

检测仪器中的机械传动系统设计方法研究

郁 灵

南德认证检测(中国)有限公司上海分公司, 上海

收稿日期: 2025年7月2日; 录用日期: 2025年8月1日; 发布日期: 2025年9月4日

摘 要

检测仪器在工业领域发挥着重要作用, 以确保产品质量符合标准。检测仪器的机械传动系统的功能在于传递运动和动力。本文提出了一种集成传递运动和动力的机械传动功能特征模型及其编码方法, 构建了集成传动功能和机构知识的传动知识库, 建立了运动-运动型、运动-动力型、动力-动力型和动力-运动型四种基本传动功能矩阵, 并集成为统一的传动功能矩阵, 并在此基础上提出了集成传递运动和动力的基于传动功能矩阵的检测仪器的机械传动设计方法。以液相色谱仪的实例加以说明, 证实了该方法有助于仪器的机械传动系统设计。

关键词

检测仪器, 传动, 机构设计, 运动和动力

Study on the Design Method of Mechanical Transmission System in Testing Instruments

Ling Yu

TÜV SÜD Certification and Testing (China) Co., Ltd., Shanghai Branch, Shanghai

Received: Jul. 2nd, 2025; accepted: Aug. 1st, 2025; published: Sep. 4th, 2025

Abstract

Testing instruments play a vital role in the industrial sector, ensuring product quality meets standards. The function of mechanical transmission systems in testing instruments lies in transmitting motion and power. This paper proposes an integrated mechanical transmission functional feature model that transmits both motion and power, along with its encoding method. It constructs a transmission knowledge base integrating transmission functions and mechanism knowledge, establishes four basic transmission functional matrices-motion-motion, power-motion, motion-power, and power-motion, and integrates them into a unified transmission functional matrix. Based on this, it proposes an integrated transmission functional matrix for transmitting both motion and power. motion-to-motion, power-to-power, and power-to-motion transmission functional matrices. These

are integrated into a unified transmission functional matrix. Based on this framework, a mechanical transmission design methodology for testing instruments is proposed, utilizing the transmission functional matrix to integrate motion and power transmission. The method is illustrated with an example of a liquid chromatograph testing instrument, which confirms that the method is helpful for the design of the mechanical transmission system of the instrument.

Keywords

Testing Instruments, Transmission, Mechanism Design, Motion and Dynamics

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

检测仪器中涉及很多的机械传动，其设计方法得到国内外学者的广泛研究。在传统的利用图册来获取设计思路的方法的基础上，各国学者纷纷提出了机械传动方案的系统化设计方法，并利用人工智能与计算机辅助技术来加以支持，取得了一些有效的进展。Chiou 等[1]提出了一种基于矩阵的功能分解方法，通过矩阵变换来完成机械传动系统的综合。Mao 等[2]提出了一种基于蒙特卡洛树的机构概念设计方法。Majumder 等[3]则提出功能表达、机构拓展、机构评价和方案生成方法。Yang 等[4]系统地总结了机构智能设计的结构综合方法。梁栋等[5]提出多驱动模式并联机器人概念设计方法。宋志广等[6]提出了基于功能元推理的机构设计方法。王欢等[7]提出了汽车传动系统构型设计方法，特别在混合动力汽车得到应用。雷英俊等[8]提出了一种高灵敏度和低耦合三维弹性机构及其参数优化方法。李满宏等[9]研究了基于凸轮机构的变刚度仿生柔性关节设计和优化方法。仿生是一种很好的设计理念[10]，邓清东[11]利用仿生方法设计了仿生机器鱼的机构并进行了优化。知识库作为支持机构设计的重要支撑技术，得到广泛的研究[12][13]。吴雨佳等[14]对产品设计创新过程中的知识获取、知识分类、知识表达和知识库系统构建进行研究。

检测仪器中的机械传动系统的功能在于传递运动和动力。当前的研究往往侧重于研究系统的运动传递功能，而动力的传递同样是传动功能的一个重要组成部分。本文提出了一种集成传递运动和动力的机械传动功能特征模型及其编码方法，构建了集成传动功能和机构知识的传动知识库，建立了运动-运动型、运动-动力型、动力-动力型和动力-运动型四种基本传动功能矩阵，并集成为统一的传动功能矩阵，并在此基础上提出了集成传递运动和动力的基于传动功能矩阵的机械传动设计方法。并利用上述模型和方法在液相色谱仪的设计中得到应用，证实了该方法的可行性。

2. 基于特征的传动功能表达模型与编码方法

2.1. 运动状态特征模型与编码方法

检测仪器中的机械传动系统的功能在于传递运动和动力。机械运动包含了运动类型、运动方向、方向属性等特征。在仪器仪表设计领域，通常是传递运动。如图 1 所示，建立了运动状态特征模型。

- 运动类型：运动类型包括平动(T)、转动(R)和复合运动(O)。
- 运动方向：对于平动按其运动方向定义 X 方向、Y 方向和 Z 方向；对于转动，根据转轴定义 X 轴、Y 轴和 Z 轴；对于复合运动，方向也必须用方向和来表示。
- 方向属性：对于平动和转动等简单运动，以右手螺旋定则，正向定义为 1，反向定义为-1；对于摆动，统一定义为 0；对于复合运动，统一定义 2。

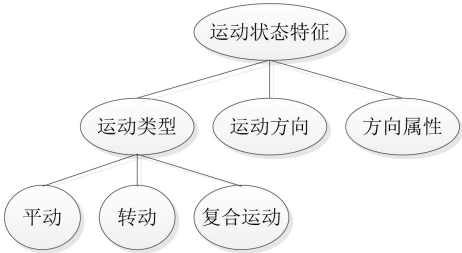


Figure 1. Motion state feature model
图 1. 运动状态特征模型

2.2. 动力状态特征模型与编码方法

而在传递运动的同时，机械传动系统同样能够传递动力。在机械工程领域，更普遍的情况是传递动力。而动力特征包含了动力类型、方向属性、恒定性、往复性、线性和连续性。如图 2，建立了动力状态特征模型。

- 动力类型：动力类型包括力(F)和力矩(M)。
- 方位：对于力(F)定义 X、Y、Z 三个方向，分别表示力沿 X、Y、Z 轴线方向；而对于力矩(M)定义 X、Y、Z 三个方向，分别表示作用对象在力矩(M)的作用下发生绕着 X、Y、Z 轴方向的转动。对于力和力矩的共同作用，采用“方向和”来进行表示。
- 方向属性：对于力(F)，沿轴正向定义为 1，方向则为-1，往复则为 0。而对于力矩(M)，在力矩的作用下，作用对象的旋转方向符合右手螺旋法则的定义为 1，反之则为-1。
- 恒定性特征：表示力或力矩是否恒定。若一直保持不变，则定义为 1，否则为-1。
- 往复性特征：表示力或力矩是否具有往复性特征，若是往复的，则定义为 1，否则为-1。



Figure 2. Dynamic state feature model
图 2. 动力状态特征模型

2.3. 基于特征的传动功能表达模型

对于传动系统来说，如图 3 所示，传动功能包括运动状态的转换特征和动力状态转换特征，而运动状态转换特征包括输入/输出运动状态特征，动力状态转换特征则包括输入/输出动力性态特征。其中的输入/输出运动/动力状态特征可以用图 1 和图 2 所示的特征模型进行表达。

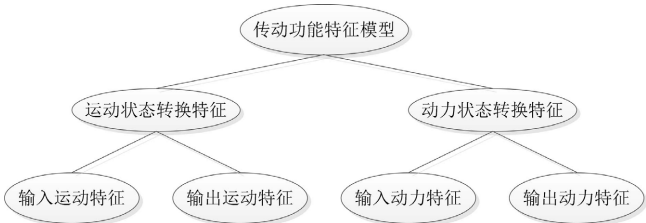


Figure 3. Feature-based representation model of transmission function
图 3. 基于特征的传动功能表达模型

利用上述模型，可以方便地进行传动功能的表达。

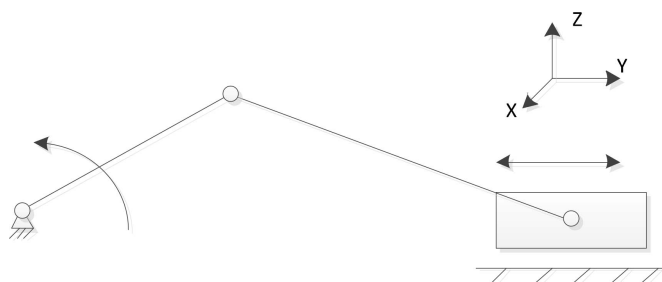


Figure 4. Crank slider mechanism

图 4. 曲柄滑块机构

如图 4 所示的曲柄滑块机构，根据设计师的用途，可以有不同的功能表达模型。如：

1) 第一种类型：

输入运动 I_1 : $[R, X, 1]$ ，输入运动是转动、绕着 X 轴、正向。

输出运动 O_1 : $[T, Y, 0]$ ，输出运动是平动、沿着 Y 轴、摆动。

传动功能 F_1 : $[R, X, 1] \rightarrow [T, Y, 0]$ ，此传动功能表达的是输入运动是转动、绕着 X 轴方向、正向；而输出运动是平动、沿着 Y 轴、摆动。

2) 第二种类型：

输入运动 I_2 : $[T, Y, 0]$ ，输入运动是平动、沿着 Y 轴、摆动。

输出运动 O_2 : $[R, X, 1]$ ，输出运动是转动、绕着 X 轴、正向。

传动功能 F_2 : $[T, Y, 0] \rightarrow [R, X, 1]$ ，此传动功能表达的是输入运动是平动、沿着 Y 轴、摆动；而输出运动是转动、绕着 X 轴、正向。

3) 第三种类型：

输入动力 I_3 : $[M, X, 1, 1, -1]$ ，表达为：输入动力为力矩 M ，绕着 X 轴方向，正向，恒定，不往复。

输出动力 O_3 : $[F, Y, 0, -1, -1]$ ，表达为：输出动力为力 F ，沿着 Y 方向，方向往复，变化，往复。

传动功能 F_3 : $[M, X, 1, 1, -1] \rightarrow [F, Y, 0, -1, -1]$ 。表达为此传动机构的输入动力为力矩 M ，绕着 X 方向，正向，恒定，不往复；传动机构的输出动力为力 F ，沿着 Y 方向，方向往复，变化，往复。

4) 第四种类型：

输入动力 I_4 : $[F, Y, 0, -1, -1]$ ，表达为：输入动力为力 F ，沿着 Y 方向，方向往复，变化，往复。

输出动力 O_4 : $[M, X, 1, 1, -1]$ ，表达为：输出动力为力矩 M ，绕着 X 方向，正向，恒定，不往复。

传动功能 F_4 : $[F, Y, 0, -1, -1] \rightarrow [M, X, 1, 1, -1]$ 。表达为此传动机构的传动机构的输入动力为力 F ，沿着 Y 方向，方向往复，变化，往复；输出动力为力矩 M ，绕着 X 方向，正向，恒定，不往复。

3. 传动机构知识库建立

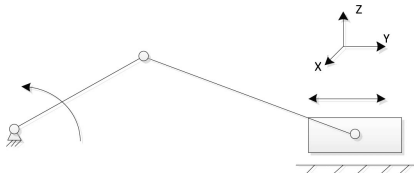
收集整理仪器仪表机械领域的常见的传动机构，整理成如表 1 所示的传动机构知识库。该传动机构知识库包括 4 方面的内容。

标识项用于明确传动机构的编号、机构名称。

功能项则说明输入运动、输出运动、输入动力和输出动力的形式进行表达。输入运动、输出运动、输入动力和输出动力项采用上一节提出的表达式进行表达。这四项不需要同时填满，但是必须填写输入(输入运动或输入动力)和输出(输出运动或输出动力)。

主体项则介绍该机构的信息，主要包括机构简图、机构说明、主要设计参数和应用实例等。
备注项则对该机构信息进行备注。

Table 1. Transmission mechanism knowledge base (example)
表 1. 传动机构知识库(示例)

标识项	编号	1	机构名称	曲柄滑块机构	
功能项	输入运动 1	[R, X, 1]	输出运动 1	[T, Y, 0]	
	输入运动 2		输出运动 2		
	输入动力 1	[M, X, 1, 1, -1]	输出动力 1	[F, Y, 0, -1, -1]	
	输入动力 2		输出动力 2		
主体项	机构简图				
	机构说明	曲柄滑块机构是一种常见的机械传动装置，由曲柄、连杆和滑块组成。曲柄作圆周运动，通过连杆带动滑块作往复直线运动。			
	主要设计参数	曲柄长度、连杆长度、偏置距、杆长条件、行程速比系数、滑块行程等。			
	应用实例	内燃机、空气压缩机、冲床、自动送料装置			
备注项	备注	当连杆与曲柄共线时，机构可能卡死(如内燃机上止点)，需通过惯性飞轮或外力跨越。			

4. 传动功能矩阵建模方法

检测仪器中的机械传动系统可以根据其运动动力之间的转换，分为下面四种基本类型：实现运动到运动转换、实现运动到动力的转换、实现动力到运动的转换、实现动力到动力的转换。

如表 2 所示，在仪器机械设计过程中，建立一个传动功能矩阵，表格水平轴列举了所有的输出运动类型，包括[T, X, 1]、[T, X, 0]、[T, X, -1]、[T, X, -1]等以及输出动力类型，包括[F, X, 1, 1, 1]、[F, X, 1, 1, -1]、...[M, X, 1, 1, 1]、[M, X, 1, 1, -1]等。类似地，在竖直轴，列举所有的输入运动类型，包括[T, X, 1]、[T, X, 0]、[T, X, -1]、[T, X, -1]等等以及输入动力类型，包括[F, X, 1, 1, 1]、[F, X, 1, 1, -1]、...[M, X, 1, 1, 1]、[M, X, 1, 1, -1]等。

如表 2 所示，整个传动功能矩阵分为四大部分：左上区域实现运动到运动转换、右上区域实现运动到动力的转换、左下区域实现动力到运动的转换、右下区域实现动力到动力的转换。通过此传动功能矩阵，实现了传动功能的统一。

在上面的表格中，每一行和每一列相交于一个空格，在该空格内填写能够实现特定输入(包括运动或动力)到特定输出(包括运动或动力)的机构方案的编号，即上一节提出机构知识库的标识项中的编号。例如，[R, X, 1]→[T, Y, 0]，此传动功能表达的是输入运动是转动、绕着 X 轴、正向；而输出运动是平动、沿着 Y 轴、摆动。在[R, X, 1]和[T, Y, 0]的交叉单元格内，有数字“1”，表示传动机构知识库中的编号为“1”的知识库。

5. 基于传动功能矩阵的机械传动设计方法

在如表 2 所示的传动功能矩阵中，首先从输入轴上选择输入运动或输入动力特征编码，接着在输出

轴上选择输出运动或输出动力特征编码。由此，确定输入运动/动力特征编码与输出运动/动力特征编码的交叉单元格。如果该单元格内有编码，该机构即为实现特定需求的一级传动机构。如果该单元格内没有编码，则说明在当前的知识库中没有一级传动机构。

Table 2. Knowledge modeling methods of transmission functional matrix
表 2. 传动功能矩阵建模方法

		输出运动					输出动力					
		T, X, 1	...	T, Y, 0	T, X, 2	...	F, X, 1, 1, 1	...	F, Y, 0, -1, -1	M, X, 1, 1, 1	M, X, 1, 1, -1	...
输入 运动	T, X, 1											
	T, X, 0											
	T, X, 1	5, 8			6							
	T, X, 2											
	...											
										78, 96		
	R, X, 1			1								
	R, Z, -1											
	...											
输入 动力	F, X, 1, 1, 1											
	F, X, 1, 1, -1			88								
	F, X, 1, 1, -1	46										
	...											
	M, X, 1, 1, 1											
	M, X, 1, 1, -1								1			
	...											

在一级传动求解结束后，将当前状态的输入运动/动力特征编码作为下一次求解的输出运动/动力特征编码，并对该输出量在矩阵中所对应的列进行遍历求解，从而得到二级传动机构。

类似地，递归调用上述算法分别进行求解可以得到三级、四级等多级传动机构，直到获得设计师满意的传动机构方案。

6. 设计实例

液相色谱仪是利用液相色谱原理对液体样品组分分析的核心装备[15]。对于液相色谱仪，部分需要实时存储在仪器的信息系统内，另外一部分数据需要输出为打印纸张。因此，需要设计一套液相色谱仪送纸机构。传统的设计方法是查询各类图册[16]。

液相色谱仪送纸机构的输入运动可以表达为[R, X, 1]，输出运动可以表达为[T, Z, 0]。采用基于传动功能矩阵的机械传动设计方法，从输入轴上选择输入运动编码[R, X, 1]，接着在输出轴上选择输出运动编码[T, Z, 0]。由此，确定输入运动编码和输出运动编码的交叉单元格。

一级传动求解后，可以求解二级传动。将当前状态的输入运动特征编码作为下一次求解的输出运动特征编码，并对该输出量在矩阵中所对应的列进行遍历求解，从而得到二级传动机构，即[R, X, 1]→[R, Y,

$0] \rightarrow [T, Z, 0]$, $[R, X, 1] \rightarrow [R, Z, 0] \rightarrow [T, Z, 0]$, $[R, X, 1] \rightarrow [T, X, 0] \rightarrow [T, Z, 0]$, $[R, X, 1] \rightarrow [T, Y, 0] \rightarrow [T, Z, 0]$, $[R, X, 1] \rightarrow [R, Y, 1] \rightarrow [T, Z, 0]$, $[R, X, 1] \rightarrow [R, Z, 1] \rightarrow [T, Z, 0]$ 等。每一级传动利用如表 1 所示的传动机构知识库, 可以得到知识库的编号。利用这些编号, 可以找到对应的机械传动机构, 并形成机构组合。

二级传动求解后, 可以求解三级传动。将当前状态的输入运动特征编码作为下一次求解的输出运动特征编码, 并对该输出量在矩阵中所对应的列进行遍历求解, 从而得到三级传动机构, 即 $[R, X, 1] \rightarrow [R, Y, 0] \rightarrow [T, X, 0] \rightarrow [T, Z, 0]$, $[R, X, 1] \rightarrow [R, Y, 0] \rightarrow [T, X, 1] \rightarrow [T, Z, 0]$, $[R, X, 1] \rightarrow [R, Y, 0] \rightarrow [T, Z, 1] \rightarrow [T, Z, 0]$, $[R, X, 1] \rightarrow [T, X, 0] \rightarrow [T, Y, 0] \rightarrow [T, Z, 0]$, $[R, X, 1] \rightarrow [T, X, 0] \rightarrow [T, X, 1] \rightarrow [T, Z, 0]$, $[R, X, 1] \rightarrow [T, Y, 0] \rightarrow [R, Y, 0] \rightarrow [T, Z, 0]$, $[R, X, 1] \rightarrow [T, Y, 0] \rightarrow [R, Y, 0] \rightarrow [T, Z, 0]$, $[R, X, 1] \rightarrow [T, Z, 1] \rightarrow [R, Y, 0] \rightarrow [T, Z, 0]$ 等。每一级传动利用如表 1 所示的传动机构知识库, 可以得到知识库的编号。利用这些编号, 可以找到对应的机械传动机构, 并形成机构组合。

经过方案评价, 形成如图 5 所示的液相色谱仪送纸机构方案。

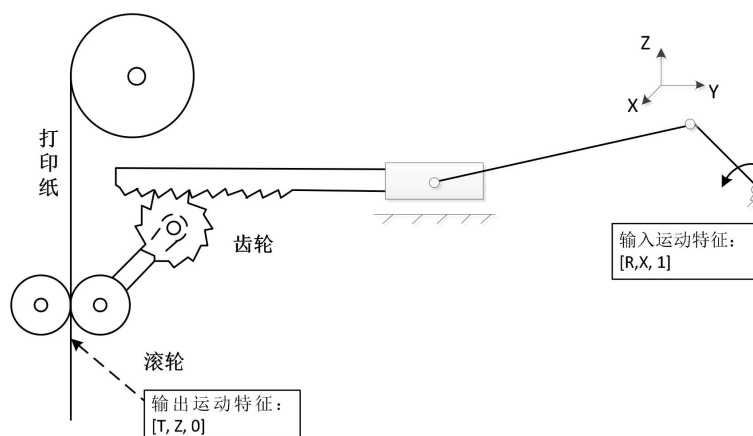


Figure 5. Paper feeding mechanism of liquid chromatograph
图 5. 液相色谱仪送纸机构

7. 结论

本文提出了集成传递运动和动力的机械系统传动功能特征模型, 提出了相应的机械传动知识建模方法, 提出了集成传递运动和动力的机械传动系统设计方法。并利用上述方法在液相色谱仪送纸机构的设计中得到应用, 证实了该方法的可行性。

参考文献

- [1] Chiou, S. and Sridhar, K. (1999) Automated Conceptual Design of Mechanisms. *Mechanism and Machine Theory*, **34**, 467-495. [https://doi.org/10.1016/s0094-114x\(98\)00037-8](https://doi.org/10.1016/s0094-114x(98)00037-8)
- [2] Mao, J., Zhu, Y., Chen, G., Yan, C. and Zhang, W. (2025) Automated Conceptual Design of Mechanisms Based on Thompson Sampling and Monte Carlo Tree Search. *Applied Soft Computing*, **170**, Article ID: 112659. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.112659>
- [3] Majumder, A., Todeti, S.R. and Chakrabarti, A. (2023) Empirical Studies on Conceptual Design Synthesis of Multiple-State Mechanical Devices. *Research in Engineering Design*, **34**, 477-495. <https://doi.org/10.1007/s00163-023-00420-8>
- [4] Yang, W., Ding, H. and Kecskeméthy, A. (2022) Structural Synthesis towards Intelligent Design of Plane Mechanisms: Current Status and Future Research Trend. *Mechanism and Machine Theory*, **171**, Article ID: 104715. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2021.104715>
- [5] 梁栋, 崔满军, 宋轶民, 等. 新型多驱动模式并联机器人创新设计与建模分析[J/OL]. 机械工程学报, 2025: 1-15.

- <https://link.cnki.net/urlid/11.2187.TH.20250402.1751.004>, 2025-06-22.
- [6] 宋志广, 孙亮波, 陈永康, 等. 基于功能元求解的机械结构创新设计方法[J]. 武汉轻工大学学报, 2025, 44(2): 111-117.
- [7] 王欢, 崔露兴, 葛帅帅, 等. 功率分流式混合动力汽车传动系统构型设计方法[J/OL]. 机械科学与技术, 2025: 1-8. <https://link.cnki.net/doi/10.13433/j.cnki.1003-8728.20230341>, 2025-06-18.
- [8] 雷英俊, 许桢英, 李瑞君. 三维等灵敏度低耦合弹性机构的设计和优化[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(11): 47-55.
- [9] 李满宏, 马艳悦, 张明路, 等. 基于凸轮机构的变刚度仿生柔性关节设计与分析[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(2): 213-222.
- [10] 黎小巨, 刘伟乐, 洪春龙, 等. 一种仿生机械手的创新设计及运动学仿真[J]. 机电工程技术, 2024, 53(4): 82-85+110.
- [11] 邓清东, 杜必强, 姚万业. 变压器内检仿生机器鱼机构优化设计[J]. 仪器仪表用户, 2021, 28(11): 1-4+37.
- [12] 叶志刚, 邹慧君, 郭为忠, 等. 机械运动方案知识库的建立和机构自动化型综合[J]. 机械设计与研究, 2003, 19(2): 11-14.
- [13] 苏宁. 基于港口机械本体知识库的智能查询系统研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2023.
- [14] 吴雨佳, 曹岩. 面向机械产品快速设计的知识库构建及表达[J]. 西安工业大学学报, 2022, 42(1): 29-34.
- [15] 代荣琴, 柏彬, 王婷. 检验仪器分析技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2023.
- [16] Sclater, N., Chironis, N.P. 机械设计实用机构与装置图册[M]. 邹平, 译. 北京: 机械工业出版社, 2011.