doi: 10.7690/bgzdh.2026.10.016

基于非线性 SEM 模型的防空导弹武器系统作战能力评估方法

张　鹏，冯　柯，佘劲松
（陆军工程大学野战工程学院，南京 210000）

摘要：为解决防空导弹武器系统作战能力耦合交互导致效能非线性涌现、难以评估以及度量的问题，提出武器系统作战能力涌现性度量模型。以复杂系统视角，从侦察探测能力、指挥控制能力、保障生存能力和拦截打击能力 4 方面分析系统内各子系统的内在联系，构建度量非线性涌现的结构方程建模（structural equation modeling，SEM）作战能力效能评估解析模型和模型参数结构方程，解决复杂系统评估模型准确度低、参数指标选择难度大、过度依赖主观经验等的问题。以防空导弹武器系统反巡航导弹作战为例，通过利用结构方程模型分析软件（LISREL9.30）得到参数估计值及非线性模型下的估值。验证结果表明，非线性 SEM 模型具备有效性，可为防空导弹武器系统作战能力评估和作战方案选择提供辅助决策支持。

关键词：防空导弹；作战效能和作战能力；结构方程模型；非线性
中图分类号：TJ760.1　　**文献标志码：**A

A Method for Evaluating the Combat Capability of Air Defense Missile Weapon Systems Based on Nonlinear SEM Models

Zhang Peng, Feng Ke, She Jinsong
(*College of Field Operations Engineering*, *Army Engineering University of PLA*, *Nanjing* 210000, *China*)

Abstract: In order to solve the problem of non-linear effectiveness emergence, difficulty in evaluation and measurement caused by the coupling interaction of combat capabilities of air defense missile weapon systems, a measurement model for the emergence of combat capabilities of weapon systems is proposed. From the perspective of complex systems, analyze the inherent connections between various subsystems within the system from four aspects: reconnaissance and detection capabilities, command and control capabilities, survival capabilities, and interception and strike capabilities. Construct a structural equation modeling (SEM) operational capability effectiveness evaluation analytical model and model parameter structural equation to measure nonlinear emergence, and solve problems such as low accuracy of complex system evaluation models, difficulty in selecting parameter indicators, and excessive reliance on subjective experience. Taking the anti cruise missile combat of the anti-aircraft missile weapon system as an example, parameter estimates and estimates under nonlinear models were obtained by using structural equation modeling analysis software (LISREL9.30). The verification results indicate that the nonlinear SEM model is effective and can provide auxiliary decision support for evaluating the combat capability and selecting combat plans of air defense missile weapon systems.

Keywords: air defense missile; combat effectiveness and combat capability; structural equation modeling; nonlinear

0　引言

随着防空作战需要发展而形成的地面防空武器，通过实施远程精确打击空中飞行目标，逐步成为防空作战的重要支撑。防空导弹武器系统作战能力评估[1]已经成为评判防空作战胜负的关键依据。防空导弹武器系统在完成使命任务的对抗中通过系统之间动态交互涌现出的作战能力，是随着体系的演化而不断地发展变化的。如何有效解决复杂武器系统涌现性、动态性和非线性等复杂特性，准确评估防空导弹武器系统作战能力，充分发挥防空体系最大作战能力已经成为一项愈发重要的任务。

现有的防空导弹武器系统作战能力评估方法中，文献[2−3]基于可用性、可靠性、能力（availability dependability capability，ADC）效能评估模型建立一种防空导弹作战效能定量评估模型进行评估仿真；文献[4]在防空作战效能评估指标体系的模型中应用 BP 神经网络进行作战效能评估；文献[5]通过将主成分分析法（principal component analysis，PCA）对原始数据进行降维和去相关性处理后应用到 BP 神经网络中验证模型在作战效能评估中的有效性；文献[6]改进防空导弹武器系统基于目标有限等待和差错服务的模型，运用排队论基本原理进行作战效能评估；文献[7]结合三角模糊数的层次分析法和信息熵法对各指标进行赋权，运用灰色关联理想解

收稿日期：2025−02−12；**修回日期：**2025−03−25
第一作者：张　鹏（1993—），男，山东人，硕士。

法(technique for order preference by similarity to an ideal solution，TOPSIS)的组合评估法评价防空导弹作战能力的优劣性；文献[8]运用德尔菲法、AHP 法、指数法等评估方法，构建了防空导弹武器系统作战能力指标体系进行作战能力评估。上述文献建立的防空导弹武器系统作战能力体系均采用传统的树状结构，指标之间具有独立性，但事实上不同指标之间的关联性异常紧密，难以解决非线性的复杂防空导弹武器系统的适用性问题，无法满足实际分析和现实研究需要。

笔者从系统的角度出发，依据内在联系建立反映体系各项作战能力之间关系的网状结构的作战能力指标体系[9]。采用 SPSS STATISTICS 软件与 LISREL 软件进行数据分析，依托结构方程模型(SEM)实现防空导弹武器系统作战能力评估和最优作战方案的选择。

1　防空导弹武器系统作战能力与作战效能

防空导弹武器系统在具有代表性的一系列作战任务中体现出的作战效能，能够反映其完成使命任务的“本领”。可通过在作战任务中获得的作战效能来综合、提炼出防空导弹武器系统的作战能力，建立作战效能与作战能力指标之间的定量关系模型。

1.1　作战能力指标解析

防空导弹武器系统结构复杂、应用环境多变，存在系统的构成、型号和采用的技术手段不相同，作战过程存在一定的差异[10]，但防空导弹武器系统通常是集侦察预警、火力拦截、指挥控制、网络通信、综合保障等系统于一体的复杂体系，各系统组成相互联系、相互作用的具有特定功能的有机整体。在此前提下，防空导弹武器系统的作战能力主要有侦察探测能力、指挥控制能力、拦截打击能力和保障生存能力。

整个防空导弹武器系统的作战流程，保卫目标的防护能力是最核心，但存在指标获取模糊、评估难度大的问题。而拦截打击能力可间接体现该体系的防护能力，因此将拦截打击能力作为防空导弹武器系统作战能力评估和优选作战方案的最终指标和重要依据。

1.2　防空导弹武器系统指标体系的构建

明确作战效能与作战能力指标之间的关联，是构建定量关系模型的重要基础和前提[11]。图 1 为作战效能与作战能力指标的定性关系。

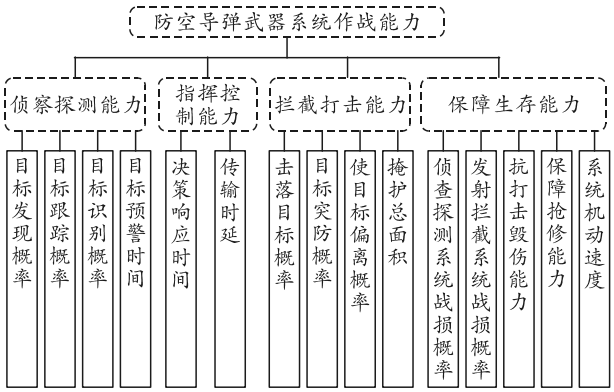

图 1　作战效能与作战能力指标的定性关系

根据防空导弹武器系统作战能力指标体系中涉及的主要作战能力分别建立作战效能与作战能力指标的定性关系。其中实线框表示作战效能指标，虚线矩形框表示作战能力指标。

1) 侦察探测能力与作战效能指标的定性关系。由于防空导弹武器系统探测发现目标的步骤主要包括发现、识别、跟踪目标[12]，因此将目标发现概率、目标跟踪概率、目标识别概率以及目标预警时间等作为反映侦察探测能力的作战效能指标。

2) 指挥控制能力与作战效能指标的定性关系。为有效和及时拦截来袭目标，需要指挥控制系统有较快的响应速度和传输速度；因此，采用决策响应时间、传输时延[13]等作为反映指挥控制能力的作战效能指标。

3) 拦截打击能力与作战效能指标的定性关系。作为体系中的核心指标，将击落目标概率、目标突防概率、使目标偏离概率以及掩护总面积等[13]作为反映拦截打击能力的作战效能指标。

4) 保障生存能力与作战效能指标的定性关系。防空导弹武器系统中的各种系统生存能力可以通过系统的战损情况来反映，同时为了提高系统的生存能力，需具备一定机动性；因此，将侦察探测系统战损概率、发射拦截系统战损概率、抗打击毁伤能力、保障抢修能力以及系统机动速度作为反映保障生存能力的作战效能指标。

各系统作战能力相互关联并产生影响，这种关联性有单向的，也有双向的。单向关系可以通过体系的作战流程体现出来。如发现搜索能力单向影响跟踪识别能力，后者又单向影响对目标的拦截打击能力，同时体系的指挥控制能力也单向影响着拦截打击能力。双向关系主要体现体系的拦截打击能力与保障生存能力之间，如拦截打击的成功提升了保

障生存的概率，而保障生存能力的提升对拦截打击失败后的二次打击有着至关重要的影响。因此在评估体系的作战能力时，由于作战能力之间的耦合交互对各项作战能力值的影响，导致很难用传统的树状结构指标体系进行描述。建立网状效能评估模型时，如图 2 所示，拦截打击能力直接作用于目标，受到侦察探测能力、指挥控制能力和保障生存能力的影响，拦截打击能力、保障生存能力之间又存在相互影响、制约，耦合交互的关系。

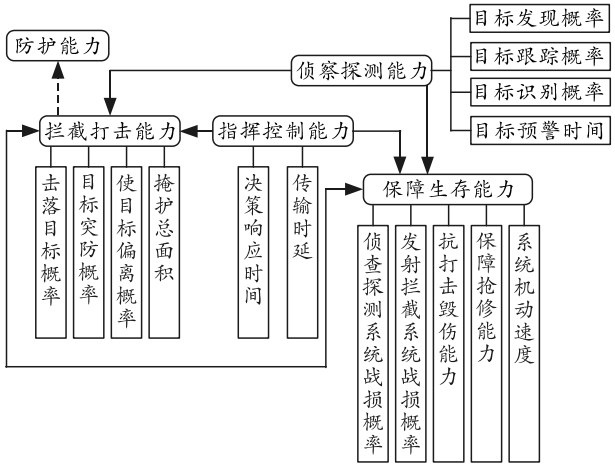

图 2 防空导弹武器系统作战能力评估指标体系

2 基于非线性 SEM 的作战能力评估模型

2.1 SEM 方法基本原理

2.1.1 SEM 方法的理论依据

SEM 也称结构方程建模或结构方程分析。当某些潜变量无法直接观测，但可以由一个或几个显变量表征时，可以通过对显变量的测量来分析潜变量以及潜变量之间的关系[14]。

2.1.2 SEM 变量的分类和表示方法

SEM 变量有 2 种分类：1) 显变量与潜变量；2) 内生变量与外生变量[15]。

显变量是指可以直接观测或度量的变量，比如作战效能指标。潜变量是指不能被直接观测的因素或特质，可以是某种理论构思、研究假设等，但可以通过显变量体现和测量，比如需要评估等系统作战能力指标[16-17]。

内生变量是指在一个假定的因果关系模型中，受其他变量影响或被其他变量说明的变量，比如防空导弹武器系统作战能力评估指标体系中的拦截打击能力。外生变量是指只影响其他变量而不受其他变量影响的变量，比如防空导弹武器系统作战能力评估指标体系中的侦察探测能力。

2.2 防空导弹武器系统作战能力涌现的评估模型

作战能力是作战效能的基础，而作战效能是作战能力外在发挥的表现[18]，因此通过分析作战效能评估数据，将定性关系转换为定量关系模型，从而对作战能力进行评估。

2.2.1 潜变量和显变量的确定

构建包含侦察探测能力、指挥控制能力、拦截打击能力和保障生存能力 4 项指标的非线性 SEM 的防空导弹武器系统作战能力评估模型。其中侦察探测能力和指挥控制能力决定于系统自身指标，设为外生变量。保障生存能力和拦截打击能力除自身影响外，受外生变量的影响，故设为内生变量，因此变量具体如表 1 所示。

表 1 防空导弹武器系统变量对应

变量	潜变量(作战能力指标)	显变量(作战效能指标)
外生变量	侦察探测能力 E_1	目标发现概率 x_1
		目标识别概率 x_2
		目标跟踪概率 x_3
		目标预警时间 x_4
	指挥控制能力 E_2	决策响应时间 y_1
		传输时延 y_2
内生变量	保障生存能力 N_1	侦察探测系统的战损概率 z_1
		发射拦截系统的战损概率 z_2
		抗打击毁伤能力 z_3
		保障抢修能力 z_4
		系统的机动速度 z_5
	拦截打击能力 N_2	击落目标概率 n_1
		目标突防概率 n_2
		使目标偏离概率 n_3
		掩护总面积 n_4

2.2.2 非线性 SEM 度量模型的建立

由于防空导弹各作战能力之间耦合关联交互，其包含的作战效能往往呈现整体与部分之间不相同的特征，而不是各分系统作战能力的简单线性叠加[19]。依据防空导弹武器系统作战能力评估指标体系所示，拦截打击能力直接作用于目标，受到侦察探测能力、指挥控制能力和保障生存能力的影响，拦截打击能力、保障生存能力之间又存在相互影响、制约，耦合交互的关系，建立非线性 SEM 度量模型。其中，E_1 表示侦察探测能力，E_2 表示指挥控制能力，N_1 表示保障生存能力，N_2 表示拦截打击能力。采用交叉乘积的方法增加非线性项 E_1*E_2、N_1*N_2，体现系统的耦合交互作用。

建立防空导弹武器系统作战能力评估的非线性 SEM 模型，如图 3 所示。

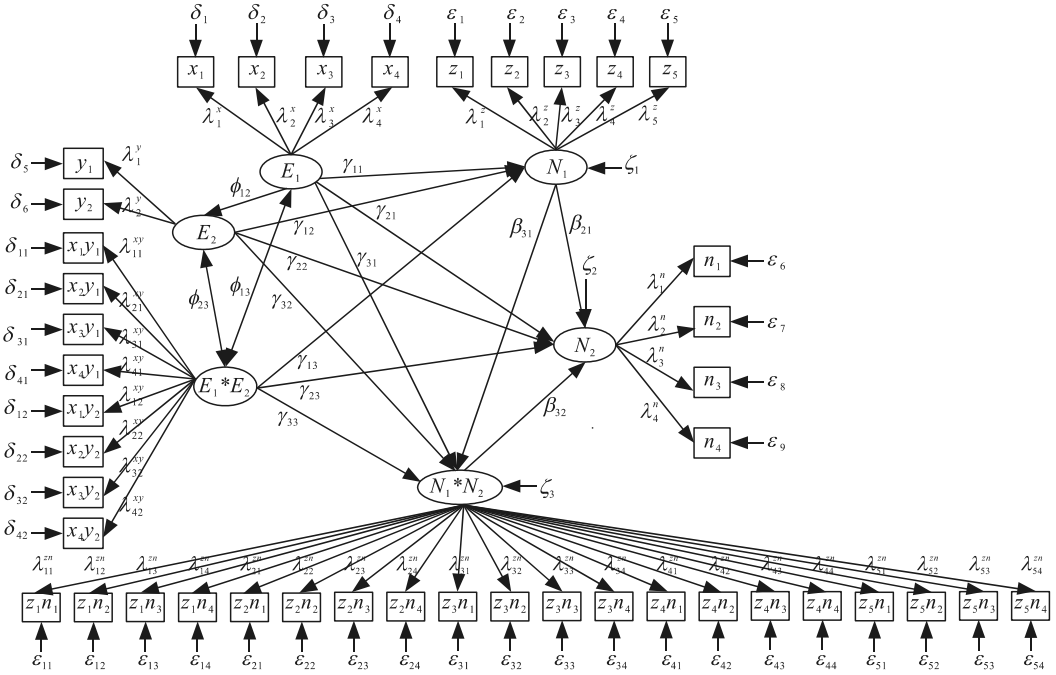

图 3　防空导弹武器系统 SEM 结构模型

模型的测量方程为：

$$X(Y)=\lambda_{x/y}E+\delta\text{；}\tag{1}$$

$$\begin{bmatrix}x_1\\ \vdots\\ x_4\\ y_1\\ y_2\\ x_1y_1\\ \vdots\\ x_4y_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\lambda_1^x & 0 & 0\\ \vdots & 0 & 0\\ \lambda_4^x & 0 & 0\\ 0 & \lambda_1^y & 0\\ 0 & \lambda_2^y & 0\\ 0 & 0 & \lambda_{11}^{xy}\\ 0 & 0 & \vdots\\ 0 & 0 & \lambda_{42}^{xy}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}E_1\\ E_2\\ E_1*E_2\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\delta_1\\ \vdots\\ \delta_4\\ \delta_5\\ \delta_6\\ \delta_{11}\\ \vdots\\ \delta_{42}\end{bmatrix}\text{；}\tag{2}$$

$$Z(N)=\lambda_{z/n}N+\varepsilon\text{；}\tag{3}$$

$$\begin{bmatrix}z_1\\ \vdots\\ z_5\\ n_1\\ \vdots\\ n_4\\ z_1n_1\\ \vdots\\ z_5n_4\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\lambda_1^z & 0 & 0\\ \vdots & 0 & 0\\ \lambda_5^z & 0 & 0\\ 0 & \lambda_1^n & 0\\ 0 & \vdots & 0\\ 0 & \lambda_4^n & 0\\ 0 & 0 & \lambda_{11}^{zn}\\ 0 & 0 & \vdots\\ 0 & 0 & \lambda_{54}^{zn}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}N_1\\ N_2\\ N_1*N_2\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\varepsilon_1\\ \vdots\\ \varepsilon_5\\ \varepsilon_6\\ \vdots\\ \varepsilon_9\\ \varepsilon_{11}\\ \vdots\\ \varepsilon_{54}\end{bmatrix}\text{。}\tag{4}$$

模型的结构方程为：

$$N_1=\gamma_{11}E_1+\gamma_{12}E_2+\gamma_{13}E_1*E_2+\beta_{31}N_1*N_2+\zeta_1\text{；}\tag{5}$$

$$N_1*N_2=\gamma_{31}E_1+\gamma_{32}E_2+\gamma_{33}E_1*E_2+\beta_{31}N_1+\zeta_3\text{；}\tag{6}$$

$$N_2=\gamma_{21}E_1+\gamma_{22}E_2+\gamma_{23}E_1*E_2+\beta_{21}N_1+\beta_{32}N_1*N_2+\zeta_2\text{。}\tag{7}$$

通过构建的防空导弹武器系统测量方程模型，得到指标之间的定量关系模型[18]，即防空导弹武器系统作战能力评估模型。利用 LISREL9.30 软件进行方程未知数的估计，获得指标之间的关联关系。

1) 侦察探测能力评估模型：

$$E_1=\frac{x_1-\delta_1}{4\lambda_1^x}+\frac{x_2-\delta_2}{4\lambda_2^x}+\frac{x_3-\delta_3}{4\lambda_3^x}+\frac{x_4-\delta_4}{4\lambda_4^x}\text{；}\tag{8}$$

2) 指挥控制能力评估模型：

$$E_2=\frac{y_1-\delta_5}{2\lambda_1^y}+\frac{y_2-\delta_6}{2\lambda_2^y}\text{；}\tag{9}$$

3) 侦察探测能力和指挥控制交叉能力的评估模型为：

$$E_1*E_2=\frac{x_1y_1-\delta_{11}}{8\lambda_{11}^{xy}}+\frac{x_2y_1-\delta_{21}}{8\lambda_{21}^{xy}}+\frac{x_3y_1-\delta_{31}}{8\lambda_{31}^{xy}}+\frac{x_4y_1-\delta_{41}}{8\lambda_{41}^{xy}}+\frac{x_1y_2-\delta_{12}}{8\lambda_{12}^{xy}}+\frac{x_2y_2-\delta_{22}}{8\lambda_{22}^{xy}}+\frac{x_3y_2-\delta_{32}}{8\lambda_{32}^{xy}}+\frac{x_4y_2-\delta_{42}}{8\lambda_{42}^{xy}}\text{；}\tag{10}$$

4) 保障生存能力评估模型：

$$N_1=\frac{z_1-\varepsilon_1}{5\lambda_1^z}+\frac{z_2-\varepsilon_2}{5\lambda_2^z}+\frac{z_3-\varepsilon_3}{5\lambda_3^z}+\frac{z_4-\varepsilon_4}{5\lambda_4^z}+\frac{z_5-\varepsilon_5}{5\lambda_5^z}\text{；}\tag{11}$$

5) 拦截打击能力和保障生存能力交叉能力的评估模型为：

$$N_1 * N_2 = \frac{z_1 n_1 - \varepsilon_{11}}{20\lambda_{11}^{zn}} + \frac{z_1 n_2 - \varepsilon_{12}}{20\lambda_{12}^{zn}} + \frac{z_1 n_3 - \varepsilon_{13}}{20\lambda_{13}^{zn}} + \frac{z_1 n_4 - \varepsilon_{14}}{20\lambda_{14}^{zn}} + \frac{z_2 n_1 - \varepsilon_{21}}{20\lambda_{21}^{zn}} + \frac{z_2 n_2 - \varepsilon_{22}}{20\lambda_{22}^{zn}} + \frac{z_2 n_3 - \varepsilon_{23}}{20\lambda_{23}^{zn}} + \frac{z_2 n_4 - \varepsilon_{24}}{20\lambda_{24}^{zn}} + \frac{z_3 n_1 - \varepsilon_{31}}{20\lambda_{31}^{zn}} + \frac{z_3 n_2 - \varepsilon_{32}}{20\lambda_{32}^{zn}} + \frac{z_3 n_3 - \varepsilon_{33}}{20\lambda_{33}^{zn}} + \frac{z_3 n_4 - \varepsilon_{34}}{20\lambda_{34}^{zn}} + \frac{z_4 n_1 - \varepsilon_{41}}{20\lambda_{41}^{zn}} + \frac{z_4 n_2 - \varepsilon_{42}}{20\lambda_{42}^{zn}} + \frac{z_4 n_3 - \varepsilon_{43}}{20\lambda_{43}^{zn}} + \frac{z_4 n_4 - \varepsilon_{44}}{20\lambda_{44}^{zn}} + \frac{z_5 n_1 - \varepsilon_{51}}{20\lambda_{51}^{zn}} + \frac{z_5 n_2 - \varepsilon_{52}}{20\lambda_{52}^{zn}} + \frac{z_5 n_3 - \varepsilon_{53}}{20\lambda_{53}^{zn}} + \frac{z_5 n_4 - \varepsilon_{54}}{20\lambda_{54}^{zn}}。 \tag{12}$$

6) 拦截打击能力评估模型：

$$N_2 = \gamma_{21} E_1 + \gamma_{22} E_2 + \gamma_{23} E_1 * E_2 + \beta_{21} N_1 + \beta_{32} N_1 * N_2 + \zeta_2。 \tag{13}$$

作战能力评估问题将转化为非线性 SEM 模型中的参数估计问题。

3 实例验证

3.1 想定描述

蓝方(空袭方)情况：蓝方发射巡航导弹对红方某方圆数平方千米的重要区域进行空袭。发射单批次共 54 枚巡航导弹，来袭方向为重要区域的某一方向。红方(防御方)情况：红方防空部队在蓝方来袭巡航导弹方向部署防空导弹武器系统进行抗击，保护重要区域。

3.2 方案设计

红方部署的防空导弹武器系统通过发现、识别并跟踪目标后，利用数据链或通信链路向指挥控制系统传输目标信息，指挥控制系统进行信息处理、态势评估，并生成作战命令，打击拦截系统通过制导雷达捕捉的目标信息对打击目标进行跟踪锁定，当作战命令下达后进行拦截，最后将拦截结果上传至指挥控制系统。反巡航导弹方案如表 2 所示。

表 2 反巡航导弹方案要素编号

组成要素	组成方式	编 号
侦察探测系统	2 架 *X* 型战术预警雷达	*A*
	1 架 *X* 型战术预警雷达，1 架 *Y* 型预警机	*B*
	2 架 *Y* 型预警机	*C*
系统基本部署	扇形部署	*D*
	线形部署	*E*
	环形部署	*F*
系统基本配置	双层防线	*G*
	单层防线	*H*
系统配置数量	12 部 *Z* 型防空武器系统(双层防线每层 6 部)	*I*
	14 部 *Z* 型防空武器系统(双层防线每层 7 部)	*J*
	16 部 *Z* 型防空武器系统(双层防线每层 8 部)	*K*

注意：*Z* 型中程防空武器系统自身包括制导和指示雷达，既可以受侦察探测系统引导，也可独立发挥探测识别功能。

作战目标不同，体系构成和作战方案也不同。面对同一威胁，防空导弹武器系统可以产生多种组成方案。对方案的不同组成方式进行全排列，形成应对巡航导弹攻击的 54 种反巡航导弹方案，如表 3 所示。

表 3 方案的作战效能仿真指标值

编号	侦察探测系统	电子防御系统	防空武器系统配置方式	防空武器系统配置数量
1	*A*	*D*	*G*	*I*
2	*B*	*D*	*G*	*I*
3	*C*	*D*	*G*	*I*
4	*A*	*E*	*G*	*I*
5	*B*	*E*	*G*	*I*
6	*C*	*E*	*G*	*I*
7	*A*	*F*	*G*	*I*
8	*B*	*F*	*G*	*I*
9	*C*	*F*	*G*	*I*
10	*A*	*D*	*H*	*I*
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
50	*B*	*E*	*H*	*K*
51	*C*	*E*	*H*	*K*
52	*A*	*F*	*H*	*K*
53	*B*	*F*	*H*	*K*
54	*C*	*F*	*H*	*K*

理解防空导弹武器系统反巡航导弹能力的评估指标体系时需要注意以下假设：1) 由于敌方发射的巡航导弹为单批次，所以己方在反巡航导弹过程中受损的任何系统都被认定是不可修或是只能发挥其部分功能；2) 对巡航导弹拦截成功是指击毁巡航导弹，巡航导弹突防是指未被己方防空导弹武器系统击伤，完好通过己方防线的巡航导弹；3) 巡航导弹的主要攻击对象为己方某重要区域，同时也包括己方防空导弹武器系统中地面部署的各系统。综上所述，防空导弹武器系统反巡航导弹能力评估指标体系如图 4 所示。

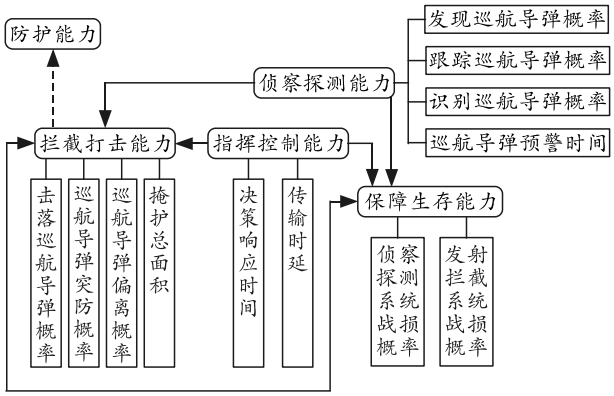

图 4 防空导弹武器系统反巡航导弹能力评估指标体系

3.3　作战能力评估参数估值

使用系统动力学动态仿真方法，搭建双方对抗模型。通过作战效能仿真，得到 54 个方案的作战效能指标值，如表 4 和 5 所示。其中作战效能指标值是经过统计处理以及标准化的数据。

需要说明的是数据经过一致性和标准化处理，重在说明验证该方法的有效性。

将各方案的效能指标数据的协方差矩阵以及系统反巡航导弹能力评估的非线性 SEM 模型输入到 LISREL9.30 进行参数估计。得到模型路径图及各参数的估计值如图 5-7 所示。

表 4　非线性 SEM 模型变量对应

变量	潜变量	显变量
外生变量	侦察探测能力 E_1	发现巡航导弹概率 x_1
		跟踪巡航导弹概率 x_2
		识别巡航导弹概率 x_3
		巡航导弹预警时间 x_4
	指挥控制能力 E_2	决策响应时间 y_1
		传输时延 y_2
内生变量	保障生存能力 N_1	侦察探测系统战损概率 z_1
		发射拦截系统战损概率 z_2
	拦截打击能力 N_2	击毁巡航导弹概率 n_1
		巡航导弹突防概率 n_2
		巡航导弹偏离概率 n_3
		掩护总面积 n_4

表 5　方案的作战效能仿真指标值

序号	x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_2	z_1	z_2	n_1	n_2	n_3	n_4
1	0.581	0.703	0.604	0.605	1.000	0.998	0.757	0.760	0.550	0.668	0.684	0.759
2	0.553	0.645	0.688	0.578	0.881	0.735	0.800	0.774	0.782	0.642	0.562	0.834
3	0.585	0.718	0.647	0.606	0.990	0.990	0.996	0.729	0.577	0.508	0.628	0.872
4	0.795	0.572	0.724	0.658	0.929	0.939	0.993	0.815	0.526	0.423	0.466	0.588
5	0.795	0.895	0.734	0.735	0.929	0.848	0.965	0.888	0.645	0.655	0.765	0.926
6	0.783	0.858	0.628	0.622	0.875	0.750	0.782	0.652	0.391	0.517	0.049	0.839
7	0.667	0.686	0.876	0.899	0.964	0.949	0.984	0.786	0.408	0.368	0.393	0.554
8	0.791	0.916	0.764	0.640	0.835	0.777	0.800	0.665	0.237	0.130	0.120	0.375
9	0.410	0.462	0.538	0.400	0.913	0.866	0.800	0.764	0.138	0.315	0.221	0.474
10	0.783	0.942	0.628	0.622	0.967	0.788	0.800	0.774	0.391	0.517	0.049	0.963
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
51	0.794	0.888	0.628	0.622	0.765	0.547	0.904	0.897	0.394	0.523	0.149	0.982
52	0.791	0.875	0.644	0.639	0.967	0.874	0.998	0.887	0.377	0.616	0.099	0.935
53	0.769	0.797	0.688	0.685	0.824	0.795	0.779	0.656	0.625	0.165	0.161	0.860
54	0.783	0.812	0.735	0.650	0.903	0.753	0.800	0.784	0.415	0.290	0.228	0.824

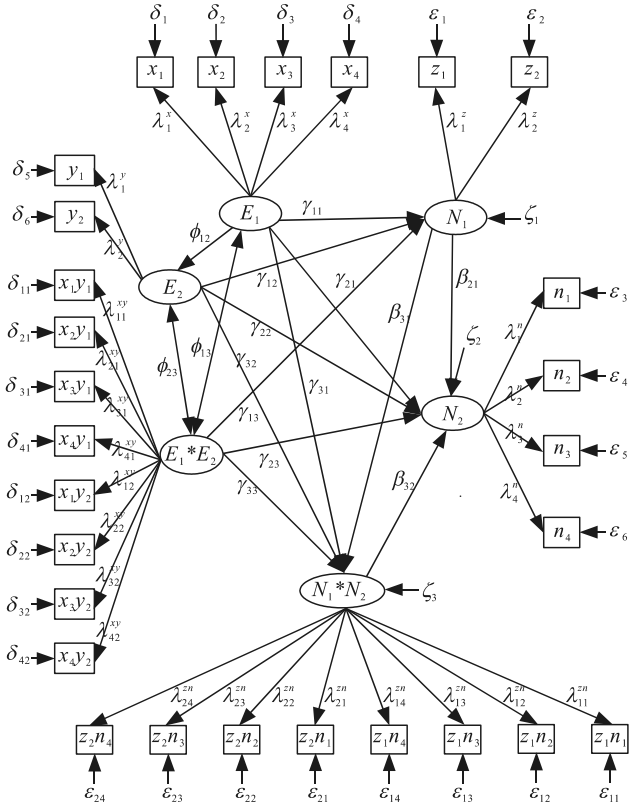

图 5　非线性的体系评估 SEM 理论模型

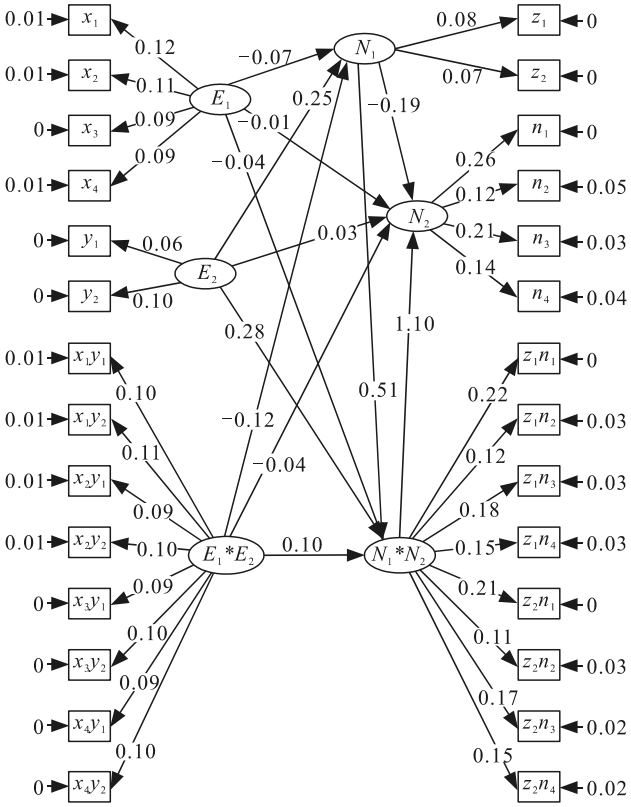

图 6　反巡航导弹非线性 SEM 的基本路径

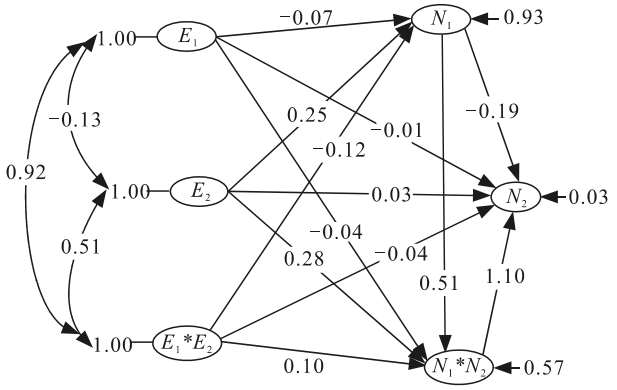

图 7 反巡航导弹非线性 SEM 的结构模型路径

3.4 反巡航导弹作战能力指标求解

利用模型参数的估计值，作战能力与作战效能的定量关系模型：

1) 侦察探测能力评估模型为：

$$E_1 = 2.08x_1 + 2.27x_2 + 2.78x_3 + 2.78x_4 - 0.072。\quad (14)$$

2) 指挥控制能力评估模型为：

$$E_2 = 8.33y_1 + 5.00y_2。\quad (15)$$

3) 侦察探测能力和指挥控制能力交叉能力的评估模型为：

$$E_1 * E_2 = 1.25x_1y_1 + 1.39x_2y_1 + 1.39x_3y_1 + 1.39x_4y_1 + 1.14x_1y_2 + 1.25x_2y_2 + 1.25x_3y_2 + 1.25x_4y_2 - 0.05。\quad (16)$$

4) 保障生存能力评估模型为：

$$N_1 = 6.25z_1 + 7.14z_2。\quad (17)$$

5) 拦截打击能力和保障生存能力交叉能力的评估模型为：

$$N_1 * N_2 = 0.57z_1n_1 + 1.04z_1n_2 + 0.69z_1n_3 + 0.83z_1n_4 + 0.60z_2n_1 + 1.14z_2n_2 + 0.74z_2n_3 + 0.83z_2n_4 - 0.14。\quad (18)$$

6) 拦截打击能力评估模型为：

$$N_2 = -0.01E_1 + 0.03E_2 - 0.04E_1 * E_2 - 0.19N_1 + 1.10N_1 * N_2 + 0.03。\quad (19)$$

根据以上公式得到计算结果如表 6 和 7 所示，依据非线性的体系评估 SEM 解析模型对各系统能力进行计算，比较分析模型计算估值。以拦截打击能力的评估值为参照标准，得出拦截打击巡航导弹能力较为典型的 7 种方案的评估值及其方案组成，如表 8 所示。

表 6 反巡航导弹作战能力评估线性/非线性 SEM 参数估计

参数	λ_1^x	λ_2^x	λ_3^x	λ_4^x	λ_1^y	λ_2^y	λ_1^z
非线性	0.12	0.11	0.09	0.09	0.06	0.1	0.08
参数	λ_2^z	λ_1^n	λ_2^n	λ_3^n	λ_4^n	λ_{11}^{xy}	λ_{21}^{xy}
非线性	0.07	0.26	0.12	0.21	0.14	0.1	0.09
参数	λ_{31}^{xy}	λ_{41}^{xy}	λ_{12}^{xy}	λ_{22}^{xy}	λ_{32}^{xy}	λ_{42}^{xy}	λ_{11}^{zn}
非线性	0.09	0.09	0.11	0.1	0.1	0.1	0.22
参数	λ_{12}^{zn}	λ_{13}^{zn}	λ_{14}^{zn}	λ_{21}^{zn}	λ_{22}^{zn}	λ_{23}^{zn}	λ_{24}^{zn}
非线性	0.12	0.18	0.15	0.21	0.11	0.17	0.15
参数	δ_1	δ_2	δ_3	δ_4	δ_5	δ_6	δ_{11}
非线性	0.01	0.01	0	0.01	0	0	0.01
参数	δ_{21}	δ_{31}	δ_{41}	δ_{12}	δ_{22}	δ_{32}	δ_{42}
非线性	0.01	0	0	0.01	0.01	0	0
参数	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4	ε_5	ε_6	ε_{11}
非线性	0	0	0	0.05	0.03	0.04	0
参数	ε_{12}	ε_{13}	ε_{14}	ε_{21}	ε_{22}	ε_{23}	ε_{24}
非线性	0.03	0.03	0.03	0	0.03	0.02	0.02
参数	ϕ_{12}	ϕ_{13}	ϕ_{23}	γ_{11}	γ_{21}	γ_{31}	γ_{12}
非线性	−0.13	0.92	0.51	−0.07	−0.01	−0.04	0.25
参数	γ_{22}	γ_{32}	γ_{13}	γ_{23}	γ_{33}	β_{21}	β_{31}
非线性	0.03	0.28	−0.12	−0.04	0.1	−0.19	0.51
参数	β_{32}	ζ_1	ζ_2	ζ_3			
非线性	1.1	0.93	0.03	0.57			

表 7 防空导弹武器系统作战能力指标估值

方案	E_1	E_2	E_1*E_2	N_1	N_1*N_2	N_2
1	6.10	13.32	6.38	10.16	3.15	1.65
2	6.11	11.02	5.11	10.53	3.40	1.83
3	6.28	13.20	6.48	11.43	3.41	1.68
4	6.77	12.44	6.54	12.03	2.73	0.79
5	7.59	11.98	7.20	12.37	4.31	2.42
6	7.03	11.04	6.01	9.54	2.04	0.48
7	8.11	12.78	7.69	11.76	2.30	0.31
8	7.60	10.84	6.42	9.75	0.85	−0.90
9	4.17	11.94	4.11	10.46	1.38	−0.28
10	7.22	12.00	6.70	10.53	2.42	0.71
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
50	6.53	12.37	6.29	11.78	3.94	2.18
51	7.12	9.11	4.94	12.06	2.96	1.00
52	7.17	12.43	6.95	12.57	3.13	1.11
53	7.20	10.84	6.08	9.55	1.83	0.24
54	7.30	11.29	6.33	10.60	2.09	0.32

表 8 拦截打击能力评估值最高的 6 种方案

方案	N_2 能力指标评估值	方案组成
41	2.67(1.00)	1 部 X 型战术预警雷达、1 架 Y 型预警机(B)；线形部署(E)；双层防线(G)；20 部 Z 型防空武器系统(K)
38	2.67(1.00)	1 部 X 型战术预警雷达、1 架 Y 型预警机(B)；扇形部署(D)；双层防线(G)；20 部 Z 型防空武器系统(K)
23	2.66(1.00)	1 部 X 型战术预警雷达、1 架 Y 型预警机(B)；线形部署(E)；双层防线(G)；16 部 Z 型防空武器系统(J)
47	2.62(0.98)	1 部 X 型战术预警雷达、1 架 Y 型预警机(B)；扇形部署(D)；单层防线(H)；20 部 Z 型防空武器系统(K)
20	2.46(0.92)	1 部 X 型战术预警雷达、1 架 Y 型预警机(B)；扇形部署(D)；双层防线(G)；16 部 Z 型防空武器系统(J)
5	2.42(0.91)	1 部 X 型战术预警雷达、1 架 Y 型预警机(B)；线形部署(E)；双层防线(G)；12 部 Z 型防空武器系统(I)
50	2.18(0.82)	1 部 X 型战术预警雷达、1 架 Y 型预警机(B)；线形部署(E)；单层防线(H)；20 部 Z 型防空武器系统(K)

3.5　评估结果有效性及准确性分析

以反巡航导弹火力打击估值高低为标准，选择前 5 个最优方案：41(2.67)、38(2.67)、23(2.66)、47(2.62)、20(2.46)。

1) 拦截打击能力评估值较高的方案中侦察探测系统由 1 部战术预警雷达和 1 架预警机组成，说明空基预警系统和陆基预警系统配合使用是提高防空导弹武器系统拦截巡航导弹拦截打击能力的重要手段。战术预警雷达探测距离较远，但是存在低空探测盲区，不易发现低空突防的巡航导弹，且战术预警雷达机动能力较差，暴露后容易遭到定点打击；预警机机动性能强，不易受到攻击，生存能力强，同时探测规范广，可以发现低空突防的巡航导弹，但是预警机较预警雷达相比能够处理、识别的目标较少，因此配合使用效果较单独使用效果更好。

2) 防空导弹武器系统的部署方式对打击拦截巡航导弹具有重要影响，防空导弹武器系统的部署方式与其配置数量和体系的配置方式具有紧密联系。

当基本部署为线形部署时，武器系统配置方式较武器系统的配置数量对打击拦截巡航导弹能力的影响要大。如表 8 中的方案 23 和 41，虽然方案 23 中导弹配置数量和 41 相比较少，但是两者的拦截打击能力相近；方案 41 和 50 在配置数量相同的条件下，双层防线的拦截打击能力要优于单层防线的拦截打击能力。这是由线形部署的特点决定的，线性部署较为分散，某方向火力覆盖范围较广，但是火力较扇形部署较弱，较环形部署覆盖方向单一。在打击方向已知的条件下，选择线形部署时，需要增加多层防线以提高预警时间、火力密度等，达到弥补某方向火力不足的目的。

当基本部署为扇形部署时，武器系统的配置数量较配置方式对打击拦截巡航导弹的影响要大。如表 7 中的方案 38 和 47，虽然方案的配置方式不同，但是防空武器足够多时，对巡航导弹的拦截打击能力十分接近；在方案 38 和 20 中，虽然都是双层防线但是拦截打击能力估值随配置数量增多而增大。这是由于扇形部署的特点决定的，扇形部署较为集中，火力相对线形部署较强，但是火力覆盖范围较线形部署小，所以单层防线未拦截的目标，多层防线也较难拦截，因此需要增加防空武器的数量来提高火力拦截打击能力。

当基本部署为环形部署时，由于巡航导弹的来袭方向已确定为重要区域的某方向，环形部署在重点方向还是仅为扇形部署且数量减少，拦截打击能力进一步削弱，且方案 8 和 9 计算得出的拦截打击能力估值为负，不建议使用。

当配置的防空武器数量足够多时，即不存在配置、部署方式的影响。如表 8 中的方案 41 和 38，在其他条件一样的情况下，线形和扇形 2 种部署方式的拦截打击能力指标评估值一样，部署方式的变化没有对 N_2 能力指标产生任何影响。

3) 为了具有较高的反巡航导弹能力，防空导弹武器系统的侦察探测系统需要将空基预警与陆基预警系统配合使用。当防空导弹武器系统为线形部署时，采用双层防线，且部署数量适中的防空导弹武器数量；当防空导弹武器系统为扇形部署时，配置方式均可，但应部署数量较多的防空导弹武器数量。

3.6　选择最优方案

通过观察表 7 和 8 同时结合上文分析，可将方案 41、38、23、47 作为满意的方案，其中前 3 种方案的拦截打击能力估值相同，方案 47 的拦截打击能力估值与前 3 种方案基本接近。但是方案 23 中防空导弹武器系统数量明显少于其他 3 种方案，所以选择方案 23 作为防空导弹武器系统反巡航导弹的最优方案，方案 23 的基本组成验证了初步的评估结论。协调使用战术预警雷达和预警机联合探测和发现目标，并且采用线形部署方式，采用双层防线配置，部署适当数量的防空导弹武器系统可具备较强的反巡航导弹能力。

4　结束语

笔者从系统作战能力涌现性概念模型和度量指标出发，建立非线性 SEM 防空导弹武器系统作战能力涌现度量模型，以数据为支撑构建结构测量方程和结构方程，使估值结果更具说服力，能更有效地反映作战能力间的协同交互，与实际作战更贴近，具有更强的可行性。在防空导弹武器系统体系构建过程中，通过对防空导弹武器系统作战效能与作战能力的评估，可以找出作战方案中存在的问题和不足，并优化和改进，提高武器系统的作战效能和作战能力，使其更好地适应现代战争的需求，为作战指挥辅助决策提供参考和依据。

随着武器装备信息化建设的发展，作战能力评估指标体系将更加复杂。如何有效优化模型涌现性评估指标体系，在更精准的指标数据基础上构建评估模型将会是下一步研究的重点。

（下转第 112 页）