

加网参数与水印抗印刷攻击性能研究

马璁珑, 张雯, 王柳

(天津职业大学, 天津 300410)

摘要: **目的** 为实现数字水印技术由数字版权保护到印刷品防伪领域的移植应用, 考察水印对不同加网线数、网线角度的鲁棒性和不可见性。**方法** 以 DWT 域全息水印算法为例, 将水印图像制成全息图后, 嵌入到宿主图像 C、M、Y 或 K 通道的 DWT 域, 获得含水印图像, 对含水印图像进行不同加网线数、网线角度的模拟加网实验。**结果** 实验表明, 加网后水印的鲁棒性和不可见性随加网线数提升而提升, 可接受的最低加网线数为 120 lpi。相同加网线数条件下, 网线角度为 45° 时, 提取的水印质量较 0°、15° 和 75° 偏低。**结论** 45° 加网角度虽然适合单色印刷, 但是对水印造成的攻击也最为显著, 因此应规避加网角度为 45° 的颜色通道作为水印嵌入位置。

关键词: 数字水印; CMYK 颜色空间; 网线角度; 全息图

中图分类号: TP309.7 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2022)07-0269-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.07.035

Screening Frequency and Watermarking Performance against Printing Attack

MA Cong-long, ZHANG Wen, WANG Liu

(Tianjin Vocational Institute, Tianjin 300410, China)

ABSTRACT: The work aims to investigate the robustness and invisibility of watermarks against different screening frequency and screen angles, so as to transplant digital watermarking technology from the field of digital copyright protection to printing anti-counterfeiting. With the holographic watermarking algorithm in DWT domain as an example, the watermarked image was made into a hologram and the hologram was embedded into the DWT domain of host image in C, M, Y or K layers, to obtain watermarked image. Simulation experiment was carried out to the watermarked image with different screening frequency and screen angles. The robustness and invisibility of watermarked image increased with the increase of the number of screening frequency. The lowest acceptable number of screen frequency was 120 lpi. Under the condition of the same number of screen frequency, the quality of extracted watermarks when the screen angle was 45° were lower than that at 0°, 15° and 75°. The screen angle of 45° is suitable for monochrome printing, but the watermark attack is the most significant. Therefore, the color channel with screen angle of 45° should be avoided as the watermark embedding position.

KEY WORDS: digital watermark; CMYK color space; screen angle; hologram

数字水印技术多用于数字媒体的版权保护和安
全^[1-3], 多年来在离散小波域^[4-7]、离散余弦域^[9-11]等
频域的算法已有丰富积累, 近年来诸多学者尝试将该

技术应用于印刷防伪。

与计算机中存储的数字图像不同, 印刷品的承印
物, 如纸张等, 自身不能发射光线, 是通过四色或多

收稿日期: 2020-07-14

基金项目: 天津市艺术科学规划项目 (D20026)

作者简介: 马璁珑 (1988—), 硕士, 天津职业大学讲师, 主要研究方向为平面设计及传播等。

色油墨的网点反射光线而呈现色彩, 这将对水印造成多源异类攻击, 印前、印刷、印后参数都将对水印造成影响, 例如印前过程中的颜色模式转换与色彩管理, 印刷过程的油墨、承印物、印刷机类型等, 与此相关的研究逐步展开。

已有学者着力研究承印物对水印抗印刷扫描攻击鲁棒性的影响, 如葛乃馨等^[12]研究了纸张表面性能与水印鲁棒性的关系, 发现纸张平滑度、白度、粗糙度与水印鲁棒性具有强相关性。

数字图像颜色模式为 RGB, 像素之间的位置关系连续; 印刷图像是离散的半色调, 其颜色模式为 CMYK, 网点的位置关系有叠加和并列 2 种。已有学者尝试在 CMYK 颜色模式中嵌入水印^[13-14], 如王彩印等^[14]将有意义水印和结构模板信号分别嵌入 CMYK 颜色模式中的 Y 颜色通道和 K 颜色通道, 提出了一种抗印刷扫描攻击的鲁棒水印算法。同时, 也有研究探索了 RGB 与 CMYK 颜色模式及各个颜色通道对水印的不同影响, 如文献[15]中指出, 在 R、B、C 和 Y 4 个颜色通道嵌入水印总体效果较优。

文中将研究聚焦到印刷加网过程, 探索在不同颜色通道中嵌入水印, 印刷加网过程中加网线数、网线角度参数对水印的影响。

1 关键技术

1.1 加网线数

印刷品以网点为基本单元表现层次与颜色。加网线数是指单位长度内网点的数量。加网线数越高, 单位长度内网点的数量随之增加, 所能表现的细节越丰富。目前, 受承印物、印刷设备、工艺水平等参数共同限制, 通常加网线数不高于 200 lpi。

决定加网线数的主要因素有 3 个, 分别是观察距离、承印物质量、产品的精细程度。例如, 对于观察距离较远的大型海报, 其加网线数为 60~80 lpi; 平版印刷的加网线数为 133~150 lpi; 精细程度较高的印刷品加网线数可达到 175 lpi, 甚至 200 lpi。

1.2 网线角度

网线角度是相邻网点中心连线与基准线的夹角, 文中设置的网线角度是指网点中心连线与垂直线的夹角, 常用网线角度有 0°、15°、45°和 75°。

理论上, 如果四色套印精确无误, 可以采用相同网线角度印刷。实际中, 由于四色套印误差, 相同网线角度印刷会产生龟纹, 影响印品视觉效果, 因而, 单色印刷时, 网线角度首选 45°; 四色印刷时, 主色版网线角度为 45°, 黄版网线角度为 0°, 其余两色版与主色版相差 30°。

值得注意的是, 由于四色印版采用不同的网线角

度, 由数字图像到印刷品这一过程中, 一个网点不一定能够对应一个像素, 因此需要适当提高印前数字图像的分辨率。分辨率与加网线数之比称为加网质量因子 (q), 见式 (1), q 通常为 1.5 或 2。

$$\text{图像分辨率} = q \times \text{加网线数} \quad (1)$$

1.3 全息图

将水印以全息图的形式嵌入宿主图像, 利用全息图的不可撕毁性和干涉条纹的表现形式, 可同时提升水印的鲁棒性和不可见性。如下过程制作博奇编码的傅里叶全息图。

输入水印图像 $f(x,y)$; $f(x,y)$ 乘以随机相位, 模拟光学全息中毛玻璃漫射光的作用后, 进行傅里叶变换, 获得傅里叶频谱 $F(x,y)$:

$$F(x,y) = FFT\{f(x,y)\exp[j\phi(x,y)]\} \quad (2)$$

由傅里叶频谱 $F(x,y)$, 获得振幅信息 $A(x,y)$ 和相位信息 $\phi(x,y)$:

$$A(x,y) = \sqrt{\text{real}[F(x,y)]^2 + \text{imag}[F(x,y)]^2}$$

$$\phi(x,y) = \arctan \left\{ \frac{\text{real}[F(x,y)]}{\text{imag}[F(x,y)]} \right\} \quad (3)$$

式中: $\text{real}[\]$ 和 $\text{imag}[\]$ 分别为取复波面的实部与虚部操作。

在线性记录条件下, 光学离轴全息图的透过率函数 $h(x,y)$ 为:

$$h(x,y) = |F(x,y) + R(x,y)|^2 =$$

$$|A(x,y)\exp[j\phi(x,y)] + R(x,y)\exp[i2\pi\alpha x]|^2 =$$

$$|A(x,y)|^2 + R_0^2 + 2R_0A(x,y)\cos[2\pi\alpha x - \phi(x,y)] \quad (4)$$

式中: $f(x,y)$ 为物光波的复振幅; $R(x,y)$ 为离轴平面参考光波; $A(x,y)$ 为物光波的振幅信息; R_0 为参考光波的振幅信息。 $\phi(x,y)$ 和 $2\pi\alpha x$ 分别为相位信息。

取归一化 $A(x,y)$ 使 $|A(x,y)|_{\max} = 1$, 再令参考光波 $|R(x,y)|_{\max} = 1$ 则有:

$$h(x,y) = 0.5\{1 + A(x,y)\cos[2\pi\alpha x - \phi(x,y)]\} \quad (5)$$

利用式 (5) 得到博奇编码傅里叶计算全息图。

1.4 离散小波变换

空间域中水印不可见性不易保障, 变换域高频区水印脆弱, 文中将采用离散小波变换 (Discrete Wavelet Transformation, DWT) 处理宿主图像, 将水印嵌入宿主图像二层 Haar 小波变换的对角高频。

宿主图像经一层小波变换后, 获得包含图像主要信息的低频区 (A) 和 3 个高频区, 对低频区 (A) 进行二层小波变换, 获得二层低频区 (AA)、水平高频 (AH)、垂直高频 (AV) 和对角高频 (AD), 选取对角高频 (AD) 作为水印嵌入位置。

2 嵌入与提取水印

2.1 嵌入水印

文中选择包含字母“T”的灰度图作为水印, 尺寸为 64 像素×64 像素; 选择测试图像“Lena”作为宿主图像, 尺寸为 512 像素×512 像素, 颜色模式为 CMYK, 见图 1。

将水印 (图 1a) 制成全息图, 见图 2。



图 1 水印与宿主图像
Fig.1 Watermark and host image



图 2 全息图
Fig.2 Hologram

对全息图进行一层离散小波变换, 获得全息图的对角高频 D。对宿主图像进行分离通道, 获得 C、M、Y 和 K 4 个颜色通道。由 C、M、Y 和 K 中选取某一通道作为嵌入通道, 对该通道进行二层小波变换, 获

得二层对角高频 AD, 采用替换的方式将 D 嵌入 AD 中, 嵌入方程见式 (6)。

$$M'(i, j) = \alpha m'(i, j) \quad (6)$$

式中: $M'(i, j)$ 为含水印图像的 AD 系数值; α 为嵌入强度, $\alpha=0.2$; $m'(i, j)$ 为全息图 D 的系数值。

进行二层逆小波变换获得含有水印的图像。分别在 C、M、Y 和 K 通道嵌入水印后合并通道, 形成含水印的彩色图像, 效果分别见图 3a—d。

2.2 提取水印

应用嵌入算法的逆运算, 对含水印图像进行分离通道, 对含水印通道进行二层小波变换, 获得其 AD 的系数值, 从而再现水印。从图 3 中提取的水印见图 4。

2.3 评价指标

采用峰值信噪比 (Peak Signal to Noise Ratio, PSNR) 评价含水印不可见性。采用归一化相关系数 (Normalized Coefficient, NC) 评价提取的水印质量。计算图 3 中含水印图像的 PSNR 值, 计算图 4 中提取水印的 NC 值, 见表 1。

在未受到攻击的情况下, 含水印图像的 PSNR 值均在 40 dB 以上, 提取到的水印 NC 值均在 0.91 以上, 其中 C 和 Y 两通道嵌入水印效果较其他通道更优, 符合文献[6]所述。

3 模拟加网

应用 PHOTOSHOP 软件模拟调幅加网效果, 打开含水印图像 (图 3) 后, 分为 4 步模拟加网效果。第 1 步, 分离通道获得 C、M、Y 和 K 4 个通道的灰度图; 第 2 步, 采用“半调网屏”的方法、“圆形”网点

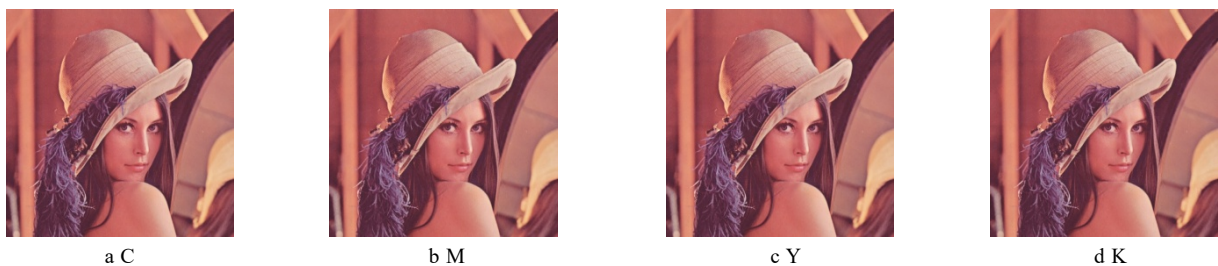


图 3 含水印图像
Fig.3 Watermarked images



图 4 提取的水印
Fig.4 Extracted watermarks

表1 含水印图像的 PSNR 值和 NC 值
Tab.1 PSNR and NC value of watermarked images

嵌入通道	PSNR 值/dB	NC 值
C	42.98	0.93
M	40.82	0.92
Y	41.28	0.93
K	44.03	0.91

形状、自定分辨率和加网线数,将灰度图转为位图;第3步,以“1”为大小比例将位图转为灰度图;第4步,采用“CMYK 颜色”合并通道,获得模拟加网后的彩色图像。

以 C 通道中嵌入水印为例,选取加网质量因子为 2,分辨率为 160 dpi,加网线数为 80 lpi,网线角度为 0°,模拟加网效果见图 5。



图5 加网后含水印图像
Fig.5 Watermarked image after screening

3.1 加网线数

为考察加网线数对水印不可见性的影响,分别测试了不同加网线数条件下,在 C、M、Y、K 4 个通道中嵌入水印的 PSNR 值,加网质量因子选取 2,加网线数分别取 60、80、120、150、175 lpi 时,不同通道嵌入水印的 PSNR 值见表 2。

表2 不同加网线数时的 PSNR 值
Tab.2 PSNR value of watermarked images with different screen frequency

嵌入通道	PSNR 值/dB				
	60 lpi	80 lpi	120 lpi	150 lpi	175 lpi
C	20.88	25.85	31.48	34.13	35.86
M	20.84	25.78	31.28	33.78	35.40
Y	20.87	25.82	31.36	33.92	35.54
K	20.80	25.73	31.34	34.05	35.83

由表 2 可知,模拟加网后,含水印图像的 PSNR 值自 40 dB 以上降低至 20.80~35.86 dB。加网线数相同时,在 4 个颜色通道中嵌入水印,水印不可见性有所波动,但波动幅度有限,基本在 1 dB 内。加网线数变化时,随着加网线数的降低,图像包含的细节信

息减少,4 个颜色通道的含水印图像保真度同时显著降低。相较于颜色通道,加网线数对含水印图像保真度的影响处于主导地位。

为考察加网线数对提取水印质量的影响,分别测试了不同加网线数条件下,在 C、M、Y、K 4 个通道中嵌入水印的 NC 值,加网质量因子选取 2,加网线数分别取 60、80、120、150、175 lpi 时,不同通道嵌入水印的 NC 值见表 3。

表3 不同加网线数时的 NC 值
Tab.3 NC value of watermarked images with different screen frequency

嵌入通道	NC 值				
	60 lpi	80 lpi	120 lpi	150 lpi	175 lpi
C	0.52	0.61	0.82	0.86	0.89
M	0.52	0.61	0.79	0.84	0.87
Y	0.56	0.65	0.82	0.87	0.89
K	0.52	0.64	0.79	0.82	0.86

由表 3 可知,模拟加网后,NC 值自 0.91 以上降低至 0.52~0.89。加网线数不变时,C 和 Y 两通道嵌入水印效果较其他通道更优,符合文献[6]中所述。随着加网线数的增加,图像细节更丰富,4 个颜色通道提取的水印质量同时显著提升,加网线数大于 120 lpi 时,最小 NC 值大于 0.75,所提水印较清晰。

3.2 网线角度

测试图像“Lena”的主色版为 M 版,M 版网线角度为 45°,Y 版网线角度为 0°,C 版网线角度可以为 15°或 75°,K 版网线角度可以为 75°或 15°。

为考察不同网线角度对水印不可见性和鲁棒性的影响,分别测试了不同网线角度条件下,加网质量因子选取 2,加网线数为 120 lpi,网线角度分别取 15°(C)、45°(M)、0°(Y)、75°(K)和 75°(C)、45°(M)、0°(Y)、15°(K)时,不同通道嵌入水印的 PSNR 值和 NC 值见表 4。

由表 4 可知,模拟加网后,含水印图像的 PSNR 值明显下降,且不同嵌入通道、不同网线角度的下降幅度基本一致。值得关注的是,虽然提取的水印均可较好辨认,但 NC 值为 0.80~0.84,不同嵌入通道、不同网线角度的 NC 值差异较大。其中较低的是 M 通道与 K 通道,综合表 1 中数据可知,M 通道 NC 值加网后降低了 0.12,K 通道 NC 值加网后降低了 0.11,M 通道降低幅度较大。

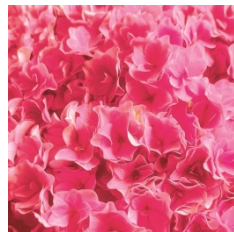
进一步测试网线角度作用于不同宿主图像对 NC 值的影响,采用图 8 中 4 幅分别以 C、M、Y、K 为主色版的宿主图像分别进行测试。其中,由于在四色印刷中,黄版网线角度通常为 0°,因而图 8c 中,选择品红版作为加网角度为 45°的色版。

表 4 不同网线角度的 PSNR 值和 NC 值 (Lena)
Tab.2 PSNR and NC value of watermarked images with different screen angles (Lena)

嵌入通道	网线角度/(°)				NC 值	PSNR 值/dB
	C	M	Y	K		
C	15	45	0	75	0.84	31.57
	75	45	0	15	0.83	31.46
M	15	45	0	75	0.80	31.38
	75	45	0	15	0.80	31.38
Y	15	45	0	75	0.83	31.47
	75	45	0	15	0.83	31.47
K	15	45	0	75	0.80	31.47
	75	45	0	15	0.80	31.48



a C



b M



c Y



d K

图 6 不同色彩的宿主图像
Fig.6 Host images with different colors

分别采用图 6 中 4 幅作为宿主图像,测试了不同网线角度条件下,加网质量因子选取 2,加网线数为 120 lpi 时,不同通道嵌入水印的 PSNR 值和 NC 值,见表 5。

由表 5 可见,在宿主图像相同,水印嵌入网线角度为 45°的颜色通道时,NC 值偏低。造成上述现象的原因有:文中所采用的水印嵌入算法将水印嵌入到二层小波变换的对角高频区,而主色版主要集中了图像的颜色信息,而图像的轮廓细节在主色版的相反色中表现,因此文中算法在水印嵌入主色版时最为脆弱;在加网角度为 45°时,单位长度上一个网点所对应的像素数最少,因而保真度降低,导致水印鲁棒性降低。

表 5 不同网线角度的 PSNR 值和 NC 值
Tab.5 PSNR and NC value of watermarked images with different screen angles

宿主图像	嵌入通道	网线角度/(°)				NC 值	PSNR 值/dB
		C	M	Y	K		
图 6a	C	45	15	0	75	0.84	32.82
		45	75	0	15	0.84	32.82
		45	15	0	75	0.87	32.91
		45	75	0	15	0.87	32.91
	M	45	15	0	75	0.85	32.85
		45	75	0	15	0.85	32.85
		45	15	0	75	0.85	32.58
		45	75	0	15	0.86	32.59
	Y	15	45	0	75	0.86	32.51
		75	45	0	15	0.86	32.51
		15	45	0	75	0.74	32.04
		75	45	0	15	0.74	32.04
K	15	45	0	75	0.78	32.05	
	75	45	0	15	0.78	32.06	
	15	45	0	75	0.80	32.45	
	75	45	0	15	0.80	32.44	
图 6b	C	15	45	0	75	0.81	32.28
		75	45	0	15	0.81	32.29
		15	45	0	75	0.79	32.37
		75	45	0	15	0.79	32.37
	M	15	45	0	75	0.81	32.25
		75	45	0	15	0.81	32.25
		15	45	0	75	0.83	32.22
		75	45	0	15	0.83	32.23
	Y	15	75	0	45	0.85	31.87
		75	15	0	45	0.85	31.88
		15	75	0	45	0.87	31.87
		75	15	0	45	0.88	31.87
K	15	75	0	45	0.86	31.84	
	75	15	0	45	0.86	31.84	
	15	75	0	45	0.77	31.42	
	75	15	0	45	0.77	31.43	

4 结语

研究以 DWT 域全息水印算法为例,考察了加网线数、网线角度对水印鲁棒性和不可见性的影响。研

究结果表明,加网线数与水印鲁棒性和不可见性呈正相关,因此综合考虑承印物、印刷设备、工艺水平的影响,在保障印品质量的前提下,应选择最大加网线数;水印嵌入网线角度为 45° 的颜色通道时,水印鲁棒性偏低,因此针对不同宿主图像应考虑不同嵌入通道,尽量规避在加网角度为 45° 的颜色通道嵌入水印。该研究集中于DWT域全息水印算法的抗加网鲁棒性研究,虽然研究结果受到水印算法的局限,却也显现了加网攻击对数字水印的影响,建议今后研究数字水印硬拷贝时,在水印鲁棒性测试中增加加网攻击。

参考文献:

- [1] MUSELET D, ALAIN T. Recent Trends in Color Image Watermarking[J]. Journal of Imaging Science and Technology, 2009, 53(1): 1-15.
- [2] CHOI U S, LEE S H, KWON K R. Medical Image Verification Watermarking for Healthcare Information Management[J]. Journal of Multimedia Information System, 2017, 4(4): 205-210.
- [3] CHEN Lan-xiang, BAI Wu-tong, YAO Zhi-qiang. A Secure and Privacy-Preserving Watermark Based Medical Image Sharing Method[J]. Chinese Journal of Electronics, 2020, 29(5): 819-825.
- [4] KHARE P, SRIVASTAVA V K. A Novel Dual Image Watermarking Technique Using Homomorphic Transform and DWT[J]. Journal of Intelligent Systems, 2020, 30(1): 297-311.
- [5] AHMED A G, GERMIN G. Three Levels Dwt Watermarking Technique for Color Images and Watermarks[J]. International Journal of Recent Technology and Engineering, 2019, 8(3): 564-569.
- [6] CHEN C J, HUANG Huang-nan, TU Shu-yi, et al. Digital Audio Watermarking Using Minimum-Amplitude Scaling on Optimized DWT Low-Frequency Coefficients[J]. Multimedia Tools and Applications, 2021, 80(2): 2413-2439.
- [7] WANG Kun-shu, GAO Tie-gang, You Dao-tao, et al. A Secure Dual-Color Image Watermarking Scheme Based 2D DWT, SVD and Chaotic Map[J]. Multimedia Tools and Applications, 2022, 81(5): 6159-6190.
- [8] ZHOU Xiao-yi, MA Yue, ZHANG Qing-quan, et al. A Reversible Watermarking System for Medical Color Images: Balancing Capacity, Imperceptibility, and Robustness[J]. Electronics, 2021, 10(9): 1024-1024.
- [9] MAHBUBA B, SHORIF U M. Multiple Image Watermarking with Discrete Cosine Transform[J]. Journal of Computer and Communications, 2021, 9(3): 88-94.
- [10] TIAN Li-hua, DAI Hang-tao, LI Chen. A Semi-Fragile Video Watermarking Algorithm Based on Chromatic Residual DCT[J]. Multimedia Tools and Applications, 2020, 79(3/4): 1759-1779.
- [11] WANG Jun, WAN Wen-bo, LI Xiao-xiao, et al. Color Image Watermarking Based on Orientation Diversity and Color Complexity[J]. Expert Systems With Applications, 2020, 140(C): 112868.
- [12] 葛乃馨, 王琪, 韩雪莹. 纸张表面性能与硬拷贝水印提取质量相关性研究[J]. 中国造纸学报, 2020, 35(2): 69-74.
- [13] GE Nai-xin, WANG Qi, HAN Xue-ying. Research on Correlation between Paper Surface Characteristics and Hard Copy Watermark Extraction Quality[J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2020, 35(2): 69-74.
- [14] 张雯, 王丽颖. 窄色域抗打印扫描全息水印算法[J]. 包装工程, 2020, 41(7): 234-240.
- [15] ZHANG Wen, WANG Li-ying. Holographic Watermarking Algorithm for Print-and-Scan Process in Narrow Colour Gamut[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(7): 234-240.
- [16] 王彩印, 孔祥维, 李超. 面向保真印刷的CMYK图像鲁棒水印方法[J]. 电子科技大学学报, 2017, 46(3): 529-536.
- [17] WANG Cai-yin, KONG Xiang-wei, LI Chao. Robust Watermarking Applying to CMYK Printed Image for Fidelity Printing[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2017, 46(3): 529-536.
- [18] XIE Yong, SHAN Wu-yang, FENG Qi-qin, et al. Performance Comparison of Holographic Watermarking for Color Images in RGB and CMYK Channels[C]// 2013 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), IEEE, 2013: 3024-3027.

责任编辑: 曾钰婵