

碳纤维线电热混凝土道面板温升速率影响因素显著性分析

张楚杰,许巍,蔡良才,李春鸣

(空军工程大学机场建筑工程系,西安,710038)

摘要 碳纤维线电热混凝土道面板的温升速率与多种因素有关,为了研究“工作电流强度”“发热线布置埋深”“发热线间距”3个因素对混凝土道面板温升速率影响的显著性,运用 ANSYS 建模进行试验并获取数据,采用正交法和响应面法进行数据分析,并通过现场试验进行验证。正交法所得埋深的 F 值为 13.634,间距的 F 值为 25.605,工作电流强度的 F 值为 14.431;响应面法所得埋深的 P 值为 0.037 5,间距的 P 值为 0.012 6,工作电流强度的 P 值为 0.015 0。通过分析可以发现3个因素对于混凝土板温升速率的影响都较为显著,且显著性大小顺序为 B (碳纤维线间距) $>C$ (工作电流强度) $>A$ (碳纤维线埋深),由 DX 软件分析得到温升速率的拟合方程: $\alpha = 2.73 - 0.077A - 0.099B + 0.096C + 0.008AB + 0.013AC + 0.01BC - 0.097A^2 + 0.028B^2 - 0.063C^2$,并由此得到碳纤维发热线间距为 80 mm,埋深为 50~90 mm,工作电流强度为 0.5~1.0 A 时,道面板温升速率满足融雪化冰要求。

关键词 仿真试验;正交法;响应面法;温升速率;碳纤维线;混凝土道面板

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.05.010

中图分类号 V351 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)05-0055-06

A Significance Analysis of Influence Factors on Carbon Fiber Heating Wire Concrete Pavement Slab Temperature Rising

ZHANG Chujie, XU Wei, CAI Liangcai, LI Chunming

(Airport Construction Engineering Department, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: The temperature rising rate of carbon fiber reinforced concrete pavement slab has relations with many factors. In order to study the significance of influence of three factors, i. e. the working current intensity, the heating wire buried depth and spacing, on the temperature rising rate of the concrete, this paper uses ANSYS to modeling to test and obtains data by adopting orthogonal method and response surface methodology to analyze, and uses field test to verify. The F value of buried depth, spacing and temperature obtained by orthogonal method is respectively 13.634, 25.605 and 14.431. The P value of three factors obtained by response surface methodology is respectively 0.0375, 0.0126 and 0.0150. The analysis shows that these three factors have a significant effect on the temperature rising rate of concrete, and the order is B heating wire spacing $> C$ working current intensity $> A$ heating wire buried depth. The fitting equation of temperature rising rate obtained by DX is: $\alpha = 2.73 - 0.077A - 0.099B + 0.096C + 0.008AB +$

收稿日期: 2017-03-20

作者简介: 张楚杰(1992—),男,江苏徐州人,硕士生,主要从事机场规划与设计研究。E-mail:1876861659@qq.com

引用格式: 张楚杰,许巍,蔡良才,等.碳纤维线电热混凝土道面板温升速率影响因素显著性分析[J].空军工程大学学报(自然科学版),2017,18(5):55-60. ZHANG Chujie, XU Wei, CAI Liangcai, et al. A Significance Analysis of Influence Factors on Carbon Fiber Heating Wire Concrete Pavement Slab Temperature Rising [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(5): 55-60.

$0.013AC+0.01BC-0.097A^2+0.028B^2-0.063C^2$, thus it can also be obtained that the spacing of heating wire is 80 mm, buried depth is 50~90 mm, working current intensity is 0.5~1.0 A, and the temperature rising rate meets the requirements of pavement slab deicing and snow melting.

Key words: simulation test; orthogonal method; response surface methodology; temperature rise rate; carbon fiber wire; concrete pavement slab

碳纤维线电热混凝土道面板温升速率的影响因素有很多,其中内部因素包括碳纤维线的阻值、埋深、间距以及是否布置隔热层等;外部因素包括环境温度、风速、通电电流强度等^[1]。发热线布置深度及间距会对混凝土温度均匀性产生影响,埋深和间距的减小,会提高混凝土的温升速率^[2-4]。此外,电功率也是影响混凝土发热效果的重要因素之一,随着加热功率的增大,板面所能达到的最大温度逐渐增加^[5-6]。为了研究各个因素对于该电热混凝土温升速率的影响大小,需要进行大量的现场试验,成本高、效率低,造成人力物力的浪费,所以本文运用 ANSYS 软件模拟现场试验。

对于模拟得到的数据结果,将采用正交法和响应面法来进行分析,研究碳纤维线的间距、埋深及工作电流大小对于温升效率的影响大小。正交法是通过典型性、代表性的试验代替全面试验,具有数据需求量小、数据分布均匀的特点^[7-8],操作方便简洁,能够高效率处理多因素优化问题^[9],目前正交法被广泛运用于多种领域中^[10-12];响应面法通过数据拟合回归方程,对于多因素问题能够进行连续准确地预测并得到最优方案^[13-14],常被用于食品安全、生物科学、化学等领域的研究^[15-17],但在自发热混凝土中应用较少。

1 温升效率仿真计算

本文将运用正交法与响应面法设计试验方案,运用 ANSYS 软件进行建模并模拟试验得出数据。

1.1 模型建立

选用 Thermal Mass Solid278 为混凝土单元类型, Thermal Electric 3D Line68 为碳纤维发热线模型。混凝土道面板长度 $a=2$ m,板高 $h=30$ cm,设定混凝土板及环境初始温度 T_0 均为 -2°C ,风速设定为 2.5 m/s,参考已有的研究文献定义材料属性,混凝土密度为 $2\,500$ kg/m³,比热为 $1\,046$ J/kg·K,导热系数为 2.34 W/(m·K)^[18],碳纤维线的导热率为 0.16 W/(m·K),电热转换率为 98%,发热线的埋深 A 、间距 B 、工作电流强度 C 需根据试验方案的不同进行设定。在板面上每隔 200 mm 设置一测试点,用于反应板面的温度变化情况。混凝土板模型见图 1。

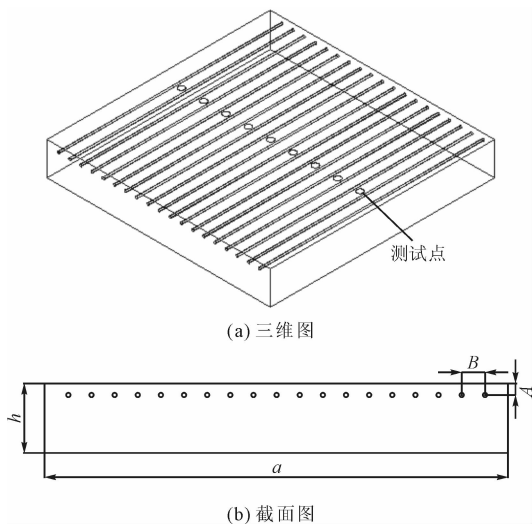


图 1 混凝土板结构图

Fig. 1 Concrete slab structure

1.2 仿真计算方案及结果

1.2.1 确定试验指标

一般认为,当板面温度达到 $2\sim 3^\circ\text{C}$ 时,即可满足融雪化冰的要求^[19],因此以升温速率 a 来作为试验指标,其计算公式为:

$$a = \frac{T - T_0}{t} \quad (1)$$

式中: $T=3^\circ\text{C}$; T_0 为传感器所测得的初始温度,单位为 $^\circ\text{C}$; t 为所有测试点中最后一个测得温度达到 3°C 的点所需要的时间,单位为 h。

1.2.2 碳纤维线相关参数

为了研究碳纤维线的埋深、间距及工作电流强度 3 个因素对于混凝土板温升速率的影响大小,按照表 1 来进行不同因素组合的模拟试验。

表 1 因素水平表

Tab. 1 Factors and levels

水平	A/mm	B/mm	C/A
1	50	80	0.5
2	70	100	0.75
3	90	120	1.0

1.2.3 正交法计算方案及结果

不考虑因素间的相互影响,根据四因素三水平的 $L_9(3^4)$ 正交表修订模型的相关参数并进行试验,结果见表 2。

表 2 正交计算结果

Tab. 2 Results of orthogonal design

序号	因素			试验指标		
	A	B	C	$T_0/^\circ\text{C}$	t/h	$\alpha/(^\circ\text{C}\cdot\text{h}^{-1})$
1	1	1	1	-2.00	1.833	2.654
2	1	2	2	-2.00	2.017	2.479
3	1	3	3	-2.00	1.950	2.751
4	2	1	2	-2.00	1.817	2.678
5	2	2	3	-2.00	1.867	2.272
6	2	3	1	-2.00	2.200	2.631
7	3	1	3	-2.00	1.900	2.205
8	3	2	1	-2.00	2.267	2.238
9	3	3	2	-2.00	2.233	2.301

1.2.4 响应面法计算方案及结果

通过 Design Expert 8.0.6 (DX) 软件,采用 BBD 四元二次通用旋转组合进行响应面试验,结果见表 3。

表 3 响应面计算结果

Tab. 3 Results of response surface methodology

序号	A/mm	B/mm	C/mm	α
1	90.00	100.00	0.50	2.419
2	90.00	80.00	0.75	2.727
3	70.00	120.00	1.00	2.803
4	90.00	120.00	0.75	2.459
5	50.00	100.00	0.50	2.608
6	50.00	100.00	1.00	2.702
7	50.00	120.00	0.75	2.586
8	50.00	80.00	0.75	2.884
9	70.00	100.00	0.75	2.830
10	70.00	100.00	0.75	2.631
11	70.00	100.00	0.75	2.678
12	70.00	100.00	0.75	2.752
13	90.00	100.00	1.00	2.564
14	70.00	100.00	0.75	2.777
15	70.00	80.00	1.00	2.857
16	70.00	120.00	0.50	2.479
17	70.00	80.00	0.50	2.654

2 仿真计算数据分析

2.1 正交法结果分析

根据正交试验结果建立极差和方差分析表,见表 4、表 5。从表 4 中可以看出, $R_B > R_C > R_A$,所以因素 B 布置间距对于温升速率的影响最大,其次是

因素 C 电流强度,最后是因素 A 碳纤维线埋深。在本次正交试验中,考虑温升速率这个试验指标,最佳试验方案是 A2B1C2,此方案下混凝土板达到融雪化冰温度所需时间最短,温升速率为 2.678 $^\circ\text{C}/\text{h}$ 。

通过表 5 可以看出各个因素的 F 值,通过将各因素实测 F 值与标准 F 值对比,可以得出每个因素对于温升速率影响的显著程度,如果实测值 $F >$ 标准值 $F_{0.01}$,则称该因素十分显著,记为 * * ;如果 $F_{0.01} >$ 实测值 $F > F_{0.05}$,则称其较为显著,记为 * ;如果实测值 $F < F_{0.05}$,则称其不显著。查手册可得 $F_{0.01}(2,2) = 99, F_{0.05}(2,2) = 19$,表 5 中 $F_{0.05} < F_A < F_{0.01}, F_B, F_C$ 均 $< F_{0.05}$,所以对于碳纤维线电热混凝土温升速率来说,发热线间距的影响较为显著,发热线埋深及工作电流强度的影响不显著。

表 4 极差分析表

Tab. 4 Range analysis

温升速率 α	A	B	C
k_1	2.566	2.679	2.377
k_2	2.567	2.454	2.489
k_3	2.357	2.359	2.624
R	0.208	0.323	0.246

表 5 正交试验方差分析结果

Tab. 5 Variance analysis of orthogonal design

因素	自由度	离差	均方离差	F 值	显著性
A	2	0.087	0.043	13.634	
B	2	0.163	0.081	25.605	*
C	2	0.092	0.046	14.431	
误差	2	0.006	0.003		

2.2 响应面法结果分析

通过软件 DX 对表 3 中数据进行分析,得出分析结果表 6。如果某一因素 P 值 < 0.01 ,则称该因素十分显著,记为 * * ;若 $0.01 < P$ 值 < 0.05 ,则称其较为显著,记为 * ;若 P 值 > 0.05 ,则称其不显著。可以发现,该模型 P 值为 $0.0375 < 0.05$,所以模型显著,失拟项 P 值为 $0.3841 > 0.05$,所以失拟项不显著,这说明该回归模型是准确的,可以用来预测碳纤维线电热混凝土的温升速率。发热线埋深、间距及电流强度的 P 值均小于 0.05,说明它们对温升速率的影响较显著;A 碳纤维线埋深的二次项的 P 值小于 0.05,对温升速率的影响较显著;其它项的 P 值均大于 0.05,对于温升速率的影响可以忽略。对表 5 数据进行多元二次拟合回归,得到“温升速率 α ”和“A 碳发热线埋深”“B 发热线间距”“C 发工作电流强度”的回归方程:

$$\alpha = 2.73 - 0.077A - 0.099B + 0.096C + 0.008AB + 0.013AC + 0.01BC - 0.097A^2 + 0.028B^2 - 0.063C^2$$

在响应面试验中,各项影响显著性的大小顺序为: $B>C>A$ 。

表6 响应面统计结果

Tab. 6 Statistics of response surface methodology

	平方和	自由度	均方	F	P	显著性
Model	0.26	9	0.029	4.13	0.0375	Y
A	0.047	1	0.047	6.58	0.0373	*
B	0.079	1	0.079	11.09	0.0126	*
C	0.073	1	0.073	10.27	0.0150	*
AB	2.273E-004	1	2.273E-004	0.032	0.8634	
AC	6.437E-004	1	6.437E-004	0.090	0.7726	
BC	3.729E-003	1	3.729E-003	0.52	0.4931	
A ²	0.040	1	0.040	5.60	0.0498	*
B ²	3.214E-003	1	3.214E-003	0.45	0.5236	
C ²	0.017	1	0.017	2.34	0.1700	
残差	0.050	7	7.132E-003			
失拟项	0.025	3	8.285E-003	1.32	0.3841	N
纯误差	0.025	4	6.266E-003			
总变异	0.31	16				

3 各因素显著性分析

本文运用正交法与响应面法,研究了碳纤维线埋深、间距及工作电流强度3个因素对于混凝土板温升速率影响的显著性。2种方法都得出显著性 $B>C>A$ 的结论,即对于碳纤维线电热混凝土来说,碳纤维线的间距对于混凝土的温升速率影响是最大的,其次才是电流强度与发热线的埋深。

通过正交法分析可以发现碳纤维线的埋深和工作电流强度对于温升速率的影响不大,但是在响应面法分析中,这2个因素的影响较为显著,这是由于:①正交试验是对单一的试验点进行分析,不具有连贯性;②本文所选取的碳纤维埋深及电流强度范围处于合理范围之内,从而造成模拟出的数据差别不大。响应面法将试验得出的数据进行拟合回归得到一个连续的预测模型,在试验过程中连续的对各因素各个水平进行分析,并且考虑到因素之间的相互影响,因而与正交试验相比,响应面法所得结果更具可靠性,通过响应面法分析,可以认为埋深与电流强度对于温升速率的影响是较为显著的,在今后的试验当中,推荐埋深取值为50~90 mm,电流强度为0.5~1.0 A。

通过2种方法的分析,发现碳纤维发热线的布置间距对于温升速率影响较为显著,并且在间距80

mm时,获得最大的温升速率。间距越小,碳纤维线的数量越多,对于减小电功率、增加发热效果有利,且经研究,发热线间距越小,板内及板面温度均匀性越好,有利于减小温度应力^[20]。本文所用最佳碳纤维线间距为80 mm。

发热线间距、埋深和工作电流的选取还需综合考虑多种因素,在确保混凝土板面温度均匀性良好的前提下,应布置尽量减少发热线的使用以降低工程造价,即采用较大的发热线间距;尽量减小埋深,从而提高板面的温升速率和能源利用率。

4 实例验证

为了验证分析结果的准确性,2015年冬在辽宁鞍山开展了碳纤维发热线混凝土板冬季自然环境下的通电温升试验,采用发热线间距为80 mm,埋深为50 mm,工作电流强度为1.0 A,温度传感器布置位置与仿真模型测试点位置一致,现场试验如图2所示。将现场试验所得数据与数值模拟所得数据进行对比分析,如图3所示,通过比较曲线的拟合程度,对该仿真模型的准确性进行验证。

从图中可以看出,现场试验与仿真试验相比,板面中心点温度曲线更为平滑,这是因为仿真试验中假定风速以及环境温度是一恒定值,两种试验所得温度的最大差值为1.18℃,总体来说仿真试验所模

拟的道面板温升情况与现场试验基本保持一致,可以认为之前的分析结果是准确的。



图2 现场试验图

Fig. 2 Field test picture

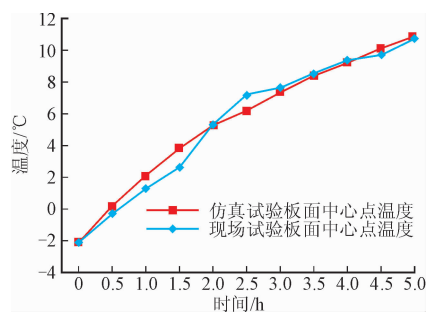


图3 试验值与模拟值的对比

Fig. 3 Comparison between experimental and simulated values

5 结论

1)通过正交法与响应面法分析,认为碳纤维线间距、埋深及工作电流强度对于混凝土板温升速率影响较为显著;

2)3种因素的显著性大小顺序为: B (碳纤维间距) $>C$ (工作电流强度) $>A$ (碳纤维埋深);

3)温升速率的拟合方程为 $\alpha=2.73-0.077A-0.099B+0.096C+0.008AB+0.013AC+0.01BC-0.097A^2+0.028B^2-0.063C^2$,推荐碳纤维发热线间距为80 mm,埋深为50~90 mm,工作电流强度为0.5~1.0 A;

4)本文只考虑了发热线埋深、布置间距、电流强度,像发热线线型、回路方式、风速等因素对混凝土板发热效果的影响还有待进一步研究。

参考文献(References):

[1] 赵宏明. 布置碳纤维发热线的混凝土路面及桥面融雪化冰试验研究[D]. 大连:大连理工大学, 2010.
ZHAO H M. Experimental Investigation on Concrete Pavement and Bridge Deck Deicing with Carbon Fiber Heating Wire [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese)

[2] 李春鸣, 许巍, 李强, 等. 连续式碳纤维自发热机场

道面温升规律试验研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2015(11): 64-70.

LI C M, XU W, LI Q, et al. Experimental Study on Temperature Rising Law of Continuous Carbon Fiber Heating Airport Pavement [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2015(11): 64-70. (in Chinese)

[3] 杨飞. 碳纤维发热线用于道路除冰雪的技术研究[D]. 西安:长安大学, 2014.

YANG F. Research on Carbon Fiber Heating Wire for Pavement Deicing [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014. (in Chinese)

[4] 陈鸿毅, 梁增洁, 陈绍辉, 等. 麻昭高速公路内置碳纤维发热线桥面融冰技术应用[J]. 公路交通科技, 2015(4): 90-92.

CHEN H Y, LIANG Z J, CHEN S H, et al. Built-in Carbon Fiber Wire Deicing Technology Applied in Ma Chao Highway [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015(4): 90-92. (in Chinese)

[5] 车广杰, 吴智敏, 王松根. 布置碳纤维发热线混凝土的电热性能研究[J]. 青岛理工大学学报, 2008, 29(6): 30-36.

CHE G J, WU Z M, WANG S G. Study on Electro-Thermal Properties of Carbon-Fiber Electric-Heating-Line Concrete [J]. Journal of Qingdao Technological University, 2008, 29(6): 30-36. (in Chinese)

[6] 陈绍辉, 彭余华, 鲍梦捷. 内置碳纤维发热线的融冰桥面设计与施工[J]. 筑路机械与施工机械化, 2016(2): 34-40.

CHEN S H, PENG Y H, BAO M J. Design and Construction of Deicing Deck with Built-in Carbon-fiber Heating Wires [J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2016(2): 34-40. (in Chinese)

[7] 王树源, 李晏, 张毅科. 混凝土正交试验结果极差分析与方差分析方法对比[J]. 建材发展导向, 2016(12): 44-48.

WANG S Y, LI Y, ZHANG Y K. Comparison of Range and Variance Analysis of the Results of Orthogonal Design [J]. Development Guide to Building Materials, 2016(12): 44-48. (in Chinese)

[8] 李玉荣, 杨敏. 纤维混凝土正交试验方案设计分析[J]. 科技咨询, 2011(21): 70.

LI Y R, YANG M. Design and Analysis of Orthogonal Design for Fiber Reinforced Concrete [J]. Science and Technology Information, 2011(21): 44-48. (in Chinese)

[9] 刘瑞江, 张业旺, 闻崇炜, 等. 正交试验设计和分析方法研究[J]. 实验技术与管理, 2010, 27(9): 52-55.

LIU R J, ZHANG Y W, WEN C W, et al. Study on

- the Design and Analysis Methods of Orthogonal Experiment [J]. *Experimental Technology and Management*, 2010, 27(9): 52-55. (in Chinese)
- [10] FANGH S, TIAN J, WANG S, et al. Numerical Optimization of Czochralski Sapphire Single Crystal Growth Using Orthogonal Design Method [J]. *Crystal Research and Technology*, 2014, 49(5): 323-330.
- [11] ABUD-ARCHILA M, VÁZQUEZ-MANDUJANO D G, RUIZ-CABRERA M A, et al. Optimization of Osmotic Dehydration of Yam Bean (*Pachyrhizus Erros*) Using an Orthogonal Experimental Design [J]. *Journal of Food Engineering* 2008, 84(3): 413-419.
- [12] MUNOZ B, LESSER V M, RAMSEY F L. Design-based Empirical Orthogonal Function Model for Environmental Monitoring Data Analysis [J]. *Environmetrics*, 2010, 19(8): 805-817.
- [13] 牟会荣, 陈昆, 王晓岚, 等. 正交试验法与响应面法在桑叶黄酮提取工艺优化中的应用和比较 [J]. *江苏科技大学学报(自然科学版)*, 2016, 30(1): 88-93.
- MOU H R, CHEN K, WANG X L, et al. Comparison of Orthogonal Design and Response Surface Methodology Used to Optimization of Flavonoids Extraction from Mulberry Leaves [J]. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2016, 30(1): 88-93. (in Chinese)
- [14] 王艳红, 贾桂燕, 李丽阳, 等. 响应面法在生物分离工程实验课程中的应用——以牛血清免疫球蛋白的盐析沉淀为例 [J]. *安徽农学通报*, 2012, 18(23): 166-172.
- WAND Y H, JIA G Y, LI L Y, et al. Application of Response Surface Methodology in Experiment of the Engineering of Biological Separation-Salt Precipitation of Immunoglobulin from Bovine Serum [J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2012, 18(23): 166-172. (in Chinese)
- [15] GOMES T, BARRADAS C, DIAS T. Optimization of Mead Production using Response Surface Methodology [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2013, 59(89): 680-686.
- [16] AKTAS N. Optimization of Biopolymerization Rate by Response Surface Methodology (RSM) [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2005, 37(4): 441-447.
- [17] SUMAIRA N, LIK-VOON K, LIP Y C. Optimization of Phospholipid Nanoparticle Formulations Using Response Surface Methodology [J]. *Journal of Surfactants and Detergents*, 2016, 19(1): 67-74.
- [18] 车广杰. 碳纤维发热线用于路面融雪化冰的技术研究 [D]. 大连:大连理工大学, 2008.
- CHE G J. Study on the Technology of Carbon Fiber Heating Wire for Deicing [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [19] 赵宏明, 吴智敏, 车广杰. 碳纤维发热线布置于路面融雪化冰间距研究 [J]. *混凝土*, 2010(3): 142-144.
- ZHAO H M, WU Z M, CHE G J. Interval Design of Carbon Fiber Heating Wire for Pavement Deicing [J]. *Concrete*, 2010(3): 142-144. (in Chinese)
- [20] 李春鸣. 连续式碳纤维自发热机场混凝土道面融雪化冰技术研究 [D]. 西安:空军工程大学, 2015.
- LI C M. Study on Deicing Technology of Continuous Carbon Fiber Self Heating Airport Concrete Pavement [D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2015. (in Chinese)

(编辑: 姚树峰)