

地坪的热膨胀在飞机制造中 对互换协调的影响

陕西飞机制造公司 刘忠梁

摘 要

本文针对大、中型飞机生产中出现的严重不协调现象,对厂房地坪相对于室温变化的伸缩情况,进行了试验研究。测出了厂房地坪相对于室温变化的伪热膨胀系数 $\alpha_{地伪}^*$,找出了在与地坪固定的型架中装配产品时,产生严重不协调现象的原因是厂房地坪的伪热膨胀系数大大小于工装和产品常用材料钢和铝合金的热膨胀系数,而严重地影响着固定于地坪上的型架中各尺寸随室温变化的伸缩量。同时也导出了在不同结构型式、不同材料的工装间,在不同室温下装配产品时,所产生的热膨胀综合误差的通用计算公式。探讨了型架结构发展的方向。

一、前 言

地坪的热胀冷缩,在飞机制造中对协调尺寸的影响,未见作过试验研究;对在热平衡条件下热膨胀误差的计算,在有关的文献资料中,是以制造飞机的材料为铝合金,制造工装及型架安装设备的材料是黑色金属(钢和铸钢),并以它们随室温的变化能自由伸缩为前提。按在这两种材料间传递协调尺寸时,由于热膨胀系数不同,及传递尺寸时的温度不同来进行计算,导出了一个只有在特殊情况下或尺寸传递的个别环节中,才适用的计算公式

$$\Delta L = L_0 \cdot \Delta \alpha \cdot \Delta t \quad (1)$$

而目前国内不少的大、中型工装,都是与厂房地坪固定的。从我们在不同时期内,

对某机种十台固定于地坪上的大型分散式型架一些主要协调尺寸,先后共进行五十多次的测量中,发现其误差值均比按式(1)计算的结果要大得多,且几经返修,误差仍然存在。

本文针对上述情况,对地坪热膨胀给协调尺寸产生的影响,进行了测试研究。并导出了各工装和其所装配产品的热膨胀系数均不相同,在不同温度下制造工装和装配产品的过程中,所产生的热膨胀综合误差的通用计算公式。

二、地坪相对于室温变化的伪热膨胀系数

地坪随地温变化的热膨胀系数,是不便于实际使用的。因此本文介绍的是应用钢制

*因地坪本身温度的变化要滞后于室温的变化,故令其为伪热膨胀系数。

1985年8月22日收到

长杆千分尺与厂房地坪相对于室温变化的相对热膨胀关系，模拟分散式型架在地坪上的固定情况，来测定地坪相对于室温变化的伪热膨胀系数 $\alpha_{地伪}$ 。即将两个直径为 $\phi 18f_9$ 的钢棒，垂直地埋在厚度为140mm，相距8979.67mm（20°C时的距离）的厂房地坪上。并在两钢棒之间，等距埋了八个定位档

块，用来保证在每次用长杆千分尺测量时的位置和直线度（见图1）。按一年四季气候的循环变化，每隔半个月左右，用钢制长杆千分尺（材料为20钢）测量两钢棒之间的距离。一年内所测得的结果列于表1，其变化如图2所示。

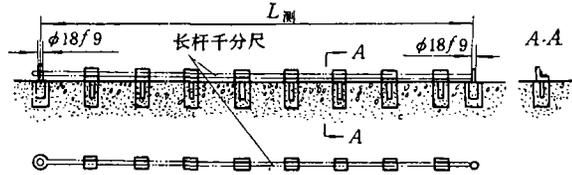


图1 测量地坪相对于室温伸缩的方法

表1 相对于室温变化测得的两钢棒间距离的数据

室温 °C	35.5°C	32°C	30°C	28.5°C	28°C	26.5°C	26°C	25°C	23°C	23°C
长度 $L_{测}$ mm	8978.25	8978.59	8978.72	8978.92	8978.87	8979.97	8979.07	8979.17	8979.32	8979.35
室温 °C	22°C	13°C	13°C	10°C	9°C	9°C	8.5°C	7.5°C	7°C	7°C
长度 $L_{测}$ mm	8979.39	8979.40	8979.47	8980.87	8980.92	8980.96	8981.02	8980.59	8980.97	8981.07

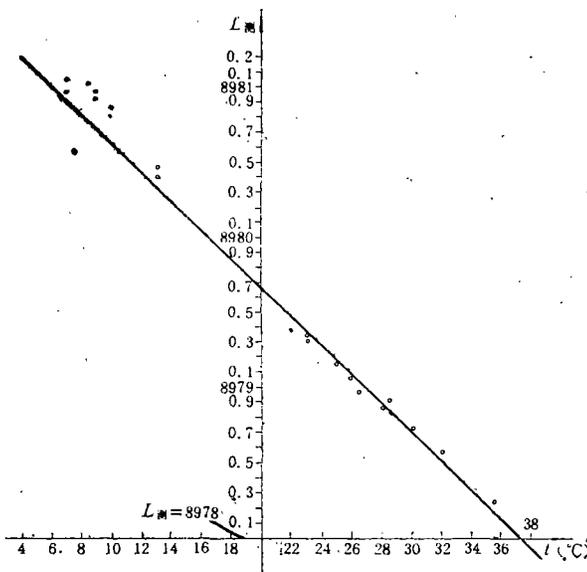


图2 两钢棒间距离相对于室温的变化

将图 2 中相对于室温变化的测量尺寸 $L_{测}$ 取
下式

$$L_{测} = L_0 + \Delta L$$

$$\Delta L = L_{地} - L_{钢}$$

$$\begin{aligned} \therefore L_{测} &= L_0 + (L_{地} - L_{钢}) \\ &= L_0 + \{ [L_0 + \alpha_{地伪}(t - t_0)L_0] \\ &\quad - [L_0 + \alpha_{钢}(t - t_0)L_0] \} \\ &= L_0 + (\alpha_{地伪} + \alpha_{钢})(t - t_0)L_0 \end{aligned}$$

$$\therefore \alpha_{地伪} = \frac{L_{测} - L_0}{(t - t_0)L_0} + \alpha_{钢} \quad (2)$$

式中

L_0 —— 室温为标准温度 20°C 时，地坪上两测量钢棒间的距离；

$L_{钢}$ —— 在室温为 20°C 时，长度为 L_0 的钢制长杆千分尺，相对于室温变化后的长度；

$L_{地}$ —— 地坪上两钢棒间相对于室温变化后的距离；

ΔL —— 在 20°C 时，长度均为 L_0 的两钢棒间距离与长杆千分尺相对于室温变化后的长度差；

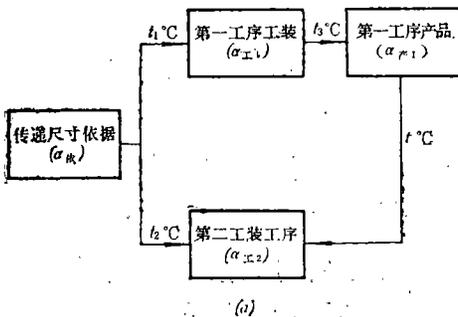
t_0 —— 标准温度 (20°C)；

$\alpha_{钢}$ —— 钢制长杆千分尺的热膨胀系数 ($\alpha_{钢} = 11.16 \cdot 10^{-6}$)；

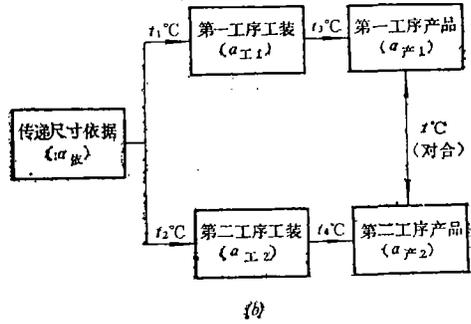
$\alpha_{地伪}$ —— 地坪相对于室温变化的热膨胀系数；

由图 2 可知：当温度为 38°C 时

$$L_0 = 8978 + 1.67 = 8979.67\text{mm}$$



a. 产品与工装间协调尺寸的传递路线；



b. 两产品之间对接协调尺寸的传递路线。
图 3 标出热膨胀系数及传递温度的协调路线

根据协调尺寸前后传递路线，画出协调尺寸的热膨胀影响图 (见图 4)。

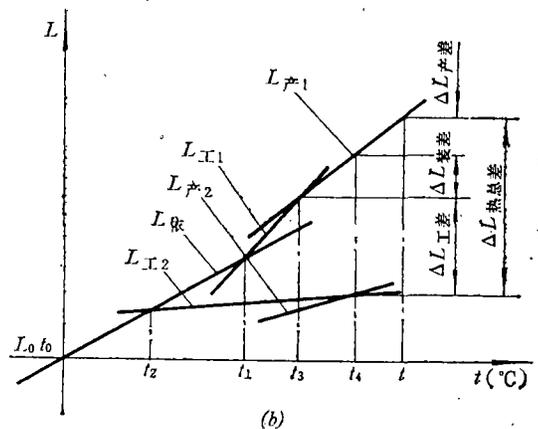
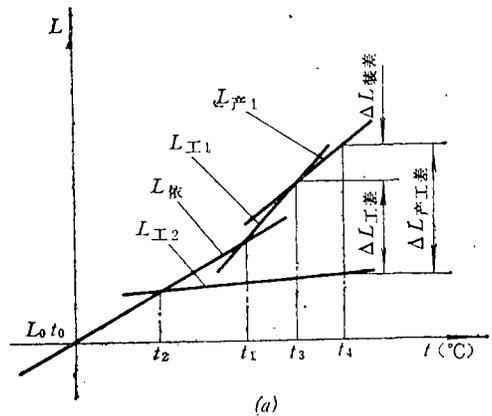


图 4 协调尺寸的热膨胀影响
a. 产品与工装间协调尺寸的热膨胀影响；
b. 两产品间对接协调尺寸的热膨胀影响。

图 4 中各条热膨胀线的方程式为

$$L_{依} = L_0 [1 + \alpha_{依}(t - t_0)] \quad (3)$$

$$L_{工1} = L_0 [1 + \alpha_{依}(t_1 - t_0) + \alpha_{工1}(t - t_1)] \quad (4)$$

$$L_{工2} = L_0 [1 + \alpha_{依}(t_2 - t_0) + \alpha_{工2}(t - t_2)] \quad (5)$$

$$L_{产1} = L_0 [1 + \alpha_{依}(t_1 - t_0) + \alpha_{工1}(t_3 - t_1) + \alpha_{产1}(t - t_3)] \quad (6)$$

$$L_{产2} = L_0 [1 + \alpha_{依}(t_2 - t_0) + \alpha_{工2}(t_4 - t_2) + \alpha_{产2}(t - t_4)] \quad (7)$$

图文中符号说明

$\alpha_{依}$ ——传递尺寸依据(如测量工具、加工设备或标工)的热膨胀系数;

$\alpha_{工1}$ ——1 工序工装的热膨胀系数;

$\alpha_{工2}$ ——2 工序工装的热膨胀系数;

$\alpha_{产1}$ ——1 工序工装装配的产品的热膨胀系数;

$\alpha_{产2}$ ——2 工序工装装配的产品的热膨胀系数;

t_1 ——安装第 1 工序工装时的温度;

t_2 ——安装第 2 工序工装时的温度;

t_3 ——第 1 工序工装装配产品时的温度;

t_4 ——第 2 工序工装装配产品时的温度;

t ——两产品对合时的温度;

L_0 ——图纸上的名义尺寸

$L_{依}$ ——传递协调尺寸依据的长度,随温度变化的热膨胀线,在标准温度时 $L_{依} = L_0$;

$L_{工1}$ ——1 工序工装上协调尺寸的热膨胀线;

$L_{工2}$ ——2 工序工装上协调尺寸的热膨胀线;

$L_{产1}$ ——第 1 工序工装装配的产品的协调尺寸热膨胀线;

$L_{产2}$ ——第 2 工序工装装配的产品的协调尺寸热膨胀线;

$\Delta L_{工差}$ ——在不同温度下,前后两工序工装装配产品时,这两工装间协调尺寸的

热膨胀误差;

$\Delta L_{装差}$ ——由于装配两产品时温度的不同,这两产品协调尺寸产生的热膨胀误差;

$\Delta L_{产差}$ ——由于两产品热膨胀系数不同,及装配与对合时的温度不同,两产品间协调尺寸产生的热膨胀误差;

$\Delta L_{产工差}$ ——按第 1 工序工装装配出来的产品,进入第 2 工序工装装配时,与该工装间协调尺寸产生的热膨胀误差;

$\Delta L_{热总差}$ ——为 $\Delta L_{工差}$ 、 $\Delta L_{装差}$ 、 $\Delta L_{产差}$ 之和;

对图 3a, 图 4a 的情况,即对产品与工装之间协调尺寸产生的热膨胀综合误差

$\Delta L_{产工差}$ 为

$$\Delta L_{产工差} = L_{产1} - L_{工2} \quad (8)$$

将式 (6) 和式 (5) 代入式 (8) 得

$$\begin{aligned} \Delta L_{产工差} &= \Delta L_{工差} + \Delta L_{装差} \\ &= L_0 [\alpha_{依}(t_1 - t_2) + \alpha_{工1}(t_3 - t_1) \\ &\quad - \alpha_{工2}(t_4 - t_2) + \alpha_{产1}(t_4 - t_3)] \end{aligned} \quad (9)$$

$$L_{测} = 8978 - 0.06 = 8977.94 \text{ mm}$$

将上列数值代入式 (2) 得

$$\begin{aligned} \alpha_{地伪} &= \frac{8977.94 - 8979.67}{18 \times 8979.67} + 11.16 \times 10^{-6} \\ &= 11.16 \times 10^{-6} - 10.7 \times 10^{-6} \\ &= 0.46 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

上述测试结果表明:地坪相对于室温变化的伸缩量很小,与工装和产品常用材料钢和铝合金的热膨胀系数相差很大,这就是在不同室温下,用钢制长杆千分尺,对固定于地坪上的分散式型架一些协调尺寸实测结果,比按式(1)计算的结果要大得多的原因。

在估算热膨胀误差时,可以令

$$\alpha_{地伪} \approx 0.5 \times 10^{-6} \text{ 或 } \alpha_{地伪} \approx 0.$$

三、热膨胀综合误差的通用计算公式

为了计算热平衡条件下,飞机各部件、

装配件之间、产品与工装之间以及各工装之间，由于它们的热膨胀系数不同、传递尺寸时的温度不同，而产生的热膨胀综合误差，首先画出注有协调尺寸传递依据及对象的热膨胀系数、传递协调尺寸时温度的前后传递路线示意图（见图 3）。

对图 3b，图 4b 的情况，即对两产品在温度 t 下对合时，协调尺寸产生的热膨胀综合误差 $\Delta L_{\text{热总差}}$ 为

$$\Delta L_{\text{热总差}} = L_{\text{产}1} - L_{\text{产}2} \quad (10)$$

将式 (6) 和式 (7) 代入式 (10) 得

$$\begin{aligned} \Delta L_{\text{热总差}} &= \Delta L_{\text{工差}} + \Delta L_{\text{装差}} + \Delta L_{\text{产差}} \\ &= L_0 [\alpha_{\text{依}}(t_1 - t_2) + \alpha_{\text{工}1}(t_3 - t_1) \\ &\quad - \alpha_{\text{工}2}(t_4 - t_2) + \alpha_{\text{产}1}(t_4 - t_3) \\ &\quad + (\alpha_{\text{产}1} - \alpha_{\text{产}2})(t - t_4)] \quad (11) \end{aligned}$$

由图 4b 可知式 (11) 中

$$\Delta L_{\text{工差}} = L_0 [\alpha_{\text{依}}(t_1 - t_2) + \alpha_{\text{工}1}(t_3 - t_1) - \alpha_{\text{工}2}(t_4 - t_2)]$$

$$\Delta L_{\text{装差}} = L_0 \alpha_{\text{产}1}(t_4 - t_3)$$

$$\Delta L_{\text{产差}} = L_0 (\alpha_{\text{产}1} - \alpha_{\text{产}2})(t - t_4)$$

其中 $\Delta L_{\text{工差}}$ 、 $\Delta L_{\text{装差}}$ 、 $\Delta L_{\text{产差}}$ 的大小，反映了它们在 $\Delta L_{\text{热总差}}$ 中各占比例的大小，以及热膨胀影响协调的主次因素。它可作为解决生产中因热膨胀引起的不协调问题的依据。

式 (11) 是热膨胀综合误差的通用计算公式。当 $\Delta L_{\text{热总差}}$ 大于零时，为第一工序工装装配出来的产品尺寸大于第二工序工装装配出来的产品尺寸，反之则小于。

式 (11) 不但可以用于装配件与装配件、装配件与型架以及型架与型架之间热膨胀综合误差的计算，也可以用于零件制造与装配之间热膨胀综合误差的计算。

根据 $\alpha_{\text{依}}$ 、 $\alpha_{\text{工}1}$ 、 $\alpha_{\text{工}2}$ 、 $\alpha_{\text{产}1}$ 、 $\alpha_{\text{产}2}$ 及 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 、 t 等的同异，可以从式 (11) 中简化出式 (9) 及其它许多不同的热膨胀综合误差的计算公式和绘制出不同的协调尺寸的热膨胀影响图。按不同条件简化出来的公式，其综合误差的组成往往不同。

如当式 (11) 中的 $t = t_4$ 时，因后一产品的长度是在 t_4 下第二工序工装的长度，因此图 4b、图 3b 可分别简化为图 4a、图 3a，式 (11) 也就简化为式 (9) 了，这时 $\Delta L_{\text{产差}} = 0$ ，而 $\Delta L_{\text{热总差}}$ 也就等于 $\Delta L_{\text{产工差}}$ 。

而当 $\alpha_{\text{产}1} = \alpha_{\text{产}2}$ 时，式 (11) 同样也简化为式 (9)，但其热膨胀影响图则变为图 5，由图 5 可知：这时两产品对合时的热膨胀综合误差，在数值和误差的组成上都与 $\Delta L_{\text{产工差}}$ 相同，而与两产品的对合温度无关。

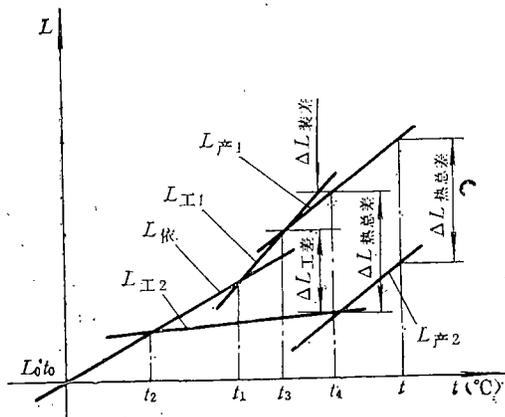


图 5 当 $\alpha_{\text{产}1} = \alpha_{\text{产}2}$ 时协调尺寸的热膨胀影响

同理当 $\alpha_{\text{依}} = \alpha_{\text{工}1} = \alpha_{\text{工}2} = \alpha_{\text{工}}$ ， $\alpha_{\text{产}1} = \alpha_{\text{产}2} = \alpha_{\text{产}}$ 和 $\alpha_{\text{工}1} = \alpha_{\text{工}2} = \alpha_{\text{工}}$ ， $\alpha_{\text{产}1} = \alpha_{\text{产}2} = \alpha_{\text{产}}$ ， $t_3 = t_4$ 时，式 (11) 可以分别简化出在型式上与式 (1) 相同的

$$\begin{aligned} \Delta L_{\text{热总差}} &= \Delta L_{\text{工差}} + \Delta L_{\text{装差}} \\ &= L_0 [\alpha_{\text{工}}(t_3 - t_4) + \alpha_{\text{产}}(t_4 - t_3)] \\ &= L_0 (\alpha_{\text{产}} - \alpha_{\text{工}})(t_4 - t_3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{和 } \Delta L_{\text{热总差}} &= \Delta L_{\text{工差}} \\ &= L_0 (\alpha_{\text{依}} - \alpha_{\text{工}})(t_1 - t_2) \end{aligned}$$

的热膨胀综合误差计算公式（但它们 $\Delta L_{\text{热总差}}$ 的组成部分却不同）和绘制出相应的协调尺寸热膨胀影响图等。

目前飞机装配型架的结构，主要为整体

式、组合式与分散式三大类,有些标工和型架安装设备(即传递协调尺寸依据)也固定于厂房地坪上,所以,只有不与地坪固定的协调尺寸传递依据(包括标工和型架安装设备)和整体式型架,当室温变化时,其协调尺寸才能自由伸缩,不受地坪的约束,在计算装配过程中的热膨胀综合误差时,其热膨胀系数 α ,才能取其制造材料的热膨胀系数。而对与地坪固定的型架、标工和型架安装设备,均不能取其制造材料的热膨胀系数(除其伸缩不受地坪固定影响的尺寸外)。对与地坪固定的分散式型架,各独立构件之间的协调尺寸,均应取地坪的伪热膨胀系数 $\alpha_{地伪}$ 。

组合式型架中的热膨胀影响很复杂。因为在组合安装前,其梁相对室温的变化,按制造材料的热膨胀系数自由伸缩,但在组合安装后,它的伸缩就要受到与地坪固定的约束,不能按制造材料热膨胀系数伸缩,安装时协调尺寸的实际大小,与室温成比例,而在安装以后,由于上、下梁部位受地坪约束的大小不同(下梁大,上梁小),上、下梁相对室温的变化,伸缩量亦不可能一致,所以严格地说,组合式型架(包括与地坪固定标工和型架安装设备)既不能取其制造材料的热膨胀系数,也不能取 $\alpha_{地伪}$ 。

由于地坪相对室温变化的伪热膨胀系数很小,因此在与地坪固定的型架中(如与地坪固定的组合式型架与分散式型架中),对装配协调的影响很严重。以某机的机身中段为例,其下部型架和总装型架,都是与地坪固定的分散式型架。全长13m,它们都是用钢制长杆千分尺和工具轴安装的。若下部型架和总装型架安装时的室温,分别为25°C和15°C,而装配下部产品和下部产品进入总装型架装配时的室温,又分别为15°C和25°C,在此情况下,用式(11)来计算下部产品与总装型架之间产生的热膨胀综合误差时,则 $\alpha_{工1} = \alpha_{工2} = \alpha_{地伪}$, $\alpha_{产1} = \alpha_{产2} = \alpha_{产}$, 式

$$\begin{aligned} (11) \text{ 简化为} \\ \Delta L_{\text{热总差}} &= \Delta L_{\text{工差}} + \Delta L_{\text{装差}} \\ &= L_0 [(\alpha_{依} - \alpha_{工})(t_1 - t_2) - \\ &\quad \alpha_{地伪}(t_4 - t_3) + \alpha_{产}(t_4 - t_3)] \\ &\quad \text{(按误差的组成书写)} \\ &= L_0 [(\alpha_{依} - \alpha_{地伪})(t_1 - t_2) \\ &\quad + (\alpha_{产} - \alpha_{地伪})(t_4 - t_3)] \\ &\quad \text{(综合以后)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{其中 } \alpha_{依} &= 11.16 \times 10^{-6}, \alpha_{产} = 22.7 \times 10^{-6} \\ \alpha_{地伪} &= 0.46 \times 10^{-6} \\ \therefore \Delta L_{\text{热总差}} &= 13000 [(11.16 \times 10^{-6} \\ &\quad - 0.46 \times 10^{-6})(25 - 15) \\ &\quad - 0.46 \times 10^{-6}(25 - 15) \\ &\quad + 22.7 \times 10^{-6}(25 - 15)] \\ &= 1.391 - 0.058 + 2.951 \\ &= 4.284 \text{ mm} \end{aligned}$$

很明显,在这种情况下,若在装配工艺或总装型架的结构设计上,都没有调整补偿的环节,下部产品会无法装入总装型架。

四、解决热膨胀对互换协调影响的措施

解决热膨胀对协调尺寸影响的措施,除了在协调尺寸传递过程中尽量创造热平衡条件(还可以采用温度批次管理);采用 $\Delta \alpha = 0$ (装配工装局部采用,零件样板及零件工装基体采用与产品相同的材料);采用在标准温度下传递协调尺寸,即 $\Delta t = 0$;缩短协调尺寸及采用工艺补偿和设计补偿等措施外,还可以

1. 采用尺寸修正法

即当在非标准温度下,在两种不同材料间传递精度要求高的协调尺寸时,不用图纸上的名义尺寸 L_0 ,而用下式修正后的 $L_{修}$

$$L_{修} = L_0 [1 + (t_0 - t)(\alpha_{依} - \alpha_{工})] \quad (12)$$

使在非标准温度下安装、制造、加工的型架、标工和产品零件,相当于在标准温度下制造的。

2. 采用不与地坪固定的型架结构

由前面的分析讨论中可知: 由于地坪的伪热膨胀系数 $\alpha_{地伪}$ 很小, 而使与地坪固定的工装产生很大的热膨胀误差。所以采用不与地坪固定, 对大、中型型架并用多个可调支承, 支承整体框架式和将各分散式的骨架安装于一个整体底座上 (对特大型型架不能用一个整体底座时, 也可根据各协调尺寸的具体要求分片用几个底座) 形成整体底座式结构, 以清除地坪热膨胀对协调尺寸的影响。

五、几点主要结论

1. 经测试表明: 地坪相对于室温变化的伪热膨胀系数 $\alpha_{地伪}$ 很小, 只有 0.46×10^{-6} , 与工装和产品常用材料钢和铝合金的热膨胀系数相差近 25 倍和 50 倍, 因此在与地坪固定的型架中装配产品时, 常要产生很大的热膨胀误差, 其数值要远远大于在不与地坪固定的型架中装配产品时产生的误差值。这不但会严重地影响型架与产品、产品与产品之间的协调和互换, 还会由于产品在装配过程中的伸缩, 使型架的构件承受巨大的热胀冷缩力, 导致型架构件的严重变形和产品难于下架。所以应尽量采用不与地坪固定的整体式和整体底座式的型架结构, 取代与地坪固定的组合式和分散式型架结构。

2. 在计算协调尺寸传递过程中产生的热膨胀综合误差时, 与地坪固定工装的热膨胀系数, 不能取其制造材料的热膨胀系数。对与地坪固定的分散式型架应取 $\alpha_{地伪}$ 。

$$\begin{aligned} 3. \Delta L_{热总差} = & L_0 [\alpha_{依}(t_1 - t_2) \\ & + \alpha_{工1}(t_3 - t_1) \\ & - \alpha_{工2}(t_4 - t_2) \\ & + \alpha_{产1}(t_4 - t_3) \\ & + (\alpha_{产1} - \alpha_{产2})(t - t_4)] \end{aligned}$$

此式是计算协调尺寸的传递过程中, 产生的热膨胀综合误差的通用公式, 它由三部分误差组成, 即 $\Delta L_{工差}$ 、 $\Delta L_{装差}$ 和 $\Delta L_{产差}$ 。按 $\alpha_{依}$ 、 $\alpha_{工1}$ 、 $\alpha_{工2}$ 、 $\alpha_{产1}$ 、 $\alpha_{产2}$ 和 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 、 t 的同异, 可以从通用计算公式中简化出许多不同的计算式来。当 $\alpha_{产1} = \alpha_{产2}$ 时, 则 $\Delta L_{产差} = 0$, 而 $\Delta L_{热总差}$ 与两产品对合时的温度关系, 其数值在工装制造安装以后, 只决定于两产品的装配温度。当 $t_3 = t_4$ 时, 则 $\Delta L_{装差} = 0$ 。当 $\alpha_{依} = \alpha_{工1} = \alpha_{工2} = \alpha_{工}$ 及 $t_3 = t_4$ 时, 则 $\Delta L_{工差}$ 和 $\Delta L_{装差}$ 同时为零。当 $\alpha_{产1} = \alpha_{产2}$ 及 $t_3 = t_4$ 或 $\alpha_{工1} = \alpha_{工2} = \alpha_{产1} = \alpha_{产2}$ 时, 则 $\Delta L_{装差}$ 和 $\Delta L_{产差}$ 同时为零。

参考文献

- [1] 杨彭基, 热膨胀对飞机装配工艺的影响, 西北工业大学, 1964年。
- [2] 程宝粟, 飞机制造协调准确度与容差分配, 国防工业出版社, 1979年9月。

**INFLUENCE OF SHOP FLOOR THERMAL EXPANSION ON
INTERCHANGEABILITY AND COORDINATION
OF AIRCRAFT DURING ASSEMBLY**

Liu Zhunliang

(ShanXi Aircraft Company)

Abstract

This paper introduces experimental investigation on the serious incoordination resulted from non-uniform thermal expansion of shop floor, jigs and aircraft components.

A general formula for calculating the resultant error during assembly with different structural type and material of jigs and at different room temperature is given.

In addition, the development trend of jig structure is discussed.