

# Design of Control System for RF-Driven Negative Ion Source

Yuanzhe Zhao, Chundong Hu\*, Qinglong Cui, Wei Liu, Shihua Song, Jianglong Wei

Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei Anhui  
Email: zyz@ipp.ac.cn, \*cdhu@ipp.ac.cn

Received: Sep. 30<sup>th</sup>, 2019; accepted: Oct. 7<sup>th</sup>, 2019; published: Oct. 14<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

A control system for RF-driven negative ion source is designed to coordinate and control the experimental operation, realize data collection and sharing, monitor the status of power supply system, cryo-vacuum system, cooling water and diagnostic system, alarm and protect system security. The overall frame structure of control system, remote control unit, plant control unit, data acquisition system, interlock and protection system, as well as network system have been introduced in this paper. The performance tests have been done and the results indicate that the designed control system may provide stable control for RF-driven negative ion source.

## Keywords

Negative Ion Source, Control, Data Acquisition, Interlock and Protection

---

# 射频负离子源控制系统设计

赵远哲, 胡纯栋\*, 崔庆龙, 刘伟, 宋士花, 韦江龙

中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥  
Email: zyz@ipp.ac.cn, \*cdhu@ipp.ac.cn

收稿日期: 2019年9月30日; 录用日期: 2019年10月7日; 发布日期: 2019年10月14日

---

## 摘要

为协调控制射频负离子源稳态实验运行、实现实验数据的采集与共享、并对电源、低温真空、循环冷却水、诊断等系统状态进行实时监控、故障报警和连锁保护, 设计了射频负离子源控制系统。对控制系统的总体框架结构、远程控制单元、现场控制单元、采集单元、连锁和保护单元等关键组件的设计进行了

\*通讯作者。

详细介绍。通过实验测试,验证了所设计的控制系统能够满足射频负离子源测试平台稳态实验运行控制要求。

## 关键词

负离子源, 控制, 采集, 连锁和保护

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

中性束注入(Neutral Beam Injection, NBI)作为托卡马克核聚变装置四种辅助加热手段中加热效率最高、物理机制最清楚的加热方式,在国际和国内的磁约束核聚变装置上得到广泛应用。为避免受到磁约束核聚变装置中强磁场的干扰,NBI离子源加速形成的高能粒子束必须经过中性化处理后才能注入到聚变装置的芯部等离子体中,达到加热等离子体的目的。

未来的聚变反应堆,如中国聚变工程试验反应堆(CFETR),国际热核聚变实验堆(ITER)、国际聚变示范堆(DEMO)等,都将装备高能量(~1 MeV)和高功率的中性束注入系统。然而当束能量大于100 keV时,正离子源的中性化效率急剧下降,而负离子源的中性化效率仍然可以保持在70%~80%,故基于大面积负离子源的NBI成为我国中性束注入技术发展的趋势。为满足未来大型磁约束聚变装置对高能量、高功率和稳态中性束注入系统的需求,世界上磁约束聚变领域的主要研究单位均启动了大功率强流负离子源的研发工作。ITER和CFETR中性束注入系统均将采用MeV量级的射频负离子源[1][2]。

中国科学院等离子体物理研究所现已初步搭建了射频负离子源测试平台,以开展负离子产生与引出相关预研工作。射频负离子源测试平台由束源、束线及支撑系统、电源系统、控制系统和诊断系统组成。控制系统负责协调各子系统完成稳态实验运行、控制电源系统的供给及时序和幅值的实时调节、实现实验数据的采集与共享、并对电源、低温真空、循环冷却水、诊断等系统状态进行实时监控、故障报警和连锁保护。本文将系统地阐述射频负离子源控制系统的设计与性能测试。

## 2. 控制系统需求分析

射频负离子源样机如图1所示,控制系统负责在射频负离子源运行期间驱动射频率功率源、启动灯丝电源、引出电源、加速电源、缓冲器偏置电源、弧偏置电源、偏置板电源工作;对低温真空、循环冷却水、铯注入等慢过程进行实时控制;对实验运行期间各子系统产生的实验数据进行采集、存储和共享;并实时监控各子系统运行状态,对各系统发生的异常事件进行实时管理、故障报警,同时提供可靠的连锁保护机制,在保障实验设备和人身安全的前提下,有序地控制射频负离子源稳定运行。

为协调控制射频负离子源稳态、安全运行,控制系统需满足以下功能需求:

- a) 强电磁和射频干扰环境下稳定运行;
- b) 具备本地和远程控制功能;
- c) 提供良好的人机交互系统;
- d) 具备所有子系统的单独调试与监控能力;
- e) 提供精度10 μs的快速控制和100 ms的慢速控制;

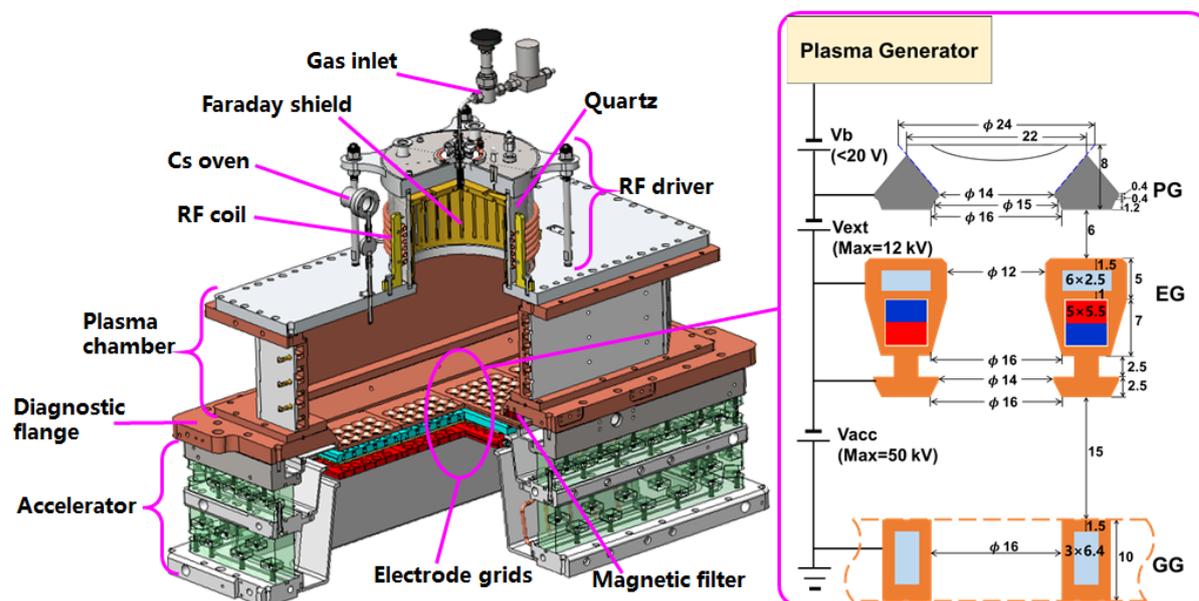


Figure 1. Prototype of RF ion source

图 1. 射频负离子源样机

- f) 实现 1~100 Hz 调制束引出与加速控制;
- g) 对关键状态参数的实时监控;
- h) 提供故障连锁和保护机制, 保障实验设备和人身安全;
- i) 针对实验运行过程中连续的、低带宽、高带宽数据提供不同采样率的数据采集服务;
- j) 提供在线和离线数据访问与分析处理服务。

### 3. 控制系统设计

根据以上需求分析, 控制系统主要负责协调控制各子系统完成射频负离子源稳态实验运行、控制电源系统的供给及时序和幅值的实时调节、实现实验数据的采集与共享、并对电源、低温真空、循环冷却水、诊断等系统状态进行实时监控、故障报警和连锁保护, 其各功能模块设计指标如表 1 所示。

Table 1. Design target of control system

表 1. 控制系统设计指标

序号	参数名称	设计指标
1	系统控制模式	分布式控制系统
2	定时系统	1 $\mu\text{s}$ 时钟精度
3	慢速控制	100 ms 控制精度
4	快速控制	10 $\mu\text{s}$ 控制精度
5	低速数据采集	100 Hz/ch
6	高速数据采集	1 MHz/ch
7	慢速连锁保护系统	100 ms 连锁响应
8	快速连锁保护系统	10 $\mu\text{s}$ 连锁响应

如图 2 所示, 控制系统框架结构主要分为三层: 现场设备层、现场控制层和远程控制层[3]。

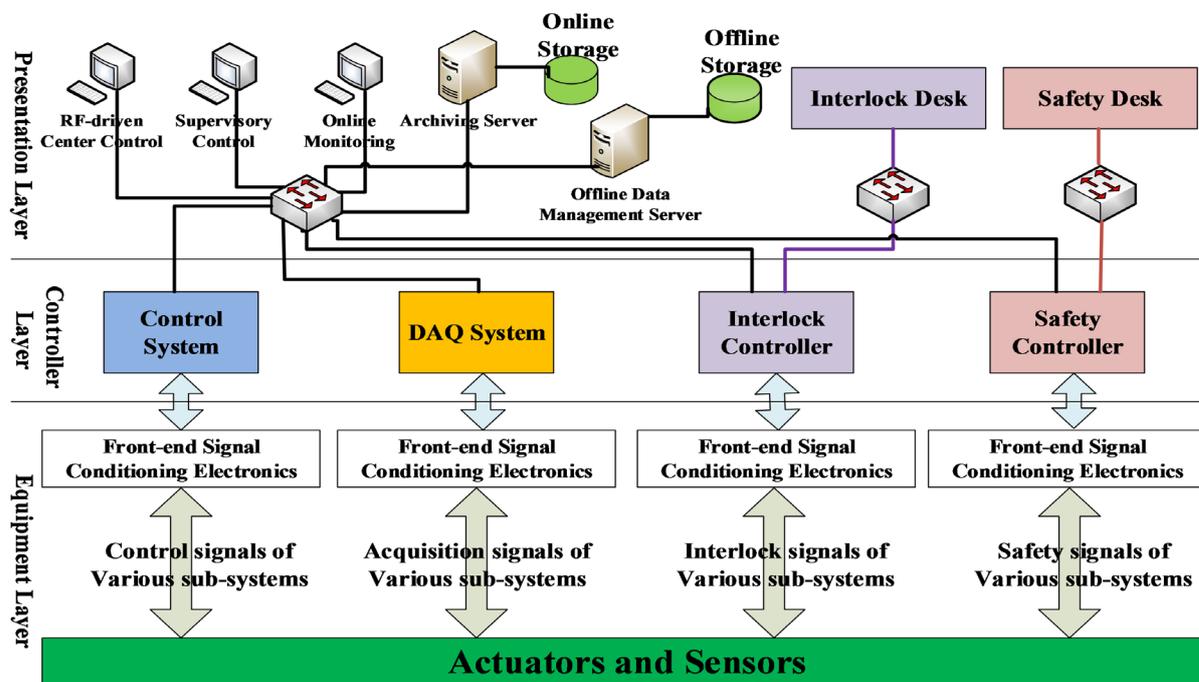


Figure 2. Structure of control system

图 2. 控制系统框架结构示意图

现场设备层：主要包括电源系统、诊断系统、低温真空系统、循环冷却水系统的信号传感器、执行器、信号接口和前端信号调理电路等。

现场控制层：包括现场控制单元、采集单元、连锁和保护单元等。

远程控制层：该层提供实验运行控制、管理、在线数据查看、状态监控、归档服务、离线数据分析、数据存储与管理等多样化工作站。

### 3.1. 现场控制单元

现场控制单元负责控制现场设备的实际运行，包括现场控制主机、交换机、现场控制器和信号接口电路，根据控制精度的不同分为快速控制和慢速控制。快速控制应用于电源系统控制与打火管理，在系统打火等特殊异步事件发生时，驱动电源系统运行，控制精度为  $10\ \mu\text{s}$ 。快速控制通过 NI PXI-7842R 多功能可重置 RIO 板卡和 PXI-6733 高速模拟量输出板卡实现 40 路数字信号输出、40 路数字信号输入、16 路模拟信号输出和 8 路模拟信号输入，通过 PXI 总线触发方式实现板卡间的同步输出，快速控制输出模拟信号示意图如图 3 所示。

慢速控制主要完成低温真空系统、供气系统、循环冷却水系统、供配电系统、电源系统以及铯恒温注入系统的工艺过程监控，其控制精度为毫秒量级。慢速控制网络结构如图 4 所示。

慢速控制通过以西门子 S7-1500 系列 PLC 为控制核心组成的数据采集与监视控制系统来实现各子系统运行过程的可视化控制。各子系统 PLC 通过 DI/DO 模块可实现各子系统现场的运行设备状态监视和过程控制，AI/AO 模块可实现关键参数实时测量、运行参数和报警阈值的设置。多台 PLC 基于 Profibus 通讯协议组成单一主站 Profibus-DP 主从通讯系统。主站实时接受从站发送的各系统设备状态和参数，状态综合后根据任务要求发送控制命令给从站。从站负责各子系统过程控制，并实时将系统设备状态和参数发送给主站，接受并执行主站发送的控制命令。本地触摸屏可实时显示各子系统工艺过程控制，远程监控终端通过全图形化监控界面实现各子系统工艺过程的远程状态监控。

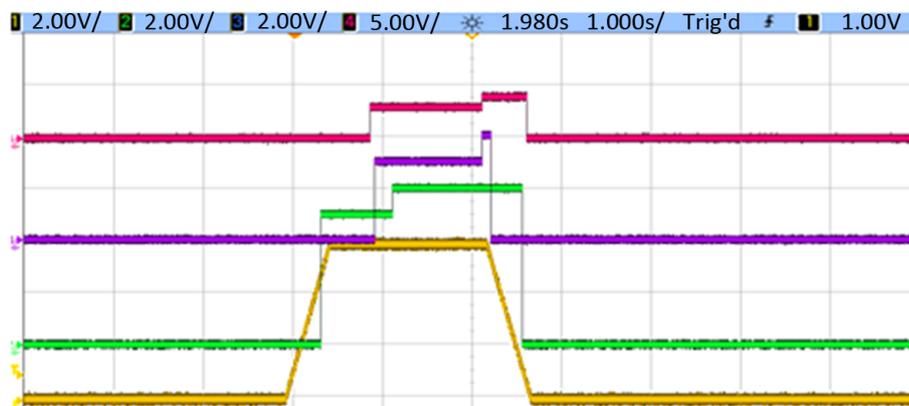


Figure 3. Analog output of fast control

图3 快速控制输出模拟信号示意图

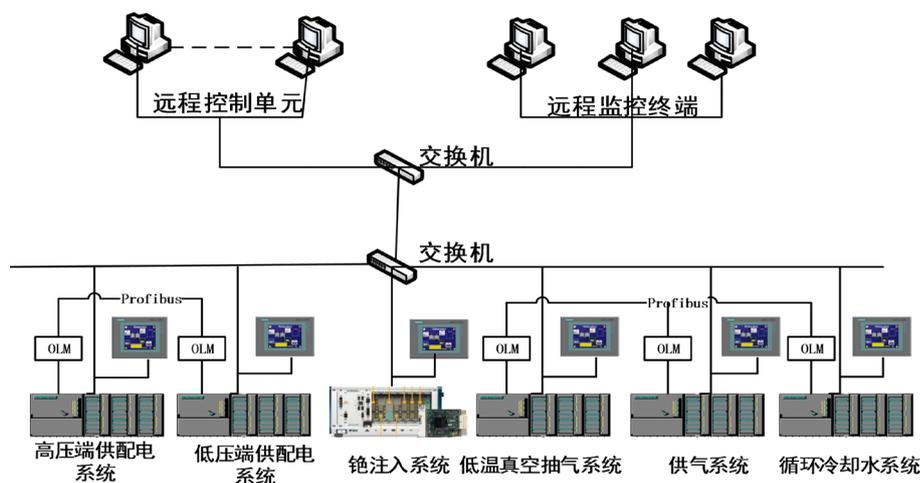


Figure 4. Network structure of slow control

图4 慢速控制网络结构

### 3.2. 采集单元

采集单元实现对放电过程中各系统实验数据的收集、存储与共享，其硬件设备由 PXI 机箱、NI PXI-6289 采集板卡、PXIe-6365 采集板卡、硬件接口板卡、自定义 CPCI 接口机箱组成，触发方式为外部时钟触发，软件基于 LabVIEW 平台开发，通过 DSC 控制实现与远程控制单元间的 CA 通讯，采集单元硬件结构设计分布图如图 5 所示。

放电过程中各子系统的采集信号通过 V/F 模块和 F/V 模块传输到前端信号调理电路，实现电磁绝缘。根据系统对采样率的不同需求，数据采集信号大致分为四类：实验运行过程中连续、独立的缓慢信号，如进气压力；仅在出束阶段需要采集的低带宽信号，采样率几十 kS/s，如电测量；受事件驱动触发的高带宽信号，采样率 1 MS/s，如电源系统测量；要求实时处理的高带宽信号，采样率几十 MS/s，如光腔衰荡。同时采集单元将所有收集到的实验数据发送到远程控制单元，实现在线数据监控、离线数据分析、数据存储与备份，及数据的长期存档，以便于后期数据分析与共享。

### 3.3. 连锁和保护单元

连锁和保护单元对冷却系统、进气和真空系统、射频功率源、引出电源、加速电源、偏置电源、偏

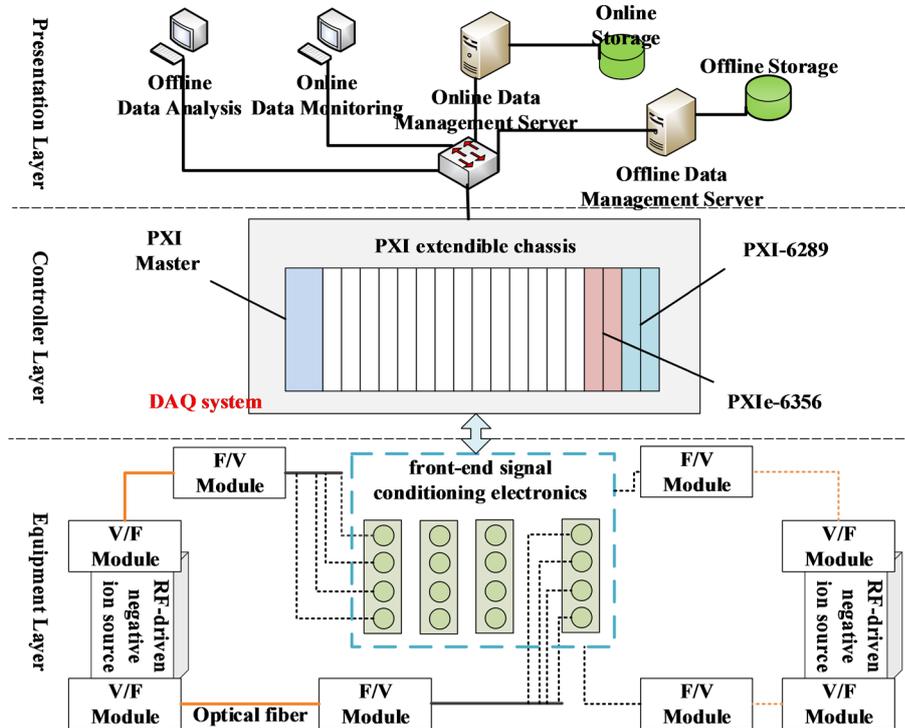


Figure 5. Hardware design of data acquisition unit  
 图 5 采集单元硬件结构设计分布图

置板电源、磁滤器电源、缓冲器偏置电源、启动灯丝电源、弧偏置电源、电偏转电源、配电柜、铯注入系统、热电偶测量系统发生的异常事件进行实时管理，保障实验设备和人身安全。连锁和保护系统通过检测各子系统当前状态，按照规定的运行状态，根据不同子系统的特性，将当前的故障信号综合，从而保证射频负离子源可以正常进行束引出。表 2 列举了射频负离子源实验运行过程中可能出现的部分故障及故障检测手段和处理措施。

Table 2. Main protections of RF ion source  
 表 2. 射频负离子源故障列表

序号	故障	检测手段	处理措施
1	冷却水回路故障	冷却测量系统	关闭电源、进气系统
2	冷却剂电导率错误	冷却测量系统	关闭电源、进气系统
3	离子源部件过温	源部件温升测量	关闭电源、进气系统
4	束线热沉积过温	束线温升测量	关闭电源、进气系统
5	功率测量靶异常	功率测量靶诊断	关闭电源、进气系统
6	进气和真空系统过压	压力开关	关闭电源、进气系统
7	进气和真空系统欠压	压力开关	关闭电源、进气系统
8	进气与真空系统故障	真空测量	关闭电源、进气系统
9	加速电源过流输出	加速电源电气测量	关闭电源、进气系统
10	加速电源过压输出	加速电源电气测量	关闭电源、进气系统
11	加速电源故障	加速电源电气测量	关闭电源、进气系统

Continued

12	偏置电源故障	偏置电源电气测量	关闭电源、进气系统
13	射频功率源故障	射频功率源电气测量	关闭电源、进气系统
14	引出电源故障	引出电源电气测量	关闭电源、进气系统
15	远程控制单元软件故障	心跳信号	关闭电源、进气系统和使能信号
16	装置命令不应答	应答信号	关机 + 关闭电源、进气系统

根据故障需求的响应时间的不同, 连锁和保护单元接收到的故障信息大致分为三类: 慢速故障(包括机械组件、进气、真空、水冷等系统故障, 要求连锁保护单元响应时间在 0.1 s 以内)、快速故障(包括电气绝缘破裂、电源过流、过压等, 要求连锁保护单元响应时间在 10  $\mu$ s 以内)和远程控制单元或者被控单元控制硬件或者软件提供的故障。对于慢速故障和快速故障的连锁保护采用不同的技术手段, 慢速故障连锁保护机制基于 PLC 技术实现, 设备接口采用离散的电流隔离逻辑信号实现, 以满足 I/O 和处理单元高可靠性的要求, 快速故障连锁保护机制则是基于 FPGA 技术实现, 设备接口全部采用光纤隔离, 以获得最佳的抗噪声能力。

### 3.4. 远程控制单元

远程控制单元通过 CSS 集成开发平台的 BOY 模块提供友好的人机交互界面, 供实验人员监视并控制整个实验过程。用户在控制界面中实现对各子系统时序和幅值的设置、实验运行模式的设置以及与其他单元的通信。远程控制单元使用 Jython 实现界面逻辑控制, 同时支持 TCP/IP 和 EPICS CA 两种通信架构, 其通过 TCP 网络通信将设置信息发送给现场控制单元, 现场控制单元将配置部署下去, 以控制子系统输出, 同时远程控制单元通过 CA 通讯实时获取与显示数据采集单元采集到的实验波形[4], 远程控制单元运行界面如图 6 所示。



Figure 6. Operation interface of remote control unit

图 6. 远程控制单元运行界面

## 4. 小结

应用于射频负离子源测试平台的控制系统初步搭建完成, 满足目前射频负离子源放电对控制、采集

和连锁保护的需求；目前数据压缩采用 LZO 压缩算法，压缩效率较高，但不提供统一的数据归档、管理和访问接口，灵活性较差，数据采集与处理系统下一步的工作重点在于基于 MDSplus 组件的脉冲放电数据管理系统研发[5]；在远程控制单元研发过程中，对 EPICS、CSS 等核聚变领域主流技术进行了初步摸索，为后续工作的开展奠定了基础。

## 基金项目

国家重点研发计划(No. 2017YFE0300101)、中国科学院合肥物质科学研究院院长基金青年“火花”项目(YZJJ2019QN11)资助。

## 参考文献

- [1] 胡纯栋, 谢远来, 谢亚红, 等. EAST 长脉冲中性束注入器的研制[C]//中国核科学技术进展报告. 中国核学会 2009 年学术年会论文集: 第一卷, 第 6 册. 2009.
- [2] Vollmer, O., *et al.* (2001) Progress in the Development of a Large RF Negative Ion Source for Fusion. *Fusion Engineering and Design*, **56-57**, 465-470.
- [3] Lister, J.B., *et al.* (2007) The ITER CODAC Conceptual Design. *Symposium on Fusion Technology*, **82**, 1167-1173. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2007.01.013>
- [4] 胡纯栋, 陈光亚, 谢亚红, 等. 基于 CSS 的 NBI 射频离子源控制程序设计[J]. 核技术, 2017, 40(11): 43-48.
- [5] Luchetta, A., *et al.* (2012) Architecture of SPIDER Control and Data Acquisition System. *Fusion Engineering and Design*, **87**, 1933-1939. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2012.06.007>