基于等效传感器和插值法的燃油量测量算法

欧阳平超 刘红梅 焦宗夏

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100083)

摘 要: 以某型号飞机的机身油箱为例,提出了等效虚拟传感器的方法,将多根传感器测量值所确定的燃油面,用油箱中某个特殊位置的一虚拟传感器的值等效表示. 建立虚拟传感器长度、飞机姿态中俯仰角和横滚角与燃油体积关系的三维数据表,利用插值的方法得到燃油量的近似值. 利用 Solidworks 三维辅助设计软件对运用等效原理和插值法得到的燃油量进行验证,结果表明该方法测量精度高,计算结果可靠. 而且等效原理的利用,使插值法涉及的数据量大大减少,达到了压缩数据的目的,便于在实际系统中的实现.

关 键 词: 飞机燃油; 燃油量测量; 传感器; 插值

中图分类号: V 241.72

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)08-0950-04

Measurement arithmetic based on linear interpolation and equivalent transducer in aircraft fuel quantity gaging

Ouyang Pingchao Liu Hongmei Jiao Zongxia

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: A measurement arithmetic based on virtual equivalent sensor and linear interpolation was presented, which was applied to aircraft fuel quantity gaging. The aircraft fuel surface which was defined by more than three fuel sensor's measurement value could be also expressed with one virtual equivalent sensor located in special situation in the fuel tank. In this equivalent principle, fuel quantity could be acquired having three-dimensional linear interpolation through the three-dimensional data stable showing the relation between fuel quantity and the virtual equivalent sensor, aircraft attitude information. Effectiveness and precise of the proposed method were demonstrated by simulation results adopting Solidworks software. The results show that the measurement arithmetic is stable, reliable and effective. Because of the application of the equivalent sensor, data quantity in three-dimensional table is greatly compressed, which makes the interpolation method easy to be realized in actual aircraft fuel quantity gaging system.

Key words: aircraft fuels; fuel gages; transducer; interpolation

燃油量测量是飞机燃油系统的重要组成部分,其测量精度对飞机的整体性能有着重要的影响. 二战以后,飞机油箱中的燃油测量绝大多数采用电容式油位传感器来感受油面的变化,电容式油位测量传感器的极管被制成与油箱形状相关的成型剖面,使燃油体积的变化与电容的变化成线性的对应关系,通过模拟电路得到燃油量. 但是,这种特性传感器的设计和加工都非常复杂,而且不能补偿由于飞行姿态的变化而引起的测量误差,显然不能满足新一代高性能飞机的发展需求[1-2]. 20 世纪 70 年代后,出现了数字式油量测量系统,在数字式系统中,电容式传感器测量值 h 是完全线性的,同时飞行姿态俯仰角 α、倾斜角 β 对油量测量精度的影响也给予了考虑,燃油体积可用函数的形式表示为 $V=f(h,\alpha,\beta)$. 这是一个三元的非线性函数,由于油箱的非规则性,要找到它精确的数学解析式是不可能的. 一个有效的办法是采用三维列表的方法来描述它,再对此三元

收稿日期: 2005-09-27

作者简介: 欧阳平超(1977-), 男,湖南邵阳人,博士生, ou2001@tom.com.

函数进行线性插值,得到函数的近似解[3-4].

利用三维数据表进行三元非线性函数插值的方法计算燃油体积,其数据量是非常巨大的. 面对庞大的数据,文献[3]提到了可以适当增加姿态角间隔,减少各个油面传感器 h 的插值基点的方法减少数据量,但这样必然会使测量的精度降低. 为了保证测量精度,又能缩减数据量,本文从一个新的角度出发,提出了虚拟等效传感器的概念,即在不减少油箱中油面传感器个数的情况下,不对每个传感器建立与之对应的三维特性数据表,而是把根据各个传感器的测量值所确定的燃油面,在某个位置用一个虚拟的传感器的长度值等效表示. 根据虚拟传感器长度、俯仰角和横滚角与燃油体积关系建立一个三维数据特性表,再利用插值方法算出燃油体积. 多根传感器,只有一个数据特性表,达到了压缩数据的目的. 同时本文给出了把三维特性数据用一个二维数组表示的方法,给出了利用插值法测量燃油体积的具体步骤. 最后,利用 Solidworks 三维辅助设计软件对运用等效原理和插值算法得到的燃油量测量结果进行验证.

1　电容式油量测量原理

目前绝大多数飞机上使用的油量传感器为电容式,并且均由同心管制成,内管和外管都是电容的一个电极,其电容可用(1)式表示:

$$C = 2\pi ekl/\ln(R/r) \tag{1}$$

其中,e 为自由空间介电常数;k 为燃油的相对电容率(介电常数);l 为传感器长度;R 为电容外径;r 为电容内径.

设传感器在空气中的电容为 C_a,浸入燃油内深度为 h 时,电容器电容为 C_h,电容增量为

$$\Delta C = C_h - C_a = h(k-1)C_a/l \tag{2}$$

$$h = l\Delta C/(k-1)C_a \tag{3}$$

则可由(3)式求出油面高度,再根据油量与油面 h 的关系 $V=f(h,\alpha,\beta)$,求出对应的燃油体积. 如果已知燃油的密度为 ρ,则燃油质量 $m=V\cdot\rho$.

2　等效虚拟传感器

在燃油测量系统中,为了使燃油测量精度达到给定的要求,需要在一个油箱中安装多根传感器. 以往的做法通常是给每一个传感器建立一个传感器长度、俯仰角和横滚角与燃油体积关系的三维特性数据表,通过插值法,得出此传感器测得的油量,这样每个特性表得出一个测量值,然后,把每个传感器得到的燃油量进行线性组合或利用分段的方法计算出油箱中的燃油量. 这样做使得数据量特别巨大,计算步骤也比较繁琐.

对于一个具体的油箱,当油量一定,俯仰角 α 和横滚角 β 一定时,油箱中所形成的油面是唯一确定的. 不在同一条直线上的 3 点确定一个平面,所以要确定一个油面,也至少应该知道此油面上 3 个点.

如图 1 所示,为某型号机身油箱,假定此油箱中有 3 个垂直安装于底面的传感器,布局如图 2 示. 某时刻,传感器与油面的 3 个交点可通过传感器的读数确定,假设为 x_1,x_2 和 x_3,又假定 3 根传感器两两之间的距离为 s_1,s_2 和 s_3. 连接 3 根传感器的安装点,形成一个三角形,假设在三角形的重心处有一个虚拟的传感器,此传感器与燃油油面有一个交点,设交点到重心的距离为 x,如图 2 所示,则 x 可由下面的步骤求得.

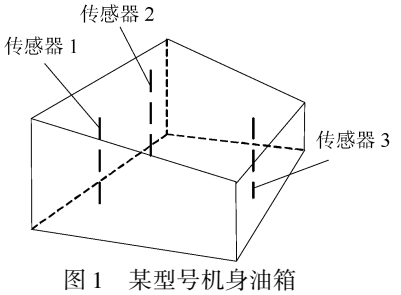


图 1　某型号机身油箱

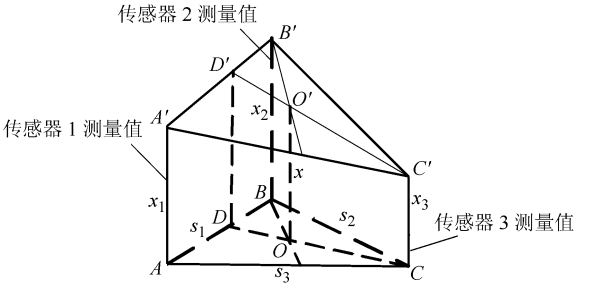


图 2　虚拟传感器位置

在 $\triangle ABC$ 中,点 D 为 AB 的中点,点 O 是重心,则

$$\left.\begin{aligned} OC &= \frac{2}{3}CD \\ OD &= \frac{1}{3}CD \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

$$DD' = (AA' + BB')/2 \tag{5}$$

在梯形 $CDD'C'$ 中,面积

$$S_{CDD'C'} = \frac{(DD' + CC')\cdot DC}{2} = \frac{(DD' + OO')\cdot OD + (CC' + OO')\cdot OC}{2} \tag{6}$$

将(4)式、(5)式代入(6)式中整理得

$$OO' = \frac{AA' + BB' + CC'}{3}$$

即

$$x = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3} \tag{7}$$

由(7)式可见,若选取虚拟传感器的位置为3根传感器形成的三角形的重心,则虚拟传感器的长度只与传感器的测量值有关,而与3根传感器的安装位置无关. 传感器的安装位置只要保证当飞机处于规定的最大俯仰角或横滚角时,最小可测燃油的燃油面应该浸没所有传感器即可. 通过此种等效虚拟传感器方法,把3个三维数据特性表压缩为一个三维数据特性表,使数据量减少了2/3,达到了数据压缩的目的.

3 三元函数线性插值算法

通过上面介绍的方法得到虚拟的等效传感器长度后,就可以利用插值方法近似计算油量了. 首先在燃油箱中虚拟等效传感器的位置建立 $V=f(h,\alpha,\beta)$ 的插值基点,在插值基点上的燃油值是精确的. 这些点以表格形式存储在计算机中. 为了讨论问题的方便,假设飞机俯仰角的范围为 $-10°\sim10°$,横滚角为 $-6°\sim6°$,俯仰角和横滚角的插值步长取2°,等效油面传感器 h 的插值基点取30个,则建立此油箱三维特性数据表的总数据量为 $11\times7\times30=2\,310$. 下面阐述如何将一个三维表格用二维数组表示. 以等效油面传感器 h 的插值基点个数为行数,俯仰角和横滚角的所有组合个数为列数,建立一个30×77的二维数组:

$$\begin{matrix}
V_{h_1\alpha_{-10}\beta_{-6}} & V_{h_1\alpha_{-10}\beta_{-4}} & V_{h_1\alpha_{-10}\beta_{-2}} & V_{h_1\alpha_{-10}\beta_0} & V_{h_1\alpha_{-10}\beta_2} & V_{h_1\alpha_{-10}\beta_4} & V_{h_1\alpha_{-10}\beta_6} & \cdots & V_{h_1\alpha_{10}\beta_{-6}} & V_{h_1\alpha_{10}\beta_{-4}} & V_{h_1\alpha_{10}\beta_{-2}} & V_{h_1\alpha_{10}\beta_0} & V_{h_1\alpha_{10}\beta_2} & V_{h_1\alpha_{10}\beta_4} & V_{h_1\alpha_{10}\beta_6} \\
V_{h_2\alpha_{-10}\beta_{-6}} & V_{h_2\alpha_{-10}\beta_{-4}} & V_{h_2\alpha_{-10}\beta_{-2}} & V_{h_2\alpha_{-10}\beta_0} & V_{h_2\alpha_{-10}\beta_2} & V_{h_2\alpha_{-10}\beta_4} & V_{h_2\alpha_{-10}\beta_6} & \cdots & V_{h_2\alpha_{10}\beta_{-6}} & V_{h_2\alpha_{10}\beta_{-4}} & V_{h_2\alpha_{10}\beta_{-2}} & V_{h_2\alpha_{10}\beta_0} & V_{h_2\alpha_{10}\beta_2} & V_{h_2\alpha_{10}\beta_4} & V_{h_2\alpha_{10}\beta_6} \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
V_{h_{30}\alpha_{-10}\beta_{-6}} & V_{h_{30}\alpha_{-10}\beta_{-4}} & V_{h_{30}\alpha_{-10}\beta_{-2}} & V_{h_{30}\alpha_{-10}\beta_0} & V_{h_{30}\alpha_{-10}\beta_2} & V_{h_{30}\alpha_{-10}\beta_4} & V_{h_{30}\alpha_{-10}\beta_6} & \cdots & V_{h_{30}\alpha_{10}\beta_{-6}} & V_{h_{30}\alpha_{10}\beta_{-4}} & V_{h_{30}\alpha_{10}\beta_{-2}} & V_{h_{30}\alpha_{10}\beta_0} & V_{h_{30}\alpha_{10}\beta_2} & V_{h_{30}\alpha_{10}\beta_4} & V_{h_{30}\alpha_{10}\beta_6}
\end{matrix}$$

假设从飞控系统和由公式(7)计算得到一个测量值 (h,α,β),先判断 h 所属的区间 (h_m,h_{m+1}),$m=1,\cdots,30$. 固定 h_m,找到 α 所属的区间 (α_n,α_{n+1}),$n=-10,\cdots,9$,β 所属区间 (β_r,β_{r+1}),$r=-6,\cdots,5$. 插值方法如图3所示,包围 $V_{h_m\alpha\beta}$ 的4个点为 $V_{h_m\alpha_n\beta_r}$,$V_{h_m\alpha_{n+1}\beta_r}$,$V_{h_{m+1}\alpha_{n+1}\beta_r}$,$V_{h_m\alpha_{n+1}\beta_{r+1}}$,它们是精确值.

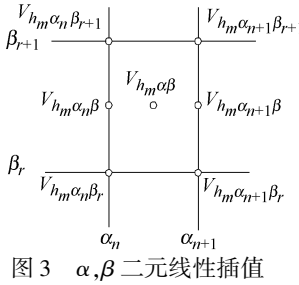


图3 α,β 二元线性插值

固定 α,对 β 进行两次插值,得

$$V_{h_m\alpha_n\beta} = V_{h_m\alpha_n\beta_r} + \frac{V_{h_m\alpha_n\beta_{r+1}} - V_{h_m\alpha_n\beta_r}}{2}(\beta - \beta_r) \tag{8}$$

$$V_{h_m\alpha_{n+1}\beta} = V_{h_m\alpha_{n+1}\beta_r} + \frac{V_{h_m\alpha_{n+1}\beta_{r+1}} - V_{h_m\alpha_{n+1}\beta_r}}{2}(\beta - \beta_r) \tag{9}$$

固定 β,对 α 插值,得

$$V_{h_m\alpha\beta} = V_{h_m\alpha_n\beta} + \frac{V_{h_m\alpha_{n+1}\beta} - V_{h_m\alpha_n\beta}}{2}(\alpha - \alpha_n) \tag{10}$$

同理,对 h_{m+1},可得

$$V_{h_{m+1}\alpha_n\beta} = V_{h_{m+1}\alpha_n\beta_r} + \frac{V_{h_{m+1}\alpha_n\beta_{r+1}} - V_{h_{m+1}\alpha_n\beta_r}}{2}(\beta - \beta_r) \tag{11}$$

$$V_{h_{m+1}\alpha_{n+1}\beta} = V_{h_{m+1}\alpha_{n+1}\beta_r} + \frac{V_{h_{m+1}\alpha_{n+1}\beta_{r+1}} - V_{h_{m+1}\alpha_{n+1}\beta_r}}{2}(\beta - \beta_r) \tag{12}$$

$$V_{h_{m+1}\alpha\beta} = V_{h_{m+1}\alpha_n\beta} + \frac{V_{h_{m+1}\alpha_{n+1}\beta} - V_{h_{m+1}\alpha_n\beta}}{2}(\alpha - \alpha_n) \tag{13}$$

最后,对 h 进行插值,得

$$V_{h\alpha\beta} = V_{h_m\alpha\beta} + \frac{V_{h_{m+1}\alpha\beta} - V_{h_m\alpha\beta}}{h_{m+1} - h_m}(h - h_m) \tag{14}$$

$V_{h\alpha\beta}$ 即为所求的燃油体积.

4 插值结果验证

插值基点的值可以通过实验获得. 本文为了方便,采用Solidwoiks创建机身油箱,其结构与尺寸如图4所示,设 α 的范围为 $\pm10°$,β 的范围为 $\pm6°$,插值步长为2°,虚拟传感器位置到顶面的总长度为589 mm,在第5 mm处取第1个插值点 h_0,步长为20 mm,一共30个插值点,即 $h_{30}=585$ mm. 利用Solidworks软件中能方便求实体体积的功能[5],获取插值基点的值,方法如下:

在Solidworks中,旋转实体模型,截取虚拟传

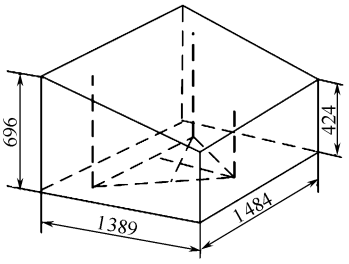


图 4　机身油箱实体模型(单位:mm)

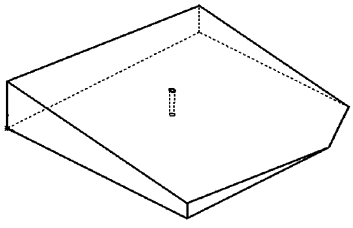


图 5　油箱经截断后的剩余实体

感器长度,使得俯仰角 α,β,h 与某个插值基点吻合,如$(-10°,-6°,h_{10})$,然后在 h_{10} 处用一水平面截断实体,如图5所示,计算截断后剩余实体的体积,得到一个插值基点的值 $V_{h_{10}\alpha_{-10}\beta_{-6}}$,乘以密度后,得到质量值. 用同样的方法,得到所有插值基点的质量值,单位为 kg,二维数据如下所示:

94.9	90.7	88.2	87.4	88.2	90.7	94.9	…	42.4	38.2	35.7	32.2	35.7	38.2	42.4
119.2	114.9	112.4	111.5	112.4	114.9	119.2	…	58.3	54.1	51.5	50.7	51.5	54.1	58.3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
911.5	912.3	912.7	912.9	912.7	912.9	911.5	…	950.7	960.5	970.1	975.3	970.1	960.5	950.7

假设某时刻,油箱中 3 根传感器的测量值经公式(7)计算得到重心处虚拟传感器的长度 h 为 400 mm,飞行姿态角 α,β 分别为 5°,-3°. 在二维数组的行数中找包夹 400 的上下两行,为 h_{20} 和 h_{21},在第 h_{20} 行中找到包夹 $\alpha=5°$ 和 $\beta=-3°$ 的 4 个插值基点的值 $V_{h_{20}\alpha_4\beta_{-2}}$,$V_{h_{20}\alpha_4\beta_{-4}}$,$V_{h_{20}\alpha_6\beta_{-2}}$,$V_{h_{20}\alpha_6\beta_{-4}}$,分别为 694.2 kg,693.9 kg,700.7 kg,701.1 kg. 利用公式(8)~公式(10)计算得到 $V_{h_{20}\alpha\beta}=679$ kg. 类似地,在第 h_{21} 行中找到包夹 $\alpha=5°$ 和 $\beta=-3°$ 的 4 个插值基点的值 $V_{h_{21}\alpha_4\beta_{-2}}$,$V_{h_{21}\alpha_4\beta_{-4}}$,$V_{h_{21}\alpha_6\beta_{-2}}$,$V_{h_{21}\alpha_6\beta_{-4}}$,分别为 725.8 kg,725.9 kg,730.4 kg,730.7 kg. 利用公式(11)~公式(13)计算得到 $V_{h_{21}\alpha\beta}=735.5$ kg. 最后,利用公式(14)对 h 进行插值得到 $V_{h\alpha\beta}=722.1$ kg. 而实际的燃油质量为 720.1 kg,测量值误差仅为 2 kg. 大量验证结果表明,测量误差小于满油量的 0.2% 与被测油量的 0.5%,满足实际测量要求.

5　结　论

1) 采用虚拟等效传感器的方法,解决了传统的飞机燃油数字测量系统中,对每一传感器建立三维函数特性表格进行三维函数线性插值计算存在的数据量庞大的问题,可使数据量减少为原来的 2/3,可见此方法在压缩数据量方面是非常有效的.

2) 采用 Solidworks 三维计算机辅助设计软件获取插值基点及对采用插值法得到的燃油量数据进行验证,表明此种方法测量精度高,计算结果可靠. 所采用的将三维数据用二维数组表示的方法,简化了实际的应用程序的编制.

参考文献 (References)

[1] 肖凝. 飞机燃油测量技术研究与发展[J]. 航空科学技术, 2003(3):31-34
Xiao Ning. Research and development of the aircraft fuel measurement technology[J]. Journal of Aeronautics Technology and Science, 2003(3):31-34(in Chinese)

[2] 李占国. 未来飞机燃油系统设计与仿真技术[J]. 航空科学技术,1996(3):23-26
Li Zhanguo. Design and simulation of future aircraft fuel system [J]. Journal of Aeronautics Technology and Science, 1996(3): 23-26(in Chinese)

[3] 关丽, 陈行禄. 用多维查表法解决飞机燃油油量测量的数据处理问题[J]. 测控技术,1997,16(1):41-43
Guan Li, Chen Xinglu. A method for the data process in fuel quantity gaging on aircraft by multidimensional table look-up technique[J]. Measurement and Control Technology, 1997, 16 (1):41-43(in Chinese)

[4] 袁梅,吴昊,张建. 采用 CAD 技术对飞机燃油测量进行姿态误差修正[J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28 (1): 119-121
Yuan Mei, Wu Hao, Zhang Jian. Fuel measurement with attitude error correction by using CAD technique[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28 (1): 119-121(in Chinese)

[5] 李启炎,李光耀. Solidworks 2003 三维设计教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003
Li Qiyan, Li Guangyao. Solidworks 2003 three dimensional design[M]. Beijing: Machine Industry Press, 2003(in Chinese)

(责任编辑:朱丽萍)