文章编号 1674-2915(2009)03-0236-06

大功率 TEA CO_2 激光系统的电磁兼容设计

孟范江,杨贵龙,李殿军,邵春雷,张来明,郭 劲,郭立红
(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

摘要:大功率 TEA CO_2 激光系统工作时产生的强电磁干扰对激光系统内部及相关外部设备的电子系统具有很大的干扰和破坏作用。本文对大功率 TEA CO_2 激光系统的电磁干扰进行了分析计算,在此基础上对该系统进行了电磁兼容(EMC)的设计。硬件设计手段分别采用了对电磁干扰源和控制子系统进行屏蔽、系统合理布局与布线、滤波隔离;软件设计则采用了数据冗余纠错、冗余化操作和数据鉴别等抑噪和纠错技术,有效抑制了干扰电磁波在系统内外的传播,解决了大功率 TEA CO_2 激光系统的 EMC 问题。测试结果表明,EMC 的设计,使电源线和温度传感器信号线中的干扰电压分别降低了 26 dB 和 4 dB,干扰频谱最强处为 96 dBμV/m,干扰场强满足 GJB151A-97 中 RS103 的要求。这些结果表明,改进后的激光系统有很高的可靠性。

关 键 词:TEA CO_2 激光器;电磁兼容;屏蔽;电磁干扰
中图分类号:TN248.2 **文献标识码**:A

EMC design of high-power TEA CO_2 laser system

MENG Fan-jiang, YANG Gui-long, LI Dian-jun, SHAO Chun-lei,
ZHANG Lai-ming, GUO Jin, GUO Li-hong

(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*)

Abstract: The strong Electromagnetic Interference(EMI) generated in the operation of a high-power TEA CO_2 laser system has high interference and damage to the electronic systems inside and outside the laser system itself. This paper analyzes the reasons for EMI from the high power TEA CO_2 laser system and then designs the Electromagnetic Compatibility(EMC) of the laser system based on the analysis and calculation of the EMI. Two methods, hardware method and software method, are presented to suppress the propagation of the interference electromagnetic wave from the high power TEA CO_2 laser. The hardware design adopts electromagnetic shielding for interference sources and controlling sub-systems, layouting systems and wirings appropriately, and filtering isolation, while the software design uses the noise depression and error corrections including data redundancy error correction, redundancy operation and data identification. The tested results show the disturbing voltages of the power cable and signal line of the temperature cable sensor have decreased by 26 dB and 40 dB respectively and the largest disturbing spectrum in interference fields is 96 dBμV/m, which satisfies the requirements of RS103 in standard GJB 151A-97. These results reported here prove that the proposed method

收稿日期:2009-03-21;**修订日期**:2009-05-23

can guarantee the high reliability of the laser system.

Key words: TEA CO_2 laser system; electromagnetic compatibility; shielding; electromagnetic interference

1　引　言

电磁兼容(Electromagnetic Compatibility, EMC)在国标(GB/T4365)中定义为:“设备或系统在其电磁环境中能正常工作且不对该环境中任何事物构成不能忍受的电磁干扰的能力”。TEA CO_2激光器属于高电压脉冲激励类型的气体激光器,在其工作过程中激光主放电回路、脉冲火花开关和电源会产生很强的电磁干扰[1~4](Electromagnetic interference, EMI),这种强 EMI 对激光系统内部及相关外部设备的电子系统具有很大的干扰和破坏作用。因此,分析 TEA CO_2 激光系统中电磁干扰产生的原因,研究抑制电磁干扰措施,对提高激光系统的稳定性很有意义。本文对大功率 TEA CO_2激光系统进行了 EMI 分析,并在此基础上进行了 EMC 设计。通过对电磁干扰源和控制子系统进行屏蔽,合理布局和布线以及滤波隔离等措施保证了激光控制子系统硬件不受破坏,同时采用数据冗余纠错、数据鉴别等软件抑噪和纠错技术有效抑制干扰电磁波在系统内外的传播,从而保证了激光系统的可靠性。

2　大功率 TEA CO_2激光器电系统组成

大功率 TEA CO_2激光器电系统由触发子系统、脉冲开关子系统、制冷子系统、高压电源子系统、储能放电子系统和控制子系统组成,其组成结构如图 1 所示。高压电源子系统对储能放电子系统中的储能电容器充电至额定值后,触发子系统发出触发脉冲使脉冲开关子系统中的脉冲开关导通,储能放电子系统中的储能电容器通过脉冲开关对主放电电极进行高压脉冲放电,激励主放电电极之间的气体产生激光,激光系统充放电的重复频率为 100 ~ 500 Hz。制冷子系统的作用是使脉冲开关和主放电电极中的气体循环流动降温,提供稳定放电气流条件。控制子系统的任务是根据操作者输入的指令,通过用户程序运算处理对激光系统进行实时控制。

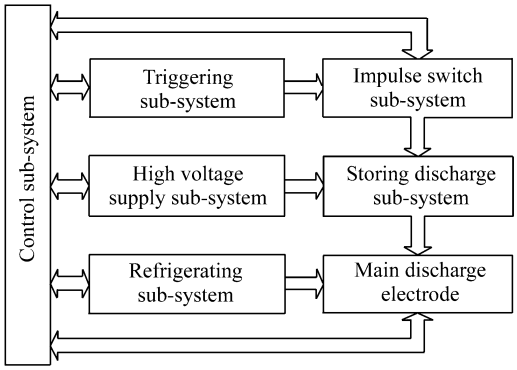


图 1　大功率 TEA CO_2激光电系统组成结构

Fig. 1　Components of electricity system in high-power TEA CO_2 laser

3　大功率 TEA CO_2激光系统中的电磁干扰源

大功率 TEA CO_2激光系统存在多个电磁干扰源,它们在敏感设备上产生的综合电磁环境干扰场强符合线性叠加原理。干扰源包括:激光主回路脉冲放电电流干扰、脉冲火花开关弧光放电干扰、预电离放电干扰、触发脉冲干扰和电源干扰等[5,6]。

3.1　激光主回路脉冲放电电流干扰

图 2 是大功率 TEA CO_2激光系统主回路充放电电路图。图 2 中 HV 是高压电源,SG_1是火花开关,L_1是主回路电感,C_1和 L_2是储能电容和充电电感,C_3是锐化电容,C_2和 L_3是火花预电离电容及

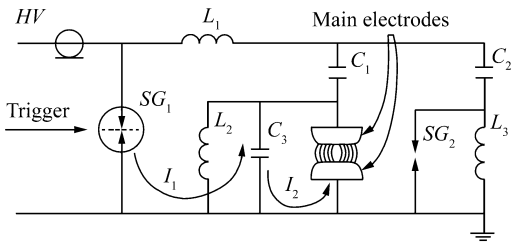


图 2　大功率 TEA CO_2激光主回路充放电电路图

Fig. 2　Main circuit of laser charge and discharge

电感，SG_2是火花预电离间隙。当SG_1导通后，先后形成两个主要脉冲电流I_1和I_2。高电压大电流放电时，会在其放电回路周围产生时变电磁场，激光放电回路满足小电流环路条件。利用电磁辐射理论公式[7]及试验测出的电流，求得距主放电回路1 m处产生的干扰场强和GJB151A-97中RS103允许的环境场强如表1所示。由表1可知，I_1和I_2所产生的干扰场强均超出所允许的环境场强，其中I_2产生的干扰场强在10 cm长的导线上感应的电压能达到200 V左右，对低电压电路的干扰非常严重。

3.2 脉冲火花开关弧光放电干扰

脉冲火花开关SG_1也是一个强电磁干扰源，这种大电流火花间隙开关一般工作在弧光放电区[8]。弧光放电属于最危险的干扰源之一，它所产生的0.15～150 MHz的辐射干扰可传播很远距离[9]。经过测试，其干扰频率在70 MHz左右最强。

表1 主放电回路干扰场强和GJB151A允许环境场强

Tab.1 Interference field strength of main discharge circuit and surrounding field strength allowed by GJB151A

Interference	Current I/kA	Signal frequency f/MHz	Electrical field E/(dBμV·m^{-1})	Magnetic field H/(dBμA·m^{-1})	E in allowed environment /(dBμV·m^{-1})	Difference /(dBμV·m^{-1})
I_1	4	1	166	155	146	20
I_2	10	4.2	186	164	154	32

3.3 预电离放电干扰、触发脉冲干扰和电源干扰

预电离放电和触发脉冲放电均属于火花类型放电，触发子系统发出的触发脉冲(Trigger)电压达35 kV，该触发脉冲在传送至SG_1后，以火花放电方式触发SG_1导通，火花放电的干扰频谱在20 MHz～1 GHz，经过测试，其干扰频率在35 MHz左右干扰最强，但其干扰能量比主放电要小得多。此外，大功率高压电源子系统和控制子系统中的大功率变频器的输入端和输出端均会产生高次谐波，这些谐波通过传导和辐射形式干扰电网及邻近的电气设备。另外，大功率高压电源等在启动、运行和停止过程中会使整个大功率TEA CO_2激光系统的供电电源出现电压下陷、浪涌以及波形发生畸变，其干扰程度与电网的供电制式及容量大小有关。由此得出结论：上述EMI源中，既有近场大电流磁场干扰与高压电场干扰，还有弧光放电和火花放电产生的辐射干扰和电源谐波干扰，分别在1、4、35和70 MHz处有强干扰，整个干扰频谱在几百kHz至1 GHz。

4 大功率TEA CO_2激光系统的EMC设计

EMI的构成有3个要素，即：干扰源(噪声源)、噪声的耦合路径和噪声接收器(敏感设备)。因此，解决EMC问题的基本方法需从这3个因素入手，削弱干扰源的能量、切断噪声耦合路径及提高设备对EMI的抵抗能力。消除这3个问题或其中之一，就能解决系统的EMC问题。

4.1 硬件手段

4.1.1 屏蔽

根据理论分析[10]，对激光系统的高压电源，脉冲开关与储能放电腔组成的激光主放电回路和控制子系统这3部分采用钢质金属板屏蔽，屏蔽体之间的连接线采用高压同轴屏蔽电缆。当采用导电材料作屏蔽体时，可同时对高频电场和磁场起到屏蔽作用，进入被屏蔽空间的总的场强仅为[7]：

$$E_t(d) = \sum E_{t_i}(d) = (1-\rho_0)(1-\rho_d)\mathrm{e}^{-kd}(1+\rho_d^2\mathrm{e}^{-2kd}+\rho_d^4\mathrm{e}^{-4kd}+\cdots), \quad (1)$$

式中，ρ_0(电磁波在空气金属界面上的反射系数)及ρ_d(电磁波在金属空气界面上的反射系数)都很大，在金属中的场强衰减系数k也很大，所以$E_t(d)$很小，说明绝大部分干扰信号的能量都可以被金属屏蔽体屏蔽掉。屏蔽设计一般分3步完成：(1)确定对屏蔽体屏蔽效能的要求。(2)选择屏蔽材料、确定屏蔽体结构。(3)进行屏蔽结构完整性设计。屏蔽效能的关键是缝隙、孔洞、开门

处,分别采用电磁密封衬垫、蜂巢式屏蔽通风板、铍铜指形簧片等材料进行了严密的电磁密封处理,控制电路的供电电源设置了 TVS 管、交流稳压器、电源滤波器、超级隔离变压器组成的电源净化网络,信号传输通道采用宽带滤波器滤波、隔离后输入控制系统。

4.1.2　空间合理布局与布线

如上所述,激光主放电回路可视为小电流环路,即为磁偶极子,磁偶极子近场区的电场和磁场处在以场源为中心的大曲率半径球面上,如图 3

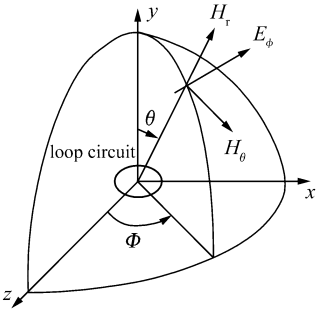


图 3　环路产生的电场和磁场

Fig. 3　Electronic field and magnetic field generated in circuit loop

所示。放电电流产生的电磁场应满足式(2)~(4)[11]:

$$H_\theta = \frac{IA\beta^3}{4\pi}\left[\frac{-1}{(\beta r)} + \frac{\mathrm{j}}{(\beta r)^2} + \frac{1}{(\beta r)^3}\right]\sin\theta(A/m), \quad (2)$$

$$H_r = \frac{IA\beta^3}{2\pi}\left[\frac{\mathrm{j}}{(\beta r)^2} + \frac{1}{(\beta r)^3}\right]\cos\theta(A/m), \quad (3)$$

$$E_\varphi = \frac{IA\beta^4}{4\pi\omega\varepsilon_0}\left[\frac{-1}{(\beta r)} + \frac{\mathrm{j}}{(\beta r)^2}\right]\sin\theta(V/m), \quad (4)$$

式中 I 为电流(A),A 为电流环面积(m^2),β 为波长 ω/c 的电场强度(V/m),ω 为角频率,θ 为 Z 轴观测点的夹角,φ 为 Y 轴与观测点在 XY 平面投影的夹角。由式(2)~(4)可知,磁偶极子共有 3 个类型的波,它们的强度分别随距离按 $1/r^3$、$1/r^2$、$1/r$ 减少,即距离增加一倍时,这3 种波能量分别衰减 18、12 和 6 dB。因此,在空间条件允许的情况下,增加干扰源与敏感设备间距离可达到降低干扰耦合度的目的。在激光系统调试期间,激光控制子系统的变频器曾出现了过流故障和功率模块损坏现象。经分析确认是由于变频器的输出电缆走线距离地面较高,激光主回路脉冲放电时,其周围会有水平电场或垂直磁场,如同一个接收天线,虽然经过一个带宽为 30 MHz、插入损耗为 30 dB的滤波器滤波,仍剩有 200 V 左右的感应电压沿变频器输出电缆进入变频器内部,导致干扰现象。将变频器输出电缆沿地面铺设并尽量减少了耦合距离与回路面积后,变频器稳定工作。

4.2　软件手段

软件方法实质上是采用冗余技术对故障进行屏蔽,对干扰响应进行掩盖,在干扰过后对干扰所造成的影响在功能上进行补偿,实现容错自救,同时在调试和运行中用容错技术对干扰进行多层次、多角度的预防、屏蔽和监测。EMC 设计软件手段主要包括:数据冗余纠错、冗余化操作和数据鉴别等抑噪和纠错技术等。

5　测试结果

大功率 TEA CO_2激光系统经过 EMC 设计后,系统工作稳定可靠,同时对相邻电子计算机设备没有产生电磁干扰。采用德国 LANGER 公司提供的 RF1 磁场探头组,并利用 TDS3032B 示波器内置的快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform Algorithm,FFT)功能测得距激光系统主放电回路 1 m 处的电磁干扰瞬态波形如图 4 所示(图 4 中,上方信号为电流 I_2产生干扰的时域图,下方细线

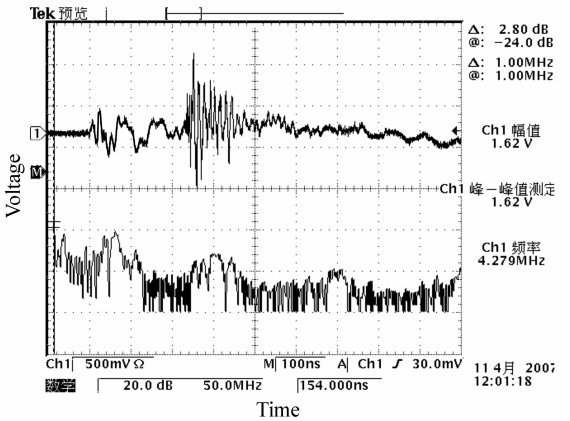
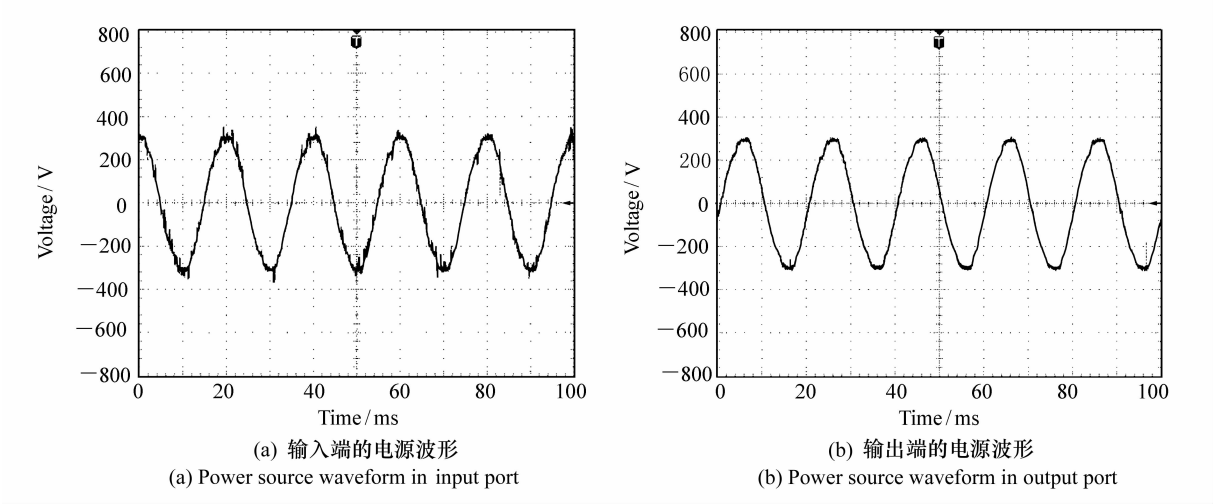


图 4　距主放电回路 1 m 处的磁场测试波结果

Fig. 4　Test result of magnetic field 1 m from main discharge circuit loop

为用 FFT 功能得到的整个干扰频谱曲线,FFT 单位是 dBVRSM)。由图 4 中可以看出两个主放电脉冲电流 I_1、I_2形成的干扰磁场经过屏蔽后已经很微弱,FFT 中 1 MHz 点干扰最强,约有 96 dBμV/m,满足 GJB151A-97 中 RS103 环境场强要求。用 TDS2012 示波器 P6015A 高压探极分别测试了电源净化网络前后电源线上的波形,见图 5(a)及图 5(b)。从图 5(a)可看出电源上叠加的干扰电压最大可达 200 V,当该高频干扰电压与电网的50 Hz电源电压极性相同并且叠加在最大值处时,则最高电压可达 511 V,很容易损坏或干扰激光控制子系统。从图 5(b)可以看出,电源线中的干扰经过电源净化网络后,干扰电压已<10 V,此剩余干扰电压再经过直流电源后,可以被抑制掉。



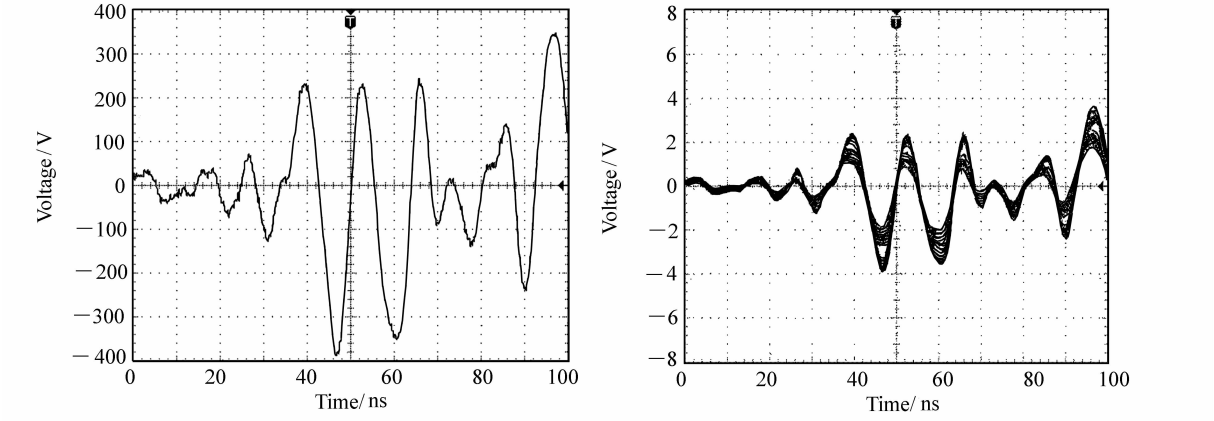
(a) 输入端的电源波形
(a) Power source waveform in input port

(b) 输出端的电源波形
(b) Power source waveform in output port

图 5 电源净化网络前后电源线上的波形

Fig. 5 Power source waveforms of input port and output port

同时测试了采取上述电磁兼容措施前后,Pt100 传感器信号线上的波形见图 6(a)与图 6(b)。比较图 6(a)与图 6(b)可看出,Pt100 传感器信号线上的干扰电压的峰-峰值由 720 V 降为 6 V,即降低了 40 dB。



(a) Pt100传感器信号受到辐射干扰的波形
(a) Signal waveform of Pt100 sensor under interference

(b) Pt100传感器信号经过抗干扰措施后的波形
(b) Signal waveform of Pt100 sensor after anti-interference

图 6 Pt100 传感器信号线上的波形

Fig. 6 Signal waveforms of Pt100 sensor

6　结　论

大功率 TEA CO_2激光系统的强 EMI 主要来源于激光主放电回路和脉冲火花开关,其次是预电离放电、触发脉冲和电源。对高压电源、主放电回路和控制子系统进行屏蔽有效地抑制了 EMI 的传播;系统合理布局、布线及滤波隔离分别有效地降低了 EMI 空间干扰耦合度并抑制了传导干扰;软件抗干扰程序具有很好的抑噪能力。上述 EMC 设计已成功应用于数千瓦级大功率 TEA CO_2激光系统。结果表明,对 EMI 源进行屏蔽,提高控制子系统硬件抑噪能力等措施,是抑制 EMI、保证激光系统硬件不受损坏的主要手段。软件本身不属于电磁兼容的范畴,但它可以作为一种容错技术在 EMC 中应用。在噪声突破硬件警戒线后采用软件容噪、纠错,可以提高激光系统的可靠性。

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] PHULLUKE R,AGRAWAL V,KUMAR G,*et al*.. Conducted EMI issues and the design of EMI filters for AC power supply feeding a copper vapour type laser[C]. *IEEE Proceedings of the International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility*,2002:267-271.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 李殿军,杨贵龙. TEA CO_2激光器主放电延迟时间对效率的影响[J]. 光学 精密工程,2006,14(5):807-810.
LI D J, YANG G L. Impact of main discharge delay time on optoelectronic conversion efficiency in TEA CO_2 laser[J]. *Opt. Precision Eng.*,2006,14(5):807-810. (in Chinese)

[6] 孟范江,郭立红,杨贵龙,等. 大功率 TEA CO_2激光器系统中电磁干扰的抑制[J]. 强激光与粒子束,2008,20(2):177-181.
MENG F J,GUO L H,YANG G L,*et al*.. Suppression of electromagnetic interference in high power TEA CO_2 laser system [J]. *High Power Laser and Particle Beams*,2008,20(2):177-182. (in Chinese)

[7] 邹逢兴,张湘平,李汉军,等. 电磁兼容技术[M]. 北京:国防工业出版社,2005:49.
ZOU F X,ZHANG X P,LI H J,*et at*.. *Electromagnetic Compatibility Technology*[M]. Beijing:National Defense Industry Press,2005:49. (in Chinese)

[8] 何孟兵,王清玲,贺臣,等. 旋转电弧对火化间隙开关电极烧蚀的影响[J]. 强激光与粒子束,2004,16(11):1468-1472.
HE M B,WANG Q L,HE C,*et al*.. Influence of rotary arc on the feature and electrode erosion of spark switch[J]. *High Power Laser and Particle Beams*,2004,16 (11):1468-1472. (in Chinese)

[9] 白同云,吕晓德. 电磁兼容设计[M]. 北京:北京邮电大学出版社,2001:28.
BAI T Y, LV X D. *Electromagnetic Compatibility Design*[M]. Beijing:Beijing University of Posts and Telecommunications Press,2001:28. (in Chinese)

[10] 周旭. 电子设备防干扰原理与技术[M]. 北京:国防工业出版社,2005:106-124.
ZHOU X. *Anti-jamming Principles and Technologies of Electronic Equipment*[M]. Beijing:National Defense Industrial Press,2005:106-124. (in Chinese)

[11] 林国荣. 电磁干扰及控制[M]. 北京:电子工业出版社,2003:211.
LIN G R. *Electromagnetic Interference and Control*[M]. Beijing:Electronics Industry Press,2003:211. (in Chinese)

作者简介:孟范江(1957—),男,黑龙江牡丹江人,副研究员,主要从事高功率激光器控制系统及高压电源方面的研究。
E-mail:mengfj2006@ sohu. com