求解多阶段护士排班问题的带权禁忌搜索算法

评审意见回复

感谢两位评审专家对论文提出的宝贵修改意见，在修改后的论文中，我们认真考虑了两位专家所提出的意见和建议，并在论文中做了相应的修改，所有修改的地方都用了红色字体标出。以下是对评审专家提出的意见的回复。

**审稿人一：**

**问题1：**较少看到文章对算法理论方面的贡献，虽然作者声称其算法和前两名相比稳定性较好（满足hard constraints)，但是所有结果均基于算例。

回复：由于多阶段护士排班问题是来源于实际应用的具有NP难度的多约束复杂组合优化问题，到目前为止，理论上还不存在具有多项式时间复杂度的精确算法对其求解。对于这一类复杂的组合优化问题，国际学术界往往通过对公开标准算例的测试来检验和比较算法的性能。第二届护士排班竞赛正是为了方便学术界对护士排班问题进行算法性能的比较而举行的。

**问题2：**由于作者在算例运算比较这块写得不够详细，不是特别容易理解表2到表6的对比意义。

回复：表2、表3、表4是对决赛中使用的60个算例计算结果的对比，其中每个算例测试10次。表中给出了所有竞赛参赛者给出的最优结果、本文算法10次测试的最优结果以及平均结果、竞赛第一名算法10次测试的最优结果以及平均结果。其中，表2是护士数为35、周期长度分别为4周和8周的20个算例的计算结果，表3是护士数为70、周期长度分别为4周和8周的20个算例的计算结果，表4是护士数为110、周期长度分别为4周和8周的20个算例的计算结果。由表中可以看出，相对于第一名的结果，本文所提出的算法对于所有算例均可以得到合法解（99999表明非法解）。表5为验证本文算法中的权重调整策略的有效性，给出了三种疏散性策略在18个算例上的对比结果，每个算例运行32次。从32次测试中所得最优结果的对比可以看出，三种疏散性策略没有明显差异，而从平均结果的对比看出，本文算法采用的权重调整策略在75%的算例上优于另外两种策略，表明了该策略的有效性。表6给出了对全局约束S7和S8的三种近似策略的对比，从表中可以看出完全忽略全局约束效果最差，本文算法采用的均匀分配剩余排班数的效果最好，相比于均匀分配各阶段排班数有大约3%的改进。修改稿中增加了对这些表中对比的详细说明。

**问题3：**为什么针对多阶段护士排班问题设计带权禁忌搜索算法？如果是其它的算法，会有什么结果？

回复：由于多阶段护士排班问题属于NP难度问题，当前国际学术界针对该类问题通常采用启发式算法或以启发式算法为基础的混合算法对其进行求解。而禁忌搜索是一种高级的元启发式算法，它在多个领域的NP难度问题上已证明其有效性，如TSP问题、图着色问题、排课表问题等。针对护士排班问题的结构，可以设计出多种邻域结构，如本文算法提出的增加、减少、变更、交换排班四种邻域结构，通过自适应的邻域选择方式可以有效地将这些邻域结构组合在一起。同时，通过调整权重，可使得算法在集中性和疏散性之间达到平衡，这也是设计启发式算法的关键之一。

**问题4：**需要更多介绍算例的背景，小规模和大规模算例的具体差别，每个算例的构成。

回复：按照评审意见，修改稿中增加了关于算例文件的说明（见4.1节）。本文所使用的所有算例都是由在比利时医院工作过、对求解护士排班问题有着非常丰富经验的人员生成。算例的规模主要由护士数量决定，如决赛中包含护士数35、70、110三种规模的算例。不同的算例集关于护士掌握的技能、合同规定、每阶段护士人数需求、每阶段护士请求等存在不同之处。

**问题5：**请详细说明所提算法究竟能够适用于多大规模的算例，譬如是否可以适合国内三甲医院几百名护士几个月的排班需求？

回复：目前竞赛提供的标准算例集中最大的算例护士数为120，周期长度为8周。根据我们实验测试，护士数为120时，算法的迭代速度大概为每秒2600次迭代。国内医院的护士排班通常按科室来划分，护士一般不会跨科室，规模一般不会超过120，一般采用人工方式进行排班，排班一般为固定循环模式。排班周期通常为4周，本文测试的算例最大为8周，已属于大规模排班。据我们了解，目前国内医院还没有真正商用化的考虑多种约束的、上百个护士、长周期（4-8周）的完全智能的排班软件。

**问题6：**如果可能，能否介绍前三名大致运用的算法以及算法之间的差别？

回复：由于第二届护士排班竞赛于2015年8月刚刚结束，是当前国际学术前沿问题，目前还未发现关于该问题公开发表的论文或研究报告，竞赛官网上也只公布了决赛各参赛队的计算结果，并没有参赛者算法的详细描述。因此在论文中我们只给出了计算结果的对比。

**问题7：**如果能有该算法在国内三甲医院的实际应用以及和没有应用所提算法的差别，则更能说明算法的实际贡献。

回复：第二届护士排班竞赛由比利时鲁汶大学CODeS实验室主办，该问题中的约束和目标函数的设置主要来自比利时50多家医院的实际护士排班场景，根据本文作者与国内某些三甲医院的交流，目前国内护士排班基本依靠人工经验来完成，还没有真正商业化的智能排班软件。如果将该成果应用于国内三甲医院，还需要与各医院进行详细的有针对性的业务需求分析、数学建模。真正智能化的护士排班软件在三甲医院的推广和应用，还需要考虑医院现有的实际业务模式是否支持自动化排班。但是，本研究成果可以作为后期在国内三甲医院推广应用的理论基础，在不久的将来有望将其应用在国内三甲医院的护士排班中。

**审稿人二：**

**问题1：**缺点在于在搜索策略中大量使用随机策略，也是就该算法的期望应该还可以，但是对于求最优解的计算（相对于利用解整数规划的技术）就会乏力。

回复：在本文算法中使用随机策略是为了增加算法搜索的多样性和稳定性。由于多阶段护士排班问题是具有NP难度的多约束的复杂组合优化问题，并且问题规模大，单纯使用整数规划方法往往只能用来求解规模很小的问题实例。

**问题2：**在描述算法发面，符号太多。如果能给出一个具体的小规模的算例，结合算例描述的话，可读行就会好的多。

回复：按照评审意见，已在修改稿中补充了更多图例，包括解向量的图例（见图1），四种邻域结构的图例（见图2、3、4、5）。同时，在描述算法细节部分也分别增加了举例文字说明（见3.4、3.5、3.6节）。