

# 涡喷 / 涡扇发动机试车台比对试验校准研究

## Turbojet and Turbofan Test Cells Correlation

■ 焦天佑 刘志友 周杰 / 中国航发涡轮院

时至今日，试车台试验依然是航空涡喷/涡扇发动机技术验证、型号研制和批产交付的重要手段。在相关部门的协调下，开展涡喷/涡扇发动机试车台比对试验校准研究是完全可行的，也是非常必要的。

发动机的相关各方（试验、设计以及最终用户等）都对试验结果（尤其是推力、耗油率等主要性能参数结果）的准确性和权威性十分重视，因为这直接关系到发动机技术发展、型号研制和批产交付。由于航空发动机研制与生产的需要，我国涡喷/涡扇发动机试车台数量多并分布在不同地域，其结构和测试方法不尽相同，加之以往难以有效落实和严格贯彻 GJB721—1989《涡喷/涡扇发动机试车台校准规范》和 HB7508—1997《涡喷/涡扇发动机露天基准试车台基准试车要求》，因而导致同一型甚至同一台发动机在不同试车台上试验的推力、耗油率等主要性能参数结果可能不一致，使得发动机试验结果的准确性与权威性受到质疑，给我国发动机试验乃至研制工作都带来了不利影响。



我国SB101高空台1号试验舱



俄罗斯CIAM的高空台C-4N试验舱

### 1号舱和4号舱之间的计量标定与比对试验结果

参数名称	不确定度 / %		相对偏差 / %	备注
	C-4N 试验舱	1号试验舱		
空气流量	0.40	0.68	+0.6	地面静止状态 (换算转速100.5%)
推力	0.85	0.71	+0.87	
耗油率	0.91	0.82	-0.87	
空气流量	0.44	1.39	+0.93	高空飞行状态 (换算转速100.5%)
推力	1.71	1.79	+1.70	
耗油率	1.86	1.87	-1.60	

## 涡喷/涡扇发动机试车台校准方法

发动机在室内试车台上试车时，空间有限和发动机排气引射的影响使得气流通过试车台进气系统时产生压力损失，以及对发动机有一定迎

面速度、外流沿发动机轴向存在静压变化和摩擦阻力、发动机尾喷口处的环境静压降等都会引起测量推力损失。因此，要准确确定发动机试验性能和实现不同试车台试验结果之间的有效共享和传递，有必要对试车台进行校准。试车台校准常

用的方法就是比对试验校准法。

### 我国试车台校准方法

我国 GJB721 校准规范对用于发动机科研生产的新建试车台、结构布局与气动特性发生显著变化的试车台、试验对象进排气特性发生显著变化（指试验发动机的进排气特

性变化)和超过校准有效期的试车台,都明确规定了用基准试车台对涡喷/涡扇发动机试车台进行校准的方法。GJB721校准规范的主要校准思想,是用基准试车台(含露天和室内两种)上基准试车得到的校准发动机及其标定性能对被校试车台进行校准——校准试车并确定被校试车台的修正值(或修正系数)。GJB721中规定,在基准试车和校准试车前必须对车台的测试系统进行校准,而且其测试精度必须满足GJB241《航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用规范》的要求,即对推力、转速、燃油流量、空气流量、压力、温度等测试通道进行计量标定。简言之,GJB721所指的发动机试车台校准,其实质就是两个或多个试车台(其中有且仅有一个是基准试车台)之间按照预先规定的条件和程序,通过同一台发动机整机试车来确定(被校)试车台能力与特性的试车台比对校准。

1992—1995年,我国SB101高空台1号试验舱(下面简称1号舱)与俄罗斯中央航空发动机研究院(CIAM)高空台C-4N试验舱(下面简称4号舱)之间的对比标定试验,即通过测量系统计量标定来确定高空台的推力、空气质量流量、燃油质量流量、压力、温度、湿度、转速、热态喷口面积等8个参数的数据精度,通过对比试验来确定发动机飞行推力和耗油率的确定方法和数据精度,就是GJB721校准规范用于高空台之间校准的典型示例。其中俄罗斯4号舱及其试车分别作为基准试车台和基准试车,校准发动机是一台空气流量70kg/s级的俄制涡喷发动机。此外,1999—2004年,在我国1号舱

和A109试车台之间进行的交叉比对试验就是用1号舱作为基准试车台来确定该地面台的气动特性和推力修正系数,校准发动机是一台空气流量110kg/s级的俄制涡扇发动机,也是GJB721校准规范用于涡喷/涡扇发动机试车台校准的典型示例。另外,我国还一度存在用所谓的“标准发动机”直接去校准试车台的情况,不过由于“标准发动机”自身标准的有效性存在问题,目前基本不再使用该校准方法。

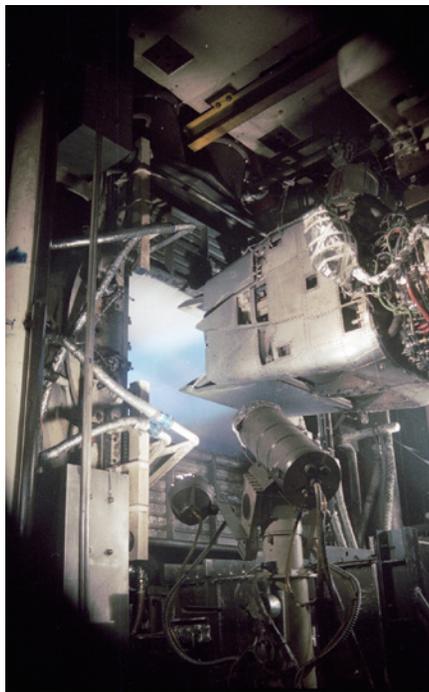
### 美国试车台校准方法

美国ARP741《涡喷/涡扇发动机试车台交叉校准》提供了不同试车台之间试验结果相关性确定的一种方法,其实质是基准试车台与被校试车台之间的比对试验方法。该方法利用一台性能稳定且已知的发动机在基准试车台和被校试车台上进行试车(比对),来校准被校试车台并确定其修

正值(修正系数),试车前要严格对车台测试系统和发动机性能参数测量通道进行计量标定。普惠公司在1983年用一台PW2037发动机在X-217和X-218高空舱进行了比对试验,完成了对新建高空舱X-218的校准。北大西洋公约组织(北约)在1980—1990年实施的“发动机试验一致性”计划,用两台J57涡喷发动机在美国、英国、法国、加拿大和土耳其的4个高空舱和4个地面台之间进行了比对试验研究,从而统一了北约内部发动机性能参数确定及不确定度的评定方法,实现了不同试车台试验结果的有效共享和传递。

### 俄罗斯试车台校准方法

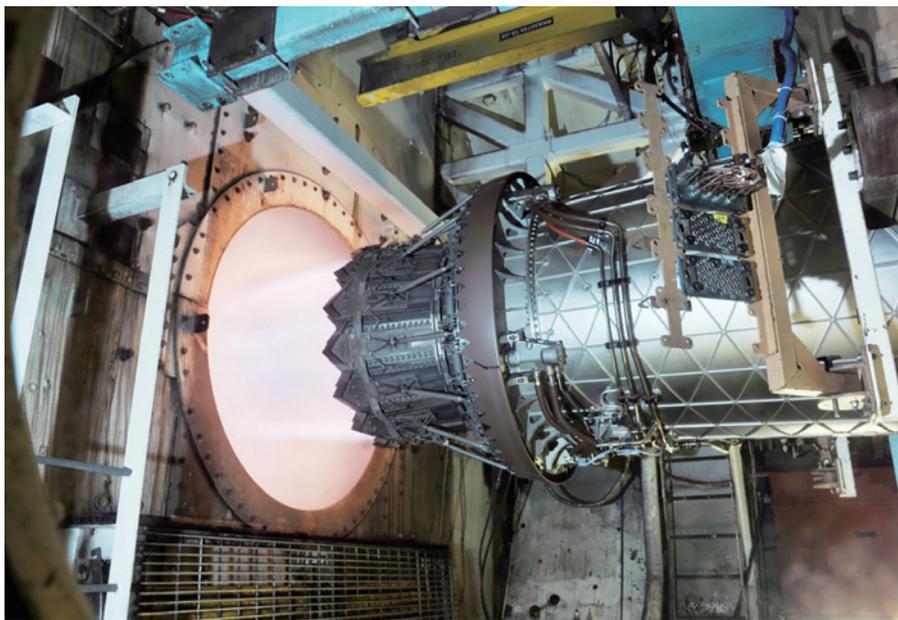
俄罗斯涡喷/涡扇发动机试车台采用测试系统计量标定和发动机比对试验的校准方法,并在1985年对《确定燃气涡轮发动机台架试验时的推力》(方法53-85)进行过修订。



YF119原型发动机在C-1舱进行试验



F136发动机在J2舱进行试验准备



F135-PW-100发动机在J2舱进行试验

该方法的关键内容包括三方面：首先是计量标定参加比对校准的试车台测试系统，以确定发动机稳定工作时气流压力、温度、湿度、测量推力、发动机转速、燃油流量、喷管面积、流量管面积等直接测量通道的误差以及发动机主要性能参数的间接测量误差；其次是确定被校试车台的气动特性，包括发动机前气流流场的均匀性、平均速度、试验间轴向压力分布和喷管外表面压力分布等，以确定进气冲压和次流流动以及喷口处负压对发动机推力测量的影响；最后是比对试验，即用一台带工作喷管和刚性收敛喷管的发动机分别在基准试车台和被校试车台上进行规定试验，进而得出被校试车台试验该型发动机的主要性能参数及其修正系数。1992—1995年的中俄高空台和1999—2004年的中国高空台与地面台之间的对比试验就是俄罗斯试车台校准方法在我

国试车台比对校准上的应用和实践。

### 英国试车台校准方法

英国试车台校准采用标准发动机和标准试车台方法，即用标准发动机在标准试车台和被校试车台上进行比对试验来校准被校试车台；或者直接用标准发动机试车来校准被校试车台；或者在没有标准发动机和标准试车台时，就用高空台或者海平面露天试车台试验来得到“标准发动机”，进而用该标准发动机试车来校准被校试车台。英国的这三种方法本质上都是基准试车台与被校试车台之间的比对试验校准。该校准方法也包括测试系统计量标定、试车台气动特性测试（进气冲压、台架阻力等）和比对试验三个部分，与美国ARP741校准规范是内在一致的。我国在斯贝发动机引进中，就用英国罗罗公司生产的性能合格、使用时间较短、状态较好的一台发动机作为标准发动机，在罗罗公司

一个试车台（基准试车台）和我国的一个试车台（被校试车台）之间进行了比对试验，从而确定了该试车台试验斯贝发动机的试验结果的有效性和性能修正系数。

## 试车台校准与试验结果的权威性面临困境

试车台按照GJB721校准规范通过校准后，其试车结果和发动机性能的有效性和权威性就有了根本保障，而且保证了发动机性能在不同试车台之间和发动机相关各方之间的共享和有效传递，因此试车台按规定进行校准无疑是有益的、应当的。

不过，由于国内航空发动机试验条件建设的不完善，以前一直没有严格意义上的涡喷/涡扇发动机基准试车台。尽管我国高空台1号舱经过了与俄高空台4号舱的严格比对校准，然而由于试验任务一直饱满，加之国内发动机研制生产单位的试车任务较多而且试车结果也“基本可以接受”，致使我国SB101高空台未能有效担当基准试车台的使命。

与此同时，国内目前也没有与在研涡喷/涡扇发动机试验相适应的基准发动机。尽管引进过斯贝、阿勒-31等所谓的“标准发动机”，但由于发动机自身性能衰减和技术状态变化，也难以确保其基准的地位。这些使得GJB721校准规范有效执行面临的问题越来越多，尤其是对新研发发动机而言，难以找到和确定与之相应的发动机作为基准发动机载体来进行比对试验校准，致使试车台发动机试验性能准确性和权威性的疑问一直搁置和受到严重关切，影响到了发动机性能指标的科学评定。

再者，试车台比对校准涉及到发

动机资源、试车台资源、试车台测试系统计量标定、试车台气动特性精细测量和大量的比对试验工作，使得试车台校准的周期长、费用高，这也是试车台在建设和使用中未能严格执行GJB721校准规范的重要因素。

## 我国试车台比对校准的机遇与可行性

### 试车台比对校准的机遇

为适应“两机”专项发动机研发的试验需要，我们还需要新建和改造相当数量的试车台，而且同一型甚至同一台发动机在不同单位和不同地域试车台上实施试验分析与试验鉴定工作在所难免。这些试车台证明其能够真实反映和客观评价被试发动机的性能、保证试车台的良好状态和不同车台之间试验结果的一致性的最有效和简易的方法，就是按GJB721校准规范进行试车台之间的比对试验。这就为试车台比对校准提供了前所未有的资源、素材和紧迫需求。我国至今已建有4个高空试验舱（其中3个为不同流量和推力量级的涡喷/涡扇发动机试验舱）和1个露天试车台区（4个试车台），这些舱和台为按GJB721校准规范进行比对试验校准提供了较为充裕的基准试车台资源。

为准确评估涡喷/涡扇发动机使用、作战的适用性和有效性，试车台试验和试验鉴定工作就必须能切实摸清被试发动机的性能底数与效能底数，严格把控发动机技术研究的验证效果和发动机产品定型、交付的关口，确保交付的发动机管用、实用、好用、耐用，这是新的涡喷/涡扇发动机试验鉴定工作的主要任务。要胜任该任务，试车台首

先就得说清楚自身的技术状态和试验结果的有效性和权威性，确保发动机试验的“测试准确、结果公正”，这就得按GJB721校准规范定期进行试车台的比对试验校准。因此试车台比对校准会有相当需求。

对发动机试验而言，试车台测出的推力、耗油率等性能参数准不准、不可靠？同一台发动机在不同试车台上试验得出的结果是否一致？不一致的原因是什么、有何改进？有无相应的标准或规范使各类试车台保持良好状态？这些都是试车台技术状态和试验质量控制必须回答和确保的问题。要回答这些问题，最简易和令人信服的方法就是按GJB721进行比对试验。因此，试车台比对校准不再仅仅是某个厂所的内部事务，已成为发动机用户和发动机研制单位的共同关注和需要。

### 试车台比对校准的可行性

首先，分别与俄罗斯、英国合作完成的试车台比对试验工作使我国不仅在实践中有效贯彻了GJB721校准规范，而且了解掌握了俄罗斯试车台计量标定和比对试验校准、美英等国试车台交叉校准的一整套技术方法，从中获取了实践经验，大大降低了技术风险。表1示出了中俄高空台试验舱的计量标定与比对试验结果。

第二，我国新建和改扩建的试车台和已建成的4个高空舱与露天试车台区，为按GJB721校准规范开展试车台比对试验提供充足的市场需求和软硬件资源。需要时，还可开展我国高空台2号舱与1号舱之间的比对试验，以及高空台、室内地面试车台和露天试车台之间的比对试验。这就意味着需要统筹安排比对

试验经费、周期和试车台的比对试验与生产研制试验任务，但这些与试车台比对试验校准的需求、效益和作用相较而言，都不是难题甚至不再是问题。

第三，根据新的航空发动机试验鉴定工作要求，只有技术状态清楚，能够准确、客观地评价被试发动机的战术技术性能、作战使用效能和保障效能，并严格把住发动机定型与交付关口并能摸清其性能底数的试车台，才能作为鉴定试车台和承担发动机鉴定试验。因此，试车台比对校准已经成为中国航空发动机集团和发动机最终用户的强制要求和严重关切。

## 结束语

当前，涡喷/涡扇发动机试验任务和试车台建设需求都大幅增加，这为发动机试验能力与技术水平提升创造了有利条件。同时“两机”专项的实施和装备实战化能力鉴定的改革也对发动机推力、耗油率等参数的试验结果的有效性与权威性提出了更高要求。而试车台的校准就是保证试验结果有效性和权威性的重要措施之一。

与航空发动机发达国家相比，试车台比对校准研究和比对试验工作是我国的短板之一。在相关部门统筹策划下，开展涡喷/涡扇发动机试车台比对试验校准研究是非常必要的，也是完全可行的。要想快速打赢自主研发航空发动机攻坚战，这项基础平台工作必须要落实，否则就会欲速则不达。

**航空动力**

（焦天佑，中国航发科技委试验与测试专业委员会委员，研究员，长期从事航空发动机试验研究工作）