



KONGQI

DONGLISHIYANYUYANJIU

空气动力实验与研究

哈尔滨空气动力研究所

低速风洞滑流试验
中的几个影响因素与修正方法探讨

舒 宗 国

哈尔滨空气动力研究所

一九八九年九月

目 录

一、低速风洞滑流试验中的几个影响因素与修正方法探讨	舒宗国
二、FL-8低速风洞带动力支架干扰实验研究	王玉凤
三、低速风洞腹撑支架气动外形的实验研究	田学诗
四、旋转天平与飞机尾旋运动预测	楼海辉 沈济全
五、TAK半模在MBB与HARI低速风洞实验对比分析	郝卫东 舒宗国
六、湍流减阻的一种措施	胡国伟
七、三维附面层转捩位置的测量	卞于中
八、风洞中复杂涡流场三维速度LDV测量	唐敏中 曹 锐
九、翼下导弹发射架测力天平	贾庚仁 李富成 白桂珍
十、空气湿度对风洞实验的影响	付维军 楼海辉 陈景春
十一、FL-8风洞轴同分段可变开闭比斜孔 壁二元试验研究	单希状 王树杰 陈永魁
十二、求解二元翼型非守恒全速位跨音速 绕流的AF ₃ 方法	鲁 滨 谢志强

摘 要

螺旋桨飞机模型风洞带动力实验结果的精准度远较无动力实验差。在采用了先进的高转速大功率螺旋桨驱动电机及稳转速控制系统后，情况大有改善，但对不同期实验结果的吻合性仍无明显改进。本文通过对影响因素的分析，给出了风洞温度，大气压和速压偏差对实验结果影响的修正方法。实践证明，按本文提供的滑流补偿实验法进行实验，可以基本消除因风洞温度、大气压变化对实验结果的影响。速压偏差影响也可以按文中提供的方法得到较为满意的修正。考虑上述三项修正后，滑流实验的精准度可与无动力实验相比，特别对阻力分量的精准度的提高尤为显著。

目 录

- 一、引 言
- 二、影响滑流实验精准度的因素
- 三、考虑风洞温度和大气压影响的滑流补偿实验法
- 四、速压偏差影响的修正方法
- 五、修正方法应用效果
- 六、结 论
- 七、结束语

一、引言

与喷气发动机飞机比较，螺旋桨滑流对飞机气动特性的影响要大得多，而且只能通过带动力模型的风洞实验才能较为准确地给出其影响量。影响量的大小与螺旋桨的拉力系数和个数成正比，与飞机的载推比成反比。

风洞滑流实验基于不同的目的有不同的实验方法，但最基本的方法是固定拉力系数为常数，改变模型姿态做实验。因为由此得出的数据除了可以直接用于偏航和载荷计算外，可以转换成其他各种实验方法所得的数据和曲线。

多年来，风洞实验工作者一直被风洞滑流实验的重复性远较常规（无动力）实验差所困扰。原因是除常规实验的影响因素外，还要受到实验风速太低以及螺旋桨驱动电机转速控制不稳等影响。因此多年来滑流实验技术的改进主要在改善动力设备上下功夫。

对于3米量级风洞来说，如果驱动电机功率大于15kw，最大转速20000转/分，转速控制精度达到10转/分时，滑流试验风速可以达到40米/秒左右。这样滑流实验的连续重复性精度大大提高，同无动力实验具有相当的水平。

但是，此时滑流实验的不同时间的重复性精度问题并没有很好解决。原因是在实验过程中，虽然电机转速保持不变，但拉力系数却可能是随时间变化的。

二、影响风洞滑流实验精准度的因素

在滑流试验过程中，拉力系数 T_c 不恒定是影响实验精准度的主要原因。

1、风洞滑流实验的基本方法

固定拉力系数为常数改变模型姿态的实验方法为恒拉力系数法，具体步骤是：先进行预备性实验，根据飞机典型模拟状态的 $T_c \sim Q_c$ 曲线，选定风洞实验时的螺旋桨桨叶角和实验风速，以及与拉力系数 T_c 对应的螺旋桨转速。然后用选定的桨叶角和实验风速进行固定转速的恒拉力系数实验。由此可见，恒拉力系数是通过恒电机转速实现的。

2、影响拉力系数保持常值的因素

一般讲有四种因素影响 T_c 变化，即桨叶角 μ ，螺旋桨转速 n ，飞行速度 v 和空气密度 ρ 。而空气密度 ρ 又可分解为温度 t 和大气压力 P_a 的影响。

现代螺旋桨飞机几乎都是变距螺旋桨飞机，螺旋桨转速变化范围很小。在一定飞行高度和飞行速度下，拉力系数 T_c 的大小是通过改变桨叶角 μ 来调节的。 μ 角一定则拉力系数 T_c 不变，在风洞实验中与此相反，是桨叶角 μ 不变，改变螺旋桨转速 n 来调节 T_c ，即是说 n 不变则 T_c 不变，恒拉力系数实验即变成恒转速 n 的实验。但在实验中发现，恒转速 n 并没有完全达到恒 T_c 的目的。这是因为 T_c 还受到上面提到的空气密度 ρ 变化影响的缘故，这和真飞机的 T_c 随飞行高度变化的影响实质是相同的：空气密度变化取决于温度和大气压力的变化。

另一影响因素是速压。实验速压的变化改变了螺旋桨气流的入流角，导致拉力变化。

由此看出，在风洞滑流实验中，通过预备实验选定了桨叶角和电机转速后，影响拉力系数为常值的因素变为三个：温度、大气压和速压。

风洞温度和大气压在吹风过程中发生变化是不可避免的。FL-8风洞夏天实验初期洞温约 20° 左右，经连续运转后风洞温度可达 45° 。冬天风洞温度 0°C ，经几天连续运行后达 20°C 左右。大气压亦随天气、昼夜、季节而变化。一个典型记录见附图1。二者导致风洞空气密度变化，使螺旋桨拉力不恒定，造成前后实验滑流影响不一致。

对于稳风速系统不够理想的风洞来说，速压偏差是存在的。速压随攻角变化更明显，对螺旋桨拉力的影响也最严重。

三、考虑风洞温度和大气压影响的滑流补偿实验法

滑流补偿实验法是对给定电机转速进行补偿修正来保持实验过程中拉力系数为常数的方法，是对传统实验方法的改进。

通过预备性实验可以得到如下两种曲线：拉力系数和扭矩系数曲线($T_C \sim Q_C$)(图1)以及电机转速控制曲线($T_C \sim n$)(图2)由 $T_C \sim Q_C$ 曲线选定桨叶角 ψ ，由 $T_C \sim n$ 曲线根据模拟的拉力系数 $T_{C_1}, T_{C_2} \dots$ 确定相应的电机转速 $n_1, n_2 \dots$ 。必须指出的是，根据 $T_C \sim n$ 曲线确定的开车转速 $n_1, n_2, \dots$ ，只相应于预备实验时风洞温度和大气压条件之值。当正式吹风时，如果温度和大气压有异于预备实验条件时，则空气密度

发生变化，在此转速下相应的拉力系数亦将发生变化。此时要想保持拉力系数 T_c 为常值，必须对已确定的转速 $n(n_1, n_2 \dots)$ 进行补偿修正。补偿修正后的电机转速由电机转速控制"通用"曲线查取。图2所示的电机转速控制曲线只不过是"通用"曲线的一个特例而已。"通用"曲线按下述方法绘制。

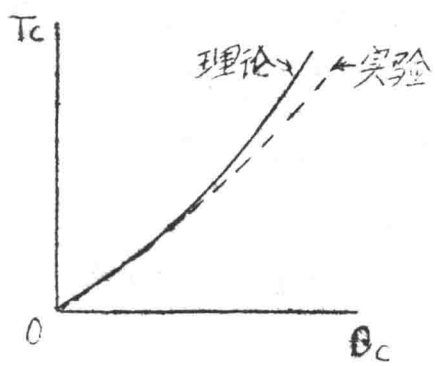


图1、 $T_c \sim Q_c$ 曲线

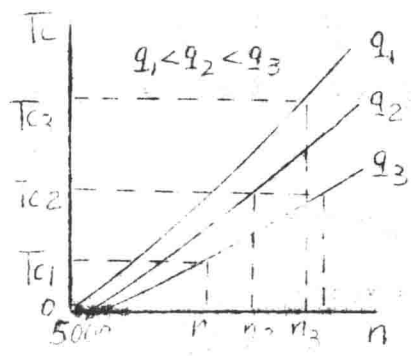


图2、 $T_c \sim n$ 曲线(电机转速控制曲线)

1、根据预备实验条件绘制电机转速控制"通用"曲线

由预备实验还可绘出第三种曲线，即 $T_c \sim \lambda$ 曲线(图3)。在动力模拟中， $T_c \sim \lambda$ 曲线不随实验条件改变而变化。当桨叶角确定以后， T_c 与 λ 有唯一的对应关系，因此只要保持 λ 为常数， T_c 就自然为常值

了。与 T_c 对应的 λ 值由图3查取。

因为螺旋桨的前进比

$$\lambda = \frac{V}{Dn}$$

由于

$$V = \frac{4\sqrt{q}}{\sigma}$$

所以

$$\lambda = \frac{c}{n\sqrt{\sigma}}$$

式中 q —— 控制速压，视为常值

σ —— 涵道比， $\frac{D}{B}$

$$c = \frac{4\sqrt{q}}{D} = \text{常数}$$

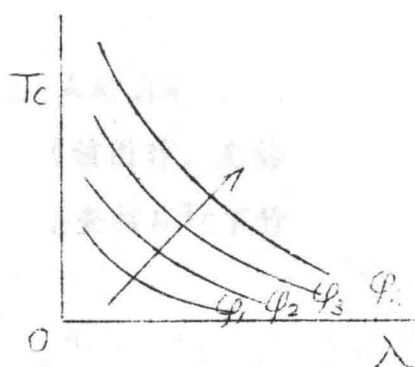


图3. $T_c \sim \lambda$ 曲线

在风洞试验过程中，要求 λ 保持常值，得到实验时电机控制转速为

$$n_2 = n_1 \sqrt{\frac{T_{02} P_1}{T_{01} A_1 P_2}}$$

$$\text{即 } n_2 = n_1 f(t_{01}, t_{02}, MB_1, MB_2, q) \quad (1)$$

式中

$$A_1 = (1 + q/p_1)^{\frac{1}{3.5}}$$

P 为风洞实验段静压,

t_0 为风洞气流总温, $^{\circ}\text{C}$,

MB 为大气压读数。

注脚“1”为予备实验条件下的值

“2”为正式吹风条件下的值

根据予备试验条件 t_{01} , MB_1 , n_1 和控制速压 q 由(1) 式给出的电机转速控制通用曲线的实例见附图3。由图可知, 在使用该图时, 先读取当天的大气压 MB_2 和当时的风洞温度 t_{02} , 根据 MB_2 , t_{02} 查相应 T_c 下的曲线即可得到电机需要控制的转速 n_2 。

2、根据 λ , q 绘制通用曲线

前面已经提到当模型螺旋桨几何外形(包括桨叶角)确定时, $T_c \sim \lambda$ 有唯一的对应关系。

$$\text{由 } \lambda = \frac{V}{nD}$$

$$\text{得 } n = \frac{V}{\lambda D} \quad (2)$$

式中符号定义同前

为了方便，可将(2)式绘制成如下“通用”形式：

1)、绘制 $n \sim v$ 关系曲线

当 λ 一定时， n 与 v 有唯一的关系，如右图上部分。

2)、绘制 $v=f(MB, t_0)$

关系曲线

经过简单推导得速度与大气压和温度的关系式为

$$v=44.826\sqrt{T_0(1-A)} \quad (3)$$

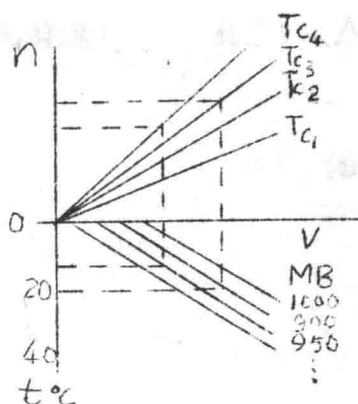


图4、通用曲线(二)示意图

由(3)式可作出图4所示的下部分。上下两部分构成一张完整的电机转速控制通用图。在使用时，根据实验时风洞的温度和大气压，从图下部分查得相应的实验风速，根据实验风速 v 从图的上部分即查得保持拉力系数为常值时需要的电机转速 n 。

3、“通用曲线”的使用

滑流实验需用的电机控制转速根据当时测取的温度和读取的大气压直接从通用控制曲线查取。但电机操作人员往往嫌麻烦，不愿认真随时插取，因此实际中可采用简化措施。

实践证明，一天的大气压变化是很小的，因此只需白天读取一次，晚间读取一次就可以了。这样可以认为在一个班次中电机控制转速 n 只随温度 t_0 变化。

由控制通用曲线(或通过计算)求得 $Kn(\text{转}/^\circ\text{C}) \sim Tc$ 曲线如图5所示。

根据图5事先求得相应于温度增量 Δt 的电机转速增量曲线 $\Delta n \sim \Delta t$ 如图6。则在实验过程中电机控制转速为

$$n = n_0 + \Delta n \quad (4)$$

式中 $\Delta n = K_n \Delta t$

$$\Delta t = t_i - t_0$$

应用(4)式计算电机控制转速 n 的步骤是：开车前，首先读取当班的MB和风洞温度 t_0 ，然后根据“通用曲线”(如图4)查取相应的电机转速 n_0 。在吹风过程中，风洞温度变为 t_i ，即温度变化量为 $\Delta t = t_i - t_0$ ，则新的电机转速根据(4)式为

$$n = n_0 + \Delta n$$

式中 Δn 根据 Δt 从图6查取。由上看出图5为图6的过渡曲线。

显而易见，通用曲线对不同的模型是不一样的，但同一模型在实验过程中则是通用的。

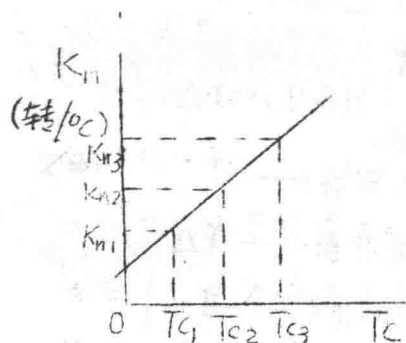


图5 $K_n \sim T_c$ 曲线

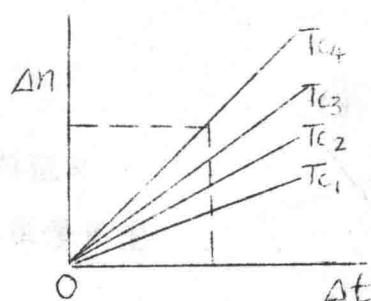


图6 $\Delta n \sim \Delta t$ 曲线

四、速压偏差影响的修正方法

速压偏差指实验速压偏离标准(预备实验选定的)速压, 包括因模型状态变化而引起的速压改变。速压偏离标准值将引起实验时的拉力系数偏离给定(模拟)值。在数据处理中要扣除因拉力系数偏离标准值而产生的附加的直接贡献, 尤其对阻力影响最大。当存在重心转换或不对称拉力时, 对六个分力均存在不可忽视的影响。修正的方法是在

数据处理公式中增加拉力系数修正量的影响项。

1、实际拉力系数的估算法

实践证明，实验过程中速压产生偏差是难以避免的，即使具有稳定速压装置的风洞亦如此。此时只是偏差量较小而已，但对滑流实验来说，仍能显示出对拉力系数的影响。此时实际拉力系数可按如下公式估算。设实际拉力系数为 T_c' ，则

$$T_c' = T_c + \Delta T_c$$

$$\Delta T_c = (1-B) \left(\frac{T_c}{B} - \frac{K}{S} \right) \quad (5)$$

式中 T_c ——标准速压拉力系数(模拟值)

ΔT_c ——速压偏差引起的拉力系数修正量

$B = q_a / q_r$

q_r ——标准速压(给定值)

q_a ——实验速压(采集速压经洞壁修正后)

k ——拉力变化修正系数，由实验方法或预备实验数据求得

s ——机翼参考面积

2、速压偏差对阻力的修正

速压偏差产生拉力系数增量 ΔT_c ，导致对阻力的修正为

$$C_x = C_{x_{\text{测}}} + \Delta C_{xq}$$

$$\Delta C_{xq} = N \Delta T_c \cos \alpha \cos \beta$$

式中

$C_{x_{测}}$ ——阻力系数测量值

ΔC_{xq} ——速压偏差引起的对阻力系数的修正量

N ——发动机台数

对其他分力的速压影响修正公式从略。

五、修正方法应用效果

1、滑流补偿实验法效果比较

附图2为传统的电机转速控制曲线实例。附图3为滑流补偿实验法使用的电机转速控制通用曲线实例。附图4、5为XX飞机模型不同期和同期不同时间实验修与不修风洞温度，大气压影响的比较。由附图4和5看出，风洞温度和大气压对滑流实验（特别大拉力系数）精准度的影响很大，其中对阻力影响最大；从修后的重复性看，是比较满意的。说明滑流补偿实验法对温度，大气压影响修正是有效的。

对附图2中5月9日晚新条件下测得的电机转速控制曲线 $T_c \sim n$ ，用公式(2)进行了估算，用*号表示在图上，可见与实验曲线($\diamond$ ， $\circ$)完全重合，说明通用曲线公式(2)具有很好的预见性(即通用性)。

2、速压偏差修正与不修正的比较

附图6是一个速压随攻角变化最大偏差小于5的实际例子。修正后的结果与精心稳速压的测定结果几乎完全一致(甚至曲线变得更为光滑)，而未经速压偏差修正的曲线与修正后的曲线相差很远。

六、结 论

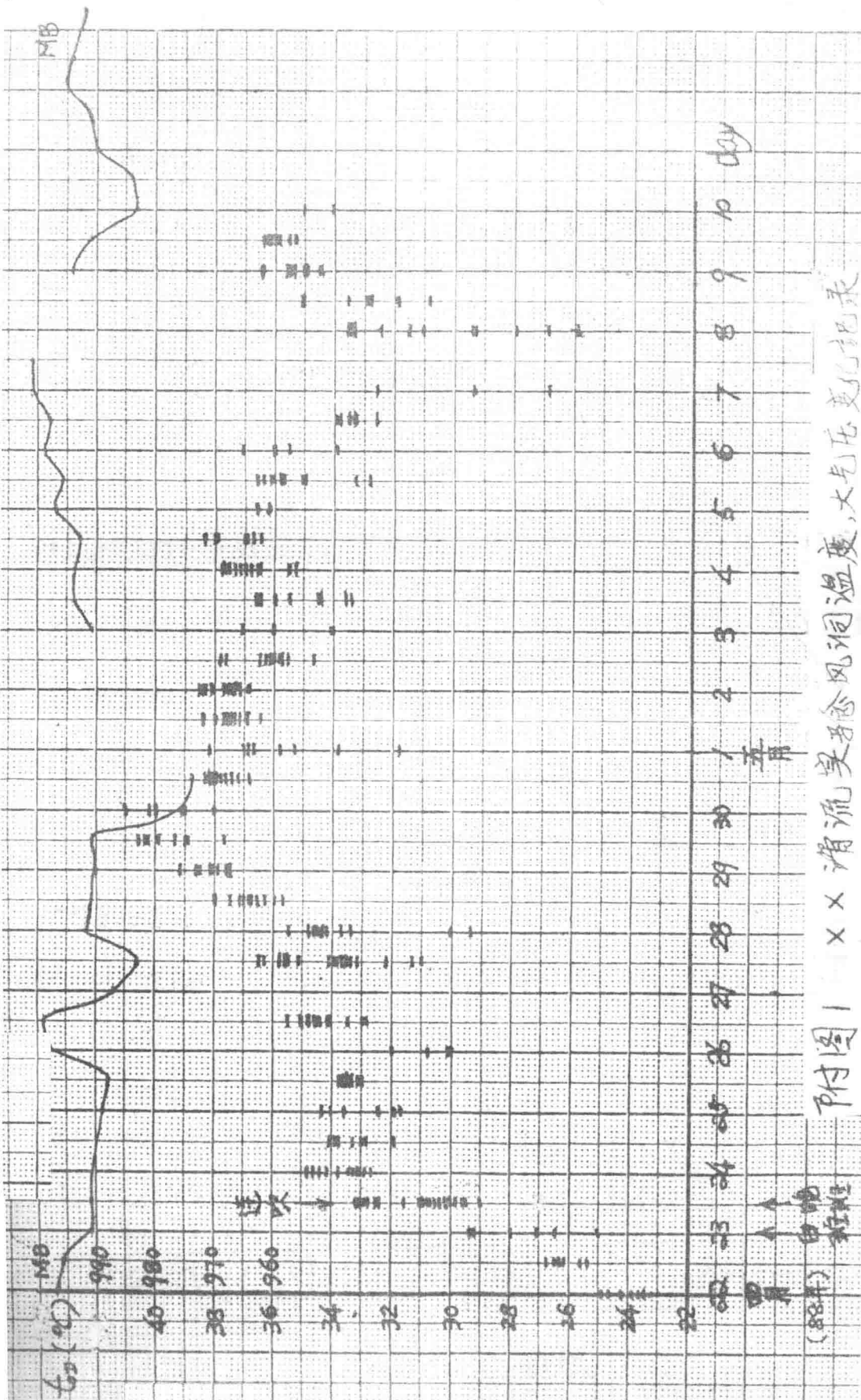
1、滑流补偿实验法为消除风洞温度和大气压影响，提高滑流实验的重复性精度提供了可靠途径，为同期不同时间以及不同期乃至不同风洞滑流实验结果的比较奠定了基础。

2、速压偏差修正是在准确的预备实验数据和采用补偿实验法所获结果的基础上进行的一项滑流实验数据修正。是稳速压系统不够理想的风洞进行滑流实验获得与恒速压风洞相同准确度的结果的可靠措施。

七、结 束 语

滑流实验应在恒温，恒速压，恒大气压条件下进行，这意味着稳速压系统不够理想的风洞不适合做滑流实验；没有恒温措施的风洞也只能间断式运行以不让风洞温度变化为约束。过去常采用分析大量的重复性实验结果的方法以寻求滑流实验的较为规律的数据。只有在具有先进的动力设备之后，滑流实验技术的深入研究才成为可能。目前采用的滑流补偿实验法和速压偏差修正法使得这项特种实验对风洞的苛刻要求变得没有必要了，也就是说在常规风洞中进行滑流实验可以获得与无动力精准度相当的结果。

本文所做工作是在郑正根，王玉凤等同志参与下完成的，特此致谢。



附图1 XX滑流实时风洞温度、大气压变化记录