

引用格式:马志强,孙艳丽.基于自适应光源采样的软阴影高效逼真绘制[J].电光与控制,2019,26(11):99-104. MA Z Q, SUN Y L. Efficient and high-quality soft shadow rendering based on adaptive light source sampling[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(11):99-104.

基于自适应光源采样的软阴影高效逼真绘制

马志强, 孙艳丽

(中国电子科技集团公司电子科学研究院,北京 100041)

摘要:提出一种基于自适应光源采样的软阴影高效逼真绘制方法。首先,通过对面光源的部分区域进行规则采样生成多张阴影图,再将阴影图重投影到视点下,在屏幕空间根据比较生成的阴影差值来判断是否需要进一步细分光源采样点,从而实现自适应的逐层采样,避免生成对软阴影质量没有贡献的阴影图,在保持软阴影逼真绘制的同时,较好地提高绘制效率。

关键词:阴影图;自适应光源采样;软阴影;逼真绘制

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.11.021

Efficient and High-Quality Soft Shadow Rendering Based on Adaptive Light Source Sampling

MA Zhi-qiang, SUN Yan-li

(Academy of Electronic and Information Technology of CETC, Beijing 100041, China)

Abstract: An efficient high-quality soft shadow rendering method based on adaptive light source sampling is proposed. First, multiple shadow maps are generated by regular sampling of some areas of the surface light source, and then the shadow maps are re-projected to the viewpoint. The shadow difference value in image space is used to determine if it is necessary to further subdivide light source sampling points, so as to realize adaptive layer-by-layer sampling and avoid generating shadow maps that do not contribute to soft shadow quality. The proposed algorithm can not only keep the soft shadow realistic, but also improve the rendering efficiency.

Key words: shadow map; adaptive light source sampling; soft shadow; high-quality rendering

0 引言

计算机图形学技术在近几年得到迅猛发展,很多领域都对绘制图像的真实感有了更高的要求,而且对高真实感图像的需求更大。影响图像真实感的一个重要因素就是阴影,它反映了光源对物体的照射信息,对人们认知世界中物体的位置关系起着非常重要的作用。准确的阴影效果能帮助观察者理解物体的空间位置,从而能增强虚拟场景中的真实感,能使场景显得更加逼真^[1]。然而,在动态三维场景中如何绘制出高质量且具有强真实感的阴影仍然是一个挑战。

这些年,人们已经提出了很多关于软阴影生成的方法,主要集中在对于阴影图算法^[2-4]和阴影体^[5]算法的改进及扩展的研究上。因为基于物理的软阴影生

成方法需要大量的可见性计算,现在的交互式应用大多数采用基于阴影图^[6]的方法,通过启发式方法来近似软阴影的半影区,但该方法的缺点在于,由于只对光源上一个点进行了采样,不能够精确地计算面光源光照所产生的软阴影边界。文献[7]提出了PCSS(Percentage-Closer Soft Shadows)方法,只需要一次光源采样(一张阴影图)就可以生成精度自适应的软阴影;文献[8]提出了方差阴影图方法,通过在深度缓存中存储的深度分布的平均值和方差,使得近似软阴影的绘制达到实时。以上算法均是基于单张阴影图的绘制,为了提升软阴影的绘制精度,文献[9-13]提出了一类反投影算法,实现软阴影的精准绘制,但将大量的阴影图纹元反投影,影响绘制效率;文献[14]提出将多张阴影图的可见性信息存在一个预处理的三维压缩可见性数据结构中,用以生成软阴影;文献[15]随后利用CUDA支持的非规则数据结构,准确地计算每个像素的阴影值。近两年出现的基于屏幕空间的延时阴影

收稿日期:2018-10-18

修回日期:2018-12-19

作者简介:马志强(1982—),男,山东临沂人,博士,高工,研究方向为计算机图形学。

映射算法^[16]和基于 BVH 的自适应阴影图算法^[17],虽能提高阴影渲染效率,但渲染质量有待提升。

对面光源进行规则采样生成多张阴影图的做法能生成高质量的软阴影效果,但可多遍生成阴影图使得该算法效率很低。通过研究发现,当相机离阴影较远时,软阴影绘制只会利用到部分光源采样点得到的阴影图。为避免生成对软阴影质量没有贡献的阴影图,本文提出一种自适应方法对光源进行采样。本文采用的算法属于利用在光源多处采样阴影图来绘制软阴影的技术,是一种高质量的软阴影绘制算法:首先,对面光源的部分区域进行采样,再将阴影图重投影到视点下,最后通过比较生成的阴影差值来判断是否需要进一步细分采样点,从而实现自适应的逐层采样,避免生成不必要的阴影图,在保持软阴影逼真绘制的同时,较好地提高绘制效率。

1 算法整体流程

本文充分利用逐层细化采样的思想,提出了一种基于多阴影图的软阴影生成方法。先对面光源边界上的初始采样点进行采样,将生成的阴影图重投影到视点下,通过计算屏幕上每个像素对应的空间点的可见光源采样点数目,并统计每个像素与周围邻近像素点差异的情况,来判断是否需要细化光源采样点,以此来逐层细化必要的光源采样点,生成相应的阴影图,最后利用这些阴影图生成出高质量的软阴影。该方法在保证软阴影高质量的同时,避免了对软阴影质量提升没有贡献的阴影图的生成,从而提高了高质量软阴影的绘制效率。算法流程如图 1 所示。

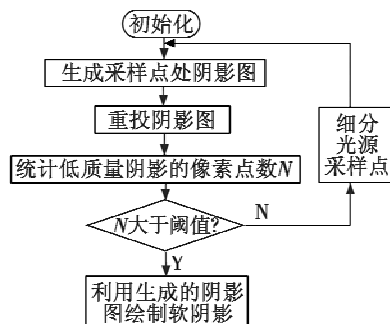


图 1 自适应光源采样的高质量软阴影生成算法流程图

Fig. 1 Flow chart of high-quality soft shadow generation algorithm based on adaptive light source sampling
详细步骤如下。

1) 初始化阶段,将面光源边界上的点(本文采用矩形面光源说明算法,此处可取矩形 4 个顶点)作为初始待采样点。

2) 生成采样点处阴影图,将相机移动到待采样点位置,对整个场景进行一遍渲染,生成相应阴影图。

3) 重投影阴影图,将步骤 2) 中生成的 4 张阴影图重

投到视点下。

4) 统计低质量阴影的像素点,根据视点下每个像素与其周围像素对光源采样点可见情况的比较来判断该像素点的阴影质量,并对低质量阴影的像素点进行统计。

5) 细分光源采样点,如果步骤 4) 后需要细分采样点,则对面光源上采样点进行细分,然后重复步骤 2)、3) 和 4)。

6) 利用生成的阴影图绘制软阴影,如果步骤 4) 后不需要再细分采样点,则结束采样,利用已经采样得到的阴影图进行软阴影绘制。

2 自适应光源采样

自适应光源采样主要是通过重投阴影图、统计低质量阴影的像素点和细分光源采样点等步骤来自适应地对面光源进行采样,在保证绘制的高质量软阴影的同时,使生成的阴影图尽可能少,从而加速绘制高质量软阴影的效率。

2.1 重投阴影图

重投阴影图,即将阴影图重新投影到视点下,是判断当前考虑的 4 个光源采样点处的阴影图是否足够用来生成满足要求的软阴影的第一步。对视点下的每个像素查询当前生成的 4 张阴影图,输出处在照亮处对应的阴影图数目(表示照亮该像素对应的空间点的光源采样点数目),结果保存在与渲染目标纹理同大小的另一张名为比较图的纹理中。具体步骤如下:

1) 将相机移动到当前视点下;

2) 将先生成的要比较的阴影图和相应的变换矩阵传送到着色器;

3) 渲染场景,在片段着色器中将输出结果初始化为 0,再利用变换矩阵将每个片段(Fragment)对应的世界空间位置变换到阴影图生成的空间下,查询相应阴影图,如果该片段对于光源采样点的深度不大于查询其阴影图得到的深度,则说明该片段可以被这个采样点处光源照亮,片段的输出值加 1;

4) 将渲染结果输出保存在比较图中,比较图中的值称为比较值,则可知比较值从 0 到 4 变化,将其如图 2 所示可视化,0 到 4 的比较值分别用黑、红、绿、蓝、白 5 种颜色表示。

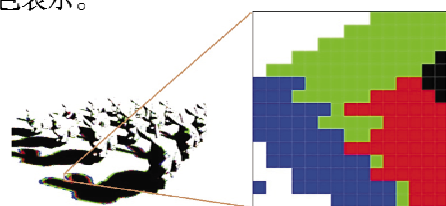


图 2 可视化阴影图的比较图

Fig. 2 Comparison chart of the visualization for shadow maps

2.2 统计低质量阴影的像素点

对于比较图中比较值非 0 且非 4 的像素,其比较值反映着半影区阴影的灰度。当与其周围 8 个像素的比较值都相同时,意味着以该像素为中心的 3×3 像素块的阴影灰度是一样的,则认为该像素点的阴影质量低。这种情况下,利用目前的 4 张阴影图在该像素处生成的阴影质量还可以提高。如图 3 所示,上面 2 个为阴影质量较高的像素点,下面 2 个像素点则为低质量阴影的像素点,其需要通过细分光源采样点得到更多阴影图来进一步提高阴影质量。

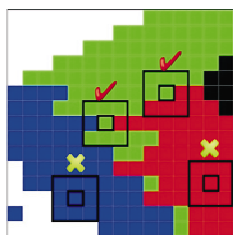


图 3 低质量阴影的像素点示意图
Fig. 3 Pixel plots of low-quality shadows

遮挡查询技术用来获取在一次或多次绘制调用后实际绘制的像素数目,该技术是基于 GPU 硬件支持的,常用来优化一些渲染过程。例如,基于遮挡查询技术的遮挡剔除算法,可以快速实现对场景中物体可见性的判断,从而避免渲染不可见物体造成的开销。本文利用 OpenGL 的遮挡查询功能实现对低质量阴影的像素点的统计,该过程同样可以在对比较图做一遍着色器处理后得到,其具体步骤如下:

- 1) 在着色器程序启动前开始遮挡查询;
- 2) 在片段着色器中查询该片段对应的比较值,如果为 0 或者为 4,则丢弃该片段;
- 3) 在片段着色器中查询该片段对应的周围 8 个邻近像素的比较值,如果存在与该片段对应的比较值不同的情况,则丢弃该片段;
- 4) 在着色器程序完成后结束遮挡查询,调用 OpenGL 的函数就可以查询到通过测试而没被丢弃的像素数目 P_N 。

2.3 细分光源采样点

P_N 是为了得到更高质量软阴影还可以细分的像素点数目。当 P_N 大于某个设定的阈值 P_M 时,则需要对面光源的采样点进行细分,以得到更多的阴影图来提高软阴影的质量。(通过 P_M 值可以判断是否细分光源采样点,当设定较大的 P_M 值时,生成的阴影图较少,绘制效率高,绘制质量低;反之,生成的阴影图较多,绘制效率低,绘制质量高)。

以矩形面光源为例来说明一种对面光源采样点进行细分的方法。如果当前采样点(图 4a)生成的阴影

图不足以提供高质量的软阴影效果,则应当在当前采样点形成的矩形内部细分出更多采样点(图 4b)。细分步骤为连接该光源矩形四边的中点,将其均匀分割成 4 个小矩形,则新形成的 5 个顶点为新细分出的采样点(图 4c)。

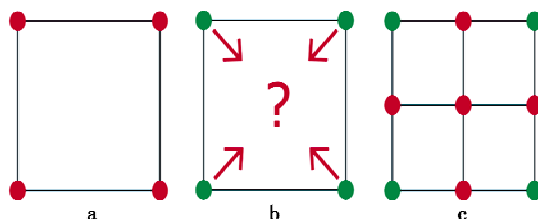


图 4 细分光源采样点

Fig. 4 Subdivision of light source sampling points

在生成新产生的光源采样点处的阴影图后,再分别对 4 个小矩形的顶点处采样的阴影图做本文叙述的重投影和统计低质量阴影像素点等操作。重复以上步骤,直到光源采样点不需要再细分或者光源采样点数目达到最大值为止。

3 基于多阴影图的软阴影绘制

在基于多阴影图的软阴影的绘制过程中,视点下场景光栅化得到的片段需要与所有的阴影图作比较。由于本文采用的自适应方法实际上是对光源进行分层细化的采样,所以在光源各处的采样密度是不一样的。规定最先采样的 4 个光源采样点处在第 0 层,同时规定第 d 层采样点细分出的新采样点所处层次为 $d + 1$ 。很显然,每层采样点形成的阴影图对最终软阴影的贡献值均不一样,且该贡献值随 d 增大而减小。因此,根据其生成阴影图对阴影值的贡献度给每个光源采样点 i 赋不同权重 w_i 。细分层次较多的采样区域,其采样密度较大,采样点的权重 w_i 为一个较小值;反之, w_i 为较大值。 w_i 的算式为

$$w_i = \frac{1}{(2^d + 1)^2} \quad (1)$$

式中: d 为光源采样点 i 所在的层次。

由于在逐层细化的过程中,光源采样点所处的层次 d 会改变,所以其对应的权重 w_i 也是不断变化的。如图 5a 所示,面光源顶点处的 4 个初始采样点和首次细分出的 5 个采样点在生成时分别处于第 0 层和第 1 层。然而事实上,这 9 个光源采样点生成的阴影图对阴影值的贡献度一样。此时初始采样点属于第 1 层,应该对其权重进行调整。考虑到在重投阴影图时的 4 张阴影图处于同一层次,此时对已生成阴影图的光源采样点进行权重调整,结果如图 5b 所示。对于采样点生成时权重如图 5c 的光源采样情况,重投阴影图调整后其对应的权重结果如图 5d 所示。

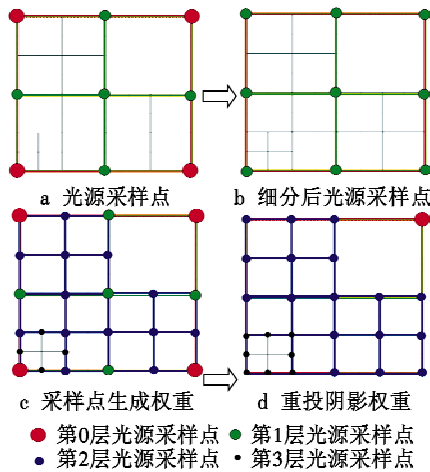


图 5 自适应光源采样点的权重

Fig. 5 Weight of adaptive light source sampling points

图 5b 中,如果面光源各部分的采样层次都相同,各采样点权重之和将为 1;图 5d 中,当面光源各部分的采样层次有差异时,各采样点的权重需要规范化,以保证最终得到的阴影系数在 0(本影区)和 1(照亮区)之间,即

$$w_i = \frac{w_i}{N_s} \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i$$

式中: N_s 为光源采样点的总数。

对光源采样点的权重进行调整后,就可以利用生成的阴影图绘制软阴影。绘制时将第 i 张阴影图测试得到的 0 或 1 的结果乘以相应的权重 w_i ,并相加就可以得到其被遮挡的百分比,以此获得阴影值。为了达到高质量的软阴影,往往用到足够多的阴影图进行比较测试,但是目前的图形硬件决定了一遍渲染中可采样的纹理数是有限的。

一种解决方法是采用延迟着色技术,其主要基于帧缓冲对象(Frame Buffer Object)技术,采用一个单通道的屏幕空间缓存区作为输出对象。对于每一张阴影图,可单独渲染一遍场景,将每个片段得到的硬阴影值(0 或 1)乘以相应的权重,并输出到缓存区相对应位置进行累加。整个过程用先期的深度测试来保证只有可见片段能被累加到缓存区。在 n 遍渲染过后,所有的阴影图比较都完成了,最后再用一遍渲染场景。对于每个屏幕空间的片段 $f(x, y)$,找出其对应的累加缓存区的值 $face(x, y)$ 作为遮挡百分比,并由此绘制出该像素的阴影值。由于当前的图形硬件不支持对渲染纹理同时进行读写操作,所以需要创建两个累加缓存区,来交替充当输入纹理和渲染输出目标,这无疑造成了新的 GPU 显存开销。

本文利用 OpenGL 3.1 的新特性——纹理数组和

统一缓冲对象(Uniform Buffer Object)进行多阴影图的软阴影绘制。新图形显示卡最多能将 2048 张大小和格式相同的纹理传给着色器程序,并且在着色器程序中能随机访问到这些纹理,同时,也最多能将 65 536 B 的外部数据以统一缓冲对象方式传给着色器程序,并在着色器程序中随机访问这些数据。因此,将生成的多张阴影图存放纹理数组中,将与之对应的投影矩阵也保存在统一缓冲对象中一起传给着色器,这样就可以在一遍渲染中,利用多张阴影图对软阴影进行绘制,将大大提升渲染效率。

4 实验结果与分析

本文算法的实验环境为 Intel Core(TM) i7-3770 3.40 GHz CPU, 6 GiB 内存, NVIDIA GeForce GTX570 显示卡,运行 WindowsXP 操作系统的 PC 机。实验程序基于 OpenGL 3.1 API, Shader 程序使用 Shader Model 3.0 方式编译。所使用的所有场景或者模型的相关信息如表 1 所示。

表 1 软阴影绘制实验所用的测试模型面片数

Table 1 The number of test models used in soft shadow rendering experiments

场景(模型)名称	三角面片数
兔子	1048.5×10^3
小树林	561.1×10^3
牛群	211.6×10^3
茶壶	320×10^3

实验采用了 4 种测试场景——兔子、小树林、牛群和茶壶进行比较。所有实验的屏幕分辨率均为 512×512 , 采用 512×512 的 32 位浮点类型纹理作为阴影图,以 GL_LINEAR 方式存储深度。判断是否细分采样点的阈值 M_p 设为 0, 最多允许采样生成 289 张阴影图。如图 6 所示,采用规则光源采样的方法与本文算法进行比较实验。

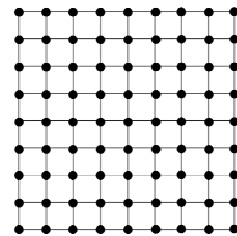


图 6 规则光源采样示意图

Fig. 6 Schematic diagram of regular light source sampling

4.1 绘制效果比较

4 种实验场景下阴影效果比较如图 7 和图 8 所示。从图中可以看出,本文算法与规则光源采样所绘制的高质量软阴影效果基本完全一样,可以达到高质量绘制效果。

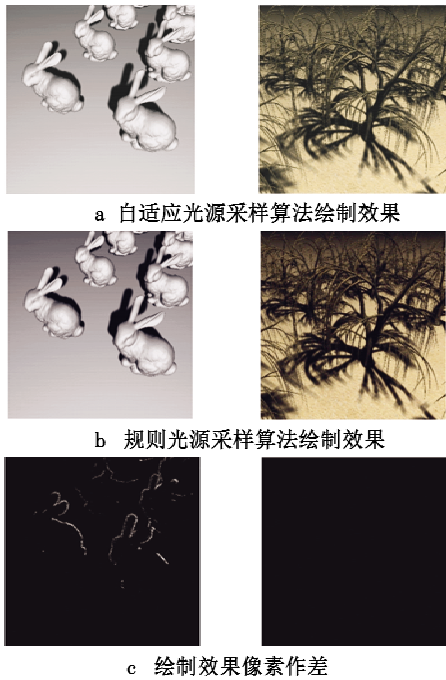
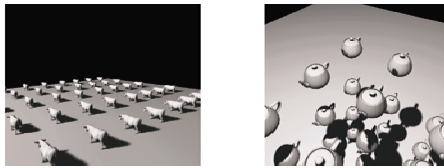


图 7 兔子和小树林的软阴影绘制效果图
Fig. 7 Soft shadow rendering of rabbit and grove



要高。而对于存在复杂模型的场景(如小树林),自适应光源采样算法将很容易达到最大采样密度,生成和规则光源采样算法相同数目的阴影图数目。此时,由于引入额外开销,本文算法的绘制效率较规则光源采样算法稍微有所下降。

表 2 自适应光源采样算法与规则光源算法效率(帧频)的比较

Table 2 Efficiency of adaptive light source sampling algorithm and regular light source algorithm 帧/s

场景	自适应光源采样算法	规则光源采样算法
兔子	19.89(45)	1.73(289)
小树林	3.48(289)	3.88(289)
牛群	15.67(111)	3.28(289)
茶壶	23.42(62)	7.31(289)

表 2 括号中数值为绘制场景算法所需要的阴影图数目。

5 结束语

本文提出一种自适应光源采样的高质量软阴影生成算法,主要创新点有:

- 1) 根据屏幕上可见阴影像素的质量,自适应地对光源进行采样,生成相应数目的阴影图;
- 2) 在多阴影图渲染阶段,将阴影图直接渲染到纹理数组中,把传统利用混合进行多遍场景渲染的过程

- ACM Siggraph Computer Graphics, 1977, 11(2):242-248.
- [6] 李胜亮,管莉,张凌,等. 基于阴影映射的实时软阴影算法及实现[J]. 弹箭与制导学报, 2007, 27(1):214-217.
- [7] FERNANDO R. Percentage-closer soft shadows[C]//ACM SIGGRAPH Sketches, 2005:35-43.
- [8] DONNELLY W, LAURITZEN A. Variance shadow maps[C]//The Symposium on Interactive 3D Graphics and Games, 2006:161-165.
- [9] GUENNEBAUD G, BARTHE L, PAULIN M. Real-time soft shadow mapping by backprojection[C]//The 17th Eurographics Conference on Rendering Techniques, 2006:227-234.
- [10] GUENNEBAUD G, BARTHE L, PAULIN M. High-quality adaptive soft shadow mapping[J]. Computer Graphics Forum, 2007, 26(2):525-533.
- [11] ATTY L, HOLZSCHUCH N, LAPIERRE M, et al. Soft shadow maps: efficient sampling of light source visibility[J]. Computer Graphics Forum, 2006, 25(4):725-741.
- [12] BARNABAS B, LASZLO S K. Real-time soft shadows with shadow accumulation[C]//The 17th Eurographics Conference on Rendering Techniques, 2006:53-56.
- [13] SCHWARZ M, STAMMINGER M. Bitmask soft shadows[J]. Computer Graphics Forum, 2007, 26(3):515-524.
- [14] STAMOUR J F, PAQUETTE E, POULIN P. Soft shadows from extended light sources with penumbra deep shadow maps[C]//Proceedings of Graphics Interface, 2005:105-112.
- [15] SINTORN E, EOSEMANN E, ASSARSSON U. Sample-based visibility for soft shadows using alias-free shadow maps[J]. Computer Graphics Forum, 2008, 27(4):1285-1292.
- [16] KIM S G, LEE S K. Mipmap-based deferred soft shadow mapping[J]. Journal of KIISE, 2016, 43(4):399-403.
- [17] 袁昱纬,全吉成,刘宇,等. 基于 BVH 的自适应阴影图算法[J]. 光电子技术, 2017, 37(2):130-135.

(上接第 84 页)

- 抗控制器设计[J]. 电光与控制, 2018, 25(11):112-115.
- [2] 杨影,李之珂,王爽,等. 基于轴转矩扰动观测器的伺服系统扭振抑制研究[J]. 电工技术学报, 2018, 22(10):10-18.
- [3] 刘胜,郭晓杰,张兰勇. 六相永磁同步电机新型单向滑模控制[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(10):10-19.
- [4] 刘旭东,李珂,张奇,等. 基于非线性扰动观测器的永磁同步电机单环预测控制[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7):2153-2162.
- [5] 刘京,李洪文,邓永停. 基于干扰观测器的永磁同步电机电流环自适应滑模控制[J]. 光学精密工程, 2017, 25(5):1229-1241.
- [6] 晋超琼,张葆,李贤涛,等. 基于干扰观测器的光电稳定平台摩擦补偿策略[J]. 吉林大学学报:工学版, 2017, 47(6):1876-1885.
- [7] 刘丙友,竺长安,郭兴众,等. 基于改进型 ADRC 的永磁同步电机转子位置角控制方法[J]. 电机与控制学报, 2017, 21(12):24-33.
- [8] 邓永停,李洪文,刘基,等. 于扰动力矩观测器的大口径望远镜低速控制[J]. 光学精密工程, 2017, 25(10):2636-2643.
- [9] 刘旭东,李珂,孙静,等. 基于广义预测控制和扩展状态观测器的 PMSM 控制[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(12):1613-1619.
- [10] 易伯瑜,康龙云,冯自成,等. 基于扰动观测器的永磁同步电机预测电流控制[J]. 电工技术学报, 2016, 9(31):37-45.
- [11] 朱斌. 自抗扰控制入门[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2017.
- [12] LI S H, ZONG K, LIU H X. A composite speed controller based on a second-order model of permanent magnet synchronous motor system[J]. Transactions of the Institute of Measurement & Control, 2010, 32(1):522-541.
- [13] LI S H, LIU Z H. Adaptive speed control for permanent magnet synchronous motor system with variations of load inertia[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(8):3050-3059.
- [14] 廖晓钟,刘向东. 控制系统分析与设计[M]. 北京:清华大学出版社, 2008.