

## 基于概率的平行独立仪表进近二维告警算法

程 擎, 梅静娴

(中国民用航空飞行学院, 四川 广汉 618307)

**摘要:** 研究了平行独立仪表进近中基于概率的二维告警算法。针对平行独立仪表进近传统告警算法存在模式固定、多余告警和延迟告警, 导致告警作用不佳且飞行效率降低等问题, 提出一种新的基于概率的二维告警算法。该算法利用蒙特卡罗仿真得到碰撞概率和碰撞概率等于危险水平的告警区域, 结合碰撞曲线来规定告警条件。以某机场为飞行环境, 选取不同的飞机位置验证算法。结果表明, 利用改进算法有效消除了多余告警和延迟告警, 可为进一步的告警算法优化提供参考。

**关键词:** 仪表进近; 平行进近; 碰撞概率; 碰撞曲线; 告警极限值

**中图分类号:** TP301.6

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-637X(2015)08-0093-04

## Probability-Based 2D Alerting Algorithm for Independent Parallel Instrument Approach

CHENG Qing, MEI Jing-xian

(Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

**Abstract:** A probability-based two-dimensional (2D) alerting algorithm in independent parallel instrument approach procedure is studied. In view of the problems that there exist fixed modes, extra and delayed alarms in traditional algorithm for independent parallel instrument approach, which may bring poor alerting performance and reduce flight efficiency, a new 2D alerting algorithm is proposed based on probability. This algorithm uses Monte Carlo simulation to obtain the collision probability and the alerting region, in which the collision probability equals to the danger level, to define the alerting condition in combination of the collision curve. Taking a certain airport as the flight environment, different locations of aircraft are selected to verify this algorithm. The results demonstrate that the improved algorithm can effectively eliminate extra and delayed alarms, which can provide a reference for further optimization of the alerting algorithm.

**Key words:** instrument approach; parallel approach; collision probability; collision curve; alert threshold

### 0 引言

近年来,随着我国航班流量的迅猛增长,越来越多的繁忙机场修建了两条或两条以上的平行跑道,相比单跑道来说使用策略灵活,提升容量显著。随之而来的就是运行模式的改变,多跑道独立运行是一种更先进、更高效的运行模式,这是适应业务量快速增长的必然要求,也是提高机场运行效率、提升机场服务质量的必然要求。但是,由于平行跑道同时运行程序比单跑道更为复杂,需要空中管制单位和机组人员更加协调,对于导航监视设施要求也更为严格,以获得安全和效

率双赢的局面。

为此,研究平行独立仪表进近的告警算法,对于提高飞行流量和保障飞行安全有着极其重要的意义。本文在某机场非侵入区(NTZ)和正常运行区(NOZ)宽度的基础上,设计两条平行跑道的基于概率的二维告警算法。根据我国《平行跑道同时仪表运行管理规定》,在考虑限制因素和技术误差后,给出NTZ和NOZ的宽度<sup>[1]</sup>,并且将该数据应用到新的基于概率的二维告警算法中,经过取点计算来检验算法性能,从而保障双跑道独立平行进近的飞行安全,这对于优化未来多跑道独立平行进近的告警策略具有重要的作用<sup>[2]</sup>。

### 1 某机场NTZ和NOZ划设

某机场有东西两条跑道,西跑道是02L或20R,长

收稿日期:2014-09-28

修回日期:2014-10-09

作者简介:程 擎(1972—),男,四川广汉人,教授,硕士,研究方向为民航空管监视系统和空管自动化、新一代航行系统、领航等。

度为 3600 m,宽度为 45 m,东跑道是 02R 或 20L,长度为 3800 m,宽度为 60 m。东跑道与西跑道间距 2200 m;西跑道南端相对东跑道南端向南错开 400 m;西跑道北端相对东跑道北端向南错开 600 m。

NTZ 是指位于两条跑道中心线延长线之间特定的空域。划设 NTZ 应当考虑探测区 DZ、延时或者反应时间 DR、修正区 CZ、侧向轨迹间隔 LTS 等方面的因素<sup>[1]</sup>,该机场 NTZ 的宽度为 815 m。NOZ 是指从仪表着陆系统(IIS)航向道中心线向两侧延伸至指定范围内的空域。NOZ 的宽度取决于导航系统的精度和航空器航迹保持的精度<sup>[1]</sup>。根据机场平行跑道数据可计算出平行跑道  $\frac{1}{2} \cdot N_{NOZ1} = 692 \text{ m}, \frac{1}{2} \cdot N_{NOZ2} = 693 \text{ m}$ 。

## 2 基于概率的二维告警理论

飞机在平行进近时的距离比飞行的任何其他阶段近得多,一架飞机背离航向转向平行流中另一架飞机的可能性较大。为了提高安全性,告警系统需要警告这些故障飞机的机组人员,告警系统的目标就是当允许平行进近实施时确保飞机间充足的间隔<sup>[3]</sup>。针对此问题,本文设计了基于概率的二维告警算法,提出了更合适的告警极限值,相比传统的精确跑道监视 PRM 告警系统更加精确和高效。

PRM 系统的告警极限值是 NTZ 的边界,提供了 249/250 的安全水平和 1/250 的危险水平。基于概率的算法允许依据任何一个将要发生的概率来管理多余告警和碰撞的数量,其告警极限值能被设计在碰撞概率之下直到多余告警的概率上升到不再被接受的水平上。基于概率的系统被设计成其危险水平接近于 PRM 的危险水平 0.001,相比 PRM 系统 0.004 的危险水平更能保障飞行安全<sup>[4]</sup>。

本文中受到威胁的飞机称为 A 飞机,这架飞机装有告警系统并且对告警有规避飞行反应,另一架飞机为闯入飞机称为 B 飞机,假定 B 飞机不能对 A 飞机的飞行做出反应。本文在二维条件下,仅仅考虑 A 飞机与 B 飞机同高度的情况,不考虑最初的相对高度以及爬升率。A 飞机与 B 飞机在飞行过程中所涉及到的参数如图 1 所示,假设跑道中心线是 A 飞机拟定的路径,任何偏离路径的情况都将被修正。为了简化随后的图,本文中,A 飞机总是出现在坐标轴的原点, $x, y$  分别为 B 飞机到 A 飞机跑道中心线的横向和纵向距离, $V_A$  和  $V_B$  分别为 A 飞机和 B 飞机的空速, $\Psi$  为 B 飞机的航向, $\Phi$  为 B 飞机的坡度角。

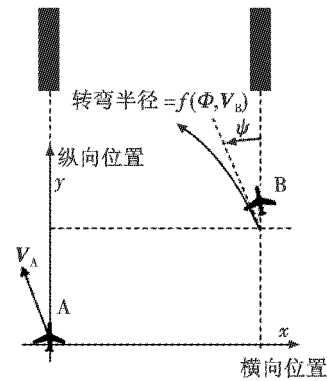


图 1 A 飞机与 B 飞机平行进近

Fig. 1 Parallel instrument approach of aircraft A and aircraft B  
所有这些测量值的结合形成了状态矢量

$$\bar{X} = (x, y, \Psi, \Phi, V_A, V_B) \quad (1)$$

对于 A 飞机来说, $\bar{X}$  的值可以通过 ADS-B 或者其他监视技术获得,告警算法可通过该值推断出飞机未来的轨迹。由  $\bar{X}$  规定的隐含的  $P(C|M)$  是基于概率的算法的核心,其表示 A 飞机在意识到 B 飞机对其有威胁,做出转弯爬升避让飞行后与 B 飞机的碰撞概率,本文中  $P(C|M)$  指  $P(C|$ 转弯爬升 $)$ 。由于飞机的位置是不断变化的,上述参数也在不断变化中,无法实时计算出  $P(C|M)$ 。因此,将所有参数测量值的状态矢量进行存储,利用蒙特卡罗仿真技术预测碰撞事件的概率  $P(C|$ 转弯爬升 $)$ <sup>[5]</sup>,假定当 A 飞机执行指定的规避飞行时,B 飞机是以恒定转弯率飞行,并且蒙特卡罗仿真过程中考虑到了测量误差和随机误差,通过多点测量值的集合来仿真出大范围的  $P(C|$ 转弯爬升 $)$ ,任意情形的碰撞概率计算能用插值法来完成<sup>[5]</sup>,如此一来,告警极限值在状态测量值实时状态下可以调出使用。当  $P(C|$ 转弯爬升 $)$  等于最大可接受的危险水平时,该值便为系统规定的告警极限值,该告警算法得到的告警极限值如图 2 所示。

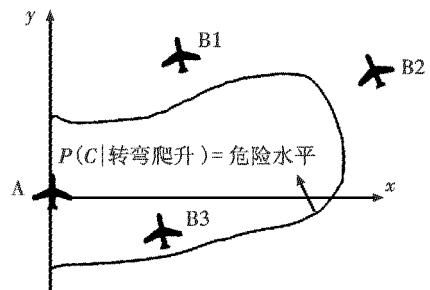


图 2 告警极限值

Fig. 2 Alerting threshold

由上述理论可知, B1 飞机不会导致告警,尽管与 A 飞机的横向间隔较小; B2 飞机,一般情况下如果不采取措施,则预计要与 A 飞机发生碰撞,但未达到告警极

限值时,管制中心有足够时间收集其轨迹信息,引导其在安全水平内采取规避措施,不会触发告警;B3 飞机会触发告警,如果 A 飞机在此时才采取规避措施,碰撞的概率比危险水平要大得多。

### 3 基于概率的二维告警算法构建

为了简化告警极限值,采用碰撞曲线模型来分析。B 飞机状态值的集合经过蒙特卡罗仿真得到概率值  $P(C| \text{转弯爬升})$ ,该概率值等于危险水平 0.001 位置的点构成等值线,即告警区域。告警区域中心规定了一条碰撞曲线,其规定了告警标准:当 B 飞机所在位置确定的范围  $L$  处于对应的限制范围内,比较 B 飞机纵向位置  $y$  和对应的碰撞曲线纵向位置  $y_{\text{curve}}$ ,两者相差在 243 m 以内,则认为 B 飞机在告警区域内,发布告警<sup>[6]</sup>。具体如图 3 所示。

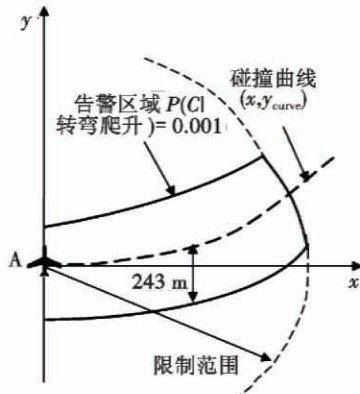


图 3 简化告警区域与碰撞曲线

Fig.3 Simplified alerting region and collision curve

基于概率的二维告警算法构建方法详细过程如图 4 所示。

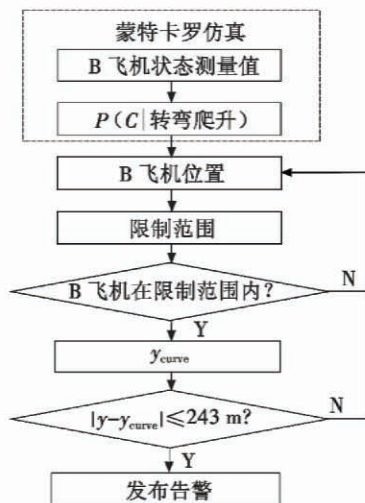


图 4 基于概率的二维告警算法流程图

Fig.4 The 2D alerting algorithm based on probability

假定 A 飞机的空速恒定为 268 km/h,当发布告警

时,A 飞机有 2 s 的反应时间,随即以 5 (°)/s 进行转弯爬升飞行避让,直至达到 30°的坡度角。为了划设平行进近的合理范围,根据仪表飞行规则,规定了 B 飞机的 5 种状态测量值范围,如表 1 所示<sup>[7]</sup>。横向距离的范围限制是基于机场 02 号和 20 号东西跑道间隔 2200 m,航向和坡度角的范围是 B 飞机具有代表性的可能的姿态。

表 1 B 飞机状态测量值

Table 1 Aircraft state measurements

| 测量值                     | 范围           | 增量  | 个数 |
|-------------------------|--------------|-----|----|
| $x/m$                   | 0 ~ 2200     | 220 | 10 |
| $y/m$                   | -6330 ~ 6330 | 211 | 60 |
| $V_B/(km \cdot h^{-1})$ | 222 ~ 334    | 28  | 4  |
| $\Psi/(^\circ)$         | -40 ~ 40     | 10  | 9  |
| $\Phi/(^\circ)$         | -20 ~ 40     | 10  | 7  |

蒙特卡罗仿真根据  $x, y, \Psi, \Phi, V_B$  的 151 200 (10 × 60 × 4 × 9 × 7) 种组合产生出 151 200 种  $P(C| \text{转弯爬升})$ ,当  $P(C| \text{转弯爬升})$  等于危险水平时设置告警极限值。

限制范围由 B 飞机的空速、航向角和坡度角共同决定,表 2 是空速为 222 km/h 时,航向角和坡度角任意组合所得到的限制范围<sup>[8]</sup>。实际情况中,其他的值可利用线性插值法得到。

表 2 限制范围

Table 2 Limited range (°)

| $\Psi$ | $\Phi$ |     |     |     |      |     |      |
|--------|--------|-----|-----|-----|------|-----|------|
|        | -20    | -10 | 0   | 10  | 20   | 30  | 40   |
| -40    | 243    | 243 | 243 | 243 | 243  | 397 | 541  |
| -30    | 243    | 243 | 243 | 243 | 328  | 441 | 561  |
| -20    | 243    | 243 | 243 | 243 | 365  | 499 | 614  |
| -10    | 243    | 243 | 243 | 330 | 437  | 555 | 658  |
| 0      | 243    | 243 | 243 | 409 | 1707 | 618 | 693  |
| 10     | 243    | 243 | 410 | 501 | 520  | 676 | 758  |
| 20     | 243    | 334 | 514 | 584 | 672  | 756 | 858  |
| 30     | 281    | 474 | 585 | 661 | 739  | 831 | 918  |
| 40     | 383    | 622 | 669 | 734 | 821  | 896 | 1015 |

$x, y$  为 B 飞机的横向和纵向位置,表示要撞到 A 飞机的位置, $\gamma$  为航向改变率,单位为 (°)/s,由 B 飞机的坡度角  $\Phi$  和空速  $V_B$  决定, $R$  为 B 飞机的转弯半径,单位为 m,初始位置到碰撞的时间为 B 飞机到达 A 飞机跑道中心线的时间  $t_c$ ,单位为 s。根据飞行程序设计中的转弯参数关系,利用下述公式可计算出飞机所在位置对应的碰撞曲线纵向位置  $y_{\text{curve}}$ <sup>[9]</sup>。

$$\gamma = \frac{6355 \tan \Phi}{\pi V_B} \quad (2)$$

$$R = \left| \frac{V_B^2}{g \tan \Phi} \right| \quad (3)$$



$$t_0 = \frac{\arccos[\frac{x}{R} - \cos \Psi] - \Psi}{\gamma} \quad (4)$$

$$y_{curve} = V_A t_0 - R |\sin(\gamma t_0 + \Psi) - \sin \Psi| \quad (5)$$

### 4 性能分析

为了对比传统告警算法与基于概率的二维告警算法的性能,采用该机场 20 号和 02 号跑道的数据进行验证,假定  $V_A = 268 \text{ km/h}$ ,  $V_B = 222 \text{ km/h}$ , B 飞机航向角  $\Psi = 40^\circ$ , 坡度角  $\Phi = 10^\circ$ , 由表 2 可知限制范围为 758 m。选取两个特殊的点,分别为 NTZ 的左右边界 B1(692,0), B2(1507,0)。其次在两条间隔为 2200 m 的跑道范围内产生 5 组随机位置(单位为 m),分别为 B3(1613,200), B4(720,200), B5(728,-200), B6(514,-200), B7(1086,300), 具体如图 5 所示。

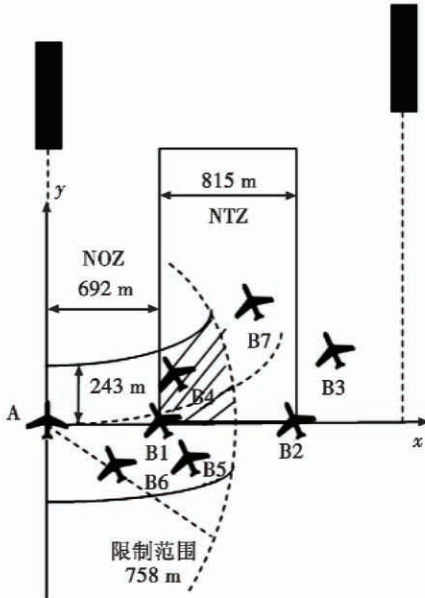


图 5 B 飞机位置示意图  
Fig.5 Location of aircraft B

飞机在不同位置所确定的范围  $L$  由式(6)确定, 具体如表 3 所示。

$$L = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (6)$$

表 3 飞机不同位置确定的范围  $L$

Table 3 The field determined by different aircraft location

| 飞机位置/m       | 范围 $L$   |
|--------------|----------|
| B1(692,0)    | 692      |
| B2(1507,0)   | 1507     |
| B3(1613,211) | 1 626.74 |
| B4(720,211)  | 750.28   |
| B5(728,-211) | 757.96   |
| B6(514,-211) | 555.62   |
| B7(1086,422) | 1 165.11 |

传统算法与本文算法的告警结果比较如表 4 所示。

表 4 告警结果

Table 4 Alerting results

| 飞机 | 传统告警算法 | 本文告警算法 |
|----|--------|--------|
| B1 | 告警     | 告警     |
| B2 | 告警     | 不告警    |
| B3 | 不告警    | 不告警    |
| B4 | 告警     | 告警     |
| B5 | 不告警    | 告警     |
| B6 | 不告警    | 告警     |
| B7 | 告警     | 不告警    |

通过图 5 和表 3、表 4 可以看出,处于 B2, B7 位置的飞机在传统算法中将会触发告警,而在本文算法的条件下其并未处于限制范围内,因此对 A 飞机不会构成威胁, A 飞机机载告警系统不会告警。这是因为传统算法的局限性较强并且不考虑实时状态,如果 B 飞机处于 NTZ 边界,其飞行参数决定的未来轨迹并不一定会对 A 飞机构成威胁,属于多余告警<sup>[10]</sup>。处于 B5, B6 位置的飞机在传统算法中由于未达到 NTZ 边界,因此不会触发告警,而在本文算法中满足告警条件。当按照传统算法 B 飞机需要飞行一定时间达到 NTZ 边界时才会触发告警,而此时 A 飞机已经来不及进行转弯爬升去避让 B 飞机,属于延迟告警。处于 NTZ 与本文算法划设的告警区域重合位置的 B1, B4 飞机位置在两种算法条件下都会触发告警, B3 飞机处于 NTZ 和限制范围外,不满足两种算法的告警条件。

由上述随机数据验证算法性能可以表明,本文算法根据飞机实时状态仿真的概率值进行划设告警区域更加合理灵活,能够对 NTZ 内外的飞机进行选择告警,解决 NTZ 内的多余告警和延迟告警。说明本文算法可对平行独立仪表进近过程中的危险碰撞较为准确及时地发布告警,相比传统算法具有一定的优越性。

### 5 结束语

在平行独立仪表进近的过程中,核心问题是如何保证两架飞机的间隔,这就涉及到在平行跑道之间告警算法的选择问题。本文针对这个问题提出了基于概率的二维告警算法,不但克服了传统算法模式固定、多余告警率和延迟告警率高的缺点,满足了多流量平行跑道的飞行安全要求。性能分析结果表明,基于概率的二维告警算法能够更加准确地对不同位置的飞机分析计算并给出不同的告警结果,从而验证了该算法的有效性,在平行独立仪表进近领域有较好的应用前景。

### 参考文献

[1] 中国民用航空总局. 平行跑道同时仪表运行管理规定[S]. 北京:中国民用航空总局,2004. (Civil Aviation

(下转第 109 页)

的设计提供了一种新思路。

### 参考文献

- [1] 杨希祥,周张,彭科. 基于 Kriging 方法的整流罩气动外形设计优化[J]. 固体火箭技术, 2014, 37(2): 167-171. (YANG X X, ZHOU Z, PENG K. Aerodynamic shape design optimization of fairing based on Kriging method[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2014, 37(2): 167-171.)
- [2] 吕培培. 基于 CFD 的民机翼身整流罩气动外形优化方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011. (LYU P P. CFD-based aerodynamic shape optimization method investigation on a civil aircraft wing-body fairing[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.)
- [3] 李明,李明高,李国清,等. 参数化驱动的高速列车头型气动外形优化设计[J]. 铁道学报, 2013, 35(11): 14-20. (LI M, LI M G, LI G Q, et al. Optimized design of parameteric-driven aerodynamic shape of high-speed EMU head-type[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(11): 14-20.)
- [4] 雷娟棉,吴甲生. 滑翔增程制导航弹气动外形设计[J]. 北京理工大学学报, 2012, 31(12): 1387-1390. (LEI J M, WU J S. Aerodynamic configuration design of gliding extended range guided bomb[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2012, 31(12): 1387-1390.)
- [5] 周志超. 无伞末敏弹气动外形设计与气动特性分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2011. (ZHOU Z C. The aerodynamic shape design and aerodynamic characteristics analysis of non-parachute terminal sensing ammunition[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2011.)
- [6] 张锡金. 飞机设计手册(第6册: 气动设计)[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002. (ZHANG X J. Handbook of aircraft design (Sixth copies: aerodynamic design) [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2002.)
- [7] 刘珍. 高速列车风挡气动特性及气动疲劳强度研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012. (LIU Z. Research on wind-shield aerodynamic characteristics and pneumatic fatigue strength of high speed train[D]. Changsha: Central South University, 2012.)
- (上接第96页)
- Administration of China. The simultaneous instrument operation management regulations on parallel runways[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2004.)
- [2] 顾正兵. 虹桥机场近距离平行跑道仪表运行方式研究[J]. 中国民航大学学报, 2010, 28(5): 21-24. (GU Z B. The research of Hongqiao Airport closely spaced parallel runways instrument operation manner[J]. Journal of China Civil Aviation University, 2010, 28(5): 21-24.)
- [3] 孙佳,田勇. 近距离平行跑道配对进近中的碰撞风险分析[J]. 哈尔滨商业大学学报, 2014, 30(2): 241-244. (SUN J, TIAN Y. Collision risk analysis in closely spaced paired approach on parallel runways[J]. Journal of Harbin University of Commerce, 2014, 30(2): 241-244.)
- [4] CARPENTER B D. A probability-based alerting logic for aircraft on parallel approach[D]. Maryland: University of Maryland at College Park, 1996.
- [5] 邵伟. 蒙特卡洛方法及在一些统计模型中的应用[D]. 济南: 山东大学, 2012. (SHAO W. The Monte-Carlo method and the application in some statistical model[D]. Ji'nan: Shandong University, 2012.)
- [6] KUCHAR J K. Methodology for alerting-system performance evaluation[J]. AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1996, 19(2): 438-444.
- [7] 李亚浩,赵刚,王传喜. 飞机碰撞检测算法的研究与设计[J]. 电子设计工程, 2011, 19(9): 86-88. (LI Y H, ZHAO G, WANG C X. Aircraft collision detection algorithm research and design[J]. Electronic Design Engineering, 2011, 19(9): 86-88.)
- [8] 张浩淼. 基于概率的飞行环境危险探测与告警算法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012. (ZHANG H M. The flight environment risk detection and alarm algorithm research based on probability[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.)
- [9] 朱代武,何光勤. 目视和仪表飞行程序设计[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2013. (ZHU D W, HE G Q. Visual and instrument flight program design[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2013.)
- [10] 安伟连. 跑道侵入冲突探测及告警算法研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2013. (AN W L. The runway intrusion conflict detection and alarm algorithm research[D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2013.)