

基于 QAR 数据的民航客机设计理念分析

陈 啸¹, 王永飞^{2,3,4}

- (1. 上海飞机客户服务有限公司, 上海 200241; 2. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100041;
3. 北京市高速交通工具智能诊断与健康重点实验室, 北京 100041;
4. 轨道交通装备全寿命周期状态监测与智能管理技术与应用北京市工程实验室, 北京 100041)

摘要: 中国国内运行着大量国外先进民用飞机。这些飞机全部装有飞行数据快速存取记录器, 以采集飞行数据开展飞行品质监控工作; 民机日常飞行数据除了能够在航空公司运行中发挥作用, 还能够通过技术手段分析得出先进型号的设计经验与运行特点, 相关技术成果对国产民机制造业的发展也具有一定的借鉴意义; 在分析国内外相关研究基础上, 以两款国外民机巡航段飞行数据的分析为例, 解析了两型飞机的高度保持控制律设计逻辑, 实际案例分析表明, 基于 QAR 数据的分析能够有效地反应在自动飞行阶段高度保持控制律中体现的设计逻辑, 从而有助于对国产民机的设计和优化。

关键词: QAR 数据; 自动飞行; 高度保持控制律; 设计逻辑

Analysis of Civil Airliner Design Concept Based on QAR Data

Chen Xiao¹, Wang Yongfei^{2,3,4}

- (1. Shanghai Aircraft Customer Service Center, Shanghai 200241, China; 2. Beijing Aerospace Measure & Control Corp. Ltd, Beijing 100041, China; 3. Beijing Key Laboratory of High-speed Transport Intelligent Diagnostic and Health Management, Beijing 100041, China; 4. Beijing Engineering Laboratory of Rail Transportation Equipment Life Cycle Condition Monitoring and Intelligent Management Technology and Application, Beijing 100041, China)

Abstract: China is running a large number of foreign advanced civil aircraft. These aircraft are all equipped with flight data quick access recorders to collect flight data for flight quality monitoring. Besides being able to play a role in airline operation, the daily flight data of civil aircraft can also analyze the design experience and operation characteristics of advanced models through technical analysis. The relevant technical achievements have certain reference significance to the development of domestic civil aircraft manufacturing industry. Actual case analysis shows, the analysis based on QAR data can effectively respond to the design logic embodied in the altitude maintenance control law of the automatic flight phase, which can benefit the design and optimization of the domestic civilian aircraft.

Keywords: QAR data; automatic flight; control law of the altitude maintenance; design logic

0 引言

QAR (quick access recorder, 快速存取记录器) 是一种无保护装置的机载飞行数据记录设备, 主要用于日常运行时获取飞行数据^[1]。根据设计技术标准的不同, QAR 记录的飞行数据种类由 200~2000 之间不等, 基本覆盖飞行员操作、飞机飞行参数、重要系统参数。根据参数重要程度和设备设计原理, 各参数记录频率从一秒 16~0.25 次不等。对 QAR 数据进行分析, 可以归纳得到主制造商在设计制造中的一些基本理念, 对国产民机制造业有它山之石的借鉴意义。本文将给出两种国外进口民用飞机型号的飞行数据分析示例, 以探究其在自动飞行阶段高度保持控制律中体现的设计逻辑。

1 国内外基于 QAR 数据的应用现状

随着科技的进步, 民航业的运输安全水平得到了不断提高, 航空重大事故率已降低至百万次飞行 0.8 次的较好水平。同时, 我国的民航安全水平也取得了长足进步。1999 年到 2008 年的数据显示, 我国运输航空重大事故率为百万次飞行 0.2 次。由此可见国内民航业安全运行条件不断改善, 安全记

录持续改进。然而, 与发达国家如美国比, 我国的亿客公里死亡人数在 2009 年以前都一直高于美国, 可见, 我国定期载客航班运输的安全水平, 在民航业不断发展的过程中仍然需要不断提高。

为将风险管理落到实处, 并以此不断提高飞机和飞行操作的安全性, 中国民航自 1993 年起开始研究飞行品质监控技术, 按照规定, 凡在中国境内注册的大型公共运输航空器都必须安装飞行数据记录器 (Flight Data Recorder, FDR) 和快速存储记录器 (Quick Access Recorder, QAR), 这些数据记录器是飞行品质监控 (FOQA) 的重要硬件支持^[2], 它们可以收集飞行运行过程中的数百个运行数据, 从而客观全面地展现飞行在整个飞行过程中的状态以及飞行员的操作表现。同时, 航空企业也可以将这些数据传输在地面用于飞行品质监控工作, 通过监控出发逻辑判断的超限事件, 进而达到风险管控的目的。

QAR 相比 FDR, 由于更易存储, 采样频率高, 故记录的参数更多, 从而对 QAR 数据的分析结果也更加准确, 因而被航空公司广泛采用。QAR 能够连续记录 600 小时的飞行数据, 记录容量可以达到 128M^[3], 最多可存储 2000 多个参数, 数据存储量相当之大, 可以记录多次航班从起飞滑跑开始到最后着陆滑跑停至机位的一系列信息, 具有较高的研究价值, 所以, 基于 QAR 的数据对航班的整个起降过程的安全风险进行研究, 可以对实际运行中可能出现的各种不安全事件起到很大的

收稿日期: 2017-07-13; 修回日期: 2017-07-20。

作者简介: 陈 啸 (1986-), 男, 安徽淮南人, 硕士, 工程师, 主要从事飞行数据分析、飞行安全监控、不安全事件调查等工作方向的研究。

预防作用。

目前，借助 QAR 系统记录数据并开展了“飞行品质操作保证计划”也就是 FOQA 计划已在全球部分航空公司业广泛应用。按照 Flight Safety Foundation (FSF) 中 FOQA 的定义，该项应用的主要目的是用获取飞机在航线飞行时的飞行数据，并进行分析，以提高飞机飞行时的可操作性和安全性，进而改善机组对飞机的操作技术和飞机运行机制。

1.1 基于 QAR 数据进行飞行品质监控的研究

为克服飞行员主观感觉和人工解读的误差和效率低下的问题，20 世纪 70 年代起，世界上知名航空公司就已经开始进行软件研发，并且将软件用于检测飞机状态以便为飞机维修和发动机监控提供帮助。在 2004 年 11 月初段^[4]，设立于 Cranfield 大学的英国民航局研究中心采用 Flightscape 公司的基于可视化窗口操作系统 (Insight FDM 系统) 试图找到一种利用 QAR 数据分析来提高飞机飞行安全性的方法，该系统是 Flightscape 公司专门开发出来用于航空公司进行飞行数据分析的软件。

美国的 SMI 公司 (Scientific Monitoring, Inc) 以发动机视情维修思想为指导，专门研发了一款针对复杂的资金密集型设备 (比如民用航空发动机) 的状态监控软件。该软件结合了计算机数据挖掘、人工智能等相关技术 (如人工神经网络)，成功建立了可靠的数学监控模型，可以对一些不安全事件或者事故症候提前发出预警，从而协助用户更加方便地制定维修计划，从而降低生产成本，取得了较好的经济效益。同时，美国的 Sim Author 公司的 Flight Viz 飞行数据模拟试验再现软件可以将飞行数据广泛应用于日常监控工作中，并且起到了明显的效果。

1997 年，中国民航总局在要求所有运输机加装上 QAR 设备，并且要对所飞的每个航班实施监控和数据分析，对改进的飞机飞行品质和保证飞行安全提供重要的科学手段。随后，国内部分航空公司或航空科技企业也围绕 QAR 数据的分析和应用开展了一些工作^[5-6]。部分国产飞行品质监控在国内航空公司有小范围使用，其功能与国际同类软件基本相同，为国内飞机飞行品质的监控进行了有益探索。同时，飞行品质监控工作的实施也大大提升了国内民航运行安全水平。

1.2 基于 QAR 数据进行飞机性能监控的研究

QAR 数据也能反映老龄飞机的性能衰减情况。国内学者周百政等对利用 EHM 软件进行性能监控做了研究^[7]，近年来，由于飞机机龄的增大以及对飞机油耗的精确要求和飞行安全品质的状况不断提高，国内各主要航空公司陆续开展了基于 QAR 数据的飞机性能监控计划。其中，中国国际航空公司自 2008 年开始，便逐步探索发力飞机性能监控工作，依靠所研发的 AHM 和 QAR 两套系统开展性能监控工作，成功覆盖了其全部机型。深圳航空用精确的数据作为监控依据，利用 QAR 数据分析系统来提供飞行计划的优化、飞机性能的监控、飞行时间的统计和节油管理。南方航空公司开展发动机状态排队、计划发展、发动机性能衰减评估等状态分析工作，并且利用此成果，加强了对其内部飞机的规划安排工作，提高了飞机发动机的使用安全性和经济性。

2 QAR 结构与原理分析

典型 QAR 数据应用系统架构及工作原理如图 1 所示。

由飞机机载航电系统采集的总线数据被存储在 QAR 中，

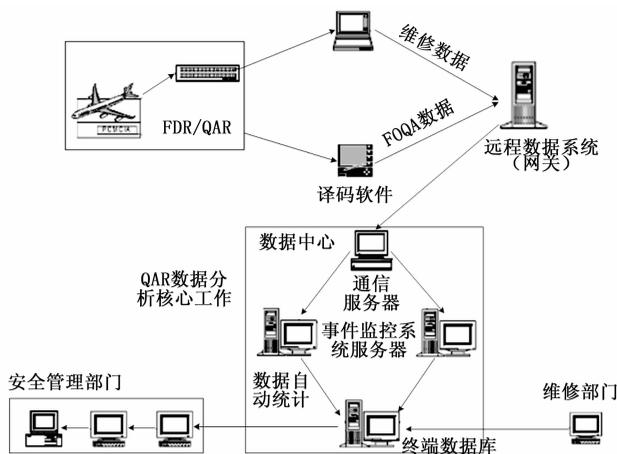


图 1 典型 QAR 数据应用系统架构

一般在落地后人工或通过 4G 网络、机场 wifi 下载传输至航空公司运行基地，译码软件分析后经远程数据系统转存至数据中心进行分析工作；在数据中心中主要由事件监控系统服务器进行数据自动统计的工作，然后持久化至终端数据库，最终提供给维修部门和安全管理部进行分析和使用。

一般情况下，QAR 飞行数据可以按照表 1 分为 4 类。

表 1 QAR 数据类型及描述

数据类型	描述
操作参数	飞行员操作飞机各项操纵器的直观反应,如脚蹬位置等
告警参数	描述飞机上所安装的各类告警器是否被触发,如近地警告等
状态参数	飞机在飞行过程中的速度、燃油流量等监控飞行状态的参数
环境参数	如风向、风速等外部环境相关参数

以上几类参数，状态参数的观测值一般呈线性变化，一些具有目标值得状态类参数还具有特定的分布曲线，具有良好的研究价值。其他三类参数一般作为状态类参数超限时寻找超限原因的辅助工具和数据支撑，分析人员一般依靠着几类数据的综合分析来提出避免超限的可靠方法。

在实际运行中，QAR 数据的分析和管理工作只是飞行品质监控的一小部分，航空公司一般借助软件对 QAR 的各项数据进行自动筛选，并统计成表，再依靠航后管理功能对相关事件进行复训^[8]。

3 基于某型干线飞机自动巡航飞行数据分析的设计

截取某型干线飞机巡航中的两分钟数据进行分析。涉及的飞行数据均在直线巡航飞行中提取，飞行中横向和侧向的扰动微小可忽略。当时飞机处于自动驾驶状态，飞行员没有操作动作。高度曲线中，虚线为飞行员当时预选高度，数值为 27 000 ft。升降舵偏转、发动机推力调整等动作均由自动驾驶仪和自动油门控制。将该时间段飞行高度、发动机低压涡轮转速 (N1)、升降舵偏角、法向过载、垂直速度等参数如图 2 所示。

根据图 2 中的数据曲线还原当时飞行场景如下。

1) 0~60 s 之间：在该时间段内，飞行气压高度稳定在 26 950 ft 左右，比预选巡航高度低 50 ft。该偏离值在航空器

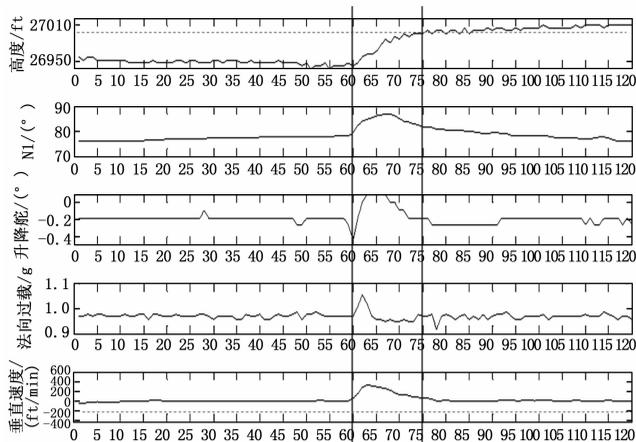


图 2 某型干线飞机自动巡航飞行中 4 个典型参数

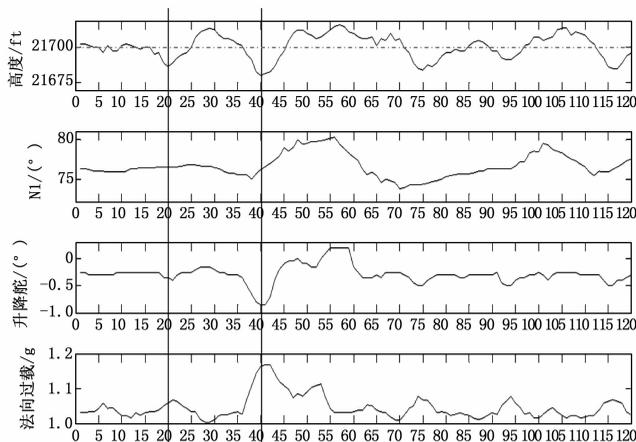


图 3 某型支线飞机自动巡航飞行中 4 个典型参数

实施 RVSM 运行的适航批准范围 ($-65 \sim +65$ ft) 之内^[9]。飞机升降舵基本无动作, 稳定在 -0.2° 。发动机 N1 数值缓慢增加, 但增加量不足以引起高度调整。

2) 60~75 s 之间: 在该时间段内, 发动机 N1 值有显著增加, 促使飞机推力增大产生爬升率。为保持飞行姿态与速度, 升降舵配合 N1 进行调整, 偏转量级在 $-0.3 \sim +0.3^\circ$ 之间。二者共同作用的结果是飞行高度在十五秒之内追回到预选高度 27 000 ft。期间为避免高度过快增加超出预选高度, 在垂直速度为正、高度持续增加的情况下, N1 值从 68 s 起开始回调。

3) 75 s 之后: 飞机高度保持在 27 000 ft 左右, 且有轻微上升趋势。发动机推力有微调降低, 升降舵基本稳定在 -0.2° 左右。

由上数据分析结果可以概括该型飞机在巡航中自动飞行阶段的高度保持控制策略。首先, 飞行高度偏离预选高度在一定范围内, 飞机不会明显调整动力或升降舵。少量数据分析结果表明该范围为 $-80 \sim +80$ ft。其次, 飞行高度持续偏离超过某一阈值, 则发动机推力、升降舵会在短时间内 (上图例中时间为 15 s) 进行操作, 达到保持高度追踪的目的。该阈值目前尚不明确, 持续时间、高度偏离数值、垂直速度都有可能包含其中。

经实际飞行数据证实, 在上述飞行控制策略的作用下, 飞机在自动飞行中的高度平均偏差较大。但飞行过程平稳, 垂直过载较小, 很少造成乘员对过载的体感。

4 基于某型支线飞机自动巡航飞行数据分析的设计

同样截取某型国外制造支线飞机在自动驾驶状态下的两分钟数据进行分析。高度曲线中, 虚线为飞行员当时预选高度, 数值为 21 700 ft。升降舵偏转、发动机推力调整等动作均由自动驾驶仪和自动油门控制。将该时间段气压高度、发动机低压涡轮转速 (N1)、升降舵、法向过载等参数如图 3 所示。

图 3 中可见, 该支线飞机与上文某干线飞机的自动飞行阶段数据曲线特点截然不同。

1) 高度、升降舵、法向过载都存在不规律的振荡, 部分时候可见 20 s 的周期性, 如图中两直线标记的高度、升降舵波谷所示;

2) 升降舵、N1 都具有较频繁的操作。在高度偏离小于 30 ft 的情况下, 升降舵偏离配平位置的角度范围在 0.6° 以内, N1 调整范围在 8% 以内;

3) 高度变化与升降舵偏转之间具有明显相关性, 二者曲线相位基本相同;

4) 高度偏离仅 25 ft (图上 40 s 时) 也会导致升降舵较大偏转 (0.5°), 此时法向过载峰值 1.17 g。

数据分析结果反映出该型飞机的高度保持控制策略也与上文干线飞机完全不同。该型飞机控制策略是时刻跟踪高度, 一旦高度偏离就会做出升降舵和发动机油门操作, 使得飞机返回预选高度。因此平飞中飞机会频繁使用升降舵和油门控制飞行状态。如此设计的优点在于飞机高度保持能力较好, 平均高度偏差小于上文干线飞机。缺点是会有较明显的高度振荡, 且易出现峰值较高 (上图中过载峰值 1.17 g) 的法向过载, 导致机上人员产生较强的体感。

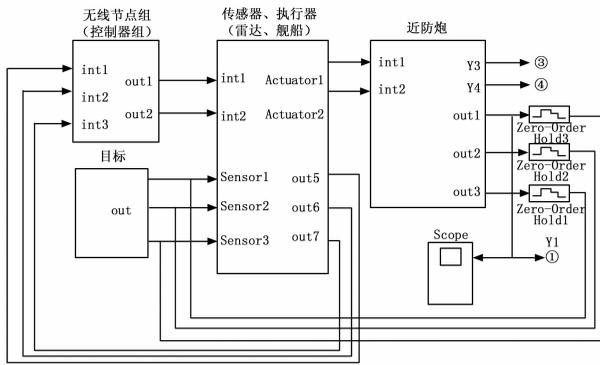
5 QAR 数据分析结论的借鉴意义

我国的国产民机制造业尚处于探索阶段, 距离国外先进水平仍有差距。加之国外严格的技术封锁、自身设计与运行经验的欠缺, 设计人员在个别情况下无法给出明确的系统原理逻辑和设计指标。因此, 从 QAR 数据中分析得到的其他机型基础设计理念就显得尤为宝贵。

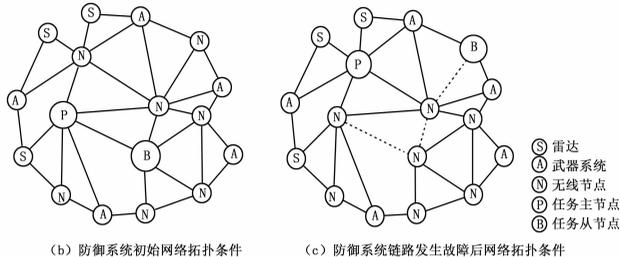
6 实验结果与分析

上文两型飞机的自动飞行高度保持控制逻辑就能够为国产民机的设计提供借鉴。两型飞机都通过了高标准适航审定。对某干线飞机而言, 实际飞行数据证明其高度偏离值并未时刻控制在规章要求范围内。但这种控制策略在保证基本安全性的前提下大大提高了乘坐舒适性。对某支线飞机, 其简单的控制策略可能出自支线运行环境、软硬件成本等方面的考量。但在实际运行环境中不可避免会出现法向过载的较大变动, 引起乘员的显著体感。目前我国国产支线飞机与文中支线飞机采用了近似的设计逻辑, 在运行中也出现了同样的问题。为改善乘坐舒适性, 使用调整控制律参数的手段收效甚微。而根治问题的办法就可以借鉴某干线飞机, 从根本上改变高度保持控制策略。

(下转第 161 页)

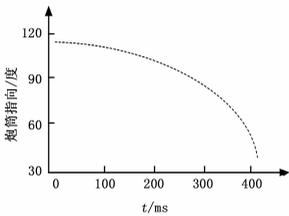


(a) 舰艇编队防御系统的建模

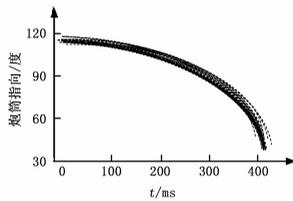


(b) 防御系统初始网络拓扑条件

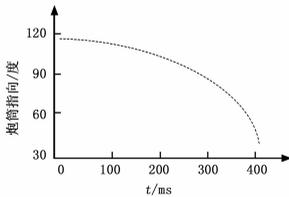
(c) 防御系统链路发生故障后网络拓扑条件



(d) 网络拓扑条件为 (b) 时系统响应



(e) 网络拓扑条件为 (c) 时未用VM系统响应



(f) 网络拓扑条件在60 ms

图 4 VM 在编队防御系统中的应用

机实现了底层不可靠物理设备和控制方法的无缝连接。

(上接第 153 页)

7 结论

中国民航规章对航空器的 RVSM 空域实施 300 米 (1000 英尺) 垂直间隔标准运行适航批准有统一的要求。但各型号为达到同样标准而采取的控制策略各有不同。由于不同型号具有各自的重量和气动设计特点, 因此不能简单的根据数据评判各自控制策略的优劣, 也不能生搬硬套地借鉴他人经验。本文的研究成果仅基于少量国外型号在国内运行的 QAR 数据。如能得到更多数据的支持, 分析结论可以得到更充分的验证, 对国产民机制造业的促进意义也将更显著。

参考文献:

[1] 中国民用航空局飞行标准司. 飞行品质监控 (FOQA) 实施与管理 [R]. AC-121/135-FS-2012-45R1, 2012.
 [2] 俞力玲. 中国民航飞行品质监控回顾与展望 [J]. 中国民用航

6 总结

编队一体化防御系统的目的是通过网络综合集成各种作战资源, 实现体系内的各种作战要素之间的信息共享和综合运用, 以形成一个体系配套、多武器协调的良好防御体系。将战争从“作战平台中心战”转向“网络中心战”。

然而, 由于作战环境恶劣, 无线网络自身的不可靠, 节点或链路可能发生故障, 最终导致通讯失败, 严重则造成整个系统不可控。

本文提出的基于嵌入式虚拟机的构架及其分配和移植算法, 能够灵活应对作战环境, 根据网络的拓扑结构, 动态的将控制任务移植或分配到可靠的无线节点中。通过系统仿真证明了此方案的可行性, 嵌入式虚拟机实现了控制算法和底层不可靠无线网络的友好连接, 对基于无线网络的控制算法的研究具有一定的借鉴意义。

参考文献:

[1] Hespanha J P, Naghshtabrizi P, Xu Y. A survey of recent results in networked control systems [A]. Proceedings of the IEEE, Special Issue on Technology of Networked Control Systems [C]. 2007, 95 (1): 138-162.
 [2] Jiang Z, Pajic M, Moarref S, et al. Modeling and verification of a dual chamber implantable pacemaker [A]. TACAS' 12: 18th Conf. on Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems [C]. 2012.
 [3] 朱磊, 王宝树. VM 技术在传感器网络中的应用 [A]. 2005 年西电研究生学术年会 [C]. 2005.
 [4] nanoRK. Sensor RTOS [EB/OL]. http://www.nanork.org, 2010.
 [5] Schrijver A. Theory of Linear and Integer Programming [Z]. John Wiley & sons, 1998.
 [6] Pajic M, Mangharam R. Embedded virtual machines. Technical report [R]. University of Pennsylvania, 2009.
 [7] Fu Z, Mahajan Y, Malik S. New Features of SAT' 04 version of zChaff [A]. The International Conference on Theory and Applications of Satisfiability Testing [C]. 2004.
 [8] Liu J. Real-Time Systems [M]. Prentice Hall, Inc., 2000.

空, 2012, 140.
 [3] 张杰. 飞行品质监控与飞行安全 [J]. 中国民航飞行学院学报, 2002, 13 (3).
 [4] 周百政. QAR 数据处理系统的设计与实现 [D]. 天津: 中国民航大学, 2009.
 [5] 耿宏, 李萍萍, 刘家学. 基于压缩感知的 QAR 数据重构 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (5): 1351-1353.
 [6] 高飞鹏, 黄加阳, 陈新霞. 基于航后 QAR 数据译码的 APU 故障诊断技术 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (1): 42-45.
 [7] 周百政, 曹惠玲. 基于 EHM 软件思路的 QAR 数据处理 [J]. 航空维修与工程, 2010 (4): 60-62.
 [8] 杨经焯. 基于 QAR 数据的航班运行安全风险研究 [D]. 天津: 中国民航大学, 2016.
 [9] 中国民用航空局航空器适航审定司. 在 RVSM 空域实施 300 米 (1000 英尺) 垂直间隔标准运行的航空器适航批准 [R]. AC-21-13, 2013.