

〈微光技术〉

## 一种微光像增强器的电磁兼容设计与实现

杜培德，褚祝军，曾进能，朱文锦，周盛涛，李晓露，李亚情，左加宁  
(北方夜视技术股份有限公司，云南 昆明 650217)

**摘要：**一种微光像增强器的抗电磁干扰能力弱，不能通过电磁兼容(emagnetic compatibility, EMC)试验，因此推测其在战场的复杂电磁环境下很可能出现同试验结果一样的现象，即荧光屏闪烁、高亮、熄灭等，可能干扰夜视观察。为了满足 EMC 要求，本文首先进行电磁兼容试验摸底，基于试验结果分析该像增强器的 EMC 设计薄弱环节，确定了影响 EMC 的关键因素，其次开展高频滤波、金属屏蔽和低阻抗接地等设计技术，最终在 200V/m 强电场抗干扰试验中，该微光像增强器在全频率范围内稳定显示，通过了测试，具备了抗电磁干扰能力。

**关键词：**微光像增强器；电磁兼容；电场辐射干扰

中图分类号：TN223 文献标志码：A 文章编号：1001-8891(2023)06-0658-05

### EMC Design and Implementation for Image Intensifiers

DU Peide, CHU Zhujun, ZENG Jinneng, ZHU Wenjin, ZHOU Shengtao, LI Xiaolu, LI Yaqing, ZUO Jianing  
(North Night Vision Technology Co. Ltd., Kunming 650217, China)

**Abstract:** An image intensifier cannot pass an electromagnetic compatibility (EMC) test because of its weak anti-electromagnetic interference (EMI) ability. Therefore, it is speculated that abnormal phenomena, such as flickering, highlighting, and extinction of the fluorescent screen, similar to that observed in the test results may occur in the complex electromagnetic environment of a battlefield. This will likely interfere with night vision observation ability. To meet EMC requirements, this study first analyzed the EMC design weaknesses of an image intensifier based on EMC test results and determined the key factors affecting EMC. Next, high-frequency filtering, metal shell shielding, and low-impedance grounding were designed accordingly. Finally, the image intensifier was subjected to an anti-radiation interference test in a 200 V/m electric field; results indicated that the image intensifier was stable in the whole frequency range, verifying the acquired anti-EMI ability.

**Key words:** image intensifier, EMC, electric field radiation interference

## 0 引言

现代信息化战争中各种探测、通信、电子对抗等设备和武器的使用，导致战场的电磁环境十分复杂<sup>[1]</sup>。一种微光像增强器按 GJB 151B-2013<sup>[2]</sup>进行 CE102、RE102 和 RS103 电磁兼容 (electromagnetic compatibility, EMC) 摸底试验未通过，尤其是 RS103 试验时出现了荧光屏闪烁、高亮、熄灭等现象，说明该产品的抗电磁干扰能力弱。为提高该产品在战场复杂电磁环境下的适应性能，对其开展 EMC 设计与实

现。

本文首先进行 EMC 试验摸底，分析试验结果，从该像增强器的组成结构、工作原理方面总结影响 EMC 的因素，其次针对性开展高频滤波、金属屏蔽和低阻抗接地设计和实施，最后进行验证和改进，最终该产品通过了最严限值的 CE102、RE102、RS103 试验，具备了抗电磁干扰能力。

## 1 EMC 试验结果分析

从传导发射、辐射发射、辐射敏感度 3 方面进行

收稿日期：2021-11-15；修订日期：2022-01-08。

作者简介：杜培德（1986-），男，云南玉溪人，硕士，工程师，主要从事像增强器电源设计。E-mail：541395364@qq.com。

摸底试验来确定该产品的 EMC 问题, 具体如下。

首先, 进行 CE102 试验, 输入正线的传导干扰见图 1。该产品内部有基于罗耶尔结构<sup>[3]</sup>的双管自激谐振开关电源, 谐振频率 24 kHz 左右, CE102 曲线在低频段呈现其基波和高次谐波尖峰, 说明该产品的输入端未滤波或者滤波器的插入损耗较低; 高频段, 出现幅值高且频带宽的谐振包络, 说明输入线上差模高频成分较大, 推测可能对外辐射干扰。

其次, 进行 RE102 试验, 结果见图 2。验证了上述推测, 该产品内部的高频干扰通过输入线或其他杂散因素向空间辐射。频谱形状和门函数的基本一致, 说明产品内部存在幅值较大且快速变化的脉冲信号。对更高频段进行测试, 未发现异常尖峰、包络。

最后, 进行 200 V/m 最高场强的 RS103 试验。该产品在 300 MHz~1.1 GHz 频段内间隔性地出现闪烁、熄灭、高亮敏感现象。

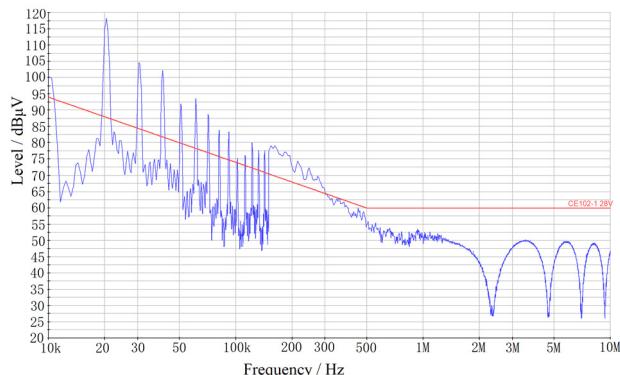


图 1 CE102 摸底试验结果

Fig.1 CE102 evaluation test results

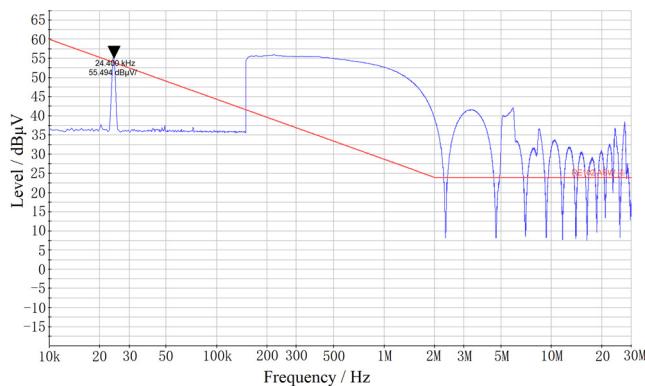


图 2 RE102 摸底试验结果

Fig.2 RE102 evaluation test results

## 2 EMC 影响因素分析

如图 3, 该像增强器由 T 字形的像管和环形自动门控高压电源(以下简称高压电源)套合互连引线后灌封硅橡胶在塑料外壳内构成, 引出直流供电线, 从结构、工作原理方面分析确定影响 EMC 的因素。

### 2.1 像管 EMC 分析

见图 3, 像管的光电阴极、微通道板(microchannel plate, MCP)、荧光屏以 0.1 mm 左右的间距相互近贴<sup>[4]</sup>, 采用陶瓷环隔离和铜环片钎焊、铟封为真空成像器件。光电阴极和地之间接-200~+30 V 脉冲电压, MCP 两端接约 800 V 直流电压, 荧光屏和地之间接约 5.6 kV 直流电压。三者处于真空、高压、近贴环境中, 偏置电压产生的电场强度远高于 RS103 试验的 200 V/m 电场, 因此像管的光-电转换不易受到外界电场的影响, 像管本身可作为次要 EMC 影响因素。

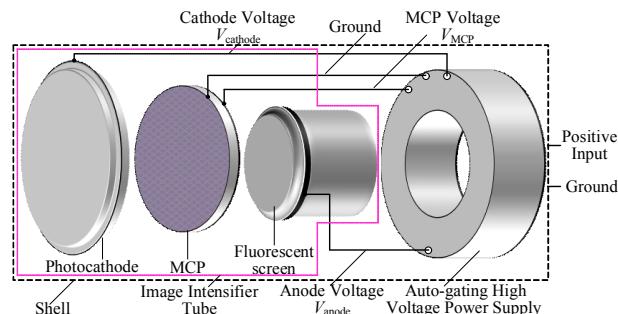


图 3 像增强器的结构

Fig.3 Structure of image intensifier

但由于 MCP 自身电容特性和像管的双近贴、钎焊封装结构形成了几十至数百 pF 的寄生电容<sup>[5]</sup>, 在 RS103 试验施加的 10 kHz~18 GHz 交变强电场下足可以形成 nA 级别的位移电流<sup>[6]</sup>叠加到荧光屏电流中, 可能导致高压电源的自动控制<sup>[7]</sup>(automatic brightness control, ABC) 功能异常, 具体见 2.2 分析。

### 2.2 高压电源 EMC 分析

#### 2.2.1 低频噪声源分析

见图 4, 高压电源的输入供电通常是 2~5 V 的电池, 其内部通过双管自激谐振电路、高匝比变压器和信克尔倍压电路实现 DC-DC 变换、倍压整流, 为像管的各部件提供电压偏置。DC-DC 开关谐振频率为 24 kHz 左右, 属于低频强噪声源, 因此可确定该部分引起了 CE102 试验、RE102 试验低频段超标, 所以输入端必须加强差模滤波处理。

#### 2.2.2 高频噪声源分析

阴极电压设计值为-200~+30 V 的脉冲, 上升下降沿为十几个 ns, 脉宽由 ABC 电路判断外界光强进行反比调整, 脉冲周期为 200 Hz 左右。分析图 2 的频谱, 信号的带宽  $B \approx 20 \text{ MHz}$ , 按式(1)<sup>[8]</sup>计算信号的上升时间  $\tau_r \approx 15.92 \text{ ns}$ , 和设计值吻合。高速脉冲的谐波非常丰富, 极易对外辐射干扰, 属于高频强噪声源, 因此可确定 RE102 试验高频段超标是由阴极脉冲引起, 需要对输入线和壳体进行滤波、屏蔽处理。

$$\tau_r = \frac{1}{\pi B} \quad (1)$$

### 2.2.3 敏感源分析

ABC 电路对荧光屏电流进行采样，该电流为 nA 级别，因此采样电阻为 MΩ 级别且需要高输入阻抗的 T 形网络反相比例运算电路实现放大，阻抗大则容易受到干扰。为实现外界光照强度较大变化时荧光屏亮度基本保持恒定的目的，荧光屏电流只允许数个 nA 的变化，这只能大范围地调控 MCP 电压幅值和阴极脉冲占空比，以控制 MCP 电子增益和光电阴极的电子发射量基本恒定。较窄范围的电流采样，大范围地反馈输出调控，即 ABC 电路的输出对输入采样电流信号的响应非常灵敏。

因此，当外界干扰进入反馈网络或者由于 2.1 所述位移电流超过调控范围，则很容易引起 MCP 电压振荡或阴极占空比紊乱，导致荧光屏出现闪烁、高亮、熄灭等敏感现象，故需对 ABC 电路进行抗干扰设计。

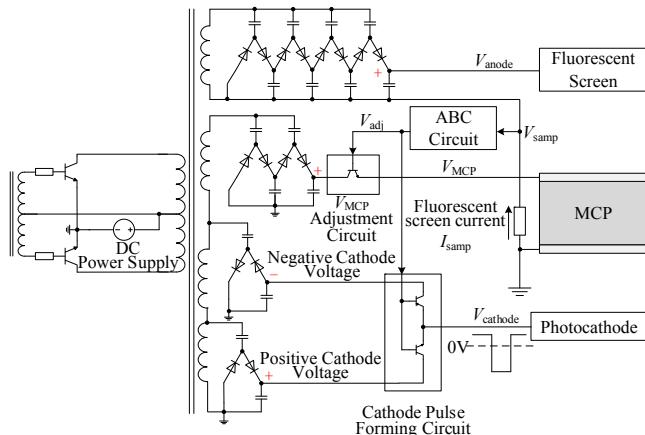


图 4 自动门控电源结构

Fig 4 Structure of auto-gating power supply

### 2.3 引线 EMC 分析

引线是高效的接收和辐射“天线”，见图 3，像增强器的引线包括从高压电源引出的外部供电线和高压电源与像管之间的互连引线。供电线长  $l_1=10\text{ cm}$  左右，互连引线长  $l_2=2\sim3\text{ cm}$ ，依据等效天线 ( $\lambda/4$ ) 的原理，按式(2)可估算敏感频率：

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{4l} \quad (2)$$

式中： $c$  为光速； $\lambda$  为波长，计算供电线在 750MHz 附近容易接收干扰，RS103 试验敏感频段是 300MHz~1.1GHz，二者比较符合，因此需对供电线进行高频共模滤波处理。计算互连引线容易在 2.5~3.75GHz 附近接收干扰，该频段未出现敏感，可作为次要 EMC 影响因素，但不能完全排除。

### 2.4 塑料外壳 EMC 分析

阳极电压高达 5.6kV，容易放电，便携应用限制了产品的重量，因此常规像增强器的外壳和高压电源外壳均采用壁厚薄、质量轻、耐高压的塑料材质，无屏蔽作用，也不能接 GND 或大地，很容易对外辐射干扰和受到外界干扰，因此需进行金属屏蔽处理。

像增强器属于成像器件，外壳不能完全屏蔽，外露视窗直径约 1.6~1.8 cm，按式(2)计算能屏蔽 4.16 GHz 以下的干扰。但由于供电线穿过外壳，屏蔽效能还会下降，因此再次明确了需对供电线进行滤波、屏蔽处理。

## 3 EMC 设计措施

综上分析，确定高压电源即是电磁噪声源，也是敏感源，其 ABC 电路因为维持亮度的缘由本身设计灵敏，供电线又是高效的“天线”，因此重点对高压电源进行 EMC 设计。外壳金属屏蔽和接地，是提高抗干扰能力最有效的措施之一，也作为设计重点。

### 3.1 输入滤波器设计

对供电线即输入端进行滤波器设计如图 5 所示。

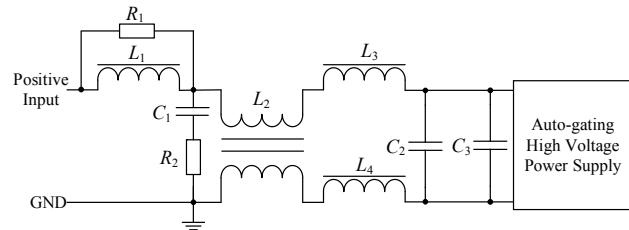


图 5 输入滤波器设计

Fig.5 Input filter design

采用两级滤波结构，前级由电感  $L_1$  和电容  $C_1$  构成低频滤波器，抑制高压电源产生的 24kHz~10MHz 差模低频干扰，电阻  $R_1$  和  $R_2$  用于阻尼调整；后级采用共模电感  $L_2$  和磁珠  $L_3$ 、 $L_4$  抑制吸收外界 300MHz~1.1GHz 共模干扰；末端采用电容  $C_2$  抑制差模高频成分，电容  $C_3$  则是降低高压电源的输入阻抗，避免阻抗失配引起输入振荡。

由图 1 可知滤波器的插入损耗在 24 kHz 后应高于 10~30 dB 才能通过 CE102 和降低 RE102 发射。对图 5 电路进行插入损耗仿真，结果见图 6，低频段较难实现高的插入损耗，可根据实际试验结果决定是否增大  $L_1$ 、 $C_1$ ，以进一步降低截至频率。

### 3.2 ABC 电路抗干扰设计

图 7 为 ABC 电路简图，荧光屏电流设置电路限定了荧光屏电流  $I_{\text{samp}}$  的变化范围，当外界光照强时， $I_{\text{samp}}$  增大并流经采样电阻  $R_S$  得到采样信号  $V_{\text{samp}}$ ，经 T 形反相比例运放放大得到调整信号  $V_{\text{adj}}$ ，再经后级电路控制降低 MCP 电压和阴极脉冲占空比，使得  $I_{\text{samp}}$

降低, 完成 ABC 反馈调整。因此, 在关键的信号流入、流出节点, 设置高频磁珠  $L_1 \sim L_3$ , 吸收外界耦合的干扰, 提高 ABC 反馈网络的抗电磁干扰能力。

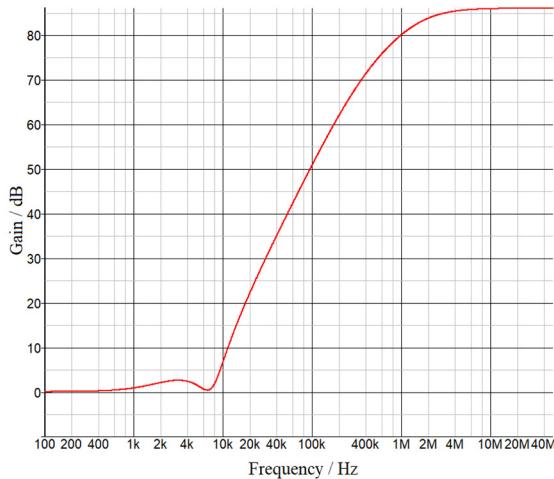


图 6 输入滤波器仿真

Fig.6 Input filter simulation

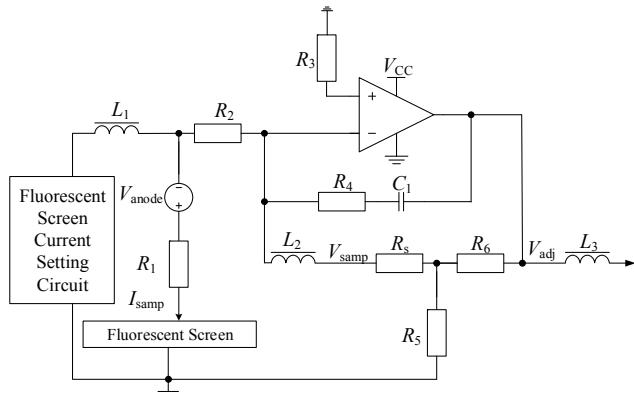


图 7 ABC 电路抗干扰设计

Fig.7 Anti interference design of ABC circuit

### 3.3 外壳屏蔽和接地设计

金属良导体能够高效反射、吸收电磁波, 因此在原有塑料外壳的基础上, 通过电镀、喷涂导电漆、激光增材制造等工艺将壳体外表面金属化, 实现内腔绝缘、外表面导电、质量轻的屏蔽设计。

如图 8, 从高压电源内部引出一根接地线, 采用焊接、导电胶等在图示 A、B、C 处接地, 尽可能缩短接地线长度以降低高频阻抗; 盖板和外壳底边在灌封硅橡胶后紧密接触导通, 实现整体屏蔽和接地。

## 4 试验验证及改进

将上述设计应用于样品并进行 EMC 试验, 其中 CE102、RE102 首次试验即通过, 见图 9、图 10。低频段, 图 9、图 10 中 24 kHz 基频和其高次谐波依然存在, 但均被滤波器衰减降低至限值以下, 满足要求, 说明滤波器有效抑制了沿供电线传播的传导干扰和

辐射。高频段, 干扰则被金属化外壳屏蔽, 测量结果接近实验室的背景噪声。

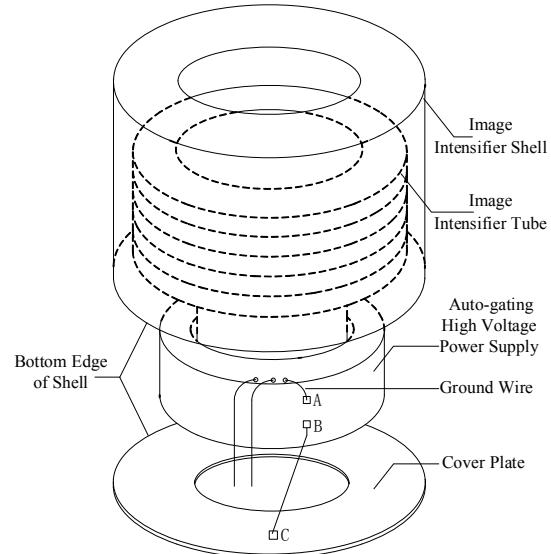


图 8 外壳屏蔽和接地设计

Fig.8 Shell shielding and grounding design

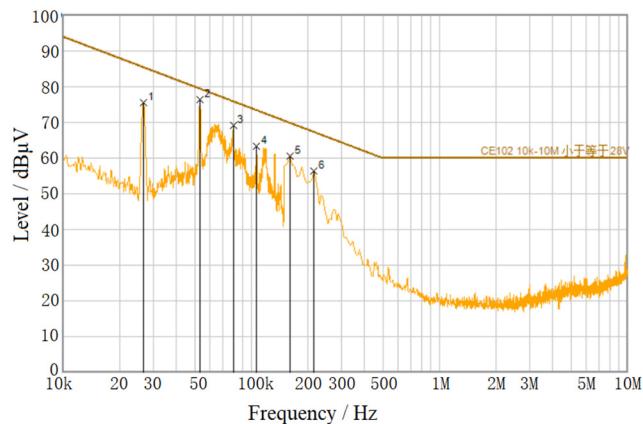


图 9 改进后的 CE102 结果

Fig.9 Improved CE102 results

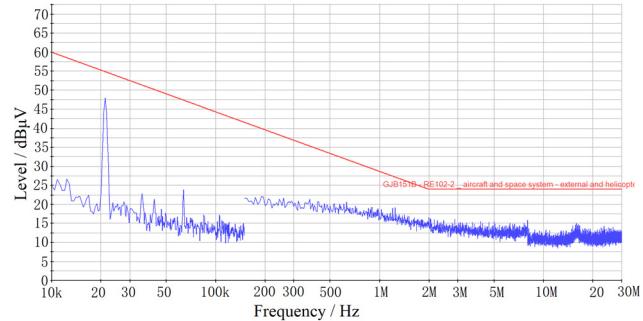


图 10 改进后的 RE102 结果

Fig.10 Improved RE102 results

200 V/m 的 RS103 试验结果大幅改善, 敏感现象减少且敏感频段范围缩小。分析原因是图 5、图 7 中的元器件阻抗不够高, 因此针对性选择在敏感频段内阻抗更高的磁珠、共模电感, 调整后测试产品在 10 kHz~40 GHz 整个频段内荧光屏均稳定显示, 无任何

敏感现象，说明采用上述设计后，产品具备了抗电磁干扰能力。

## 5 结论

本文首先通过试验摸底一种微光像增强器存在的 EMC 问题，然后从结构、工作原理方面分析超限原因，确定影响 EMC 的关键因素，最后针对性采取滤波、屏蔽和接地设计措施，最终该产品通过了最严限值的 EMC 试验，验证了上述 EMC 分析和设计的正确性。该产品在 200 V/m 高场强的 RS103 试验中全频稳定显示，说明产品已具备了抗电磁干扰能力，能够保证在战场复杂电磁环境下的夜视观察能力。

## 参考文献：

- [1] 范忠亮, 朱耿尚, 胡元奎. 认知电子战概述[J]. 电子信息对抗技术, 2015, 30(1): 33-38.  
FAN Zhongliang, ZHU Gengshang, HU Yuankui. An overview of cognitive electronic warfare[J]. *Electronic Information Warfare Technology* 2015, 30(1): 33-38.
- [2] 总装备部. 军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求与测量: GJB 151B-2013 [S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2013.  
General Equipment Department. *Military Equipment and Subsystem Electromagnetic Emission and Sensitivity Requirements and Measurements*: GJB 151B-2013[S]. Beijing: Military Standard Publishing and Distribution Department of the General Equipment Department, 2013.
- [3] 李定宣. 开关稳定电源设计与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006: 45-55.  
LI Dingxuan. *Design and Application of Switching Stable Power Supply*[M] Beijing: China Electric Power Press, 2006: 45-55.
- [4] 张昆林. 小型 16mm 双近贴式像增强器研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008: 40-41.  
ZHANG Kunlin. Research on minitype 16 mm double-proximity image intensifier[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008: 40-41.
- [5] Photek Inc. Photomultiplier & Photodiode User Guide[R/OL]. [www.photek.co.uk](http://www.photek.co.uk), 2016.
- [6] 杨继深. 电磁兼容(EMC)技术之产品研发及认证[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014: 11-14.  
YANG Jishen. *Product Development and Certification of Electromagnetic Compatibility (EMC) Technology*[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2014: 11-14
- [7] YANG Ye, YAN Bo. Feedback circuit design of an auto-gating power supply for low-light-level image intensifier[C]//*Proc. of SPIE*, 2015, 9795: 97950B-2.
- [8] 于争. 信号完整性揭秘[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013: 28-34.  
YU Zheng. *Revealing the Secrets of Signal Integrity*[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2013: 28-34.