

专利驱动的工业机器人技术主题识别及多维度演化分析

杨洁松 林小爱^(通讯作者)

南京理工大学知识产权学院, 江苏南京, 210094;

摘要:目的/意义:本研究旨在系统性识别工业机器人领域关键技术主题及其演化规律。方法/过程:首先以 incoPat 全球专利数据库为数据来源,对工业机器人领域从“本体、控制、驱动、感知”四个维度进行技术分解并检索,涵盖了机械结构、运动控制、动力传输及环境感知等核心方向;接着通过共现分析筛选高中介中心性的 IPC 分类号(如 B25J9/16、G05B19/00),进而通过构建 LDA 主题模型对专利摘要进行文本挖掘并识别出 11 个技术主题,最后量化 11 个技术主题的主题强度演变。结果/结论:本体技术维度中的运动规划(Topic #0)由于传统算法在动态场景中的局限性主题强度下降,而与 AI 技术融合成为其新的研究突破方向;控制系统维度中由数字孪生驱动的协同控制(Topic #8)受到政策的支持作用其强度呈现波动增长的态势;驱动系统技术维度虽然面临技术迭代的瓶颈,但驱动控制(Topic #7)受边缘计算与 5G 技术的推动主题强度呈现局部回升;感知系统(Topic #9)由于国产 LiDAR 量产的因素影响主题强度回升。鉴于此,建议加强算法与硬件协同创新以及通过产学研合作缩短技术转化周期,进而使得核心器件的国产化进程加快。

关键词:工业机器人;技术分解;共现分析;LDA 主题模型;技术主题强度

Identification of Patent-driven Industrial Robot Technology Themes and Multi-dimensional Evolutionary Analysis

Yang Jiesong Lin Xiaoi^(corresponding author)

School of Intellectual Property, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu, 210094;

Abstract: Purpose/Significance: This study aims to systematically identify key technological themes in the field of industrial robots and their evolution patterns. Method/Process: Firstly, using the incoPat global patent database as the data source, the field of industrial robots was decomposed into four dimensions: "body, control, drive, and perception", covering core directions such as mechanical structure, motion control, power transmission, and environmental perception. Then, through co-occurrence analysis, IPC classification numbers with high betweenness centrality (such as B25J9/16, G05B19/00) were screened out. Subsequently, an LDA topic model was constructed to conduct text mining on patent abstracts and identify 11 technological themes. Finally, the intensity evolution of the 11 technological themes was quantified. Result/Conclusion: In the body technology dimension, the theme intensity of motion planning (Topic #0) declined due to the limitations of traditional algorithms in dynamic scenarios, while integration with AI technology has become a new research breakthrough direction. In the control system dimension, the theme intensity of collaborative control driven by digital twins (Topic #8) showed a fluctuating growth trend due to policy support. Although the drive system technology dimension faced a bottleneck in technological iteration, the theme intensity of drive control (Topic #7) showed a local recovery due to the promotion of edge computing and 5G technology. The theme intensity of the perception system (Topic #9) recovered due to the impact of domestic LiDAR mass production. Therefore, it is suggested to strengthen the collaborative innovation of algorithms and hardware and shorten the technology transfer cycle through industry-university-research cooperation, thereby accelerating the domestication process of core components.

Key words: industrial robot; technology decomposition; co-occurrence analysis; LDA topic model; technical topic intensity

DOI: 10.69979/3041-0673.25.11.008

引言

工业机器人领域的技术演化对智能制造产业的发展至关重要,现有研究多注重单一技术维度,对多主题

协同演化的系统性分析还尚有不足。本文首先基于全球专利数据,将工业机器人领域技术分解为“本体、控制、驱动、感知”四个技术维度并进行检索,接着采用 IPC 共现网络筛选高中介中心性的分类号,识别了重要技术

枢纽节点，以此为基础进而利用文本挖掘提取出了 11 个技术主题并量化其主题强度演变的规律。通过研究发现，传统运动规划的技术面临动态场景适应性的瓶颈，而数字孪生与边缘计算是推动控制技术迭代的重要因素，驱动和感知系统的技术波动是由于硬件依赖与国产化进程等因素导致的。本研究为技术预测提供了新的方法，并且为政策的制定以及企业优化研发方向提供了依据。

1 文献综述

在专利分析的方法中，共现分析、主题模型与文本挖掘成为技术演化研究的重要工具。首先在共现分析方面，赵靓等^[1]（2023）基于德温特专利数据构建军事智能技术共现网络，追踪技术子领域演化路径；楼旭明等^[2]（2020）结合 Derwent 分类码分析无人机技术演变，验证共现网络对技术融合的揭示能力。而在技术主题方面，陈伟等^[3]（2018）融合 LDA 与困惑度检验方法分析时序主题演变；Jiang 等^[4]（2016）量化技术占比趋势，为预测提供概率依据；杨超等^[5]（2017）结合 LDA 与 SAO 结构实现多层次技术识别。另外专利态势研究经典成果包括 Chen 等^[6]（2012）通过引文网络预测技术趋势；巩玥等^[7]（2019）基于 IPC 统计解析技术布局时空特征。

Hofmann^[8]（1999）的 PLSA 模型和 Salton（1988）^[9]的 VSM 模型为文本向量化与主题建模奠定基础，Watts^[10]（1997）则通过主题模型追踪专利关键词动态变化。

现有的研究多聚焦单一的方法，共现分析方法侧重于技术的关联但是难以量化主题热度，主题模型虽然可以识别潜在的主题却容易忽视硬件依赖等外部的因素。本文整合了技术分解、IPC 共现与 LDA 模型从而构建了“关联识别-主题挖掘-强度评估”的框架，实现从四个维度来揭示技术协同的矛盾。

2 工业机器人领域技术分解与 IPC 共现

2.1 技术分解

本文基于 incoPat 全球专利数据库对工业机器人领域发明专利的相关信息检索。incoPat 全球专利数据库涵盖了全球各国的专利数据，并且对标题、摘要、权利要求等专利数据字段进行了统一的机器翻译，翻译的内容精准且有保障性，为后续文本挖掘分析时的预处理提供了便利。

本研究对工业机器人技术领域进行了如下技术分解，并多次调整检索式和检索策略，力求尽可能平衡查准和查全。

表 2-1 工业机器人领域技术分解

技术分解	扩展 IPC 分类号	扩展关键词
本体技术	‘B25J*’（机械手相关子类，如 B25J9/00 程序控制机械手）、‘B23Q7*’（机械传动装置）、‘B25I15/00’（夹持器/末端执行器）、‘B25J17/00’（关节结构）	工业机器人、机械臂、多关节机器人、末端执行器、自由度、刚体结构、运动学模型； industrial robot, robotic arm, manipulator, end effector, kinematic model, rigid body, DOF (degree of freedom)
控制系统	‘G05B19/00’（程序控制系统）、‘G05D1/00’（运动控制）、‘G06N3/00’（神经网络控制）、‘G06F17/10’（复杂数学运算）	运动控制、轨迹规划、示教编程、PID 控制、自适应控制、数字孪生； motion control, trajectory planning, teach pendant, PID control, adaptive control, digital twin
驱动系统	‘H02K7/00’（电机结构）、‘F16H1/00’（齿轮传动）、‘F16H57/00’（减速器润滑/散热）、‘H02P29/00’（电机控制）	伺服电机、RV 减速器、谐波减速器、行星齿轮、动力传输、扭矩控制； servo motor, RV reducer, harmonic drive, planetary gear, torque transmission, dynamic response
感知系统	‘G01B11/00’（光学测量）、‘G01D5/00’（传感器信号处理）、‘G06V10/00’（图像识别）、‘G01S17/00’（激光测距）	视觉引导、点云处理、力觉反馈、SLAM（即时定位与地图构建）、多传感器融合； visual guidance, point cloud processing, force feedback, SLAM, multi-sensor fusion

检索日期为 2025 年 3 月 10 日，对 2012 年到 2023 年的发明申请和授权专利进行检索，本体技术维度共检索得到 38788 条专利信息，控制系统技术维度共检索得到 8945 条专利信息，驱动系统技术维度共检索到 1346 2 条专利信息，感知系统技术维度共检索到 1440 条专利信息。以上结果为合并同族专利后的结果。

2.2 IPC 共现

本小节采用科学知识图谱中常用的社会网络分析

法对工业机器人领域 IPC 分类号进行共现筛选，进而方便后续对属于这些核心 IPC 分类号的技术专利文本进行文本挖掘分析。

首先将从 incoPat 上筛选的专利 IPC 分类号数据导入 Co-Occurrence1.7 程序软件，为了控制数量，减小不必要的数量量将关键词共现频次设定为 10，导出共现矩阵数据列表同时也导出共现频次数据。

接着结合共现频次数据，将共现频次数据小于 200 的 IPC 分类号数据在共现矩阵中删掉，整理好后倒入 G

ephi 软件进行社会网络共现分析，将度范围调节到 200 以上进行筛选，过滤掉关联性弱的节点。绘制 IPC 共现

图谱如图 2-1 所示，节点的大小表示分类号出现的频次，连线深浅表示节点关系的强弱。

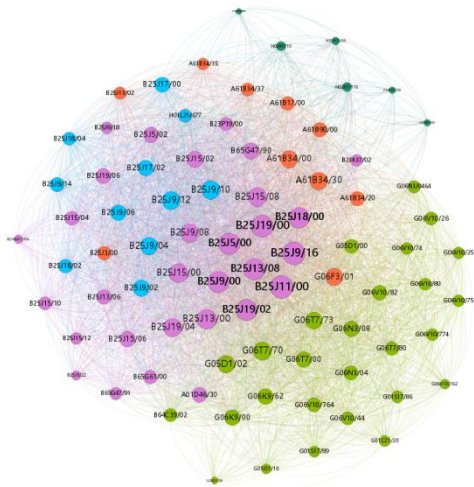


图 2-1 工业机器人领域专利 IPC 分类号共现分布

对核心技术专利进行筛选需要采用一定的指标进行评定。中介中心性 Between Centrality 可以计算为一个节点作为另外两个节点最短路径上的桥梁的次数，计算公式为：

$$BC = \sum \frac{d_{st}(0)}{d_{st}} \quad (2.1)$$

其中 dst 表示 s 到 t 的最短路径数量，dst () 是

指 s 节点到 t 节点的最短路径中连接的节点数量，将中介中心性除以 (n-1)*(n-2) 可实现标准化，n 是节点数量。

本文采用标准化中介中心性作为评价指标将筛选出的核心 IPC 分类号进行排序，经过筛选，将排名前 20 的核心技术分类号、技术内容、标准化中介中心性数据展示在表 2-2 中。

表 2-2 工业机器人产业核心专利 IPC

IPC 分类号	技术内容	中介中心性
B25J9/16	程序控制机械手的运动控制方式	0.023
B25J11/00	未列入其他类的机械手或机器人	0.023
B25J9/00	通用工业机器人或可编程机械手	0.022
B25J19/00	与机械手配合的辅助装置	0.021
B25J18/00	机械手的支架构件	0.017
B25J13/08	通过视觉反馈控制机械手	0.016
B25J19/02	机械手的传感装置	0.015
B25J5/00	工业用机械手	0.015
B25J9/10	可编程机械手的控制装置	0.011
B25J9/08	可编程机械手的示教或学习控制	0.010
B25J9/12	可编程机械手的示教或学习控制	0.010
B25J15/08	具体指与机械手末端执行器相关的某一特定技术或结构，可能涉及特定类型的末端执行器的连接方式、操作原理或应用场景等。	0.01
B25J15/00	指机械手或机器人末端执行器中的夹持装置（如夹具、抓手、吸盘等），用于抓取、固定或操纵物体	0.009
B25J13/00	控制机械手或机器人运动、操作的系统、方法或装置	0.009
G06T7/70	特指对图像内容进行分析、识别或理解的技术	0.009
G06F3/01	用于将用户指令输入计算机的装置或方法	0.008
A61B34/30	强调机器人辅助手术中的控制方法、用户接口或人机协作技术	0.008
G05D1/02	二维平面上的车辆、飞行器或船舶的自动导航或路径控制。	0.007
B25J19/04	机器人的视觉系统或光学检测装置	0.007
A61B34/00	计算机辅助手术系统	0.007

3 工业机器人技术主题挖掘与协同演化的文本驱动研究

通过采用社会网络分析法对 IPC 分类号进行共现分析后,筛选出了高中介中心性的技术关键节点,在这些关键技术节点框架内的专利通常扮演技术枢纽的角色,能够连接多个技术子领域。它们可能涉及交叉学科的技术融合或是某一核心模块,在不同技术分支之间传递知识或资源。这种特性使其成为信息流动的关键节点,甚至可能控制上下游技术的协同发展。本章采用 LDA 文本挖掘对工业机器人领域该范围内专利的摘要文本进行挖掘分析。

3.1 LDA 建模实验设置

3.1.1 数据收集与数据库构建

本研究采用 jupyter (anacondan3)作为实验工具,同时实验导入 LDAmodal 作为建模库,导入 numpy、pandas 作为数据分析的库、导入 jieba 作为分词用的库、导入 CoherenceModel 用来计算困惑度和一致性、导入 matplotlib.pyplot、pyLDAvis 用作可视化。

3.1.2 数据预处理

本次建模实验的数据预处理包含以下过程。

(1) 核心的技术专利数据筛选。依靠前文共现分析得到的核心 IPC 分类号,以主分类号为筛选依据,得到相关的核心专利文本数据。

(2) 数据清洗及文本翻译。本研究由于条件限制,重点对专利的摘要文本进行分析。incoPat 数据库对外文专利摘要已进行了翻译,减少了翻译的工作量。同时要对没有“摘要”及“摘要(翻译)”字段数据进行去除。

(3) 摘要分词。构建工业机器人领域词典和同义词词典,在 TXT 文档中添加“词汇、词频、词性”。这样再进行分词可以避免冗余词汇的干扰。

(4) 文本特征矩阵构建。将分词后的专利摘要文档处理成可以输入 LDA 模型的文本特征矩阵形式。本文采用 gensim 库中的 corpora,models 完成构建 BOW 稀疏向量进行 TF-IDF 计算后输入后续的 LDA 模型中。

3.1.3 LDA 模型参数参数确定

将文本特征矩阵输入 LDA 模型中进行训练后。在 LDA 模型构建时的重要参数有:①主题数目 K;②文档-主题分布的超参数 α ;③主题-词分布的超参数 β ;④迭代次数。

(1) 主题数目 K 设置

利用导入的库 LDAmodal 计算 perplexitys 和 coherence core 并结合 matplotlib 库进行可视化展示。根据经验估算,设置最大主题数目 30,然后计算从 K=1 到 K=30 的困惑度,最终确定当一致性检验分数较大时主题数目 K=11。

(2) 其他参数设置

对于超参数 α 和 β ,经过多次实验之后采用了常用的默认取值, α (即 doc_topic_prior)=1/K, β (即 topic_word_prior)=1/K。为了确保模型效果,较大迭代次数设定为较大的 500。全部参数确定完毕后即可实现模型的构建,最后输出文档-主题概率矩阵以及主题-词汇分布。

3.2 基于 LDA 主题识别模型的结果分析

3.2.1 结果展示

本研究对去除空值的工业机器人领域核心专利数据进行 LDA 建模实验,最终确定了工业机器人领域 11 个技术主题,最后输出主题-文档概率矩阵,文档-概率矩阵表示的是每个专利文档属于不同主题的概率,横向一个文档在不同主题的分布概率之和为 1,纵向表示的意义是一个主题在所有文档中的影响加权程度,其纵向之和越高说明该主题影响比重越大,主题热度越高。

主题分布的对应词汇如表 3-1 所示。

表 3-1 主题对应词汇

Topic#0	Topic#1	Topic#2	Topic#3	Topic#4	Topic#5
机器人 关节 轨迹 规划 运动 控制 模块 位置 连接 末端 目标 模型 单元 系统 路径 装置 参数 机械手 驱动 小车 步骤 工业 传感器 计算 角度 柔性 旋转 抓取 连杆 空间	机器人 关节 路径 模块 驱动 控制 末端 装置 小车 空间 连杆 信息 模型 连接 运动 角度 位置 目标 系统 机械手 规划 轨迹 工业 控制器 平台 参数 动力学 传感器 状态 单元	机器人 关节 驱动 控制 运动 路径 规划 系统 空间 电机 模块 计算 工业 位置 机械手 末端 轨迹 连杆 参数 抓取 小车 信息 控制器 安装 目标 速度 步骤 检测 算法 运动学	规划 路径 控制 机器人 模块 小车 关节 运动 驱动 目标 末端 电机 机械手 步骤 位置 连接 位姿 数据 参数 连杆 空间 信息 轨迹 角度 获取 装置 柔性 力矩 速度 运行	机器人 路径 目标 连杆 机械手 空间 模块 系统 关节 运动 驱动 连接 末端 信息 单元 小车 规划 位置 安装 控制 轨迹 固定 步骤 角度 电机 工业 位姿 参数 装置 自由度	关节 机器人 轨迹 电机 路径 运动 空间 模型 机械手 控制 连杆 驱动 位置 目标 信息 小车 规划 连接 工业 步骤 计算 单元 力矩 末端 控制器 角度 平台 模块 装置 位姿
Topic#6	Topic#7	Topic#8	Topic#9	Topic#10	
机器人 轨迹 控制 关节 运动 路径 空间 模块 信息 小车 连接 系统 驱动 模型 速度 规划 目标 状态 参数 连杆 位置 计算 机械手 优化 动力学 装置 单元 步骤 安装 输出	机器人 关节 连杆 路径 位置 控制 目标 运动 轨迹 小车 末端 模型 驱动 电机 装置 角度 连接 机械手 模块 系统 参数 检测 安装 柔性 信息 规划 抓取 固定 计算 空间	关节 机器人 驱动 位置 目标 控制 模块 路径 轨迹 小车 规划 运动 机械手 信息 模型 连接 抓取 角度 系统 空间 传感器 操作 单元 末端 运动学 手指 装置 连杆 参数 导航	机器人 关节 控制 位置 运动 轨迹 路径 空间 模型 小车 驱动 模块 信息 规划 末端 装置 单元 目标 参数 力矩 系统 连杆 运行 数据 抓取 自由度 传感器 定位 角度 安装	机器人 路径 连接 空间 传感器 控制 关节 运动 位置 轨迹 小车 连杆 规划 信息 装置 控制器 目标 角度 模块 电机 数据 末端 驱动 系统 模型 机械手 操作 参数 安装 平台	

*注：数据来自 incoPat

3.2.2 主题内容

资料得到产业专利 11 个核心技术主题如下。

通过 LDA 建模实验，综合多方面分析并查找相关

表 3-2 工业机器人领域核心技术主题

主题序号	主题名称
Topic #0	运动规划与结构设计
Topic #1	运动控制与动力学
Topic #2	驱动与运动控制
Topic #3	运动学控制
Topic #4	动力系统集成
Topic #5	优化控制
Topic #6	机械系统集成
Topic #7	驱动控制
Topic #8	运动学实现
Topic #9	环境感知与检测
Topic #10	空间定位与操作

将表中的技术主题结合对工业机器人技术分解的四个维度进行分类，阐明每个技术主题的技术内涵以及判定依据如下：

本体技术维度涵盖机械结构与空间运动的核心设计，包含以下三个技术主题：

Topic #0（运动规划与结构设计）：该技术主题的内涵是能体现机器人本体运动路径生成与机械结构（如柔性组件）的空间布局设计，该主题是机械臂基础运动能力的实现核心。关节、轨迹、路径、连杆、机械手等关键词能体现该主题内容特征。

Topic #6（机械系统集成）：该技术主题的内涵是描述机器人机械装置的物理装配过程以及重点解决多自由度系统的结构稳定性与模块化单元组合问题的研究方向。固定、自由度、安装、单元等关键词能体现该主题内容特征。

Topic #10（空间定位与操作）：该技术主题的内涵是强调末端执行器（如机械手）在三维空间中的精确定位能力，以及通过操作平台实现抓取、移动等任务的关键技术。定位、平台、手指、导航等关键词能体现该主题内容特征。

控制系统技术维度是工业机器人技术领域的核心模块，包含以下四个技术主题：

Topic #1（运动控制与动力学）：该技术主题的内涵是涉及机器人整体运动状态的动态调节与能量管理，确保复杂动作的稳定性的技术方向。控制器、动力学、状态等关键词能体现该主题内容特征。

Topic #3（运动学控制）：该技术主题的内涵是实现机器人运动学模型的实时解算与控制指令生成，为轨迹跟踪提供理论支撑的相关技术。位姿、力矩、算法等

关键词能体现该主题内容特征。

Topic #5（优化控制）：该技术主题的内涵是专注于控制策略的迭代改进与执行效率提升的相关技术，例如路径规划算法的计算资源优化等研究方向。优化、计算、速度等关键词能体现该主题内容特征。

Topic #8（运动学实现）：该技术主题的内涵是解决多关节协同运动的数学建模问题，确保机械系统按预设规则完成动作序列的相关技术研究。运动学、自由度等关键词能体现该主题内容特征。

驱动系统技术维度注重能量传递与执行机构，包含以下三个技术主题：

Topic #2（驱动与运动控制）：该技术主题的内涵是关于描述驱动设备的功率输出控制与运动状态的反馈机制，以及直接影响机械臂响应速度与精度的相关研究。电机、速度、检测等关键词能体现该主题内容特征。

Topic #4（动力系统集成）：该技术主题的内涵是关于整合动力传输组件（如减速器、联轴器）与执行机构，保障机械系统动力输出的连贯性与可靠性的相关研究。力矩、运行等关键词能体现该主题内容特征。

Topic #7（驱动控制）：该技术主题的内涵是实现驱动单元与环境感知数据的联动，典型的应用有 AGV 小车的自主避障行驶等。涉及操作、导航、传感器等跨系统协作的关键词能体现该主题内容特征。

感知系统技术维度是关于体现机器人环境交互能力，有一个技术主题是归于该技术维度：

Topic #9（环境感知与检测）：该技术主题的内涵是关于涵盖视觉识别、力觉反馈、位置检测等功能模块，用来为控制系统提供实时环境信息输入并构成机器人智能决策的基础数据层的相关研究。传感器、检测、数

据等相关的关键词能体现该主题内容特征。

3.2.3 技术主题强度计算

各个技术主题在文档集的出现频率从另一个角度可以认为该项技术对整个技术范围的作用程度，参考李湘东等^[11]的研究，计算技术主题强度可以采用将文档-主题矩阵中的纵向进行求和，这样得到的结果为每个主题在所有核心技术主题专利文档上作用的程度，所得的结果除以文档的数量，得到的结果就可以看做该技术主题的热度或者重要性量化程度，也即主题强度。具体公式如式 4.1 所示。

$$\theta_i^t = \sum_{d=1}^M \theta_i^d / M \quad (3.1)$$

其中， θ_i^t 表示在时间窗口 t 中主题 i 的主题强度， θ_i^d 表示文档 d 属于主题 i 的概率， M 表示时间窗口 t 中所有文档的数量。主题强度是主题热度的体现，在同一时间窗口内，主题强度越大，主题热度越高。

将每个主题每年的技术强度进行计算，即以 2014 年至 2023 年中的每一年作为时间窗口，由此可得各个核心技术主题主题强度逐年变化的情况整理如表 3-3 所示。

表 3-3 各技术主题逐年技术强度变化

年份	Topic#0	Topic#1	Topic#2	Topic#3	Topic#4	Topic#5
2014	0.1098	0.0803	0.0851	0.0823	0.0992	0.0836
2015	0.1008	0.0947	0.0826	0.0941	0.0902	0.0895
2016	0.0989	0.0872	0.0883	0.0892	0.0918	0.0827
2017	0.0991	0.0882	0.0916	0.0903	0.0891	0.0822
2018	0.1014	0.0866	0.0894	0.0856	0.0948	0.0869
2019	0.0972	0.0869	0.0931	0.0844	0.0904	0.0824
2020	0.1003	0.0907	0.089	0.0849	0.089	0.0808
2021	0.0981	0.0867	0.0939	0.0869	0.0888	0.0851
2022	0.0997	0.0902	0.0916	0.0877	0.0883	0.083
2023	0.0976	0.0883	0.0908	0.0888	0.0893	0.0837
年份	Topic#6	Topic#7	Topic#8	Topic#9	Topic#10	
2014	0.1029	0.0837	0.0958	0.0914	0.0859	
2015	0.0963	0.0851	0.0831	0.0844	0.0993	
2016	0.0895	0.0918	0.1039	0.084	0.0925	
2017	0.0907	0.1051	0.095	0.0786	0.0902	
2018	0.0915	0.093	0.0934	0.0871	0.0903	
2019	0.0916	0.089	0.1102	0.0869	0.0879	
2020	0.0958	0.0886	0.0956	0.0894	0.096	
2021	0.0952	0.0903	0.0952	0.0849	0.0949	
2022	0.0949	0.0866	0.0991	0.0868	0.0922	
2023	0.0929	0.0901	0.0951	0.0889	0.0945	

以上是关于 11 个技术主题的逐年技术主题强度演变计算结果，鉴于此，将按照技术分解的四个技术维度分别对相关技术主题进行演变分析如下。

3.3 技术主题强度演化分析

3.3.1 本体系统技术维度

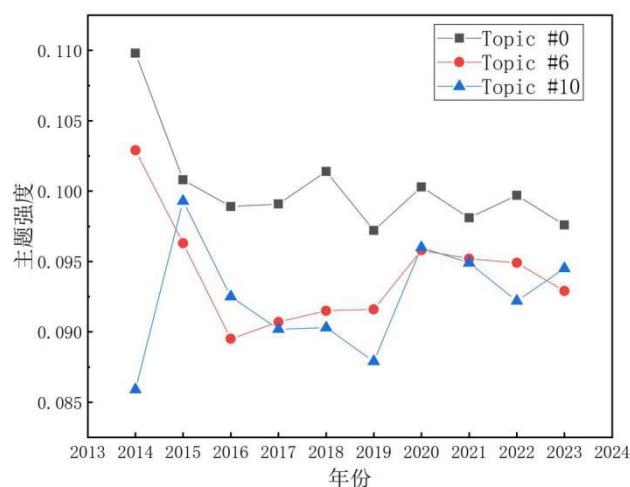


图 3-1 本体技术维度技术主题强度演变

Topic #0 (运动规划与结构设计) 的技术主题强度处于长期下降趋势, 在 2023 年的技术主题强度为 0.0976, 这体现出传统几何规划方法在非结构化场景中的局限性, AI 增强型规划技术是新的技术突破方向; 该技术主题的技术主题强度在 2018 年达到局部峰值 0.1014, 这可能与 ROS2 机器人操作系统的普及以及 GPU 加速算法的引入有关。该技术主题注重于对多自由度路径优化与轻量化结构设计。运动规划的研究依赖对 RRT (最优快速探索随机树) 以及深度强化学习驱动的动态避障策略等算法的研究, 目的是为了解决在复杂环境中的实时路径生成问题; 结构设计方面为了提升机械臂的功重比与动态响应性能, 注重关于采用拓扑学进行优化以及碳纤维复合材料的应用方面的研究。

Topic #6 (机械系统集成) 的技术主题强度在 2014—2023 年之间缓慢下降且标准差为 0.0052, 这表明如实时操作系统等底层技术已趋成熟, 模块化设计逐渐成熟后热度趋缓。该技术主题是关于硬件-软件的协同设计, EtherCAT 总线协议优化、模块化关节集成 (如谐波减速器与力矩电机一体化) 及冗余故障诊断机制是该技术主题的重要研究方向, 随着如 OPC UA 等标准化接口的推广许多厂商降低了设备兼容性成本。未来的研究方向可以注重结合边缘计算与数字孪生技术, 提高系统的自适应水平即提高系统维护能力的预测性。

Topic #10 (空间定位与操作) 在 2020 年的技术主题强度达到局部高点为 0.0960, 这得益于事件相机及双目结构光技术的商业化应用。该技术主题的技术强度演变标准差为 0.0053, 这种波动性反映出该技术主题相关研究面临在例如视觉 SLAM 与 LiDAR SLAM 的技术路径竞争以及在高精度场景 (如太空机械臂) 规模化落地的挑

战。该技术主题的研究内容核心是关于如激光雷达、视觉、IMU 等的多模态传感器的融合以及高精度控制算法的研究, 应用有比如在半导体封装与医疗机器人领域改进的 Graph-SLAM 与六维力觉反馈技术。

各技术主题的内在技术发展矛盾与驱动情况: 首先 Topic #0 技术主题强度的降低与运动规划算法复杂度的指数级增长有关, 在动态障碍物场景的应用中传统方法面临“维度灾难”的问题, 对于这个问题可以采用神经符号系统 (NeSy) 去将解释性与效率做一个平衡; Topic #6 的技术主题强度趋于稳定, 这是由于工业机器人对可靠性的严苛要求, 但随着边际创新收益递减, 研究应注重支持异构设备即插即用的如硬件抽象层 HAL 之类的“软硬解耦”架构; Topic #10 技术主题强度具有较高波动性, 这源自于精度与鲁棒性的权衡矛盾, 未来研究应当注重发展超材料光学传感器以及联邦学习驱动的分布式定位优化, 从而能够降低对单一的技术路径的依赖。

为了突破技术瓶颈也可以考虑采用技术主题的交叉融合拓展方向: 运动规划和系统集成可以考虑采用例如 NVIDIA Isaac Sim 的数字孪生仿真平台, 从而实现多机协作的效率优化, 这样可以减少物理调试周期; 系统集成和空间定位的技术交叉融合可以考虑开发低延迟总线协议 (如 TSN) 支持来实时点云传输, 再结合 FPGA 加速的 SLAM 前端就能够满足医疗机器人亚毫米级定位需求; 空间定位与运动规划之间的技术融合可以考虑注重强化学习生成动态抓取策略的研究方向, 通过结合触觉传感器的闭环反馈, 进而突破传统示教编程的柔性限制。

3.3.2 控制系统技术维度

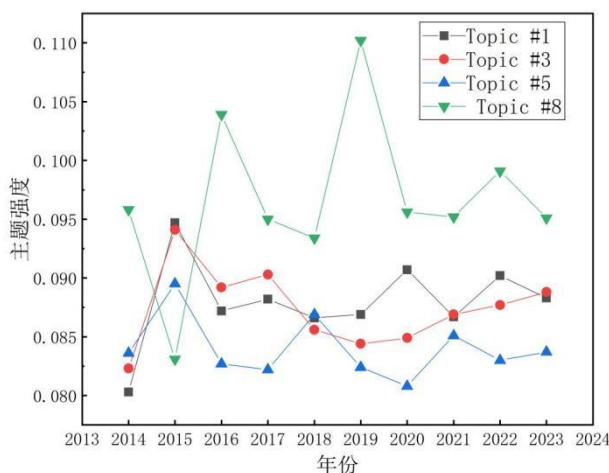


图 3-2 控制系统技术维度技术主题强度演变

Topic #1 (运动控制与动力学) 的技术主题强度整体呈现平稳趋势, 其在 2015 年达到局部峰值 0.0947, 这与“中国制造 2025”的政策推动导致的伺服系统国产化密切相关; 而在 2021 年后技术主题强度回升至 0.0902, 这得益于疫情后如物流分拣机器人等出现了很大需求, 进而导致智能制造领域的投资增加。该技术主题的内容涵盖 Lagrange-Euler 方程的多体动力学建模、伺服驱动算法优化以及动态耦合补偿技术等研究内容, 重载机器人的轨迹规划与高速并联机械臂的动态稳定性控制是该技术主题的主要应用方向。另外, 结合图中数据, 由于复杂负载突变场景下的模型收敛性不足, 导致该技术主题的技术主题强度难以持续提升, 可以通过进一步优化其动态模型的鲁棒性来改善。

Topic #3 (运动学控制) 的技术主题强度整体呈现稳定态势, 技术强度在 0.0823 - 0.0903 间波动, 2017 年达到局部峰值 0.0903, 这与 3C 电子领域的协作机器人市场爆发相关, 在近年的顶刊论文中冗余自由度研究占比提升 12%, 这说明该方向的学术研究在持续深化; 另外在 2019 年的技术主题强度小幅度下降, 这可能与因算力限制导致的实时性难题有关; 在之后至 2023 年技术主题强度回升至 0.0888。该技术主题的主要研究方向涵盖解析法和数值迭代的逆运动学求解、冗余自由度分配及位姿误差补偿等研究方向, 协作机器人的路径规划与医疗手术机器人高精度定位是主要的技术应用方向。另外该技术主题方向的产业化落地的核心瓶颈是奇异位形避让算法的高复杂度与硬件适配成本较高。

Topic #5 (优化控制) 的技术主题强度在 2014 年至 2020 年之间呈现波动下降趋势, 这可能是由于传统算法成熟度饱和的原因, 而在 2021 年得益于 AI 融合技术的跨界应用 (例如能耗优化与动态避障结合) 技术主题强度出现一定的回升。该技术主题的主要研究方向经历了从早期的对模型预测控制 (MPC) 以及鲁棒性算法的研究向近年来如强化学习与神经网络控制的数据驱动优化技术方向的研究。当前面临算法泛化能力不足的问题, 可以考虑与 Topic #8 (运动学实现) 协同验证实际场景适配性。

Topic #8 (运动学实现) 的技术主题强度呈现显著波动增长, 2016 年达到局部峰值 0.1039, 这是由于受《机器人产业发展规划》推动的数字孪生技术落地驱动

的影响; 2019 年达到局部峰值 0.1102, 这是与与智能制造示范项目的扩展 (如汽车焊接多机协同效率提升 30%) 相关; 另外该技术主题的技术强度在 2023 年回落至 0.0951, 原因有高精度标定设备成本较高 (例如激光跟踪仪占比超 30%), 还有中小企业渗透率较低 (<15%), 对技术的标准化要求亟待提高。该技术主题主要的研究方向在运动学参数标定、数字孪生虚实映射及离线编程仿真等相关技术探索, 工业机器人离线调试与多机协同系统是主要的应用方向。

各技术主题的内在技术发展矛盾与驱动情况: Topic #1 技术主题的技术演进面临市场需求和复杂工况下模型不确定性的矛盾, 虽然在政策驱动下硬件国产化加速了动态补偿的算法迭代, 但是动态负载突变问题依旧缺乏理论突破; Topic #3 技术主题的技术升级面临协作机器人高精度需求和算力限制的冲突的问题, 虽然在学术领域对冗余自由度的研究日益注重 (年均增长 15%), 但是产业化依旧面临着实时性与解析法适用性矛盾。Topic #5 技术主题的相关技术转型依赖于较为成熟的传统算法与 AI 融合产生的潜在机会, 资源投入会逐步注重边缘场景, 但对数据驱动优化的跨界应用还需要等待验证; Topic #8 技术主题的波动性特征源自于政策驱动的数字孪生需求与硬件成本限制的矛盾, 虽然示范项目能够推动技术落地, 但是标定设备高成本 (>50 万元) 会导致中小企业渗透困难。

为了突破技术瓶颈也可以考虑采用技术主题的交叉融合拓展方向: 运动控制与动力学结合运动学控制来做例如 ADAMS-Matlab 协同的联合仿真, 可以借助动力学-运动学耦合优化性质来对重载机械臂的轨迹跟踪精度与稳定性产生显著的提升; 优化控制和运动学结合可以实现例如 MPC 嵌入数字孪生的集成, 这可以实现离线编程中能耗的动态优化, 可以提升调试效率的同时降低能耗; 运动学控制和运动学实现的协同应用例如视觉反馈结合参数自适应, 可以实现对逆解算法实时标定难题的解决, 极大的提高标定效率从而为柔性生产线提供快速部署的方案。该类融合弥补了单一技术主题的技术局限, 可以通过算法-硬件-场景的协同实现对工业机器人控制系统技术维度向智能化和高可靠性的演变。

3.3.3 驱动系统技术维度

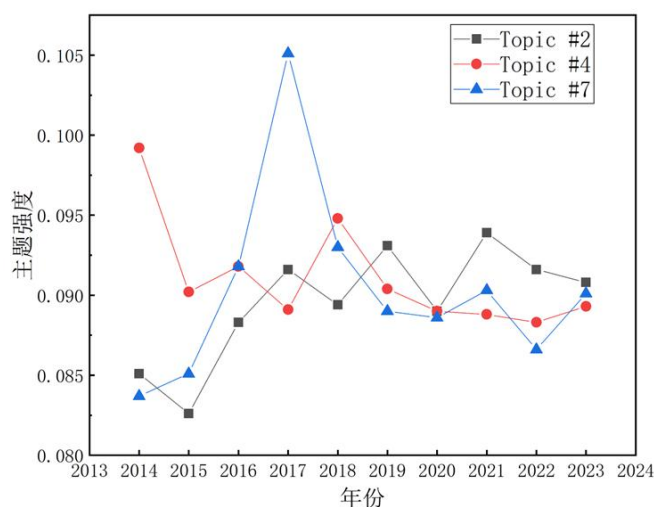


图 3-3 驱动系统技术维度技术主题强度演变

Topic #2（驱动与运动控制）的技术主题强度从 2014 年至 2023 年呈弱上升趋势，年均增长率为 0.66%，其中在 2017 年达到局部峰值 0.0916，这得益于高精度伺服电机控制算法的突破，例如深度学习驱动的非线性补偿技术被首次大规模的应用在关节控制方面，导致相关论文研究激增；另外在 2021 年也达到了局部峰值 0.0939，这得益于国产碳化硅功率器件的量产显著提升了系统能效比；但是，2020 年后技术强度短暂回落至 0.089，可能的原因与中美贸易摩擦导致的进口编码器供应链波动相关，这说明该技术主题存在硬件依赖的风险。

Topic #4（动力系统集成）的技术主题强度从 2014 年至 2023 年呈现波动下降的趋势，年均降幅达到 1.01%，其中 2018 年存在短暂回升至 0.0948，这得益于“十三五”政策对模块化设计的支持相关，例如比亚迪推出的电-液复合驱动专利对降低系统复杂度具有很大贡献。但是由于多学科协同设计能力不足以及产业化成本过高的问题，之后技术强度再度下滑。另外国际巨头的专利壁垒对国内该技术主题的技术发展产生了不小的限制，例如西门子占混合动力系统核心专利 70%。

Topic #7（驱动控制）的技术主题强度呈现一种倒“U 型”波动，2017 年达到峰值 0.1051，这是由于 FPGA 实时控制芯片的早期应用解决了多任务并行处理的实时性问题；但由于受限于硬件算力瓶颈的原因，2020 年后技术主题强度下滑；2023 年出现的回升是由于边缘

计算与 5G 技术的融合，例如华为昇腾芯片驱动的分布式控制架构落地。

各技术主题的内在技术发展矛盾与驱动情况：Topic #2 技术主题可以通过深度学习非线性补偿等算法优化以及碳化硅器件的升级来提高技术精度，但由于对硬件技术的依赖制约了技术迭代速度；Topic #4 技术主题的驱动因素有模块化设计降低集成复杂度，但也存在多学科协同能力不足的问题导致技术停滞；Topic #7 技术主题的驱动因素有通过边缘计算实现了分布式控制突破，但由于芯片国产化率低导致算力存在瓶颈制约。外部因素有“十四五”智能制造专项等政策因素驱动以及如新能源产线对高速机器人这样的市场需求驱动，二者加速了技术路径分化，另外还有国际的专利壁垒促使我国在 Topic #4 技术主题方向谋求差异化创新。

为了突破技术瓶颈也可以考虑采用技术主题的交叉融合拓展方向：驱动与运动控制和驱动控制结合，为了满足手术机器人微秒级响应需求，可以考虑将自适应算法嵌入实时芯片架构来实现；动力系统集成搭载驱动和运动控制的智能能耗管理算法相结合，可以有效的降低重载机器人能耗；动力系统集成和驱动控制协同从而构建分布式驱动网络，可以适配柔性制造模式进而提升 AGV 集群调度效率。三个技术主题相结合构建“感知-决策-执行”的闭环，对为工业机器人智能化升级提供系统性解决方案有重要作用。

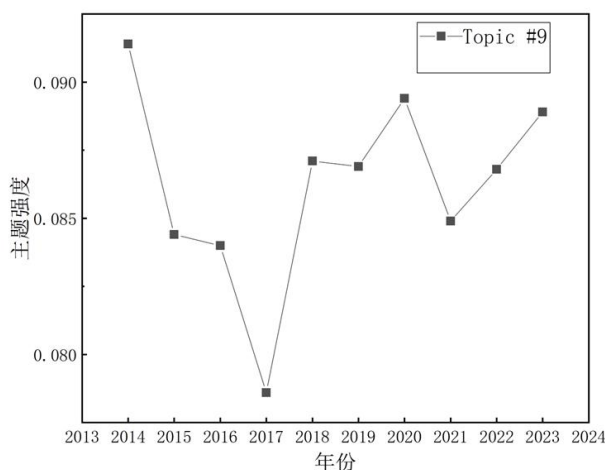


图 3-4 感知系统技术维度技术主题强度演变

3.3.4 感知系统技术维度

Topic #9（环境感知与检测）的技术主题强度在 2014 - 2017 年技术强度持续下降，这是由于该阶段技术研发面临两个瓶颈：第一个是高端传感器（如高精度 LiDAR）依赖进口，国产化进程缓慢；另一个是多模态数据融合算法的不成熟导致在实际场景适应性不足。2018 年后技术强度回升并在 2023 年达到 0.0889，这与《新一代人工智能发展规划》等政策驱动以及关键技术突破（国产 16 线 LiDAR 量产）密切相关，该阶段的技术特征表现为算法轻量化与边缘计算集成，实现了在复杂场景下的动态目标检测并且显著提升了实时性。

Topic #9（环境感知与检测）内在技术发展矛盾与驱动情况：驱动因素包含中国制造 2025 专项补贴等政策因素、疫情后自动化需求激增等市场需求因素以及国产 LiDAR 成本降低等技术突破因素。然而高端传感器进口占比较高的技术依赖以及研发周期长等因素对该技术主题的研发突破形成制约。

4 结论与建议

本文研究基于 LDA（潜在狄利克雷分布）主题模型进行文本挖掘，系统的对工业机器人领域的核心技术主题及其演进规律以及相关技术链的协同需求与发展瓶颈进行了分析。具体总结如下：

4.1 技术主题识别与分类

本研究通过 LDA 建模从 1589 篇核心专利中提取出 11 个技术主题，将其归类到技术分解的四个技术维度如下：

本体技术维度包括 Topic #0（运动规划与结构设计）、Topic #6（机械系统集成）与 Topic #10（空间定位与操作）三个技术主题，该技术维度聚焦机械结构与运动能力，机械设计与多自由度协同控制相关研究居于主导地位。

控制系统技术维度包括 Topic #1（运动控制与动力学）、Topic #3（运动学控制）、Topic #5（优化控制）以及 Topic #8（运动学实现）四个技术主题，其中 Topic #8（运动学实现）的关键技术突破与数字孪生政策驱动密切相关。

驱动系统技术维度包括 Topic #2（驱动与运动控制）、Topic #4（动力系统集成）以及 Topic #7（驱动控制）三个技术主题，该技术主题维度呈现算法优化与硬件依赖的双重特征，另外 Topic #2（驱动与运动控制）技术主题相关研究虽然由于国产碳化硅器件量产实现技术强度提升，但由于如编码器等硬件依赖进口制约了迭代速度。

感知系统技术维度仅包含 Topic #9（环境感知与检测）一个技术主题，该技术主题技术强度长期偏低，但由于国产 LiDAR 量产与边缘计算推动的原因，2018 年之后技术主题强度回升。

4.2 主题强度与趋势演变

本体技术维度起主导作用：Topic #0（运动规划）技术主题强度一直保持最高，但其 2014-2023 年间技术主题强度大致呈现下降的趋势，这体现出了传统算法在动态场景中的局限性；Topic #10（空间定位）在 2020

年技术主题强度跃升,这是由于其在多模态传感器融合方面实现技术突破,但标准差 0.0053 的波动性特征暴露了技术路径的竞争。

控制系统技术维度呈现分化态势: Topic #8(协同控制)的技术主题强度在 2016 年和 2019 年出现局部峰值,原因是得益于政策驱动的数字孪生项目落地; Topic #5(优化控制)技术主题强度持续走低,建议加强与 AI 融合的相关研究。

驱动系统技术维度的矛盾凸显: Topic #4(动力系统集成)技术主题强度持续下滑,原因是多学科协同能力的不足; Topic #7(驱动控制)的技术主题强度在 2023 年回升至 0.0901,原因是受边缘计算与 5G 技术推动,但是 FPGA 芯片国产化率低依旧限制其发展。

4.3 政策与产业建议

通过专项基金支持,设立“运动-感知-控制”闭环技术攻关项目,进而重点突破 AI 规划算法、边缘计算驱动控制等方向;加快对开源工具链国产化的研究,推动 MATLAB 等开源工具链的国产替代方案,降低中小企业的技术门槛;联合传感器厂商与算法公司共建实验室,并且缩短 LiDAR 标定、多模态融合等技术转化周期,实现产学研协同;为了保障供应链的安全,注重对核心器件(ToF 芯片、FPGA)研发税收优惠,从而提升国产化率。

参考文献

[1] 赵靛,游宏梁,高强,等.基于专利共现网络社区发现的军事智能技术演化分析[J].情报理论与实践,2023,46(04):176-183.
[2] 楼旭明,张程锦,唐影.基于专利分析和 TRIZ 理论的无人机技术态势研究[J].情报杂志,2020,39(02):56-62.

[3] 陈伟,林超然,李金秋,杨早立.基于 LDA-HMM 的专利技术主题演化趋势分析——以船用柴油机技术为例[J].情报学报,2018,37(07):732-741.
[4] Jiang H C, Qiang M S, Lin P. Finding Academic Concerns of the Three Gorges Project Based on a Topic Modeling Approach[J]. Ecological Indicators, 2016, 60: 693-701.
[5] 杨超,朱东华,汪雪锋,朱福进,衡晓帆.专利技术主题分析:基于 SAO 结构的 LDA 主题模型方法[J].图书情报工作,2017,61(03):86-96.
[6] Chen S H, Huang M H, Chen D Z. Identifying and Visualizing Technology Evolution: A Case Study of Smart Grid Technology[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2012, 79(6): 1099-1110.
[7] 巩玥,刘俐媛,陈扬.基于专利计量的汞污染治理技术态势分析[J].环境工程学报,2019,13(06):1473-1487.
[8] Hofmann T. Probabilistic Latent Semantic Indexing[C]//Proceedings of the 22nd Annual International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval. 1999: 50-57.
[9] Salton G, Buckley C. Term-weighting Approaches in Automatic Text Retrieval[J]. Information Processing and Management, 1988, 24(5): 513-523.
[10] Robert, J, Watts, et al. Innovation Forecasting - ScienceDirect[J]. Technological Forecasting and Social Change, 1997, 56(1): 25-47.
[11] 李湘东,张娇,袁满.基于 LDA 模型的科技期刊主题演化研究[J].情报杂志,2014,33(07):115-121.