

光束路径排布对称性与光功率分布均匀性

谭吉春¹ 刘丽绒¹ 魏晓峰² 师智全¹ 袁晓东² 石磊¹

(¹ 国防科技大学应用物理系 204 光电室 长沙 410073; ² 中国工程物理研究院激光工程部 成都 610003)

摘要 报道了 60 路激光束的入射窗在球形靶室上的经度和纬度的计算方法。以靶丸表面激光功率分布的几何均匀性为判据, 分析结果表明: 靶区光路排布“凸 32 面体模型”中的不等边六边形的邻边边长比例因子为 1.14~ 1.25 时, 入射光束空间排布的几何对称性达到最佳状态, 直接驱动的辐照均匀性亦随之得到改善。

关键词 激光, 光路, 惯性约束聚变, 直接驱动, 靶区

由于单台激光器的输出功率有一定限度, 人们采取多路光束合成的方法, 例如用 60 路光束合成, 提高直接驱动激光系统的总功率。与此同时, 还必须强调沉积于靶丸的光功率密度三维分布的均匀性, 以利于提高等离子体的稳定性, 获得较高的核聚变增益。提高驱动光束焦斑均匀性的技术措施主要有以下两项: (1) 空域束匀滑技术(消除焦斑光能分布的大尺度非均匀性); (2) 时域束平滑技术(降低光束相干性, 消除小尺度非均匀性)。空域与时域匀滑技术均以改善二维(焦斑)均匀性为目标, 而多光束对称排布技术则是以提高靶丸表面光能沉积的三维均匀性为目标。靶区多光束对称排布是实现“束匀滑”的前提条件。

1 靶区光束“球内接凸多面体”排布方案

1.1 修正“球内接凸多面体”光束排布构型

据文献报道, 美国 OMEGA 装置靶区 60 束激光空间排布方案采用类似于“足球”的几何构型, 使直接驱动方式焦斑功率密度分布的非均匀性小于 1~ 2%^[1, 2]。

设靶丸为球形, 在以下讨论中, 我们将“焦斑靶面分布”和“入射窗靶室壳体分布”抽象为同一个几何问题, 即 60 路激光光斑在半径为 R 的球面上的分布均匀性问题。如表 1 所示, 标准的“足球”几何构型是一个 32 面体, 它由边长相等的 20 个球面正六边形(面积为 S_6) 和 12 个球面正五边形(面积为 S_5) 组合而成。相应的球面多边形面积之和为 $20S_6 + 12S_5 = 4\pi R^2$ 。文献 [1] 指出, OMEGA 装置靶区多光束空间排布方案(简称“球内接凸多面体”模型)与标准的足球并不完全一致。为了弄清选择直接驱动靶区光路排布方案的数学依据, 本文对标准足球与“OMEGA 球内接凸多面体”的几何差异进行了比较, 以光斑在靶丸表面的三维分布均匀性为判据, 分析几何修正因子取值与光束空间排布对称性和均匀性的关系。并计算出 60 个激光入射窗在球形靶室壳体上的经度和纬度。

表 1 直接驱动光路排布选用的球面内接凸多面体

Table 1 Inscribed polyhedron in a spherical surface for direct-drive laser beams geometrical arrangements

The plane angle at a vertex of polygon		The total number of vertexes of polyhedron	The numbers of plane surfaces of polygon		The total number of plane surfaces of polyhedron
108°	120°	E	n_5	n_6	F
1	2	60	12	20	32

1.2 球面内接凸 32 面体”几何构型的修正方法

在表 1 光束布局方案中,多面体每个顶点均含三个球面角。其中,五边形顶角 $\angle P = p \approx 111.38^\circ$,六边形顶角 $\angle Q = q \approx 124.31^\circ$ 。设光束沿多面体顶点入射,激光聚焦成圆斑,则球面五边形所分得的光斑能量与球面六边形所分得的光斑能量之比近似为 (p/q) 。五边形内光功率密度平均值与六边形内的光功率密度平均值之比 R_t 为

$$R_t = (5p/S_5)/(6q/S_6) \tag{1}$$

式中, $p + 2q = 360^\circ$ 。由于球面五边形面积 S_5 小于球面六边形的面积 S_6 ,即 $S_6/S_5 \approx 1.529$, R_t 约等于 1.142,导致输入五边形区域的激光功率密度面积平均值大于六边形区域的光功率密度面积平均值。这种均匀性偏差是直接驱动所不允许的。

修正表 1 “足球”几何构型的原则是,既要改善其光功率分布的均匀性,又要保持其对称性。球面正六边形和球面正五边形(共 32 个)相对于过南北极的球轴构成旋转对称结构;但不具有相对于赤道面的“面对称”特性。鉴于 12 个正五边形处于特殊的对称位置,已经均匀、对称地分布在球面上。文献[1]采用缩短“足球”表面原有六边形边长的方法修正光功率密度分布的非均匀性。如图 1,图 2 所示,修正后的六边形具有两种边长:1) 与五边形相邻的较长边(对应的弦长记为 b_1),共 $5 \times 12 = 60$ 条;2) 与相邻六边形共用的边(对应的弦长记为 b_2),共 30 条。使不等边六边形的面积相应减小,正五边形面积相对增大。

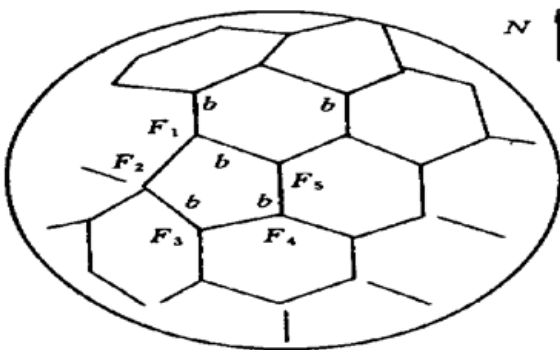


图 1 激光束辐照几何形状——用于直接驱动靶的理想“足球构形”(F_i 点为输入光束的位置, b 为多边形的侧边长度)

Fig. 1 Laser beams irradiation geometry—the ideal “stretched soccer ball” configuration for direct-drive target (Points F_i are the positions of input beams, and b is the side length of polygons)

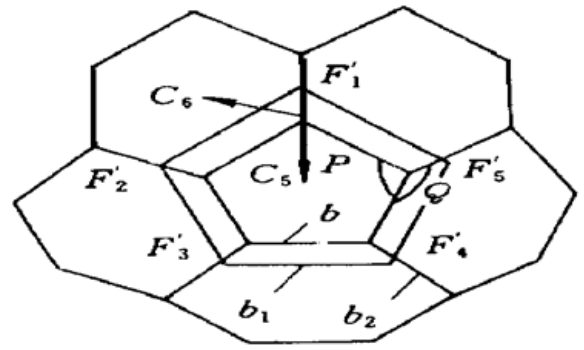


图 2 激光束辐照几何形状——用于直接驱动靶的变形“足球构形”(F_i' 为输入光束的位置,侧边长度比 $(b_1/b_2) \neq 1$)

Fig. 2 Laser beams irradiation geometry—the deformed “stretched soccer ball” configuration for direct-drive target (F_i' are the positions of input beams. The side length ratio $(b_1/b_2) \neq 1$)

2 球内接凸 32 面体模型的边长修正因子

以表 1 结构参数为参照,可将修正后的结构看作是由原球内接 32 面体切削而成。修正前

所有多边形的边长均为 b_1 。修正后,五边形边长增大为 b_2^5 ,六边形边长则减为 b_2^6 (如图 2 所示)。以下重点讨论六边形边长修正因子 (b_1/b_2) 的计算方法。

2.1 修正因子的计算方法 1——“光功率面积平均值”法

求解修正因子 $(b_1/b_2)_{MJ}$ 最佳值的判据是使修正后五边形区域沉积的光功率与六边形区域沉积的光功率面积平均值相等 (忽略光束相干叠加效应)。即,使修正后的光功率分布符合

$$R_{t_1}'(S_5'/S_6') = (5p'/S_5') / (6q'/S_6') = 1 \tag{2}$$

式中符号定义与式(1)相同,各参量的上标“'”表示修正后的取值。

2.2 修正因子的计算方法 2——“多边形重心光功率平均值”法

设激光束截面光强分布为高斯型: $I = I_0 \cdot \exp[-r^2/\omega(z)^2]$, 对称高斯光束沿多面体顶点入射。求解 $(b_1/b_2)_{ZX}$ 最佳值的判据是使修正后五边形重心 C_5 处沉积的光功率平均值 $P(C_5)$ 与六边形重心 C_6 处沉积的光功率平均值 $P(C_6)$ 相等。即,使修正后的光功率分布符合条件

$$R_{t_2}'(C_5/C_6) = P(C_5)/P(C_6) = 1 \tag{3}$$

式中,高斯光束在球面五边形重心处沉积的光功率 $P(C_5)$ 为

$$P(C_5) = 5 \cdot I_0 \cdot \exp[-(r_5^2/\omega^2)] \tag{4}$$

高斯光束在球面六边形重心处沉积的光功率 $P(C_6)$ 为

$$P(C_6) = 6 \cdot I_0 \cdot \exp[-(r_6^2/\omega^2)] \tag{5}$$

2.3 边长修正因子 (b_1/b_2) 的计算结果

本文分析了截面光强分布函数为超高斯型、高斯型和余弦型三种光束的修正因子,经计算得出图 3 所示曲线。该组曲线表明修正因子 (b_1/b_2) 的取值与聚焦光斑半径尺寸大小及服从何种截面功率分布密切相关。

1) 当截面光强分布函数为 $I = I_0 \cdot \exp[-r^n/\omega(z)^n]$ 时 ($n \geq 6$), 以“光功率面积平均值”达到均匀分布为目标求解方程(2), 计算结果是: 在本文所设的超高斯光斑照射条件下, 使 60

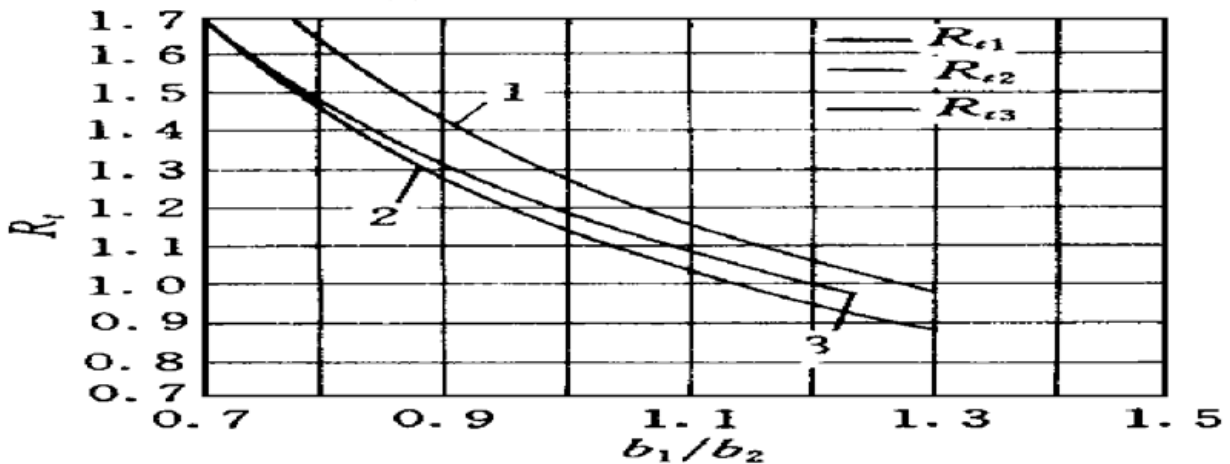


图 3 辐照均匀度随光斑半径和因子 (b_1/b_2) 的变化

R_t 为方程(1)的激光功率比, (b_1/b_2) 为多面体面中相邻侧面之比, 如图 2。 R_{t_1} 的最佳修正因子 $(b_1/b_2) = 1.14$, 光束截面功率呈超高斯型分布 $I = I_0 \cdot \exp[-r^6/\omega(z)^6]$, R_{t_2} 的最佳值 $(b_1/b_2) \approx 1.25$, 光束截面功率呈高斯型分布 $I = I_0 \cdot \exp[-r^2/\omega(z)^2]$; $(b_1/b_2) \approx 1.0$, 光束截面功率呈 Cosine $I = I_0 \cdot [\cos^{2.125}(2\pi\theta)]$

Fig. 3 The irradiation uniformity vary with beam spot radius and factor (b_1/b_2)

R_t is the ratio of laser powers of equation (1), and (b_1/b_2) is the ratio between neighboring sides in the hexagonal face as Fig. 2. The optimum $(b_1/b_2) = 1.14$ for R_{t_1} with Super Gaussian $I = I_0 \cdot \exp[-r^6/\omega(z)^6]$ and the optimum $(b_1/b_2) \approx 1.25$ for R_{t_2} with Gaussian $I = I_0 \cdot \exp[-r^2/\omega(z)^2]$; $(b_1/b_2) \approx 1.0$ with Cosine $I = I_0 \cdot [\cos^{2.125}(2\pi\theta)]$

束激光光斑在球面上趋于对称和均匀分布的修正因子的最佳值 $(b_1/b_2)_{MJ} \approx 1.142$, 六边形与五边形面积比为 $S_6'/S_5' \approx 1.333$, 如图 3 所示。

2) 当截面光强分布函数为高斯型时, 以“多边形重心光功率平均值”达到均匀分布为目标求解方程(3) ~ (5), 计算结果是: 在本文所设的高斯光斑照射条件下, 使 60 束激光光斑在球面上趋于对称和均匀分布的修正因子的最佳值 $(b_1/b_2)_{ZX} \approx 1.256$, 高斯光束腰斑半径与五边形外接圆半径之比为 $\omega'/r_5' \approx 0.94$ 。

当截面光强分布函数为 $I = I_0[\cos^{2.125}(2\pi\theta)]$ 时, 在本文所设的余弦光斑照射条件下, 光功率在球内接多面体各顶点和球面多边形重心两类控制点附近达到均匀分布的修正因子最佳值 $(b_1/b_2)_{ZX} \approx 1.201$, $R_{i_3} \approx 1$ 。

3 靶室壳体上激光入射窗的经度和纬度

标准“足球”北半球上有 30 个顶点, 顺次分布在自高纬度至赤道的 4 个纬度圈上。各顶点经度和纬度近似值举例如下

当 $(b_1/b_2) = 1.000$, 对“socer ball”, 坐标值如下 (A: 经度, B: 纬度, 单位: 度)

环 1: $A = 69.92; B[1] = 0.00, B[2] = 72.00, B[3] = 144.00, B[4] = 216.00, B[5] = 288.00;$

环 2: $A = 46.64; B[1] = 0.00, B[2] = 72.00, B[3] = 144.00, B[4] = 216.00, B[5] = 288.00;$

环 3: $A = 30.99; B[1] = 22.39, B[2] = 49.61, B[3] = 94.39, B[4] = 121.61, B[5] = 166.39, B[6] = 193.61, B[7] = 238.39, B[8] = 265.61, B[9] = 310.39, B[10] = 337.61;$

环 4: $A = 9.88; B[1] = 11.82, B[2] = 60.18, B[3] = 83.82, B[4] = 132.18, B[5] = 155.82; B[6] = 204.18, B[7] = 227.82, B[8] = 276.18, B[9] = 299.82, B[10] = 348.18。$

按式(2) ~ (5) 数学模型修正后的“球内接凸 32 面体”北半球上 30 个顶点经度和纬度的近似值为

当 $(b_1/b_2)_{MJ} \approx 1.142$, 对球内接凸 32 面体, 坐标值如下 (A: 经度, B: 纬度, 单位: 度)

环 1: $A = 68.94; B[1] = 0.00, B[2] = 72.00, B[3] = 144.00, B[4] = 216.00; B[5] = 288.00;$

环 2: $A = 47.62; B[1] = 0.00, B[2] = 72.00, B[3] = 144.00, B[4] = 216.00, B[5] = 288.00;$

环 3: $A = 31.11; B[1] = 23.52, B[2] = 48.48, B[3] = 95.52, B[4] = 120.48, B[5] = 167.52, B[6] = 192.48, B[7] = 239.52, B[8] = 264.48, B[9] = 311.52, B[10] = 336.48;$

环 4: $A = 9.05; B[1] = 12.35, B[2] = 59.65, B[3] = 84.35, B[4] = 131.65, B[5] = 156.35, B[6] = 203.65, B[7] = 228.35, B[8] = 275.65, B[9] = 300.35, B[10] = 347.65。$

以赤道为对称面, 按式(2) ~ (5) 数学模型修正后的“球内接凸 32 面体”在南半球上也有 30 个顶点顺次分布在 4 个纬度圈上。各对应顶点的经度相对于北半球各点错开 12° 。

4 结 论

(1) 驱动光束辐照均匀性与核聚变的增益稳定性密切相关。改善光束入射对称性有助于

提高驱动光束空域上的均匀性。在修正后的球内接凸 32 面体的 60 个顶点位置安装激光入射窗,入射光束相对于球 OZ 轴呈对称分布,靶丸上的光斑呈三维均匀分布,五边形和六边形内的平均功率密度近似相等。

(2) 在直接驱动靶区光路设计时,有必要对标准足球的几何构型加以修正,以便为后续的光斑均匀化措施提供良好的初始条件。改善靶丸表面光功率密度分布均匀性的途径是改变“足球”几何构型中六边形的邻边的比例关系。OMEGA 装置靶区 60 束激光空间排布方案中,对“足球”几何构型的修正因子取为 $(b_1/b_2) \approx 1.2$ 。文献[1]仅指出修正因子计算结果,但未说明其修正依据和具体算法。

靶区光路空间排布方案不是唯一的^[3,4]。 (b_1/b_2) 的取值最优解应根据直接驱动物理试验的需要确定。本文以“光功率面积平均值”为判据的修正因子取值和以“多边形重心光功率平均值”为判据的修正因子取值不同, (b_1/b_2) 的取值依赖于光斑功率分布函数在 1.14 ~ 1.25 范围内变化,说明在保留标准足球对称性布局优点的基础上,随入射光斑截面光强分布的变化,“变形足球”光路布局将出现多种衍生方案。

本文计算出经修正后的“球内接凸 32 面体”构型的入射窗经、纬度值,可作为 60 束激光直接驱动靶区入射窗布局的候选(参考)方案。修正因子 (b_1/b_2) 实际取值需综合考虑诊断孔布局和其他工程因素后作出的选择。

参 考 文 献

- 1 John M. Soures. The Omega upgrade laser facility for direct-drive experiments. *J. Fusion Energy*, 1991, **10**(4): 295
- 2 John M. Soures. OMEGA upgrade laser for direct-drive target experiments. *Laser and Particle Beams*, 1993, **11**(2): 317
- 3 Tan Jichun, Wei Xiaofeng, Cheng Zhe *et al.*. Geometric arrangement of laser beams in target area. Third International Conference Solid Laser for Application to ICF. *SPIE*, 1998, **3492**: 866~ 870
- 4 Tan Jichun, Wei Xiaofeng, Cheng Zhe *et al.*. Geometric arrangement with multiplicity of laser beams in target area for indirect-drive. *Chinese J. Lasers*, 1988, **B7**(1): 46~ 50

Geometric Symmetry of the Laser Beam's Arrangement Scheme on the Surface of a Ball Target

Tan Jichun Liu Lirong Wei Xiaofeng* Shi Ziquan Yuan Xiaodong* Shi Lei

Department of Applied Physics, National University of Defense Technology, Changsha 410073

* *Institute of Nuclear Physics & Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Chengdu 610003*

Abstract A computation method of longitudes and latitudes of incident windows for the 60 laser beams on the spherical target chamber is reported. It is shown analytically that when the length ratio between the neighboring sides of hexagonal faces on the 32-face polyhedron inscribed in the chamber's spherical faces equals 1.14~ 1.25, according to the criterion of irradiation uniformity on target for the “stretched soccer ball” model, the geometrical symmetry of the spatial arrangement of the beams comes to the optimum condition, and thus the irradiation uniformity of direct drive is improved.

Key words laser, optical beam path, inertial confinement fusion, direct-drive, target illumination