基于公理系统化方法的角模块构型设计*

高镇海[1] 刘达禹[2] 乔斌[3] 李冠廷[3] 卢萍萍[1]

（1.吉林大学汽车底盘集成与仿生全国重点实验室，长春 130022；2.吉林大学汽车工程学院，长春 130022；
3.重庆长安汽车股份有限公司，重庆 404100）

【摘要】为解决轮边驱制动一体化系统在电动重载商用汽车应用中因高度集成而导致的轮毂内空间受限、构型复杂度提高，以及功能与结构复杂耦合所引发的潜在矛盾冲突问题，提出面向角模块驱制动一体化构型的正向设计方法。首先，采用公理化设计方法对系统功能需求与结构参数进行分析，并借助设计矩阵识别构型中的耦合关系与冲突问题；然后，运用系统化设计方法构建底层结构的形态学矩阵，通过构型枚举获得潜在设计方案；最后，结合具体应用场景筛选合理构型，并通过偏好矩阵分析对候选方案进行评价，以确定最终可选构型。结果表明，该方法能够从功能需求出发提升构型设计效率，辅助设计人员完善设计流程，并为后续结合人工智能设计开展专家知识库构建提供支持。

主题词：角模块构型 正向构型设计 系统化设计 电子机械制动

中图分类号：U463.3 **文献标志码：**A **DOI:** 10.19620/j.cnki.1000-3703.20250776

Axiomatic and Systematic Methods Based Corner Module Configuration Design

Gao Zhenhai[1], Liu Dayu[2], Qiao Bin[3], Li Guanting[3], Lu Pingping[1]

（1. National Key Laboratory of Automotive Chassis Integration and Bionics, Jilin University, Changchun 130022; 2. School of Automotive Engineering, Jilin University 130022; 3. Chongqing Changan Automobile Co., Ltd., Chongqing 404100）

【Abstract】To address the potential conflicts caused by limited in-wheel space, increased configuration complexity, and the intricate coupling between functions and structures in integrated wheel-side drive-brake systems for electric heavy-duty commercial vehicles, a forward design method for corner-module integrated drive-brake configurations is proposed. First, axiomatic design is employed to analyze the system's functional requirements and structural parameters, while a design matrix is used to identify coupling relationships and conflict issues within the configuration. Then, a systematic design method is applied to construct the morphological matrix of the underlying structures, and potential design schemes are obtained through configuration enumeration. Finally, feasible configurations are selected in accordance with specific application scenarios, and candidate schemes are evaluated using preference matrix analysis to determine the final optional configurations. The results show that the proposed method improves configuration design efficiency from the perspective of functional requirements, assists designers in refining the design process, and provides support for the subsequent establishment of an expert knowledge base in combination with AI-based design.

Key words: Corner module, Forward configuration design, Systematic design, Electro-mechanical brake

【引用格式】高镇海, 刘达禹, 乔斌, 等. 基于公理系统化方法的角模块构型设计[J]. 汽车技术, 2026(5): 40-47.

GAO Z H, LIU D Y, QIAO B, et al. Axiomatic and Systematic Methods Based Corner Module Configuration Design[J]. Automobile Technology, 2026(5): 40-47.

1 前言

角模块构型是指将单个车轮的驱动、制动、转向和悬架等功能集合到轮边的模块化设计[1]，结合了电子机械制动（Electro-Mechanical Brake，EMB）的角模块系统具有更短的响应时间和控制精度，是未来的重要发展方向[2]。

近年来，围绕轮毂电机与摩擦制动系统的集成已有

*基金项目：国家自然科学基金项目（52394261）。

研究提出了多种方案，包括基于轴向磁场轮毂电机的电机转子与制动盘一体化设计[3]、将制动盘布置于轮毂电机内部的角模块结构[4]，以及将减速器与轮毂电机集成于同一壳体并结合能量回收实现多工作模式的构型[5]。此外，还有研究通过减速机构连接驱动与制动单元，以缩短轴向尺寸并提升制动性能[6-7]；也有研究基于内转子电机提出并联传力结构，以兼顾紧凑布置和大扭矩输出[8]。

为提高复杂工况下的适应能力，已有研究提出了多种结构优化方案，包括将减振器集成于轴向磁场轮毂电机并布置在定子内侧，以增强系统抗振性能[9]。与此同时，EMB系统因响应速度快、控制精度高和能耗低等优势，为角模块设计提供了新的技术路径[10-18]。面向重型商用车应用，已有研究开发了适用于角模块的EMB系统[19]。此外，也有研究提出基于双联万向节与内转子电机的内悬置电动轮构型，为弹簧和阻尼元件预留更多安装空间[20]。

通过分析，这些传统设计方法往往依赖于经验驱动或单功能优化的方法进行局部改进，缺乏系统化的功能分解与结构对应分析，难以及时识别功能与结构参数间的耦合关系，易在集成和试制阶段反复调整，导致周期延长和成本上升。因而，在驱制动一体化系统的正向开发中，系统梳理功能需求、明确结构对应、预判并优化潜在冲突，是实现高效开发与可靠量产的关键。本文针对上述问题，提出一种结合公理化设计和系统化设计的正向驱制动一体化构型设计方法，并进行构型评估和优选，从而拓展构型的设计思路。

2　公理系统化设计概述

公理化设计方法（Axiomatic Design Method，ADM）以功能需求（Functional Requirements，FRs）与设计参数（Design Parameters，DPs）的映射关系为核心，通过明确和结构化地分析系统在功能实现过程中所需的具体物理参数及其作用机制，能够有效支撑复杂系统的正向设计开发[21]。

系统化设计方法（Systematic Design）起源于20世纪中后期，该方法通过逻辑分解降低设计的复杂性，为规范化的工程设计提供了探索思路[22]。系统化设计方法包含了需求分析、概念生成和方案评估的设计体系，这种体系在前期进行需求分析时可以引入公理化设计来对复杂系统的功能进行拆解分析。

如图1所示，在功能需求分析阶段，公理化设计方法可以系统化地分解和映射系统中的多重功能需求，将其与具体的物理结构和部件一一对应，并建立清晰的功能需求-设计参数（FR-DP）对应关系和设计矩阵（Design Matrix）。通过该过程，能够在系统设计初期有效识别潜在的功能耦合关系和结构冲突，避免后期集成调试过程中的重复迭代和不必要的结构修改，从而实现结构和功能上的优化。



图1　公理系统化设计流程

完成需求分析和结构参数对应后，可以基于当前的结构参数建立形态学矩阵，涵盖不同类型的零部件使用情况[23]。之后完成系统化构型枚举，列举出当前条件下所有可能的设计方案，并剔除其中不合理的方案。最后通过结合使用场景和应用要求，建立评价指标和规则，通过偏好矩阵对枚举出的构型进行对比评估，评选出合适的设计方案[24]。

这种正向设计流程不仅能够提升系统设计效率和开发质量，还能够保证功能的完整性和结构的合理性，为高效开发、高性能集成及快速工程落地提供有力的理论支持和实践路径。

3　功能结构分析

驱制一体化角模块系统是一个具备复杂功能和结构的系统，为了分析其设计需求，需要从顶层功能需求开始分析，并逐步细化，将复杂的总体功能拆解为更易于实现和验证的子功能。本文根据驱制一体化角模块系统的设计需求出发，首先将其最顶层功能定义为如表1所示的几种类型，并将对应的结构参数定义为表2所示的内容，接下来逐步分解功能到更具体的层面。

表1　顶层功能分析

编号	描述
FR_1	实现驱动功能
FR_2	实现制动功能
FR_3	适应复杂工况

表2　顶层结构分析

编号	描述
DP_1	轮毂电机
DP_2	EMB制动系统
DP_3	重载适应性结构

3.1　驱动功能

根据角模块构型的应用场景和要求，可以对FR_1进行进一步分解，分解结果如表3所示。

表3　功能FR_1分解

编号	描述
FR_{11}	产生驱动扭矩
FR_{12}	降低转速增大扭矩
FR_{13}	实现驱动散热
FR_{14}	保持电机机械支撑稳定

对于重载商用车要求较高的驱动扭矩，减速器组件具有重要作用，同时在高扭矩输出时要提供良好的散热和稳固的支撑。针对上述分解可以分配对应的结构参数，如表4所示。

表4　结构DP_1分解

编号	描述
DP_{11}	轮毂电机转子、定子
DP_{12}	减速器组件
DP_{13}	电机散热管路
DP_{14}	轮毂电机外壳和安装架等

3.2　制动功能

为了适配驱制动一体化的角模块构型开发需求，本文采用的制动系统为EMB。

EMB是一种完全独立的电控制动执行单元，相较于传统液压制动系统，其无需主缸、液压管路、油泵及制动液等部件，能够以更高集成度直接布置于角模块内部，并与轮毂电机、减速器及其他关键部件共同构成完整的模块化总成。该方案不仅有助于简化整车制动系统的总体布局，减少空间占用和线束布置复杂度，还能够提升角模块结构的紧凑性、集成性与布置灵活性，更适合驱制动一体化构型的开发需求。因此对FR_2功能的分解如表5所示，与之对应的结构参数如表6所示。

表5　功能FR_2分解

编号	描述
FR_{21}	实现再生制动
FR_{22}	实现制动力执行
FR_{23}	实现制动力传递
FR_{24}	快速释放制动热能

表6　结构DP_2分解

编号	描述
DP_{21}	电机再生制动组件
DP_{22}	制动盘+制动钳
DP_{23}	EMB电机+传动组件
DP_{24}	制动盘通风结构

3.3　适应复杂工况

重载商用车通常需要在高速行驶、路面颠簸、频繁起停以及高温、低温、雨雪、泥泞等复杂工况下长时间连续运行，这对底盘系统及关键执行部件的可靠性、耐久性和环境适应性提出了较高要求。尤其对于集成轮毂电机、减速器、制动器以及转向和悬架机构的轮边角模块系统而言，各子系统之间耦合度高，一旦局部性能不足，可能进一步影响整车的动力输出、制动安全、操纵稳定性及持续运行能力。因此，轮边角模块应具备良好的复杂工况适应能力，以保证整车在多种运行条件下的动力性、安全性与运行可靠性。基于以上分析，对FR_3进行分解，如表7所示。

表7　功能FR_3分解

编号	描述
FR_{31}	承受大载荷和冲击
FR_{32}	抵御泥沙/水等环境干扰
FR_{33}	具备良好抗振能力

同时分解对应的结构参数DP_3，如表8所示。

表8　结构DP_3分解

编号	描述
DP_{31}	高强度轮毂、轴承总成和壳体
DP_{32}	高等级防护壳体和密封结构
DP_{33}	轮毂内减振结构组件

3.4　设计矩阵评估

根据公理化设计的域对应思路，本文对各层次的FRs和DPs之间的映射关系进行了表述。在设计层次的某一给定层级中，定义具体设计目标的一组功能需求可在功能域中表示为向量$\{\boldsymbol{FRs}\}$。与之对应，物理域中用于实现这些功能需求的设计参数，也可表示为向量$\{\boldsymbol{DPs}\}$。两个向量之间的关系表示为：

$$\{\boldsymbol{FRs}\}=[\boldsymbol{A}]\{\boldsymbol{DPs}\} \tag{1}$$

其中$[\boldsymbol{A}]$被定义为设计矩阵，具体到某个层级可以写作$\boldsymbol{FR}_i=\boldsymbol{A}_{ij}\boldsymbol{DP}_j$，当$\boldsymbol{FRs}$中的变化与$\boldsymbol{DPs}$中的变化相关联时，设计矩阵的参数可以表示为$\boldsymbol{A}_{ij}=\partial\boldsymbol{FR}_i/\partial\boldsymbol{DP}_j$。为满足独立性公理，设计矩阵$[\boldsymbol{A}]$必须为对角矩阵或三角矩阵的形式。当设计矩阵$[\boldsymbol{A}]$为对角矩阵时，表示每

个功能需求（FR）都可以通过唯一的设计参数（DP）独立满足，此时设计被称为解耦设计。在此情况下，设计中的每个FR之间互不影响，便于在后续设计优化和系统调试中灵活调整单独参数而不破坏其他功能需求的满足。当设计矩阵[$\boldsymbol{A}$]为三角矩阵时，意味着虽然DP与FR之间存在一定的依赖关系，但只要按照适当的顺序对DP进行调整，也可以保证FR之间的独立性，这类设计被称为顺序解耦设计，在实际复杂系统中是可接受的设计方案。若设计矩阵[$\boldsymbol{A}$]为全耦合形式，说明设计参数之间相互影响，调整一个DP会同时影响多个FR，无法保证功能需求的独立实现，这类设计被称为耦合设计，应在设计优化中予以避免。

通过上述分析，本文进行的构型设计矩阵映射关系可对应为：

$$\begin{Bmatrix} \boldsymbol{FR}_1 \\ \boldsymbol{FR}_2 \\ \boldsymbol{FR}_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \boldsymbol{DP}_1 \\ \boldsymbol{DP}_2 \\ \boldsymbol{DP}_3 \end{Bmatrix} \tag{2}$$

$$\begin{Bmatrix} \boldsymbol{FR}_{11} \\ \boldsymbol{FR}_{12} \\ \boldsymbol{FR}_{13} \\ \boldsymbol{FR}_{14} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \boldsymbol{DP}_{11} \\ \boldsymbol{DP}_{12} \\ \boldsymbol{DP}_{13} \\ \boldsymbol{DP}_{14} \end{Bmatrix} \tag{3}$$

$$\begin{Bmatrix} \boldsymbol{FR}_{21} \\ \boldsymbol{FR}_{22} \\ \boldsymbol{FR}_{23} \\ \boldsymbol{FR}_{24} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \boldsymbol{DP}_{21} \\ \boldsymbol{DP}_{22} \\ \boldsymbol{DP}_{23} \\ \boldsymbol{DP}_{24} \end{Bmatrix} \tag{4}$$

$$\begin{Bmatrix} \boldsymbol{FR}_{31} \\ \boldsymbol{FR}_{32} \\ \boldsymbol{FR}_{33} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \boldsymbol{DP}_{31} \\ \boldsymbol{DP}_{32} \\ \boldsymbol{DP}_{33} \end{Bmatrix} \tag{5}$$

根据上述公式可以判断，当前划分的功能和结构参数之间的设计矩阵全部为对角矩阵或者三角矩阵，也就是当前的设计为顺序解耦设计，满足独立性公理要求，可以进行后续的构型枚举和评估。

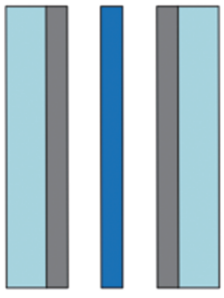
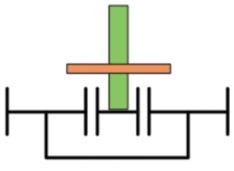
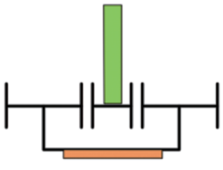
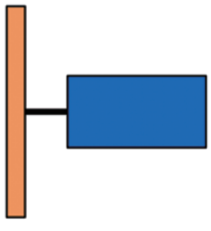
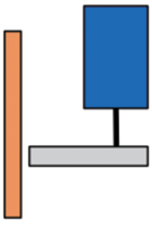
4　驱制一体化构型方案构建

经过功能和结构参数分析，已经基本确定了驱制一体化构型的功能需求和对应的具体构件，接下来需要构建形态学矩阵，以便形成构型枚举。

首先根据对构型方案影响的大小筛选核心的结构参数，比如角模块中的减振组件和散热管路等不会对整体构型空间形态产生明显影响，因此在后续构型枚举时暂不考虑。在制定形态学矩阵时，既要尽可能涵盖实现子功能的潜在机构种类，又要便于区分各个可能方案。经过筛选，保留的底层结构参数为DP_{11}（轮毂电机转子、定子），DP_{12}（行星减速器组件）和DP_{23}（EMB电机+传动组件）。

参考目前的常见布置方式，DP_{11}参数中轮毂电机的电机磁场方向可以包含径向、轴向两个类型，DP_{12}参数的行星减速器组件可以按布置方式分为将驱制动系统布置在同一侧或异侧，DP_{23}参数可以按EMB电机布置的位置分为轴向、径向，具体结果如表9所示。

表9　结构参数形态

结构参数	形态1	形态2
DP_{11}	 径向磁场	 轴向磁场
DP_{12}	 驱制动同侧	 驱制动异侧
DP_{13}	 轴向布置	 径向布置

为了便于后续表述，本文使用编号0和1代表每个结构参数对应的形态1和形态2，进而可以使用3个数字的组合来表示一种构型方案，对于一种组合方案下的不同空间布置方式，可以用后缀编号来区分，因此每个构型方案的表示方法为XXX-i，XXX为前述的部件形态的二进制数组合，i为不同空间布置方式下的位置变型序号。

在所选结构参数中，轮毂电机类型对整体构型影响最大，因此分别基于轴向磁场电机与径向磁场电机进行位置变型枚举。对于轴向磁场电机，由于其转子平面与驱动轴线垂直，较易与制动盘实现集成布置，常通过在转子侧安装制动钳来简化结构并缩短轴向尺寸，同时制动盘也可根据空间需求布置于电机内侧或外侧。除此之外，单定子与双定子等不同拓扑形式也会显著影响空间分配、传力路径及部件布局，使轴向磁场电机构型具有更高的多样性。

EMB系统方面，轴向布置通常更适用于滚珠丝杠式结构，径向布置则主要考虑楔形自增力式或凸轮式结构，以适应不同安装空间和制动执行需求。减速器的布置方式则与制动器位置密切相关：同侧布置有利于实现紧凑集成和扭矩放大，但散热压力相对较大；异侧布置则有利于将制动盘布置在更靠近轮毂的位置，从而改善散热条件，并提升后续维护与拆装的便利性。最终构型枚举如表10和表11所示。需要说明的是，表中构型示意图主要展示各部件的大致布置方案，不能完全反映实际空间尺寸特征，部分构型由于重复度较高，或在结构实现方面存在较大困难，因此不纳入考虑范围。这样处理有助于在保证构型覆盖性的同时，提高方案枚举与后续分析的针对性和有效性。

表10　轴向磁场轮毂电机构型

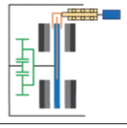
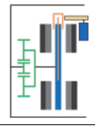
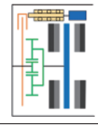
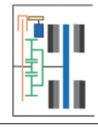
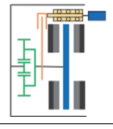
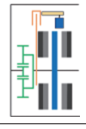
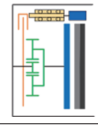
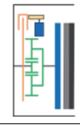
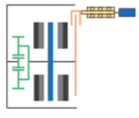
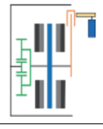
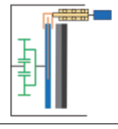
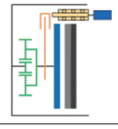
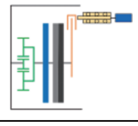
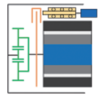
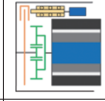
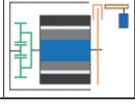
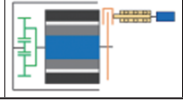
组合	100	101	110	111
位置1				
位置2				
位置3				
位置4				
位置5				
位置6				

表11　径向磁场轮毂电机构型

组合	001	000	011	010
位置1				
位置2				

5　构型评估与选择

概念设计阶段进行的枚举难以对构型的应用潜力进行评价，因此本文选择使用偏好矩阵来量化各构型的特点以进行比较。针对上文方案构建中提到的构型，选取一部分有代表性的构型来进行偏好矩阵对比。构型的选取中要尽可能考虑实际应用中存在的设计方案，也要保留枚举方法的优势，尽量保留多个类型的方案来探索新的设计可能。因此最终选取的构型为100-1，100-2，100-3，100-6，101-1，101-3，110-1，111-1，001-1，001-2，000-1，000-2，011-1，010-1共16种，并依次赋予一个独立编号来进行后续的对比。

驱制动一体化构型在实际应用时，面临的主要挑战包括轮边布置空间有限、高度集成化的结构不利于散热等，因此在进行构型评估时，本文选择从轴向布置空间、径向布置空间和散热性能3个方面进行对比和评价。

轴向布置空间主要考虑构型在车轮轴向方向上所需的空间，这一指标直接影响轮距设计和悬架行程布置，轴向布置空间越小，越有利于节约底盘中部空间，用于其他设备的安装，提高空间利用效率，同时也能够实现低地板结构，方便装卸货物或上下乘客。同时长轴向尺寸的驱制一体化构型会使质量分布更远离车体悬架固定点，增加转动惯量，不利于提升舒适性。

径向布置空间主要考虑在轮辋平行面所需的布置空间，径向布置空间过大会增加结构质量，增加转动惯量，影响部分运动学性能，同时在轮辋内布置时有更大的难度，容易造成部件之间的干涉。

散热性能主要考虑构型整体的散热能力，针对驱制动一体化构型，其制动器和轮毂电机是整车中发热较多的部件，制动器温度过高会导致制动效能显著下降，甚至面临热失效风险，而电机温度过高可能导致内部磁场失效和工作效率降低。

根据工程经验和选取的结构参数特征，本文初步定义几个评价规则，如表12所示，需要注意的是这些规则只代表了部分评价标准，对构型整体的评价需要综合考虑各方面因素叠加的结果。在布置空间方面，电机形态的影响最大，轴向磁场电机可以显著减少轴向空间占用，同时也会增加径向空间占用，EMB形态和制动器的布置位置对空间占用的影响相对较小。

在散热性能方面，轴向磁场轮毂电机可以用更大的散热面积并且通风效果更好，但是其散热结构设计更加复杂，且径向磁场轮毂电机的散热结构应用案例更多，经过合理的设计也能实现较好的散热效果，因此在散热性能方面轴向磁场轮毂电机略优于径向磁场轮毂电机。EMB系统中使用滚珠丝杠的轴向布置结构散热性能略强于使用楔形自增力或凸轮传动的径向布置结构，但是

差别较小。制动盘处于轮毂电机内侧的设计由于远离轮毂，通风效率较低，因此散热性能不如将制动盘布置在靠近轮毂端的构型。

表12　评价指标和内容

评价指标	评价规则
轴向布置空间	轴向磁场轮毂电机优于径向磁场轮毂电机 制动盘和轮毂电机转子共用同一构件优于独立制动盘构型 EMB电机径向布置优于EMB电机轴向布置
径向布置空间	径向磁场轮毂电机优于轴向磁场轮毂电机 EMB电机轴向布置优于EMB电机径向布置
散热性能	轴向磁场轮毂电机略优于径向磁场轮毂电机 EMB电机轴向布置略优于EMB电机径向布置结构 制动盘靠近轮毂端的构型优于制动盘处于轮毂电机内侧的构型

确立了这些评价规则后，针对选出的构型进行对比，并建立偏好矩阵。每个偏好矩阵由一列候选方案和其右侧的一个三角形矩阵构成。按表格的延伸方向，每个三角矩阵的元素对应两个左侧的候选方案，该元素的值代表了在对比中更优构型的编号，若其值为“—”，则表示无法判断或相差较小。通过逐一进行对比，将对比结果填满三角形矩阵后，即可完成所有方案的两两对比，通过统计每个方案编号出现的次数，可以判断各方案在某一评价指标下的表现。根据如图2、图3、图4所示的偏好矩阵结果，可以得到如图5所示的统计结果。

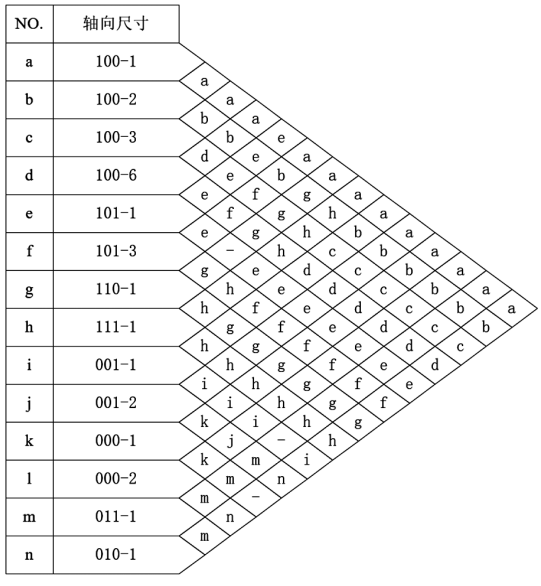


图2　基于轴向空间的偏好矩阵

在轴向尺寸方面，方案a和e的评分高于其他方案，这是因为这两个构型将制动盘和轴向磁场轮毂电机的转子进行了集成，减少了多余部件，同时也得益于轴向磁场电机本身较小的轴向尺寸，进一步缩小了轴向空间占用。并且采用了径向磁场轮毂电机的方案中由于难以将制动盘集成到电机中，且径向磁场轮毂电机的轴向尺寸相对更大，因此普遍在轴向空间占用评估中处于劣势。

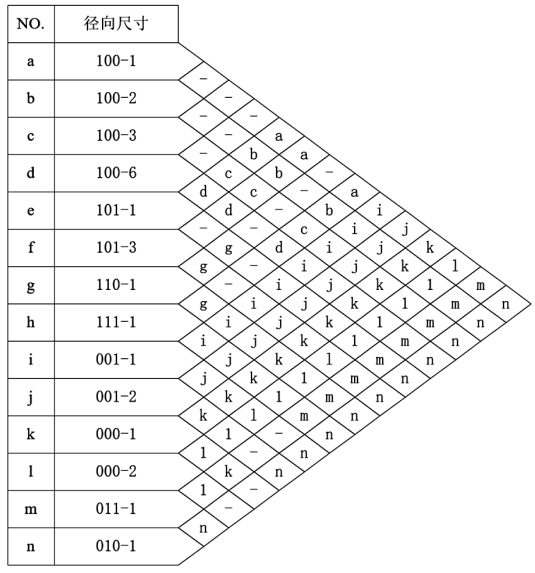


图3　基于径向空间的偏好矩阵

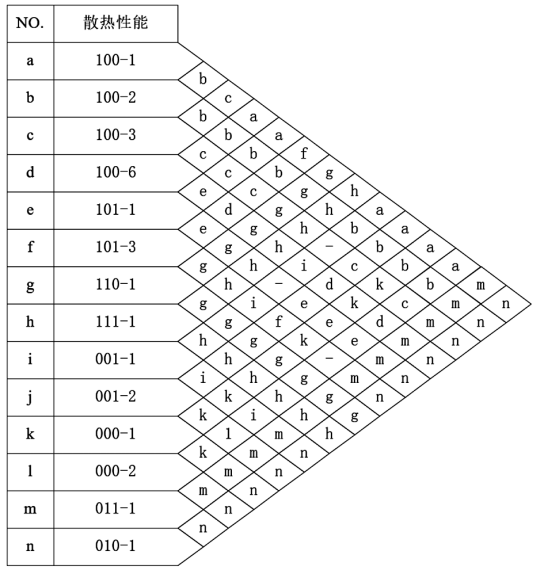


图4　基于散热性能的偏好矩阵

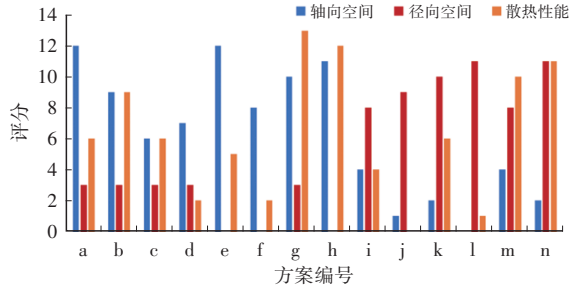


图5　方案评分对比

在径向尺寸方面，采用径向磁场轮毂电机的方案评分普遍较高，这是因为径向尺寸主要由电机本体外径决定，且受制动器、悬架等其他部件布置的影响相对较小，因此轮毂电机型号及其布置方式成为了主要影响因素。

同时可以观察到方案e、f和h的评分为0，说明这几个方案的径向空间占用较大，难以在对比评估中取得优势，在径向空间受限的实际应用场景中，应避免采用类似的构型。

在散热性能方面，可以观察到方案g和h的评分最高，这是因为这两个方案采用了轴向磁场轮毂电机并将制动盘布置在靠近轮毂的一侧，此类方案有利于散热。同时可以观察到方案j的评分最低，可以证明这种构型的散热难度大，散热系统不易于设计。

综合考虑多个指标下的评分，可以得出结论，方案a、方案g和方案m较为合理，可以被选为较优构型进行进一步设计。同时也可以发现a和g两个构型的径向空间占用较大，构型m的轴向空间占用较大，实际部署时可以综合考虑其他部件如悬架和转向机构的占用，以确定具体构型进行进一步优化。

6 结束语

本文提出了一种基于公理系统化设计的正向设计方法，构建了角模块构型中驱制一体化系统的功能结构分析矩阵和形态学矩阵，并通过枚举和筛选构型得到16种方案，再通过建立偏好矩阵进行了对比，最终选出几个较合适的构型作为进一步研究的重点。本文提出的方法可以显著提升角模块构型中驱制一体化构型的设计效率，探索了正向设计思路下的构型设计路线和设计空间，所提出的驱制动一体化构型能够支持设计方案的优化和改进，未来还可以进一步引入AI设计方法，实现更加全面的智能化设计。

参 考 文 献

[1] 杨殿阁, 刘辉, 殷国栋, 等. 分布式电驱动车辆现状与发展趋势[J]. 前瞻科技, 2025, 4(2): 84-98.
YANG D G, LIU H, YIN G D, et al. Current Status and Development Trends of Distributed Electric Drive Vehicles[J]. Science and Technology Foresight, 2025, 4(2): 84-98.

[2] 高镇海, 张汉英, 陈国迎, 等. 汽车底盘设计方法研究进展与发展建议[J]. 前瞻科技, 2025, 4(2): 58-72.
GAO Z H, ZHANG H Y, CHEN G Y, et al. Research Progress and Development Suggestions of Automotive Chassis Design Methods[J]. Science and Technology Foresight, 2025, 4(2): 58-72.

[3] 王其光. 扇形模组轴向磁场轮毂电机研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
WANG Q G. Study on Axial-Flux In-Wheel Motor with Fan-Shaped Module[D]. Changchun: Jilin University, 2023.

[4] 王清华，贺先兵，王英喆，等. 轮毂电机内置刹车系统: CN212667341U[P]. 2021-03-09.
WANG Q H, HE X B, WANG Y Z, et al. Wheel Hub Motor with Built-In Braking System: CN212667341U[P]. 2021-03-09.

[5] 马国清, 冯居辉, 王其光, 等. 一种轮毂电机驱动系统: CN112498087A[P]. 2021-03-16.
MA G Q, FENG J H, WANG Q G, et al. A Hub Motor Drive System: CN112498087A[P]. 2021-03-16.

[6] 陈锋, 马志敏, 傅直全, 等. 一体化具有减速机构的驱制动轮毂电机总成: CN112377603B[P]. 2024-11-19.
CHEN F, MA Z M, FU Z Q, et al. Integrated Drive-Brake Hub Motor Assembly with Reduction Gear Mechanism: CN112377603B[P]. 2024-11-19

[7] 陈锋, 汤充, 马志敏, 等. 集成盘式轮毂电机与减速器的驱制动一体化电动轮及汽车: CN111845319B[P]. 2022-03-18.
CHEN F, TANG C, MA Z M, et al. Integrated Disc Hub Motor and Reduction Gear Drive-Brake Integrated Electric Wheel and Automobile: CN111845319B[P]. 2022-03-18.

[8] 李建秋, 胡家毅, 蔡炳坤, 等. 一种集成轮毂电机的电动轮总成: CN108340768A[P]. 2018-07-31.
LI J Q, HU J Y, CAI B K, et al. An Electric Wheel Assembly with an Integrated Hub Motor: CN108340768A[P]. 2018-07-31.

[9] 邹渊, 张旭东, 董玉刚, 等. 一种集成有减震器的盘式轮毂电机: CN111478503B[P]. 2021-03-23.
ZHOU Y, ZHANG X D, DONG Y G, et al. A Disc Hub Motor with Integrated Shock Absorber: CN111478503B[P]. 2021-03-23.

[10] KELLER F, UBSTADT W. Electromagnetic Wheel Brake Device: US6536561B1[P]. 2003-03-25.

[11] SCHWARZ R, KILIAN P, SEMSCH M, et al. Disc Brake Which Can Be Actuated Electromechanically: US6230854B1[P]. 2001-05-15.

[12] SCHWARZ R. Electromechanically Actuated Disc Brake: US6315092[P]. 2001-11-13.

[13] JOHANN J B, STEFAN S, ELTVILLE. Actuating Unit for an Electromechanically Actuated Disc Brake: US6752249B1[P]. 2004-06-22.

[14] SIM D G, SHIN C S. Electro-Mechanical Brake Device: KR20170070894A[P]. 2017-06-23.

[15] MICHAEL P. Electrically Actuated Friction Brake: EP1798123B1[P]. 2018-05-15.

[16] 严旻, 严周栋, 陈辛波. 凸轮式电子机械制动器和车辆: CN116592076A[P]. 2023-08-25.
YAN M, YAN Z D, CHEN X B. Cam Type Electromechanical Brake and Vehicle: CN116592076A[P]. 2023-08-25.

[17] 严周栋, 严旻, 陈辛波. 基于单向自锁机构进行间隙调整

的电子机械制动器: CN117489729A[P]. 2024-02-02.
YAN Z D, YAN M, CHEN X B. Electronic Mechanical brake: for Adjusting Gap Based on Unidirectional Self-Locking Mechanism: CN117489729A[P]. 2024-02-02.
[18] LI C C, ZHUO G R, TANG C, et al. A Review of Electro-Mechanical Brake (EMB) System: Structure, Control and Application[J]. Sustainability, 2023, 15(5): 4514.
[19] 赵洵, 张哲, 马怡平, 等. 一种应用于重型车辆的电子机械制动系统: CN114715107A[P]. 2022-07-08.
ZHAO X, ZHANG Z, MA Y P, et al. An Electronic Mechanical Braking System for Heavy-Duty Vehicles: CN114715107A[P]. 2022-07-08.
[20] HÖFER A, ZEITVOGEL D, FRIEDRICH H E, et al. Holistic View of Chassis, Powertrain and Driving Dynamics Control[J]. ATZ Worldwide, 2015, 117(4): 48-53.
[21] SUH N P. Axiomatic Design Theory for Systems[J]. Research in Engineering Design, 1998, 10(4):189-209.
[22] BEITZ W, PAHL G, GROTE K. Engineering Design: A Systematic Approach[M]. 3rd ed. London, England: Springer, 2007.
[23] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. Systematic Approach to the Design of Technical Systems and Products: VDI2221[S]. Berlin: Beuth Verlag, 1987.
[24] ADAMS K M. Non-Functional Requirements in Systems Analysis and Design[M]. Cham: Springer, 2015.

（责任编辑　王　一）
修改稿收到日期为2025年11月22日。

《汽车文摘》征文

《汽车文摘》（月刊）于1963年7月3日创刊，由国务院国有资产监督管理委员会主管、中国第一汽车集团有限公司主办，为中国汽车工程学会会刊。《汽车文摘》以“览全球汽车技术文献，指中国汽车技术之道”为使命，以打造“中国汽车前沿与创新技术传播与交流的重要平台”为愿景，致力于成为汽车领域最具影响力的综述类期刊。

《汽车文摘》深耕电动化、智能化、网联化、共享化和智能制造5大方向和10大领域，聚焦新能源、燃料电池与混合动力汽车、智能网联汽车、氨氢融合零碳和碳中性燃料、汽车安全、健康与舒适、碳达峰与碳中和、生命周期评价（LCA）与技术经济分析、智能制造、材料轻量化与一体化压铸、飞行汽车前沿与创新技术综述论文，揭示相关领域的新动态、新趋势、新技术和新进展，为广大科研和工程技术人员进一步发展这一领域提供新突破口、新出发点和新基准。

欢迎高等院校师生、研发工程技术人员、技术管理人员，充分发挥专业领域优势，深度挖掘国内外高影响力学术期刊与其它文献，形成某个技术领域前沿综述。

《汽车文摘》选题范围：

电动化：混合动力关键技术；动力电池关键技术；先进充电技术；电驱动系统及电力电子技术；智能底盘及子系统线控关键技术；燃料电池动力系统设计与优化。

智能化：新型电子电气架构；自动驾驶感知、决策与运动控制；智能新能源汽车测试评价方法与工具链；车辆智能安全技术。

网联化：智能网联云控技术；车用通信及网络技术；车路协同技术；汽车人因、人机交互与智慧座舱；信息安全与预期功能安全；车网融合（V2G）及应用。

低碳化：汽车节能与排放技术；清洁能源动力系统技术；碳达峰、碳中和；氢燃料制、储、运、加及安全管控技术；生命周期评价（LCA）、标准法规与技术经济分析；氨氢融合零碳和碳中性燃料。

轻量化：新能源汽车新材料技术；混合材料轻量化设计；一体化压铸。

共享化：区块链技术与移动出行；车辆大数据挖掘方法与应用案例。

燃料电池：电池堆、电池系统与基础设施。

智能制造：机器人与自动化控制、四大工艺、物流技术、设计-制造-服务。

颠覆式出行：飞行汽车；未来低空智能交通体系及其关键技术。

汽车安全：主被动安全与融合；智能安全；健康与舒适。

《汽车文摘》发表论文的独特优势：

《汽车文摘》是国家级刊物、中国汽车工程学会会刊、汽车领域唯一的综述期刊。《汽车文摘》不收版面费、4个月左右可发稿。

投稿要求：

1. 综述篇幅在10 000～15 000字（6~10页），图文并茂，图、表和公式非原创要求标注引用文献；

2. 请按科技论文要求撰写文章摘要，摘要中文字数约200字；

3. 文章必须附有公开发表、体现本领域最新研究成果和高影响力出版物作为参考文献，一般要求参考文献在20篇以上，一半左右为外文参考文献，且在文中标注所引用文献；

4. 来稿保密审查工作由作者单位负责，确保署名无争议，文责自负；

5. 切勿一稿多投。

《汽车文摘》投稿网址：http://www.qcwz.cbpt.cnki.net

邮箱：autodigest@faw.com.cn

《汽车文摘》编辑部