

# 航空发动机研发决策分析流程

## Decision Analysis Process for Aero Engine Research and Development

■ 宁怀松 张德志 李昌红 王常亮 / 中国航发动力所

在发动机的研发过程中经常需要在多个备选方案之间做出选择，这些备选方案的实现通常需要耗费相应的资源（如人力、原材料、生产设备、资金等），且相关资源一旦使用将无法收回，因此决策必须非常慎重。

在航空发动机的研发过程中，决策分析是无处不在的。按照GJB 8113—2013《武器装备研制系统工程通用要求》，如图1所示，决策分析是系统工程技术管理过程之一：在择优选择方案时，应开展决策分析，如系统分析、费用—效能分析、权衡优化研究等。决策分析贯穿于武器装备研制各环节、各领域的方案优化和选定。同时，决策又是一个非常复杂的过程，并且总是包含一些不确定性因素，经常涉及多种类型和来源的输入，以及决策者对这些输入的理解，而这些理解又可能是主观的。鉴于决策的重要性，为确保决策结果的正确性、合理性，有必要通过分析完成决策过程。

### 决策分析的内涵

决策工作的范围一般分为两类：狭义上认为决策是单纯的选择方案的活动；广义上认为决策是一个提出问题、研究问题、拟定方案、选择方案并完善、实施方案的完整过程。

按照该思路，决策就是为达到某一目的，经过分析、比较、判断，在多个备选方案中选择一个最优方案并予以实施的过程。

根据发动机的研发实际，对照GJB 811—2013规定的技术过程和技术管理过程，以及该标准对决策

分析的描述，本文所涉及的决策分析是狭义的表达，即在不同“方案”之间做出选择，主要关注选择过程。至于方案的拟订、完善和实施等过程，则由系统工程技术过程和其他技术管理活动负责执行。

### 决策的层级和情景

决策分析适用于各类决策，但在发动机研发过程中，决策的层级是有显著差异的，具体可分为如下层级，

如图2所示。

#### 快速的决策

快速的决策最常发生且数量巨大，使用研发常识和经验法则即可完成。其中，经验法则包括标准、规范、指导书等。例如，可依据相关材料标准完成零件选材的决策，按照相关的规范完成零件的壁厚、圆角等尺寸决策，按照相应的指导书完成零件的加工方式决策等。由于这类决策的数量非常多且可能

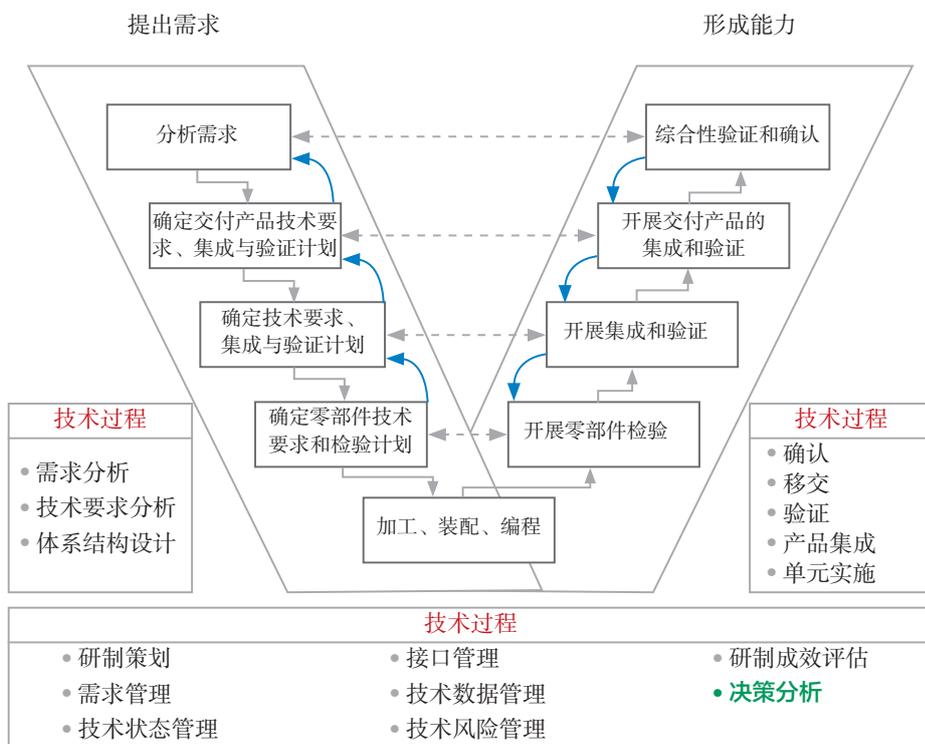


图1 GJB 8113规定的技术过程和技术管理过程

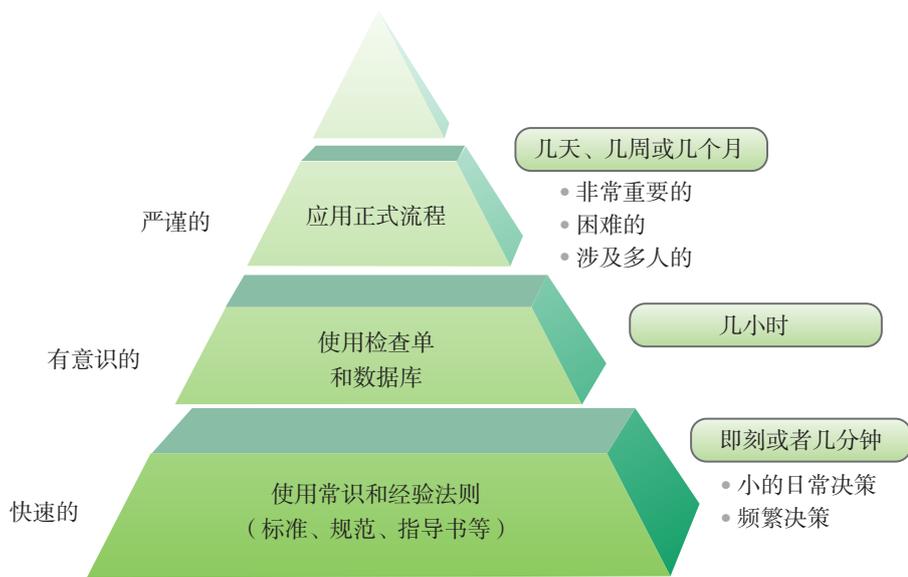


图2 决策层级示意图

随时发生，故一般不需要采用正式的流程，否则不但要付出极大的管理成本，还将导致极低的研发效率。通常按照研发流程和相应的流程文件开展工作，即可确保该类决策的正确性、合理性。

### 有意识的决策

很多快速的决策往往是“无意识”的，甚至是“拍脑袋”式的。对于重要性和复杂性更高的决策，则需要有意识的决策，如部件的选型、评审结论的确定、供应商的选择等。这类决策最好使用相关的检查单，并在决策数据库的支持下开展，以获得满意的结果。

### 严谨的决策

虽然严谨的决策数量较少，但却对发动机的研制发挥着举足轻重的作用。这类决策往往涉及到多个目标，需要考虑多目标优化，需要更加精准的分析，要考虑复杂性、动态性以及长远的影响，因此需要使用结构化、规范的决策分析流程，这也是本文研究的重点。该类决策

通常包括型号转阶段评审、确定产品发展规划等，详见表1。

## 决策分析流程

本文关注的是狭义的决策分析，且主要针对“严谨的决策”开展流程研究，结合发动机研发实际，并参

照相关文献资料，制定了航空发动机决策分析流程，如图3所示。

### 明确决策事项

对于发动机研制，有些决策事项是研发流程中已经确定的，如架构设计中涉及到的多方案筛选、型号的转阶段评审等；有些决策事项则可能是临时触发的，如选择新的供应商。无论是计划内的决策还是临时的决策，决策分析的第一步均是明确决策事项，弄清楚“要做什么”，进而明确决策的目的。为避免不同决策参与者对决策事项的理解出现分歧，应编制书面文件，对决策事项的范围、目的、要求进行详细描述，并说明发动机研发的相关约束（如周期、成本、资源等），以便决策参与者准确掌握相关信息，为良好的决策奠定基础。

### 定义评价准则

评价准则的定义对决策分析至关重要。评价准则的选取反映了决策的关注点。因此，必须围绕决策

表1 贯穿于发动机生命周期的决策情景示例

| 生命周期阶段  | 决策情景                              |  |
|---------|-----------------------------------|--|
| 产品规划    | 技术方案确定；制定各领域策略；立项审查               |  |
| 技术规划    | 制定投资组合策略；制定路标                     |  |
| 技术研究与开发 | 技术方案选择；制定各领域策略；产品线决策              |  |
| 产品开发    | 概念                                | 备选方案选择；概念决策评审；技术状态项确定；各领域（研发、制造、采购、服务、技术状态、市场、适航等）策略和计划的制订 |
|         | 计划                                | 架构设计中的多方案筛选；部件/子系统设计中的多方案筛选；测试方案的选择；工艺总方案的制订；供应商选择；计划决策评审  |
|         | 开发                                | 测试结果评估；物料采购；技术状态变更；综合决策评审                                  |
|         | 验证                                | 验证结果评估；小批生产准备；状态鉴定/列装定型；适航审定；可批量交付决策评审                     |
| 生命周期管理  | 制定维护策略；选择关闭的内容和时机；选择处置（退出）方法；归零评审 |  |

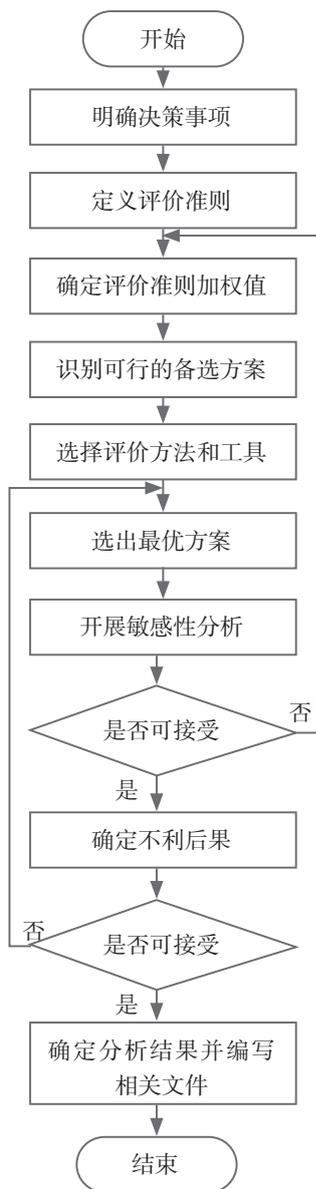


图3 决策分析流程

事项和目的开展评价准则的选取。可将评价准则分为“筛选准则”和“优选准则”。筛选准则是所有备选方案均应满足的，通常和关键利益攸关者的需求和约束直接关联，如发动机的功能、推力、耗油率、质量等，属于必须达到的“门限值”，不满足筛选准则的备选方案一般不会进一步考虑，以免浪费决策分析的相关资源。优选准则用于评价各

备选方案的优劣，由于通常存在对利益攸关者非常重要的关键期望特性，因此确定优选准则并不难，结合发动机的研制需求进行选取即可。通常，所选的准则基本上是独立的，并准确反映发动机的需求。评价准则选取时，不仅要考虑发动机的功能、性能、研发周期、通用质量特性等方面的因素，还要考虑投资、收益等经济指标。评价准则制定时，应考虑发动机的类型。以适航方面的要求为例，对于民用发动机，属于筛选准则，对于军用发动机，则属于优选准则，还应考虑发动机所处的研发阶段。比如，早期主要关注设计，后期则更加关注制造能力，因此，同样的评价准则，在研发初期可能是筛选准则，在研发后期则可能变为优选准则。

### 确定评价准则的加权值

加权值反映了评价准则在决策分析中的相对重要性。可在1~10的范围内设置评价准则的加权值，10用于表示最重要的评价准则。应在识别出可行的备选方案前确定各项评价准则的加权值，并在决策参与者之间达成一致，以提高决策的客观性。建立加权值是一项难度很大的工作，且往往受到决策参与者主观因素的影响，如决策参与者总倾向于认为自身领域/专业的工作更加重要。因此，应通过有效、充分、民主的沟通和研讨，确保加权值设置的合理性。确定加权值时，应考虑发动机的运行环境，如防腐蚀方面的要求，对于海军用发动机其加权值应相对高一些，对于空军用发动机其加权值则可以相对低一些。还应注意发动机的类型，以耗油率和推力质量比两项评价准则为

例，军用发动机更加重视推力质量比，民用发动机则更加重视耗油率，在设置加权值时，应予以考虑。

### 识别可行的备选方案

根据决策事项，完成可行的备选方案的识别。该项工作一般和发动机研发流程相关联，可根据流程运行结果确定相应的备选方案。备选方案一般不应少于两个，较为合适的是3~5个，以确保既不忽略可行的备选方案，又使决策分析的成本保持在合理限度内，具体数量根据决策事项的实际情况确定。

### 选择评价方法和工具

完成上述工作后，需要选择和决策事项匹配的评价方法和工具，如系统分析、权衡研究、成本收益分析、决策树、层次分析法、效用分析法、决策矩阵等。评价方法和工具属于决策分析的使能项，虽然不是必须使用的，但推荐使用相关方法和工具以提高决策分析的效率和有效性。

### 选出最优方案

根据确定的评价准则、加权值，使用选择的评价方法和工具，对所有备选方案进行评价，以确定各备选方案的优先顺序，并选出最优方案。进行评价时，应严格依据评价准则开展，必须确保过程的规范性。

### 开展敏感性分析

决策分析通过对不同备选方案的评价来选出最优方案。一旦识别出一个最优方案，决策参与者需要知悉，并搞清楚当评价准则发生变化时所选的最优方案是否依然还是最优的。为实现上述目标，需要开展最优方案对评价准则的敏感性分析。该工作通过改变评价准则的得分或加权值，重新计算每个备选方

案的得分情况，以确定如果得分或加权值发生变化时，各个备选方案得分的相应变化情况。若变化情况超出可接受的范围，则需要重新确定评价准则的加权值并重新开展评价。如果决策主要是基于某个评价准则的评分做出的，则需要特别关注该评价准则的得分，因为该评价准则的得分对决策结果具有非常重要的影响，敏感性分析也应集中于这类评价准则上。

### 确定不利后果

每个备选方案实施后均可能带来不可接受的后果。虽然相关的不利后果在评价准则中已经有所体现，但为确保全面性，开展本步骤工作是非常必要的。许多情况下，当风险非常大时，该步骤还应与风险评估工作同步开展，并将其视为风险项予以持续的跟踪。由于所选的最优方案极有可能带来不可接受的不利后果，如拖期、增加成本等，所以有时最优方案可能不能作为最终选取的方案，则需要开展相应的迭代工作。

### 确定分析结果并编写相关文件

完成上述过程后，应确定决策分析的最终结果，明确优选方案，并编写决策分析报告等文件。决策分析报告中应包括决策事项说明、决策目的、评价准则的选取和加权值设置情况、决策中设定的假设条件、采用的决策评价方法/工具、备选方案的描述、评价情况、敏感性分析情况、不利后果分析情况、最终的分析结果及依据等内容。

## 决策的注意事项

为确保决策的有效性和效率，开展决策时应注意以下事项。

一是应做到循证决策。决策的基础是事实、定性/定量数据、专业判定等。GJB 9001C—2017《质量管理体系要求》提出了循证决策的质量管理原则。不论是何种层级的决策，均应做好决策的准备工作，在充分收集、分析决策相关的数据、信息的基础上做出决策，以产生期望的结果，确保决策的合理性。

二是应关注重点的决策事项。受到决策资源、成本的限制，在发动机研发中，不可能按照决策分析流程对所有决策事项进行决策。应根据发动机研发实际，梳理出重点的决策事项，纳入发动机研制策划中，仅对这些重点事项进行流程化的决策。

三是应面向发动机全生命周期进行决策分析。每一项决策都应围绕发动机全生命周期的需求开展，而不应仅局限于完成当前的工作，以免后续出现不可接受的不利后果。例如，设计过程中的决策，要充分考虑后续的制造、验证、保障、退役等工作的要求，必要时邀请相关领域的人员参与决策过程。

四是应坚持民主决策，尽量减少主观因素影响。决策是由人做出的，过程中必然会受到个人主观因素的影响，为确保决策的客观性必须努力减少该方面的影响。一方面应慎重地选择决策参与者（包括参与者的范围、专业能力要求、道德品质要求等）；另一方面尽量使用相关的决策支持工具，努力提升决策过程的规范性，以公正、无私、富有洞察力的决策参与者和规范的决策过程，提升决策的成效。

五是应做好决策分析的成文信息管理。按要求做好决策过程

的记录，形成相关的文件，以便后续对决策情况的追溯，同时也可用于支持相关决策工作的开展。

## 结束语

虽然在发动机研发中决策无处不在，GJB 8113—2013也对决策分析提出了明确要求，但当前决策工作的规范性、客观性、有效性、及时性等均存在一定的不足。结合航空发动机研发体系建设工作，在上述决策分析流程基础上还应强化以下工作：面向全生命周期，进一步梳理发动机研发过程中涉及的决策事项，研究建立相应的评价准则，形成评价准则加权值设置方法；充分研究决策分析和其他技术流程、技术管理流程的关系，将决策事项融入技术流程，并和研制策划、研制成效评估、技术风险评估等技术管理工作统筹进行；开展相关使能方法、工具的研究，包括开展相关指导文件、决策分析支持方法的研究，开展决策分析信息化系统的研究，从方法和工具两个方面提高决策效率和决策的规范性。

航空动力

（宁怀松，中国航发动力所，高级工程师，主要从事系统工程及航空发动机研发体系建设研究）

### 参考文献

- [1] 国际系统工程协会. INCOSE 系统工程手册[M]. 张新国, 译. 北京: 机械工业出版社, 2017: 405-430.
- [2] 美国国家航空航天局. NASA 系统工程手册[M]. 朱一凡, 李群, 杨峰, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2021: 239-259.
- [3] 夏绍玮, 杨家本, 杨振斌. 系统工程概论[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995: 125-140.