

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2017.01.007

民用飞机后机身与垂尾连接结构研究

Research on configurations of After Fuselage and the Vertical Stabilizer Intersection for Civil Aircraft

孙洁琼 张宝柱 尤宏良 / SUN Jieqiong ZHANG Baozhu YOU Hongliang

(中航沈飞民用飞机有限责任公司工程研发中心, 沈阳 110000)

(Engineering Research & Development Center, AVIC SAC Commercial Aircraft Company Ltd.,
Shenyang, 110000, China)

摘要:

民用飞机后机身与垂尾的连接,担负着将垂尾的载荷传递到机身上的重任,是民用飞机设计中的一个关键连接。该连接方案的选择,需要综合考虑传力路径、工艺性、损伤容限、维修性、重量、成本等多方面因素。对成熟机型和在研机型的对接方案进行了分析,总结出了三种主要连接方案,通过对比给出了不同方案的优缺点,能够为我国民用飞机后机身与垂尾的连接设计提供参考和借鉴。

关键词:民用飞机;后机身;垂尾;连接;接头

中图分类号:V225+.2

文献标识码:A

[Abstract] The joint between after fuselage and the vertical stabilizer for commercial aircraft is very important, which transfers the load from vertical stabilizer to fuselage. The joint structure design is based on load, methods, damage tolerance, repairable, weight, cost, etc. This paper analyzes the mature concept of representative aircraft and the joint scheme of developing aircraft, and makes a summary of three main schemes. The advantages and disadvantages were given by comparing. The methods could be used as reference for the joint between after fuselage and the vertical stabilizer of commercial aircraft.

[Keywords] commercial aircraft; after fuselage; vertical stabilizer; joint; fitting

0 引言

飞机尾翼的功用是产生和改变升力来保证飞机飞行纵横向的稳定性、操纵性和平衡^[1],通常包括垂直尾翼和水平尾翼两部分。垂直尾翼主要由

垂直安定面和方向舵组成,是飞机的重要组成部分。民用飞机的垂直尾翼(简称垂尾,本文代指垂直安定面),普遍安装在后机身段上部,垂尾前、后梁(含多梁或长桁)的根部通过永久性连接或接头与后机身段隔框进行连接^[2],如图1所示。

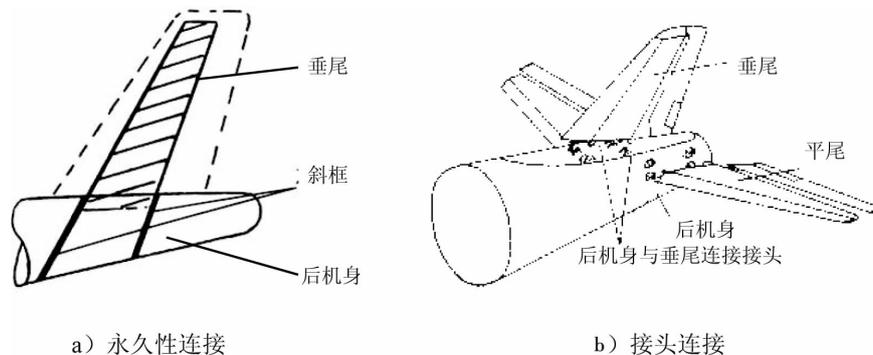


图1 后机身与垂尾连接典型结构布置

后机身与垂直尾翼的连接是飞机结构的重要连接部位之一。本文对现役以及在研的民用飞机后机身与垂尾的典型连接结构进行了权衡分析,综合比较了结构的设计协调性、承载能力、工艺性、维修性、耐久性和损伤容限特性、重量及成本等特性,并进行总结,能够对国内民用飞机的研制提供支持 and 借鉴。

1 载荷分析

垂尾结构承受表面气动载荷、惯性载荷、方向舵悬挂支臂传来的集中载荷,T尾构型还需要承受平尾接头传来的集中载荷。这些作用在垂尾上的

载荷最终都要传递到后机身上去。

永久性连接方案,采用斜框以适应垂尾翼梁插入后机身,即可将垂直安定面上的载荷直接传到机身结构上,避免了因结构连接引起的疲劳问题^[2]。

接头连接方案,将简化为 F_x 、 F_y 、 F_z 三个方向的集中力,以及 M_x 、 M_y 、 M_z 三个方向的力矩通过垂尾连接接头传递到后机身上去。垂尾载荷通过垂尾壁板、梁及接头结构传递到与后机身连接的接头上,可分为垂直集中载荷和水平集中载荷,水平集中载荷又可分为航向载荷和侧向载荷,如图2所示。这些载荷最终通过机身接头传递到机身的加强框及纵向加强件上。

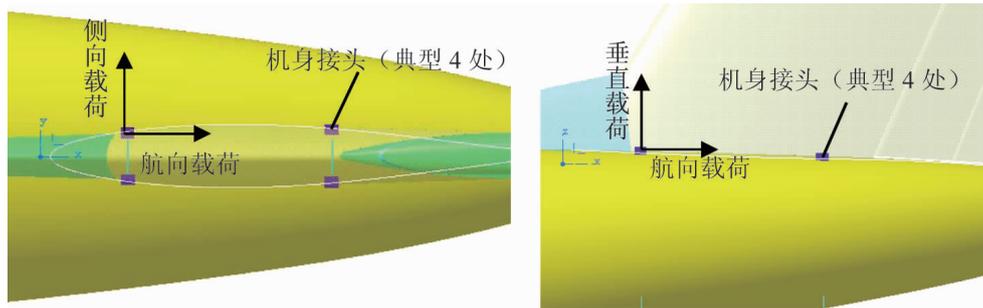


图2 接头载荷(以四点接头为例)

2 典型民机后机身与垂尾连接设计

通过对民用飞机现役机型以及在研机型进行分析,能够发现后机身与垂尾连接结构主要分为斜框连接(永久性连接)、耳片接头连接以及平面接头对接三种形式,在耳片接头连接形式中,又可分为顺航向耳片接头连接和垂直航向耳片接头连接两种形式。

在各种接头连接构型中,后机身与垂尾的连接可设计为四点、六点、八点连接甚至更多。对接点数应考虑垂尾安定面、机身的受力及机身内部布置的具体情况^[1],同时兼顾使用寿命及损伤容限要求等多方面因素,本文不作探讨。

2.1 斜框连接

斜框连接形式比较简单,即将后机身的机身框布置为斜框,分别与垂尾前后梁对应。通过接头连接垂尾与机身框或翼梁直接插入机身内,与机身加强框连接为一体,代表机型为 CRJ700/900 和 Q400,如图3、图4所示。斜框方案中垂尾前后梁间的其他机身框也需要相应布置成斜框,以满足后机身的整体布置要求。梁与框共面的连接形式,能够保证

垂尾载荷从前、后梁直接传到机身框,传力直接且连续。斜框连接通常为永久式连接结构,后机身与垂尾间无分离面,垂尾梁与机身框先连接为一个整体,再进行装配。

斜框连接结构的特点是:机身框的布置方向与垂尾梁方向一致,传力路线最短;装配工艺较为简单,结构重量轻;但斜框布置影响后机身内总体布局;垂尾无法拆卸,检查和维修性较差;翼身连接处无需整流。

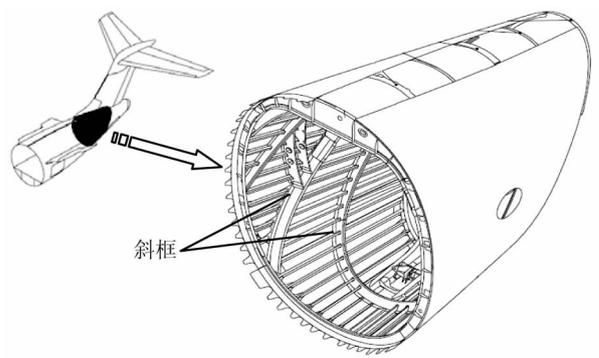


图3 采用斜框连接的 CRJ700/900 后机身

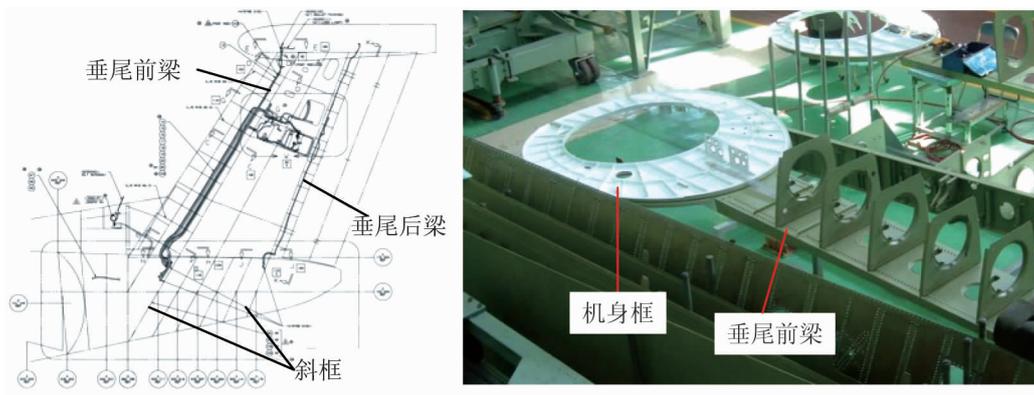


图 4 采用斜框连接的 Q400 后机身和垂尾

2.2 耳片接头连接

2.2.1 顺航向耳片接头连接

连接结构由连接接头、侧杆组成。垂尾根部的航向载荷和侧向载荷都通过接头传递到机身。由于主传力接头耳片顺航向布置,故称顺航向耳片接头,传递飞机航向载荷。代表机型有空客 A320、A330、A340、A380 庞巴迪 C 系列飞机等。

A320 飞机采用整体机加耳片接头来传递航

向与侧向载荷。垂尾前、中、后梁两侧各对应两个接头,为 6 点连接形式,如图 5 所示。整体接头受力较复杂,接头的顺航向耳片传递垂尾根部的航向载荷;左右接头相对的一侧设计侧耳片用于连接侧杆,传递垂尾根部的侧向载荷。接头通过高锁螺栓连接到后机身加强框的缘条和腹板上,与垂尾壁板耳片、侧杆则通过破损安全销连接。

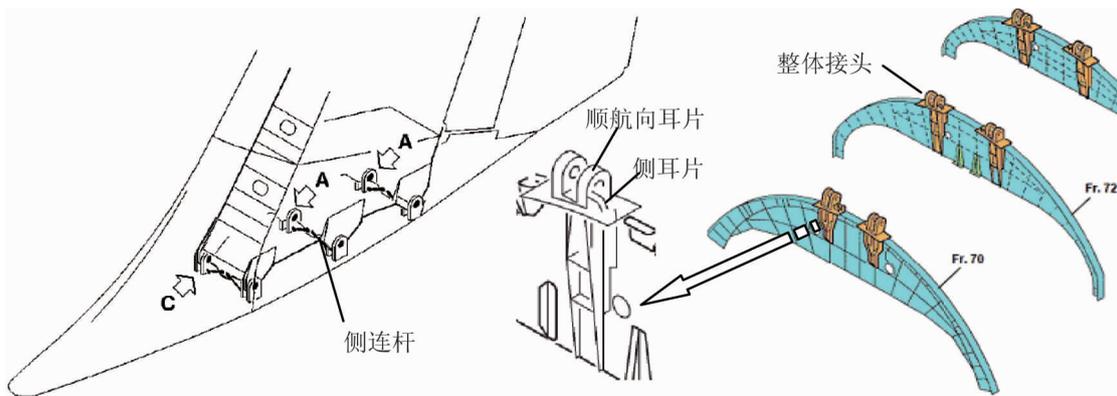


图 5 整体式顺航向耳片接头方案 (A320)

C 系列飞机也属于顺航向耳片连接,不同之处在于垂尾前后梁位置两主接头中间各增加一个附加接头。接头上部通过侧连杆与垂尾前、后梁处的接头连接,下部与机身加强框腹板和缘条直接相连,如图 6 所示。附加接头能够将垂尾侧向载荷直接传递给机身框,传力路线简单清晰;与整体接头相比,改善了单个接头受力;提高了结构的损伤容限能力,降低了制造难度。

相比 A320,空客公司对 A340 连接方案进行了改进。改进后的连接结构与 C 系列类似,侧向载荷

不再由顺航向接头传递,而是增加了用来承受侧向力的附加接头。由于载荷较大,耳片接头不再与机身框相连,而是连接到框间,类似于接头与加强梁的整体结构来传递顺航向载荷。A340 垂尾采用三梁结构,因此在前、中、后梁布置了三个附加接头。

顺航向耳片接头方案的特点为:接头结构受力简单;连接销只承受剪切载荷;易于更换和维护;疲劳损伤容限性能好,结构寿命高。但由于顺航向耳片接头需要在垂尾翼型内布置拉杆,往往受到垂尾空间的限制。

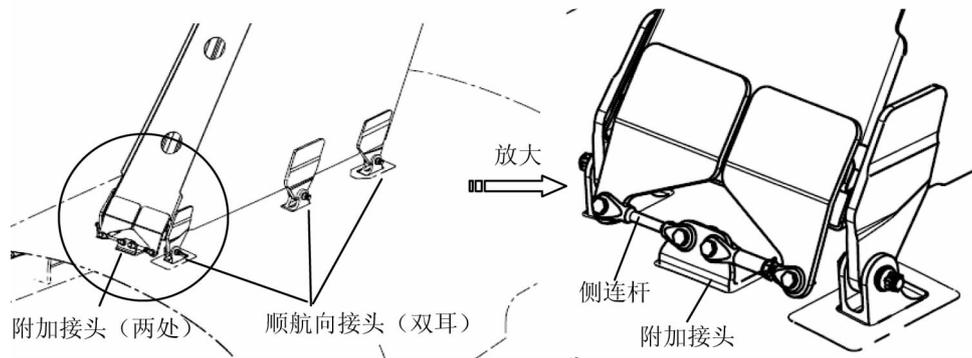


图6 组合式顺航向耳片接头方案(C系列)

2.2.2 垂直航向耳片接头连接

机身接头布置在与垂尾前、后梁对应的加强框上,接头耳片方向与飞机航向垂直,故称垂直航向耳片接头,代表机型有波音707、波音737飞机。

波音737垂尾前、后梁的耳片接头均为组合式双耳结构。耳片腹板和缘条分别与对应加强框的腹板

和框缘条相连。由于后梁根部载荷较大,布置由8个单耳片组成的4组接头来满足破损安全要求,如图7所示。接头的螺栓孔轴线与飞机的纵轴平行,且前后共轴,垂直航向的耳片接头传递垂尾根部的侧向载荷,航向载荷则通过垂尾后梁接头前后的“L”型材传递。

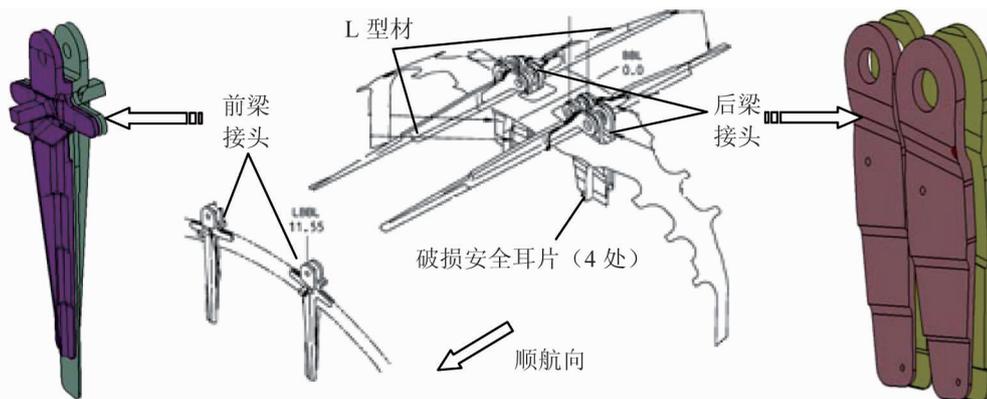


图7 垂直航向耳片接头连接(B737)

垂直航向耳片接头结构的特点为:安装与拆卸垂尾时可用一侧的前后接头作轴,向机身侧向旋转,进行吊装。可以降低总装厂房高度,便于外场维修、拆卸和更换;与垂尾前梁连接的机身接头不传递航向载荷,航向载荷由布置在机身垂尾后梁处的接头传递;机身尾段外形收敛,为保持前后接头孔的同轴度,必须抬高后部接头,造成后部接头在承受侧向力时受载较严重;垂尾接头需转折为“L”型,产生附加应力,垂尾接头设计复杂;零件多,重量大,装配复杂;属于波音系列早期方案,现在已不再采用。

2.3 平面接头对接

垂尾位于后机身上部,垂尾壁板通过几组垂尾

接头连接到对应的机身加强框接头上,对接平面为后机身与垂尾的设计分离面。平面对接设计又包含两种方案,一种是以支线飞机ATR72为代表的仅通过接头大螺栓承受拉剪复合载荷的连接形式;另一种是以宽体飞机B767、B777、B787和A350为代表的垂尾接头除了大螺栓还有小螺栓承剪的结构形式。

ATR72飞机采用“T”尾布局,垂尾与后机身间通过平面接头对接(4点/6点),所有载荷均由垂尾接头的大螺栓传递,其侧面和前后梁处都没有布置承剪小螺栓。这样的连接方案结构简单但传力复杂,装配时可通过垫片调整,界面处后机身上壁板开口能够满足装配和维护的可达性要求,如图8所示。

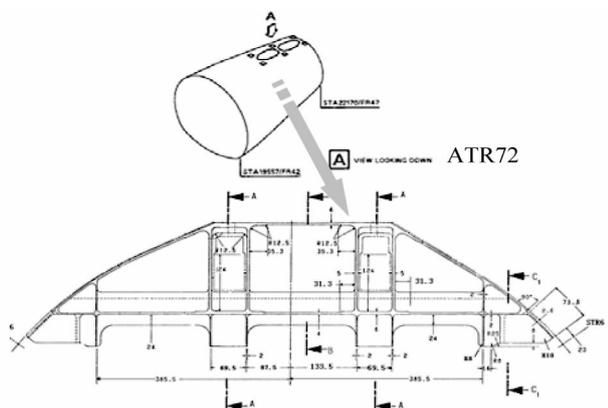


图 8 ATR72 垂尾与后机身连接结构

B787 采用多点连接(8 点),如图 9 所示。垂尾“L”型接头与后机身框接头连接;机身与垂尾的每个对接点上设计有两个螺栓孔,连接螺栓主要受拉,接头前后缘条延伸处布置小螺栓,用来传递航向剪切载荷;尾翼前后梁处同样设计“L”型接头与后机身前后梁框连接,传递侧向剪切载荷。连接界面处仅在后机身壁板中间设计一个开口,能够满足较大飞机的维护可达性;连接接头与加强框可以采用整体机加件,也可以采用组合件。组合设计能够提高结构的损伤容限能力,降低制造难度,节省成本;但装配较复杂,会增加重量。

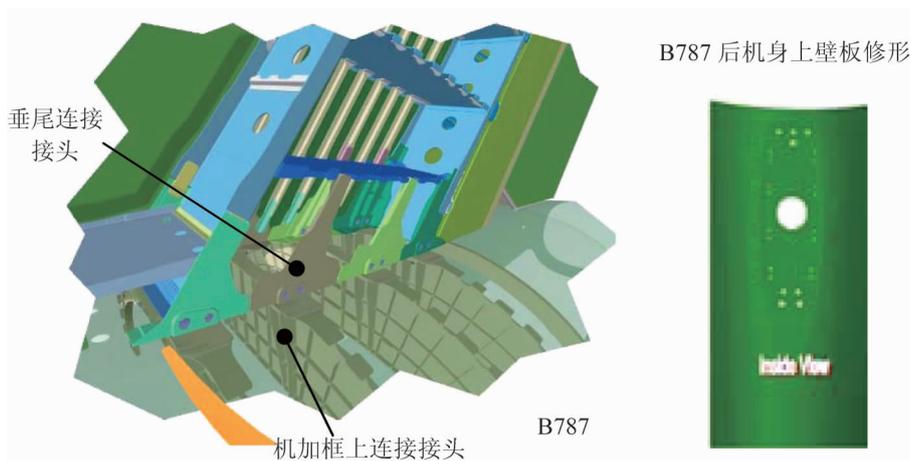


图 9 B787 垂尾与后机身连接结构

平面接头对接方案的特点为:机身与垂尾对接面为一个平面,接头可以与壁板贴合连接,对垂尾翼型要求不高;连接处大小螺栓分别承受拉伸载荷和剪切载荷的情况对于结构设计和强度计算都相对简单,拉伸对接孔精度要求低,对接装配相对容易,成本低;但小螺栓的设计导致垂尾不可拆卸,更

换垂尾困难;只通过大螺栓承受拉剪复合载荷的方案,疲劳性能差;对接处,后机身理论外形需要从双曲面修形为平面。

3 后机身与垂尾连接构型对比分析

对上述连接方案的特点进行对比,结果见表 1。

表 1 后机身与垂尾连接方案对比

	斜框结构 (CRJ700/900、 Q400)	耳片式接头连接			平面接头对接	
		顺航向耳片接头		垂直航向 耳片接头 (B707、B737)	拉剪分开 (B787、A350)	拉剪复合 ATR72
		整体接头 (A320)	附加接头 (C 系列)			
结构协调性	×	-	√	×	√	√
载荷传递	√	×	×	-	√	√
疲劳	√	-	√	√	√	×
损伤容限	-	-	√	√	-	-
制造工艺	√	-	√	×	×	√
装配工艺	√	-	-	√	-	-
维修性	×	√	√	×	-	√
重量	√	-	-	-	-	-
成本	√	√	-	-	-	-

注:√良好;-一般;×较差

从表1可以看出,斜框连接结构传力连续而直接,在工艺、成本和重量方面也具有一定优势,但固定连接不利于检修和维护,无分离面设计也限制了垂尾与后机身的设计和制造供应商的选择。斜框布置影响了后机身段的总体布局,尤其是平尾的布置,因此多用于100座以下采用“T”尾的支线飞机。

耳片接头连接构型,尤其是顺航向带附加接头方案,在损伤容限特性、结构维修性、工艺性方面具有明显的优势,容易满足现代民用飞机较高的服役寿命要求;同时能够降低结构重量和成本,对后机身外形影响较小;连接界面处需要布置整流罩;但这种构型需要有足够开敞的装配和维修空间,尤其是侧连杆的布置不适用与尾翼厚度较小的支线飞机;另外,多组耳片式接头平面最好相互平行且距离较近,可以避免偏心造成的附加弯矩,对于翼型曲率较大的机型布置起来比较困难;需要同时关注接头和螺栓的疲劳问题。

平面接头对接构型相对耳片接头构型传力路线较短;对空间要求小;可以与垂尾翼型相匹配,相比耳片接头更适合与复合材料垂尾连接;在国内具有较为成熟的制造和装配经验;且垂尾与机身连接处无需整流;相比耳片接头载荷单一,只需关注螺栓疲劳问题即可;但其贴合面处检查和维修相对困难;需要对后机身双曲面理论外形进行修形。

现代民用飞机的垂尾结构和机身尾段越来越多的采用复合材料结构。对于大飞机来讲,由于垂尾面积大,载荷大,通常的4个或6个接头转载已不能满足要求,加上复合材料结构单钉转载能力较小,必然需要更多接头转载,而多个承受复杂、高载耳片接头的高精度协调安装难度会成倍增加;采用

多个对接接头的平面连接,由于钉的配合精度要求不高,简化了垂尾的对接安装,大大降低了装配难度;通常耳片式接头与垂尾壁板采用整体固化,为了保证与航向平行,往往接头处较厚,结构尺寸大,不利于固化,难以保证质量;而机身的耳片接头往往采用金属机加结构。金属与复材接头的双剪连接,也容易造成复材接头的分层。平面对接方案则可以采用钛合金接头与垂尾复合材料壁板进行机械连接,改善了装配工艺和结构的疲劳性,对于复合材料机身与垂尾连接具有一定的优势。

4 结论

本文在对多个典型机型后机身与垂尾的连接结构方案进行了研究,总结了三种典型的连接形式。通过分析和比较,可以看出每种连接方案都有各自不同的优缺点和适用机型。其中波音机型以平面对接形式为主,空客机型则主要采用顺航向耳片式连接方案。对于代表波音和空客最高技术水平的两大复合材料机型B787和A350,双方都采用了平面对接方案,也从一个侧面说明了平面对接方案在复合材料飞机垂尾与机身连接的适用性。

了解和熟悉各种连接形式的特点及其适用性,采用成熟有经验的设计方案,能够降低设计成本和风险。本文的研究能够为不同机型后机身与垂尾的连接提供参考,对国内民用飞机在该连接结构处的方案设计具有借鉴意义。

参考文献:

- [1]《飞机设计手册》总编委会.飞机设计手册第10册:结构设计[M].北京:航空工业出版社,2000.
- [2]牛春匀.实用飞机结构工程设计[M].北京:航空工业出版社,2008.