

商用航空发动机材料数据管理要求 及数据库系统建设方案

张 燕, 徐 芳, 张剑锋, 马 峰, 黄小波

(中国航发商用航空发动机有限责任公司, 上海 200241)

摘 要: 基于对 CCAR33.15 材料适航条款的分析, 以典型商用航空发动机为例, 阐述了商用航空发动机材料性能数据管理要求, 其目的是实现各类材料或基于不同制造工艺形成材料的全流程数据的管理, 包括金属材料、非金属材料、复合材料、增材制造材料、焊接结构等, 数据类型涵盖材料测试数据、材料谱系数据、统计数据及设计许用数据, 同时分析了数据存储、检索、追溯性建立、计算分析等方面的管理要求。探讨提出商用航空发动机材料数据管理要求及数据库系统的建设方案, 包括构建子库架构以满足不同材料及制造工艺的差异化数据结构需求, 建立多模块材料数据之间智能链接以实现全流程数据可追溯性, 集成材料数据统计处理程序以实现材料数据库数据读取、数据计算分析与统计数据写入的一体化等, 为商用发动机的材料符合性验证奠定数据基础。

关键词: 商用航空发动机; 材料适航; 材料性能数据; 数据库系统; 追溯性

中图分类号: V25; TP311.13 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2023)06-0492-07

引用格式: 张燕, 徐芳, 张剑锋, 等. 商用航空发动机材料数据管理要求及数据库系统建设方案[J]. 中国材料进展, 2023, 42(6): 492-498.

ZHANG Y, XU F, ZHANG J F, *et al.* Materials Data Management Requirements and Database System Solution for Commercial Aircraft Engine[J]. Materials China, 2023, 42(6): 492-498.

Materials Data Management Requirements and Database System Solution for Commercial Aircraft Engine

ZHANG Yan, XU Fang, ZHANG Jianfeng, MA Feng, HUANG Xiaobo

(AECC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Shanghai 200241, China)

Abstract: The requirements of material property data management was elaborated based on the analysis of CCAR33.15 airworthiness requirements and on the typical case of commercial aircraft engine, aiming to realize the full-lifetime management of material data of metallic materials, non-metallic materials, composite materials, additive manufacturing materials, and weld joints, whilst the requirements on the storage, searching, traceability establishing and calculation of the material test data, material pedigree data, statistical data and design allowable data was analyzed. A database system solution on materials property data management was introduced, where differentiated sub-unit with customized data structure were established for different type of materials and manufacturing processes, smart linkages across different data modules were built to meet the lifetime traceability requirements, and data calculation programs were integrated to the database system to realize the integration of data reading, calculation and writing, to finally support the materials airworthiness verification.

Key words: commercial aircraft engine; material airworthiness; material property data; database system; traceability

1 前 言

商用航空发动机在安全性、可靠性、排放等方面有非常严格的要求, 必须通过适航审定后才能进入市场。

材料是构成航空发动机的基础, 必须随发动机产品进行适航审查^[1-3]。材料数据作为航空发动机研制的重要基础性数据, 除用于评价材料质量、进行生产管控之外, 还为航空发动机选材、强度及寿命分析提供依据, 也是材料适航符合性验证最重要的审查对象之一。同时, 发动机材料性能数据包括材料来源信息、生产过程信息、测试数据、统计分析数据、设计许用数据等, 存在数据量大、种类繁多、结构复杂等特点, 正是上述特点给航

收稿日期: 2021-06-08 修回日期: 2021-11-14

第一作者: 张 燕, 女, 1982 年生, 高级工程师,

Email: 26558148@qq.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202106005

空发动机材料性能数据的管理和利用带来了较大挑战。因此,亟需开展商用航空发动机材料性能数据管理要求分析及管理信息化系统建设研究,以实现航空发动机材料性能数据的科学高效管理、便捷可靠支撑航空发动机设计与适航工作。

国外航空发动机材料数据管理工作报道较少,一般标杆发动机公司会建立自己的材料数据库,也有航空企业采用一些商业数据库,如 Granta MI, Material Center 等。然而,由于国内商用航空发动机研制起步较晚,当前尚未形成成熟的材料性能数据管理方法与数据管理系统,北京航空材料研究院、北京钢铁研究总院等单位建立了一些航空材料数据库,但还存在数据库标准化与数据分析软件集成等方面的问题^[4],国内的航空发动机设计单位前期多以材料数据手册的形式来使用数据,一方面很难与测试数据建立追溯性管理,另一方面也不便于动态更新和状态管理;在材料数据方面,材料牌号多、材料标准兼容性差、材料性能数据不全且分散度较大,提供给设计使用的数据有缺项、可信度不高、与制造技术相关联的材料性能数据更显不足^[5]。国内在航天领域也通过对材料发展和应用的需求分析,从大数据建设与数据流形成、航天器材料大数据应用和数据服务体系这3个方面提出了航天器材料大数据服务体系建设构想^[6]。本文通过解析航空发动机材料适航相关条款的要求,阐述了材料适航验证对材料性能数据的管理要求,并基于此提出了材料性能数据管理系统的建设方案。

2 商用航空发动机材料适航要求

中国民航在民用航空发动机的适航规章 CCAR-33-R2 第 33.15 条中要求^[7]:“发动机所用材料的适用性和耐久性必须满足下列要求:①建立在经验或试验的基础上;②符合经批准的规范(如工业或军用规范),保证这些材料具有设计资料中采用的强度和其他性能。”本条款要求材料适航的范围为发动机选用的所有材料。其工程要求理解包括:①材料应具有一定使用经验;②材料必须通过试验验证;③选用或建立材料标准,以满足材料控制要求;④材料标准应经局方批准;⑤为结构设计和强度校核提供可靠的设计基准数据,对供应商的质量体系、过程能力进行管控。

3 材料符合性验证需求

基于以上条款要求及对其工程要求的理解,材料符合性验证主要包括对材料数据、材料标准和材料制造过程控制方法的验证要求,具体如下:

(1)材料数据:必须为结构设计和强度校核提供可

靠的设计基准数据。因此,需要建立材料性能数据的生成流程和统计方法,保证性能数据的来源可追溯、生成过程可控、统计方法科学合理。

(2)材料标准:必须建立并验证材料标准。满足设计和材料采购验收要求。

(3)材料制造过程控制:必须建立相应的材料供应商技术管控流程,保证供应商能够生产出满足设计要求的材料且能持续地提供合格产品。

为满足以上要求,商用发动机型号研制需要建立和完善材料制造管控体系;优先引用适航当局已认可的通用材料和检测标准,如 AMS、ASTM 等标准,以保障发动机的可靠性要求;建立供应商管控流程、标准、数据、产品符合性验证流程;建立满足设计需求的材料数据库。

由于航空发动机所涉及的材料及影响材料性能的制造工艺种类繁多,包括金属材料(高温合金、钛合金、钢、铝等)、非金属材料、复合材料、增材制造材料、焊接结构等,不同材料和制造工艺的性能特点、生产过程都存在差异,随之对材料数据建立、材料符合性验证的要求存在一定的差异。因此,在材料数据管理系统的建立过程中应当考虑上述差异。

此外,材料设计许用数据也是材料数据的重要组成部分,其建立过程应重点关注。根据运输类飞机适航标准 CCAR-25 部的第 25.613 条“材料的强度性能和材料的设计值”中的要求^[8],材料设计许用数据的建立有两种方法,一种为基于统计的方法,主要为 A 基值(概率 99%,置信度 95%)、B 基值(概率为 90%,置信度 95%),应基于足够样本的统计来确定;另一种为基于精选的方法,由于基于精选的方法要对每一个项目进行试验,保证 100%不低于材料设计许用数据。因此,应基于统计方法建立材料规范值和设计许用数据,才能保证材料具有设计资料所采用的满足一定概率要求的材料强度和其他性能^[9]。对于金属材料,FAA 的 AC25.613 及 EASA 的 AMC25.613 都指出^[10,11],《金属材料性能发展与标准化》(metallic materials properties development and standardization, MMPDS)中的材料设计许用数据(A、B、S 基值、性能曲线等)是可以接受的;对于复合材料,FAA 接受美国国家先进材料性能中心(national center for advanced materials performance, NCAMP)建立的复合材料行业规范和设计值作为 25.603 和 25.613 条款的证据。然而,对于航空发动机,第 33.15 条款中并未对统计值要求做明确规定,FAA 也没有明确表示认可的公开材料性能数据手册。根据上述梳理,可以按照 MIL-HDBK-1783《发动机结构完整性大纲》中对设计许用数据的要求进行处理^[12],即:发动机可以使用 -3σ 值(50%置信度)、 -2σ 值(95%置信度)、

B0.1 基值(50%置信度)或 A 基值(95%置信度)作为材料力学性能设计许用数据。

4 材料性能数据的管理要求

材料数据是材料适航验证过程中的关键要素,尤其是设计许用数据的建立需要基于多批次材料数据的统计分析^[9]。同时,作为发动机设计的核心基础资料,应对材料数据进行全生命周期的保存与管理,以保证数据的可靠性、可追溯性和持续利用性,并在适航审查时作为证据。总结起来,即材料性能数据的管理要具有完整性和可追溯性,且可实现基于统计的数据分析。

因此,材料数据管理系统的数据架构及其关系如下:

① 需存储数据的材料及制造工艺种类:金属材料(钛合金、高温合金、钢、铝)、非金属材料、复合材料(包括树脂基复合材料、陶瓷基复合材料)、增材制造材料、焊接结构^[13]; ② 需存储的数据种类及其关系:测试数据,材料性能测试原始数据;谱系数据,与材料测试数据相关的必要信息,主要为材料历史信息,典型包括材料标

准、来源、炉批号、放行数据、工艺信息、试样加工信息、取样位置/方向等;统计数据,是对材料测试过程中产生的数据按照相关处理流程、规范和算法处理后产生的数据;设计许用数据,提供给设计人员使用的正式材料数据,需满足强度设计要求及设计数据生成准则。

图 1 为各数据类型之间的关系。其中谱系数据是测试数据的必要相关信息;测试数据通过统计计算生成统计数据,所生成的统计数据主要分为两类,一类是面向最终设计基值需求而进行的统计计算,如静态力学性能母体一致性分析程序(包含 ADK 检验、F 检验与 t 检验),95% 置信度下材料持久性能和蠕变性能的 L-M 方程的计算程序(中值与 -3σ 值)等;另一类是对材料进行质量一致性评价的统计分析,如质量控制图、Cpk 计算等;设计许用数据则是对第一类统计数据进行处理转换,按照设计许用数据表达形式要求来最终提供给设计用的设计许用数据,如将统计分析生成的单温度拉伸强度和屈服强度 -3σ 值拟合形成抗拉强度-温度曲线、屈服强度-温度曲线等。

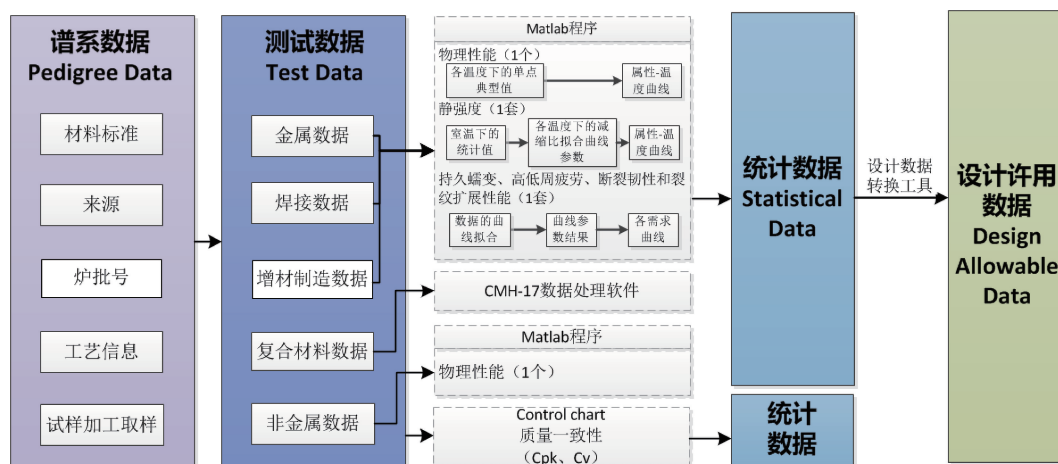


图 1 数据种类之间的关系

Fig. 1 Correlation between data of each stage

5 材料性能数据管理系统方案

5.1 总体方案

材料数据管理系统中的材料数据主要包括手册数据、自主开展的材料测试以及对这些数据进行分析产生的设计许用数据。手册数据结构化处理后迁移到材料数据管理系统中。材料数据管理系统不仅要实现所有数据类型的存储,同时要完成测试数据、设计许用数据的过程管理,还要实现直接采用接口与外部平台进行数据交互。

图 2 为系统整体业务逻辑图,材料数据库系统由测试过程管理模块、材料数据管理模块、数据分析模块、外部接口等组成,其中材料数据管理模块又分为测试数

据(含谱系数据)、设计许用数据和参考数据 3 部分,各模块之间业务流程关系如下:

(1) 首先由测试任务管理模块产生测试需求、创建测试任务,并将测试任务进行下发,在试验测试过程中,需要各级节点执行、审核,流程结束后,测试任务相关信息全部存储到材料数据库系统中;

(2) 测试获得的原始测试数据通过远程上传功能上传至存储“测试数据”的数据库中,其中包含金属材料、复合材料、焊接结构、增材制造材料、非金属材料 5 类材料数据;

(3) 测试数据导出至数据分析模块,对材料各类性能参数,如强度、疲劳、蠕变、断裂、物理特性、化学

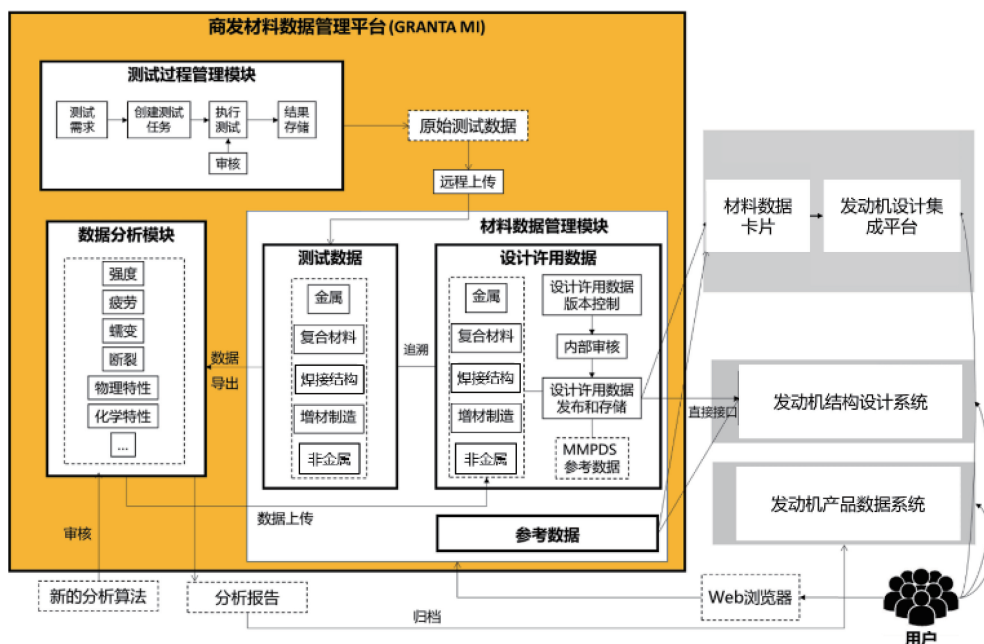


图2 系统业务逻辑

Fig. 2 System functional logic

特性等, 进行分析计算。数据分析模块中对测试数据进行分析计算得到材料的设计许用数据, 通过数据上传接口上传至设计许用数据库, 同时生成的报告可通过与产品数据管理系统接口完成归档。设计许用数据的发布受版本控制, 需要经过审核。设计许用数据分两部分, 一部分是 MMPDS 数据, 另外一部分是计算产生的设计许用数据。另外, 中国航发商用航空发动机有限责任公司(简称商发)已有的参考数据也存储到系统中。在数据分析模块中, 如需增加新的分析算法, 则需要经过审核流程;

(4) 设计许用数据生成后需要传递给航空发动机设计专业人员使用, 材料数据管理平台将通过材料卡片形式将材料数据传递给设计计算软件, 避免人工输入材料性能数据可能引起的错误;

(5) 系统用户根据权限可通过 Web 浏览器浏览材料数据管理系统中的测试数据和设计许用数据。

图3为材料数据库系统整体系统功能架构, 最底层为 SQL Server 数据库, 在 SQL Server 内部存储数据层中的各类材料数据, 包含 MMPDS、参考数据、金属材料数据、复合材料数据、增材制造数据、焊接结构数据、非金属材料数据。

数据层之上为应用层, 按照功能类别可将应用层功能分为材料数据管理、材料数据处理、流程管理、系统管理以及系统接口5部分: ①材料数据管理提供材料数据模板配置、数据分类维护、公告发布、高级检索(基于关键字和材料属性)、远程上传、版本管理; ②材料数

据处理模块提供包含数据可视化(曲线拟合、二维/三维图绘制)、数据分析算法集成、报告生成、材料卡片导出接口的自定义配置以及标准软件开发工具包; ③基于流程管理模块实现测试任务管理、数据分析算法审核、数据发布审核流程; ④系统管理功能提供用户管理、权限管理、版本管理、日志管理功能; ⑤系统接口包含与产品数据系统、结构设计系统、发动机设计集成平台的集成接口。

5.2 不同材料种类的数据架构搭建方案

不同种类材料的数据信息存在一定的差异, 如金属材料与焊接结构制备工艺路线不同、金属材料与复合材料测试项目不同等, 因此对数据存储架构的需求也存在差异, 很难通过一套数据架构来满足所有材料的数据管理需求。通过对不同材料所涉及4类数据的差异性进行分析, 搭建了金属材料子库、焊接结构子库、增材制造材料子库、复合材料子库、非金属材料子库, 且系统平台可根据后续可能产生的新需求进行子库添加。

图4为金属材料子库数据架构图, 数据包含金属材料信息、材料规范信息、测试任务信息、关键性加工信息、测试信息及原始数据记录、数据统计计算以及设计许用值发布等关键点。

(1) 金属材料信息: 记录材料类型(钢材、高温合金、钛合金等)、材料牌号、材料标准号、材料形态(板、棒、丝、带等)、热处理状态、材料尺寸、化学成分等特定材料的特定状态条件下的信息标识。

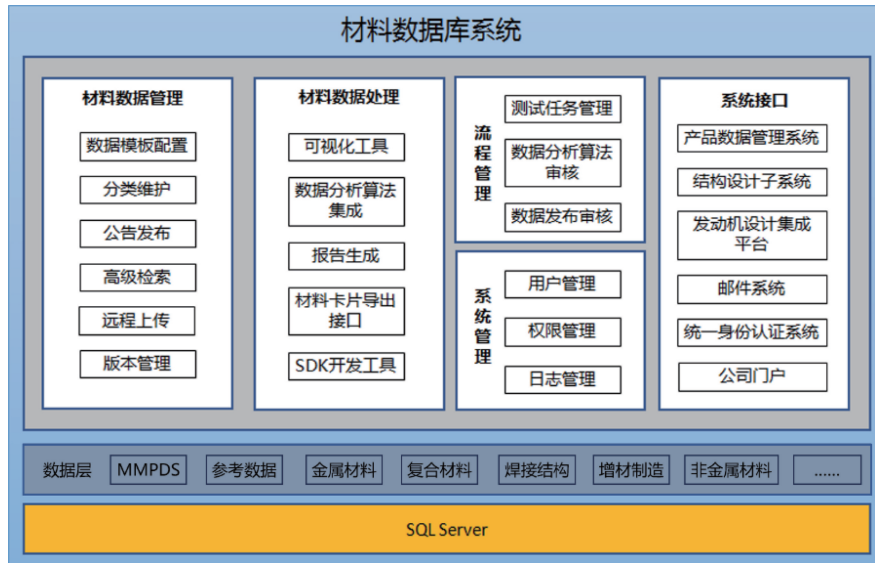


图 3 材料数据库系统功能架构

Fig. 3 System functional structure of material database system

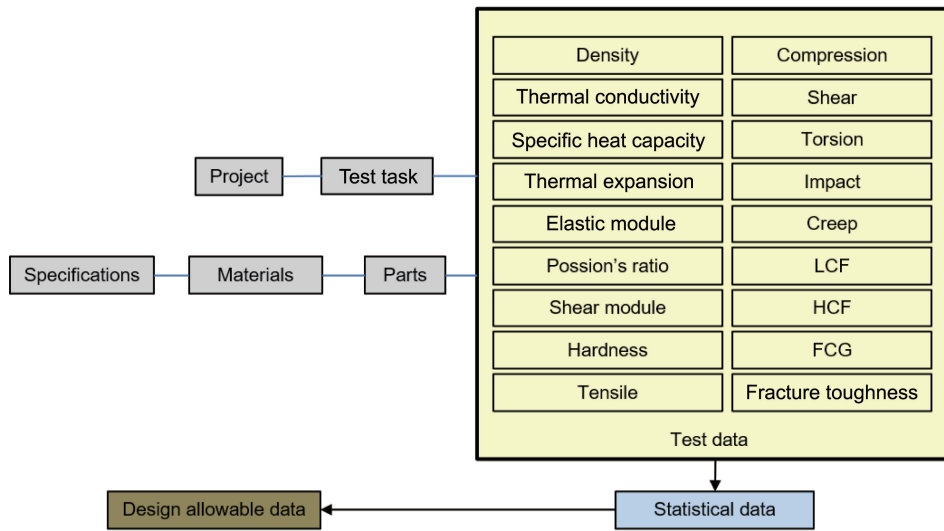


图 4 金属材料子库数据架构图

Fig. 4 Data structure of metallic materials sub-database

(2) 材料规范信息：记录、展示与金属材料信息对应的材料规范中的材料性能规格限值数据值。

(3) 关键性加工信息：记录影响材料主要性能的生产加工要素信息，如生产商、熔炼成分、铸造(或锻造)信息、热处理信息等生产要素信息。根据国外材料信息管理经验与商发金属材料加工过程，关键性加工信息记录包括初级加工信息与次级加工信息两部分内容，其中初级加工信息主要是材料熔炼过程的关键要素信息，包括初级生产商基本信息、炉号、锭节号、化学成分、坯材形式(棒材、板材、线材、带材)、尺寸等；次级加工信息主要是金属材料热加工(如锻造、铸造)过程关键要

素信息，包括次级供应商基本信息、材料形式、初级批次 ID、加工信息、热处理信息、构件信息等。

(4) 测试任务：记录和管理商发内部发起的材料测试任务。

(5) 测试信息及原始数据记录：记录材料性能试验的过程信息与测试结果，包括测试条件、试样信息、测试人员、日期等。试验类型包括密度、热导率、比热容、热膨胀率、硬度、弹性模量、泊松比、剪切模量、拉伸、压缩、剪切、扭转、冲击、蠕变、持久、高周疲劳、低周疲劳、疲劳裂纹扩展性能与断裂韧性。

(6) 材料数据统计计算：对金属材料单一项性能的测

试数据进行统计计算分析并记录结果。

(7)设计许用数据发布:收集、存储、发布材料数据统计计算结果。

5.3 多模块数据模板智能链接数据存储方案

采用多模块数据链接的方式实现材料数据的存储,各个模块的数据模板之间通过智能链接关系管理,链接关系通过各个表单中记录的特定的属性ID号确定,以保证可以实现数据信息的可追溯性。以下以金属材料子库数据模板追溯链接关系为例进行介绍,其追溯链接关系如图5所示。

其中,Materials-Specification information:材料基本信息通过编订的Material ID唯一标定;Testing task-Project:每个测试项目包含多个测试系列,测试项目通过Project ID追溯到相应的测试系列;Testing task-Test data:每个测试系列中包含多个测试试样,测试系列通过Series ID追溯到该测试系列所有的测试结果;Test data-Parts:每个测试数据均对应特定的构件信息、测试供应商和测试设备信息,分别通过Part ID, Equipment ID, Production ID实现追溯;Parts-Pedigree:每个构件对应特定的谱系数据,通过Batch ID与Pedigree实现追溯。

5.4 材料数据统计分析与处理方案

为满足材料适航要求,保证材料的经济安全利用,

必须采用统计分析的方法对测试数据进行处理,进而得到材料设计许用数据。针对不同材料性能数据的特点,根据MMPDS、GJB/Z 18、MIL-HDBK-1783B等材料数据统计分析标准要求,应分别开发化学成分、物理性能、弹性性能、静强度、高周疲劳、低周疲劳、持久蠕变等数据处理程序,具体如表1所示^[11, 12, 14]。

在上述数据处理程序的基础上,开发材料设计值数据处理集成软件,制作用户界面、建立数据接口,实现基于材料数据库树结构的便捷数据选取、处理方法和数据值类型选择、曲线及重要指标的可视化,并达到材料数据读取、计算分析与统计数据写入的一体化。

6 结论

通过对材料适航条款及设计数据使用要求进行梳理解读,系统阐述了商用航空发动机材料数据的管理要求。建立了测试数据、谱系数据、统计数据及设计许用数据等四大类全流程数据逻辑关系。提出了商用航空发动机材料性能数据信息系统建设方案,包括总体方案、不同材料种类的数据架构搭建方案、多模块数据模板智能链接数据存储方案、材料数据统计分析与处理方案。所形成的材料数据管理方案及数据管理系统,可初步实现对材料数据及其可追溯性信息的完整、可靠管理,为商用

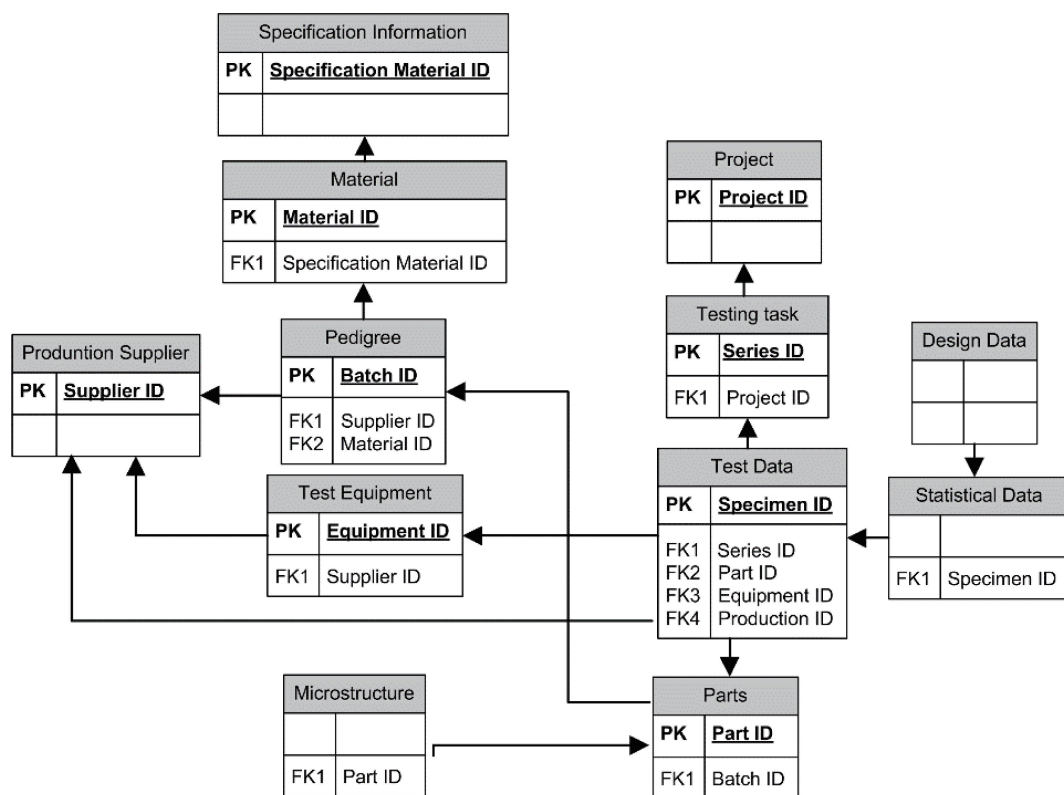


图5 金属材料数据模板追溯链接关系

Fig. 5 Traceability relation of metallic material data templates

表 1 各类材料性能数据的处理方法^[11, 12, 14]
Table 1 Analysis methods of typical material data^[11, 12, 14]

No.	Property type	Statistical basis	Analyzing methods
1	Chemical composition	Typical	Mean value
2	Physical properties	Typical	Mean value
3	Elastic properties	Typical	Mean value
4	Tension strength	A-Basis, B-Basis, -3σ Basis	Reduction ratio regression analysis, parameter estimation
5	High cycle fatigue	A-Basis, B-Basis, -3σ Basis	Maximum likelihood estimation, nonlinear regression method, parameter estimation
6	Low cycle fatigue	A-Basis, B-Basis, -3σ Basis	Maximum likelihood estimation, nonlinear regression method, parameter estimation
7	Creep and rupture	A-Basis, B-Basis, -3σ Basis	Nonlinear regression method, parameter estimation

航空发动机的材料适航符合性验证提供了有力的支撑,此方案未来也可拓展应用于新的材料与制造工艺数据的管理。

参考文献 References

[1] 政策法规司. 民用航空产品和零部件合格审定规定: CCAR-21-R4 [S]. 北京: 中国民用航空局, 2017.
Department of Policies, Laws and Regulations CAAC. Certification Procedures for Civil Aviation Products and Parts: CCAR-21-R4[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2017.

[2] 航空器适航审定司. 航空器型号合格审定程序: AP-21-AA-2011-03-R4[S]. 北京: 中国民用航空局, 2011.
Department of Aircraft Airworthiness Certification CAAC. Type Certification Procedure of Aircraft: AP-21-AA-2011-03-R4 [S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2011.

[3] 机场司. 民用航空材料、零部件和机载设备技术标准规定: CCAR-37AA[S]. 北京: 中国民用航空局, 1992.
Department of Airport CAAC. Civil Aeronautical Materials, Parts, Appliances Technical Standard Order: CCAR-37AA[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 1992.

[4] 刘芳宁, 王越, 孙瑞侠. 科技创新导报[J], 2018, 34: 149–151.
LIU F N, WANG Y, SUN R X. Science and Technology Innovation Herald[J], 2018, 34: 149–151.

[5] 刘大响. 材料工程[J], 2017, 45(10): 1–5.
LIU D X. Journal of Materials Engineering[J], 2017, 45(10): 1–5.

[6] 高鸿, 牛虎, 王向轲, 等. 中国材料进展[J], 2022, 41(11): 930–937.
GAO H, NIU H, WANG X K, *et al.* Materials China[J], 2022, 41(11): 930–937.

[7] 政策法规司. 航空发动机适航规定: CCAR-33-R2[S]. 北京: 中国

民用航空局, 2016.
Department of Policies, Laws and Regulations CAAC. Airworthiness Standards of Aircraft Engines: CCAR-33-R2[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2016.

[8] 政策法规司. 运输类飞机适航标准: CCAR-25-R4[S]. 北京: 中国民用航空局, 2016.
Department of Policies, Laws and Regulations CAAC. Airworthiness Standards of Transport Category Airplanes: CCAR-25-R4[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2016.

[9] 沈小明, 陈挺, 张迎春. 材料工程[J], 2017, 45(11): 139–142.
SHEN X M, CHEN T, ZHANG Y C. Journal of Materials Engineering [J], 2017, 45(11): 139–142.

[10] Federal Aviation Administration. Material Strength properties and Material Design Values: AC 25.613-1[S]. Washington DC: FAA, 2003.

[11] Federal Aviation Administration. Metallic materials properties Development and Standardization (MMPDS) [S]. Washington DC: FAA, 2017.

[12] Department of Defense. Engine Structural Integrity Program(ENSIP): MIL-HDBK-1783B w/CHANGE 2[S]. Washington DC: DoD, 2004.

[13] 路勇超, 苏航, 尹士科. 金属功能材料[J], 2019, 26(5): 14–18.
LU Y C, SU H, YIN S K. Metallic Functional Materials [J], 2019, 26(5): 14–18.

[14] 中国航空工业第一集团公司. 金属材料力学性能数据处理与表达: GJB/Z 18A-2005[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 2005.
Aviation Industry Corporation of China. Data Reduction and Presentation of Mechanical Property for Metallic Materials: GJB/Z 18A-2005 [S]. Beijing: Committee of Science, Technology and Industry for National Defense, 2005.

(编辑 吴 锐)