

DOI: 10.3901/JME.2009.09.126

# 印制电路板拆解技术与拆解工艺综述\*

杨继平<sup>1,2</sup> 向东<sup>1</sup> 高鹏<sup>1</sup> 汪劲松<sup>1</sup> 段广洪<sup>1</sup> 杨继荣<sup>3</sup>

- (1. 清华大学精密仪器与机械学系 北京 100084;
2. 后勤工程学院供油工程系 重庆 400016;
3. 湖南文理学院机械工程学院 常德 415000)

**摘要:** 综述了电路板拆解单元技术、工艺和设备等方面的研究现状与进展。按照电路板拆解的过程顺序,分别从元器件的识别与定位、电路板解焊技术、拆解施力方式、元器件与焊锡的分离、收集与分类等5项单元技术方面描述了近年来的技术现状与发展;在分析各种拆解工艺和设备的基础上,根据拆解目的和拆解方法的不同,分选择性拆解工艺与设备、面向材料回收的同时性拆解工艺与设备、面向元器件功能重用的同时性拆解工艺与设备、混合拆解工艺与设备等4个方面对当前的各种拆解工艺和设备进行了综合与分类。最后指出,电路板拆解在采用新方法的拆解单元技术、电路板拆解机理分析、更加经济实用、环保、快速的拆解工艺和装备等方面有待进一步研究与开发。

**关键词:** 废旧电路板 印制电路板 拆解 电子元器件 回收

中图分类号: X705

## Disassembly Technology and Disassembly Process of Waste Printed Circuit Boards: a State-of-the-art

YANG Jiping<sup>1,2</sup> XIANG Dong<sup>1</sup> GAO Peng<sup>1</sup> WANG Jinsong<sup>1</sup>  
DUAN Guanghong<sup>1</sup> YANG Jirong<sup>3</sup>

- (1. Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084;
2. Department of Oil Supply Engineering, Logistical Engineering University, Chongqing 400016;
3. College of Mechanical Engineering, Hunan University of Science and Arts, Changde 415000)

**Abstract:** The research status and progress in the field of disassembling unit technologies, processes and equipment of printed circuit boards (PCBs) are reviewed. According to the disassembly process order, the technical status and progress in five unit technologies are described, i.e. identification and location of components, unsoldering technology, mode of disassembling force application, separation of component and tin solder, collection and classification. On the basis of analysis of various disassembling processes and equipment, according to different goals and disassembly methods, four kinds of disassembly process and equipment are classified and discussed in detail, i.e. selective disassembling, simultaneous disassembling for material recycling, simultaneous disassembling for component function reuse, and hybrid disassembling. Finally it is pointed out that further research and development should be carried out in aspects of adopting new methods for disassembling unit technologies, analysis of PCB disassembly mechanism, and developing more economical, practical, environment-friendly and quick disassembling process and equipment.

**Key words:** Waste printed circuit board Printed circuit board Disassembly Electronic component Recycling

## 0 前言

我国是世界电子电器产品的消费大国,每年有数以百万吨计的电子废物产生,日益快速增长的电

子废物给环境和社会带来了巨大压力。为了尽量降低电子废物给环境和社会造成的影响,有效实现其资源化,世界各国纷纷开展其资源化技术研究。国内外研究表明,在对电子废物资源化的过程中,实现电路板的拆解是电子废物资源化需要解决的一个难点问题,是资源化过程的一个重要步骤<sup>[1-6]</sup>。然而,到目前为止,尽管电路板的组装和装配过程已经实

\* 国家科技支撑计划(2006BAF02A16)和重庆市科技攻关(CSTC, 2007AC2063)资助项目。20080918收到初稿,20090309收到修改稿

现了很高的自动化,但其工业化的拆解过程却一直处于技术含量很低的手工操作状态<sup>[2-4,7]</sup>。

分析和研究表明,废旧电路板虽然作为一个整体被淘汰或失去了其原有的功能,但其上很多元器件还远未达到使用寿命,仍然具有较高的可用性和可靠性。而且,很多元器件中含有各种有毒有害物质、贵金属,在废旧电路板破碎粉碎之前有必要对这些元器件进行拆解分离,以利于物质富集,降低后续处理中物质分离的难度。另外,电路板在生产装配过程中会产生许多不合格产品,为了降低生产成本和维修成本,也需要将尚未使用过的元器件拆解下来重新使用。在电子电器产品维修行业,虽然已有不少针对单个元器件的拆解技术和设备,但这些拆解技术和设备远不能满足当前大批量废旧电路板资源化处理的需要。因此,高效的拆解是实现废旧电路板资源化非常重要的一步<sup>[2,4]</sup>,研究电路板拆解技术、工艺和设备具有非常重要的现实意义。目前世界上很多国家的学者和工程师对其进行了多方面的研究,取得了不少成果。笔者在收集、整理国内外大量有关电路板拆解的论文、专利和研究成果的基础上,总结了电路板拆解技术、工艺和设备等方面的研究现状,并提出电路板拆解研究需要进一步解决的若干问题。

## 1 电路板拆解单元技术

### 1.1 元器件的识别与定位

电路板自动化拆解的首要问题是电路板上元器件的识别与定位。为获得电路板和待拆解元器件的相关信息,可以通过提取它们的二维图像、三维图像、X光照片、红外照片等来获得。不同的方法、设备具有不同的效果。FELDMANN等<sup>[1]</sup>评价了以上四种图像对拆解对象的识别效果,认为三维图像包含信息丰富、范围较大并且费用不高,具有较高的综合利用价值。其次是图像信息的处理与实时传递问题。拍摄的图像通过模式识别进行特征分析和提取,获取元器件的位置、方位、外形封装信息,并和事先储存在数据库中的信息对比,从而获得拆解该元器件的必要信息,再将该信息及时转换为控制指令,实现对其机械化和自动化拆解。KNOTH等<sup>[2,7]</sup>和KOPACEK等<sup>[3]</sup>研发了一套带图像处理的识别系统。KNOTH认为为了达到元器件的准确定位和识别,识别系统的位置精度需要达到0.1 mm级,并且需配备字符识别处理模块以识别元器件上的字符标识。文献[8-10]也采用类似技术和方法来获得图像、提取信息,进行拆解对象的识别与定位控

制。

### 1.2 电路板解焊技术

解焊是电路板拆解过程中的关键步骤之一,目前解焊的主要方式是焊锡加热熔化,焊锡溶解<sup>[6,11-12]</sup>和化学腐蚀与电镀<sup>[13]</sup>的方法研究虽少,但足以引起工业界的注意和兴趣。

焊锡熔化一般通过加热实现,在各种电路板拆解设备中常用的加热方法有:金属热传导<sup>[14-17]</sup>、气体热对流加热<sup>[18-21]</sup>、液体热对流加热<sup>[22-25]</sup>、红外辐射加热<sup>[26-30]</sup>和激光加热<sup>[2,7,31-32]</sup>等,不同的加热方法有不同的解焊效果<sup>[1]</sup>。江博新<sup>[17]</sup>分别采用电炉加热、电热板加热、沙浴加热、焊锡液浴、热空气加热和真空吸锡电加热对废家电电路板进行了拆解试验对比,认为热空气加热和真空吸锡电加热应用于工业化拆解时能耗、环境污染、设备投资、运行成本等相对较低。为了增强加热效果,有些文献综合采用两种或多种方法来熔化焊锡<sup>[33-36]</sup>。文献[37]对元器件进行热风加热时采用了两种方法提高传热效率,一是向热空气中加入水蒸汽,使其热容增加,二是在对集成电路芯片引脚一边吹热风一边抽真空以加强对流。

焊锡溶解方面,HOSODA等<sup>[6,38]</sup>利用在常温下呈液态的元素镓(纯度99.999 9%)扩散到联接界面使界面溶解,从而分离被联接的两部分。利用液态镓拆解电路板上的芯片无疑是一种值得探讨的好方法,这方面还有待深入研究,比如溶解时间及工业化的可行性等。文献[11]发明了一种解焊剂,由汞、锡铅合金、氯化锌、凡士林、樟脑、桉树油和马铃薯粉等材料通过适当工艺制成,不需借助其他工具,可以解焊任何元器件,且对元器件不会造成损伤。在焊锡的化学解焊方面,STENNETT等<sup>[13]</sup>采用硝酸和过氧化氢两种蚀刻剂来去除球栅阵列封装芯片和单列直插内存模块上的锡铅焊料,在超声搅拌作用下,4~8 min可以将元器件很好地去除,而且不损坏电路板和其他元器件。但在焊球节距较小时,为了使蚀刻剂进入并充分接触焊球,需要采用喷射蚀刻剂的方式。STENNETT还利用锡铅电镀液进行了单列直插内存模块引脚上焊锡的去除试验,在300 mA电流密度下,平均大约14.5 min后,引脚上的焊锡被“吸”到阴极去了。但这种方法需要将所有待拆解的焊点接触电镀液并保证电路畅通,因此无法拆除密脚元器件尤其是采用倒装法的元器件。

### 1.3 拆解施力方式

目前各种电路板拆解设备上采用的施力方式主要有:使用各种夹具对元器件进行抓取<sup>[2-3,7,16]</sup>,真空抽吸元器件<sup>[9,14,37,39]</sup>,振动<sup>[36,40-42]</sup>或超声波振动<sup>[40,43]</sup>、冲击<sup>[20,44]</sup>实现元器件与基板的分离,切

割元器件的引脚实现分离<sup>[20, 45-46]</sup>, 扫刷分离元器件<sup>[19, 35, 47-48]</sup>, 或者利用重力<sup>[25, 49]</sup>、弹性变形力<sup>[49-50]</sup>、离心力<sup>[42, 51]</sup>、电磁力<sup>[24, 40]</sup>、剪切力<sup>[52]</sup>、流体喷射<sup>[22, 34, 53]</sup>等方式实现元器件的脱落或分离。

根据拆解对象数量和范围的不同, 拆解可以分为选择性拆解和同时性拆解两种。选择性拆解常用于维修行业拆解个别坏的元器件, 或者从废旧电路板上拆解个别有再利用价值的元器件, 通常采用抓取和真空抽吸的方式拆解元器件<sup>[16, 54, 55]</sup>。同时性拆解适合于对电路板部分或所有元器件进行同时拆解, 常采用振动、冲击、扫刷或刮刷、引脚切割、或其他具有普适作用的力的方法。

#### 1.4 元器件与焊锡的分离、收集与分类

元器件与焊锡的分离、收集与分类是电路板拆解必不可少的工作, 其技术适用性和效果将直接影响电路板拆解的整体效率。目前这部分研究与技术应用主要集中在元器件分离与分类、焊锡分离与收集、元器件与焊锡分离、不同焊料间的分离等方面。

将元器件从拆解地移走, 除了可以采用夹具夹取或真空抽吸的选择性拆解方式外, 在同时性拆解时可以采用筛网接住并收集脱落下来的元器件<sup>[34]</sup>, 采用传送带将脱落的元器件移开或运送到元器件回收箱中<sup>[36, 46-47]</sup>。为了对拆解下来的元器件识别与分类, 文献[9]将元器件拔出后, 对元器件进行机器自动识别并分类; FELDMANN 等<sup>[1, 33]</sup>利用基于线阵电荷耦合器件图像传感器(Charge coupled device, CCD)的识别单元, 将元器件分成有毒、可再利用、含铝、含铜、含重金属的元器件等几部分。

对焊锡的分离收集主要有刮擦<sup>[26, 35, 45, 56]</sup>、热流体喷射<sup>[57-58]</sup>、真空抽吸<sup>[19, 47, 55, 59]</sup>、表面张力分离<sup>[14]</sup>等方法。YOKOYAMA 等<sup>[26, 56]</sup>采用砂带磨光机对电路板表面的剩余焊锡进行刮擦并收集。文献[35]采用两个高速转动的滚刷对电路板背面的焊锡进行滚动刷除, 焊锡去除率可以达到 90%以上。

将混在一起的元器件和焊锡分离, 主要有依据尺寸的筛网分离和依据密度的浮力分离两种方式。筛网分离是将解焊后脱落的元器件和焊锡采用负压抽吸或重力作用通过过滤网, 固态、体积较大的元器件被拦下, 液态的或颗粒状的焊料则通过过滤网, 实现二者的分离<sup>[19, 40, 44]</sup>; 浮力分离是利用元器件和焊锡的密度差异, 将电路板放入密度比焊锡小、但比元器件重的液体中加热来实现分离<sup>[22, 41]</sup>。

有铅焊料和无铅焊料的分离可以利用两种焊料的密度差异或对 X 射线的透过率不同来区分。文献[40]在热液体中将熔化的焊锡通过传送带送入一种磁流体中, 磁流体密度介于有铅焊料和无铅焊料的密度之间, 有铅焊料则会沉淀, 而无铅焊料会

浮在磁流体上面。文献[10]则利用无铅焊料的 X 射线透过率比有铅焊料的透过率高而将二者区分开来。

## 2 电路板上元器件的拆解工艺与设备

### 2.1 选择性拆解工艺与设备

对电路板上的元器件进行选择性拆解主要有两个目的: 维修时拆解有问题或不再使用的元器件, 或者拆解废旧电路板上还能使用的元器件以便功能重用。前者拆解时需要避免对周围其他元器件造成不良影响, 后者需要避免机械操作造成元器件损伤, 或导致元器件内部产生热应力。拆解目的不同, 拆解对象不同, 人们为此设计了各种选择性拆解工艺与设备。就针对批量废旧电路板处理的选择性拆解工艺而言, 归纳起来主要有以下几种。

(1) 惰性介质加热后去除元器件<sup>[39, 53]</sup>。采用常规加热方法, 元器件上残留的焊锡会氧化, 使其浸润性和再焊性变差。文献[39]采用氮气加热元器件, 残留在元器件上的焊锡因不受氧化膜的影响而成为球体, 因此元器件可以直接进行焊接而再次使用。

(2) 热风红外加热, 手工去除元器件。人工的灵活性在元器件识别、分类、抓取等方面具有比较优势, 文献[28]和[30]采用红外加热, 然后使用普通手工工具拆解元器件。据称, 采用该方法拆解了超过 300 个品种大约 1 000 000 个元器件, 经测试, 90%以上的元器件可以继续使用。

(3) 采用图像识别方法的选择性拆解工艺。KNOTH<sup>[2, 7]</sup>、KOPACEK<sup>[3]</sup>和 HOFFMANN<sup>[31]</sup>等基于柔性拆解单元和拆解族的概念, 研制了一个模块化拆解单元, 包含元器件识别、激光解焊等模块, 其工艺如图 1 所示。STOBBE 等<sup>[18]</sup>也提出了类似的工艺, 并在系统中重点考虑了元器件拆解时的质量控制与检测, 主要通过图像识别对元器件的外观尺寸进行检测。

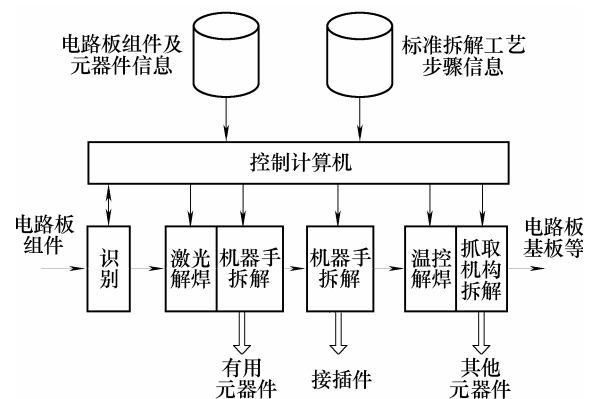


图 1 基于图像识别的选择性拆解工艺

选择性拆解设备方面，市场上已有很多针对单个元器件的选择性拆解设备，各国也申请了不少专利<sup>[9-10, 14, 28, 30, 39, 49]</sup>。文献[60]采用流水线作业，对只含单个元器件的电路板进行拆解，加热至焊锡熔化后，吸取元器件并置于金属板上再加热，以分离去除附着的焊锡，使元器件可以再使用。

### 2.2 面向材料回收的同时性拆解工艺与设备

电路板中含有丰富的金属和非金属资源。将废旧电路板作为资源回收，开发同时性拆解工艺与设备，降低回收成本，提高材料的回收效率，是各国学者和工程师考虑的主要问题之一。目前这方面的研究大体可以归纳为以下三个方面。

(1) 利用振动冲击刮刮等外力从电路板上同时分离元器件和焊锡。YOKOYAMA等<sup>[26, 56]</sup>提出的拆解工艺如图2所示，并设计了相应的拆解装备<sup>[61]</sup>。在加热使焊锡保持熔化的情况下，首先沿垂直电路板表面的方向施加振动冲击，去除掉元器件和部分焊锡，然后沿平行于电路板表面的方向施加振动和刮擦，去除掉电路板上的其余焊锡，从而分别得到元器件、焊锡和电路板基板。专利<sup>[41-42, 51, 62]</sup>等也分别提出了类似废旧电路板处理工艺，或设计了相应的拆解设备。

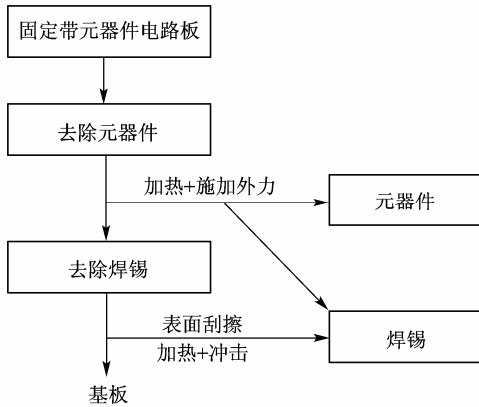


图2 采用外力分离的面向材料回收的同时性拆解工艺

(2) 对元器件引脚切割或对焊接点磨削以分离元器件、焊锡和基板。文献[45]提出的处理工艺流程如图3所示。电路板经过预处理后，将其元器件安装面朝下，并用小钢球填充支撑其下部；加热后采用刮刮的方式去除背面的贴片元器件和部分焊锡，接着用切削轮对焊锡面进行切削；再将元器件安装面朝上，用剥离刀将元器件剥离，再用切削轮对电路板元器件安装面切削指定深度，最后对切削下来的焊锡、产生的废气等加以收集和进一步处理。文献[20, 63]采用不同的切削方式，其具体的拆解工艺也有所不同。

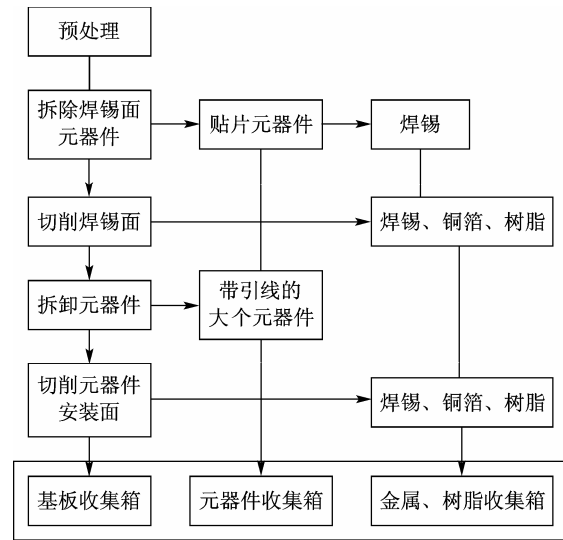


图3 采用引脚切削的面向材料回收的同时性拆解工艺

(3) 通过首先分离回收焊锡以拆解电路板。采用振动<sup>[64]</sup>、滚刷<sup>[35]</sup>、喷射热媒体<sup>[39, 57-58]</sup>、酸液浸泡<sup>[62]</sup>等方法首先将焊锡分离出来并回收，以此达到拆解电路板的目的。文献[35]将电路板固定在托架上，在随链条移动的同时对其均匀预热，然后对电路板吹高温热风加热，使焊锡达到熔化状态，并采用两个钢丝滚刷对电路板的焊锡面(朝下布置)进行刮刷，使焊锡去除。据称，采用这种方法焊锡去除率达到90%以上。文献[44]利用旋转的笼子式容器在分离元器件和电路板的同时回收焊锡。

### 2.3 面向元器件功能重用的同时性拆解工艺与设备

为了使拆解下来的元器件能够再次使用，延长其使用寿命，提高材料的综合利用率，同时降低拆解成本，人们面向元器件功能重用开发了一些同时性拆解工艺与设备<sup>[19, 34, 40, 47]</sup>。贴片元器件在焊锡熔化后所需的拆解力较小，采用高温压缩气体拆解贴片元器件可以避免对其造成机械损伤。文献[34]和[47]分别设计了一种采用高温压缩气体拆解贴片元器件的设备。文献[19]将废旧电路板均匀加热至所有焊点熔化后，采用负压抽吸装置把元器件和焊料合金从基板上吸下，并采用机械滚刷提高分离率。再利用高温压缩气体将元器件和焊料吹向过滤网，固态的元器件和液态的焊料随即被分离。

应用振动、冲击的方法既可以拆解贴片元器件，又可以拆解插装元器件，参数设置合适时也能够保证元器件功能完好<sup>[36, 65-69]</sup>。文献[65]将电路板元器件安装面斜向下安装固定在传送带上送入红外加热区加热，当焊锡熔化后，在电路板焊锡面施加敲击振动，使元器件脱落。该设备可以配备多名操作者，一旦元器件没有被振动下来，可以采用手工方法使其脱落。文献[66-68]采用多升距凸轮可以依

次提供逐渐增大的冲击力,从而实现贴片元器件和插装元器件的分别拆解。文献[66]采用各种冲击结构对插装元器件引脚实施接触式冲击,再用吹扫器扫刷元器件和焊锡,并用传送网带和焊锡收集盘分离收集元器件与焊锡。文献[67]则在前者基础上,改为对电路板卡具实施直接冲击,而不接触插装元器件的引脚,保护了引脚不会变形,其工艺流程如图 4 所示。文献[68]直接将电路板固定装置与冲击机构连接,待加热至焊锡熔化后,冲击机构使元器件震落下来,再用传送网带和焊锡收集盘分离和收集元器件和焊锡。

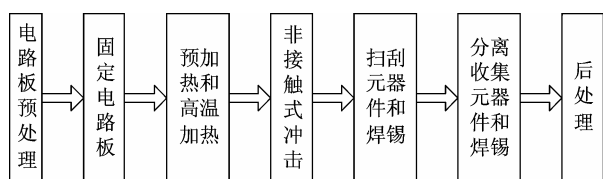


图 4 面向元器件功能重用的同时性拆解工艺

## 2.4 混合拆解工艺与设备

废旧电路板种类繁多,其上各种元器件的可重用价值或再资源化价值、拆解成本等相差极大,单纯采用前述的某一种拆解工艺不一定能达到最佳的综合拆解效益。为此,一些学者和工程师根据所拆

解电路板上元器件的具体情况,综合前述几种拆解工艺的特点,提出了一些混合拆解工艺,可以分为两类。

(1) 先利用图像识别选择性拆解再同时性拆解的混合拆解工艺。文献[8]采用光学传感器识别电路板上元器件的位置、类型等,并与数据库中的数据比较,然后分别控制真空抽吸和抓取机构选择性摘除识别的贴片元器件和插装元器件,最后对剩下的元器件采用滚刷去除。德国 FELDMANN 等<sup>[1,33]</sup>的拆解工艺分为四步:首先采用三维图像获取待拆解元器件的相关拆解信息,采用热风加热和真空抽吸的方式拆解贴片元器件,采用红外加热和平口钳等抓取机构拆解插装元器件;然后采用红外加热和施加惯性力等方式对所有元器件同时进行拆解;再对没有拆解下来的元器件进行破坏性切割等方式拆解;最后脱落到传送带上的元器件被送出加热拆解单元,采用线阵 CCD 进行分类,如图 5 所示。这种工艺融合了选择性拆解和同时性拆解的优点,既保证了功能重用元器件的性能,又使其他只需材料回收的元器件拆解成本降低,不足之处在于选择性拆解部分的成本较高。

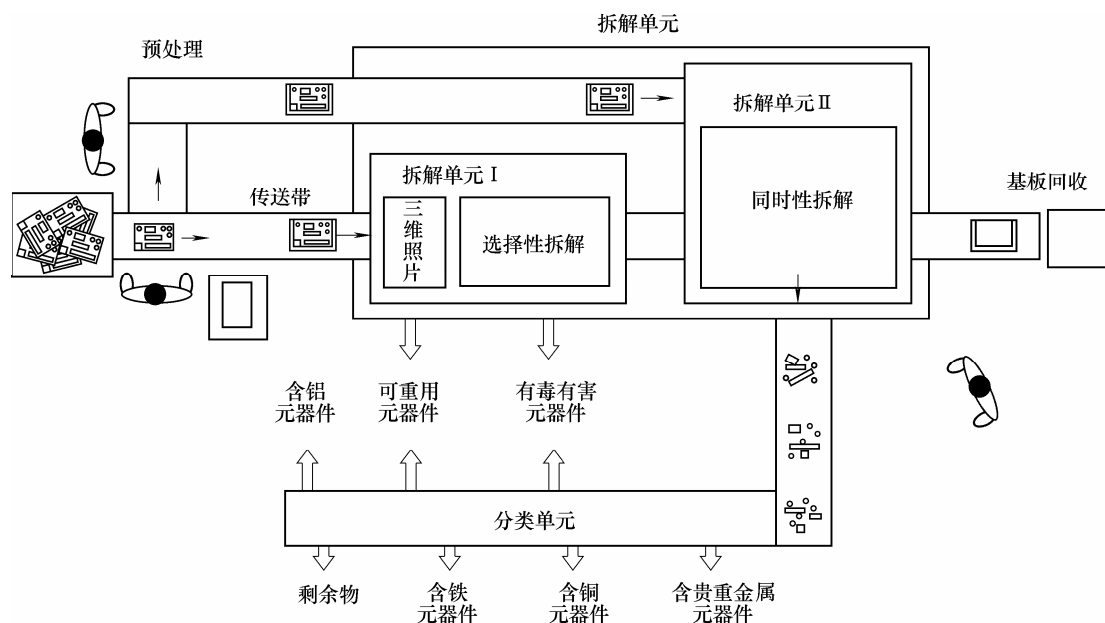


图 5 利用图像识别的混合拆解工艺

(2) 先完好性拆解再材料回收性拆解元器件的混合拆解工艺。文献[46]将电路板元器件安装面朝下沿运送线传输,分别通过预热室和热风炉加热,然后采用高温风嘴向电路板上的元器件吹热风,使贴片元器件和部分插装元器件脱落,未脱落的元器件再采用固定刀从基板上强制性剥离下来。该方法降低了拆解成本,但也使部分元器件丧失了功能重

用的价值。文献[48]将电路板悬垂夹持在搬运机构上,首先加热电路板并分离收集焊锡,接着对电路板吹热风以分离收集贴片元器件,用 50~200 Hz 的声波振动电路板以分离收集插装元器件,滚刷扫刮基板表面以收集未脱落的元器件,最后收集基板。采用这种方法,许多振动、吹落的元器件经检测可以再用,实现了不同元器件的功能重用和材料回收。

其不足之处是, 由于插装元器件引脚与插孔的相对运动方向与重力方向垂直, 使插装元器件的拆解效果欠佳。

### 3 结论

综合目前电路板拆解技术、设备等方面的研究与发展, 笔者认为电路板拆解技术在以下几个方面还有待进一步研究与开发。

(1) 研究微波加热、高频加热、感应加热、电介质加热等技术在电路板解焊中的应用, 主要围绕如何进一步提高电路板解焊的效率等, 还需研究温度梯度对功能重用元器件产生的热应力影响等问题。

(2) 研究超声波振动、声波振动等技术在电路板拆解中的应用, 比如对元器件拆解效率、功能性能和外部形状的影响, 研究对元器件无害、无损、高效的拆解施力方法和机构。

(3) 研究快速、经济的元器件识别与定位技术, 研究同时性拆解下来的元器件的快速分类分离技术, 研究基于各种物理量的元器件经济、高效的分类分离方法和设备。

(4) 针对不同类型的电路板, 面向不同回收目的, 研究更加经济实用、快速的拆解工艺, 研发高效、经济、环保的电路板新型拆解装备, 尤其是研究柔性的、适度自动化的拆解系统, 以达到较佳的综合拆解效益。

(5) 分析不同拆解工艺对元器件可重用性的影响, 比如元器件引脚的再焊性、浸润性、残留焊锡等。

(6) 探索面向工业实际应用的焊锡溶解、化学解焊等解焊方式, 继续深入研究更加快速经济的解焊剂或溶解剂, 更加高效、实用的溶解工艺和化学解焊工艺。

另外, 随着电路板拆解技术、工艺、设备研究的不断深入, 采用无铅焊接的电路板的拆解技术与工艺、废旧元器件的快速检测技术和方法、面向拆解和回收处理的产品设计等课题也正在引起人们的重视和兴趣。

### 参 考 文 献

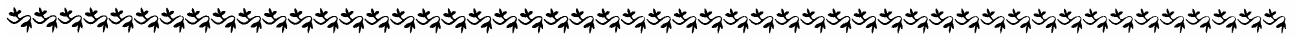
- [1] FELDMANN K, SCHELLER H. Disassembly of electronic products[C]// Proceedings of the 1994 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, San Francisco, CA, USA, 1994: 81-86.
- [2] KNOTH R, HOFFMANN M, KOPACEK B, et al. Intelligent disassembly of electr(on)ic equipment[C]// Proceedings of Second International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, EcoDesign 2001. Tokyo, Japan, 2001: 557-561.
- [3] KOPACEK P, KOPACEK B. Intelligent, flexible disassembly[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 30(5-6): 554-560.
- [4] LI Jianzhi, SHRIVASTAVA P, GAO Zong, et al. Printed circuit board recycling: A state-of-the-art survey[J]. Electronics Packaging Manufacturing, IEEE Transactions on, 2004, 27(1): 33-42.
- [5] GOOSEY M, KELLNER R. Recycling technologies for the treatment of end of life printed circuit boards (PCBs)[J]. Circuit World, 2003, 29(3): 33-37.
- [6] HOSODA N, HALADA K, SUGA T. Smart disassembly [joint separation method][C]// Proceedings of the 2004 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment. Scottsdale, AZ, USA, 2004: 166-167.
- [7] KNOTH R, BRANDSTÖTTER M, KOPACEK B, et al. Automated disassembly of electr(on)ic equipment[C]// Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment. San Francisco, California, USA, 2002: 290-294.
- [8] ENGLERT K. Anlagen sowie verfahren zur automatischen entstückung: Weltorganisation für geistiges eigentum, WO9413124[P]. 1994-06-09.  
ENGLERT K. Process and plant for the automatic removal of components: World Intellectual Property Organization, WO9413124[P]. 1994-06-09.
- [9] 上森大嗣, 櫻井邦男. 電子部品取り外し装置及び電子部品取り外し方法: 日本, JP2003092466 A[P]. 2003-03-28.  
UEMORI H, SAKURAI K. Electronic component removing apparatus and electronic component removing method: Japan, JP2003092466 A[P]. 2003-03-28.
- [10] 横沢雄二, 岡田英生. 部品が搭載されたプリント基板の解体装置および解体方法: 日本, JP2001195587 A[P]. 2001-07-19.  
YOKOZAWA Y, OKADA H. Device and method for disassembling printed circuit board with packaged component: Japan, JP2001195587 A[P]. 2001-07-19.
- [11] VARGAS Martinez M, LOPEZ Partida R. Removedor universal de componentes electrónicos, pasta desoldadora para retirar componentes electrónicos de montaje superficial discretos y convencionales. Organización

- mundial de la propiedad intelectual, WO2004/062843 A2[P]. 2004-07-29.
- VARGAS Martinez M, LOPEZ Partida R. Universal detacher for electric components, comprising a desoldering paste for removing standard, discrete, surface-mounted electric components: World Intellectual Property Organization, WO2004/062843 A2[P]. 2004-07-29.
- [12] 細田奈麻絵, 須賀唯知, 荻谷義治. 接合された構成材からパーツを分離回収する方法及び分離容易な継ぎ手構造: 日本, JP3896462-B2[P]. 2007-01-05.
- HOSODA N, SUGA T, KARIYA Y. Separating and recovering joined parts obtained from discarded home electrical appliance: Japan, JP3896462-B2[P]. 2007-01-05.
- [13] STENNETT A D, WHALLEY D C. Novel rework techniques for electronic assemblies[C]// Proceedings of 1998 IEEE/CPMT 2nd Electronics Packaging Technology Conference, 8-10 Dec. Singapore, 1998: 196-201.
- [14] 鈴木元治. 半導体パッケージの取り外し方法: 日本, JP3019848-B1[P]. 2000-01-07.
- SUZUKI M. Semiconductor package removal method: Japan, JP3019848-B1[P]. 2000-01-07.
- [15] 境忠彦, 酒見省二. 電子部品去除装置: 日本, JP7131151[P]. 1995-05-19.
- SAKAI T, SAKEMI S. Electronic component removal apparatus: Japan, JP7131151[P]. 1995-05-19.
- [16] VIAL H W, LAKE N W. Electric tool for desoldering surface mounted devices: America, US4614858[P]. 1986-09-30.
- [17] 江博新. 《废家用电器回收利用技术研究及工程化应用》项目验收报告 BM2003523[R]. 徐州: 徐州国贸稀贵金属综合利用研究所, 2007.
- JIANG Boxin. Acceptance report of project "Research on recycling technologies of waste home appliances and its industrial applications". BM2003523[R]. Xuzhou: Resource Recycling Institute of the Ministry of Domestic Trade, 2007.
- [18] STOBBE I, PÖTTER H, GRIESE H, et al. Quality challenges of reused components[C]// Proceedings of 2004 International IEEE Conference on the Asian Green Electronics, January 5-6, 2004, City University of Hong Kong, Hong Kong, China, 2004: 218-225.
- [19] 张杰. 废弃电路板的电子元件、焊料的分拆与回收方法及装置: 中国, CN1600458A[P]. 2005-03-30.
- ZHANG Jie. Method of disassembling components and separating solder from waste PCB and its apparatus: China, CN1600458A[P]. 2005-03-30.
- [20] 祖山真一, 山際康之, 武田和彦, など. 電子部品回収装置及び電子部品回収方法: 日本, JP10209634[P]. 1998-08-07.
- SOYAMA S, YAMAGIWA Y, TAKEDA K, et al. Electronic component extraction apparatus from PCB: Japan, JP10-209634[P]. 1998-08-07.
- [21] 富田守雄, 小俣一夫. 電子部品取付け装置または電子部品取外し装置: 日本, JP10256794[P]. 1998-09-25.
- TOMITA M, OMATA K. Electronic component mounting and removal apparatus for PCB: Japan, JP10256794[P]. 1998-09-25.
- [22] 海上雅毅. 焊料回収方法及回収装置: 中国, CN1125582C[P]. 2003-10-22.
- KAIJYOU M. Recovering method of solder and its recovering apparatus: China, CN1125582C[P]. 2003-10-22.
- [23] 宋守许, 潘君齐, 刘志峰, 等. 印刷线路板液态导热介质中脱焊分离器件的方法和装置: 中国, CN1832663A[P]. 2006-09-13.
- SONG Shouxu, PAN Junqi, LIU Zhifeng, et al. Method of desoldering and separating components from printed circuit board in liquid conduction media and its apparatus: China, CN1832663A[P]. 2006-09-13.
- [24] LEICHT H W. Verfahren und vorrichtung zum auslöten von bauelementen, insbesondere von SMD-bauelementen: Deutschland, DE4211241-A1[P]. 1993-10-14.
- LEICHT H W. Desoldering surface mounted device components: Germany, DE4211241-A1[P]. 1993-10-14.
- [25] ENGLERT K. Anlage sowie verfahren zur simultanen entfernung oberflächenmontierter bauelemente: Deutschland, DE4241412-A1[P]. 1994-06-16.
- ENGLERT K. SMD components simultaneous removal assembly: Germany, DE4241412-A1[P]. 1994-06-16.
- [26] YOKOYAMA S, IJI M. Recycling of printed wiring boards with mounted electronic parts[C]// Proceedings of the 1997 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment. San Francisco, CA, USA, 1997: 109-114.
- [27] PUTTLITZ K J, LIDESTRI K. Replacing flip chips on MLC multichip modules using focused infrared (IR): the basics.[C]// Proceedings of the 1992 International Symposium on Microelectronics (SPIE Vol. 1847). San Francisco, CA, USA, 1992: 384-390.

- [28] KRUEGER E F. Method for the salvage and restoration of integrated circuits from a substrate : America, US4270260[P]. 1981-06-02.
- [29] HSIAO Y. Photothermic desoldering unit : America, US6301436B1[P]. 2001-10-09.
- [30] KRUEGER E F. System for salvage and restoration of electrical components from a substrate : World Intellectual Property Organization, WO96/01972[P]. 1996-01-25.
- [31] HOFFMANN M, KNOTH R, KOPACEK B, et al. How can experiences from reuse activities influence the development of DFE-tools[C]// Proceedings of the 2001 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, Denver, CO, USA, 2001: 264-267.
- [32] TAN S. Procédé et dispositif pour fixer des microplaquettes par radiations à courte longueur d'onde: European patent office, EP13345-A[P]. 1980-07-23.  
TAN S. Apparatus for fastening a microchip to a lead frame: European patent office, EP13345-A[P]. 1980-07-23.
- [33] FELDMANN K, SCHELLER H. The printed circuit board - a challenge for automated disassembly and for the design of recyclable interconnect devices[C]// International Conference on Clean Electronics Products and Technology, Edinburgh, UK, 1995: 186-190.
- [34] TRODLER J, REUTER H, FRANKE M. Vorrichtung zum entstücken von mit SMD-bauelementen bestückten schaltungsträgern : Deutschland, DE19525116-A1[P]. 1997-01-09.  
TRODLER J, REUTER H, FRANKE M. Removal device for circuit board surface-mounted components: Germany, DE19525116-A1[P]. 1997-01-09.
- [35] 禅三津夫, 董祺, 高橋宝四郎. プリント基板のはんだ除去方法、はんだ除去装置およびキヤリヤー: 日本, JP3243412-B2[P]. 2001-10-19.  
ZENZOU T, DONG Qi, TAKAHASHI T. Method, apparatus and experience of solder removal for PCB: Japan, JP3243412-B2[P]. 2001-10-19.
- [36] CHAPMAN R. Apparatus and process for removing surface mounted components from printed wiring assemblies: America, US5758817[P]. 1998-06-02.
- [37] COX W L, POOLE J D, SLESINGER K A. Rework and underfill nozzle for electric components : America, US6499644-B2[P]. 2001-07-05.
- [38] 細田奈麻絵, 須賀唯知, 菊谷義治. 接合された構成材からパーツを分離回収する方法及び分離容易な継ぎ手構造: 日本, JP3896462-B2[P]. 2007-01-05.  
HOSODA N, SUGA T, KARIYA Y. Separating and recovering joined parts obtained from e.g. discarded home electrical appliance : Japan, JP3896462-B2[P]. 2007-01-05.
- [39] 浅野富雄, 白井貢, 田村光範. 電子部品取外し装置: 日本, JP9-252177[P]. 1997-09-22.  
ASANO T, SHIRAI M, TAMURA M. Electronic component removal apparatus: Japan, JP9-252177[P]. 1997-09-22.
- [40] 横沢雄二, 吉田陽. プリント基板の解体方法および解体装置: 日本, JP2004022607 A[P]. 2004-01-22.  
YOKOZAWA Y, YOSHIDA A. Method and apparatus for dismantling printed circuit board : Japan, JP2004022607 A[P]. 2004-01-22.
- [41] 湧川朝宏. プリント基板からの電子部品および半田の分離装置および分離方法: 日本, JP3460480-B2[P]. 2003-08-15.  
YUUGAWA A. Electronic components extracting method for used printed circuit boards : Japan, JP3460480-B2[P]. 2003-08-15.
- [42] BUCHTA B, PFEIFFER H. Verfahren und vorrichtung zum entstücken von leiterplatten mit darauf angeordneten elektrischen und/oder elektronischen bauteilen : Deutschland, DE4330677-A1[P]. 1995-03-16.  
BUCHTA B, PFEIFFER H. Printed circuit board electronic components removal device : Germany, DE4330677-A1[P]. 1995-03-16.
- [43] 高瑞. 废旧电路板元器件拆解技术研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2007.  
GAO Rui. Research on disassembly of waste printed circuit board[D]. Beijing: China Academy of Machinery science and Technology, 2007.
- [44] 溝口尚武. プリント基板から有価物を回収する装置: 日本, JP2791645-B2[P]. 1998-06-19.  
MIZOGUCHI S. Recovery of solder from printed board: Japan, JP2791645-B2[P]. 1998-06-19.
- [45] 福島哲夫, 中井章二. プリント回路基板の解体処理方法および解体処理システム: 日本, JP2000124597 A[P]. 2000-04-28.  
FUKUSHIMA T, NAKAI S. Dismantling method and system of Printed circuit board : Japan, JP2000124597 A[P]. 2000-04-28.
- [46] 那須敏幸, 竹内暢人, 香宗我部秀雄. 実装基板のリサイクル装置: 日本, JP9-83129[P]. 1997-03-28.  
NASU T, TAKEUCHI T, KASYUUGABU H. Substrate

- recycling equipment for PCBs: Japan, JP9-83129[P]. 1997-03-28.
- [47] 湧川朝宏. プリント基板からの電子部品および半田の分離装置および分離方法: 日本, JP10200255-A[P]. 1998-07-31.  
YUUGAWA A. Solder isolation apparatus for isolating electronic components from PCB: Japan, JP10200255-A [P]. 1998-07-31.
- [48] 藤田恵之助. プリント基板廃材の処理方法及びその装置: 世界知的所有権機関国際事務局, WO02/42016 A1[P]. 2002-05-30.  
FUJITA K. Method of processing printed board scrap and apparatus for the same: World Intellectual Property Organization, WO02/42016 A1[P]. 2002-05-30.
- [49] ZABEL C, LEICHT H W. Vorrichtung zum abtrennen von bauelementen von einer unterlage, insbesondere zum auslöten von elektronischen bauelementen: Weltorganisation für geistiges eigentum, WO96/31109[P]. 1996-10-03.  
ZABEL C, LEICHT H W. Device for separating components from a substrate, in particular for unsoldering electronic components: World Intellectual Property Organization, WO96/31109[P]. 1996-10-03.
- [50] В.И.Копусь и Ф. Г. Петров. Устройство для демонтажа радиоэлементов с печатных плат: Россия, SU1660234-A1[P]. 1991-06-30.  
KOPUS V I, PETROV F G. Dismantling jig e.g. for PCB radio components: Russia, SU1660234-A1[P]. 1991-06-30.
- [51] 久角隆雄, 上村武志. 回路基板の処理方法: 日本, JP3832135-B2[P]. 2006-07-28.  
HISASHIKADO T, KAMIMURA T. Processing apparatus for printed circuit board: Japan, JP3832135-B2[P]. 2006-07-28.
- [52] PARK J, KOGA R T. Surface mount components removal tool: America, US5579571[P]. 1996-12-03.
- [53] 佐久間武雄. 電子部品取外し装置及びその取外し方法: 日本, JP2000315859 A[P]. 2000-11-14.  
SAKUMA T. Electronic component detaching apparatus and detaching method thereof: Japan, JP2000315859 A[P]. 2000-11-14.
- [54] 新家達弥, 白井貢, 神田廣造, など. 電子部品取外し装置ならびにあ該取外し部品用取外し治具: 日本, JP1264293-A[P]. 1989-10-20.  
SHINKE T, SHIRAI M, KANDA K, et al. Electronic part removal apparatus: Japan, JP1264293-A[P]. 1989-10-20.
- [55] SALUCCI G L, CANOVA A. Device for desoldering electronic components from electronic card: European patent office, EP1375044-A[P]. 2004-01-02.
- [56] YOKOYAMA S, IKUTA Y, IJI M. Recycling system for printed wiring boards with mounted parts[C]// Proceedings of First International Symposium On Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Tokyo, Japan, 1999: 814-817.
- [57] 西堀義弘. はんだの回収方法およびその装置: 日本, JP3444557-B2[P]. 2003-06-27.  
NISHIBORI Y. Method and apparatus for recovering solder: Japan, JP3444557-B2[P]. 2003-06-27.
- [58] KAZUHIKO S, KOUJI S, TAKESHI Y, et al. Method and apparatus for separating solder: World Intellectual Property Organization, WO98/24939[P]. 1998-06-11.
- [59] FORTUNE W S. Metallic conduction - hot gas soldering-desoldering system: America, US5380982[P]. 1995-10-02.
- [60] 田村光範, 白瀬一夫, 井上友次. はんだ除去機構付電子部品取外し装置: 日本, JP4061191-A[P]. 1992-02-27.  
TAMURA M, SIRASE I, INOUE Y. Electronic parts releasing apparatus with solder removing mechanism: Japan, JP4061191-A[P]. 1992-02-27.
- [61] MORI E, YOKOYAMA S, IJI M, et al. Parts disassembling apparatus: America, US5715592[P]. 1998-02-10.
- [62] 平澤栄一. 廃棄物処理装置: 日本, JP11034058-A[P]. 1999-02-09.  
HIRASAWA E. Used PCB treatment equipment: Japan, JP11034058-A[P]. 1999-02-09.
- [63] 古澤彰男, 福島哲夫. プリント回路基板の解体処理方法および解体処理システム: 日本, JP2000151094A [P]. 2000-05-30.  
FURUSAWA A, FUKUSHIMA T. Method and system of disassembling printed circuit board: Japan, JP2000151094A[P]. 2000-05-30.
- [64] 安井至, 坂村博康. プリント基板のはんだ除去方法およびはんだ除去装置: 日本, JP10017948-A[P]. 1998-01-20.  
YASUI I, SAKAMURA H. Solder removal method for printed circuit board: Japan, JP10017948-A[P]. 1998-01-20.
- [65] BOUCHER B J, DINSMORE K S, MALESKY J A, et al. Component reclamation apparatus and method: America,

- US5148969[P]. 1992-09-22.
- [66] 向东, 汪劲松, 杨继平, 等. 采用接触式冲击对线路板进行拆解的方法与设备: 中国, CN101014227A[P]. 2007-08-08.
- XIANG Dong, WANG Jinsong, YANG Jiping, et al. Method of printed circuit board disassembly with contactile impact and its equipment : China, CN101014227A[P]. 2007-08-08.
- [67] 段广洪, 向东, 汪劲松, 等. 采用非接触式冲击对线路板进行拆解的方法与设备: 中国, CN101014228A[P]. 2007-08-08.
- DUAN Guanghong, XIANG Dong, WANG Jinsong, et al. Method of printed circuit board disassembly with non-contact impact and its equipment : China, CN101014228A[P]. 2007-08-08.
- [68] 汪劲松, 向东, 杨继平, 等. 一种将元器件从废旧线路板上整体性拆卸的方法与设备: 中国, CN101014229A[P]. 2007-08-08.
- WANG Jinsong, XIANG Dong, YANG Jiping, et al. Method of simultaneous disassembling printed circuit board and its equipment: China, CN101014229A[P]. 2007-08-08.
- [69] SCHWARZ T, RITZER M, SCHMALHOFER J. Verfahren zum Entlöten von Elektronikplatinen : Deutschland, DE19511041-A1[P]. 1996-09-26.
- SCHWARZ T, RITZER M, SCHMALHOFER J. De-soldering of circuit boards with electronic components: Germany, DE19511041-A1[P]. 1996-09-26.
- 
- 作者简介: 杨继平, 男, 1971 年出生, 博士研究生, 副教授。主要研究方向为废旧电路板拆解处理。  
E-mail: yjp05@mails.tsinghua.edu.cn



(上接第 125 页)

- JIANG Jie, LI Huawei, HU Yujin. Finite element analysis of stiffness of vertical lathe table of CKX53200[J]. Journal of Hubei Polytechnic University, 1996, 11(3): 50-53.
- [2] 江洁. CKX53200 型 20 米数控立车工作台静刚度有限元分析[D]. 武汉: 华中理工大学, 1996.
- JIANG Jie. Finite element analysis about the static stiffness of table of 20 meters CNC vertical boring & turning mills[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 1996.
- [3] 陈燕生. 液体静压支承原理和设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1980.
- CHEN Yansheng. Theory and design of hydrostatic bearing[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1980.
- [4] LOGAN Daryl L. A first course in the finite element method[M]. Australia: Brooks/Cole, 2002.
- [5] 蒋惟朴, 石峰. 用恒流静压导轨改造十米立车[J]. 制造技术与机床, 1990(6): 40-41.
- JIANG Weipu, SHI Feng. Refitting 10 meters vertical turning machine using constant current hydrostatic guideway[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 1990(6): 40-41.
- [6] 刘德江. 预载式恒流静压导轨在 CX5200 立车上的应用[J]. 制造技术与机床, 1994(11): 21-24.
- LIU Dejiang. Application of preloaded constant current hydrostatic guideway to vertical turning machine CX5200 [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 1994(11): 21-24.
- [7] 李庆杨, 关治, 白峰杉. 数值计算原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- LI Qingyang, GUAN Zhi, BAI Fengshan. Principle of numerical computation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- 
- 作者简介: 赵明, 男, 1969 年出生, 博士研究生, 高级工程师。主要研究方向为重型数控机床多学科设计优化。  
E-mail: zhaoming@smail.hust.edu.cn
- 王书亭(通信作者), 男, 1968 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为复杂机电装备建模、结构动态优化设计等。  
E-mail: wangst@mail.hust.edu.cn