

现代飞机前缘缝翼作动装置 ——齿轮-齿条的设计技巧

Leading Edge Slat Actuating Unit of Modern Civil Aircraft ——The Design Technique of Pinion-Rack

黄建国/Huang Jianguo

(中国商飞民用飞机试飞中心,上海 200232)

(COMAC Flight Test Center, Shanghai 200232, China)

摘要:

前缘缝翼在飞机起飞、降落中起到提高飞机升力、改善飞行性能的重要作用。新型的缝翼作动装置—齿轮—齿条,由于构思巧妙、占用空间小、重量轻而备受重用。在小齿轮与大圆弧齿条设计中,诸多参数的确定、关键细节的设计、全机多作动装置的协调、故障载荷的计算与深入分析,构成了其设计的重点和难点。采用此方法研制的齿轮-齿条装置已成功应用在飞机中。

关键词:前缘缝翼;齿轮-齿条装置;设计参数;细节设计;故障载荷

[Abstract] The leading edge slat takes an important role to increase aircraft lift and to improve flight performance during taking off and landing. The new type slat actuating unit---pinion-rack is used greatly due to ingenious design, little occupied room and light weight. In design of pinion and big arc rack, definition of parameters, design of key details, coordination for full-scale actuating units, calculation and analysis of fault-loads make of important and difficult points of units design. The pinion-rack actuating units which is adopted the method hereinbefore to design and research have been applied on aircrafts successfully.

[Key words] Leading Edge Slat; Pinion-Rack Actuating-Unit; Design Parameter; Detail Design; Fault-Load;

0 引言

前缘缝翼位于飞机左右对称的机翼前缘。它在飞机起飞、降落中,与后缘襟翼一起放下和收上,以提高机翼的升力系数,改善飞机的飞行性能,缩短飞机起、降时的滑跑距离,从而增加了飞机的安全性和经济性。

前缘缝翼对飞机带来的显著好处,使它在旅客机、军用大中型运输机上广泛被使用。早期的客机、运输机前缘缝翼的运动,大多采用液压作动器或液压作动器—钢索驱动。而目前的民用客机中,无论是支线飞机还是大中型客机(如 A380),几乎全采用齿轮—齿条作动装置,如图 1 所示。

齿轮—齿条装置由一段直径很大的圆弧齿条(可达 $\varphi 3\ 000\text{mm}$) 和一个直径很小的齿轮(可达

$\varphi 30\text{mm}$) 组成。齿条与缝翼的滑轨相连,滑轨又与前缘缝翼固接。当马达驱动传动线系转动时,缝翼作动器带动齿轮—齿条产生偏转,从而实现缝翼的收、放。

1 齿轮—齿条装置的优势

1.1 结构巧妙,占用空间小

机翼前缘呈扁状的圆弧形截面,结构空间狭小,但却需要在此安装供缝翼运动和承载的主力构件——滑轨及相应的法向、侧向滚柱。可见,此处所剩的空间已很小,如果再安装作动缝翼运动的液压作动器或钢索线系、支架则相当困难。

特别是现代客机大多采用薄型的超临界机翼,机翼前缘内容纳装缝翼作动装置的空间更为有限,为满足顺应气体流动的要求,机翼前缘上不能有突

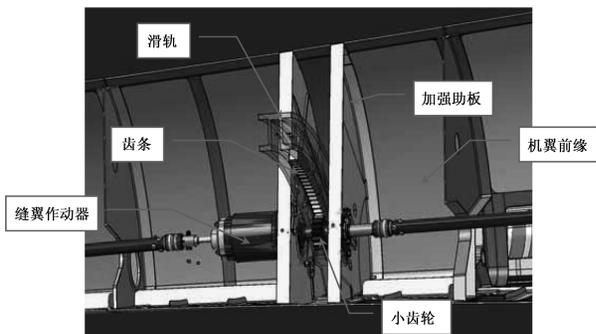


图1 缝翼作动器、齿轮、齿条及其在结构上的安装

出的“鼓包”。因此,液压作动器和钢索线系的缝翼作动器在现代客机上不再应用了,代之而起的是齿轮-齿条装置。这种装置齿轮直径小、占用空间较少;圆弧形的齿条虽直径很大,但只有一段,并巧妙地相嵌在圆弧滑轨的内部,几乎不占用空间。从而有效地解决了机翼前缘结构空间狭小的问题。

1.2 体积小、重量轻

小齿轮直径小、体积小,重量较轻。此外,齿条高度也较小;除齿高外,其它取决于与滑轨相连的圆柱销直径大小,齿条弧长只与舵面偏转角度大小、转轴半径大小有关。齿条的重量也远小于缝翼液压作动器,一套齿轮-齿条装置的总重还不及一个液压作动器的一半。

1.3 齿轮-齿条装置随转轴长短成比例并呈系列化

布满整个机翼前缘的所有缝翼都是绕同一根转轴作圆弧运动的,但由于机翼后掠和上翘,使缝翼转轴线为一条与机翼成夹角的上斜直线,造成沿翼展方向的滑轨半径大小不一,从内向外由大变小。(即内缝翼滑轨半径大,外缝翼小)这就使得齿轮-齿条装置也由大变小成比例,这种成比例的变化造就了同一飞机上的缝翼齿轮-齿条装置的系列化。齿轮-齿条的这种系列化,正好迎合了从内缝翼到外缝翼转轴半径、气动外载、结构空间由大到小的变化。特别是,极小的外机翼前缘空间还可容得下小小的外缝翼齿轮-齿条装置,并达到了非常理想的效果。

也正是这种装置的系列化,带来了全机齿轮-齿条装置的设计、制造及安装的简化,安全性、经济性随之提高。

2 齿轮-齿条装置的设计技巧

对于常用的齿轮-齿条,人们可以按“机械设计

手册”进行计算。然而,按常规方法,却无法设计出满足飞机缝翼运动的齿轮-齿条来。这既是因为缝翼上的齿轮-齿条装置有它特定的要求,又因为齿轮-齿条设计中,需要有一些技巧。只有破解了这些难点,才会取得设计的成功。

2.1 齿轮-齿条传动比的选择

齿轮-齿条传动比(i)是该装置重要的设计参数,为齿条与齿轮的齿数比,或齿条半(直)径/齿轮半(直)径。通常,它由舵面运动特性、安装型式等来确定。

大多数情况下,缝翼的运动是由作动装置驱动与舵面相连的滑轨运动来实现的。因此,滑轨的圆心(位于缝翼转轴线上)与半径(指圆心距滑轨底径之长)便决定了缝翼运动的规律;将齿条嵌入滑轨内并与滑轨同心和同半径,在传递运动和传力路径方面都是一种最佳的作动型式。

(1) 齿条半径大小随缝翼转轴线位置而变。内缝翼转动半径很大,可达到0.6m以上,外缝翼转动半径因转轴线倾斜而变得很小。

(2) 齿条半径大小随飞机大小而变。通常,飞机大,因机翼弦线长,缝翼转轴线下移,故舵面的转动半径大。一些大型飞机上的缝翼齿条半径可达1m~1.5m。

由此可知,齿条的直径之大是受缝翼转轴线限制的结果,另一方面,为了减小安装在机翼前缘上的齿轮(轴)占用的空间,尽可能将齿轮直径设计得很小。这样,齿条与齿轮的传动比:齿条半径/齿轮半径就非常小,可高达18~22之间。这种单级大传动比的齿条-齿轮传动装置无论在机械传动上,还是在飞机上均属罕见。

2.1.1 减小缝翼作动器的输出力矩 M_k

齿条-齿轮这种大传动比的装置带来了缝翼作动器输出力矩小的好处,如图2所示。

以转轴线上滑轨圆心 o 求力矩平衡,可得:

$$M_o = (F_1 L_1 - F_2 h_2) = p R \quad (1)$$

式中, F_1 为作用在缝翼上的法向力, F_2 为切向力, R 为齿条半径, P 为作用在齿条上的切向力, L_1 、 h_2 分别为缝翼气动合力距缝翼转轴中心的水平方向和垂直方向长度。

$$P = (F_1 L_1 - F_2 h_2) / R \quad (2)$$

从式(2)可知:由于齿条半径很大,则 P 较小

$$\text{又因: } M_k = P \times r \quad (3)$$

式中, r 为小齿轮半径, M_k 为作用在小齿轮上

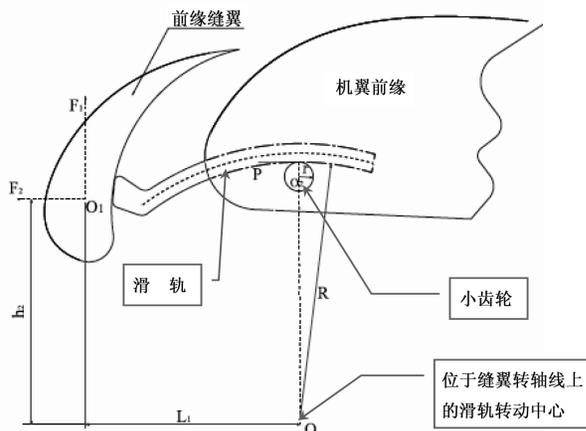


图2 作用在缝翼舵面上的气动铰链力矩与齿条上的力P的关系

的力矩。由于 r 很小, P 也较小, 故 M_k 非常小。

将式(3)/式(1)得: $M_k / M_o = 1 / i$

由此可见, 齿条-齿轮传动比 i 越大, M_k 越小, 即缝翼作动器输出力矩小。

2.1.2 降低舵面偏转速率

由于齿条-齿轮传动比 i 大, 较高速转动的缝翼作动器传至齿条、滑轨和舵面的运动速度降低了 i 倍。从而, 有利于缝翼低速偏转至每分钟只有 1.4° , 满足飞机的气动设计要求。

2.2 小齿轮设计参数的选择

受机翼前缘内部空间狭小的限制, 加之传递并不太大的扭矩和减重, 都要求齿轮直径小。减小齿轮直径小的有效途径是减少齿轮齿数。齿轮节圆直径为: $d = z m$ (4)

式中, m 为齿轮模数, 选用模数主要由齿轮承载大小来确定。减小齿数 z 可以有以下 2 个特点:

(1) 采用增大齿形角

通常, 齿轮设计手册规定的国家标准齿形角为 20° , 而我们将齿形角增大, 其好处是可以将齿数减少而不会产生轮齿的根切。若按标准齿形角 20° , 齿轮的最小齿数为 17 个。另外, 采用较大的齿形角, 可以提高齿面的接触强度和齿根的弯曲强度。从而, 使小齿轮耐磨损、承载大、寿命长。

(2) 小齿轮的齿宽应小于滑轨齿槽宽 2mm ~ 3mm

对齿轮宽度进行强度计算时, 应与滑轨、齿条宽度进行充分协调。通常, 齿条的齿顶圆会嵌入到滑轨槽内, 如图 3 所示, 与之相啮合的齿轮顶部也将进入滑轨槽中。设计中, 必须考虑机翼前缘与缝翼

在气动外载作用下的变形不一致 (Δ)。因此, 齿轮宽度小于滑轨槽宽 2mm ~ 3mm, 就是补偿机翼前缘与缝翼的变形差值。

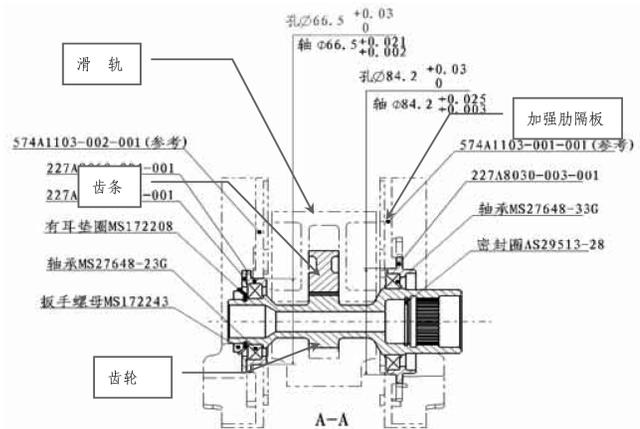


图3 齿条与滑轨、齿轮的配合与安装

2.3 设计相同的齿条-齿轮传动比

缝翼有多块对称的舵面, 每块均有两个齿轮-齿条作动装置, 全机共约 12 ~ 20 个。而这么多齿条-齿轮的传动比都设计成相同或非常相近的大小, 主要是为了满足所有的舵面等速度偏转, 确保舵面同步运动。此外, 也有利于简化传动线系。如全机采用相同的缝翼作动器, 无需更多的变速齿轮箱等, 更有利于系统的设计。

2.4 采用齿轮非标准模数

设计要求所有齿轮-齿条作动装置都为相同的传动比, 但从下式可知: $r = M \times Z_1$ (5)

$$R = M \times Z_2$$

式中, Z_1 、 Z_2 分别为齿轮、齿条的齿数, M 为齿轮齿条相同的模数。

设计齿轮中, 齿轮的模数与齿轮承载大小密切相关。按国标规定齿轮模数应标准化。若按标准, 由于 M 分挡太少, 齿数又必须是完整齿, 这样按标准模数计算出的所有齿轮与齿条根本无法达到相同的传动比。同时, 若按标准模数计算出的小齿轮, 直径偏大, 则难以安装在窄狭的空间内; 直径偏小, 则难以满足强度要求。

于是, 笔者采用了非标准齿轮模数, 每个齿轮-齿条装置的齿轮模数各不相同, 这就解决了相同的传动比、不同的承载及空间狭小的矛盾。

只是, 采用非标准齿轮模数, 将带来插齿内啮合圆柱齿轮(齿条)和滚齿小齿轮时, 需要增加专门加工相应的刀具及检测的量具, 会带来成本的增加。不过, 目前, 加工非标准的齿轮刀具并不非常

复杂,能生产齿轮的工厂都能胜任。

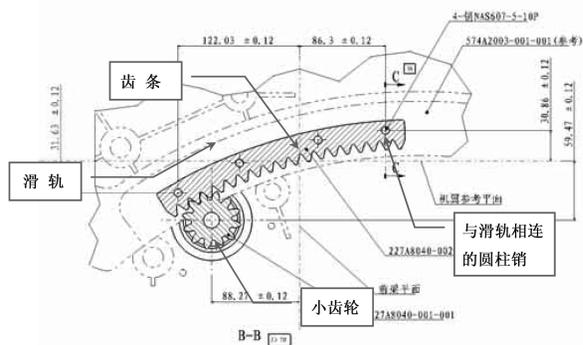


图4 齿轮-齿条的啮合运动(缝翼收上状态)

2.5 齿条的设计参数

2.5.1 齿条为完整的内啮合圆柱齿轮的一段

从理论上讲,齿条只要能满足圆心角大小(舵面偏转角度)的完整齿即可。其实不然,只有设计成一个完整的圆柱齿轮才能加工、插齿出内啮合的齿条来。该齿条必须具有完整的齿数,其模数与其相啮合的小齿轮一样,且齿形角、周节、齿顶高等参数相同。

2.5.2 齿条齿顶圆半径的确定

齿条的齿顶圆半径是齿条的最小尺寸和最重要的基准面。其大小与舵面转轴直接有关之外,它与缝翼滑轨也密切相关:齿条的齿顶圆应尽量与滑轨的底圆齐平、半径一样。若齿条齿顶圆露出滑轨,会使伸出前梁后的滑轨防护套过高,很不利于防护套在加强肋板上的安装;若齿条齿顶圆陷入滑轨太深,又会使滑轨高度加大,重量、尺寸均会加大,如图3所示。

即便齿轮-齿条传动比确定之后,齿条的齿顶圆半径大小还必须考虑小齿轮直径的变化,因为小齿轮轴的位置与缝翼传动的扭力管相连。扭力管的位置常常会因机翼结构、飞控系统、液压系统的变化而改变,因此,齿条齿顶圆半径的确定是一个综合参数,涉及多方面因素考虑、协调的结果。

3 齿轮-齿条设计载荷类型及分析

飞行中,齿轮-齿条装置需克服作用在舵面上的气动力并使之产生运动,同时,也要考虑齿轮、齿条及相连接结构万一出现故障时需采用的安全措施。这就使它比常规齿轮传动装置的承载类型复杂得多,与常规的分析方法差异较大。

3.1 正常操纵载荷

3.1.1 缝翼运动时作动器的操纵载荷(M_1)

缝翼运动时作动器的操纵载荷是根据缝翼在不同的角度、以不同的速度(标牌速度)运动时,缝翼作动器或齿轮-齿条承受的最大载荷。

3.1.2 缝翼不运动、飞机运动时作动器的强度载荷(M_2)

飞机作巡航飞行时,缝翼不运动,舵面处于零位。气动载荷作用在缝翼上的力会传递到齿轮-齿条和缝翼作动器上。因巡航飞行速度大于缝翼正常运动时的速度,并考虑飞机过载状态等,强度载荷通常都大于缝翼作动器上的最大操纵载荷。因而以往的飞机常以强度载荷作为操纵系统构件的设计载荷。

3.2 故障状态下的载荷

3.2.1 作动器断开载荷(M_F)

通常,缝翼作动器、齿轮、齿条的断开(断裂)故障率大于 10^{-9} ,因此,飞行中它们有可能出现故障。若同一舵面上,有一个作动器出现断开时,舵面会停止运动,则另一个作动器将承担两个作动器的强度载荷的总和。

由于每块舵面上的两个作动器并非位于舵面气动力中心的等距离两侧,因此,两个作动器的断开载荷并不一定相同。

3.2.3 扭矩限制器载荷(M_L)

当缝翼或缝翼作动器运动中出现卡住(阻)时,马达将不断发出更大的功率(力矩),极可能造成结构的破坏。为防止此类故障发生,在每个齿轮-齿条前端的缝翼作动器内设置了扭矩限制器。其最大的扭矩值通常为最大操纵载荷的2.7~4倍。这个值究竟怎么选取?通常通过试验和反复验证获得,并用于计算中。

这个系数值之所以这么大,主要考虑低温条件下作动器内润滑脂的粘度大、运动阻力大,扭矩限制器中的机械元件(弹簧等)的加工精度要求高以及使用中零、部件的磨擦、工作寿命长短等。

3.2.3 作动器卡阻有效限制力矩(M_K)

同一舵面中若一个作动器断开(内部或外部)时,仍可以由另一作动器驱动舵面运动,不过运动时,舵面将产生倾斜直至停止。此时,作动器将承受巨大的故障力矩 M_K 。此力矩与3.2.1节中的断开力矩及另一作动器的扭矩限制器的最大扭矩值有关。

其实,三种故障载荷均来自正常操纵载荷的大小。无论是齿轮、齿条,缝翼作动器,还是与其相连

的结构,它们承受的载荷都与故障载荷密切相关。至于故障载荷如何计算,举例如下。

例:计算内缝翼作动器 1-1 及 1-3 的 M_K

$$\begin{aligned} M_K(1-1) &= (871.2 + 0.46 \times 857.3) / 1.33 \\ &= (871.2 + 394.358) / 1.33 \\ &= 1\,265.558 / 1.33 \\ &= 951.5(\text{NM}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_K(1-3) &= (871.2 + 0.46 \times 973.1.3) / 1.33 \\ &= (871.2 + 447.63) / 1.33 \\ &= 1\,318.826 / 1.33 = 991.6(\text{NM}) \end{aligned}$$

由上式可知:同一舵面中,若一个作动器断开,不影响另一作动器继续推动舵面运动直至停止,停止的作动器承受的载荷除整个舵面上的气动载荷器全部作用在该作动器 M_F 上外,还将受到断开作动器施加的部分载荷 ($0.46 \times M_L$)。其中, $K = 0.46$ 来自多种试验和换算的结果。1.33 为强度计算中的安全系数。

缝翼作动器的三种故障载荷都会直接传递到齿轮-齿条上。在齿轮和齿条设计与强度计算中,需取三种极限故障载荷的最大值。与其相接的结构(机翼前缘、加强肋板)都将承受此最大载荷。对此,应引起结构的特别重视,因它与以前的飞机设计有很大的差异。

4 结论

4.1 齿轮—齿条装置的突出优势

齿轮-齿条装置具有传力路线短、重量轻和空

间小的优点,并巧妙地利用了空间小处的载荷小这一特点,减小了齿轮-齿条装置的结构外形,适应了小空间内的布局,使其在现代飞机上的应用越来越广泛。

4.2 非常规的齿轮设计

飞机上的齿轮—齿条装置不同于一般常规设计,以采用相同的大传动比为设计首要条件,很好地解决了多舵面多作动器同步运动的严格要求。

4.3 难得的选用参数技巧

为了解决齿轮—齿条装置在窄狭空间内的安装和设计,将齿条镶嵌在滑轨内,采用不根切的最小齿轮、非标准齿轮模数等,其设计技巧独特新颖。

4.4 重要的载荷计算

该齿轮—齿条装置设计突破了常规,采用了更为准确的载荷计算。操纵载荷为驱动多舵面的动力需求提供依据,故障载荷是设计齿轮-齿条装置的重要参数。

参考文献:

- [1] Rudolph, Peter . K . C . High lift Systems on Commercial Subsonic Aircraft[R]. NASA Contractor Report 747& September 1966.
- [2] 齿轮手册编委会. 齿轮手册(上册) [M]. 北京:机械工业出版社,2000.

(上接第 47 页)

去检测转子的位置信息,提高起动可靠性,再将起动转换单元和发电机控制单元综合到一起,提高设备的利用率,同时采用固态功率控制器(SSPC)技术减少电气元器件的使用,使电气接口更加简单,总体上减轻飞机的重量^[4-5]。

3 结论

本文从电气功能原理、电气接口及典型构型的实际应用出发,对辅助动力装置起动系统电气设计进行详细地介绍和分析,并通过对比研究,分析得出民用飞机辅助动力装置起动系统电气设计的发展方向,以期对民用飞机辅助动力装置起动系统设计方案的选择提供参考和借鉴。

参考文献:

- [1] 孙立. APU 技术进展和维修现状[J]. 国际航空,2009,3: 58-60.
- [2] 梅彦平. 航空高压直流稀土永磁无刷电机控制技术研究[D]. 西安:西北工业大学,2005.
- [3] 李广伟. 无刷直流电机的直接转矩控制研究[D]. 山西:太原科技大学,2009.
- [4] 李国生. 电励磁双凸极起动/发电机起动控制技术研究[D]. 江苏:南京航空航天大学,2011.
- [5] 李国柱,董进武,马建毅. 电源自动管理系统中功率控制器(SSPC)的设计与实现[J]. 海军航空工程学院院报,2010, 25(3):329-332.