

# 利用压缩空气驱动的高速列车模型加速技术

杨乾锁<sup>1</sup>, 宋军浩<sup>1,2</sup>, 杨国伟<sup>1</sup>

(1 中国科学院力学研究所高温气体动力学国家重点实验室(筹), 北京海淀区 100190)

(2 大连工业大学, 光子学研究所, 大连 116034)

**摘要:** 在动模型实验中, 为了将质量较大的高速列车模型加速到 500 公里/小时以上, 我们提出并验证了一种利用压缩空气的动模型实验列车的均匀加速技术。来自于空气炮的压缩气体推动加速管内的活塞, 活塞通过后面的一根绳缆来牵引拖曳车, 最后拖曳车推动或牵引列车模型使其均匀加速到所要求的速度, 然后释放使列车模型进入实验段。拖曳车和列车模型的减速采用刹车片和橡胶摩擦的方式。原理性的实验结果表明: 空气炮的初始压力和拖曳车的动能成线性的比例。在加速长度为 20 米的原理验证试验中, 拖曳车和运动部分的总体重量超过了 10 公斤, 总体的最高速度达到了 420 公里/小时。

**关键词** 动模型实验, 空气炮, 压缩空气, 摩擦, 减速

## 1 绪 言

作为一为了准确模拟高速列车外型的空气动力学性能, 在高速列车动模型实验中需要将大尺寸的列车模型在有限的距离内加速到所要求的速度。然后让列车进入试验段, 完成相关的动模型实验测试。随后, 动模型车进入回收减速段, 模型逐步减速直至停止。随着列车模型外型尺寸的增大, 其重量迅速增加。而模型车的加速和减速难度及其建造费用亦随之增加。其中列车模型的加速技术是列车动模型实验的关键所在。

目前, 列车模型的加速途径之一是使用弹力索来加速带有动滑轮组的列车模型 [1], 这里利用动滑轮组来使列车模型的速度达到弹力索末端速度的数倍。这种加速技术适用于质量较大列车模型的加速。并且, 被加速的列车模型的外型尺寸可以真实模拟列车的空气动力学外型。但是, 这种列车模型的加速方式由于牵引列车模型的牵引索要进入动滑轮组内带动动滑轮转动, 并使整个动滑轮组随之移动, 其各种

摩擦力和机械能的损耗迅速增加, 因此模型车的最大速度受到了限制, 一般不超过 300 公里/小时。另一方面, 只有列车速度在 300 公里/小时以上时, 列车外形的空气动力学效应才明显。因此这种加速技术不适合用于速度更高的高速列车模型的加速。

另一类列车模型的加速技术是利用压缩空气将安放在加速管内的列车模型发射出来[2-5]。尽管这种技术可以把列车模型加速到 350 公里/小时以上, 但是下面的各种缺点使得这种加速技术不能应用于外型尺寸较大的动模型实验列车的加速。第一, 由于列车模型从加速管内发射, 列车的外型尺寸和结构形式严格被限制。当列车模型的尺寸增大时, 发射管的口径随之增加。第二, 由于列车模型在通过试验段后, 需要减速回收, 这种结构形式的列车模型由于结构形式的限制不能在回收减速段进行有效的减速和回收。第三, 当列车模型要有一定形式的空气动力学外型时, 加速管的封闭变成一个两难的问题: 如果利用列车模型的末端进

行封闭, 对应的列车模型空气动力学外型被破坏; 如果利用活塞进行封闭, 列车模型发射后, 活塞在加速段的减速是一个棘手的问题。第四, 来自加速管的压缩空气会严重干扰列车模型在实验段的实验测试, 尽管可以用大型凹腔来消除这种高压气流对实验段的干扰[5], 但是凹腔的使用限制了双向对开的列车模型实验工作的展开。第五, 在这种列车加速装置中, 不能在列车模型的顶端安装受电弓模型。

考虑到上述两类列车模型加速技术的特点, 为了将具有较大质量和较大外型尺寸的列车模型加速到 500 公里/小时以上, 以开展我国目前发展的各种高速列车大比例(1:8~1:10)的动模型空气动力学实验模拟, 我们提出了并正在研制总长度在 180 米, 可以将 40 公斤的列车模型加速到 500 公里/小时以上的高速列车动模型实验平台。在实验中, 列车模型的外型可以完全模拟真实列车的空气动力学外型, 并且顶端可以安装受电弓以研究受电弓的受力情况, 列车模型的加速是利用压缩空气驱动活塞间接完成的。

## 2 大质量和大外型尺寸列车模型加速技术

压缩空气驱动的高速列车模型加速原理如图 1 所示。图 1(a)所示的是压缩空气推动活塞, 而活塞通过牵引索拖拉拖曳车的加速和减速示意图。这部分位于列车模型实验装置的底部。而上部是列车模型运动的三个过程: 加速段、实验段和刹车段, 如图 1(b)所示。压缩空气来自于一个电子线路控制的空气炮。当压缩气体进入加速管后, 向右推动活塞。而活塞的移动通过牵引索牵引拖拽车一起向右移动, 这里牵引索通过加速管封闭端的小孔和拖拽装置连接。由于小孔的直径与活塞的直径比为 1:11, 因此在压缩空气进入加速管推动活塞向右移动的过程中, 通过小孔泄漏的高压空气可以忽略不计。而拖拽装置将拖拉着列车模型一起作加速运动。当活塞经过加速管末端时, 加

速管末端的侧孔使压缩空气泄漏, 活塞失去加速所需的拉力。但是拖拽装置进入减速段开始减速。这样在拖拽装置减速过程中, 通过牵引索使活塞亦减速下来。而列车模型由于惯性, 继续以匀速运动向前进入试验段, 开始相关实验测试。

在上述高速列车动模型实验平台的研制过程中, 我们分步开展相关的实验研究来验证我们方案的原理和技术上可行性及其未来要达到相关指标的运行参数。

## 3 方案的实验验证及其实验结果

第一类实验是活塞加速实验, 如图 2 所示。这里来自空气炮的压缩空气进入加速管密封的左端和活塞之间, 进入的压缩空气推动活塞加速向右运动, 当活塞加速到加速段的末端, 压缩空气从放气孔泻出, 活塞停止加速。这里加速管内径为 110mm, 加速管长度 15 米, 活塞重量分别为 1.7 公斤和 3.3 公斤。空气炮和 15 米加速管的容积分别为 280 升和 142 升。得到实验结果如图 3(a)和 3(b)所示, 其中图 3(a)和(b)分别为活塞的速度和动能, 这里空气炮的压力为空气炮主室的绝对压力减去一个大气压。

为了便于分析整个加速系统的工作性能, 根据实际的驱动状态我们建立了初步的压缩空气所作的功和运动部分动能的关系公式:

$$P_0 \cdot S \cdot L \cdot g \cdot \eta = \frac{1}{2} m V^2 \quad (1)$$

这里假设空气炮提供的是稳定的压力, 其压力是空气炮的初始压力  $P_0$ , 加速管的横截面积为  $S$ , 长度为  $L$ , 压缩空气做功为:

$$W = P_0 \cdot S \cdot L \cdot g \quad (2)$$

这里, 活塞的重量为  $m$ , 活塞的速度为  $V$ , 压缩空气做功变为模型车动能的效率为  $\eta$ 。由图 3(c)所示的实验结果可以看出: 一方面, 空气炮的压力越高, 系统能量转换的效率就越高。另一方面, 增加活塞的质量, 有利于转换效率

的提高。当将活塞质量增加到 3.3 公斤时，在 4 个大气压的初始压力下，活塞的速度达到 378km/hour，对应的动能为 19.6KJ，效率提高到 33%。上述特征的原因在于：随着压力的增加，活塞在运动过程中摩擦力做的功相对于压缩气体膨胀做得功的比例逐步减小，这样对应的能量转换逐步有所增加。

为了进一步验证连接有拖拽装置的活塞被压缩空气加速的可能性和效率，以最后确定 180 米长动模型的最后设计方案，我们设计了如图 1(a)的动模型底部驱动实验装置。这里加速管的内径仍为 110mm，拖拽车在轨道上滑行。当活塞经过放气孔时，拖拽车开始减速，通过牵引索使活塞也在减速管内减速停下来。通过变化整个运动部分的质量，我们来研究能量转化系数的变化特性。这里空气炮的容积仍为 280 升，加速管的容积随其长度而发生变化，图 4 为实验结果。

由图 4(b)所示的实验结果可以发现，在固定空气炮容积和加速长度的条件下，效率几乎不随空气炮的初始压力发生变化，这为我们操作整个系统提供了理论依据和预测依据。另一方面，在只固定空气炮容积的条件下，加速管的长度越长，压缩空气中的能量转化到运动部件的能量效率就越低。其原因在于：在空气炮的开关打开后，随着空气炮内压缩空气的膨胀压力随之下降。在整个加速过程中，加速管越长，膨胀部分的体积就越大，这样压缩空气初始压力和加速末端的压力差就越大，末端的加速度就越低。因此，当延长加速管时，为了维

持系统能量的转化效率，也因该按比例提高空气炮的容积。最后，实验结果还表明：在加速管长度固定的情况下，随着运动部件质量的增加，能量转换效率也有所提高。将两类实验相比，运动部分的质量越重，能量的转换效率就越高。

#### 4. 总结

本文提出了一种利用由空气炮提供的压缩空气来驱动加速管内的活塞，利用活塞来牵引一个拖车能够牵引或推动列车模型的高速列车模型车加速方案。为了验证这个方案在技术上的可行性和相关的工作参数，设计了两类实验。两类实验的结果不仅验证了这个技术方案的可行性，而且为未来空气炮结构参数、加速管的长度和口径设计提供了技术依据，并为安全开展实验研究工作奠定了实验基础。

#### 参考文献：

- 1 田红旗 列车空气动力学 中国铁道工业出版社 (2007-01出版)
- 2 J. L. Zonglin, K. Matsuoka, A. Sasoh, K. Takayama, Numerical and experimental investigation of wave dynamic processes in high-speed train/tunnels ACTA MECHANICA SINICA, Vol.18, No.3, June 2002
- 3 Takayama K, Sasoh A, Onodera O, et al. Experimental investigation on tunnel sonic boom. *Shock Waves*, 1995, 5:127~138
- 4 Sasoh A, Matsuoka K, Nakashio K, et al. Attenuation of weak shock waves along pseudo perforated walls. *Shock Waves*, 1998, 8:161N172
- 5 E. A. Demmenie, A.C. de Bruin, E. Klaver, Experimental pressure wave research at NLR for high-speed rail tunnels, NLR-TP-98375, 1998.

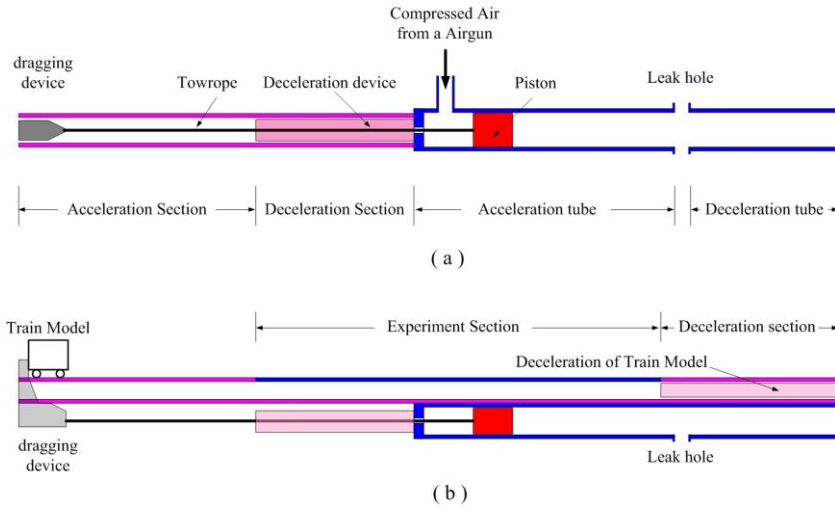


图 1 压缩空气驱动模型加速示意图: (a)底部的加速部分和(b)整体结构的侧视图

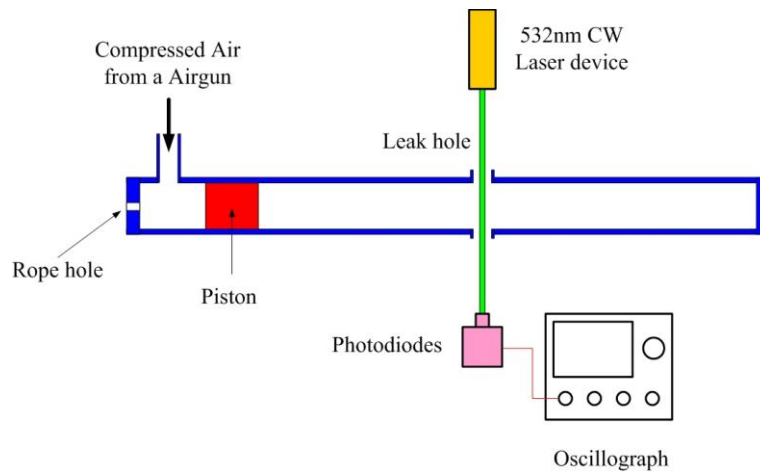


图 2 压缩空气驱动活塞加速实验的装置示意图

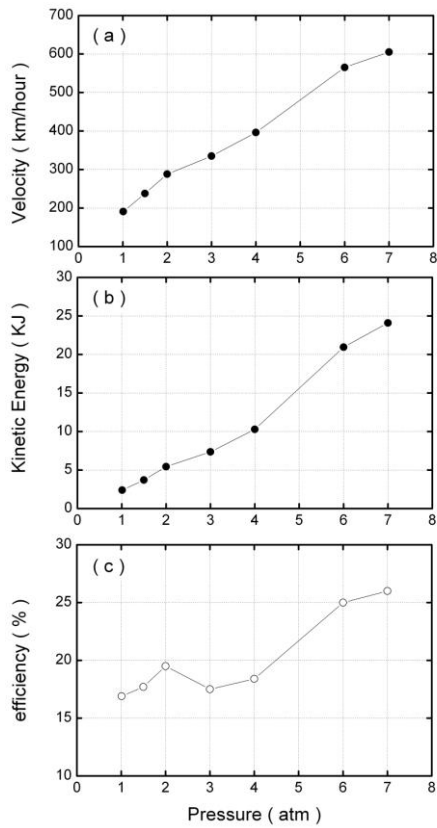


图3 压缩空气驱动活塞实验数据(a)速度(b)动能和(c)转换效率随压力的变化

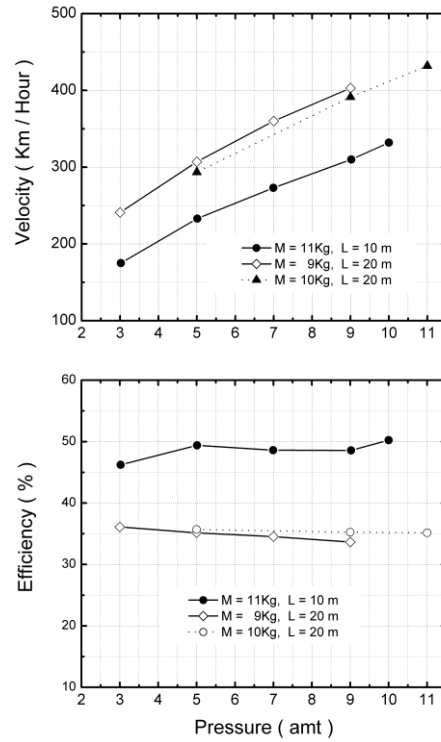


图4 不同长度的加速管压缩空气驱动带拖曳车的活塞速度随压力的变化

## AN NEW APPROACH FOR ACCELERATION OF TRAIN MODEL WITH COMPRESSED AIR

YANG Qiansuo<sup>1</sup> SONG Junhao<sup>1,2</sup> YANG Guowei<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese academy of sciences, Beijing 100190, China)

(2 Dalian Polytechnic University, Dalian, 116034, , China)

**Abstract** In order to accelerate a heavy train model with a large dimension to a velocity higher than 500 km/hour for the moving model test, the compressed air is utilized to drive the model indirectly. The gas from an airgun impels a piston in the accelerating tube for a uniformly acceleration. The piston connects a driving device through a rope and the device promotes or pulls the train model for a desired velocity. The deceleration of the train model and the driving device are all realized by the friction between the brake plates and the rubber blocks. The principium experiment results reveal that the initial pressure of the airgun is linearly proportional to the kinetic energy of the model where the moving assembly with a weight more than 10 kg has been accelerated to 420 km/hour in an accelerating distance of 20m.

**Key words:** Train model testing, Air gun, Compressed air, Friction, deceleration.