

doi: 10.7690/bgzdh.2019.07.007

一种改进的 FL-32 风洞双转轴角度测量方法

李 勇, 马东平, 顾海涛, 黄 睿, 蒋婧妍

(中国空气动力研究与发展中心高速所, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为满足风洞开展横向测力试验的需求, 对 FL-32 风洞双转轴角度测量方法及结构进行改进。依据侧滑角的测量原理, 利用三角函数关系计算侧滑角, 通过分析侧滑角测量方法误差来源, 结合 FL-32 风洞实际结构形式, 建立了一套新的侧滑角测量方法, 可提高侧滑角的测量精度; 同时, 通过对双转轴局部结构进行改进, 解决了双转轴的可靠性和适用性。试验结果表明, FL-32 风洞双转轴能满足风洞横向测力试验的要求。

关键词: 双转轴; 误差分析; 测量方法; 结构优化; 风洞试验

中图分类号: TP202 **文献标志码:** A

An Improved Angle Measurement Method on Double-rotate-axis of FL-32 Wind Tunnel

Li Yong, Ma Dongping, Gu Haitao, Huang Rui, Jiang Jingyan

(High Speed Institute, China Aerodynamics Research & Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to meet the needs of carrying out the transverse force test in wind tunnel, according to the measurement principle of the angle of side-slip and using the trigonometric function relation, by analyses of the angle measurement methods error sources and combined with the practical structure of the FL-32 wind tunnel, a new angle measurement method is set up for the double-rotate-axis. The new measurement method can obviously improve the measuring accuracy of the angle of side-slip, and also the reliability and applicability of the double-rotate-axis is improved by optimizing the local structure. The wind tunnel test results show that the double-rotate-axis can meet the requirements of the wind tunnel transverse force test in the FL-32 wind tunnel.

Keywords: double-rotate-axis; error analysis; method of measurement; structure optimization; wind tunnel test

0 引言

在 CARDC 1.2 m 量级以上的大型高速风洞中, 通常采用双转轴实现横向测力试验^[1], 而对于 0.6 m 量级的小型高速风洞, 由于空间受限, 难以兼顾堵塞度和结构刚度强度的要求。

FL-32 风洞在小尺寸风洞使用双转轴机构上进行了尝试。为满足风洞试验段堵塞度的要求, 该机构设计尺寸较小, 整体结构小巧精妙, 满足小载荷试验需求。但由于机构尺寸偏小, 而且受 FL-32 风洞试验段空间限制, 使用传统方法测量双转轴机构侧滑角的误差较大, 同时出厂后的双转轴机构还存在卡块定位不准、天平走线不便等问题。为此, 笔者根据风洞及双转轴机构实际情况对角度测量方法开展研究, 并对双转轴局部结构进行改进。

1 10°双转轴结构

如图 1 所示, FL-32 风洞 10°双转轴主要由中部支架、轴架、前后轴、前后卡块、驱动装置、锁

紧装置等组成^[2], 其侧滑角范围为 $-10^{\circ} \sim +10^{\circ}$, 定位阶梯为 1° , 精度要求为 $\beta \leq |3'|$, $\gamma \leq |3'|$ 。双转轴侧滑角通过前轴和后轴组合运动实现, 后轴通过蜗轮蜗杆机构实现侧滑角姿态变化, 前轴利用同样机构实现模型滚转角的调平。前轴和后轴角度调整到位后, 通过前、后卡块与前、后基准卡块座的相互配合实现精确定位, 利用拉紧螺母和锁紧套进一步加固锁紧前轴和后轴。

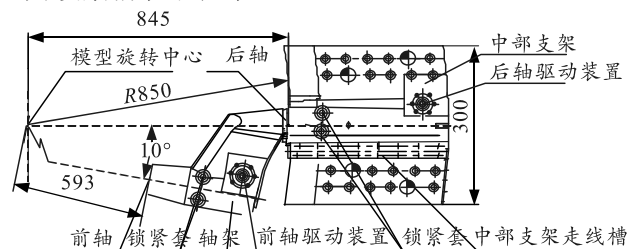


图 1 双转轴结构

如图 2 所示, 卡块座上的零位销孔是卡块的定位基准, 卡块上不同角度 $T(45^{\circ} \sim 135^{\circ})$ 的定位销孔与卡块座定位基准孔配对实现各侧滑角。

收稿日期: 2019-03-06; 修回日期: 2019-04-12

作者简介: 李 勇(1992—), 男, 四川人, 学士, 助理工程师, 从事机械设计、高速风洞试验等研究。E-mail: 343827588@qq.com。

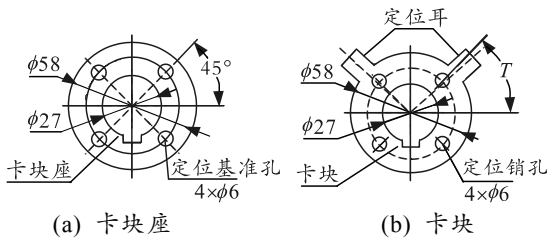


图 2 卡块座和卡块结构

2 双转轴角度测量方法研究

由于加工误差及双转轴与风洞迎角机构弯刀的配合误差，双转轴实际角度与设计值存在误差，需将双转轴机构安装在风洞工位下进行实际测量，以获得机构真实的侧滑角和滚转角。

2.1 测量原理及实施方法

侧滑角的测量原理：一般利用测量工具测量安装在双转轴检棒上前后两点与试验段侧壁之间的横向距离，以及测量检棒上两点的距离，利用三角函数关系计算侧滑角^[3]。

在实际测量中，一般采用 2 种操作方法：1) 将百分表固定在试验段侧壁上，操作支架段在精密导轨上轴向移动，利用百分表测量安装在双转轴前轴的圆柱检棒距试验段侧壁的距离，通过计算得出侧滑角；2) 支架段相对固定，通过内径千分尺直接测量检棒上前后两点到试验段侧壁的距离来计算侧滑角。测量方法如图 3 所示。

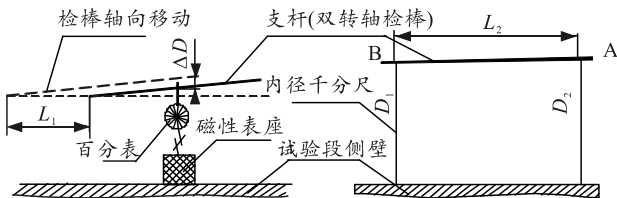


图 3 利用百分表和内径千分尺测量侧滑角

2 种测量方法对应侧滑角的计算公式如下：

$$\beta = 60 \times \arctan \frac{\Delta D}{L_1}; \quad (1)$$

$$\beta = 60 \times \arcsin \frac{|D_1 - D_2|}{L_2}. \quad (2)$$

式中： β 为侧滑角，(°)； L_1 为检棒轴向移动距离，mm； L_2 为检棒上两测量点的距离，mm； ΔD 为百分表 2 次读数差值，mm； D_1 、 D_2 为检棒与试验段侧壁之间的距离，mm。

2.2 误差来源及分析

2.2.1 检棒上两测点距离对测量结果的影响

根据式(1)、式(2)可得：在 ΔD 、 D_1 、 D_2 一定的

情况下，检棒上两测量点距离越长，则 β 测量误差值越小。

采用检棒轴向移动以测量大角度侧滑角时，因百分表量程较小（一般为 0~10 mm），机构轴向行走距离受限，造成检棒上两测点距离较短。FL-32 风洞支架段轴向沿普通轨道移动，轴向导向不连续，移动过程不平稳。按百分表量程 10 mm、定位精度 0.01 mm，按照风洞支架段轴向定位精度 0.2 mm。以 10°侧滑角为例，根据式(1)得，检棒随支架段轴向移动的最长距离为 56.7 mm，而各单项定位精度会引起侧滑角精度误差最大为 2.6'。

2.2.2 两测点与侧壁横向距离对测量结果的影响

使用内径千分尺直接测量检棒与试验段侧壁距离时，测量球头与检棒圆柱面对不准，内径千分尺本身与测量面位置不正，加上试验段侧壁平面局部缺陷与侧壁扩开角的距离误差等因素，内径千分尺人为操作误差约为 0.5 mm。利用钢板直尺测量检棒上两测点距离的精度为 0.5 mm，如需将侧滑角最大误差控制在 3'以内，根据式(2)可得检棒上两测点最短长度不小于 573 mm。

2.2.3 测量工具姿态对测量结果的影响

测量检棒到试验段侧壁距离时，若内径千分尺与侧壁垂直线存在视差夹角 θ ，(°)，如图 4 所示。

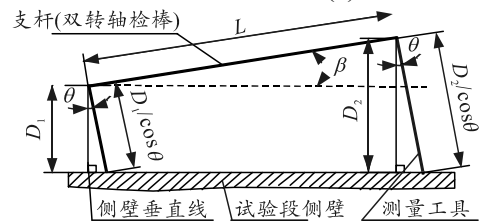


图 4 测量存在视角误差

按侧滑角最大允许偏差量 3' 计算得：

$$\beta + 3 \geq 60 \times \arcsin \frac{\left| \frac{D_1}{\cos \theta} - \frac{D_2}{\cos \theta} \right|}{L_2}. \quad (3)$$

由式(2)、式(3)联解得：

$$\theta \leq \arccos \frac{\sin \frac{\beta}{60}}{\sin \frac{\beta + 3}{60}}. \quad (4)$$

根据式(4)赋值理论侧滑角，得到图 5 所示理论侧滑角与允许视差夹角 θ 关系曲线。由图可得：在侧滑角精度要求范围内，允许视差夹角 θ 随理论侧滑角的增大而减小，即侧滑角越大，测量工具与试验段侧壁的垂直度影响量越大。

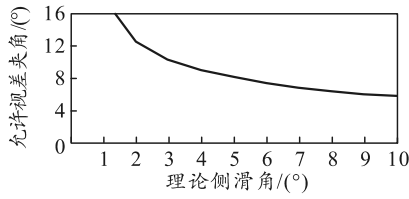


图 5 理论侧滑角与视差夹角 θ 关系

由此可见：测量检棒到试验段侧壁距离时，必须满足测量工具与试验段侧壁垂直度要求，且测量点在检棒水平中分面上。

目前大尺寸风洞基本上都是利用百分表或内径千分尺测量检棒前后两点与试验段侧壁的距离。由于检棒上两测点距离较长，上述误差源的影响相对较小，可以获得较为满意的测量精度，但在小尺寸风洞中，由于检棒上两测点距离变短，测量姿态难以控制，上述误差源的影响增大^[4]。且由于试验段内部空间狭小，不利于测量操作，往往难以获得满意的测量结果，需要改进测量方法。

2.3 测量方法优化

基于上述对侧滑角测量误差及精度分析的理解，结合 FL-32 风洞实际结构形式，笔者探索出新的测量方法，以精确获得双转轴的侧滑角。

2.3.1 测量基准的建立

支架段和试验段(超声速和跨声速)的轴线是以喷管段轴线为基准建立的，喷管段轴线所在铅垂中分面是以喷管段侧壁为基准建立的^[5]。测量侧滑角时，为避免不同试验段因自身同轴度误差而代入测量误差，采用架设在收缩段内的经纬仪建立一个距喷管段左侧壁 150 mm 的铅垂面为测量基准，通过经纬仪读取铅垂基准面距检棒上两测点的距离，具体如图 6 所示。经纬仪分辨率较高，测量读数精度小于 0.1 mm。

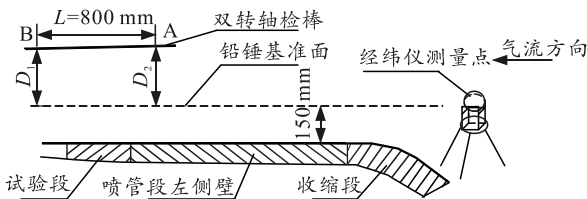


图 6 利用经纬仪测量侧滑角原理

2.3.2 测量点距离 L 精确化处理

根据检棒长度误差分析，选定检棒上两测点距离为 800 mm，利用机床精确刻出 A、B 2 个相距 800 mm 测量点位置线，两测点距离精度为 0.1 mm，以方便测量对准操作。同时将检棒上两点测量处精加工成共面的小平面，避免了圆柱检棒测量时测量工

具对不准的情况。

2.3.3 测量工具姿态矫正

如图 7 所示，为了消除因测量工具姿态不到位造成读数误差，在万能角度尺直角边固定一截标尺，将万能角度尺预先调整至理论侧滑角度数，用万能角度尺另一边紧贴检棒小平面，标尺平面对准检棒上测量点的刻线，以保证测量时标尺面与经纬仪所扫描铅垂基准面相互垂直。

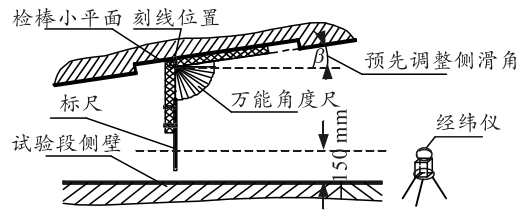


图 7 利用万能角度尺测量原理

2.3.4 重复性误差消除

每一种侧滑角状态下拆装双转轴及检棒 3 次，每一次由不同操作者通过经纬仪测量检棒上 A、B 两点距铅垂基准面的距离，以排除人为安装和读数因素对侧滑角测量结果的影响。利用式(2)计算得到 3 组侧滑角数据，取 3 次测量的平均值作为该侧滑角真值，以确保测量结果的可靠性^[6]。

双转轴的滚转角则通过数字倾斜仪测量检棒上方预制的平台所获得。

2.4 测量的精度估算

按照上述经纬仪测量精度 0.1 mm，检棒上两测点距离为 800 mm、距离精度 0.1 mm。根据式(2)赋值理论侧滑角，其中 D_1 、 D_2 、 L_2 单项定位精度各不相同的增减 0.1 mm，按照计算公式中分子增大、分母减小的原则，可得到图 8 所示理论侧滑角与对应最大测量误差 $\Delta\beta$ 关系曲线。

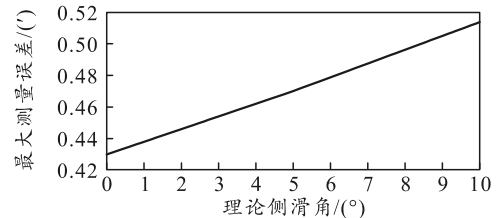


图 8 理论侧滑角与对应最大测量误差 $\Delta\beta$ 关系

由图可得：在 10°理论侧滑角下测量误差最大为 0.512'，且最大测量误差 $\Delta\beta$ 随理论侧滑角的增大而增大，即理论侧滑角越大，测量精度逐渐降低。

侧滑角最大允许偏差量 3'。测量方法优化后侧滑角的最大测量误差(0.512')远小于 3'，满足机构侧滑角测量精度要求。

3 双转轴定位方式改进及效果

3.1 双转轴首次安装检测结果

将双转轴与风洞弯刀装配完成后，利用上述侧滑角优化后的测量方法，检测双转轴机构在偏航角为 0° 和 10° 2 种极限状态下侧滑角的精度。双转轴在 0° 偏航角时检棒有 $47'$ 的滚转角，双转轴在 10° 偏航角时检棒侧滑角超差 $9'$ 。由测量结果可得：机构的侧滑角和滚转角与预期设计指标存在一定误差，同时机构在调试过程中还存在装配困难等问题。

3.2 原卡块定位结果及存在问题分析

3.2.1 卡块和卡块座定位不准

前卡块和前卡块座定位不准，会引起前轴滚转角的变化。后卡块和后卡块座定位不准，则会引起后轴侧滑角及前轴滚转角的变化。双转轴在 0° 侧滑角时存在滚转角，在 10° 偏航角时检棒侧滑角超差，这是由于双转轴的卡块和卡块座零位定位不准引起的，而零位定位误差会影响其他侧滑角的定位精度。

3.2.2 天平线无法从前轴尾端沿前卡块穿出

前轴尾端走线孔为 5 mm (宽) $\times 10\text{ mm}$ (长) 腰形孔，天平线沿前轴内孔穿线至前轴尾端走线孔处，正好被前卡块挡住，天平线无法穿至轴架走线槽内；且前卡块相对轴架固定，在前轴正反向转动时，前轴尾端走线孔也会被前卡块挡住。

3.3 结构改进措施

3.3.1 零位基准的确定

双转轴的零位基准由前卡块座和后卡块座的零位定位销孔来确定，零位基准应在双转轴 0° 侧滑角状态下、在侧滑角及滚转角均满足要求时，根据 0° 卡块的定位销孔来配做对应卡块座的零位基准销孔，卡块座的零位是其他角度卡块定位的基准。以往双转轴的零位基准是在机床平台上找正后配做的，在实际工位下会有固定偏差。为排除固定偏差，FL-32 风洞的 10° 双转轴零位基准的确定工序改在工位下测量确定，以确保后续其他侧滑角角度的准确度^[7]。

在风洞工位下安装调试双转轴，利用经纬仪和万能角度尺测量调整至满足要求；锁紧前轴和后轴左右锁紧套，在地面上配钻前轴和后轴的径向零位销并插入圆锥销定位，最后配做前卡块座和后卡块座的轴向零位基准销孔。

3.3.2 定位卡块结构改进

如图 9 所示，为便于天平线走线，将前卡块厚度由原 10 mm 增至 22 mm ，在两耳中间对称开 10

mm (宽) $\times 10\text{ mm}$ (高) $\times 16\text{ mm}$ (长) 的矩形通槽，中间留有 2 mm 厚加强板。这样既能实现前卡块正反安装时天平线走线的功能，又能保证前轴装配尺寸链和结构强度的要求。在前卡块和后卡块两定位销孔中间增加顶丝，并在卡块正反面做角度及正负标识，以便使用。

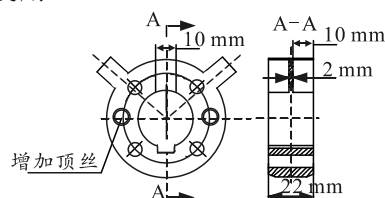


图 9 前卡块结构改进

3.3.3 前轴走线结构改进

根据前卡块角度 T 变化范围可知：侧滑角变化 $\pm 10^\circ$ 时，前轴会正反转 90° 。为此，如图 10 所示，采取将前轴内孔由原 $\phi 10\text{ mm}$ 扩孔至 $\phi 15\text{ mm}$ ，前轴尾端走线孔宽度增至 10 mm ，长度方向扩至 180° ，即把轴径向切掉一半，并将走线孔周边锐边倒圆角，以防止割伤天平线。

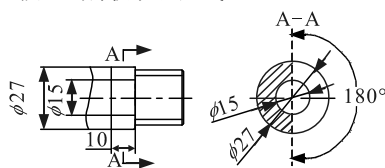


图 10 前轴走线孔结构改进

3.4 结构改进效果及应用

安装调试双转轴，笔者将双转轴各侧滑角测量计算结果汇总如表 1 所示。

表 1 双转轴各侧滑角精度检测统计

理论侧滑角 $\beta/(\circ)$	三次测量计算结果 $\beta/(\circ)$	三次侧滑角平均值 $\beta/(\circ)$	实测滚转角 $\gamma/(\circ)$
0	+2.15'/+2.15'/+2.58'	+2.29'	-1
+1	+1°1.6'/+1°2.6'/+1°2.1'	+1°2.1'	+2
+2	+1°56.5'/+1°58.6'/+1°57.5'	+1°57.5'	+1
+3	+3°1.9'/+3°2.2'/+3°2.1'	+3°2.1'	+2
+4	+4°2.4'/+4°2.1'/+4°2.6'	+4°2.4'	+1
+5	+5°0.5'/+5°2.6'/+5°1.6'	+5°1.6'	-1
+6	+6°1.9'/+6°2.4'/+6°2.9'	+6°2.4'	0
+7	+7°1.3'/+7°2.3'/+7°1.8'	+7°1.8'	-2
+8	+8°2.8'/+8°2.4'/+8°2.8'	+8°2.6'	+1
+9	+8°57.9'/+8°58.9'/+8°58.9'	+8°58.6'	+1
+10	+10°2.4'/+10°2.4'/+10°2.7'	+10°2.5'	+3
-1	-1°1.66'/-58.94'/-1°0.03'	-1°0.21'	-2
-2	-1°57.3'/-1°56.8'/-1°57.3'	-1°57.1'	0
-3	-3°0.2'/-2°59.7'/-2°59.6'	-2°59.6'	+1
-4	-3°59.7'/-3°57.7'/-3°58.7'	-3°58.2'	-1
-5	-4°59.9'/-4°59.9'/-4°58.9'	-4°59.6'	-1
-6	-5°59.7'/-5°58.7'/-5°58.6'	-5°58.5'	+1
-7	-7°2.1'/-7°2.8'/-7°1.5'	-7°2.1'	+3
-8	-8°2.2'/-8°2.8'/-8°2.5'	-8°2.5'	-1
-9	-9°2.5'/-9°1.4'/-9°1.9'	-9°1.9'	-1
-10	-10°2.2'/-10°1.1'/-10°1.7'	-10°1.6'	+2

表 4 常用封装焊接工艺要求的器件间距推荐

封装类型	间距推荐/mm
一般封装	0.25±0.05
尺寸小于等于 0402 的贴片电阻电容电感类	0.15±0.05
尺寸大于 0402 的贴片电阻电容电感类	0.25±0.05
对接焊引脚 (Butt Joints)类	0.8±0.05
BGA 类	3±0.05
贴片铝电解电容和贴片晶体类	0.5±0.05
CGA 和 LGA 类	3±0.05
扁平延伸引脚的 SOT,SOD 类	0.15±0.05

3 结束语

在 PCB 封装设计过程中,只要综合考虑环境条件、产品性能、密度等级、产品可制造性良好等情况,遵循芯片设计手册的规定,并参考 IPC-7351B 标准,就一定能设计出满足产品性能要求的可制造性良好的 PCB 封装。笔者所在单位采用 IPC-7351B

(上接第 33 页)

由表可以看出:

- 1) 双转轴侧滑角和滚转角的定位精度全部满足设计指标要求;
- 2) 侧滑角测量重复性良好,侧滑角真值与 3 次测量结果偏差均 $\leq 1'$,说明采用经纬仪和万能角度尺配合测量方法的误差较小,也说明双转轴多次拆装依然满足精度要求。

在某型号导弹全弹测力试验中,吹风马赫数为 0.3~4.0 Ma,侧滑角为 0°、+5°、+10°,试验车次共计 150 余次,试验数据获得型号单位好评。在试验期间,10°双转轴安装更换侧滑角操作方便,天平线走线顺畅,各卡块定位精准可靠,侧滑角精度满足气动要求,10°双转轴具备型号试验能力。

4 结论

1) 通过对侧滑角测量方法的误差分析及测量方法优化,采用经纬仪和万能角度尺能实现小型量级风洞侧滑角的精确测量,对同类风洞的侧滑角测量具有一定的借鉴意义;

2) 双转轴的零位基准确定应在风洞 0°侧滑角工位状态下进行,基于工位确定零位基准,为双转

(上接第 36 页)

- [2] 刘双双,叶晓慧,王红霞. 嵌入故障诊断策略的 IETM 的研究与实现[J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(9): 1964-1966.
- [3] 蒋俊荣. 基于混合诊断模型的诊断设计优化及其应用技术研究[D]. 石家庄: 军械工程学院, 2010.
- [4] 徐宗昌,黄书峰,孙寒冰. 面向故障诊断的 IETM 故障

标准里的密度等级 A 建立元器件封装库,进一步提高了产品可靠性。实践结果证明:该方法切实可行,提高了产品的可焊性和可靠性。

参考文献:

- [1] 黄智伟. 印制电路板(PCB)设计技术与实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 6-36.
- [2] IPC-7351B. Generic Requirements for Surface Mount Design and Land Pattern Standard[S]. AUGUST 2009.
- [3] 郭瑜,孙志礼,马小英,等. 考虑 PCBA 翘曲失效的回流焊工艺制程分析[J]. 兵器装备工程学报, 2017(1): 158-162.
- [4] 吴均,王辉,周佳永. Cadence 印刷电路板设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014: 71-78.
- [5] 李文庆. Cadence Allegro 16.6 实战必备教程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016: 44-78.

轴研制提供了新的工艺思路,为阶梯侧滑角的准度提供参考依据;

3) 风洞试验结果证明:通过合理改进定位卡块和前轴的结构形式,能降低侧滑角更换的技术难度,提高侧滑角更换效率及保护天平走线;经过局部结构优化,提高了双转轴的可靠性和适用性。

参考文献:

- [1] 饶正周,郁文山,马永一. 2.4 m 跨声速风洞双转轴控制系统[J]. 兵工自动化, 2011, 30(10): 79-80.
 - [2] 甘小明,马东平,丁寿和. 29062 工程双转轴机构外委项目技术任务书[Z]. CARDC-2, 2015.
 - [3] 仵荣祥,谭永根,张宗国. 风洞工程测量标准[S]. 中国人民解放军总装备部, 2000.
 - [4] 霍国,康洪铭,刘晓林,等. L-12 风洞螺旋桨带动力试验系统[J]. 兵工自动化, 2018, 37(6): 23-27.
 - [5] 马东平,唐淋伟,丁寿和. 新区 0.6 m × 0.6 m 暂冲式跨超声速风洞喷管段静调报告[R]. CARDC-2, 2015.
 - [6] 马东平,李勇,丁寿和. 新区 0.6 m × 0.6 m 暂冲式跨超声速风洞四大段定位精调报告[R]. CARDC-2, 2016.
 - [7] 田正波,杨家军,史玉杰. 一种新的风洞试验支撑机构横向弹性角校准方法[J]. 兵器装备工程学报, 2017(8): 32-35.
- 数据模块研究[J]. System Simulation Technology & Application, 2012(14): 844-847.
- [5] 李东霖,杨文潇. 某型计算机无 ARINC429 通讯信号输出故障排除[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(10): 204-206.
 - [5] S1000D-I9005-01000-00. International specification for technical publications using a common source database[S]. Issue No. 4.2, 2016.