

文章编号 1004-924X(2011)05-0983-09

大功率 TEA CO₂ 激光器的电磁 辐射测试及屏蔽方舱设计

葛欣宏^{1,2*}, 郭立红¹, 孟范江¹, 于洪君¹, 王思雯¹, 王鹤淇^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要:为了抑制大功率 TEA CO₂ 激光器对其他电子设备的电磁干扰,在测量并分析激光器的近场电磁辐射特性的基础上,设计了电磁屏蔽方舱并进行了实验验证。根据大功率 TEA CO₂ 激光器的工作原理,分析了激光器工作过程中的主要电磁辐射源;结合电磁辐射理论与激光器的实际结构,确定了电磁辐射测试的主要部位为火花开关、主回路、激光器出光口处。分析测试结果,得到了激光器近场不同方位的主要辐射频率及辐射场特性,据此设计了屏蔽方舱,并在屏蔽方舱门处进行了屏蔽效能验证。结果表明,大功率 TEA CO₂ 激光器在近场区的电磁辐射源为磁场源,据此设计的屏蔽方舱其屏蔽效能整体达到 40 dB 以上,部分频率的屏蔽效能达到 60 dB 以上。

关键词:大功率 TEA CO₂ 激光器;电磁辐射;近场探头;电磁兼容;屏蔽方舱;屏蔽效能

中图分类号:TN248.2 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20111905.0983

Electromagnetic radiation test of high-power TEA CO₂ laser and its shielding cabin design

GE Xin-hong^{1,2*}, GUO Li-hong¹, MENG Fan-jiang¹

YU Hong-jun¹, WANG Si-wen¹, WANG He-qi^{1,2}

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China; Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

*Corresponding author, E-mail: gexin820209@126.com

Abstract: In order to suppress the electromagnetic interference of a high-power TEA CO₂ laser for the other electronic equipment, the near-field electromagnetic radiation characteristics of the laser were measured and analyzed, and an electromagnetic shielding cabin was designed and validated. According to the work principle of the high-power TEA CO₂ laser, the main electromagnetic radiation sources of the laser in working process were analyzed, then it points out that the main part of electromagnetic radiation tests is the spark switch, main circuit and the part of light out by combing of laser electromagnetic radiation theory and the actual structure. After analysis of test results, the main frequencies of laser radiation in different directions were obtained. Based on the above, the shielding cabin was designed, and its

收稿日期:2010-08-16;修订日期:2010-10-27.

基金项目:激光与物质相互作用国家重点实验室基金资助项目(No. SKLLIM0902-01)

shielding effectiveness was verified near the cabin's door. The results show that the electromagnetic radiation of the high-power TEA CO₂ laser is magnetic field source in the near-field zone, and the shielding efficiency is 40 dB for the whole frequencies and more than 60 dB for some special frequencies.

Key words: high-power TEA CO₂ laser; electromagnetic radiation; near-field probe; electromagnetic compatibility; shielding cabin; shielding effectiveness

1 引言

大功率 TEA CO₂ 激光器属于高功率脉冲激励型气体激光器,工作在高电压、大电流的状态下,激光器的火花开关、主回路和出光口处向空间辐射强烈的电场、磁场。当激光器集成于载车或舰船时,由于和大量的电子设备集成在相对狭小的空间里,这种强电磁辐射将对激光器附近的电子设备、传感器、精密仪表、通讯信号等产生强烈的干扰,甚至使其不能工作。为确保大功率 TEA CO₂ 激光器外部的电子设备工作正常,必须设计具有良好屏蔽性能的屏蔽方舱,以抑制强电磁辐射对电子设备的干扰,进而使集成了大功率 TEA CO₂ 激光器的整个系统实现电磁兼容,而设计屏蔽方舱的基础是对 TEA CO₂ 激光器的电磁辐射进行较全面的测试和分析。

目前,国内外开展了不少关于激光器电磁辐射及屏蔽的实验及理论工作,国外方面,文献[1-4]研究了各种激光器电磁辐射的成因及抑制方法,但并未专门研究 TEA CO₂ 激光器的辐射分布及屏蔽方舱设计。国内方面,文献[5-7]讨论了大功率 TEA CO₂ 激光器电磁辐射的机理,其中文献[5]给出了屏蔽设计的概略流程,文献[6]测试了激光器主回路 1 m 处的磁场辐射。综合来说,目前尚未见有对大功率 TEA CO₂ 激光器进行较全面的电场、磁场辐射测试,并在此基础上进行屏蔽方舱设计的相关报道。

本文在分析了大功率 TEA CO₂ 激光器电磁辐射形成机理的基础上,确定了应用近场探头进行电磁辐射测试的方案。基于电磁辐射的近场特性,在每个测试点分别测试了电场辐射、磁场辐射,由测试结果分析了大功率 TEA CO₂ 电磁辐射的主要频率点及近场分布特性。以测试结果为基础,应用电磁屏蔽衰减计算理论,计算了以 60 dB 为设计目标时,屏蔽层的选材、厚度,并应用波导理论对激光器出光口部位进行了设计。确定各

项指标后,针对屏蔽不连续的部分,包括方舱门等,进行了屏蔽加固处理。最后,在方舱门开、关情况下,分别测试了辐射情况,考察了方舱的屏蔽效能。

2 大功率 TEA CO₂ 激光器电磁辐射的机理

图 1 为激光器放电系统的等效电路图。HV 为高压电源,SG₁ 为火花开关,L₁ 为主回路电感,C₁ 和 L₂ 为储能电容和充电电感,C₃ 为锐化电容,C₂ 和 L₃ 为火花预电离电容及电感,SG₂ 为火花预电离间隙。

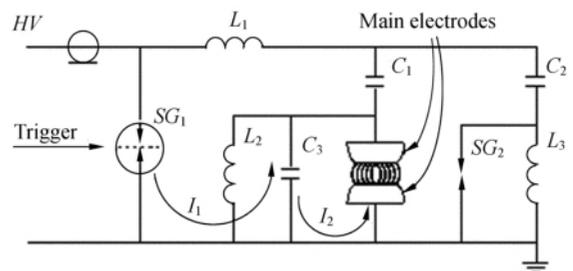


图 1 激光器原理图

Fig. 1 Schematic of laser

HV 通过 L₁, L₂ 对储能电容 C₁ 充电至额定值,同时通过 L₁, L₃ 对火花预电离电容 C₂ 充电至额定值,此时锐化电容 C₃ 没有被充电。

当触发脉冲 Trigger 将 SG₁ 触发导通时,C₁ 上储存的电量在 C₁-L₁-SG₁-C₃ 回路形成电流 I₁,C₁ 的部分电量同时转移至 C₃;此时,C₂ 经 C₂-L₁-SG₁-SG₂ 回路放电,在 SG₂ 放电产生的紫外光电离作用下,主电极周围形成等离子区^[8-9]。当 C₃ 上的电压上升至主电极之间的气体击穿阈值时,主电极之间的气体被击穿放电,C₃ 和主电极构成回路放电形成电流 I₂。

放电结束后,C₁ 上储存的剩余能量会在回路中产生一定的衰减振荡,但振荡振幅要小得多。

由系统工作原理分析,激光器的主要电磁辐射源包括:(1)脉冲火花开关弧光放电干扰,对应 I_1 的电流回路。(2)激光器主回路放电干扰,对应 I_2 的电流回路。(3)激光器出光口部分,这部分辐射的电磁场主要由极板间放电和 I_2 回路综合作用产生。

另外,还包括紫外预电离产生的放电电磁辐射,由文献可知,这部分的电磁辐射比较微弱。激光器最主要的电磁辐射源是火花开关、激光器主回路和出光口。

依据电磁辐射理论,激光器工作时形成的电流回路相当于小环天线,若电流回路的面积为 S ,流过的电流为 $i_m = I_m \sin \omega t$,则在近场区内,即 $r \ll \lambda/2\pi$ 的区域内,近似有

$$E_\varphi = \frac{-I_m S k^2}{4\pi\epsilon\omega r^2} \sin \theta \sin \omega t, \quad (1)$$

$$H_r = \frac{I_m S}{2\pi r^3} \cos \theta \cos \omega t, \quad (2)$$

$$H_\theta = \frac{I_m S}{4\pi r^3} \sin \theta \cos \omega t, \quad (3)$$

式中 E_φ, H_r, H_θ 为在球面坐标系下,电流环路激励的电磁场矢量的分量。 $E_r = E_\theta = 0, H_\varphi = 0, \epsilon$ 为介电常数。

电场、磁场辐射方向如图 2,由式(1),(2),(3)可知,近似处理下,电流环路辐射的电场分量以 $1/r^2$ 衰减,磁场分量以 $1/r^3$ 衰减。

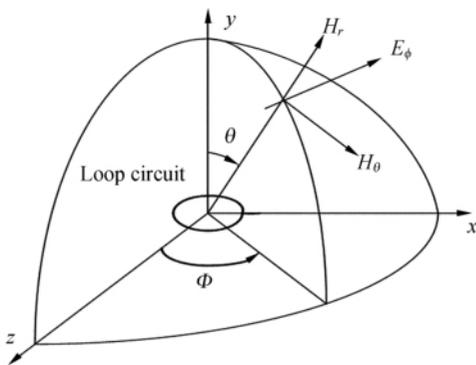


图 2 电流回路辐射的电场与磁场

Fig. 2 Radiation electric and magnetic fields of current loop

3 测试与结果分析

3.1 测试方案

测试设备采用加拿大容向公司的电场探头

RF-E02、磁场探头 RF-R-400-1、有 FFT 功能的示波器。测试布置如图 3,通过测试能有效获取激光器近场电磁辐射信息的关键在于测试点的位置和测试距离的确定。实际工程中,屏蔽方舱壁距火花开关的距离小于 1 m,因此选择测试距离 L 为 30 cm,50 cm 和 1 m。

由于探头存在衰减因子 AF ,测试的结果必须经过换算。电场强度的换算方法为将测试结果转换为 $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$,再加上衰减因子 AF ,即

$$E = V + 120 + AF, \quad (4)$$

其中电场强度 E 的单位为 $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ 。

磁场强度的换算方法为将测试结果转换为 $\text{dB}\mu\text{A}/\text{m}$,由于示波器的输入阻抗为 50Ω ,由 $I = U/R$,有 $20\lg I = 20\lg U - 20\lg 50 = 20\lg U - 34$,即

$$I = V - 34 = V + 120 - 34, \quad (5)$$

式中 I 的单位为 $\text{dB}\mu\text{A}$, V 的单位为 dBV 。

$$H = V + 86 + AF. \quad (6)$$

式中磁场强度 H 的单位为 $\text{dB}\mu\text{A}/\text{m}$ 。

在测试中 AF 为 40(查探头说明书得)。

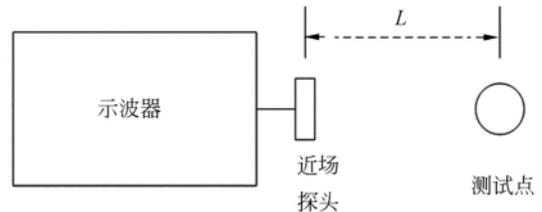


图 3 电磁辐射测试布置

Fig. 3 Electromagnetic radiation test arrangement

由激光器的电磁辐射机理分析可知,激光器的强电磁辐射源主要有火花开关、主回路、出光口。结合激光器的实际结构,确定激光器的主要测试点如图 4 所示。测试点 A 主要测试激光器主回路产生的电磁辐射,测试点 B 主要测试火花开关本身的电磁辐射;由于旋转火花开关与电机轴连接的部分有电磁泄漏,因此测试点 C 主要测试火花开关电机侧的电磁辐射;测试点 D 则主要测试出光口部分的电磁辐射。实际结构中,各个辐射源相互连接,不能截然分开,因此各个测试点测试的电磁辐射是多个辐射源共同作用,以其中一种为主。

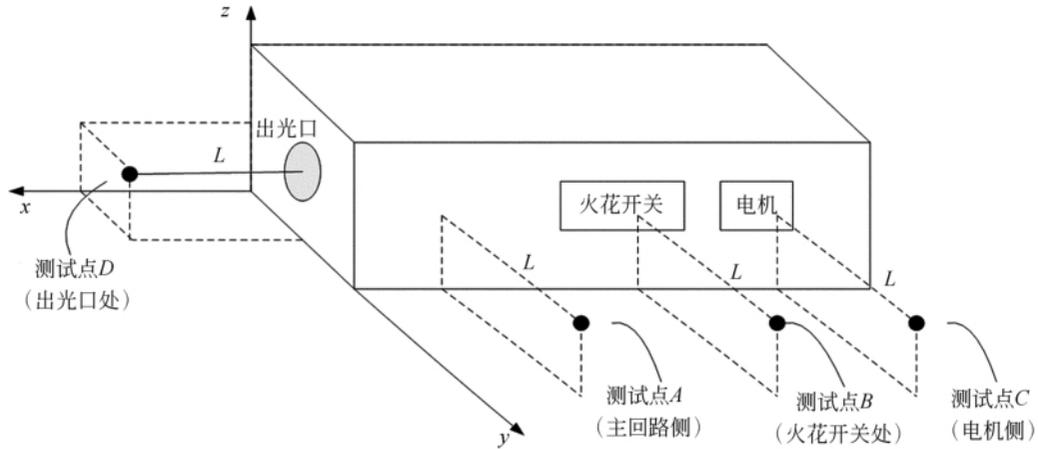


图 4 测试点位置

Fig. 4 Location of test points

3.2 电磁辐射测试结果

激光器电磁场的采集点包括出光口处、主回路侧、火花开关处、电机侧。由于 4 处采集点只是方位不同,采集方法相同,限于篇幅,本节详述主回路侧的测试结果,同时直接给出出光口处、火花开关处及电机侧的测试结果。

主回路侧的电磁辐射由激光器主回路和火花开关共同激励,以主回路的激励为主。图 5 为 30 cm 处电场辐射的测试结果,曲线 1 为时域波形,曲线 M 为频谱图,频谱中峰值对应的频率为主要的辐射频率。电场辐射有 3 个主要的辐射频率,分别为 44,65,135 MHz。图 6 为 30 cm 处磁场辐射的测试结果,磁场辐射有 3 个主要的辐射频率,分别为 34,99,127 MHz。

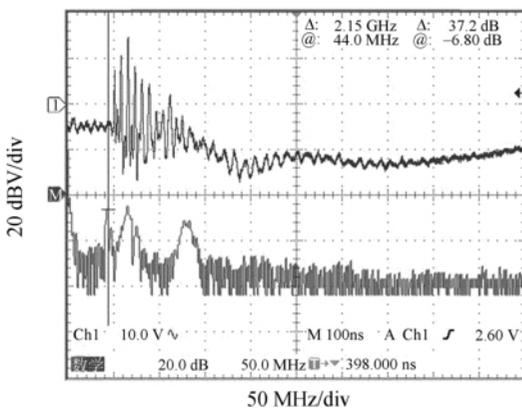


图 5 30 cm 电场测试结果

Fig. 5 Electric field test results in 30 cm

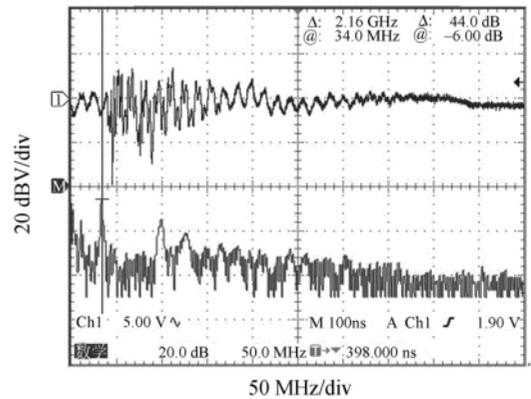


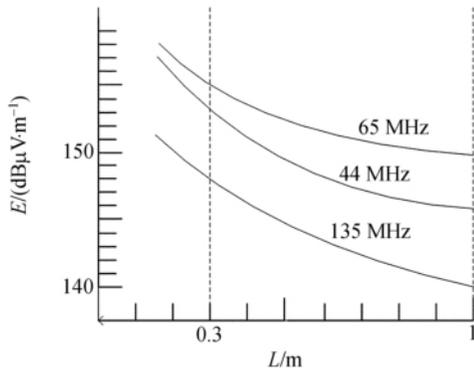
图 6 30 cm 处磁场测试结果

Fig. 6 Magnetic field test results in 30 cm

图 7 为主回路测试点处电磁辐射强度随距离、频率的变化关系。图中,横坐标为测试距离,在 0.3,0.5,1 m 处对应的辐值为实际测试的数据,进而可获得在非测试距离处电磁辐射的近似值。可以看出,电场、磁场的辐射强度随距离、频率的增大而衰减。

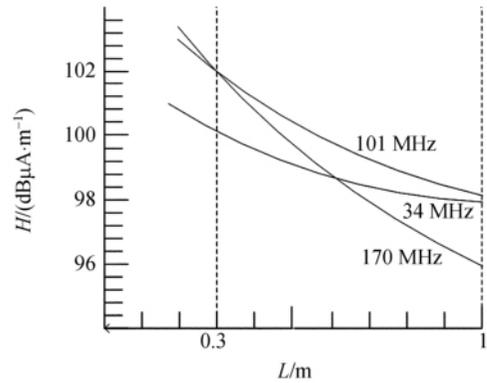
图 8 为火花开关处电磁辐射的测试结果,火花开关处的电磁辐射主要由火花开关本身激励。电场辐射的主要频率为 65,127 MHz,磁场辐射的主要频率为 34,101,170 MHz。

图 9 为电机侧电磁辐射强度的测试结果,电机侧电磁辐射由主回路、电机、火花开关共同激励,以火花开关激励的电磁场为主。电场辐射的主要频率为 65,134 MHz,磁场辐射的主要频率为 34,44,102,161 MHz。



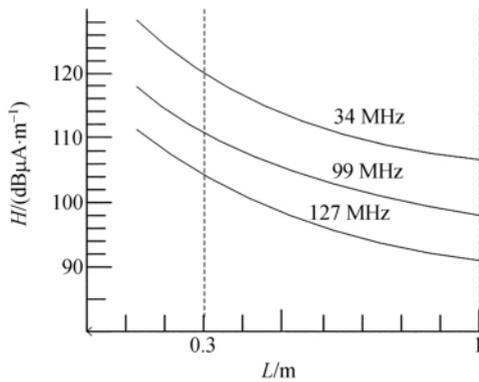
(a) 电场

(a) Electric field



(b) 磁场

(b) Magnetic field

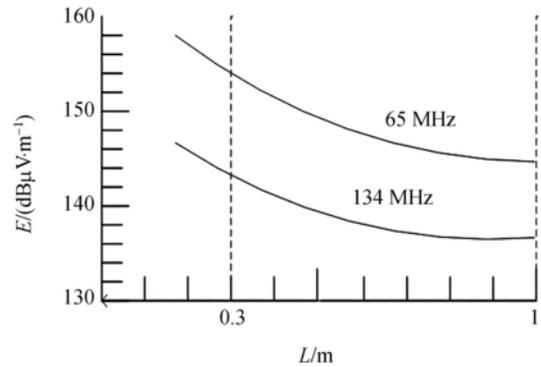


(b) 磁场

(b) Magnetic field

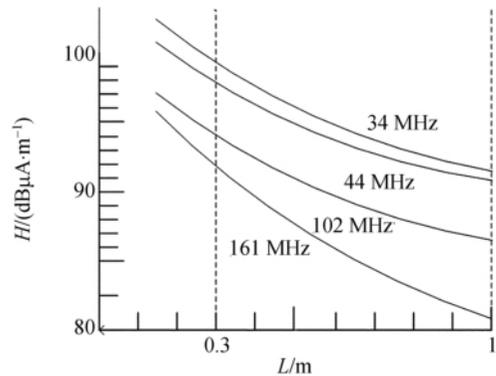
7 在测试 A 点电磁辐射强度随距离、频率的变化情况

Fig. 7 Electromagnetic radiation intensity changed with distance and frequency in measuring point A



(a) 电场

(a) Electric field



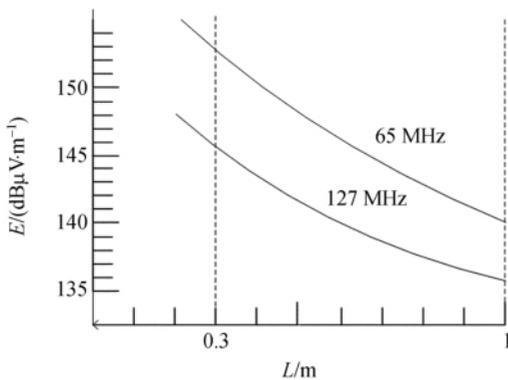
(b) 磁场

(b) Magnetic field

9 在测试 C 点电磁辐射强度随距离、频率的变化情况

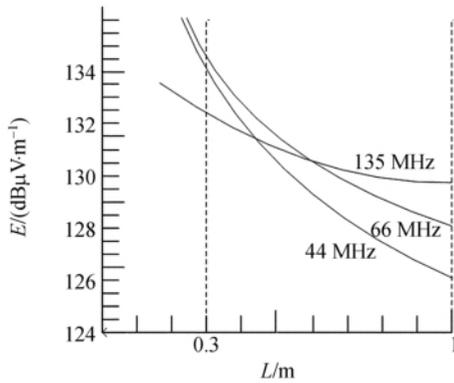
Fig. 9 Electromagnetic radiation intensity changed with distance and frequency in measuring point C

图 10 为出光口处电磁辐射的测试结果,出光口处的电磁辐射主要由 I₂ 回路产生。图示表明,电场辐射的主要频率为 44,66,133 MHz,磁场辐

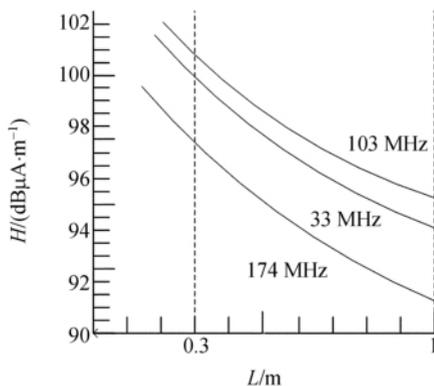


(a) 电场

(a) Electric field



(a) 电场
(a) Electric field



(b) 磁场
(b) Magnetic field

10 在测试 D 点电磁辐射强度随距离、频率的变化情况
Fig. 10 Electromagnetic radiation intensity changed with distance and frequency in measuring point D

射的主要频率为 33, 103, 174 MHz。

3.3 测试结果分析

对测试结果分析可得如下结论：

(1) 激光器的近场电磁辐射的性质为低阻场, 各点的电磁场值可以等效为多个小环天线辐射值的叠加, 进而在屏蔽设计时主要考虑近场磁场屏蔽, 兼顾电场屏蔽。由波阻抗计算公式 $|Z| = |E/H|$, 有 $20 \lg |Z| = 20 \lg |E| - 20 \lg |H|$, 进而有 $|Z| = 10^{\frac{E-H}{20}}$ 。在出光口 30 cm 处, $f=33$ MHz 时, 波阻抗为 38 Ω ; $f=174$ MHz 时, 波阻抗为 33 Ω 。在 1 m 处, $f=33$ MHz 时, 波阻抗为 31.6 Ω ; $f=174$ MHz 时, 波阻抗为 109.6 Ω 。因此在 1 m 内出光口的电磁场为低阻场。同理可得, 1 m 内, 在主回路、火花开关处、电机侧的电磁场均为低阻场。

(2) 由测试结果可得激光器在 1 m 处的整体电磁辐射情况, 如图 11; 而图 12 中 1 m 处电场辐射强度最大值对应的频率为 65 MHz, 磁场辐射强度最大值对应的频率为 34 MHz, 这个结果为屏蔽方舱设计提供了设计依据。

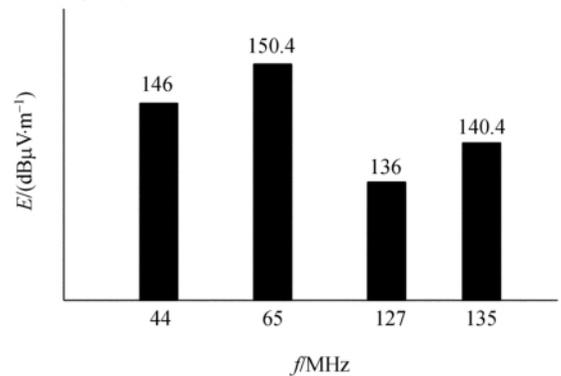


图 11 1 m 处激光器整体电场辐射情况
Fig. 11 Total electric field radiation of laser at 1 m

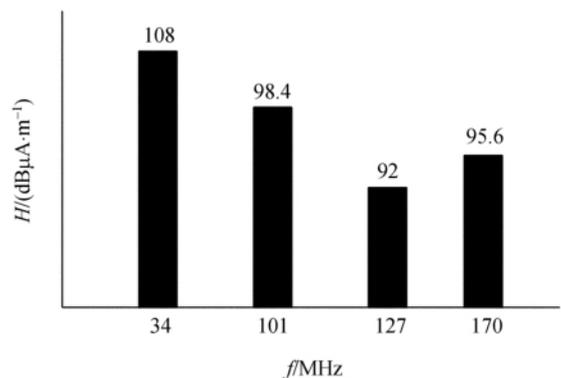


图 12 1 m 处激光器整体磁场辐射情况
Fig. 12 Total magnetic field radiation of laser at 1 m

4 屏蔽方舱的设计

由第 3 节的测试结果及分析可知, 大功率 TEA CO₂ 激光器辐射的电磁场在 1 m 内为低阻场, 电磁辐射源主要为磁场源, 因此, 在设计屏蔽方舱时, 主要从磁场屏蔽的角度进行考虑, 同时兼顾电场, 以屏蔽效能为 60 dB 作为设计指标。

4.1 屏蔽材料、厚度的确定

依据电磁辐射测试的结果, 激光器整体电场辐射的主要频率为 44, 65, 127, 135 MHz, 磁场辐射的主要频率为 34, 101, 127, 170 MHz; 在屏蔽方舱的尺寸范围内, 电磁辐射属于近场辐射, 电场、磁场的屏蔽效能需要分别确定。屏蔽设计要

兼顾电场、磁场。

由经验公式,金属屏蔽层的屏蔽效能由吸收损耗、反射损耗、多次反射损耗 3 部分决定。

$$A = 131.66t \sqrt{f\mu_r\sigma_r}, \quad (7)$$

近场磁场的反射损耗

$$R_H = 322 - 20 \lg \sqrt{\frac{f^3 r^2 \mu_r}{\sigma_r}}, \quad (8)$$

近场电场的反射损耗

$$R_E = 20 \lg \left[\frac{0.01169}{r} \sqrt{\frac{\mu_r}{f\sigma_r}} + 5.3r \sqrt{\frac{f\sigma_r}{\mu_r}} + 0.5 \right], \quad (9)$$

式中 μ_r 为相对磁导率, σ_r 为相对电导率, t 为金属板厚度。

当 $A > 15$ dB 时,多次反射损耗 B 可以忽略。

经计算,屏蔽材料选为铝时,由 $\sigma_r = 0.61$, 得 $\mu_r = 1$ 。当 $f = 34$ MHz 时,在距辐射源 0.3 m 处有 $A = 599.595t$ (dB), $R_E = 90.4$ dB。

电场主要依靠反射损耗进行屏蔽,在方舱接地良好的情况下,电场的屏蔽效能大于 60 dB,电场的屏蔽指标容易达到。

磁场主要依靠吸收损耗进行屏蔽,若使方舱的近磁场屏蔽达到 60 dB,依据吸收损耗计算结果,由 $599.595t = 60$, 可得 $t = 0.1$ mm。此外,吸收损耗与频率成正比,故对于比 34 MHz 高的频率,0.1 mm 厚的铝蒙皮即可满足屏蔽指标要求。因此,结合机械强度等工艺要求,最终确定方舱壁的外部蒙皮为 2 mm 厚的铝板。

4.2 屏蔽不连续部分的处理

实际工程中,方舱存在门、接缝、进线孔等结构,造成屏蔽层中电流的不连续,电磁波直接从这些部分泄漏。对屏蔽不连续部分的处理直接影响屏蔽方舱的最终性能,因此,针对屏蔽不连续部分,采取了如下处理措施:

(1) 方舱门是舱体最大的开口,由于维护的需要,方舱门开在火花开关侧,门和门框之间形成的缝隙是电磁波泄漏的重要途径。为在关门时保持电气连续性,在门和门框之间安装金属丝网导电衬垫。

(2) 出光口是电磁波泄漏的另一主要部分,依据波导理论,采用金属材料制成的波导管连接激光器与出光口,其衰减低于波导管截止频率的电磁波。

(3) 减少其他孔结构的数量,对于无法避免

的通风口采用通风波导窗进行屏蔽,采光窗用金属丝网屏蔽玻璃制造,过线孔的面积尽量小。依据测试结果,尽量避免在电磁辐射强的部位开孔,包括火花开关、电机侧、主回路处。

5 屏蔽效能测试

屏蔽方舱门是激光器方舱电磁泄漏的主要部位,分别在门开、门关的情况下测试激光器的电磁辐射。图 13 为方舱门开时的磁场辐射波形,图 14 为方舱门关时的磁场辐射波形。

屏蔽效能为在某一场上,屏蔽层安装前后的电场强度或者是磁场强度之比值^[10]。

$$SE = H_0 - H_1.$$

式中 H_0 为未屏蔽时测得的场强, H_1 为屏蔽后测得的场强。

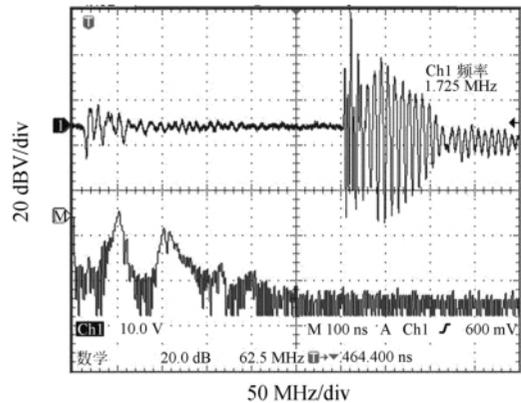


图 13 方舱门开时磁场辐射波形

Fig. 13 Magnetic radiation waveforms when shelter door opened

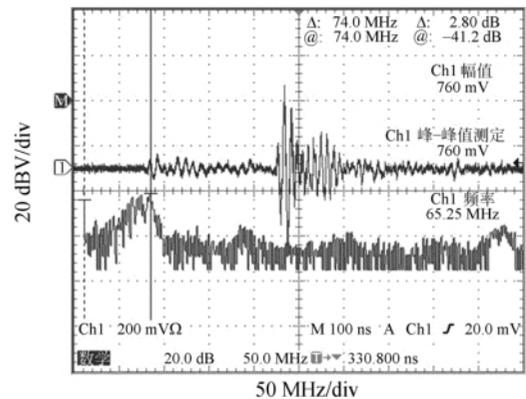


图 14 方舱门关时磁场辐射波形

Fig. 14 Magnetic radiation waveforms when shelter door closed

表 1 为主要辐射频率屏蔽效能的测试数据,由结果分析,屏蔽方舱达到 II 级方舱 40 dB 的要求,但未达到 I 级方舱 60 dB 的要求,这是因为激光器方舱有出光口存在,由于激光器本身的功能

表 1 屏蔽效能测试

Tab. 1 Test of shield effectiveness

| 频率/ MHz | 屏蔽前/ dBV | 屏蔽后/ dBV | 屏蔽效能/ dB |
|------------|-------------|-------------|-------------|
| 34 | -12 | -54 | 42 |
| 44 | -9 | -50 | 41 |
| 65 | 3 | -44 | 47 |
| 101 | -14 | -58 | 44 |
| 127 | -2 | -48 | 46 |
| 135 | -3 | -64 | 61 |
| 170 | -10 | -52 | 42 |

参考文献:

- [1] BHATIA M S, KUMAR G. On the EMI potential of various laser types[C]. *IEEE Proceedings of the International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility*, 2002;3-5.
- [2] BHATIA M S, MADAN V K, DONGARE A S, et al. Mapping of radiation field from a discharge laser head[C]. *IEEE Proceedings of the International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility*, 2002;6-10.
- [3] GAYEN A, DAS B N, PODDAR D R. Study of electromagnetic interference from a high power copper vapor laser[C]. *IEEE Proceedings of the International Conference on Electromagnetic Compatibility*, 2005;847-850.
- [4] GAYEN A, DAS B N, PODDAR D R. Study of electromagnetic interference from a high power copper vapor laser[C]. *IEEE Electromagnetic Compatibility*, 2005;847-850.
- [5] 孟范江,郭立红,杨贵龙,等. 大功率 TEA CO₂ 激光器系统中电磁干扰的抑制[J]. *强激光与粒子束*, 2008,20(2):177-182.
- MENG F J, GUO L H, YANG G L. Suppression of

要求,出光口处无法做到完全屏蔽,必然存在电磁泄漏。此外,由于测试位置、探头误差及激光器每次放电状态不同,很难真正严格做到对同一信号的对比。

6 结 论

采用近场探头,对大功率 TEA CO₂ 激光器近场的电磁辐射情况进行了详细测试。由测试结果可知,激光器主要的辐射频率在 34,44,65,103,127,135,161,174 MHz。通过波阻抗的计算,确定激光器近场区为低阻场,辐射源为磁场源。针对这种强电磁干扰情况,对激光器方舱进行了电磁屏蔽设计。结果表明:激光器的近场区为低阻场,在主要辐射频率上,屏蔽方舱的屏蔽效能达到 40 dB,部分辐射频率的屏蔽效能达到 60 dB。

electromagnetic interference in high power TEA CO₂ laser system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008,20(2):177-182. (in Chinese)

- [6] 孟范江,杨贵龙,李殿军. 大功率 TEA CO₂ 激光系统的电磁兼容设计[J]. *中国光学与应用光学*, 2009, 2(3):236-241.
- MENG F J, YANG G L, LI D J. EMC design of high power TEA CO₂ laser system [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009,2(3): 236-241. (in Chinese)
- [7] 李念峰,郭立红,罗艳春. 车载高功率激光器系统的 EMC 设计[J]. *武汉理工大学学报*, 2008, 30(4): 149-152.
- LI N F, GUO L H, LUO Y CH. EMC design of vehicular high power laser system [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2008,30(4):149-152. (in Chinese)
- [8] 李殿军,杨贵龙,谢翼江,等. 9.3 μm 脉冲 CO₂ 激光倍频实验[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(11):2684-2691.
- LI D J, YANG G L, XIE J J. Experiments of second harmonic generation of 9.3 μm pulsed CO₂ lasers [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11): 2684-2691. (in Chinese)
- [9] 王思雯,郭立红,赵帅,等. 高功率 CO₂ 激光对远场

HgCdTe 探测器的干扰实验[J]. 光学 精密工程, 2010,18(4):798-804.

WANG S W, GUO L H, ZHAO S. Experiments of high-power CO₂ laser disturbance to far-field HgCdTe detectors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4):798-804. (in Chinese)

[10] 黄大庆,李勃. 无人机电磁兼容传导与辐射测试项

目剪裁法[J]. 光学 精密工程, 2009,17(2):341-345.

HUANG D Q, LI B. Novel tailoring method for conducting and radiating electromagnetic compatibility testing of unmanned aerial vehicle[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2):341-345. (in Chinese)

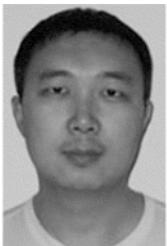
作者简介:



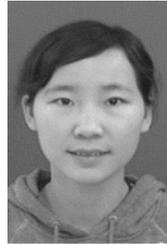
葛欣宏(1982—),男,吉林珲春人,博士研究生,2007年于长春理工大学获得硕士学位,主要从事电磁兼容和计算电磁学的研究。E-mail: gexin820209@126.com



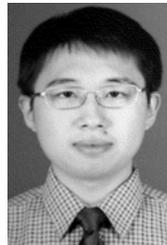
孟范江(1957—),男,黑龙江牡丹江人,副研究员,主要从事电子学控制方面的研究。E-mail: mengfj2006@sohu.com



于洪君(1980—),男,2002年于吉林大学获得学士学位,主要从事伺服控制技术和电磁兼容方面的研究。E-mail: 13634404920@139.com



王思雯(1983—),女,吉林松原人,助理研究员,2010年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光电对抗、激光干扰、电磁干扰等方面的研究。E-mail: wangsiwen2001@163.com



王鹤淇(1983—),男,吉林长春人,博士研究生,2007年于吉林大学获得学士学位,主要从事电子设备可测试性和可靠性方面的研究。E-mail: whq200808@gmail.com

导师简介:



郭立红(1964—),女,吉林舒兰人,研究员,博士生导师,1986年于长春理工大学获得学士学位,1998年、2003年于中科院长春光学精密机械与物理研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事计算机应用、天文惯导和星体自动化标校等方面的研究。E-mail: guolh@ciomp.ac.cn