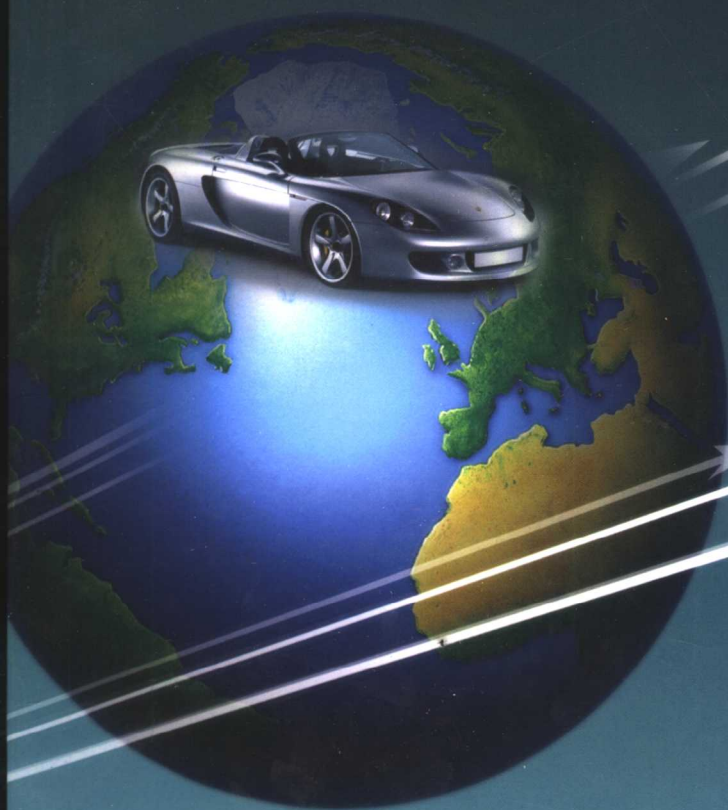


汽车车身制造 质量控制技术

林忠钦 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

汽车车身制造质量控制技术

林忠钦 著



机械工业出版社

本书针对国内汽车制造业的实际状况,建立了小样本采样条件下汽车车身装配质量控制体系,深入研究与车身制造质量密切相关的冲压、电阻点焊、夹具与检具等内容,并成功解决了车身制造质量评价、偏差源诊断过程中“小样本”推断等问题。内容主要包括汽车车身制造质量控制中的质量评价、冲压技术、点焊质量控制、焊装夹具的设计、测量检具的优化设计,以及汽车车身焊装过程偏差源快速诊断方法等关键理论和技术。最后,介绍了近年来应用本书中的理论、方法在国内轿车企业成功实施的案例,充分体现了“理论联系实际”的研究思想。

本书适用于从事汽车车身制造的工程技术人员和高校师生。

图书在版编目(CIP)数据

汽车车身制造质量控制技术/林忠钦 著. —北京:机械工业出版社, 2005. 1

ISBN 7-111- 15856-3

I. 汽… II. 林 III. 汽车—车体—生产过程—质量控制
IV. F407. 471. 63

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 135079 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:曲彩云 责任印制:李妍

北京蓝海印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2005 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16·16.5 印张·409 千字

0001—3500 册

定价:30.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010) 68993821、88379646

68326294、68320718

封面无防伪标均为盗版

前 言

汽车车身是汽车的重要组成部分，是整个汽车零部件的载体，它的重量和制造成本约占整车的 40%~60%。它通常由 300~500 多个具有复杂空间曲面的薄板冲压零件，由 55~75 个装配站在生产线上大批量、快节奏地焊装而成，装夹定位点达 1700~2500 个，焊点多达 4000~5000 个，中间环节众多，各种装配偏差源难以避免。车身焊装质量的优劣对整车质量起着决定性作用，焊装尺寸偏差直接影响到最终汽车产品的质量，如密封、噪声、寿命、动力性和外观等。

20 世纪 80 年代末，日本依靠全面质量管理（TQM）使其品牌产品的车身制造综合偏差控制在 2mm 以内，为日本轿车全面占领欧美市场奠定了基础。90 年代初，美国轿车车身的制造综合偏差普遍在 $\pm 2\text{mm}$ 以上，显著高于日本当时的车身制造水平（ $\pm 1\text{mm}$ ），为此，美国的轿车工业丢掉了 30%左右的国内市场。随着为期 3 年的“2mm 工程”项目的有效实施，到 1996 年，美国的轿车车身制造质量赶上了世界先进水平，并逐步夺回了原有的市场份额。欧洲轿车车身制造偏差的最好水平在 $\pm 1.25\sim 1.5\text{mm}$ ，目前在提高车身制造质量方面也在进行着不断的尝试与努力，如：德国大众公司正在推行的 RPS 参考点系统。

目前，我国汽车制造业处于快速发展阶段，但是轿车车身制造偏差还很不稳定，平均在 $\pm 5\text{mm}$ 左右，远远落后于世界先进水平。这是因为我国的轿车车身制造业起点低、技术力量薄弱、检测手段有限，这给我国实施轿车车身制造质量控制研究带来小样本、贫信息、结构化等特殊问题。同时，加入世界贸易组织（WTO）给中国轿车工业带来了前所未有的挑战和冲击。

为了振兴我国的汽车工业、提高汽车制造水平，作者从 1995 年开始，在国内汽车制造企业进行了一系列的车身制造质量控制的实践、研究，试图走出一条具有中国特色的轿车车身制造质量控制之路。经过多年的研究、实践，终于取得了成功。在此基础上，作者总结了自己及所领导的课题组多年来在车身制造质量控制方面的理论与成功实践，出版本书。

本书是作者阶段性研究工作的总结。作者十分清楚后面要走的路还很长，需要做的工作还很多。作者希望通过本书的出版，能够提高现阶段我国汽车制造领域中冲压、电阻点焊、夹具、检具、质量控制等理论与实践水平，为今后

我国开发具有自主知识产权的汽车奠定基础,最终为提高我国汽车制造业水平、形成汽车自主开发能力做出贡献。

本书针对国内汽车制造业的实际状况,建立了小样本采样条件下汽车车身装配质量控制体系,深入研究与车身制造质量密切相关的冲压、电阻点焊、夹具与检具等内容,并成功解决了车身制造质量评价、偏差源诊断过程中“小样本”推断等问题。内容主要包括汽车车身制造质量控制中的质量评价、冲压技术、点焊质量控制、焊装夹具的设计、测量检具的优化设计,以及汽车车身焊装过程偏差源快速诊断方法等关键理论和技术。最后,介绍了近年来应用本书中的理论、方法在国内轿车企业成功实施的案例,充分体现了“理论联系实际”的研究思想。

鉴于作者业务水平有限,而且由于现代汽车制造质量控制技术的研究工作发展很快,不断有新的理论和方法产生,因此,本书中的错误、不妥和欠缺之处一定难免,希望专家和读者在阅读中不吝指教,以期将此专著趋于完善,作者将不胜感激。

作者

于上海交通大学

2004年9月

目 录

前言

第1章 绪论.....	1
1.1 引言	1
1.2 面向制造过程的车身尺寸偏差控制	2
1.2.1 传统的工序控制的缺陷与在线检测.....	2
1.2.2 基于偏差诊断的车身尺寸偏差控制.....	4
1.2.3 基于自适应补偿的车身装配偏差控制.....	5
1.3 面向设计的车身装配尺寸偏差控制	6
1.3.1 夹具的优化设计.....	6
1.3.2 车身装配偏差分析与综合.....	7
1.4 基于偏差流理论的车身装配尺寸偏差控制的系统模型.....	9
1.5 现代车身制造质量控制体系框架	10
参考文献	10
第2章 白车身制造质量检测与评价方法.....	13
2.1 引言	13
2.2 基于功能尺寸的白车身制造质量检测方法.....	13
2.2.1 车身统一基准系统 (RPS)	13
2.2.2 白车身检测的功能尺寸系统定义.....	14
2.2.3 白车身检测的功能尺寸系统构成与作用机制.....	15
2.2.4 应用实例.....	18
2.3 基于曲率特征的覆盖件检测规划	21
2.3.1 采样规划原理.....	22
2.3.2 算法实现.....	23
2.4 白车身制造过程的统计质量评价	24
2.4.1 制造过程的离线检测.....	24
2.4.2 白车身制造质量连续改进指数 (CII)	29
2.4.3 小样本检测条件下 CII 指数的计算.....	30
2.4.4 小样本检测条件下合格率的计算.....	37
2.5 本章小结	41
参考文献	41
第3章 基于数值模拟的薄板冲压成形质量控制.....	44
3.1 引言	44
3.2 薄板冲压成形仿真系统	45
3.2.1 计算机软硬件平台.....	47
3.2.2 体系结构中的关键环节.....	47
3.3 冲压回弹分析.....	48

目 录

3.3.1	汽车零件的变形及其回弹.....	48
3.3.2	回弹的影响因素.....	51
3.3.3	回弹的常用计算方法.....	52
3.3.4	回弹预测的增量有限元法.....	55
3.3.5	基于一步模拟的回弹预测方法.....	59
3.4	回弹控制与补偿方法研究.....	62
3.4.1	基于变压边力的大弯曲件回弹控制方法.....	62
3.4.2	基于回弹预测的小曲率件模具型面设计.....	68
3.5	本章小结.....	73
	参考文献.....	74
第4章	白车身点焊质量控制方法研究.....	80
4.1	引言.....	80
4.2	轿车车身电阻点焊熔核长大过程有限元仿真研究.....	80
4.2.1	点焊装配的分类.....	80
4.2.2	电阻点焊过程计算模型.....	81
4.2.3	点焊过程控制方程组.....	81
4.2.4	点焊过程有限元模拟.....	83
4.2.5	电阻点焊热过程对零件变形影响研究.....	85
4.2.6	试验研究.....	91
4.3	轿车车身电阻点焊装配过程偏差机理及其仿真的研究.....	93
4.3.1	车身装配的特点.....	93
4.3.2	轿车车身装配偏差定义.....	95
4.3.3	偏差传播的几何分析.....	95
4.3.4	轿车车身零件多点装配过程偏差有限元仿真.....	99
4.3.5	应用实例.....	103
4.4	本章小结.....	108
	参考文献.....	108
第5章	柔性薄板焊装夹具的优化设计方法.....	110
5.1	引言.....	110
5.2	基于CBD的焊装夹具概念设计.....	111
5.2.1	焊装夹具设计实例相似度.....	112
5.2.2	焊装夹具设计实例的索引和检索.....	113
5.2.3	焊装夹具设计实例的修改和存储.....	116
5.3	面向N-2-1定位的薄板焊装夹具优化设计方法.....	117
5.3.1	多种群自适应模拟退火—遗传算法.....	118
5.3.2	多种群自适应模拟退火—遗传算法(SAMGA)算法结构研究.....	119
5.3.3	基于MATLAB和FEMLAB的SAMGA优化算法工具包.....	122
5.3.4	焊装夹具的定位误差.....	123
5.3.5	考虑定位误差时的“N-2-1”定位原理.....	123

5.4 车身薄板焊装夹具虚拟设计系统	125
5.4.1 车身焊装夹具虚拟设计体系	125
5.4.2 车身焊装夹具虚拟设计系统	129
5.5 应用实例	134
5.5.1 车门内板结构及其装配过程	134
5.5.2 车门内板焊装夹具概念设计	136
5.5.3 车门内板焊装夹具结构设计	137
5.5.4 车门内板焊装夹具优化设计	138
5.6 本章小结	141
参考文献	142
第6章 柔性薄板冲压件检具设计方法	145
6.1 引言	145
6.2 车身检具选型设计方法	145
6.2.1 车身检具设计过程	146
6.2.2 车身检具的特点及其分类	147
6.2.3 车身覆盖件检测特征	148
6.2.4 基于检测特征的车身检具选型设计研究	149
6.2.5 车身检具选型设计应用举例	154
6.3 车身检具结构设计方法	154
6.3.1 车身检具结构特征	155
6.3.2 车身检具特征映射	159
6.3.3 车身检具特征映射系统结构	163
6.3.4 车身检具特征映射功能的实现方法	167
6.3.5 应用举例	168
6.4 柔性薄板冲压件检具优化设计	169
6.4.1 关于柔性零件——检具的基本假设	169
6.4.2 检具的有限元优化分析模型	170
6.4.3 柔性件检具优化设计方法——基于知识的遗传算法	172
6.5 基于 ANSYS 的薄板冲压件检具优化设计	183
6.5.1 基于 APDL 的遗传算法优化技术	183
6.5.2 基于知识的遗传算法计算模块	184
6.5.3 ANSYS 环境下柔性零件检具优化设计的程序结构	185
6.6 应用实例	186
6.7 本章小结	189
参考文献	190
第7章 基于知识的车身装配尺寸偏差源快速诊断方法	192
7.1 引言	192
7.2 小样本检测数据的处理分析与尺寸控制方法	193
7.2.1 小样本采样条件下相关分析与主成分分析	193

目 录

7.2.2	基于多维时间序列分析的车身装配过程预测	194
7.2.3	车身装配过程尺寸控制的系统流程	198
7.3	N-2-1 焊装夹具定位失效模型与故障模式匹配方法	199
7.3.1	车身焊装夹具的定位方案与假想失效模式	200
7.3.2	夹具定位单元与测点的几何关系	201
7.3.3	焊接夹具误差样本模型的建立	203
7.3.4	模型参数的确定	208
7.3.5	夹具误差样本模型中的诊断向量与主成分之间的关系	209
7.3.6	夹具故障模式匹配的映射程序	210
7.3.7	基于蒙特卡罗模拟的模型验证	212
7.4	基于知识的车身装配尺寸偏差源诊断系统构造	214
7.4.1	系统结构	214
7.4.2	产品和工艺过程知识库	215
7.4.3	问题识别	219
7.4.4	问题分析	221
7.4.5	误差源定位	222
7.5	本章小结	224
	参考文献	224
第8章	轿车车身制造质量控制系统研究应用实例	226
8.1	引言	226
8.2	白车身装配工艺系统	226
8.3	白车身装配过程偏差源智能诊断系统软件	230
8.3.1	软件总体结构	230
8.3.2	主要模块功能和界面	230
8.4	案例分析实例	234
8.4.1	某轿车后围板尺寸波动诊断实例	235
8.4.2	某三厢车前围尺寸偏差及波动案例研究	241
8.4.3	某轿车前翼子板钻孔工位钻孔波动案例	251

第1章 绪论

1.1 引言

车身是轿车的最大总成，重量和制造成本约占整车的40%~60%。典型车身通常由250多个薄板冲压件在55~75个装配站上焊装而成，装夹、定位点可达1700~2500个，焊点多达4100个。如图1-1所示，车身装配为一种多层次体系结构，若干零件经过焊装成为分总成，分总成又成为下一层装配中的零件。车身尺寸偏差主要来源如下：

- 零部件间的干涉。
- 工装、夹具定位的不稳定性。
- 零件本身的偏差。
- 焊装变形。
- 操作影响。

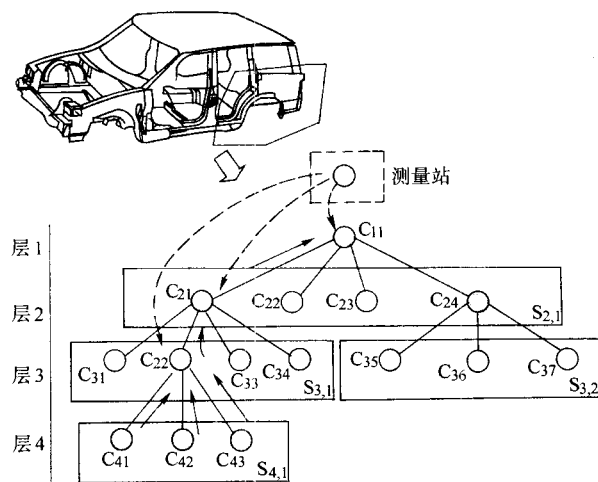


图1-1 车身装配的多层次体系结构

C₁₁—后围总成 C₂₁—后纵梁拼装件 C₂₂—左轮罩总成 C₂₃—右轮罩总成 C₂₄—地板拼装件

C₃₁—左后纵梁总成 C₃₂—右后纵梁总成 C₃₃—安全带支架 C₃₄—备胎支架 C₃₅—中地板

C₃₆—后地板 C₃₇—地板接长件 C₄₁—右后纵梁 C₄₂—定位碗头 C₄₃—加强板

轿车白车身 (Body-in-White) 制造涉及薄板冲压成形、自动装配、焊接及检测等多个领域，其制造质量显著影响到整车性能，并直接关系到汽车产品的市场竞争力，在很大程度上代表了一个国家的制造业技术水平。

20世纪90年代初期，美国汽车制造质量在整体上落后于日本与欧洲，导致美国汽车企业失去了近30%的国内轿车市场。如以车身关键测量点 6σ 值为评价指标，当时欧洲车身制造偏差的最好水平为 $\pm 1.25\text{mm}$ ，日本的最好水平为 $\pm 1.00\text{mm}$ ，而美国车身制造偏差一般要超过 $\pm 2\text{mm}$ 。在这种情况下，美国Michigan大学吴贤铭教授提出了旨在降低车身综合制造偏差的“2mm工程”计划。该计划得到美国三大汽车公司的响应，并获得了美国商业部

先进技术计划 (ATP, Advanced Technology Program) 的资助。研究内容涵盖了车身装配在线检测、制造偏差的减小方法、零部件装配公差分析与综合、车身制造信息管理等方面。经过 3 年的努力,摆脱了依赖经验的传统质量控制模式,“2mm 工程”项目获得了巨大成功。90 年代中期,美国车身制造质量达到世界先进水平,逐步夺回了原有的市场份额。

20 世纪 90 年代末,中国轿车车身制造与美国 20 世纪 90 年代初的处境十分相似,车身制造尺寸偏差在 $\pm 2\text{mm}$ 以上,激烈的国内外市场竞争迫切需要迅速提高车身制造水平。美国“2mm”工程特别注重依靠在线检测设备获取装配过程的尺寸测量信息,而对车身产品知识和工艺装备知识的应用不足,车身装配线投资巨大,不适合于目前的多品种、中小批量生产模式。工业界和学术界也普遍认为在线检测的性能价格比是其存在的严重问题。国内由于受经济承受能力和单个车型产量的限制,不可能配置昂贵的在线检测设备,不能照搬美国“2mm”工程技术,只能采用离线检测方式,因此必须解决小样本检测条件下质量评价与偏差源诊断问题。我们也不能照搬日本和欧洲的车身质量控制模式,因为我们不可能在短时间内积累丰富的经验,同时企业员工的素质也与日本和欧洲存在较大差距。因此,必须探索适合中国特色的车身制造质量控制新路。

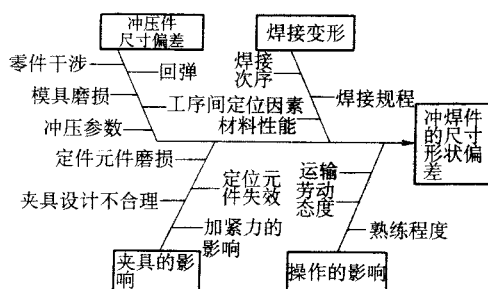


图 1-2 冲焊件尺寸偏差影响因素

如图 1-2 所示,车身制造过程中的主要偏差源在装配过程中耦合、传播和积累而形成车身制造的综合偏差,犹如纵横交错的溪流汇入滔滔江河,为此引入了车身装配过程偏差流理论^[1]。从水利学的角度,如果给定溪流流量,希望预测江河总流量;如果主河道下游出现浑浊现象,希望推断上游降雨的位置。类似地,车身装配偏差流理论将尺寸偏差控制归结为两类问题:①揭示装配过程中偏差流的传播规律,根据各偏差源预测车身的综合偏差,反过来实现误差再分配;②针对制造过程中所出现的尺寸偏差确定偏差根源,实现制造过程的偏差控制。①是面向设计过程的,②是面向制造过程的。因此,为了实现车身制造质量控制,必须兼顾面向设计和面向制造的偏差控制的辩证统一关系,建立轿车车身的偏差流控制系统模型,才能实现制造偏差的综合控制。

1.2 面向制造过程的车身尺寸偏差控制

1.2.1 传统的工序控制的缺陷与在线检测

车身装配被认为是具有最小柔性的装配过程,因为面对频繁的改型,工装与夹具必须同新建立的工业过程和产品设计相适应,造成大量人力物力的消耗。即使工夹具准备就绪之后,通常要花费一年以上的时间才能完成轿车开发的最后阶段。该阶段包括样车试制 (Pilot Program)、小规模试生产 (Pro-volume Production)、生产启动 (Launch Time)

和大规模生产 (Full-Production)。

在时序上, 样车试制阶段的车身尺寸偏差较大, 经过小规模试生产和生产启动阶段的改进, 主要误差源被消除, 尺寸偏差逐步减小, 进入大规模稳定生产阶段。在大规模稳定生产阶段, 尺寸变化的主要原因是工艺过程的突然变化。最经常出现的尺寸变化是均值变动、不规则跳动及方差变化, 或三者的组合。从偏差形态上看, 偏差分为平面内的和非平面内的两种。一般, 平面内的偏差起源于夹具定位的变动, 具有刚体运动的性质; 而非平面的偏差可能产生于零部件变形或焊枪的偏差, 具有变形属性。从诊断学角度, 前者是可诊断的, 后者是有条件可诊断的。基于偏差诊断技术的车身尺寸偏差控制是以数据驱动质量为基本思路, 通过偏差识别和故障诊断快速定位误差源, 一方面缩短大规模生产前的预生产时间, 较快地进入稳定生产阶段, 另一方面是最大限度地维持生产状态的稳定。

戴明 (Deming) 循环反映了“计划—执行—检验—总结” (PDCA) 的一般规律, 显著影响了汽车文化的发展, 促进汽车制造质量的不断提高。它体现的是方法论范畴的管理科学。从本质上看, 提高制造过程的根本基础是工序控制。目前, 工业界和学术界公认有效的两种工序控制方法是基于控制图的统计过程控制和线内质量控制。

传统控制图采用 \bar{x} 、 \bar{R} 、 T^2 图^[2, 3] 监控制造过程的单变量或两相关变量的状态。统计过程控制 (SPC) 借助控制图分析确定工艺过程状态。对处于非控制状态的工艺过程, 通过进一步确定误差源实现工序校正。田口玄一的线内质量控制基础是工序诊断调节及预测矫正, 它与控制图法的重要区别是更强调过程控制的时间经济效果, 而且自动控制的引入有利于质量工程中提出的高质量、低成本目标。统计技术和线内质量控制法都曾用于某些车身装配线的尺寸分析, 离线地隔离某些缺陷。

无论是 SPC 法还是工序诊断调节法, 首先要对制造过程进行尺寸数据的检测采样。因为尺寸数据的跟踪是实现车身装配过程监控的基础, 检测方法决定了车身装配过程监控的精确性和有效性。

传统的检测夹具是 20 世纪 70 年代前广泛使用的检测工具。虽然它们可以提供检测点空间相互关系的直接反馈, 但由于检测速度太慢, 不能提供足够的特征样本数据。三坐标测量机 (CMM) 依靠其较高精度和较高柔性, 成为 20 世纪 80 年代初乃至现在国内外汽车制造厂流行的检测设备。由于需要完成从测量线到测量室间的搬运、定位、测量和再搬运操作, 通常每班仅能测量 2~3 台 (件) 的测量任务。当发现制造过程出现质量问题时, 存在此类缺陷的若干产品已被转移到后续工序中, 因而装配过程中缺陷检测和诊断并不是十分有效。

20 世纪 80 年代末, 光学坐标测量机 (OCMM) 的出现, 为车身装配过程的在线测量提供了可能^[4]。光学坐标测量机通常安装在总成装配或整车装配的末端, 利用视觉传感器 (一般为结构光传感器), 以 100% 的采样率测量分布于车身部件上的 100~150 个关键点, 为装配过程的质量界定和误差源定位提供了丰富的多变量尺寸信息。Wu^[4] 利用 100% 在线测量数据、结合 SPC 实现了车身装配过程的实时缺陷检验。Roan 和 Hu^[5] 在线监控装配过程中状态的突然变化。

传统的 SPC 法和工序诊断调节法主要侧重于制造过程单变量和双变量的监控, 而不是制造过程的诊断和控制。由于缺乏制造过程的诊断支持, 很难解释车身制造过程中不同测

量变量之间以及不同层次变量间的关系,较难揭示多维统计数据变化的原因,从而不能产生有实际意义的推断结果。因而,在缺乏在线测量系统和制造过程诊断的前提下,从发现问题到解决问题,数百辆有缺陷的车身将流入下道工序,从而影响后续工序的质量。

1.2.2 基于偏差诊断的车身尺寸偏差控制

装配尺寸偏差或者源于刚体运动,或者源于结构的变形,其测量数据往往具有很强的相关性。主成分分析(PCA, Principle Component Analysis)通过特征值求解确定采用非相关变量集合 $\{z_i\}$ 表示相关多变量数据集合 $\{x_i\}$ 的线性变换,当与较大特征值对应的若干非相关变量的方差足以近似代表原多变量数据方差时,相应的变换矩阵 A 的行向量,即主向量可以较容易地实现测量数据误差源的直观解释。Wu和Hu^[5]成功地使用主成分分析根据在线测量数据识别偏差模式;Hu和Wu^[6]针对车门装配过程,借助于主成分分析、偏差向量的内积和Mahalanobis距离分类器,提出两级故障模式的在线分类方法,实现偏差源的定位;Roan、Hu和Wu^[7]首先利用装配过程特征和相干族分析,对轿车车身测点分组(案例),再使用主成分分析识别案例的误差源。

上述文献虽给出了以偏差模式表示的尺寸缺陷的直观解释,但没有指明偏差模式与故障源的内在联系,偏差源定位仅是将所识别出的偏差模式与先前已解决案例进行模式匹配的结果,其工作重点是过程模型的识别,没有利用产品及工夹具的系统知识。从这种意义上讲,它们仅仅是偏差控制的统计工具,而不是装配过程诊断的系统方法。上述工作更适合于稳定生产过程的诊断控制,而对于生产启动阶段,通常不存在供预先的案例,基于经验的诊断技术不再有效,换言之,缺乏产品和工艺知识的统计方法不足以确定误差源。

Ceglarek^[8]借鉴在线模式诊断系统,提出基于知识的车身装配诊断系统方法,以实现车身生产启动阶段的故障快速监测和定位。车身装配知识表达和诊断推理是诊断系统的关键。以层次结构表达的系统知识包括产品、工夹具、工艺和测量四个知识组。通过下述三步完成车身装配故障诊断的推理:

- 进行测量数据的统计相关分析,确定问题的候选点集。
- 根据零件上候选点集,搜索车身装配过程中具有潜在失效的候选零件和候选装配站。
- 由主成分分析确定偏差向量,并由候选点集的比例确定零件的偏差形式(整体或局部),根据夹具定位位置点、夹具加紧点、焊点位置关系和外部干涉特征确定误差源。

Ceglerek和Shi^[9]进一步提出将PCA(统计知识)和夹具CAD(工程知识)集成的夹具故障诊断方法,其关键是夹具潜在失效模式构造、未知失效的偏差模式的确定和故障映射方式。潜在失效模式采用夹具的CAD数据进行构造,未知失效的偏差模式由在线传感器测量数据通过主成分分析确定,使用最小距离分类器实现优势方向的故障分类。从而利用模式识别方法实现了未知偏差模式与夹具潜在失效模式间的匹配,锁定夹具误差源。

由薄板零件偏差和焊枪偏差引起的装配尺寸的非平面变化,同一装配站上多变量测量数据也具有较强的相关性。Hu指出:在仅考虑薄板零件偏差条件下,只要非冗余测点数目大于或等于误差源数目,串联装配的误差源是完全可诊断的,而并联装配的误差源是有条

件可诊断的，必要条件是两零件之一的偏差已知。本书认为由薄板零件偏差和焊枪、夹具偏差引起的非平面偏差的诊断，应首先离线地建立焊枪偏差引起的偏差模式，以及装配综合误差对零件偏差的敏感矩阵，然后通过在线测量数据的主成分分析、模式识别分离焊枪误差源和零件误差源。

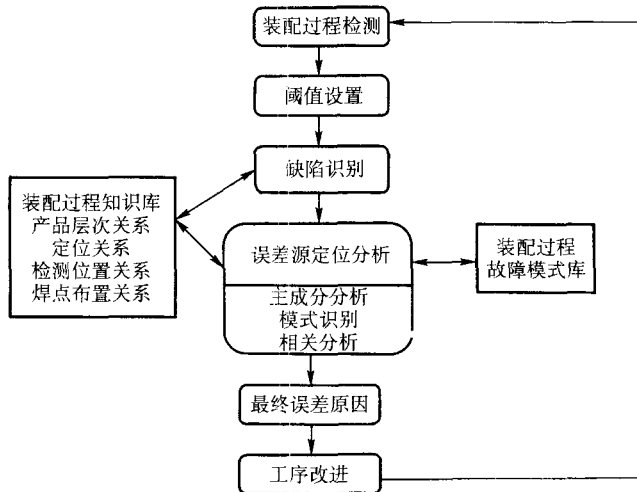


图 1-3 基于偏差诊断的车身尺寸偏差控制框图

综上所述，车身制造偏差的诊断控制基本上可分为生产启动阶段的偏差诊断控制和稳定生产过程的偏差控制。两者的主要不同是生产启动阶段的故障诊断缺乏稳定生产过程的偏差诊断经验知识，但是方法是相同的。根据戴明循环原理并综合考虑两阶段的偏差诊断控制，本书将基于偏差诊断的车身尺寸偏差控制方法归纳为图 1-3 所示的框图。

1.2.3 基于自适应补偿的车身装配偏差控制

线内质量控制方法不仅强调对工序的诊断调节，而且重视工序运行的自动控制。自动控制是一种当工序发生状态变化时，不探究原因，只通过参数调整控制参数水平进行校正的方法。虽然工序运行的自动控制广泛运用于冶金、印染、化工和切削加工等质量控制，但传统的车身装配系统中，夹具利用固定定位点定位零件，偏差信号的采集和对变量施加控制较为困难，因而车身装配线上一般没有设置误差补偿环节，造成制造偏差堆积。

Roan 和 Hu^[10]提出了通过夹具调整实现车门缝隙优化装配的系统方法。首先根据缝隙偏差、缝隙平行度和车身间缝隙的一致性，建立多目标约束优化模型，确定车门的最佳装配方位；然后通过车门-车身夹具系统调整机构，实现车门装配的最佳调整，控制参数是夹具的调整量。该文献给出了计算机仿真结果和夹具调整的手动实验，并没有实现真正意义上的自适应补偿。

Ceglarek^[11]报道了用于车门装配偏差补偿的 Net Form-Pierce(NF&P)系统。NF&P 装配站位于车门吊装的前一道工序，根据误差补偿关键定位点位置确定安装孔的位置，在车身和车门上冲制安装孔，以补偿前面各道工序所出现的偏差。理论上，NF&P 系统可以补偿上游装配的各项偏差，但由于硬件的限制，NF&P 系统一般仅能实现装配过程引入的关键偏差模式的补偿，此时，装配夹具的故障诊断为 NF&P 系统的误差补偿奠定了基础。

可见，基于自适应补偿的车身装配偏差控制并不探索引起偏差的上游工序的误差源，

而是在当前工序中设置补偿环节或机构,将上游工序偏差予以消除。对于偏差流理论,装配偏差的自适应补偿犹如江河中的水库,虽然没有从根本上解决上游的水流量,但调节了下游的水流量。

1.3 面向设计的车身装配尺寸偏差控制

制造过程物化了尺寸偏差,而产品的设计决定了由制造过程引入的偏差水平。Ceglarek 和 Shi 指出 6σ 偏差为 2mm 的水平,代表了目前设计能力的内在水平极限,尺寸偏差的进一步减少和控制依赖于产品设计和工艺设计。质量工程(QE)正是一种面向产品和工艺设计的质量控制方法。丰田公司称其车身 50% 以上的质量改进都是源于该方法。

质量工程的主要特征是参数设计(或实验设计)。通过参数设计使产品和工艺对引起质量偏差的外部因素具有鲁棒性。本节主要讨论与装配尺寸偏差有关的夹具和车身装配结构设计问题,不涉及冲压件本身的偏差问题。

1.3.1 夹具的优化设计

1. 形闭合和力闭合

制造过程(如加工、焊接、装配和检测等)中,夹具是用于在三维空间定位和夹紧工件的设备。夹具设计的中心问题就是选择最优定位点数,并确定它们的最佳位置,以实现工件的确定约束定位。如果工件依靠接触区域几何形状便可完全约束,称为“形闭合”;如果还必须借助摩擦才能完全约束,则称为“力闭合”。

通常形闭合强调动态分析,而力闭合研究工件的静态稳定。1885年,Reuleaux^[12]首先研究了二维工件的形闭合机制,证明了形成二维物体的形闭合必须有四个定位点。之后,Somoff 证明三维物体的形闭合需要七个定位点。1978年,Lakshminarayana^[13]从静态平衡角度利用代数理论,进一步证明了三维工件的形闭合至少需要七个点。1988年,Nguyen^[14]研究了机器手力闭合机制,1989年,Asada 和 Kitagawa^[15]研究了用于凸形和凹形工件的机器手的形闭合。通常的六点定位原理一般需要夹紧力将工件完全约束,因此常常是力闭合。

2. 螺旋理论

近十几年来,“螺旋理论”广泛流行于夹具设计中。螺旋理论将三维工件的三维空间运动描述为沿某一方向的平移和绕这一轴线的转动。最初由 Ball^[16]提出,并得到 Waldron^[17]、Ohwovoriole 和 Roth^[18]的发展。1983年,根据螺旋理论,Salisbury 和 Roth^[19]研究了七种不同类型的指状接触,并建议用指状外形去完全固定夹紧物体。1987年,Ohwovoriole^[20]利用扩展的螺旋理论就刚体的全部或局部约束分析了有摩擦夹紧。1989年 Chou^[21]提出了用于棱柱形工件的加工夹具自动布置的数学理论。1990年,Bausch 和 Youcef Toumi^[22]讨论了各夹具定位接触阻止工件相互螺旋运动的能力,提出了一种用于夹具设计的工件运动约束方法。1991年,Weill^[23]利用小螺旋模型考虑了夹具定位误差对工件几何精度的影响。1994年,DeMeter^[24]在夹具约束分析中研究了表面接触和摩擦问题。1994年,Sayed 和 DeMeter^[24]开发出了考虑动态约束、完全夹紧和刀具路径偏差的夹具设计和分析软件。可以说,夹具设计的螺旋理论已经用于处理确定定位和完全夹紧问题以及定位质量、

接触类型和摩擦等问题,并取得了明显成绩。

3. 薄板柔性件焊装夹具定位原理与优化设计

大量的文献集中论述了刚性件的夹具设计,但关于薄板柔性件的夹具设计研究很少涉及,特别是考虑加工载荷作用下,工件变形的夹具设计的研究几乎没有。实际上,在航空工业和汽车工业,薄板变形可能导致严重的尺寸偏差。对于易变形薄板,定位夹具除了具备限制零件刚体运动的基本功能外,还必须能够限制过多的工件变形。

较早考虑工件或夹具定位单元刚性的研究见于 Shawki 和 Abdel-Aal^[25] [1965],他们根据实验结果,研究了夹具刚度和磨损对尺寸精度的影响。

1987年 Lee 和 Haynes^[26]提出了一种用于柔性定位夹具的夹具系统分析的有限元模型,加工过程中的加工力,可看作是作用于节点的力。基于该模型,可以计算出工件变形、夹紧力和应力分布,可运用库仑摩擦定律去计算工件与夹具定位单元间接触处的摩擦力。虽然通过考虑工件变形和有限元分析推动了这一领域,但它既没有提出任何一种具体的定位原理,也没有为具有柔性的薄板件提出一种定位方案。此外,这种模型并没有将工件的有限元分析结果同夹具设计规范联系起来,它更多的是工件的分析而不是夹具设计。

1988年, Youcef - Toumi^[27]提出了一种薄板夹具定位分析的方法。他们研究了用于平板和壳体的三点和四点夹具定位系统,夹具布置必须使得工件中的应力低于材料的屈服应力。然而,这种方法并没有解决薄板夹具的本质问题,因为减小变形是薄板件定位的关键所在。

1991年 Menassa 和 Devries^[28]在 Lee 和 Wilson 研究成果的基础上,进行更深入的研究,利用有限元建模选择使工件在第一基准面法向的变形最小的夹具定位布置。为确定最佳夹具定位布置,利用拟牛顿优化算法使有限元网格上的关键节点的变形的平方和最小。设计变量是“3-2-1”定位原理所要求的第一基准面上的三个定位点。虽然他们的研究考虑了夹具优化设计,但仍采用“3-2-1”定位方案,未能讨论薄板件夹具设计的独特特征。

1993年, Rearick, Hu 和 Wu^[29]提出了一种综合运用非线性优化和有限元分析的薄板工件的夹具设计和评估方法,将优化结果用于一个代价函数分析来确定装配工序中的最优夹具定位单元数。代价函数将变形减小值与伴随所需增加夹具定位点的代价相比较。

1996年, Cai, Hu 和 Yuan^[30]进一步提出了一种新的定位原理——“ $N-2-1$ ”定位原理,并证明了该定位原理与广泛应用于刚性件的“3-2-1”定位原理相比,更适用于易变形薄板件的定位。根据“ $N-2-1$ ”定位原理,提出了夹具优化设计的算法,即利用有限元分析和非线性规划方法去找到最优的“ N ”定位点,使得薄板件的总体变形最小,即:第一基准面上所需的定位点数 N ($N \geq 3$),第二、第三基准面所需的定位点为二个和一个,禁止在正反两侧同时设置定位点。

稳健设计是在确定定位环境下,使由于工件表面和夹具安装误差(源误差)导致的工件定位误差最小。Cai 等^[31]提出了基于变分法的夹具稳健性设计方法,采用一阶几何信息和二阶几何信息实现夹具结构优化设计。

1.3.2 车身装配偏差分析与综合

车身装配是一个多层次复杂的装配过程。偏差流理论揭示装配过程中偏差的传播规律,根据零件偏差、定位稳定性和零件干涉预测车身的偏差,确定各误差源的贡献率,从

而为进行车身装配偏差控制奠定基础。装配偏差分析的常用方法是基于误差累积理论的极值法、统计分析法和 Monte Carlo 模拟法。

极值法^[32]通过假定所有的零件尺寸都取得极限值来估计装配偏差,但零件同时取得极限值的概率非常小,因而需要缩小零件公差来满足设计要求。统计分析法首先确定零件偏差概率分布,然后根据零件偏差分布计算装配部件的综合偏差,统计分析法可以获得比极值法更切合实际的偏差估计^[33]。上述两种方法一般不易用于复杂两维和三维装配偏差分析。复杂两维和三维装配偏差分析的常用方法为 Monte-Carlo 模拟法^[34],该方法通过对零件已知偏差分布随机采样构造装配误差统计分布。

这些方法都认为零件为刚体,其装配偏差的集合特征仅由几何或(和)运动关系确定。但对于像薄板冲压件类的柔性零件,Takezawa^[35]根据车身实测数据的线性回归分析指出:“对于柔性薄板装配,传统的积累理论不再有效,装配偏差可以小于零件偏差且接近于刚性较大零件偏差”。因此,必须引入柔体装配的误差传播理论,以指导车身装配的偏差分析与综合。柔体件装配的误差传播理论认为装配后的综合偏差可写成如下形式:

$$v = f(v_1, v_2, \dots, v_n) \quad (1.1)$$

即综合偏差为各偏差源(零件、工夹具)的函数,它不仅取决于零件的几何关系,还受到零件力学关系的影响。如果装配满足线弹性条件,则式(1.1)可改写为:

$$v = c_1 v_1 + c_2 v_2 + \dots + c_n v_n \quad (1.2)$$

式中, c_1, c_2, \dots, c_n 为各偏差源对综合偏差的影响系数。可以说,柔体装配偏差分析就是确定函数 f 或影响系数 c_1, c_2, \dots, c_n 。

并联和串联是两种基本的装配形式。串联装配的偏差仅与零件的几何形状有关,装配偏差具有累积性;而并联装配的偏差受到几何关系和零件力学关系的双重影响,各误差源对综合误差的影响系数的代数和恒等于 1,在一定的条件下,其装配综合误差将小于单个误差源的误差。

搭接、对接和角接是薄板装配的三种基本接头形式。接头形式显著影响到综合偏差对零件和工具偏差的敏感程度,采用偏置单元对两薄板并联装配偏差分析表明^[28, 29],当两零件厚度相当时,搭接接头对工具偏差较敏感,当两零件厚度不同时,刚度较大零件的偏差对搭接综合装配偏差起支配作用;对接接头对工夹具偏差不敏感,控制零件偏差是装配偏差控制的关键;对于角接接头,当折角件远比平板件厚时,折角件偏差起支配作用,当平板件远比折角件厚时,焊枪偏差起支配作用。

当薄板装配包含两维或三维自由曲面时,需利用有限元法进行结构分析预测装配偏差,常用方法是直接 Monte Carlo 法。该方法首先根据误差分布,由随机数发生器产生零件偏差;再由 FEM (Finite Element Method) 计算零件被夹持到名义位置的外力;然后由 FEM 计算焊接后装配结构的回弹;最后计算装配后的误差分布。虽然该法简单易行,但为获得装配误差分布所需的计算量非常大。Liu 和 Hu^[36]提出薄板装配误差分析的影响系数法,有效地提高了计算效率。它通过单位力响应和互易定理,建立零件变形和作用外力的影响