 300 Nm，电机额定转速 3 000 rpm，250 Hz，额定电流 9.4 A，电机额定工作电压 400 V，电机额定功率 4.1 kW，配置旋转变压器速度反馈；平移机构选用 SEW 锥齿轮伺服减速电机，型号为 K77 CM90M/TF/RH3M/SM50/2WE/OS1，减速比 97.05 : 1，额定输出扭矩 1 550 Nm，电机额定转速 2 000 rpm，100 Hz，额定电流 6.9 A，额定转矩 14.5 Nm，额定工作电压 400 V，额定功率 3 kW，配置旋转变压器速度反馈。

控制系统组成如图 7 所示，系统监控界面如图 8 所示。

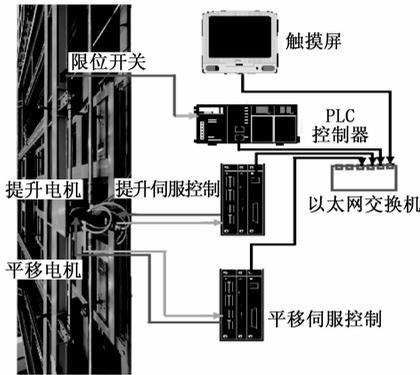


图 7 移动顶盖控制系统组成

触摸屏手动模式用于移动顶盖升降、平移机构已经找到机械零位后，移动顶盖升降、平移机构按照设定位移任意连续移动；触摸屏自动模式用于移动顶盖升降、平移机构已经找到机械零位后，系统自动完成“移动顶盖打开运行”、“移动顶盖关闭运行”全过程。

通过调试，上壁面顶盖从关闭到完全打开用时 6 min，一键操作，全程实现自动找零、升降和平移，升降位移 745 mm，平移位移 4 750 mm，顶盖运行平稳，定位准确，操作方便。顶盖关闭和打开过程如图 9 所示。



图 9 移动顶盖关闭/打开过程

6 结束语

为了便于模型安装，提出在试验段上顶面设计开孔和移动顶盖，利用行车吊装模型的方法，研制了大尺度、重载荷、高精度移动顶盖自动开闭装置，包括上框架、上壁板、移动顶盖、平移机构、提升机构和两轴伺服控制系统。上壁板位于上框架的下方，上框架用于支撑和固定所述上壁板；移动顶盖安装在上壁板开口处，安装在提升机构的下端，通过提升机构使移动顶盖垂直升降，用于打开或关闭上壁板开口；平移机构用于使移动顶盖从风洞上壁面中心移动到过渡扩散段顶部，为模型吊装留出足够空间；控制系统用于系统运行操作，提高系统自动化水平。系统调试运行表明：风洞试验段上壁面自动顶盖装置达到设计目的，实现了大尺度、重载荷移动顶盖高精度自动升降和平移控制，运行稳定，操作简单，提高了试验模型更换效率。

参考文献：

- [1] 李周复. 风洞特种试验技术 [M]. 北京：航空工业出版社，2010.
- [2] 恽起麟. 风洞实验技术 [M]. 北京：航空工业出版社，1991.
- [3] 中国人民解放军总装备部. 低速风洞试验 [M]. 北京：国防工业出版社，2002.
- [4] 战培国. 国外风洞试验 [M]. 北京：国防工业出版社，2018.
- [5] 郭 龙，王梓旭. 3 米×2 米结冰风洞用户手册 [C]. 中国空气动力研究与发展中心，2014.
- [6] 易 贤，李维浩，王应宇，等. 飞机结冰传感器安装位置确定方法 [J]. 实验流体力学，2018，32 (2)：48-54.
- [7] 熊建军，倪章松，李 昱，等. 防冰总压/静压探针结构及控制系统设计与应用 [J]. 测控技术，2019，38 (4)：132-136.
- [8] 熊建军，倪章松，赵 照，等. 飞机模型电加热防除冰控制系统设计与应用 [A]. 第十六届中国航空测控技术年会论文集 [C]. 2019.

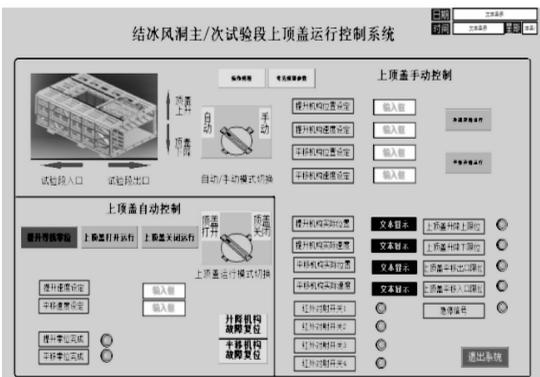


图 8 移动顶盖监控界面

5 系统调试与应用

先后解决上壁面框架组装、顶盖两侧支撑导轨水平调试、限位开关安装、线缆布置、机械找零、高精度位移控制等技术难题，上壁面顶盖实现按钮点动、触摸屏手动/触摸屏自动三种控制模式。系统运行前，完成运行检查，待移动顶盖具备运行条件后，通过控制柜面按钮和触摸屏监控界面操作，完成控制系统按钮点动、触摸屏手动、触摸屏自动三种控制模式设置。按钮点动模式用于移动顶盖升降、平移任意位置点动控制，该模式不需要找机械零位；