

考虑传感器故障检测能力的 PHM 系统传感器 优化配置方法

朱喜华¹, 李颖晖¹, 侯世芳², 晏海波³

(1. 空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038; 2. 陕西飞机工业集团飞机设计研究院, 汉中 723213;
3. 中国人民解放军 95903 部队 89 分队, 武汉 430331)

摘 要: 传感器优化配置是航空航天设备 PHM 系统功能得以有效实现的基础和保证。针对目前传感器配置研究中未考虑传感器实际属性的问题,建立了考虑传感器故障检测能力的 PHM 系统传感器优化配置模型。首先分析了系统故障-传感器相关性矩阵的含义,将传感器的故障检测能力和相关性矩阵相结合,以概率形式描述了传感器对故障的检测性能。在此基础上根据系统的测试性指标要求建立传感器优化配置模型,并采用混沌二进制粒子群优化算法求解。仿真实例结果表明,本文建立的优化模型更加符合实际情况,配置结果更加准确和可靠。

关键词: 传感器优化配置; 故障检测能力; 传感器-故障相关性矩阵; 二进制粒子群算法; 混沌

中图分类号: V474 文献标识码: A 文章编号: 1000-1328(2013)09-1253-06

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2013.09.011

Sensor Optimization Placement Method for PHM System Taking the Fault Detectability of the Sensor into Account

ZHU Xi-hua¹, LI Ying-hui¹, HOU Shi-fang², YAN Hai-bo³

(1. School of Aeronautics and Astronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;
2. Aircraft Design and Research Institute, Shaanxi Aircraft Industry Group, Xi'an 723213, China;
3. 89 Element, Unit 95903 of Chinese People's Liberation Army, Wuhan 430331, China)

Abstract: Sensor optimization placement is foundation and guarantee for a PHM system function's effective implementation for aerospace equipments. Considering the problem that the sensors' practical attributes are ignored in the actual research on sensor placement, the sensor optimization placement model for the PHM system taking the fault detectability of the sensors into account is proposed. First, the meaning of the fault-sensor relativity matrix is analyzed, the sensor's fault detectability and the relativity matrix are combined, and then the sensor's fault detection performance is described in the form of probability. Based on this, the sensor optimization placement model is founded according to the testability index requirements of the system, and the chaos binary Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm is used to solve the problem. The results of a simulation example show that the optimization model is closer to the practice, and the placement results are more accurate and reliable.

Key words: Sensor optimization placement; Fault detectability; Fault-sensor relativity matrix; Binary PSO algorithm; Chaos

0 引 言

传感器优化配置是系统测试性设计的重要内

容,也是故障预测与健康管理(Prognostics and Health Management, PHM)系统的基础^[1],对 PHM 系统功能的实现具有至关重要的作用。传感器优化

配置需要解决以下两个问题^[2]:(1) 在保证系统故障覆盖和辨识的前提下,确定需要采用的传感器的类型和数目;(2) 对选定传感器的布局进行优化,其优化准则是在保证系统具有较高可靠性的前提下具有较好的检测性能。从理论上讲,传感器数量越多所获取的系统性能参数就越多,对系统健康状态的描述就越准确越全面。然而对于航空航天设备PHM系统这样的大型复杂系统,其监测变量成千上万,由于结构特点和经济因素等原因的限制,不可能对所有变量都安装传感器进行测量。此外,传感器的安装和布局方式可能会对设备的工作状态产生影响。因此,在满足PHM系统测试性指标要求的条件下,研究其传感器优化配置的理论和方法,选择在其最关键的位置配置合适数量的传感器,具有十分重要的理论意义及工程实用价值。

近年来,国内外学者对传感器优化配置问题开展了广泛的研究。BHUSHAN等人^[3]提出了基于符号有向图(SDG)在可靠性准则下的传感器分布设计问题,其设计思想是从系统可靠性最薄弱的环节入手,以解决系统整体的可靠性问题;Bagajewica^[4]提出了一个混合整数线性规划(Mixed Integer Linear Programming, MILP)模型以解决传感器的选择问题,但是没有考虑传感器故障的影响;清华大学的杨帆^[5]研究了利用概率符号有向图(SDG)模型来描述大规模复杂系统故障检测的可靠性问题,并针对系统中各种传感器的不同故障概率,分析传感器的选择和分布对故障检测可靠性的影响;哈尔滨工业大学的徐敏强^[6]针对某卫星一次电源系统,提出了一种基于可观测性和可靠性的传感器分布优化设计方法。

以上对于传感器优化配置的研究都没有考虑传感器自身的故障检测性能,都是假设传感器正常工作能以100%的概率对相应的故障进行检测,而这种假设是不符合实际情况的。实际工作过程中,传感器也有一定的故障率,其故障检测能力除受自身性能的影响外,还与环境因素密切相关,是各种因素综合作用的结果。本文在他人研究的基础上,在建立优化模型时把传感器的故障检测性能考虑在内,以增加传感器优化配置结果的准确性和可靠性,并以阿波罗号发射前的检测为例进行了仿真验证。

1 系统故障 - 传感器相关性矩阵

PHM系统状态监测和故障诊断的质量很大程度上依赖于传感器所采集的信息,如果传感器配置不当,可能导致某些故障无法检测或对其不敏感,以致造成严重后果,因此传感器的配置方案必须保证对设备故障状态的全部覆盖和有效辨识。这就要求对设备的故障模式具有一定的先验知识,进而基于设备的故障模式分析进行传感器优化配置,设备的故障模式可以通过对其进行故障模式影响及危害分析(Failure Modes, Effects and Criticality Analysis, FMECA)得到。为实现对设备故障模式的检测和辨识,首先需要建立故障模式集合与传感器集合之间的相关性矩阵。

设某系统有 m 种故障模式,可供选择的传感器测量信号有 n 类,则该系统的故障 - 传感器相关性矩阵可记为布尔逻辑矩阵 $D = [d_{ij}]$,其中 $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$ 。矩阵的行表示故障模式,列表示传感器类型,如表1所示。

表1 故障 - 传感器相关性矩阵

Table 1 Fault-sensor relative matrix

	S_1	S_2	S_3	...	S_n
f_1	1	1	0	...	0
f_2	0	1	0	...	1
\vdots	\vdots	\vdots
f_m	1	0	1	...	0

表1中,元素 $d_{ij} = 1$ 表示故障 f_i 能被传感器 s_j 检测到,元素 $d_{ij} = 0$ 表示故障 f_i 不能被传感器 s_j 检测到。故障 - 传感器相关性矩阵描述了系统故障与传感器的二元相关性关系,是对复杂系统进行传感器优化配置的基础。

2 传感器故障检测能力分析

系统故障 - 传感器相关性矩阵只是粗略地描述了系统故障集和传感器集之间的简单对应关系,其元素 $d_{ij} = 1$ 可以有两种含义:(1) 传感器 s_j 能检测到故障 f_i 的发生,即二者有相关关系;(2) 当故障 f_i 发生时,传感器 s_j 检测到 f_i 的概率为1,即只要故障 f_i 发生,传感器 s_j 就能检测到。同理可得 $d_{ij} = 0$ 时的含义。显然,第一种含义更合理,第二种含义则不符合实际情况。在实际系统中,由于传感器自身的可靠

性问题及环境因素的影响,即使 $d_{ij} = 1$, 传感器 s_j 也不一定能检测到故障 f_i 的发生。

传感器对故障的检测能力取决于多种因素, 如

$$U_{ij} = \begin{cases} (1 + e^{-b(V_{ij}-c)})^{-1} (1 + e^{-g(N_j-h)})^{-1} (1 - \frac{T_{ij}}{F_{ij}})^\alpha (\frac{Y_{ij}}{F_{ij}})^\beta, & T_{ij} < F_{ij} \\ 0, & T_{ij} \geq F_{ij} \end{cases} \quad (1)$$

其中: V_{ij} 为传感器 j 对故障 f_i 的检测灵敏度; N_j 为传感器 j 的信噪比; T_{ij} 为故障 f_i 的发生时刻与传感器 j 检测到该故障的时刻之间的时间间隔; F_{ij} 为故障 f_i 发生的时刻与该故障导致系统不能正常工作时刻之间的间隔; Y_{ij} 为传感器 j 能检测到故障 f_i 的征兆

$$U_{ij} = \begin{cases} (1 + e^{-10(V_{ij}-0.5)})^{-1} (1 + e^{-(N_j-0.5)})^{-1} (1 - \frac{T_{ij}}{F_{ij}})^{0.5} (\frac{Y_{ij}}{F_{ij}})^{0.2}, & T_{ij} < F_{ij} \\ 0, & T_{ij} \geq F_{ij} \end{cases} \quad (2)$$

由于实际的传感器具有一定的故障率, 在工程实际中, 对于一些重要变量的监测需要设置传感器冗余, 即对于同一监测变量用多个传感器测量, 以提高故障检测的可靠性, 在本文的研究中不考虑冗余, 即只考虑传感器是否安装。假设各类传感器的安装数量为 $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}, q_j \in \{0, 1\}$; 各传感器的故障率为 $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$ 。综合系统故障-传感器相关性矩阵和传感器故障检测能力, 在传感器不发生故障的条件下, 当故障 f_i 发生时, 传感器 s_j 对其进行有效检测的能力为:

$$J_{ij} = d_{ij} U_{ij} \quad (3)$$

3 传感器配置优化模型的建立及求解

3.1 优化模型的建立

传感器优化配置就是在满足系统各种测试性指标要求的前提下, 选择尽可能少的传感器, 使成本最小, 同时满足系统的故障检测可靠性要求。假设系统各故障模式的先验概率集为 $P = \{p_0, p_1, \dots, p_m\}$, 且有 $\sum_{i=0}^m p_i = 1$, 其中 p_0 为正常状态的概率值。

PHM 系统要求传感器配置方案对系统所有故障模式的覆盖, 即对于每一种故障 f_i , 都要有至少一个传感器对其进行检测, 数学描述为:

$$\sum_{j=1}^n q_j J_{ij} > 0 \quad (4)$$

此外, PHM 系统对故障检测率、故障隔离率和

传感器的可靠性(故障率)、信噪比、灵敏度等。定义传感器 s_j 对故障 f_i 的检测能力如下^[7]:

的持续时间; b, c, g, h, α 和 β 为常数。由式(1)可知, 传感器的故障检测能力为(0, 1)之间的实数, 可以理解为检测的概率值。

根据经验, 典型的传感器故障检测能力可描述为如下形式:

虚警率都有一定的要求, 分别如式(5)、(6)和(7)所示^[2]:

$$\frac{\sum_{i=1}^m p_i (1 - \prod_{j=1}^n \lambda_j^{q_j J_{ij}})}{\sum_{i=1}^m p_i} \geq \gamma_{FD}^* \quad (5)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^L p_i \prod_{j=1}^n (1 - \lambda_j^{q_j J_{ij}})}{\sum_{i=1}^m p_i (1 - \prod_{j=1}^n \lambda_j^{q_j J_{ij}})} \geq \gamma_{FI}^* \quad (6)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^m [(1 - p_i) \prod_{j=1}^n \lambda_j^{q_j J_{ij}}]}{\sum_{i=1}^m [p_i \cdot (1 - \prod_{j=1}^n \lambda_j^{q_j J_{ij}})] + \sum_{i=1}^m [(1 - p_i) \prod_{j=1}^n \lambda_j^{q_j J_{ij}}]} \leq \gamma_{FA}^* \quad (7)$$

一个最优的传感器配置不仅要求能够检测到被监控系统所有的故障, 还要尽可能提高故障检测的可靠性。故障检测可靠性可以描述为: 当系统发生某种故障时, 其相关传感器至少有一个正常工作, 保证能检测到该故障的发生; 如果该故障的所有相关传感器都同时发生了故障, 则该故障不能被有效检测, 即发生漏检, 从而导致故障检测的可靠性降低。对于故障 f_i , 构造其故障检测可靠性函数如下:

$$r_i = p_i \prod_{j=1}^n \lambda_j^{q_j J_{ij}} \quad (8)$$

类似故障检测率, 用平均值来描述系统的故障检测可靠性, 该值越小, 故障检测可靠性越高, 如式

(9)所示:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^m p_i \prod_{j=1}^n \lambda_j^{q_j^{i/j}}}{\sum_{i=1}^m p_i} \quad (9)$$

对于大型复杂系统,需要安装的传感器数量极其庞大,成本是一个必须考虑的因素,主要包括传感器的购买、安装、维护,以及相应的数据采集和处理费用等。假设折算到每一个传感器的成本为 c_j ,则总的成本为:

$$C = \sum_{j=1}^n c_j q_j \quad (10)$$

PHM 系统传感器优化配置的目的是在满足系统测试性指标(故障检测率、故障隔离率等)的前提下,配置尽可能少的传感器,使系统的总成本最低,同时满足系统的可靠性要求,则优化模型为在满足约束条件(4)~(7)条件下,使目标函数(9)和(10)取最小值。

3.2 二进制粒子群算法的混沌改进

传感器优化配置是一个集合覆盖和多目标组合优化问题,属于典型的 $N-P$ 难题,许多文献都提出了相应的求解方法,如基于逻辑运算的方法、基于贪婪策略的方法、基于遗传算法的方法和基于粒子群算法等^[8-10],并在工程中得到了广泛的应用。粒子群算法(PSO)由于具有参数少、收敛速度快等优点,本文利用其改进离散形式——混沌二进制粒子群算法对传感器优化模型进行求解。

基本粒子群优化算法中各粒子按式(11)更新其速度和位置信息^[11]:

$$\begin{cases} v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 r_1^k (L_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2^k (G_{id}^k - x_{id}^k) \\ x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \end{cases} \quad (11)$$

二进制粒子群算法中的速度向量不再是位置变化,而是作为粒子位置取1或0的概率。根据速度的大小来选择粒子在对应位置上为1或0,表示该位置上是否安装传感器,其概率值可以用 sigmoid 函数来描述:

$$\text{sigmoid}(v) = \frac{1}{1 + e^{-v}} \quad (12)$$

为了防止 sigmoid 函数出现饱和,将粒子的速度设定在一定范围之内,其修改形式如下所示:

$$\text{sigmoid}(v) = \begin{cases} 0.98, & v > 4 \\ \frac{1}{1 + e^{-v}}, & -4 \leq v \leq 4 \\ 0.02, & v < -4 \end{cases} \quad (13)$$

二进制粒子群算法粒子的位置更新规律为:

$$\begin{cases} x_{id}^{k+1} = 1, & \delta_{id}^{k+1} < \text{sigmoid}(v_{id}^{k+1}) \\ x_{id}^{k+1} = 0, & \delta_{id}^{k+1} \geq \text{sigmoid}(v_{id}^{k+1}) \end{cases} \quad (14)$$

式(14)中, δ_{id}^{k+1} 为(0,1)之间的随机数。

混沌优化方法是一种新颖的优化方法,它利用混沌系统特有的遍历性特点来进行优化搜索,而且不要求目标函数具有连续和可微的性质,其基本思想是首先产生一组与优化变量相同数目的混沌变量,用类似载波的方式将混沌引入优化变量使其呈现混沌状态,同时把混沌运动的遍历范围放大到优化变量的取值范围,然后直接利用混沌变量进行搜索。

一般应用 Logistic 映射(逻辑映射)来产生混沌变量,其映射形式如下^[12]:

$$z_{k+1} = \mu \cdot z_k \cdot (1 - z_k) \quad (15)$$

其中 $\mu \in [0,4]$ 为控制变量, $z_k \in [0,1]$, $k = 0,1,2,\dots$ 。当 $\mu = 4$ 时,系统(15)完全处于混沌状态,此时,轨道布满区间 $[0,1]$,即混沌轨道在区间 $[0,1]$ 内遍历。由任意初值 $z_0 \in [0,1]$ 可迭代出一个确定的混沌时间序列 z_1, z_2, z_3, \dots 。

4 仿真实例分析

以文献[13]中阿波罗号发射前的检测为例,根据上述方法进行仿真分析。该系统有10种故障模式,可提供15个传感器测量点。假设系统的故障检测率、故障隔离率要求分别为不低于90%和85%,虚警率要求不高于5%。该系统的部分故障-传感器相关性矩阵($S_1 - S_{10}$)如表2所示,故障先验概率和各传感器成本分别见表3和表4。

根据本文的混沌二进制粒子群算法对建立的传感器优化配置模型进行求解,结果为:各传感器配置数量为 $[1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0]$,故障检测率为95.2%,故障隔离率为91.5%,虚警率为3.7%,故障检测可靠性指标为0.0368,总成本为1.1。文献[13]的配置结果为:各传感器配置数量为 $[0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 0]$,系统故障检测率100%,故障隔离率为100%,总成本为0.7。

表2 系统故障-传感器相关性矩阵

Table 2 Faults-sensors relative matrix for the system

	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}
f_1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1
f_2	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
f_3	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1
f_4	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0
f_5	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1
f_6	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1
f_7	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0
f_8	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1
f_9	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0
f_{10}	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0

表3 故障先验概率

Table 3 Prior probabilities of the faults

f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
0.0010	0.0010	0.0015	0.0010	0.0020
f_6	f_7	f_8	f_9	f_{10}
0.0010	0.0015	0.0010	0.0010	0.0015

表4 传感器成本

Table 4 Costs of the sensors

S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8
0.1	0.8	0.5	1	1	0.5	0.8	0.6
S_9	S_{10}	S_{11}	S_{12}	S_{13}	S_{14}	S_{15}	
0.3	0.8	0.4	0.9	0.7	0.3	0.6	

由仿真计算结果可知,各项性能指标都能满足系统的要求。跟文献[13]的结果对比分析得:本文方法要比文献[13]多安装传感器 S_1 和 S_9 ;故障检测率、故障隔离率结果都较文献[13]有所降低,但都能满足系统的故障诊断要求。导致这一结果的原因有:(1) 本文建模时将故障检测可靠性作为一个优化的性能指标;(2) 本文模型考虑了传感器对故障的检测性能,即传感器对故障的检测能力不是简单的0或者1,而是介于0和1之间的实数。由于考虑了传感器检测故障能力的实际属性,本文建立的模型更加符合实际情况,优化结果也更加准确和可靠。

5 结论

信息获取的完备性和准确性是 PHM 系统功能有效实现的基础。随着航空航天技术的飞速发展,航空航天设备的功能日益强大,复杂性也越来越高,为了对其工作状况和健康状态进行实时监测,需要

安装大量的传感器以采集其各种信息。大型复杂设备具有数量庞大的监测变量,对其进行有效的选择性测量显得尤为重要,这就需要在系统设计之初就对传感器的选择和配置进行全局优化,安装尽可能少的传感器对其关键变量进行监测,以满足系统的 PHM 要求。本文在参考他人研究的基础上,将传感器的故障检测能力加入优化配置模型之中,用概率的形式对传感器的故障检测性能进行描述:传感器的故障检测能力不是系统故障-传感器相关性矩阵中简单的0或者1,而是介于0和1之间的实数,具体取决于传感器的可靠性(故障率)、信噪比、灵敏度等和环境因素等多种因素。仿真实例结果说明了本文方法的可行性和准确性,对航空航天设备 PHM 系统的传感器优化配置具有参考价值。

参 考 文 献

- [1] Cheng S f, Azarian M H, Pecht M G. Sensor systems for prognostics and health management[J]. Sensors, 2010, 10(6): 5774-5797.
- [2] 杨光,刘冠军,李金国.基于故障检测和可靠性约束的传感器布局优化[J].电子学报,2006,34(2):348-351.[Yang Guang, Liu Guan-jun, Li Jin-guo. Optimal sensor placement based on various fault detectability and reliability criteria[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(2): 348-351.]
- [3] Bhusan M, Rengaswamy R. Design of sensor location based on various fault diagnostic observability and reliability criteria[J]. Computers and Chemical Engineering, 2000, 24(2): 735-741.
- [4] Bagajewica M I, Fuxman A. Cost optimal instrumentation network design and upgrade for process monitoring and fault detection[J]. AIChE Journal, 2004, 50(8): 1870-1880.
- [5] 杨帆,萧德云.故障检测的可靠性描述及传感器分布优化算法[J].应用科学学报,2006,24(2):125-130.[Yang Fan, Xiao De-yun. Reliability description of fault detection and optimization algorithm of sensor location[J]. Journal of Applied Sciences, 2006, 24(2): 125-130.]
- [6] 徐敏强,宋其江,王日新.基于可观测性和可靠性的传感器分布优化设计[J].宇航学报,2010,31(11):2618-2622.[Xu Min-qiang, Song Qi-jiang, Wang Ri-xin. Optimization design of sensors location based on fault observability and reliability[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(11): 2618-2622.]
- [7] Zhang G F. Optimum sensor localization/selection in a diagnostic/prognostic architecture [D]. Georgia: Georgia Institute of Technology, 2005.

- [8] 陈希祥, 邱静, 刘冠军. 基于混合二进制粒子群-遗传算法的测试优化选择研究[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(8): 1674-1680. [Chen Xi-xiang, Qiu Jing, Liu Guan-jun. Optimal test selection based on hybrid BPSO and GA [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(8): 1674-1680.]
- [9] 曾光, 李东旭. 空间智能桁架作动器/传感器位置优化中的遗传算法应用[J]. 宇航学报, 2007, 28(2): 461-464. [Zeng Guang, Li Dong-xu. Placement optimization of actuators/sensors of space intelligent truss using genetic algorithms [J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(2): 461-464.]
- [10] 王威远, 魏英杰, 王聪, 等. 压电智能结构传感器/作动器位置优化研究[J]. 宇航学报, 2007, 28(4): 1025-1029. [Wang Wei-yuan, Wei Ying-jie, Wang Cong, et al. Optimal investigation of sensor/actuator placement for piezoelectric smart structure [J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(4): 1025-1029.]
- [11] 石忠, 王永智, 胡庆雷. 基于多项式插值的自由漂浮空间机器人轨迹规划粒子群优化算法[J]. 宇航学报, 2011, 32(7): 1516-1521. [Shi Zhong, Wang Yong-zhi, Hu Qing-lei. A polynomial interpolation based particle swarm optimization algorithm for trajectory planning of free-floating space robot [J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(7): 1516-1521.]
- [12] 袁小芳, 王耀南. 基于混沌优化算法的支持向量机参数选取方法[J]. 控制与决策, 2006, 21(1): 111-113, 117. [Yuan Xiao-fang, Wang Yao-nan. Selection of SVM parameters using chaos optimization algorithms [J]. Control and Decision, 2006, 21(1): 111-113, 117.]
- [13] 王宏力, 张忠泉, 崔祥祥. 基于改进 PSO 算法的实时故障监测诊断测试集优化[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(4): 958-962. [Wang Hong-li, Zhang Zhong-quan, Cui Xiang-xiang. Test optimization of real-time monitoring and fault diagnosis system based on improved particle swarm optimization [J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(4): 958-962.]

作者简介:

朱喜华(1985-),男,博士生,主要研究方向为传感器优化配置、智能优化算法及其应用。

通信地址:陕西省西安市灞桥区空军工程大学航空航天工程学院飞控与电气工程教研部电气工程教研室(710038)

电话:13474117028

E-mail:zxh2004_kgd@sina.com

(编辑:余 未)