

一种直线电机双动子上下料平台的控制方法

张丽伟, 孔祥茂, 白丽丽, 任士桐, 辛至明, 王健健

(潍柴动力股份有限公司, 山东潍坊 261000)

[摘要] 文章提出了一种针对直线电机双动子上下料平台的控制方法, 旨在提高平台的运动精度和稳定性, 以满足现代工业自动化领域对高精度上下料作业的需求。文章首先分析了直线电机双动子平台的结构特点和工作原理, 明确了控制目标, 即实现2个动子在垂直方向上的精确同步运动。针对这一目标, 设计了一种基于模块化的控制策略。该策略通过实时检测2个动子的位置和控制信息, 确保双动子能够同步且稳定地运动至指定位置。该研究成果对于推动直线电机在工业自动化领域的应用具有重要意义, 为提高生产效率、降低生产成本提供了有力支持。

[关键词] 双动子; 上下料平台; 模块化; 控制方法

[中图分类号] TP278 **[文献标志码]** A

0 引言

产品的自动上下料是智能制造的重要环节, 直线电机双动子上下料平台是产线实现自动上下料的常用结构。但实际应用中, 上下料的需求随机, 上下料动子运动区域交叉, 动作逻辑复杂, 必须通过合理的控制方法保证上下料过程的节拍最优, 且避免上下料动子发生碰撞。因此, 提出一种稳定、可靠、节拍最优, 且通用的动子控制逻辑很有必要。

1 直线电机双动子结构

常用的双动子上下料平台包含 M01 上料部、M02 双动子平台、M03 加工工站和 M04 下料部, 如图1所示。

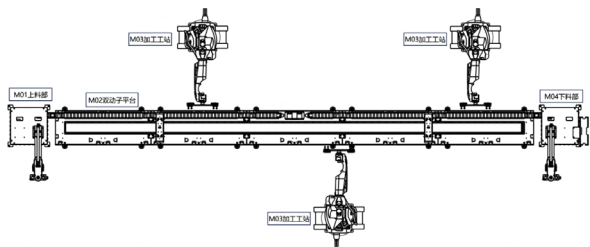


图1 双动子上下料平台结构

(1) M01 上料部: 将待加工的产品自动放置在上料动子上。

(2) M02 双动子平台: 包含2个动子, 靠近上料部的动子定义为上料动子, 放置待加工的产品; 靠近下料部的动子定义为下料动子, 放置已加工完成的产品。

(3) M03 加工工站: 产品加工工站, 发起对产品的上料和下料请求。

(4) M04 下料部: 回收下料动子上已加工完成的产品。

2 目前控制方法存在的主要问题

(1) 排列组合上下料需求和动子状态的情况, 根据

不同的情况罗列控制程序, 实际操作时容易出现遗漏或错误。

(2) 常规的控制方法, 程序量大, 修改和问题查找的难度大。

(3) 随着有上下料需求工站的数量增加, 需要罗列的情况也随之增加, 逻辑优化和问题排查时, 工作难度也加大。

3 控制逻辑

3.1 动子位置定义

(1) 动子坐标值的定义。当上料动子处在上料动子原点时, 其坐标值为0; 当上料动子远离上料动子原点, 靠近下料动子原点时, 坐标值变大, 当上料动子靠近上料动子原点, 远离下料动子原点时, 坐标值减小。当下料动子处在下料动子原点时, 其坐标值为0; 当下料动子远离下料动子原点, 靠近上料动子原点时, 坐标值变大; 当下料动子靠近下料动子原点, 远离上料动子原点时, 坐标值减小。

(2) 安全距离 L 的定义。当上料动子与下料动子在动子平台上接触时, 2个动子的位置坐标之和为 L 。当前坐标之和 $< L$ 时, 说明当前两个动子未发生碰撞; 反之, 当前坐标之和 $\geq L$ 时, 动子发生碰撞, 触发紧急停止报警。

(3) 动子位置定义。上料动子除上料部的接料位置外, 动子的位置根据加工工站的情况定义上料位置。下料动子除卸料部的上料位置外, 动子的位置根据加工工站的情况定义下料位置。动子位置定义见表1。同一个加工工站, 上料动子的上料位置靠近 M01 上料部, 下料动子的下料位置靠近 M04 下料部。

表1 动子位置定义

动子	分组	位置名称	位置编号
上料动子	加工工位 1	上料位置 1	A.1
	加工工位 2	上料位置 2	A.2
	加工工位 3	上料位置 3	A.3
	加工工位 N	上料位置 N	A.N
下料动子	加工工位 1	下料位置 1	B.1
	加工工位 2	下料位置 2	B.2
	加工工位 3	下料位置 3	B.3
	加工工位 N	下料位置 N	B.N

(4) 上下料动子位置编号, L 的定义等如图2所示。

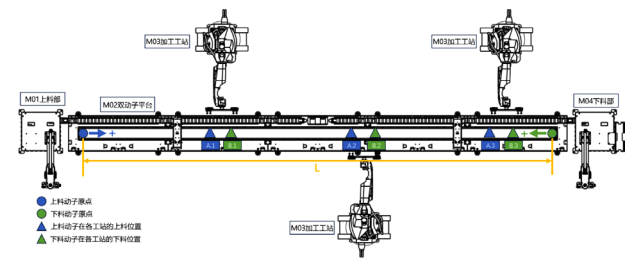


图2 上下料动子位置示意

3.2 动子请求位置

3.2.1 上料动子请求位置

根据各工站物料的上料请求状态, 输出上料动子的请求位置。当加工工位1请求上料时, 上料动子的请求位置编号为 A.1; 当加工工位1无上料请求, 且加工工位2请求上料时, 上料动子的请求位置编号为 A.2; 当加工工位1与加工工位2无上料请求, 且加工工位3请求上料时, 上料动子的请求位置编号为 A.3; 依次类推, 请求位置算法见表2, 其中, “/” 表示加工工站可以请求上料需求, 也可以无请求上料的需求。

表2 上料动子位置请求算法

加工工位 1 请求上料	加工工位 2 请求上料	加工工位 3 请求上料	加工工位 N 请求上料	请求位置	位置编号
是	—	—	—	上料位置 1	A.1
否	是	/	—	上料位置 2	A.2
否	否	是	—	上料位置 3	A.3
否	否	否	是	上料位置 N	A.N

通过以上处理确定了各工站上料的优先级, 优先级的确认也可根据实际需求进行调整。

3.2.2 下料动子请求位置

根据各工站物料的下料请求状态, 输出下料动子的请求位置, 当加工工位1请求下料时, 下料动子的请求位置编号为 B.1; 当加工工位1无下料请求, 且加工工位2请求下料时, 下料动子的请求位置编号为 B.2; 当加工工位1与加工工位2无下料请求, 且加工工位3请求下料时, 下料动子的请求位置编号为 B.3; 依次类推, 请求位置算

法见表3。

表3 下料动子请求位置算法

加工工位 1 请求下料	加工工位 2 请求下料	加工工位 3 请求下料	加工工位 N 请求下料	请求位置	位置编号
是	/	—	—	下料位置 1	B.1
否	是	—	—	下料位置 2	B.2
否	否	是	—	下料位置 3	B.3
否	否	否	是	下料位置 N	B.N

通过以上处理确定了各工站下料的优先级, 优先级的确认也可根据实际需求进行调整。

3.3 动子目标位置算法模块

3.3.1 上料动子目标位置算法模块

上料动子需要去给某个工站上料时, 需要根据上料动子的请求位置、下料动子的运动状态、当前位置和目标位置等4个变量的综合判断, 来确定上料动子的目标位置。

如果有碰撞可能时, 上料动子不能直接运动到请求位置, 需要先去避让位置等待。上料动子的避让位置 = $L - \text{Max}(\text{下料动子当前位置}, \text{下料动子目标位置}) - \text{动子最小间距 } d$ 。说明: $\text{Max}(\text{下料动子当前位置}, \text{下料动子目标位置})$ 是取两个数的最大值, 动子最小间距 $d > 0$ 。判断过程可参考表4。

表4 上料动子目标位置

上料动子请求位置 + 下料动子当前位置 < L	上料动子请求位置 + 下料动子目标位置 < L	下料动子 非运动状态	目标位置
是	是	是	请求位置
是	是	否	请求位置
是	否	是	避让位置
是	否	否	避让位置
否	是	是	避让位置
否	是	否	避让位置
否	否	是	避让位置
否	否	否	避让位置

(1) 当上料动子请求位置与下料动子当前位置之和 $< L$, 上料动子请求位置与下料动子目标位置之和 $< L$, 并且下料动子处在非运动状态时, 上料动子的目标位置 = 请求位置。

(2) 当上料动子请求位置与下料动子当前位置之和 $< L$, 上料动子请求位置与下料动子目标位置之和 $< L$, 并且下料动子处在运动状态时, 上料动子的目标位置 = 请求位置。

(3) 当上料动子请求位置与下料动子当前位置之和 $< L$, 上料动子请求位置与下料动子目标位置之和 $\geq L$, 并且下料动子处在非运动状态时, 上料动子的目标位置 = 避让位置。

(4) 当上料动子请求位置与下料动子当前位置之和 $< L$ ，上料动子请求位置与下料动子目标位置之和 $\geq L$ ，并且下料动子处在运动状态时，上料动子的目标位置 = 避让位置。

(5) 当上料动子请求位置与下料动子当前位置之和 $\geq L$ ，上料动子请求位置与下料动子目标位置之和 $< L$ ，并且下料动子处在非运动状态时，上料动子的目标位置 = 避让位置。

(6) 当上料动子请求位置与下料动子当前位置之和 $\geq L$ ，上料动子请求位置与下料动子目标位置之和 $< L$ ，并且下料动子处在运动状态时，上料动子的目标位置 = 避让位置。

(7) 当上料动子请求位置与下料动子当前位置之和 $\geq L$ ，上料动子请求位置与下料动子目标位置之和 $\geq L$ ，并且下料动子处在非运动状态时，上料动子的目标位置 = 避让位置。

(8) 当上料动子请求位置与下料动子当前位置之和 $\geq L$ ，上料动子请求位置与下料动子目标位置之和 $\geq L$ ，并且下料动子处在运动状态时，上料动子的目标位置 = 避让位置。

为了减少代码重复编写，并降低代码的错误率，可将上料动子目标位置的计算方法封装成可重复调用的算法模块，输入条件有双动子的安全距离，上料动子请求位置，下料动子当前位置，下料动子目标位置，下料动子运动状态，输出上料动子目标位置，封装形式如图3所示。

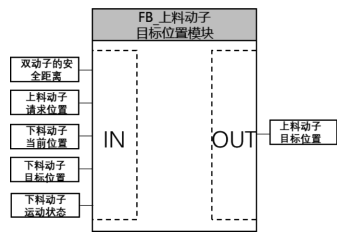


图3 FB_上料动子目标位置算法模块

3.3.2 下料动子目标位置算法模块

下料动子需要去给某个工站接料时，需要根据下料动子的请求位置，上料动子的运动状态、当前位置和目标位置等4个变量进行综合判断，来确定下料动子的目标位置。

如果有碰撞可能时，下料动子不能直接运动到请求位置，需要先去避让位置等待。下料动子的避让位置 = $L - \text{Max}(\text{上料动子当前位置}, \text{上料动子目标位置}) - \text{动子最小间距 } d$ 。说明： $\text{Max}(\text{上料动子当前位置}, \text{上料动子目标位置})$ 是取两个数的最大值，动子最小间距 $d > 0$ 。

判断过程可参考表5。

表5 下料动子目标位置

下料动子请求位置 + 上料动子当前位置 $< L$	下料动子请求位置 + 上料动子目标位置 $< L$	上料动子非运动状态	目标位置
是	是	是	请求位置
是	是	否	请求位置
是	否	是	请求位置
是	否	否	避让位置
否	是	是	避让位置
否	是	否	避让位置
否	否	是	避让位置
否	否	否	避让位置

(1) 当下料动子请求位置 B.R 与上料动子当前位置之和 $< L$ ，下料动子请求位置与上料动子目标位置之和 $< L$ ，并且上料动子处在非运动状态时，下料动子的目标位置 = 请求位置。

(2) 当下料动子请求位置与上料动子当前位置之和 $< L$ ，下料动子请求位置与上料动子目标位置之和 $< L$ ，并且上料动子处在运动状态时，下料动子的目标位置 = 请求位置。

(3) 当下料动子请求位置与上料动子当前位置之和 $< L$ ，下料动子请求位置与上料动子目标位置之和 $\geq L$ ，并且上料动子处在非运动状态时，下料动子的目标位置 = 请求位置。

(4) 当下料动子请求位置与上料动子当前位置之和 $< L$ ，下料动子请求位置与上料动子目标位置之和 $\geq L$ ，并且上料动子处在运动状态时，下料动子的目标位置 = 避让位置。

(5) 当下料动子请求位置与上料动子当前位置之和 $\geq L$ ，下料动子请求位置与上料动子目标位置之和 $< L$ ，并且上料动子处在非运动状态时，下料动子的目标位置 = 避让位置。

(6) 当下料动子请求位置与上料动子当前位置之和 $\geq L$ ，下料动子请求位置与上料动子目标位置之和 $< L$ ，并且上料动子处在运动状态时，下料动子的目标位置 = 避让位置。

(7) 当下料动子请求位置与上料动子当前位置之和 $\geq L$ ，下料动子请求位置与上料动子目标位置之和 $\geq L$ ，并且上料动子处在非运动状态时，下料动子的目标位置 = 避让位置。

(8) 当下料动子请求位置与上料动子当前位置之和 $\geq L$ ，下料动子请求位置与上料动子目标位置之和 $\geq L$ ，并且上料动子处在运动状态时，下料动子的目标位置 = 避让位置。

注意：当上下动子同时请求位置且目标位置有干涉时，此处是按照优先运行下料动子接料的方式处理，在实际应用中处理方式也可根据情况调整为优先上料动子上料。

与上料动子情况相同，可将下料动子目标位置的计算方法封装成可重复调用的算法模块，输入条件有双动子的安全距离，下料动子请求位置，上料动子当前位置，上料动子目标位置，上料动子运动状态，输出下料动子目标位置，封装形式如图4所示。

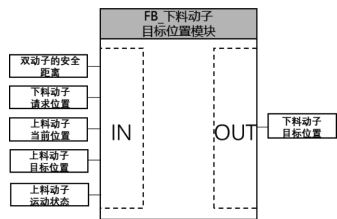


图4 FB_下料动子目标位置算法模块

4 方案对比

(1) 使用模块化的动子逻辑控制方案，控制逻辑清晰，避免重复代码量，在实际应用中易于修改与故障排查，可快速判断出是请求位置的控制逻辑出现问题，还是目标位置的控制逻辑出现问题，精准确定问题点。

(2) 本方案增加了避让位置，可大大提升动子的运转效率。

(3) 当增加和减少加工工站时，程序开发工作量小。

5 结束语

由于上下料需求情况复杂，动子运动时不能发生碰撞，并需要保证节拍最优。使用常规的顺序控制方法，逻辑繁琐，出现异常时，问题排查困难。通过模块化的控制方法，将动子位置请求与目标位置确定分开处理，控制逻辑更清晰，逻辑修改更方便，保证了动子运行的节拍更优，更稳定可靠。

参考文献

[1]胡寿松.自动控制原理[M].北京：科学出版社，2019.
[2]顾新建，杨青海，纪杨健，等.机电产品模块化[M].北京：机械工业出版社，2013.

作者简介

张丽伟（1987—），女，山东潍坊人，本科，工程师，主要从事制造企业智能制造相关工作。

（编辑：凌 瑞）

（上接第88页）

度为30 μm，并据此计算了相应的倾斜角度，见表1。通过分析观察得出随着悬臂长度的增加以及目标最大宽度 D_{max} 值的减小，所需的倾斜角度误差值呈现下降趋势。如当悬臂长度分别为10.0mm、12.5mm、15.0mm时，实现450 μm最大宽度的角度误差分别是0.44°、0.34°和0.24°。

表1 预测的所需宽度对应的倾斜角度误差

刀具直径（μm）	悬臂长度		
	10.0mm	12.5mm	15.0mm
350	0.21	0.11	0.01
400	0.33	0.23	0.13
450	0.44	0.34	0.24

3 结束语

本研究探讨了微铣削工具对准误差与加工精度之间的内在联系，并通过案例分析量化了对准变量对加工结果的具体影响。研究发现，微铣削过程中的角度误差与加工深度的误差率之间存在非线性关系，而最大深度误差与最小深度误差的差值则表现出一定的稳定性，不受除角度外其他变量的影响。此外，角度误差与通道宽度误差率之间的线性关系也得到了明确的证实。基于案例研究的数据和多元回归预测模型，准确预测通道最大宽度与实验变量之

间的关系。通过进一步的实验验证，确认了预测模型不仅在理论上成立，而且在实际微铣削加工中具有重要的指导意义。

参考文献

[1]肖祖铭，郭瞻.基于数据驱动的激光雕刻机路径高精度控制方法[J].激光杂志，2023，44（11）：194-198.
[2]张从阳，邹日貌，余祖元.超声辅助等离子体中微细电火花加工技术研究[J].航空制造技术，2019，62（11）：32-38.
[3]裴云亮，姚煜，邹文俊，等.材料表面微图案结构成型技术及其研究进展[J].材料工程，2024，52（4）：87-101.
[4]欧彦江，殷国富，沈德章，等.端铣加工参数对铝合金表面粗糙度的影响研究[J].工具技术，2023，57（11）：50-55.

作者简介

蒋宏（1985—），男，四川眉山人，本科，工程师，主要研究方向为生产技术管理。

（编辑：凌 瑞）