

文章编号:1000-6893(2008)04-0914-05

一对一遭遇时飞机生存力-探测时间解析模型

王旭, 宋笔锋

(西北工业大学 航空学院, 陕西 西安 710072)

Analytic Model of Aircraft Survivability-detection Time for One-on-one Engagement

Wang Xu, Song Bifeng

(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

摘 要: 考虑探测事件的发生时间对开火、击中以及杀伤事件的影响,分析飞机与威胁的一对一遭遇情形,推导出飞机遭遇打击的次数的概率分布以及特定打击次数下飞机的生存概率,最后得到了一对一遭遇飞机生存力-探测时间的解析求解公式。该解析模型精确考虑了威胁与飞机遭遇的全过程,包括:探测、跟踪、开火以及重新装弹、开火等。根据该模型,不仅可以计算一对一遭遇飞机生存概率,而且可以方便地绘制生存力随平均发现时间、一次打击杀伤概率等参数变化的曲线。算例和分析结果表明该模型计算简便、合理有效。

关键词: 飞机生存力; 探测时间; 打击次数; 击中概率; 生存概率

中图分类号: V221.91 **文献标识码:** A

Abstract: Considering that the time taken to detect an aircraft will affect the subsequent events such as launch, hit, and kill, a one-on-one engagement between aircraft and threat is first analyzed. Then, the probability distribution of the number of shots on an aircraft is obtained and the conditional probability that the aircraft survives with certain number of shots is proposed. Finally, an analytic formula for calculating the aircraft survival probability is derived. This analytic model explicitly represents the whole encounter process between aircraft and threat, such as target detection, acquisition and firing, and reload and firing. This model not only makes it possible to calculate the aircraft survival probability, but also plots the survivability contour maps with ease, which vary with the mean time of detection, single shot kill probability and other parameters. Numerical examples and analysis of the results show that the model is reasonable and effective.

Key words: aircraft survivability; detection time; number of shots; hit probability; survival probability

飞机作战生存力(ACS)可定义为飞机躲避和承受人为敌对环境的能力^[1-3],生存力又可分为敏感性和易损性两部分。生存力评估对飞机生存力增强设计、高生存力战术选取以及威胁效能评估都有重要意义。

一对一遭遇是飞机与单一威胁的遭遇,此种情况的飞机生存力评估是其他更复杂情况生存力评估的基础。目前美国已经开发了多种一对一遭遇飞机生存力评估模拟程序,如:ALARM,RADGUNS,ESAM 和 TRAP 等^[4-7]。其中:ALARM 用于计算飞机被雷达探测的概率;RADGUNS 用于评估飞机与防空高炮遭遇时的生存力;ESAM 用于评估飞机与防空导弹遭遇的生存力;TRAP 用于评估飞机与空空导弹遭遇时的生存力。中国关于该方面的研究起步较晚,但也取得了一些研

究成果:文献[8]研究了雷达隐身和机载电子攻击组合情况下的飞机生存力评估;文献[9]分析了雷达散射截面积对飞机生存力的影响;文献[10]对敏感性中的探测事件进行了评估;文献[11-12]给出了飞机易损性定量计算方法。总的来说,国外的生存力评估程序均属于模拟模型,需要输入详细的飞机特征信号、结构以及性能参数,且运算量较大,不适用于飞机设计方案评估以及高生存力战术的快速选取。中国的研究大多是针对某一类生存力增强措施或单独针对敏感性、易损性的评估,针对一对一遭遇飞机生存力的整体评估模型尚不多见。因此,寻求一种适用于飞机设计方案评估以及高生存力战术快速选取的一对一遭遇飞机生存力的评估方法具有重要的实际意义^[13]。

本文通过分析飞机与威胁一对一遭遇的一般情形,建立一种生存力评估模型,抽取对飞机生存力最有影响的参数,推导出飞机生存概率关于这些参数的表达式。

收稿日期:2008-01-02; 修订日期:2008-03-28

基金项目:航空基础科学基金(01A53008)

通讯作者:王旭 E-mail: wwxu@mail.nwpu.edu.cn

1 一对一遭遇情形

从飞机与人为敌对威胁系统遭遇的情形来看,飞机生存力过程由一系列复杂事件组成,主要包括:飞机飞行中被探测、跟踪(探测事件),敌对威胁系统发射威胁传播物(发射开火事件),威胁传播物截击飞机(拦截事件),威胁传播物爆炸击中飞机(击中事件),在击中的条件下威胁传播物杀伤飞机(杀伤事件)^[3]。这个过程具有如下特性:①各事件的发生具有严格的先后顺序,且每一个事件都是随机事件,具有一定的发生概率,比如:为了杀伤飞机,威胁必须先发现飞机,而一次遭遇中,威胁能否发现飞机,是一个随机事件,可以用发现概率来表示;②前一事件的发生时间,会对后一事件产生较大的影响,比如:在探测事件发生概率相同的情况下,探测事件越早发生,飞机遭受打击的次数就越多,被杀伤的概率也就越高。在下面的分析中将综合考虑以上两个特性。

如图1所示,假设威胁位于地面或海面,相对于高速运动的飞机,不考虑威胁在整个遭遇过程中地理位置的变化。威胁探测和攻击都有一定的范围,且探测范围大于攻击范围。飞机沿着某一飞行路线飞过威胁上空。

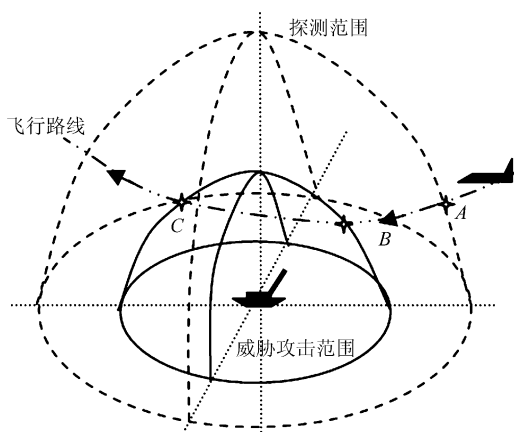


图1 飞机与威胁一对一遭遇示意图

Fig. 1 One-on-one engagement between aircraft and threat

整个遭遇过程如下:①以飞机进入威胁探测范围作为遭遇开始条件;②只有当飞机被威胁探测到并被跟踪,且处于威胁的攻击范围内时,威胁才能攻击飞机;③如果一次攻击没有杀伤飞机,且飞机仍在威胁的攻击范围之内,威胁会再次攻击飞机;④整个遭遇过程结束的条件是飞机被威胁杀伤或离开威胁攻击范围。

在具体的—次遭遇中,当威胁的作用范围和飞机的飞行路线以及速度已知时,整个遭遇的持续时间由3类关键时间组成:探测时间,跟踪、开火时间和重新装弹、开火时间^[14]。

(1) 探测时间 指从飞机进入威胁探测范围到威胁探测到飞机的时间。威胁可能会采取各种各样的探测装置去探测飞机,如:雷达、红外和光电装置等。由于这些装置是通过飞机的特征信号来探测飞机的,所以飞机的特征信号的大小是影响探测时间的主要因素之一。在搜索论中,用随机过程理论来研究探测问题,并把对目标的探测过程看做马尔可夫过程,推导出了探测时间分布函数的指数形式,文献[15-16]给出了具体的推导过程。

(2) 跟踪、开火时间 指威胁探测到飞机后,跟踪飞机、进行火控解算、瞄准并开火、威胁传播物飞行至飞机附近所需的时间。假设该时间为常数,它反映了威胁的性能。

(3) 重新装弹、开火时间 假设威胁采取点射开火原则,也就是前一次开火后,如果没有杀伤目标,紧接着进行第2次开火。重新装弹、开火时间包括进行装弹、再次瞄准并开火及威胁传播物飞行至飞机附近所需的时间,假设该时间也是一个常数。一般情况下,该时间要比跟踪、开火时间短。

在威胁一次开火(打击)的条件下,威胁传播物会有—定的概率击中飞机;在威胁传播物击中飞机的条件下,威胁战斗部又会有—定的概率杀伤飞机;假设—次打击击中飞机的概率以及击中后战斗部杀伤飞机的概率均为常数。

2 生存力评估模型

按照飞机被威胁探测到的早晚,可以将飞机与威胁的遭遇分为3种情形:①威胁探测到飞机过晚,以至于来不及对飞机进行打击;②威胁较早探测到飞机,并提前开火,飞机—进入威胁攻击区,就遭遇了威胁的第1次打击;③介于前2种情形之间,飞机遭遇第1次打击是在进入威胁攻击区以后的某一个时刻。以上3种情形有其各自的发生概率,且概率之和为1。不同的遭遇情形下,飞机通过威胁空间遭受的打击次数不同,而不同的打击次数导致飞机生存概率也不同。下面首先介绍打击次数及其概率分布的确定方法,然后推导特定打击次数下飞机的生存概率,最后得到整个遭遇过程的飞机生存概率。

2.1 打击次数及其概率分布

假设飞机进入威胁探测范围的时刻为 0 时刻,飞机进入威胁攻击范围的时刻为 t_1 ,飞机脱离威胁攻击范围的时刻为 t_2 。威胁的跟踪、开火时间(跟踪时间+火控解算时间+瞄准开火时间+威胁传播物飞行时间)为 a ,威胁重新装弹、开火时间(装弹时间+瞄准开火时间+威胁传播物飞行时间)为 b 。

假设飞机被探测到的时刻为 t ,那么,飞机第 1 次遭受攻击的时刻为 $t+a$ 。由于探测时间 t 服从负指数分布,因此探测时间的概率分布为

$$f(t) = se^{-st} \quad (1)$$

式中: s 为威胁探测到飞机所需的平均时间的倒数。平均探测时间取决于威胁自身特性以及目标的特征信号水平,文献[10]给出了雷达对飞机的平均探测时间的计算方法,文献[15-16]给出了光学探测器对目标的平均探测时间的估算公式。

通过探测时间的概率分布的积分可以计算飞机在某个时间段内被探测到的概率,如:在 $[\tau_1, \tau_2]$ 时间段内的探测概率为

$$\int_{\tau_1}^{\tau_2} f(t) dt = e^{-s\tau_2} - e^{-s\tau_1}$$

下面针对飞机与威胁遭遇的 3 种情形,分别推导飞机通过威胁空间遭受的打击次数的分布:

(1) 当威胁探测到飞机过晚,以至于来不及对飞机进行打击时,有 $t+a > t_2$ 。此种情形下,飞机遭遇的打击次数为 0,而遭遇 0 次打击的概率等于飞机在 $[t_2-a, +\infty]$ 时间段内被探测到的概率,即

$$P_E^{(0)} = \int_{t_2-a}^{+\infty} f(t) dt = e^{-(t_2-a)s} \quad (2)$$

(2) 当威胁较早探测到飞机,并提前开火,飞机一进入威胁攻击区,就遭遇第 1 次打击时,有 $t+a \leq t_1$ 。此种遭遇情形下,威胁会多次攻击飞机,飞机通过威胁空间遭受的打击次数为

$$M = \text{int}[(t_2 - t_1)/b + 1] \quad (3)$$

式中: $\text{int}[\quad]$ 表示取计算结果的整数部分,故飞机通过威胁空间遭受 M 次打击的概率为

$$P_E^{(M)} = \int_0^{t_1-a} f(t) dt = 1 - e^{-(t_1-a)s} \quad (4)$$

(3) 当飞机遭遇第 1 次打击在进入威胁攻击区以后的某一个时刻时,有 $t_1 < t+a \leq t_2$ 。此种情形下,飞机通过威胁空间遭受的打击次数 i 满足 $1 \leq i \leq M$,又可分为两种情形:①当 $t_2 - ib < t+a \leq t_2 - (i-1)b$ 时,其中 $1 \leq i \leq M-1$,有

$$P_E^{(i)} = \int_{t_2-a-ib}^{t_2-a-(i-1)b} f(t) dt = e^{-(t_2-a-ib)s} - e^{-(t_2-a-(i-1)b)s} \quad (5)$$

②当 $t_1 < t+a \leq t_2 - (M-1)b$ 时,也就是 $i=M$ 时,有

$$P_E^{(M)} = \int_{t_1-a}^{t_2-a-(M-1)b} f(t) dt = e^{-(t_1-a)s} - e^{-(t_2-a-(M-1)b)s} \quad (6)$$

综合以上 3 种情形,可得到飞机通过威胁空间遭受的打击次数 i 的概率分布为

$$P_E^{(i)} = \begin{cases} e^{-(t_2-a)s} & i = 0 \\ e^{-(t_2-a-ib)s} - e^{-(t_2-a-(i-1)b)s} & 1 \leq i \leq M-1 \\ 1 - e^{-(t_2-a-(M-1)b)s} & i = M \end{cases} \quad (7)$$

由于已经讨论了飞机与威胁遭遇的所有可能情形,所以式(7)中的各次打击事件组成一个全概率事件,其发生概率之和为 1。

2.2 特定打击次数下的生存力

文献[3]给出了飞机通过威胁空间遭受的打击次数为 N 时生存概率的计算公式为

$$P_{S/E} = \prod_{j=1}^N (1 - P_K^{(j)}) \quad (8)$$

式中: $P_K^{(j)}$ 为第 j 次打击下飞机被杀伤的概率,且

$$P_K^{(j)} = P_H^{(j)} P_{K/H}^{(j)} \quad 1 \leq j \leq N \quad (9)$$

式中: $P_H^{(j)}$ 为第 j 次打击威胁击中飞机的概率; $P_{K/H}^{(j)}$ 为第 j 次打击击中飞机时杀伤飞机的概率。

一般的研究把式(8)中的打击次数 N 看做是一个固定值^[3],而本文的打击次数是一个随机变量,所以式(8)需要进行相应的修正。用随机变量 i 来表示打击次数,用 $P_{S/E}^{(i)}$ 表示飞机通过威胁空间遭受的打击次数为 i 时的生存概率,则式(8)可改写为

$$P_{S/E}^{(i)} = (1 - P_K^{(1)})(1 - P_K^{(2)}) \cdots (1 - P_K^{(i)}) \quad (10)$$

假设各次打击击中飞机的概率和击中的情况下杀伤飞机的概率相等,均为 P_H 和 $P_{K/H}$,则

$$P_K^{(j)} = P_H P_{K/H} \quad 1 \leq j \leq i \quad (11)$$

进一步得到

$$P_{S/E}^{(i)} = (1 - P_H P_{K/H})^i \quad (12)$$

2.3 一对一遭遇的飞机生存力

结合式(7)和式(12),可得一对一遭遇情形下飞机的生存概率为

$$P_S = \sum_{i=0}^M P_E^{(i)} P_{S/E}^{(i)} = e^{-(t_2-a)s} +$$

$$(1 - e^{-[t_2 - a - (M-1)b]s})(1 - P_H P_{K/H})^M + \sum_{i=1}^{M-1} (e^{-(t_2 - a - ib)s} - e^{-[t_2 - a - (i-1)b]s})(1 - P_H P_{K/H})^i \quad (13)$$

由式(13)可以看出,飞机生存概率可以表示为平均探测时间 $1/s$, 一次打击杀伤飞机的概率 $P_H P_{K/H}$, 飞机进入、脱离威胁攻击范围的时刻 t_1 和 t_2 , 跟踪、开火时间 a , 重新装弹、开火时间 b 的函数。该模型是一对一遭遇情形生存力评估的解析模型,可用于估算飞机的生存概率,不需编程即可计算。

3 算例及分析

3.1 一对一遭遇飞机的生存力计算

如图 1 所示,假设某一执行低空任务的固定翼飞机与某一防空高炮遭遇,该高炮的探测半径为 18 km,攻击半径为 4 km,在探测范围内,高炮对目标的平均探测时间为 10 s,跟踪、开火时间为 8 s,重新装弹、开火时间为 3 s;飞机的飞行高度为 500 m,当地声速为 340 m/s,飞机的平均飞行速度为 500 m/s, A, B, C 是其航路上的 3 点,飞机在点 A 进入高炮探测范围,在点 B 进入高炮攻击范围,在点 C 脱离高炮的攻击范围。AB 段航程为 10 km, BC 段航程为 7 km。假设一次打击中飞机的概率为 0.4,在击中飞机的条件下,杀伤飞机的概率为 0.5。

由高炮对目标的平均探测时间为 10 s,可得参数 $s = 0.1$,从而高炮探测到飞机的时间分布为: $f(t) = 0.1e^{-0.1t}$;以飞机进入高炮探测范围的时刻作为 0 时刻,根据 AB 段、BC 段航程以及飞行速度,可得飞机进入威胁攻击区的时刻 $t_1 = 20$ s,飞机脱离威胁攻击区的时刻 $t_2 = 34$ s;由式(3)可得 $M = 5$ 。

根据式(7)和式(12)可得飞机通过威胁空间遭受不同打击次数的概率,以及各次打击下飞机的生存概率如表 1 所示,根据式(13)可得一对一遭遇下飞机的生存概率 $P_S = 0.415$ 。

表 1 打击次数以及各次打击下飞机的生存概率

Table 1 Number of shots and aircraft survival probabilities						
i	0	1	2	3	4	5
$P_E^{(i)}$	0.074	0.025	0.035	0.047	0.063	0.750
$P_{S/E}^{(i)}$	1.00	0.80	0.64	0.51	0.41	0.33

3.2 参数对生存力的影响讨论

基本假设与 3.1 节一样,分两种情况讨论不同参数的变化对生存力的影响:

(1) 飞机自身特性(可探测性、性能和易损性等)的变化对生存概率的影响。

飞机可探测性的高低在该模型中可以用平均探测时间的变化来表示,飞机性能以及易损性的高低可以用一次打击的杀伤概率来表示。如果将平均探测时间、一次打击的杀伤概率看做变量,其余参数不变,可以方便地得到飞机生存概率随它们变化的曲线,如图 2 所示。

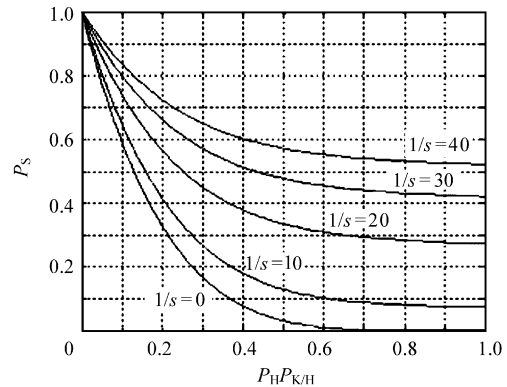


图 2 P_S 随 $1/s, P_H P_{K/H}$ 的变化
Fig. 2 P_S vs $1/s$ and $P_H P_{K/H}$

由图 2 可以看出生存概率随平均探测时间的增大而增大,随一次打击杀伤概率的增大而减小。针对不同飞机设计方案的平均探测时间和一次打击的杀伤概率的组合,通过该图可以比较其一对一遭遇的生存概率,进一步指导飞机高生存力增强设计。

(2) 飞机作战战术的变化对生存概率的影响。

飞机在作战中可能采取不同的战术,可用飞机在威胁攻击区内停留时间 $t_2 - t_1$ 的变化来表示飞机战术的变化。如果将 $t_2 - t_1$ 看做变量,其他参数不变,则可得到飞机生存概率随停留时间变化的曲线,如图 3 所示。

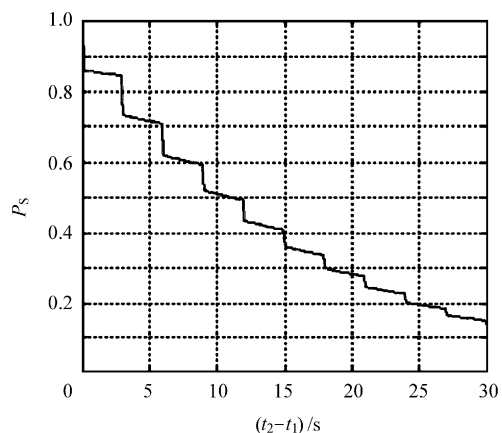


图 3 P_S 随 $t_2 - t_1$ 的变化
Fig. 3 P_S vs $t_2 - t_1$

由图3可以看出生存概率随飞机在威胁攻击区内停留时间的增大而减小。图3可用于指导飞机高生存力战术的选取。

4 结 论

给出了一种一对一遭遇飞机生存力评估模型,该模型具有以下特点:①不同于一般的模拟模型,该模型是飞机生存力评估的解析模型;②该模型考虑了探测事件的发生时间对开火、击中以及杀伤事件的影响;③该模型中打击次数是一个随机变量,并推导出了该打击次数的概率分布。

根据该模型,不仅可以计算一对一遭遇飞机生存概率,而且可以方便地绘制生存力随各个参数变化的曲线,而为了得到同样的曲线,模拟的方法则需要大量的运算。通过模型曲线可以分析各参数对飞机生存力的影响,进一步用于飞机设计方案评估以及高生存力战术快速选取。算例结果和分析表明,该模型计算简便、合理有效。

参 考 文 献

- [1] GJB/Z 202-2001. 飞机非核生存力通用指南[S]. 北京:国防科工委军标出版发行部, 2002.
GJB/Z 202-2001. General guide for aircraft nonnuclear survivability[S]. Beijing: National Defense Council of Science and Industry Military Standard Press, 2002. (in Chinese)
- [2] MIL-HDBK-336-1. Survivability aircraft nonnuclear general criteria[S]. Washington D C: Dept of Defense, 1988.
- [3] Ball R E. The fundamentals of aircraft combat survivability analysis and design[M]. 2nd ed. Reston: AIAA, 2003.
- [4] SURVIAC. ALARM—advanced low altitude radar model [EB/OL]. (2008-01-08) [2008-01-09]. <http://www.bahdayton.com/surviac/alarm.htm>.
- [5] SURVIAC. RADGUNS—radar-directed gun system simulation [EB/OL]. (2008-01-08) [2008-01-09]. <http://www.bahdayton.com/sur-viac/radguns.htm>.
- [6] SURVIAC. ESAMS—enhanced surface-to-air missile simulation [EB/OL]. (2008-01-08) [2008-01-09]. <http://www.bahdayton.com/sur-viac/esams.htm>.
- [7] SURVIAC. TRAP—trajectory analysis program [EB/OL]. (2008-01-08) [2008-01-09]. <http://www.bahdayton.com/surviac/trap.htm>.
- [8] Huang J, Wu Z, Xiang J W. Assessment of aircraft combat survivability enhanced by combined radar stealth and onboard electronic attack[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2000, 17(2): 150-156.
- [9] 马东立,张考. 雷达散射截面对飞机生存力的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 1998, 24(5): 538-541.
Ma Dongli, Zhang Kao. Effect of radar cross section on aircraft survivability[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1998, 24(5): 538-541. (in Chinese)
- [10] 高宏建. 飞机探测敏感性评估系统中的基本模型研究[D]. 西安:西北工业大学航空学院, 2002.
Gao Hongjian. Basic model research of aircraft susceptibility assessment[D]. Xi'an: School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, 2002. (in Chinese)
- [11] Pei Y, Song B F, Han Q. A generic calculation model for aircraft single-hit vulnerability assessment based on equivalent target[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2006, 19(3): 183-189.
- [12] Pei Y, Song B F, Han Q. New method for calculating aircraft equivalent single vulnerable area[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2006, 19(3): 190-196.
- [13] Hall D H. Integrated survivability assessment (ISA) [J]. Aircraft Survivability—Survivability Through Modeling and Simulation, 2004, Fall: 20-23.
- [14] Wand K, Wilson R J T. MATADOR: an analytic model of a stochastic tank duel[J]. The Journal of the Operational Research Society, 19187, 38(6): 545-551.
- [15] Przemieniecki J S. Mathematical methods in defense analysis[M]. 2nd ed. Reston: AIAA, 1994: 277-282.
- [16] 徐培德,余滨,马满好,等. 军事运筹学基础[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 2003: 46-52.
Xu Peide, Yu Bin, Ma Manhao, et al. The fundamental of military operation research[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2003: 46-52. (in Chinese)

作者简介:

王旭(1982—) 男,博士研究生。主要研究方向:飞行器总体设计,生存力/敏感性评估。

E-mail: wwangxxu@mail.nwpu.edu.cn

宋笔锋(1963—) 男,博士,教授,博士生导师。主要研究方向:飞行器多学科优化设计,微型飞机设计和飞行器生存力,可靠性维修性与保障性研究。

Tel: 029-88495914

E-mail: bfsong@nwpu.edu.cn

(责任编辑:徐晓)