

# 搬运机器人抓取末端控制系统设计分析

朱宏武

(广东嘉腾机器人自动化有限公司, 广东 佛山 528300)

**摘要** 文章提出了一种搬运机器人抓取末端控制系统的设计方案, 在简单说明该控制系统的总体框架设计内容的基础上, 从系统的硬件部分以及软件部分这两方面入手, 对该搬运机器人抓取末端控制系统的具体设计方案进行了探讨, 提出了基于匀速抓取阶段、反馈减速阶段以及应力松弛阶段的不同控制算法, 确保系统在运行期间可以控制搬运机器人、抓取末端执行器完成对货物的精准抓取, 并降低货物损失。

**关键词** 搬运机器人; 抓取末端执行器; 抓取末端控制系统; 传感器

中图分类号: TP24

文献标志码: A

文章编号: 2097-3365(2024)08-0004-03

现阶段, 搬运机器人的开发与应用, 促使物流企业可以在无人操作的情况下完成 24 小时不间断的系统化搬运任务, 运行成本随之下降。然而, 一些大型货物搬运机器人难以适应多元化的货物搬运作业要求。为确保搬运机器人可以高质量完成对小型货物的精准、高效、无损搬运, 开发设计一种搬运机器人抓取末端控制系统极为必要。

## 1 搬运机器人抓取末端控制系统的总体框架设计

本研究设定的搬运机器人抓取末端控制系统总体框架如图 1 所示。整个系统可以划分为两部分, 即硬件部分、软件部分。其中, 本系统的硬件部分主要由主控制器、货物位置感知器、驱动控制器以及抓取末端压力传感器等结构所组成; 本系统的软件部分重点包含抓取末端的控制算法, 具体有匀速抓取阶段控制算法、反馈减速阶段控制算法、应力松弛阶段控制算法。

搬运机器人抓取末端控制系统的实际运行期间, 需要依托对货物位置感知器的应用, 促使搬运机器人

能够大致确定出货物的空间位置, 并在主控制器、驱动控制器的作用下, 让末端执行器移动到相应位置; 抓取末端压力传感器对货物是否存在于末端执行器抓取范围内以及所需抓取力度大小进行判断, 以此完成自适应货物的抓取与搬运。

## 2 搬运机器人抓取末端控制系统的具体设计方案与实现

### 2.1 系统的硬件部分设计

#### 2.1.1 主控制器

在该控制系统中, 主控制器主要承担着对搬运机器人以及抓取末端执行器运动方向进行控制的任务, 切实参考搬运货物的空间信息, 完成移动方向的自动、合理设定, 实现对障碍物的躲避, 避免发生碰撞问题。在投放的主控制器内, 设置了 28 个 I/O 端口, 主要承担着对抓取末端压力传感器、货物位置感知器、驱动控制器所反馈的数据信息进行统筹管理与分析的任务; 设置了 16bit 定时器 (2 个), 以此保证搬运机器人可以在静止状态、移动状态下均维持姿态的平稳; 设置

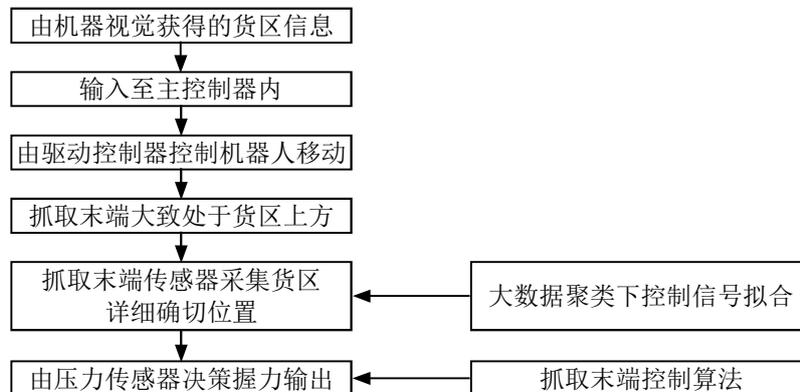


图 1 系统总体框架设计图

了 USART 通信接口（3 个），主要承担着对极其视觉数据、抓取末端执行器运行数据进行集成管理的任务；设置了 STM32F 核心控制芯片，由于其所具备的信息数据处理能力保持在偏高水平，因此可以控制搬运机器人同时完成货物的抓取搬运、避障移动等操作。同时，STM32F 核心控制芯片支持外部 USB 扩展，为后续控制系统的升级、维护工作的便捷展开提供有力支持；内部原件丰富且集成性高，实际运行中所产生的能耗偏低，应用优势明显。

### 2.1.2 驱动控制器

对于主控制器而言，其在实际运行期间主要依托对机器视觉的应用，完成对不存在障碍物遮挡的货物搬运线路的单纯规划设计，而无法实现对抓取末端执行器动作的直接驱动，促使抓取末端执行器能够达到指定位置。基于这样的情况，为确保抓取末端执行器能够迅速、精准执行来源于主控制器发出的指令，主要在该系统内引入了驱动控制器，结合对直流电机大马力扭矩的应用，促使抓取末端执行器可以平稳运行。实践中，在机身两侧分别加设一个电机，并保证电机分别对货物搬运期间的抓取末端执行器移动方向、移动速度进行独立控制。

引入桥型的内置电路，在实现对电机运行状态进行检测与控制的基础上，在三极管的支持下完成对电机翻转的控制。此期间，所设置的 2 个电机中，存在任意一个电机发生运行故障问题，PWM 脉冲也会产生相应波动，控制电机速度的平稳性。投放双路驱动设备（DBH-03 型），保证抓取末端执行器可以在不同速度的条件下始终保持在平稳移动的水平；内置光耦离合器，避免货物搬运环境内所存在的其他获取对搬运机器人、抓取末端执行器的移动与运行会产生干扰，同时确保短距离制动的有效性提升。将极限电压设定在 22 V；将固定电压设定在 8 ~ 18 V。

### 2.1.3 货物位置感知器

在抓取末端执行器与货物之间实际所具有的距离达到低于 30 cm 的状态下时，主控制器所拥有的机器视觉难以实现对抓取末端执行器与货物之间距离大小的准确感知<sup>[1]</sup>。基于这样的情况，为确保抓取末端执行器能够精准抓取货物，主要在该控制系统内引入了货物位置感知器，即集成锁相环路解码器 LM567 以及红外扫描装置等，保证能够迅速向主控制程序传递货物的精准位置信息。

在抓取末端执行器的边缘位置设置红外发光管的发射端、接收端，在货物尚未进入抓取末端执行器的内部时，红外线输出端所发出的信号能够正常被接收端所接收，此时输出端为低电平，主控制器继续驱动

抓取末端执行器实施对货物的抓取作业。在货物进入到抓取末端执行器的内部后，受到货物遮挡的影响，红外线输出端所发出的信号无法正常被接收端所接收，此时输出端为高电平，在暂时存储卡的支持下，数据向着信号集成中心转移，主控制器对抓取末端执行器抓取货物的动作进行控制。

### 2.1.4 抓取末端压力传感器

在抓取末端执行器的实际运行期间，势必会与抓取的货物产生接触、碰撞。为确保整个搬运机器人具备较长的使用年限，抓取末端执行器主要使用了合金材质，刚度大、硬度大且至质量轻。与之相对应的是，由于抓取末端执行器本身所具有较强的刚度，因此在与抓取货物接触碰撞期间，会对该货物产生一定的损伤，且抓取末端执行器的金属表面光滑程度明显，与货物之间并不会产生相对较大的摩擦力。基于这样的情况，主要将柔性橡胶铺设在抓取末端执行器的内部，应用设定的柔性橡胶层，促使抓取末端执行器与货物相接触区域的摩擦力有所提高（将摩擦系数提升至 0.5 水平），同时也对抓取末端执行器的抓握碰撞力进行一定程度的吸收，实现对货物的稳定、完好抓取。

在此基础上，为更好地避免抓取末端执行器在抓取货物时对货物造成损伤，必须要确保设置的抓取末端压力传感器反应灵敏且体积相对较小<sup>[2]</sup>。基于这样的要求，在本系统的硬件开发阶段投放了 FRS-402 敏感电阻作为抓取末端压力传感器。在抓取末端执行器存在接触压力的条件下，力敏感电阻值会显现出随之下降低的变化趋势，能够承受的压力范围为 1 ~ 500 N。同时，接触力与电阻值变换之间存在线性相关的关系，为抓取控制算法的计算提供更为良好的条件支持。

## 2.2 系统的软件部分设计

搬运机器人抓取末端控制系统运行期间，整个货物抓取过程可以细化为三个阶段，即匀速抓取阶段、反馈减速阶段、应力松弛阶段，因此在本系统的软件部分，主要针对这三个阶段完成控制算法的设定。

### 2.2.1 匀速抓取阶段控制算法

为确保抓取末端执行器能够完成对货物的稳定抓取，需要确保末端执行器的抓握力能够匀速增加至最大静态抓握力水平<sup>[3]</sup>。在此过程中，末端执行器与货物相接触的接触力（ $f$ ）的主要变化过程为：

$$\frac{df}{dt} + \frac{e_1 e_2}{\lambda_1 \lambda_2} f = \frac{e_1 e_2}{\lambda_2} v_0$$

上式中，抓取末端执行器的恒定荷载使用  $\frac{df}{dt}$  进行表示；抓取末端执行器与货物接触时的瞬时弹性系数使用  $e_1$  进行表示；抓取末端执行器与货物接触时的延迟弹性系数使用  $e_2$  进行表示；并联条件下的柔性橡胶

的黏性系数使用  $\lambda_1$  进行表示；串联条件下的柔性橡胶的黏性系数使用  $\lambda_2$  进行表示；抓取末端执行器的抓取速度使用  $v_0$  进行表示。

在匀速抓取阶段，设定的初始条件为：

$$\begin{aligned} f(0) &= 0 \\ f'(0) &= v_0 \cdot e_1 \end{aligned}$$

上式中，力对获取的状态改变使用  $f'$  进行表示。

### 2.2.2 反馈减速阶段控制算法

受到惯性的影响，在抓取末端执行器达到最大静态抓握力后，接触力依旧会显现出持续提升的状态，这时的最大静态抓握力会低于抓取末端执行器与货物接触时的接触力<sup>[4]</sup>。与之相对应的是，抓取末端执行器需要迅速转入减速运动状态直至停止运动。在此过程中，抓取末端执行器的运动可以进行如下表述：

$$m_c x = F_{\max} - f$$

上式中，抓取末端执行器与货物的等效质量使用  $m_c$  进行表示；获取质量使用  $x$  进行表示。如果在  $t_0$  时刻能够得到最大静态抓握力与接触力相同，针对时刻  $t$  进行求导，能够得到的是，在该阶段抓取末端执行器与货物相接处的接触力 ( $f$ ) 的主要变化过程如下所示：

$$\frac{df}{dt} + \frac{e_1 e_2}{m_c \lambda_2} f = \frac{e_1 e_2}{m_c \lambda_2} F_{\max}$$

在反馈减速阶段，设定的初始条件为：

$$\begin{aligned} f(t_0) &= F_{\max} \\ x'(t_0) &= v_0 \\ x(t_0) &= v_0 \cdot t_0 \end{aligned}$$

由于上式的特征方程值保持在高于 0 的水平，因此结合对 MATLAB 求解特征方程的实施，可以获取到 2 个共轭复根，即  $\alpha \pm \beta$ ；以及 1 个实根，即  $k1$ ，解值如下：

$$f = F_{\max} - Y_1 e^{k1T} + e^{aT} (Y_1 \cos \beta T + Y_2 \sin \beta T)$$

上式中，力的变化常数使用  $Y_1$ 、 $Y_2$  进行表示； $t_0$  与  $t$  之间的差值使用  $T$  进行表示，结合对该阶段初始条件的计算完成相应数值的获取<sup>[5]</sup>。

### 2.2.3 应力松弛阶段控制算法

在  $t1$  时刻，如果抓取末端执行器的速度达到 0，且抓取末端执行器与货物相接触的最大接触力存在，则电机会自动转入锁定状态。与之相对应的是，抓取末端执行器不会再对货物进行抓握力的施加，此时的货物会产生应力松弛<sup>[6]</sup>。在此过程中，末端执行器与货物相接触的接触力 ( $f$ ) 的主要变化过程为：

$$\frac{df}{dt} + \frac{e_1 e_2}{\lambda_1 \lambda_2} f = 0$$

在应力松弛阶段，设定的初始条件为：

$$\begin{aligned} f(t_1) &= f_{\max} \\ f'(t_1) &= -f_{\max} \left( \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_1}{\lambda_2} \right) \end{aligned}$$

上式中，抓取末端执行器与货物相接触的最大接触力使用  $f_{\max}$  进行表示。

随着时间的推移，匀速抓取阶段的货物变形量会逐步显现出线性关系，而在发展至反馈减速阶段后，货物不会再继续产生变形<sup>[7]</sup>。基于这样的情况，综合前文所列表达式，结合对 MATLAB 推导求积分的实施，同时满足如下约束条件，即：

$$t = t_0, x' = v_0, x = v_0 \cdot t_0$$

在此基础上，可以获取到应力松弛阶段的货物变形量与时间变化之间的关系表达式，即：

$$x' = Y_1 e^{k1T} - e^{aT} (Y_1 \cos \beta T + Y_2 \sin \beta T)$$

参考抓取末端执行器在上述三个不同阶段中，获取变形量与时间之间的关系性，对抓取末端执行器的接触力、关节力矩输出进行合理控制，并在大数据聚类的支持下实现对信号的模拟，最终达到精准控制抓取末端执行器动作的效果。

## 3 结束语

本研究所设定的搬运机器人抓取末端控制系统可以划分为两部分，即硬件部分、软件部分。系统实际运行期间，依托对货物位置感知器的应用，促使搬运机器人能够精准定位货物的空间位置，并在主控制器、驱动控制器的作用下，让末端执行器移动到相应位置；抓取末端压力传感器对货物是否存在于末端执行器抓取范围内以及所需抓取力度大小进行判断，提高货物抓取稳定性与效率，避免损坏货物。

## 参考文献：

- [1] 赵培强, 崔永文, 潘帅. 基于 RFID 的工业机器人柔性搬运系统的应用与实践[J]. 自动化应用, 2024, 65(10): 30-33.
- [2] 李春晖, 吴志刚, 翁枫, 等. 双目-多运动副全向构型搬运机器人导引控制优化[J]. 微型电脑应用, 2024, 40(04): 132-134.
- [3] 宋振伟, 孙玉忠, 李永华, 等. 基于 Arduino 的智能物料搬运机器人设计及样机试验[J]. 机电工程技术, 2024, 53(03): 181-186.
- [4] 满文鏖, 李艳杰, 卜春光, 等. 基于动力学的搬运机器人运动规划控制算法与仿真[J]. 机械工程师, 2024(02): 40-46.
- [5] 张忠江, 张磊. 铁路货运列车自动搬运装卸机器人设计[J]. 中国科技信息, 2024(11): 85-87.
- [6] 兰天翔, 刘英. 基于机器视觉的智能搬运机器人设计[J]. 林业机械与木工设备, 2024, 52(03): 30-35.
- [7] 沈灿钢. 基于 ABB 工业机器人的物料搬运控制系统[J]. 信息系统工程, 2024(01): 12-15.