

通用型往复式双（多）穿梭车控制系统研究

段达庆

云南紫金科贸有限公司，云南省昆明市，650000；

摘要：本文提出了一种通用型往复式双（多）穿梭车控制系统的控制模型和控制系统结构，对该系统功能特性、任务分配、车辆避让、防碰撞、系统扩展、系统结构进行了阐述，并对系统的能力和系统设计及其对物流系统总体设计的要求进行了分析。

关键词：通用型；双穿梭车系统；系统原理；系统结构；能力估算

DOI：10.64216/3104-9680.25.01.005

往复式穿梭车作为自动化物流系统中的关键设备，以其技术成熟、可靠性高、使用灵活等优势，在自动化立体仓库中得到广泛应用。采用往复式穿梭车后，输送系统可大幅减少输送设备的数量和占地面积，为自动化立体仓库的总体设计、WCS系统和电控系统的开发提供了诸多便利。此外，物料的输送效率显著提升，运行过程更加平稳，系统故障率亦随之降低。

然而，单台往复式穿梭车往往难以满足高流量物流系统的需求。目前，业界常采用多工位穿梭车、环形穿梭车、往复式穿梭车与输送机混合使用、全输送机方案等多种方式来应对这一挑战。在某些场景下，甚至通过在同一轨道上布置两台穿梭车来提升流量处理能力。尽管这些方案各有优劣，但在物流系统的总体布局、穿梭车的使用方式及物料输送顺序等方面，仍存在诸多限制。特别是常规的一轨双车模式，受限于穿梭车的调度方式和避让策略，未能充分发挥其潜力。因此，亟需研发一种通用型往复式双穿梭车系统，以应对日益复杂的物流系统需求。

1 系统功能特性分析

通用型往复式双穿梭车系统能同时执行两个穿梭车任务。不论穿梭车执行这两个任务时的运行轨迹是否互相干涉，两台穿梭车都能同时投入运行，将穿梭车互相避让等不利因素造成的效率损失尽量减少，充分地发挥穿梭车的能力。同时尽量减少对物流系统总体布局设计的限制。

在物流系统流量不大，待执行的任务只有一个时，自动采取单车运行模式，处理当前任务。保证系统响应速度，防止任务不合理的堆积。

一台车发生严重故障时，另一台车能接管全部任务。

1.1 系统原理

1.1.1 任务分配

在双穿梭车系统执行任务之前，必须先接收任务指令。在系统允许的数量范围内，上级系统可随时下达任务，每次下达一条。任务内容至少包括任务识别号、起始地址、目的地地址、任务优先级等信息。双穿梭车系统接收到这些信息后，会生成待执行任务队列。

在双车运行模式下，当两台穿梭车均处于空闲状态时，控制系统将根据待执行任务队列中任务的优先级和下达顺序等因素，选择当前需执行的任务。

若待执行任务队列中仅有一个任务，系统会将该任务设为当前任务，并按照预设的单任务分配列表，指定一台穿梭车执行，另一台则待机或进行避让作业。该任务完成后，系统才会重新分配新任务。

若待执行任务队列中有两个以上任务，系统将选取其中两个作为当前任务，并进行任务分配。只有合理分配，才能充分发挥穿梭车的效能。研究表明，若两个任务的目的地允许同时卸货，在穿梭车位置坐标轴中，目的地坐标值较小的任务应分配给坐标值较小的穿梭车。若两个任务目的地不允许同时卸货（包括目的地相同或卸货站台过近等情况），则起始地坐标值较小的任务应分配给坐标值较小的穿梭车。当穿梭车的上货或卸货站台位于无法提供避让空间的轨道端头附近时，少数特殊任务无法按上述方法分配，此时特殊任务固定分配给某台穿梭车。若两个任务均应由同一台车承担，系统先分配一个任务，再根据待执行任务队列情况重新确定另一个当前任务。此外，对于采用双穿梭车的物流系统，所有可能的任务组合数量有限，涉及特殊任务的部分更少，因此建立上述列表

并不困难。对于发生概率极低或双车无法处理的任务组合，系统可自动切换至单车模式处理，处理完毕后再恢复双车模式。

1.1.2 车辆避让

在物流系统中，穿梭车执行任务的顺序性要求对穿梭车之间的避让策略提出了挑战。为解决两台穿梭车在执行任务时的相互避让问题，必须明确两个穿梭车任务组合中应优先执行的任务。在穿梭车运行过程中，无优先权的穿梭车应适时进行避让。此外，针对穿梭车任务组合中起始地不同但目的地相同，且物流系统对物料输送顺序有特定要求的情形，穿梭车任务的分配亦需明确优先级。在确定优先任务时，可将任务队列中位置靠前的任务指定为穿梭车需优先执行的任务。上位系统只需按照物料输送的先后顺序下达穿梭车任务，即可确保穿梭车输送物料的顺序正确无误。

在穿梭车系统并行执行任务时，不可避免地会遇到穿梭车运行轨迹相互干涉的问题。控制穿梭车的运行轨迹和相互避让是控制系统需要妥善处理的关键问题。在任务组合中，最复杂的情况是两台穿梭车的取货和卸货站台均相互干涉。控制系统采用分步调度控制策略，将整个作业过程划分为八个步骤，依据任务分配、任务优先级以及任务执行进度，依次计算并处理每台穿梭车当前应执行的作业。系统每次仅向穿梭车发送相应的调度命令，穿梭车仅执行当前任务，无需关注整个任务序列，从而实现整体优化运行。如图1所示的物流系统平面布置图，任务一涉及从13站台向4站台的输送，任务二涉及从3站台向14站台的输送。

设定穿梭车轨道左侧端点为坐标原点，以向右为正方向建立穿梭车位置坐标轴。控制系统将任务一分配给穿梭车A，任务二分配给穿梭车B，其中A穿梭车享有执行优先权。任务执行流程如下：

穿梭车A移动至第13站台，与此同时，穿梭车B移动至第一次避让位置（即第13站台坐标值+2米）；

穿梭车A在第13站台上进行货物装载，而穿梭车B暂无新任务；

穿梭车A移动至第二次避让位置（即第3站台坐标值-2米），同时穿梭车B移动至第3站台；

穿梭车A暂无新任务，穿梭车B在第3站台上进行货物装载；

穿梭车A移动至第4站台，同时穿梭车B移动至第三次避让位置（即第4站台坐标值+2米）；

穿梭车A在第4站台进行货物卸载，穿梭车B暂无新任务；

穿梭车A移动至第四次避让位置（即第4站台坐标值-2米），同时穿梭车B移动至第14站台；

穿梭车A完成任务，穿梭车B在第14站台进行货物卸载后亦完成任务；

在上述情境下，双穿梭车同时执行两个任务所需的时间，与单穿梭车分别执行两次任务所需时间相比，尽管前者中影响任务完成时间的A车实际行走距离增加了四米，B车同样增加四米，且起停次数增多，从单车角度看似乎会多耗费一些时间，但由于两台穿梭车并行作业所节省的时间足以抵消上述增加的时间。而且，随着站台距离的延长，节省的时间将更为显著。据此可以认为，在此情况下，双穿梭车同时执行两个任务所需时间略少于单穿梭车执行两次任务。需要说明的是，首先，这种情况在所有任务组合中仅占极小比例；其次，通过优化设计穿梭车站台的位置和输送方向，合理分配穿梭车任务，可大幅减少甚至避免此类情况的发生。在执行其他相对简单的任务组合时，上述八步调度控制中的某些步骤可省略，两台穿梭车能够同时进行行走对位、上货、卸货等全部或部分作业，从而进一步提升双穿梭车系统的整体效能。

1.1.3 防碰撞

在双穿梭车系统中，为充分发挥穿梭车的能力，不仅两台穿梭车运行区域重叠，而且两台穿梭车需同时行走，行走方向有时同向，有时相向，这些都对穿梭车的防碰撞设计提出了较高的要求。为此，控制系统应采取多重保护措施。首先是控制系统在解析任务给出分步调度指令时，确保穿梭车在执行当前运行步骤时行走区域不重合；其次，穿梭车运行时随时获取另一台车的控制系统状态、车体位置、行走方向、速度、通信状态等信息，并结合本车的相关状态，采取适当的措施；第三穿梭车上安装有不依赖通信伙伴的检测两车距离的保护传感器并设有机械防撞装置。

1.2 系统的扩展

在物流系统需求超出三台穿梭车的情况下，可对双穿梭车系统进行拓展。然而，在拓展过程中，新增的穿梭车不应采用前述的任务分配和车辆避让策略。这是因为随着穿梭车数量的增加，任务分配和车辆避让的复杂性将显著提升，进而导致穿梭车效率的显著

下降，甚至可能引发任务执行的失败。因此，建议将多穿梭车的工作区域进行划分，其中一部分由双穿梭车系统负责，其余部分则由双穿梭车系统之外的单穿梭车或另一双穿梭车系统负责，跨工作区域的任务通过穿梭车站台进行中转。在设置穿梭车中转站台时，可采用相邻区域共用或不共用两种策略。共用中转站台能够节约输送设备，但会导致相邻工作区域的穿梭车工作区域出现重叠，因此需要穿梭车分时使用中转站台以实现任务的移交，此方法可简化穿梭车的避让控制。而采用不共用中转站台的方式，则不同工作区域的穿梭车设置不同的站台，站台之间通过输送设备连接，以确保相邻工作区域的穿梭车工作区域不重叠。无论采取何种策略，上位系统在分配任务时，都应尽量减少跨区域任务的分配。

1.3 系统架构

在通用型往复式双穿梭车系统中，两台穿梭车构成一个相互关联的整体执行机构。因此，需要一个超越单车控制装置的调度控制装置，负责接收输送机系统或上位系统的任务指令，并反馈任务执行情况。该调度控制装置还需分析任务，为穿梭车分配任务并确定任务优先级，处理紧急优先任务，监控任务执行过程，解析穿梭车下一步的分解任务并控制其执行时机，协调两车运行，处理穿梭车防碰撞问题，实现与输送机的信号连锁和信息交换，以及协调穿梭车与输送机系统的运行等。这些功能对调度控制装置提出了较高的性能要求，包括运算速度、编程能力以及通信功能。通信功能需与穿梭车单车控制装置和输送机系统控制装置（通常为 PLC）保持实时性与可靠性，以满足设备控制层的要求，防止通信延迟对系统安全和作业效率产生不利影响。如有需要，调度控制装置还应提供与上位计算机系统的通信接口。鉴于穿梭车通常作为自动化物流系统的瓶颈设备，其可靠性要求较高。综合考虑上述要求，控制装置间的通信应采用工业以太网或工业现场总线，并采取适当的通信方式。双穿梭车系统的调度控制装置可采用具备足够通信接口和可靠性的工业计算机配合软 PLC，或使用大中型 PLC，并配备人机界面。

在双穿梭车系统扩展时，所有穿梭车均由调度控制装置统一控制，便于实现不同工作区域穿梭车的互为备份。若采用两个以上的双穿梭车系统，调度控制

装置可共用一套。

尽管调度控制装置可替代所有穿梭车单车控制装置，但设置单车控制装置仍具有多项优点。穿梭车单车控制装置根据调度控制装置的指令执行任务，除完成穿梭车的行走、定位、移载等控制任务外，还需特别关注防止穿梭车间的碰撞。基于上述防碰撞策略，穿梭车单车控制装置除满足与调度控制装置的通信要求外，还需实现两台穿梭车间的直接通信，该通信可由调度控制装置中转。调度控制装置应尽量减少中转通信导致的延迟。

2 能力估算

基于所提出的双穿梭车系统调度控制模型，其搬运能力的分析可借鉴单穿梭车搬运能力的研究成果。在双穿梭车系统中，两台穿梭车并行执行任务时，任务组合可划分为以下几种情形：

当双穿梭车的上货点互不干扰，且下货点亦互不干扰时，穿梭车在任务执行过程中无需进行避让。在该系统中，每台穿梭车的平均行走距离小于单穿梭车的一半，双穿梭车同时执行两个任务所需时间少于单穿梭车执行单个任务的平均时间。因此，双穿梭车系统的搬运能力是单穿梭车的 2 倍以上，具体能力系数为 $K_{n1}=2.2$ ，此情形在所有任务中所占比例系数为 K_1 。

若双穿梭车的上货点互不干扰，但下货点存在干扰，则在任务执行过程中，穿梭车需进行二次避让。假设双穿梭车行走时间中至少一半为同时行走，则双穿梭车同时执行两个任务所需时间少于单穿梭车执行单个任务平均时间的 1.5 倍，即搬运能力大于单穿梭车的 1.5 倍。相应的能力系数为 $K_{n2}=1.65$ ，此情形在整个任务中所占比例系数为 K_2 。

在双穿梭车的上货点存在干扰，而下货点互不干扰的情况下，穿梭车同样需进行二次避让。若双穿梭车行走时间中至少一半为同时行走，则双穿梭车同时执行两个任务所需时间少于单穿梭车执行单个任务平均时间的 1.5 倍，即搬运能力大于单穿梭车的 1.5 倍。相应的能力系数为 $K_{n3}=1.5$ ，此情形在整个任务中所占比例系数为 K_3 。

当双穿梭车的上货点和下货点均存在干扰时，可认为双穿梭车同时执行两个任务所需时间少于单穿梭车执行单个任务平均时间的 2 倍，即搬运能力大于单穿梭车的 2 倍。相应的能力系数为 $K_{n4}=1$ ，此情形在整个任务中所占比例系数为 K_4 。

双穿梭车系统相对于单穿梭车的总能力系数 K 可表示为:

$$\begin{aligned} K &= Kn1*K1+Kn2*K2+Kn3*K3+Kn4*K4 \\ &= 2K1+1.5K2+1.5K3+K4 \end{aligned}$$

由此可见, 双穿梭车系统相对于单穿梭车的总能力系数 K 取决于不同任务组合在所有任务中的比例分布。通过采取优化措施, 例如合理分配双车承担的任务以尽量实现同时上货、优化穿梭车站台位置和输送方向的设计, 可以显著提升各比例系数的取值, 进而提高系统效率。采用优化后的比例系数, 取 $K1=0.3$ 、 $K2=0.3$ 、 $K3=0.3$ 、 $K4=0.1$, 则:

$$K=2.2\times0.3+1.65\times0.3+1.65\times0.3+1.1\times0.1=1.76$$

在控制系统设计中, 尽管双穿梭车系统执行一次工作循环需要进行多次任务解析和通信, 但由此产生的系统延迟时间总和可控制在一秒钟以内, 对双穿梭车系统能力的影响可以忽略不计。

同样, 由于穿梭车的防碰撞要求, 对其行走速度的控制也提出了特定要求。速度计算时需考虑另一台车的工作状态。特别是在两车相向而行时, 穿梭车需提前减速。然而, 在每次工作循环中, 这种情况发生的概率低于 50%, 且其运行距离较短。在采取最优控制规律对速度控制进行优化后, 平均每次工作循环耗时增加约二秒钟, 即穿梭车每执行一个任务将多耗时约一秒钟, 对系统能力的影响相对较小。

综合考虑前述估算及各种复杂工况, 可以得出双穿梭车系统搬运能力相当于单穿梭车搬运能力的 1.65-1.75 倍。

3 系统设计及其对物流系统总体设计的要求

在穿梭车系统中, 当多台穿梭车同时执行任务时, 不可避免地会遇到穿梭车之间的相互避让问题。因此, 建议在穿梭车轨道的两端, 至少在一端设置车辆避让空间。当两端均设有避让空间时, 任意一台穿梭车可在另一台车进行避让的情况下到达任意站台, 这有助于优化穿梭车的调度控制, 减少或消除不能双车同时投运的特例, 从而提高系统的能力。

在穿梭车轨道的一端或两端设置避让空间, 有两种可行的方式。首选方案是加长穿梭车轨道; 若空间受限, 无法加长轨道, 则需调整穿梭车站台的位置和输送方向, 确保最靠近不能加长的穿梭车轨道端头的

穿梭车卸货站台或者取货站台(二者只能选一)和轨道端头之间能停放一台穿梭车, 同时每个穿梭车上货站台每次只产生一个任务。由此可见, 在不加长穿梭车轨道的情况下, 对物流系统总体布局有一定的限制, 同时不利于穿梭车的调度控制, 对系统能力有一定的不利影响。

尽量减少穿梭车车体长度, 使其最大尺寸约等于穿梭车站台的宽度尺寸, 有利于穿梭车的避让, 保证系统的能力。

若条件允许, 对站台布置进行优化, 可提高双穿梭车系统的能力。首先, 适当加大穿梭车轨道站台间距, 穿梭车能同时停靠的两个站台的组合的数量越多越好; 其次, 尽量使穿梭车轨道同一位置附近两侧的站台输送方向保持一致, 即轨道一侧为穿梭车上货站台, 另一侧则为下货站台; 第三, 避免某一站台流量超过双穿梭车系统能力的 70%, 否则就应增加站台数量; 第四, 尽量避免从穿梭车轨道的一端输送到另一端, 即相距最远的两个站台应同为穿梭车上货站台或卸货站台。

在系统进行扩展时, 灵活合理地划分工作区域、采取不同的组合方式, 是保证系统效率的必要保证。

4 结论

通用型往复式双穿梭车系统, 较单穿梭车大幅度提高了输送能力, 同时对自动化物流系统的总体设计限制少, 较之已有的一些解决方案, 有其独到的优点。在一定的流量范围内, 不失为一种较理想的选择。另外, 自动化物流系统流量经常具有不均衡的特点, 流量较高时, 单穿梭车输送能力略显不足, 导致作业时间延长, 使用该系统能有效弥补这一缺陷, 同时提高物流系统的可靠性。

参考文献

- [1] 云南昆船设计研究院. 一种用于穿梭车的集成驱动控制单元:CN201520738098.0[P]. 2016-03-02.
- [2] 上海振华重工(集团)股份有限公司. 有轨穿梭车的无线通讯导航控制系统:CN201520377335.5[P]. 2015-09-16.
- [3] XM800A 型电动保洁车[Z]. 河南机电高等专科学校. 2011.