差值驱动：竞技体育数智化训练的数理模型

陈 艳
陆军兵种大学北京营区军政基础系，北京 100072

[摘要]竞技体育训练长期缺乏可运算数理模型。现有主流“外挂式”数智化路径，因缺少统一的度量框架，只能描述训练状态，而无法驱动训练决策。研究提出以五维体能基元度量框架为统一基座，比对冠军基准与运动员当前状态，归一化为可同构运算的目标向量与状态向量，建立差值驱动方程，阐明复合映射函数的三项基本约束与实现路径，设计 ADPV 闭环（评估-诊断-处方-验证，Assessment-Diagnosis-Prescription-Verification）自进化机制。研究表明，专项技能训练的本质，是基元差值由负向零持续收敛的过程。当差值归零，目标状态自动更新至更高层级，系统进入下一轮迭代。差值驱动定律为构建竞技体育“内生式”数智化训练，提供了可运算的数学引擎。

[关键词]差值驱动定律；ADPV 闭环；复合映射函数；内生式数智化；数理模型
DOI：10.33142/jscs.v6i5.20673　　中图分类号：G811　　文献标识码：A

Difference Driven: A Mathematical Model for Competitive Sports Digital Intelligence Training

CHEN Yan
Department of Military and Political Fundamentals, Beijing Campus of Army Services University, Beijing, 100072, China

Abstract: Competitive sports training has long lacked computable mathematical models. The current mainstream "plug-in" digitalization path, due to the lack of a unified measurement framework, can only describe the training state and cannot drive training decisions. The study proposes using a five dimensional physical fitness unit measurement framework as a unified foundation, comparing the champion benchmark with the current state of the athlete, normalizing them into isomorphic target vectors and state vectors, establishing a difference driven equation, clarifying the three basic constraints and implementation paths of the composite mapping function, and designing an ADPV closed-loop (Assessment - Diagnosis - Prescription - Verification) self evolution mechanism. Research has shown that the essence of specialized skill training is the process of continuous convergence of elementary differences from negative to zero. When the difference value returns to zero, the target state is automatically updated to a higher level, and the system enters the next iteration. The difference driven law provides a computable mathematical engine for constructing "endogenous" digital training in competitive sports.

Keywords: difference driven law; ADPV closed loop; composite mapping function; endogenous digitization; mathematical model

引言

当前，竞技体育“外挂式”数智化训练体系，因缺少可运算的数理模型，数据采集与训练决策之间存在数据断层。训练体系中的状态数据和训练处方之间，没有确定的数学映射关系。数智体系只能描述训练状态，无法驱动训练决策[1]。

系统科学进入体育研究的讨论已持续四十余年，相关研究早已指出系统论、信息论、控制论进入体育科技领域的必然性[2]。近年有研究进一步明确了传统范式应从“还原论”向“复杂系统理论”跃迁的方向，指出静态分解与线性叠加无法解释运动表现的非线性特征[3]。然而，此类讨论多停留在理论呼吁与框架设想层面，未能建立可运算的中观尺度模型，体技耦合的生成机理依然模糊。

任何专项技能动作，均可解构为力量、速度、耐力、柔韧和灵敏体能要素的组合[4]。体能基元理论将五项体能要素界定为构成竞技能力的最小功能单元，即体能基元[5]。在体能基元度量框架中，专项技能动作由体能基元按照不同权重比例、时空序列非线性耦合而成，可由体能基元数据表征。体-技耦合的数学化表达，为训练数据提供可运算的基座。以此为基础，建立差值导航机制，将冠军基准与运动员当前状态，归一化为可同构运算的目标向量与状态向量，以二者之差作为训练决策的唯一导航依据，训练

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

决策模式从经验判断转向数据导航。

1 内生式数智化训练体系的构成与条件

“内生式”数智化训练体系，应由三个核心模块构成：数据基座、运算引擎、闭环迭代。

1.1 数据基座

数据基座解决数据来源和量纲统一。训练现场部署多种传感设备，采集力量、速度、耐力等多维数据。这些异源数据必须纳入统一的度量框架，才能消除量纲差异，实现同构运算。统一度量让当前状态与目标状态的差值，可被精确计算，为后续训练导航提供基准。

1.2 运算引擎

运算引擎的功能是建立数据-决策映射关系。状态数据进入系统后，需要明确的数学映射关系，把当前状态翻译为训练处方。这是数智化系统的核心运算模块。引擎的核心功能，是把状态差距翻译为训练处方，实现差值到决策的自动导航。没有引擎，数据再多也只能停留在描述层面。

1.3 闭环迭代

决策持续优化是迭代模块的功能。针对专项技能训练的持续过程，系统必须能够自我迭代：一轮干预结束后，自动进入下一轮评估和诊断，且不依赖人工重置。训练计划应当根据上轮效果自动调整，而不是周期结束之后才进行的人工复盘。

上述三个模块要有效运转，必须同时具备四项基本条件。第一，统一量纲：所有数据必须在同一语义框架内描述。第二，标准化处理：原始数据必须经过归一化清洗，转化为算法可识别的输入。第三，数学映射：状态与处方之间必须存在确定的函数关系。第四，自进化机制：系统必须根据上轮效果自动调整，形成持续收敛。

2 外挂式数智化训练的结构性缺陷

“外挂式”路径在三个核心模块上，均存在结构性缺失，系统架构存在先天缺陷（见表 1）。

表 1 外挂式路径的模块缺失对照

体系模块	应具备条件	外挂式现状	直接后果
数据基座	统一度量框架，异源同构	测力台输出牛顿，GPS 输出米/秒，心率带输出次/分，血乳酸仪输出毫摩尔每升，量纲不一，互不兼容	数据不可比、差值不可算，训练无导航基准
运算引擎	状态→处方的数学映射	止于报表生成与趋势分析，无映射函数	差值无法翻译为处方，系统无数据导航能力
闭环迭代	自评估、自诊断、自进化	计划一次性制定，周期结束人工复盘	训练属于经验试错

系统结构的先天性缺失，形成“外挂式”路径的投入产出悖论：当前路径只做“加法”（设备堆砌、增加传感器），不做“乘法”（数据融合与决策生成）。海量训练数据随着投入的不断增加，反而加剧了数据孤岛问题，同时提高了后期治理成本，训练效益随投入的增加，不增反降。

3 内生式数智化训练的体系架构

3.1 基元度量框架

力量、速度等体能基元确立五维基元度量框架，构成五个维度的基本运算空间。所有训练数据均映射到该框架中，转化为基元相对值。

目标状态向量 Xi 以专项冠军或同层级标杆群体的实测基元数据为基准，归一化为 Xi=100。当前状态向量 Ai(t) 是运动员实测基元数据相对于该基准的百分制得分。差值向量 Δ_i(t)=Ai(t)-Xi，负值直接表征该基元维度的缺口百分比。

理想状态与当前状态被同时映射为体能基元数据，基元差值成为可见、可算、可导航的训练指令（见图 1）。

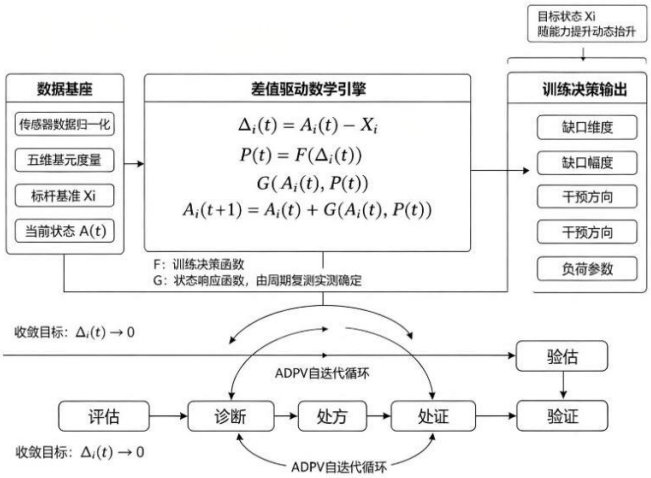


图 1 差值定律与 ADPV 闭环的关系

3.2 量纲统一

训练体系中的所有异源数据，经基元度量框架映射后，均以基元相对值形式在五维空间内流动。比如力量不再表现为牛顿，而是相对于冠军基准的归一化数值。五种维度的异源训练数据，在同一语义框架内实现同构。

3.3 三层技术架构

“内生式”数智化训练体系，由三层架构支撑，完成从原始监测数据到训练处方的完整链路。

基座映射层作为数据入口，接收外源传感采集的原始体能数据，依托五维基元度量框架完成归一转换，构建运动员当前状态向量 Ai(t)，并导入专项标杆目标向量 Xi。

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

差值诊断层完成状态对标，求解差值向量Δi(t)=Ai(t)-Xi，量化各基元维度的缺口方向与幅度。

处方输出层依托复合映射函数，以基元差值为输入，生成对应的训练干预方案，形成从原始监测数据到训练处方的完整链路[6]。

三层顺序衔接，基座映射层只管数据归一与对标，差值诊断层只管算缺口，处方输出层只管生成方案。权重配比与动作耦合不在此三层处理，由后续专项固化环节完成。

3.4 基础体能的专项固化：动作模式的中介作用

体能基元是支撑技能生成的通用原料，如同原油，原料本身尚不能直接支撑专项技能的高效输出。经由专项动作模式对应的耦合配方，也就是特定权重配比与时序序列的耦合结构，体能基元原料完成“炼化”，转化为适配项目需求的专项体能；专项体能作为成型燃料，支撑专项技能稳定、高效生成。

专项动作模式对应的耦合配方，可基于同项目标杆样本完成初始标定，作为数字化转化的初始参数[7]，后续再依据运动员技能表现持续微调优化。差值驱动机制首要补齐基础体能维度的能力缺口，为后续专项体能炼化提供充足原料[8]。

以短跑为例：力量与速度基元在起跑动作模式中按标定配比、特定时序耦合，形成专项起跑体能；该专项体能直接支撑起跑技能的高效输出。基础体能训练提供优质原料，动作模式决定原料如何组装成专项体能，专项体能决定技能生成的效率与质量[9]。差值驱动不仅补齐基础体能短板，更通过动作模式的耦合结构，保障基础体能向专项体能的有效转化。整个转化链条由差值导航：差值标定短板方向，处方响应差值指令，验证校验差值收敛。训练全程由数据导航，不再依赖经验决策。

4 差值驱动定律

差值驱动定律是系统的数学引擎，可把当前状态与目标状态的差距转化为训练决策。

4.1 差值向量

差值向量定义为当前状态与目标状态的差。Δi(t)为 t 时刻第 i 个基元的差值。负值代表该基元当前值低于冠军基准，正值代表高于冠军基准。差值向量的每个分量精确标示该维度的缺口方向和幅度。

4.2 差值驱动定律

训练系统的迭代演化遵循差值驱动定律，构成如下闭环方程组：

$$\Delta i(t)=Ai(t)-Xi \quad (1)$$

$$P(t)=F(\Delta i(t)) \quad (2)$$

$$Ai(t+1)=Ai(t)+G(Ai(t),P(t)) \quad (3)$$

式中：Ai(t)为 t 时刻第 i 个基元的当前状态；Xi 为目标向量，各维取值以同专项冠军或同层级标杆群体的实测基元数据为参照基准；Δi(t)为基元差值向量，负值分量表示对应基元低于目标水平；P(t)为第 t 周期训练处方；F 为训练决策函数，按差值维度与幅度确定干预方案，其具体形式因专项而异；G 为训练干预的状态响应，其具体形式不预先设定，由负荷施加后的周期复测实测确定。

用系统模型描述训练过程并寻找其数理规律，是运动科学长期探索的方向。Calvert 等人早在 1976 年就提出，运动表现与“体能-疲劳”差值函数密切相关[10]。差值驱动定律在此基础上进一步将“差值”从预测变量推进为决策变量：不仅用差值解释表现波动，更用差值生成训练处方。

三式构成一个控制回路：式（1）以目标与现状之差生成训练误差信号，式（2）由误差信号经决策函数输出训练处方，式（3）由处方驱动机体状态转移并进入下一周期。决策环节（F）可计算，响应环节（G）须实测，二者的区分是方程组可操作的前提。该方程组属于概念逻辑模型，用于刻画系统迭代运行机理，并非面向高精度数值仿真的工程模型。

4.3 基元差值的定向收敛

差值驱动把训练转化为数据导航过程，三个操作要点将收敛过程可操作化：

差什么。Δi(t)的负分量直接标定缺口维度。哪个基元低于冠军基准，哪个维度就是短板。

差多少。|Δi(t)|精确给出缺口幅度。不是模糊的力量不够，而是力量基元低于冠军基准 40 个百分点。

怎么补。F 函数把差值翻译成训练处方：练什么动作、上多大负荷、持续多长时间。处方不是经验拍脑袋，是差值的数学输出。

专项技能训练的数学本质：不是周期模板下的经验试错，而是基元差值由负向零持续收敛的过程。

$$\Delta i(t)\rightarrow 0$$

当 Δi(t)=0，该基元当前状态达到冠军基准。五维差值全部归零，运动员体能结构与专项标杆完全同构。

4.4 F 函数的实现方式与三项基本约束

F 的具体实现基于专项训练数据库，通过实测基元向量与技能表现变量的关联分析进行拟合标定。不同专项中，F 的具体形式由该专项的动力学特征决定[9]（见表 2）。

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

表 2　F 函数三项基本约束

约束名称	数学/逻辑内涵	训练学意义
定向性	若 Δ_i(t)<0，该基元维度干预负荷只增不减	缺什么补什么，差值指向哪里，干预就投向哪里
边界约束	存在生理上限 A_max，使 A_i(t)≤A_max	训练负荷不超人体耐受阈值，防止过度训练致伤
非对称耦合	基元间干预响应不满足交换律	力量→速度与速度→力量的交叉效应不同，耦合方向不可互换

单周期近似下，F 可写为线性形式：

$$Ai(t+1)=Ai(t)+\alpha\cdot\Delta i(t),\alpha\in(0,1] \quad (4)$$

α 为训练响应系数，反映运动员单周期内对训练刺激的能力提升响应。α 取值决定每轮训练缩小的差距。α 越大，单轮进步幅度越大，但需兼顾生理恢复边界；α 越小，追赶越保守，但给运动员留出充分适应空间。

5 ADPV 闭环：差值导航的工程化实现

ADPV 闭环将差值驱动定律，转化为可运转的导航流程：评估定坐标、诊断算偏差、处方给航向、验证看落点。

5.1 四环节运转

评估阶段采集当前基元状态向量 A_i(t)。诊断阶段计算差值向量 Δi(t)=Ai(t)-Xi。处方阶段由 F 函数输出训练干预方案。验证阶段干预后复测，获得 Ai(t+1)，触发下一轮迭代。

四个环节形成闭合循环。上一轮的验证结果是下一轮的评估起点。系统无需外部指令即可自动持续运转。这种通过反馈实现目标导向调控的机制，其理论源头可追溯至维纳的控制论[11]。控制论揭示，系统通过测量输出与目标的偏差并据此调整输入，即可实现无需外部干预的自动收敛。ADPV 闭环将控制原理工程化，把反馈调控的逻辑运用于基元差值的计算与处方的迭代生成。

5.2 目标状态更新

差值归零不等于系统停止。训练目标不是固定靶，而是随能力增长不断提高的动态标杆。当 Δi(t)→0，目标状态自动更新至更高层级的标杆数据，系统进入下一轮迭代。从省级冠军基准更新为全国冠军基准，从全国冠军基准更新为国际冠军基准。根据设定的训练目标，系统无需外部重置，即可进入更高一级训练目标，差值持续收敛。

6 两种数智转型路径的数理对比

外挂式路径与差值驱动路径在数理逻辑上有本质区别，对比结果如表 3 所示。

表 3　外挂式与差值驱动路径的数理对比

对比维度	外挂式路径	差值驱动路径
数据基座	无统一度量框架，异源异构	五维基元度量框架，全量同构
量纲处理	原始量纲混杂，不可运算	相对值归一，统一语义框架
数学引擎	无，止于报表描述	差值驱动定律 A_i(t+1)=F(Δ_t)
闭环机制	无，计划一次性制定	ADPV 四环节自动迭代
自进化	无，需人工重新制定周期	目标状态动态更新，持续收敛

外挂式路径缺少四个基本条件中的每一个。差值驱动路径在四个条件上都有对应的解决方案。

7 数值推演

以符号化推演演示差值驱动迭代的收敛逻辑与 F 函数的定向性约束。所有数值为示意性设定，不代入真实运动员数据（见表 4）。

表 4　差值驱动迭代推演

推演环节	数学表达/数值	说明
目标向量	X=(100,100,100,100,100)	五维基元归一化基准
运动员初始状态	A(0)=(60,50,80,70,65)	体能基元当前得分
初始差值向量	Δ(0)=(-40,-50,-20,-30,-35)	各维度缺口百分比
F 函数诊断	速度基元缺口最大(-50)	优先干预最大缺口维度
干预参数	α=0.1	收敛系数
第一轮状态更新	A(1)=(60,55,80,70,65)	仅速度维度提升 5 个单位
迭代趋势	Δ(n)→0	多轮迭代后各维度差值绝对值逐步衰减

第二轮重新计算 Δ^(1)，F 根据新的最大缺口调整干预方向。单周期线性近似下，收敛速度由 α 控制，干预方向始终指向当前最大缺口所在维度。

8 结论与展望

建立了以差值导航为主线的“内生式”数智化训练体系。基元度量框架提供统一坐标，精确计算当前状态与冠军基准差值；差值驱动定律提供导航引擎，把状态差距翻译为训练处方；ADPV 闭环提供自动舵，持续纠偏直至收敛。三者共同推动决策模式从经验判断转向数据导航[12]。与外挂式路径相比，差值驱动在数据基座、量纲处理、数学引擎、闭环机制、自进化五个维度，具备结构性优势。

存在两点局限：F 函数具体实现基于专项数据库拟合标定，不同专项标定方法待建；模型为纯数理推演，尚缺大规模实证验证。后续将围绕 F 函数专项标定、ADPV 工程化实现、多专项收敛阈值展开。

[参考文献]

[1]钟亚平,吴忠忠,陈小平.数据驱动精准训练:理论内涵、实现框架与推进路径[J].体育科学,2021,41(12):48-61.

[2]袁旦,赵玉亭.再论系统论、信息论、控制论进入体育科学技术领域的必然性——带动体育科学技术发展的前沿

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

科学[J].体育科学,1984(4):79-86.
[3]赵刚,周静静.从还原论到复杂系统理论：运动表现分析的理论跃迁、方法重构与实践路径[J].体育科学,2026,46(2):43-54.
[4]田麦久.运动训练学[M].2 版.北京:高等教育出版社,2000.
[5]陈艳,纪鹏.关于“体能基元”理论与数智化训练体系的思考[J].长缨,2026(1):46-48.
[6]陶飞,刘蔚然,张萌,等.数字孪生五维模型及十大领域应用[J].计算机集成制造系统,2019,25(1):1-18.
[7]田麦久,麻雪田,黄新河,等.项群训练理论及其应用[J].体育科学,1990,10(6):29-35,94.
[8]刘大庆.运动员竞技能力非衡结构补偿理论[J].体育科学,2000,20(1):43-46.
[9]王瑞元,苏全生.运动生理学[M].北京:人民体育出版社,2012.
[10]Calvert T W,Banister E W,Savage M V,et al.A systems model of the effects of training on physical performance[J].IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics,1976,SMC-6(2):94-102.
[11]维纳.控制论[M].刘佳,译.重庆:重庆出版社,2023.
[12]刘伟.人机智能融合:人工智能发展的未来方向[J].人民论坛 学术前沿,2017(20):32-38.
作者简介：陈艳（1974—），女，汉族，四川泸州人，硕士，陆军兵种大学，研究方向：体能训练。

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.