

机载光电转塔气动外形优化设计方法

孙蓓¹, 蔡猛¹, 赵克军¹, 刘健¹, 于长虹²

(1. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000;

2. 洛阳师范学院网络与电化教育中心, 河南 洛阳 471022)

摘要: 机载光电转塔的气动外形, 对载机气动特性以及转塔自身的转动精度、系统量测结果都有重要的影响。结合工程实践, 提出一种机载光电转塔气动外形优化设计方法。基于转塔外形设计和气动特性分析, 初步给出多种候选外形方案, 然后结合理论分析和 CFD 仿真, 最终得到最优的转塔气动外形。以某型直升机机载光电转塔为例, 对所提方法在实际工程中的应用过程进行了说明。

关键词: 机载光电转塔; 气动外形; 气动特性分析

中图分类号: V271.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)08-0105-05

Optimal Design of Aerodynamic Shape for Electric-Optic Turret

SUN Bei¹, CAI Meng¹, ZHAO Ke-jun¹, LIU Jian¹, YU Chang-hong²

(1. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China;

2. Network and Educational Technology Center, Luoyang Normal University, Luoyang 471022, China)

Abstract: The aerodynamic shape for airborne Electric-Optic (EO) turret has great impact on the aerodynamic characteristics of the plane, the precision of rotation of turret itself and the measurement results of the system performance. An optimal scheme for aerodynamic shape design is presented from the viewpoint of engineering practice. Based on the analysis to aerodynamic shape and aerodynamic characteristics, we proposed several possible aerodynamic shapes, among which an optimal design of turret was obtained through theoretical analysis and CFD simulation experiments. In addition, the application of the proposed method in practice was demonstrated by taking a certain type of helicopter airborne EO turret as an example.

Key words: airborne EO turret; aerodynamic shape; aerodynamic analysis

0 引言

机载光电转塔是载机实现对地扫描侦察、武装攻击决策、实时地情信息采集等功能的核心组成部分, 为整机态势感知系统的安装和稳定运行提供基础平台。由于光电转塔安装在载机的前端或下部, 在其 360° 旋转时, 需要克服外界气流产生的阻力矩, 这种气动力矩 (也叫铰链力矩) 的大小在某种程度上决定了光电转塔的可转动性能和系统量测结果。同时转塔也会给飞机带来气动阻力, 影响载机的飞行能力。为获得良好的气动特性, 亟需对光电转塔气动外形优化设计这个重要科学问题开展研究。

气动外形设计在运载火箭、军民机翼身、高速列车、导弹等军民应用领域有着较好的研究基础。文献 [1] 利用 Kriging 函数建立了运载火箭整流罩气动参数的近似计算模型和估计流程, 可在外形设计时取得较好的优化收敛速度; 文献 [2] 基于 N-S 方程的 CFD 技术, 利用 B 样条参数化方法和响应面遗传算法对民机翼身整流罩进行了气动外形优化设计; 文献 [3] 运用 NSGA-II 多目标遗传算法建立了一种可参数化驱动的高速列车头型气动性能自动计算分析流程; 文献 [4] 通过对运用了滑翔增程技术制导航弹弹翼的设计、翼型的选择和前整流罩的设计, 给出了远程卫星制导炸弹的气动布局新方案, 有效提高了航弹射程; 文献 [5] 分析了无伞末敏弹弹体和尾翼的基本气动外形和气动特性, 研究了复杂外形弹箭流场网格的生成方法, 改进了末敏弹气动外形。然而, 尚未见有关机载光电转塔

收稿日期: 2014-10-31

修回日期: 2014-12-29

作者简介: 孙蓓 (1983—), 女, 河南洛阳人, 硕士, 工程师, 研究方向为光机结构仿真、振动与测试。

气动外形设计的公开资料。

本文针对机载光电转塔,基于转塔气动外形设计技术、气动特性理论分析和数值计算技术,提出了一种气动外形优化设计方法。基于内部载荷初始排布和转塔气动外形设计原则,给出多个可选的气动外形方案,基于工程经验公式,快速估算各个方案 360°周向的气动力矩和阻力分布,并以表面积、最大阻力和最大力矩作为评价指标,选出综合最优的气动方案,最后利用高精度的 CFD 计算方法,给出最终方案较准确的气动阻力和气动力矩。本文以某直升机机载光电转塔为例,应用上述方法,给出了优化后的气动外形。

1 气动外形设计

光电转塔(见图 1)外形设计与飞机翼身、弹体、动车组等的气动外形设计要求不同,除需满足气动阻力小之外,还必须满足气动力矩小的要求。并且由于转塔在转动过程中,迎风面不断发生改变,因此需要在 360°周向上考虑其气动特性。此外,作为机载产品,光电转塔在尺寸、体积、重量和表面积等方面也是越小越好。

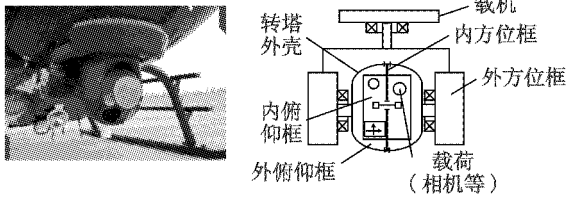


图 1 光电转塔

Fig. 1 Electric-optic turret

参考《飞机设计手册》及相关工程经验,光电转塔在外形设计中应该考虑的主要原则有:1)尽可能沿旋转轴对称;2)表面光滑;3)尽量减小迎风面^[6]。

1.1 沿旋转轴对称

良好的对称性外形可以保证光电转塔的气动阻力中心位于旋转轴上,是减小轴系气动力矩的重要手段。

在气动外形设计过程,受限于产品结构和功能要求,做到转塔外形严格沿旋转轴对称是非常困难的,例如同时具备红外、电视和激光 3 种传感器光窗的转塔,因此外形设计与内部结构设计往往需要经过多次迭代过程,才能得到双方都较满足的结果。在工程中,具有良好旋转轴对称特性的转塔外形包括球形和圆柱形等。

1.2 表面光滑

光滑的产品外形不仅美观,还具有良好的空气动力学性能,可以在一定程度上减小转塔的空气阻力。气动外形设计过程中,在满足结构功能设计要求的前提下,主要考虑减少转塔表面的尖角、凹陷等,对必须保留的尖角等应进行平滑处理,尽量做到表面曲率连续。

1.3 迎风面设计

转塔的气动阻力与迎风面积直接相关,在计算迎风面积时,除考虑转塔前视横截面积外,安装形式及转塔在载机上的位置,对其阻力也有十分明显的影响。

考虑上述因素,对于转塔迎风面积的理论估算表达式为

$$A = C_D \cdot S \cdot q_1 \cdot q_2 \quad (1)$$

式中: A 为迎风面积, C_D 为安装阻力系数; S 为转塔前视面积; q_1 为弦向安装修正系数; q_2 为展向安装修正系数。

转塔的安装阻力系数 C_D ,可以根据转塔直径,通过图 2 中的曲线得到(对于非圆形转塔,直径 D 可用当量直径代替);转塔前视面积 S 可以通过几何体正投影计算得到;当弦向方向安装多个转塔时,得到的总阻力要比每个转塔单独安装的阻力之和小,因此弦向安装修正系数 q_1 可以依次取值为:1.0,0.6,0.5;转塔展向安装在机身中心线附近时, q_2 取 0.85;转塔安装在机翼下, q_2 取 1.0。

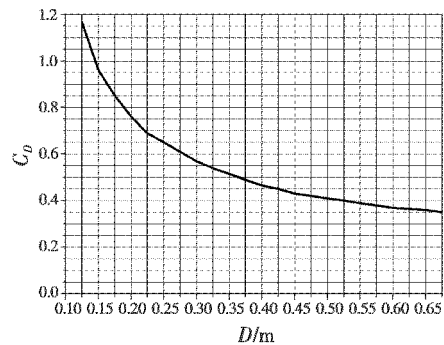


图 2 转塔安装阻力系数 C_D 值

Fig. 2 Installation drag coefficient (C_D) of the turret

通常情况下,气动外形的 3 个设计原则并不是一致的,例如受限于内部载荷的分布和运动空间,光电转塔的最小包络外形通常不是对称的。为满足对称性要求,往往需要增大转塔塔身的体积,从而带来迎风面积和气动阻力的增加。在实际设计过程中,优先考虑不同的设计因素,可以得到多种不同的外形设计方案。

2 气动特性分析

对于多个可选的光电转塔气动外形设计方案,一般以体积、重量、最大阻力和最大力矩作为评价指标,选出综合最优的气动外形方案。

对机载光电转塔气动阻力和气动力矩进行计算有多种途径,其中基于工程经验公式的理论估算方法,虽然结果精度稍差,但是计算成本低、速度快、容易实现,能够得到气动特性的大致估计值,特别适用于进行多方案横向比较时所进行的反复迭代计算。同时为了实

现分析评估过程的自动化,基于 ModelCenter 集成优化软件,对相关计算工具进行了集成,在实际应用中,大大提高了方案评估的速度。

2.1 气动阻力估算方法

在亚音速范围内,气动阻力与载机的飞行速度和迎风面积正相关,对于机载光电转塔的气动阻力理论估算的算式为

$$F = k_1 \cdot \frac{\rho \cdot V^2 \cdot A}{2} \quad (2)$$

式中: F 为气动阻力; ρ 为大气密度; V 为飞行速度; A 为最大迎风面积; k_1 为压力修正系数。

一般情况下,大气密度 ρ 可按照标准大气压力表的给定值选取;压力修正系数 k_1 的取值范围为 $0 \leq k_1 \leq 1$ 。考虑具体应用环境,迎风面为平面时, $k_1 = 1$;迎风面为球面、柱面或锥面时, k_1 取 $0.5 \sim 0.6$;迎风面为其他类型时, k_1 取 $0.7 \sim 0.8$ 。

2.2 气动力矩估算方法

由于光电转塔外形的复杂性,精确计算气动阻力的作用中心非常困难。工程中,通常将最大迎风面的形心作为气动阻力的作用中心,将其简化为图3所示的形式,然后再依次估算:1)将转塔的迎风面以旋转轴线为中心,左右分为两部分;2)分别计算这两个部分对旋转轴线的力矩;3)计算上述两个力矩之差,该值即为转塔的气动力矩

$$M = k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2} \cdot (A_2 L_2 - A_1 L_1) \quad (3)$$

式中: M 为气动力矩; A_1, A_2 为以转动轴线为界,转塔左、右两侧的面积; L_1 为侧面积 A_1 的形心 P 与转动轴线的距离; L_2 为侧面积 A_2 的形心 Q 与转动轴线的距离; k_2 为对称修正系数。

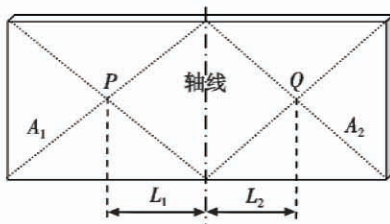


图3 气动力矩的计算

Fig.3 Sketch map for aerodynamic moment calculation

一般情况下,当转塔的迎风面为球面、柱面或锥面旋转对称时,修正系数 $k_2 = 1$;当转塔的迎风面为球面和柱面的组合形体时,修正系数 k_2 范围为 $2 \sim 3$;当转塔的迎风面为其他非对称形状时, k_2 范围为 $4 \sim 5$ 。

尽管理论公式计算结果的末位并不一定十分精确,但它所获得的机载光电转塔气动阻力和气动力矩量级与转塔几何特征和安装位置之间的数据关系,在工程实践中较为实用。

2.3 计算工具集成

对外形方案进行气动特性计算过程中,涉及三维建模、模型格式转换、迎风面积计算、气动阻力、力矩计算及结果可视化等不同的商业软件和计算代码,利用 ModelCenter 集成优化软件将上述软件工具整合成单个计算模型,实现接口数据的自动传递及计算流程的固定,可以极大地提高评估的速度,同时避免人为操作失误。

对光电转塔进行气动阻力和力矩分析的 ModelCenter 模型如图4所示。

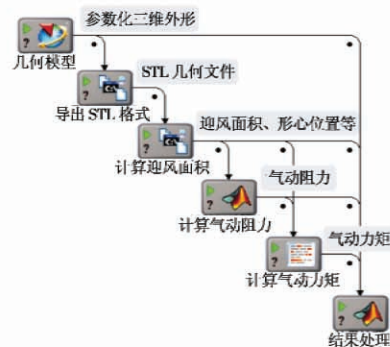


图4 ModelCenter 分析模型

Fig.4 Analysis model based on ModelCenter

3 基于 CFD 的方案验算

基于 CFD 软件的数值仿真计算方法,可以较真实地模拟转塔周围的空气流动,从而得到精度较高的气动参数计算值,但是 CFD 方法往往由于网格数量巨大,需要付出较高的人力和计算成本。因此在本方法中,仅对选定的最终气动外形方案进行数值仿真计算,以得到准确的气动阻力和气动力矩数据。

运用 CFXDesign10.0 软件对不同转塔外形在一定飞行速度条件下进行流场计算,采用非结构四面体网格对流场空间进行填充。在考虑到计算资源的限制以及保证计算精度的同时,一般可以选取 $10L \times 7L \times 7L$ (L 为转塔高度)的长方体为计算域。

光电转塔随载机飞行时,空气会沿着转塔流过,由于转塔表面并不是绝对光滑,在紧贴转塔表面的地方就会出现流速沿转塔法线方向逐渐增大的薄层空气,即附面层^[7]。为了真实模拟转塔飞行状态,计算网格由3部分组成:1)转塔的网格;2)转塔外附面层的网格;3)整个流场的网格。为了提高网格生成质量,在机身外形变化剧烈的地方采用了网格加密处理技术。

4 外形设计实例

现以某直升机机载光电转塔外形的气动优化设计为例,对本文所述的优化设计方法进行验证。

4.1 气动外形方案

该光电转塔采用两轴 4 框架的内、外万向架结构形式,安装于某直升机机头前下方。在转塔内部,有效载荷包括红外镜头、红外成像部件、红外电子部件、电视镜头、电视成像部件、电视电子部件等,通过稳定陀螺补偿载机运动、晃动、颠簸对转塔视轴的扰动及造成的图像模糊和变形,如图 5 所示。

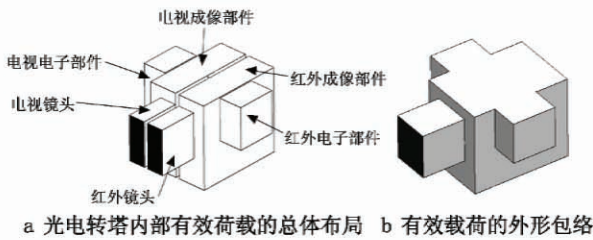


图 5 某光电转塔荷载及初始外形

Fig.5 Pay load and origin design of the turret

基于前述转塔外形包络,根据转塔气动外形设计原则,分别以最小表面积、球体、圆柱球体和混合折中作为主要设计因素,所得可选外形方案及表面压力分布如图 6 所示。

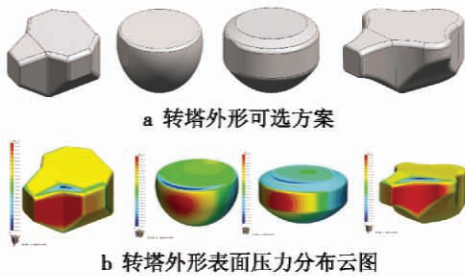


图 6 转塔外形可选方案与表面压力分布云图

Fig.6 Alternatives of turret shape and distribution of their surface pressure

4.2 外形方案评估

对图 6a 中 4 种转塔外形可选方案(从左至右分别为方案 A,B,C,D),选择合适的压力修正系数、对称修正系数,分别计算其 180° 周向(根据对称性,可以直接得到其余 180° 结果)的气动阻力和气动力矩分布,计算结果如图 7 所示。最大气动阻力、气动力矩、表面积以及体积数据如表 1 所示。

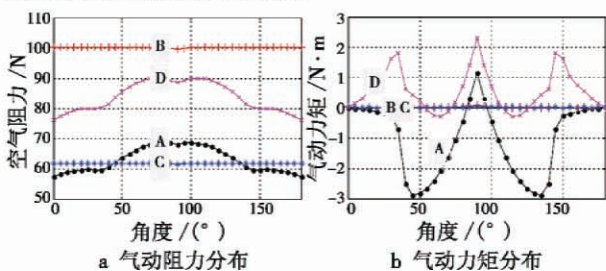


图 7 气动阻力和气动力矩分布

Fig.7 Distribution of aerodynamic drag and torque

表 1 理论估算结果

Table 1 The theoretical assessment results

方案	k_1	k_2	气动阻力/N	气动力矩/N·m	表面积/m ²	体积/m ³
A	0.8	4	68.59	2.89	0.249	0.009 1
B	0.4	1	100.17	0.09	0.475	0.026 7
C	0.5	1	61.78	0.05	0.392	0.018 8
D	0.7	4	89.97	2.30	0.280	0.010 6

光电转塔设计要求气动力矩不大于 3 N·m,根据计算结果,4 个方案均满足要求。

参考表 1,按照对称性最优原则设计的方案 B 和 C 的气动力矩远小于其他方案,但是其表面积和体积较大,这反映出转塔的体积和重量较大。按照最小外形设计的方案 A 和 D 的表面积和体积远小于其他方案,但是由于对称性较差,因此气动力矩较大。

考虑到气动力矩对转塔精度有重要影响,以及方案 C 的气动阻力、表面积和体积都较优,因此选择方案 C 作为最终的转塔气动外形方案。

4.3 CFD 计算结果

在选定方案 C 为最终外形方案的情况下,只需对其 CFD 仿真计算即可。本文为评价理论估算方法的精度,仍对 4 种方案都进行了仿真计算。不同转塔外形在 200 km/h 飞行速度条件下的气动特性数据如表 2 所示。

表 2 仿真计算结果

Table 2 The simulation results

方案	气动阻力/N	气动力矩/N·m
A	64.94	3.05
B	92.03	0.07
C	46.76	0.03
D	84.53	2.55

对比表 1 和表 2,可以看到理论估算方法与高精度的 CFD 计算结果相比,仍具有一定的误差,但是在反映气动特性趋势上与 CFD 方法是一致的,因此基于理论估算方案仍可以得到正确的方案横向比较结果。

对于方案 C,其气动阻力为 46.76 N,相对于旋转轴的气动力矩为 0.03 N·m,满足设计要求,在 4 个方案中具备最优的气动特性,同时也具有较好的体积和重量。

5 结束语

本文针对光电转塔的外形,基于转塔气动外形设计和气动特性分析,通过理论分析和仿真相结合的方法,得到了一种机载光电转塔气动外形优化设计新方法。在气动外形设计前期,采用转塔气动特性分析的理论计算公式,可以有效估计转塔的气动阻力和气动力矩,方法简单易用,误差合理,为光电转塔气动外形

的设计提供了一种新思路。

参考文献

- [1] 杨希祥,周张,彭科. 基于 Kriging 方法的整流罩气动外形设计优化[J]. 固体火箭技术,2014,37(2):167-171. (YANG X X, ZHOU Z, PENG K. Aerodynamic shape design optimization of fairing based on Kriging method[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2014, 37(2): 167-171.)
- [2] 吕培培. 基于 CFD 的民机翼身整流罩气动外形优化方法研究[D]. 上海:上海交通大学,2011. (LYU P P. CFD-based aerodynamic shape optimization method investigation on a civil aircraft wing-body fairing[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.)
- [3] 李明,李明高,李国清,等. 参数化驱动的高速列车头型气动外形优化设计[J]. 铁道学报,2013,35(11):14-20. (LI M, LI M G, LI G Q, et al. Optimized design of parameteric-driven aerodynamic shape of high-speed EMU head-type[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(11): 14-20.)
- [4] 雷娟棉,吴甲生. 滑翔增程制导航弹气动外形设计[J]. 北京理工大学学报,2012,31(12):1387-1390. (LEI J M, WU J S. Aerodynamic configuration design of gliding extended range guided bomb[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2012, 31(12): 1387-1390.)
- [5] 周志超. 无伞末敏弹气动外形设计与气动特性分析[D]. 南京:南京理工大学,2011. (ZHOU Z C. The aerodynamic shape design and aerodynamic characteristics analysis of non-parachute terminal sensing ammunition[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2011.)
- [6] 张锡金. 飞机设计手册(第6册:气动设计)[M]. 北京:航空工业出版社,2002. (ZHANG X J. Handbook of aircraft design (Sixth copies: aerodynamic design) [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2002.)
- [7] 刘珍. 高速列车风挡气动特性及气动疲劳强度研究[D]. 长沙:中南大学,2012. (LIU Z. Research on wind-shield aerodynamic characteristics and pneumatic fatigue strength of high speed train[D]. Changsha: Central South University, 2012.)
- (上接第96页)
- Administration of China. The simultaneous instrument operation management regulations on parallel runways[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2004.)
- [2] 顾正兵. 虹桥机场近距离平行跑道仪表运行方式研究[J]. 中国民航大学学报,2010,28(5):21-24. (GU Z B. The research of Hongqiao Airport closely spaced parallel runways instrument operation manner[J]. Journal of China Civil Aviation University, 2010, 28(5): 21-24.)
- [3] 孙佳,田勇. 近距离平行跑道配对进近中的碰撞风险分析[J]. 哈尔滨商业大学学报,2014,30(2):241-244. (SUN J, TIAN Y. Collision risk analysis in closely spaced paired approach on parallel runways[J]. Journal of Harbin University of Commerce, 2014, 30(2): 241-244.)
- [4] CARPENTER B D. A probability-based alerting logic for aircraft on parallel approach[D]. Maryland: University of Maryland at College Park, 1996.
- [5] 邵伟. 蒙特卡洛方法及在一些统计模型中的应用[D]. 济南:山东大学,2012. (SHAO W. The Monte-Carlo method and the application in some statistical model[D]. Ji'nan: Shandong University, 2012.)
- [6] KUCHAR J K. Methodology for alerting-system performance evaluation[J]. AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1996, 19(2): 438-444.
- [7] 李亚浩,赵刚,王传喜. 飞机碰撞检测算法的研究与设计[J]. 电子设计工程,2011,19(9):86-88. (LI Y H, ZHAO G, WANG C X. Aircraft collision detection algorithm research and design[J]. Electronic Design Engineering, 2011, 19(9): 86-88.)
- [8] 张浩淼. 基于概率的飞行环境危险探测与告警算法研究[D]. 上海:上海交通大学,2012. (ZHANG H M. The flight environment risk detection and alarm algorithm research based on probability[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.)
- [9] 朱代武,何光勤. 目视和仪表飞行程序设计[M]. 成都:西南交通大学出版社,2013. (ZHU D W, HE G Q. Visual and instrument flight program design[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2013.)
- [10] 安伟连. 跑道侵入冲突探测及告警算法研究[D]. 广汉:中国民用航空飞行学院,2013. (AN W L. The runway intrusion conflict detection and alarm algorithm research[D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2013.)