

二次曲面共形光学整流罩面型设计

张 旺 汪东生 秦兰琦 党凡阳 陈守谦 范志刚

(哈尔滨工业大学空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 椭球形整流罩产生较大的空气阻力,限制了精确制导武器的作战性能。以减小空气阻力为主要目标,针对二次曲面共形光学整流罩进行研究,设计综合性能较为完善的整流罩面型。应用计算流体力学方法,计算了共形整流罩的空气阻力系数,建立了共形整流罩空气阻力评价函数。基于光线追迹理论,以不同目标视场下的平均波前误差作为像质评价指标,构建了共形整流罩像质评价函数。以雷达散射理论为基础,计算了整流罩的雷达散射截面积,给出了共形整流罩雷达散射特性评价函数。结合空气阻力、光学成像质量和雷达散射特性,建立了二次曲面共形整流罩综合性能评价函数,确立了长径比为 1.5 的抛物线型整流罩具有较好的综合性能。相比椭球形整流罩,该抛物线形整流罩减少了约 1/3 的空气阻力。

关键词 几何光学;共形光学;整流罩;二次曲面

中图分类号 O435.2; O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201434.1222006

Design on Surface Shape of Conicoidal Conformal Optical Domes

Zhang Wang Wang Dongsheng Qin Lanqi Dang Fanyang Chen Shouqian Fan Zhigang

(Research Center for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology,

Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract The ellipsoidal domes generate huge air resistance, which limits the operational performance of precise guided weapons. To reduce the air drag, the conicoidal conformal optical domes are investigated and a better surface shape of the dome is designed. The computational fluid dynamics method is adopted to compute the drag coefficients produced by the conicoidal conformal optical domes. The evaluation function of the drag coefficient is established. Based on the ray tracing theory, the evaluation function of imaging quality of conformal domes is modeled by putting the average root mean square wavefront errors of different fields of regards to the evaluation parameters. Based on the radar scattering theory, the radar scattering cross sections of conformal domes are computed. The evaluation function of radar scattering property is established. Taking the air resistance, imaging quality and radar scattering property into account, the evaluation function of comprehensive performance of the conicoidal conformal optical domes is established. The parabolic dome with the fineness ratio of 1.5 is proved to possess better comprehensive performance. Compared with the ellipsoidal dome, the parabolic dome established in this paper just produces 2/3 air resistance of the ellipsoidal dome does.

Key words geometric optics; conformal optics; dome; conicoidal surface

OCIS codes 220.1000; 080.1005; 080.2740

1 引 言

新技术革命的到来促使光学精确制导武器向着速度快、射程远、搜索范围大等方向发展。在技术需求的牵引下,导引头整流罩的形状发生了深刻的变

化。共形光学是指首先考虑导引头的空气动力学性能,其次改善导引头光学系统的成像质量^[1]。这使得导引头整流罩的形状可以不是传统的半球形或半球形的一部分,而是具有流线型的其他结构。以往

收稿日期: 2014-07-15; **收到修改稿日期:** 2014-07-29

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61275020)、航空科学基金(20130177003)

作者简介: 张 旺(1987—),男,博士研究生,主要从事光学系统设计、共形光学技术和气动光学技术等方面的研究。

E-mail: zw_hit@163.com

导师简介: 范志刚(1966—),男,博士,教授,主要从事精密光电测试技术方面的研究。E-mail: fzg@hit.edu.cn

针对共形光学技术的研究^[2-5],包括本课题组之前的研究工作^[6-8],主要围绕椭球形整流罩展开。然而椭球形整流罩产生较大的空气阻力,限制了共形精确制导武器的速度和射程,影响了精确制导武器的作战性能。长期以椭球形整流罩为研究对象,会造成武器装备的落后以及资源配置的浪费。为此,开展以减小空气阻力为主,设计综合性能较为完善的共形整流罩面型具有重要的理论意义和实用价值。

光学整流罩作为导引头的一部分,其外形设计为武器性能带来的影响主要表现在三方面:1)空气阻力;2)导引头光学系统成像质量;3)雷达散射特性(即武器隐身性能)。就当今高陡度、大长径比光学整流罩加工水平来讲,二次曲面共形光学整流罩加工工艺较为成熟。本文针对二次曲面共形光学整流罩进行研究,以减小整流罩产生的空气阻力为主要设计目标,综合考虑整流罩的光学成像质量和雷达散射特性,构建共形整流罩综合性能评价函数,确定综合性能较为完善的二次曲面共形光学整流罩面型。打破了以往共形光学技术仅针对椭球形整流罩进行研究的限制,填补了共形整流罩面型设计上的空白,完善了共形光学技术的研究。

2 二次曲面共形整流罩空气阻力分析

精确制导武器高速飞行时,整流罩及弹体周围产生巨大的空气阻力。受空气阻力影响,精确制导武器在射程、速度方面明显下降。研究表明,整流罩产生的空气阻力约占精确制导武器总体阻力的一半以上,因此优化设计整流罩面型,对于降低空气阻力,增强精确制导武器作战性能具有直接推动意义。

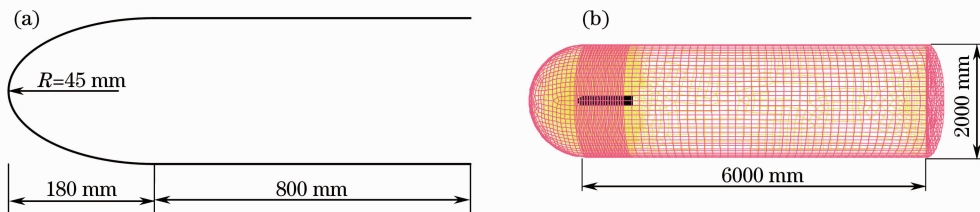


图1 计算模型示意图。(a)共形导引头模型;(b)流场网格划分模型

Fig. 1 Computational models. (a) Model of a conformal seeker; (b) grid model of aerodynamic flow field

2.2 求解器定义和边界条件选择

雷诺数(Re)是一种可用来表征流体流动情况的无量纲数,根据其大小可以将流体的流动分为层流和湍流,也可用来确定物体在流体中流动所受到的阻力。理论上讲,当 Re 低于4000时,流体的流动可以看成是层流的,此时黏滞力对流场的影响大于惯性力,流场中流速的扰动会因黏滞力而衰减,流

体流动稳定;当 Re 高于200000时,湍流效应明显,此时,惯性力对流场的影响大于黏滞力,流体流动不稳定,流速的微小变化容易发展、增强,形成紊乱、不规则的紊流流场。雷诺数计算公式为^[9]

$$Re = \rho VL / \mu, \quad (1)$$

式中 ρ 为流体密度, V 为飞行速度, L 为精确制导武器长度, μ 为黏性系数。

2.1 模型建立及网格划分

研究的全部二次曲面共形整流罩模型底部直径均为180 mm,弹体长度为800 mm。不同形状的二次曲面共形整流罩具有不同的长径比和离心率,以长径比为1、离心率为0.87的椭球形整流罩为例,建立的共形导引头模型如图1(a)所示,其顶点曲率半径为45 mm。网格划分主要有两种方法,一种是结构性网格,另一种是非结构性网格。由于非结构性网格可以采用任意形状的单元格,单元边的数目也无限制,使其能够很好地模拟自然几何边界。同时非结构网格生成简单,具有较好的可调节性和可控性,对于计算精确制导武器外流场,非结构性网格划分更为有效。采用非结构性网格划分精确制导武器外流场,外部流场网格划分结果如图1(b)所示,流场区域长度为7000 mm,底部直径为2000 mm。精确制导武器实际工作时处于超音速飞行状态,整流罩附近会产生激波,弹体尾部会产生尾焰,两种位置处空气动力学特征明显。因此在划分网格时,将整流罩和弹体尾部网格划分较为密集,弹体部位网格划分较为稀疏,该方法可以在保证计算精度的同时,提高计算效率。

根据(1)式计算得到 Re 远大于 200000,因此选用 Spalart-Allmaras 湍流模型计算精确制导武器的外流场。

在密度基求解器中,迭代格式选择隐式格式,迭代方法选择基于节点的高斯格林函数,该方法适用于非结构化网格,计算空气阻力系数时计算结果更为准确。由于精确制导武器飞行速度快,流场类型选择适用于马赫数较高的 AUSM,计算格式选择二阶迎风格式,相比一阶迎风格式,二阶迎风格式在解决非结构网格问题时计算更为准确。计算流场时设置的边界条件如表 1 所示。

2.3 计算结果分析

应用计算流体力学软件 Fluent 计算不同形状二次曲面共形整流罩周围流场分布,以椭球形整流

罩为例,得到密度场和压力场分布分别如图 2(a)和 (b)所示。从图 2(a)密度场分布中可以看出,整流罩顶端产生激波层,沿着整流罩轴线方向,密度由顶端向底端逐渐减小。从图 2(b)压力场分布可以看出,整流罩顶端产生的压强最大,沿着整流罩轴线方向,压力自顶端向底端逐渐减小。

表 1 流场计算的边界条件

Table 1 Boundary conditions for aerodynamic computation

Boundary parameters	Reference value
Altitude /km	10
Mach number /Mach	3
Inlet total pressure /Pa	26435.8
Inlet total temperature /K	223.15
Angle of attack /($^{\circ}$)	0

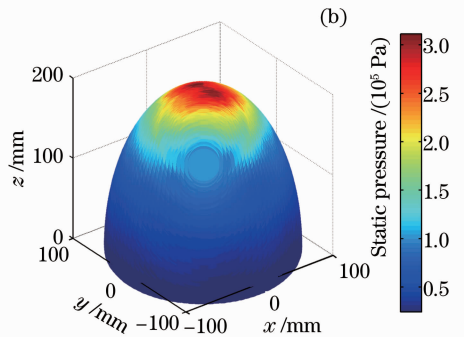
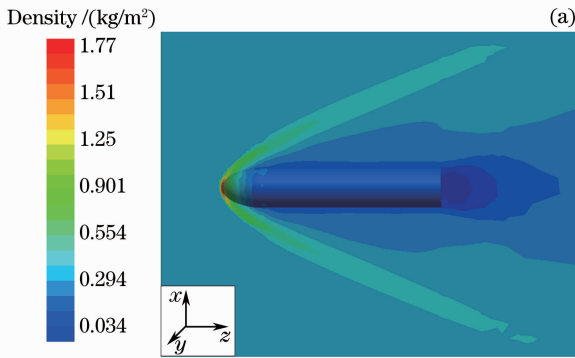


图 2 流场云图分布。(a)密度场分布；(b)压力场分布

Fig. 2 Aerodynamic flow field. (a) Density field distribution; (b) static pressure field distribution

离心率是描述二次曲面形状的主要参数,随着离心率的增大,二次曲面形状由椭球面向抛物面再到双曲面转化。通过计算不同形状二次曲面共形整流罩的空气阻力系数,得到空气阻力系数随离心率的变化曲线如图 3 所示。从图 3 中可以看出,当离心率小于 1 时,随着离心率的增大,二次曲面共形整

流罩产生的空气阻力系数迅速减小。当离心率大于 1 时,随着离心率的增大,空气阻力系数变化缓慢,基本趋于不变。

不同形状二次曲面共形整流罩空气阻力系数随长径比的变化关系如图 4 所示。从图 4 中可以看

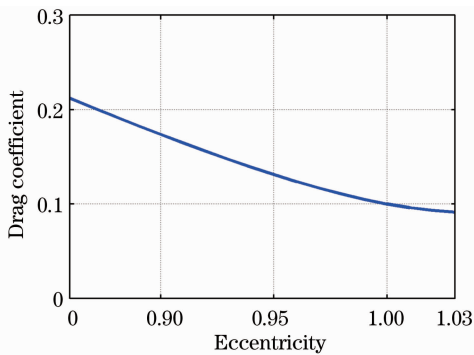


图 3 空气阻力系数随离心率变化曲线

Fig. 3 Plot of the variation of drag coefficient relative to eccentricity

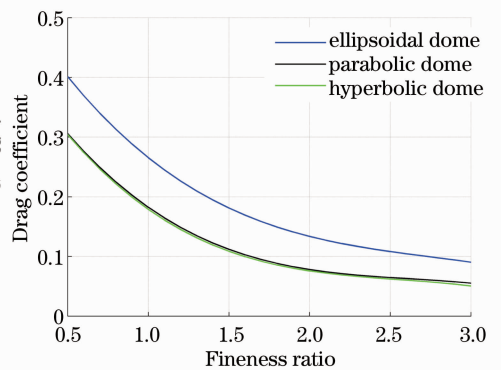


图 4 不同形状二次曲面共形整流罩空气阻力随长径比变化曲线

Fig. 4 Plot of the variation of drag coefficient of conicoidal surface with different shapes relative to fineness ratio

出,相同长径比下,椭球形整流罩产生的空气阻力最大,双曲线形整流罩产生的空气阻力最小而抛物线形整流罩与双曲线形整流罩产生的空气阻力基本相同。这与图 3 得出的结论相符合。由于共形光学首先考虑的是整流罩的空气动力学性能,选择二次曲面设计共形整流罩时应主要考虑抛物线形整流罩与双曲线形整流罩。鉴于双曲线形整流罩的加工及检测难度较大,且成像质量明显低于抛物线形整流罩,因此选择抛物线形整流罩作为研究对象。

将抛物线形整流罩空气阻力系数曲线进行归一化处理后,应用最小二乘法对曲线进行拟合,得到空气阻力系数随长径比变化的函数关系为

$$C_d(F) = -0.07F^3 + 0.56F^2 - 1.52F + 1.63. \quad (2)$$

3 二次曲面共形整流罩成像质量分析

光学整流罩除具有保护导引头内部元器件不受外部环境的影响外,还是导引头光学系统的重要组成部分,影响光学系统的成像质量。非零目标视场下,

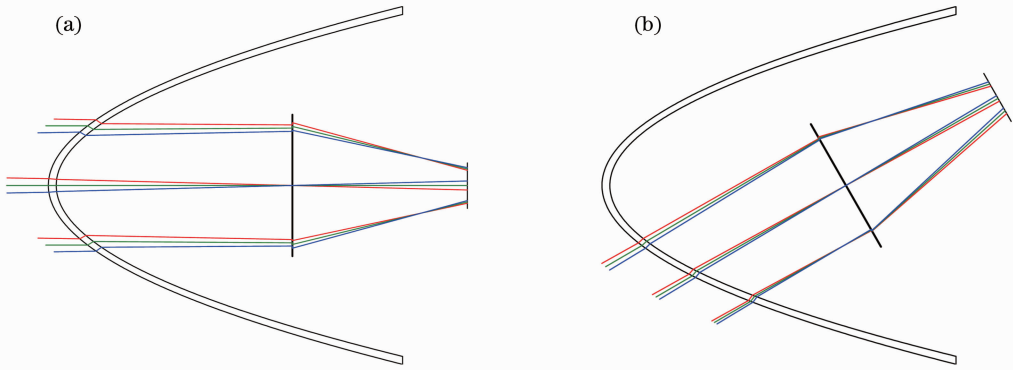


图 5 不同目标视场下抛物线形整流罩光学系统。(a) 0°目标视场; (b) 30°目标视场

Fig. 5 Parabolic dome optical system at different fields of regard. (a) 0° field of regard; (b) 30° field of regard

不同目标视场下共形整流罩引入不同的像差,因此需要选取一种合理的像质评价方法,定量地评价共形光学系统各目标视场的综合成像质量^[10-11]。本文采用均方根(RMS)波前误差平均值作为像质评价函数。基于光线追迹方法,计算不同目标视场下 RMS 波前误差,通过对各目标视场下 RMS 波前误差取平均值,进而定量地评价共形整流罩的综合成像质量。计算后得到的 RMS 波前误差平均值随长径比的变化曲线如图 6 所示。从图 6 中可以看出,椭球形整流罩产生的像差最小,其次是抛物线形整流罩,而双曲线形整流罩产生的像差最大。随着长径比的增大,双曲线形整流罩和抛物线形整流罩产生的像差远大于椭球形整流罩。

二次曲面共形整流罩失去旋转对称性,引入了随目标视场变化而动态变化的像差,导致成像质量严重下降。因此,研究整流罩引入的像差,评价整流罩的成像质量,对于设计共形整流罩至关重要。

以长径比为 1 的抛物线形整流罩为例,建立的整流罩光学系统如图 5 所示。抛物线形整流罩光学系统参数如表 2 所示。建立的所有二次曲面共形整流罩光学系统,除整流罩外形参数不一致以外,其余光学参数完全相同。应用理想透镜取代实际成像系统研究共形整流罩引入的像差,由于理想透镜不产生像差,所有像差均由共形整流罩产生。

表 2 导引头光学系统基本参数

Table 2 Parameters of the seeker optical system

Parameters of system	Design value
Thickness of dome /mm	4
Entrance pupil diameter /mm	60
Wavelength /μm	8~12
Field of regard /°	80
Field of view /°	2

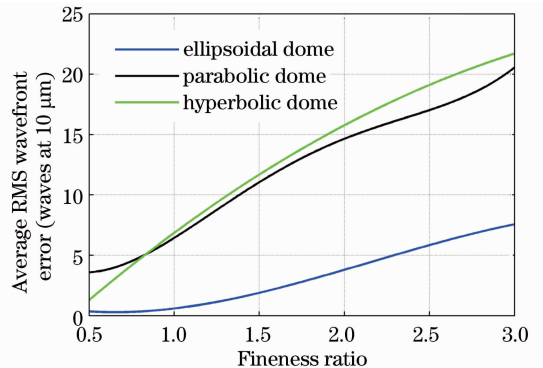


图 6 RMS 波前误差平均值随长径比变化曲线

Fig. 6 Plot of the variation of average RMS wavefront error relative to fineness ratio

研究对象为抛物线形整流罩,将抛物线形整流罩的 RMS 波前误差平均值曲线进行归一化处理,应用最小二乘法对曲线进行拟合,得到 RMS 波前误差平均值随长径比变化的函数为

$$A_{\text{RMS}}(F) = 0.08F^4 - 0.60F^3 + 1.44F^2 - 1.00F + 0.38. \quad (3)$$

4 二次曲面共形整流罩雷达散射特性分析

整流罩的形状除了决定导引头空气动力学性能和光学成像质量外,还影响着导引头的雷达散射截面积,即隐身性能。随着反导武器快速发展,延长精确制导武器寿命,提高武器的突防能力变得格外重要。因此,深入研究共形整流罩雷达散射特性,改善武器的隐身性能,对于升级我军精确制导武器装备意义重大。

实际上大多数雷达目标都处在光学区,当目标尺寸比波长大得多时,如果目标表面比较光滑,那么几何光学原理可以用来确定目标雷达截面积。按照几何光学原理,表面最强的反射区域是对电磁波波前最突出点附近的小的区域,这个区域的大小与该点的曲率半径 ρ 成正比。曲率半径越大,反射区域越大,这一反射区域在光学中成为“亮斑”。对于共形整流罩表面,反射面在“亮斑”附近不是旋转对称的,可通过“亮斑”并包含视线作相互垂直的两个面,这两个切面上的曲率半径为 ρ_1 和 ρ_2 ,则雷达截面积为^[12]

$$\sigma = \pi\rho_1\rho_2. \quad (4)$$

通过计算得到二次曲面共形整流罩雷达散射截面积与长径比的关系,如图 7 所示。从图 7 中可以

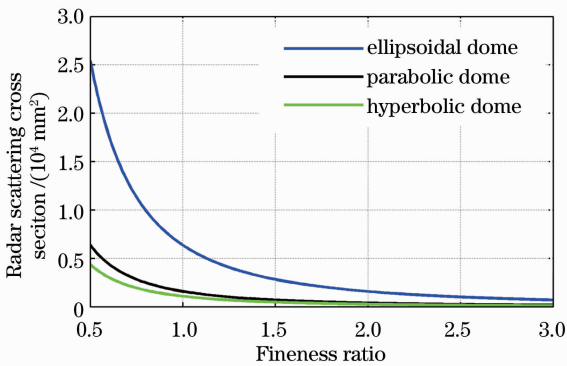


图 7 不同形状二次曲面共形整流罩雷达散射截面积随长径比变化曲线

Fig. 7 Plot of the variation of radar scattering cross section of conicoidal surface with different shapes relative to fineness ratio

看出,双曲线形整流罩的雷达散射截面积最小,即隐身性能最好,其次是抛物线形整流罩,而椭球形整流罩的隐身性能最差。随着长径比的增加,3 种面型的共形整流罩隐身性能逐渐接近。

将抛物线整流罩雷达散射截面积曲线进行归一化处理,应用最小二乘法对曲线进行拟合,得到雷达散射截面积随长径比变化的函数关系为

$$R_{\text{sc}}(F) = \frac{1}{4F^2}. \quad (5)$$

5 二次曲面共形整流罩综合性能评价函数建立

利用得到的抛物线形共形整流罩归一化空气阻力评价函数、光学成像质量评价函数和雷达散射特性评价函数,构建无量纲的抛物线形共形整流罩综合性能评价函数:

$$E_{\text{dome}}(F) = \omega_1 C_d(F) + \omega_2 A_{\text{RMS}}(F) + \omega_3 R_{\text{sc}}(F), \quad (6)$$

式中 ω_1 、 ω_2 和 ω_3 为空气阻力、成像质量和雷达散射特性的权重。

共形光学将改善导引头空气阻力作为首要目标,其次考虑内部光学系统的成像质量。故权重分配过程中,应按照从空气动力学、光学成像质量到雷达散射截面由大到小进行分配。由于该评价函数的研究对象为抛物线形整流罩,函数建立过程已经充分考虑减小整流罩的空气阻力,故在权重分配过程中可将空气阻力与成像质量分配相等权重。光学整流罩的隐身性能除与自身形状有关外,还可通过镀膜或其他工艺来提高其隐身性能,因此综合性能评价函数中,隐身性能的权重分配应小于空气阻力与成像质量。综合考虑上述因素,评价函数权重

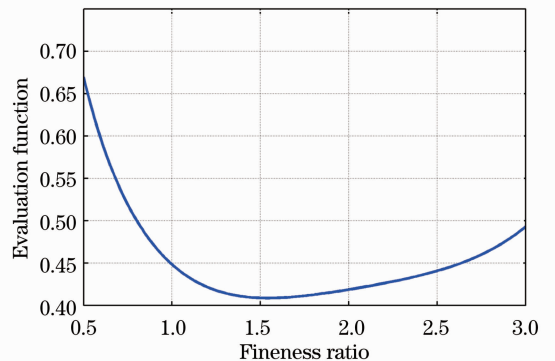


图 8 不同形状抛物线形共形整流罩综合评价函数曲线
Fig. 8 Plot of evaluation function of parabolic conformal optical domes with different shapes

$w_1:w_2:w_3$ 按照 3:3:1 分配, 建立的综合评价函数对应的函数关系曲线如图 8 所示。从图 8 中可以看出, 当抛物线型整流罩长径比为 1.5 时, 综合评价函数取得极值, 此时二次曲面共形整流罩具有较好的综合性能。

6 结 论

为了减小光学精确制导武器产生的空气阻力, 改善武器的综合作战性能, 针对二次曲面共形光学整流罩进行研究, 重新设计了共形整流罩面型。以减小空气阻力为主要目标, 综合考虑共形整流罩的光学成像质量和雷达散射特性, 建立了二次曲面光学整流罩综合性能评价函数, 确定了长径比为 1.5 的抛物线形整流罩具有较为完善的综合性能。相比相同长径比下的椭球形整流罩, 建立的抛物线形整流罩产生的空气阻力降低了约 1/3, 且综合性能较为完善。提出的二次曲面共形光学整流罩面型设计方法及研究成果, 打破了以往共形光学技术仅针对椭球形整流罩进行研究的限制, 填补了共形整流罩面型设计上的空白, 同时也为今后共形光学技术的研究奠定了基础。

参 考 文 献

- 1 P A Trotta. Precision conformal optics technology program [C]. SPIE, 2001, 4375: 96-107.
- 2 Scoot W Sparrold, David J Knapp, Paul K Manhart, *et al.*.

- Capabilities of an arch element for correcting conformal optical domes [C]. SPIE, 1999, 3779: 434-444.
- 3 B G Crowther, D B McKenney, J P Mills. Aberrations of optical domes [C]. SPIE, 1998, 3482: 48-61.
- 4 Scott W Sparrold. Arch corrector for conformal optical systems [C]. SPIE, 1999, 3705: 189-200.
- 5 J P Mills, S W Sparrold, T A Mitchell, *et al.*. Conformal dome aberration correction with counter-rotating phase plates [C]. SPIE, 1999, 3705: 201-208.
- 6 Wang Zhang, Shouqian Chen, Chenglong Hao, *et al.*. Conformal dome aberration correction with gradient index optical element [J]. Opt Express, 2014, 22(3): 3514-3525.
- 7 Wang Zhang, Baojun Zuo, Shouqian Chen, *et al.*. Design of fixed correctors used in conformal optical system based on diffractive optical elements [J]. Appl Opt, 2013, 52(3): 461-466.
- 8 Zhang Wang, Zuo Baojun, Chen Shouqian, *et al.*. Design of conformal dome inner surface shape beneficial to aberration correction [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1122001. 张 旺, 左宝君, 陈守谦, 等. 利于像差校正的共形整流罩内表面面型设计[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1122001.
- 9 M Sadraey. Aircraft Performance Analysis [M]. Berlin: VDM Press, 2009. 11-34.
- 10 Liu Yongming, Xie Jun, Li Xiangqin, *et al.*. Optimization and figure analysis of elastic thin-film liquid lens [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1216001. 刘永明, 谢 军, 李湘勤, 等. 弹性薄膜液体透镜的优化设计及面形分析[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1216001.
- 11 Wei Xiaoxiao, Xu Feng, Yu Jianjun. Design of space coaxial field-bias three-mirror optical system with high resolution [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0416002. 韦晓孝, 许 峰, 余建军. 高分辨率空间同轴偏视场三反光学系统设计[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0416002.
- 12 Ding Lufei, Geng Fulu. Radar Theory [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2008. 141-153. 丁鹭飞, 耿富录. 雷达原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008. 141-153.

栏目编辑: 韩 峰