

基于全寿命周期成本理论的水工结构维修加固决策模型

苏怀智^{1,2}, 高建新^{1,2}, 范振东²

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 鉴于补强修复和除险加固作为水工结构领域中一项重要工作和长期任务, 对保障工程服役安全、发挥工程效益、延长工程服役周期等具有极其重要的意义, 在保证结构安全可靠的前提下, 考虑结构性能的劣化特性, 从优化工程全寿命周期成本的目标出发, 引入全寿命周期成本理论, 研究水工结构维修加固成本计算与决策模型及其算法, 并应用于某水工结构工程中, 优化制定其全寿命周期内具体维修方案。研究表明, 文中所述模型可为制定水工结构工程在全寿命周期内的维修加固策略提供一定的科学依据。

关键词: 水工结构工程; 维修加固; 决策模型; 全寿命周期成本理论

中图分类号: TV314

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2018)05-0038-05

Decision making model and method for maintenance and reinforcement of hydraulic structures based on life cycle cost theory//SU Huaizhi^{1,2}, GAO Jianxin^{1,2}, FAN Zhendong²(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Reinforcement recovery and reinforcement is an important work and long-term task in the field of hydraulic structure, which are of significance to ensure the safety service of the project, to develop the project benefit, and to extend the service period of the project. The cost calculation and decision making model of hydraulic structure maintenance and reinforcement and its algorithm are established under the premise of ensuring structure safety and reliability, with the consideration of the deterioration characteristics of structural performance and the introduction of life cycle cost theory from the objective of optimizing the whole life cycle cost in engineering. The proposed method is applied to a hydraulic structure, and the concrete maintenance plans during the whole life cycle are calculated and formulated. The result shows that the models and methods in this paper can provide some scientific basis for the maintenance and reinforcement strategies of hydraulic structures in the whole life cycle.

Key words: hydraulic structure engineering; maintenance and reinforcement; decision making model; life cycle cost theory

我国拥有世界上数量最多、类型最丰富的水工结构工程, 为保障我国防洪、供水、粮食、能源和生态等的安全奠定了重要基础, 但大批工程建于 20 世纪 50—70 年代, 服役超 50 a, 受当时国力国情及科技水平等的制约, 这些工程病险除控与提能延寿成为近年来国家水利事业的一项重要工作并趋常态化。目前, 大坝、水闸、渡槽等水工结构工程维修加固方式基本分为两种, 一种是定期检查, 发现问题则进行维修处理, 这种方法如果检查的时间间隔过短, 会增加

结构全寿命周期内的检测费用, 如果时间间隔过长, 有可能无法及时发现问题; 另一种是当结构性能达到规定最低要求时进行维修加固, 这种方法单次维修成本较大, 进而可能导致全寿命周期内总维修成本的增大。以往除险加固工程的目标多是考虑此次成本最小化或维修效果最大化, 缺少长期考虑、综合规划的统筹思想^[1-3]。笔者将全寿命周期成本 (life cycle cost, LCC) 理论应用于水工结构工程维修加固决策, 旨在依据水工结构工程运行风险, 合理安排维

修加固的方案,规划施工的时间间隔,保证工程在安全运行的前提下其服役期间维修加固总成本最小。

全寿命周期成本思想起源于铁路系统,之后迅速在各发达国家多个领域内被广泛运用,其理论研究也取得了较多的成果。1983—1993年,Flanagan、Dellasola、Bull先后发表了与全寿命周期成本相关的著作,论述了全寿命周期成本的基本概念和基本理论^[4-7];1999年后,Frangopol、Das、Miyamoto、Liu等在研究桥梁结构劣化的基础上,结合全寿命周期成本理论,讨论了桥梁的养护管理和维修策略的优选方法^[8-11];2002年,Abaza^[12]建立了适用于柔性路面维修加固优化的LCC分析模型;2004年,Kong等^[13]提出针对劣化结构进行维护成本分析时,需要同时考虑两个方面的内容,一是不同维修方案各自的成本,二是维修成本与结构性能提高之间的关系。

LCC理论虽然应用很广,但考虑到水工结构工程的复杂性,并没有对其维修加固的全寿命周期成本计算进行深入的研究。为减少维修加固资金的浪费,降低维修加固进度安排的失误,笔者从LCC的角度出发,研究水工结构工程维修加固决策模型。该模型除了应考虑降低工程使用期内的总维修成本,还需综合考虑结构服役性能改善、维修加固措施选取及维修加固时间节点确定等因素,因此在各约束条件下进行寻优计算得到结果后,还需要结合实际工程情况,进行二次优化,以满足实际运行条件。

1 水工结构全寿命周期维修加固成本估算模型

1.1 工程维修加固成本

从工程开始设计、规划、勘测、建造、使用直到报废拆除后所经历的全部时间称为工程寿命,在该期间产生的所有直接或间接的成本称为全寿命周期成本。直接成本是期间所需要的经济成本,间接成本是指由工程引起的不利影响所造成的损失。间接成本难以定量计算和统计,通常在规划阶段考虑,直接经济成本包括初始费用、检测费用、维修加固成本、失效损失和项目残值^[14]。本文研究时间段为工程使用期,对维修加固成本 C_R 进行优化,以达到减少全寿命周期成本的目的。通常定期对水工结构工程进行检测,当水库工程出现严重问题,结构整体安全可靠度降低至规范允许的最低标准时,必须对结构进行加固,以保证结构的正常使用和安全。维修措施不同,对结构性能的影响也不同,比如混凝土结构表面涂层修复,按涂层材料不同有环氧砂浆涂层、丙乳砂浆涂层、硅粉砂浆涂层等,其中环氧砂浆涂层和硅粉砂浆涂层对结构性能的提高要大于丙乳砂浆涂

层。维护维修可分为日常性维修(routine maintenance, RM)、预防性维修(preventive maintenance, PM)和加固性维修(essential maintenance, EM)三类^[15]。日常性维修和预防性维修均不能提高结构性能,但能延缓结构的劣化速度,使结构使用寿命延长;加固性维修是在结构性能不能达到规范使用的最低要求时进行的必要的维修加固,它能提高结构的性能,但结构的劣化速度不会延缓。

日常性维修通常在规划期进行考虑,其成本为初期建造成本的特定比例。预防性维修和加固性维修成本可以通过市场价值与具体维修部位尺寸估算得到。

1.2 资金折现率

资金折现率是LCC计算中一个重要参数。参考文献[2]得到未来成本与现值之间的折算关系为

$$C_p = \frac{C_Q}{(1 + \gamma)^Q} \quad (1)$$

式中: C_p 为现值成本; C_Q 为未来第 Q 年发生的成本; γ 为分析时刻的折现率。

关于折现率的选取,Cady^[16]提出了一个数学模型,即

$$\gamma = \frac{\gamma_c - f}{1 + f} \quad (2)$$

式中: γ_c 为社会折现率; f 为生产者价格指数年变化量。

社会折现率是社会资本时间价值尺度的量度,是综合反映国家目前资本收益、资本供给和需求、宏观调控意图水平的重要参数之一。结合我国国情,将我国工程项目的社会折现率定为4%~7%,前30年取7%,31~60年取5%,61年之后取4%^[17]。

生产者价格指数(producer price index, PPI)反映了物价的波动水平、社会生产企业的总供求关系和经济周期的变化。根据统计分析,认为我国的PPI随时间在1%~5%范围内递减,在前30年取5%,31~60年取3%,61年之后取1%^[17]。

根据式(2)和社会折现率、PPI的取值,可大致确定我国工程项目折现率的取值,在前60年取2%,61年之后取3%。

1.3 维修加固成本估算模型

当工程项目的全寿命周期效益(life cycle benefit, LCB)能够比较精确预测时,可以用净收益现值来衡量该工程的成本;当工程的全寿命周期效益难以准确预测时,则通常用LCC理论对项目进行经济分析。图1表示全寿命周期内的现金流以及结构的性能劣化随时间和维护维修措施变化的关系。此时,LCC应为全寿命周期内的各项现金流之和。

全寿命周期成本理论分析的经济计算较为复

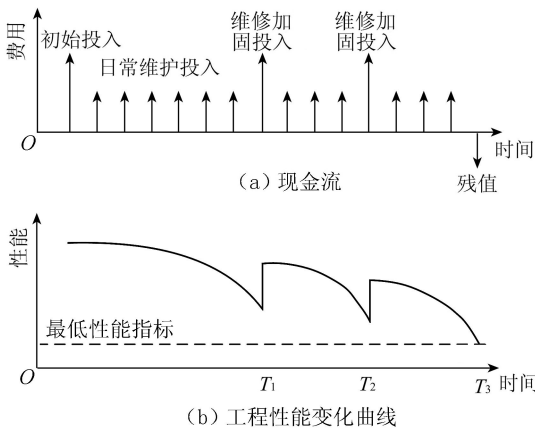


图1 工程全寿命周期现金流及性能变化曲线

杂,其中维修加固成本估算模型的表达式为

$$C_R = \sum_{i=1}^T \frac{1}{(1+\gamma)^t} C_i + \sum_{j=1}^m \frac{1}{(1+\gamma)^{t_j}} C_j(k) \quad (3)$$

式中: C_R 为维修加固成本; T 为工程寿命; C_i 为第*i*年的日常维护成本; m 为使用期间总的维修加固次数; t_j 为第*j*次维修加固的时间; $C_j(k)$ 为第*j*次维修时选用*k*维修方案的费用; t 为工程当前已运行的时间。

该模型内成本函数可以通过大量类似工程除险加固资料的统计分析得到,也可以由专家凭经验确定。

2 水工结构全寿命周期维修加固决策模型及其算法

水工结构维修加固策略优化是在保证工程安全的前提下,寻找维修加固方案及时刻,使得总体维修成本最小的一个寻优问题。假设该工程由*n*个构件组成,其优化模型可用数学表达式表示如下。

决策变量:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{21} & \cdots & t_{m1} \\ k_{11} & k_{21} & \cdots & k_{m1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ t_{1n} & t_{2n} & \cdots & t_{mn} \\ k_{1n} & k_{2n} & \cdots & k_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

目标函数:

$$\min C_i = \sum_{i=1}^n C_{Ri} \quad (5)$$

约束条件:

$$S_{it} \geq [S] \quad (6)$$

式中: \mathbf{X} 为维修策略变量; t_{mn} 为第*n*个构件第*m*次维修加固的时刻; k_{mn} 为第*n*个构件第*m*次维修时选取的方案; C_i 为整体维修费用; C_{Ri} 为第*i*个构件的维修费用; S_{it} 为工程第*i*个构件在第*t*年的性能(或风险度)指标, $i=1,2,\dots,n$; $[S]$ 为允许的最低性能

(或最高风险度)指标。

为了求解上述优化问题,采用新型的回溯优化算法^[18],主要包括以下5个步骤。

步骤1 种群初始化。根据设置的参数随机产生进化种群 \mathbf{P} 和历史种群 \mathbf{P}_0 :

$$P_{i,j} \sim U(l_j, u_j) \quad (7)$$

$$P_{o,i,j} \sim U(l_j, u_j) \quad (8)$$

式中: $U(l_j, u_j)$ 为随机均匀分布函数; l_j 与 u_j 分别为第*j*个变量的下界和上界。

考虑到维修加固次数、每次加固的时刻及相应采用的维修方案都未知且相互关联,将算法运用到实例中,假设某一随机种群为

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0 & 2 & \cdots & 0 \\ 3 & 1 & \cdots & 2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 1 & \cdots & 3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

该矩阵有*N*行*D*列,*N*表示该种群个体数量,*D*表示服役寿命。矩阵中的数字1、2、3分别代表维修方案I、方案II、方案III;0代表不维修。种群中的个体为1行*D*列的矩阵,表示在服役寿命*D*年中,每一年都会有一个措施:不维修或者选择某一个维修方案。每个维修方案对应了不同的维修成本和维修效果(性能变化情况),不维修则无成本、无效果。

步骤2 选择I。通过随机数比较,由进化种群和历史种群产生一个新的历史种群,并对新的历史种群个体进行随机排序。更新矩阵中的数字即为更新某个个体、某一年的维修方案。

步骤3 变异。变异策略如下式所示:

$$\mathbf{P}_{n1} = \mathbf{P} + F(\mathbf{P}_0 - \mathbf{P}) \quad (10)$$

式中: \mathbf{P}_{n1} 为变异后的新种群; F 为变异尺度系数,其值为标准正态分布随机数的3倍。

步骤4 交叉。首先定义一个大小为*N*×*D*的映射矩阵 \mathbf{M} ,初始元素均为零,然后按下面的方法对映射矩阵元素进行随机更新:

$$M_{i,j} = 1 \quad (11)$$

式中:*i*和*j*为随机选取的若干组整数, $i \in [1, N]$, $j \in [1, D]$ 。具体操作见文献^[18],然后,根据映射矩阵更新种群:

$$\mathbf{P}_{n2} = \mathbf{P} + \mathbf{FM}(\mathbf{P}_{n1} - \mathbf{P}) \quad (12)$$

式中: \mathbf{P}_{n2} 为变异交叉后的新种群。

变异、交叉操作后需要进行性能约束操作。以性能劣化曲线为基础,假设第一年初的性能为1,第一年不维修,则第一年末的性能根据劣化曲线自然劣化得到,若某一年不维修(矩阵中相应数字为0),该年末性能低于规范允许的最低值,则该年必须维修(矩阵中原数字0需换成某个维修方案对应的数

字),使工程在各时间点的性能均大于 $[S]$,以保证工程安全。

步骤5 选择II。种群经过性能约束调整后,会得到一个新的种群,矩阵中每个数字代表的维修措施有对应的维修成本,个体的适应度函数为这些维修方案对应的成本之和,例如:

$$P_1 = (0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 3 \ 0 \ 2 \ 0) \quad (13)$$

式(13)表示工程寿命为10a,在10a服役寿命内,第3年选用方案I维修,第7年选用方案III维修,第9年选用方案II维修,共维修3次。假设方案I成本为10万、方案II成本为15万、方案III成本为20万,则此个体的适应度函数(总成本)为45万。

从初始进化种群和变异交叉后的新种群中选出优秀个体组成新的种群,然后回到第2步迭代,并设置一个最大迭代次数。在性能约束的前提下,选出总成本最低的个体,即为最优解,可从中获得维修加固次数、每次维修的时刻及相应选择的维修方案。

3 实例分析

为了说明本文所述模型、算法的可行性,以某一输水建筑物为例^[2],建立其维修加固优化模型,并用回溯优化算法进行除险决策优化。该输水建筑物的组成部分如图2所示,包括槽身、支座、盖梁、纵梁和槽墩5个部分。

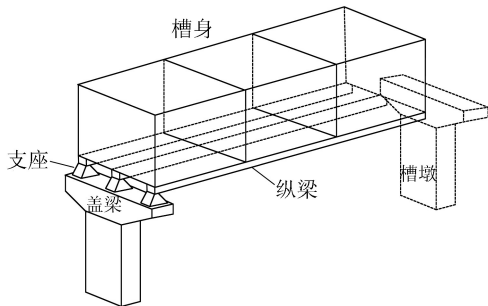


图2 钢筋混凝土输水建筑物

由于该建筑物处于沿海地区,为简化考虑,槽身、盖梁、纵梁和槽墩只考虑氯离子的破坏,支座的寿命取产品质量保证书上所给的上限80a,支座到达寿命上限后只能更新,无法维修,各构件的性能劣化曲线如图3所示。

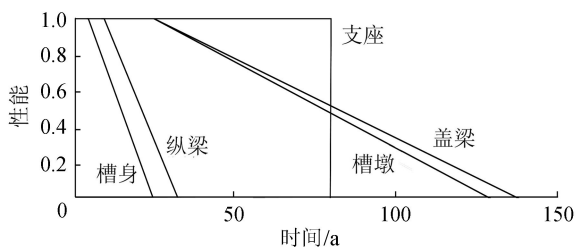


图3 输水建筑物各构件性能劣化曲线

水工钢筋混凝土建筑物的维修方法有很多种,表1列出了本案例中选取的6种维修方法及其维修效果,表2列出了各构件对应于表1所列维修方法的费用^[2]。

表1 水工钢筋混凝土维修方法与效果

代号	维修方法	维修效果
M1	不维修	无效果
M2	表面涂层	维持7a耐久性不变
M3	丙乳砂浆抹面	维持10a耐久性不变
M4	断面修复	劣化曲线恢复到初建水平
M5	通电防蚀	维持40a耐久性不变
M6	断面修复+丙乳砂浆抹面	劣化曲线恢复到初建水平且维持10a耐久性不变

表2 各构件各维修方法的费用 元

代号	槽身	纵梁	盖梁	槽墩
M1	0	0	0	0
M2	71400	16100	8800	12900
M3	25200	56700	31000	45600
M4	1891700	425600	232400	342300
M5	357000	80300	43900	64600
M6	2070600	465900	254400	374700

本工程实例中,使用期维修决策模型的目标函数为构件维修加固总成本最小,即 C_R 最小;约束条件为构件全寿命周期内的性能不低于允许的最低性能指标 $[S]$,设 $[S]=0.6$ 。设结构的使用年限为80a,工程成本折现率的取值在前60a取2%,61a之后取3%。采用回溯优化算法进行寻优,种群大小 N 设置为30,最大迭代次数 E 设为1000。

图4为槽身、纵梁、盖梁和槽墩在迭代过程中新种群的维修成本和进行二次调整后的种群维修成本变化曲线。经过步骤5,每一次迭代的最优种群为原算法结果。但从实际情况出发,选择一种维修方案之后,此方案会有维修效果持续时间,在此期间内,不需要再次进行维修,因此对种群在维修效果持续时间中产生的维修方案进行替换,使之成为不维修方案,称为二次调整。由图4可以看出,在性能约束条件下,随着迭代次数的增加,维修成本越来越小,二次调整后的种群维修成本基本收敛,维修成本变化较小。

结构的全寿命周期维修加固决策模型有许多解,本文在满足安全条件下选择维修成本最低的维修方案,如表3所示。表3表示80a之内,在满足最低性能指标的情况下,各构件最优的维修时间节点和维修方案。如槽身需间隔10a左右进行丙乳砂浆抹面修复;纵梁刚开始需间隔7~9a进行表面涂层修复,在第41年进行断面修复+丙乳砂浆抹面处理,之后可一直保护结构安全;盖梁和槽墩在使用周期内只需间隔数年进行表面涂层修复即可。考虑折现率与否的维修加固成本绘于图5。

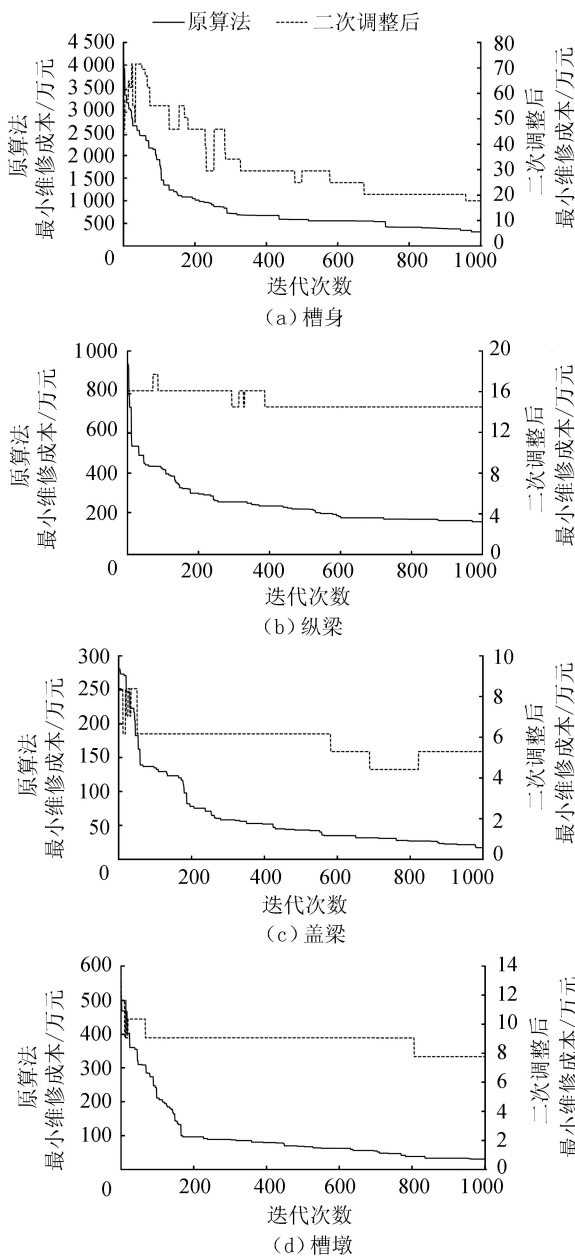


图4 最小维修成本随进化次数变化曲线

表3 各构件使用期间维修计划

槽身		纵梁		盖梁		槽墩	
维修时间节点	维修方案	维修时间节点	维修方案	维修时间节点	维修方案	维修时间节点	维修方案
9	M3	11	M2	31	M2	34	M2
20	M3	20	M2	38	M2	41	M2
30	M3	27	M2	53	M2	54	M2
40	M3	34	M2	63	M2	61	M2
50	M3	41	M6	71	M2	69	M2
61	M3					78	M2
71	M3						

注:表中维修时间节点表示时刻,如数字9表示结构开始使用后于第9年选用相应方案进行维修。

该输水建筑物采取表3所示维修加固方案的各构件使用期内的性能指标见图6,由图6可以看出,各构件在使用期内的性能指标均能满足最低性能指

标要求。

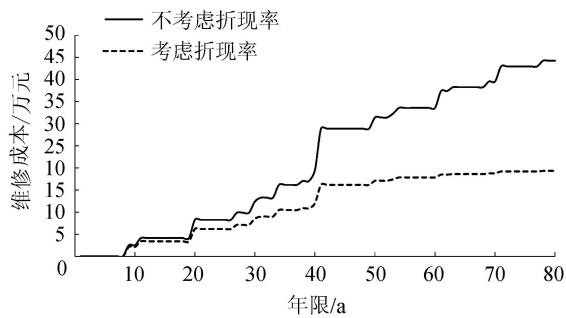


图5 维修加固成本曲线

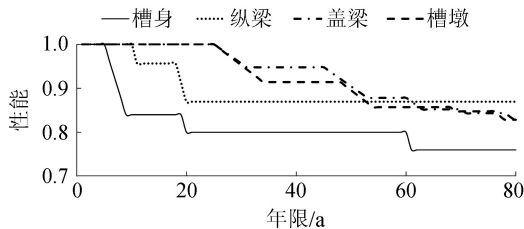


图6 各构件使用期内性能变化曲线

4 结语

a. 在对 LCC 理论和实用模型分析论述的基础上,充分考虑水工结构工程安全与效益、维修加固时间节点与相关措施等问题优化,研究建立了基于 LCC 的水工结构维修加固决策模型。

b. 考虑到基于 LCC 的水工结构维修加固决策模型是一个优化问题,为求解模型优化问题,引入了回溯搜索优化算法,进行了工程案例应用分析。研究表明,文中所述方法为该问题的解决提供了较好的平台。

参考文献:

- [1] WU Zhongru, PENG Yan, LI Zhanchao, et al. Commentary of research situation and innovation frontier in hydro-structure engineering science [J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(4): 767-780.
- [2] 吴鑫森. 基于寿命周期成本理论的水工结构设计与维修计划优化[D]. 天津:天津大学, 2008.
- [3] SU Huaizhi, HU Jiang, WEN Zhiping. Optimization of reinforcement strategies for dangerous dams considering time-average system failure probability and benefit-cost ratio using a life quality index [J]. Natural Hazards, 2013, 65(1): 799-817.
- [4] FLANAGAN R. Life cycle costing for constructing [M]. London: Surveyors Publication, 1983.
- [5] FLANAGAN R. Life cycle costing: theory and practice [M]. Oxford: BSP Professional Books, 1989.
- [6] DELLASOLA P E, KIRK S J. Life cycle costing for design professionals [M]. New York: McGraw-Hill, 1991.

(下转第70页)