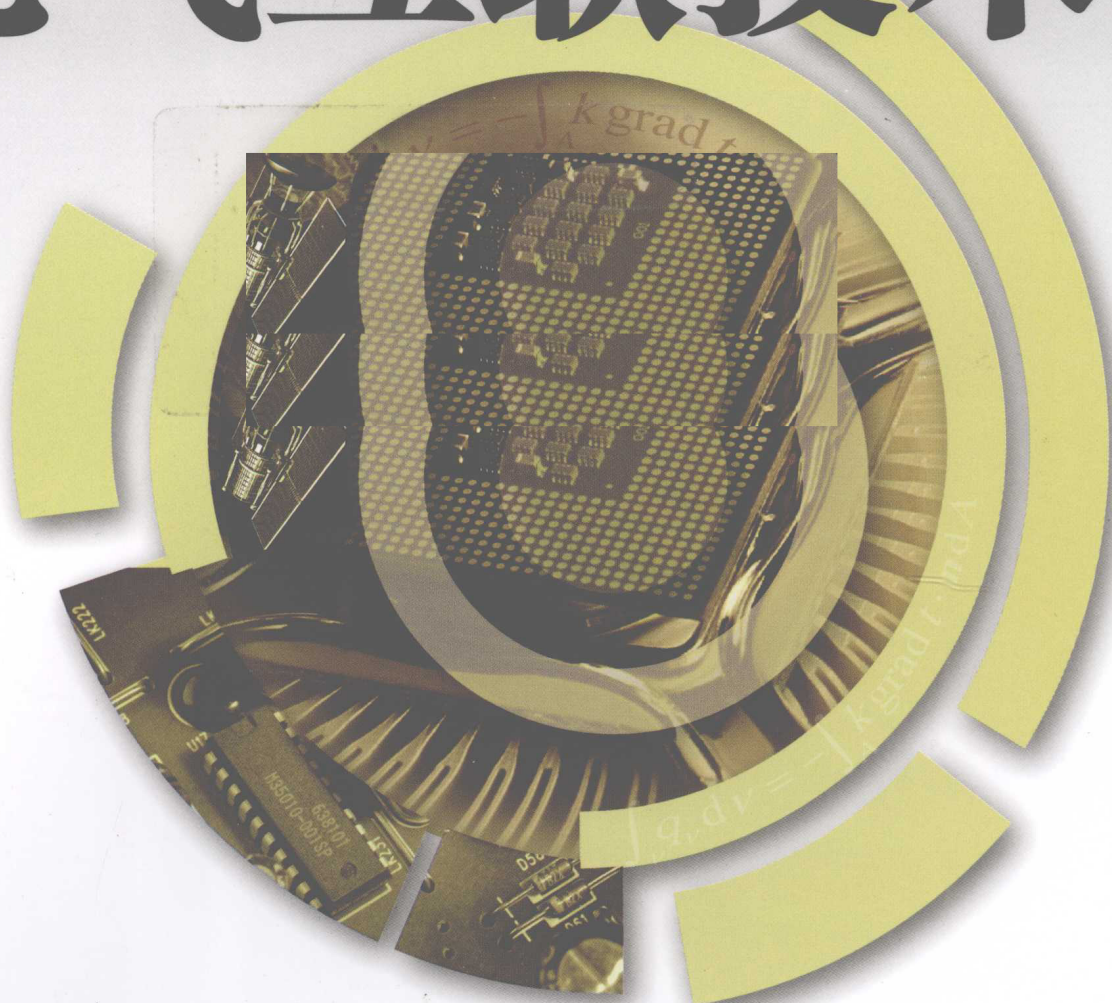




电子机械工程丛书

周德俭 等编著

电子制造中的 电气互联技术



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

电子机械工程丛书

电子制造中的电气 互联技术

周德俭 等编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书介绍电子产品制造中的电气互联技术，全书共 8 章，内容包括：电气互联技术基本概念、技术体系、现状与发展等内容概述，互联基板技术，器件级互联与封装技术，PCB 级表面组装技术，表面组装工艺技术，SMT 组装系统，整机互联技术，电气互联新工艺等主要技术的论述与介绍。

本书可作为高等院校电子制造工程类专业方向的教材，也可供从事电子制造的工程技术人员自学和参考。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

电子制造中的电气互联技术 / 周德俭等编著. —北京：电子工业出版社，2010.3
(电子机械工程丛书)

ISBN 978-7-121-10448-0

I. 电… II. 周… III. 电子产品—生产工艺 IV. TN05

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 031804 号

策划编辑：李 洁

责任编辑：李 洁

印 刷：涿州市京南印刷厂

装 订：涿州市桃园装订有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编：100036

开 本：787×1 092 1/16 印张：24.5 字数：624 千字

印 次：2010 年 3 月第 1 次印刷

印 数：4 000 册 定价：49.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：(010) 88258888。

电子机械工程丛书编委会

主 任 王小谟

副主任 段宝岩

委 员 罗 群 龚振邦 施浒立 季 馨

周德俭 俞惟铨 黄大贵 程辉明

叶渭川 陈慧宝 李文海 史金飞

赵惇爻 蒋全兴 童时中 卢世济

主 编 段宝岩

副主编 龚振邦、施浒立、季 馨、周德俭

编辑部主任 叶渭川 高 平

编辑部副主任 黄 进 李 洁



出版说明

《电子机械工程》丛书(以下简称“丛书”)是由中国电子学会电子机械工程分会与电子工业出版社共同策划、组织编写的一套系列技术丛书。由于电子机械工程是电子和机械为主的多学科交融的学科,涉及专业面极广,因此,这套“丛书”将是一套开放性“丛书”,为今后拓展留下空间。

参加“丛书”编写的作者均为高等院校、科研院所的知名专家与学者,“丛书”是专家们集体智慧的结晶,是他们长期实践经验的总结,是一套集理论与实践相结合的上乘之作。

本套“丛书”内容丰富,涵概了电子机械工程涉及的主要方面。第一批先出版的分册主要体现了以下四个方面的内容:

- 介绍了电子设备环境适应性设计,如电磁兼容性设计、电子设备热设计、抗振动冲击设计、防腐蚀设计等;
- 介绍了电子设备各种类型的天线系统和结构及机电系统的伺服控制;
- 介绍了电子产品的电气互联技术;
- 介绍了电子产品人机工程和色彩设计。

本套“丛书”写作严谨,定义准确,语言简练,图文并茂,公式齐全,案例丰富,集设计性、实用性、新颖性于一体,既是电子机械工程科技工作者的设计指南,也是高校电子机械工程专业及相关专业师生极好的教材和参考书。

中国电子学会电子机械工程分会
电子工业出版社



电子机械工程主要研究电子装备机械结构设计与制造等,其特点在于如何使系统或装备在复杂的机械环境、电磁环境以及热环境中满足对其电性能的要求,并具有高的可靠性。飞速发展的电子信息技术已成为我国现代化建设的一个关键技术。电子信息技术的实现依赖于电子装备的性能,包括电磁性能和机械结构性能。机械结构不仅是电性能实现的载体和保障,而且往往制约着电性能的实现。随着电子装备向高频段、高增益;高密度、小型化;快响应、高指向精度方向的发展,这种制约作用愈加凸显。电子机械工程即专门研究为实现电子装备性能,进行机械结构设计与制造的学科,是一门多学科相交融的学科。具体可分为如下四个方面:

一 **机械结构因素对电性能的影响**:如天线伺服驱动系统的结构谐振频率限制了控制系统的带宽;摩擦、间隙、弹性变形等对控制系统性能的影响;天线结构变形和反射面误差影响天线的效率;微波器件的加工精度与表面粗糙度对微波器件的影响等;实际上微波器件的结构设计与电气设计已经密不可分。因此必须清楚透析这些影响的机理与规律,才能正确设计结构,确保电子装备的性能优良。这是一个多种物理场的耦合问题,可归结为机械、电子、控制的耦合理论以及耦合问题的建模和求解。

二 **电子设备对各种恶劣环境的防护**:包括电子设备在强烈的振动与冲击下可靠工作,防止失效;在严酷环境下电子设备的温度控制,使电子元、器件温度不超过允许值;电子设备抵御外界电磁干扰的能力和避免自身对环境的电磁污染等。其特点在于使系统或装备在复杂的机械环境、电磁环境以及热环境中满足对其电性能的要求,并具有高的可靠性。此外,还有防潮、防霉、防盐雾腐蚀以及防原子、防生物化学武器等。涉及机械学、传热学、电磁场理论、环境科学、化学、材料学等多门学科。因此在电子设备的设计中必须将各种防护措施综合、统一来考虑。

三 **电子组装技术**:即如何将成千上万的电子元器件正确而有效地连接、组装及布局,组成一个性能满足要求的整机或系统。在组装过程中,内部要考虑各电子元器件间的互相影响;外部要考虑各种环境因素的影响,最终确保其高可靠性、易维修性及易操作性。目前电子组装技术已发展到表面安装、三维组装及微组装。其中,电路、结构、工艺密不可分。此外为了使操作人员能高效地工作,人机工程学也不容忽视。

四 **电子精密机械设计**:为实现电子设备的功能,往往需要精密机械,甚至大型机械与结构。典型的如雷达天线、射电望远镜天线、计算机外部设备、机器人等。雷达天线是一种典型的精密机械,其精度与精密机床相比毫不逊色;直径几十米、上百米的全可动抛物面反射器结构高精度的要求,工程上很难实现;计算机外部设备如绘图机、扫描仪、打印机等,其设计是典型的机、光、电一体化设计。这里的电子精密机械设计不同于一般概念上的精密机械设计,是为了满足电子设备性能要求的机电综合性设计。

特别需要指出的是军用电子设备与系统,由于要适应条件苛刻、问题突出、要求严格、更新快的战争环境,在民用产品中罕见应用的代价高昂的许多尖端新技术,率先在军事装备中获得广泛应用。在未来战争中电子战与信息战将起着至关重要的作用,这将赋予电子机械工程在加强现代化国防建设中更重大的责任,也将使电子机械工程面临新的挑战。

为系统总结我国在电子机械工程领域的研究工作,中国电子学会电子机械工程分会特组

希望该丛书的出版将对我国电子机械工程技术的发展起到积极的促进作用。

西安电子科技大学校长

中国电子学会电子机械工程分会主任委员

石室岩

前 言

电子产品制造中的电气互联技术是指在电、磁、光、静电、温度、湿度、振动、速度、辐射等已知和未知因素构成的环境中，任何两点（或多点）之间的电气连接制造技术以及相关设计技术。它是传统电气互联技术概念的新描述。在电子元器件微制造技术和电子电路表面组装技术（SMT）等新兴技术的推动下，现代电气互联技术具有比传统的电气互联技术更丰富的内涵，已经成为电子产品先进制造的核心技术。

电气互联技术具有涉及学科和知识面宽、综合性强、技术发展快等特点，是一门多学科综合性工程技术。目前，在元器件级互联与封装技术、板级或组件级组装技术、整机或系统级组装技术等传统技术基础上，表面组装技术、高密度组装技术、立体组装技术、微系统互联技术、绿色互联技术等技术为标志的新兴技术已经日趋成熟，并已经逐步发展成为电气互联技术的主体技术内容。

本书力图通过对电气互联技术概念和主要技术的描述和介绍，较为系统、全面地反映出现代电气互联技术的知识内涵和体系结构，从而便于从事电子制造工程类专业或相关专业方向的读者学习。同时，也希望现代电气互联技术在快速发展的同时，其定义、内涵、技术体系等知识内容的解读也能与时俱进，以利该门综合性工程技术的学科专业归类、科学研究和建设。

全书分为8章，内容包括：电气互联技术基本概念、技术体系、现状与发展等内容概述，互联基板技术，器件级互联与封装技术，PCB级表面组装技术，表面组装工艺技术，SMT组装系统，整机互联技术，电气互联新工艺等主要技术的论述与介绍。其中第1、3、5~8章由广西工学院周德俭教授编写，第2、4章和附录由桂林电子科技大学吴兆华教授编写，全书由周德俭教授统稿。本书在编写中参考和引用了部分文献的相关内容，因文献量较大，仅列出了主要参考文献。

电气互联技术涉及知识面广，技术内容新且非常丰富，要在本书中予以系统和全面的介绍是困难的；同时，由于作者的水平有限，书中也一定存在着不少谬误，不足之处请同行专家和读者谅解。

编著者

目 录

第 1 章 概论	(1)
1.1 电气互联技术的基本概念	(1)
1.1.1 电气互联技术的概念	(1)
1.1.2 电气互联技术的组成与作用	(2)
1.1.3 电气互联技术中的若干技术概念	(3)
1.2 电气互联技术的技术体系	(5)
1.2.1 电气互联技术的总体系构架	(5)
1.2.2 电气互联技术的分体系	(7)
1.3 电气互联技术的现状与发展	(7)
1.3.1 元器件和互联工艺技术	(7)
1.3.2 互联设计技术	(11)
1.3.3 互联设备和系统技术	(14)
1.3.4 其他互联技术	(17)
1.3.5 电气互联技术的发展特点	(20)
第 2 章 互联基板技术	(22)
2.1 概述	(22)
2.1.1 互联基板的作用与类型	(22)
2.1.2 互联基板材料与性能	(24)
2.2 基板制造技术	(31)
2.2.1 陶瓷基板电路制造技术	(31)
2.2.2 低温共烧陶瓷基板工艺技术	(36)
2.2.3 内埋芯片基板技术	(40)
2.3 PCB 制造技术	(43)
2.3.1 单面印制板制造工艺	(43)
2.3.2 双面印制板制造工艺	(46)
2.3.3 多层印制板制造工艺	(52)
2.3.4 挠性和刚挠印制板制造工艺	(56)
第 3 章 器件级互联与封装技术	(60)
3.1 概述	(60)

3.1.1	器件封装的作用与类型	(60)
3.1.2	封装的基本工艺	(61)
3.2	键合互连技术	(63)
3.2.1	键合的类型及其比较	(63)
3.2.2	引线键合技术	(64)
3.2.3	载带自动焊技术	(68)
3.2.4	倒装键合技术	(74)
3.2.5	键合互连技术的发展	(81)
3.3	密封与成品处理工艺技术	(83)
3.3.1	密封技术	(83)
3.3.2	打标与成形剪边	(90)
3.3.3	包装	(92)
第 4 章	PCB 级表面组装技术	(99)
4.1	表面组装技术 (SMT) 概述	(99)
4.1.1	SMT 内容	(99)
4.1.2	SMT 工艺技术内容与特点	(100)
4.2	SMT 组装方式与组装工艺流程	(103)
4.2.1	SMT 组装方式	(103)
4.2.2	SMT 组装工艺流程	(104)
4.3	表面组装元器件与组装材料	(109)
4.3.1	常见表面组装元件	(109)
4.3.2	表面组装半导体器件	(121)
4.3.3	表面组装材料及其用途	(127)
第 5 章	表面组装工艺技术	(142)
5.1	表面组装涂敷工艺技术	(142)
5.1.1	黏结剂涂敷工艺技术	(142)
5.1.2	焊膏涂敷工艺技术	(146)
5.2	表面贴装技术与设备	(155)
5.2.1	贴装技术方法和原理	(155)
5.2.2	贴装机结构与类型	(155)
5.2.3	贴装机技术性能选择	(158)
5.3	焊接工艺技术	(160)
5.3.1	SMT 焊接工艺方法与特点	(160)

5.3.2	再流焊接技术特点与类型	(162)
5.3.3	再流焊炉及其温度曲线	(168)
5.3.4	波峰焊接工艺技术	(171)
5.4	SMA 清洗工艺技术	(178)
5.4.1	清洗技术的作用与分类	(178)
5.4.2	影响清洗的主要因素	(179)
5.4.3	清洗工艺及其设备	(181)
5.5	SMT 检测技术	(188)
5.5.1	检测技术基本内容与方法	(188)
5.5.2	来料检测	(191)
5.5.3	组装质量检测技术	(195)
5.5.4	组装工艺过程检测与组件测试技术	(199)
第 6 章	SMT 组装系统	(206)
6.1	SMT 组装系统概述	(206)
6.1.1	SMT 组装系统基本概念	(206)
6.1.2	SMT 组装系统的分类与组成	(207)
6.1.3	SMT 组装系统的特性	(210)
6.2	SMT 组装系统设计	(214)
6.2.1	主要设计内容	(214)
6.2.2	系统总体设计	(215)
6.2.3	系统布局与规划	(219)
6.2.4	系统静电防护设计	(225)
6.2.5	系统可靠性设计	(228)
6.2.6	系统其他设计	(235)
6.3	SMT 组装系统的控制与优化	(239)
6.3.1	SMT 组装系统的计算机控制系统	(239)
6.3.2	多生产线系统的控制与优化	(246)
6.3.3	贴片机物料调度及分配优化	(249)
6.4	SMT 产品质量管理系统设计	(251)
6.4.1	SMT 产品质量管理系统概述	(251)
6.4.2	SMT 产品质量管理系统的结构与功能设计	(253)
6.4.3	SMT 产品质量管理系统的软件设计	(259)

第 7 章 整机互联技术	(261)
7.1 整机互联技术及其主要内容	(261)
7.1.1 整机与整机互联的概念	(261)
7.1.2 整机互联技术主要内容	(263)
7.2 整机线缆互联工艺技术	(265)
7.2.1 整机线缆布线设计	(265)
7.2.2 整机线缆布线工艺	(267)
7.3 整机线缆三维布线软件系统设计	(270)
7.3.1 三维布线软件设计要求与设计流程	(270)
7.3.2 线缆电磁兼容分析与预测	(273)
7.3.3 线缆布线系统电磁兼容控制技术	(278)
7.3.4 线缆布线系统的建模与算法	(281)
7.3.5 线缆布线系统的布线知识库设计	(287)
7.4 整机线缆三维布线系统设计实例	(292)
7.4.1 系统框架与功能设计	(292)
7.4.2 系统总体(概要)设计	(294)
7.4.3 系统详细设计	(297)
7.4.4 设计界面实例	(308)
第 8 章 电气互联新工艺	(310)
8.1 三维高密度组装技术	(310)
8.1.1 三维高密度组装技术概述	(310)
8.1.2 立体组装工艺技术	(313)
8.1.3 垂直互连关键工艺技术	(318)
8.2 微系统封装技术	(320)
8.2.1 系统级封装技术	(320)
8.2.2 MEMS 封装技术	(326)
8.3 光电互联技术	(331)
8.3.1 光电互联技术概述	(331)
8.3.2 光电互联封装技术	(333)
8.4 微波互联技术	(336)
8.4.1 微波互联技术概述	(336)
8.4.2 典型微波互联结构	(338)
8.5 绿色互联技术	(345)

8.5.1 无铅焊接技术概述	(345)
8.5.2 无铅焊接相关技术	(348)
8.5.3 无铅焊接技术应用设计	(352)
8.5.4 其他绿色互联技术	(356)
附录 A 常用英文缩写与名词解释	(360)
附录 B SMT 常用名词解释	(365)
参考文献	(377)

第1章

概 论

1.1 电气互联技术的基本概念

1.1.1 电气互联技术的概念

1. 传统的电气互连技术定义

电子产品制造中,任何两个分立接点之间的电气连通称为互连,紧邻两点(或多点)间的电气连通称为连接。一般将电气互连和电气连接统称为“电气互连”。电子产品的芯片级、元器件/微系统级、电路模块/组件/子系统级组装中,任何一级组装都离不开互连与连接。

将数量众多的电子元器件、金属或非金属零部件、紧固件及各种规格的导线,按设计文件规定的技术要求,装配连接成整件或整机称为电子设备装联技术。电子设备装联技术是电气互连技术概念的拓宽,可以认为是广义的电气互连技术。

2. 电气互连技术定义的不足

电气互连传统定义描述了“点与点”和“件与件”之间的电气连接和连通的概念,强调了连接的机械性能和电气互通,而忽视了对机械和电气连通之外的电气性能和物理性能的保障的描述,而后者恰是新一代电子产品互连设计制造中更需强调、更为重要的内容。

如果说电气互连的概念是对“点与点”和“件与件”之间的电气连接进行了“有形”的描述,则它对组装延迟、热设计、电磁兼容设计、无线通信、光电互连等“无形”的电气和物理性能保障内容,以及对振动等系统动态特性设计内容均未能系统地予以概括。

为此,电气互连技术概念或定义面对新一代电子产品设计制造技术的发展已彰显不足。

3. 电气互联技术概念的产生

针对电气互连技术传统概念与定义的不足,为了适应新一代电子产品设计制造技术的发展,特别是适应以表面组装技术(Surface Mount Technology, SMT)为代表的电子产品先进组装技术的快速发展需要,国内相关电子先进制造技术专业组和专家经过若干年的酝酿和各种形

式的研讨,于“九五”期间正式提出了“电气互联技术(Electricity Interconnect Technology, EIT)”名词和相关概念,并很快被国防科工委、总装备部和中国电子科技集团等相关部门和专家认可,将其作为电子产品先进制造技术的标志性技术,列为国防工业先进制造技术的主干技术之一。

4. 电气互联技术的定义

电气“互联”技术是传统电气“互连”技术的延伸与扩展,它指的是:在电、磁、光、静电、温度、湿度、振动、速度、辐射等已知和未知因素构成的环境中,任何两点(或多点)之间的电气连接制造技术以及相关设计技术。

电气互联技术既包含电气互连的“有形”连接概念,又包含了为保障电气性能和物理性能的,与电气连接具有“联系”的“无形”连接的概念,同时还将相关现代设计方法也包括在内。这一新概念定义全面、科学,更能适应新一代组装技术和新一代互联技术发展及研究的需要。

1.1.2 电气互联技术的组成与作用

1. 电气互联技术的组成

电气互联技术的基本组成如图 1.1 所示。它由机械工程科学、电子技术与信息科学等基础科学和材料、元器件、互联设计、互联工艺与设备等基本技术支撑,主要内容包含了元器件/微系统级互联技术、印制电路板(PCB)电路模块/组件/子系统级互联技术、整机/系统级互联技术三大部分。电气互联技术是一门以电子机械工程学科的专业技术为主要基础的综合型工程技术。

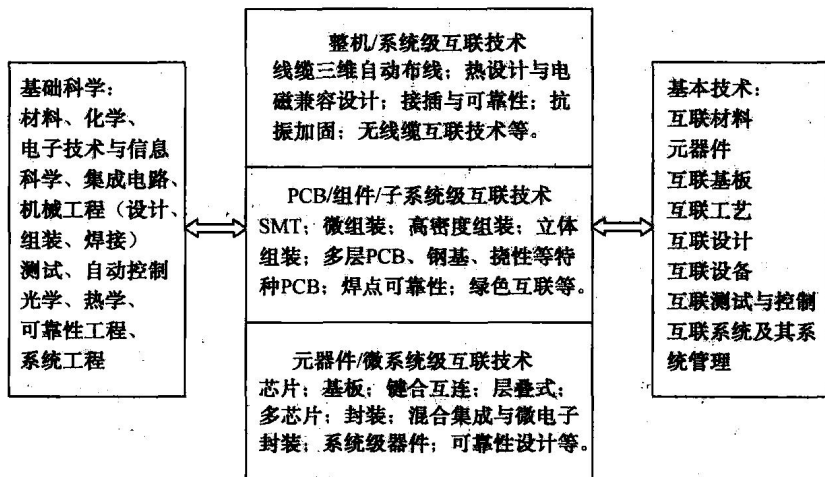


图 1.1 电气互联技术基本组成

2. 电气互联技术的作用

电气互联技术的作用是保障点与点、线(缆)与线(缆)、元器件/接插件与基板、组件与组件、组件与整机(系统)、整机(系统)与整机(系统)等电气互联点、件、系统之间的电气可靠连接和“联通”,其技术应用遍及电子产品(设备)制造的各个层面(参见图 1.2)。

随着电子技术、信息技术的快速发展和向传统设备的快速渗透,以及现代产品的高速电气化进程,电气互联技术在现代产品中的作用越来越重要,电子技术在系统中所占的含量越来越

大, 相应的电气互联点、线、件也越来越多, 电气互联技术的重要性随之不断提高。可以说, 电气互联技术已经发展成为现代电子设备设计、制造的基础技术, 是电子设备可靠运行的主要保障技术, 是电子先进制造技术的重要组成部分, 是支持电子信息产业发展的关键技术。

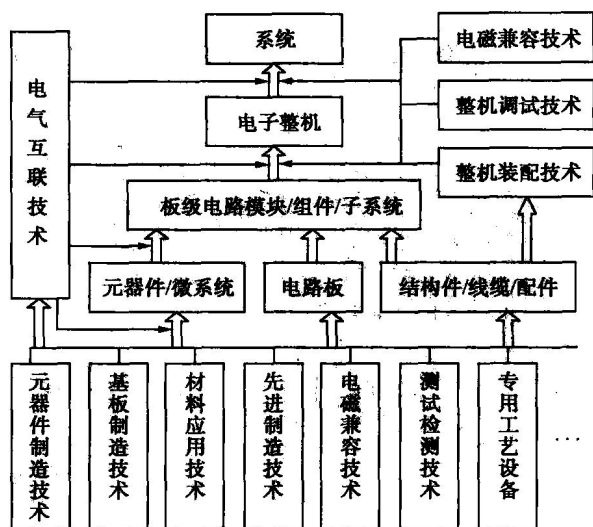


图 1.2 电气互联技术在电子设备制造中的作用

1.1.3 电气互联技术中的若干技术概念

1. 电气互联技术与 SMT

电气互联技术涵盖了 SMT, SMT 是电气互联技术体系中的主要技术和主要组成部分。SMT 作为新一代组装技术, 已逐步代替传统通孔插装技术, 得到广泛应用, 成为现代电子产品的 PCB 电路模块/组件/子系统级电气互联的主要技术手段。而且其技术不断更新, 应用范围不断扩大, 目前在元器件和微系统级互联中的应用也越来越多。随着电子设备进一步微型化和器件级系统不断增加的发展趋势, SMT 在电气互联中的作用和重要性还在不断增大, 是现代电气互联技术的发展主流之一。

2. 封装技术与组装技术

在电子产品制造中, 传统的概念将封装技术分为 0 级、1 级、2 级、3 级共四个级别, 如图 1.3 所示。0 级封装指从晶片(圆片)加工至芯片成产品过程的芯片级封装技术, 1 级封装指用封装外壳将芯片(含多芯片)封装成元器件的元器件级封装技术, 2 级封装指将 1 级封装和其他元器件组装到印制板上的印制板级封装技术, 3 级封装指将 2 级封装插装到母板上的整机或系统级封装技术。其中, 2 级印制板级与 3 级整机级采用的是组装技术, 这里所用的“封装(Packaging)”概念具有广义, 兼有“封装”与“组装”之意。

这种“封装”的表示方法源于国外有关专业组织给出的定义及其“Packaging”的多义性, 当用中文表示时, 一般还是明确地将 0 级芯片级和 1 级元器件级“Packaging”技术称为“封装技术”, 而将 2 级印制板级和 3 级整机级“Packaging”技术称为组装技术。

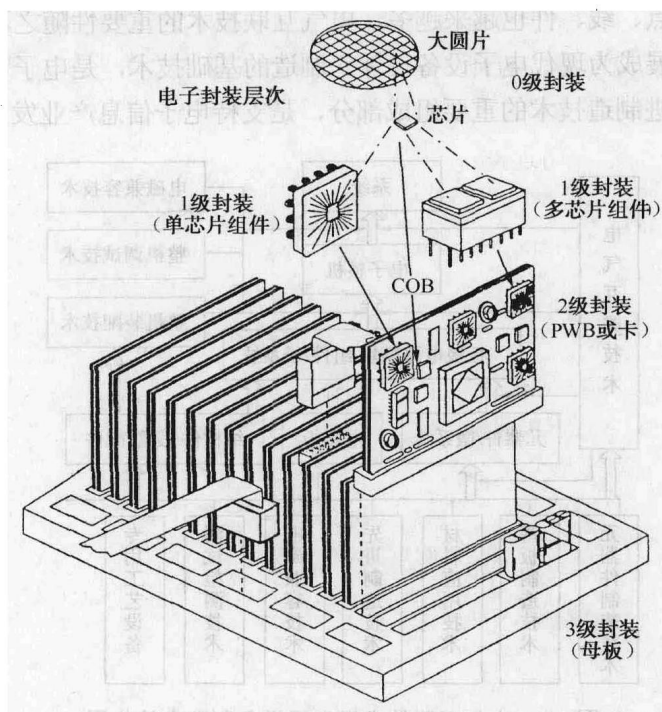


图 1.3 封装技术的级别示意图

3. 微组装与高密度组装技术

组装技术根据组装工艺精度不同可以分为插装、常规组装、精细组装、微组装、高密度组装等技术类别。常规组装是指元器件或芯片引线、引脚间距大于 0.5mm 的组装技术。精细组装是指引线、引脚间距在 $0.3\sim 0.5\text{mm}$ 之间的组装技术。微组装是指引线、引脚间距等于或小于 0.3mm 的组装技术。高密度组装概念刚产生时，是指在同一电路基板上组装的焊点密度达到平均 $30\text{点}/\text{cm}^2$ 以上的组装工艺技术，随着元器件的进一步微型化和组装技术的进步，当前一般是指组装焊点密度达到平均 $60\text{点}/\text{cm}^2$ 以上的组装工艺技术。

目前，SMT 已处于微组装和高密度组装技术历史阶段，高密度组装技术国外已有 $100\text{点}/\text{cm}^2$ 以上的实际应用，国内已有 $100\text{点}/\text{cm}^2$ 以上的研究案例。

值得说明的是，微组装除了特指组装工艺技术的高级发展阶段，即元器件引脚间距等于或小于 0.3mm 间隙的表面组装技术外，还经常用于泛指电路引线间距或元器件引脚间距微小、或所形成的组件、系统微小的各种封装和组装技术。

4. 微连接与微互连、微封装

微连接一般是指对微型对象的焊接方法，但它并不是一种传统焊接技术之外的焊接方法。它是指由于连接对象尺寸的微小精细而产生的尺寸效应，使得溶解量、扩散层厚度、表面张力、应变量等传统焊接技术中可以忽略的因素将对材料的焊接性、焊接质量产生不可忽视的影响状况下，必须考虑接合部位尺寸效应的精细焊接方法。它在工艺、材料、设备等方面与传统焊接技术有着显著不同，采用的方法和形式多样。微连接这一名称具有针对各类微型对象进行连接的广义性。

微互连一般是指利用微线、微带、微凸点等工艺的互连技术，一般应用于芯片和元器件