

柔性电子产业发展文献综述

孔善右¹,唐德才²,赵紫倩²,易锐²

(1. 江苏仕邦柔性电子研究院有限公司,江苏 南京 210044;

2. 南京信息工程大学 管理工程学院,江苏 南京 210044)

摘 要:柔性电子是当今时代的关键核心,因其具有独特的柔性、延展性以及高效、低成本等优点,在信息、能源、医疗、国防等领域具有广泛应用前景。阐述了柔性电子产业发展的必要性、紧迫性以及可行性;根据现有文献将我国的柔性电子产业发展分为理论研究、相关技术研究、主要产品研究、发展概况研究及存在问题研究五点进行分析;总结并提出柔性电子产业发展建议,从而提高公众对柔性电子产业的认知度与重视度,推动柔性电子产业的发展。

关键词:柔性电子;发展概况;发展建议

中图分类号:TP18 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)06-0106-05

Literature Review on Development of Flexible Electronics Industry

KONG Shanyou¹, TANG Decai², ZHAO Ziqian², YI Rui²

(1. Jiangsu Seenbom Flexible Electronics Institute Co., Ltd., Nanjing 210044, China; 2. School of Management

Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Flexible electronics, the key core of current era, has a wide range of application prospects in information, energy, medical, national defense and other fields due to its unique flexibility, ductility, high efficiency, low cost etc. This paper expounds the necessity, urgency and feasibility of the development of flexible electronics industry, classifies its development in China into 5 points as theoretical research, related technology research, major product research, development overview research and existing problems research based on the existing literature, and summarizes and puts forward suggestions for its further development, so as to enhance the public awareness and attention to the industry to promote its development.

Keywords: flexible electronics; development overview; development suggestion

0 引言

当今社会是科技创新的时代,是智能化的时代。柔性电子(flexible electronics, FE)是智能时代的关键核心,在众多领域应用前景广阔。十九届五中全会将科技自立自强作为我国国家发展的战略支撑,中央经济工作会议进一步强调了战略科技理念。科学技术前沿的主要领域包括八大方面,组合成英文的单词为 FAMISHED,英文原意是 extremely hungry,体现了我们对科学技术创新的极度渴望和需求。FAMISHED 中的 F 代表柔性电子,也称“柔性电子+”,其他领域包括人工智能、材料科学、泛物联网、空间科学、健康科学、能源科学和数据科学^[1]。科学前沿的核心和基础是柔性电子。本文的研究目的是推动柔性电子产业的发展,提高我国的国防力量、科技及医疗水平,促进经济的可持续增长,使我国在国际竞争中占据有利地位。研究目标是提高公众对柔性电子产业的认知度与重视度,为我国柔性电子产业的发展提供政策建议,推动柔性电子产业的发展。

1 柔性电子产业发展迫在眉睫

1.1 柔性电子产业发展的必要性

二战之后的科技及产业的发展主要是以美国为代表的西方国家为主导。现如今,以硅基材料和光电为核心基础的柔性电子产业正蓬勃发展,具备推动柔性电子产业发展的条件。我国柔性电子产业的发展关乎我国能不能走出四个自信,能不能走出中国道路,引领未来全球经济发展。在当今信息时代,若关键核心技术受制于其他国家,那么国家的发展也将受制于其他国家。柔性电子的发展对于推动国防、医疗等领域的发展以及提高人类生活质量具有重要的战略意义,符合社会发展的需求。当前柔性电子产业处于起步阶段,市场空间广阔,且柔性电子技术是国家颠覆性创新技术,其所带动的柔性电子产业能够为从业人员、企业家和投资人等带来超高的产业附加值。因此需要推动柔性电子产业的发展。

1.2 柔性电子产业发展的紧迫性

推动柔性电子产业发展迫在眉睫。未来很长一段时间内,柔性电子产业是全球发展的重点。在激烈的国际竞争中,谁先掌握了柔性电子产业的核心技术,谁就有可能在国际竞争中拥有制胜的主动权^[2]。我国的柔性电子产业起步较晚,缺乏相关核心关键技术,尚未形成完整的柔性电子产业链,在国际柔性电子产业分工中的地位较低,处于跟随阶段。因我国柔性电子产业上游发展不够,很多关键技术都依赖于其他国家,严重制约了我国柔性电子产业的发展。故而我国需要加快柔性电子产业核心技术的研发及设备的制造,抢占柔性电子产业发展的先机。从社会经济发展角度看,发展柔性电子产业,有利于推动我国产业升级转型,促进经济可持续增长。从国防民生角度看,柔性电子能够广泛应用于显示、照明、国防、航天航空、医疗等领域,有助于增强我国的国防力量,提高我国的医疗水平及公众生活水平。总而言之,为了我国的最高利益,我国应该重视柔性电子产业的发展,培养相关科技人才。

1.3 柔性电子产业发展的可行性

目前推动柔性电子产业发展的条件已经成熟。我国已有一批深入研究柔性电子的优秀科技人员,且各高校、各相关企业及地方政府积极支持柔性电子产业的研究,在几大省份均已建立相关前沿研究中心及实验室^[3]。大力推动柔性电子的产业化,尝试打造“柔谷”、“柔都”等,为我国推动柔性电子产业的发展创造良好的技术与环境基础。柔性电子产业具有广阔的市场,市场规模迅速扩张,柔性电子产业发展市场基础良好。我国制定了许多针对柔性电子产业发展的政策及重大研究计划,举办了柔性电子国际学术大会等学术会议,为我国柔性电子产业的发展提供了良好的政策帮扶和学术氛围。此外,我国许多柔性电子研究院、高校等,积极引进、培养柔性电子科研人员,为柔性电子产业发展提供了源源不断的人才。

2 柔性电子产业文献综述

通过对国内外关于柔性电子产业相关文献的学习研究,本文将柔性电子产业文献分为理论研究、相关技术研究、主要产品研究、发展概况及存在问题研究五点,并通过对这五点的详细阐述,使公众对现今的柔性电子产业发展研究的认知更加清晰。

2.1 柔性电子产业理论

柔性电子(FE)概念已存在几十年。20世纪60年代CRABB R L和TREBLE F C提出了柔性太阳能电池的概念^[4]。20世纪80年代研究人员研发了具有柔性特点的有机电子器件。2006年,为了解决基于无机半导体材料的传统光子、电子集成器件柔性差、无法与人体紧密贴合的问题,科学界首次提出了可延展无机柔性电子的概念,在无机半导体衬底上制备功能单元,将其剥离后集成到柔性衬底并通过波浪状导线互连,形成可延展柔性集成电路及仿皮肤电子器件^[5]。

柔性电子包含柔性与电子两个方面,柔性电子既要具

备柔性又要具备电子功能^[6]。柔性电子是在柔性基底上沉积有机、无机或有机无机复合材料,形成以电路为代表的电子元器件及集成系统的一门新兴科学技术^[7-9]。柔性电子技术根据工艺不同,也被称作打印电子技术、有机电子技术、软电子技术等,是在物理、化学、生物、电子、材料等二十多个学科高度交叉融合基础上形成的真正意义上的颠覆性科学技术^[10]。柔性电子器件同时具备有机半导体和无机半导体的特征,使无机半导体不仅具有可拉伸、可弯曲等变形特点,而且具有传统无机集成器件和电路的高性能、高可靠性^[11]。柔性电子具有独特的柔性和延展性、成本低、便携、可大面积应用、节能环保等显著优势,在显示、照明、集成电路、数字医疗、人工智能、能源、物联网、穿戴以及国防等领域均具有广泛的应用前景^[12-13]。

综上所述,目前众学者的研究主要集中于柔性电子,很少有学者对柔性电子产业有一个具体的定义,故认为,柔性电子产业(flexible electronics industry, FEI)是指参与柔性电子技术的研发,利用柔性电子技术所从事的与柔性电子产品、相关设备、材料等的研发、生产制造、应用等一系列过程活动的企事业单位集合体。柔性电子产业是在柔性电子技术的发展和应用的基础上发展起来的。

2.2 柔性电子技术

柔性电子技术是柔性电子产业发展的基石,柔性电子技术可细分为众多相关技术,本文主要研究了两种柔性电子印刷技术。

1) 柔性电子转印技术。柔性电子转印技术是将无机功能单元从源基底组装到柔性目标基底上最终形成柔性集成器件的技术^[8]。目前应用较为广泛的柔性电子转印技术是基于印章的转印技术,主要有剥离与印制两个步骤。即使用柔性印章粘起源基底上的薄膜器件,然后将之印制在新的目标基底上。转印技术可分为基于率相关的转印、激光驱动的转印、基于形状记忆聚合物的转印、基于微结构的转印技术等^[14]。其中基于率相关的转印技术是指在剥离过程中采取一个较快的分离速度,使得印章与薄膜器件间的能量释放率大于薄膜器件与源基底间的能量释放率;在印制时,采取一个较慢的分离速度,使得印章与薄膜器件间的能量释放率小于薄膜器件与目标基底间的能量释放率,这样才能够成功转印。

2) 喷墨印刷技术。喷墨印刷技术是一种利用数字化方法控制的材料直接图形化技术,通过电信号控制含有功能材料的墨水从微米级别的喷头直接沉积在基底表面形成高质量图案^[15]。目前最主要的无版数字化印刷技术就是喷墨印刷,具有成本低廉、程序简单等优点。喷墨印刷不受任何材料限制,几乎可以适用于所有的可印刷电子元器件和功能电路。WANG Y 等于2016年研究了一种通过喷墨打印结合表面改性和化学沉积,在柔性电子器件的柔性聚合物基底上合成铜图案的方法,且所制图案具有高附着力和低电阻率,较为可靠且成本低^[16]。GHOSALE A 等于2016年研究出可以在循环伏安法测量中成功应用的喷墨印刷导电电极^[17]。LI X Y 等于2019年成功地在柔性碳布基材上印刷了氧化石墨和银纳米颗粒,使其表面形成了一层柔性、导电和亲水的薄膜,并研制出具有大表面积

电子传输层的新型基板^[18]。

2.3 柔性电子产业主要产品

随着柔性电子技术的不断发展,柔性电子技术在许多产品中得到应用,各种柔性电子产品应运而生^[19-20]。柔性电子产品主要包括柔性电路板、柔性传感器、柔性显示器、有机发光二极管 OLED、薄膜太阳能电池板等。柔性电子产品主要由柔性基底、电极以及功能层三部分构成^[21]。柔性电子产品主要材料构成见表 1。

表 1 柔性电子产品主要材料

名称	主要材料
柔性基底	聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、聚酰亚胺(PI)、聚二甲基硅氧烷(PDMS)、热塑性聚氨酯(TPU)等有机高分子材料和聚合物
电极	氧化铟锡(ITO)、软金属(液态金属、金属纳米颗粒等)、导电纳米材料(石墨烯、碳纳米管等)、导电聚合物及其混合物、新兴碳导体等
功能层	有机材料、纳米材料(纳米颗粒、石墨烯等)、有机无机杂化材料等

柔性电路板是以聚酰亚胺或聚酯薄膜等为柔性基底制成的一种具有高度可靠性、绝佳可挠性的印刷电路板。柔性电路板由绝缘薄膜、导体以及黏接剂组成,有单层、双层以及多层板的不同结构,具有质量轻、配线密度高、厚度薄、弯折性好的特点,完美地诠释了柔性电子产品小型化和轻薄化的发展特点^[22]。柔性电路板已在数码相机、手机和计算机等产品以及医疗、汽车、航天等领域得到广泛应用。全球柔性电路板需求最大的应用市场是在手机和计算机中的应用,仅一台智能手机就需要搭载 10 至 15 片柔性电路板。政府和相关研究人员很重视柔性印刷电路板的研究^[23]。眭石军和廖平针对当前柔性印刷电路板缺陷检测中人工目检效率低的问题,设计了一套基于机器视觉技术的实时检测系统^[24]。

柔性传感器是一种采用柔性材料制成的传感器,与传统传感器相比,柔性传感器具有灵敏度高、制造工艺简单、柔韧性和延展性好等特点。柔性传感器具有丰富的结构形式,可按照要求任意设计布局,便于对被测量对象进行检测。柔性传感器主要可以分为应变传感器、压力传感器、气体传感器、温度传感器等^[25-27]。柔性传感器被广泛应用于可穿戴设备、医疗保健、人机交互等新兴领域。邹艳玲等于 2021 年通过研究基于 RFID 技术的无线无源柔性纺织应变传感器,发明了一种可以穿戴的柔性应变传感器^[28]。曹鑫林等于 2022 年以聚偏二氟乙烯(PVDF)为主材料,设计制备了液体芯 PVDF 压电纤维、电子皮肤柔性触觉传感器^[29]。

2.4 柔性电子产业发展概况

a) 全球发展概况

目前,柔性电子产业正处于起步阶段,随着柔性电子技术的发展,部分柔性电子产品已经投放市场。目前全球柔性电子产业的引领性企业主要有华为、苹果、三星、京东方、柔宇科技等。从当前柔性电子产品的产业化状况来

看,柔性电子市场尚不成熟,柔性显示在智能手机、液晶电视、平板计算机、车载产品等中占据的市场份额较少,但随着电子器件的柔性化与应用领域不断拓展,柔性电子未来的市场很大。

欧美等发达国家柔性电子产业起步较早,生产经验和制造工艺水平均居于世界前列,在柔性电子领域居于主导地位。在柔性电子各领域有一批全球领先的企业,例如,韩国三星、韩国 LG、日本夏普、日本东芝等在柔性显示领域的研发处于前列,占据了较多的市场份额;美国 M-FIEX、日本旗胜、台湾臻鼎等公司在柔性电路板领域的研发居于前列,占有较大的先发优势。欧盟、英国、美国、澳大利亚、日本、韩国等政府机构、高等院校及相关科研单位投入大量的人力、物力与研发资金,并建立研究中心与技术联盟,重点支持柔性显示、柔性电子器件、健康医疗等方面的研究及产业化。

b) 中国发展概况

为了发展柔性电子产业,我国制定了许多相关政策及重大研究计划。《中国制造 2025》中将柔显技术上升为国家电子信息崛起战略的一部分,“十三五”规划将新型显示产业列为重点发展的产业之一;国家自然科学基金委设立了相关的重大国际合作项目和系列面上项目,科技部也设立了专项 973 计划。各高校和地方政府积极支持柔性电子的研究,推动我国柔性电子产业的发展。中国科学院、北京大学、清华大学等单位在生物电子和柔性传感领域取得了一定的科研成果。复旦大学、南京工业大学、厦门大学等单位建立了先进材料与柔性电子研究基地,并取得了重要的研究成果^[30]。黄维院士及其团队在面向柔性显示的钙钛矿发光、基于生物医学光子学纳米平台的癌症诊断和治疗等领域取得重大成果^[3]。胡又凡研究员与彭练矛教授课题组制备出高性能的 CMOS 电子器件,并成功地将传感集成系统应用于人体信息监测^[31]。赵刚课题组制备出新型可重构回收的高性能柔性电子器件^[32]。

台湾元太科技、台湾友达光电等企业在我国柔性电子产业的中游柔性显示市场处于领导地位,我国京东方、华星、维信诺、天马微等企业也大力发展柔性电子产业。京东方(BOE)在柔性显示照明领域的研究中取得了重大进展,首次设计出全球独有的针对外折的 AMOLED 产品多膜层结构^[9]。厦门天马微第六代柔性 AMOLED 生产线,主要生产曲面与折叠显示屏,主要应用于智能手机、智能穿戴等柔性应用显示领域^[33]。以弘信电子为代表的国内企业,在柔性电路板等领域取得重大进步并占有一定市场。我国以华为、小米、OPPO 等企业为代表,在柔性电子产业下游手机、电视等终端应用领域占据一定的市场份额。

c) 柔性电子重点企业

1) TCL 华星光电技术有限公司。TCL 华星光电技术有限公司专注于半导体显示领域的研发。TCL 华星光电产品全线覆盖大尺寸电视面板和中小尺寸移动终端面板,已建成和在产的产线共有 7 条。TCL 华星光电积极布局 Mini-LED、Micro-LED、OLED、印刷显示等先进显示技术以及大尺寸触控模组、电子白板、拼接墙、车载、电竞等显示应用领域,进一步夯实在全球面板行业的核心竞争力。TCL 华星光电主要产线情况如下:①G8.5 液晶面板项目,

主要生产主流尺寸电视面板,是我国首条完全依靠自主创新建设的高世代液晶面板生产线。②G8.5 TFT-LCD 项目,生产新型显示产品等。③G6 LTPS (OXIDE) LCD/AMOLED 显示面板项目,主要生产 76.2~304.8 mm (3~12 吋)、400 PPI 以上高端智能手机、移动 PC 显示面板等。④G6 LTPS-AMOLED 显示面板项目,主要生产 76.2~304.8 mm (3~12 吋) 高分辨率柔性 and 折叠智能手机用显示面板。⑤G11 TFT-LCD 及 AMOLED 新型显示器件项目,主要生产新型平板显示。⑥G11 超高清新型显示器件项目,项目产品以 8 K 高附加值为主。

2) 北京维信诺科技有限公司。北京维信诺科技有限公司是中国科学技术产业化的杰出代表和中国 OLED 行业的领导者。维信诺是集自主研发、规模生产、市场销售于一体的高科技企业,是大陆第一家拥有 OLED 大规模生产线并能够批量生产的公司。维信诺拥有一支来自研发、生产、营销和管理等背景的专业人才,掌握了 OLED 显示屏及模块生产技术,建立了广泛的上下游产业链关系。维信诺在柔性电子方面的主要成果如表 2 所示。

表 2 维信诺主要成果

时间	成果
2002 年	建成国内第一条 OLED 中试生产线
2003 年	完成了 OLED 生产工艺技术的集成,实现了 OLED 屏及模块的小批量生产和销售
2008 年	建成了我国首条 OLED 大规模生产线
2010 年	成功开发 203.2 mm (8 吋) 彩色有机发光显示器 (AMOLED) 显示屏
2011 年	宣布启动 AMOLED 产业化项目,计划建设一条 4.5 代以上 AMOLED 生产线,并在 2013 年投产
2014 年	发布中国大陆首款低温多晶硅 (LTPS) 柔性 AMOLED 全彩显示屏,并建成了中国国内第一条专业的 5.5 代 AMOLED 量产线
2018 年	建成我国首条第 6 代全柔 AMOLED 生产线
2020 年	建成合肥第 6 代全柔 AMOLED 生产线、广州全柔 AMOLED 模组生产线

2.5 柔性电子产业存在问题

虽然我国柔性电子产业发展态势良好,但是由于我国柔性电子产业起步较晚,柔性电子产业在发展过程中也存在一些问题。

1) 人才匮乏。虽然我国在柔性电子行业已拥有一大批优秀学者(如黄维院士、冯雪教授等),并取得不少国际领先的研究成果,但是从整个行业来看,人才匮乏依然是十分严峻的问题。产业的竞争依赖于技术的竞争,技术的竞争归根到底是人才的竞争。现有柔性电子相关产业仍处在技术、设备和高端人才以海外引进为主阶段,这也是制约我国柔性电子技术可持续发展的重要影响因素之一。目前我国柔性电子产业的发展急需大量专业人才的加入,来为柔性电子的发展注入强大动力。

2) 产业布局不够完整。我国柔性电子企业与国际上的标杆企业相比,产线布局与产能规模仍然存在较大差

距。LG、三星等国外柔性电子领军企业均已形成完整的产业链布局,且在柔性电子产业的上游形成技术垄断。这导致我国在柔性电子产业的上游设备制造及材料环节较为薄弱,所需的关键材料及设备基本只能依赖进口,核心制作工艺上必须依赖外国企业,这也使我国的柔性电子产业安全受到严重威胁^[9]。

3) 创新能力不足。虽然近几年来中国的柔性电子企业(如 TCL 华星光电,京东方等)的产能都在逐步提高并取得了重大突破,但是仍然面临着产品单一、产品良率不高等问题。国内柔性电子企业创新能力不足、经营效率不高的问题十分显著,且柔性电子产品现有的应用还停留在柔性电子技术的初级阶段,并未很好地展现出柔性电子的优越性,所应用领域主要集中于娱乐型电子产品领域,而非医疗、军事等刚性领域,难以替代传统非柔性产品。柔性电子产业急需在技术上实现重大突破,以保证在和传统非柔性产品的竞争中占据优势。

3 结语

柔性电子产业是我国的战略新兴产业,未来发展前景广阔。尽管我国柔性电子产业在发展过程中存在很多问题,但是新基建、5G 的推广、国家持续出台的柔性电子相关政策等推动了柔性电子产业的发展。为进一步推动我国柔性电子产业的发展,本文提出以下四点发展建议。

1) 加快产业培育,壮大柔性电子产业规模。一是通过“技术-材料-器件”路径培育柔性电子产业。结合柔性电子产业发展趋势,聚焦有机电子、纳米电子、生物电子等领域,推动柔性光电器件加工制备技术、具有柔性功能的材料与器件的研发,以先进技术积累支撑产业发展。重点在消费电子、医疗健康、可穿戴设备等领域开发柔性电路板、柔性传感器、柔性显示屏、柔性电池等具有市场化前景的柔性电子终端器件,实现产业技术研发与应用的良性互动格局,发挥我国制造业优势,推进柔性电子信息产品的开发和普及应用,提升产品智能化水平,提高产业附加值。二是打造柔性电子智能制造产业园。遵循细分产业发展规律,积极强化产业准入、培育区域品牌、完善基础设施、搭建公共服务平台,打造集研发、标准制定、生产、产品应用为一体的柔性电子产业园区,引进和培育一批柔性电子相关企业,扩大产业下游应用的影响力。积极鼓励柔性电子产业龙头企业,通过资本运作、产业链协作、内部创新成果溢出、外部创新创业孵化等多种形式,打造高度一体化的柔性电子专业园。

2) 突破关键核心技术,构建协同创新体系。一是加强柔性电子核心技术攻关。依托柔性电子关键技术发展路线图,围绕柔性电子重点领域的关键核心技术、共性技术,择优遴选实施主体,推动一批关键核心技术实现产业化。支持柔性电子相关重点企业,与产业链上下游相关行业企业及高校、科研机构等,开展联合技术攻关。提升科技成果转化效率,发挥好市场配置资源的决定性作用。二是推动建设高水平创新载体。依托国内各高校以及柔性电子科研院所设立协同创新平台,设立柔性电子技术创体综合平台,建设从基础到应用及成果转化的印刷及柔性显示技术创体综合平台,开展前瞻性和关键技术研发以及产

业化。三是完善创新服务体系。以柔性电子行业创新需求为导向,鼓励支持国内外知名高校、科研院所等机构,深化产学研协同创新攻关,构建多形式、多层次的自主创新服务体系。进一步深化科技成果转化体制机制改革,建设众创空间、孵化器、加速器等创业载体以及中小企业公共技术服务平台、标准化技术平台等创新服务平台,提升创新服务能力和科技创新实效。推动重大科技设施、高校实验检测平台向集群企业开放,实现创新资源共用共享。

3) 聚焦项目人才引进,打造产业发展的积聚效应。一是强化重大项目建设。聚焦柔性显示、柔性电池、柔性电子皮肤等重点和培育方向,细化招商目录和产业地图,建立重大项目信息库,通过产业链招商、精准招商等多种形式,重点在柔性显示、柔性电池、柔性电路板等市场前景好、带动性强的项目开展国内外招商。注重柔性电子产业链完善、技术水平提升和未来市场需求,积极谋划技术成熟或有待提高的技术研发和产业化项目,推动我国在柔性电子核心技术创新研发、成果转化、标准制定、材料及智能制造等方面走向该领域的前沿。二是积极培育柔性电子产业人才。落实国家相关人才计划,加大对柔性电子技术人才培养的支持力度,依托骨干企业、产业基地、重大科研或工程项目,积极培养基础研究、产业技术、资本投资、园区运营等各类专业人才。在现有高校基础上,创建柔性电子学院,鼓励柔性电子企业设立硕士、博士工作站和博士后流动站,建立柔性电子产业人才培养体系。

4) 加大政策支持力度,优化产业发展环境。一是强化顶层设计和政策资源支持。建立长效跟踪机制,推动科技创新和技术储备,完善组织管理,明确近期、中期、远期目标。积极谋划出台支持柔性电子前沿探索、基础研究、应用攻关、产业转化全过程的相关政策,着力降低柔性电子产业布局的准入门槛,引导更多企业参与,建立健全优先使用自主创新成果的激励机制和风险容错机制。二是加大产业金融支持力度。加大原始创新研发资金的投入力度,强化天使投资、创业投资等创投基金的引导作用,完善基金决策机制,扶持创新中心、测试评价和产业孵化平台等建设。积极推进金融机构与重点企业的协调沟通机制,鼓励金融机构在提高授信额度、延长贷款期限、降低融资成本等方面支持柔性电子企业发展。三是深入开展国内外交流合作。聚焦柔性电子产业发展趋势,加强各区域产业合作,注重推动资源共享、互利共赢,形成柔性电子制造领域一体化发展格局。支持国内企业和科研机构与国外高端科研院所、优势企业加强对接合作,开展国际学术交流合作项目,促进协同创新和集成创新。引导企业加强国际产能合作,主动走出去参与国际竞争,加快提升产业发展层级。

参考文献:

- [1] 邱锐,贺春禄. 黄维院士:打造柔性电子产业推动中国电子信息产业变革[J]. 高科技与产业化,2021,27(7):20-23.
- [2] 李代姣,张嘉琪,赵晓慧. 中国科学院院士黄维:以柔性电子技术引领科技创新“开道超车”[N]. 河北经济日报,2021-09-07(3).
- [3] 韩爱青. 黄维院士:柔性电子为“双碳”提供路径与支持[J]. 高科技与产业化,2021,27(11):28-31.
- [4] CRABB R L, TREBLE F C. Thin silicon solar cells for large

flexible arrays[J]. Nature,1967,213(5082):1223-1224.

- [5] 周焯. 打造全生态柔性电子产业链 领跑柔性电子技术创新发展 2019 第二届柔性电子国际学术大会在杭州举行[J]. 中国科技产业,2019(8):45-47.
- [6] 崔铮. 柔性混合电子——基于印刷加工实现柔性电子制造[J]. 材料导报,2020,34(1):1009-1013.
- [7] 华经情报产业研究院. 全球柔性电子市场前景广阔 中国全产业链发展不均衡[J]. 高科技与产业化,2021,27(7):36-39.
- [8] 王宙恒,陈颖,郑坤炜,等. 柔性电子技术中的半导体材料性能调控概述[J]. 物理学报,2021,70(16):164203.
- [9] 贾异,卞曙光. 柔性电子技术发展现状及趋势[J]. 科技中国,2021(1):17-20.
- [10] ZHOU Z, ZHANG H S, LIU J Q, et al. Flexible electronics from intrinsically soft materials[J]. Giant,2021,6:100051.
- [11] CORZO D, TOSTADO-BLÁZQUEZ G, BARAN D. Flexible electronics:status,challenges and opportunities[J]. Frontiers in Electronics,2020(1):594003.
- [12] YU H H, CAO Z H, ZHANG Z, et al. Flexible electronics and optoelectronics of 2D van der Waals materials[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2022, 29(4):671-690.
- [13] GONG M, ZHANG L Q, WAN P B. Polymer nanocomposite meshes for flexible electronic devices[J]. Progress in Polymer Science,2020,107:101279.
- [14] 黄银,李海成,陈颖,等. 可延展柔性光子/电子集成器件及转印技术[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学,2016,46(4):61-74.
- [15] 陈晨,褚夫强,孙加振. 数字印刷技术在柔性电子制造领域的应用及进展[J]. 今日印刷,2020(10):43-45.
- [16] WANG Y, WANG Y, CHEN J J, et al. A facile process combined with inkjet printing, surface modification and electroless deposition to fabricate adhesion-enhanced copper patterns on flexible polymer substrates for functional flexible electronics[J]. Electrochimica Acta,2016,218:24-31.
- [17] GHOSALE A, SHANKAR R, GANESAN V, et al. Direct-writing of paper based conductive track using silver nano-ink for electroanalytical application[J]. Electrochimica Acta, 2016, 209:511-520.
- [18] LI X Y, ZHAO Y H, YU J, et al. Layer-by-layer inkjet printing GO film and Ag nanoparticles supported nickel cobalt layered double hydroxide as a flexible and binder-free electrode for supercapacitors[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2019, 557:691-699.
- [19] RIGHINI G C, KRZAK J, LUKOWIAK A, et al. From flexible electronics to flexible photonics: a brief overview[J]. Optical Materials,2021,115:111011.
- [20] 廖嘉宁,张东石,李铸国. 飞秒激光制备柔性电子器件进展[J]. 光电工程,2022,49(2):50-67.
- [21] 王灏珉,何茂帅,张莹莹. 碳纳米管薄膜的制备及其在柔性电子器件中的应用[J]. 物理化学学报,2019,35(11):1207-1223.
- [22] 刘晓莉. 柔性电子技术的主要产品及其应用前景[J]. 大科技,2022(4):155-156.
- [23] OSTFELD A E, DECKMAN I, GAIKWAD A M, et al. Screen printed passive components for flexible power electronics[J]. Scientific Reports,2015(5):15959.

(下转第126页)

2.4 仿真结果分析

从上面的仿真结果可以看出:

1) 当隔磁环长度在 8 mm~28 mm 范围内变化时,随着隔磁环长度的增加,电磁铁的启动电磁力先增大后基本不变,当隔磁环长度为 14 mm 时电磁铁的启动电磁力为 3.51 N,仍小于目标值 4.12 N,不满足先导阀打开要求;

2) 当隔磁环位置在 -3.0 mm~7.1 mm 范围内变化时,电磁铁的启动电磁力先增大后减小,当隔磁环位置左移 3.0 mm 后,电磁铁的启动电磁力为 14.17 N,远大于目标值 4.12 N,满足先导阀打开要求;

3) 因此原电磁铁最好的优化方案是将隔磁环位置左移 3.0 mm。

3 试验验证

从仿真结果中可以看出,电磁铁最好的优化方案是将隔磁环位置左移 3.0 mm。根据仿真结果对导向筒中隔磁环位置进行调整,优化后的导向筒结构及启动电磁力测试结果如图 9 所示。

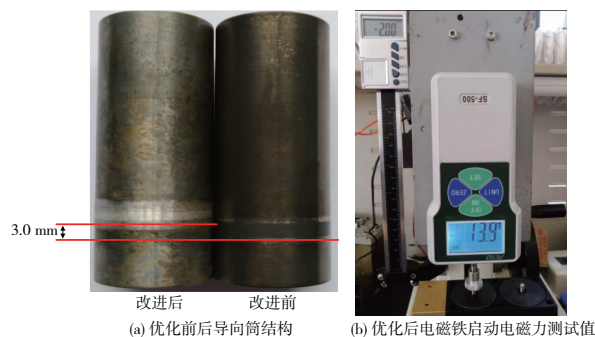


图 9 结构优化及启动电磁力测试试验

从图 9 的测试结果中可以看出,将隔磁环位置左移 3.0 mm 后电磁铁的启动电磁力增加为 13.9 N,与仿真结果基本吻合,相比于原电磁铁启动电磁力 3.47 N 增加了 10.4 N,远大于目标值 4.12 N,满足先导阀打开要求。

4 结语

本文通过对矿用电磁铁启动电磁力仿真优化得到:

- 1) 隔磁环参数对电磁铁的启动电磁力有重要影响;
- 2) 在一定范围内通过增加隔磁环长度可以提高电磁铁的启动电磁力,但影响程度不大;
- 3) 隔磁环位置对电磁铁的启动电磁力有重要影响,通过改变隔磁环位置可以提高电磁铁的启动电磁力。

参考文献:

- [1] 柴伟峰,廖瑶瑶,廉自生,等. 矿用电磁阀动态特性分析[J]. 液压与气动,2020(8):42-48.
- [2] 廖瑶瑶,任怀伟,张德生,等. 液压支架换向阀的液动力计算方法及其应用[J]. 煤炭学报,2019,44(5):1609-1615.
- [3] 魏列江,李彬杰,严晓岚,等. 线圈匝数对高速开关电磁铁响应时间影响研究[J]. 液压气动与密封,2018,38(2):79-82.
- [4] 黄路路,王金林,冀宏,等. 基于 Maxwell 的比例电磁铁有效工作特性研究[J]. 液压气动与密封,2017,37(3):38-42.
- [5] 毛乐园,周连刚. 影响比例电磁铁吸力的结构因素研究[J]. 液压气动与密封,2019,39(2):41-44.
- [6] 马婷,廉自生. 本质安全型电磁铁的性能仿真研究[J]. 矿山机械,2013,41(3):120-123.
- [7] 龚斌. 比例电磁铁静态特性的研究[J]. 流体传动与控制,2017(2):25-32,35.
- [8] 田昊,赵禹任,侯交叉,等. 基于电流调制的电磁开关阀开关特性研究[J]. 液压与气动,2019(5):9-14.
- [9] 吴锐,王仪明,方继根,等. 一种车用高速开关阀电磁力影响因素研究[J]. 液压与气动,2020(9):168-173.
- [10] 王强. 螺管式电磁铁设计与仿真分析[D]. 湘潭:湖南科技大学,2013.
- [11] 谢斌. 阀用直流电磁铁吸力研究[D]. 湘潭:湖南科技大学,2018.
- [12] 丁廷哲,潘孝斌. 高压气动大流量电磁阀设计和仿真[J]. 液压与气动,2017(1):21-25.

收稿日期:2022-07-01

(上接第 110 页)

- [24] 陆石军,廖平. 基于机器视觉的 FPC 缺陷检测系统[J]. 仪表技术与传感器,2020(9):64-68.
- [25] JIAN M Q,XIA K L,WANG Q,et al. Flexible and highly sensitive pressure sensors based on bionic hierarchical structures[J]. Advanced Functional Materials,2017,27(9):1606066.
- [26] XIA K L,WANG C Y,JIAN M Q,et al. CVD growth of fingerprint-like patterned 3D graphene film for an ultrasensitive pressure sensor[J]. Nano Research,2018,11(2):1124-1134.
- [27] HONG S Y,LEE Y H,PARK H,et al. Stretchable active matrix temperature sensor array of polyaniline nanofibers for electronic skin[J]. Advanced Materials,2016,28(5):930-935.
- [28] 邹艳玲,郑聪,江心雨,等. 基于 RFID 技术的无线无源纺织

应变传感器研究进展[J]. 丝绸,2021,58(8):53-59.

- [29] 曹鑫林,王先进,郭成东,等. 一种电子皮肤的触觉传感性能研究[J]. 压电与声光,2022,44(1):118-124.
- [30] 徐恒,侯沁. 柔性电子产业发展潜力巨大[N]. 中国电子报,2016-10-28(2).
- [31] 新型. 北大超薄柔性电子器件研究获得重要进展[J]. 化工新型材料,2018,46(4):110.
- [32] 陈婉婉,章韬. 中科大制备新型高性能柔性电子器件[J]. 科教文汇,2022(2):1.
- [33] 姜健. 厦门柔性电子产业现状与发展建议[J]. 厦门科技,2022(1):60-62.

收稿日期:2022-11-02