

# 机械手动态应用综述

自动化搬运工序的魅力

Grippers in Motion—The Fascination of Automated Handling Tasks

[德] 安德烈亚斯·沃尔夫 (Andreas Wolf)

[德] 亨利克·雄克 (Henrik Schunk)

著 夏明劼 译

# 序一

本书在原有的基础上增加关于抓取和搬运的技术内容是为了扩展我们在自动化工业领域已经发行的专业书籍。我们对于抓取技术的热情始于在 1983 年首先研发并标准化的机械手，专业抓取技术的来源和根基是基于我们客户的复杂需求。本书的目的不仅是给予生产领域的专业人士关于全球自动化的一个展示，也是为了让企业领导、消费者和学生对此领域增加一些了解。因为对于纯粹自动化生产系统的识别会变得越来越艰难，本书内容有助于在一个更广阔的基础上培养对于此技术的理解。横跨各个领域和专业性的限制在未来必须给予重视，以此才能充分计划和应用相关技术。

搬运技术的魅力在于搬运本身是为人们所熟知的。搬运工作是我们日常生活的一部分，每天都在我们的日常工作生活中发生成百上千次。搬运技术让生产流程变得越来越容易，所以它对我们来说也变得越来越重要。对于一个中型的企业来说，我们是有长期目标性和持续发展性的。这使得我们更关注于在未来智能工厂中的人机协作和智能信息安全以及最大限度的柔性生产，这些也成为了未来抓取技术中的关键指标。我们的任务是创造高效并且安全的自动化解决方案，让我们的客户可以实施优化的自动化生产流程。对于 SCHUNK 公司来说，它涉及了所有自动化生产领域，如在医疗实验室、食品生产、车辆制造中的研发，并在这些领域中提供了自己的产品。我们的客户在全球范围内都能购买到我们的产品，并且得到备件和售后维护的技术支持。

本书只能提供成千上万个抓取系统可能性中的一些缩影。对于更深入的问题，我们的员工会很愿意提供另外的指引和信息。我借此机会感谢所有为本书提供信息的人员，所有为本书出版提供支持的公司和研究机构也应该得到我们的感激。另外，我还感谢 Robomotion 公司的员工，他们帮助和支持 Wolf 博士提供了建议和案例。

Henrik Schunk  
2018 年 4 月于内卡河畔劳芬

## 序二

对于未来生产工序上的需求是一直在增长的。未来生产中对于高柔性、高质量和低成本提出了要求，原因在于产品的多样化和工序时间缩短的需求。对于生产低成本的转变必然会降低生产柔性、提高物流成本以及无法保证产品的质量。此外，人工成本在低人工成本的国家也在持续上升，工作的危险性情况也成为关注因素。

从欧洲发生过的危机中学到的经验也推动我们越来越关注本地的生产。与其他欧洲国家相比，德国超过 20% 的本土生产产品的比例可以作为其他欧盟低劳动密集型工业国家的榜样。它的创新型公司和有市场竞争力的产品使德国在欧洲危机中占有十分有利的地位。以此作为延伸，它也成为很多工业化国家的一个政治目标，即希望把工业生产从低劳动报酬的国家重新转移回国内，从而增强国内本土的制造能力。然而，本土化生产所产生的高工资使得在老龄化社会的条件下，一种新的生产技术成为了需求，那就是使小批量多样化的工业生产成为可能。

机器人提供的柔性解决方案满足了这些要求。机器人起源于汽车工业和重工业生产领域中，现在已经渗透到各种领域，当然也影响了中小型产品生产中的核心领域。目前，必须关注的是工作生产强度，特别是老龄的工人是否能承受工作中的高强度体力输出。因此，对于研究手动工具技能的生产概念也成为必需的基础要点。

创新管控机制和安全概念使人机协作变得经济可靠。硬件成本会一直降低，计划工具和仿真环境使在应用的准备环节中更高安全层次的细节计划和仿真成为可能。精准的机械手仿真中，参数化使机械手的开闭行为具象化了。

机械手作为“应用执行者”会变得越来越重要，也可以作为搬运系统中的 APP 来看待。这里最严峻的因素是需要创造一个稳固的模块化系统作为搬运系统中经过验证的基本组成部分。这样可以节约工程师宝贵的整机研发时间，同时也意味着他们能够依靠这些经过长期验证的组件，保证其在应用中的高可用性。

这种的高可用性成为在精准制造领域中让用户满意的一个关键因素。在没有缓冲或是错误处理系统的生产链中，最小的错误都会成为致命的错误。这也是在自动化生产中，为什么每个自动化组件都有自己重要的位置。

本书的作者成功地介绍了自动化搬运的历史和近年来自动化搬运技术的发展。在自动化领域中未来的组件，如机械手和搬运系统，是我们走向未来自动化生产的一个进阶石，简而言之，它促进了工业 4.0 的发展。更进一步说，先进的电动机械手或是机械手中集成传感器的发展也是向更好的过程控制迈出了一大步。

本书提供了生动的案例，让读者能够更容易理解生产设施的计划和设计；本书通过介绍创新技术展现了如何研发新的生产工序和生产方法；本书在研究和教育领域也给老师和学生提供了一些新的思路 and 想法。

Fraunhofer 研究所的研究网络对于这些领域的研究已经给出了出色的研究结果和研究框架。不管是作为技术的提供者还是技术的使用者，中小型企业的很多创新也会对这个领域的发展做出一定贡献。设备和工厂的使用者会成为开发出这些技术的最大潜能。

Prof. Dr.-Ing. Bauernhansl  
2018 年 4 月于斯图加特

# 序三

在十多年前我们创建了 Robomotion 公司，从而有机会和 SCHUNK 公司一起撰写本书。最初，只是打算把它归整作为我在斯图加特大学教学课件的补充和完善。由于专业出版社的相关部门和出色的图书出版机构提供了此书出版的可能性，我能够和 SCHUNK 公司以及 Robomotion 公司的专家一起为此工作，本书合适地展现了双方的专业知识和自动化搬运技术中的相关案例。

目前，有很多和数字化生产相关的关键词已成为了其衡量准则。必须要说明的是，其中有很多已经变成了现实，并且成为了驱动创新的一些因素。在本书中，可以概略地看到自动化生产是如何实现的。对此感兴趣的读者，可以在第 1 章和第 2 章中看到关于自动化生产的基本需求和关于此项新兴技术的一些历史背景介绍。如果你有更深入了解的兴趣，需要知道自己公司中自动化项目如何实施，也可以在第 3 章和第 4 章中找到答案。整个工序会被系统性地予以阐述和解释，从工件开始，继而介绍机械手和前端手指的内容，最后联系到机械臂系统。在第 5 章中，作者也以目前的眼光对未来的自动化技术进行了描绘。

世界上没有一本书能够从每个方面阐述自动化技术，也不可能举出所有自动化技术方面的案例。然而，本书从基础方面引入自动化项目，阐述了自动化技术的概况，展示了从工件到机械手手指设计，从机械手到机械臂等整体的安全单元。“可用”将会很快成为对于所有自动化组件制造者的一个熟悉词汇。这意味着集成商能够把所有可用元件组合起来，组装成一个整体可用的解决方案。在很多应用方案中，这已经变成了现实，如柔性焊接机器人、可用的物流模块化软件，用于连接多个机器人。当然，如果没有机械手硬件以及传感器和原料供应，这些也并不能成为现实。对于可下载的用于工业的 APP 还需要一些时间来开发。现在，仍然有太多的不同用户需求和应用需要被涵盖。而相对的，针对每个应用的研发，硬件和软件又缺乏用户的判定。基于此情况，作为第一步，特殊功能组件范围的不断稳定增长，为集成商提供了机会，让他们不用再去关注功能组件本身。本书展现了其发布之前近 10 年中取代之前技术的前沿技术发展。

在此，感谢 SCHUNK 家族和他们的员工让我有机会能够参与本书新版本的编辑。关于这本书的内容和 Henrik Schunk 先生的讨论以及一起合作的努力一直都特别有结构性，也特别值得。同时，还要感谢 Ralf Steinmann 先生和 Ralf Becker 先生的协作和观点分享。Fellhauer 先生提供了关于传感器系统方面宝贵的信息；Letsch 女士和 Srouji 先生为本书的可视化材料修订做出了贡献。我也要感谢所有为本书的出版提供了素材和

图片，并允许出版发布的公司。如果没有他们，本书将会缺少很多优秀的经典案例。

我感谢斯图加特 REFORM DESIGN Grafik GmbH 公司提供了精彩的图片，并且特别感谢 Luise Marianek 女士和 Christian Kellner 先生，他们对所有图片进行了准备和修改。

特别感谢我的父亲，他一直陪伴我一次次地耐心阅读和修改。也感谢 Deak 女士和 Jonas Eckstein 先生提供额外的修订协助。除了我父亲以外，还要感谢我的家庭在精神上的支持。

Robomotion 公司的员工和管理层在此书上也做出了贡献，因为书中的很多实例来源于他们的工作经验。与本书的第 1 版相比，他们的贡献让此书的新版本显得尤为不同。

我想把本书献给 Schmeer 先生，他是 Robomotion 公司的第一个员工，也是一个公司从起始阶段到现在始终充满激情的员工，他为公司奉献了他的一生。本书中的很多应用都是由他提供的。

Dr.-Ing. Andreas Wolf  
2018 年 4 月于 Leinfelden

# 译者序

对于大多数工业自动化领域的从业者来说，在自动化生产、自动化物流等技术领域，从宏观上都有较为清晰的理解，至于这些技术在过去几十年的发展历程以及发展现状，相信也会在每个人心里留下各自与众不同的独特印记。

本书对工业自动化领域中一个细分领域“自动化搬运（自动化上下料）”的技术、发展状态、相关硬件设备以及未来发展趋势作了从理论到实践的完整框架性描述和解释，深入浅出地为这个领域描绘出了一幅生动的画像。而我作为 SCHUNK 公司中国子公司（雄克精密机械贸易（上海）有限公司）的一员，很荣幸有机会成为本书的译者。

中国的工业自动化进程正在飞速发展，而在此进程中，一个很显著的特征就是工业领域专业细分的多样性变得越来越明显。随着这种趋势的延续，自动化搬运技术所涉及的各种硬件设备、工业 APP、人工智能算法、工业物联网的衍生信息需求等，都会成为这个细分领域在未来的发展和突破方向。

本书针对自动化搬运这个话题，对现有的设备及技术阐述得特别清晰，因此从另外一个角度来说，它也可以作为一本专业教材来使用。但更重要的是，在此基础上，我们需要有一种开拓精神，使这个细分领域朝着更智能、更可靠、更安全以及更经济性的方向推进，这也是我对整个工业自动化发展方向的预期和愿景。

夏明劼

2020年1月5日于上海

# 目 录

## Contents

### 第 1 章 搬运工序.....1

1.1 搬运——一个没有附加价值的工序? .....	3
1.2 搬运技术的发展 .....	8
1.3 是什么驱使搬运技术的自动化? .....	10
1.4 搬运和生产技术的术语 .....	16
1.4.1 柔性 .....	16
1.4.2 EPEI——“每个部件,每个间歇” .....	17
1.4.3 自动机 .....	17
1.4.4 搬运 .....	17
1.4.5 搬运技术中的子功能 .....	17
1.4.6 搬运系统 .....	18
1.4.7 抓取系统 .....	18

### 第 2 章 机械手——机器人的“APP”.....21

2.1 抓取技术的历史发展 .....	22
2.2 机器人的历史 .....	29
2.3 机器人正在占领市场 .....	40

## 第3章 机械手概要.....49

3.1 工件作为起点.....	53
3.1.1 搬运技术中的工件分类.....	53
3.1.2 搬运任务的定义.....	59
3.2 机械手手指作为执行元件.....	64
3.2.1 吸附式抓取和反向抓取.....	65
3.2.2 力和形位的有效表面.....	68
3.2.3 机械手手指的数量.....	78
3.3 抓取用途的机械手.....	82
3.4 力的传递.....	86
3.4.1 夹持力.....	87
3.4.2 夹持力的产生.....	91
3.4.3 允许的抓取力.....	94
3.4.4 夹持力和能源.....	97
3.5 抓取范围.....	101
3.6 抓取时间.....	103
3.7 抓取的情形.....	106
3.7.1 抓取的情形及工件的自由度.....	107
3.7.2 抓取和经济效率.....	110
3.7.3 抓取中的精度要求.....	115
3.7.4 运动中的工件抓取.....	117
3.7.5 机械手和可用负载.....	118
3.8 机械手作为生产信息来源.....	119
3.8.1 搬运工序中的传感器.....	121
3.8.2 检测工件的传感器.....	127

3.9 机械手的选择·····	130
3.10 抓取和安全·····	139

## 第 4 章 运动的附加值····· 147

4.1 运动的影响·····	150
4.1.1 惯性的影响·····	150
4.1.2 工艺力的影响·····	155
4.1.3 运动的中断·····	162
4.2 让运动成为可能·····	165
4.2.1 线性运动·····	166
4.2.2 旋转运动·····	168
4.2.3 运动关节·····	175
4.2.4 运动的计划·····	182
4.3 布局·····	190
4.4 工件的处理·····	192

## 第 5 章 抓取和搬运技术的未来····· 197

## 参考文献····· 203



## 第 1 章 搬运工序

我们每天都在成百上千次地搬运东西，“搬运”这个动作已经成为我们日常生活的一部分。

当我们按下开关上的按钮到打开的位置，把咖啡杯移到嘴边，做出倾斜咖啡杯的动作（图 1.1）。同时我们的眼睛一直关注杯子的位置，我们的大脑毫不费力地计算抓取的位置和杯子移动的路径，从而杯子在移动过程中不会碰到其他物体。这些一系列下意识的执行动作的过程告诉我们，这些动作太过平常，以至于在生产中使用起来是有些荒谬的。

但是仔细地审视这些例如“抓取咖啡杯”的任务，我们就会发现，检测、移动、抓取杯子这些流程对机器其实提出了严峻考验。所以在家务劳动中，机器人并没有用来熨烫和折叠

衣服，这也是情有可原的事情。

毫不意外，这些“无用”的，或者专家口中的“没有附加价值”的抓取工序仍然大量充斥在工业领域中。这些工序指的是那些组件不被加工的工序，换言之，也就是组件形状在工序中不被改变。在生产中，每次当工件被转移、储存、传输或组装时，都会发生搬运的动作。

工件在此过程中会被抓取和移动，通常来说，这些动作需要靠人力来执行。为了保持和工件数量与工资涨幅的同步性，人们也投入精力去研究在生产中如何使抓取次数变得最少，并且专注于当前组件相关的工序操作。

过去在加工中心中的加工生产就是一个例子。没有工人的干预，这些加工中心可以在单



图 1.1 移动咖啡杯（来源：REFORM DESIGN<sup>1</sup>）

个装夹状态下完成一个完整的磨削工艺。工件在加工中心之间的传输或者每个加工中心中的上料工序可以被省去。工件质量得到了提升，工序中发生的错误率也得到了缩减。把多个工序集成在同一个加工中心中使生产力得到了显著提升。这些带来了生产中的高成本投资和非柔性的生产计划，因此加工中心的发展遇到了瓶颈。

然而，对于由多个不同独立组件组成的产品，装配带来的生产成本仍然占总成本的很大一部分。对此，制造者更倾向于向系统供应商购买复杂的组装件，从而能节省装配工艺产生的成本。

基于工业和产品，这些装配工艺大多在低工资收入国家进行。在过去几十年中，远东的经济蓬勃发展，在那里重新建立工厂并不是白费功夫。

甚至在中国，目前生产自动化的压力和对人工作业更严格的要求促成了更高的产品质量等级和高速增长的人工成本，这也对生产力的提升提出了要求。

搬运任务的自动化是众多可用设计解决方案中的一种。但是对于产品设计本身，使用额外的生产方法和工厂管理也是十分重要的因素，它们也能提供基于现实情况的一种解决方案。来源于管理咨询公司的一种新想法指出，在过去的工厂设计中，关注点仅仅是精益制造和高效制造。

生产技术和市场需求以及产品范畴相适应，需要结合相关的管理措施，这才是唯一正确并且有生产力的生产方法，这也是一个逐渐占据主流的理念。因此，纯粹的管理咨询公司中，有越来越多的生产技术专家加入管理咨询团队，这些技术专家帮助管理咨询团队通过检验在生产设备中使用的技术手段来提高整体效能。

这些工作的共同目标是防止由“无附加价值”工序引起的生产力浪费。在很大程度上来

说，所有的“附加价值”工序（指的是能够增加产品价值的工序）都需要第二个动作，这也是管理和技术优化措施的焦点。从经济角度来说，这些管理和技术的延伸正持续不断地遇到限制。

首先，在工序优化程度上就存在局限性。当然，对于进一步提高生产力，技术工具就成为了必需品。一直以来，系统界限的选择成为了一个影响因素。以提升工序为目标，在复杂生产中大幅提升生产效率几乎是不可能的，只能以小步推动的形式来进行，如人工工序变成了自动化工序。这个方案需要检验制造工艺和产品结构，或者优化生产工艺中的系统界限。

本章介绍了对于当代搬运工序中可用自动化组件的基本理解。进入到自动化组件的世界从介绍优化搬运工序开始。本章也审视了搬运技术的发展和在工业生产的所有领域中发展的源动力，它对于阐述此项技术未来发展的驱动力和得到未来组件发展的蓝图有所帮助。这个工序本身将会被定义，工序中相关的术语也会得到解释。

## 1.1 搬运——一个没有附加价值的工序？

在生产中，搬运一般被认为是一个必需的过程。尽管在某些特殊的工艺中，搬运可以使产品产生附加价值，但是在更多的情况下，搬运这个工序更多地是造成产能的浪费，而并不是对产品本身产生附加价值。这也是为什么在精益生产中，人们认为工件从一个工位到另一个工位的转移是一种不经济而且需要尽量避免的行为。这种工位的转移通常指的是工件从一个加工中心到另外一个加工中心的转移，而很多生产现场优化措施的目标也是缩短工位之间的距离或是尽量减少搬运动作，如 Kaizen 方法

就是一个例子。

工件搬运被视为“产能浪费的一个永恒来源”，曾经是 20 世纪 60 年代装配技术研究的一个焦点。目前来看，当时的主要观点核心是避免在生产工序、工件装配中的设备空闲时间，如对于机床的上下料时间。

搬运技术的重要性被认为低于真正的生产技术和加工工艺，从而其重要性是次等级的，

因为搬运动作本身并没有对产品有增值的影响。生产中所必须花费的时间分为加工时间和搬运时间（图 1.2）。加工时间指的是加工机器在生产中的运作时间，换句话说，这个过程是工件自身产生改变从而产生价值的过程（比如材料切割、形状重塑、镀层等）。加工时间可以进一步被划分成预处理时间、加工时间和后处理时间。

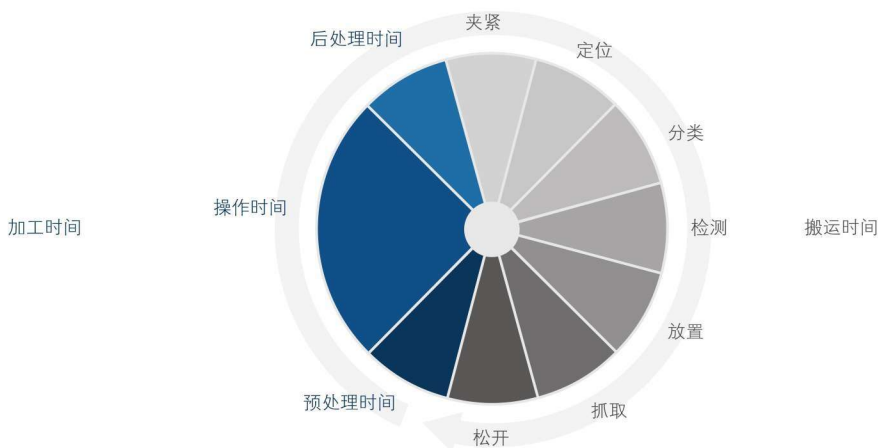


图 1.2 加工时间（操作时间）和搬运时间（预处理和后处理时间）

例如，钻床主轴被驱动到预定的转速和位置贴近工件进行实际金属加工工作，如在金属上钻一个孔，是在加工时间内完成的。过去，这些机器的空闲时间一直被缩短到最小以增加机器本身的效率和产出。但是，对于缩短机器本身加工时间的问题也在一直被推动着。例如，这个目的可以通过改变工具材料加工的手段来实现。

机器空闲时间和搬运时间进行的不同任务，可以针对在加工中心中工件被卡盘等夹具夹紧中的必需步骤来进行细分。通常来说，这些任务是在机外执行的，也包括为了确保工件质量而进行的任务，如图 1.2 所示。每个生产计划者都想要根据机器本身的主加工时间来协调同步机器的空闲时间。例如，这个过程包括使用上、下料设备，在加工设备运行时，预先将工件搬运到预加工的位置等待加工过程的完成。

没有被优化过的生产工序会导致加工设备必须等待工件上下料的过程。假设机器人在注塑机加工工件中除了完成工件搬运动作以外还需要完成其他工序任务，如移除浇注口，这个动作要么是必须在一个更短节拍时间内完成，要么机器人必须将整体工件放置到单独的工位来进行处理。在这个过程中，机器人必须在下一个工件搬运准备就绪之前也达到预定的搬运准备就绪状态。

对这些工序的计划需要对工序时间的精确分析，因为让机器人在加工中心加工时间中的等待或是让加工中心等待机器人上料都是没有意义的。

在任何情况下，不同类型的组件和它们所对应的加工时间都会成为必须要考虑的因素，因为加工设备通常会用于不同组件以及对应不同的工序任务。

为了让设备空闲时间在不可避免的情况下变得更有生产效率，自动化解决方案就成为了一种需求，它使操作执行的部件和加工设备分离开来。在加工之前预存储和加工后缓存工件材料使人工操作和机加工操作在工序周期结束后的立即分离成为可能。这种在加工设备上缓存和填充工件材料的方法也作为在生产线上预防干扰的一种缓冲方式。根据精益生产的方法，这种类型的缓冲方式并不具有优势，因为它阻止了人们把眼光放在当前工序操作上，从而忽略了工序本身可能发生的错误。这意味着这种缓冲方式允许不可靠的工序本身产生浪费，这种浪费可能在事后才能被发现，或者直接被忽略了。这种浪费只有在移除了这些缓冲措施之后才能被发现。从这方面来看，这种减少生产错误但并不在错误发生后暂停生产的缓冲措施对于价值链或是生产工序链是有害的。

对于其他没有材料缓存或是储备并且包含连续生产流程的生产工艺，对生产技术和独立功能部件提出了更高的要求。在现实的技术和机械部件领域中，大多都是通过对功能部件长时间测试的方式，来保证其具有最高的工艺可用性。

这说明在没有缓冲措施的生产线中，存留的搬运工序的重要性是在增加的，而且高的功能可用性将会成为自动化操作中的一个焦点。

例如，一个机械手抓取工具被安装在机器人末端，执行操作设计的工程师将会依赖那些在数据表格中具有能满足高节拍性能的组件。因此，从所有者总成本（TCO）的角度来说，组件的价格并不是唯一的因素，组件的使用周期及其故障频率也是感兴趣的要点。通常来说，对功能性组件的独立自主设计有一定的缺陷，相对于经过长期测试验证的标准产品而言，它缺少广泛和有效的验证，并且不够成熟。

独立自主的产品设计，如机械手，需要被避免，不仅是由于成本原因，也由于标准产品更具有经济性，从而不会给整体研发成本带来

太大的影响。但是，对于批量情况而言，可能会有不同的结论。在这种情况下，所有的花费都将视为成本的影响因素，包括非标准件的储存费用或是任何长期测试费用。

这说明了搬运应用的设计对未来工序的可靠性和总体设备效率（OEE）有着很大影响。

通常来说，OEE 数值是一个 0~100% 的指数，数值越高表明状况越好。在实际生产中，实际数值在有些情况下是十分低的。对于搬运工序的进一步审视是十分重要的，因为搬运工序对时间、效率和数量三个参数都产生了影响。这使得可靠的搬运工序能够产生良好的总体设备效率（图 1.3）。

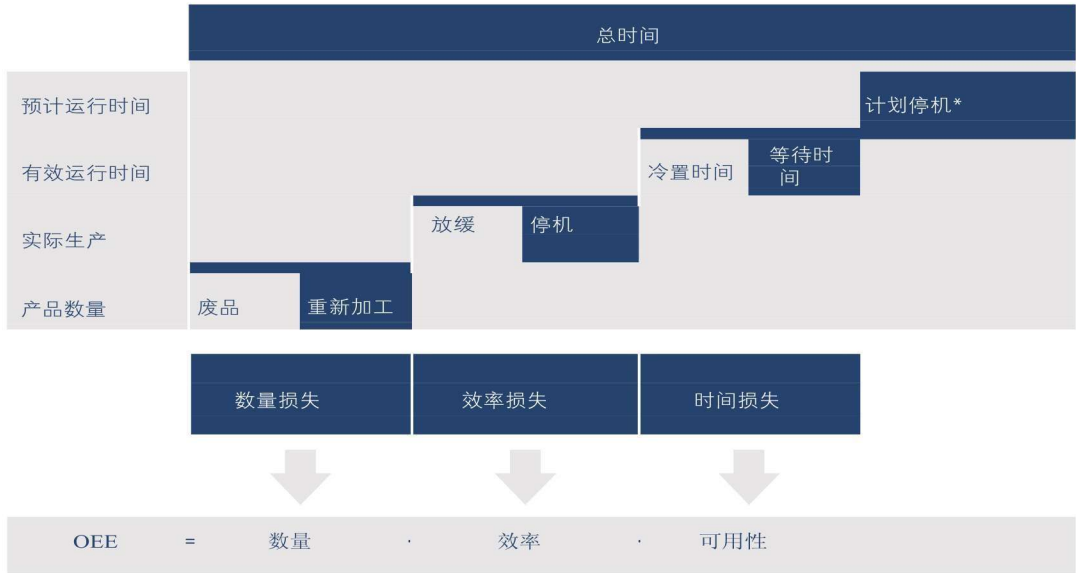
一台加工设备中协同的搬运工序越多，独立工序的可靠性就显得越重要。这意味着经过测试的组件和组件功能扮演着越来越重要的角色，否则有效运行时间或性能将会降低。

在现代搬运系统中由于高的动态性使得短的生产周期越来越多。最后的结果就是，加工设备的利用率得到了提升。

表 1.1 中显示了不同搬运系统的加速度和速度大小。

到目前为止，纯运动学已经成为了搬运工序中最严苛的因素，如果从更整体的角度去衡量 OEE，定位精度等条件会被放在首位。甚至对于一个简单的打包任务，其中的定位要求在几毫米，可能也会有定位误差，它可能会引起累计误差的叠加，从而导致在打包工序中的错误中断。更进一步地去审视由高运动性决定的高节拍工序（如用机器人每分钟搬运 100 颗果仁糖），我们也会在高质量的工厂里看到在每一层托盘上可能会出现一些工件定位误差。

由于这个原因，搬运工序不应该单独由工件上下料的频率来进行分类。如果由于抓取技术和有效的传感器的原因，搬运工序变得对人们来说越来越直观（视觉和触觉），那么抓取任务有时会变得特别复杂。



\*计划的停机时间不被计入OEE衡量标准

图 1.3 在生产中 OEE 的数值判定的图表说明 (来源: fme AG<sup>5</sup>)

表 1.1 不同驱动系统及其动态响应性能比较

驱动类型	气动	传送带	电机丝杠传动	外部驱动	直线电机驱动	并联机器人
中间位置	需要外加特殊结构	可行	可行	需要外加特殊结构	可行	可行
最大速度 / (m · s <sup>-1</sup> )	≈1.2	≈3	≈2.5	≈3	≈5	≈10
最大加速度 / (m · s <sup>-2</sup> )	-	≈10	≈10	≈10	≈100	≈120
定位精度 / (mm · m <sup>-1</sup> )	终止位置 机械限位	0.1	0.05	-	≈0.05	≈0.5

为了提高对搬运工序的分析能力，搬运工序分为不同的组成部分。这里可以把搬运工序分为单个部分：抓取、移动以及放置（图 1.4）。

在抓取阶段，工件本身和抓取状态都是十分重要的因素。在抓取中工件所展现出来的特殊特征和特性必须被考虑到（如质量、几何形状、敏感性等）。此外，抓取场景也必须考虑，比如工件的可获取性和工件的运动。

运动阶段会由搬运任务来定义，所要求的节拍时间及其所必需的加速度数值在此显得尤为重要。根据运动路径和工件的质量，工件表面和机械手手指之间会产生不同大小的接触力。

整体趋势是使运动时间尽可能短，换句话说，在搬运系统中需要选择可能的最大的速度和最短的运动路径。在某些情况下，与抓取工序有关的其他因素也很重要。因为如果抓取工件的时间延长，有些工件会对与其接触的机械手手指在两者的接触表面产生黏性力。对于高温工件的抓取，需要确定其最长的抓取时间，这是为了避免由高温工件热传递导致的机械手损坏。

在放置阶段，与抓取阶段类似的因素会对其产生影响。一方面，机械手的张开动作耗费的时间是一个重要影响因素，因为它可以让整个节拍时间变短。然而，重要的是，对于不同

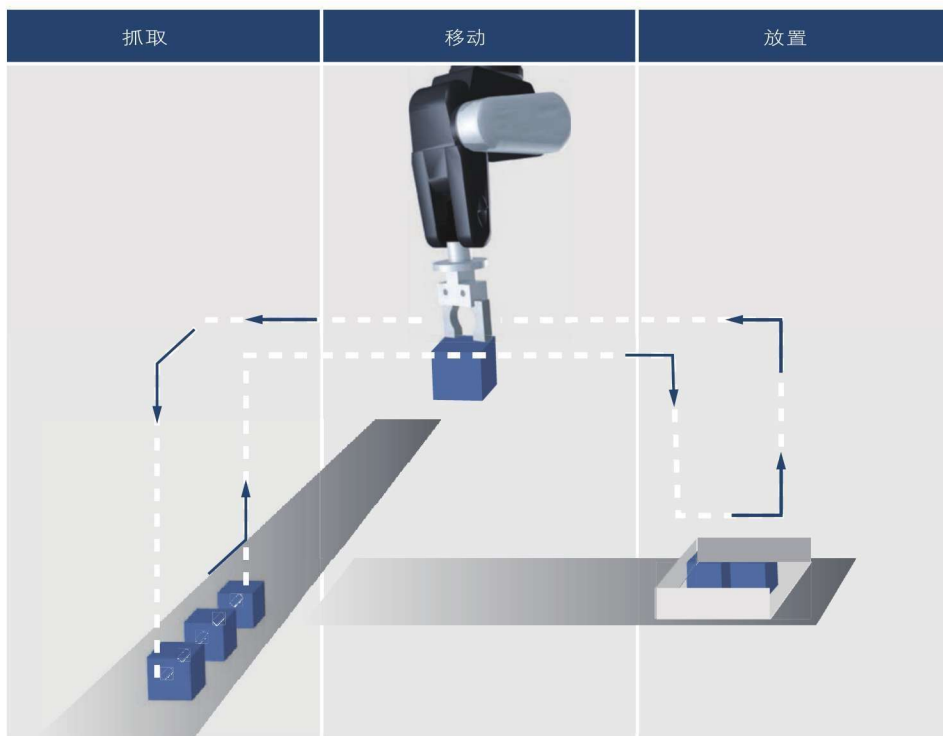


图 1.4 工件从抓取到放置过程中的运动

类型的机械手而言，由于机械手结构的不同，机械手关闭动作所耗费的时间可能和其打开动作所耗费的时间不一样。另一方面，工件的可获取性对于机械手选型的原则又十分重要。特别是对于短的搬运时间，相对于运动阶段所耗费的时间，花在抓取和放置阶段的大量时间会成为一个重要因素，如在并联运动系统中的搬运任务。其中对抓取放置所花费的时间需要精确定义到毫秒，同时整个抓取节拍时间会不必要地增加。

为了正确地定义抓取和放置阶段，对工件特殊的特征、可获取性的检查是十分有必要的。这些因素将会在第 3 章中介绍。

对于抓取，最基本的是确定在工件表面哪些区域可以被抓取。然而，弄清楚一个机器人是如何在加工区域被定位的也是十分重要的。换言之，需要弄清楚机械手是如何接触到工件的。只有在此之后才能确定机械手手指能够张开的行程大小、机械手手指能够多稳固地夹紧

工件。机械手手指的张开对于放置工件也会十分重要，例如，如果在放置工件的动作中，放置动作必须在一种干涉特别严峻的条件下实现。整个工序可能会使用传感器进行检测，并使用相关的安全技术用于应对不同的危险情况。

由于效率原因，移动过程一般都会在短时间内完成。但是由于产品质量原因，工件在移动过程中的安全性也需要被考虑。图 1.5 所示为一个持续不断的抓取流程，展现了机器人位置是如何持续变化的。

相对于抓取力而言，在这个过程中，在机器人的行进路径上，加速和必要的减速是很严格的阶段。例如，敏感工件可能会由于过高的加速度而导致损坏。另外，也有可能是在过高的侧向加速运动中，需要使用更高的夹持力来使工件被稳定夹持以避免工件在运动中掉落。但更高的夹持力有可能会致工件被机械手本身损坏。

这些因素会在第 4 章中详细阐述。