

基于图论的作战计划军事效果评估

秦前付^{1,2} 曹存根² 徐 洸²

(空军指挥学院 北京100089)¹

(中国科学院计算技术研究所智能信息处理重点实验室 北京100080)²

摘要 采用仿真系统评估和分析空中作战计划会耗费大量的时间,本文提出了新计算方法,可以单独用来提高计划质量,或与仿真系统结合提高计划效率。分析军事目标的主要内容和描述方式,提出由作战任务计算军事效果的方法。建立不同打击目标之间的相互制约和相互影响关系图,据此提出了打击效果的网络图算法,将作战计划对于不同目标的突击效果集中映射到网络中体现系统核心能力的节点集合中,评估总体打击效果。最后讨论了该评估方法的应用。
关键词 作战计划,军事知识,效果评估,图论

Evaluating Military Effect of Air Operational Plan Based on Network Theory

QIN Qian-Fu^{1,2} CAO Cun-Gen² XU Guang¹

(Air Force Command College, Beijing 100089)¹

(Key Laboratory of Intelligent Information Processing, Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)²

Abstract It costs enough time to evaluate air plan by means of simulation system, so the new method is designed that can cooperate with simulation to improve work efficiency or be used independently to improve the plan quality. We introduce the main contents and expression of military objectives, and suggest a kind of method to evaluate military effect by means of operational objective. A relation network is built to describe mutual restriction and mutual influence between at targets, and a network-based algorithm is designed to calculate operational effect. In the algorithm we map attacked effect of all nodes to those reflecting the key operation ability of targets system so as to synthesize the total attacked effect of the system. At the end some questions of model application are discussed.

Keywords Military operational plan, Military knowledge, Effect evaluation, Network theory

1 引言

军事运筹的关键任务之一是评估作战行动和作战计划^[1],主要手段是计算机仿真^[2,3]。海湾战争中运行CEM“作战方案评价模型”500次^[3],采用C³ISIM模型对空中行动前24小时的作战计划进行两轮分析和完善,战后提出了改进要求^[4],建立了评估作为作战计划的核心部分的主计划的仿真系统^[5]。但是采用仿真系统的不足之处是系统运行耗费时间多,例如CEM的新一轮运行需要数月准备时间。在高强度的现代空中作战中,需要连续滚动制定每日作战计划^[6],没有充分时间在每个日计划周期中使用仿真模型。如果开发利用军事目标评估计划的快速评估模型,可以从整体上提高空中作战计划的质量。条件允许时与仿真系统结合,则可以提高作战评估效率,减少对于计划的调整和完善时间。基于效果的作战思想^[9]是目前国内外的研究热点之一,对于整体的作战效果的客观分析与评估是其中的重点工作之一。文[9]对海湾战争中可能因效果评估的不足造成的兵力浪费也提出了疑问。目前评估空中作战计划作战效果的非仿真方法有适合于装备论证等宏观问题分析的价值求和方法^[7]和其他静态评估方法^[8],但不能充分反映目标体系内部联系和整体效果,不适于评估具有真实作战背景的作战计划。

本文从定性定量相结合的角度出发,采用网络图理论,提出空中作战计划的军事效果评估方法,基本特点:(1)依据作战计划的军事目标,合理分配不同作战任务对最终评估效果

的贡献程度。(2)将对方作战能力的降低程度作为评估的基础,采用网络图方法充分考虑构成作战能力各主要单元之间的内在关系。

首先描述作战计划的军事目标,然后以对防空系统的打击为例,使用网络图理论计算构成军事目标的各个作战任务的打击效果,并综合得到军事效果,最后讨论军事效果评估方法的应用。

2 军事目标

作战计划的军事目标(Military Objectives)相对于政治目标、经济目标而言,有不同的层次,有总体目标、阶段性目标,对于每一天的计划也有明确预期达到的军事目标,本节所讨论的军事目标就是针对每日计划而言。每日计划的军事目标由一组作战任务构成。可以列举出这些作战任务的集合,记为:

$$\text{OperationalMissionSet} = \{APOS_i\}, i = 1, 2, \dots, NAPOS$$

NAPOS为作战任务的总数。这些具体的作战任务包括:夺取制空权、保持制空权、区域防空作战、破坏交通系统、破坏反击能力,等等。根据军事理论和实践的发展,作战任务集合是可以扩展的。例如,信息化战争的来临,产生了诸如打击信息系统这样新的作战任务。

所以,军事目标 MilitaryObjective 应当是作战任务集合 OperationalMissionSet 的子集,而且其中元素之间还存在优先级的差别,记为一个二元组的集合:

秦前付 博士,副教授,主要研究领域为人工智能与空中作战计划理论;曹存根 博士,教授,博士生导师,主要研究领域为人工智能;徐 洸 教授,博士生导师,主要研究领域为空军作战指挥理论与方法。

$MilitaryObjective = \{ \langle OM_j, PRI_j \rangle \}, j=1, 2, \dots, NOM$
 NOM 为一个作战计划中所包含的作战任务的总数。该二元组描述作战任务 OM_i 及其对应的优先程度 PRI_i , 存在 $OM_i \in OperationalMissionSet$ 。

不同的作战任务, 是通过攻击一些特定的目标群或者目标系统实现。从数学角度来看, 根据作战任务确定攻击目标是一个映射的过程, 该映射通常是一对多的映射, 一个作战任务可以与多个攻击目标相关联。用数学公式表示如下:

$$f: TargetSet \rightarrow OperationalMissionSet$$

$TargetSet$ 表示所有可攻击目标集合, f 描述映射关系。目前主要依靠专家知识和经验确定映射关系, 例如五环理论^[10], 用知识库描述:

$$RulesMissionTarget = \{ \langle APOS_i, TS_i \rangle \}, i=1, 2, \dots, NA-POS$$

显然, $APOS_i \in OperationalMissionSet$, 表示作战任务, $TS_i \in TargetSet$, 表示对应的攻击目标集合。例如削弱敌防空能力是一个作战任务, 需要打击的主要攻击目标集合如图1所示。

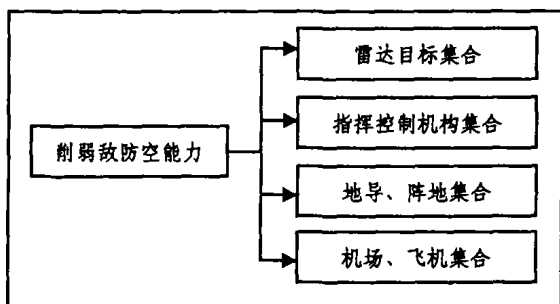


图1 削弱敌防空能力的攻击目标集合

作战计划的军事目标是所有作战任务的总和, 所有作战任务的作战效果的总和, 就称为军事效果, 它是作战计划效果的量化描述。

3 军事效果

作战任务的类型比较多, 事实上在一定的条件下, 例如速战速决, 不必考虑长远影响时, 有些作战任务的结果可以忽略不计, 它们对军事效果的影响可以不予考虑。例如, 在夺取制空权的空中打击行动中, 摧毁一座桥梁可能无关大局, 而摧毁一个重要的前线机场, 则可能导致空中优势的易位, 可见对最终的军事效果有完全不同的贡献。图2描述了构成军事效果的一组可能的作战任务的效果集合。为习惯起见, 在进攻性质的作战中, 将作战任务的效果称为打击效果。

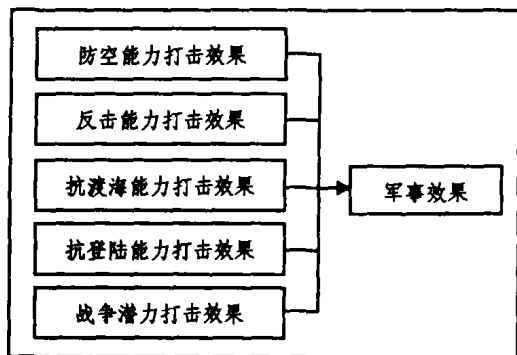


图2 构成军事效果的作战任务集合

计算, 二是将打击效果综合为总体的军事效果。

3.1 打击效果计算

在打击效果的计算中, 以削弱敌防空能力的打击效果计算比较复杂, 本节以此为例说明计算方法。参考图1, 敌防空系统包括许多分散的目标和目标系统, 这些目标之间不是独立的, 而是相互依存, 有着情报、指挥、功能依赖等方面的密切联系, 但是最后防空能力的体现则在于作战飞机和地空导弹的作战能力的发挥。基本思路是, 先建立体现防空系统目标之间关系的网络, 并建立目标之间的联系类型和强度, 最后分析目标遭到毁伤所产生的整体防空效能上的降低程度。

3.1.1 构建防空目标网络图 可以将所有防空系统目标按照它们之间存在的关系, 定义成一个有向图 G :

$$G = (DefenceTargetSet, RelationSet, RelationIntensity)$$

其中, $DefenceTargetSet$ 是防空目标集合, 主要包括雷达情报系统类、指挥控制系统类、地对空导弹类、飞机类和机场类目标四类:

$$DefenceTargetSet = \{ RadarSysTarget, CCSysTarget, SamTarget, PlaneTarget, AirPortTarget \}$$

$RelationSet$ 是防空目标之间的弧(关系)的集合, 这里只考虑指挥控制、情报传递、和被依赖三类弧(关系):

$$RelationSet = \{ CCRelation, IntelRelation, ReliedOnRelation \}$$

对于 $RelationSet$ 中的任意一个元素 $\langle x, y \rangle$, 从军事知识可知,

- 如果 $\langle x, y \rangle \in CCRelation$, 则一定有 $x \in CCSysTarget, y \in DefenceTargetSet \wedge y \notin RadarSysTarget$, 且 $x \neq y$, 由于雷达情报系统类目标对于指挥实时性没有迫切要求, 可以简化处理。

- 如果 $\langle x, y \rangle \in IntelRelation$, 则一定有 $x \in RadarSysTarget, y \in RadarSysTarget \cup CCSysTarget$, 且 $x \neq y$;

- 如果 $\langle x, y \rangle \in ReliedOnRelation$, 则一定有 $x \in PlaneTarget, y \in AirPortTarget$, 且 $x \neq y$ 。

有些特殊的节点, 可以利用上述节点进行组合处理。例如预警机, 可以看作雷达情报系统类和指挥控制系统类节点的重合, 在受到攻击时, 两个节点会遭到同样的毁伤效果。

$RelationIntensity$ 是弧(关系)强度集合, 描述弧的始节点对于终节点功能的贡献程度, 值域规定为 $[0, 1]$ 。如果 $RelationIntensity$ 为0, 则始节点对终节点没有影响; 如果为1, 则始节点对终节点起决定性作用。 $RelationIntensity$ 可以看作是从 $RelationSet$ 到实数域 $[0, 1]$ 的映射:

$$g: RelationSet \rightarrow [0, 1]$$

从上面的定义可知, 防空系统目标可以构成一个有向图 G , 如图3是一个典型的示意图。这个有向图根据弧的性质的不同可以认为是三个图 G_1, G_2, G_3 的叠加, 即:

$$G = G_1 \cup G_2 \cup G_3$$

G_1 是指挥控制信息图, 定义为:

$$G_1 = (DefenceTargetSet, CCRelation, RelationIntensity)$$

通常, 最高指挥机构是有向图 G_1 的一个节点, 其入度数为零。而地空导弹类和飞机类则通常是叶节点, 出度数为零。

G_2 是情报信息图, 描述一个情报从雷达站到情报处理中心、指挥控制机构和武器系统的有向图, 定义为:

$$G_2 = (DefenceTargetSet, IntelRelation, RelationIntensity)$$

G_3 是依赖关系图, 描述一个武器对于阵地、飞机对于机场等目标的依赖关系的有向图, 定义为:

$$G_3 = (DefenceTargetSet, ReliedOnRelation, RelationIn-$$

可见, 要计算军事效果需要解决两个问题, 一是打击效果

ensity)

这三个有向图的叠加,可以比较完整地描述防空目标之间复杂的相互关系。根据研究对象的不同和所求解问题的需要,还可以叠加其他关系类型的有向图,例如作战协同关系有向图等。

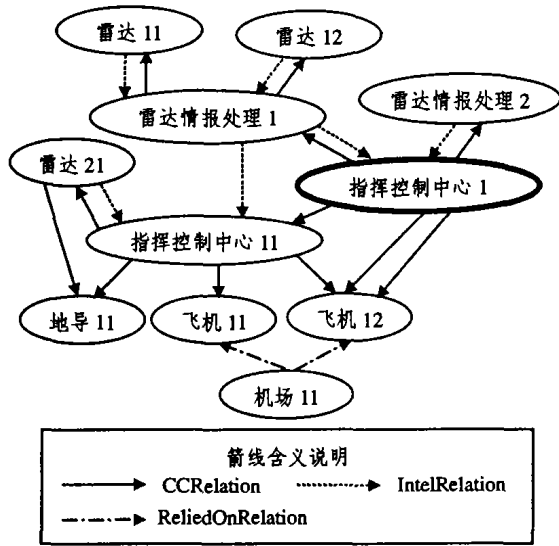


图3 防空目标网络示意图

作战计划实施时,对不同类型的目标节点 $V, V \in DefenceTargetSet$, 有不同的打击效能值,并将效能值的值域定义为 $[0, 1]$,初始值(不受攻击或者完全恢复时)定为1。定义各种效能值如下:

- 指挥控制效能值 ECC ,是对指挥控制系统类目标作战指挥能力的量化描述。

- 情报保障效能值 EI ,是对情报保障系统类目标工作效能的量化描述。

- 武器使用效能值,包括飞机使用效能值(EP),和地对空导弹使用效能值(ES),描述一个节点或者整个防空系统的飞机或者地对空导弹可以被充分发挥作战效能的比例,如果指挥能力、情报和保障设施都完好,则令为1。

- 装备功能效能值 EF ,是对目标本身生存状态的描述,每一个目标都拥有。如果目标没有遭到攻击,则效能值为1,被摧毁则效能值为0。

3.1.2 单目标效能计算 在描述指挥控制关系的图 G_1 中,可以计算出节点 V 相应的入度 $ID(V)$,将为节点 V 输入指挥控制信息的所有节点定义为集合 $\cdot V$,则:

$$\cdot V = \{x_i | \langle x_i, V \rangle \in CCRelation\}, i=1, 2, \dots, N$$

其中, N 是输入信息节点的个数,等于入度数,即 $N = ID(V)$ 。记所对应的弧强度集合为:

$$IntensityV = \{Intensity_i = g(\langle x_i, V \rangle) | \langle x_i, V \rangle \in CCRelation\}, i=1, 2, \dots, N$$

且 $\sum_{i=1}^N Intensity_i = 1$,根据对本目标的指挥关系规定确定,例如有直接上级和非直接上级两个指挥信息来源,显然直接上级的关系强度大得多。

设集合 $\cdot V$ 中任意节点 x_i 的指挥控制效能值为 ECC_i ,则输入节点 V 的指挥控制信息量为:

$$InfoCC = \sum_{i=1}^N ECC_i \cdot Intensity_i$$

但如果 $\cdot V = \emptyset$,则取 $InfoCC=1$ 。因为没有指挥控制输入的节

点,不需要其他节点的控制信息支持。

同样,对于描述情报保障关系的图 G_2 ,设集合 $\cdot V$ 中任意节点 x_i 的情报保障效能值为 EI_i ,则输入节点 V 的指挥控制信息量为:

$$InfoIntel = \sum_{i=1}^N EI_i \cdot Intensity_i$$

同样,如果 $\cdot V = \emptyset$,则取 $InfoIntel=1$ 。没有情报保障输入的节点,不需要其他节点的情报保障支持。

对于描述被依赖关系的图 G_3 ,设集合 $\cdot V$ 中任意节点 x_i 的装备功能效能值为 EF_i ,则支持节点 V 的依赖信息量为:

$$InfoRely = \sum_{i=1}^N EF_i \cdot Intensity_i$$

如果 $\cdot V = \emptyset$,则取 $InfoRely=1$ 。没有被依赖关系的节点,不需要依赖其他节点。

下面根据不同的节点类型,给出节点的效能计算公式。

对于图 G 中的节点 V ,如果 $V \in RadarSysTarget$,则受到攻击后,其效能 EI 将受到本身被攻击的效果 EF 、进入情报的效果 $InfoIntel$ 的影响。根据实际情况,如果 $EF=0$,或者 $InfoIntel=0$,则 $EI=0$ 。可以列出经验计算式:

$$EI = EF \cdot InfoIntel$$

如果 $V \in CCSysTarget$,则受到攻击后,其效能 ECC 将受到本身被攻击的效果 EF 、进入情报的效果 $InfoIntel$ 以及进入控制信息 $InfoCC$ 三个因素的影响。根据实际情况,如果 $EF=0$,或者 $InfoIntel=0$,则 $ECC=0$;如果 $InfoCC=0$,对节点 V 影响不是很大,因为指挥控制系统类目标具有较强的独立防空决策能力。可以列出经验计算式:

$$ECC = EF \cdot InfoIntel \cdot (\Delta ICC + InfoCC \cdot (1 - \Delta ICC))$$

其中, ΔICC 表示当 $InfoCC=0$ 时,影响节点效能 ECC 的程度。

如果 $V \in SamTarget$,则受到攻击后,其效能 ES 将受到本身被攻击的效果 EF 、进入情报的效果 $InfoIntel$ 以及进入控制信息 $InfoCC$ 三个因素的影响。可以列出武器使用效能值的经验计算式:

$$ES = EF \cdot (\Delta II + InfoIntel \cdot (1 - \Delta II)) \cdot (\Delta ICC + InfoCC \cdot (1 - \Delta ICC))$$

其中, ΔII 表示当 $InfoIntel=0$ 时,影响节点效能 ES 的程度。 ΔICC 含义不变。

如果 $V \in PlaneTarget$,则受到攻击后,其效能 EP 将受到本身被攻击的效果 EF 、依赖信息量 $InfoRely$ 以及进入控制信息 $InfoCC$ 三个因素的影响。根据实际情况,如果 $EF=0$,或者 $InfoIntel=0$,或者 $InfoCC=0$,则 $EP=0$ 。可以列出武器使用效能值的经验计算式:

$$EP = EF \cdot InfoRely \cdot InfoCC$$

如果 $V \in AirportTarget$,仅仅考虑目标本身的损伤,则有:

$$EA = EF$$

3.1.3 系统效能综合计算 突击行动完成后,对被选择作为攻击目标的防空目标产生了毁伤效果,对目标本身的功能和其他相关的目标均产生影响,需要按一定的顺序逐步递推和计算这种影响。计算的基本依据是目标之间的相互关联关系,即雷达情报信息对指挥控制系统类目标和其他需要的目标产生影响,指挥控制系统类目标对直接攻击武器装备的效能产生影响,可以写出效能计算顺序,如图4。

- Step1 计算所有目标的装备效能值 EF ;
- Step2 按照雷达情报上传的顺序逐步计算雷达情报系

- Step3 统类目标的情报保障效能值 EI;
按照指挥控制信息从上到下的流动顺序,计算各指挥控制系统类节点的指挥控制效能值 ECC;
- Step4 计算各飞机节点的作战效能值 EP 和地空导弹的作战效能值 ES.

图4 效能计算顺序

显然,计算顺序的终点在于飞机的作战效能 EP 和地空导弹的作战效能 ES.由于空中进攻计划的实施对于雷达情报系统、指挥控制系统所造成的系统效能的降低已经通过网络图计算方法传递和叠加到了最终的直接作战武器节点上,因此体现防空力量被削弱的目标综合效能的计算只需考虑直接作战武器节点即可.

设飞机节点共有 NPL 个,计算出的使用效能值分别为 EP_i , 并设不同飞机节点的所有飞机的作战能力和为 $Eplane_i$, $1 \leq i \leq NPL$. 容易计算出防空系统所有飞机的平均使用效能值:

$$EP_{sys} = \left(\sum_{i=1}^{NPL} EP_i \cdot Eplane_i \right) / \sum_{i=1}^{NPL} Eplane_i$$

同理,可以计算出地空导弹的平均使用效能值 EM_{sys} . 然后,综合计算飞机和地空导弹的综合使用效能 Es_{ys} :

$$Es_{ys} = \alpha \cdot EP_{sys} + (1 - \alpha) EM_{sys}$$

其中, α 为权重系数,根据对应武器平均抗击空袭兵力数量由专家确定.防空系统综合效能的值域在 $[0, 1]$ 内,考虑作战前初始综合效能值 Es_{ys0} , 容易计算出防空目标被削弱的程度为:

$$\Delta Es_{ys} = (Es_{ys0} - Es_{ys}) / Es_{ys0}$$

削弱的程度更容易描述系统能力的降低,结合系统的恢复能力,有利于多次攻击效果的连续计算.

3.2 军事效果计算

采用3.1节所讨论的网络图方法,可以计算出军事效果其他构成能力,包括反击能力打击效果、抗渡海能力打击效果、抗登陆能力打击效果,以及战争潜力等因素构成,采用加权求和方法,可以计算出军事效果.

不同的打击效果在军事效果中的权值,决定于制定计划的具体军事目标 *MilitaryObjective* 中作战任务构成元素及其优先程度.我们将优先程度分为三级:重点、次重点、需要:

• “重点”表明该作战任务或者该组作战任务是本次计划的重点作战任务;

• “次重点”则是为未来若干天的行动进行的预先准备;

• “需要”表明并非十分急迫但仍然需要的作战任务.

可以用如下方法确定不同打击效果的权值:

$$\mu_j = \frac{\text{value}(PRI_j)}{\sum_{j=1}^{NAPO} \text{value}(PRI_j)}$$

$\text{value}(PRI_j)$ 表示作战任务不同的优先程度所对应的度量值.所有的权值构成权值矢量 $\vec{\mu}$, 所有的打击效果构成效果矢量 \vec{E}_m , 总体的军事效果可以描述为这两个矢量的积:

$$E_{military} = \vec{E}_m \times \vec{\mu}$$

显然,综合各种打击效果的军事效果的值域为 $[0, 1]$. 不同的打击效果中可能有对相同目标的重复考虑,但从它对多个作战任务的影响看,是合理的.

4 讨论

应用表明,本模型能够有效合理地刻画空军作战计划的军事效果和不同计划军事效果的差别.它充分考虑了目标体系内部元素之间的相互联系,避开了价值求和方法需要直接确定军事价值的困难,同时简单容易使用,耗费资源少.在使用中有如下问题需要注意:

• 目标的毁伤效果是本模型计算的基础,我们使用的毁伤数据不是选定目标的期望打击效果,而是根据计划中的兵力指派,考虑兵力对抗与我机损失后计算出来的毁伤效果,这样才能反映不同计划的差别.

• 衡量一个空中作战计划的优劣,主要指标是效费比,这里的效果指军事效果.经济效果也需要考虑,但由于量纲的原因,难以与军事效果综合,可以作为多目标优化的另一个目标.至于目标函数的排序,根据实际情况由指挥员确定,但绝大多数情况下,考虑军事效果的效费比排序第一.

• 本文涉及较多的系数和权重确定,需要专家根据经验并采用一些有效的方法确定.可以预先确定,也可以建立适当的规则,这是自动化解算的基础,也是本方法能够方便使用的重要前提.

此方法的重要应用包括制定计划前选择打击目标和选择优化不同策略下的作战计划.通过在目标系统中搜索不同的目标组合,直至军事效果最好,就可以得到最佳的目标选择集合,这是采用分步计划优化方法的重要步骤;通过对不同的作战计划进行评估,选择一个比较好的作战计划,是提高作战效率的必要保障.

参考文献

- 1 Thomas C J, Sheldon R S. Military Operations Research. <http://www.mors.org/history/>
- 2 徐学文,王寿云.现代作战模拟.北京:科学出版社,2001
- 3 Lour P E. Army Combat Simulation Assessment. PHALANX, Dec. 1991. 7
- 4 Command, Control, Communications, Computers, and Battle Management. GW-4 Command, Control, Communications, and Battle Management [M], Oct. 1994. 245~304
- 5 JSIMS Joint Program Office. Joint Simulation System Test And Evaluation Master Plan (TEMP) 1.01, 1999. <http://www.jwfc.js.mil>
- 6 Report to Congress on the Conduct of the Persian Gulf War. <http://es.rice.edu/projects/Poli378/Gulf/>
- 7 秦前付,曹存根,等.基于装备水平与知识的空中作战效果分析.火力与指挥控制,已收入
- 8 秦前付,徐泚.空军作战计划分析方法.见:中国系统工程学会军事系统工程专业委员会学术97年会论文集,北京:军事科学出版社,1997
- 9 White Paper on Training, Planning and Systems, Development for Effects-Based Operations, Prepared for the C⁴ISR Summit by the Effects-Based Operations Panel, Aug. 2003
- 10 Warden John A III. Air Campaign: Planning for Combat. <http://www.42cs.au.af.mil/au/awc/awcgate/warden/>