

制造业可靠性系统工程标准

STANDARD OF RELIABILITY SYSTEMS ENGINEERING FOR MANUFACTURING ENTERPRISES

RSE-STD-1909.2 2023

卫星通信系统可靠性与 可用性指标确定要求

Requirements of Reliability and Availability Index Determination
for Satellite Communication Systems

（征求意见稿）



© 本标准属于深圳市为民可靠性系统工程研究院所有，享有著作权及其他法律规定的任何权益，受法律和国际条约保护。

2023-11-19 发布



深圳市为民可靠性系统工程研究院

目 次

前 言 II

1 范围..... 1

2 引用文件 1

3 术语和定义..... 1

4 符号..... 1

5 通用要求 2

 5.1 参数选择 2

 5.2 指标确定原则..... 2

 5.3 指标确定流程..... 2

 5.4 工作要点 2

6 一般要求 3

 6.1 获取期望达到指标值..... 3

 6.2 分析可达到指标值 3

 6.3 确定最终指标值 4

附 录 A （资料性附录） 专家评分细则 5

附 录 B （资料性附录） 评分一致性检验方法..... 7

附 录 C （资料性附录） 影响因素综合得分和权重计算方法..... 8

附 录 D （资料性附录） 可达到指标值计算方法 10

附 录 E （资料性附录） 某卫星通信系统可用性指标确定示例..... 11

前 言

本标准由深圳市为民可靠性系统工程研究院提出并发起编制。

本标准起草单位：北京航空航天大学、华为技术有限公司、中国空间技术研究院、深圳市为民可靠性系统工程研究院、北京航空航天大学云南创新研究院、北京蓝威技术有限公司、中国东方红卫星股份有限公司、中国电子科技集团公司电子科学研究院。

本标准主要起草人：李瑞莹、高莹、马骥、宋叶晴、康锐、黄宁、伍湘平、崔国楠、陈锐、黄和富、税长江、刘亮、王学望、张栋、王靖、马文杰、陈卫卫。

卫星通信系统可靠性与可用性指标确定要求

1 范围

本标准规定了卫星通信系统可靠性与可用性指标确定的要求。

本标准适用于深圳市为民可靠性系统工程研究院理事单位，也可供其他企业参照使用。

2 引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GJB 421 卫星术语

GJB 451 装备通用质量特性术语

GJB 1909 装备可靠性维修性保障性要求论证

RSE-STD-451 确信可靠性术语与定义

RSE-STD-1909.1 卫星通信系统可靠性与可用性参数体系

3 术语和定义

RSE-STD-451 2022、RSE-STD-1909.1 2023 界定的术语与定义适用于本文件。

3.1

一致性检验 consistency test

判断若干组经验数据是否存在显著性差异的方法。

3.2

经验不确定分布 empirical uncertainty distribution

基于专家经验数据的分布函数，是确信可靠分布的一种。

3.3

成本型因素 cost factor

数值越小越好的因素。

3.4

效益型因素 benefit factor

数值越大越好的因素。

4 符号

下列符号适用于本文件。

β ——折衷系数，常数

I_C ——可达到指标值

I_F ——相似系统指标值

I_M ——最终指标值
 I_U ——期望达到指标值

5 通用要求

5.1 参数选择

卫星通信系统可靠性与可用性参数应符合 RSE-STD-1909.1 2023 的规定。参数选择时可根据系统功能需求（如覆盖功能、连通功能和业务传输功能）选择确信可靠性参数（包括确信覆盖可靠度、确信连通可靠度、确信业务可靠度）和确信可用性参数（包括确信覆盖可用度、确信连通可用度、确信业务可用度）。

5.2 指标确定原则

（1）先进性原则

应立足于未来需求，着眼于发展，充分利用成熟技术并采用相应的先进技术成果，使待确定指标系统的可靠性与可用性水平尽量达到同类系统的先进水平。

（2）可行性原则

卫星通信系统可靠性与可用性指标的确定，应充分考虑科技水平、工业基础、预研基础及其研制能力和研制周期要求，使其建立在切实可行的基础上，经过一定的努力能够达到。

（3）经济性原则

从任务需求出发提出的可靠性与可用性指标，应进行经济性论证，考虑经济可承受能力，力求获得良好的效费比。

（4）对比优先原则

应进行多种可靠性与可用性方案对比优化论证，从效能、费用等方面进行分析和比较，排出优先顺序，供决策部门选择。

5.3 指标确定流程

卫星通信系统可靠性与可用性指标确定流程如图 1 所示。

5.4 工作要点

（1）本标准规定了卫星通信系统可靠性与可用性指标确定的基本程序和主要方法，对具体系统的指标要求确定可以根据实际情况进行适当剪裁；

（2）指标确定应在综合论证阶段进行，待确定指标系统的使用需求和研制能力均应作为确定可靠性与可用性指标要求的依据；

（3）通过查阅资料和调查收集相似系统可靠性与可用性指标有关数据时，除了指标本身，还应包括所有指标影响因素相关的数据；

（4）指标确定过程自始至终都存在协调和权衡分析工作，应不断反复迭代进行，与性能、进度、费用综合权衡，经整体权衡优化后得到系统指标；

（5）所提出的系统可靠性与可用性指标相互之间应协调匹配，并保证最终提出的指标要求和系统设计方案、使用方案与保障方案相协调；

（6）所提出的系统可靠性与可用性指标应有明确的定义，是可度量、可追溯、可验证的，并且有明确的验证时机、内容、条件和方法。

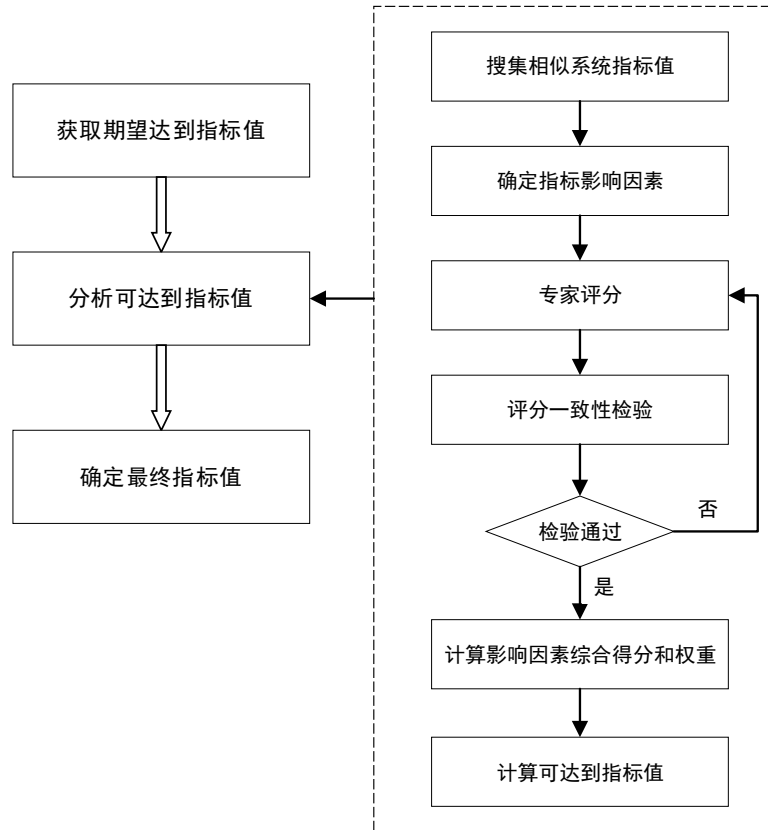


图 1 卫星通信系统可靠性与可用性指标确定流程

6 一般要求

6.1 获取期望达到指标值

收集期望达到的可靠性与可用性指标值，记作 I_U 。

收集过程中，应充分考虑系统的实际使用需求，必要时可通过采访或问卷调查获得。

6.2 分析可达到指标值

(1) 搜集相似系统指标值

根据卫星通信系统研制的任务需求，开展调研工作，了解国内外同类系统的可靠性与可用性指标，选择一个或综合多个系统的相应指标作为相似系统指标值，记作 I_F 。

(2) 确定指标影响因素

对卫星通信系统可靠性与可用性水平产生影响的因素通常包含成本型因素和效益型因素两个方面。常见的影响因素如网络复杂度、研制投入费用、进度要求、技术成熟水平、环境条件、维修保障水平和性能裕量等。

(3) 专家评分

邀请若干名专家根据自己经验分别对待确定指标系统与相似系统的各项因素及其相对重要性进行匿名评分，评分细则见附录 A。

(4) 评分一致性检验

对所有专家的评分进行一致性检验，检验方法见附录 B。如果检验通过，则评分结果有效，继续进行后续流程；否则，应请专家再次评分，直至通过检验。

(5) 计算影响因素综合得分和权重

根据通过检验的专家评分数据，分别对待确定指标系统与相似系统计算所有影响因素的综合得分和权重，计算方法见附录 C。

(6) 计算可达到指标值

根据相似系统指标值、待确定指标系统和相似系统所有影响因素的综合得分和各影响因素的权重，计算得到可达到指标值，记作 I_C ，计算方法见附录 D。

6.3 确定最终指标值

按以下两种情况确定系统最终指标值 I_M ：

(1) $I_C < I_U$

当 $I_C < I_U$ 时，即期望达到指标值大于可达到指标值，应采用折衷法，降低期望指标的同时提高可达到指标，如式(1)所示。

$$I_M = \beta I_U + (1 - \beta) I_C \quad (1)$$

式中：

β ——折衷系数，需综合考虑现实需求和研制能力取值，通常为 0.4~0.6。

(2) $I_C \geq I_U$

当 $I_C \geq I_U$ 时，即可达到指标值大于期望达到指标值，指标选取以可达到指标为准，如式(2)所示。

$$I_M = I_C \quad (2)$$

附录 E 给出了某卫星通信系统可用性指标确定示例。

附录 A
(资料性附录)
专家评分细则

A.1 影响因素评分细则

选择卫星通信系统领域的专家组成专家小组，要求专家小组需要具备一定的权威性和专业多样性，通常为 5-20 人。所有专家需要根据自己的知识和经验分别匿名独立地对影响相似系统和待确定指标系统可靠性和可用性的每个因素评分，填写专家评分表（见表 A.1）。为便于统计，建议评分标准统一采用 10 分制。

表 A.1 影响因素专家评分表

影响因素 1: ()							
相似系统	可能评分						
	实际值 $\leq$ 评分值的信度						
待确定指标系统	可能评分						
	实际值 $\leq$ 评分值的信度						
影响因素 2: ()							
相似系统	可能评分						
	实际值 $\leq$ 评分值的信度						
待确定指标系统	可能评分						
	实际值 $\leq$ 评分值的信度						
.....							
影响因素 n: ()							
相似系统	可能评分						
	实际值 $\leq$ 评分值的信度						
待确定指标系统	可能评分						
	实际值 $\leq$ 评分值的信度						
判断依据							
理论分析	实践经验	向同行了解	直觉	其他			
评分变化说明							

评分的具体步骤如下：

(1) 填写评分和信度

针对每个影响因素，分别考虑相似系统和待确定指标系统，填写所有的可能评分值及其信度。其中：

1) 评分：为便于统计，建议专家评分时首先确定各影响因素对各系统评分值的上下限，并将评分值确定为上下限范围内的整数。例如，若评分范围取 3~6 分，则可评为 3、4、5、6 分。评分过程中，为避免专家理解不一致，应备注清楚每个影响因素评分高低的具体含义。例如，对网络复杂度这一影响因素，可备注复杂度越高评分越高。

2) 信度：对各影响因素在各系统的所有评分值，分别给出实际值小于等于评分值的可能性，即信度。例如，对上述例子中的 4 个评分值（3、4、5、6），可分别给出信度 0.1、

0.3、0.5、0.9。

(2) 填写判断依据

在表格中填写判断依据，包括理论分析、实践经验、向同行了解、直觉和其他，专家可在对应位置标记“√”。

(3) 填写评分变化说明（如有）

如果第一轮专家评分未通过数据一致性检验（见附录 B），则将专家评分表全部匿名反馈给各位专家，让专家比较自己同他人的不同意见，选择是否要修改自己的评分。如需修改，则应填写评分变化说明（第一次评分无需填写）。

A.2 影响因素相对重要性评分细则

邀请专家小组对所有影响因素进行两两比较，进行相对重要性评分并填写评分表（见表 A.2），评分标准可参考表 A.3。

表 A.2 影响因素相对重要性评分表

影响因素 j 影响 相对 因素 i 重要性	1	2		n
1				
2				
.....				
n				

表 A.3 相对重要性评分标准

相对重要性分值	定 义
1	因素 i 和因素 j 同等重要
3	因素 i 比因素 j 稍重要
5	因素 i 比因素 j 明显重要
7	因素 i 比因素 j 强烈重要
9	因素 i 比因素 j 极端重要
2,4,6,8	上述等级重要度的中间值

注： $i, j = 1, 2, \dots, n$ ， n 为影响因素数量。

附录 B
(资料性附录)
评分一致性检验方法

可应用基于不确定理论的 Delphi 检验法对多专家的评分结果进行一致性检验。下面以对某影响因素在某系统的评分一致性检验为例, 解释一致性检验步骤具体如下:

(1) 数据整理

将收集到的所有专家对该影响因素在该系统的评分经验数据进行升序排列, 其中来自不同专家的相同值被视为一个, 如式(B.1)所示:

$$z_1 < z_2 < \cdots < z_s \quad (\text{B.1})$$

式中:

z_k ——第 k 个评分值, $k = 1, 2, \cdots, s$;

s ——可能评分值的总数。

(2) 经验不确定分布计算

计算第 h 名专家各可能取值 z 的经验不确定分布 $\Phi_h(z)$, 如式(B.2)所示:

$$\Phi_h(z) = \begin{cases} 0, & \text{若 } z < z_{hk} \\ \alpha_{hk} + \frac{(\alpha_{h(k+1)} - \alpha_{hk})(z - z_{hk})}{z_{h(k+1)} - z_{hk}}, & \text{若 } z_{hk} \leq z \leq z_{h(k+1)} \\ 1, & \text{若 } z > z_{hk} \end{cases} \quad (\text{B.2})$$

式中:

α_{hk} ——专家 h 给出的评分值 z_k 对应的信度。

(3) Delphi 检验

对每个评分值, 计算信度均值 $\bar{\alpha}_k$ 和检验因子 d_k , 如式(B.3)和式(B.4)所示。

$$\bar{\alpha}_k = \frac{1}{m} \sum_{h=1}^m \Phi_h(z_k) \quad (\text{B.3})$$

$$d_k = \frac{1}{m} \sum_{h=1}^m (\Phi_h(z_k) - \bar{\alpha}_k)^2 \quad (\text{B.4})$$

式中:

m ——专家数量。

通常, 取 Delphi 检验阈值 $\varepsilon = 0.05$ 。如果 $\forall d_k < \varepsilon$, 认为通过 Delphi 检验; 否则, 认为检验未通过。

附录 C
(资料性附录)

影响因素综合得分和权重计算方法

C.1 综合得分计算方法

使用通过检验的评分结果分别对相似系统和待确定指标系统计算所有影响因素的综合得分。对某影响因素在某系统的综合得分计算方法如式(C.1)所示。

$$E(\xi) = \frac{\bar{\alpha}_1 + \bar{\alpha}_2}{2} z_1 + \sum_{k=2}^{s-1} \frac{\bar{\alpha}_{(k+1)} - \bar{\alpha}_{(k-1)}}{2} z_k + (1 - \frac{\bar{\alpha}_{(s-1)} + \bar{\alpha}_s}{2}) z_s \quad (\text{C.1})$$

式中：

z_k ——第 k 个可能取值；

$\bar{\alpha}_k$ —— z_k 的信度均值（见式 B.3）， $k=1, 2, \dots, s$ 。

汇总相似系统和待确定指标系统所有影响因素的综合得分，分别记作 $E_F(\xi) = [E_F(\xi_1), E_F(\xi_2), \dots, E_F(\xi_n)]$ 和 $E_M(\xi) = [E_M(\xi_1), E_M(\xi_2), \dots, E_M(\xi_n)]$ 。

C.2 权重计算方法

C.2.1 处理相对重要性评分数据

将每位专家的评分构造成判断矩阵，如式(C.2)所示。

$$W_h = \begin{bmatrix} 1 & w_{12} & \cdots & w_{1n} \\ 1/w_{12} & 1 & \cdots & w_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/w_{n1} & 1/w_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{C.2})$$

式中：

w_{ij} ——影响因素 i 和影响因素 j 间的相对重要度。

采用 Hadamard 乘法凸组合方法对所有判断矩阵进行集成处理，得到最终唯一的复合判断矩阵，如式(C.3)所示。

$$P = W_1^{\lambda_1} \times W_2^{\lambda_2} \times \cdots \times W_m^{\lambda_m} = \begin{bmatrix} 1 & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ 1/p_{12} & 1 & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/p_{n1} & 1/p_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{C.3})$$

式中：

λ_h ——专家 h 的影响力权重；

p_{ij} ——集成处理后的影响因素 i 和影响因素 j 间的相对重要度。

C.2.2 计算影响因素权重

基于多专家打分结果计算各影响因素权重并进行一致性检验，具体步骤如下：

(1) 对复合判断矩阵 P 求解特征向量 V ，如式(C.4)所示；

$$V = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \frac{p_{1i}}{\sum_{j=1}^n p_{ij}} \\ \sum_{i=1}^n \frac{p_{2i}}{\sum_{j=1}^n p_{ij}} \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n \frac{p_{ni}}{\sum_{j=1}^n p_{ij}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix} \quad (\text{C.4})$$

(2) 将特征向量 $V = [v_1, v_2, \dots, v_n]^T$ 进行归一化处理, 得到各个影响因素所对应的权重向量 ω , 如式(C.5)所示;

$$\omega = \begin{bmatrix} \frac{v_1}{\sum_{i=1}^n v_i} \\ \frac{v_2}{\sum_{i=1}^n v_i} \\ \vdots \\ \frac{v_n}{\sum_{i=1}^n v_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \vdots \\ \omega_n \end{bmatrix} \quad (\text{C.5})$$

(3) 对权重计算结果进行一致性检验。求解复合判断矩阵 P 满足等式 $P\omega = \lambda_{\max}\omega$ 的最大特征值 $\lambda_{\max}$ 和对应的特征向量 ω , 计算一致性比率如式(C.6)所示;

$$C_R = \frac{\lambda_{\max} - q}{(q - 1)R_I} \quad (\text{C.6})$$

式中:

q ——复合判断矩阵 P 的阶数;

R_I ——平均随机一致性指标取值, 可查阅表 C.1。

表 C.1 平均随机一致性指标

q	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_I	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49

(4) 当 $C_R < 0.1$ 时, 判断矩阵通过一致性检验, 否则调整矩阵 P 的取值, 直至通过检验。最后输出所有影响因素所对应的权重 $\omega = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]^T$ 。

附录 D
(资料性附录)
可达到指标值计算方法

根据已有的相似系统指标值、相似系统和待确定指标系统所有影响因素的综合得分和权重，计算卫星通信系统可靠性与可用性可达到指标值，如式(D.1)所示。

$$I_C = I_F \left[\sum_{i=1}^u \frac{E_F(\xi_i)}{E_M(\xi_i)} \omega_i + \sum_{j=u+1}^n \frac{E_M(\xi_i)}{E_F(\xi_i)} \omega_i \right] \quad (\text{D.1})$$

式中：

I_F ——相似系统指标值；

$E_F(\xi_i)$ ——相似系统影响因素 i 的综合得分；

$E_M(\xi_i)$ ——待确定指标系统影响因素 i 的综合得分；

ω_i ——影响因素 i 的权重；

u ——成本型因素数量($1 \leq u \leq n$)。



附录 E (资料性附录)

某卫星通信系统可用性指标确定示例

E.1 参数选择

考虑到卫星通信系统的任务需求，选择确信覆盖可用度、确信连通可用度和确信业务可用度三个参数，具体定义及内涵见 RSE-STD-1909.1 2023。

E.2 获取期望达到指标值

针对卫星通信系统的语音业务，通过调研与分析，确定期望达到的指标值如表 E.1 所示。

表 E.1 期望达到的指标值

业务类型	可用性指标		
	确信覆盖可用度	确信连通可用度	确信业务可用度
语音业务	0.9999	0.9995	0.999

E.3 确定可达到的指标值

(1) 搜集相似系统指标值

通过调研与分析，选择某现役卫星通信系统作为本示例的相似系统，其指标值如表 E.2 所示。

表 E.2 相似系统指标值

业务类型	可用性指标		
	确信覆盖可用度	确信连通可用度	确信业务可用度
语音业务	0.999	0.999	0.994

(2) 确定指标影响因素

网络建设复杂度、建设成本、研制能力等均会影响卫星通信系统的覆盖、连通和业务能力，因此，本示例考虑网络复杂度、建设投入费用、进度要求、技术成熟水平、环境条件、维修保障水平、性能裕量 7 种影响因素。其中，网络复杂度为成本型因素，其余为效益型因素。

(3) 专家评分

为避免大量罗列数据，仅以网络复杂度这一影响因素为例展示分析过程。邀请 6 名专家匿名独立地分别进行因素评估，得到第一轮评分数据如表 E.3 所示。

表 E.3 相似系统和待确定指标系统的第一轮专家评分（“网络复杂度”）

专家	评分结果					
专家 1	相似系统	(4,0)	(5,0.1)	(6,0.6)	(7,1)	
	待确定指标系统	(5,0)	(6,0.3)	(7,0.6)	(8,0.9)	(9,1)
专家 2	相似系统	(5,0.1)	(7,0.3)	(9,0.8)		
	待确定指标系统	(5,0)	(7,0.2)	(9,0.9)		
专家 3	相似系统	(5,0)	(6,0.3)	(7,0.7)	(8,0.9)	(9,1)
	待确定指标系统	(6,0)	(7,0.4)	(8,0.7)	(9,0.9)	(10,1)

表 E.3 (续)

专 家	评分结果					
专家 4	相似系统	(6,0)	(7,0.3)	(8,0.8)	(9,1)	
	待确定指标系统	(7,0)	(8,0.5)	(9,0.9)	(10,1)	
专家 5	相似系统	(5,0)	(6,0.25)	(7,0.6)	(8,0.8)	(9,1)
	待确定指标系统	(6,0)	(7,0.3)	(8,0.6)	(9,0.75)	(10,1)
专家 6	相似系统	(5,0)	(6,0.5)	(7,1)		
	待确定指标系统	(5,0)	(6,0.5)	(7,0.8)	(8,1)	

注：表格中括号内第 1 个数字为该因素的可能评分，第 2 个数字为实际值小于等于该评分值的信度。

(4) 评分一致性检验

由上述数据，根据式(B.2)分别生成相似系统和待确定指标系统的 6 个经验不确定分布，如表 E.4 和表 E.5 所示。

表 E.4 相似系统“网络复杂度”评分经验不确定分布

z	4	5	6	7	8	9
$\Phi_1(z)$	0	0.1	0.6	1	1	1
$\Phi_2(z)$	0	0.1	0.2	0.3	0.55	0.8
$\Phi_3(z)$	0	0	0.3	0.7	0.9	1
$\Phi_4(z)$	0	0	0	0.3	0.8	1
$\Phi_5(z)$	0	0	0.25	0.6	0.8	1
$\Phi_6(z)$	0	0	0.5	1	1	1

注： $\Phi_h(z)$ ——专家 h 对“网络复杂度”评分的经验不确定分布。

表 E.5 待确定指标系统“网络复杂度”评分经验不确定分布

z	5	6	7	8	9	10
$\Phi_1(z)$	0	0	0.3	0.6	0.9	1
$\Phi_2(z)$	0	0	0.2	0.55	0.9	1
$\Phi_3(z)$	0	0	0.4	0.7	0.9	1
$\Phi_4(z)$	0	0	0	0.5	0.9	1
$\Phi_5(z)$	0	0	0.3	0.6	0.75	1
$\Phi_6(z)$	0	0.5	0.8	1	1	1

使用附录 B 中式(B.3)和式(B.4)，对所有专家评分结果进行 Delphi 检验。令 $\varepsilon = 0.05$ ，则相似系统和待确定指标系统第一轮 Delphi 检验结果如表 E.6 和表 E.7 所示。

表 E.6 相似系统第一轮 Delphi 检验结果

z	4	5	6	7	8	9
$\overline{\alpha_k}$	0	0.0333	0.3083	0.6500	0.8417	0.9667
d_k	0	0.0022	0.0387	0.0825	0.0237	0.0056

表 E.7 待确定指标系统第一轮 Delphi 检验结果

z	5	6	7	8	9	10
$\overline{\alpha_k}$	0	0.1500	0.3833	0.7083	0.9083	1
d_k	0	0.0358	0.0681	0.0337	0.0070	0

由于存在检验因子大于 Delphi 检验阈值 ε 的情况，所以向每位专家反馈所有的评分情况并重新评分。第二轮专家数据如表 E.8 所示。

表 E.8 相似系统和待确定指标系统的第二轮专家评分（“网络复杂度”）

专家	评分结果					
专家 1	相似系统	(4,0)	(5,0.1)	(6,0.6)	(7,1)	
	待确定指标系统	(5,0)	(6,0.3)	(7,0.6)	(8,0.9)	(9,1)
专家 2	相似系统	(5,0.1)	(7,0.5)	(9,0.8)		
	待确定指标系统	(5,0)	(7,0.2)	(9,0.9)		
专家 3	相似系统	(5,0)	(6,0.3)	(7,0.7)	(8,0.9)	(9,1)
	待确定指标系统	(6,0)	(7,0.4)	(8,0.7)	(9,0.9)	(10,1)
专家 4	相似系统	(6,0.1)	(7,0.5)	(8,0.8)	(9,1)	
	待确定指标系统	(7,0.3)	(8,0.5)	(9,0.9)	(10,1)	
专家 5	相似系统	(5,0)	(6,0.25)	(7,0.6)	(8,0.8)	(9,1)
	待确定指标系统	(6,0)	(7,0.3)	(8,0.6)	(9,0.75)	(10,1)
专家 6	相似系统	(5,0)	(6,0.5)	(7,1)		
	待确定指标系统	(5,0)	(6,0.5)	(7,0.8)	(8,1)	

类似地，基于上述数据生成每位专家的经验不确定分布，在此基础上得到相似系统和待确定指标系统对应的信度均值和检验因子，如表 E.9 和表 E.10 所示。

表 E.9 相似系统第二轮 Delphi 检验结果

z	4	5	6	7	8	9
$\overline{\alpha_k}$	0	0.0333	0.3417	0.7167	0.8583	0.9667
d_k	0	0.0022	0.027	0.0447	0.0153	0.0056

表 E.10 待确定指标系统第二轮 Delphi 检验结果

z	5	6	7	8	9	10
$\overline{\alpha_k}$	0	0.1500	0.4333	0.7083	0.9083	1
d_k	0	0.0358	0.0422	0.0337	0.007	0

由表 E.9 和表 E.10，所有检验因子均小于 Delphi 检验阈值 ε ，因此，判定该组数据通过 Delphi 检验，可用于后续指标确定。

(5) 计算指标影响因素综合得分和权重

基于该组数据的经验不确定分布，根据式(C.1)求得网络复杂度的综合得分。

类似地，对其他影响因素进行评分、检验，得到相似系统和待确定指标系统所有影响因素的综合得分，如式(E.1)和式(E.2)所示。

$$\begin{aligned}
 E_F(\xi) &= [E_F(\xi_1), E_F(\xi_2), \dots, E_F(\xi_7)] \\
 &= [6.583, 7.442, 6.008, 4.825, 5.500, 5.525, 6.192]
 \end{aligned}
 \tag{E.1}$$

$$\begin{aligned}
 E_M(\xi) &= [E_M(\xi_1), E_M(\xi_2), \dots, E_M(\xi_7)] \\
 &= [7.300, 6.142, 6.608, 7.175, 6.167, 7.142, 7.242]
 \end{aligned}
 \tag{E.2}$$

设 6 名专家的影响力 $\lambda = [0.3, 0.2, 0.15, 0.1, 0.15, 0.1]$ ，根据式(C.3)计算得到基于 Hadamard 乘法凸组合的复合判断矩阵 P ，如式(E.3)所示，根据式(C.5)计算各影响因素对应的权重，如式(E.4)所示。对复合判断矩阵 P 进行一致性检验，其最大特征值

$\lambda_{\max}=7.3362$ ，平均随机一致性指标 $R_I=1.36$ ，通过计算得到一致性比率 $C_R=0.0412<0.1$ ，因此通过一致性检验。

$$P=W_1^{\lambda_1} \times W_2^{\lambda_2} \times \dots \times W_6^{\lambda_6}$$
$$= \begin{bmatrix} 1 & 0.5506 & 1.3174 & 0.3403 & 3.5625 & 0.2845 & 0.2503 \\ 1.8163 & 1 & 2.8435 & 0.5431 & 4.3051 & 0.4202 & 0.4134 \\ 0.7591 & 0.3517 & 1 & 0.3065 & 1.0845 & 0.3536 & 0.4004 \\ 2.9385 & 1.8413 & 3.2627 & 1 & 4.1075 & 1.0845 & 1.3817 \\ 0.2807 & 0.2323 & 0.9221 & 0.2435 & 1 & 0.3393 & 0.4038 \\ 3.5151 & 2.3800 & 2.8277 & 0.9221 & 2.9469 & 1 & 0.7800 \\ 3.9955 & 2.4190 & 2.4977 & 0.7209 & 2.4766 & 1.2821 & 1 \end{bmatrix} \quad (E.3)$$

$$\omega = \begin{bmatrix} \frac{v_1}{\sum_{i=1}^7 v_i} \\ \frac{v_2}{\sum_{i=1}^7 v_i} \\ \vdots \\ \frac{v_7}{\sum_{i=1}^7 v_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \vdots \\ \omega_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0851 \\ 0.1366 \\ 0.0636 \\ 0.2303 \\ 0.0523 \\ 0.2118 \\ 0.2204 \end{bmatrix} \quad (E.4)$$

(6) 计算可达到指标值

基于上述计算结果，根据式(D.1)可得到该语音业务可达到的覆盖可用度、连通可用度和业务可用度可达到指标值，如表 E.11 所示。

表 E.11 可达到指标值

业务类型	可用性指标		
	确信覆盖可用度	确信连通可用度	确信业务可用度
语音业务	0.9992	0.9992	0.9942

E.4 最终指标值的确定

对比表 E.1 和表 E.11，由于 $I_C < I_U$ ，即期望指标大于可达到指标，因此，使用式(1)计算系统最终指标值，如表 E.12 所示。其中， β 取 0.6。

表 E.12 系统最终指标值

业务类型	可用性指标		
	确信覆盖可用度	确信连通可用度	确信业务可用度
语音业务	0.9996	0.9994	0.9971