

## 纸币处理系统的智能大脑

为了帮助全世界的现金中心安全地清分与处理纸币,德国捷德货币技术公司的工程师与物理学家使用多物理场仿真开发了磁性、光学与超声传感器,从而对采用模块化设计的高性能纸币处理系统进行了优化。

作者 ZACK CONRAD

“现金为王”这句话会引起我们许多人的共鸣,每天都要经手和处理数百万张纸币的专业现金中心想必对此更有感触。当今的现金流通量超过了以往任何历史时期。纸币数量的激增,加上纸币日益多样化的防伪标志以及复杂的票面设计,大大提高了对现金自动处理系统的要求。世界各地的印刷厂都必须保证每张新钞的最高质量。除此之外,中央银行和商业银行以及现金押运公司需要根据钞票面额、货币类型、纸币方向、真伪和整洁度,对纸币进行极其精准又快速地分拣。德国捷德货币技术公司(Giesecke+Devrient Currency Technology,简称捷德货币)的物理学家 Jan Domke 和 Klaus-Thierauf 受专业现金中心的委托,为高性能的模块化纸币处理系统(banknote processing systems,简称 BPS)开发专用传感器(图 1)。

为了降低运作成本,确保处理后的纸币被安全送出,捷德货币的处理系统采用了大批传感器阵列,以保证结果的可重复性和持久的耐用性。纸币被送入机器后,圆皮带传输系统(图 2 左)将对每张纸币的两面进行全面测量。分拣操作依赖于嵌入传输带中的大量传感器,其中假币被精准剔除,破损纸币由于质量欠佳而被检出甚至是撕碎。通过检查的纸币随后被包装成捆,进入现金流通或银行金库。捷德货币制造的典型机器能够在单次检测中从四个方向检测出多种不同的货币类型,这个高效率的系统每小时可处理超过 15 万张纸币。Domke 解释说:“我们的部门负责开发传感器系统及其评估机制,它们是机器的眼睛和大脑,承担着辨别纸币真伪、区分完整或破损

纸币的重要任务。”

### » 探测与分拣

纸币在通过处理系统时将经历三个主传感器检测系统:磁性、光学和超声波传感器。系统利用不同的传感特性,无缝、高效地对纸币进行检查与分拣。磁性传感器负责检测特殊的磁性防伪印记;光学传感器在紫外光、近红外光和可见光范围内根据钞票面额和货币类型实现分类;超声波传感器则检验纸币的残损状态(撕裂、孔洞、胶带等)。为了提高传感器的性能,加快不断发展的开发工作,Domke 和 Thierauf 使用多物理场仿真来深入洞察这些复杂现象背后的物理原理。作为开发过程的重要一环,仿真能够协助团队验证核心概念,开发团队还能够基于仿真结果与算法团队进行后续讨



图 1. BPS X9 是世界上最快的纸币处理系统,每秒可处理 44 张纸币,每小时的有效吞吐量超过 15 万张。中央模块的尺寸为 1.9 米高,5.7 米宽。

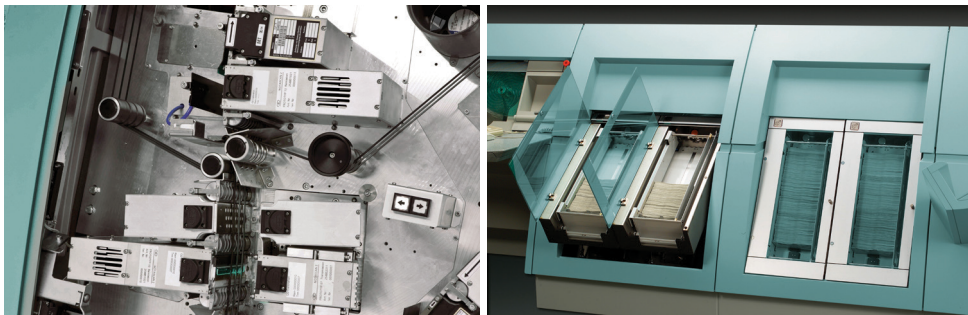
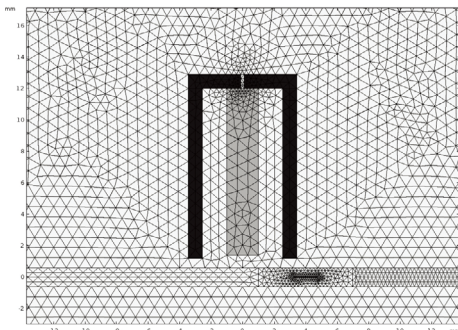


图 2. 左: 传感器模块的一部分, 其中圆皮带传输系统负责将纸币运送过处理系统。右: 分拣到大型交付模块的纸币是自动提款机中的散装纸币的来源之一。

论。“COMSOL® 软件让整个团队能够步调一致地观察与理解相关的物理效应, 是传感器开发过程中不可或缺的重要工具。” Domke 评价道。

### » 检测防伪标记

纸币的关键防伪标记是印在票面上的磁性墨水, 它相当于磁性探针, 当纸币穿过传输系统时, 这些探针将与传感器中永磁体的磁场相互作用。团队可以实时分析场线所受的影响, 以此作为指示信号, 并根据特定算法生成所需的信息。为



为了确保算法的准确性, 团队需要预先对磁场的变化进行模拟。Thierauf 为此求助于数值仿真, 其团队在软件

中创建了磁性传感器组件, 预定义其磁化强度, 然后利用动网格技术模拟软磁探针穿过传感器的情况。他们可以参照模型中获取的磁场读数调整参数, 从而得到满足检测需要的磁场形状。

当探针经过传感器时, 与磁场发生相互作用。磁性传感器探测到磁场变化后, 将产生的信号以电响应的形式从系统中发射出来。信号强度取决于探针与磁铁的距离, 而仿真对于理解这种依赖性至关重要。Thierauf 解释说: “磁场形成后, 你就能计算出信号强度与距离之

间的关系。基于这项数据, 我们就可以根据客户的要求对传感器进行优化, 然后在更专业的模型中改进设计。”

### » 对纸币的整洁度要求

在分拣纸币时, 除了防伪标记外, 还需要考虑纸币的整洁程度。进入处理系统的纸币可能已经破损、带有缺角或折角、污渍、涂鸦或胶带, 或者与其他纸币粘在一起。为了准确检测出粘在一起或黏有胶带的纸币, Domke 的团队使用了超声波阵列传感器。当纸币到达传感器的位置时, 传感器发射的脉冲超声信号穿过纸币到达另一侧的接收器。这里存在的主要问题在于实际上只有 1% 或更少的信号透过纸币到达了接收器; 99% 的声能都被反射回来。为此, 系统采用了 24 对发射器以提高接收器的分辨率(图 3)。然而大量发射器造成的信号串扰问题, 让管理信号时序、阻尼元件和几何构造成为了一个

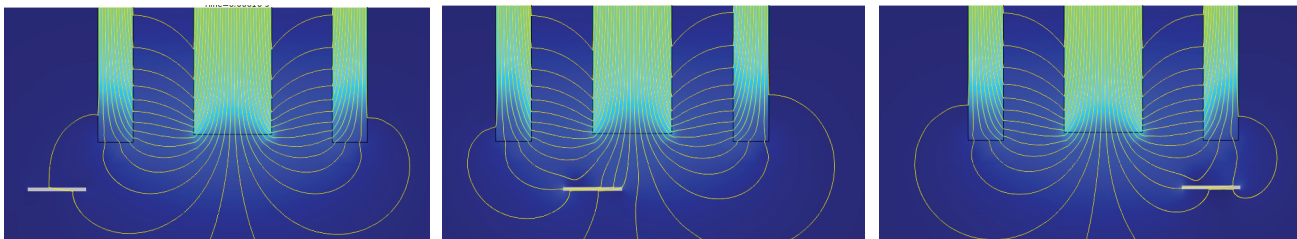


图 3. 通过磁性传感器的磁探针仿真。上: 永磁体(灰色)和铁芯(黑色)引导传感器的磁场。动网格用于模拟穿过虚拟传送通道的探针。下: 经过传感器并导致磁场变形的探针的时序。



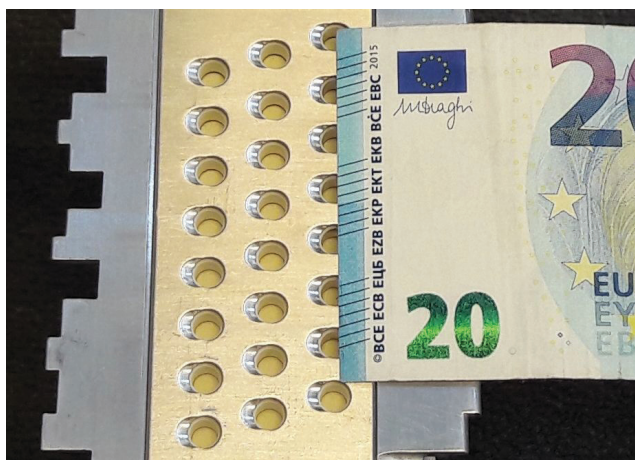


图 4. 由 24 个发射器组成的阵列可以发射通过纸币的超声信号。插图  
为 20 欧元的纸币。

复杂而棘手的难题。

Domke 及其团队利用多物理场仿真来应对这些挑战。当纸币经过传感器时会反射超声信号，由于声波的衍射现象，部分声波将绕过纸币被接收器提取（图 4）。由于这种衍射信号会干扰穿过纸币的微弱信号，因此接收器的检测操作需要在衍射信号到达之前完成。借助多物理场仿真，Domke 还模拟了声学通道以引导脉冲信号。通过模拟近场及远场特性、最大信号幅度和声场衰减，Domke 能够减少发射

信号的失真。Domke 解释说：“仿真是分析此类情况的关键工具，因为实验测量根本无法在如此微小的尺度下进行。如果我们能够从设计之初就通过仿真调整几何结构与时序，就能获得清晰且不受干扰的传输信息。”

### 未来的改进

DOMKE 和 THIERAUF 还将多物理场仿真引入到传感器开发流程的其他方面，并致力于扩展仿真的应用范围。他们采用多物理场方法来模拟超声换能器，

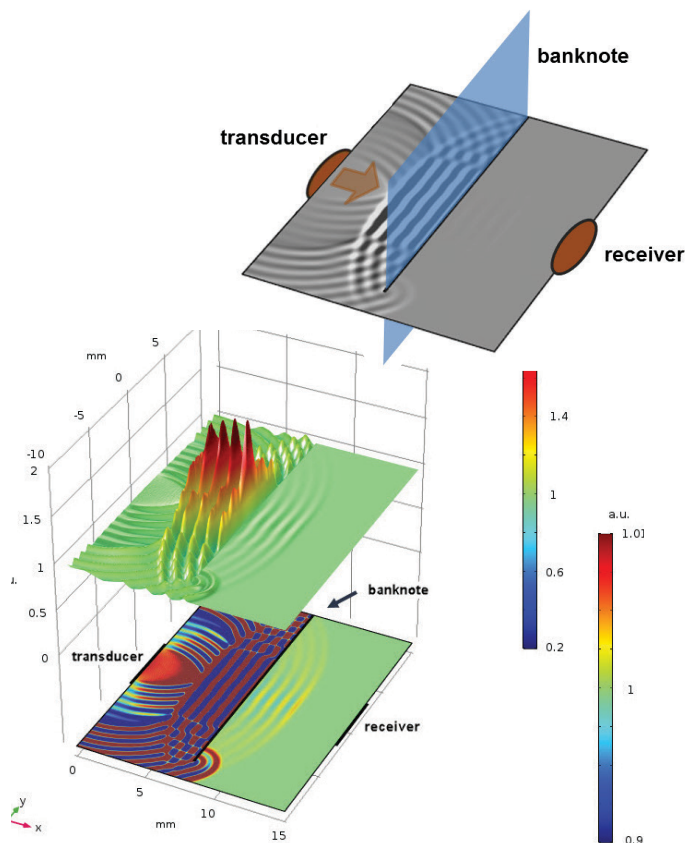


图 5. 换能器发射的声子波传播经过纸币边缘，最终到达接收器。  
上：模拟装置的草图。下：子波向纸币传播过程的两种表征方式。在此图中，一半子波撞击到纸币上，但只有一小分子波穿过纸币，而大部分子波在纸币边缘被衍射出去。图注：transducer – 换能器；banknote – 纸币；receiver – 接收器

并对印刷电路板的热管理系统进行传热分析。他们还将仿真结果与实验数据进行比较，高度吻合的结果是模型准确性的最有力证明。在未来，他们希望持续的仿真分析让团队的研究工作更加灵活，帮助他们更好地贴合客户需求，优化伪钞的分拣效果，尽可能让钞票整洁地呈现在人们面前。🌀

“仿真是分析此类情况的关键工具，因为实验测量根本无法在如此微小的尺度下进行。

——JAN DOMKE, G+D CURRENCY TECHNOLOGY 物理学家



德国捷德货币公司的物理学家 Klaus Thierauf 和 Jan Domke。