

航炮地面热校靶的仿真分析

Simulation Analysis of Aircraft Gun Thermal Calibration in Ground

中航工业沈阳飞机工业(集团)有限公司 蔡恒鑫 宋鹏详 林 成

[摘要] 由于航炮系统结构的复杂性,在热校靶靶试精度调整过程中面临地面热校靶靶试精度低问题,需要依靠进行反复的实弹射击,而这一过程通常要花费很大代价(消耗弹药、降低航炮的使用寿命等),利用仿真技术建立航炮仿真模型,并将其置于虚拟试验的环境中进行测试^[1],找出热校靶弹着点的分布规律,应用到地面热校靶,有利于实现航炮的靶试精度、提高生产效率、降低成本和缩短靶试周期。本文采用 CATIA V5 平台建立航炮系统仿真,通过仿真模型的研究^[2],提高热校靶靶试精度。

关键词: 仿真技术 热校靶 靶试精度

[ABSTRACT] Because of the complexity of aircraft gun system and the low accuracy of target test, repeated firing practices are needed in actual situation which spend large cost(consume ammunition, decrease the using life of aircraft gun and so on). By using the virtual prototype technology to establish the simulation of aircraft gun and test it in virtual experiment environment, finding the distribution law of thermal calibration impact point, applying in ground thermal calibration, this is beneficial to improve the accuracy of aircraft gun target test, raise the efficiency of production, decrease the cost and shorten cycle of target test. CATIA V5 is used to establish a simulation of aircraft gun system and improve the accuracy of thermal calibration test by studying this simulation model at last.

Keywords: Simulation technology Thermal calibration Target test accuracy

1 航炮热校靶仿真模型建立的需求

地面热校靶,即以机身水平、垂直线为基准,采用平行缩距校靶原理,根据航炮在飞机上的安装位置及校靶图,用经纬仪测量飞机姿态,用校靶镜观察航炮冷校点,用航炮固定座调整扳手调整航炮安装状态达到校正目的,再通过实弹射击确定炮管轴线应指的方向,找出平均命中点(散布中心即校靶精度),需要不断地实弹射击来确定航炮的校靶精度。

某型飞机依据设计文件要求采用 10 发炮弹连射的

方法确定平均弹着点,其误差计算平均命中点不大。如果以概率偏差的倍数 R 表示,射弹发数 N 与 R 成指数关系,如图 1 所示。 $N=10$ 发炮弹以后,曲线变化不大,即再增加炮弹发数,不会对精度起多大作用。但实际地面热校靶存在平均弹着点极难满足校靶技术条件要求的问题,按技术文件反复调整航炮轴线直到合格为止,这样将会消耗大量炮弹、弹链,造成生产成本成倍增长,调试时间延长,同时减少航炮的使用寿命,成为重点工程亟需解决的关键难题。

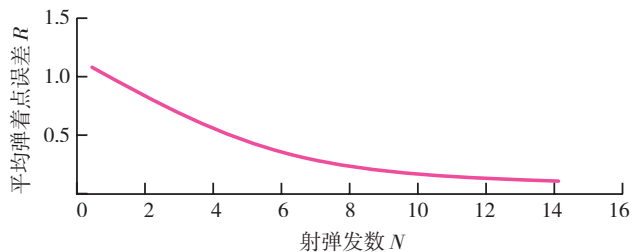


图1 平均弹着点误差与射弹发数的关系
Fig.1 Relationship between mean absolute error and number of projectiles

利用仿真技术建立航炮仿真模型,将其置于虚拟试验的环境中进行测试对靶试精度进行评价^[3],并对所取得的试验数据进行整理分析找到地面靶散布中心的分布规律,将有利于实现航炮的靶试精度、提高生产效率、降低成本和缩短靶试周期。

2 评价航炮热校靶靶试精度因素^[4]

评价航炮热校靶靶试精度的重要因素有分布密度、分布曲面和散布椭圆、正态分布参数,将上述三参数引入到仿真模型中对航炮热校靶靶试精度进行评价。

2.1 分布密度

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{(x-a_x)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y-a_y)^2}{\sigma_y^2}\right]}, \quad (1)$$

式中, a_x 、 a_y 分别为 x 、 y 方向的平均值(中心); σ_x 、 σ_y 分别为 x 、 y 方向的均方差(散布)。

为简化运算,采用解析几何中旋转坐标的方法,替

代坐标轴。则相关的分布密度表达式可化成二维正态随机变量分布密度的形式,即:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right]} \quad (2)$$

2.2 分布曲面和散布椭圆(散布圆)

根据分布密度可求得其散布曲面,如图2所示。

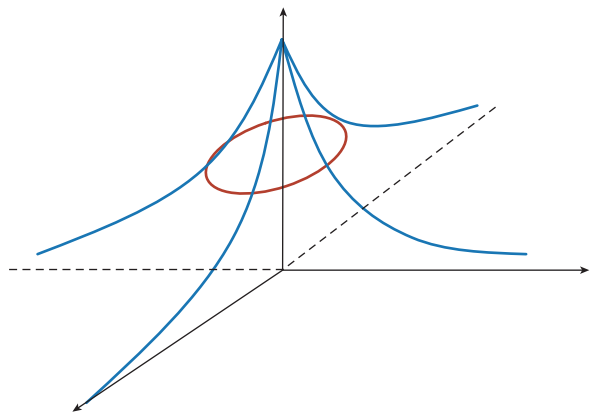


图2 正态分布曲面
Fig.2 Normal distribution curve

用平行 xoy 平面去截散布曲面,其交线为一椭圆,椭圆上各点的概率分布都是相等的。在 xoy 平面上的椭圆叫单位散布椭圆。

长短轴为主概率偏差 E_x, E_y 的椭圆为:

$$\frac{x^2}{(E_x)^2} + \frac{y^2}{(E_y)^2} = 1 \quad (3)$$

如果长短轴为 $2E_x, 2E_y$, 则单位椭圆为:

$$\frac{x^2}{(2E_x)^2} + \frac{y^2}{(2E_y)^2} = 1 \quad (4)$$

同理也可为:

$$\frac{x^2}{(3E_x)^2} + \frac{y^2}{(3E_y)^2} = 1 \quad (5)$$

当长短轴为 $4E_x, 4E_y$ 时,椭圆为全散布椭圆,方程为:

$$\frac{x^2}{(4E_x)^2} + \frac{y^2}{(4E_y)^2} = 1 \quad (6)$$

长短轴不同,椭圆的面积不同, X, Y 在 xoy 平面内的单位椭圆中的取值概率就不同。如:

$$P[(x, y) \in \Omega_1] = 0.203,$$

$$P[(x, y) \in \Omega_2] = 0.974.$$

而在 Ω_2, Ω_3 情况下, $P[(x, y) \in \Omega_2]$ 和 $P[(x, y) \in \Omega_3]$ 都在 0.203~0.974 之间。如果也仿造半数命中界的含义,求一下半数命中圆的的话,需令:

$$E_x = E_y = E_R \quad (7)$$

则曲线方程变为圆方程:

$$x^2 + y^2 = E_R^2 \quad (8)$$

其概率为:

$$P[(x, y) \in \Omega] = 1/2.$$

可见,如果在平面正态分布情况下, E_x, E_y 表示的散布椭圆,并非半数命中圆,随机变量出现在该域内的概率值为 0.203。如果有 1/2 的概率,必须扩大圆面积。

2.3 用数理统计法求正态分布的参数

正态的分布,关键是确定其参数:散布中心 α_x, α_y ; 均方差 σ_x, σ_y 或 E_x, E_y 。这些参数是经过大量实弹射击后经数理统计确定的。射弹散布经大量实践,符合正态分布规律。

2.3.1 数学期望(平均值、散布中心)的估计

用 n 次试验结果的算术平均值为:

$$m^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (9)$$

m^* 是试验后的统计值,它与理论值 m 在试验次数 $n \rightarrow \infty$ 时是一致的。据此可得平面正态分布的散布中心估计公式:

$$\alpha_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (10)$$

$$\alpha_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (11)$$

2.3.2 主概率偏差 E_x, E_y 的估计(x, y 独立时)

用下式求统计散度:

$$D_x^* = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m^*)^2 \quad (12)$$

统计均方差为:

$$\sigma_x = \sqrt{D_x^*} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m^*)^2}{n-1}} \quad (13)$$

据此可得平面正态分布的概率偏差的统计值:

$$E_x = 0.675 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m_x^*)^2}{n-1}} \quad (14)$$

$$E_y = 0.675 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - m_y^*)^2}{n-1}} \quad (15)$$

3 航炮热校靶仿真物理模型^[5]

航炮轴线与机身水平基准线平行,由前支点、前固定座、后固定座共 3 个支点对航炮进行固定。3 个支点的装配精度也是影响热校靶精度重要因素^[6]。

3.1 前支点

用于减小炮管振动,保证必要的射击密集度,前支点在航炮进行垂直调整时,特形螺栓头部在竖槽内移动,而螺栓本身则穿过底座的椭圆孔使半卡箍支架连同炮管一起作垂直方向的移动;航炮进行水平调整时,通过半卡箍支架的椭圆孔使支架与炮管一起作水平方向的移动。

3.2 前固定座

由固定座和上半卡箍组成球形槽,与航炮的球形支点相配合,可以在水平面和垂直面内调整航炮的位置。

3.3 后固定座

用于承受航炮的重量以及校靶瞄准时用于调整航炮。航炮底部的两导向凸部是插入航炮固定架的导向槽内,防止航炮在射击时向侧方、上下方移动,限制航炮只能沿纵向(前后)移动。支架的耳片在垂直调整轴的螺纹段,轴的两端被支架固定。

因此,当转动垂直调整轴时,支架移动,从而进行航炮的垂直调整。安装在支架上的水平调整轴有螺纹段,在螺纹段上有保险螺帽和调整螺帽。当转动调整螺帽时,水平调整轴在支架内移动,航炮固定座随同水平调整轴一起移动,从而进行航炮的水平调整。在支架及对应零件上有齿纹,在航炮调整后,必须检查齿纹板的齿纹重合。

3.4 航炮

机载航炮作为射击武器视为一整体,在地面热校靶时不需要对其进行调整,在热校靶后仅需分解、清洗、组合即可。

4 航炮热校靶仿真模型的建立研究

航炮实弹校靶需要通过实弹射击校正航炮武器和瞄准点系统的安装位置,以及消除系统误差,使其满足航炮设计所要求热校靶靶试分布密度、分布曲面和散布椭圆、正态分布参数。建立航炮热校靶仿真模型的目的在于通过模拟热校靶靶试的弹着点找到冷校点分布规律,提高地面热校靶的靶试精度。

4.1 冷校点的设置对热校靶的影响^[7]

理论冷校点 A_2 从理论上讲航炮瞄准此点,应命中理论平均弹着点 A ,但往往由于航炮前后固定座的制造组合安装误差,造成瞄准理论弹着点后却打在图 3 的 A_1 点位置。要调整瞄准点,找出一个可以满足技术条件要求,打在理论平均弹着点上的实际的瞄准点(即实际冷校点)。

实际冷校点的设置,依据技术条件进行热校靶,技术条件并没给出实际冷校点,而热校靶总得有一个第一组实弹瞄准点。按规定第一组实弹瞄准点即为理论冷

校点。而此组弹着点没有打在理论平均弹着点上,却打偏了,这样必须再打 10 发炮弹找下一个冷校点,如果还不符合技术要求,就要继续再打 10 发炮弹,直到打合格为止。

在实际热校靶中调整航炮使校靶镜对准理论冷校点后,10 发炮弹的实际平均弹着点没打在理论平均弹着点上,即实际平均弹着点的计算值不在以理论平均弹着点为圆心、直径为 200mm(参考数据)的周围内,此现象称为偏靶,如图 3 所示。

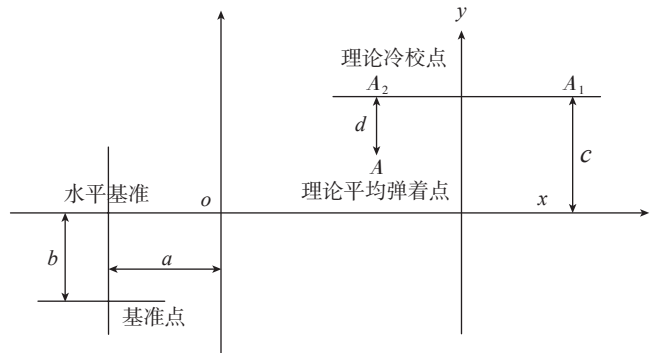


图3 航炮地面热校靶图(参考)

Fig.3 Diagram of aircraft gun ground thermal calibration (reference)

要重新调整炮身的安装角度,对准第一次实际平均弹着点 A 的相反方向上的某点(称此点为实际冷校点),再打 10 发炮弹,计算实际平均弹着点位置是否打在理论平均弹着点上。如此反复试验调整,每架飞机都要至少打数次以上,才能最后找到一个合适的实际冷校点,使校靶镜对准这个实际冷校点后打 10 发炮弹其实际平均弹着点刚好打在理论平均弹着点的范围内。

4.2 航炮热校靶在仿真模型上的调整

打开前支点,打开前支点的上半卡箍,拧松前固定座,把压紧螺母拧松 1.5~2 圈,拧下后固定座的保险螺母,垂直调整时,拧下保险螺母,并松开轴,调节轴,将航炮调到必要位置,为使齿板重合,需用手把住航炮,使锯齿形槽相重合,此时刻有齿槽的垫片绕轴不能有转动;水平调整时,旋转后固定座上的调节套,拧上后固定座的保险螺母后拧上前固定座的保险螺母,盖上前支点的上半卡箍,此时在炮身和前支点卡环之间,应当有均匀的环形间隙(炮身和卡环不应有接触)。

4.3 将影响热校靶因素引入仿真模型^[8]

航炮后固定座沿水平和垂直方向的调整校靶余量,如图 4 所示,前支点不小于 3.5mm,保证后固定座水平向左的调整校靶余量 C 应不小于 14mm,水平向右的调整校靶余量 D 应不小于 11mm,垂直向上的调整(校靶)

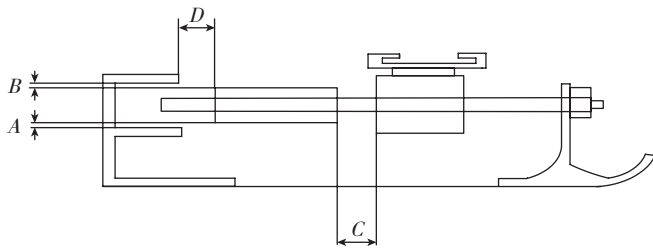


图4 后固定座的调整余量示意图

Fig.4 Diagram of back fixed seat margin for adjustment

余量 B 应不小于 7mm, 垂直向下的调整校靶余量 A 应不小于 7mm。在进行飞机航炮最终冷校靶之前(热校靶前), 后固定座沿水平和垂直方向调整余量不小于 4mm, 前支点沿水平和垂直方向调整余量不小于 5.5mm。(以上数据仅为参考)。

5 仿真对热校靶靶试的意义

通过仿真模拟热校靶射击单元的散布规律, 计算出 10 发炮弹平均弹着点偏差量, 在坐标系对应象限假设存在一个实际冷校点。通过仿真模型了解航炮调整及其实弹散布面机理, 运用数学解析法找出了一个可以满足要求的实际冷校点, 即适合地面热校靶时瞄准点在第三象限。

通过多架飞机航炮地面热校靶验证了航炮仿真理论方法的正确性, 在地面热校靶时将瞄准点在第三象限顺利地完靶试, 既满足了航炮热校靶靶试精度, 提高了航炮地面实弹校靶合格率, 又减少了弹药的消耗、延长了航炮的使用寿命, 最终达到了提高生产效率、降低成本和缩短靶试周期的目的。

参考文献

- [1] 许国晖, 杨宇航, 等. 基于虚拟样机技术的火炮维修仿真系统研究. 计算机仿真, 2002(3): 33-35.
- [2] 赵经成. 航空虚拟装备仿真平台的设计与研发 // 第三次全军院校实验室建设与发展学术研讨会论文集. 北京: 国防工业出版社, 2004: 121-124.
- [3] 毕红哲, 庄达民. 航空人机工程计算机仿真. 电子工业, 2010(2): 25-27.
- [4] 刘进成, 冯金富, 齐晓林. F III-301 航炮发射控制原理研究. 中国测试技术, 2002(2): 20-22.
- [5] 姚英学, 蔡颖. 计算机辅助设计与制造. 北京: 高等教育出版社, 2002: 12-15.
- [6] 刘应忠. 航空自动武器导论. 长春: 吉林科学技术出版社, 2002: 68.
- [7] 允来锋. 自行火炮发射动力学研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2002.
- [8] 徐庚保, 曾莲芝. 数字仿真. 计算机仿真, 2009(9): 3-4.

(责编 夏宛)

(上接第 86 页)

7 实样保存

为便于飞机上导管零件的互换, 标准实样需要妥善保管, 作为每批生产时的依据和验收标准, 以便给飞机提供备件。有的导管还要保存弯管的夹具和检验夹具, 需要庞大的仓库或贮存间。而数控弯管制造技术则不需要保留导管实样。

8 结论

数字化导管加工在前期设计中耗费的时间较长, 而对飞机设计制造全过程而言, 取消了装配鉴定实样的过程, 大幅缩短了生产周期, 加快飞机研制进度, 更保证了产品质量。

常规导管加工比较适合单机专机专配生产, 在精度要求不高的情况下适合装机。

尽管数控弯管机只有在导管弯曲参数标准化的前提下, 才能得到充分利用, 但却能更好地节约资源, 减少模具制造量和降低生产成本, 加快飞机制造步伐, 这对现代飞机及其发动机不断改型和更新, 以及多机种同时生产的实际情况确实带来了极大的好处, 可以更多地应用此技术。

(责编 夏宛)

(上接第 38 页)

寿命分别为 128931 和 278294, 应力提高疲劳寿命 115%。因此, 疲劳试验说明应力波安装方法可以明显提高接头疲劳寿命。

5 结论

工艺试验表明, 目前生产中采用冷缩安装和强迫安装难以完成大直径、高干涉螺栓的安装。提出的应力波安装方法可以安装大直径、高干涉螺栓。安装结果表明应力波安装方法不仅可以解决大直径、高干涉螺栓安装难题, 并且安装质量好, 能较大幅度提高接头疲劳寿命。

参考文献

- [1] Duprat D, Campassens D, Balzano M, Boudet R. Fatigue life prediction of interference fit fastener and cold worked holes. Int. J. Fatigue 1996(18): 515-521.
- [2] 高彬, 曹增强. 干涉配合紧固件的安装. 航空制造技术, 2003(11): 25-26.
- [3] 徐进永. 对大过盈量连接用液氮冷装. 机械工艺师, 1995(1): 54-55.
- [4] Cao Zengqiang, Qin Qinghua. A study on driving interference-fit fastener using stress wave. Materials Science Forum, 532-533.

(责编 可岚)