

doi: 10.7690/bgzd.2024.08.014

基于时间自动机的动力调度岗位培训仿真机理建模

罗昌俊, 任星倩, 何 福, 马永一, 汤 瀑

(中国空气动力研究与发展中心计算空气动力研究所, 四川绵阳 621000)

摘要: 针对大型风洞群中压空气系统存在调度机理复杂、岗位人员素质要求高、系统实操培训代价大等问题, 实施基于时间自动机的动力调度岗位培训仿真机理建模。通过混杂系统理论提出适合大型风洞群中压空气调度的扩展时间自动机模型, 基于先来先服务策略构建了资源申请、机组工作等队列, 建立了调度器、就地执行器等核心机理模型, 解决了现有技术中存在的运行模式粗放、大型压缩机组频繁启动能耗物耗高等问题, 并采用 UPPAAL 工具对模型进行了验证, 取得满意的效果。结果表明: 该模型的建立不仅为岗位人员掌握设备结构原理、积累实操经验提供有效手段, 而且为建立风洞试验调度仿真系统、合理有效实施风洞动力调度岗位培训打下了基础。

关键词: 风洞群; 中压空气资源; 调度仿真; 岗位培训; 扩展时间自动机; UPPAAL

中图分类号: 文献标志码: A

Modeling and Verification of Simulation Mechanism of Power Dispatching Job Training Based on Time Automata

Luo Changjun, Ren Xingqian, He Fu, Ma Yongyi, Tang Pu

(Computational Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: Aiming at the problems such as complex scheduling mechanism, high quality requirement of post personnel and high cost of system practical operation training of medium pressure air system in large wind tunnel group, the dynamic scheduling job training simulation mechanism modeling based on time automata is implemented. Based on the hybrid system theory, an extended time automaton model suitable for medium pressure air scheduling in large wind tunnel groups is proposed. Based on the first-come, first-served strategy, queues for resource application and unit work are constructed, and core mechanism models such as scheduler and local actuator are established, which solves the problems existing in prior art such as extensive operation mode and high energy and material consumption caused by frequent start-up of large compressor units. UPPAAL tool is used to verify the model, and satisfactory results are obtained. The results show that the establishment of the model not only provides an effective means for the staff to master the equipment structure principle and accumulate practical operation experience, but also lays a foundation for the establishment of wind tunnel test scheduling simulation system and the reasonable and effective implementation of wind tunnel dynamic job training.

Keywords: Wind tunnel group; Medium pressure air resources; Dispatching simulation; Job trainin; Extended time Automata; UPPAAL

0 引言

作为国家的战略资源, 系列化的大型风洞设备的高中压空气、高低真空、特种气体等动力资源的精准调度、精益保障是风洞试验高效运行的必备条件^[1]。动力调度是整个风洞群各类动力资源调度的关键岗位, 负责上百台套复杂、危险设备的调度, 对人员素质要求高, 但是传统的“传帮带”培训方式主要靠人工和文档, 存在人员实操经验少、了解原理不深入等问题。以机理模型为核心的调度模拟器的出现, 改变了传统教学与培训模式, 为人员掌握设备结构原理、积累操作经验提供有效手段^[2]。

动力资源调度系统是一个典型的混杂系统, 需

要集成企业内部的设备控制、过程控制、运营管理和调度决策等各层次信息和数据, 实现工业化和信息化的融合^[3]。

混杂系统建模是混杂系统研究的重要领域之一。由于混杂系统涉及领域广泛, 遇到的问题复杂多样, 很难用一种通用的模型来解决所有的问题^[4]。常见的模型包括 petri 网模型^[5]、自动机模型^[6-7]、层次结构模型^[8]等, 这些模型适用于不同类型的混杂系统^[9]。

本文针对大型风洞群中动力资源调度和岗位仿真培训的需求, 以实现一类工业指标(如罐群实时标方容量等)连续变化控制为目标, 提出一种基于扩展

收稿日期: 2024-04-17; 修回日期: 2024-05-12

第一作者: 罗昌俊(1968—), 男, 四川人, 硕士。

时间自动机的调度岗位仿真机理建模方法，并采用快速验证工具 UPPAAL 进行模型分析验证。

1 设计

1.1 扩展时间自动机

时间自动机是一种计算模型，使用有限个真值时钟变量来表示有时间约束的状态转换图。使用时间自动机对系统进行建模和分析设计能够保证所开发的实时系统等复杂系统具有高可信性。该模型具有时间自动机^[10]、扩展时间自动机^[9]和时间自动机的积构造^[12]三种定义。

1.2 验证工具 UPPAAL

UPPAAL 是一种以时间自动机作为行为模型而且可以对实时系统模型进行自动验证的工具。UPPAAL 主要通过快速搜索机制来验证时钟约束和可达性。验证工具 UPPAAL 主要包括编辑器、模拟器和验证器三个部分。编辑器用于创建和编辑要分析的系统，模拟器用于确认所建系统能否正常执行，验证器使用简化的计算树逻辑(Computation Tree Logic, CTL)来快速搜索系统的状态空间检查时钟约束和反应限制性质，对系统进行验证^[16]。

2 实现方法

2.1 扩展时间自动机建模

中压空气资源控制包括罐群当前标方容量等连续变化，又包括风洞试验需求等离散事件，是典型的混杂系统。

2.2 系统总体设计

将整个系统分为用户层、调度层及就地执行层 3 个层级，如图 1 所示。

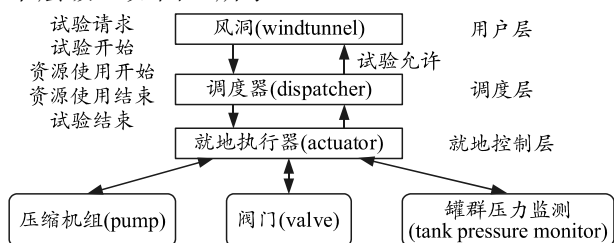


图 1 系统总体结构

上层为用户层，发出试验请求、试验开始、资源使用开始、资源使用结束、试验结束等信号，并收受下层送来的试验允许信号，属于离散事件层。

底层为就地执行层，包括执行器、压缩机组、阀门以及罐群压力监测器等部分，实现对压缩机组启动、停机、放空，阀门的开启、关闭，罐群压力

的实际控制或监测，罐群压力随时间连续变化(试验开始时，罐群压力将剧烈变化)，所以底层属于连续时间层。

中间为调度层，根据调度策略选择机组，启动压缩机组打气以达到用户所需要的中压空气标方容量，并根据风洞需求、罐群当前标方容量、最小预警容量等信息确定是否停机或放空。

为了实现对中压压缩机组的智能控制，设定对压缩机及相关装置的具体控制要求如下：

1) 上层用户层表示风洞用户的不确定需求，建立中压资源请求队列，当风洞试验请求达到时，进入队列；

2) 不失一般性，选取不同风洞的试验最低标方容量 N_w^i 的最高值加一个常量 $V1$ 为最低预警容量 N_{min} ，当 $N_T(t) \leq N_{min}$ 时，启动一台压缩机组；

3) 不失一般性，选取罐群的额定标方值 N_R 减去一个常量 $V2$ 为最高预警容量 N_{max} ，当 $N_T(t) \geq N_{max}$ 时，压缩机组停止或放空；

4) 以最高预警容量与最低预警容量之差，除以机组数量 i ，得到需求标方容量级差 $l1, l2, \dots, li-1$ ，和 i 台机组的启动门限；

5) 当有新的风洞试验请求到达时，进入请求资源队列，队列中每个元素之和为风洞群请求标方容量，当风洞群请求标方容量 $>$ 最低预警容量 $+l1$ (第二台机组启动门限)，则启动第二台压缩机组，以此类推；

6) 按先到先服务的顺序，打开对应风洞的阀门，为风洞试验提供中压空气资源，当该风洞试验完成后，关闭对应风洞阀门，从请求资源队列移除，并更新风洞群请求标方容量；

7) 当罐群当前标方容量达到最高预警容量后，不失一般性，压缩机组放空 60 分钟，如罐群当前标方容量无变化，则压缩机组停机。

2.3 系统的扩展时间自动机建模

从系统中抽象出风洞(wind)、压缩机(pump)、阀门(valve)、罐群压力监测(monitor)、调度器(dispatcher)、就地执行器(actuator)六个类，分别建立时间自动机模型，整个系统就是 $wind||pump||valve||monitor||dispatcher||actuator$ 。

1) 建立风洞需求模型(wind)

建立风洞请求资源队列，采取先到先得的服务原则。

2) 建立压缩机模型(pump)

压缩机组将高压空气打入气罐群中，为每个风洞试验提供高压气源。包括停机 (halt)、启动 (work)、放空 (unload) 三个位置。

3) 建立阀门模型 (valve)

通过中压空气罐群的阀门为相应风洞提供中压空气资源。风洞群中每个风洞对应一个阀门模型，阀门模型计时函数监测该阀门的开启时间。

4) 建立罐群压力监测模型 (monitor)

罐群压力监测模型实现对中压罐群压力的实时

监测，判断是否在允许压力范围之内，防止罐群压力过低、过高。

5) 建立调度器模型 (dispatcher)

调度器模型 dispatcher 使用 line_work、line_halt、line_unload 三个队列分别记录工作机组、空闲机组和放空机组的队列，根据风洞发来的试验请求 test_request、压缩机停止信号、压缩机放空信号，为实现压缩机组的合理轮转，队列采用先来先服务策略。如图 2 所示。

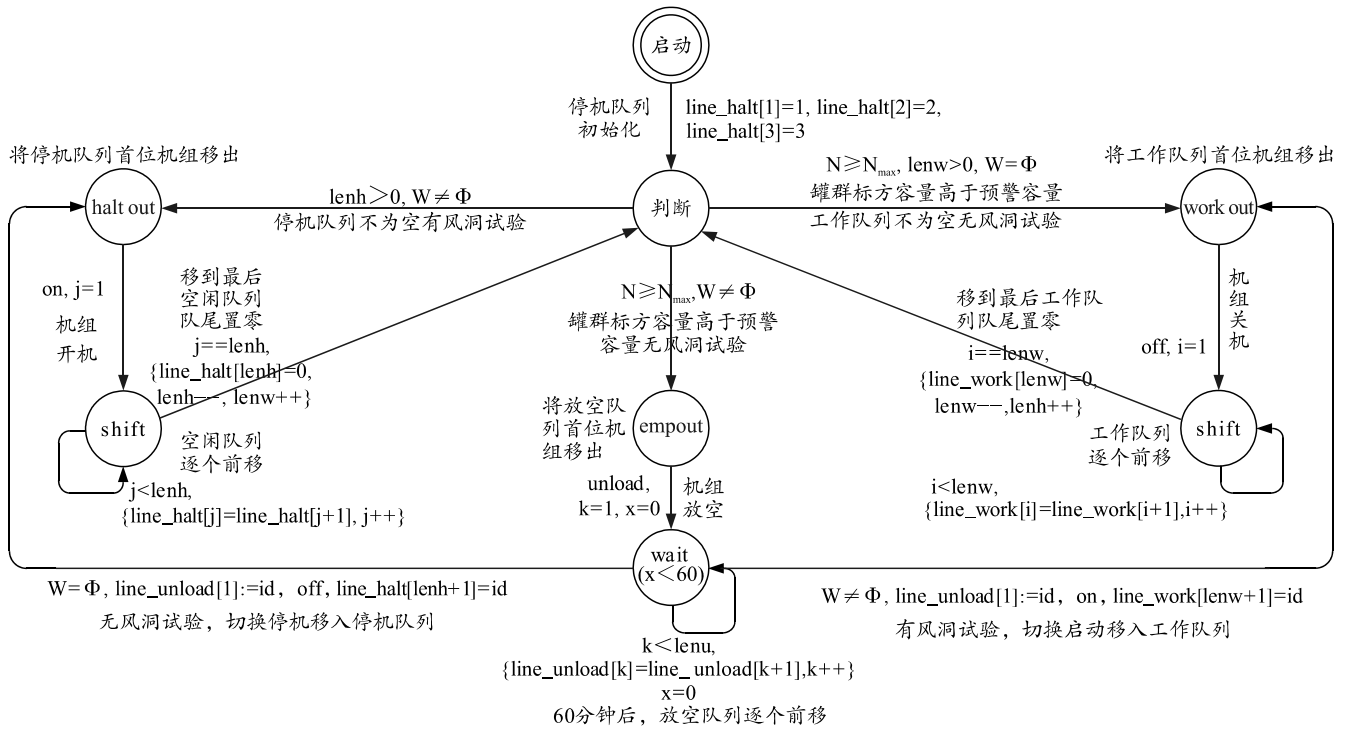


图 2 调度器模型

6) 建立就地执行器模型 (actuator)。

当就地控制器 actuator 接收到调度器 dispatcher

给出的启动或停止信号，实现压缩机组的启动停止、阀门开启以及风洞试验单次消耗计量。如图 3 所示。

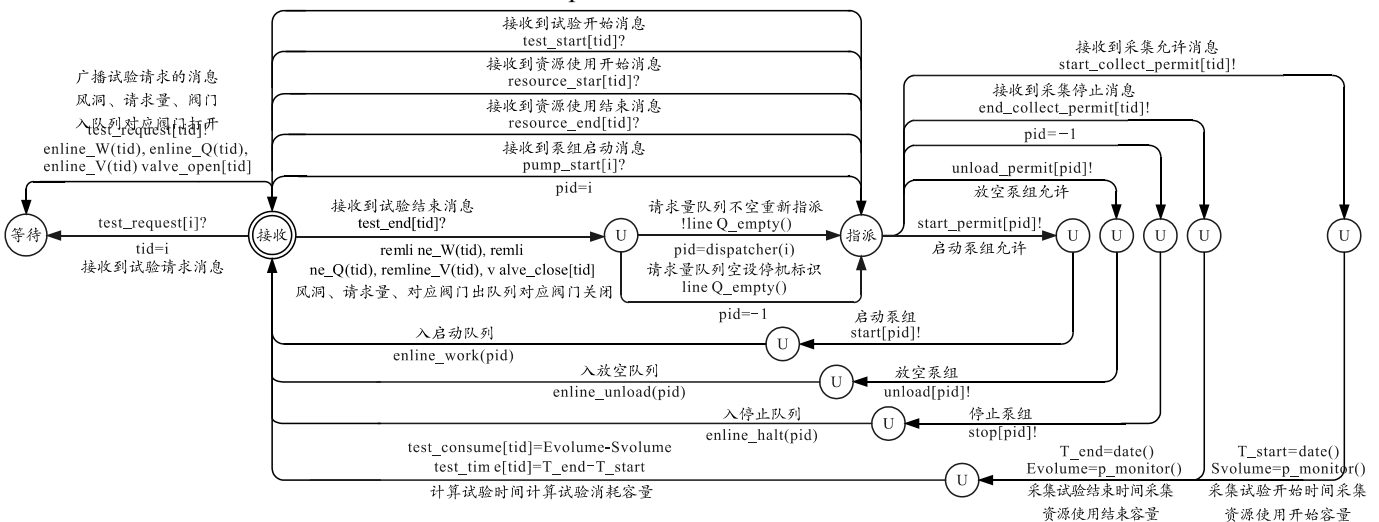


图 3 就地执行器模型

3 系统模型验证

目前基于时间自动机的模型验证工具使用比较广泛的有 UPPAAL、KRONOS 以及 COSPAN 等，由于 UPPAAL 相较于其他验证工具更具可靠性与安

全性^[9]，更适用于大型风洞群风洞试验，因此本文选择使用 UPPAAL 进行模型验证。

该仿真选取 3 座风洞与 3 台压缩机作为初始条件，使用 UPPAAL 进行进一步验证。具体验证的内容如表 1 所示。验证结果如图 4 所示。

表 1 系统验证性质

No	验证性质	验证语法	结果
1	系统不死锁	A[] not deadlock	满足
2	验证当前罐群标准容量 $N_T(t)$ 与需求标准容量差值之间的关系	E<>pump1.work and pump2.halt and pump3.halt imply wind.l1; E<>pump1.work and pump2.work and pump3.halt imply wind.l2; E<>pump1.work and pump2.work and pump3.work imply wind.l3	满足
3	检查压缩机状态	E<>pump1.work E<>pump1.halt	满足
4	队列不会溢出	A[] line_halt[L-1] == 0 A[] line_work[L-1] == 0 A[] line_unload[L-1] == 0	满足
5	检测放空调度	E[] Wind.l3 and pump1.work and W and Dispat.x == 60 imply pump1.halt	满足



图 4 UPPAAL 验证结果

通过对 2020 年期间实际风洞需求情况进行统计，使用本文中的模拟风洞群中压缩机的方法与当年使用传统方法的实际性能相比，本文提出的方法通过合理的调度，在满足了风洞群试验功率的要求下，启停的压缩机数量减少了 11%，总体运行能耗即正常运转的压缩机的平均功率减少了 8%。

该仿真验证了通过建立调度岗位机理模型能够实现风洞中压空气资源的模拟调度，极大地简化了岗位操作流程，提高操作安全性，为建立调度仿真系统、实现调度岗位人员在线模拟培训奠定基础。新入职人员能够通过调度仿真系统，更规范地进行岗位培训，减少调度岗位培训的成本，进一步提高了风洞岗位培训的科学与普及性。

4 结束语

笔者根据风洞需求、罐群当前标方容量、最小预警容量等信息建立仿真模型以调节中压机组的启停。该方法在满足风洞试验动力需求、高效保障风

洞试验的条件下，能够有效降低中压压缩机组的频繁启停，从而有效降低中压空气系统的能耗，保证设备运行安全可靠。该模型不仅对降低能耗、延长压缩机寿命起到非常重要的作用，而且为岗位人员掌握设备结构原理、积累操作经验提供有效手段，进而为建立风洞试验调度系统、合理有效实现风洞动力调度岗位训练，打下了基础。该仿真实验证实了通过建模实现中压空气系统调度过程控制的可行性，下一步，团队将重点以效能为重点进行建模研究，并将其他的验证工具纳入实验，通过对比实验寻求最优效能。

参考文献：

[1] 罗昌俊, 马永一, 明丽洪. 基于隔离耦合的风洞群集中监测系统设计与实现[J]. 测控技术, 2019, 38(11): 29-32.

[2] 马子龙, 房立清. 基于混杂自动机的装备仿真训练机理建模方法研究[J]. 价值工程, 2015, (3): 58-61.