

文章编号:1671-1637(2019)04-0182-09

机场道面除冰雪车辆队形控制模型

邢志伟¹, 李 斯², 罗 谦³

(1. 中国民航大学 电子信息与自动化学院, 天津 300300; 2. 中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300;
3. 中国民航局第二研究所, 四川 成都 610041)

摘要:为了解决机场道面实际除冰雪作业中方案不能完全适应环境的问题,考虑了除冰雪过程中作业方式和航空器适航条件,构建了具有时间约束的两阶段除冰雪作业模型;基于机场除冰雪车辆的作业能力,研究了机械除冰雪作业方法中多车辆的协同作业问题,设计了基于复拉普拉斯矩阵的队形控制模型;为了减少通讯消耗及保证通讯稳定性,基于 Henneberg 序列操作方法生成机场道面除冰雪作业车辆最优通讯图,并验证了所生成最优通讯图满足队形控制模型所要求双根条件。研究表明:两阶段除冰雪作业模型能够选择不同的异构车辆进行编队作业以达到时间和效果最优;基于复拉普拉斯矩阵和领航者方法相结合得到的控制模型与传统控制模型相比队形更稳定;采用边有向化操作所生成的最优通讯图保证了队形中领航者和跟随者之间通讯的有效性;在一阶运动学模型下,基于5自主体“人”字形编队从任意位置出发能够在1 min内实现速度收敛一致及生成期望队形,且运动轨迹中不存在绕圈、小角度转弯的情况,符合实际作业车辆运行规则,能在随后的作业中保持期望队形。可见,所构建的队形控制模型能够实现对大型异构除冰雪作业车辆的队形控制,满足预期要求。

关键词:机场除雪;队形控制;复拉普拉斯矩阵;Henneberg 序列;协同作业;最优通讯图

中图分类号:U491.264 **文献标志码:**A

Formation control model of airport pavement deicing vehicles

XING Zhi-wei¹, LI Si², LUO Qian³

(1. College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
2. College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
3. The Second Research Institute of CAAC, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: In order to solve the problem that the scheme of the actual deicing operation of the airport pavement cannot be fully adapted to the environment, the operation mode and the airworthiness condition of the aircraft during deicing process were considered, and a two-stage deicing operation model with time constraints was constructed. Based on the operation ability of the airport deicing vehicle, the collaborative operation problem of multiple vehicles in the mechanical deicing operation method was studied, and the formation control model based on the complex Laplacian matrix was designed. In order to reduce communication consumption and ensure communication stability, the Henneberg sequence operation method was used to generate the optimal communication diagram of the airport pavement deicing operation vehicles, and the generated optimal communication diagram satisfied the double root condition required by the

收稿日期:2019-02-21

基金项目:国家自然科学基金项目(U1533203);中央高校基本科研业务费专项资金项目(3122014D020)

作者简介:邢志伟(1970-),男,辽宁沈阳人,中国民航大学教授,工学博士,从事机场交通信息与控制研究。

通讯作者:李 斯(1993-),男,山东菏泽人,中国民航大学工学硕士研究生。

formation control model. Analysis result shows that the two-stage deicing operation model can select different heterogeneous vehicles for formation work to achieve the optimal time and effect. The formation of control model based on the combination of the complex Laplacian matrix and the leader method is more stable than the traditional control model. The optimal communication diagram generated by the edge directed ensures the availability of communication between the leader and follower in the formation. Under the first-order kinematics model, the speed convergence can be achieved and the desired formation can be generated within 1 min based on the 5-agent “人” type formation. There is no winding or small angle turning in the motion trajectory, which conforms to the actual operation rules of vehicles and can maintain the desired formation in subsequent operations. Therefore, the formation control model can realize the formation control of large-scale heterogeneous deicing operation vehicles and meet the expected requirements. 9 figs, 30 refs.

Key words: airport deicing; formation control; complex Laplacian matrix; Henneberg sequence; collaborative operation; optimal communication diagram

Author resumes: XING Zhi-wei (1970-), male, professor, PhD, cauc_xzw@163.com; LI Si (1993-), male, master student, laiwa111@163.com.

0 引言

至2017年底,中国机场航班起降架次达1 024.9万次,其中,北京首都国际机场航班起降架次达到59.7万次,随着航班密度的逐年增加,保证航班正常起降成为工作重点。冰雪天气是影响中国北方机场冬季航班正点率的主要因素,因此,提高除冰雪作业能力成为保证航班正点率的重要手段。除冰雪作业可以分为对航空器除冰雪和对机场道面除冰雪,国内外学者对航空器除冰雪进行了大量研究,已经形成多种成熟的理论和方法,其中航空器集中除冰雪方法已经得到广泛应用。机场道面除冰雪作业涉及到有限资源合理分配、车辆编队及路径优化等各种问题,目前研究很少涉及这一领域。

当前对机场道面除冰雪的研究主要是从路径规划、作业时间、资源利用等方向展开。Liu等把除冰雪作业当成一个网络优化问题,通过采用容量弧线路径问题的数学模型使车辆的运行路径最短^[1]; Hajibabai为使总除冰雪作业时间最短,提出了一个混合整数线性规划模型,并用动态规划算法弥补该模型的不足^[2]; Quirion-Blais等考虑了转弯限制、路线平衡与可变车速等因素,为每条路径设定了不同的优先级,通过清除优先级高的路面保证道路的最大通行度^[3]; Xie等在资源有限的情况下提出了一种基于时空网络的除雪模型,通过区域合作战略提高资源利用率并减小对环境的污染^[4-5]; Kinable等

在考虑街道网络、车辆运行限制、资源使用和补给限制等因素下开发并分析了3种不同的优化模型,即混合整数规划模型、约束规划模型、通过迭代改进搜索的启发式过程模型^[6]; Akbari等采用同步弧路径的方法解决了冰雪灾害发生后道路网络受到阻碍而封闭的问题,以便重新获得道路网络的连通性^[7]。2017年,戴姆勒公司和法兰克福机场合作进行了新的尝试,即通过远程控制实现车辆的自动编队除雪,这一试验为除冰雪作业研究提供了新方向。

机场道面除冰雪作业另一重要研究方向是采用微波等最新科技对除冰雪作业方法进行研究。Lu等为克服传统机械除冰雪技术的不足,采用矩形波导的微波来加热覆盖冰雪的道面,在有限元理论的基础上研究了微波频率与道面材料之间的除冰雪效率关系^[8]; Maleki等通过制备含有碳纤维增强聚合物的导电混凝土板,来研究该种材料下通过电加热方法进行除冰雪作业的可能性^[9]; Yao等根据碳纳米管网的各方向导电性能不同的特性,对碳纳米管网进行高度排列来定制不同大小的电阻,以适应任何表面和功率要求的快速除冰雪^[10]; Yi等通过研究新型化学制剂来提高除冰雪作业效率,在研究过程中发现采用煅烧回收方法所获得的双层氢氧化物制备的除冰剂具有优异的除冰耐久性^[11]; Chen等通过研究冰与不同材料之间的黏附性质,发现基于纳米技术的疏水表面具有较好的除冰雪性质,且在飞机等表面应用广泛,而在道面除冰雪应用中因各种制约因素使用较少^[12]。

目前对于除冰雪作业中路径规划等内容研究的局限点在于所研究对象通常为城市道路、高速公路等作业环境,而这些作业环境与机场道面环境具有一定的差异性,且除冰雪作业车辆性能相差较大。对于除冰雪作业新技术而言,每种技术在实际环境运用中存在诸多制约因素,如经济等,因此,对除冰雪作业车辆队形控制的研究具有实际意义。

本文首先根据除冰雪作业影响因素构建出适用于机场环境且具有时间约束的两阶段作业模型,随后对作业模型中机械物理除冰雪方法中涉及到多车辆协同作业过程进行研究,构建基于复拉普拉斯矩阵的队形控制模型,最后为保证队形车辆间可靠通讯,采用 Henneberg 序列生成最优通讯图,并在 MATLAB 仿真中采用除冰雪作业中常使用的“人”字形队形进行仿真,验证本文所构建的队形控制模型的有效性。

1 机场道面除冰雪作业车辆队形控制模型

机场道面是个大面积、少障碍、多限制的特殊作业环境,通常由停机坪、滑行跑道与跑道组成,对不同的区域有着不同的作业等级、时间要求。以跑道为例,跑道是航空器起降平台,跑道表面质量关系到航空器起降安全,因此,跑道是除冰雪作业优先保证的部分。中国机场跑道宽度通常为 60 m,作业范围需要达到 40 m 以上,单除冰雪设备无法满足作业需求,因此,为在限定时间内完成除冰雪任务需多车辆协同作业。本节主要研究多车辆协同作业过程中队形控制问题^[13]。

1.1 具有时间约束的两阶段除冰雪作业模型

机场道面除冰雪作业需综合考虑航空公司航班计划、机场服务能力、天气等多种影响因素,且除冰雪作业分为机场运行期间作业和机场正常关闭期间作业,对运行期间作业又可分成不停航作业和关闭机场作业。除冰雪作业在机场运行期间进行时有严格时间限制^[14]。随着航班密度逐年增加,越高效的除冰雪作业对航班计划的影响越小。面对不同的雪情、雪型及有无结冰等情况,已经形成了多种合理的作业方案。作业方案应对的天气情况可以简单分为无结冰小雪、无结冰中雪、无结冰大雪及结冰有雪这 4 种情况,在实际作业中应根据所面对的天气情况合理选择作业方案。

除冰雪是多设备组合作业,根据积雪情况和作业时间可以灵活选择不同设备。目前机场除冰雪作

业通常选用撒布化学制剂法和机械式物理法,在降雪初期,通常采用撒布化学制剂的办法保证机场正常运行,当积雪影响航空器安全起降后,采用扫雪、吹雪等机械式物理法进行作业。参考 Perrier 等对城市路面设计的冬季降雪雪量积累和清除两阶段模型^[15],构建出适合运行期间机场作业环境且具有时间约束的两阶段除冰雪作业模型,如图 1 所示。该模型分为三时间段积雪阶段和单时间段清除阶段,在积雪阶段进行除冰雪作业是利用航空器起降时间间隙或者少量影响随后航班准点起降的情况下进行作业,清除阶段是指在大面积影响航班正常情况下除冰雪作业。

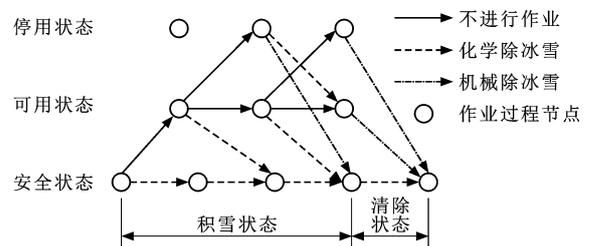


图 1 两阶段除冰雪作业模型

Fig. 1 Two-stage deicing operation model

该模型适用于航班密度大、具有编队作业能力的大型枢纽机场。在机场运行期间根据实际天气条件进行不停航作业或者暂时关闭机场除冰雪作业,能够减少作业时间,减少航班延误。对该除冰雪作业模型的解释如下。

(1) 时间段长短可变。当面对不同的雪情、作业时间时,每个时间段的长短是可变的。

(2) 时间约束为主。当降雪初期机场道面满足适航条件时可以不进行除冰雪作业,但是需要进行多次摩擦因数测定,若变化较大则需要进行化学除冰雪作业;进行化学除冰雪作业后道面可使用时间为化学制剂作业时间减去撒布时间和安全裕度时间;清除阶段作业采用机械除冰雪方法,这种作业方法的限定作业时间为枢纽机场作业限定时间。

(3) 模型适用范围及约束条件。模型考虑持续降雪这种天气情况,若为短时间降雪且雪后较长时间不再降雪,则可以根据实际情况修改模型中某一时间段;如果降雪为短时间大量降雪且天气情况不允许航空器起降,对于这种情况该模型不适用,且模型适用于具有编队能力、航班密度大的大型枢纽机场。

(4) 3 种状态。安全状态,机场跑道等道面摩擦因数不变或者少量变化;可用状态,机场跑道等道面摩擦因数变化较大,但是满足使用条件(摩擦因数大

于0.4);停用状态,机场道面摩擦系数无法满足使用条件,必须停航除冰雪(摩擦因数小于0.4)。

(5)3种作业方式。不进行作业,当面临的天气情况对航班正常起降在一定时间内没有影响时可以不进行除冰雪作业;化学除冰雪,当机场道面有少量积雪或者摩擦因数少量变化,可以通过撒布除冰剂、融雪剂等降低冰雪对起降的影响;机械除冰雪,当机场道面积冰积雪严重影响起降安全的时候需要进行机械除冰雪,例如抛雪、扫雪等,经过机械式除冰雪使机场道面摩擦因数达到安全状态。

(6)与传统作业方法对比,目前传统除冰雪作业以经验为主,且以一次作业为单位,作业区域分散,区域关联性小;而所构建的除冰雪作业模型以整个降雪期间或者整个机场运行期间为研究对象,并以整个机场作业道面为目标,增加各作业区域间关联性;根据实际天气安排不同区域的作业顺序,提高机场道面可使用时间,避免二次作业情况的发生。

对两阶段除冰雪作业模型分析可知,从起始节点(初始状态)到最终节点(最终状态)的网络中,每条路径都代表一个作业流程,在满足最少作业时间的前提下,合理选择作业路径,可以满足经济性和保护环境的要求。通过构建的两阶段除冰雪作业模型,在一定程度上可以减少或者推迟航班大量延误情况的发生。

具有时间约束的两阶段除冰雪作业模型中主要涉及化学除冰雪和机械除冰雪,目前机场撒布化学制剂的撒布车作业宽度可达30 m,而摩擦因数测试车单独使用,因此,不考虑撒布车和摩擦因数测试车协同作业队形控制问题。本次主要研究机械除冰雪作业中作业宽度窄、作业能力弱、使用数量多的除冰雪作业车辆在跑道、滑行道及部分机坪这种大面积、少障碍的作业环境中进行除冰雪协同作业队形控制问题。

当前机场所拥有的除冰雪作业车辆的种类、作业能力、动力学特性等各有不同且存在见雪就除、有设备就用的盲目除冰雪问题。根据所构建的除冰雪作业模型,当面对不同雪情时有针对性的设计个性化作业方案,选择最合适的作业车辆并根据其动力学特性合理布置车辆位置,通过车辆间的协同作业使整个队形中作业车辆的作业能力维持在同一水平,提高整体作业能力,并能够节约车辆资源,减少作业时间,提高作业效率。通过协同作业还能避免作业过程中信息传递失误,队形变形过程中车辆迷失自我位置、变换路径混乱,大幅度降速等问题。

1.2 基于复拉普拉斯矩阵的除冰雪车辆队形控制模型

具有时间约束的两阶段除冰雪作业模型是对整个除冰雪过程的建模分析,在本节选择该模型的机械除冰雪方法中涉及到多车辆协同作业过程进行研究并构建其队形控制模型。通过队形控制方法可以充分发挥作业车辆的动力学特性,提高作业速度,保证作业道面不遗漏。一次作业后道面满足适航要求,能够避免重复作业,做到减少作业时间,提高作业效率的要求。通过队形控制方法,保证车辆作业过程中按照所设计的队形进行作业,从而保证针对不同雪情所制定的个性化作业方案有效执行。

对机场道面除冰雪作业中涉及到的除冰雪作业车辆进行理想化分析,对其抽象成为质点模型,即不考虑实际中作业车辆的尺寸和队形规模,仅研究队员之间的相对关系并进行相似队形控制研究。理想化后的除冰雪车辆称为自主体,且不考虑各个自主体之间的差异。

目前对于队形控制的研究主要集中在队形生成、队形保持、队形切换及避障等方面^[16-20],经过多年的研究已经形成基于虚拟结构法、基于行为法等多种有效的控制方法。由于通讯能力的不同,自主体之间通讯方式可以分成基于相对/绝对位置构建队形方法、基于相对距离构建队形方法和基于位移构建队形方法等^[21]。多自主体队形控制是为了保证在自主体移动过程中相对距离、相对速度等固定不变,即

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} \| \mathbf{x}_q(t) - \mathbf{x}_p(t) \| = d_{pq} \\ \lim_{t \rightarrow \infty} | \dot{\mathbf{x}}_p(t) - \mathbf{c}(t) | = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{x}_p(t)$ 、 $\mathbf{x}_q(t)$ 分别为自主体 p 与 q 在 t 时刻的位置; d_{pq} 为两自主体之间期望距离; $\mathbf{c}(t)$ 为对整个队形设定的期望移动速度。

在研究过程中结合跟随领航者方法和图论知识,构建出基于相对距离的复拉普拉斯矩阵队形控制模型。

用复数 z_1, z_2, \dots, z_n 表示 n 个自主体在实际场景的二维空间中所处的位置,用图 $G=(V, E)$ 表示 n 个自主体之间所对应的关系,其中 $V=\{v_i | i=1, 2, \dots, n\}$ 为图的节点集, $E=\{e_{ij} | i, j=1, 2, \dots, n\}$ 为图中的边集,并表示节点之间的通讯关系。如果节点 $v_i \in V$ 且 $v_j \in V$,边 $(v_i, v_j) \in E$,代表节点 v_i 与 v_j 可进行通信,并定义节点 v_i 的邻居集合为 $N_i=\{v_j, (v_i, v_j) \in E\}$ 。定义 ξ_i 表示节点 i 在复平面中的坐标,

用复向量 $\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)^T$ 表示 n 个自主体在坐标系下的期望编队即队形的基向量。为保证规定自主体之间位置的不重叠,规定 $\xi_i \neq \xi_j$, 即 $i \neq j$ ^[22-23]。

在连续系统下一阶运动学模型可以表示为

$$\dot{z}_p = u_p \quad (2)$$

式中: z_p 为自主体 p 在复平面上的坐标; u_p 为自主体 p 的运动速度。

为保证在运动过程中信息的可靠传输,对每个队形设定 2 个领航者。假设执行领航者职能的自主体 a, b 具有相同的初始运动速度 $v_0(t)$, 即领航者的控制输入为

$$u_a = u_b = v_0(t) \quad (3)$$

对连续系统中执行跟随职能的自主体 a', b' 施加的速度控制器为

$$\begin{cases} u_{a'} = d \sum_{b' \in N_{a'}} \omega (z_{b'} - z_{a'}) & a', b' = 1, 2, \dots, n \\ \mathbf{L}\xi = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: d 为待设计控制参数; ω 为满足线性约束条件的复数权重系数; \mathbf{L} 为复拉普拉斯矩阵。

在控制策略式(4)下,系统可以表示为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{z}} = -\mathbf{D}\mathbf{L}\mathbf{z} = (z_1, z_2, \dots, z_n)^T \\ \mathbf{D} = \text{diag}(d_1, d_2, \dots, d_n) \end{cases} \quad (5)$$

式中: \mathbf{D} 为稳定矩阵。

\mathbf{D} 的主要作用是配置复拉普拉斯矩阵的特征根(零特征根除外),使其全部位于坐标系右半平面,从而使多自主体系统渐进收敛形成一个稳定运动编队。

机场道面除冰雪作业车辆队形控制模型中涉及到复拉普拉斯矩阵和稳定矩阵,其中图 G 对应复拉普拉斯矩阵 \mathbf{L} 各元素的值 φ_{ij} 为^[21]

$$\varphi_{ij} = \begin{cases} -\chi_{ij} & i \neq j, v_j \in N_i \\ 0 & i \neq j, v_j \notin N_i \\ \sum_{v_j \in N_i} \chi_{ij} & i = j \end{cases} \quad (6)$$

式中: χ_{ij} 为边 e_{ij} 的复权重。

若任意一个自主体的邻居个数 $f \geq 2$, 因此,求取 χ_{ij} 的方法有 2 种,分别对应 $f=2$ 和 $f>2$ 这 2 种情况,求取方法为

$$\begin{cases} (\chi_{ij}, \chi_{ik}) = p'(\xi_k - \xi_i, \xi_i - \xi_j) & f = 2 \\ (\chi_{i1}, \chi_{i2}, \dots, \chi_{in}) = \sum_{h=1}^{C_n^f} p' \zeta_h & f > 2 \end{cases} \quad (7)$$

式中: p' 为任意非零复数; ζ_h 为第 h 种组合的 n 维向量。

在求解 χ_{ij} 时需要满足的约束条件为

$$\sum_{v_j \in N_i} \chi_{ij} (\xi_j - \xi_i) = 0 \quad (8)$$

引理 1: 如果有向图 G 是双根的,则对几乎所有 \mathbf{L} , 存在一个稳定矩阵 \mathbf{D} 能够任意配置矩阵 \mathbf{DL} 的特征根(零特征根除外)^[24]。

2 除冰雪作业车辆队形最优通讯图

编队中自主体之间通讯存在滞后等问题,因此,为减小通讯能量消耗,采取基于 Henneberg 序列操作生成最简通讯图,随后对最简通讯图中的边赋予权值使其变为赋权通讯图,最后对生成的赋权通讯图进行边有向化操作生成最优通讯图,并验证所生成的最优通讯图能够保证除冰雪作业车辆期望队形生成。

2.1 基于 Henneberg 序列除冰雪作业最简通讯图生成

除冰雪作业车辆编队在作业过程中,如果任意车辆之间的距离不发生改变,表明车辆编队所对应图中任意节点间的距离不发生变化,即车辆编队所对应的图为稳定通信图^[25]。当图 $G=(V, E)$ 在为稳定通讯图的前提下,已知 n_E 为边的个数, n_V 为点的个数,满足 $n_E \leq 2n_V - 3$ 时,图 G 为最简通讯图(不唯一)。

Henneberg 序列是关于图 G_2, G_3, \dots, G_N 的一个序列,其中 G_2 是包含 2 个顶点的完全图, $G_\tau (\tau \geq 3)$ 由 $G_{\tau-1}$ 通过增加顶点或者边分离操作获得。由于增加顶点和边分离操作保证了生成过程的最简性,同时 G_2 是最简通讯图,所以序列中的每个图都是最简通讯图^[26]。增加顶点操作如图 2 所示。图 2(a) 中有 v_j, v_k 两个节点,且属于最简通讯图 $G=(V, E)$, 增加顶点操作是指增加点 v_i 和边 e_{ij}, e_{ik} , 见图 2(b)。

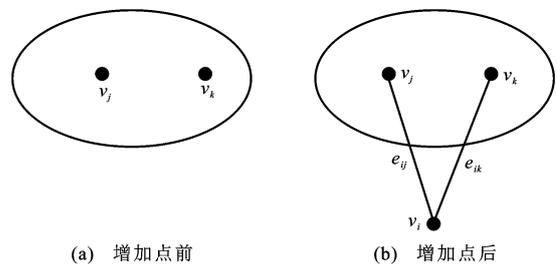


图 2 基于 Henneberg 序列增加点

Fig. 2 Increasing point based on Henneberg sequence

2.2 除冰雪作业车辆队形最优通讯图生成方法

对最简通讯图进行边有向化操作,使自主体之间的双向通讯变成单向通讯,减小了通讯能量开销。当有向图中任意节点 v_i 的出度满足 $d^-(i) \leq 2$, 此

时最简通讯图称为半优通讯图。而最优通讯图是在赋权通讯图的基础上进行边有向化操作并满足任意节点的出度为 $d^-(i) \leq 2^{[27]}$ 。为保证通信传递的可靠性,为每个编队设置 2 个领航者,在对赋权通讯图进行边有向化操作时,从指定的领航者关联边开始,操作需要满足的条件如下。

(1)领航者的出度 $d^-(i) = 2$,入度 $d^+(i) = 0$; 跟随者的入度 $d^+(j) \geq 2$ 。

(2)远离指定领航者且能满足 $d^+(i) = 0$ 的节点暂不进行边有向化操作。

(3)第 2 个领航者自主体尽量接近权值较大的边,保证通信的可靠性。

(4)当所有的跟随者自主体都满足入度 $d^+(j) \geq 2$ 后,对于剩余的边进行有向化时,方向指向远离领航者的自主体或指向大权值边。

在满足上述条件下,对赋权通讯图进行边有向化操作生成最优通讯图过程如下。

Step 1:将所有节点的出度 $d^-(i)$ 设置为零。

Step 2:从指定领航者关联边开始有向化操作,并使关联边两端节点出度 $d^-(i) = 2$ 。

Step 3:对两节点关联边进行增加顶点操作,并使随后节点出度 $d^-(i) = 2$ 。

Step 4:重复 Step 3 过程,使编队中有向边逐渐覆盖无向边。

Step 5:确定第 2 个领航者并保证入度 $d^+(i) = 0$,出度 $d^-(i) = 2$ 。

Step 6:对赋权通讯中没有覆盖到的边按照条件(4)进行有向化操作,得到最优通讯图。

由上述内容总结出机场道面除冰雪作业车辆队形最优通讯图生成过程如下。

Step 1:分析所需除冰雪作业车辆数目,确定期望队形,构建图 $G = (V, E)$ 。

Step 2:基于 Henneberg 序列生成最简通讯图。

Step 3:由最简通讯图赋权生成赋权通讯图。

Step 4:有向化赋权通讯图生成最优通讯图。

2.3 最优通讯图双根性验证

所构建的机场道面除冰雪作业车辆队形控制模型生成稳定收敛期望队形的充分必要条件是所生成的最优通讯图能够保证领航者到跟随者各点之间存在多条通路。

引理 2^[22]:有向图 G 中,存在复向量 ξ 使得相似编队可实现的充分必要条件是 G 为双根的。

定理:在满足 $n_E \leq 2n_V - 3$ 和 $d^-(i) \leq 2$ 条件下,基于 Henneberg 序列生成的最优通讯图是双根的。

设集合 $S = \{s_1, s_2\}$ 表示最优通讯图中领航者自主体集合,设集合 $R = \{r_1, r_2, \dots\}$,且 $\{s_1, s_2\} \notin R$ 为跟随者自主体集合。在有向图中,集合 S 中任意 1 个节点到集合 R 中任意 1 个节点如果存在 1 条通路,那么,称这 2 个节点是可达的。对于最优通讯图,如果除去集合 R 中任意 1 个节点后,存在一条通路从集合 S 到达集合 R 中节点,则称集合 S 到集合 R 是次可达的。如果从集合 S 到集合 R 中所有节点都是次可达的,则说明最优通讯图是双根的,集合 S 中的节点就是最优通讯图的根。如果集合 S 到集合 R 不是次可达的,那么表明到目的节点(跟随者)只存在 1 条通路,即目的节点入度 $d^-(i) = 1$,不满足最优通讯图生成条件,因此,最优通讯图满足双根条件。如图 3 为任选最优通讯图,可知除去集合 R 中任意 1 个节点,集合 S 到集合 R 中总会存在另外 1 条通路到集合 R 中的目的节点^[22,28]。

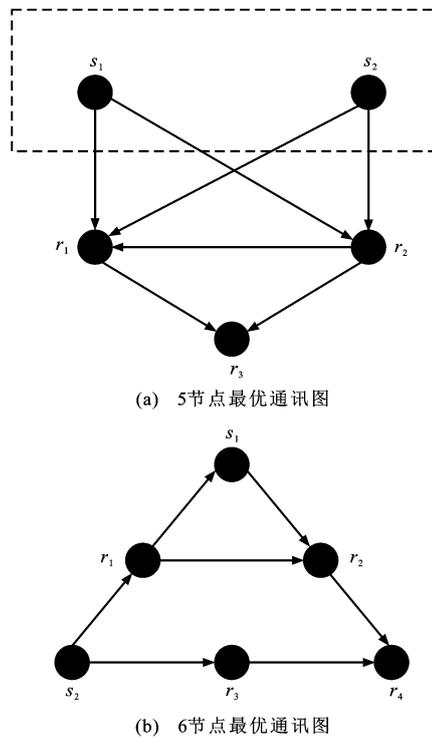


图 3 最优通讯图

Fig. 3 Optimal communication diagrams

由上述可知在满足 $n_E \leq 2n_V - 3$ 和 $d^-(i) \leq 2$ 条件下生成的最优通讯图都满足双根条件,即所生成最优通讯图在基于复拉普拉斯矩阵队形控制模型下能够生成稳定收敛的期望队形。

3 仿真结果分析

机场道面除冰雪作业队形设计时需要充分考虑车辆作业轨迹的重叠宽度、车辆间距、积雪运动方向

等因素,因此,通过所设计的队形控制车辆作业能够避免重复作业并满足适航要求,作业时常用队形为“人”字形或梯形编队^[13],本文采用 5 个自主体组成“人”字形编队,并指定自主体 1 为第 1 个领航者,基于增加点的 Henneberg 序列生成最简通讯图的过程如图 4 所示。可见生成的通讯图满足 $n_E \leq 2n_V - 3$ 条件,即该通讯图为最简通讯图。

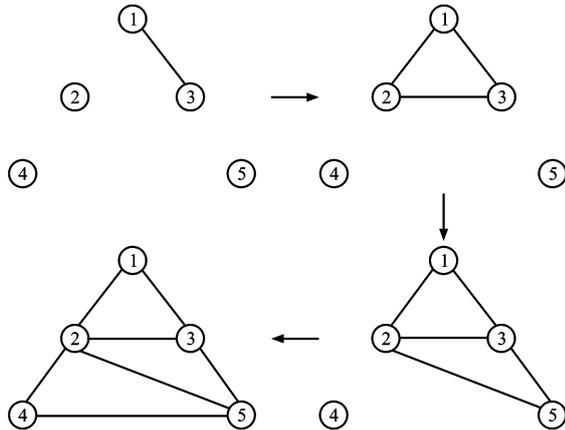


图 4 基于 Henneberg 序列增加点队列

Fig. 4 Increasing point queues based on Henneberg sequence

为简化操作,在仿真中对最简通讯图所有边赋同样权值,即最简通讯图为赋权通讯图。采用上述方法对赋权通讯图进行边有向化操作生成最优通讯图,如图 5 所示。分析所生成通讯图可知出度 $d^-(i) \leq 2$,即生成的通讯图为最优通讯图,并且可知自主体 4 为第 2 个领航者,其余为跟随者。对最优通讯图分析可知,除去跟随者集合中任一节点,存在从领航者集合到跟随者集合中各点的路径,即所生成的最优通讯图满足双根条件。

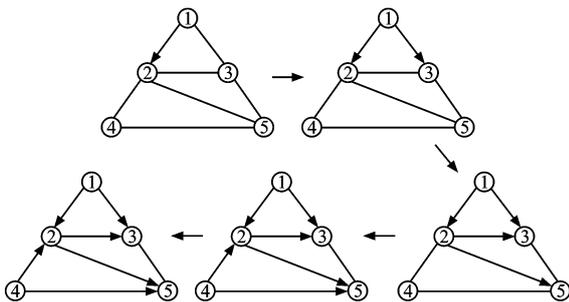


图 5 最优通讯图生成步骤

Fig. 5 Generation steps of optimal communication graph

在复平面中放置生成的最优通讯图,使所有自主体具有确定的位置,最优通讯图在复平面中位置见图 6。

其队形基向量为

$$\xi = (2l, -1+l, 1+l, -2, 2)^T \quad (9)$$

式中: l 为复数的虚部。

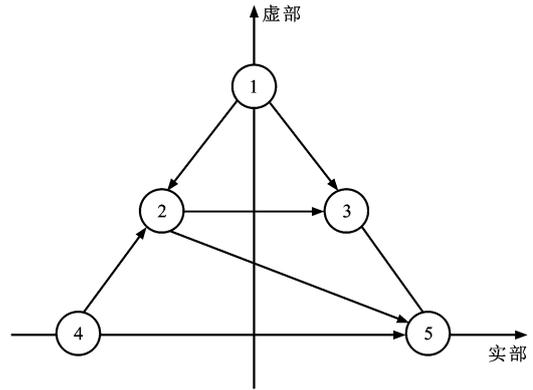


图 6 编队在复平面中的位置

Fig. 6 Formation in the complex plane position

利用复拉普拉斯矩阵 L 来表示空间编队,该最优通讯图对应的复拉普拉斯矩阵为

$$L = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1+l & -2-2l & 0 & 1+l & 0 \\ 2 & -1+l & -1-l & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5-l & 1+l & -4+2l & -2-2l \end{bmatrix} \quad (10)$$

稳定矩阵 D 由同伦牛顿法计算得

$$D = \text{diag}(3.32 - 1.33l, 4.20 + 2.03l, -3.30 - 3.89l, 1, 1)$$

可得到 DL 矩阵的特征值为 $2 + 2l, 0.59 - 7.19l, 4.34 + 12.46l, 0, 0$ 。可见稳定矩阵使特征值全部位于右半平面。给 2 个领航者施加相同的同步速度控制输入

$$v_0(t) = 1 + 0.5l$$

在连续系统一阶运动学模型下,在 MATLAB 中仿真结果见图 7、8。

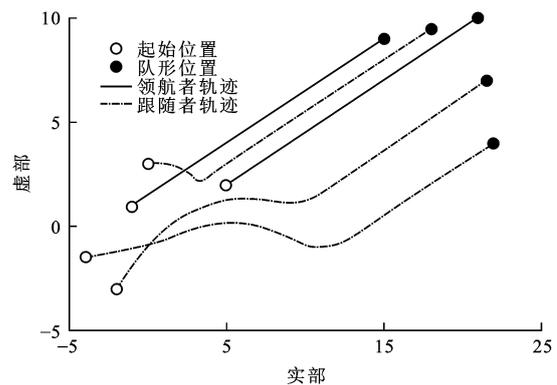


图 7 多自主体运动轨迹

Fig. 7 Multi-agent motion trajectories

由图 7 可知:自主体从任意位置出发,最终渐进收敛到所期望的队形,并在随后的运动中保持相同速度。由图 8 可知:最终各自主体收敛一致,保持期望的运动编队。可见,本文所构建的队形控制模型

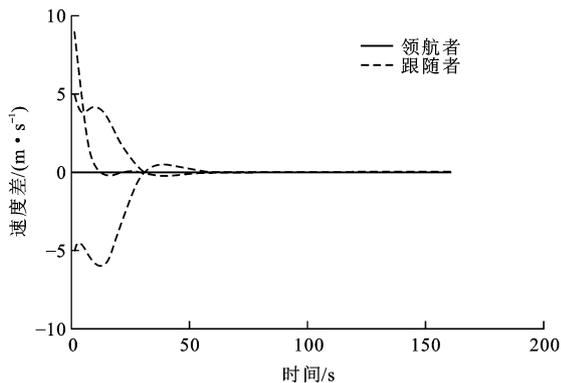


图 8 多自主体速度收敛曲线

Fig. 8 Curves of multi-agent velocity convergence

能够得到所期望的队形,能够实现除冰雪作业车辆的队形控制。

机场道面除冰雪队形控制的研究对象、研究环境、研究条件等具有特殊性,因此,无法进行实际现场试验验证,只能通过仿真分析来说明所构建模型的可行性。目前队形控制方法研究集中于小型同构的自主体^[29-30],而除冰雪作业车辆属于大型异构自主体,在此采用基于领航者和导航控制的同构队形控制方法与本文所构建队形控制方法做对比仿真。基于领航者和导航控制多自主体运动轨迹如图 9 所示。

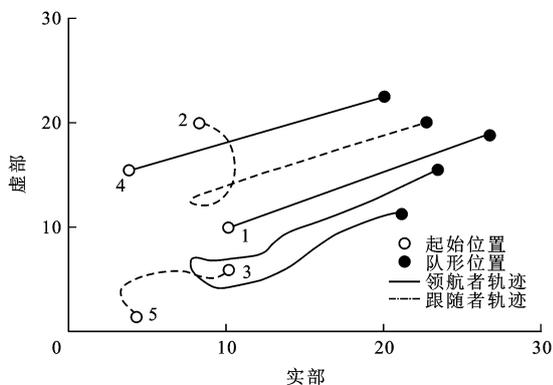


图 9 基于领航者和导航控制多自主体运动轨迹

Fig. 9 Multi-agent motion trajectories based on leader and navigation control

比较图 7、9 可以看出:在图 9 中自主体运动前期轨迹存在绕圈、急转弯现象,且运动轨迹不平滑,这种情况在小型同构自主体中不会出现,但是对于除冰雪作业车辆有转弯半径这一条件限制,因此,在运动过程中不能出现急转弯等情况;最后生成的队形和理想队形在自主体距离保持上有一定的误差,生成效果不理想。由此可以得出:基于领航者和导航控制的队形控制方法并不完全适用于机场道面除冰雪作业车辆,而本文中所构建的队形控制方法能够很好的形成理想队形,且运动轨迹较平滑符合实

际作业情况。

4 结 语

(1)具有时间约束的除冰雪作业模型能够根据实际雪情设计出最优作业方案。面对除冰雪作业时间有限、雪情雪型多变等情况时,可以通过修改模型中积雪阶段的作业路径生成新的最优作业方案。

(2)所构建的基于复拉普拉斯矩阵的队形控制模型能够在机场这一特殊作业环境下的对于不同种类、不同作业能力除冰雪车辆的队形控制,生成期望编队队形。

(3)通过最优通讯图构建方法,能够解决机场除冰雪作业中多车辆协同作业时信息传递混乱、通讯不稳定等情况,实现队形中队员间通讯最优。

(4)在研究中对实际情况进行理想化分析,没有考虑在某些路径中车辆转弯半径的影响。在今后的工作中应重点研究在某些作业环境下如何消除车辆转弯半径的影响,以及车辆队形变化下的队形控制方法。

参 考 文 献 :

References :

[1] LIU Gang, GE Yong-feng, QIU T Z, et al. Optimization of snow plowing cost and time in an urban environment: a case study for the city of Edmonton[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2014, 41(7): 667-675.

[2] HAJIBABAI L. Scheduling and routing of service trucks and planning of resource replenishment locations for winter roadway maintenance[D]. Urbana: University of Illinois, 2014.

[3] QUIRION-BLAIS O, LANGEVIN A, LEHUÉDÉ F, et al. Solving the large-scale min-max K-rural postman problem for snow plowing[J]. Networks, 2017, 70(3): 195-215.

[4] XIE Bing-lei, JIN Lei, MU Wei. Snow disposal operations optimization in winter highway maintenance[C]//IEEE. 21th Annual International Conference on Management Science and Engineering. New York: IEEE, 2014: 227-232.

[5] XIE Bing-lei, LI Ying, JIN Lei. Vehicle routing optimization for deicing salt spreading in winter highway maintenance[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2013, 96: 945-953.

[6] KINABLE J, VAN HOEVE W J, SMITH S F. Optimization models for a real-world snow plow routing problem[C]//QUIMPER C G. Proceedings of 13th International Conference on Integration of Artificial Intelligence and Operations Research Techniques in Constraint Programming (CPAIOR 2016). Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2016: 229-245.

[7] AKBARI V, SALMAN F S. Multi-vehicle synchronized arc routing problem to restore post-disaster network connectivity[J]. European Journal of Operational Research, 2017, 257(2):

- 625-640.
- [8] LU Song, XU Jin-yu, BAI Er-lei, et al. Investigating microwave deicing efficiency in concrete pavement[J]. RSC Advances, 2017, 7(15): 9152-9159.
- [9] MALEKI P, IRANPOUR B, SHAFABAKHSH G. Investigation of de-icing of roads with conductive concrete pavement containing carbon fibre-reinforced polymer (CFRP)[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2019, 20(6): 682-690.
- [10] YAO Xu-dan, HAWKINS S C, FALZON B G. An advanced anti-icing/de-icing system utilizing highly aligned carbon nanotube webs[J]. Carbon, 2018, 136: 130-138.
- [11] YI Yi, YU Jian-ying, CHEN Xiao, et al. Preparation and properties of a self-deicing coating based on layered double hydroxide[C]//Trans Tech Publications Ltd. . 17th IUMRS International Conference in Asia. Zurich: Trans Tech Publications Ltd. , 2017: 1553-1560.
- [12] CHEN Hua-xin, WU Yong-chang, XIA Hui-yun, et al. Review of ice-pavement adhesion study and development of hydrophobic surface in pavement deicing [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2018, 5(3): 224-238.
- [13] 邢志伟,陈亚雄,罗 谦,等. 枢纽机场道面除冰雪机群资源优化配置[J]. 中国民航大学学报, 2017, 35(6): 36-40, 51. XING Zhi-wei, CHEN Ya-xiong, LUO Qian, et al. Optimization and allocation research of hub airport pavement fleet deicing resource[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2017, 35(6): 36-40, 51. (in Chinese)
- [14] FAGHRI A, LICHLITER A, FAGHRI A, et al. Assessing airport snow and ice removal and its economic implications for sustainable airport management [J]. Journal of Airport Management, 2014, 8(2): 174-188.
- [15] PERRIER N, LANGEVIN A, CAMPBELL J F. A survey of models and algorithms for winter road maintenance. Part I: system design for spreading and plowing[J]. Computers and Operations Research, 2006, 33(1): 209-238.
- [16] 王祥科,李 迅,郑志强. 多智能体系统编队控制相关问题研究综述[J]. 控制与决策, 2013, 28(11): 1601-1613. WANG Xiang-ke, LI Xun, ZHENG Zhi-qiang. Survey of developments on multi-agent formation control related problems[J]. Control and Decision, 2013, 28(11): 1601-1613. (in Chinese)
- [17] WANG He-sheng, GUO De-jun, LIANG Xin-wu, et al. Adaptive vision-based leader-follower formation control of mobile robots[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(4): 2893-2903.
- [18] WANG Xiang-ke, ZENG Zhi-wei, CONG Yi-rui. Multi-agent distributed coordination control: developments and directions via graph view point[J]. Neurocomputing, 2016, 199: 204-218.
- [19] SALEHIZADEH M, DILLER E. Two-agent formation control of magnetic micro-robots in two dimensions[J]. Journal of Micro-Bio Robotics, 2017, 12(1-4): 9-19.
- [20] ALONSO-MORA J, BAKER S, RUS D. Multi-robot formation control and object transport in dynamic environments via constrained optimization[J]. International Journal of Robotics Research, 2017, 36(9): 1000-1021.
- [21] OH K K, PARK M C, AHN H S. A survey of multi-agent formation control[J]. Automatica, 2015, 53: 424-440.
- [22] WANG Li-li, HAN Zhi-min, LIN Zhi-yun. Formation control of directed multi-agent networks based on complex Laplacian[C]// IEEE. Proceedings of the 51st IEEE Conference on Decision and Control. New York: IEEE, 2012: 5292-5297.
- [23] HAN Zhi-min, LIN Zhi-yun, FU Min-yue, et al. Distributed coordination in multi-agent systems: a graph Laplacian perspective [J]. Frontiers of Information Technology and Electronic Engineering, 2015, 16(6): 429-448.
- [24] LIN Zhi-yun, WANG Li-li, HAN Zhi-min, et al. Distributed formation control of multi-agent systems using complex Laplacian [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2014, 59(7): 1765-1777.
- [25] 罗小元,邵士凯,关新平,等. 多智能体最优持久图编队动态生成与控制[J]. 自动化学报, 2013, 39(9): 1431-1438. LUO Xiao-yuan, SHAO Shi-kai, GUAN Xin-ping, et al. Dynamic generation and control of optimally persistent formation for multi-agent systems [J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(9): 1431-1438. (in Chinese)
- [26] HENDRICKX J M, ANDERSON B D O, DELVENNE J C, et al. Directed graphs for the analysis of rigidity and persistence in autonomous agent systems[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2007, 17(10/11): 960-981.
- [27] 罗小元,杨 帆,李绍宝,等. 多智能体系统的最优持久编队生成策略[J]. 自动化学报, 2014, 40(7): 1311-1319. LUO Xiao-yuan, YANG Fan, LI Shao-bao, et al. Generation of optimally persistent formation for multi-agent systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(7): 1311-1319. (in Chinese)
- [28] 刘 春,宗 群,窦立谦. 基于持久图的双轮机器人编队生成与控制[J]. 控制工程, 2017, 24(3): 518-523. LIU Chun, ZONG Qun, DOU Li-qian. Generation and control of wheeled robots formation based on persistent graph theory[J]. Control Engineering of China, 2017, 24(3): 518-523. (in Chinese)
- [29] MENG De-yuan, JIA Ying-min, DU Jun-ping, et al. On iterative learning algorithms for the formation control of nonlinear multi-agent systems[J]. Automatica, 2014, 50(1): 291-295.
- [30] YANG Tao, MENG Zi-yang, DIMAROGONAS D V. Global consensus for discrete-time multi-agent systems with input saturation constrains[J]. Automatica, 2014, 50: 499-506.