第十届湖南省研究生数学建模竞赛承诺书

我们仔细阅读了湖南省高校研究生数学建模竞赛的竞赛规则。

我们完全明白，在竞赛开始后参赛队员不能以任何方式（包括电话、电子邮件、网上咨询等）与队外的任何人（包括指导教师）研究、讨论与赛题有关的问题。

我们知道，抄袭别人的成果是违反竞赛规则的，如果引用别人的成果或其他公开的资料（包括网上查到的资料），必须按照规定的参考文献的表述方式在正文引用处和参考文献中明确列出。

我们完全清楚，在竞赛中必须合法合规地使用文献资料、软件工具和 AI 工具，不能有任何侵犯知识产权的行为。否则我们将失去评奖资格，并可能受到严肃处理。

我们郑重承诺，严格遵守竞赛规则，以保证竞赛的公正、公平性。如有违反竞赛规则的行为，我们将受到严肃处理。

我们授权湖南省研究生数学建模竞赛组委会，可将我们的论文以任何形式进行公开展示（包括进行网上公示，在书籍、期刊和其他媒体进行正式或非正式发表等）。

我们参赛选择的题号是（从组委会提供的赛题中选择一项填写）：A

我们的参赛编号（请填写完整参赛编号）：202518001010

所属学校（请填写完整的全名）：国防科技大学

参赛队员（打印后签名）：1. 刘威

2. [illegible]

3. [illegible]

指导教师或指导教师组负责人（打印后签名）：宋志勇

日期：2025 年 8 月 27 日

（请勿改动此页内容和格式。以上内容请仔细核对，如填写错误，论文可能被取消评奖资格。）

第十届湖南省研究生数学建模竞赛

题　目：基于离散随机事件仿真的大型装置测试任务规划模型

摘要：

本文针对大型装置测试任务规划问题，运用概率模型相关定律进行机理分析，建立状态机模型，基于蒙特卡洛方法和离散随机事件仿真进行计算机求解，建模实现了测试流程的全过程仿真，在单个班次和双班次轮班的条件下，制定了测试工作计划，以实现最短的测试时间。

针对问题 1，基于全概率公式与贝叶斯定理，推导综合测试检测系统问题的概率表达式，及问题指向 A、B、C、D 子系统的比例参数 λ_1-λ_4的计算逻辑，λ_1-λ_4的值分别为 0.2866、0.3171、0.2561、0.1402；并且计算了综合测试测出系统有问题的概率表达式，将具体数值带入后得到结果是 1.73%。

针对问题 2，采用“蒙特卡洛仿真+离散事件调度”方法，构建包含测试设备、被测装置、测手的面向对象状态机模型，模拟单分队单班（12 小时）测试 100 个装置的全流程，统计任务完成平均天数（T）、通过装置数（S）、总漏判概率（P_L）、总漏判概率（P_W）、各个专业测试组的有效工作时间比等指标，结果显示 T=35 天、S=97.255 个、P_L=4.83%、P_W=0.12%，四个测试小组的有效工作时间比分别为 70.5%、57.6%、70.3%、88.3%。

针对问题 3，扩展模型至双分队倒班场景，以 0.5 小时为步长遍历班次时长 K∈[9,12]h，通过多组仿真对比 T 与 P_l的权衡关系，确定最优 K 值并输出对应优化指标。

针对问题 4，通过敏感性分析识别设备故障概率、班次时长 K、测手差错率为影响任务时间的关键因素，据此提出设备提前更换、测手专项培训、动态调度优化等可操作改进建议。

本文构建的模型可有效还原测试流程中的随机交互与资源约束，计算结果为大型装置测试任务的计划制定与优化提供了科学的量化依据。

关键词：大型装置测试；蒙特卡洛仿真；离散事件调度；双目标优化

一、问题重述

1.1 问题背景

某大型装置因其使用可靠性要求极高，在投入使用前需经过一系列严格的测试。该装置由 A、B、C 三个子系统构成。测试工作在一个拥有两个独立测试台的测试大厅中进行，可同时测试两个装置。

承担测试任务的一个测试分队下辖四个专业小组：小组 A、B、C 分别负责对应子系统的测试，小组 E 负责综合测试。各小组拥有专用工位，可独立并行作业。测试流程为串联顺序：每个装置必须依次通过 A、B、C 子系统的测试后，方能进入 E 组的综合测试。四项测试全部通过，则装置测试成功。若在任何环节测出问题，需进行重测；若同一环节连续两次测试未通过，则该装置被判定为测试失败，退出测试流程。装置在测试完成后，需运出测试大厅，并随即运入下一个待测装置，每次运入或运出均需 0.5 小时，且运输过程可并行进行。

测试过程并非确定的，而是受到多种随机异常因素的影响：

(1)**测试设备故障**：设备故障概率随累计使用时长增加而上升，使用超过 240 小时或发生故障时必须更换；

(2)**子系统固有缺陷**：A、B、C 子系统本身存在一定的故障概率；

(3)**测手操作差错**：分为“误判”（无问题判为有问题）和“漏判”（有问题判为无问题）两种；

(4)**综合测试发现问题**：可能发现前期漏判的子问题或联接产生的新问题（视为子系统 D 的问题）。

测试任务的核心目标是：在尽可能短的时间内完成测试任务，同时尽量降低将有问题装置误判为合格的总漏判概率。

1.2 问题需求

基于以上背景，本题要求建立数学模型，并依次解决以下四个问题：

问题 1：建立数学表达式，计算综合测试（E 组）测出系统存在问题的概率，以及当问题被检出时，问题分别来源于子系统 A、B、C、D 的比例参数 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$。要求给出表达式并代入题目给定数值计算出具体结果。

问题 2：针对一个测试分队需完成 100 个装置测试的任务，制定一套测试工作计划。该计划需考虑每日 12 小时工作班的限制，以及“工序中断需重新测试”的规则。要求计算在该计划下，任务的**平均完成天数（T）**、**通过测试的平均装置数（S）**、**总漏判概率（PL）**、**总误判概率（PW）**以及**各小组的有效工作时间比（YXB$_i$）**等指标，并将结果填入指定格式的表格中。

问题 3：在任务紧急的情况下，安排两个测试分队接续倒班工作，每个班次工作时长为 K 小时，K∈[9,12]，同一工序的两个班次共用一套测试设备。要求确定一个**最优的 K 值**，并制定相应的测试计划。计算在此最优 K 值下的各项统计指标（同问题 2），并将结果填入表格。

问题 4：基于问题 3 的模型，分析各类因素（如设备可靠性、测手水平、测试时长、班次安排等）对测试任务平均完成时间的影响强度，进行敏感性分析。据此，向测试任务的主管部门提出具有针对性和可操作性的测试工作改进建议。

二、问题分析

本题是一个复杂的系统可靠性测试调度与优化问题，涉及随机过程、排队论、概率统计和资源调度等多个建模领域。核心目标是在满足多种随机异常和资源约束的前提下，制定测试计划，以优化"任务完成时间"和"总漏判概率"这两个主要指标。以下将对四个问题进行逐一分析。

2.1 问题 1 分析

问题一要求推导综合测试中测出问题的概率表达式及各问题来源的比例参数 λi。这是一个典型的全概率与贝叶斯公式的应用问题，并且引入了重测机制。因此需要对每种情况进行详细分析后，综合得到各子系统漏判进入综合测试的概率后，进而求解 λ_i 和综合测试发现问题概率。综合测试测出问题，源于两个根本原因：

（1）子系统 A, B, C 本身存在缺陷但在前期测试中被漏判；

（2）子系统 D（整体联接）本身存在新问题。

建模思路：

首先，需要计算一个子系统没有问题被误判成有问题的概率，以及有问题被漏判成没有问题的概率，二者可通过 Y2，Y3 中，子系统有问题的概率、测手出现差错、以及误判和漏判的比例，建立条件概率表达式，进行求解。之后，基于重测，可求出子系统 A、B、C 通过测试中漏判的概率。然后，综合测试测出问题的总概率，等于该系统确实存在问题且被综合测试成功检出的概率之和。比例参数 λi 则代表了在"综合测试测出问题"这一事件发生的条件下，问题来源于子系统 i 的后验概率。

2.2 问题 2 分析

问题二要求为一个测试分队制定测试 100 个装置的工作计划，并计算多项绩效指标。这是一个服务器排队系统优化问题。系统包含多重随机性：设备故障、子系统真故障、测手误判和漏判。这些随机事件直接影响每个装置的测试流程时

间（可能因重测而延长）和最终状态（通过、退出或因漏判通过）。

建模思路：

每个装置的测试是一个串并联流水线（A、B、C→E），每个工位是一个服务台。由于存在重测机制，服务时间并非固定值，而是服从某种复杂分布。最合适的方法是建立**离散事件仿真（DES）模型**，来模拟每个装置在每个工位的测试、可能发生的中断、重测以及运输过程。因此采用面向对象建立状态机，包括测试设备、被测设备、测手三个对象。

状态机状态转移包括：

（1）调度规则：在两个测试台的情况下，需要制定调度规则（如 FCFS）。运输时间（0.5 小时进出）必须被纳入仿真时钟。

（2）班次约束：每日工作不超过 12 小时。工序中断需重新开始，这意味着设备故障或班次结束导致的测试中断将造成当前测试工时的完全浪费，这是影响效率的关键因素。

（3）重测机制：A、B、C、E 的重测均会影响时间，并且完成 A、B、C 的测试后才能进行 E 的综合测试

指标计算：通过蒙特卡洛仿真（如 100 次），可以统计平均任务天数 T、平均通过数 S、总漏判概率 PL（“带病”通过数/总测试数）、总误判概率 PW（误判导致的重测次数/总测试次数）以及各小组的有效工作时间比 YXB。

2.3 问题 3 分析

问题三在问题二的基础上引入了双分队倒班模式，并将班次工作时间 K 作为一个决策变量（$9\leq K\leq 12$）。这是一个更复杂的资源调度优化问题。

两个分队共用同一套测试设备，交替工作。班次时长 K 直主要影响方面为：当测试人员接近下班时，需判断测试人员剩余工作人员和测试设备用时情况。通过改变 K 值，尽可能减少这一部分时间的浪费。

建模思路：

在问题二的 DES 模型基础上扩展仿真模型，增加班次时钟。仿真理时钟将严格按 K 小时一个班次推进，并记录每个班次内各设备的使用累计时间（用于计算故障概率）。优化变量：以 K 为决策变量，以平均任务完成天数 T 为主要优化目标（兼顾漏判概率 PL），在 K=9, 9.5, 10, ..., 12 等取值中进行搜索。运行不同 K 值下的仿真实验，比较其输出的 T 和 PL 等指标，寻找使 T 最小的最优 K 值。

2.4 问题 4 分析

问题四要求基于问题三的模型，进行敏感性分析，并为主管部门提供改进建

议。需要识别出影响测试效率（平均完成时间）的关键因素。

建模思路：

（1）因素识别：关键因素包括：各工位的测试时间、故障概率、漏判/误判概率、运输时间、班次时长 K、设备更换策略（是否一定要满 120 小时）等。

（2）敏感性分析：在问题三模型的基础上，微调上述关键参数的取值，观察任务平均完成时间 T 的变化幅度。变化幅度大的参数即为敏感因素。

（3）建议提出：根据敏感性分析的结果，向主管部门提出最具潜力的改进方向。例如，如果降低 E 组的测试时间能极大缩短 T，则建议研发更快的综合测试方法；如果某个小组的漏判概率非常敏感，则建议加强对该组测手的培训。

三、模型假设与约定

假设 1：各子系统状态是独立的。

假设 2：倒班的时候未完成的测试需要中断。

假设 1：Y2（子系统有问题的概率）：这是一个先验概率，表示子系统本身存在缺陷的客观概率。例如，对于子系统 A，P(A 有问题)=0.025。这个概率是基于历史数据统计得到的，假设在理想测试条件下（即测手完美）估计出的固有故障率。它不包含任何测试误差。

假设 2：Y3（测手发生差错）：测手差错概率（A:3%, B:4%, C:2%, E:2%）包括两种情形：误判（被测系统没问题但测手认为有问题）和漏判（被测系统有问题但测手没测出来），各占 50%。Y3 是测试过程中引入的错误，独立于 Y2。

假设 4：假设一个大型装置最多只有一个子系统出现故障。因此子系统（A、B、C、D）出现故障的概率都很低，而由于假设 2，则同时出现两个子系统故障（万分之几）或者两个以上子系统故障的概率都极低，可以忽略。

四、符号说明与名词定义

符号	含义
$P_{(Y2)i}$ ，i=A、B、C	子系统有问题的概率
$P_{(Y3)i}$ ，i=A、B、C	测手发生错误的概率
$P_{(Y31)i}$ ，i=A、B、C	测手误判的概率
$P_{(Y32)i}$ ，i=A、B、C	测手漏判的概率
$P_{(Y31\|Y2)i}$	测手误判的条件概率
$P_{(Y32\|\overline{Y2})i}$	测手漏判的条件概率
P_{i_false}	综合测试出现问题的概率

$P_{i\|pass}$	通过子系统测试的问题概率
P_{Ei}	综合测试中子系统的测出问题的概率

五、模型建立与求解

5.1 问题一的模型建立与求解

5.1.1 问题一的模型建立

测试台1	测试台2	测试台1	测试台2	测试台1	测试台2	测试台1	测试台2
测试设备A		测试设备B		测试设备C		测试设备E	
测手A		测手B		测手C		测手E	

图 1　系统工作场景

该测试大厅的工作场景如图 1 所示，进行测试的时候，测手使用测试设备对两个测试台上的设备进行测试，同一时刻只能对一个测试台上的设备进行测试。

大型装置测试流程可以如图 2 表示。首先，子系统 A、B、C 相互独立进行测试。子系统 A、B、C 进行测试，通过后再进行级联测试，即对子系统 D 进行测试。

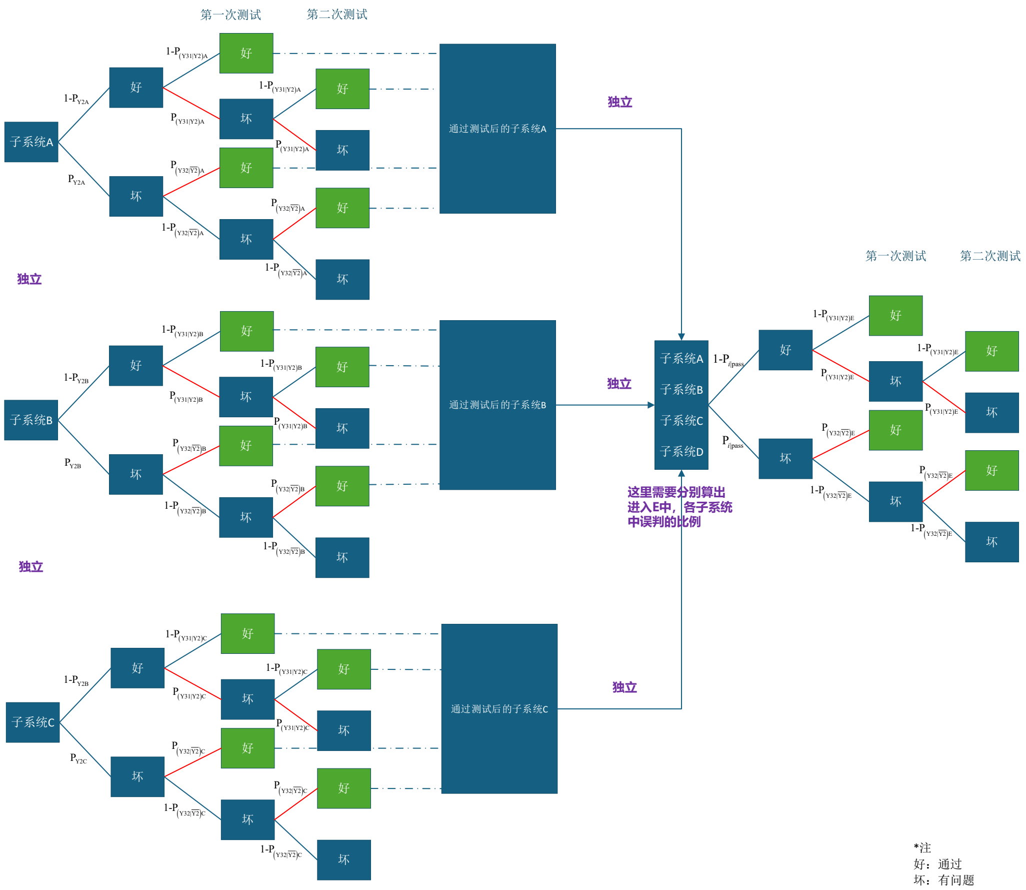

图 2　某一个大型装置检测过程

5.1.2 问题二的模型建立

首先定义子系统 A、B、C 有问题的概率分别为$P_{(Y2)i}$ ，i=A、B、C，具体值如表 1 所示。

表 1 子系统 A、B、C 有问题的概率

	$P_{(Y2)A}$	$P_{(Y2)B}$	$P_{(Y2)C}$
有问题的概率	2.5%	3%	2%

根据 Y3 所述，定义测手 A、B、C 发生差错的概率分别$P_{(Y3)i}$ ，i=A、B、C，具体值如表 2 所示。

表 2 测手 A、B、C 发生差错

	$P_{(Y3)A}$	$P_{(Y3)B}$	$P_{(Y3)C}$
测手发生差错的概率	3%	4%	2%

Y3 中在所有测手差错事件中，误判和漏判各占大约一半。 因此可以得到子系统在测试中误判和漏判的概率可表示为

$$P_{(Y31)i} = P_{(Y3)i} \times 0.5 \tag{1}$$

$$P_{(Y32)i}=P_{(Y3)i}\times 0.5 \tag{2}$$

因此当子系统有问题时，测手误判的概率即条件概率为

$$P_{(Y31|Y2)i}=\frac{P_{(Y31)i}}{P_{(Y2)i}} \tag{3}$$

当子系统正常时，测手漏判的概率为

$$P_{(Y32|\overline{Y2})i}=\frac{P_{(Y31)i}}{1-P_{(Y2)i}} \tag{4}$$

$P_{(Y31|Y2)i}$ 和 $P_{(Y32|\overline{Y2})i}$ 具体结果如表 3 所示。

表 3 误判和漏判条件概率

	A	B	C
误判 $P_{(Y31\|Y2)i}$	1.538%	2.062%	1.020%
漏判 $P_{(Y32\|\overline{Y2})i}$	60%	66.667%	50%

表 3 说明对于某一件具体的装置，测手漏判的概率要远大于误判的概率，这样才能保证二者比例为 1：1，也就是对于一件有问题的子系统，测手更容易将其判断为正常的设备。这与实际情况也相符。

对于各子系统的流程，具体如图 3 所示。

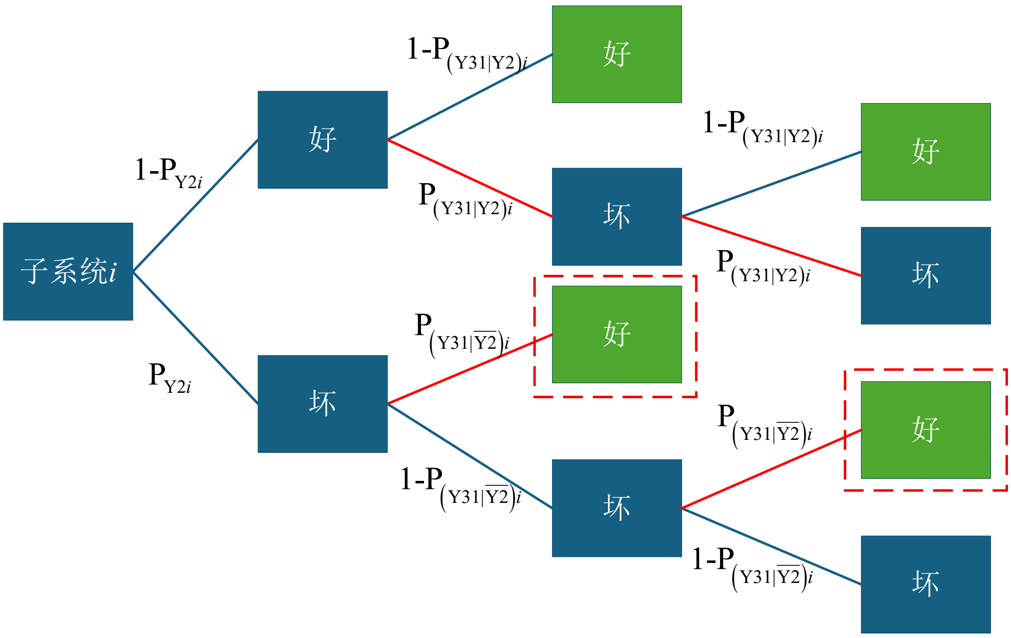

图 3 子系统检测流程

子系统 i 需要通过两轮测试，通过测试的可以进入 E 中进行综合测试。两轮测试过后，图中框起来的部分就是通过测试进入 E 的部分。

进一步，要计算出通过子系统测试的 i 中存在问题的概率，定义为 $P_{i|pass}$。

$$P_{i|\text{pass}}=\frac{P_{(Y2)i}P_{(Y32|\overline{Y2})i}+P_{(Y2)i}P_{(Y32|\overline{Y2})i}(1-P_{(Y32|\overline{Y2})i})}{1-(1-P_{(Y2)i})P_{(Y31|Y2)i}{}^{2}-P_{(Y2)i}(1-P_{(Y31|Y2)i})^{2}} \tag{5}$$

表 2.4 通过检测的子系统 A、B、C 有问题的概率

	$P_{A\|pass}$	$P_{B\|pass}$	$P_{C\|pass}$
有问题的概率	2.11%	2.68%	1.51%

下面对综合测试 E 的流程进行建模。综合测试的工作流程如图 4 所示。

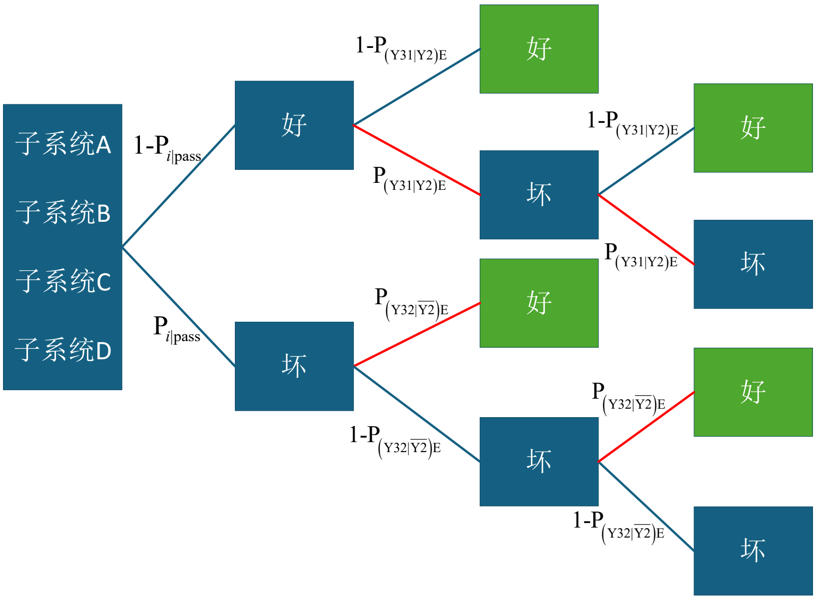

图 4 综合测试流程

想要求解 λ 的值，P_{i_false} 代表的是进入系统 E 中的子系统 i 被判为错误概率，λ_i 的比值与 P_{i_false} 的比值相同。因此，求解 λ 就需要先求解 P_{i_false}

$$P_{i\_false}=(1-P_{i|pass})\cdot P_{(Y31|Y2)E}+P_{i|pass}\cdot(1-P_{(Y32|\overline{Y2})E}) \tag{6}$$

上式中需要计算 E 组测手发生误判和漏判的条件概率。

E 测试装置能够对 A、B、C、D 四个子系统进行测试，并且假设了综合测试测出各个子系统问题的能力是相同的，这意味着测手发生漏判和误判的概率对各个子系统是相同的。因此，首先要保证对各子系统测手发生差错的概率

$$P_{(Y3)E}=\frac{\sum_{i=A\sim D}(1-P_{i|pass})P_{(Y31|Y2)E}+P_{i|pass}P_{(Y32|\overline{Y2})E}}{4} \tag{7}$$

其次，要保证误判和漏判的情况相同

$$\sum_{i=A\sim D}(1-P_{i|pass})P_{(Y31|Y2)E}=\sum_{i=A\sim D}P_{i|pass}P_{(Y32|\overline{Y2})E} \tag{8}$$

联立公式(7)(8)后，求解出测手 E 漏判和误判的条件概率。

表 5 误判和漏判条件概率

	E
误判 $P_{(Y31\|Y2)E}$	1.02%

漏判 $P_{(Y32\|\overline{Y2})E}$	52.63%

将计算出的数值代入公式(6)

表 6 λ_i 的结果

	A	B	C	E
P_{i_false}	2.18%	2.41%	1.95%	1.07%
λ_i	0.2866	0.3171	0.2561	0.1402

综合测试系统测出有问题的概率 P_e

$$P_e = 1 - \sum_{i=A\sim D}(1 - P_{i\_false}) \tag{9}$$

是四个子系统均没问题的反向。

在综合测试中测出问题的概率是

$$P_{Ei} = (1 - P_{i\_false}) \cdot P_{(Y31|Y2)E}{}^{2} + P_{i\_false} \cdot (1 - P_{(Y32|\overline{Y2})E})^{2} \tag{10}$$

表 7 E 最终判断概率

	A	B	C	E
P_{Ei} ，i=A、B、C	0.57%	0.68%	0.46%	0.03%

最终，得到综合测试测出问题的概率

$$P_e = 1.73\% \tag{11}$$

5.2 问题二的模型建立与求解

问题二是“单班 12 小时测试的计划制定与指标计算”，需在“每天 1 班 12 小时、单套测试系统、2 个并行测试台”的约束下，处理“子系统问题、测手差错、设备故障”三类随机因素，最终计算“任务完成时间 T、通过装置数 S、总漏判概率 P_L、总误判概率 P_W、有效工作时间比 YXB”五项指标。

5.2.1 问题二的模型建立

问题二中包含动态调度和多随机因素交互，采用解析法很难获得准确的结果。我们采用的建模思路是“蒙特卡洛仿真+离散时间调度”，核心是面向对象建立状态机，包括测试设备、被测设备、测手三个对象。

（1）状态机参数

根据题设约束条件，可以设置 A、B、C、E 测试设备状态机的参数如下：

- 被测系统是否在位情况
- 测试设备是否损坏情况
- 测试人员在位情况
- 测试人员工作时间是否超时情况

- 被测设备测试完成情况
- 测试设备剩余寿命是否大于测试时间

设置 A、B、C、E 被测试系统状态机的参数如下：

- 测试设备是否损坏情况
- 测试设备是否空闲情况
- 测试人员在位情况
- 测试人员工作时间是否超时情况
- 被测设备在位情况
- 被测设备测试完成情况

设置 A、B、C、E 测试人员状态机的参数如下：

- 测试设备是否损坏情况
- 测试设备在位情况
- 测试设备是否空闲情况
- 被测设备在位情况
- 被测设备测试完成情况
- 测试人员工作时间是否超时情况

（2）状态机转移情况

初始化测试设备、被测试系统、测试人员三个状态机参数，包括：测试设备损坏的时间、被测设备测试出现问题发生的时间。

根据约束条件和状态机参数，给出测试设备状态机状态转移的流程如图 5 图 6 所示。

被测设备状态机之间的转换逻辑：从“无设备”状态开始，判断是否还有待检测的设备，如果存在待检测设备，就转换为“设备运入”状态；“设备运入”状态开始时，需要判断设备运入所需的时间是否超过了剩余工作时间，即防止设备运入时间超过了下班时间。若未超过工作时间，被测设备状态转换为“设备在位”；“设备在位”状态时判断是否检测完成，若检测完成，则转换为“设备运出”；“设备运出”状态最终转换为“无设备”状态。

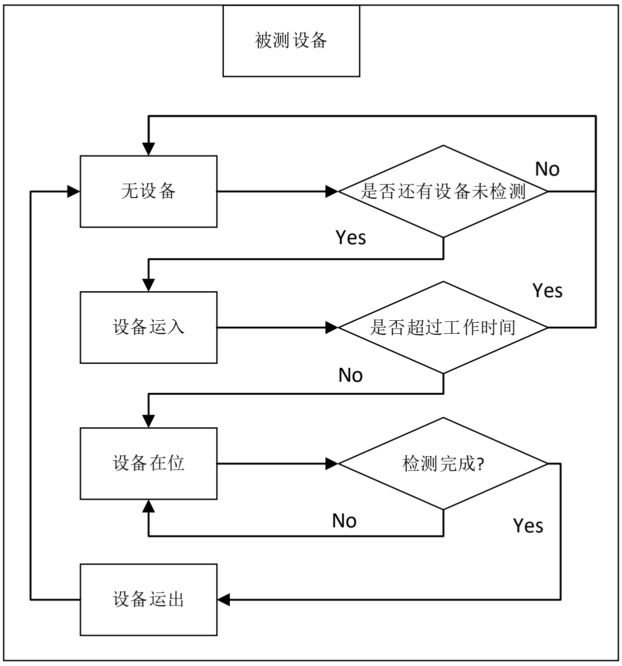

图 5 被测设备状态机

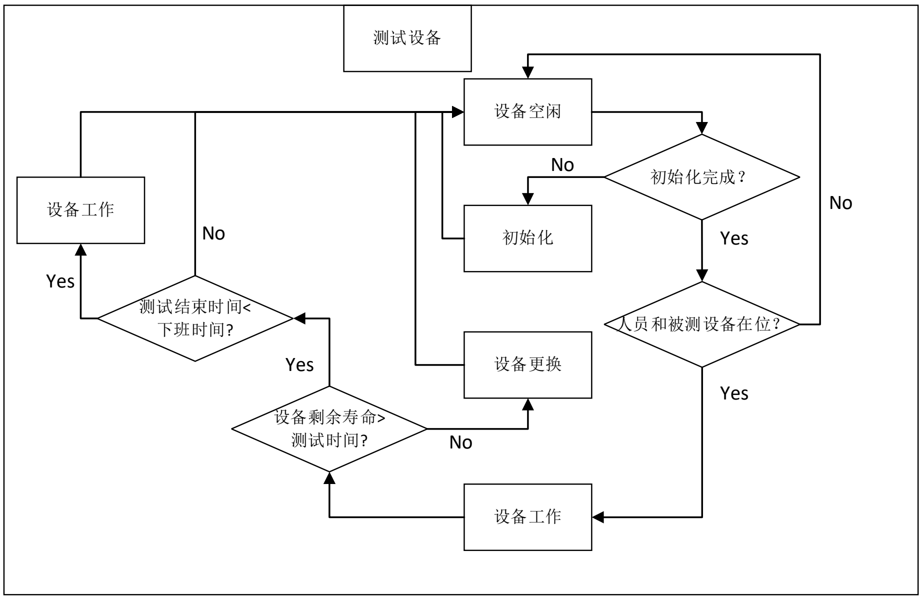

图 6 测试设备状态机

测试设备状态机之间的转换逻辑：

该状态机围绕测试设备的运行流程，存在**设备空闲**、**初始化**、**设备更换**、**设备工作**四个主要状态。测试设备处于无任务的初始状态时，进入“设备空闲”状态。此时，首先判断初始化是否完成？若没完成初始化，就进行一次初始化后，设备进行空闲状态，继续判断是否完成初始化。若完成初始化后，对人员和被测设备在位情况进行判断。若不在位，设备回到空闲状态，继续判断。若人员和被测设备在位，设备开始工作。通过两次循环判断，就能确保设备开始工作。设备开始工作后，需要判断设备剩余寿命与是否大于测试时间。确保设备工作时间小于 240 小时，否则需要更换设备。继续判断测试结束时间是否大于当天测手的工

作结束时间，确保能够本次测试能够完成，否则设备进入空闲时间。

关于测试设备故障以及被测装置出现问题发生的情况，均可通过题设概率与第一问的求解概率，在设备初始化时进行确定。

5.2.2 问题二的模型求解

在本问题中，模型通过蒙特卡洛算法进行计算。

输入：

- 测试对象：100 台大型装置；
- 时间约束：每日 1 个班次，单班工作≤12 小时，工序中断需重新开始测试；
- 初始条件：待测试装置已到位，A/B/C/E 测试设备首次调试校对已完成；

输出：全时间模拟工作流程

为了提高算法的工作效率，算法采用的更新方法是“关键时间节点更新”，算法会在更新状态机状态时，记录该状态下次更新的时间作为关键时间节点，每次关键时间节点时都会检查所有状态机的状态，并进行更新。

模型模拟计算 1000 次，记录每一次的平均天数、通过测试的装置数、总漏判概率、总误判概率和各个专业测试组的有效工作时间比。最后把 1000 次的结果进行平均。

图 7 展示了测试设备提前更换对测试时间的影响，可见提前更换设备对测试时间的影响很小，这是因为测试设备中途损坏的概率较小，对测试结果的影响不大。

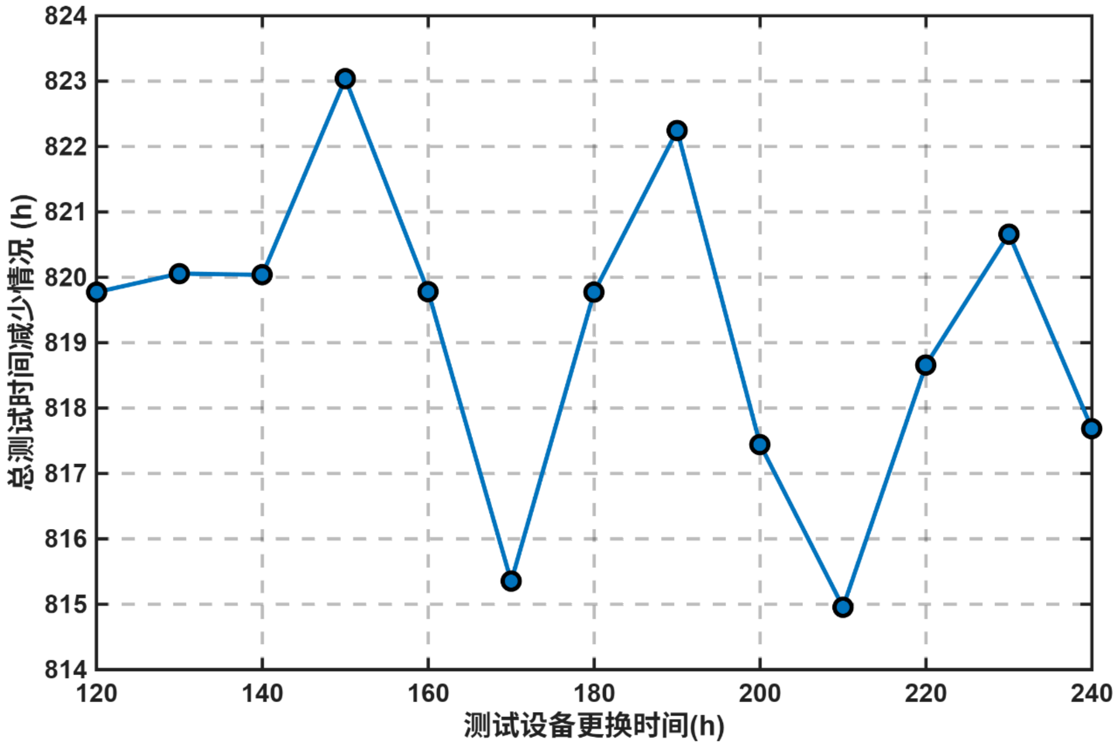

图 7 测试设备更换时间对测试时间的影响

表 8 问题 2 结果统计指标

T	S	PL	PW	YXB1	YXB2	YXB3	YXB4
35 天	97.255 个	4.83%	0.12%	70.5%	57.6%	70.3%	88.3%

5.3 问题三的模型建立与求解

问题三是“双班 K 小时测试的计划制定与指标计算”，需在“每班工作 K 小时、单套测试系统、2 个并行测试台”的约束下，处理“子系统问题、测手差错、设备故障”三类随机因素，制定测试工作计划，最终计算“任务完成平均天数 T、通过测试的装置数 S、总漏判概率 P_L、总误判概率 P_W、有效工作时间比 YXB”五项指标。

5.3.1 问题三的模型建立

与问题二的模型相比，问题三的模型是两个测试分队接续倒班工作，即保证测试工作一直进行。图 8 是两个分队接续倒班工作的示意图。

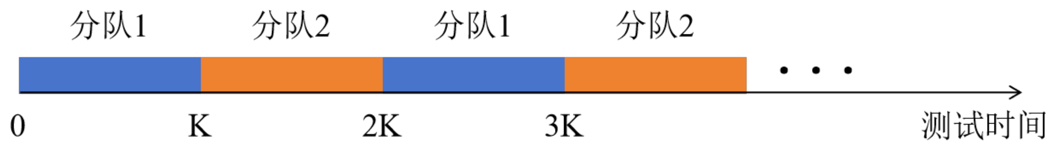

图 8 两个分队接续倒班示意图

问题三的模型的其余部分与问题二相同。

5.3.2 问题三的模型求解

K 值的取值范围是[9,12]h，取值间隔是 0.5 小时，因此 K 可取的值是{9,9.5,10,10.5,11,11.5,12}，共 7 个值。分别将 K 不同取值代入模型进行计算。

计算可得到全流程的甘特图。图 9 和图 10 分别是 K 取 10 和 12 的示例。图中蓝色的条块代表当前测试台的设备正在测试。

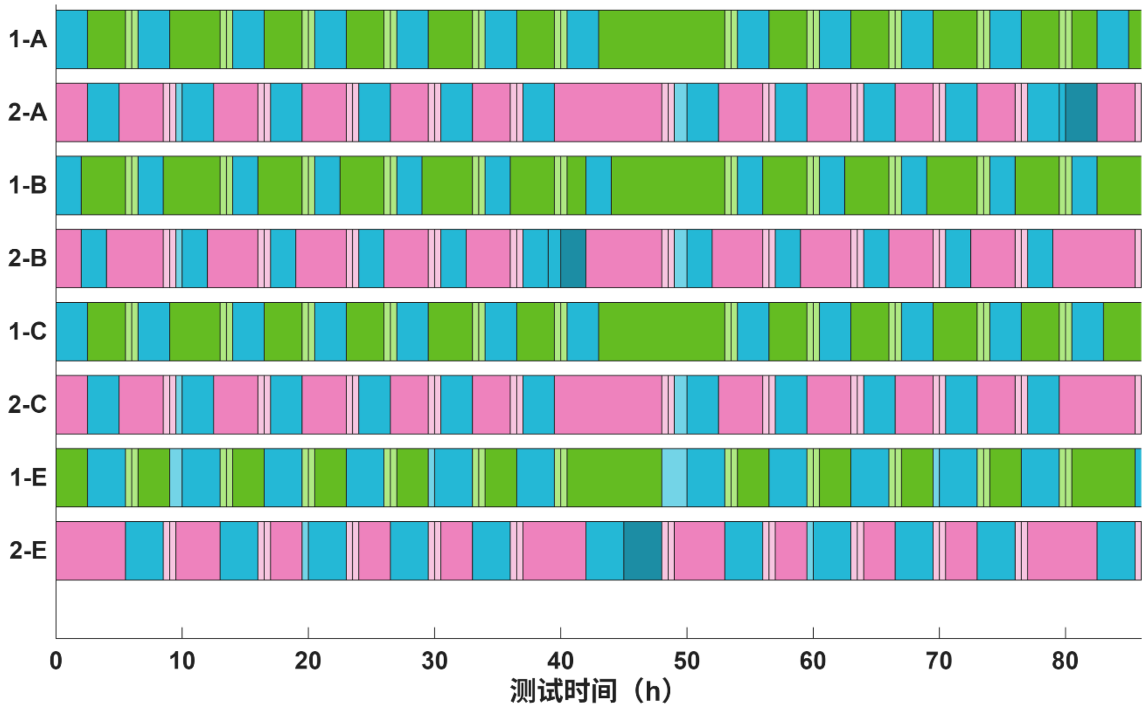

图 9　K=10 时部分工作状态示意图

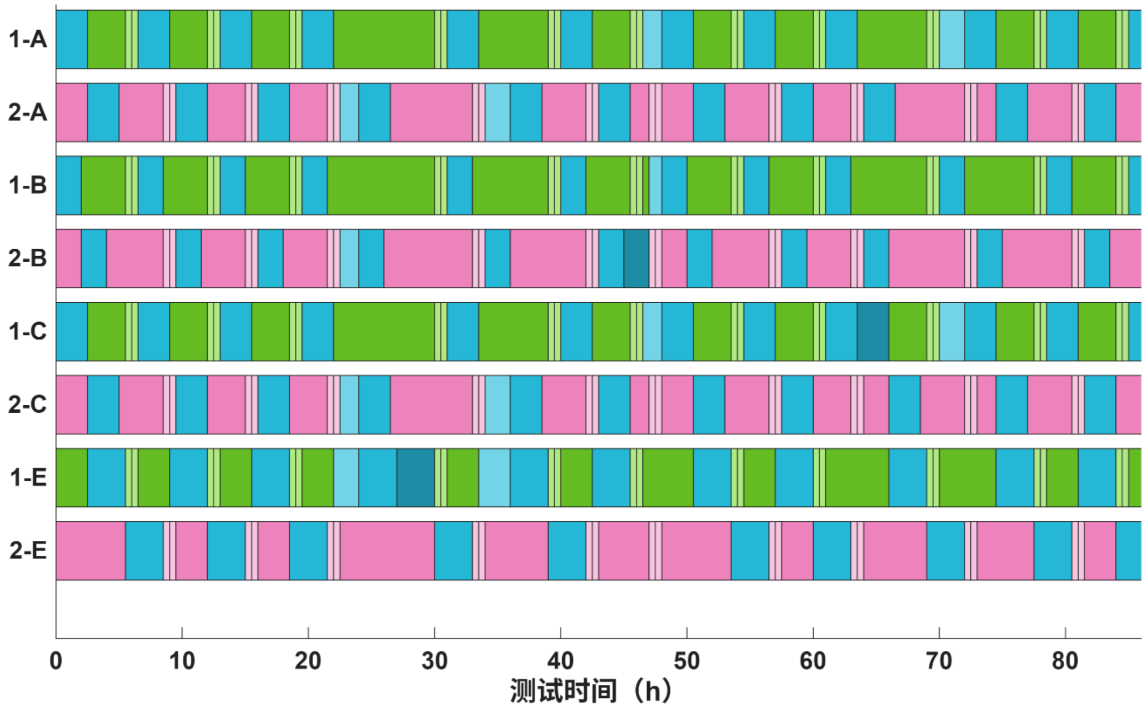

图 10　K=12 时部分工作状态示意图

计算得到的 K 与任务完成时间的关系，如图 11 所示。可以发现，当 K 取值[9,12]时，测试时间随着 K 值的增大，先减少后增大。当 K 取值为 10 的时候，所需的测试时间最少。之所以会产生这种现象，对比图 9 和图 10 可以发现，浅蓝色的色块代表由于各种原因产生的测试中断，K 取 12 时，中断占用的时间要大于 K 取 10 的时候。这是由于每次换班的时候，未完成的测试会中断，而每班正常进行测试时，尽量不要中断测试，这样所浪费的时间最少。

其次，仿真了提前更换测试设备对测试时间的影响，如图 12 所示。通过对比，提前更换设备确实能够少量减少测试时长，但是在实际生产中，需要考虑此举产生的成本。

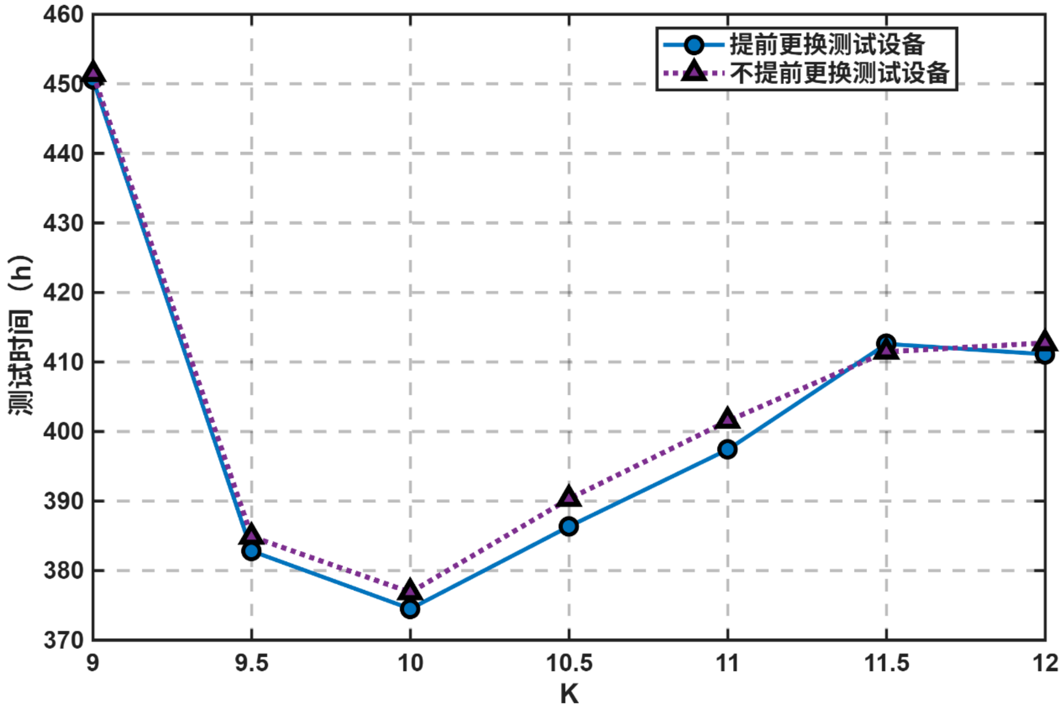

图 11　提前更换设备和 K 值对测试时间的影响

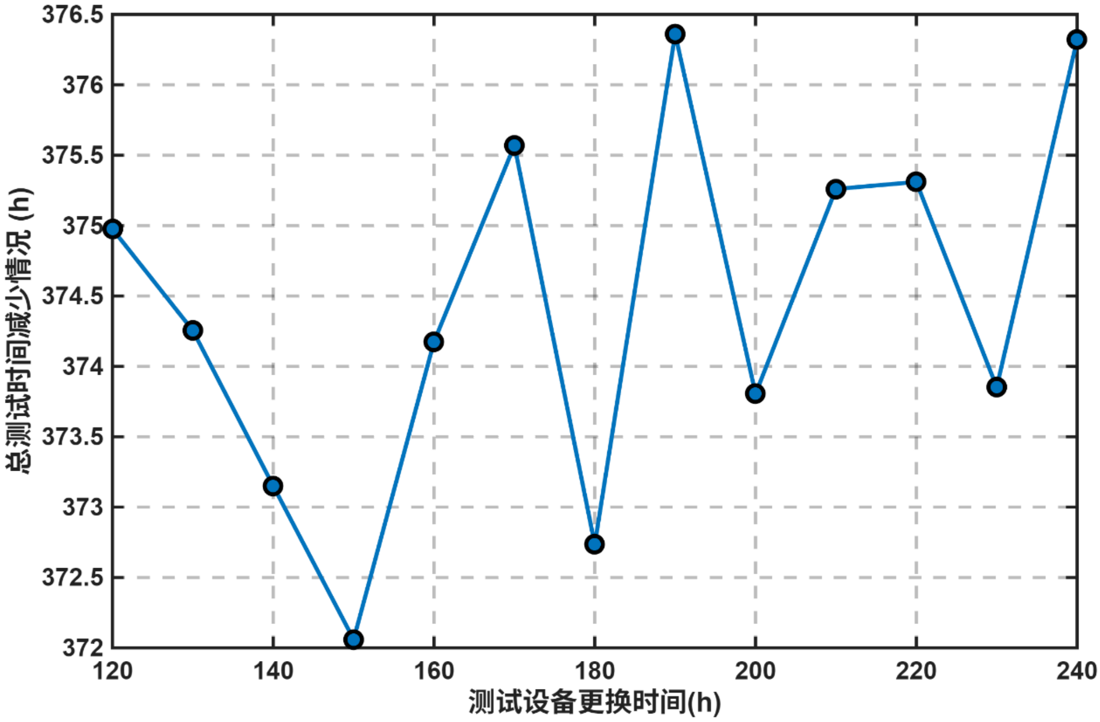

图 12　提前更换设备对测试时间的影响

K	T	S	PL	PW	YXB1	YXB2	YXB3	YXB4
10	16 天	97.3 个	4.89%	0.09%	70%	56.3%	69.7%	89.4%

5.4 问题四的模型建立与求解

分析讨论问题 3 中各个因素对测试任务平均完成时间的影响，并据此向主管部门提出对测试工作的改进建议。

主要考虑问题三中的因素为：每班工作时间 K、设备提前更换时间、测试时间减少。由第三问可知，每日工作时间为 K=10 时，测试时间最短，因此后续对比均有 K=10。

1、测试时间减少对总测试时间的影响

控制子系统测试时间，通关减少测试时间计算总测试时间，通过 100 此蒙特卡洛仿真得到如图结果。

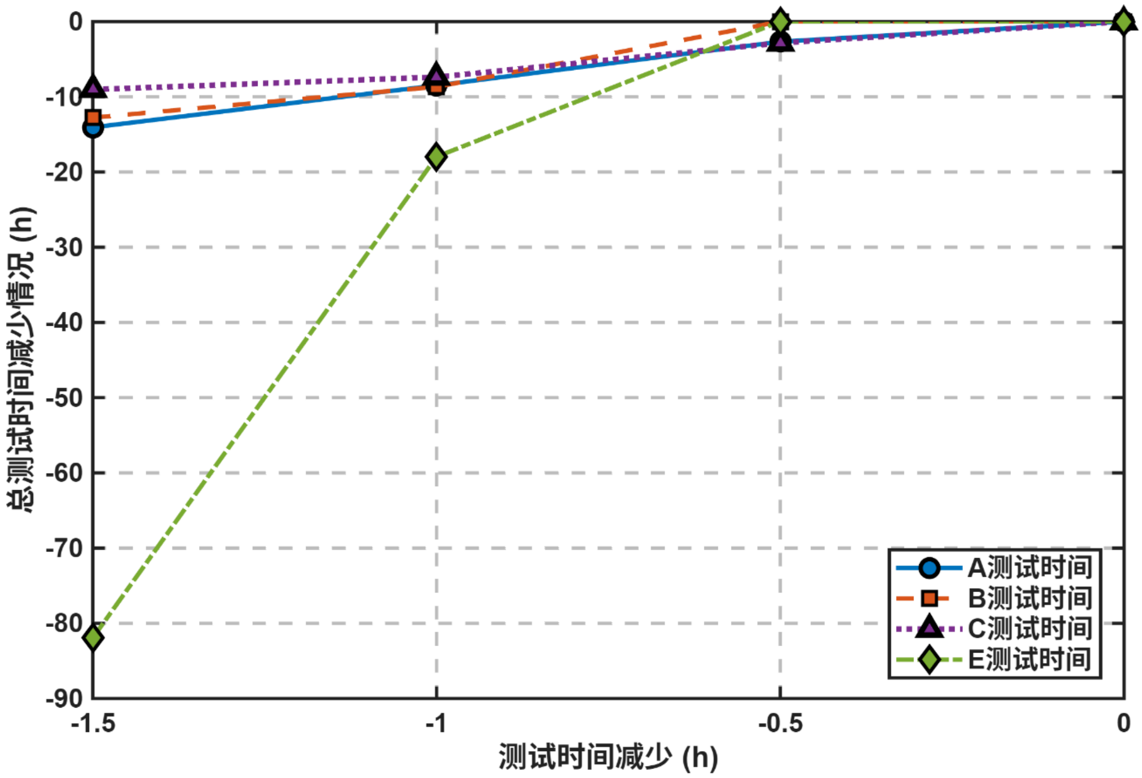

图 13　测试时间减少对总测试时间的影响

从图 13 中可知，总测试时间对 E 测试时间测试时间最敏感。因此主管部门可重点加强 E 测试小组，通关减少 E 测试时间，能大幅降低总测试时间。

2、重测次数对总测试时间的影响

改变子系统 A、B、C、E 重测次数，观察其对总测试时间的影响。结果如表 13 所示。

表 13 测试次数的影响

A	B	C	E	总测试时间 T	平均通过设备数	平均漏判概率

2	2	2	2	374.6h	97.31	4.888%
1	2	2	2	364.8h	95.492	4.282%
2	1	2	2	364.77	95.06	3.92%
2	2	1	2	366.33	95.31	4.27%
2	2	2	1	362.305	95.13	2.96%
1	1	2	2	356.59	93.52	3.82%
1	2	1	2	357.73	94.11	3.85%
1	2	2	1	354.525	93.15	2.84%
2	1	1	2	356.74	93.43	3.68%
2	1	2	1	355.6475	92.27	3.12%
2	2	1	1	356.705	93.51	2.94%
2	1	1	1	348.2196	90.98	2.63%
1	2	1	1	346.9874	91.91	2.53%

1	1	2	1	347.245	90.85	2.58%
1	1	1	2	349.91	91.57	3.43%
1	1	1	1	339.9h	89.658	2.168%

由上表可知，A、B、C、E 每少一个子系统进行重测，测试时间减少 10~12 小时，设备通过数减少约 2 个。A、B、C、E 每少两个子系统进行重测，测试时间减少 18~20 小时，设备通过数减少 4~5 个。A、B、C、E 每少两个子系统进行重测，测试时间减少 26~28 小时，设备通过数减少 6~7 个。当 A、B、C、E 均只进行一次测试，测试时间减少 34 小时，设备通过数减少 8 个。并且漏判概率和 E 是否进行重测的关系比 A、B、C 更密切。综上所述，主管部门可适当让 E 只进行一次测试或者 E 进行一次测试，A、B、C 其中一个进行一次测试，可以适当降低测试时间和漏判概率。但设备通过数有所下降。