

机器人电极帽磨损焊接补偿方法研究

李 凯 王英奎

一汽大众汽车有限公司成都分公司 四川成都 618100

摘 要：本文针对一汽大众成都分公司焊装车间中，KUKA 大众版本 8.2.28 机器人电极帽磨损问题展开研究。提出基于三轴力矩监控结合大众 LIN SUCHEN 查找功能，实现静极臂磨损量测量，经过计算补偿给工具坐标 Z 向的方法。经实验验证，该方法有效提高了焊接质量与效率，具有一定的经济效益与应用价值。

关键词：KUKA 机器人；电极帽磨损；力矩监控；磨损补偿

引言

汽车制造是一个复杂且高度集成的产业，而焊接工艺在其中占据着举足轻重的地位。车身作为汽车的关键承载部件，其焊接质量直接关乎整车的安全性、可靠性以及耐久性。一汽大众成都分公司焊装车间作为汽车制造的关键环节，采用了先进的自动化焊接技术，其中 KUKA 大众版本 8.2.28 机器人搭配气动伺服焊钳进行点焊作业是其主要的焊接方式。

在长期的实际生产过程中，气动伺服焊钳静极臂所安装的电极帽面临着严重的磨损问题。由于电极帽在每次焊接过程中都与焊件直接接触，承受着高温、高压以及摩擦等多种复杂工况，经过多次铣削后，电极帽与焊接零件之间的距离逐渐变远。焊接距离的增加引发了焊点外观缺陷，如表面不平整、出现飞溅等问题，严重降低了产品的外观质量。这些质量问题不仅增加了废品率，提高了生产成本，还可能导致生产停滞，对生产效率产生了严重的负面影响。因此，研究一种有效的电极帽磨损补偿方法对于提升一汽大众成都分公司焊装车间的焊接质量和生产效率具有至关重要的意义。

一、点焊问题分析

点焊工艺过程通常包括以下几个紧密相连的阶段：首先，焊钳在机器人的带动下，按照预设的路径快速、准确地移动到焊接位置。当到达指定位置后，电极臂在气动系统的作用下迅速闭合，将焊件牢固地夹紧，确保焊件在焊接过程中不会发生位移。接着，焊接电流通过电极传导至焊件接触部位，利用电阻热使焊件局部加热熔化。在这个过程中，焊接电流的大小、通电时间以及电极压力等参数相互配合，共同决定了焊点的质量。当焊件局

部达到熔化状态后，保持一定时间的压力，使焊点充分结晶和凝固，形成牢固的连接。之后，电极臂松开，完成一个焊点的焊接。随后，焊钳在机器人的带动下移动至下一个焊接位置，重复上述过程，直至完成整个焊接任务。

在焊接过程中，电极帽与焊件表面直接接触，相对运动产生的摩擦是导致电极帽磨损的主要原因之一。随着焊接次数的增加，这种持续的摩擦会逐渐侵蚀电极帽表面，使其材料不断损耗。每次焊接时，电极帽与焊件之间的相对滑动会在接触面上产生微小的划痕和磨损，长期积累下来，电极帽的表面粗糙度会逐渐增大，导致其与焊件之间的接触面积和接触电阻发生变化。

电极帽磨损导致其与焊件之间的接触面积和接触电阻发生变化，进而影响焊接电流密度。当电极帽磨损到一定程度时，电极帽与焊件的接触面积减小，而接触电阻增大，使得焊接电流在接触部位的分布变得不均匀。这种不均匀的电流密度分布会导致焊点处无法获得足够的热量，从而使焊点的熔核尺寸减小，焊接强度降低。在实际应用中，焊接强度不足可能导致车身部件在承受载荷时焊点开裂，影响车身结构的安全性。

从焊点外观上看，焊接距离的增加容易引发焊接飞溅，使焊点表面出现不平整、毛刺等缺陷，严重影响产品的外观质量和整体品质。焊接飞溅不仅会破坏焊点的表面光洁度，还可能在焊件表面留下飞溅物，影响后续的涂装工艺和产品的美观度。同时，这些外观缺陷也可能暗示着焊点内部存在质量问题，如气孔、夹渣等，进一步降低了产品的可靠性。

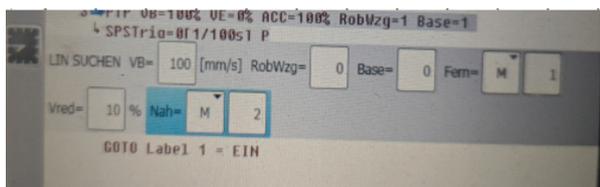
二、磨损量计算

(一) 大众 LIN SUCHEN 查找功能

大众版本中的 LIN SUCHEN 查找功能是一种具备特

定搜索与定位能力的工具。它基于预设的规则和算法，能够在相关的数据空间或工作区域内，快速准确地查找特定的目标信息或位置。

该功能的普通应用场景为机器人零件抓取。两个接近开关的Fern为远程开关，Vred为近程开关。当远程开关有效时，机器人减速为当前速度的10%，开始目标查找。当近程开关Vred有效时，表示查找到目标，到达零件的位置并实施零件的抓取。在电极帽磨损补偿的应用场景中，该功能主要用于近程开关根据力矩到位数据，精准定位到与补偿调整相关的位置信息，为后续的补偿操作提供准确的引导。



（二）三轴力矩监控原理

基于三轴力矩监控的磨损量计算方法，核心在于机器人六个轴的力矩监控传感器。保持焊接机器人姿态不变，从下往上接触铁板的过程，三轴力矩传感器能够实时感知焊钳Z方向上所受到的力矩变化。其工作原理基于某些物理效应，如压电效应或应变片原理等。以压电效应为例，当焊钳受到外力作用产生力矩时，会使传感器内部的压电材料发生形变，从而产生与外力成正比的电荷。这些电荷经过放大、滤波等处理后，转化为电信号，代表了力矩的大小和方向。

这些电信号经过放大、滤波等处理后，被采集到机器人控制系统中。数据采集过程具有较高的频率和精度，能够及时、准确地反映焊钳在焊接过程中的受力状态。通常，数据采集频率可以达到每秒数百次甚至更高，以确保能够捕捉到焊接过程中力矩的瞬间变化。高精度的A/D转换器将模拟电信号转换为数字信号，供控制系统进行分析和处理。通过对这些实时采集的数据进行分析，控制系统可以实时了解焊钳在焊接过程中的受力情况，为判断电极帽的磨损提供重要依据。

（三）磨损量计算方法

在实验过程中，采用垂直姿态选用不同速度接触铁板，同时记录移动过程中三轴力矩传感器采集到的数据。通过对这些数据的统计分析，确定一个合理的三轴力矩阈值。当实际监测到的力矩值超出该阈值时，表明电极帽已经接触到了铁板。

此时，控制系统获取当前电极帽的坐标信息，并与初始安装时新电极帽的坐标进行对比。电极帽的坐标信息可以通过机器人的运动控制系统变量\$act_pos获取，通过特定的坐标计算算法，能够得出电极帽在Z向上的磨损量，这对于后续的补偿调整具有关键意义。该坐标计算算法通常基于几何原理和数学模型，考虑了机器人的运动学参数和电极帽的安装位置，即磨损量。

（四）补偿算法与实现

将LIN SUCHEN查找功能与基于三轴力矩监控计算出的磨损量相结合，通过专门设计的补偿算法，将磨损量合理地补偿给Z向坐标。具体实现过程涉及在机器人控制系统软件中进行参数设置和程序编写。

首先，编写相应的控制程序，实现从扭矩值监控、LIN SUCHEN查找功能定位到Z向坐标补偿的一系列逻辑操作。在程序编写过程中，需要运用编程语言的逻辑控制结构，如条件判断、循环等，确保程序能够按照预定的流程执行。例如，程序首先使用LIN SUCHEN查找功能定位初始位置和结束位置，再根据运动中三轴力矩传感器的值判断出到位点，从而根据坐标偏移计算出的磨损量，最后根据这些参数控制机器人调整电极帽的Z向坐标。

然后，在系统中对与Z向坐标运动控制相关的参数进行调整，使其能够根据补偿需求精确控制电极帽在Z向的位置变化。这需要对机器人的运动学模型有深入的理解，通过调整运动学参数，如关节角度、位移比例等，来实现对电极帽Z向位置的精确控制。例如，通过修改机器人控制系统中的Z轴运动参数，使得机器人在接收到补偿指令后，能够准确地将电极帽移动到需要补偿的位置。

三、实验验证

（一）实验步骤

实验选用一汽大众成都分公司焊装车间实际使用的KUKA大众版本8.2.28机器人及配套的气动伺服焊钳。电极帽采用与实际生产相同规格和材质的产品，确保实验条件与实际生产环境一致。焊件选取与车身部件相似的金属板材，通常为高强度钢或铝合金板材，其材质和厚度与实际车身部件相近，以保证实验的真实性和可靠性。

在焊接过程中，通过三轴力矩传感器实时监测焊钳的力矩变化，并由机器人控制系统记录相关数据。每隔一定数量的焊点，暂停焊接，使用测量仪器测量电极帽的实际磨损量，并与通过三轴力矩监控计算得出的磨损

量进行对比。测量电极帽实际磨损量时，使用三坐标测量仪精确测量电极帽的外形尺寸变化，通过与初始尺寸对比得出磨损量。同时，对焊点的焊接强度、外观质量等进行检测和记录。焊接强度通过拉伸试验或剪切试验进行测量，外观质量则通过电子显微镜观察焊点表面的平整度、是否有飞溅等缺陷。

在完成一定次数的焊接循环在完成一定次数的焊接循环后，收集并整理不同阶段的测量数据。通过对这些数据的分析，绘制电极帽磨损量随焊接次数变化的曲线，以及焊接强度、外观质量等指标与电极帽磨损量之间的关系曲线。

（二）实验结果分析

将实际测量的电极帽磨损量与基于三轴力矩监控计算得出的磨损量进行详细对比。在不同的焊接阶段，计算两者之间的误差。结果显示，大部分数据点的误差控制在 $\pm 2\%$ 以内，这表明基于三轴力矩监控的磨损量计算方法具有较高的准确性。例如，在焊接初期，由于电极帽磨损相对较小，计算值与实际测量值的误差在 $\pm 3\%$ ；随着焊接次数的增加，磨损加剧，误差仍能保持在 $\pm 2\%$ 以内。这一结果验证了该计算方法能够较为准确地反映电极帽在实际焊接过程中的磨损情况，为后续的补偿操作提供了可靠的数据基础。

对采用磨损补偿方法前后的焊接质量进行全面对比。在未采用补偿方法时，随着电极帽磨损程度的增加，焊接强度呈现明显的下降趋势。当电极帽磨损量达到一定阈值后，焊接强度下降至低于设计要求的标准值，焊点出现开裂等缺陷。同时，焊点外观质量也逐渐变差，飞溅增多，表面平整度降低。

而在应用磨损补偿方法后，焊接强度得到了有效保持。在整个焊接过程中，焊接强度始终维持在设计要求的范围内，波动较小。焊点外观质量也得到了显著改善，飞溅现象明显减少，焊点表面更加平整光滑。这充分证明了所提出的磨损补偿方法能够有效提升焊接质量，确保焊接过程的稳定性和可靠性。

（三）经济效益评估

从经济效益角度对采用磨损补偿方法前后进行详细评估。在未采用该方法时，由于焊接质量不稳定，废品率较高，假设为3%。这意味着每生产100个焊件，就有3个焊件因焊接质量问题需要报废或返工，增加了原材料成本、人工成本以及生产时间成本。

采用磨损补偿方法后，焊接质量提高，废品率显著降低至1%。这使得原材料浪费减少，返工成本降低。此外，由于生产过程中因焊接质量问题导致的停机时间减少，生产效率得到提高，单位时间内的产量增加。通过综合计算，采用该磨损补偿方法后，车间在生产成本降低和生产效率提升方面取得了明显的经济效益。预计每年可节省成本10万元，同时产量提升5%。

四、结论与展望

本文针对一汽大众成都分公司焊装车间气动伺服焊钳电极帽磨损问题，深入分析了磨损原因、对焊接质量的影响以及现有解决方法的局限性。在此基础上，提出了一种基于三轴力矩监控计算磨损量，并借助大众LIN SUCHEN查找功能实现Z向坐标补偿的创新方法。通过实验验证，该方法能够准确计算电极帽磨损量，并有效地将磨损量补偿给Z向坐标，从而显著提高了焊接质量和生产效率。同时，该方法降低了生产成本，具有良好的经济效益和应用价值。这一研究成果为解决汽车制造行业中类似的电极帽磨损问题提供了新的思路和方法，具有一定的推广意义。

参考文献

- [1] 王克鸿, 陈希章, 王长军, 赵勇, 陶晔. (2007). KUKA 机器人焊接控制器国产化研制. 焊接学报, 28 (10), 93-96.
- [2] 赵熹华. “中频逆变点焊机怎样提高镀锌钢板点焊质量” 电焊机30, no.10 (2000): 23-24.
- [3] 薛海涛, 宋永伦, 李恒, 点焊过程工艺参数采集及缺陷信息分析, 焊接学报, 2023, 25 (4): 103~106.