

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.01.04

TRIZ 理论在真空热处理测量装置研究中的应用

吴镇沅

(航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 四川 成都 610091)

摘 要: 在真空热处理测量装置中, 传统的四极质谱计由于结构缺陷存在残余气体检测不充分的问题, 而标准真空计和被校真空计之间使用的 T 型三通同样由于结构问题存在真空度检测效率低的问题, 导致大容量真空炉的真空度和残余气体测不准。文章从 TRIZ 理论方法的角度出发, 对传统的四极质谱计结构进行不对称式优化, 将 T 型三通变为球面结构并作加热和气压控制改进, 优化和改进提高了真空热处理测量装置的工作效率。

关键词: 真空热处理装置; 球型校准室; 四极质谱计; TRIZ 理论

中图分类号: TB935

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2019)01-0014-06

Application of TRIZ Theory in Vacuum Heat Treatment Measurement Device

WU Zhenyuan

(Inspection Department in CAC, Chengdu 610091, China)

Abstract: In the vacuum heat treatment unit, the traditional quadrupole mass spectrometer (QMS) has the problem of inadequate residual gas detection due to structural defects, and the connector between the standard vacuum gauge and the vacuum gauge to be calibrated also has low vacuum detection efficiency due to structural problems, which leads to the inaccurate measurements of vacuum degree and residual gas in the large-capacity vacuum furnace. This article starts with TRIZ theory to make an asymmetric optimization of the structure of QMS, and transforms the T-shaped structure into a spherical structure and improves the heating and pressure control. The efficiency of vacuum heat treatment measuring device has been improved by the optimization and improvement.

Key words: vacuum heat treatment unit; spherical calibration room; quadrupole mass spectrometer; TRIZ theory

0 引言

真空热处理是真空技术与热处理技术相结合的新型热处理技术, 真空技术由于提供了稀薄的气体氛围和清洁的环境条件, 已在航天、航空、高能物理、可控核聚变等领域占有重要地位。实际应用中, 真空参数的准确性直接影响着生产产品的质量, 在热处理加工环节中真空参数的保障尤为重要。

真空度、气体微流量和抽速是真空计量最基本的三个物理参数。当前, 实际生产中仍然存在一些影响真空参数测量准确性的因素, 例如: 以高真空度在线测量不准、低残余气体测量不准等过程作为代表, 传统的测量方法无法做到准确测量, 甚至无法测量, 而部分测量方法存在无法达到工艺要求、成本代价高等问题, 影响生产进度。在解决实际问题的众多方法论中, TRIZ(发明问题解决理论)作为一种解决发明创造问题的理论, 被大量的应用于产品、流程的设计与改进, 将本来杂乱无章的创新思维活动拟合成一套有据可循的方法, 可简化产品及流程的设计与改进过程,

提高解决问题的效率。

从 TRIZ 理论的角度出发, 利用其查找根本原因的分析思路和创新原则以及设计方案的进化趋势等全流程技术工具, 探讨其在解决“高真空度在线测量”、“低残余气体测量”问题中的应用, 并试图从中找到一套解决传统真空热处理装置测不准的最佳方案。

1 真空热处理测量环节中的问题分析

1.1 关键部位分析

按照 TRIZ 理论中的组件分析法, 对引起真空热处理设备测不准的关键部件进行分析, 真空热处理设备及测量装置组成及工作原理, 如图 1 所示。

炉体真空度参数主要从利用真空计、四极质谱计和检漏设备三个方面进行测量。真空度检测环节和残余气体分子的检测分别由真空计和四极质谱计完成, 此过程中起连接作用的 T 型三通和直接检测气体的四极质谱计都存在检校效率的问题。

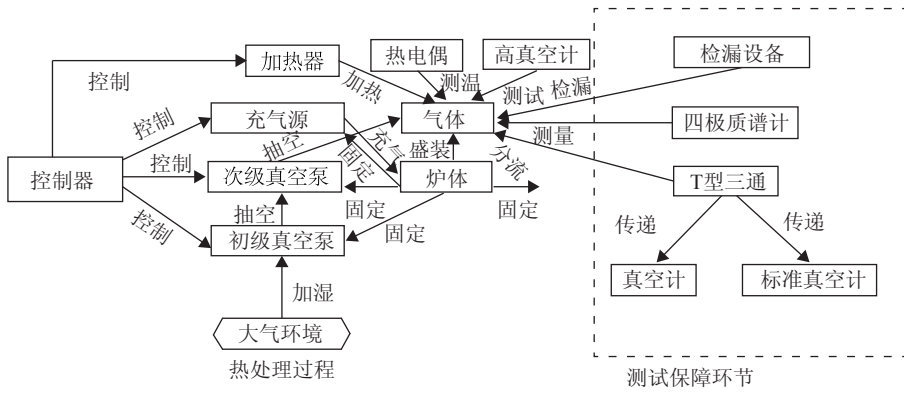


图1 真空热处理设备及测量装置组成及工作原理图

1.1.1 真空度的检测问题

1) 真空度测量的背景描述

从分子运动论的观点来看，气体压力是大量分子不断碰撞器壁的结果。气体压力是指气体分子从某一假想平面通过时，沿该平面的正法方向的动量改变率，除以该平面面积或气体分子作用于其容器壁表面上的向里的法向分量，除以该表面面积。

对任何真空容器来说，漏气是绝对的，不漏气是相对的，即使容器上没有漏气的孔、洞或裂纹，由于气体分子的直径很小，它可能穿过金属的晶格而进入真空容器。在生产环节中，当真空系统抽到一定真空度后，常利用真空计进行真空测量，而为保障现场的准确性，需利用标准真空计对现场真空计进行检校。检校的方法就是利用“T型三通”(如图2所示)连接炉体、真空计、标准真空计，再用标准真空计对真空计进行量值传递。

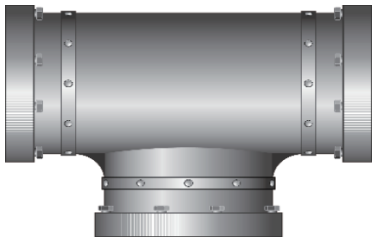


图2 T型三通示意图

2) 真空度检测问题的原因分析

利用因果分析法，对被校准真空计和标准真空计存在的气体传输过程进行分析如图3所示。真空度检测效率低的原因是由于传输气体过程中压力不均匀导致的，而压力的不均匀是由于黏性流动造成的，造成黏性流动的本质原因则是分子的平均自由程比管的内径充分小，因此T型管道的结构尺寸是导致真空度检

测效率低的根本原因。

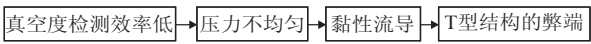


图3 因果分析法 - 真空度检测问题

根据气体运动分子特性，要复现真空度的量值，应在校准容器中建立起等温、分布均匀的各向同性的稀薄气体平衡状态，在容器内任一点的压力与整个容器的压力是相同的，气体分子遵守麦克斯韦速率分布和克努森余弦定律。分子平均自由程与容器尺寸的比值称为克努森系数，用 Kn 表示。如果 Kn 小于1，则气体分子间的碰撞是主要的，如果 Kn 大于1，则气体分子与器壁的碰撞就是主要的。

根据 JJF 1062 - 1999《电离真空计校准规范》的建议，校准室应是球型，圆形是二维图形中同内径下，面积最小的形状。在气体分子自由行程一定的情况下，缩小容器尺寸，可增大克努森系数，从而增加气体分子与器壁的碰撞几率，使得真空计能尽可能准确的测得真空度。

根据克努森余弦定律，分子会在固体表面停留一定时间，这是气体分子与固体进行能量交换，动量交换的先决条件，然而实际生产中，由于分子在固体表面的停留，会影响真空计对真空度测量的时间。同时，由于处于真空状态，容器内部分子数本就极少，即使改变了容器形状增大了气体分子与器壁的碰撞几率，由于分子运动速率的关系，也会影响真空计对真空度测量的时间。因此，仅是将T型管道改变成球型校准室并不能解决真空度检测的效率问题。

1.1.2 残余气体分子的检测问题

1) 残余气体分子检测的背景描述

四极质谱计(也叫四极滤质器)用于科研生产中对气体成份含量的监测，一些高频质谱计由于尺寸小，

可直接插入真空系统中, 因此, 在真空技术领域被普遍采用, 其基本设计如图 4 所示。理想情况下, 高频四极电场由四根顶端相距 $2r_0$ 的双曲杆状电极产生, 四个曲面与一个内圆柱相切, 电极之间的电压由一个高频交流电压 $V \cos \omega t$ 叠加一个直流电压 U 组成。

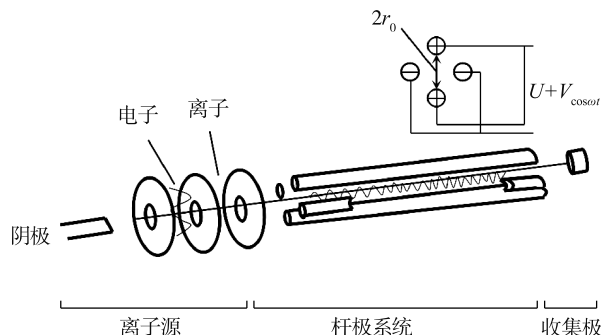


图 4 四极质谱计的结构图

如果离子沿垂直于 xy 平面的场轴方向注入离子分离系统, 由于高频电场的作用, 离子将在与场垂直的方向上振荡。这些离子的运动方程称为马绍微分方程, 其解可分为两组: 第一组解离子的振荡幅度一直受到限制称为稳定解; 另一组解则是不稳定解, 其特点是离子振荡幅度持续增大。在物理上意味着一些离子将通过质量分析器, 而其他离子将碰撞在极杆上变成中性气体分子被抽除。图 5 是四极质谱计的稳定图。

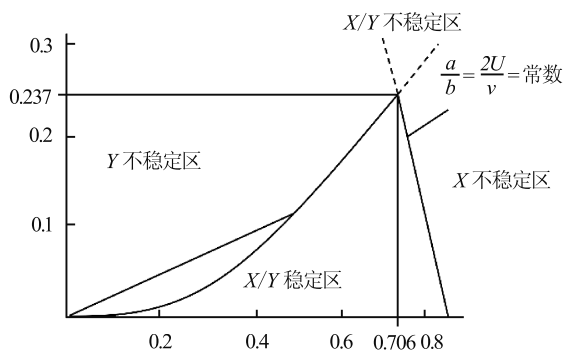


图 5 四极质谱计稳定图

从图 5 中可以看出离子运动的稳定性如何随工作参数变化, 其中, $q = 2eV/mr_0^2 \omega^2$, $\alpha = 4eU/mr_0^2 \omega^2$ 。当参数 V , U , ω , r_0 一定, 只有一定质量的离子, 或者更严格说一定质量间隔内的离子能通过分离器, 这些离子的振荡幅度小于 r_0 , 其他离子将被分离出去。

“稳定”离子满足

$$V = 14.4 m v^2 r_0^2$$

式中: m 为稳定离子的质量数, amu; V 为交流电压的幅值, V; v 为频率, $v = \omega/2\pi$, MHz; r_0 为场半

径, cm。

当 U/V 的值正好维持在低于 0.1678 处, 不同质量的离子的“工作线”与稳定区在接近顶点处相交, 从稳定性关系出发, 只要改变 U/V 的值, 就可以改变四极质谱计的分辨本领。若将 U 设为 0, 四极质谱计将是一个高通滤质器, 在此情况下, 当高频交流电压的幅值较低时, 几乎所有治疗的离子都能以稳定的轨迹运动而打到收集极上, 利用这个特性可测量全压力。随着高频交流电压幅值的增加, 开始质量较轻的离子不稳定, 而后这种不稳定离子的质量将逐渐增大。

U/V 的值可作为质量的函数加以控制, 目的是控制线宽 Δm 不变、而不是分辨本领 $m/\Delta m$ 为常数, 这意味着分辨本领随质量数的增加成正比例增加。尽管分辨本领随质量数增加而增加, 但只要四极杆系统很精确和离子源产生的离子能保证正确注入, “质量歧视”(传输率随质量数增加而降低)效应是可以避免的, 可是由于要求太高, 后一种条件往往不能满足。

2) 残余气体分子检测问题的原因分析

利用因果分析法, 对残余气体分子检测问题进行分析, 如图 6 所示。残余气体分子检测效率低的直接原因是由于四级质谱计测量灵敏度低, 而在不改变四级质谱计本身测量灵敏度的条件下, 影响四级质谱计测量能力的原因则是采样端能采集到的气体分子的数量由于被分流, 导致气体分子数量实在太少, 而接下来要做的就是设法改变采样结构, 提升到达采样端的气体分子数量。

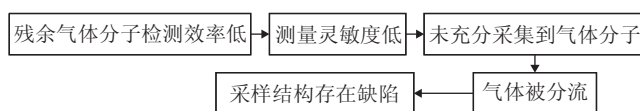


图 6 因果分析法 - 残余气体分子检测

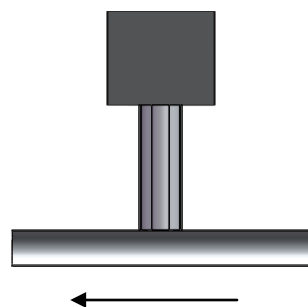


图 7 真空管道与四极质谱计示意图

实际使用中, 真空管道和四极质谱计处于正交状态, 黑色箭头表示气体整体的运动方向, 如图 7

所示。残余气体分子并不能充分接触四极质谱计的电离端，导致这种情况的发生的原因：一是大部分气体分子并不通过电离端；二是通过电离端的分子并不能“正确注入”，而这会使得四极质谱计对于残余气体的成份的分析出现偏差。

2 TRIZ 在真空热处理装置改进中的应用

2.1 TRIZ 理论

TRIZ(Theory of Inventive Problem Solving)理论由苏联人 G. S. Altshuller 于 1946 年提出和建立，中文译名为解决发明创造问题的理论。TRIZ 理论认为，所有的工程系统服从相同的发展规则，这一规则可以用来研究创造发明问题的有效解，也可以用来评价与预测如何求解一个工程系统的解决方案，任何一个发明或创新的问题都可以表示为需求和不能(或不再能)满足这些需求的原型系统之间的冲突。所以，“求解发明问题”与“寻找发明问题的解决方案”就意味着在利用折衷与调和不能被采纳时对冲突的求解。

TRIZ 理论发展出了多种工具，如冲突矩阵、76 种标准解答、ARIZ、AFD、物质-场分析、ISQ\DE，8 种演化类型、科学效应等，常用的有基于宏观的矛盾矩阵法(冲突矩阵法)和基于微观的物场变换法。TRIZ 针对输入输出的关系(效应)、冲突和技术进化都有比较完善的理论。

2.2 TRIZ 理论应用

2.2.1 T 型三通结构弊端引起真空度参数测不准问题的解决方案

1)T 型三通结构分析

根据 JJF 1062-1999《电离真空计校准规范》的建议，校准室应是球形或直圆柱形。试验中发现，球型结构对真空度测量效率有改进，克努森余弦定理指出，分子会在固体表面停留从而进行动量及能量交换，因此达到理想的真空度检测时间仍不尽人意，通过物场分析法可以对球型结构进行优化。

如图 8 所示，分子碰撞存在不足作用，到达目标真空度的检测时间就越长，可以通过加快分子运动来保证碰撞运动充足。同时，根据麦克斯韦速率分布律，对于一定种类的气体，气体分子的速率与温度的 1/2 次方成正比。因此，可以通过提高温度增加分子运动速率来提高真空度的检测效率。

如图 9 所示，通过引入热源增加分子运动效率。具体方案是通过在球型室内增加石英灯，如图 10 所示。温度的增加使得分子运动速率加快，从而减少了

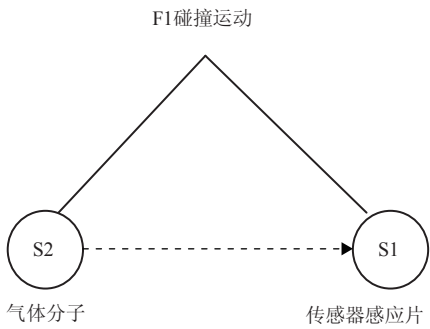


图 8 物场分析图

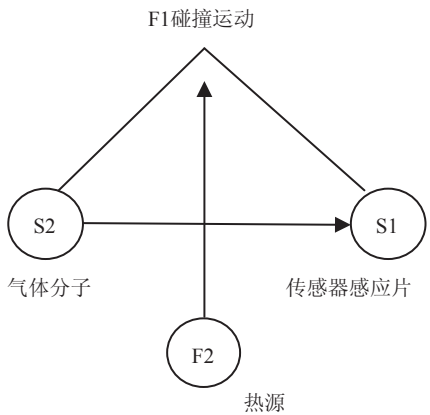


图 9 物场分析解决方法图

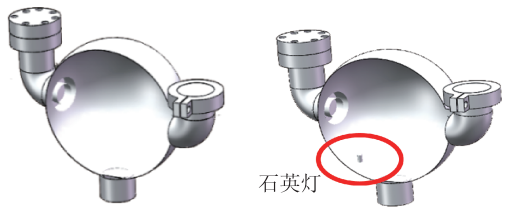


图 10 球型室加入石英灯

真空度检测等待时间，但是，根据阿伏伽德罗定律的公式，温度的增加也带来了容器压力的变化，反而使得容器内压力波动，无法达到平衡状态，而要想达到压力平衡，必然需要引入压力控制系统。

2)T 型三通结构初步方案的矛盾分析

为使分子碰撞运动充足，可以通过增加热源为分子运动提供能量，但另一方面，热源的增加导致了压力波动，带来了压力难以平衡的新问题，可以考虑进行增加电子压力控制系统，但电子压力控制系统的引入会使得成本变得超出预期。

改进带来了矛盾，且矛盾并不容易直接解决。寻找解决矛盾的方案，则成为下一步要做的事。对于工程改进中矛盾问题的解决，TRIZ 理论中有大量的应用

实例,且形成了一套高效的分析和解决问题的方法。

根据 TRIZ 理论中的矛盾分析,尝试进一步对压力难以平衡问题作出优化。根据初步方案中通过增加热源带来的效果,查阅 TRIZ 理论中的冲突矩阵表,找到本次需改进的改善参数是运动物体作用时间,而需优化的恶化参数是压力,查阅矛盾矩阵可得方案 19, 3, 27。

在矛盾矩阵 19 周期性作用原理中,有以下描述:①用周期性运动或脉动代替连续运动;②对周期性运动改变其运动频率;③在两个无脉动的运动之间增加脉动。在矛盾矩阵 3 局部质量原理中,有以下描述:①将物体或环境的均匀结构变成不均匀结构;②使组成物体的不同部分完成不同的功能;③使组成物体的每一部分都最大限度的发挥作用。在矛盾矩阵 27 廉价替代物原理中,有以下描述:用一些低廉的物体代替昂贵的物体,有关特性做折衷处理。

在此项问题的解决中,未能从周期性作用原理和局部质量原理中找到一项最终的解决方案,而廉价物替代原则则对进一步的改进提供了一个思路,即通过将空气和氮气这种无处不在的物质引入球型校准室内,而唯一要做的就是球型校准室上做一个阀门,来控制气压的平衡。

3) T 型三通结构的方案

具体的措施为在球型室上方加入空气阀,放入空气和氮气这种廉价物以平衡球型室内压力,如图 11 所示。

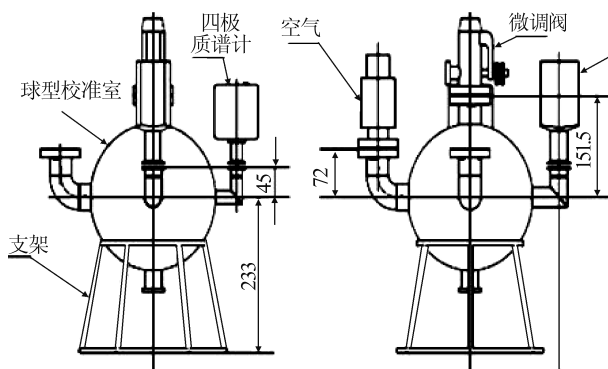


图 11 新型球型室设计图

2.2.2 提高残余气体分子检测

1) 提高残余气体分子检测的初步方案

如图 12 所示,实际生产过程的四极质谱计采用末端分流采样的方式,只有少部分气体(图 12 中处在上面位置的箭头所示)能进入电离端,而大部分气体(图

12 中处在下面位置的箭头所示)难以通过电离端导致残余气体分子的检测出现偏差。那么,比较直观的改善方式就是,将电离端“伸”进管道内,让气体能充分接触电离端,如图 13 所示。

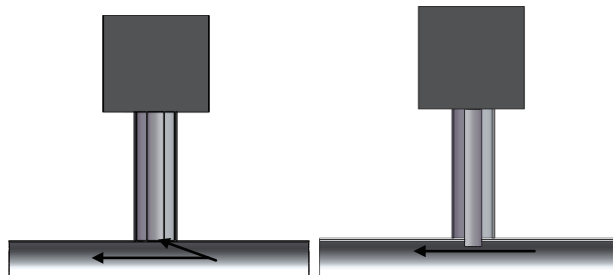


图 12 实际四极质谱计
末端分流示意图

图 13 电离端“伸”进管道

2) 提高残余气体分子检测初步方案的矛盾分析

上述方案制造成本较高,电离端很容易被损坏。在初步的改进方案中,同样存在一组矛盾,即气体能充分接触电离端,但是电离端容易受损且制造成本偏高。用同样的方式,可以通过 TRIZ 理论的技术矛盾进行分析和解决,将改善的参数定义为作用时间,即分子气体在电离端的作用时间;而将恶化的参数定义为可制造性,通过矛盾矩阵,可得发明原理 1, 4, 27, 见表 2。

在矛盾矩阵中,1 为分割原理,通常可理解为:①将一个物体分成相互独立的部分;②使物体分成容易组装及拆卸的部分;③增加物体相互独立部分的程度。根据原理 1 可以把管道拆为分离式,以使气体能向需要的方向运动,可以由此作为出发点进行改进。而 4 为不对称原理,通常可理解为:①将物体形状由对称变为不对称;②若物体不对称,增加其不对称的程度。根据原理 4 可在不用改变电离端的情况下,将气体管道变为不均匀的结构,以使气体按需要的方向运动。而在 27 廉价物替代原理中,未能得到启发。

3) 提高残余气体分子检测的最终方案

综上所述,通过不对称原理,将气体通路的出口改进至上端形成上下不均匀的结构,使气体分子在电离端充分电离,使未被电离的分子也可忽略不计,如图 14 所示。

3 改进后的效果对比

3.1 T 型三通结构改变前后的效果对比

文中提及的不同结构的 T 型三通之间检校耗时的对比如表 1 所示。

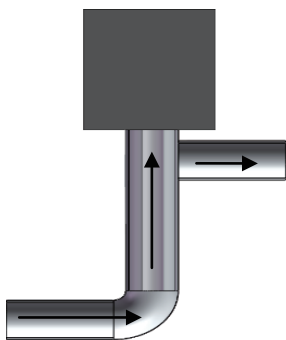


图 14 新型四极质谱计结构示意图

表 1 T 型三通结构改变前后的效果对比

结构	检校耗时/min
T 型三通	56
球形校准室	38
加热球形校准室	43
带空气阀加热球形校准室	25

3.2 四极质谱计结构改变前后的效果对比

文中提及的不同结构的四极质谱计之间检校耗时的对比如表 2 所示。

表 2 四极质谱计结构改变前后的效果对比

结构	检校耗时/min
改造前	15
改造后	11

4 结论

通过实际生产中对比得出以下结论：新型球形结构校准室明显降低了检校耗时；新型结构的四极质谱计降低了检校耗时；TRIZ 理论可以应用于真空热处理炉装置的改善。

装置的改进和结构的变化使真空热处理装置的检校变得更充分和准确,提高了一定的检校效率,但是

对于整个检校过程效率的提升还仍未到达理想的状态，因此，接下来的工作还需从单个装置自身的精度、效率、稳定性等因素出发，上升至系统整体的测试准确性、稳定性、便携性等方面进行研究与实验，未来，真空热处理自动化校准技术可以此作为基础。TRIZ 工具在此项问题的解决中提供了许多分析与解决问题的思路，该工具对于其他测试领域也能发挥作用。本文主要从测试硬件结构的角度出发，为将来自动化校准技术甚至智能化校准技术奠定硬件基础。

参 考 文 献

[1] 洪宝林. 力学计量[M]. 北京：原子能出版社，2002.
[2] 赵朝前. 力学计量[M]. 北京：中国计量出版社，2004.
[3] 李得天. 真空计量新技术[M]. 北京：机械工业出版社，2013.
[4] 刘训涛，曹贺，陈国晶. TRIZ 理论及应用[M]. 北京：北京大学出版社，2011.
[5] 成思源，周金平. 技术创新方法—TRIZ 理论及应用[M]. 北京：清华大学出版社，2014.
[6] (韩)金昊宗. 实用 TRIZ 研究与实践[M]. 北京：中国科学技术出版社，2014.
[7] 朱萍. 四极质谱计数据采集及处理系统的设计[D]. 江苏：东南大学，2004.
[8] 成永军. 极高真空校准室内残余气体的成分分析[J]. 真空科学与技术学报，2010，30(1)：54-59.
[9] 卢耀文，陈旭，李得天，等. 复合型便携式真空计校准装置[J]. 真空科学与技术学报，2013，50(3)：1-5.
[10] 国家质量技术监督局. JJF 1062-1999 电离真空计校准规范[S]. 北京，1999.

收稿日期：2018-09-13

作 者 简 介

吴镇沅(1993-)，男，助理工程师，主要从事计量检定/校准工作。

