

引用格式:王建忠, 张宝成. 基于双层优化模型的航路交叉角度设计[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(36): 394-398

Wang Jianzhong, Zhang Baocheng. Air route crossing angle design based on bi-level optimization model[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(36): 394-398

基于双层优化模型的航路交叉角度设计

王建忠 张宝成

(中国民航大学空中交通管理学院, 天津 300300)

摘要 航路交叉角度是影响交叉点运行安全和效率的重要因素。针对多条航路交叉于一点的航路交叉结构, 同时考虑多个高度层的运行以及航空器速度的变化, 依据悲观决策原则, 建立了航路交叉角度设计的双层优化模型。根据下层规划特点, 证明了下层规划的最优解在速度区间的边界处取得, 设计遗传算法求解上层规划。最后, 根据实际运行中的航空器速度区间和航空器类型比例, 设计3条航路交叉的算例验证模型方法的可行性和有效性, 并分析了航路流量比例和速度区间对最优交叉角度的影响。

关键词 安全工程 交叉航路 空域规划 双层优化模型

中图法分类号 X951; **文献标志码** A

航路交叉点一直是空中交通网络的运行瓶颈, 航路交叉结构直接影响航空运行安全和效率。航路交叉角度是航路交叉结构最重要的部分, 属于微观层面的空域设计。航路交叉角度优化设计方法可为空域精细化管理提供科学依据, 提高空域运行安全和效率, 具有重要的研究意义和现实意义。

1975年, 针对两条航路交叉的情况, William^[1]最先计算出飞机在另一条航路上的冲突范围。在此基础上, 1977年, Schmidt^[2]假设航班流为泊松流, 计算了航路交叉点附近产生冲突的均值和方差。2001年, Mao等^[3,4]和 Treleaven等^[5]提出基于分布式的横向侧移冲突解脱策略, 并证明了该策略下航迹分配空间的收敛性和稳定性。2010年张进等^[6]建立了交叉航路入口放行策略模型, 研究了航路长度、交叉角度和放行偏离角对交叉航路时隙可用性的影响。2011年, 张晨等^[7]提出了基于2次航向改变的冲突解脱组合策略, 并讨论了不同交叉角度下的空域时隙资源利用率。2014年, 王莉莉等^[8]建立了航路交叉点航空器的动态保护区范围。2016年, 戴福青等^[9]假设航路上的航班流是泊松流, 首次综合分析了航路数、交叉角度以及航班流速度与冲突数之间的关系, 指出调整交叉点的几何构型, 并使航班流的速度差控制在合适的范围内, 能降低飞行冲突。2019年, 戴福青等^[10]通过拟合得到的飞行时间和

油耗与交叉角度之间的非线性关系, 并在此基础上建立了带偏好的多目标优化模型。

上述研究均取得了一系列的研究成果, 但均未考虑航路交叉结构对不同高度层运行的影响以及航空器飞行速度的不确定性。

现针对一类航路交叉结构, 同时考虑多个高度层的运行, 以优化航空器通过交叉点的时间间隔为目标, 依据悲观决策原则建立航路交叉角度的双层优化模型, 以保障运行安全的前提下提高交叉点运行效率。根据下层规划特点, 证明下层规划的最优解在速度区间的边界处取得, 设计遗传算法求解上层规划。最后, 根据实际运行中的航空器速度区间和航空器类型比例, 设计算例验证模型方法的可行性和有效性, 分析航路流量比例和速度区间对最优交叉角度的影响。

1 航路交叉结构

考虑如下航路交叉结构, 同时考虑 k 个高度层, 在每个高度层上航路 $1, 2, \dots, n$ 相交于 O 点, 每个高度层上的航路交叉如图1所示, θ_{ij} 为航路 i 与航路 j 的夹角。根据民航规章, 在单(双)数高度层上, 航空器由西(东)向东(西)飞行。假设经过交叉点的过程中, 航空器保持速度和航向不变。

针对上述航路交叉结构, 根据William^[1]的结论, 任意两条航路 i, j 上的两架航空器先后经过交叉点的最长时间间隔为

$$t = \frac{A}{v_i v_j \sin \theta_{ij}} \sqrt{v_i^2 + v_j^2 - 2v_i v_j \cos \theta_{ij}} \quad (1)$$

2019年5月26日收到

国家自然科学基金(71571182)和

中央高校基本业务费(3122013C001)资助

第一作者简介:王建忠(1981—),男,汉族,内蒙古包头人,博士,讲师。E-mail:jzwang_cauc@163.com。

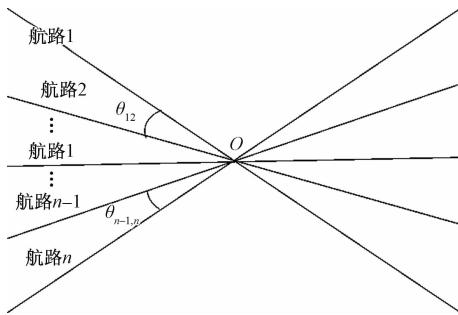


图1 单个高度层的航路交叉结构

Fig. 1 Air route intersection structure at single flight level

式(1)中: v_i 和 v_j 分别为航路 i 和航路 j 上航空器的速度; A 为最小安全间隔。

由式(1)可知,当给定某一交叉角度 θ_{ij} , 航空器过交叉点的最小时时间隔随航路上航空器的速度变化呈非线性变化。

2 航路交叉角度双层优化模型

2.1 航路交叉角度优化模型

航路交叉角度一旦确定,交叉点上所有高度层上的运行均会受到影响。因此,航路交叉角度设计要考虑所有高度层的运行情况。结合交通流量比例以及航空器机型比例因素,建立规划模型:

$$\begin{aligned} \min \sum_{k=1}^F w_k & \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n p_{ik} p_{jk} \left(\sum_{l=1}^Q \sum_{m=1}^Q p_{ilk} p_{jmk} \times \right. \right. \\ & \left. \left. A / \sqrt{v_{ilk}^2 + v_{jmk}^2 - 2v_{ilk}v_{jmk}\cos\theta_{ij}} \right) \right] \\ \text{s. t. } & \bar{\theta}_{ij} \leq \theta_{ij} \leq \bar{\theta}_{ij}, \quad 1 \leq i < j \leq n; \\ & \theta_{ij} = \sum_{h=1}^{j-1} \theta_{h,h+1}, \quad 1 \leq i < j \leq n \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)中: θ_{ij} 为决策变量; F 为高度层的数量; n 为交叉航路的数量; Q 为机型的数量; w_k 为高度层 k 的权重; p_{ik} 为高度层 k 航路 i 上的流量占比; p_{ilk} 高度层 k 航路 i 上机型 l 的比例; v_{ilk} 为高度层 k 航路 i 上机型 l 的速度; $\bar{\theta}_{ij}$ 、 $\bar{\theta}_{ij}$ 分别为 θ_{ij} 的下界和上界。目标函数为所有高度层上过点时间间隔加权和最小。

2.2 双层优化模型

现实运行中,由于风速、飞行员操作习惯以及航空器重量等多因素的共同影响,同类型的航空器在同高度层同航路上飞行时,速度也并不相同。但根据飞机性能和雷达数据可以获知特定机型在特定高度层的飞行速度区间,如 D 类飞机在 8 400 m 的速度区间为 [810, 950] km/h, 在 8 100 m 的速度区间为 [880, 1 070] km/h(受西风带的影响)。因此,航路交叉角度设计问题是一个目标函数具有区间系数的非线性规划问题。

为求解具有区间系数的非线性规划问题,按决策者的偏好将其转化为确定型的规划问题。为保障运行安全,在实际决策指挥中,管制员通常将最不利情况下的时间间隔应用于类似的情况,以保证所采用的时间间隔适用于所有可能面临的情况,减少决策时的工作负荷。因此,从悲观决策的角度出发,在规划问题[式(2)]目标函数中速度参数均采用最不利的数值,即对于任意给定的交叉角度,计算任意 2 条航路间的过点时间间隔时,从速度区间中选择使得过点时间间隔最大的速度作为标称的速度,从而将规划问题[式(2)]转化为一主多从的双层优化问题:

$$\begin{aligned} \min \sum_{k=1}^F w_k & \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n p_{ik} p_{jk} \left(\sum_{l=1}^Q \sum_{m=1}^Q p_{ilk} p_{jmk} t_{ijlmk} \right) \right] \\ \text{s. t. } & \bar{\theta}_{i,i+1} \leq \theta_{i,i+1} \leq \bar{\theta}_{i,i+1}, \quad 1 \leq i \leq n-1; \\ & 0 < \theta_{1n} < \pi \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)中: t_{ijlmk} 为下层规划[式(4)]的最优解:

$$t_{ijlmk} = \max \frac{A / \sqrt{v_{ilk}^2 + v_{jmk}^2 - 2v_{ilk}v_{jmk}\cos\theta_{ij}}}{v_{ilk}v_{jmk}\sin\theta_{ij}} \quad (4)$$

$$\text{s. t. } \bar{v}_{ilk} \leq v_{ilk} \leq \bar{v}_{ilk}; \bar{v}_{jmk} \leq v_{jmk} \leq \bar{v}_{jmk}$$

上层的决策变量为相邻航路之间的夹角 $\theta_{i,i+1}$, 下层的决策变量为 v_{ilk} 、 v_{jmk} 。 $[\bar{v}_{ilk}, \bar{v}_{ilk}]$ 和 $[\bar{v}_{jmk}, \bar{v}_{jmk}]$ 分别为速度 v_{ilk} 、 v_{jmk} 的取值范围。

3 求解算法

3.1 下层规划求解

下层规划的数量为 $C_n^2 Q^2 F$, 当考虑的航路数量、机型及高度层数量增加时,下层规划的数量急剧增加。如果每个下层规划按照传统的非线性规划求解算法来计算,计算量非常大。

为简化计算,考虑对于上层规划给定的任意两航路之间的夹角 θ_{ij} 和侧向间隔 A ,下层规划目标函数可记为

$$f(v_1, v_2) = \frac{A / \sqrt{v_1^2 + v_2^2 - 2v_1v_2\cos\theta}}{v_1v_2\sin\theta} \quad (5)$$

其偏导数为

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial v_1} &= \frac{A(v_1 - v_2\cos\theta)}{v_1v_2\sin\theta / \sqrt{v_1^2 + v_2^2 - 2v_1v_2\cos\theta}} - \\ &\quad \frac{\sqrt{v_1^2 + v_2^2 - 2v_1v_2\cos\theta}}{v_1^2v_2\sin\theta} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial v_2} &= \frac{A(v_2 - v_1\cos\theta)}{v_1v_2\sin\theta / \sqrt{v_1^2 + v_2^2 - 2v_1v_2\cos\theta}} - \\ &\quad \frac{\sqrt{v_1^2 + v_2^2 - 2v_1v_2\cos\theta}}{v_1v_2^2\sin\theta} \end{aligned} \quad (7)$$

由于 $0 < \theta < \pi$, $v_1, v_2 > 0$, $A > 0$, 易证 $\partial f / \partial v_1$

和 $\partial f / \partial v_2$ 的表达式中的分母均大于 0, 即 $f(v_1, v_2)$ 不存在导数不存在的点。同时, 联立 $\partial f / \partial v_1 = 0$ 和 $\partial f / \partial v_2 = 0$, 得 $v_1 = v_2$ 且 $\theta = 0$, 与 $0 < \theta < \pi$ 矛盾, 因此, $f(v_1, v_2)$ 没有驻点。易证, $f(v_1, v_2)$ 是连续函数, 故 $f(v_1, v_2)$ 在闭区间上的最大值应在 v_1, v_2 的边界上取得。

故下层规划的最优值 $t_{ijlmk} = \max \{f(\bar{v}_{ilk}, \bar{v}_{jmk}), f(\bar{v}_{ilk}, \bar{v}_{jmk}), f(\bar{v}_{ilk}, \bar{v}_{jmk}), f(\bar{v}_{ilk}, \bar{v}_{jmk})\}$ 。

3.2 上层规划求解

遗传算法是一种借鉴生物界进化规律演化而来的随机化搜索方法, 广泛地应用于规划问题的求解。结合下层规划特点, 设计遗传算法求解上层规划问题[式(3)]。

3.2.1 编码方式

采用实数编码, 编码长度为 $n - 1$, 第 i 位即航路 i 与航路 $i + 1$ 的夹角 $\theta_{i,i+1}$ 。

3.2.2 适应度函数

采用上层规划目标函数为适应度函数, 对于不可行解引入一个充分大的数进行惩罚, 适应度函数具体为

$$G(\theta) = \begin{cases} \sum_{k=1}^F w_k \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n p_{ik} p_{jk} \left(\sum_{l=1}^Q \sum_{m=1}^Q p_{ilk} p_{jmk} t_{ijlmk} \right) \right] \\ M, \quad \text{不可行解} \end{cases} \quad (8)$$

3.2.3 遗传操作

采用精英保留和轮盘赌策略进行选择, 以适应度函数值为依据, 优先保留当前最优个体, 同时使适应度大的个体以较大概率保留。交叉和变异策略采用双点交叉和均匀变异。

4 算例分析

针对 3 条航路交叉于 1 点的航路结构, 设每条航路上东向交通流量与西向交通流量相同。

考虑高空扇区中 8 100、8 900、9 500、10 100、10 700、11 300、11 900、12 500 等 8 个东向高度层, 8 400、9 200、9 800、10 400、11 000、11 600、12 200 等 7 个西向高度层, 共计 15 个高度层。采用中国某高空区域管制扇区雷达数据进行统计, 高度层 8 100、8 400、12 200 和 12 500 上, C、D 类航空器的速度区间如表 1 所示。假设航空器的速度随高度层增加线性递增, 其他 11 个高度层上航空器速度区间可由表 1 数据线性插值得到。

依据航空器的飞行性能及数据统计, 设 C、D 类航空器在各个高度层上的比例如表 2 所示。

中国目前服役的大多数是 C 类飞机, 飞行高度一般在 11 000 m 及以下。依据航空器高度层的占

用情况, 设高度层 8 100 ~ 11 000 的权重均为 1, 11 300 ~ 12 500 的权重均为 0.5。

首先, 考虑航路 2 上的流量比例 x 从 0.1 到 0.9 变化时, 航路 1 和航路 3 的流量比例相等, 均等于 $(1-x)/2$ 的情形, 根据 3 节设计的遗传算法, 取种群规模为 50, 交叉概率 0.8, 变异概率 0.05, 最大迭代次数 200。根据表 1 中的航空器速度区间(原始速度)计算, 航路 1 与航路 2 的最优夹角 θ_{12} 取值如表 3 第二列所示。

表 1 航空器速度区间

Table 1 Velocity interval of aircraft

方向	高度层/m	航空器速度/(km·h ⁻¹)	
		C类	D类
东向	8 100	[850, 950]	[880, 1 070]
	12 500	[880, 980]	[900, 1 100]
西向	8 400	[750, 850]	[810, 950]
	12 200	[780, 880]	[840, 980]

表 2 各高度层上航空器类型的比例

Table 2 Proportion of aircraft types at various flight level

高度层/m	航空器类型的比例	
	C类	D类
8 100	0.95	0.05
8 400	0.95	0.05
8 900	0.9	0.1
9 200	0.8	0.2
9 500	0.8	0.2
9 800	0.7	0.3
10 100	0.3	0.7
10 400	0.3	0.7
10 700	0.2	0.8
11 000	0.15	0.85
11 300	0.1	0.9
11 600	0.1	0.9
11 900	0.1	0.9
12 200	0.05	0.95
12 500	0.05	0.95

表 3 航路 2 不同流量比例下 θ_{12} 的取值

Table 3 Value of θ_{12} under different flow ratio of air route 2

航路 2 的 流量比例	$\theta_{12}/(^{\circ})$		
	原始速度	速度 ± 100	速度 ± 200
0.1	17.73	24.52	28.52
0.2	20.23	29.41	34.29
0.3	21.84	31.62	38.18
0.4	22.87	32.64	39.44
0.5	24.03	32.74	39.63
0.6	24.13	33.18	39.72
0.7	24.24	33.31	39.89
0.8	24.62	33.37	40.27
0.9	24.91	33.56	40.37

为测试航空器速度区间对最优航路夹角的影响,考虑在原始速度区间上,最大速度增加100 km/h(200 km/h)且最小速度减少100 km/h(200 km/h)的情形,取值如表3第三(四)列所示。

由于航路1与航路3分别位于航路2的两侧,且流量比例相等,因此。 θ_{12} (θ_{23})的变化趋势如图2所示。

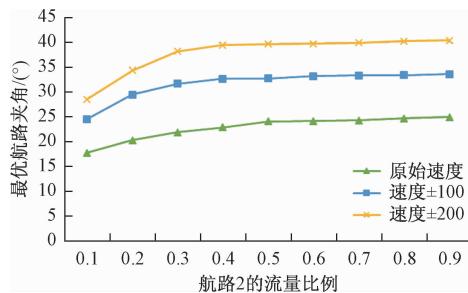


图2 航路2不同流量比例下 θ_{12} (θ_{23})的取值

Fig. 2 Value of θ_{12} (θ_{23}) under different flow ratio of air route 2

由表3和图2可知,随着航路2流量比例的增加, θ_{12} (θ_{23})的取值增加,但影响不大,最大相差7°;流量比例不变的情况下,速度区间越大, θ_{12} (θ_{23})的取值越大,变化明显。

其次,考虑航路1上的流量比例x从0.1到0.9变化时,航路2和航路3的流量比例相等,均等于 $(1-x)/2$ 的情形。根据表1中的航空器速度区间(原始速度)计算,航路1(2)与航路2(3)的最优夹角 θ_{12} (θ_{23})取值如表4第二(四)列所示。

同样,考虑在原始速度区间上,最大速度增加100 km/h(200 km/h)且最小速度减少100 km/h(200 km/h)的情形, θ_{12} 取值见表4第三(四)列, θ_{23} 取值见表4第六(七)列。变化趋势见图3所示。

由表4和图3可知,无论速度区间如何取值,随着航路1流量比例的增加, θ_{12} 取值增加,但变化极

表4 航路1不同流量比例下 θ_{12} (θ_{23})的取值

Table 4 Value of θ_{12} (θ_{23}) under different flow ratio of air route 1

航路1 的流量 比例	$\theta_{12}/(^{\circ})$			$\theta_{23}/(^{\circ})$		
	原始 速度	速度 ±100	速度 ±200	原始 速度	速度 ±100	速度 ±200
	速度 ±200			速度 ±200		
0.1	21.90	32.36	38.43	24.29	33.31	39.89
0.2	21.90	32.39	38.43	24.04	32.74	39.63
0.3	21.96	32.42	38.43	22.43	32.57	38.98
0.4	21.96	32.46	38.50	21.79	31.00	36.96
0.5	22.06	32.55	38.76	19.96	28.83	33.32
0.6	22.21	32.59	39.44	18.67	25.88	29.63
0.7	22.45	32.59	39.50	16.80	22.77	25.89
0.8	22.79	32.64	39.54	14.29	19.21	21.67
0.9	23.24	32.66	39.57	10.97	14.50	16.14

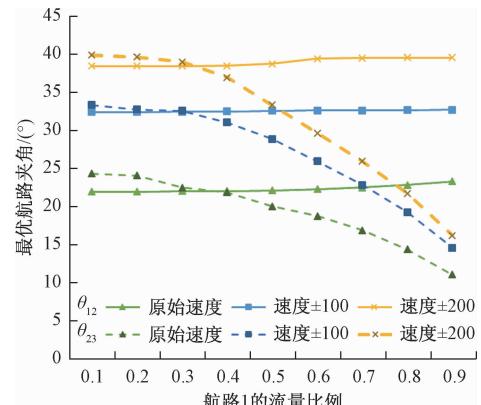


图3 航路1不同流量比例下 θ_{12} (θ_{23})的取值

Fig. 3 Value of θ_{12} (θ_{23}) under different flow ratio of air route 1

小; θ_{23} 的取值则逐渐减小,变化明显,速度区间越大, θ_{23} 减小的幅度越大。同时,流量比例不变的情况下,速度区间越大, θ_{12} (θ_{23})的取值越大,变化明显。

5 结论

针对多条航路交叉于一点的交叉结构,考虑多个高度层以及航空器的速度区间,依据悲观决策原则,建立了航路交叉角度的双层优化模型,并设计遗传算法进行求解。

针对3条航路交叉的情形,利用算例分析了航路流量比例、速度区间大小对最优交叉角度的影响。航路2流量的增加对最优交叉角度 θ_{12} (θ_{23})的取值没有显著影响,但随着航路1流量的增加, θ_{23} 取值显著减小;当航路流量固定时,速度区间越大,航路间的最优夹角 θ_{12} (θ_{23})越大。

航路交叉角度优化设计方法综合考虑多个高度层的运行情况以及航空器速度的变化,可在保证运行安全的前提下提高空域运行效率,为空域规划与管理提供科学依据。

参 考 文 献

- 1 William J D Jr. Analytical models of perceived air traffic control conflicts[J]. Transportation Science, 1975, 9(2): 149-164
- 2 Schmidt D K. On the conflict frequency at air route intersections[J]. Transportation Research, 1977, 11(5): 351-355
- 3 Mao Z H, Feron E, Bilimoria K. Stability and performance of intersecting aircraft flows under decentralized conflict avoidance rules[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2001, 2(2): 722-729
- 4 Mao Z H, Dugail D, Feron E, et al. Stability of intersecting aircraft flows using heading change maneuvers for conflict avoidance[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2005, 6(4): 357-369
- 5 Treleaven K, Mao Z H. Conflict resolution and traffic complexity of

- multiple intersecting flows of aircraft [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2009, 9(4): 633-643
- 6 张进, 胡明华, 张晨. 交叉航路空域的时隙可用性评估方法 [J]. 西南交通大学学报, 2010, 45(6): 958-964
Zhang Jin, Hu Minghua, Zhang Chen. Evaluation method for time slot availability of crossing air route [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2010, 45(6): 958-964
- 7 张晨, 胡明华, 张进. 针对交叉流的组合冲中突解脱策略 [J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(6): 1165-1173
Zhang Chen, Hu Minghua, Zhang Jin. Combined conflict resolution strategy to intersecting traffic flows [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2011, 31(6): 1165-1173
- 8 王莉莉, 王坤. 航路交叉点动态保护区的算法研究 [J]. 科学技术与工程, 2014, 14(30): 267-271
- Wang Lili, Wang Kun. Algorithm research on dynamic protection area of route intersection [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(30): 267-271
- 9 戴福青, 郑哲. 基于航班流的航路交叉点结构研究 [J]. 计算机仿真, 2016, 33(8): 22-25
Dai Fuqing, Zheng Zhe. The architecture of enroute intersection based on flight flows [J]. Computer Simulation, 2016, 33(8): 22-25
- 10 戴福青, 庞笔照, 赵元棣. 带偏好的交叉航路角度优化模型 [J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(6): 1-9
Dai Fuqing, Pang Bizhao, Zhao Yuandi. Air route crossing angles optimization model with different preferences [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(6): 1-9

Air Route Crossing Angle Design Based on Bi-level Optimization Model

WANG Jian-zhong, ZHANG Bao-cheng

(Air Traffic Management College, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

[Abstract] Route crossing angle play an important role in the safety and efficiency of intersection operation. Aiming at the intersection structure of multiple routes at one point, operations of multiple flight level and change of aircraft velocity are considered at the same time, a bi-level optimization model is established for air route crossing angle based on principle of pessimistic decision-making. According to the characteristics of the lower level programming, it is proved that the optimal solution of the lower level programming is obtained at the boundary value of the velocity interval, and a genetic algorithm is designed to solve the upper level programming. Finally, based on the aircraft speed range and aircraft type ratio in actual operation, examples for three routes intersection are designed to verify the feasibility and effectiveness of the model and method, and the influence of the route flow ratio and speed interval on the crossing angle is analyzed.

[Key words] safety engineering crossing route airspace programming bi-level optimization model

第 19 卷 终