



分 类 号 :

密 级 :

论文编号 :

学 号 :43120135118

重庆理工大学硕士学位论文

汽车涂装车间喷涂设备改造研究与实践

研 究 生: 胡 伟
指 导 教 师: 周 康 渠 教授
学 科 专 业: 工程硕士(车辆工程领域)
研 究 方 向: 精益制造与管理
培 养 单 位: 车辆工程学院
论文完成时间: 2014 年 10 月 5 日
论文答辩日期: 2014 年 12 月 6 日

Category Number:
Serial Number :

Level of Secrecy:
Student Number: 43120135118

Master's Dissertation of Chongqing University of Technology

Research and Practice of the Painting Device Transformation in Vehicle Manufacture

Postgraduate:	Hu Wei
Supervisor:	Prof. Zhou Kangqu
Specialty:	Vehicle Engineering
Research Direction:	Lean Production and Management
Training Unit:	Vehicle Engineering College
Thesis Deadline:	October, 2014
Oral Defense Date:	December, 2014

重庆理工大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师的指导下，独立进行研究所取得的成果。除文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果、作品。对本文的研究做出重要贡献的集体和个人，均已在文中以明确方式标明。

本人承担本声明的法律后果。

作者签名：日期： 年 月 日

学位论文使用授权声明

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权重庆理工大学可以将本学位论文的全部内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于（请在以下相应方框内打“√”）：

1. 保密□，在___年解密后适用本授权书。
2. 不保密□。

作者签名：日期： 年 月 日

导师签名：日期： 年 月 日

摘 要

汽车涂装是完成汽车“面子”的重要工艺环节，其目的除了防止金属腐蚀以外，还能起到美化汽车外观的作用。但涂装车间车身面漆喷涂会产生大量的漆渣和污水，治污成本较高，如何稳定喷涂质量、降低物料消耗以及减少污染物排放一直是汽车企业关注的焦点。各种类型喷涂器械组合及不同的雾化装置被广泛地应用在汽车喷涂工艺环节，喷涂机器人逐渐成为汽车涂装新的解决方案的关键要素。

首先分析了喷涂技术及喷涂装置的国内外研究现状，研究了各种类型的喷涂器械和雾化装置以及它们的工作原理，对国内外喷涂机器人和油漆雾化器的应用情况进行了详尽分析，并对喷涂仿形机与喷涂机器人的进行了对比研究，为后续实际工程项目决策提供了理论依据。

其次，研究了各种品牌喷涂机人的应用情况，重点研究了不同喷涂机器人应用所需要的客观条件，详细分析了机器人选型对产线前期设计、后期使用成本带来的影响。选用不同的喷涂机器人，对喷涂生产线的设计和改造方案有重要影响，并对首钢莫特曼 MOTOMA 的两款喷涂机人 EPX2900 和 EPX2700 进行了比较研究，为 LF 喷涂生产线涂装设备的改造奠定了基础。

最后，针对 LF 集团涂装车间一期工程项目喷涂仿形机工作不稳定，由此造成喷涂质量不稳定，制造成本高的实际情况，提出了采用喷涂机器人来改造喷涂设备。提高喷涂质量、施工周期短并兼顾改造成本等是涂装线设备改造要考虑的主要因素，基于此，设计并分析了几种引入喷涂机器人的备选方案。综合分析和评估后最终选用壁挂式喷涂机器人 EPX2700 和 ITW RAM303 型静电旋杯雾化器，并对喷涂机器人的重要性能指标提出了具体要求，解决了长期制约生产的“撞杯”隐患，对公司后续喷涂生产线及喷涂设备的改造、喷涂仿形器或喷涂机器人的选用具有参考作用。

关键词：涂装车间，喷涂设备，喷涂机器人选型，撞杯

Abstract

Automobile coating is an important technological link to complete the car "face", the purpose in addition to prevent metal corrosion, it still can rise to beautify the appearance of the car. But the topcoat spray painting workshop will produce a lot of waste paint slag and wastewater, high cost on the control pollution, how to stabilize the spraying quality, reduce material consumption and reducing pollutant emissions has been the focused by automobile enterprises. Various types of spray equipment and the combination of different atomizing device is widely used in automobile coating process, the spraying robot has gradually become the key elements of the new solution of automotive painting.

Firstly analyzed status at home and abroad of spray technology and spraying device, researched working principle of spraying equipment and various types of atomizing device. The application at home around the world of spraying robot and paint atomizer was analyzed. Compared and researched the spray painting robot and spray copying machine, provides a theoretical basis for the subsequent engineering project decision.

Secondly, the application of various brands of spraying robot was studied. Focus on the different objective conditions needed for spraying robot application, detailed analysis of the robot selection affect the later cost and the production line prophase design. The selection of different spraying robot has an important influence on the designing and retrofitting scheme of spraying production line. The comparative researched on the two spraying robots YASKAWA SHOUGANG EPX2900 and EPX2700, laid the foundation for the transformation of LF spraying production line of coating equipment.

Finally, according to the LF group painting shop project of first phase project, the spraying copying machine can't work well, resulted in the spraying quality not stable, caused the manufacturing high cost. So using the spraying robot to transform the spraying equipment was proposed. To improve the spraying quality, short construction period and the cost of transformation are main factors. Base on those factors, analyzed and designed several kinds of proposals of introducing alternative spraying robot. The wall hanging type spraying robot EPX2700 and ITW RAM303 type electrostatic rotary cup atomizer were selected and specific requirements for the important performance indexes of spraying robot were put forward after comprehensive analysis and assessment. This retrofitting project has solved the problem which restricts production "bump cup" and had important effect on designing of the company following spraying production line.

Key words: Spraying shop, spray equipment, the selection of spray robot, bump bell

目 录

摘 要	I
Abstract.....	II
1 绪 论	1
1.1 课题背景	1
1.2 论文的研究目的及意义	2
1.2.1 研究目的	2
1.2.2 课题研究意义.....	2
1.3 拟解决的关键问题、研究方法、技术路线	3
1.3.1 拟解决的关键问题.....	3
1.3.2 课题拟采用的验证方法.....	3
1.3.3 课题的技术路线.....	3
1.4 国内外研究现状	3
1.4.1 国内研究现状.....	3
1.4.2 国外研究现状.....	5
1.5 本文的研究思路与文章结构	5
1.6 本章小结	6
2 喷涂器械	7
2.1 喷涂器械种类简介	7
2.1.1 喷枪	7
2.1.2 自动喷涂装置.....	8
2.2 喷涂机器人	9
2.2.1 喷涂机器人分类.....	12
2.2.2 喷涂机器人结构.....	12
2.3 本章小结	15
3 油漆雾化装置	16
3.1 雾化的方式	16
3.2 静电雾化	16
3.2.2 静电雾化形式.....	17
3.2.3 旋杯式静电喷涂设备.....	18

3.3 本章小结	23
4 喷涂机器人选型	24
4.1 技术性指标	24
4.2 经济性能指标	25
4.3 影响运营成本的关键因素	25
4.3.1 喷房参数理论计算.....	25
4.3.2 举例计算不同机器人对喷漆室的影响.....	28
4.3.3 机器人安装方式对经济性的影响.....	29
4.4 关于机器人的有效工作区域讨论	30
4.5 本章小结	36
5 喷涂设备改造项目	37
5.1 项目基本情况	37
5.2 方案比较	38
5.3 改造项目系统介绍与要求	41
5.4 硬件配置	44
5.4.1 编码器	44
5.4.2 中涂高压静电自动喷涂机器人.....	44
5.4.3 面漆高压静电自动喷涂机器人.....	44
5.4.4 罩光漆高压静电自动喷涂机器人.....	45
5.4.5 离子风气吹除尘设备.....	45
5.4.6 车型识别系统.....	45
5.4.7 现场总线系统.....	45
5.4.8 控制柜	45
5.4.9 操作面板	46
5.5 项目选型确定	46
5.6 解决“撞杯”问题	48
5.7 本章小结	54
6 总结与展望	55
6.1 总结	55
6.2 未来研究展望	55
致 谢	57

参考文献	58
插图清单	60
插表清单	61

1 绪 论

汽车产业是我国成长性最好、带动性最强、影响最广的支柱产业之一。随着经济的飞速发展，汽车已经走进千家万户老百姓的家中，成为了人们生活、工作等不可分割的工具，也由此催生了一系列新生事物，如汽车艺术、汽车银行等，并更深地影响着人们的生活方式和传统观念。与此同时，汽车的结构复杂，不仅是高科技的载体，同时也是当代高科技的商业载体。随着世界范围内环保、安全和节能法规的日益严格，竞争的激烈和客户对汽车品质的不断提高，高新技术从未像今天这样被迅速而广泛地应用于汽车产品开发、试验、制造、销售等过程，本文主要针对汽车整车制造过程中车身的涂装工艺环节，对喷涂设备进行改造研究与实践。

汽车整车生产企业通常由冲压、焊接、涂装和总装四大生产工艺车间构成。前三个工艺过程完成车身的生产，最后在总装车间完成车身和零部件的装配，形成整车。冲压车间和焊接车间的分总成工序实行成批轮番生产，焊装车身合装线→涂装车间→总装车间按照流水生产线布置。

1.1 课题背景

汽车的“面子”是增加汽车产品附加值，提高产品市场竞争力，塑造企业品牌的重要方面，汽车的“面子”工程主要是依靠喷涂工艺来完成，因此各个汽车制造企业在汽车车身喷涂环节投入了大量的人力物力。

重庆 LF 乘用车公司涂装车间一期项目喷涂仿形机喷涂质量存在相对不稳定的情况，造成车身喷涂时常出现一些瑕疵，油漆用量大，设备故障率较高，同时也增加了设备的维护成本。车身漆面修补时间长，造成了公司人员需求量多，产量无法提高，运营成本上升等问题，因此如何改善喷涂质量，提高公司产量，降低运营成本成为一个迫切需要解决的问题。同时，LF 乘用车公司将在后期新上三条 15 万辆的生产线，通过本次投入喷涂机器人改造项目并总结经验，为后期生产线规划提供支持，避免不必要的损失。在现有工艺布置下，通过局部改造喷漆室以及输送结构等，利用喷涂机器人的高可靠性和高效、均匀的上漆效果降低运营成本。

近年,随着国民环保意识的提高,国家对汽车生产喷涂环节也有明确的要求,2006年颁布的 HJ/T 293-2006 中华人民共和国环境保护行业标准中对汽车制造业(喷涂)有明确的环保指标。

现代社会对环保的意识日益增强,人们把环保效果良好的涂装工厂称为“绿色工厂”,而技术陈旧的涂装工厂则被称为“褐色工厂”。无论是新建的先进的喷涂生产线还是将要改造技术落后的喷涂生产线,采用机器人喷涂生产都是十分必要的。必须确定的是无论新建生产线还是改造生产线都应该遵循合理使用资金这条非常重要的原则,因此降低喷涂生产线的资产投入是非常关键的一个要素。为了响应国家法律法规,同时适应行业未来发展,汽车制造适当超前于现行法规,使用先进喷涂设备提高车身上漆率,减少油漆浪费,降低清洁水用水量,使治污成本显著下降,节能降耗促进企业可持续发展。我们公司作为自主品牌的代表之一,理所当然的应该响应国家法律法规,并作好表率,竭力优于法规指标,为环保工作做表率。

2010 年左右,还有相当部份的合资品牌的汽车制造厂和国内自主品牌汽车厂家在汽车喷涂过程中使用各式各样的喷涂仿形机。限于旧式喷涂生产线与喷涂机器人使用存在区别,因此设备技术改造在所难免,考虑到国内在这方面的应用会比较多,如何使这种改造更可靠、更经济、更快捷,还需要行业多做总结。因此,本文将总结 LF 乘用车公司在喷涂设备技术改造过程中的经验,为本行业的汽车制造厂在技术改造中提供经验和思路,促进中国汽车制造行业的发展。

1.2 论文的研究目的及意义

1.2.1 研究目的

基于 LF 乘用车公司实际情况,根据不同喷涂机器人使用的物理条件,选定适用于现场的喷涂机器人;通过改造现有生产线的结构,以实现满足喷涂机器人的作业条件。通过精细化调试等措施,实现涂料的高利用率及物质消耗的合理化。并通过可行性分析,为公司的资金回报率及风险的评估建立理论基础。

1.2.2 课题研究意义

喷涂机器人已被广泛应用在整车制造过程,无论在环保方面、人力资源方面还是在制造成本方面,喷涂机器人的优势已注定成为汽车工业必备的生产设备。近几年工业机器人在被国家高度重视,重庆已在北碚区建立了机器人工业园,可以预期在未来五年到十年,机器人的应用将发展到一个新的高度。因此在喷涂机器人的应用方面多做研究和、积累和分享是有必要的。

本文是关于整车厂老的喷涂生产线进行的改造研究，该产线原采用自动仿形机，为了解决高速生产等问题，结合公司经营目标，经过详细分析后决定实施改造的。类似的生产线在国内也还有应用，旧的生产线改造涉及和影响因素会很多，将这些因素及问题进行分析、研究并分享解决方案，以便于国内车企共同进步，互相学习。

1.3 拟解决的关键问题、研究方法、技术路线

1.3.1 拟解决的关键问题

- (1) 研究目前使用的仿形机存在的问题，确定是否需要改造喷涂机器人。
- (2) 研究喷涂机器人的选型工作。
- (3) 解决机器人“撞杯”的问题。

1.3.2 课题拟采用的验证方法

本文将采用文献研究、理论逻辑分析、实证分析三种方法：

- (1) 文献研究：先对已有的喷涂技术及喷涂装备进行了解，对现有机器人喷涂存在的不足进行了解。
- (2) 理论逻辑分析：通过对传统的喷涂工艺的详细解读，提出每一个模式的进步与不足之处。结合力帆现场实际情况，提出了适合力帆老线现场的机器人。
- (3) 实证分析：根据现场实际喷涂机况以及市场机器人应用中实际工况，总结使用机器人喷涂的效果。

1.3.3 课题的技术路线

- (1) 研究不同喷涂机器人与静电雾化设备的工作原理和优势。
- (2) 分析新投入机器人项目和仿形机的区别。
- (3) 根据工厂设施情况完成机器人选型。
- (4) 解决设备长期存在的“撞杯问题”。

1.4 国内外研究现状

1.4.1 国内研究现状

在汽车行业中，静电喷涂由于油漆利用率高而被广泛采用。静电喷涂法是依据静电场对电荷的作用原理而设计的，阳极是接地的车身，阴极是涂料雾化器，雾化器加上负高压电，该负高压值在 7KV 到 9KV 之间，从而在接地的车身与雾化器之间形成高压静电场。当电压足够达到一定数值时，在涂料雾化器附近区域的空气将会产生强

烈的电晕放电现象，形成气体电离区域。涂料经管道流到喷嘴然后由雾化器雾化后喷出，被雾化的涂料微粒通过带电的喷嘴和旋杯边缘时接触带电，当经过气体电离区域时再次带电。在静电场力的作用下，这些带电的涂料微粒向阳极性的车身外表移动，当涂料附着在车身表面后放电，而涂料则粘附在车身表面，再利用静电环抱现象附着涂料，均匀的漆膜就这样形成^[2]。

仿形技术在汽车行业发展过程中扮演了重要的角色，对比人工罐喷与手持喷枪的作业方式来讲，喷涂效率得到了大幅提升，员工作业环境得到改善。

仿形技术是自动喷涂设备运动的关键技术，仿形喷涂机采用的仿形技术包括机械的硬仿形技术和自动的软仿形技术。仿形喷涂设备沿喷涂物品的外部轮廓完成喷涂作业，同时要求雾化器与被喷涂工件表面保持恒定的距离和角度，实际调试过程中该距离为 250mm 到 300mm 之间。在被喷涂工件匀速运动的条件下，自动仿形设备完成对被喷涂工件表面轮廓的仿形喷涂。机械仿形技术是通过安装在喷涂设备内部的仿形导轨来引导雾化器运动的，仿形导轨形状有直线形和曲线形等，形状的设计主要依据产品外形轮廓决定^[3-6]。

由于汽车工业近二十年的飞速发展，许多汽车制造厂单线日均产量已到达千台以上，机械硬仿形设备已不能满足日大批量的产量需求，所以自动软仿形技术被研发并投入使用。它主要是把工业机器人技术、硬仿形自动喷涂机技术综合，采用工控程序驱动电机等执行机构实现柔性的仿形动作，旋杯运动的轨迹通过软件进行控制，当对不同的喷涂对象喷涂时，只须调用预先设计好的程序即可。采用这种技术的喷涂机在被喷涂工件表面运动时，一般需要三个运动轴或更多轴同时运动来完成仿形。自动仿形设备能满足多车型的混线生产要求，所以在相当长一段时间内被广泛使用^[7-8]。

仿形自动喷涂机在 2000 年左右，国内有所应用，也叫门式仿形器。在重庆有汽车企业依然还有仿形自动喷涂机，比如庆铃汽车。长安江铃汽车公司在 2010 年仍然在不断优化改造门式仿形器。在乘用车领域，仿形自动喷涂机由于灵活性差逐渐被喷涂机器人取代，但由于仿形机成本相对喷涂机器人较低，所以还被广泛应用于小型客车、面包车、或者是有针对性的大型部件的喷涂，如列车车箱。

国内在仿形器的研究应用相对比较成熟，比如六轴的伺服器，甚至 7 轴，但主要硬件还是依赖于国外的技术，应用在高端商品车上的旋杯静电喷涂系统也同样还是国外的技术占主导，比如杯头和空气轴承。国内有部分集成商有专门的实验室摸索喷涂技术，也生产了一系列的产品，但在主流汽车制造中，国外的技术依然优势明显。

国内机器人主要生产厂家有：首钢莫托曼机器人有限公司（MOTOMAN）、新松机器人自动化股份有限公司、广州数控设备有限公司。其中，新松自动化股份有限公司是由中国科学院沈阳自动化所为主发起人投资组建；广州数控设备有限公司依托

20 多年的数控技术积累，公司从 2006 年启动工业机器人的研发工作，目前已经研制出具有独立知识产权的工业机器人，已实现 8 公斤搬运机器人小批量生产。

由于关于仿形机改机器人喷涂相关文献相对较少，在改造过程中出现的问题反映也比较少，因此研究本次改造过程能为这方面技术提供更多参考。

1.4.2 国外研究现状

静电旋杯喷涂技术主要掌握在国外几家公司，主要有：德国的杜尔、日本兰氏和 ABB 以及法国的 SAMES 等几家公司。国际机器人主要厂家主要有：瑞士 ABB、德国库卡（KUKA）、日本发那科（FANUC，安川（MOTOMAN）、瑞士史陶比尔（STAUBLI）、日本 OTC、松下、三菱、NACHI 不二越等。上述几家公司的产品在汽车制造市场应用相对比较广泛，静电喷涂的实际喷涂上漆率能达到 75%左右，比传统的空气喷枪节约 50%左右的油漆，比手持式静电喷枪也要节约 20%左右的涂料。目前静电旋杯主要向更加精密的方向发展，比如如何提高涂料的上漆率，如何控制漆雾成型以减少油漆的浪费等。

工业机器人由机器人手臂本体、示教器、伺服控制柜和传感检测装置构成。在国外，机器人在上世纪 60 年代就开始被应用，先后在美国、日本、德国、法国、英国被广泛投入工业制造中。由于机器人可以代替人工完成许多工作，对人力资源欠缺的日本，机器人的应用更是被企业追捧，并得到国家的积极支持。伴随着机器人的应用，企业产品质量显著提高，成本投入降低，因此机器人技术在国外已沉淀很多年。

国外机器人成套装备需要研究的方向有：

（1）工业生产线向集约化发展，多工位工艺操作被多个机器人集合在同一位置完成，在生产原材料技术提高的同时，实现高度集中，快速生产，节约成本的目的。

（2）研究工业机器人性能更稳定、更可靠、高运行速度、便捷的操作和易维修方向。

（3）工业机器人控制系统向 PC 机型控制器发展，使控制器速度更快，容易实现网络化控制与管理，模块化的插件使系统更具兼容性，同时也满足易维修的要求。

（4）利用先进的传感器和网络技术，实现机器人状态的在线检测和监控，可视化程度大幅提高，更为全面的掌控生产状态，确保产品质量，并且实现产品生产过程中的安全控制和质量控制。

1.5 本文的研究思路与文章结构

本文的研究内容主要思路主要是按以下几个步骤：

（1）通过文献阅读与资料查找，了解汽车行业喷涂技术的发展趋势。

(2) 了解喷涂机器人的发展趋势以及选型；

(3) 了解雾化装置的工作原理以及选型；

(4) 结合 LF 乘用车公司一期老生产线仿形喷涂机无法正常工作，准备使用喷涂机器人的个案进行分析并运用，并总结经验，为后期乘用车公司新的生产线时提供必要的数据库。

文章结构以分别喷涂机器人介绍、雾化装置介绍，然后介绍喷涂机器人的选型以及本文项目实施情况作介绍。

1.6 本章小结

本章介绍了喷涂机器人和雾化器在国内外的研究情况，同时介绍了本文拟解决的关键问题、研究方法、技术路线等。

2 喷涂器械

在整车制造中，根据车身品质要求和环保要求，喷涂系统主要包括：喷房、送排风系统、水循环系统、输调漆系统、车身输送系统、喷漆设备系统。喷涂设备由两部分组成，一是喷涂器械，二是油漆雾化装置。本章将介绍喷涂器械相关内容，关于油漆雾化装置将在第3章介绍。

2.1 喷涂器械种类简介

2.1.1 喷枪

喷枪是常用的简易的喷涂工具，由于其简单、方便、环境条件需求不高而被广泛的应用在各种喷涂作业中。

喷枪主要有空气雾化喷枪和高压无空气喷枪两类，空气雾化喷枪按涂料供给方式分为重力式、吸上式和压送式三种。高压无空气喷枪由高压泵供给涂料，有电动和气动两种类型。图2.1是一种空气雾化喷枪。

空气雾化喷枪利用压缩空气雾化涂料，由枪体、喷涂喷嘴、空气罩、漆雾形状调节装置、喷出量调节装置、压缩空气接头和扳机开关等部件构成。

高压无空气喷枪利用涂料压力骤降雾化涂料，由喷嘴、枪体、漆雾形状调节装置、涂料接头、扳机开关等部件构成。图2.2是一种高压无空气喷枪。



图 2.1 空气雾化喷枪



图 2.2 高压无空气喷枪

2.1.2 自动喷涂装置

自动喷涂装置适用于大批量生产场合，替代工人完成喷涂作业工作。常用的自动喷涂装置有四种类型：固定式自动喷涂机、往复式自动喷涂机、多功能仿形自动喷涂机、喷涂机器人^[5]。

固定式自动喷涂机的喷枪固定在支架上对工件喷涂，可以喷涂平面，也可喷涂立面，涂料连续自动供给，可以根据有无工件通过自动控制喷枪开关。

往复式自动喷涂机的喷枪固定在往复机上，作往复运动，实现宽幅面喷涂。根据安装及喷涂位置不同，往复式自动机分成顶喷机和侧喷机两部分。

（1）顶喷机 能使喷枪作水平直线往复运动，并能使喷枪与水平被涂面距离保持一定，作阶梯式升降运动。顶喷机由往复运动机构、升降机构、导柱及机体等部分组成。

（2）侧喷机 能使喷枪与被涂物件的侧面保持一定距离而作曲线往复运动。其结构原理与顶喷机基本相似，只是喷枪的运动方向不同。

（3）多功能仿形自动喷涂机 在普通喷涂机往复、升降的基础上，增加了使喷枪枪体旋转及纵向水平移动的功能，可根据工件外形，任意改变喷漆角度及喷漆距离从而能实现对工件顶部平面及前后围立面的仿形喷涂。图 2.3 是一种多功能仿形自动喷涂机。喷涂机器人采用的是工业机械手操纵喷枪，模拟人手动动作，实现对负责工件的喷涂。

喷涂机器人采用工业机械手操纵喷枪，模拟人的手臂动作，实现对负责工件的喷涂。喷涂机器人将在下一节做详细介绍。

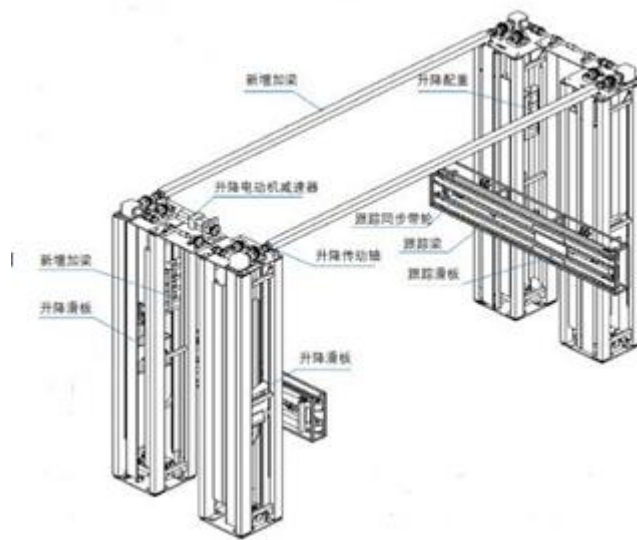


图 2.3 多功能仿形自动喷涂机

2.2 喷涂机器人

喷涂机器人是可进行自动喷漆的工业机器人。喷漆机器人主要由机器人本体、机器人伺服系统、示教器和换色系统、流量控制泵、高压控制系统、转速控制系统以及雾化装置组成^[9-10]。喷涂机器人有着丰富、复杂的控制系统、信号采集系统以及精密的执行机构。喷涂机器人多采用关节式结构，一般为5或6自由度关节，手臂根据不同设计和不同应用环境可以变化运动空间，同时喷涂机器人可以做复杂的轨迹运动。喷漆机器人一般采用防爆电机驱动，具有动作速度快、防爆性能好等特点，通过自身配备的示教器完成机器人手臂动作和轨迹的设定。喷漆机器人广泛用于汽车、仪表、电器、搪瓷等制造业，随着人力资源成本和质量控制的高标准要求，机器人的应用将更为广泛的应用到各个行业中。如图2.4是一种汽车涂装生产线中的喷涂机器人。

喷涂机器人一方面指机器人本体，因为喷涂机器人与其它机器人的重要区别在于防爆特性，由于喷涂的油漆中各种溶剂，极易引起火灾甚至爆炸，所以机器人的设计必须符合防爆要求；另一方面喷涂机器人时常又被指为机器人本体和油漆换色系统、流量控制系统、雾化系统等部件的总称。在实际应用中，我们对喷涂机器人的理解更多的是后者。为了避免混淆，本文喷涂机器人指机器人本体及其附属部件，如控制柜。本文将喷涂机器人与油漆雾化装置、换色系统、转速控制系统、高压控制系统等的集合称为喷涂设备。

喷涂机器人的应用，解决了喷涂质量由于人的因素而引起的质量不稳定，同时雾化器的使用使漆膜更为均匀，喷涂作业的上漆率被显著提升，将人从喷漆室里解放出来不与油漆接触，改善了员工的作业环境，降低的油漆消耗量，提高了产品质量。



图 2.4 喷涂机器人

喷涂机器人在使用过程中具有以下一些优点：

- (1) 工作灵活，根据需求设定轨迹，满足产品多样性的连续生产。
- (2) 适应性强，稳定性高，机器人本体平均无故障时间达到 10 年。
- (3) 提高车身漆膜质量和油漆使用效率，避免人工喷涂的随意性。
- (4) 易于操作和维护。可以在线或离线编程，适应现场的能力强，大大的缩短现场调试时间。
- (5) 设备利用效率高。喷涂机器人的利用效率可达 95%。
- (6) 节约油漆，减少废弃物处理成本，满足环保要求。

为了提高喷涂作业的灵活性和高效率，用机器人来代替喷涂机械在上世纪 90 年代就在尝试，并逐步实现使用机器人进行车体内部表面和外部表面的喷涂作业。采用机器人喷涂有突出的优点：在喷枪作业的传统生产模式中可以减少大约五分之二喷枪数量，同时提高了喷枪运动的速度。现代汽车工业制造中，为了抢占市场份额，各汽车制造厂不断开发新产品，平均每年 5 到 10 个车型。这也对生产线的适应能力提出了更高要求，采用机器人喷涂，利用可兼容数十种车型的轨迹程序的存储和调用，以适应这种频繁变化的生产需求。

机器人的作用是带着雾化装置按照事先示教好的轨迹完成喷涂作业，在喷涂过程中，雾化器与喷涂件表面保持在预先设定的角度、距离和速度^[11-13]。为了实现喷涂作业的精细化，根据车身各个位置的平面或曲面的形状不同有针对性设定喷涂流量、高压值、转速，有效的保证质量，减少浪费。为了实现这个目标，调试工程师可以采用的三维数模软件对喷涂对象模拟喷涂。三维软件能自动生成适宜喷涂轨迹，工程师一般只需要对生成的喷枪移动轨径和喷涂参数作微调，完成调试后保存示教程序。当

喷涂机器人设置为自动工作状态后，机器人会按编写好的程序完成相应动作。在实际的工业应用中，只有面对复杂的、喷涂要求精确的喷涂过程才需要使用三维软件处理，一般情况下，由机器人工程师在现场调试过程中就可以手动示教喷涂机器人的运行轨迹，然后保存程序。因此轨迹设定是非常方便的。

喷涂机器人根据不同的喷房尺寸，生产工艺，生产速度等的客观条件，有针对性的开发了各种安装连接形式的喷涂机器人。机器人能以固定的水平安装在喷房内工作，也能垂直安装在喷房墙壁上完成工作。机器人水平安装在喷房内，我们称为落地式喷涂机器人。喷涂机器人垂直安装在喷房墙壁上，俗称“壁挂式机器人”，也可以固定在靠近天花板的位置，我们常称为倒装式机器人，甚至可以安装在可移动的滑轨上实现机器人可移动的滑轨机器人。

机器人工作臂的运动方式可以选择装配成六或七轴^[14]，有时也可以根据需求选择装配为双轴的。双轴的机器人配合高速旋转的喷枪，它的灵活性没有六轴机器人好，但针对固定的喷涂面来讲，使用双轴机器人则可以节约大笔资金。

滑轨机器人安装在可移动的轨道上，以便能够更为自由的接近喷涂体的表面，提高机器人对喷涂室的适应能力，降低运营费用^[15]。在旧的整车喷涂生产线改造中，利用滑轨机器人取代旧的喷涂设备，可以基本保持喷涂室不作调整。此方法可以降低改造成本，又能缩短工期，如果产线节拍要求不是太高的情况下选择滑轨机器人颇有效益。在内表面喷涂室中，不同机器人的轨道可以上下平行安装，合理示教使两台机器人不发生干涉，可以有效节约整车的喷涂时间^[16]。这种方案可以使喷涂室缩短 1~2m，达到降低运营成本的目的。图 2.5 是发那科机器人的实例应用。关于不同机器人在实际应用中经营成本的影响，本文将在第 4 章作详细介绍。



图 2.5 滑轨机器人实例

2.2.1 喷涂机器人分类

喷涂机器人的应用解决了喷涂质量由于人的因素而引起的质量不稳定,同时雾化器的使用使漆膜更为均匀,喷涂作业的上漆率被显著提升,将人从喷漆室里解放出来不与油漆接触,改善了员工的作业环境,降低的油漆消耗量,提高了产品质量,减少废油漆和废溶剂的排放。

在企业中使用的喷涂机器人大致可分为以下几类:

(1) 按是否具有沿着车身输送链运行方向水平移动的功能分为:滑轨喷涂机器人和固定安装式机器人。

(2) 按安装位置的不同分为:落地式喷涂机器人和悬臂式喷涂机器人。落地式机器人具有负载重,由于体积大所以手臂内可以容纳更多部件,易于维护清洁的优点。而悬臂式机器人可以悬于墙体侧面以及喷房顶部,因此悬挂式机器人更具灵活性,同时可以减少喷房宽度尺寸,达到节能降耗的作用^[17]。

2.2.2 喷涂机器人结构

喷涂机器人在各个整车生产厂的存在形式大体是一致的,根据生产的需要会有外形的不同、负载能力的不同和关节数量不同等区别。喷涂机器人的结构主要是由机器人主体、机器人控制系统、机器人示教器以及操作控制台等四部份组成。

图 2.6 是 FANUC 的一款喷涂机器人的结构示意图。



机器人主体即机器人底座、臂部份、腕部份和油漆雾装置组成, 机器人臂部和腕部关节由伺服电机通过特殊减速器实现机械齿轮的确连接, 减速器一般为轮系(齿轮传动链)和RV(旋转向量)两种。大多数喷涂机器人有3~6个运动自由度, 图2.7为机器人各关节示意图。对于滑轨式喷涂机器人, 一般将机器人本体利用滑块的形式在轨道上的水平方向实现喷涂机器人的移动, 这条轨道实际上成为了机器人的扩展轴, 我们称它为第7轴, 使用第七轴的机器人应用参见图2.5。

13

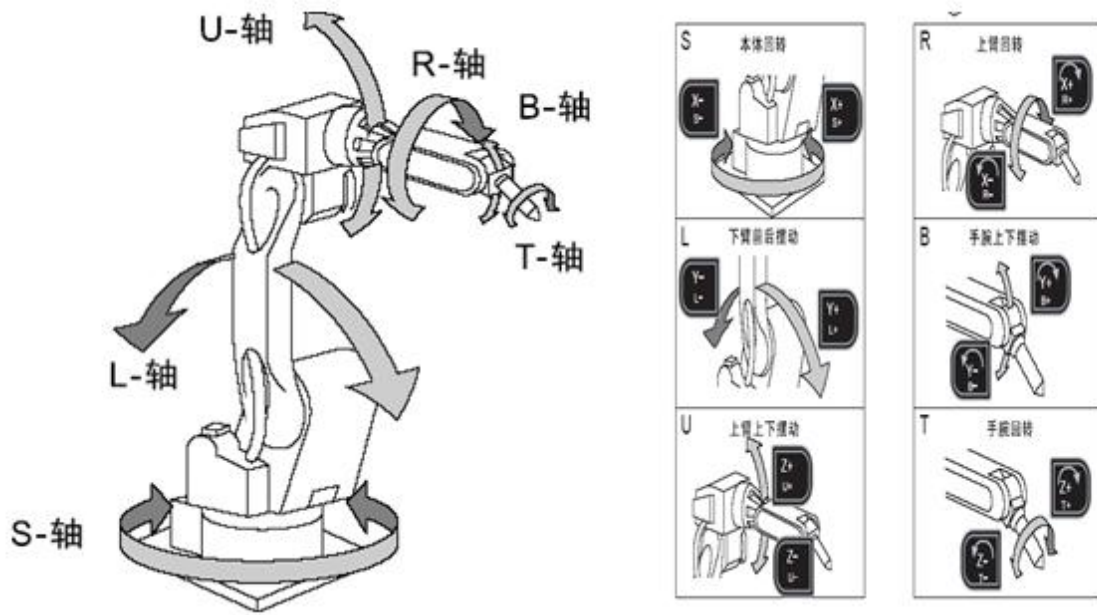


图 2.6 机器人关节示意图

(2) 机器人控制系统

每一台机器人设备都可以独立地动作，而机器人控制器就是按照输入的程序对驱动系统和执行机构发出指令信号，控制单台机器人设备运动轨迹的装置。控制器内的主要部件为与机器人手臂内的伺服电机连接的伺服放大器及控制模块，不同型号的机器人配备不同内存的控制单元，控制单元内存储有用户自定义数据及程序。控制单元将程序数据转换成伺服驱动信号给伺服放大器，伺服放大器启动伺服电机来控制机器人的运动。一般一台控制器独立控制一台机器人，随着技术的发展和低成本化的进程，目前市场上已出现一台控制器同时控制两台机器人运动的设备。

(3) 机器人示教器

机器人示教器的作用是手动操作机器人的功能，并在手动操作机器人的过程中实现轨迹的记录，完成程序编写工作。工程师根据需要编写程序，实现机器人的运动控制和机器人与其它设备数据交换的程序编写等。示教器由一根电缆与机器人控制器内的 CPU 连接。

(4) 系统操作控制台

系统操作控制台的主要功能是集成整个喷房硬件，实现系统自动化。柜内安装有一个可编程逻辑控制器 PLC 或 PC，与喷涂机器人相关的设备与机器人的数据交互将通过系统操作控制台实现其它关联设备与喷涂机器人的通讯，通讯方式一般是通过 I/O 模块、工业网络或 INTERNET 网实现 PLC 或 PC 通讯与关联设备的通讯。系统操作控制台一般会配置触摸屏或 PC 电脑，操作人能通过人机界面方便快捷的知悉设备的使用情况^[18-21]。

2.3 本章小结

本章介绍了不同种类的喷涂器械，着重阐述了不同种类的喷涂机器人的优缺点以及实际应用，同时对喷涂机器各组成部分功能作了说明。通过本章我们可以为喷涂机器人选型提供理论基础。

3 油漆雾化装置

喷漆的主要目的是防腐和美观。整车喷涂是将涂料雾化后并辅以动力将涂料喷涂在车身表面上，形成一层均匀的漆膜的方法。常见的喷涂方法有空气喷涂和高压无空气喷涂两种。涂料雾化有静电雾化、空气雾化、高压无气雾化、旋杯雾化和旋盘雾化五种形式^[22]。雾化形成对工件表面涂膜质量有较大的影响。

3.1 雾化的方式

喷漆过程中的雾化过程主要有空气雾化、高压无气雾化、旋杯雾化、旋盘雾化以及静电雾化五种方式。以下简要介绍各雾化方式的工作原理：

(1) 空气雾化 当压缩空气以 0.6MPa 的压力并以很高的流速从枪口喷出时，使喷嘴四周形成局部真空，当涂料被吸入这一真空区域时，被高速气流雾化，喷向工件表面。

(2) 高压无气雾化 高压无气雾化是用气动高压柱塞泵将涂料增压，高压涂料从喷枪的喷嘴喷出，瞬间降压并剧烈膨胀雾化成极细微粒，喷向工件表面。气动泵的传动比率通常为 10~28:1。涂料的出口压力可达 6.6~16.8MPa。高压无气雾化比空气雾化具有更好的雾化效果及沉积率^[5]。

(3) 旋杯雾化 旋杯雾化是利用装于喷枪头部高速旋转的旋杯所产生的离心力把涂料雾化的。旋杯的转速常为 3000~40000r/min^[14]。

(4) 旋盘雾化 平面式旋盘的形状有盘形、蝶形二类。它是通过高速旋转的旋盘所产生的离心力，将涂料甩出并雾化成细小的微粒。

(5) 静电雾化 静电雾化是利用直流高压静电场的作用，使带有电荷的涂料微粒沉积在工件表面而形成涂膜。

由于静电雾化具有漆雾附着高的优点，所以在工厂涂装车间中的应用较广泛，以下重点介绍静电雾化的工作原理和主要工作形式。

3.2 静电雾化

静电雾化喷涂工艺不仅能显著提高产品的表面涂装质量，还能有效提高生产效率、易于实现喷涂自动化，高效利用涂料，减少污染，改善操作人员工作环境。

3.2.1 静电雾化原理

静电喷涂的原理是工作时静电喷涂的喷枪或喷盘、喷杯部分接负极，工件接正极并接地，在高压静电发生器的高电压作用下，喷枪（或喷盘、喷杯）的端部与工件之间就形成一个静电场^[23]。

由于涂料主要是由树脂、颜料、溶剂、添加剂等物质组成，而占主体成分的树脂和颜料多为不导电的物质，所以让涂料带电主要是由溶剂和各类添加剂等物质来完成。

涂料在被喷嘴雾化后喷出前，雾化的涂料微粒在通过枪口的电极针或喷盘、喷杯的边缘时因接触而带电，当经过电晕放电所产生的气体电离区时再次带电。这些带负电荷的涂料微粒在静电场作用下，向正极性待喷涂工件的表面运动，并被沉积在工件表面上形成均匀的涂膜^[24-27]。随着喷枪上的电压升高，电场的裂化作用越强，静电雾化效果也越好，但手持喷枪的高压一般为 6KV 以下，而静电旋杯雾化器则在 7KV 到 9KV 之间，当电压再升高时，油漆附着效果将不会有显著变化，反正增加了由于电电流过大而产生火花的危险情况。

3.2.2 静电雾化形式

一般静电喷涂设备都具有两种以上雾化形式，大都是以机械雾化为主、静电雾化为辅的全面雾化形式^[28]。

静电雾化在工厂中广泛被运用，是由于其具有以下几个优点：

（1）涂膜均匀，附着力良好，涂料颗粒细小，沉积效率高，产品质量稳定。喷出的漆雾体积大，其密度仅为空气喷涂的几十分之一；

（2）生产效率高，可靠性高，可实现多台同时喷涂，易于提高自动化程度，与压缩空气喷涂相比，生产力可提高 3 倍以上；

（3）提高了涂料利用率，涂料材料利用率可达 80%~90%，减少漆雾飞散和污染，降低了对漆雾过滤装置的要求，并改善了劳动卫生条件^[29]。

当然，静电喷涂并不是万能的，在工作中静电喷涂也有一些不足需要改进：

（1）对于形状复杂的工件，在凹凸处的漆膜会不太均匀，容易产生质量瑕疵，这需要人工进行修整。

（2）静电喷涂维护管理要求格，操作不当或管理不善容易发生电击，高压击穿放电，甚至造成火警事故^[30]；

（3）静电喷涂对环境条件如温度、湿度和清洁度的要求比一般喷涂方法要高。温度和湿度的变化要保持在一定范围内，否则易使涂层厚度、平滑度、光泽、颜色等变得不均匀。另外，因静电场的作用，涂层易吸尘埃，从而对工作环境有一定的清洁度要求。

在大型整车制造厂的连续型生产过程中，静电喷涂设备使用非常广泛。手提式静电喷涂枪是人工喷涂时常采用的喷涂设备，自动喷涂时经常采用旋杯式静电喷涂设备。

3.2.3 旋杯式静电喷涂设备

静电喷涂由表面质量比较好，节约油漆和附着力强等优点而被广泛应用于工业制作中。一般在喷枪上装好电极，发射负电子，让工件接地作为正极，静电高压为 8kV 左右，应用于电阻率为 1 兆欧到 100 兆欧的油漆，常用的设备有手动静电喷枪、自动静电喷枪和旋杯、旋碟^[31-33]。如图 3.1 是旋碟喷涂示意图，图 3.2 是旋杯喷涂示意图。

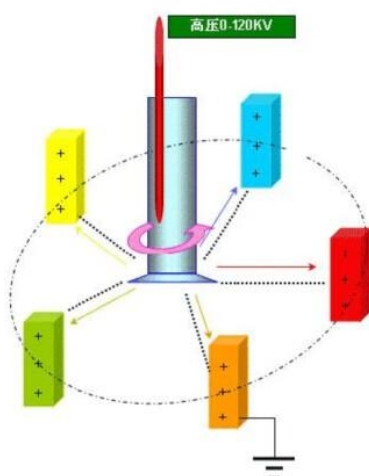


图 3.1 旋碟喷涂示意图

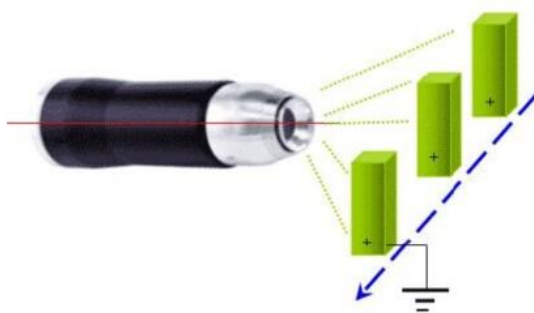


图 3.2 旋杯喷涂示意图

旋杯和旋碟的只是喷涂放置方式不一样。旋杯实际上是旋碟水平放置的一种形式。它们两者的区别主要在于旋杯雾化更加省漆，效率相对更高。旋杯常用于汽车喷涂，使用更灵活，使用范围更广^[34]。

静电旋杯系统的主要部件包括：自动控制单元、换色单元、流量控制单元、高压单元、成形空气单元、高速旋杯雾化器等六个部件^[35]。下面对这六个主要部件做简要介绍：

(1) 自动控制单元主要作用是控制旋杯系统，以实现喷涂工艺符合车身质量要求，比如，颜色的切换，高压值设值，旋杯转速的控制以及油漆流量的控制。

(2) 换色单元。油漆从调漆系统获得动力后，经过管道首先进入喷涂系统的换色单元。更换换色单元的主要作用就是实现不同颜色油漆的调用。换色单元由多组换色阀组成，每个换色阀为三通结构，由压缩空气驱动。生产时不需使用的阀组由换色阀的常开通道实现循环，以避免油漆沉淀。当需要调用某种颜色油漆时，控制系统发出控制信号使换色阀打开，则该组换色阀的油漆进入喷涂系统的管道。图 3.3 是 ABBB 的一种换色阀组^[36]。

换色阀多采用模块式结构，装置在机手臂内靠近旋杯处，可方便的进行更换，扩展和拆除。换色阀的结构以及数量可根据实际需要进行配置。换色阀的工作状可显示在人机接口上，实现手动和自动的控制^[37]。手动控制状态时，操作人员可以在控制柜上人工独立开户各阀，自动控制过程中，各换色阀、溶济阀和静电高压有连锁，防止混色及危险操作。



图 3.3 换色阀

(3) 流量控制单元。流量控制单元直接和车身油漆膜厚关系紧密，流量控制单元主要由防爆电机、齿轮定量泵、电机控制器组成^[38]。一般情况下产用闭环控制，齿轮泵每旋转一圈泵出的油漆量是确定的，并以此实现油漆流量可控。防爆电机为齿轮泵提供动力并反馈泵的实际旋转圈数给电机控制器。电机控制器根据预先设定的需要流量值与电机反馈的实际数相比较，并做出控制响应，使最终泵出的流量与设定值相符。

齿轮定量泵在喷涂作业中一般选用快速清洗流量泵，并设计有快速旁通清洗阀，齿轮泵的定量精度可以达到 $\pm 2\%$ ，完成一次清洗工作可以控制在 12 秒内。齿轮定量泵可以通过人机界面实现对流量的改变。

(4) 高压单元是实现静电高压的关键部件。它主要由高压控制器和高压线圈组成。高压控制器一般放在自动控制单元内，高压线圈一般置于雾化器内部。高压静电分直接加压和间接加压，直接加压的电极即为旋杯。外置式是高压线圈产生高压后由导体将高压引至雾化器外部释放静电场。图 3.4 为 SAMES 品牌的 PPH707 直接加压型雾化器，图 3.5 为 PPH 707EXT 外加压型雾化器。每一个机器人旋杯配有一个高压发生器和高压控制器，可提供不低于 10kV 的电压。高压控制器本身具有电源指示灯，高压开启指示灯和故障报警指示灯。同时，高压控制器智能的显示电流、电压以及各种故障内容。高压控制器可以本地人工控制和远程自动控制。正常工作时由控制系统远程控制，可以通过人机口设置参数^[39]。



图 3.4 PPH 707



图 3.5 PPH 707 EXT

(5) 成形空气单元。成形空气单元主要由一个比例阀控制。根据用户需求设定值产生一个连续的电信号控制阀门的开度以实现压缩空气的流量控制，主要目的是调整漆雾的幅度，并将经雾化器产生的漆雾以一定形状推向被车身表面，防止漆雾飞散和返流，提高油漆利用率，防止漆雾返流污染旋杯和喷枪。成形空气压力增大则喷幅减小，喷涂区域变窄，成型空气压力变小则喷幅变宽^[40]。ITW Ransburg 品牌下的 RMA303 雾化器设计了两层成型空气，成型空气的位置如图 3.6。

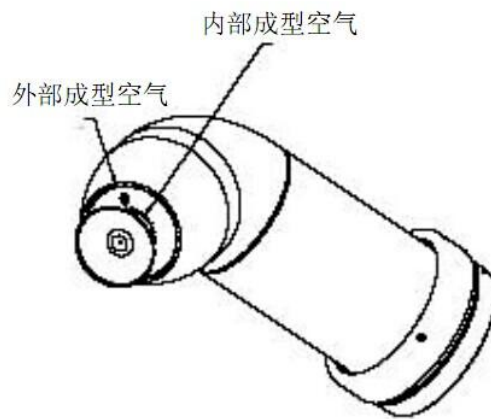


图 3.6 成型空气的位置

(6) 高速旋杯雾化器利用旋杯高速旋转在离心力的作用下使油漆分散形成雾状。它主要由旋杯、空气马达和以及速度控制系统组成。速度控制系统（控制器）采用闭环控制，它是由速度检测，速度 PID 控制以及一个空气压力调节器和一个流量增益器的执行机构^[41]。SAMES 系列常采用麦克风通过频率/电压的方式检测空气马达的转速，而 ITW Ransburg 系列常用光纤实现频率/电压的方式检测速度。控制器比较设定值与实际值后对应控制执行结构实现控制旋杯转速的目的。旋杯的转速精度可实现每分钟 500 转控制。图 3.7 是 SAMES 系列速度控制原理图。

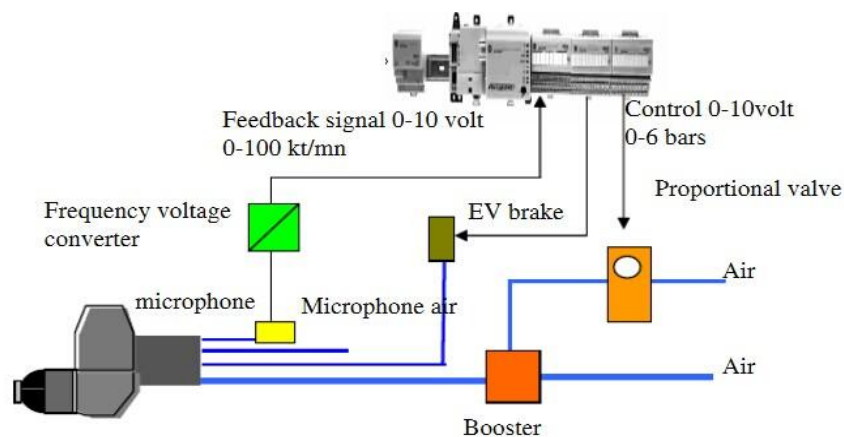


图 3.7 SAMES 系列速度控制原理图

各个品牌的静电旋杯系统的结构大致相当，只是在具体环节上的专注度不同。图 3.8 是 ITW 雾化器在实际应用中的控制示意图。

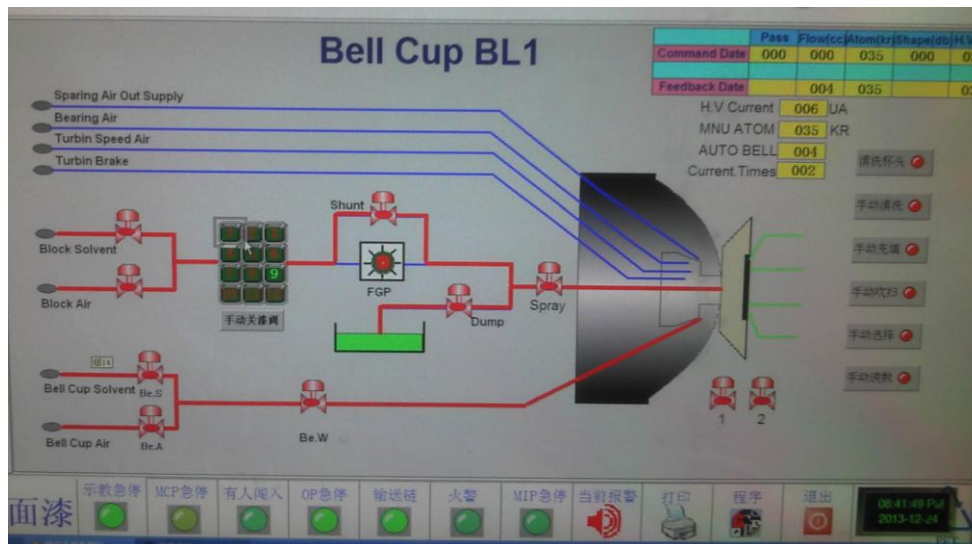


图 3.8 ITW 雾化器实例示意图

我们将机器人主体及控制柜与喷涂系统结合，将喷涂系统管路布置到机器人臂内，以实现油漆从室外到旋杯。通过工业控制网络（如 PLC 控制器）将喷涂系统、喷涂机器人、车身输送系统、安全控制系统有机的组合起来，就形成了生产线上的喷涂系统，这就完整的实现了喷涂作业硬件组合，然后通过技术人员编制根据生产实际需要设计喷涂程序，对机器人进行示教，再根据产品质量工艺要求调试旋杯的转速，静电高压，油漆流量等，这样生产作业中真正意义上的喷涂机器人就能工作了。如图 3.9 喷涂机器人配置示意图所示。

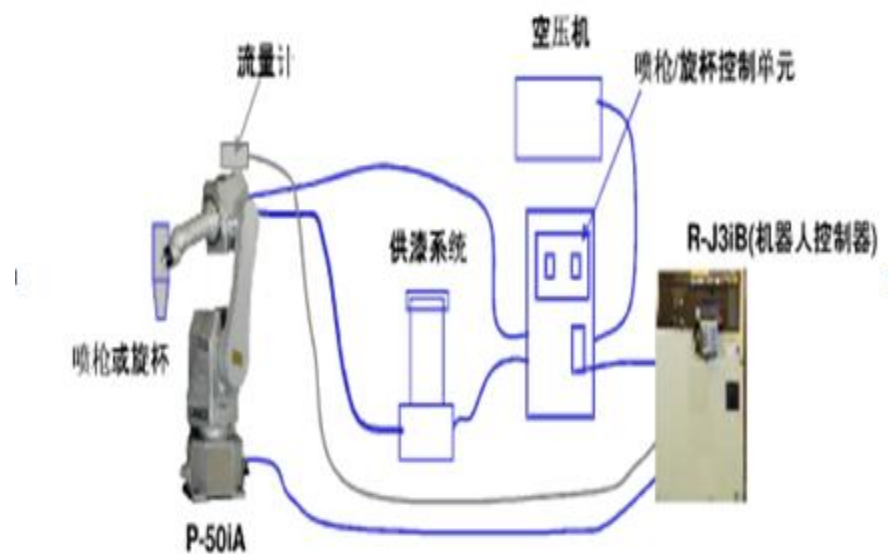


图 3.9 喷涂机器人配置示意图

3.3 本章小结

本章介绍了不同的雾化装置的特点,并着重介绍了被广泛应用在喷涂领域的静电雾化。为了更好的提高油漆上漆率,实际应用中通常将旋杯雾化与静电雾化结合使用,本章中详细讲述了静电旋杯雾化器的结构和原理。

4 喷涂机器人选型

技术的可行性、经济性的投资回报以及人的因素是应用机器人的主要考虑因素。技术可行性主要包括：喷涂机器人性能要求、机器人布局要求、设备的可扩展性。经济性能主要包括人力成本、物料消耗、生产效率、能源利用、设备维护成本等因素^[29]。

4.1 技术性指标

应用机器人选择时技术性指标（性能要求、布局要求和设备的可扩展性）主要是指以下几方面具体考虑因素。

性能要求。机器人性能要求主要有：机器人运行速度、喷涂精度、有效喷涂区、负荷情况、安装方式、满足安全生产要求以及机器人故障平均无故障时间等。

表 4.1 机器人参数举例

用途	喷涂	
机器人名称 (MOTOMAN-)	EXP2700	EXP2900
安装* 1	壁挂式	落地式
自由度	6	6
负载	15kg	20kg
垂直伸长度	5147mm	4410mm
水平伸长度	2700mm	2900mm
重复定位精度* 2	±0.15mm	±0.5mm
本体重量	590kg	1030kg
电源容量* 3	5.0KVA	5.0KVA
平均无故障时间	10 年	
操作界面	中文\英文	

布局要求。布局要求主要包括：喷涂区域的几何形状，应用区域的环境因素、对喷涂对象的覆盖情况，地基负荷的能力等方面。

设备的可扩展性。设备的可扩展性主要包括：适应多车型喷涂作业，便捷的调试操作，集成、模块化的结构，具备自诊断、智能化能力等方面^[30]。

4.2 经济性能指标

在经济性方面要考虑包括人力、物料、生产效率、能源利用、设备维护成本等因素^[31]。

(1) 人力成本。在考虑人力成本时主要是考虑投入机器人后，是否可以降低岗位人员的劳动强度，是否可以改善人员工作环境，是否可以减少直接岗位人员和后续岗位人员的配置。

(2) 物料消耗。物料消耗的评估主要是考虑喷涂机器人投入后是否可以直接和间接的降低物料的使用，提高油漆的上漆率，降低单台车身油漆使用量，减少后续岗位修补的物料消耗。

(3) 生产效率。生产效率这一因素主要考察机器人的投入是否具有能提高产品的质量，使产品一致性更稳定，减少不必要的修补时间，性使质量瑕疵减少，提高生产节拍等作用。

(4) 能源利用。能源利用是指在满足产品质量需求和经济性主体指标的情况下，减少对能源的需求和对能源稳定性的要求，以减少前期能源设施投入和后期设备应用的能源消耗，除了直接的能源消耗外，还要考虑选定机器人后附带设施的能源消耗^[32]。如：是否对电源质量、压缩空气质量等要求更为严格后产生的能源消耗。

(5) 设备维护成本。机器人作为生产上处于重要、关键的环节，因此平均无故障时（MTBF）就显得非常重要。

(6) 设备制造厂商服务质量。在现在人们要求服务质量越来越高的时代，哪个设备制造厂家能提供快捷、经济、有效的服务必然受到主机厂的欢迎。好的服务质量能让主机厂更为有效的使用设备，提高设备使用效率。

4.3 影响运营成本的关键因素

本文着重讨论重庆 LF 乘用车公司喷涂线机器人改造过程中选择机器人考虑的几个因素。

4.3.1 喷房参数理论计算

由于本案例是老线改造，因此喷涂室的结构已经确定.选择适合产线现场的机器人，减少对基础设施的改造，降低投入成本是本次改造的关键。

机器人的安装方式有落地式、壁挂式、倒挂式，倒挂式机器人是壁挂式机器人的另一种变形。不同的方式对喷涂室的宽度尺寸要求不同，而且关系到喷涂产线的生产节拍，产线的节拍要求越快，则在同等数量机器人的情况下，喷漆室的长就需要相应变长，因此喷涂机器人的喷涂速度又直接影响到喷涂室的长度。喷漆室的长度和宽度的变化直接影响喷涂室的表面积。

下面将着重阐述喷涂室表面积不同的影响结果及其与机器人选型之间的关系。



图 4.1 壁挂式机器人和落地式机器人

在整车制造厂中，涂装车间喷涂室的设计一般采用上部送风和底部抽风的方式，漆雾捕捉用文氏或水旋过滤器。喷漆室的设计包括喷涂室的尺寸计算、空调送风量的计算、加热加湿装置的计算、排风量的计算等。其中喷漆室的尺寸决定了送风量、排风量以及加热加湿装置的计算。通过式喷漆室的尺寸计算可以按以下方式计算^[5]：

喷涂室的长度 L ：

$$L = (l_1 + \frac{S\tau v}{n})N + 2l_2 + Tv \quad (4-1)$$

式中：

L ：表示通过式喷涂室的长度（mm）；

l_1 ：表示所采用的自动喷涂机作业的空间长度尺寸（mm），一般固定式喷涂机取 $l_1=2000\sim3000\text{mm}$ ；机械手及移动式喷涂机取 $l_1=l+2000\sim3000\text{mm}$ ， l 为喷枪在喷漆室长度方向上的行程(mm)^[5]；

S ：表示工件的手工喷涂面积；

τ ：表示手工喷涂 1m^2 工件表面积所需要的时间（min/m²），一般取 $\tau=1\sim1.5$ （min/m²）；

v ：表示输送机的移动速度（mm/min）；

l_2 ：表示工件至出入口的距离（mm），对车身喷涂一般取 $l_2=1500\sim 2000\text{mm}$ 。

n ：表示同一工件上操作工人的密度；

N ：表示在同一喷漆室内喷涂涂层遍数。

T ：油漆流平时间

在汽车整车生产中，静电喷涂工艺被广泛应用于喷涂过程中，喷涂机器人也广泛与静电喷涂结合使用。因此本文特别指出的采用静电喷涂设备时，喷漆室的长度和宽度计算上有些差异，这里介绍一种经验计算喷漆室长度 L 和宽度的公式 W ：

喷漆室长度公式：

$$L = l_1(n-1) + 2l_2 + Tv \quad (4-2)$$

式中：

L ：表示喷涂室的长度（mm）；

l_1 ：各静电喷枪在长度方向上投影的距离（mm）。当静电喷枪布置在输送机两侧时 l_1 可以取值 400~500；当布置在同一侧时按旋杯直径不同而取 l_1 为 800~1200；

l_2 ：静电喷枪与室体两端的距离（mm），一般取 1500 到 2000；

n ：静电喷枪数量，根据工件外型尺寸布置确定，喷枪之间的距离最好不小于 800mm。

T ：油漆流平时间。

v ：输送机的移动速度。

静电喷涂室体宽度可按下述经验公式计算室体宽度 W ：

喷漆室宽度计算公式：

$$W = w + 2w_1 + 2w_2 + 2w_3 \quad (4-3)$$

式中：

W ：喷漆室的宽度；

w ：车身最大宽度；

w_1 ：挂件与静电喷枪间的距离（mm），一般取 200~300；

w_2 ：机器人活动空间；

w_3 ：静电喷枪末端导电部分与室体侧壁间距离，同时考虑机器人的安装位置。根据人员是否时进入室内调节而选取其尺寸（mm），一般取值 300~1200。

上部送风与底部抽风喷漆室通风量 Q 计算：

$$Q_{\text{送}} = 3600 \sum S_i v_i \quad (4-4)$$

式中：

Q ：顶部送风喷漆室送风量（ m^3/h ）；

S_i ：喷漆室各区的地坪面积（ m^2 ）；

v_i : 各区垂直风速 m/s, 一般手工喷漆取 0.4~0.6m/s, 自动喷漆取 0.3~0.5m/s。

排风量的计算, 本文介绍采用正压喷漆室的排风量计算:

$$Q_{\text{排}} = (0.95 \sim 0.98) Q_{\text{送}} \quad (4-5)$$

送风机的数量 $N_{\text{送}}$

$$N_{\text{送}} = 1.1 Q_{\text{送}} / q_{\text{max}} \quad (4-6)$$

式中:

1.1: 空气泄漏系数;

q_{max} : 单台空调送风机最大额定风量。

本文关于加热加湿装置、通风管道的测算不作详解。这里比较采用座式机器人和壁挂式机器人对能耗的影响。本文以 YASKAWA MOTOMAN-EXT2700 壁挂式机器人和 YASKAWA MOTOMAN-EXT2900 落地式喷涂机器人, 举例对比。

4.3.2 举例计算不同机器人对喷漆室的影响

为了便于计算, 本文假设生产现场条件如下:

1) 采用喷涂室类型为通过式水旋喷涂室;

2) 最大生产率按面积计算为 291m²/h;

3) 工件最大外形尺寸:

车身长度方向最大: 4640 mm;

车身宽度方向最大: 1787 mm;

车身高度方向最大: 1495 mm ;

4) 工件喷涂面积为车身最大喷涂外表面积 17 m²;

5) 喷涂遍数为湿碰湿两遍;

6) 假设输送机技术特性是涂装车间 DWJ4 反向积放输送链;

7) 运行节拍假定为 3.5min/台;

8) 运行速度假定为 1.94m/min;

9) 喷涂方式为机械手喷涂加手工喷涂。

(1) 喷涂室长度的比较

根据喷漆室长度计算公式 $L = (l_1 + \frac{S\tau\nu}{n})N + 2l_2 + T\nu$, 取 $\tau = 1.3\text{min/m}^2$, $N=2$, $n=2$, $l_2 = 1.5\text{m}$, $T=7\text{min}$ 。 $\nu = 1.94\text{m/min}$, l_1 根据采用 EXP2700 和 EXP2900 分别取值 2.7+3=5.7m 和 2.9+3=5.9m。

计算 EXP2700 喷涂机器人: $L = (5.7 + \frac{17 \times 1.3 \times 1.94}{2}) \times 2 + 2 \times 1.5 + 7 \times 1.94 = 67.854\text{m}$ 。

计算 EXP2900 喷涂机器人: $L = (5.9 + \frac{17 \times 1.3 \times 1.94}{2}) \times 2 + 2 \times 1.5 + 7 \times 1.94 = 71.254\text{m}$ 。

在不考虑以 3 的倍数取值 L 的情况下, 喷涂室长度在选用喷涂机器人 EXP2700 时比选喷涂机器人 EXP2900 时节约长度 3.4m。

(2) 喷涂室宽度的比较

根据喷漆室宽度计算公式(4-3):

$$W=w+2w_1+2w_2+2w_3$$

$W=1.787\text{m}$, w_1 取值 0.2m , w_2 取值 1m , w_3 根据采用 EXP2700 和 EXP2900 取值分别为 0.3m 和 1m 。则:

计算 EXP2700 喷涂机器人 $W=1.787+2\times 0.2+2\times 1+2\times 0.3=4.787\text{m}$ 。

计算 EXP2900 喷涂机器人 $W=1.787+2\times 0.2+2\times 1+2\times 1=6.187\text{m}$ 。

喷涂室宽度在选用喷涂机器人 EXP2700 时比选喷涂机器人 EXP2900 时节约宽度 1.4m 。

4.3.3 机器人安装方式对经济性的影响

选用不同机器人带来喷涂室尺寸设计的变化,直接影响能源的消耗,喷涂室尺寸变大导致各送风量需求大、因此排风量也随之变大;为了达到工艺要求控制空气温度和湿度的、空气送风量增加,空气制冷系统和加热、加湿系统的容量也将增加;喷涂室平面面积增加,采用水旋式漆雾捕捉系统的循环水量将增加,供水泵的功率也将升高。因此选用不同机器人可能带来喷涂室尺寸设计的变化将使能源消耗发生变化,主要表现在送风电机、制冷系统、制热系统、加湿系统、循环水供应系统、排风系统。本文继续以安川 EXP2700 壁挂式喷涂机器人和安川 EXP2900 落地式喷涂机器人以送风电机和排风电机引起的能源消耗作比较。

根据通风量公式 $Q_{\text{送}}=3600 \sum S_i v_i$, 由于手工喷涂区域空气流速和机器人喷涂区域空气流速不同,一般手工喷漆取 $0.4\sim 0.6\text{m/s}$,自动喷漆取 $0.3\sim 0.5\text{m/s}$ 。为了表达不同机器人选型对空间和能源的影响又不使本文累赘,因此本文不能通风量作具体计算,本文直接取值 v 为 0.4m/s 。则:

计算 EXP2700 喷涂机器人 $Q_{\text{送}}=3600 S v=3600\times 4.787\times 67.854\times 0.4=467736.62 \text{ m}^3/\text{h}$

计算 EXP2900 喷涂机器人 $Q_{\text{送}}=3600 S v=3600\times 6.187\times 71.254\times 0.4=634821.84 \text{ m}^3/\text{h}$

比较选用喷涂机器人 EXP2700 时比选喷涂机器人 EXP2900 时不同的喷涂室设计,选用 EXP2700 喷涂机器人每小时节约风量为:

$$\text{节约风量}=634821.84-467736.62=167085.21 \text{ m}^3/\text{h}=167.085\times 10^3 \text{ m}^3/\text{h}$$

选用 EXP2700 喷涂机器人每小时节约风量为 $167.085\times 10^3\text{m}^3/\text{h}$,在不考虑管道风阻的情况下, $167085\text{m}^3/\text{h}$ 的排风量需要功率为 90KW 的风机,排风风机需要两台排风量为 $58380 \text{ m}^3/\text{h}$,功率为 37KW 的风机。那么,以每天风机工作 16 小时,全年累计工作 300 天计算,每年的电力消耗差额为:

$$\text{电力消耗差额} = (90 + 37 \times 2) \times 16 \times 300 = 787200 \text{ (度)}$$

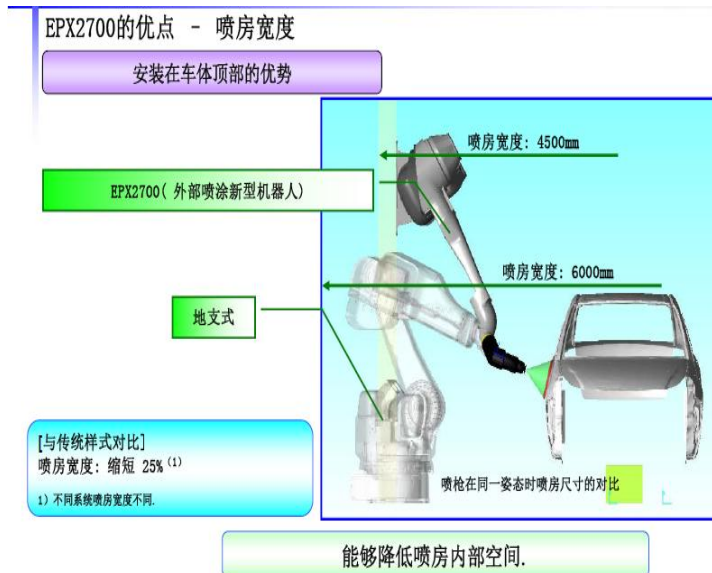
按市场电力均价 0.85 元/度计算选用 EXP2700 后的喷漆室能源消耗每年将比选用 EXP2900 机器人的喷漆室节约的费用为：

$$\text{每年节约费用} = 787200 \times 0.85 = 66.9 \text{ (万元)}$$

在图 4.1 中，我们很容易看出落地式机器人一侧的地基宽度比壁式机器人一侧的地基要宽，如图 4.2 所示，在选用壁挂式机器人 EPX2700 时将比 EXP2900 落地式机器人在喷房宽度上节约 1.5 米。

上述计算中以单侧机器人节约 1.4 米为例在资金消耗方面作了计算，在乘用车制造企业，喷涂作业有中涂漆和面涂漆两道工艺。两道喷漆在不同的喷漆室，那么，实际中送风与排风系统的年电能消耗约为： $66.9 \times 2 = 133.8$ 万元。

因此，选用不同的喷涂机器人将有可能改变喷漆室的尺寸设计，而不同的喷漆室



设计又将直接影响能源的消耗，无形中增加企业运营的成本。

4.4 关于机器人的有效工作区域讨论

现在机器人模拟人的手臂形式采用 6 个自由度的结构完成各种动作，各个关节称之为自由度，拟合机器人各个轴位于极限状态时机器人末端所有的位置点将形成一条立体的曲线，我们称为包线。每个轴的旋转角度和手臂的长度不同，机器人末端能触及的点的包线就形成了一个立体的扇形体，而机器人手臂末端不能触及的区域是非有效工作区，也称盲区。

喷涂机器人的工作是为了实现喷涂作业，既然要完成喷涂作业工作，因此喷涂机器人本体的臂中就必须容纳油漆管道或压缩空气管道等。理论上，机器人各轴可以像

图 4.2 EPX2700 优势比较

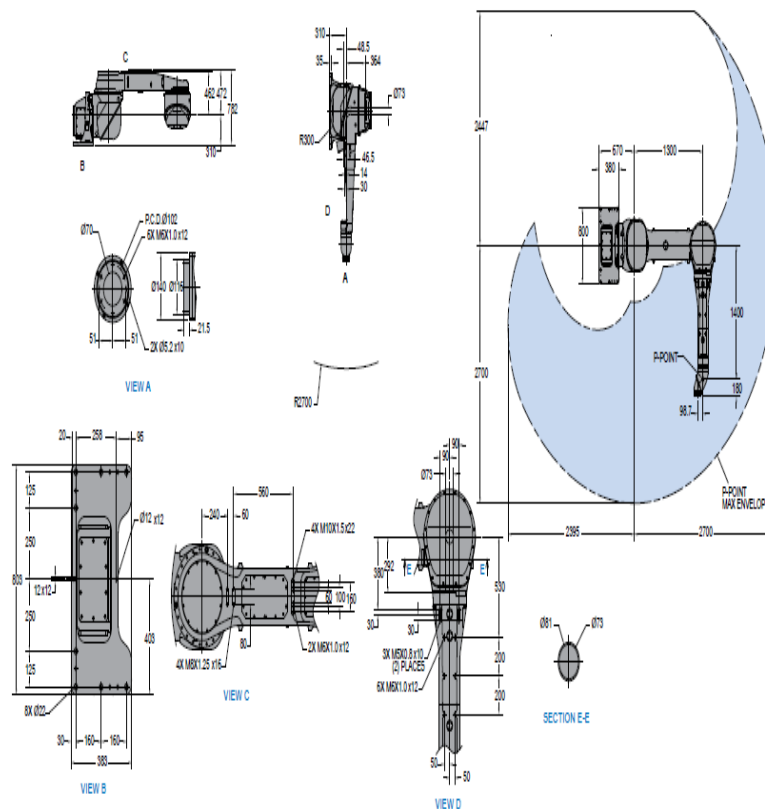


图 4.4 EPX2700 的参数

为了方便讨论有效工作区域，这里将对 EPX2900 型机器人和 EPX2700 型机器人的包线图进行分析。从包线图(4.5)可以看出 EPX2900 以机座中心设立 X 轴和 Y 轴，它的主要工作区域为 X 轴正向(0,2743),Y 向 (-1060, 2921)。EPX2900 型机器人的主要工作面为机器人正前方，从包线图来看，如图 4.5。机器人贴面的曲线附近，虽然机器人能够触及，但考虑到实际生产过程中的灵活性，快速性，该区域在连续生产时应少使用。同样，在点 (0, 2421) 与点 (2743, 2421) 连成直线以上区域也要减少应用。实际应用中，喷涂机器人在连续生产过程中，常用的工作区域为 (793, -560)，(2743, -560)，(2600, 2421)，(793, 2421) 组成的区域。

这样勾画工作区域的原因在于，虽然喷涂机器人延伸到长为 2900mm，高为 3350 的区域，但机器人手臂为了实现这个动作，机器人的每个轴关节将工作到极限。当各个轴到达极限后，为了完成下一个动作，机器人动作幅度会比较大，机器人各关节的受力也会达到最大，同时完成下一个动作的过程时间也会更长，这需要更大的喷漆空间和更长时间的喷涂节拍，增加调试难度。

EPX2900 型喷涂机器人是落地式机器人，因此它需要一个机座以实现安装。根据喷涂车身的大小，比如乘用车、重载货车，商用客车，工程中根据不同情况设计机

座的高度，以使喷涂机器人更多的覆盖车身表面，最大程度的发挥机器人的作用。

EPX2700 喷涂机器人，安装方式为落地式和壁挂式。手臂伸展最长为 2700mm，从图 4.6，以第一轴为中心建立的二维坐标，它的主要工作区域在 X 轴的下方，它的工作区域为最大能达到 X 轴(-2395,2700),Y 向 (2447, 2700) 区域内的一个立体扇形区域。从图 4.6 EPX2700 本体尺寸数据中可以看出，它的有效工作区域大致在 (-2395,-700)，(-2395,-2600)，(2000,-1580)，(2700,800)，(0,-700) 五个点连成的区域中。

在乘用车车辆中，白车身高度一般都在 2m 以下。生产过程中，装载小车高度不大于 800mm。因此，工程中只要将 EPX2700 安装于喷漆室两侧墙体高度 2700 到 3500 附近位置即可。车身喷涂主要有侧面和顶部，由于 EXP2700 的安装位置可以高于车身，同时 EXP2700 在喷涂侧面时，可以在墙面机座的下方活动。因此，EXP2700 更具灵活性，同时对空间的要求相对 EPX2900 没那么苛刻。

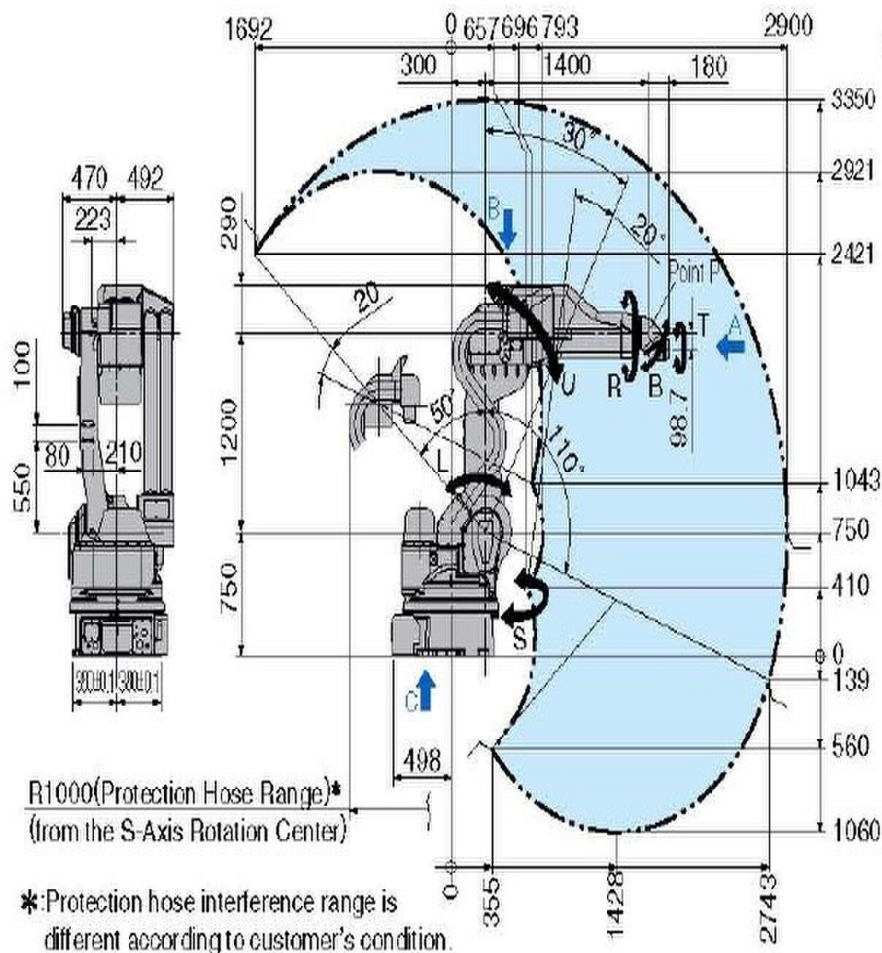


图 4.5 EPX2900 包线图

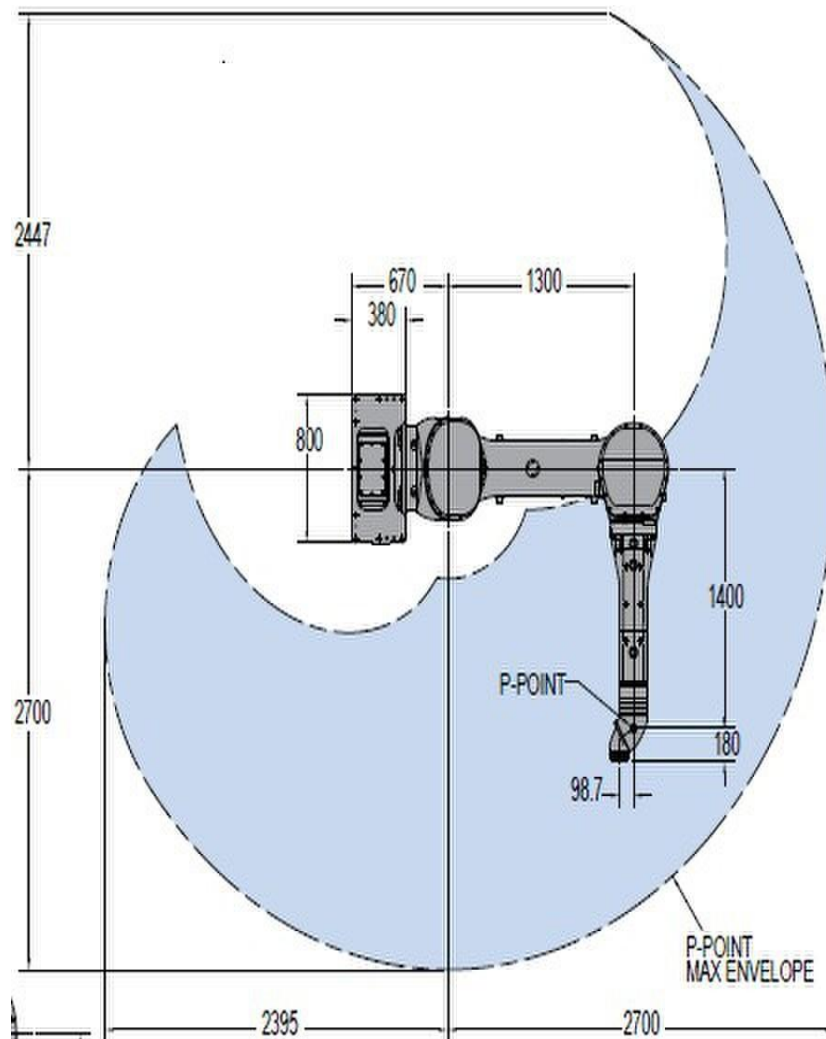


图 4.6 EPX2700 包线图

在整车喷涂作业时，臂短的喷涂机器人在作业范围比臂长的喷涂机器人要小很多，但臂短的机器人正是由于体积小，所以其占用空间少，能比较明显的产生经济效益。从图 4.7 中可以看出壁挂式机器人喷涂车身作业时的示意图，针对臂长较短的机器人，实际应用中可以采用机器人加第七轴的形式增加机器人在两个方向上作业距离，使臂短机器人能规避作业范围较小的问题，同时第七轴的投入使机器人更具灵活性。滑轨机器人的实际应用如图 4.8。

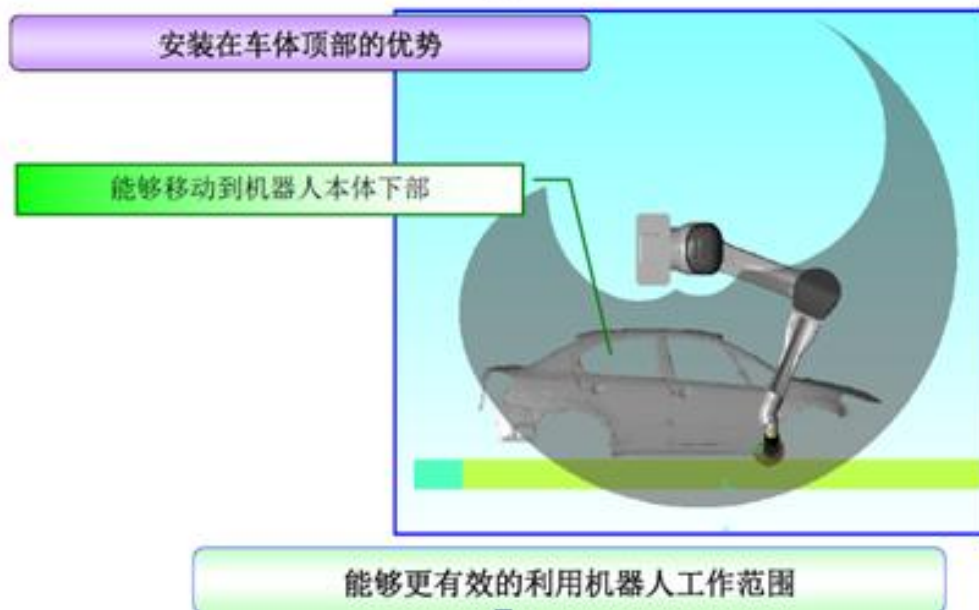


图 4.4 壁挂式机器人喷涂作业示意图

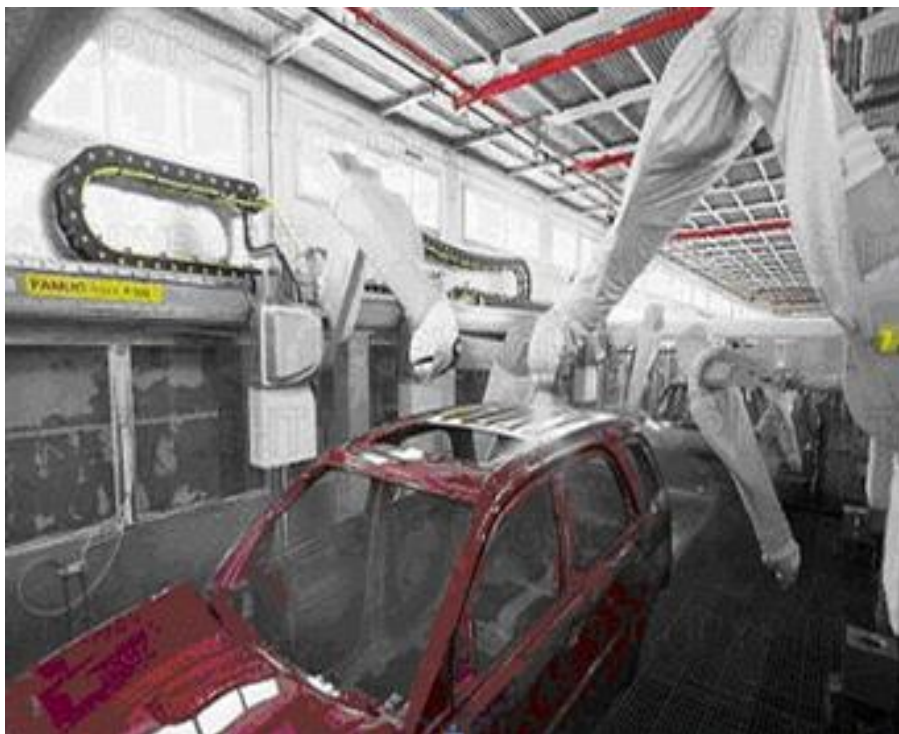


图 4.5 滑轨式机器人实例

4.5 本章小结

本章对喷涂机器人选型作了讨论，并分析了技术性指标和经济性指标。重点对影响项目成本的两个因素作了计算与分析，机器人选型工作非常重要。不同的机器人对项目投入初期成本和后期使用成本的影响至关重要，针对项目的预期目标参考本章节讨论的因素选择喷涂机器人将有利于促进项目选型的正确性。

5 喷涂设备改造项目

5.1 项目基本情况

重庆 LF 乘用车公司一期项目的涂装喷涂生产线前期使用的自动喷涂仿形机，此次改造是在原产线硬件基本不改动的前提下完成喷涂机器人替换自动仿形机的改造项目。下面将列出了原产线的相关数据。数据中 BC 站指面漆站中的色漆工位，CC 站是指清漆工位。

(1) 产品主要技术参数：

车身长度方向最大：4640 mm

车身宽度方向最大：1787 mm

车身高度方向最大：1495 mm

可满足最大喷涂外表面积：17 m²

(2) 输送系统参数：

表 5.1 输送系统参数

涂装线	节距 (m)	生产节拍 (min/台)	输送机速度(m/min)
中涂站	6.8	3.5	1.95
BC 站	6.8	3.3	2.06
CC 站	6.8	3.3	2.06

(3) 输送工艺台车高度：700mm.

(4) 喷房参数：

中涂站： 7800 mm (L) ×4500(W) mm×4500(H)mm

面漆站： BC： 15800 mm (L) ×4500(W) mm×4500(H)mm

CC： 7800 mm (L) ×4500(W) mm×4500(H)mm

(5) 油漆温度：23℃±0.5℃

(6) 无涡流下沉空气速度：0.25-0.35m/sec

(7) 温湿度参数值：

相对湿度：65%±5%

温度：23℃～30℃；

5.2 方案比较

2010 年，由于公司新投入 2 款中级车型，在生产过程中自动喷涂仿形机无法满足生产且长期存在的问题——防撞系统失效。所谓防撞失效是指喷涂系统无法检测到雾化器与车身的距离，也就意味着在某些情况下有可能发生雾化器与车身相撞的安全事故。防撞系统的失效主要在两个方面严重隐患：

(1) 无法应对顶喷机的突然“失速”。考虑更换该设备的一个主要原因是设备顶喷会偶尔出现喷涂车身 C 柱时会出现失速的情况，顶喷机失速下坠而防撞系统失效直接导致设备与车身相撞的事故，以至于维修成本非常高。

(2) 无法应对喷涂系统无法检测车身“脱钩”的问题。生产线输送链采用地面反向积放链，运载车身的台车通过挂钩与输送链上推钩的配合实现车身的移动。长期且大量的生产使的机械结构存在少量的磨损，在几率很小的情况下会出现“脱钩”的情况，即输送链在移动，但台车却停止不动了。喷漆系统跟踪车身移动速度的方式是采用同步编码器检测输送链的移动数据，当出现“脱钩”情况下，喷涂系统将按预定轨迹继续喷涂继而发生撞车事故。

由于防撞系统无法规避撞车的可能性，公司新设计的车型长度也将超过设备的适应能力，改造该设备的成本也比较高。考虑到喷涂机器人的高可靠性以及灵活性带来的经济效益，因此公司决定采用喷涂机器人代替自动仿形器。

在生产旧线上进行大规模的改造显然会影响公司的销售计划和产量任务。因此尽量缩短施工时间是本次改造的重要指标，同时资金的投入也重要的考虑因素。

从表 5.1 喷房尺寸的参数我们可以看出，中涂喷漆室和面漆喷漆室的宽度尺寸是相同的，均为 4500mm。车身参数为：4600mm (L) ×1787(W) mm×1495(H)mm。输送工艺台车高度为 750mm。本文以 EPX2700 和 EPX2900 作比较如表 5.2。

在本次改造过程中，主要参与因素在于如何在使用比较少的改造费用，尽量减少能喷漆室配套硬件大范围的更改，同时控制在一定范围内的改造可以缩短工期，减少对生产任务的影响。

喷涂机器人在改造中，按照生产线生产节拍和工艺要求配置机器人数量，喷涂系统依然采用 ITW 喷涂系统和安川的 EPX2700 喷涂机器人。

基于上述考虑，喷涂机器人在生产线布置如下图，本文列举中涂站的产线布置，如图 5.1 所示。

表 5.2 方案比较

方案	喷房宽度需求 比较 (mm)	符合 现场	解决办法	改造 工作量	是否选择 方案
延用仿 形机	4500	是	短期内无法解决存在的问题，适应 未来生产的能力不足，改造费用高	大	不选择
EPX2900 机器人	6200	否	1、改造喷漆室两边共计 1700mm, (6200-4500=1700mm) 2、检查送排风设计，增加送风量， 增加水循环送水量。 3、施工期（1 个月到 2 个月）	大	不选择
EPX2700 机器人	4700	是	1、机器人调试时，利用机器人第 一轴下方的空间，使机器人活 动空间能利用机器人的安装位 置（300mm）。 2、机器人安装高度 2200mm。 3、不需要硬件改造。 4、施工周期 15 天。	小	选择

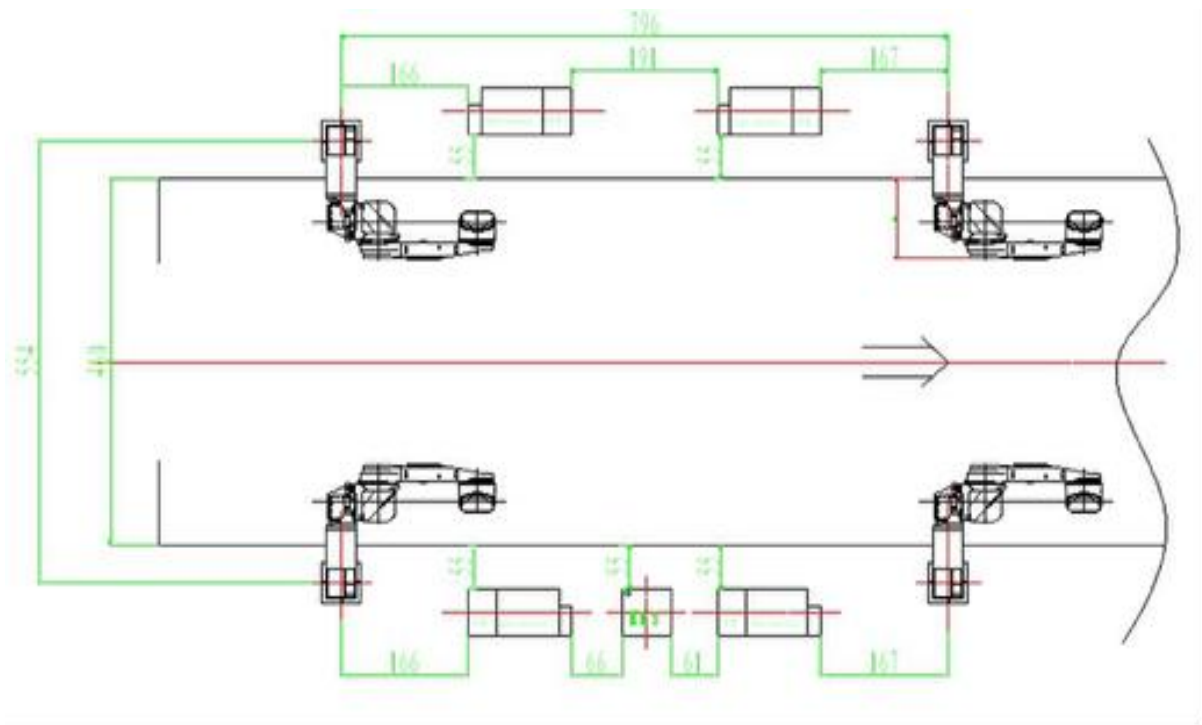


图 5.1 中涂站机器人产线布置



图 5.2 现场布局图

从图 5.2 中可以看出现场是比较的，生产线区域利用率高。这里可以能过另一张图片（图 5.3）更能形象的比较壁挂式机器人和落地式机器在使用区别。



图 5.3 落地式机器人的现场实例

5.3 改造项目系统介绍与要求

本项目包括中涂和面漆两个部分，系统方案是就用于年产双班 10 万辆车身涂装任务能满足 B 级车、C 级车的高质量喷涂需求的壁挂式机器人自动喷涂生产线。项目使用高转速、较大喷幅的高压静电旋杯，以较低喷枪速度，上漆率高，节省涂料，涂喷质量好。本项目根据实际需要提出了的要求。

在环保方面，为了减少对环境的污染，对于执行清洗程序（长清洗和短清洗）后的废溶剂，导入一个废溶剂收集系统。机器人系统负责将废溶剂定点排放到废溶剂收集系统，方便收集。在每一个机器人站区域，设置一个废溶剂和废油漆回收的容器。在不生产时，将雾化器放置于充满溶剂的容器里以保护喷杯。

在安全方面主要考虑人身安全及危险识别和危险防御。要求设备系统能够与输送链系统、设备送排风系统、消防系统、循环水处理系统、输调漆系统等相互连锁。喷涂机器人工作站每一个区域的进口和出口都设置红外线检测开关，检测正常生产过程中是否有异物进入喷涂区域，一旦检测有异物（包含人）进入就触发安全报警装置并

与系统相连锁使机器人停机，保证人员安全。每个安全开关接入自动系统控制器。当喷涂机器人相联系的任何设备的任何安全开关被触发后要求停止室内设备的运行，中断喷涂程序。在停止的地方重新启动系统操作简易。高压发生器、喷涂机、控制用的压缩空气、消防、输送系统之间有连锁，当某一环节出故障，应自动停止其它部分的操作，并有声光报警。

在所有人员安全保护装置上都有醒目的警示标语和标志，在高压静电喷涂区域的入口和出口处均安有安全光栅，在合适的高度上均安装有高压警示灯。喷涂机器人与喷房、输送链和消防系统间均有硬连线的信号互锁。所有“急停”信号采用硬接线方式连接。一旦触发，机器人立即暂停动作，关闭涂料供应并报警。需人工复位后，机器人方可继续喷涂。当喷涂机器人得到其它设备送过来火灾信号时，本站所有的机器立即停止，随后切断伺服马达供电，同时切断油漆、压缩空气和溶剂的供应。由于油漆、溶剂、清洗剂和稀释剂具有腐蚀性，要求所有喷漆室内的用于设备上的原材料都必须耐腐蚀，这些原材料不仅指接触油漆的内部件，而且包括所有使用的外部件。在所有影响人身安全或设备安全的部位，均配有相应的警示标志，在高压静电喷涂区域的出口、入口均安装高压警报灯，以显示高压是否存在，并有相应警示标志。

在机器人方面要求每台机器人的手臂内留有足够的空间，同时要求辅助柜（含有供给单元）必须配备强制通风冷却系统。使机器体内持续处于正压，保证体内不受漆雾污染，保证在机器人和控制柜没有危险气体聚积，满足防爆要求。机器人所有驱动均为伺服马达驱动，抱闸默认处于抱紧位置，仅在通电得到信号后才松闸。一旦意外断电，马达将立刻抱紧，确保机器人安全。机器人在最大负载下静态重复定位精度为 $\pm 0.5\text{mm}$ 以内。除手腕轴外，机器人各主要运动轴上均配有自动归零装置，一旦机器人失去零点，可通过示教板，运行预编好的程序，很方便地将机器人归零。所有的电缆束、软管和管路等集成在机器人手臂内，以获得最佳清理条件。电气和油漆管路必需相互隔开安装。

在雾化器方面要求雾化器配有静电旋杯快拆工具，可实现快速、便捷卸下旋杯。对于整形空气压力值、油漆流量、高压值、转速数据的开关点等的参数可以在人机界面中独立的进行调节。高压静电自动喷涂机器人的喷涂遵循先喷侧面后喷顶部的原则。两侧喷涂机器人之间应有足够的安全距离，喷涂机器人要完成车身的顶部、引擎盖、两侧、四门、前身和尾部等所有车身外表面进行全面喷涂。每台机器人所配静电旋杯、静电喷枪，喷幅重叠率 60~70%，在控制系统里建立一个数据更改记录本，所有改变喷涂结果的数值改动将被自动记录，记录的内容包含操作者，新、老数值，日期，时间，以及具体更改的具体项目（车型，雾化装置，区域，油漆，颜色高压值，雾化空气和整形空气等），并可长期储存在计算机里，从而更好的储存。同时要求设备带有强大的上位机界面，用鼠标即可完成对机器人的操作。如点动移动机器人、阀

门及雾化器操作、手动运行冲洗程序等基本操作；以及诊断高压系统、伺服驱动系统等高级操作。在使用空气支撑的涡轮时，必需采取措施，以便使涡轮不受损坏地停止或者逐渐停下来。

在控制系统方面要求配备车型自动检测、识别系统，实现车体到位自动喷涂的功能。每条地面输送链上均安装有即时跟踪采集工件位置信息的增量式编码器；分别由喷漆线上集所需的车型和颜色信息，所有同一生产线上的自动机器人站，采用工业网络实现工作站间的现场通信，完成车型和颜色信息的传送。控制程序。自动喷涂系统控制柜将安装在最合适的位置，以达到对设备的控制与操作和维护最方便和最有效。压缩空气控制箱与自动柜分隔安装，两个控制柜的人机界面要求操作者在操作时可同时观察到喷涂设备的状况。人机操作柜安装在喷房外最靠近设备的位置，操作人员可透过喷房玻璃清楚地观察到设备运行状况。自动喷房设备自动完成对不同工件的喷涂，包括轨迹的控制以及喷漆参数的控制，并根据设定要求自动进行换色，系统清洗，杯口清洗，填充等工艺动作。自动喷涂设备可以设定为模拟运行模式。在无工件和无油漆的状况下，完成自动喷涂的所有动作模拟。

每个机器人配备控制柜一个，对该机器人进行控制与操作及程序备份。每站配备控制台一个，带有人机操作界面，可进行参数的设置与修改，工况显示，命令发出，资料统计，故障报警诊断等监控，可切换手动/自动操作模式。设置清洗，维护模式，可对 PLC 程序进行上传下载、系统参数报表打印。工况流程显示的更新时间小于 1 秒。

控制系统应附带有车身型号识别系统，车身识别系统应具有自动和手动两种工作模式识别车型。在自动模式下,光电传感器在车身进入喷漆室入口识别车身的型号。在手动状态下，操作者人工输入车身型号、喷涂颜色。如果一个不能被识别的车身进入喷涂区，控制柜将发出报警信号，此时，系统允许控制台或手动操作台的操作员将正确型号的车身信息输入控制系统。喷涂系统可以识别空载的输送设备，并自动调整至非喷涂状态。

系统应具有人机界面和系统监控软件，人机界面至少应显示以下画面：主画面、状态画面、信号连锁画面、雾化器工作状态画面、PLC 网路连锁画面、喷涂表、清洗表、生产状态画面、信号监控曲线、故障报警、故障履历表等等。设备的控制系统必需至少可以处理 20 种车型喷漆程式。此外，程序存储器应预留扩展空间。

5.4 硬件配置

5.4.1 编码器

系统所需的编码器包含以下三套编码器：

- (1) 1 套与中涂喷漆室输送系统连接的编码器
- (2) 1 套与底漆喷漆室输送系统连接的编码器
- (3) 1 套与罩光漆喷漆室输送系统连接的编码器

5.4.2 中涂高压静电自动喷涂机器人

中涂高压自动静电壁挂喷涂机器人共 2 台，包括以下部件：

- (1) 2 台 6 轴壁挂式防爆机器人
- (2) 1 套启动保护、人员保护和设备保护装置
- (3) 2 套流量计量防爆齿轮泵装置
- (4) 2 套高压系统（包括高压发生器和控制器等）
- (5) 2 套气动系统
- (6) 2 套控制系统（机器人的检测及控制系统、喷涂工艺检测及控制系统）
- (7) 2 套雾化旋杯装置
- (8) 2 套旋杯清洗机
- (9) 2 套示教盒
- (10) 1 套监控设备站（即操作台）。

5.4.3 面漆高压静电自动喷涂机器人

本色漆和金属漆高压静电自动喷涂机器人站共 4 台，包括以下部件：

- (1) 4 台 6 轴壁挂式防爆机器人
- (2) 1 套启动保护、人员保护和设备保护装置
- (3) 4 套流量计量防爆齿轮泵装置
- (4) 4 套高压系统（包括高压发生器和控制器等）
- (5) 4 套气动系统
- (6) 4 套控制系统（机器人的检测及控制系统、喷涂工艺检测及控制系统）
- (7) 4 套雾化旋杯装置
- (8) 4 套旋杯清洗机
- (9) 4 套示教盒
- (10) 1 套监控设备站（即操作台）。

5.4.4 罩光漆高压静电自动喷涂机器人

罩光漆高压静电自动喷涂机器人共 2 台，包括以下部件：

- (1) 2 台 6 轴壁挂式防爆机器人
- (2) 1 套启动保护、人员保护和设备保护装置
- (3) 2 套流量计量防爆齿轮泵装置
- (4) 2 套高压系统（包括高压发生器和控制器等）
- (5) 2 套气动系统
- (6) 2 套控制系统（机器人的检测及控制系统、喷涂工艺检测及控制系统）
- (7) 2 套雾化旋杯装置
- (9) 2 套旋杯清洗机
- (10) 2 套示教盒
- (11) 1 套监控设备站（即操作台）。

5.4.5 离子风气吹除尘设备

离子风气吹除尘设备安装在面涂人工擦净后面的除尘区，自动吹走残留在车身上的灰尘。吹净装置由一个顶装机和两个侧装置组成。

5.4.6 车型识别系统

车型识别系统由 6 组红外对射光电开关组成，对不同车型的特征进行识别和记录。配置车型识别操作台，操作台能显示自动识别后的车型号，同时配备拨码开关以实现人工输入车型及颜色。

5.4.7 现场总线系统

现场总线系统包含：

- (1) 采用标准的现场总线系统、总线协议。
- (2) 为使电缆最少：在内部，控制柜内；外部，控制柜及外围元器件之间。允许采用一些分布 I/O 模块。

5.4.8 控制柜

针对控制柜的要求主要为：

- (1) 控制柜防护等级为 IP54。
- (2) 尺寸保证满足电柜内的电器元件安装要求。
- (3) 控制柜配有空调（空调单元的安装保证冷凝水的泄露不会损坏控制柜的元器件）。
- (4) 柜内安装带有自动开关的照明灯，保证检修时有充足的光源。

(5) 内部安装至少一个单相 220V 10A 电源插座。

5.4.9 操作面板

针对操作面板的要求主要为：

(1) 操作面板中包括监测系统 PC、监控器键盘、鼠标、操作按钮、急停按钮等（包括配套软件）。要求键盘和鼠标可以锁在柜里面，显示器放在装有玻璃的柜里面。

(2) 控制框图上有各种操作或信号元件的最小化图形符号（操作模式，机器状态，高压发生器状态）。

(3) 与安全有关的操作是通过钥匙开关来控制的（例如：高压发生器的打开）。主要手动操作在该工作站上位机上有监控记录。

(4) 在关闭上位计算机操作界面时不影响正常工作，保证正常生产。

(5) 要求对于每个机器人站，必须配备相应的打印设备，以便打印相关记录。

(6) 输入面板车型/颜色/部分表面/表面修补。

(7) 带有按钮、信号灯、带灯按钮的输入面板，用于输入颜色和车型信息，其安装主要取决于颜色和车型的数量多少。

(8) 要求在每一个机器人工作站的上位机上至少实现以下信息的实时显示：

当前工作站的状态：报警信息、当前区域状态和每个机器人/动力/油漆系统的状态、时间、日期。生产量统计信息。运行模式（手动、自动、模拟、清洗、输送机、维修）。

外围设备状态：喷漆室供风和排风、火警、动力供应、油漆供应、溶剂应。通信状态。

机器人操作状态监视：可以实时显示当前机器人动作、喷涂颜色、喷涂各项参数，及整个喷漆室内车身参数。

工作日志记录：每工作班次产生一个日志文件，记录该班次生产的上述各种状态参数。

5.5 项目选型确定

根据公司经营目标，在满足喷涂工艺，保证产品质量的情况下，从喷漆室的实际条件出发，在参考本文介绍的选型因素后，我们最终选定设备配置如表 5.3 所示。

表 5.3 系统配置

站别	机器人	雾化器
中涂站	EPX2700 壁挂式机器人 2 台	ITW RMA303 溶剂型旋杯 2 套
色漆站	EPX2700 壁挂式机器人 4 台	ITW RMA303 溶剂型旋杯 4 套
罩光站	EPX2700 壁挂式机器人 2 台	ITW RMA303 溶剂型旋杯 2 套

注：面漆站包括色漆站和罩光站。

设备控制系统采用三菱 Q 系列 PLC，并运用 CCLINK 工业网络完成整个喷涂系统的信息交互，控制等。

各个喷涂站的工作机器人系统接收到工件识别信号后，涂料依系统信号完成换色充填准备，充填准备。当工件触发启动行程开关后，机器启动，并依照预先示教的程序开始面漆喷涂作业。下面介绍各站的工艺情况。

(1) 1 套用于车身外表面喷涂溶剂型中涂漆的 2 台高压静电壁挂喷涂机器人。

采用 1 站布置，负责汽车外板的中涂喷涂作业。2 台壁挂机器人（YASKAWA EPX-2700）及静电旋杯（ITW RMA303）。以 1 次涂装，达到所需的膜厚（40um），喷涂面积 17m²。系统具备自动换色、系统清洗、短清洗系统(换色清洗时间 <12 秒，依清洗溶剂清洗力不同，时间会稍有差异)。静电旋杯、机器人以较低的移动速度和较宽喷幅喷涂工件的水平面和垂直面，达到最大的涂料利用率和较高的膜厚。可以获得较高的涂料利用率和均匀的膜厚。所有的换色、清洗可以由工程师设定或采用初始设定。所有的清洗溶剂和废涂料将通过排泄管排放到回收系统。机器人采集接收到工件识别信号后，涂料依系统信号完成换色、充填准备。当工件触发启动行程开关后，机器人启动，并依照预先教导的程序开始中涂站的喷涂作业。系统在经过特定的时间后自动清洗。

(2) 1 套车身外表面喷涂色漆和金属漆的 4 台高压静电壁挂喷涂机器人。采用 2 站布置，负责汽车外板面漆(色漆、银粉漆)喷涂。4 台壁挂型机器人（YASKAWA EPX-2700）通过静电旋杯（ITW RMA303），以 2 次涂装，不流挂，达到所需的膜厚（金属漆 15um、本色漆 40um），喷涂面积 17m²。具备自动换色、系统清洗、短清洗系统(换色清洗时间 <12 秒，依清洗溶剂清洗力不同，时间会稍有差异)。机器人等待接收工件识别信号后，涂料依系统信号完成换色、充填准备。当工件触发启动行程开关后，机器人启动，并依照预先教导的程序开始面涂喷涂作业。所有的换色、清洗可以由操作者设定或采用初始设定。所有的清洗溶剂和废涂料将通过排泄管排放到的回收系统。

(3) 1 套用于车身外表面喷涂罩光漆的 2 台高压静电壁挂喷涂机器人。采用 1 站布置，负责汽车外板罩光漆喷涂，分 1 站喷涂。2 台壁挂机器人（YASKAWA EPX-2700）

通过自动静电旋杯 (ITW RMA303) 。以 1 次涂装, 不流挂, 达到所需的膜厚 (40 μm), 喷涂面积 17 m^2 。具备自动换色、系统清洗、短清洗系统(换色清洗时间 <12 秒, 依清洗溶剂清洗力不同, 时间会稍有差异)。机器人等待接收工件识别信号后, 涂料依系统信号完成换色、充填准备。当工件触发启动行程开关后, 机器人启动, 并依照预先教导的程序开始面涂喷涂作业。静电旋杯、机器人以较低的速度和较宽喷幅喷涂工件的水平和垂直面, 达到最大的涂料利用率和较高的膜厚。可以获得较高的涂料利用率和均匀的膜厚。所有的换色、清洗可以由操作者设定或采用初始设定。所有的清洗溶剂和废涂料将通过排泄管排放到回收系统。

三个喷涂站的喷涂装置和机器人结构基本是相同的, 不同喷涂工位对车身工艺要求不同, 所以喷涂参数需要作应的调整。

5.6 解决“撞杯”问题

“撞杯”是我们对雾化器的旋杯与车身碰撞故障的一种称谓。由于每发生一次撞杯故障, 公司损失就相当大, 一般此类故障会造成车身部件损伤或整车报废, 同时旋杯 90% 的可能性损坏, 甚至整个雾化器报废。此类故障可能造成公司损失费用从几万元到几十万元, 所以这个问题必须被我们足够重视并予以解决。在本文 5.2 节中介绍了在本条生产线存在“撞杯”的主要原因。由于“失速”的原因在机器人使用过程中不会发生, 所以只需要解决输送设备带来的“脱钩问题”。

在实际生产中, 我们很难控制输送设备让其不“脱钩”。从反向积放链的结构来讲, 我们必须在机器人喷涂位置保持车身运载台车的灵活性 (即可以实现人工脱钩), 因此不能考虑将机器人喷涂段在机械方面将设备改造为不能脱钩, 所以在本项目中我们只能通过电气控制方面实现快速检测台车是否与输送链条脱钩了。

由于雾化器旋杯与车身的距离基本保持在 350mm 左右, 这要求“脱钩”检测机构要有快速识别, 迅速停止机器人运动的功能, 并叫停输送链系统。一般情况下, 我们会考虑用红外线检测开关, 视觉系统来解决此问题。这两个方案我们在实际应用中发现不太适用于汽车喷涂区, 原因是在车身喷涂过程中会旋杯喷出漆雾, 漆雾在成形空气和静电场的作用下附着到车身上, 在这个过程中或多或少的会有一些漆雾无法附着车身上, 这部分油漆会同样以漆雾的形式短暂的在旋杯与车身间的 350mm 周围, 然后被喷涂室的抽风迅速带走。但喷涂过程是连续的, 这个过程漆雾会持续的弥散在旋杯处, 这个现象会影响红外线的穿透能力, 以及视觉系统的识别能力, 同时也对程序软件识别的处理难度, 而且也还对增加了成本投入。因此, 采用简单、有效的识别机构是我们需要寻找的办法。

最终，根据台车结构有前小车和后小车特性，如图 5.4，我们采用增加数据采集频次的办法，先根据实际情况设置了启动点，如图 5.5。然后在整个喷涂工位设置 14 个行程开关，结合机器人喷涂姿势，相对均匀的布置 14 个行程开关。利用这 14 个行程开关在喷涂工位首先检测到台车前小车，当前小车离开整个喷涂工位后，再检测台车后小车，以实现检测台车已完全离开喷涂工位的目的。

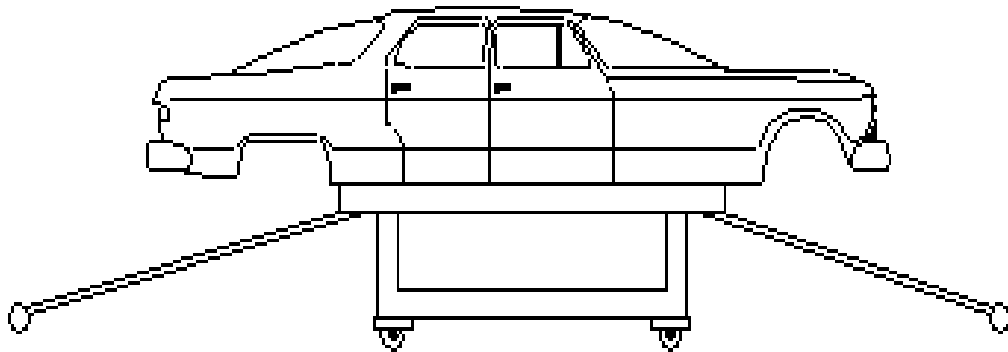


图 5.4 托架结构示意图

这种简单的检测方法具体细节是车身从起测点开始自链条运行方向会依次碰触行程开关，在喷涂工位入口处有一个红外线对射开关检测车身是否正在进入喷涂工位，系统计时开始，根据输送链的运行速度预计台车到达下一行程开关的时间，每个预计时间设 ± 3 秒的偏差。以下是我们作了 PLC 程序的设计。

在喷涂过程中增加行程开关，其作用为台车进入喷涂区域及移出喷涂区域期间台车行程和机器人与台车防撞，下面分别列出各信号点在程序中的代码，现场行程开关信号布置如图 5.5：

X60A：台车进入机器人喷涂区域，LS1 行程计数 C2 开始计数

X6CA：防碰撞行程计数开始，LS1 行程计数 C2 在 290-335 区域内防碰撞

X6CB：防碰撞信号，防碰撞行程计数 C54 在 355-398 内防碰撞

X6CC：防碰撞信号，防碰撞行程计数 C54 在 397-446 内防碰撞

X6CD：防碰撞信号，防碰撞行程计数 C54 在 445-486 内防碰撞

X60E：防碰撞信号，防碰撞行程计数 C54 在 545-585 内防碰撞

X60F：防碰撞信号，防碰撞行程计数 C54 在 610-635 内防碰撞

X60B：台车离开喷涂区域，积放行程计数开始

X60E：积放段防止链条与台车脱钩,与喷涂区域防碰撞信号共用，积放行程计数器 C3 在 45-85

X60F: 积放段防止链条与台车脱钩,与喷涂区域防碰撞信号共用, 积放行程计数器 C3 在 95-135

X610: 积放检测信号, 积放行程计数器 C3 在 140-180

X611: 积放检测信号, 积放行程计数器 C3 在 195-235

X612: 积放检测信号, 积放行程计数器 C3 在 290-330

X613: 积放检测信号, 积放行程计数器 C3 在 385-425

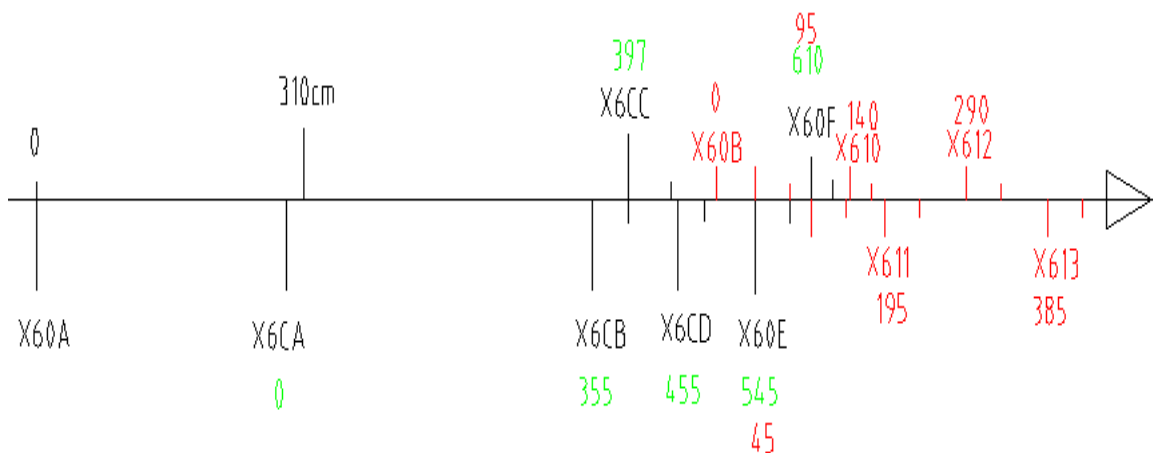


图 5.5 行程开关现场布置示意图

当台车前连杆撞到行程开关 X60A 信号为 1, 台车进入喷涂区域, C2 计数开始, 如图 5.6 所示:

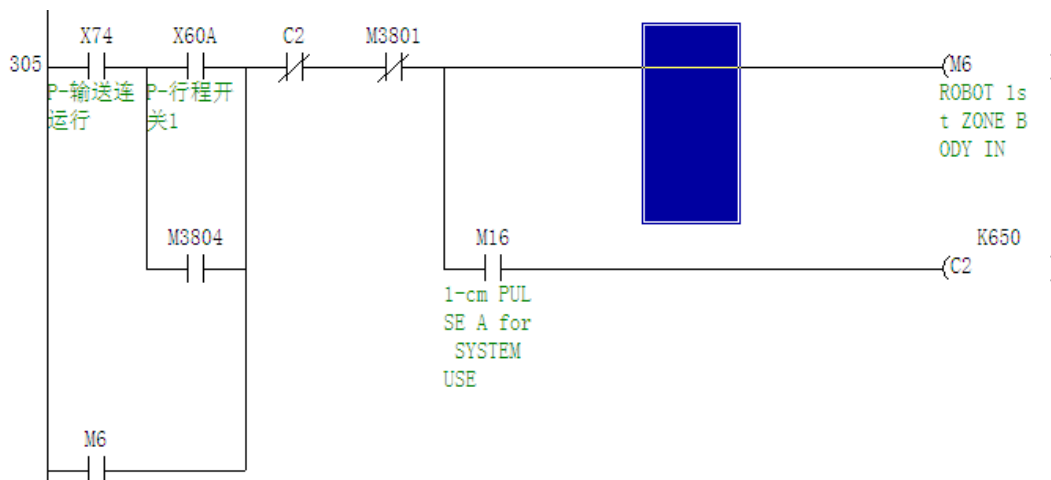
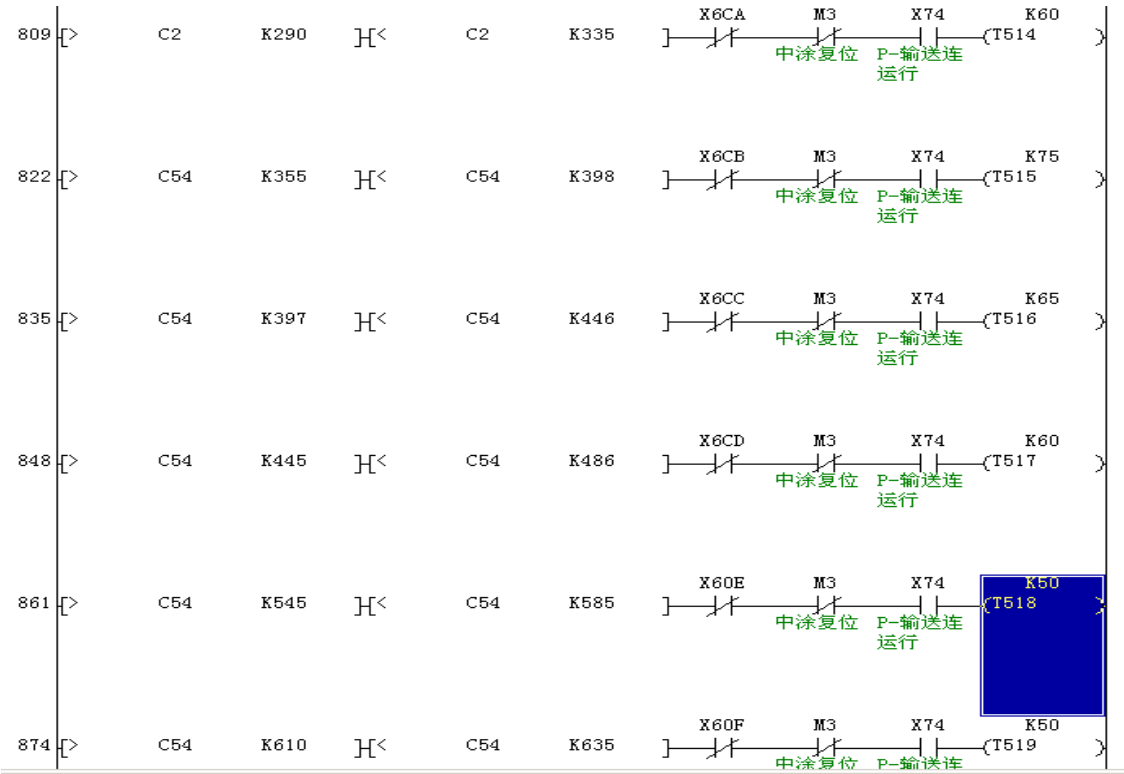
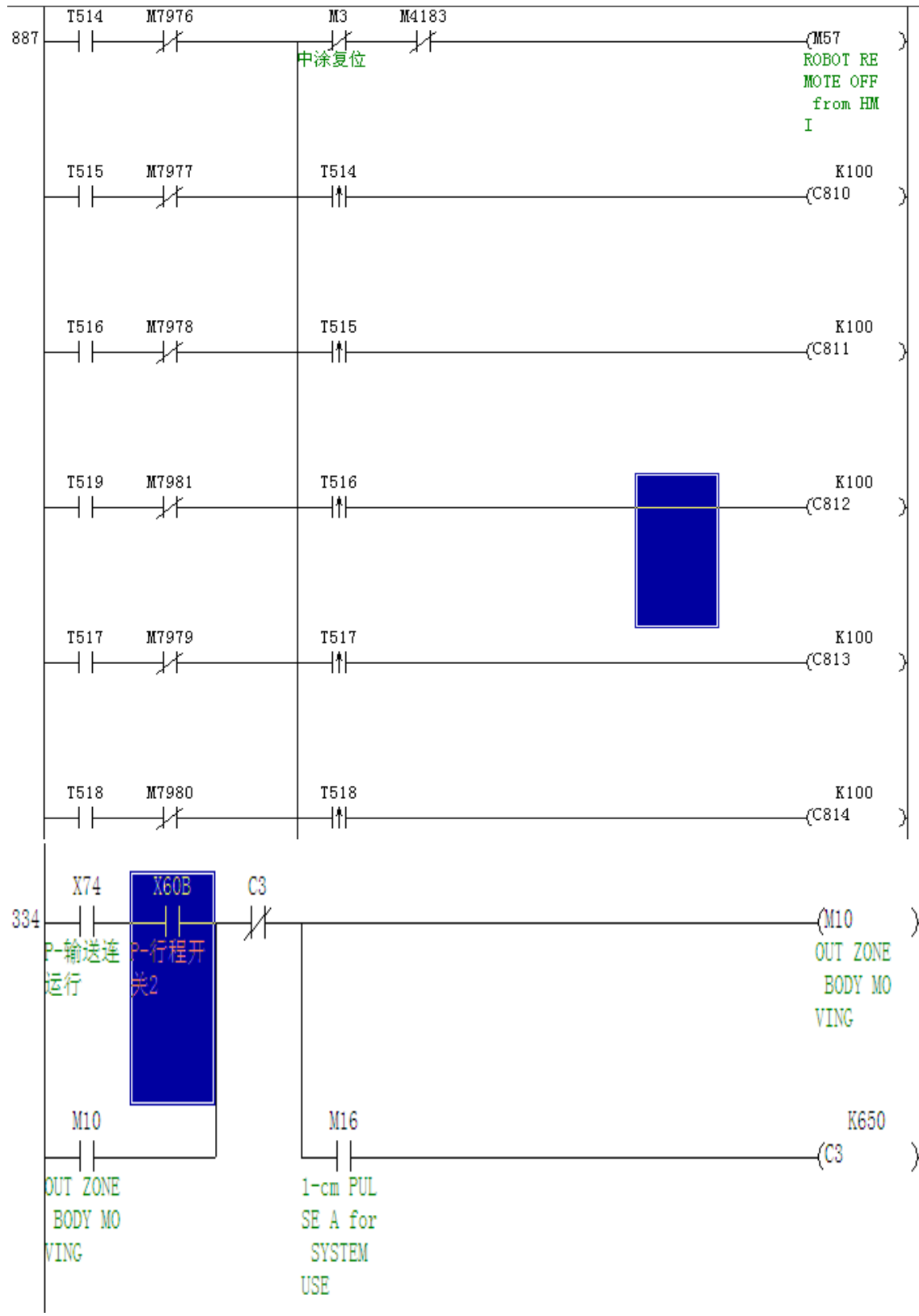


图 5.6 台车检测开始

根据机器人喷涂仿形, 行程达到 310cm 为机器人启动点, 所以在机器人启动前就要做好防碰撞检测。当台车进入 $290\text{cm} < C2 < 335\text{cm}$ 区域, 台车前连杆碰撞 X6CA,

触碰结束，T514 开始计时，6s 内未离开 290cm<C2<335cm 区域，机器人关闭远程模式，产生报警；当在 280cm<C2<320cm 内碰到 X6CA，防碰撞计数器 C54 开始计数。当进入 355cm<C54<398cm，台车前连杆碰撞 X6CB，触碰结束，T515 开始计时，7.5s 内未离开区区域，产生报警。以此类推。3.台车快离开喷涂区域时，触碰 X60B 行程开关，积放防脱钩计数器 C3 开始计数。当台车进入 45cm<C3<85cm 区域，台车前连杆碰撞 X60E，触碰结束，T30 开始计时，6s 内未离开 45cm<C3<85cm 区域，机器人产生积放报警。如图 5.7。





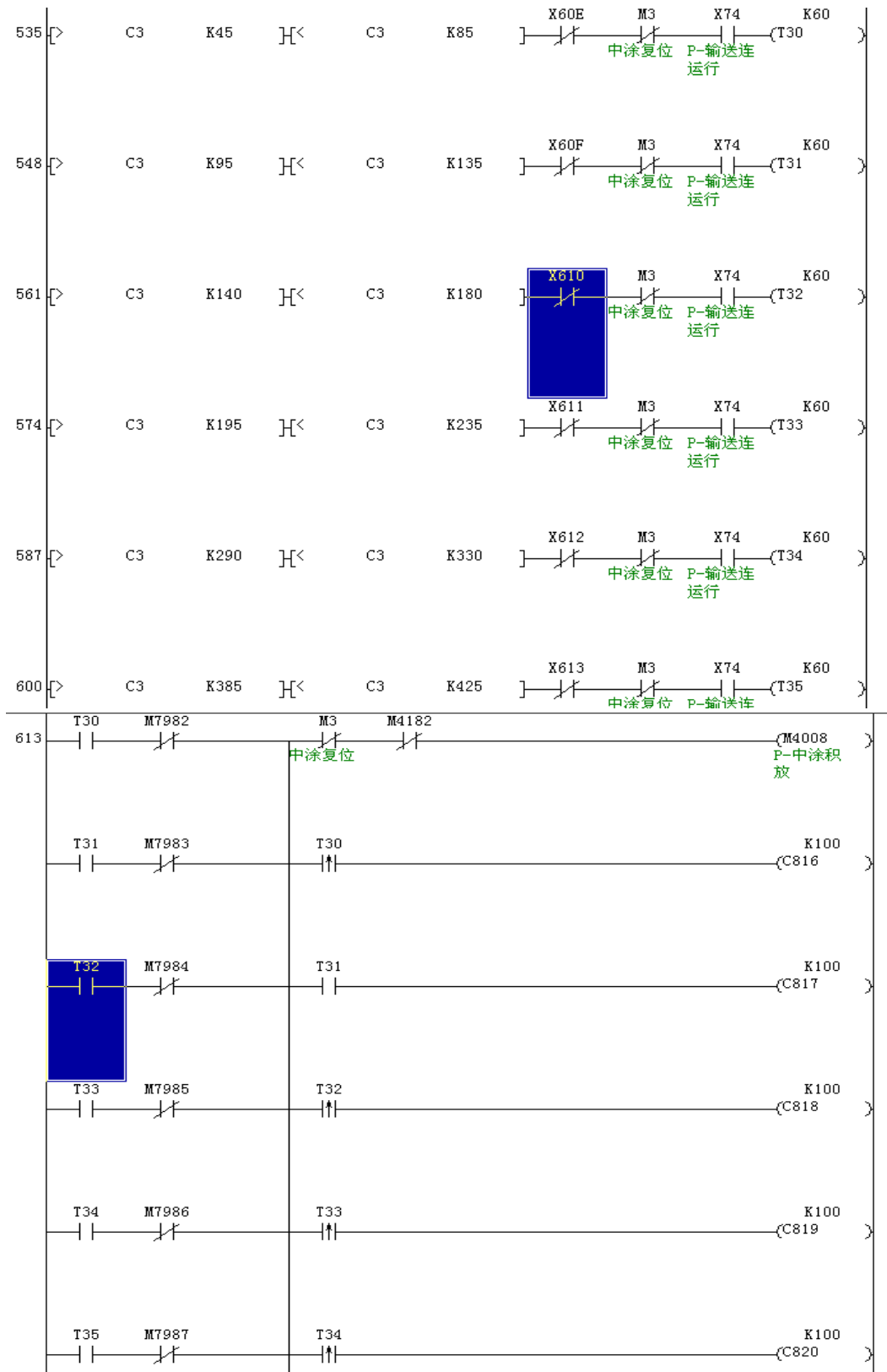


图 5.7 程序图

通过本次喷涂设备的改造工作，将原来工作不稳定的仿形机更换为喷涂机器人，使公司的喷涂人员从以前的 8 人减少为 4 人，利用喷涂机器人的灵活性弥补仿形机喷涂轨迹的粗略，根据车身不同的喷涂区域，设定特定的喷涂流量、高压等参数，在保证喷涂质量的情况下，使油漆的上漆率提高。根据后期批量生产统计发现，单车喷涂成本降低 20%。“撞杯”问题在喷涂机器人投入使用后，从监控系统中可以看出 14 个行程开关按设计正常工作，生产线没有发生过“撞杯”故障。

5.7 本章小结

本章详细讲述了次项目改造老线的环境，对改造方案进行比较并确定了产品的选型，针对喷涂机器人关键的组成部分：环保方面、安全方面、机器人方面、雾化器方面等进行了讨论，提出了具体的要求，拟定了硬件配置。阐述了“撞杯”发生的原因以及解决的办法。

6 总结与展望

6.1 总结

传统生产线的升级改造是制造企业面临的普遍问题。汽车喷涂生产由于其工艺的特殊性以及操作工人及环境的影响，喷涂生产线的换挡升级迫在眉睫。

论文通过对喷涂器械、油漆雾化装置等的分析，阐明了喷涂生产线设备改造过程中要考虑的主要方面，对喷涂机器人选型过程中要考虑的主要问题：技术性指标、经济性指标、营运成本、有效工作区等进行了研究，并实施了一个实际的喷涂设备改造项目。

在此改造过程中，首先拆除了原来的设备，根据公司的需要，原来的喷涂仿形机通过改造后在其它地方继续使用。原来仿形机被 8 台喷涂机器人取代，采用臂挂式机器人，不仅改善了旧产线存在的问题，保证了产品质量，同时还在短时间内完成了改造工作，施工时间对产量的影响也在公司预期接受的范围内，采用了适合公司现场的设备简单快捷地完成了改造工作，节省了投入，可谓“多赢”。

经过几年的使用，喷涂机器人性能可靠，产品质量稳定，解决了以前长期困扰我们的“撞杯”问题，用低成本的办法提高了设备的可靠性。

在实际运行过程中，我们也发现了设备在使用过程中问题。第一个问题是雾化器的旋杯中飞溅盘容易损坏，后来研究了损坏的原因，并对供应商的产品提出了改进要求，目前正在试用过程中。

为了更好地解决“撞杯”问题，方案采用了 14 个行程开关运用密集的信号采集以判断台车的输送状态。成功解决“撞杯”问题后，这 14 个行程开关由于附着油漆，不能正常断开和闭合，会造成设备系统认为台车“脱钩”而停机，影响正常生产进度。因此，定期维护更换行程开关是解决此问题的有效方法之一。

所实施的设备改造方案设计正确，现场施工实现了设计要求，使用效果达到了预期目标。

6.2 未来研究展望

如本文绪论所述，喷涂机器人必定在未来被大量应用在整车车身生产过程中。在未来，企业会更关注如何更有效的利用喷涂机器人，通过数量更少的机器人完成更多

的工作，通过多台机器人的配合作业，使曾经的多个工位集中一个或两个工位完成，这对调试工作提出了非常严格的要求。

静电旋杯雾化器依然将在车企持续使用，让雾化器更为可靠，对设备部件的平均无故障时间还需要提高，应采用更为精准的流量控制技术、转速控制技术、漆雾成形技术实现油漆的更高上漆率，降低资源的消耗，为绿色工厂做出贡献。

致 谢

本论文研究历时一年有余，广泛收集了大量的文献，整理、综合、学习了许多的前沿技术和现代喷涂行业机器人应用方面的优秀的技术方案，使我受益良多。在收获的时候，想想一年中经历的每次困惑和喜悦，伴随了许多领导、老师、朋友的支持。

感谢周康渠教授对我论文的指导，让我在理论与实践过程中收获颇多；感谢奉孝君总经理——我的校外导师给予我工作上的支持，让我有机会在这个课题上有足够的研究深度。在机器人应用方面我非常欣赏和佩服机器人工程师李贺的卓越能力和工作态度，感谢他对我的帮助，感谢电气工程师王青雄在喷涂机器人方面的技术分享以及“撞杯”问题上给予的帮助。论文写作即将完稿，回忆中无数朋友在脑中闪过，对公司以及生产技术部的小伙伴们，学校的朋友们在此一并言谢，没有你们的帮助，我无法完成此文写作，谢谢。

胡伟

2014 年 10 月 5 日

参考文献

- [1] 蔡自兴.机器人学[M],北京:清华大学出版社,2000.9
- [2] 王锡春,最新汽车涂装技术[M],北京:机械工业出版社,1999
- [3] 林鸣玉,汽车涂装技术[M],北京:北京理工大学出版社,1998
- [4] <http://www.khi.co.jp/rd/index.html>,技术情报
- [5] 胡宗武.徐履冰.石来德.非标准机械设备设计手册[M].北京:机械工业出版社,2002.9:1101-1783
- [6] 王锡春.谈工业涂装的高效低成本和清洁生产[J].上海涂料.2006
- [7] 刘学安,国内外伺服仿形静电技术自动喷涂系统的分析和比较,国内外机电一体化技术,2002,5
- [8] 韩鸿志,旋杯式自动喷涂机的使用与管理[J],生产技术与工艺管理,1998,10
- [9] 李斌,高转速杯式静电自动喷涂系统在轿车喷涂中的应用[J],材料保护,2004,3
- [10] 明开智,卡车车身无人全自动喷涂技术及其设备[J],涂料工业,1997:
- [11] 蔡自兴.张钟俊.试论机器人的开发与应用问题[J].机器人,1988:3-5
- [12] 张福顺,张大卫,高速旋杯式静电喷涂雾化机理的研究[J],涂料工业,2003,
- [13] <http://www.durr.com/en/>,喷涂机器人
- [14] 王长民,软仿形自动喷涂机控制系统设计[J],国内外机电一体化技术,2001,
- [15] 李亚林.喷涂机器人在汽车车身涂装的应用与质量控制研究:[硕士学位论文],湖南大学,2012
- [16] 郭健.机器人在涂装车间的应用.长春汽车工业高等专科学校机电学院,2012
- [17] 李旭.机器人技术在整车油漆喷涂领域的运用分析[J],汽车工艺与材料.2008
- [18] 张云生,祝晓红,王静,网络控制系统[M],重庆:重庆大学出版社,2003
- [19] 阳宪惠,工业数据通信与控制网络[M],北京:清华大学出版社,2003
- [20] 钱绍昌,高速旋杯式自动喷涂机[J],汽车工艺与材料,1996,(1)
- [21] 孙宏顺,高压静电旋杯控制系统的研究与开发:[硕士学位论文],北京:机械科学研究院,2005
- [22] 刘新,聂尔来,王长民,柔性仿形自动喷涂系统的轨迹规划[J],制造自化,2003
- [23] 王焱,赵德安,王振滨,李医民,喷漆机器人喷枪最优轨迹规划的研究,江苏理工大学学报(自然科学版),2001
- [24] Suk-Hwan Suh, In-Kee Woo, Sung-Kee Noh, Development of an automatic trajectory planning system (ATPS) for spray painting robots, Journal of Manufacturing Systems.
- [25] A.A. Elmours, Electrical characterization of bell-type electrostatic painting systems, IEEE Trans. Ind. Appl., 1992, 28(5)
- [26] Naoki Asakawa, Yoshimi Takeuchi, Teaching less Spray-Painting of Sculptured Surface by an Industrial Robot, Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation
- [27] David C. , Aaron Greenfield, Prasad N. Atkar, Alfred A. Rizzi, Howie Choset, Paint Deposition Modeling for Trajectory Planning on Automotive Surfaces, Transactions on Automation Science and Engineering, 2005,
- [28] W. Sheng, H. Chen, N. Xi, Tool path planning for compound surfaces in spray forming processes, IEEE, Trans. Robots. Automat, 2005

- [29] 李旭.机器人技术在整车油漆喷涂领域的运用分析[J].汽车工艺与材料, 2008
- [30] 曾勇,龚俊,陆保印.面向复杂曲面的喷涂机器人喷枪路径的规划[J].机械科学与技术,2010
- [31] 李发忠.静电喷涂机器人变量喷涂轨迹优化关键技术研究:[博士学位论文],江苏大学2012:21—32
- [32] 螺杆式涂料喷涂机的研究与设计[D]. 西安建筑科技大学 2004
- [33] 叶丽.静电旋杯喷涂技术在汽车涂装中的应用.慧聪表面处理网.2011
- [34] 王子恺,郭华进,杨光华等.浅谈旋杯喷涂在汽车涂装中的应用.涂料涂装资讯网.2012
- [35] 郭磊,曲银燕.悬挂轨道式旋杯涂装机器人.自动化博览.2013
- [36] 机器人涂装系统在新兴市场中推广应用.德国杜尔集团公司.
- [37] 孙宏顺.高压静电旋杯控制系统的设计与开发[D]. 机械科学研究院 2005
- [38] 王伟.喷涂机器人操作机方案设计及其仿真分析[D]. 西安理工大学 2006
- [39] 黄智明.FANUC P2000E机器人高压报警故障分析.AI汽车制造业.2009
- [40] 胡裕渊.静电喷涂机器人轨迹优化与仿真技术研究: [硕士学位论文], 江苏大学.2010:22-45
- [41] 安艳松.一种旋杯式高速静电侧喷机控制系统的设计与实现.天津大学.2007 :30-51

插图清单

图 2.1 空气雾化喷枪.....	7
图 2.2 高压无空气喷枪.....	8
图 2.3 多功能仿形自动喷涂机.....	9
图 2.4 喷涂机器人.....	10
图 2.5 滑轨机器人实例.....	12
图 2.6 喷涂机器人本体结构示意图.....	错误!未定义书签。
图 2.7 机器人关节示意图.....	14
图 3.1 旋碟喷涂示意图.....	18
图 3.2 旋杯喷涂示意图.....	18
图 3.3 换色阀	19
图 3.4 PPH 707	20
图 3.5 PPH 707 EXT	20
图 3.6 成型空气的位置.....	21
图 3.7 SAMES 系列速度控制原理图	21
图 3.8 ITW 雾化器实例示意图	22
图 3.9 喷涂机器人配置示意图.....	22
图 4.1 壁挂式机器人和落地式机器人.....	26
图 4.2 EPX2700 优势比较	30
图 4.3 EPX2900 的参数.....	31
图 4.4 EPX2700 的参数.....	错误!未定义书签。
图 4.5 EPX2900 包线图	错误!未定义书签。
图 4.6 EPX2700 工作区域	错误!未定义书签。
图 4.7 壁挂式机器人喷涂作业示意图.....	35
图 4.8 滑轨式机器人实例.....	35
图 5.1 中涂站机器人产线布置.....	40
图 5.2 现场布局图.....	40
图 5.3 落地式机器人的现场实例.....	41
图 5.4 托架结构示意图.....	49
图 5.5 行程开关现场布置示意图.....	50
图 5.6 台车检测开始.....	50
图 5.7 程序图	53

插表清单

表 1.1 市场主要系统集成商配置机器人使用情况.....错误!未定义书签。

表 4.1 机器人参数举例..... 24

表 5.1 输送系统参数..... 37

表 5.2 方案比较 39

表 5.3 系统配置 47