

# 光学和图像处理设备中的电磁兼容性设计

余帆, 李德华, 薛雷

(华中科技大学 人工智能研究所 图象识别与人工智能研究所教育部重点实验室, 湖北武汉 430074)

**摘要:** 为了提高获取的三维模型精度, 提出了光学和图像处理设备上消除电磁干扰信号的方法。首先运用幅度和频率筛选预测到电磁骚扰源是交流电机伺服器, 然后通过计算得到设备接地回路中的共模骚扰电压确定耦合途径, 最后依据各部分敏感度指数找到了骚扰接受敏感设备 CCD 摄像机。根据分析和计算, 将该方法运用于多关节机械臂式三维信息获取系统中, 取得了很好的效果。通过接地、隔离、滤波、屏蔽等方法逐个进行了符合设备电磁兼容规范的电磁兼容性设计, 最终使设备符合了电磁兼容性规范的设计要求。

**关键词:** 图像处理; 电磁兼容; 三维模型获取

**中图分类号:** TP752. 1 **文献标识码:** A

## Electromagnetic compatibility design in optics and image processing equipment

YU Fan, LI De-hua, XUE Lei

*(Institute of Pattern Recognition & Artificial Intelligence / The Key  
Laboratory Under the Department of Education,  
Institute of Artificial Intelligence, Huazhong University  
of Science and Technology, Wuhan 430074, China)*

**Abstract:** In order to improve the precision of 3D model obtained, suggestions were made for the elimination of electromagnetic interference signals on optics and image processing equipment. The alternator servo was first identified as the electromagnetic interference source through amplitude and frequency screening, the coupling path was then determined by calculating the interference voltage in the equipment grounding loop, and the CCD camera was finally identified as the sensitive interference receiver through comparison of components' sensitivity indexes. Electromagnetic compatibility designs were made one after another against the equipment electromagnetic compatibility specifications through analyses and calculations and by grounding, isolating, filtering and shielding.

**Key words:** image processing; electromagnetic compatibility; 3D mode acquisition

### 1 引言

电磁干扰是指电磁骚扰引起的设备、传输通道或系统性能的下降。电磁兼容性 (EMC) 就是

指系统在电磁环境中的适应能力, 及其不对该环境中的任何事物构成不能承受的电磁骚扰的能力。随着现代科学技术的发展, 电气及电子设备的数量及种类不断增加, 电磁环境日益复杂。在这种复杂的电磁环境中, 如何有效地减少系统相

互间的电磁影响, 使各种设备正常运转, 需要在新产品设计开始的时候就考虑电磁兼容性的问题, 否则, 设计试制完成后, 若发生电磁干扰问题, 就很难解决。为了实现电磁兼容, 要从 5 个方面进行研究: (1) 对电磁骚扰源的研究; (2) 对电磁骚扰传播特性的研究; (3) 对于敏感设备抗干扰能力的研究; (4) 对于测量设备、测量方法与数据处理方法的研究; (5) 对于系统内、系统间电磁兼容性的研究<sup>[1]</sup>。

进行电磁兼容性设计时, 首先就要分析电磁环境, 电磁环境就是设备、分系统或系统在执行规定任务时可能遇到的各种电磁骚扰源的数量、种类、分布以及在不同频率范围内功率或场强随时间的分布等有关电磁作用状态的总和。在分析电磁环境时, 还应考虑骚扰脉冲的重复频率、脉冲宽度、频谱覆盖范围、骚扰源天线主瓣和副瓣以及极化等因素, 因此设计时所要考虑的系统是非常复杂的。设计时, 通常依据一些场和路的算法理论用计算机模拟的方法进行计算, 然而所得的结果与实际的情况往往有偏差。在一些工程实践中, 已经比较广泛地采用了一些电磁兼容的技术, 但是对于某些特定的电磁干扰来说, 却又很

难找到因地制宜的解决方法, 使得最终的效果较差。

在实际应用中, 就要考虑以上提及的 5 个方面, 从预测入手, 对噪声源、噪声接收电路、耦合通道等几个方面进行分析。在测量的基础上, 建立恰当的数学模型并且根据实际工程需要进行合理的近似, 在实践中不断用实际参数替换模拟参数得到用来解决电磁骚扰问题的方法和手段, 由此达到电磁兼容设计的最终目的。

本文是以物体光学和图像处理设备为工程背景, 在已有的实验条件下<sup>[2]</sup>, 讨论了电磁兼容的预测模型和计算方法, 并且从工程应用的角度提出了综合设计和层次设计的方法原则, 并经过实践达到设备电磁兼容性指标的目的。

## 2 电磁兼容的预测

### 2.1 系统简介

如图 1 所示, 光学和图像处理设备是由高性能计算机、交流电机伺服器、交流电机、低功率脉冲激光器、摄像机和控制电路等部分组成的<sup>[3]</sup>。

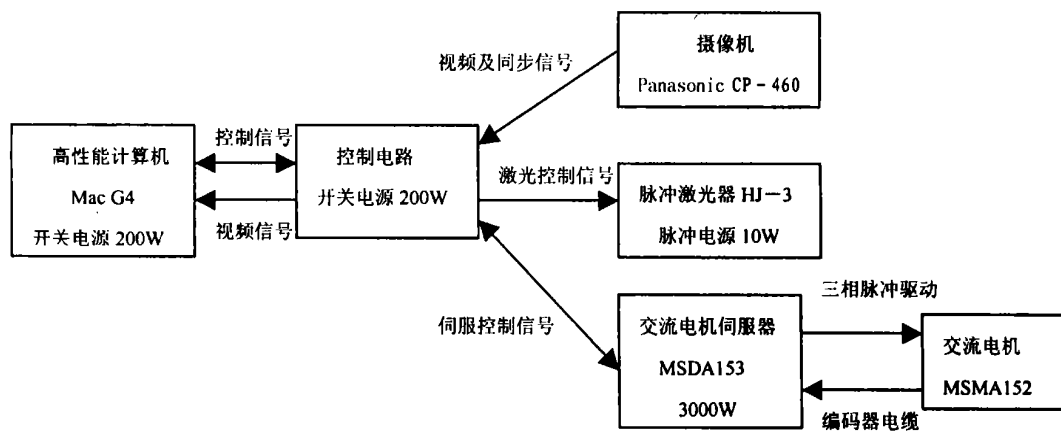


图 1 光学和图像处理设备系统结构图

Fig. 1 System structure for the optical & image processing equipment

该设备利用结构光的方法, 通过用激光器扫描物体表面而获得物体表面的三维空间坐标和色彩信息。其中机械转台和升降架部分是由大功率交流伺服电机驱动。在上面的系统结构图中, 高性能计算机、控制电路和交流电机伺服器是放置在一个电气控制柜中, 而摄像机、脉冲激光器和

交流电机则安装在机械装置上。两者之间距离为 7~8 m。在安装的时候, 由于实际的需要, 视频及同步信号线, 激光控制信号线, 驱动器编码电缆, 三相脉冲驱动线被安置在同一个电缆走线槽中。整个系统强电和弱电设备, 数字和模拟电路交错在一起, 使得整个电磁兼容性的预测比较复

杂, 所以在工作之前, 必须做好电磁兼容性的设计。

### 2. 2. 1 骚扰源的分析

该系统处在一个比较复杂的电磁环境中, 存在多个电磁骚扰源。为了能准确地对系统所在电磁环境进行描述, 需要对其进行计算和测量。形成噪声 3 要素中的骚扰源, 就首当其冲。这时要注意的是同一个设备在一个电磁环境中, 往往既是骚扰源又是敏感设备。在一个实际工程中, 一般都是按照先粗后细的原则, 剔除那些能够确定的骚扰源, 对剩下的骚扰源采用不同的分析模型处理。一般分为 4 个阶段: 幅度筛选; 频率筛选; 详细筛选; 性能预测。

在幅度筛选中, 考虑发射-响应幅度特征, 比较粗略地分析频率、时间、距离和方向的影响。幅度筛选所采用的每个输入函数, 尽可能是简单、合理、保守的近似式, 这样可以把占多数的弱骚扰和少数的强骚扰分开, 从而大大地缩小分析问题的范围。频率筛选建立在幅度筛选的基础上, 通过考虑附加的骚扰抑制制度来详细处理频率变量之间的相互关系。在详细筛选中, 主要是完成时间、距离和方向变量的修正, 确定骚扰的概率分布和时间的依从关系统计。最后, 在性能预测阶段, 考虑周围发射机和接收机的调制特征和响应特性, 计算接收机输入端的潜在骚扰、信号电平及接收机噪声电平, 从而确定系统信噪比及信干噪比。在上述 4 级预测筛选中, 幅度筛选可将超过 90% 的弱骚扰情况剔除, 这将大大减小后续预测的工作量。预测中所用的发射、接收设备的原始参数可由设计指标获得, 有些参量则根据经验数据或测量结果获得<sup>[4-5]</sup>。

在系统中, 首先可以用在电磁兼容设计和过程中常用的单步法<sup>[6]</sup>剔除一些肯定的骚扰源。系统中电磁骚扰产生的骚扰电压经过数字示波器的捕捉和测量, 大约为 0.4~0.8 V 左右, 那么根据幅度筛选的原则去除弱骚扰源, 就可以列出剩下的 4 个主要骚扰源: 脉冲激光器 (工作频率为 25 Hz)、工频电源 (50 Hz)、开关电源 (10~20 kHz)、伺服电机 (1~100 MHz)。

其次是频率筛选。对设备的公共通道进行频谱测量, 使用计算机对其进行综合, 获得了系统的骚扰频谱图, 如图 2 所示。其中  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ 、 $\alpha_4$  分别代表上述的 4 个骚扰源频谱, 电平单位根据国

际标准 (CISPR 22:1993) 《信息技术设备的无线电骚扰特性的测量方法及限值》(Limits and methods of measurement of radio disturbance characteristics of information technology equipment) 的规定选用分贝 (dB) 为单位。

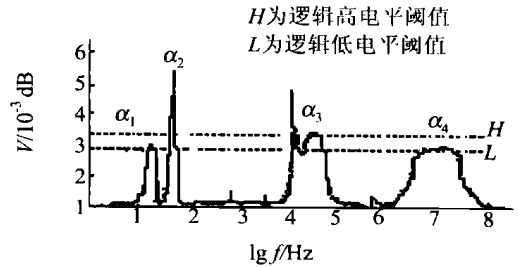


图 2 公共通道上的频谱图

Fig. 2 Different waveforms in common channel

对  $\alpha_4$  进行进一步测量得到它的高频波包。如图 3 所示。通过数字示波器, 可以得到波包的重复频率是 20 kHz, 其子波的振荡中心频率是 10 MHz。通过分析交流电机伺服器, 发现了这是因为交流电机是由交流电机伺服器产生 10 kHz 的大功率开关脉冲来驱动的。一方面, 开关脉冲的功率较大而且前后的边缘陡峭, 产生了丰富的高次谐波; 另一方面交流电动机的杂散参数使脉冲的边缘产生阻尼振荡, 在这两种因素的综合作用下出现了  $\alpha_4$  的情况。

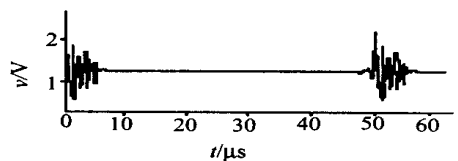


图 3  $\alpha_4$  的高频波包

Fig. 3 High frequency waveform of  $\alpha_4$

这样, 通过前两个方法已经基本确定了骚扰源, 可通过详细筛选和性能分析来进一步说明。

### 2. 2. 2 骚扰途径的分析

由于系统中没有天线, 所以可以只讨论传导耦合。对于传导耦合, 耦合路径包括电阻、电感和电容转移。传导干扰的转移在信号源与接受体之间需要一条完整的路径, 这条路径由配线、电源、共同阻抗、设备机箱、支撑金属结构、接地平面、互感或互容所组成。因此, 任何两个电路

拥有回路直接连接, 就会产生传导转移。这条回路可能是其他的金属导线, 共同的接地回路, 互感或互容。导线上经由传导耦合产生的电流决定于欧姆定律  $I = U/Z$ , 其中  $I$  为电流(单位安培),  $U$  为电压(单位伏特),  $Z$  为阻抗(单位欧姆)。

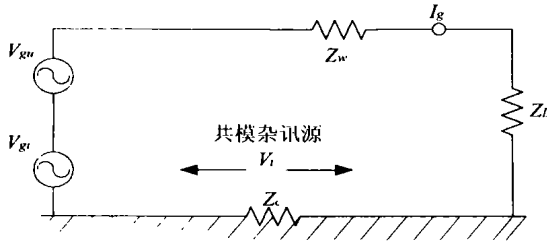


图 4 接地回路电路图

Fig. 4 Circuit of the grounding loop

流经接地面的电流  $I_g$  可以用下式表示:

$$I_g = \frac{V_g}{Z_g + Z_L + Z_W + Z_C}, \quad (1)$$

其中:  $V_g = V_{gi} + V_{gu}$  为推动源电压;  $V_{gi}$  为直流电源;  $V_{gu}$  为其他频率的电磁干扰源, 包括电力线上的谐波;  $Z_g$  为电源的阻抗;  $Z_L$  为负载阻抗;  $Z_W$  为电源至负载间导线的阻抗;  $Z_C$  为接地面的阻抗。

当交流电源的地线和负载 (也就是交流伺服电机) 的地线都接在 3 mm 厚的钢板面时, 负载阻抗为  $Z_L = V^2/P_L = (220)^2/3\ 000 = 16.13 \Omega$ 。因为负载阻抗远远大于电源至负载间的导线阻抗, 所以式 (1) 中  $I_{gi} = V_{gi}/Z_L = 220/16.13 = 13.64 \text{ A}$ 。3 mm 钢板的  $Z_C$  值约为 40 mΩ (10 MHz 的时候), 故共模骚扰电压为:  $V_{ii} = I_{gi} \times Z_C = 13.64 \times 40 = 0.55 \text{ V}$ 。众所周知在视频信号中, 既有交流分量又有直流分量。固定的基准电平发生变化, 也就是说有直流分量的影响, 就会使得视频信号的传输系统动态范围增加, 从而破坏了彩色底色平衡而产生畸变。在图像处理系统中间, 0.55 V 的骚扰电压对视频信号的影响是非常严重的, 它对图像质量的影响直接导致了后续软件处理的负载度的增加。虽然通过软件的滤波也可以最后达到要求, 但是从系统的可靠性、适应性等工程要求来看, 这些骚扰电压的影响是不容忽视的。另外, 传导耦合中间的计算, 还可以采用其他的模型来进行<sup>[7-8]</sup>。这样一来, 基本可以确定骚扰是通过公共回路中的传导干扰来传播的。下面将从接收器方面来进行更进一步的分析。

### 2. 2. 3 对敏感设备的分析

敏感设备指受干扰影响的系统、设备和电流, 其受干扰的程度用敏感度表示。所谓敏感度指敏感设备对干扰所呈现的响应程度, 而敏感度门限指敏感设备最小可以辨别的不希望有的响应信号电平, 也就是敏感电平的最小值。由于是进行保护性设计, 所以折衷选择来确定干扰极限值的基本出发点。

如果受干扰的敏感设备不只一个, 应该选择敏感度最高的敏感设备为代表, 以建立受干扰者的模型, 为此引入最大敏感度指数的概念, 对于数字电路定义最大敏感度指数为

$$S_d = 20 \lg\left(\frac{B}{N_{mit}}\right), \quad (2)$$

其中:  $S_d$  为数字电路的最大敏感度指数, 单位为 dB;  $B$  为脉冲的频带宽度,  $B = \frac{1}{\pi\tau}$ , 其中  $\tau$  为脉冲的上升时间;  $N_{mit}$  为脉冲电路的敏感度门限, 单位为 V, 低于该电平的干扰不会影响电路的工作, 对于 TTL 电路一般取  $N_{mit} = 0.4 \text{ V}$ 。

对于模拟电路系统, 最大敏感度指数定义为

$$S_a = (198 + 10 \lg \frac{B}{R} - F), \quad (3)$$

其中:  $S_a$  为模拟电路最大敏感度指数, 单位为 dB;  $B$  为模拟电路的频带宽度;  $R$  为受干扰者的输入阻抗, 单位为  $\Omega$ ;  $F$  为噪声系数, 对于未知情况, 一般取  $F = 10 \text{ dB}$ 。

表 1 中示出了在系统中根据式 (2) 和式 (3) 计算的结果, 可以发现摄像机具有最大敏感度指数, 而 TTL 数字电路  $S_d$  为最小, 说明数字电路抗骚扰能力较强, 而模拟电路的抗骚扰能力较弱。

表 1 4 类敏感设备的最大敏感度指数

Tab. 1 Maximal sensitive exponents of the four sensitive equipment

敏感设备	频宽	$N_{mit}$	$R$	最大敏感度指数
TTL 数字电路	30 MHz	0.3 V		160 dB
脉冲激光器	33 MHz	0.3 V		167 dB
场效应管放大器	1 MHz		10 MΩ	178 dB
摄像机	5.75 MHz		50 Ω	191 dB

通过以上 3 个方面的分析, 基本确定了系统中电磁干扰环境的情况。下面的工作就是进行合

理的电磁兼容工程设计, 以改善系统的电磁环境。

### 3 电磁兼容性的工程设计

前面已经分析了系统所处的电磁环境, 找出了周围可能存在的骚扰源, 并且说明了在指定频率范围(也就是摄像机的视频信号和视频同步信号的频带)内可能产生的骚扰。通过对电磁骚扰的分析和预测, 对光学和图像处理设备中存在的骚扰进行了定量的估计和计算, 避免了过高的设计措施造成不应有的浪费, 同时也避免了系统建成后才发现不兼容而造成的难题, 因为对于完工后的系统不兼容问题, 要花费很大的代价去修改设计、重新调整布局, 不仅造成很大浪费而且难于彻底解决。为了保证系统内及系统间的电磁兼容, 还规定了系统的电磁兼容性要求, 选取了电磁兼容标准与规范以及电磁兼容的保证措施, 对系统的参数也做了相应的规定。具体的对设备和电路的设计, 主要包括了接线、布线和电缆网的设计和滤波、屏蔽、接地与搭接等。针对本工程的特点, 所做设计如下。

首先, 由于交流伺服电机产生共模骚扰电压, 解决的最好方法就是对地线的设计。接地设计有两个基本目的: (1) 消除各电路电流流经 1 个公共地线阻抗时所产生的噪声电压; (2) 避免受磁场和地电位差的影响, 即不使其形成地环路。由于篇幅有限, 仅讨论信号接地的设计, 而不讨论保护接地的设计。信号接地就是在系统和设备中, 采用低阻抗的导线(或地平面)为各种电路提供具有共同参考电位的信号返回通路, 使流经该地线的各电路信号电流互不影响。在复杂的大系统中, 既有高频信号, 又有低频信号; 既有强电电路, 又有弱电电路; 既有频繁开关动作的设备, 又有极为敏感的弱信号装置。这样的综合系统中, 仅仅将电路按需要设置接地方式是不能满足电磁兼容性要求的, 必须分门别类地将不同类型的信号电路分成若干类别, 以同类电路构成接地系统。第 1 类是敏感信号和小信号“地”系统。包括低电平电路、弱信号检测电路、传感器输入电路、前级放大电路、混频器等, 由于这些电路工作电平低, 信号幅度弱小, 特别容易受到干扰而失效或降级, 因此其地线应避免混杂于

其他电路中。第 2 类是不敏感信号和大信号电路的地线系统, 包括高电平电路、末级放大器、大功率电路等。因为在这些电路中工作电流都比较大, 地线系统中的电流也比较大, 因此必须和小信号电路的地线分开设置, 否则通过地线的耦合作用必然对小信号电路造成干扰, 使电路不能正常工作。第 3 类是骚扰源设备地系统, 包括电动机、继电器、接触器等。由于这类元件在工作时产生火花或冲击电流等, 往往对电子电路产生严重的骚扰, 除了要采取屏蔽隔离技术外, 地线必须和电子电路分开设置。第 4 类是金属构件地, 包括机壳、底板、机门、面板等。

在工程实践中, 除了按照电路的性质分类接地的措施, 还要把数字信号地和模拟信号地分布设置, 交流电源地和直流电源地分开。

对上面提及的每一类而言, 还要依据单点接地和多点接地的原则分别采用, 或者采用混合接地的方式来减小地线骚扰。对于该设备, 骚扰信号的频率为 10 MHz, 则其波长  $\lambda = c/f = 30 \text{ m}$ , 那么当设备的接地线长度与  $\lambda/4 (7.5 \text{ m})$  可以比拟的时候, 就变得像一根终端短路的传输线, 而起不到“地”的作用。在工程实际中, 一般都以  $0.05 \lambda (1.5 \text{ m})$  为界, 因此设备中的接地线可能长于  $0.05 \lambda (1.5 \text{ m})$  时都采用多点接地。除了这种混合接地外, 对于脉冲激光器, 由于采用了数字电路来驱动, 所以采用了光耦来进行对地的隔离。由于光电耦合器是用光来传递信号, 从输入端(发光元件)传送到输出端(受光元件)的光电耦合器件使得输入和输出在电气上完全隔绝, 因而能够有效地抑制地回路骚扰。

对于直流电源和交流电源, 则通过采用隔离变压器阻隔地回路来对骚扰进行抑制<sup>[9]</sup>。

当然, 对于复杂的工程设计, 单单依靠接地的设计是不能够完全有效地消除电磁骚扰的。对于设备中交流伺服电机产生的高次谐波的骚扰, 采用了滤波的方法<sup>[10-11]</sup>。选用的滤波设备是高性能二级滤波器, 在 10 A 时的最大衰减为 88 dB, 16 A 时的最大衰减为 77 dB。前面计算的骚扰电压为 0.55 V, 按照 77 dB 的衰减计算, 加装了滤波器后的骚扰电压降为  $7.8 \times 10^{-5} \text{ V}$ , 远在 CCD 摄像机信号的灵敏度 40 mV 以内。实验中测量得到这种滤波器的衰减大约为 48 dB, 达到了电磁兼容设计的目的。

同时, 在分配连接器接脚和通信电缆时, 把低强度信号和高强度信号分开, 并且把接地线置于中间。对于比较容易受到干扰的信号线也采取屏蔽等方法给予保护<sup>[12-13]</sup>。另外对于 CCD 摄像机的降噪技术也有文章论述<sup>[14]</sup>。

使用的 CCD 摄像机, 输出视频信号的峰值 1.0 V, 灵敏度 40 mV, 约 20 mV 左右。骚扰电平对信号的影响几乎消除, 设计达到了电磁兼容设计规范的目的。

## 4 结 论

电子系统的噪声骚扰是一个很重要的问题, 在电子设备迅速发展的今天, 这个问题显得越来越突出, 在系统设计时考虑电磁兼容性也就成了现在电子电路设计的一个关键步骤。本文讨论了光学和图像处理专用系统研制过程中碰到的一些电磁兼容问题, 对其进行了分析, 提出了一系列解决办法。在最后的工程设计中, 按照先预测, 再逐步模拟计算的方法是可以使系统的电磁兼容性问题得到很好的解决。采用这种方法在多关节机械臂式三维信息获取系统<sup>[15]</sup>中也取得了很好的效果。

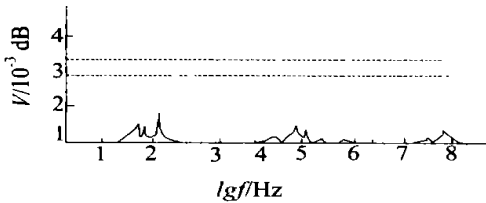


图5 电磁兼容综合设计后公共通道上的频谱图

Fig. 5 Waveform in the common channel with the EMC designs

最后经过设计, 利用频谱分析仪测得光学和图像处理设备在采取电磁兼容性设计后的骚扰频谱, 然后用计算机对其进行综合, 得到图5。可以发现, 原来的频谱已经变得很平坦, 骚扰电平也已经降到系统电磁兼容规范容许的范围以内(对于

## 参考文献:

- [1] OSBURN D M. The role of systems EMC analysis in large system EMC management by equipment EMC assurance [C]. *Electromagnetic Compatibility, 1991. Symposium Record. IEEE 1991 International Symposium on*, 1991: 189-192.
- [2] MILICAN P G, NESBIT T. A low cost EMC test system using the 'Golden Product' test method [C]. *Low Cost EMC Testing, IEE Colloquium on*, Sep, 21, 1993.
- [3] 李德华, 胡汉平, 金刚. 从平面到立体-三维扫描技术 [J]. *计算机世界*, 1999, 7 (751), 3-5.  
LI D H, HU H P, JIN G. From plane to solid technology of the 3D scanning [J]. *Computer World*. 1999, 7 (751): 3-5 (in Chinese).
- [4] 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.  
BAI T Y, LU X D. *The design of electromagnetic compatibility* [M]. Beijing: The Press Inc. of Beijing University of Posts and Telecommunications. 2001. (in Chinese).
- [5] 亨利 W O. 电子系统噪声抑制技术 [M]. 北京: 人民铁道出版社, 1978.  
HENRY W O. *Noise suppression technology in electronic system* [M]. Beijing: The Press Inc. of the People Railway, 1978. (in Chinese).
- [6] 刘鹏程, 邱扬. 电磁兼容原理及技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1993.  
LIU P CH, QIU Y. *Theory & Technology of EMC* [M]. Beijing: The Press Inc. of Higher Education, 1993. (in Chinese).
- [7] 林国荣. 电磁干扰及控制 [M]. 世界图书出版公司, 1990.  
LIN G R. *EMC interfere & control* [M]. The Press Inc. of the World Books. 1990. (in Chinese).
- [8] 薛雷, 李德华, 何笑明, 等. 图像处理设备的电磁兼容预测与工程应用 [J]. *武汉大学学报 (理学版)*, 2003, 2, 121-126.  
XUE L, LI D H, HE X M, et al. Prognostication and engineering application of electromagnetic compatibility for image processing equipment [J]. *Journal of Wuhan University*, 2003, 2, 121-126. (in Chinese).
- [9] 王定华, 赵家升. 电磁兼容原理与设计 [M]. 西安: 电子科技大学, 1995.  
WANG D H, ZHAO J SH. *The principles and design of EMC* [M]. Xi'an: The Press Inc. of the Univ. of Electronic Sci. and Tech.

1995. (in Chinese)
- [10] Bernhard Keiser. 电磁干扰与防护 [M]. 北京: 世界图书出版社, 1990.  
KEISER B. *EMC Intefere & dfending* [M]. Beijing: The Press Inc. of the World Books. 1990. (in Chinese)
- [11] 蔡仁钢. 电磁兼容原理、设计和预测技术 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1997.  
CAI R G. *EMC theory, design and forecasting* [M]. Beijing: The Press Inc. of the Beijing Univ. of Aeronautics & Astronautics. 1997. (in Chinese)
- [12] 程淑凤, 马蔚宇, 马晓庆. 电磁兼容试验技术 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2001.  
CHENG SH F, MA W Y, MA X Q. *EMC examining technology* [M]. Beijing: The Press Inc. of the Beijing Univ. of Posts & Telecommunications, 2001. (in Chinese).
- [13] Keith Armstrong. Best EMC practices for electrical and electronic assembly and installation [C]. *Electromagnetic Compatibility in Heavy Power Installations, IEE Colloquium*, 1999.
- [14] 佟受峰, 阮锦, 郝志航. CCD 图像传感器降噪技术的研究 [J]. 光学 精密工程, 2000, 8 (2): 140-145.  
TONG SH F, RUAN J, HAO ZH H. Noise reducing scheme on output signal of CCD [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8 (2): 140-145 (in Chinese)
- [15] 邹璇, 李德华. 多关节机械臂的坐标模型和参数标定 [J]. 光学 精密工程, 2001, 9 (3): 252-256.  
ZHOU X, LI D H. Coordinate model and calibration algorithm of multi joint arm [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9 (3): 252-256. (in Chinese)

作者简介: 余帆 (1979-), 男, 河南人, 华中科技大学人工智能研究所 (图象识别与人工智能研究所教育部重点实验室) 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理、智能系统, E-mail: michaelyufan@sina.com;  
李德华 (1946-), 男, 广东人, 华中科技大学人工智能研究所 (图象识别与人工智能研究所教育部重点实验室) 教授、博士生导师, 主要研究方向为模式识别、人工智能、智能控制和思维科学等;  
薛雷 (1963-), 男, 河南人, 华中科技大学人工智能研究所 (图象识别与人工智能研究所教育部重点实验室) 博士研究生, 主要研究方向为图像处理和智能系统。