



*Automotive Painting
Technology*

汽车涂装技术

〔日〕 户田纪三夫 (Kimio Toda)

〔美〕 亚伯拉罕·萨拉查 (Abraham Salazar) 等著

〔美〕 齐藤孝三 (Kozo Saito)

刘小刚 孙俊 向雪兵 陈海长 等译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

汽车涂装技术

制造 - 培训的观点

[日] 户田纪三夫 (Kimio Toda)

等著

[美] 亚伯拉罕·萨拉查 (Abraham Salazar)

[美] 齐藤孝三 (Kozo Saito)

刘小刚 孙 俊 向雪兵 陈海长 等译

机械工业出版社

内容简介

本书是由美国肯塔基大学工程学院技术开发研究所、ANSYS FLUENT 公司、Asahi Sunac 公司合作编写。本书分为四部分，分别讲解涂装技术——经验方法、涂装技术——数值模拟和比例模型、涂装技术——可视化和表征、涂装技术——研究和教学综合的方法。

本书主要讲解汽车涂装技术最新进展，适合从事汽车涂装技术研究的人员、汽车制造企业涂装技术人员以及汽车涂装专业的师生阅读。

Translation from English language edition:Automotive Painting Technology(ISBN 9789400750944)by Kimio Toda, Abraham Salazar and Kozo Saito Copyright © 2013 Springer Netherlands is a part of Springer Science+Business Media.

All Rights Reserved.

本书由 Springer Netherlands 授权机械工业出版社在中国大陆地区（不包括香港、澳门特别行政区以及台湾地区）出版与发行。未经许可之出口，视为违反著作权法，将受法律之制裁。

北京市版权局著作权合同登记 图字：01-2014-0311 号

图书在版编目（CIP）数据

汽车涂装技术 /（日）户田纪三夫（Toda, K.）等著；刘小刚等译.
—北京：机械工业出版社，2016.3

书名原文：Automotive Painting Technology

ISBN 978-7-111-53192-0

I . ①汽… II . ①户… ②刘 III . ①汽车—涂漆 IV . ①U472.44

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2016）第 046635 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：连景岩 杜凡如 责任编辑：连景岩 杜凡如 李 然

责任校对：佟瑞鑫

封面设计：张 静

责任印制：李 洋

北京汇林印务有限公司印刷

2016 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·9.5 印张·2 插页·184 千字

0 001—3 000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-53192-0

定价：79.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线：010-88361066 机工官网：www.cmpbook.com

读者购书热线：010-68326294 机工官博：weibo.com/cmp1952

010-88379203 金书网：www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网：www.cmpedu.com

序 言

我由衷地祝贺齐藤孝三教授指导的肯塔基大学涂装技术研究会成立 10 周年，并感激齐藤孝三教授的辛勤工作和才华横溢的 IR4TD 骨干成员们。我非常赞同用这本基于制造汽车涂装技术的周年专刊来纪念这一时刻。

55 年来，我的旭灿纳克公司一直致力于通过雾化喷涂设备和技术开发创新来解决全球的环境和能源问题。回顾这 55 年，我们已经取得的技术发展主要依靠我们的经验，通过一系列的试验和大量的数据收集。就像改善经营管理一样，主要通过我们自己一点点的持续不断的努力，因为我们无法从来自世界各地的学术机构的科学研究和报告中找到可以利用的资源 and 帮助。2000 年，肯塔基大学建立第一个涂装技术研究中心（PTW 2000），终于结束了这一不幸的趋势。从此，我便兴奋地寻找 PTW 创造的令人兴奋的、新的科学研究结果。我非常荣幸能够邀请齐藤教授出席旭灿纳克五十周年庆典的讲座，同时也很荣幸能够在肯塔基大学技术开发研究所（IR4TD）里进行雾化喷涂技术合作研究。

我也很高兴见到户田先生，他是一个国际公认的汽车涂装技术领域方面的专家。他在丰田和 NUMMI 的制造工程中起到至关重要的作用，同时也是 PTW 定期讲师。在他负责的章节中，户田先生应用广泛的知识和经验介绍了汽车喷涂技术。在后续的章节中，技术开发研究所（IR4TD）的研究员将科学方法运用到实际应用中，使本书具有了非常独特的价值。户田先生在推动 IR4TD 的科学研究有效地解决汽车涂装工艺、系统以及设备中的问题方面扮演着非常重要的角色。我相信这本独特的书会使对汽车涂装工艺学的基础和应用感兴趣的工程师、研究员和学生都有所收获。

甘利昌彦
日本旭灿纳克董事长

前 言

肯塔基大学技术开发研究所（IR4TD）与企业保持着相互依存和可持续发展的伙伴关系。肯塔基大学为了更好地进行研究、教育和服务，努力探索一种新的、更好的方法，这个独特的协会就是一个很好的例子。

为响应丰田公司的一个关于针对大部分以经验为基础的汽车喷涂技术领域寻找科学依据的要求，我们于1993年前后在肯塔基大学技术开发研究所开始了关于汽车涂料技术的一系列科学研究。关于具体研究的内容，户田纪三夫在他所写的章节中进行了阐述。在那时，我对汽车喷涂技术完全不熟悉，因为我的研究背景是尺度建模和燃烧。因此，我需要到新开的丰田乔治城工厂咨询问题：支持旋杯雾化喷涂的科学原理是什么？为什么有如此多的过喷漆雾产生？怎样收集这些过喷漆雾？为什么需要这样的大型喷漆室？漆膜厚度指的是什么？需要多少不同的涂层？原因是什么？所有这些对一个新手来说都是问题，但同时也帮助我们创建了一个科学研究的基准线。遵循现场现物原则，我经常带着这些疑问前往汽车厂去收集各种数据，并和工程师及操作人员进行讨论。然后在肯塔基大学进行简单的模型试验。在最初的三年里，我们一名研究生、一名企业进修工程师和作为学院研究员和组长的我组建了一个小的研究团队。

1996年前后，亚伯拉罕·萨拉查加入了我们的团队推进研究工作，用他专业的CFD（计算流体动力学）对含有涂料颗粒的气流和各种汽车制造厂用于捕捉漆雾的典型传统湿式除漆系统的漆雾捕捉机理进行模型计算分析。定量估计相对效率、能源利用和现有的湿式除漆系统捕捉漆雾的流体动态特性是我们的首次突破。

我们的下一个任务集中在如何提高湿式除漆器的性能上。这项任务需要新的思路，通过突破性思维（outside-the-box）和模式转变（paradigm shift）进行思考。我们从自然界得到启发，沙漠中的沙丘结构可能是用最少能耗捕捉涂料颗粒的最有效的方法。这种方法是在我们的团队与丰田和三一的工程师协同发明福提康（Vortecone）时提出来的。福提康（Vortecone）湿式除漆器能节能30%~50%，并且比其他市场上的同类产品有着更高的捕获能力。我们团队的成功取决于下列因素的组合：进行了捕获机理的基础研究，突破性思维（outside-the-box）的思考方式，模式的转变，以及丰田公司的持续稳定的财力支持。缺少上述任何一项因素，我都难以想象这项发明还能否成功。在这种情况下，盒子（box）是当前的技术壁垒，人类创新的思想结合工程原则就能突破这个壁垒。我们把关注视线从传统的漆雾捕捉机理转移到自然界中，根据自然现象得到了一个更有效的模型。

这个初步取得的成功，引起了很多公司对我们汽车涂装研究的关注。1999年肯塔基大学涂装技术联盟（PTC）正式成立。在接下来的一年中，我们发起了一年

一度的涂装技术研讨会，主要有以下几个目的：①提供一个场所，便于行业工程师、政府机构监管人员和学术研究人员会面并讨论涂装研究成果和技术进展；②分享涂装工艺中存在的共同问题并寻找共赢的解决方案；③提供教学和培训的机会。在2005年前后，国际知名的汽车喷涂技术专家户田纪三夫，作为一名特殊的讲师加入了PTW，带来了他在丰田公司的三十二年经验。

基于Toda-UK PTW的合作，我们举办了一个为期两天的汽车涂装技术的短期特别课程，整理了大量关于汽车喷涂技术的资料。这一课程激发了出版一本更全面的汽车涂装技术书籍的想法，最终，本书得以呈现。

齐藤孝三

目 录

序言

前言

第 1 章 介绍	1
齐藤 孝三 (Kozo Saito)	

第 I 部分 涂装技术——经验方法

第 2 章 什么是雾化喷涂?	4
户田纪三夫 (Kimio Toda)	

第 II 部分 涂装技术——数值模拟和比例模型

第 3 章 关于汽车旋杯喷涂过程的计算模型	38
亚伯拉罕·萨拉查 (Abraham Salazar)	
第 4 章 利用比例模型研究旋转雾化杯上的薄膜	76
维当斯 斯里尼瓦桑 亚伯拉罕·萨拉查 齐藤 孝三 (Vedanth Srinivasan, Abraham Salazar and Kozo Saito)	

第 III 部分 涂装技术——可视化和表征

第 5 章 汽车涂料喷雾表征及可视化	94
尼尔森 K·阿卡弗耶 (Nelson K. Akafuah)	

第 IV 部分 涂装技术——研究和教学综合的方法

第 6 章 关于表面涂装技术的制造和培训的研究及进展	128
齐藤 孝三 亚伯拉罕·萨拉查 肯·克里弗 埃里克·格鲁尔克 (K. Saito, A. Salazar, K. Kreaflle 和 E. Grulke)	

参考文献	141
------------	-----

摘要

有时候，工业界和学术界有两种截然不同的文化理念，前者关注如何及时地提供价格合理的高质量产品给客户，而后者侧重于研究和服务。然而，这种差异并不意味着没有共同点。在看重 hitozukuri（培训）、monozukuri（大致上指制造）的公司和以教育和研究为焦点的学术机构之间确实存在共同点。因此，在研究和技术开发方面，学术界和工业界之间可能实现双赢关系。这本书创建了一个成功的例子，即一个世界级的汽车制造商和肯塔基大学研究表面涂层和检测技术的双赢例子。

Monozukuri，是在本书的标题中出现的日本术语，可能需要一些解释。Monozukuri 由含义为“产品”的“mono”和含义为“制造或创造的过程”的“zukuri”组成，但这个词不仅仅意味着简单的产品制造；它具有追求卓越、技巧、精神、热情和骄傲的色彩，以及将事情做得更好的能力。自动不是盲目的重复，它需要从传统学校的结构化课程中获得相关创造性的思想，而不像工匠那样，可以通过漫长的学徒经历而获得技能。Monozukuri 代表着深深植根于日本和东亚传统的制造哲学，就好像禅宗和儒学一样。因此，monozukuri 不仅是技术和方法，它还提供了一个清晰可见的日本工程师的指导原则。

另一方面，基于逻辑思维的西方模式的科学方法，也为工程师提供理论、试验和解决工程问题的汽车涂装技术相关的数值方法。值得关注的是，本书是两种不同的产品制造和科学理论的有机结合，一个单一的理论不可能得到的非常有益的结果。

因此，本书的开端（第 I 部分）和结尾（第 IV 部分）介绍生产制造，中间部分（第 II、III 部分）介绍科学原理。

更具体地说，本书收编了我们以前在汽车喷涂工作方面的技术，并且由以下四部分组成：第 I 部分，实践方法；第 II 部分，数字模拟和比例模型；第 III 部分，可视化表征；第 IV 部分，生产制造和人才培养。第 I 部分主要由 Kimio Toda 撰写，介绍了其在丰田表面涂装部门从工程师到经理的 32 年的汽车涂装技术实践经验。这一独特章

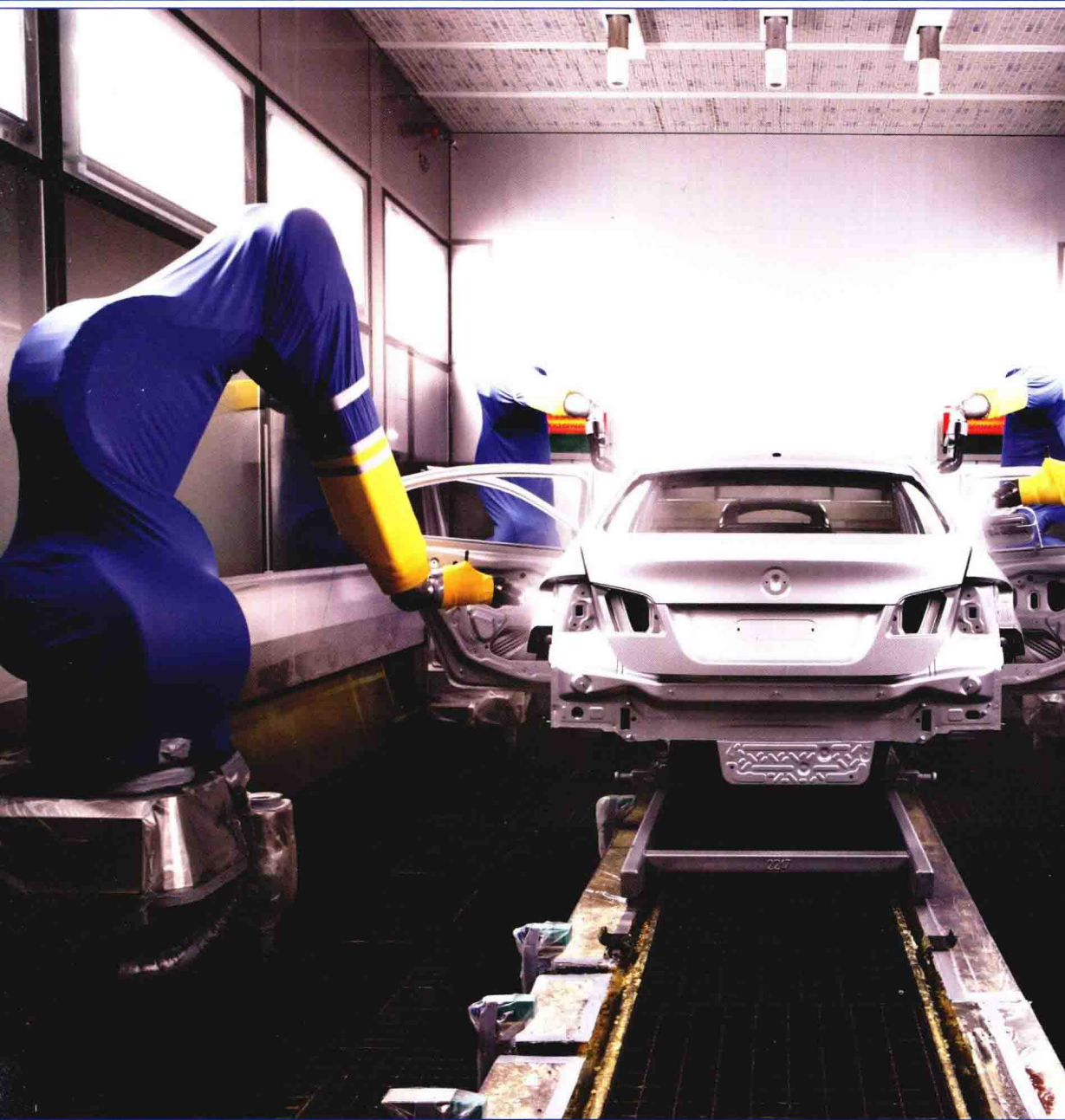
节对总工程师和大学工程专业的学生整体掌握这一技术有着非常大的帮助。第Ⅱ、Ⅲ部分介绍了计算流体动力学的模拟和数字模型以及涂料喷雾特性的红外热成像技术应用。这两部分由前任和现任的肯塔基大学喷涂技术研究团队成员撰写。它需要先进的数字模拟、流体动力学、传热知识和试验方法。

最后的第Ⅳ部分，介绍了日本独特的产品制造理念，它很大地影响了日本的技术发展，包括汽车涂装技术。这一部分阐述了技术发展与改进相关的独特思维过程，这一过程被称为改善（一个小的增量改进）和思维与改善（量子飞跃突破）。本部分的作者向读者展示了产品制造文化中的汽车涂装技术部分，以便他们可以看到他们自己对当前和未来的技术发展趋势及方向的解读。

我希望读者在阅读这本独特的基于产品制造的汽车喷涂技术书籍时能感到享受并有所收获，并且应用从本书中获得的思维方法去解决和改善汽车涂装技术的相关问题。

第 I 部分

涂装技术——经验方法



摘要

本章的目的是通过作者在汽车制造和雾化设备制造方面超过 30 年的行业经验，对雾化喷涂技术在汽车工业的发展做一个概述。作者的观点反映了产品制造不仅指关于技术问题的日本制造术语，还包括以日本传统价值观和哲学思想为中心的制造艺术和工艺。本章涉及目前的喷涂技术史，作者提出了汽车喷涂技术未来的发展方向和面临的挑战，还论述了喷涂技术作为一门艺术而不是科学的演化并强调了其对随后内容中的科学研究的必要性。

关键词：汽车涂装工艺、保护基底、表面形貌、喷漆室、能效和废物、涂料喷杯、水性和溶剂型涂料、涂料涂着效率

2.1 引言

汽车装配厂由冲压、焊接、涂装、总装车间组成，涂装车间位于整个厂区的中心，如图 2-1 所示。虽然涂装占有重要地位，但相比其他工程领域并未受到太多的重视。涂装技术一直以来没有得到很好的研究，世界上仅有几所大学和实验室在研究涂装技术。在这种情况下，肯塔基大学的 Saito 博士在十年前就开始引领涂装车间的研究。

自从 1971 年我加入丰田汽车公司以来，已主持涂装工作近 40 年。在最初的 13 年里，我开始研究和开发涂料系统，因此在丰田涂料实验室中做了很多不同类型涂料的试验，如溶剂型涂料、NAD 涂料（非水分散体涂料）、水性涂料和粉末涂料，以及许多类型的涂装设备，如静电喷枪和非静电空气喷枪及静电喷杯，并同时使用和开发了不同类型的喷涂设备，如往复机和机器人。

在 1984 年至 1987 年期间，我利用在丰田公司工作的经验在 NUMMI 新联合汽车制造公司的涂料车间担任调度员，那是一家通用汽车和丰田汽车的合资公司。1987 年我又回到了丰田公司，担任经理职务和表面处理工程部总经理，我又开始负责新的涂料系统的开发，同时也负责在全世界建设丰田的涂装车间，包括 TMMK（丰田汽车

肯塔基制造公司)、TMMC(加拿大公司)、TMMUK(美国公司)等,以及新车型的引入。



图 2-1 汽车制造工厂 (总装车间、涂装车间、焊接车间、冲压车间)

自 2005 年从丰田退休以后,我一直作为旭灿纳克公司(涂装设备和系统的制造供应商)的执行董事、高级顾问以及肯塔基大学高级访问学者负责涂装领域。

我相信我在肯塔基大学的两个角色也是非常重要的:一是在 PTW 时,以我长期经验的总结,举办为期两天的短期涂装技术培训;二是支持肯塔基大学研究人员明确涂装技术的未知领域。

坦白说,我想要在书中介绍短期课程的全部内容,但是它几乎包含了 200 个图形、照片和影片,因此我和 Saito 博士决定只概述本质。

我想要特别感谢的是丰田汽车公司、旭灿纳克公司和肯塔基大学 PTW 研究机构,同时也感谢涂料供应商,尤其是关西涂料、立邦涂料、杜邦、巴斯夫、PPG 以及汽车公司,涂装协会成员如 Surcar,柏林国际汽车节和设施和设备供应商。

2.2 什么是涂装?

涂装有两个重要的作用,一是保护基体材料(如钢铁和塑料),二是改善外观质量。涂装是通过约 0.1mm 的薄膜起作用的,这与其他方法和措施相比是非常有效的。大多数顾客对颜色和喷涂质量很感兴趣。因此它对提高商品价值也很重要。我认为我对涂装的定义可以得到大多数涂装工程师的认可。

图 2-2 所示为汽车涂装车间工艺流程。第一步主要包括脱脂、磷化、电泳(电沉积和密封)。第一步的主要目的是保护基体材料免受腐蚀。第二步包括中漆和面漆,其主要目的是提高外观质量和上色。

电泳引入涂装车间已超过 50 年。我相信涂装本身具有悠久的历史,甚至几千年的历史。但是现代涂装技术,如静电喷涂、粉末涂装和电泳涂装仅仅是在大约 50 年

前才发展和建立的。虽然 50 年前我没有开始我的职业生涯，但从 1971 年我加入丰田公司以来，从事涂装工作已有 40 年。我经历了几乎所有的汽车涂料的研究、开发和推广，包括水性漆、粉末、高固体、阴极电泳涂装、喷杯和喷涂机器人以及丰田全世界汽车涂装车间的建设。因此，我可以称得上是一个涂装专家。然而，我自己也常常有一个问题，即涂装到底是什么。



图 2-2 汽车涂装车间工艺流程

Eisenmann 在柏林的介绍材料 自从 2005 年我离开丰田来到旭灿纳克，我有更多的自由时间来总结我的经验。虽然还不清楚，但我可以想象这个问题的答案了。我的回答总结如图 2-3 所示。

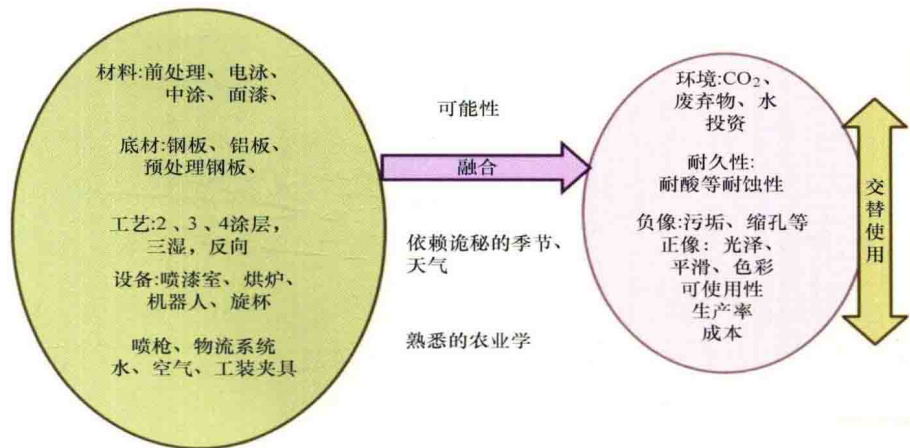


图 2-3 涂装一览

喷涂技术是一种基于概率模型的, 具有包括同时输入和输出最佳性能的技术。有两个重要的关键词, 即概率模型和集成。

1) 概率模型喷涂技术通常是基于概率模型, 而其他技术则是基于确定性模型。换句话说, 输出很少或基本没有。对于喷涂, 其条件不能设置甚至没有变化。例如, 喷涂距离取决于工件的形状。即使喷雾的条件可以进行无差异控制, 每个粒子在无数的涂料颗粒之间也会形成不同的雾化尺寸、速度和方向。因此, 我们利用统计方法了解整体喷涂的机制。在 2.3 节中, 我将向你们展示外观质量分析与统计方法。

2) Takahiro Fujimoto 教授认为, 这里有两种类型的产品结构, 即模块化和整体积分式。模块化结构的典型例子是个人计算机。个人计算机的模块组成包括 CPU、监视器、键盘、电源等。一旦这些模块之间的接口实现标准化后, 我们可以把任何模块相互整合。另一方面, 整体结构的典型例子是汽车。它是由许多模块组成的, 如发动机、底盘、车身、轮胎等。为了获得高性能, 我们必须把这些模块一个一个地整合起来。

我相信在技术和工程中也有两种类型, 即模块化和整体积分式。冲压、焊接和总装基本上属于模块化, 但涂装很典型地属于整体积分式。即使涂料供应商生产出了优质的涂料, 或设备制造商开发了一种良好的喷雾器, 如果我们没有在涂料、设备和其他物品之间进行连续的调整和整合, 也将无法获得良好的结果。对于涂装, 发展和提升每一个输入模块是很重要的, 而如何整合所有输入模块也是非常重要的。我将在 2.4 节中向你们展示一个涂装的关键模块——雾化旋杯的发展史, 并在 2.5 节中以机器人喷涂系统为例进行讲述。

2.3 用统计方法分析外表质量

对于涂装而言, 找到喷涂条件和涂料表面质量 (如颜色、光泽、表面光滑程度等) 之间的关系一直是一个关键问题。我进入丰田后的第二个任务是进行一系列的喷涂试验, 建立一个可靠的定量数据库。为了分析这个数据, 有两个困难: ①缺乏能很好控制温度和相对湿度条件的测试用喷涂间; ②喷涂技术涉及太多的参数, 测量起来是非常复杂的, 如图 2-4 所示。

1973 年, 我在丰田工作两年以后, 很幸运的是那些困难被解决了。丰田公司建成了配备大型空调机组的大型涂装实验室。我的同事也开发了一个新的多参数分析程序, 并且正在寻找他的第一个用户。

问题解决后, 我开始了分析工作。如图 2-5 所示, 我通过在同一时间改变不同的参数, 测量喷涂表面质量, 包括改变涂料流量、喷涂距离、喷涂速度和雾化程度等。受 30 个因变量的影响, 本试验条件下有超过 1000 个数据点。我可以分析各参数和喷涂表面质量之间的关系。

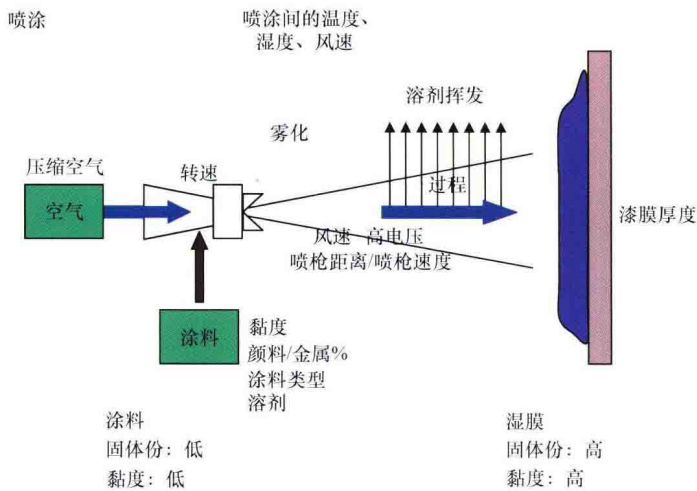


图 2-4 雾化喷涂系统示意图

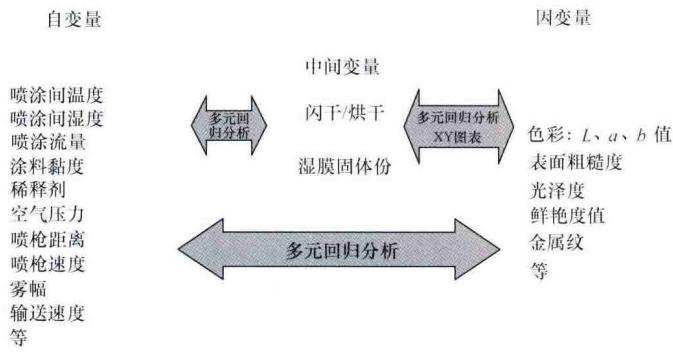


图 2-5 表面涂装的特性

然后我采用不同涂料公司生产的涂料，以及不同颜色的涂料，扩大我的喷涂表征试验。额外的数据也支持早期的相关性分析。进行一系列的试验，获得可靠的数据，建立实证的相关性差不多是一回事。但它们背后的科学推理的关系是不同的。我在第一步成功了，却在第二个过程中失败了。

为了解喷涂技术的本质和详细机理，我问自己喷涂技术到底是什么？回想喷涂过程，回顾整个试验，在我的脑海里浮现出有序、共同的喷漆过程描述：①大量的溶剂混合着低黏度涂料从喷枪喷出；②低黏度涂料从喷枪到目标表面的过程中挥发其溶剂；③雾化的涂料液滴到达目标的表面后，由于挥发了溶剂其黏度变高；④形成防止下垂的黏性薄膜。

喷涂工艺的思考帮助我认识到喷漆技术应被理解为一个短暂的过程，而不是输入和输出参数之间的关系。这个短暂的过程应包括被涂物表面的湿漆膜黏度变化和涂料

的雾化。这种新的方法,即寻找到同样问题的不同点,使我对问题的了解变得更加深入。

然而,短暂的喷涂过程是很难表征的,因为没有合适的设备去测量雾化过程和湿膜黏度。最后我想到一个办法来测量湿的涂料固体含量(涂层固含量,主要包含树脂、颜料、金属薄片)。这个方法很简单,首先我们衡量原漆中(喷涂前)的固体含量,然后测量被涂物表面的湿漆膜的固体含量。通过固体含量百分比的差异,我们应该能够计算雾化过程中丢失的溶剂量。溶剂的高损耗通常转化为更好的雾化。因此,可以通过测量固体含量的百分比之差来衡量雾化程度。此外,涂层的固体含量与湿漆膜的黏度有着——对应的关系。

以上的论述可以得到一个推论,如果我们可以测量涂层的固体含量值和薄膜的厚度,我们就可以确定颜色明度和几个喷涂表面的特点。

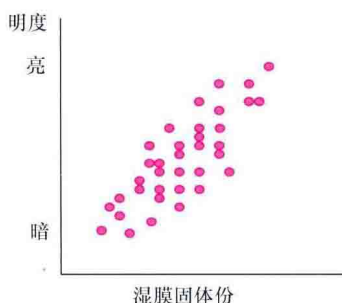
2.3.1 颜色

色彩的明度由 L 值(明度)表示,它受以下三个因素的影响,即涂料喷雾速率、喷枪的空气压力以及喷枪和被涂表面间的距离。具体而言, L 值随着如下变化而增大:喷涂流量降低、喷枪的空气压力增加、喷涂距离增加。在同一时间,我发现了湿膜固体份和 L 值之间的关系。如图 2-6 所示,不同厂家生产的不同颜色的涂料都有这一趋势。

当这种关系在丰田的一个小组会议中被提出来时,一个丰田元町工厂的涂装工程师对这种关系的准确度提出了质疑。他说他得到了一个完全不同的结果。他讲述了他的现场维护过程:随喷涂距离的增加颜色变深(即随着喷涂距离的增加降低了颜色的亮度)。

我可以得到湿膜固体份和 L 值以及喷涂参数和 L 值的关系,但是我没有找到喷涂参数变化时颜色变化的原因和机理。在那个时候,我收到了一个金属漆的新型样品,即 NAD 涂料(非水分散体涂料),并对它进行了测试。令人惊讶的是,我得到了与图 2-6 完全相反的趋势。这种新的趋势如图 2-7 所示的棕色点。这种趋势的差异是由于涂料类型的差异造成的。对此我做了额外的测试,得到了如图 2-7 所示的绿三角点以及棕色点的趋势。

(1) 非水分散体涂料(NAD) 它的主要成分包括:聚合物树脂、颜料、金属薄片、溶剂(溶剂型涂料的溶剂是有机溶剂,水性涂料的溶剂是水)和添加剂。溶



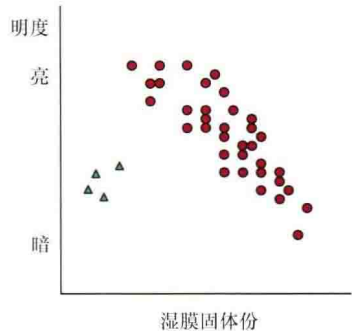
$$Y(L) = +(\text{喷涂间温度、空气压力、喷枪距离、} \\ \text{喷涂宽度、输送速度}) \\ -(\text{流量、涂料黏度})$$

图 2-6 颜色明度趋势图

剂型涂料一般指这一类型的涂料：溶型，即涂料树脂溶解在有机溶剂中。NAD 是一个划时代的技术。由于溶剂和树脂成分相似，几乎不可能将树脂分散在有机溶剂中。树脂颗粒最小化、空间位阻和使用脂肪族溶剂具有减弱溶解性的作用，并使树脂分散在溶剂中。在 20 世纪 70 年代，NAD 涂料有望减少 VOC（挥发性有机化合物）。换句话说，有机溶剂为金属漆创造了更好的应用性能。然而，在下一节中会提到，NAD 涂料因具有窄窗口而没有流行起来。

事情的波折不少，在我们试着去理解图 2-6 和图 2-7 中不一致的结果之前，我不得不说明一个测量系统怎样才能确定颜色的亮度。

图 2-8 所示为一个 20 世纪 70 年代的测量系统的示意图。有两种不同的光束以 45° 角射到涂层表面上。对上述反射光与颜色表面反射光的混合光束进行测量。图 2-9 所示为三种不同的典型案例。图 2-9a 所示为所有的金属薄片倾向于一个特定的角度。图 2-9b 所示为金属片几乎与涂层表面平行。图 2-9c 所示为所有金属片随机取向。三个箭头显示颜色的亮度：①中间的箭头表示混合的反射光束；②左侧箭头表示只有左侧光束；③右侧箭头表示只有右侧光束。图 2-6 和图 2-7 中的 L 值是通过测量混合反射光束得到的。



$$Y(L)=+(喷漆室温度、空气压力、喷枪距离、喷涂宽度、链速、涂料黏度)- (流量)$$

图 2-7 NAD 金属漆明度趋势

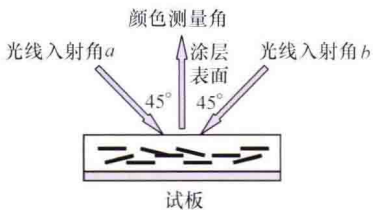


图 2-8 测量系统示意图

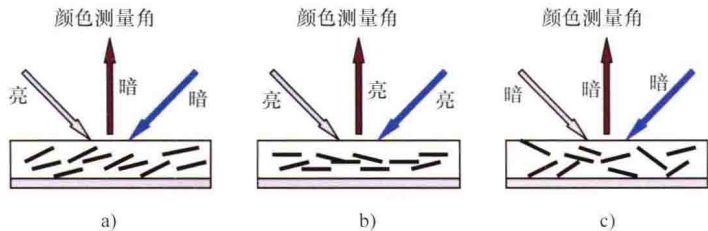


图 2-9 铝粉的排列方向

a) 平行排列，轻微对角 b) 对角线排列 c) 任意排列