残差动力学（Residual Dynamics）
一种以失败为一等对象的有限状态形式系统

谢凯凡

2026.02.15

1　研究背景与问题立场

在现有的大多数形式系统、动力系统以及计算模型中，研究的核心问题通常被表述为：系统如何成功运行，如何从初始状态出发生成合法结构，以及如何通过演化规则构造一个被称为“世界”的整体。

在这些研究框架中，失败、偏离、不闭合轨道、非法路径，往往被视为需要被排除或忽略的对象。即便被讨论，它们通常也仅以“误差”“噪声”或“例外情况”的形式出现，并不被赋予独立的结构地位。

本文采取一种与上述传统路径根本不同的立场。我们不再将失败视为附属现象，而是将其提升为一等形式对象，并系统性地研究以下问题：

失败是否可以被形式化为一个独立的状态空间？失败是否具有可组合、可累积的结构？失败在什么条件下可以被完全消除？

基于这一立场，本文提出并研究一个独立的有限状态形式系统，称为**残差动力学（Residual Dynamics，简称 RD）**。

残差动力学的核心思想并不在于描述“系统如何一步步生成世界”，而在于刻画“系统在尝试生成世界的过程中，偏离世界一致性要求的程度是如何产生、如何变化、以及如何被消除的”。

在这一视角下，世界不再是演化的起点，而是失败完全消失时的极限状态。

2　残差动力学的基本状态空间

本节将严格、逐步地定义残差动力学系统所使用的状态空间。所有对象将在此节中被明确引入，后续章节将不再引入新的基本类型。

2.1 模运算集合的定义

首先定义两个基本的模运算集合:

$$\mathbb{Z}_2 = \{0, 1\}, \qquad \mathbb{Z}_5 = \{0, 1, 2, 3, 4\}.$$

其中, $\mathbb{Z}_2$ 用于刻画二值型偏差,例如翻转、奇偶性变化等现象; $\mathbb{Z}_5$ 用于刻画具有五周期结构的相位偏移。

这两个集合在本文中仅作为有限代数结构使用,不预设任何物理或语义含义。

2.2 残差状态空间的形式定义

定义残差动力学的状态空间为如下直积集合:

$$\mathcal{R} := (\mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_5)^2.$$

也就是说,任意一个残差状态 $r \in \mathcal{R}$,都由两个有序对组成。

我们将其写作:

$$r = (r_5, r_{10}),$$

其中

$$r_5 = (r_5^b, r_5^p) \in \mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_5, \qquad r_{10} = (r_{10}^b, r_{10}^p) \in \mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_5.$$

这里的下标 5 与 10 仅作为标记,用于区分在不同观察尺度下定义的残差分量。它们在形式上是完全对称的,并不预设任何大小关系。

因此,残差状态空间 $\mathcal{R}$ 是一个有限集合,其理论规模为:

$$|\mathcal{R}| = (2 \times 5)^2 = 100.$$

2.3 直观说明(非形式部分)

为了帮助理解,可以将 r_5 理解为系统在较短观察窗口下相对于理想闭合行为所产生的偏移,将 r_{10} 理解为系统在较长观察窗口下相对于理想闭合行为所产生的偏移。

需要明确指出的是:上述解释仅用于直观理解,在后续的形式推导与验算中,所有结论仅依赖于前述集合与代数定义,而不依赖任何语义解释。

3 残差的代数合成结构

本节定义残差动力学中最核心的运算结构:残差如何被"合成(累积)"。这里的合成不是任意指定的规则,而是为了让"多个失败片段拼接后产生的总失败量"能够被一致地描述。因此,我们必须给出一个在残差空间上封闭、可计算、可组合的运算。

3.1 $\mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_5$ 上的基础合成

残差状态的每一半分量 r_5 与 r_{10} 都属于 $\mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_5$。因此我们首先在该集合上定义一个基础合成运算。

设

$$x = (x^b, x^p) \in \mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_5, \qquad y = (y^b, y^p) \in \mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_5.$$

其中:

- $x^b, y^b \in \mathbb{Z}_2$ 是二值分量;
- $x^p, y^p \in \mathbb{Z}_5$ 是五周期分量。

定义基础合成运算 $\oplus$ 为:

$$x \oplus y := (x^b \oplus y^b,\ (x^p + y^p) \bmod 5),$$

其中左侧的 $\oplus$ 表示 $\mathbb{Z}_2$ 上的异或（XOR）运算，右侧的 $+$ 与 mod5 表示在 $\mathbb{Z}_5$ 上的加法与取模。

这一定义的含义是:

- 二值分量通过异或合成：翻转次数的奇偶性会累积;
- 五周期分量通过模 5 加法合成：相位偏移会在周期群中累积。

我们强调：这里不需要任何物理解释，它只是对“两个偏差如何叠加”给出一个可计算的形式结构。

3.2 残差空间 $\mathcal{R}$ 上的总合成运算

现在我们将合成结构提升到完整残差空间

$$\mathcal{R} = (\mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_5)^2.$$

取任意两个残差状态

$$r = (r_5, r_{10}) \in \mathcal{R}, \qquad s = (s_5, s_{10}) \in \mathcal{R},$$

其中

$$r_5, s_5 \in \mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_5, \qquad r_{10}, s_{10} \in \mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_5.$$

定义残差空间上的总合成运算 $\boxplus$ 为:

$$r \boxplus s := (r_5 \oplus s_5,\ r_{10} \oplus s_{10}).$$

也就是说：残差的“短窗分量”与“长窗分量”分别独立合成，然后组合成新的残差状态。

3.3 零残差与单位元

在残差空间中，我们需要一个特殊状态表示“没有任何偏差”，它将作为合成运算的单位元。

定义零残差为：

$$\mathbf{0} := ((0,0),(0,0)) \in \mathcal{R}.$$

其中：

- $(0,0) \in \mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_5$ 表示二值偏差为 0、相位偏移为 0；
- 两个分量同时为 $(0,0)$ 表示短窗与长窗的残差都为零。

由定义可直接验算：对任意 $r \in \mathcal{R}$，有

$$r \boxplus \mathbf{0} = r, \qquad \mathbf{0} \boxplus r = r.$$

因此 $\mathbf{0}$ 是 $\boxplus$ 的单位元。

3.4 关于封闭性与可组合性的说明

残差动力学后续所有演化规则都将建立在运算 $\boxplus$ 之上。因此需要明确：

- **封闭性：** 若 $r, s \in \mathcal{R}$，则 $r \boxplus s \in \mathcal{R}$。这是因为 $\mathbb{Z}_2$ 在异或下封闭，$\mathbb{Z}_5$ 在模加下封闭，从而 $\mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_5$ 在 $\oplus$ 下封闭，最终 $\mathcal{R}$ 在 $\boxplus$ 下封闭。
- **可组合性：** 合成运算允许我们把多个失败片段的残差贡献累积起来，并将结果仍表示为一个残差状态。这使得“失败的累积”成为一个严格的形式对象，而不是模糊的定性描述。

4 驱动元与残差演化规则

本节引入残差动力学的第二个核心对象：驱动元（drive element）。驱动元表示一个“局部片段”向残差空间注入的偏差，残差动力学的演化就是驱动元在残差空间中的累积。

4.1 驱动元集合的定义

设

$$\mathcal{E} \subseteq \mathcal{R}$$

为一个给定的有限集合，称为**驱动元集合**。

集合 $\mathcal{E}$ 的作用是：规定哪些残差增量是允许被注入系统的。

换句话说，如果我们把残差状态看成“当前失败程度”，那么一个驱动元 $e \in \mathcal{E}$ 就对应一次“失败注入事件”，它将把系统从当前残差状态 r 推进到新的残差状态。

4.2 驱动元的来源与独立性（必须说清楚）

残差动力学系统本身并不规定 $\mathcal{E}$ 如何得到。$\mathcal{E}$ 可以来源于任何外部系统，例如：

- 一个有限状态自动机的局部轨道片段；
- 一个带有局部步规则的形式系统；
- 或者任何能够将局部片段映射为残差的生成机制。

残差动力学只要求：外部系统能够给出若干"片段"，并为每个片段计算一个残差，从而得到一个残差集合 $\mathcal{E}$。至于外部系统的状态、规则、语义，都不属于残差动力学的内部对象。

这就是"残差动力学独立于生成系统"的含义：RD 不研究外部系统如何生成片段，只研究这些片段一旦被映射为残差后，在残差空间中如何累积与演化。

4.3 残差演化关系 $\Rightarrow$

定义一个二元关系

$$\Rightarrow \subseteq \mathcal{R} \times \mathcal{R},$$

称为残差演化关系。

直观上，$r \Rightarrow r'$ 表示：系统可以从残差状态 r 演化到残差状态 r'。

我们将以推理规则（inference rules）的形式给出该关系的生成方式。推理规则的优点是：它明确规定了允许的演化步骤，并且可以组合得到多步演化结论。

4.4 基本推理规则：残差推进

（RD-STEP）残差推进规则 对任意 $r \in \mathcal{R}$ 与任意 $e \in \mathcal{E}$，定义一条一步演化规则：

$$r \Rightarrow r \boxplus e.$$

这条规则的含义非常明确：

- 当前残差为 r；
- 注入一个允许的驱动元 e（即一个允许的失败增量）；
- 新的残差变为 $r \boxplus e$。

因此，残差动力学的"一步"不是原系统的一步状态转移，而是"拼接一个失败片段"的事件。

4.5 反身性与组合性（保证多步演化可表达）

为了能够讨论“多步演化”，我们加入两条标准的推理闭包规则。

（RD-REFL）反身性规则 对任意 $r \in \mathcal{R}$，规定：

$$r \Rightarrow r.$$

该规则表示：允许零次注入，即保持不变。

（RD-COMP）组合性规则 对任意 $r, r', r'' \in \mathcal{R}$，若

$$r \Rightarrow r' \quad \text{且} \quad r' \Rightarrow r'',$$

则规定：

$$r \Rightarrow r''.$$

该规则表示：如果可以从 r 演化到 r'，并且可以从 r' 演化到 r''，那么就可以从 r 演化到 r''。

这保证了残差演化关系的“可拼接性”，从而允许我们用有限步推理描述任意长的失败累积过程。

4.6 这一节到底建立了什么

到此为止，残差动力学系统已经具备了三个要素：

- 明确的有限状态空间 $\mathcal{R}$；
- 明确的残差合成运算 $\boxplus$；
- 明确的一步演化规则：$r \Rightarrow r \boxplus e$（其中 $e \in \mathcal{E}$）。

这意味着：只要给定一个具体的驱动元集合 $\mathcal{E}$，残差动力学就成为一个完全确定的形式系统，并且其演化完全发生在残差空间内部，不再依赖外部系统的状态与规则。

5 世界、成功判据与吸收态

在前两节中，我们已经完成了残差动力学的核心形式结构：给出了有限状态空间 $\mathcal{R}$，定义了残差合成运算 $\boxplus$，并用推理规则刻画了残差如何在驱动元注入下演化。

本节的目标是回答一个关键问题：*在残差动力学中，什么被称为“成功”，什么被称为“世界”？*

与传统系统不同，这里的成功不是通过“生成某个对象”来定义的，而是通过“失败是否被完全消除”来判定的。

5.1 零残差切片的定义

回忆零残差的定义:

$$\mathbf{0} := ((0,0),(0,0)) \in \mathcal{R}.$$

该状态表示在所有被考虑的观察尺度下，系统均不存在任何残余偏差。

基于此，我们定义**零残差切片**（亦称“世界切片”）为集合:

$$\mathcal{W}_0 := \{\, r \in \mathcal{R} \mid r = \mathbf{0} \,\}.$$

由于 $\mathbf{0}$ 是一个唯一元素，$\mathcal{W}_0$ 实际上是残差空间中的一个单点子集。然而，正是这一单点，在残差动力学中承担了“成功状态”与“世界状态”的全部语义。

5.2 为何以零残差作为成功判据

在残差动力学的语境下，任何非零残差状态都表示：系统在某一尺度上仍然偏离世界一致性的要求。

因此，

- 若 $r \neq \mathbf{0}$，则系统尚未成功；
- 若 $r = \mathbf{0}$，则系统在所有尺度上均满足一致性要求。

这一定义具有如下重要特性:

- 成功判据是**系统内生的**，不依赖任何外部语义解释；
- 成功不是一个过程，而是一个判定结果；
- 成功状态的定义不涉及“生成路径”，只涉及“是否仍有失败残留”。

5.3 吸收态的概念

在残差动力学中，我们关心如下问题：一旦系统进入零残差状态，在后续演化中是否可能再次偏离?

为此，引入吸收态的概念。

若在不给定新的非零驱动元注入的前提下，系统一旦进入某个状态后就无法离开，则称该状态为**吸收态**。

在本系统中，零残差 $\mathbf{0}$ 具有如下性质:

$$\mathbf{0} \boxplus \mathbf{0} = \mathbf{0}.$$

并且，若驱动元集合 $\mathcal{E}$ 不包含 $\mathbf{0}$ 以外的元素，则在没有外部注入的情况下，系统一旦达到零残差状态，将保持在该状态不变。

因此，零残差在残差动力学中天然地扮演吸收态的角色。

5.4 世界的形式含义总结

综合以上定义，在残差动力学中：

> 世界不是通过演化规则"生成"的对象，而是失败完全被消除时所处的状态。

这意味着：

- 世界不是动力学的起点；
- 世界不是动力学的轨道；
- 世界是残差动力学的终点判据。

这一立场与传统动力系统的直觉是根本不同的，但正是这种不同，使得失败能够被提升为一等研究对象。

6 残差动力学作为形式系统的总结

在进入具体实例的穷举验算之前，我们先对残差动力学这一形式系统进行一次完整而精确的总结，以明确哪些对象已经被固定，哪些内容将在实例中被具体化。

6.1 形式系统的组成要素

一个残差动力学系统由以下数据完全确定：

1. 一个有限状态空间
$$\mathcal{R} = (\mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_5)^2;$$
2. 一个在 $\mathcal{R}$ 上封闭的合成运算 $\boxplus$；
3. 一个给定的有限驱动元集合
$$\mathcal{E} \subseteq \mathcal{R};$$
4. 一组生成残差演化关系 $\Rightarrow$ 的推理规则。

一旦上述要素被给定，残差动力学的所有可达状态、所有演化路径、以及成功判据都被形式化地完全确定。

6.2 与外部生成系统的关系

需要再次强调的是：残差动力学并不描述外部系统的状态空间、局部规则或演化细节。

外部系统在残差动力学中的唯一作用是：为若干"局部片段"计算残差，从而给出一个驱动元集合 $\mathcal{E}$。

一旦 $\mathcal{E}$ 被给定，外部系统的其余结构即被完全遗忘，残差动力学成为一个独立运行的形式系统。

6.3 接下来要做的事情

在下一节中，我们将选取一个具体的外部系统实例，并执行以下步骤：

- 明确给出外部系统的状态空间与局部规则；
- 枚举所有满足给定长度的局部轨道；
- 对每一条轨道计算其残差；
- 统计残差的可达性与分布；
- 验证零残差切片对应的"合法世界"。

这一实例将以完全穷举的方式展开，不跳步、不省略，从而为残差动力学提供一个可复核的具体支撑。

7 具体实例的完全穷举验算

本节给出一个**从定义到结论逐步展开**、**可完全复核**的具体实例，用于验证并展示残差动力学在真实有限系统中的工作方式。我们将明确写出系统参数，计算候选轨道的总数，定义残差的具体计算方式，并通过全空间枚举得到所有可达残差及零残差切片。

7.1 外部系统的参数设定

考虑如下一个具体的外部有限系统：

- **状态空间**定义为
$$S = \{0,1\} \times \mathbb{Z}_5.$$
因此系统共有
$$|S| = 2 \times 5 = 10$$

个不同状态。我们将任意状态记为

$$s = (b, p),$$

其中 $b \in \{0, 1\}$ 为二值分量，$p \in \mathbb{Z}_5$ 为相位分量。

- **局部步规则**仅允许以下两条原子规则：

  1. 前进步规则 R_1：
  $$(b, p) \mapsto (b,\ p + 1 \bmod 5);$$
  2. 回退翻转规则 R_2：
  $$(b, p) \mapsto (1 - b,\ p - 1 \bmod 5).$$

- **轨道长度**固定为 10 步。对任意初始状态 s_0，一条长度为 10 的轨道写作

  $$\gamma = (s_0, s_1, s_2, \ldots, s_{10}),$$

  其中对所有 $i = 0, \ldots, 9$，状态 s_{i+1} 由 s_i 通过 R_1 或 R_2 得到。

7.2 候选轨道的总数计算

我们首先计算在上述参数下，所有可能候选轨道的总数。

- 对固定的初始状态 s_0，在每一步中都有 2 条规则可选；
- 因此长度为 10 的规则序列共有

  $$2^{10} = 1024$$

  种不同可能；
- 系统初始状态共有 10 个。

由此可得，所有候选轨道的总数为

$$10 \times 1024 = 10240.$$

这 10240 条轨道构成了我们接下来进行残差计算与统计的完整枚举空间。

7.3 残差的具体计算公式

现在我们将残差动力学中的抽象残差定义具体化到该外部系统中。
设

$$s_i = (b_i, p_i)$$

表示轨道 γ 在第 i 步的状态。

7.3.1 五步残差的定义

定义轨道 γ 的五步残差为

$$\varepsilon_5(\gamma) = (b_5 \oplus (1 - b_0),\ (p_5 - p_0) \bmod 5)\,.$$

该定义包含两个分量:

- 二值分量 $b_5 \oplus (1 - b_0)$,用于检测在前五步中是否完成了“期望的翻转”;
- 相位分量 $(p_5 - p_0) \bmod 5$,用于记录前五步中相位的净偏移。

7.3.2 十步残差的定义

定义轨道 γ 的十步残差为

$$\varepsilon_{10}(\gamma) = (b_{10} \oplus b_0,\ (p_{10} - p_0) \bmod 5)\,.$$

其中:

- 二值分量 $b_{10} \oplus b_0$ 检测整段轨道是否完成偶数次翻转;
- 相位分量 $(p_{10} - p_0) \bmod 5$ 检测整段轨道是否在相位上闭合。

7.3.3 总残差

定义轨道 γ 的总残差为

$$\varepsilon(\gamma) = \big(\varepsilon_5(\gamma),\ \varepsilon_{10}(\gamma)\big) \in (\mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_5)^2.$$

7.4 零残差轨道的判定条件

根据前文对“世界”与“成功”的定义,一条轨道被称为**合法轨道**,当且仅当其满足

$$\varepsilon_5(\gamma) = (0, 0) \quad \text{且} \quad \varepsilon_{10}(\gamma) = (0, 0).$$

我们将所有满足上述条件的轨道称为**零残差轨道**。

7.5 零残差轨道的完全枚举结果

对全部 10240 条候选轨道逐一计算残差,可以得到如下严格结论:

- 满足零残差条件的轨道**恰好有 10 条**;
- 这 10 条轨道分别对应 10 个不同的初始状态 s_0;

- 所有这 10 条轨道共享**同一条规则序列**，即在 10 步中每一步均采用回退翻转规则 R_2；
- 对每一条零残差轨道 γ，都有严格闭合关系

$$s_{10} = s_0.$$

因此，在该实例中，“合法世界”并不是由多条不同结构的轨道组成，而是由一族结构完全一致、仅初始点不同的闭合轨道组成。

7.6 残差可达性的统计结果

我们进一步对全部 10240 条轨道的残差进行统计，得到以下可达性结果：

- 十步残差 ε_{10} 的可达取值覆盖整个集合 $\mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_5$，共 10 种；
- 五步残差 ε_5 的可达取值并未覆盖全部 $\mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_5$，而仅有 6 种可能；
- 总残差空间理论上包含 100 种可能状态，但在本实例中，实际可达的总残差状态仅有 36 种。

这意味着：即便残差动力学的理论状态空间规模为 100，具体系统所诱导的驱动元集合也会将其压缩到一个更小的有效子空间。

7.7 本节结论的形式意义

通过上述完全穷举，我们验证了以下事实：

- 残差动力学并非抽象设想，而是可以在具体系统中被完全枚举与验证；
- “世界”等价于零残差切片，且该切片在本实例中是一个有限、可完全列举的集合；
- 残差动力学所研究的对象，并非状态本身，而是状态轨道在一致性意义下的失败结构。

这为残差动力学作为一种独立形式系统提供了直接、可复核的实例支撑。

8 总总结：残差动力学到底完成了什么

在前文中，我们从零开始构建了残差动力学（RD）这一形式系统，并在一个具体的 10 状态、2 条局部规则、10 步窗口的实例上，通过全空间穷举给出了可复核的验算结论。

本节不引入任何新对象，仅对已完成的内容做一份**逐点**、**逐句可对照的总结**，明确读者究竟获得了什么、没有获得什么，以及这一框架为何可以被视为"失败动力学"的通用模板。

8.1 读者已经获得的形式对象（逐项确认）

截至第 7 节结束，本文已经给出了以下完全明确的形式对象。

(1) 独立的残差状态空间 我们定义了残差动力学的状态空间为

$$\mathcal{R} = (\mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_5)^2,$$

并将任意残差状态写作

$$r = (r_5, r_{10}).$$

该空间是有限集合，理论规模为 100。这一步给出的是一个纯形式的对象：它不依赖外部系统的状态定义，也不依赖外部系统的局部规则。

(2) 残差合成运算 我们在 $\mathcal{R}$ 上定义了合成运算 $\boxplus$，并明确给出其逐分量的计算方式。该运算保证残差的累积可以被形式化表达，并保证"多段失败片段的拼接"仍落在同一残差空间中。

(3) 驱动元集合与演化关系 我们引入驱动元集合

$$\mathcal{E} \subseteq \mathcal{R},$$

并定义残差演化关系 $\Rightarrow$ 由推理规则生成，其核心的一步规则为：

$$r \Rightarrow r \boxplus e \qquad (e \in \mathcal{E}).$$

因此，一旦 $\mathcal{E}$ 被指定，残差动力学的可达状态、可达路径、演化闭包均被确定。

(4) 世界/成功判据 我们用零残差

$$\mathbf{0} = ((0,0),(0,0))$$

作为成功判据，并定义世界切片为

$$\mathcal{W}_0 = \{r \in \mathcal{R} \mid r = \mathbf{0}\}.$$

在这一框架下，"世界"不再由生成过程定义，而由失败是否被完全消除来判定。

8.2 本文刻意没有做的事情（边界声明）

为了避免读者误读，我们明确指出本文**没有**做以下事情：

- 本文没有把残差解释为物理能量、熵或任何外部含义；
- 本文没有将某一具体外部系统（例如某个自动机或某个动力系统）当作唯一来源；
- 本文没有承诺"残差一定会趋于零"，也没有宣称系统必然收敛；
- 本文没有用任何概率、统计拟合或启发式方法替代形式枚举。

换言之，本文的目标不是给出一个世界观，而是给出一个**可审计**、**可复核**、**可反驳**的形式框架。

8.3 为何它构成"失败动力学"的通用模板

本文最关键的结构性结论可以被表述为：

> 只要一个外部系统能够把"局部片段"映射到一个有限残差空间，并且残差可在该空间中被合成与累积，那么关于失败如何叠加、如何传递、如何被消除的研究，就可以完全转写为残差动力学中的内部问题。

因此，外部系统的作用被压缩为一件事：**给出驱动元集合** $\mathcal{E}$。
一旦 $\mathcal{E}$ 被确定，外部系统的状态、规则、语义细节即不再是必要输入，残差动力学系统成为一个独立对象，并允许对失败结构进行纯形式研究。

8.4 与传统"单一演化函数生成世界"的差异（再次强调）

传统观点往往假设"世界"来自某个演化函数的迭代，或者来自某条时间演化方程的解轨道。
而本文的立场是：

- 局部规则只生成候选片段（可能正确，也可能失败）；
- 全局一致性要求不通过生成实现，而通过残差判据实现；
- 世界不是"生成的结果"，而是"失败为零的切片"。

因此，"生成"与"合法性/一致性"在结构上被彻底分离，这也是残差动力学能够成立的根本原因。

8.5 关于第 7 节实例的最后一句话（形式层面）

第 7 节的穷举验算并非为了宣称某个数值“很漂亮”，而是为了证明：

- 在一个极简的有限系统中，残差与世界切片可以被**完全枚举**；
- 零残差轨道集合可以被**完全刻画**；
- 残差可达集可以显著小于理论空间，从而给出“失败动力学有效状态空间”的具体含义。

以上三点是形式系统意义上的“完成度”指标：它们保证读者可以复核、可以复现、也可以反驳。

致谢与备注（可选）

本文没有依赖任何统计拟合或外部语义解释。若读者希望进一步扩展，可以在保持 RD 形式结构不变的前提下，更换外部系统以获得不同的驱动元集合 $\mathcal{E}$，从而比较不同系统的失败结构差异。这一扩展属于应用层，而不属于本文的形式层。