

面向车载运输环境的超导磁体三维冷质量支撑系统空间姿态优化*

郑义川¹⁾²⁾ 徐策^{1)†} 王晖¹⁾ 陈顺中¹⁾ 程军胜¹⁾³⁾ 王秋良¹⁾

1) (中国科学院电工研究所, 超导磁体及强磁场应用研究部, 北京 100190)

2) (华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

3) (齐鲁中科电工先进电磁驱动技术研究院, 济南 250102)

(2025年7月9日收到; 2025年9月2日收到修改稿)

为提升超导磁体的抗冲击能力, 使其适用于车载运输环境, 本文进行了磁体三维冷质量支撑系统动载模型的推导, 结合方向余弦平方和公式与高速公路卡车振动环境构造边界条件, 通过引入应力差异的惩罚项对悬挂结构空间倾角进行优化. 经过分析, 在最优倾角分布下, 冷质量支撑系统共呈现四类不同装配方式的空间姿态. 结合车载运输激励频段分布, 本文基于最大化一阶固有频率的原则设计出最优姿态, 并确定了该姿态下悬挂结构的预紧力上下限. 最后通过有限元仿真研究了高速公路谱随机振动激励下超导磁体的同轴度和应力变化特征. 结果表明, 当悬挂结构的三维空间角度为 31.22° , 68.50° 和 68.50° 时, 磁体力学性能达到最佳. 该角度分布对应的最优空间姿态具有 125.99 Hz 的一阶固有频率. 仿真结果显示, 在高速公路谱随机振动激励下, 超导磁体同轴度变化量小于 0.1 mm, 最大 von Mises 应力出现于碳纤维拉杆根部, 其值远低于碳纤维复合材料的强度极限, 表明该冷质量支撑系统满足车载运输环境的设计要求.

关键词: 超导磁体, 冷质量支撑系统, 空间姿态, 随机振动

DOI: 10.7498/aps.75.20250894

CSTR: 32037.14.aps.75.20250894

1 引言

超导磁体是运用超导体来产生强磁场或特定磁场位形的装置, 其主要利用超导体在强磁场中的无阻载流特性, 在粒子加速器、磁共振成像 (MRI)、核磁共振 (NMR) 和超导磁体储能等领域得到广泛应用^[1-4]. 相应超导磁体的冷质量支撑结构已有诸多研究^[5,6]. 拉杆组件是保证磁体在各种特殊的应用环境下性能稳定的关键, 在材料选取方面, 所选材料需同时具备高强度和低导热系数的特点, 如玻璃纤维增强塑料 (GFRP)^[7,8]、钛合金^[9] 和碳纤维增强复合材料 (CFRP)^[10] 等. 在结构设计方面, 常

见的拉杆形式有杆状和跑道型两种, 跑道型拉杆一般用于大型磁体, 多由 GFRP 绕制成型, 具有装配灵活、自适应性强和不易损坏等特点; 杆状拉杆常见于小型磁体, 多由玻璃纤维或者碳纤维卷制的细杆组合成型, 具有结构强度高、漏热小和弹性模量高等特点^[11].

近年来已有诸多学者对拉杆空间姿态进行了研究. Li 等^[12] 结合三维拉杆的力和扭矩平衡, 详细地推导了超导磁体在垂向、轴向和径向承受加速度冲击时拉杆受力与空间倾角的关系, 但他们在进行垂向动载分析时, 并未考虑冷质量系统的自重对拉杆受力的影响; Zhang 等^[13] 针对二维冷质量支撑系统中径向拉杆的布置角度进行优化, 即对该拉

* 国家自然科学基金 (批准号: 52325701, 52293421, 52293422) 和齐鲁中科电工先进电磁驱动技术研究院科研基金项目资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xc@mail.iee.ac.cn

杆与横向坐标轴所成角 θ 进行优化. 由于径向拉杆承受垂直和水平方向的载荷, 优化过程仅需考虑在垂向冲击载荷和横向冲击载荷作用下不同 θ 角对应的径向拉杆的应力. 且优化过程边界条件单一, 只进行了应力上限的约束, 并未考虑固有频率的约束限制. Zhang 等^[14] 主要对三维冷质量支撑系统中上端四根拉杆空间倾角设计的边界条件进行推导, 并未进行目标函数的设计以优化空间角度. 且在边界条件推导过程中仅以冷质量重力为上端拉杆的自然预紧力, 并未考虑超导磁体经历各种复杂工况时出现拉杆承受压缩载荷的情况, 工程实用价值有待提升; Huang 等^[15] 主要对三维冷质量支撑系统拉杆布置角度进行设计. 由于所研究磁体的孔径巨大, 冲击载荷成为拉杆的最大受力源, 故该文在角度设计过程中忽略重力、预紧力和冷缩力的影响, 仅以动载为依据. 其设计结果仅适用于一部分磁体, 且设计过程未考虑固有频率的约束限制, 工程实用价值有待提升.

针对上述问题, 本文基于 Li 等^[12] 和 Huang 等^[15] 的模型, 首先结合冷质量自重对拉杆应力的影响, 推导在垂向冲击载荷作用下拉杆的应力公式, 并引入应力差异的惩罚项构造目标函数, 结合方向余弦平方和公式与高速公路卡车振动环境构造边界条件, 进行拉杆空间倾角的优化. 优化过程同时考虑了冲击载荷、多向冲击、振动环境等影响超导磁体远距离集成车载运输安全性和可靠性的复杂因素, 优化结果对该类磁体具有一定的普适性. 在最优倾角分布下, 冷质量支撑系统会呈现四类不同装配方式的空间姿态, 本文通过有限元方法进行模态分析, 提出一种以最大化一阶固有频率的原则进行空间姿态设计的方法. 最后针对高速公路运输的振动环境开展随机振动仿真, 在磁体本体组件轴线和室温管轴线的两端建立参考点, 对振动过程中参考点的位移响应功率谱密度 (PSD) 曲线及响应均方根值 (RMS) 进行分析. 分析结果为超导磁体在远距离集成车载运输环境下的结构安全稳定提供理论指导和数据支撑.

2 理论分析

2.1 冷质量支撑系统设计

冷质量支撑系统示意图如图 1 所示, 其中冷质量自重 $m = 100 \text{ kg}$, 8 根拉杆对称分布, 每根拉杆

主体由 9 根碳纤维 T700 棒制成, 集成 4.2 K 过渡套、50 K 热拦截、拉力传感器、波纹管、球形螺母及相应紧固件. 支撑结构选用碳纤维杆状拉杆配合万向节的形式, 具有抗拉强度大、弹性模量高、能抵抗一定的横向载荷等优点. 设计参数在表 1 列出.

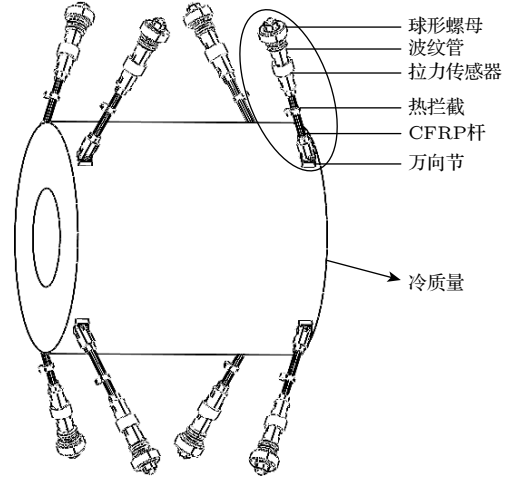


图 1 冷质量支撑系统示意图

Fig. 1. Schematic of cold mass support system.

表 1 拉杆设计参数

Table 1. Design parameters of tie rods.

| 参数名称 | 符号表示 | 参数值 |
|--------------------------|----------|--------|
| 拉杆长度/mm | L_c | 245 |
| 碳纤维杆的长度/mm | L | 115 |
| 单根碳纤维棒的直径/mm | d | 2 |
| 碳纤维杆横截面积/mm ² | A | 9π |
| 碳纤维T700的弹性模量/GPa | E | 230 |
| 碳纤维T700的抗拉强度/MPa | σ | 4900 |

2.2 应力分析

由于拉杆主要受沿杆长方向的拉力, 在垂直于杆长方向受力几乎为零^[15], 因此本文在进行应力分析时忽略横向应力的影响. 超导磁体在远距离集成车载运输时, 须具备一定的动态环境适应能力^[16], 要求磁体在轴向和横向能够承受值为 $3g$ 的冲击载荷, 由于垂直方向更加危险, 在恶劣的运输条件下, 在该方向须能承受 $5g$ 冲击载荷, g 指重力加速度. 此外, 由于拉杆只能承受拉伸载荷不能承受压缩载荷^[12], 且上端拉杆承受冷质量的重力, 工程中往往更加关心上端拉杆的最大应力 $\sigma_{u \max}$ 与下端拉杆的最小应力 $\sigma_{d \min}$, 需满足:

$$\begin{cases} \sigma_{u \max} \leq [\sigma], \\ \sigma_{d \min} \geq 0. \end{cases} \quad (1)$$

其中 $[\sigma]$ 表示碳纤维 T700 的许用应力, 由材料强度 σ 和安全裕度 n 决定.

超导磁体处于低温环境时, 冷质量系统中的组件会根据材料特性发生不同程度的收缩, 导致拉杆应力增大. 设单根拉杆与垂向 (Y)、轴向 (X) 和横向 (Z) 坐标轴所成锐角分别为 α , β 和 γ , 则有

$$\cos^2\alpha + \cos^2\beta + \cos^2\gamma = 1.$$

低温稳定状态下, 上下拉杆的应力 σ_u 和 σ_d 分别为

$$\begin{cases} \sigma_u = \frac{F_u}{A} = \frac{1}{4} \cdot \frac{mg}{A \cos \alpha} + \frac{F_c}{A} + \frac{F_p}{A}, \\ \sigma_d = \frac{F_d}{A} = \frac{F_c}{A} + \frac{F_p}{A}. \end{cases} \quad (2)$$

其中, F_c 是磁体从 285 K 降温到 4.2 K 后拉杆额外增加的冷缩力, 为确保拉杆只承受拉伸载荷还需对其施加 F_p 的预紧力.

本文进行磁体低温超导状态动载分析, 并以磁体承受垂直向上的 $5g$ 加速度载荷为例进行模型的构建. 做如下假设:

- 1) 冷质量和杜瓦都为刚体;
- 2) 忽略冲击载荷对拉杆空间倾角造成的微小变化.

当加速度垂直向上时, 冷质量具有向下的位移 Δl . 简化模型如图 2 所示. 此时上端拉杆被拉伸, Y 向形变量为 Δl , 下端拉杆被压缩, Y 向形变量为 $-\Delta l$. 所有拉杆变形的 Y 向分量之和与磁体不承受冲击载荷时的值相等.

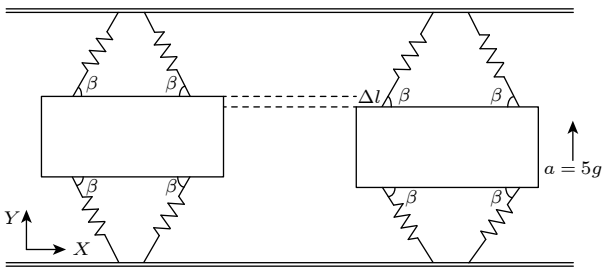


图 2 加速度简化模型

Fig. 2. Acceleration simplified model.

设磁体承受垂直向上 $5g$ 加速度冲击时, 上下拉杆的受力分别为 F_{uy+} 和 F_{dy+} , 结合受力平衡得

$$\begin{cases} \frac{F_{uy+}}{K} + \frac{F_{dy+}}{K} = \frac{F_u}{K} + \frac{F_d}{K}, \\ 4F_{uy+} \cos \alpha - 4F_{dy+} \cos \alpha = ma_y + mg, \\ \sigma_{uy+} = \frac{F_{uy+}}{A}, \quad \sigma_{dy+} = \frac{F_{dy+}}{A}. \end{cases} \quad (3)$$

其中, K 为拉杆的刚度, 计算公式为

$$K = EA/L. \quad (4)$$

求解得

$$\begin{cases} \sigma_{uy+} = \frac{1}{4} \cdot \frac{mg}{A \cos \alpha} + \frac{F_c}{A} + \frac{F_p}{A} + \frac{5mg}{8A \cos \alpha}, \\ \sigma_{dy+} = \frac{F_c}{A} + \frac{F_p}{A} - \frac{5mg}{8A \cos \alpha}. \end{cases} \quad (5)$$

设磁体承受垂直向下 $5g$ 加速度冲击时, 上下拉杆的受力分别为 F_{uy-} 和 F_{dy-} , 结合受力平衡得

$$\begin{cases} \frac{F_{uy-}}{K} + \frac{F_{dy-}}{K} = \frac{F_u}{K} + \frac{F_d}{K}, \\ 4F_{dy-} \cos \alpha - 4F_{uy-} \cos \alpha = ma_y - mg, \\ \sigma_{uy-} = \frac{F_{uy-}}{A}, \quad \sigma_{dy-} = \frac{F_{dy-}}{A}. \end{cases} \quad (6)$$

求解得

$$\begin{cases} \sigma_{uy-} = \frac{1}{4} \cdot \frac{mg}{A \cos \alpha} + \frac{F_c}{A} + \frac{F_p}{A} - \frac{5mg}{8A \cos \alpha}, \\ \sigma_{dy-} = \frac{F_c}{A} + \frac{F_p}{A} + \frac{5mg}{8A \cos \alpha}. \end{cases} \quad (7)$$

综上所述, 当超导磁体承受垂直方向 $5g$ 的加速度载荷时, 上端拉杆承受应力最大值为 σ_{uy+} , 下端拉杆承受应力最小值为 σ_{dy+} .

由 Li 等^[12] 可知, 当磁体承受轴向 $3g$ 的加速度冲击时, 上端拉杆的最大应力和下端拉杆的最小应力分别为

$$\begin{cases} \sigma_{uz \max} = \frac{1}{4} \cdot \frac{mg}{A \cos \alpha} + \frac{F_c}{A} + \frac{F_p}{A} + \frac{3mg}{8A \cos \beta}, \\ \sigma_{dz \min} = \frac{F_c}{A} + \frac{F_p}{A} - \frac{3mg}{8A \cos \beta}. \end{cases} \quad (8)$$

当磁体承受横向 $3g$ 的加速度冲击时, 上端拉杆的最大应力和下端拉杆的最小应力分别为

$$\begin{cases} \sigma_{uz \max} = \frac{1}{4} \cdot \frac{mg}{A \cos \alpha} + \frac{F_c}{A} + \frac{F_p}{A} + \frac{3mg}{8A \cos \gamma}, \\ \sigma_{dz \min} = \frac{F_c}{A} + \frac{F_p}{A} - \frac{3mg}{8A \cos \gamma}. \end{cases} \quad (9)$$

2.3 固有频率

当外部激励频率与系统的固有频率接近或相等时, 系统会发生共振现象, 导致振动响应幅值显著增大. 图 3 给出了卡车在高速公路行驶时的振动环境, 由图可知, 垂向、横向和轴向振动的功率谱密度峰值分别出现在 10—40 Hz, 20—30 Hz 和 10—20 Hz 范围内. 为保证冷质量支撑系统的动态稳定性, 其垂向固有频率应大于 40 Hz, 横向固有频率应大于 30 Hz, 轴向固有频率应大于 20 Hz.

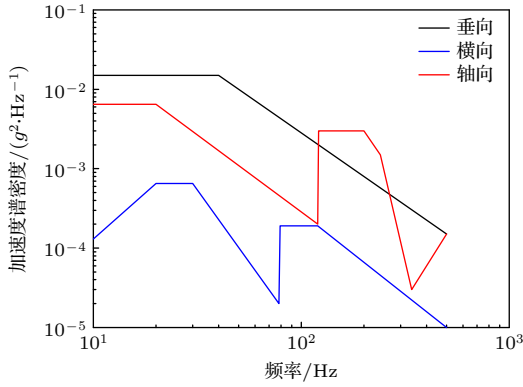


图 3 高速公路卡车振动环境

Fig. 3. Vibration environment of trucks on expressways.

对于复杂多自由度三维冷质量支撑系统, 其在垂向、轴向和横向振动的固有频率表达式为^[13,17,18]

$$f_i = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{NK \cos^2 i}{m}}, \quad (10)$$

其中 $i = \alpha, \beta, \gamma$; N 表示拉杆的数量. 由该式可知, 冷质量支撑系统在各方向的固有频率与拉杆数量、拉杆刚度、冷质量自重和拉杆在空间中倾角有关. (10) 式推导过程虽未过多考虑模型细节, 但是影响固有频率的关键物理参数均包含在内, 可为冷质量支撑系统的固有频率提供可靠的计算结果^[19].

3 优化分析

3.1 三维拉杆空间倾角优化

为提升超导磁体的抗冲击能力, 本文以磁体承受最大载荷的危险情况为拉杆空间倾角优化的依据. 由 (2) 式、(5) 式、(8) 式和 (9) 式可知, 当拉杆承受冷质量自重时, 上端拉杆的应力变化量为 $\frac{mg}{4A \cos \alpha}$, 磁体分别承受垂向 $5g$ 、轴向 $3g$ 和横向 $3g$ 的加速度冲击时, 上端拉杆的应力变化量分别为 $5mg/(8A \cos \alpha)$, $3mg/(8A \cos \beta)$ 和 $3mg/(8A \cos \gamma)$. 因此设计空间倾角优化的目标函数为

$$f = \frac{mg/4 + 5mg/8}{A \cos \alpha} + \frac{3mg}{8A \cos \beta} + \frac{3mg}{8A \cos \gamma} + \left| \frac{mg/4 + 5mg/8}{A \cos \alpha} - \frac{3mg}{8A \cos \beta} \right| + \left| \frac{mg/4 + 5mg/8}{A \cos \alpha} - \frac{3mg}{8A \cos \gamma} \right| + \left| \frac{3mg}{8A \cos \beta} - \frac{3mg}{8A \cos \gamma} \right|. \quad (11)$$

其中, 等号右边第一项、第二项和第三项分别表示

倾角 α, β 和 γ 对拉杆应力的贡献值. 为使磁体能够均衡地承受三维方向的冲击, 引入第四项、第五项和第六项作为变量差异的惩罚项, 分别表示倾角 α 和 β 对拉杆应力的贡献差、倾角 α 和 γ 对拉杆应力的贡献差以及倾角 β 和 γ 对拉杆应力的贡献差. 当目标函数 f 取最小值时, 表明拉杆在均衡承受三向冲击载荷的条件下, 其应力达到最小, 此时三维冷质量支撑系统的力学性能达到最优.

优化过程中的边界条件为

$$\begin{cases} \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{NK \cos^2 \alpha}{m}} \geq 40, \\ \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{NK \cos^2 \beta}{m}} \geq 20, \\ \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{NK \cos^2 \gamma}{m}} \geq 30, \\ \cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1. \end{cases} \quad (12)$$

结合边界条件进行目标函数的求解, 如图 4 所示, 解得 $\alpha = 31.22^\circ$, $\beta = 68.50^\circ$, $\gamma = 68.50^\circ$.

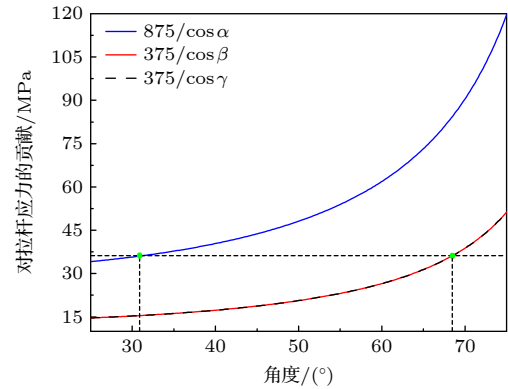


图 4 最优空间倾角的确定

Fig. 4. Determination of the optimal spatial inclination.

3.2 预紧力上下限的确定

在完成悬挂结构空间倾角的优化设计后, 可根据 (1) 式确定拉杆所施加预紧力的上下限. 超导磁体承受各种复杂工况时, 上端拉杆出现的最大应力 $\sigma_{u \max}$ 和下端拉杆出现的最小应力 $\sigma_{d \min}$ 分别为

$$\begin{cases} \sigma_{u \max} = \frac{1}{4} \cdot \frac{mg}{A \cos \alpha} + \frac{F_c}{A} + \frac{F_p}{A} + \frac{5mg}{8A \cos \alpha} \\ \quad + \frac{3mg}{8A \cos \beta} + \frac{3mg}{8A \cos \gamma} \leq [\sigma], \\ \sigma_{d \min} = \frac{F_p}{A} - \frac{5mg}{8A \cos \alpha} - \frac{3mg}{8A \cos \beta} - \frac{3mg}{8A \cos \gamma} \geq 0. \end{cases} \quad (13)$$

拉杆主要集组件与接口材料均为 AISI304 不

锈钢, 由于集成件中最小部件的横截面积小于接口横截面积, 所以此处的强度约束条件为

$$\sigma_{u1 \max} = \frac{\sigma_{u \max}}{A_1} \cdot A \leq [\sigma_1]. \quad (14)$$

式中, $[\sigma_1]$ 表示 AISI304 不锈钢的许用应力, 由材料强度 σ_1 和安全系数 n 决定, σ_1 取值为 520 MPa. A_1 表示最小集成件的横截面积, 其值为 56.745 mm².

利用有限元分析软件 ANSYS 模拟了拉杆组件的温度分布, 结果如图 5 所示. 由于对称的支撑结构会限制冷质量的冷缩位移, 拉杆的冷缩量 $\Delta l = 0.108$ mm^[18], 因此拉杆的冷缩力可计算为

$$F_c = \frac{EA\Delta l}{L_c} = 2866.73 \text{ N}. \quad (15)$$

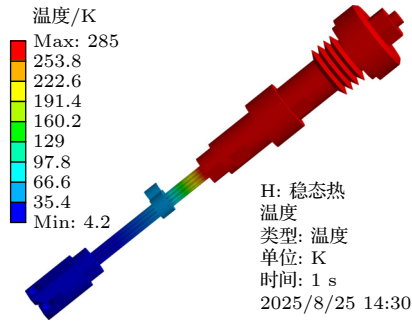


图 5 拉杆组件的温度分布
Fig. 5. Temperature distribution of the rod assembly.

取安全系数为 3, 求解得工程中可接受的预紧力取值范围为 $2777.22 \text{ N} \leq F_p \leq 3899.52 \text{ N}$, 本文取 $F_p = 3000 \text{ N}$.

3.3 三维悬挂结构空间姿态设计

由于冷质量支撑系统在横向和轴向的结构对称性, 依前文方法确定三维悬挂结构与空间坐标轴所成锐角后, 系统将存在如图 6 所示的四类空间姿态.

1) 利用 ANSYS 进行模态分析, 在仿真中由于碳纤维 T700 拉杆与 AISI304 集成件的连接处不规则, 易发生不收敛的情况, 因此整根拉杆均使用四面体单元进行网格划分, 并对网格进行加密. 线圈骨架与骨架上的不锈钢支撑螺纹杆均使用四面体单元划分网格, 线圈简化为圆筒, 使用六面体单元进行网格划分, 整个模型的网格均进行加密, 以提高计算精度. 仿真过程中的边界条件为: 1) 拉杆预紧力 F_p 为 3000 N; 2) 拉杆与冷质量固定连接.

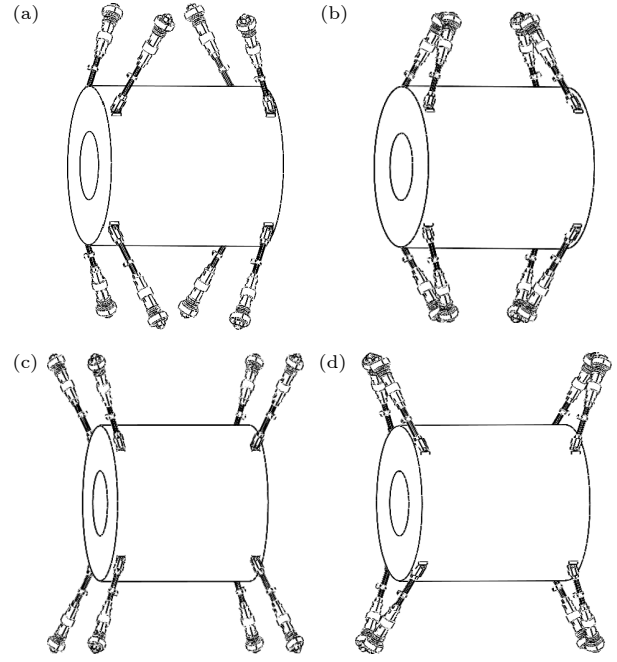


图 6 四类不同空间姿态示意图 (a) 姿态 A; (b) 姿态 B; (c) 姿态 C; (d) 姿态 D
Fig. 6. Schematic of four distinct spatial configurations: (a) Posture A; (b) posture B; (c) posture C; (d) posture D.

仿真结果如图 7 所示, A, B, C 和 D 四类空间姿态的一阶固有频率分别为 125.99 Hz, 67.605 Hz, 73.039 Hz, 120.74 Hz. 为使磁体的固有频率远离车载运输的主要激励频段, 本文采用具有最高一阶固有频率的 A 姿态.

在此空间姿态下, 冷质量支撑系统在垂向、横向和轴向振动时固有频率的理论计算值分别为 289.491 Hz, 124.067 Hz 和 124.067 Hz. 结构前六阶固有频率对应的各阶模态振型图如图 8 所示, 冷质量支撑系统在垂向、横向和轴向振动的固有频率分别为 289.15 Hz, 126.78 Hz 和 125.99 Hz, 可见由 (10) 式计算的理论与仿真值吻合较好. 冷质量支撑系统沿垂向、横向和轴向转动的固有频率分别为 241.69 Hz, 432.17 Hz 和 185.08 Hz, 表明其在三个方向的转动可得到有效约束.

4 动力学分析

4.1 超导磁体模态分析

模态分析是进行动力学性能分析的先决条件^[20,21]. 在进行模态分析时, 为提高计算效率, 在不影响结果准确性的前提下, 对磁体机械结构中一些不重要的管路接口、外形进行了简化, 其中对制冷机通过

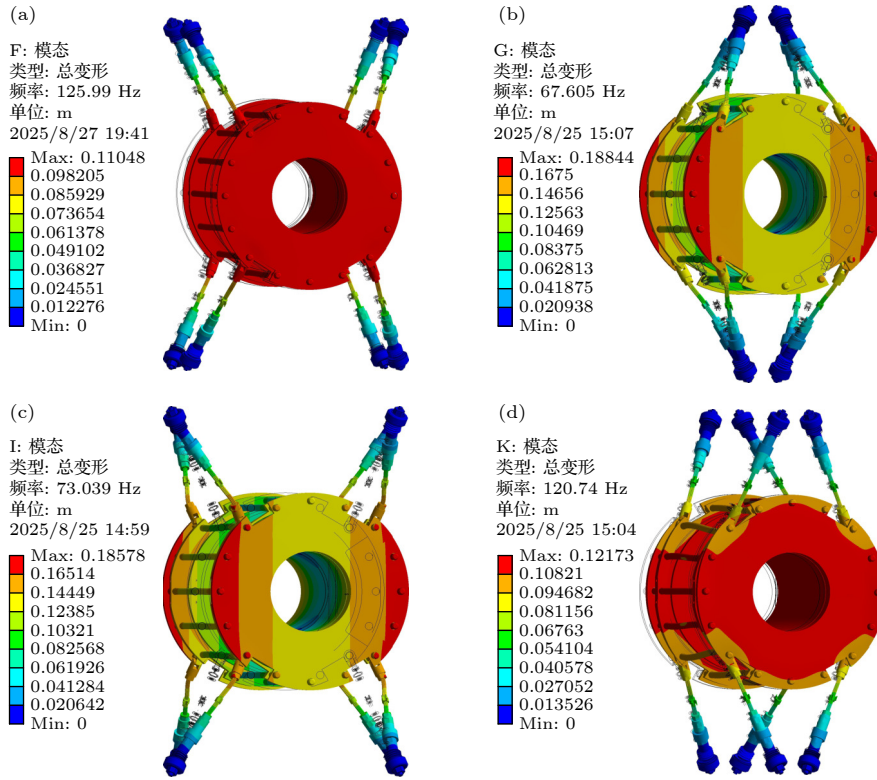


图 7 四类空间姿态一阶振型图 (a) 姿态 A; (b) 姿态 B; (c) 姿态 C; (d) 姿态 D

Fig. 7. First-order mode shapes for four types of spatial orientations: (a) Posture A; (b) posture B; (c) posture C; (d) posture D.

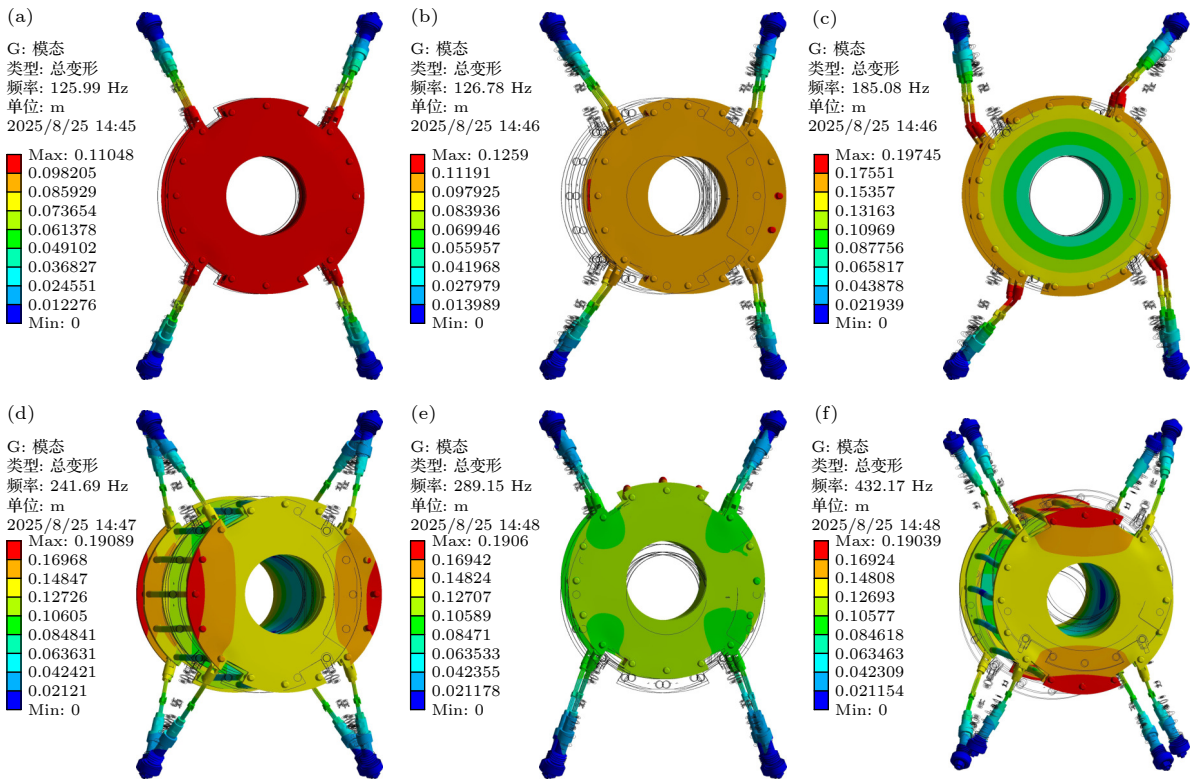


图 8 模态分析仿真结果 (a) 一阶振型; (b) 二阶振型; (c) 三阶振型; (d) 四阶振型; (e) 五阶振型; (f) 六阶振型

Fig. 8. Modal analysis simulation results: (a) First-mode shape; (b) second-mode shape; (c) third-mode shape; (d) fourth-mode shape; (e) fifth-mode shape; (f) sixth-mode shape.

质量单元模拟, 单元质量属性为 30 kg. 超导磁体固定方式是采用磁体一侧的环形面为固定面, 仿真所用材料的基本参数在表 2 列出.

表 2 各材料的基本参数

Table 2. Basic parameters of the respective materials.

| 材料 | 密度/(g·cm ⁻³) | 弹性模量/GPa | 泊松比 |
|-------------|--------------------------|----------|------|
| T2 紫铜 | 8.9 | 70 | 0.34 |
| 6061 铝合金 | 2.7 | 68.9 | 0.33 |
| T700 碳纤维 | 1.76 | 230 | 0.3 |
| AISI304 不锈钢 | 7.9 | 200 | 0.3 |

对前 10 阶模态参数进行计算, 求解结果见表 3. 可以看出, 超导磁体的模态振型主要分为三类, 第一类为冷质量在拉杆作用下的整体摆动; 第二类为磁体端部组件相对外筒的振动, 该模态主要与端部组件的质量有关; 第三类为拉杆的局部振型.

表 3 固有频率分布表

Table 3. Natural frequency distribution table.

| 阶次 | 模态频率/Hz | 振型描述 |
|--------|-----------------------|----------|
| 1—3 | 125.15—168.67, | 冷质量整体摆动 |
| 5—6 | 237.7—289.76 | |
| 4, 7—8 | 183.81, 293.03—405.22 | 磁体端部组件振动 |
| 9—10 | 417.93—419.06 | 拉杆的局部振动 |

4.2 随机振动分析

随机振动分析是一种基于概率统计学理论的谱分析技术 [22], 其研究的主要问题是系统受到随机激励时, 激励的统计特性、系统响应的统计特性, 以及激励与振动系统自身动态特性之间的关系 [23]. 本文对超导磁体开展高速公路谱随机振动 (满量级)

激励下的动力学性能分析, 此时随机激励载荷将不经衰减全部作为输入作用于磁体杜瓦, 之后从杜瓦传递到支撑系统, 对磁体本体组件的轴线与室温管轴线的同轴度和冷质量支撑系统的应力造成影响.

分析过程如下, 首先在室温管左右端轴心处建立两个参考点 A 和 B, 在磁体本体组件左右端轴心处建立两个参考点 C 和 D, 如图 9(a) 所示, 通过参考点的位移响应 PSD 曲线及 RMS 值反映同轴度的变化. 其次分别进行垂向、横向和轴向高速公路谱随机振动仿真, 振动过程中磁体组件和室温管在轴向、垂向和横向发生相对位移的示意图如图 9(b)—(d) 所示, 可知轴向相对位移对同轴度不存在影响, 因此本文针对各种振动条件下磁体组件和室温管的轴心参考点在垂直和横向方向上的位移响应进行分析. 最后仿真分析超导磁体的 von Mises 应力.

4.2.1 垂向高速公路谱随机振动

垂向高速公路谱随机振动激励下, 磁体组件与室温管轴心参考点的垂向和横向位移响应 PSD 曲线如图 10 所示, 曲线峰值处的频率对应超导磁体系统的固有频率, 此时激励频率与固有频率重合, 表明发生共振. 由于结构在垂向和横向振动的模态严格解耦, 垂向激励主要引起结构的垂向位移. 应力云图如图 11 所示, 轴心参考点的 RMS 值通过对位移 PSD 在频域内积分并取平方根计算, 计算公式为

$$RMS = \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} S_d(f)df}, \quad (16)$$

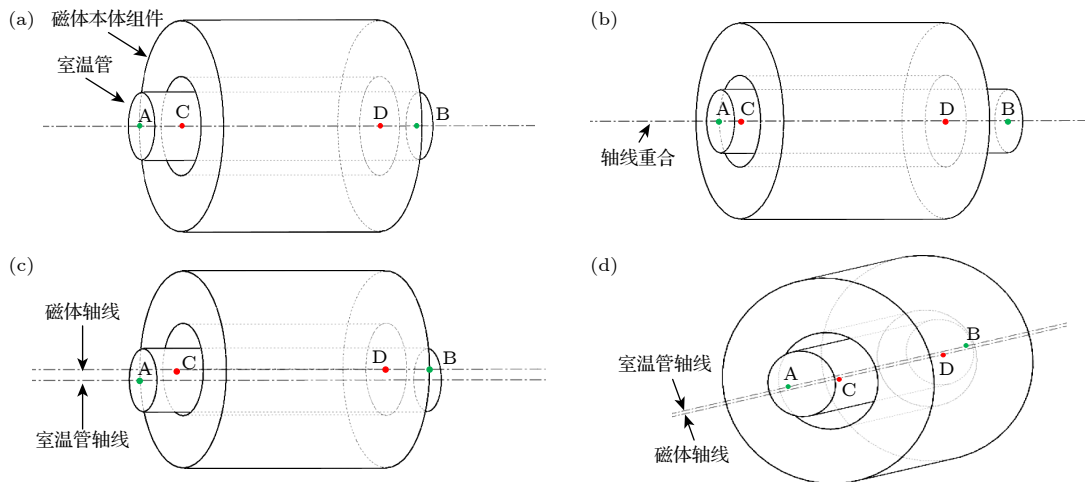


图 9 同轴度变化示意图 (a) 未发生相对位移; (b) 轴向相对位移; (c) 垂向相对位移; (d) 横向相对位移

Fig. 9. Schematic diagram of coaxiality variation: (a) No relative displacement occurred; (b) axial relative displacement; (c) vertical relative displacement; (d) lateral relative displacement.

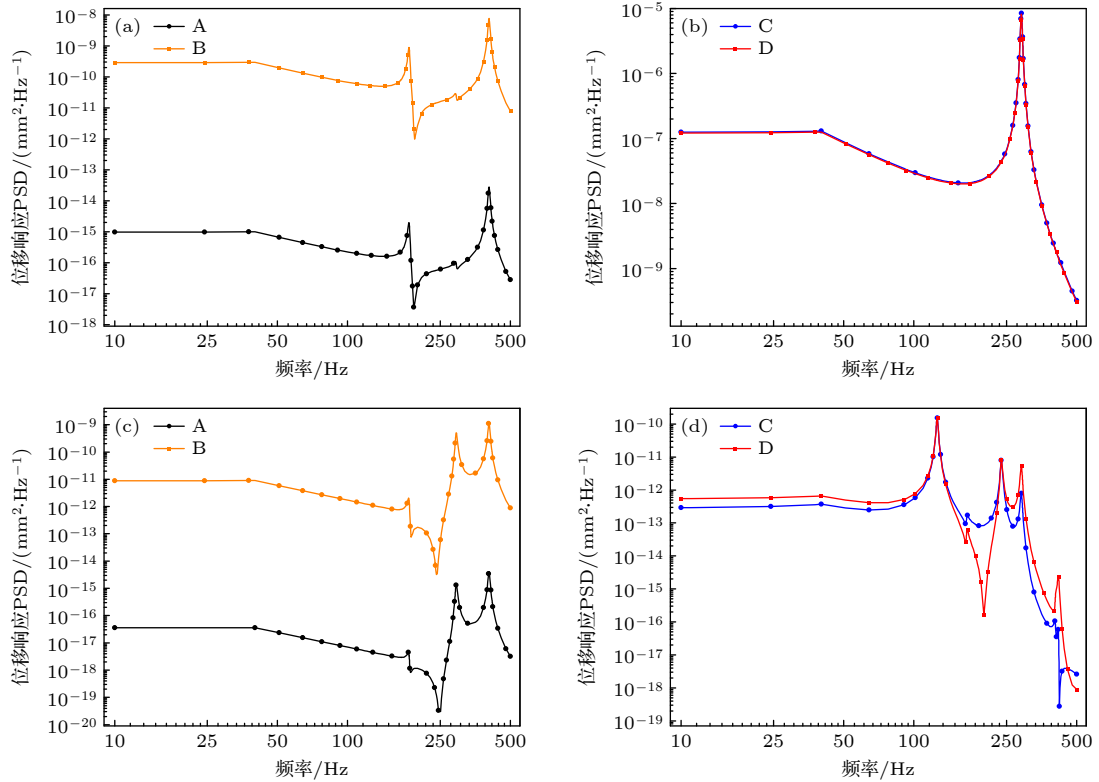


图 10 垂向激励下位移响应 PSD 曲线 (a) 室温管垂向位移; (b) 磁体组件垂向位移; (c) 室温管横向位移; (d) 磁体组件横向位移
 Fig. 10. PSD curve of displacement response under vertical excitation: (a) Vertical displacement of the room-temperature pipe; (b) vertical displacement of the magnet assembly; (c) lateral displacement of the room-temperature pipe; (d) lateral displacement of the magnet assembly.

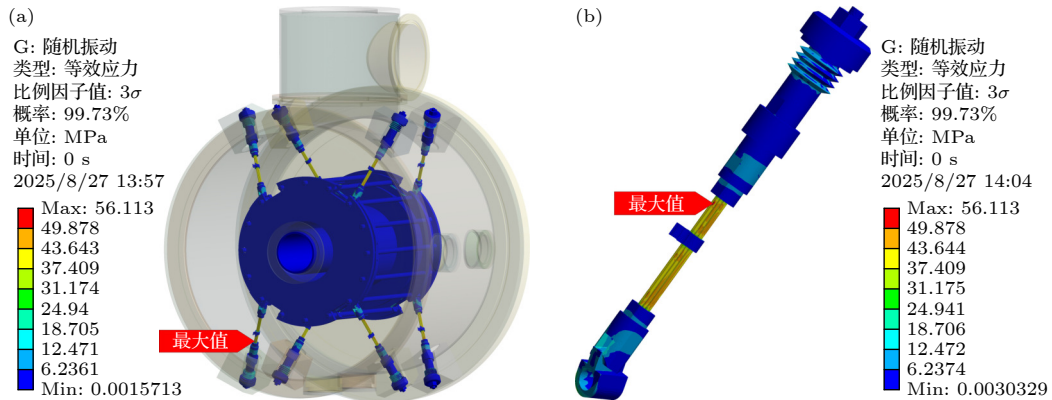


图 11 垂向激励下结构应力云图 (a) 整体应力云图; (b) 拉杆应力云图

Fig. 11. Stress contour plot of the structure under vertical excitation: (a) Overall stress map; (b) tie rod stress map.

其中, $S_d(f)$ 为位移响应 PSD, f_1 和 f_2 是频率分析范围, 计算结果在表 4 列出。

在工程振动分析中, 为确定结构的安全边界并提供高可靠度的设计依据, 常采用 3σ 位移与 3σ 应力等指标作为最大响应的估计值, 其中, σ 表示响应量的标准差. “ 3σ 置信度”是一个基于正态分布的统计学概念, 指某一随机变量的取值位于其均值附近 $\pm 3\sigma$ 区间内的概率约为 99.73%。

表 4 垂向激励下参考点 RMS 值

Table 4. RMS value of the reference point under vertical excitation.

| 参考点 | RMS/mm | |
|-----|-------------------------|-------------------------|
| | 垂向响应 | 横向响应 |
| A | 6.6403×10^{-7} | 2.6453×10^{-7} |
| B | 3.5306×10^{-4} | 1.4341×10^{-4} |
| C | 9.3631×10^{-3} | 2.6659×10^{-5} |
| D | 9.2138×10^{-3} | 2.7688×10^{-5} |

从表 4 可知, 3σ 置信度下磁体组件轴线相对于室温管轴线的垂向最大相对位移不超过 2.8087×10^{-2} mm, 横向最大相对位移不超过 3.5025×10^{-4} mm, 最大 von Mises 应力出现在碳纤维拉杆根部, 值为 56.113 MPa, 远低于碳纤维复合材料的强度极限.

4.2.2 横向高速公路谱随机振动

横向高速公路谱随机振动激励下, 磁体组件与室温管轴心参考点的垂向和横向位移响应 PSD 曲线如图 12 所示. 由于结构在垂向和横向振动的模态严格解耦, 横向激励主要引起结构的横向位

表 5 横向激励下参考点 RMS 值

Table 5. RMS value of the reference point under lateral excitation.

| 参考点 | RMS/mm | |
|-----|-------------------------|-------------------------|
| | 垂向响应 | 横向响应 |
| A | 3.2767×10^{-8} | 2.6002×10^{-7} |
| B | 1.6866×10^{-5} | 1.5255×10^{-4} |
| C | 5.591×10^{-6} | 2.0626×10^{-2} |
| D | 8.5689×10^{-6} | 2.0528×10^{-2} |

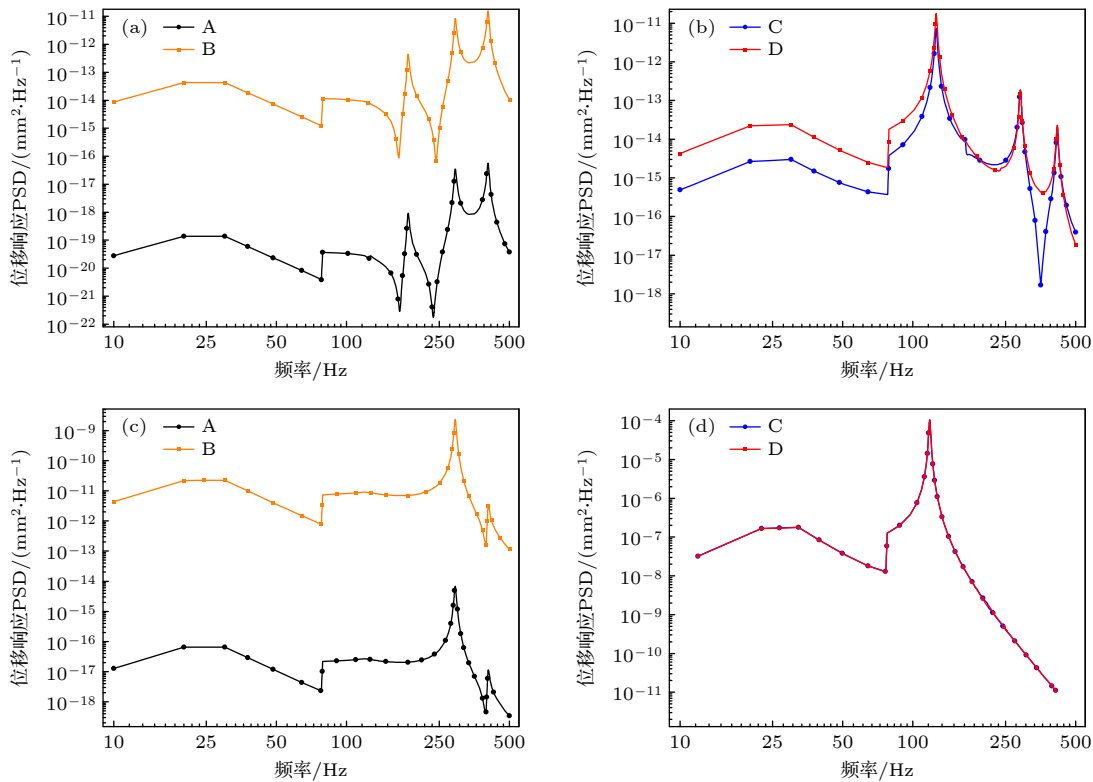


图 12 横向激励下位移响应 PSD 曲线 (a) 室温管垂向位移; (b) 磁体组件垂向位移; (c) 室温管横向位移; (d) 磁体组件横向位移
 Fig. 12. PSD curve of displacement response under lateral excitation: (a) Vertical displacement of the room-temperature pipe; (b) vertical displacement of the magnet assembly; (c) lateral displacement of the room-temperature pipe; (d) lateral displacement of the magnet assembly.

移. 轴心参考点的 RMS 值如表 5 所列, 应力云图如图 13 所示. 从结果可知, 3σ 置信度下磁体组件轴线相对于室温管轴线的垂向最大相对位移不超过 3.3825×10^{-5} mm, 横向最大相对位移不超过 6.1877×10^{-2} mm, 最大 von Mises 应力出现在碳纤维拉杆根部, 值为 58.388 MPa, 远低于碳纤维复合材料的强度极限.

4.2.3 轴向高速公路谱随机振动

轴向高速公路谱随机振动激励下, 磁体组件与室温管轴心参考点的垂向和横向位移响应 PSD 曲线如图 14 所示. 由于结构轴向的振动模态与垂向、横向振动的模态严格解耦, 轴向振动时垂向和横向的位移响应均较小. 轴心参考点的 RMS 值如表 6 所列, 应力云图如图 15 所示. 从结果可知, 3σ 置信度下磁体组件轴线相对于室温管轴线的垂向最大相对位移不超过 4.5146×10^{-3} mm, 横向最大相对位移不超过 1.1123×10^{-3} mm.

在超导磁体中, 冷质量支撑系统在垂向、横向和轴向的振动模态严格解耦, 其在对应方向振动的固有频率分别为 289.76 Hz, 125.96 Hz 和 125.15 Hz.

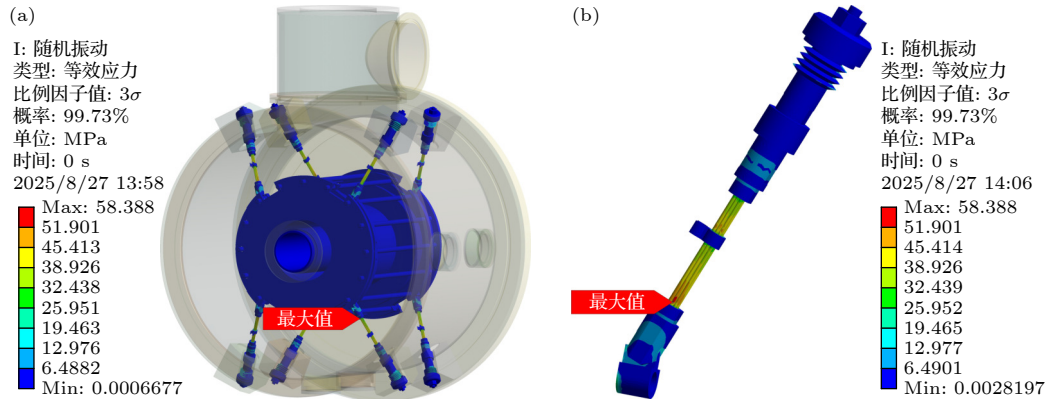


图 13 横向激励下结构应力云图 (a) 整体应力云图; (b) 拉杆应力云图

Fig. 13. Stress contour plot of the structure under lateral excitation: (a) Overall stress map; (b) tie rod stress map.

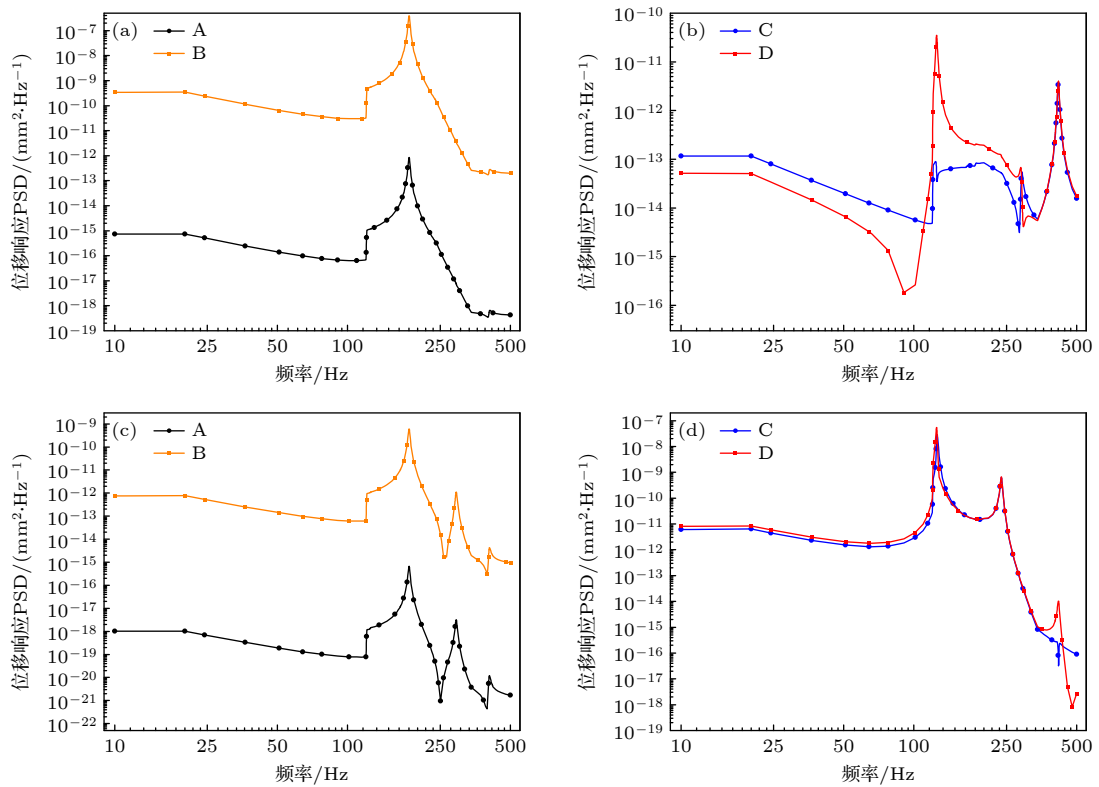


图 14 轴向激励下位移响应 PSD 曲线 (a) 室温管垂向位移; (b) 磁体组件垂向位移; (c) 室温管横向位移; (d) 磁体组件横向位移

Fig. 14. PSD curve of displacement response under axial excitation: (a) Vertical displacement of the room-temperature pipe; (b) vertical displacement of the magnet assembly; (c) lateral displacement of the room-temperature pipe; (d) lateral displacement of the magnet assembly.

表 6 轴向激励下参考点 RMS 值

Table 6. RMS value of the reference point under axial excitation.

| 参考点 | RMS/mm | |
|-----|-------------------------|-------------------------|
| | 垂向响应 | 横向响应 |
| A | 2.2112×10^{-6} | 6.2423×10^{-8} |
| B | 1.5126×10^{-3} | 5.9453×10^{-5} |
| C | 7.7399×10^{-6} | 2.9058×10^{-4} |
| D | 1.4397×10^{-5} | 3.7084×10^{-4} |

轴向振动谱在 125.15 Hz 附近的 PSD 值显著高于垂向谱在 289.76 Hz 附近与横向谱在 125.96 Hz 附近的 PSD 值. 这一现象表明, 在轴向固有频率附近的外部激励能够向系统输入更多能量, 进而诱发结构出现较高的 von Mises 应力响应. 该向激励下, 最大 von Mises 应力出现在碳纤维拉杆根部, 值为 229.23 MPa, 高于垂向和横向激励下的值, 但仍远低于碳纤维复合材料的强度极限.

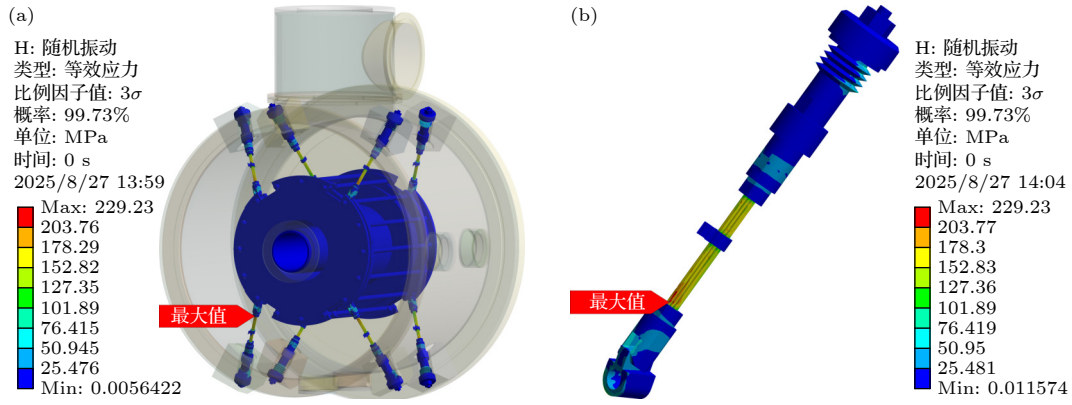


图 15 轴向激励下结构应力云图 (a) 整体应力云图; (b) 拉杆应力云图

Fig. 15. Stress contour plot of the structure under axial excitation: (a) Overall stress map; (b) tie rod stress map.

综上所述, 垂向、横向和轴向高速公路谱随机振动时, 磁体组件轴线相对于室温管轴线的垂向最大相对位移和横向最大相对位移均小于 0.1 mm, 最大应力均位于碳纤维拉杆根部, 远低于碳纤维复合材料的强度极限。上述研究表明, 冷质量支撑系统满足车载环境的设计要求, 超导磁体在高速公路运输的振动环境下具有良好的稳定性和可靠性。

5 结论

本文推导了磁体三维悬挂结构的动载模型。结合方向余弦平方和公式与高速公路卡车振动环境构造边界条件, 通过引入应力差异惩罚项构建目标函数, 对拉杆空间倾角进行了优化。结果表明, 当三维悬挂结构与垂向、轴向及横向所成锐角分别为 31.22° , 68.50° 和 68.50° 时, 磁体的力学性能达到最优。在最优倾角分布下, 冷质量支撑系统呈现出四类不同装配方式的空间姿态, 其中, A 类姿态的系统一阶固有频率最高, 为 125.99 Hz, 该频率显著高于车载运输的主要激励频段, 从而提升了系统的抗振性能。基于该姿态的集成车载运输仿真表明, 磁体组件轴线相对于室温管轴线的垂向位移和横向位移最大值均小于 0.1 mm; 最大应力出现在拉杆根部, 其值远低于碳纤维复合材料的强度极限, 表明冷质量支撑系统满足车载环境的设计要求。

参考文献

[1] Bottura L, Gourlay S A, Yamamoto A, Zlobin A V 2015 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **63** 751
[2] Wang Y S 2011 *The Basics of Superconducting Power Technology* (1st Ed.) (Beijing: Science Press) pp6-8 (in

Chinese) [王银顺 2011 超导电力技术基础 (第一版) (北京: 科学出版社) 第 6—8 页]
[3] Jiang X H, Xue P, Huang W C, Li Y 2024 *Acta Phys. Sin.* **70** 018401 (in Chinese) [蒋晓华, 薛芑, 黄伟灿, 李焯 2024 物理学报 **70** 018401]
[4] Wang Q L 2007 *The Science of High-field Superconducting Magnets* (Beijing: Science Press) pp24-37 (in Chinese) [王秋良 2007 高磁场超导磁体科学 (北京: 科学出版社) 第 24—37 页]
[5] Wang L, Wu H, Li S Y, Guo X L, Pan H, Zheng S X, Green M A 2011 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **21** 2259
[6] Green M A, Bangerter R O 2001 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **11** 1502
[7] Chen S Z, Wang Q L, Sun W S, Sun J S, Cheng J S 2023 *Trans. Chin. Electrotech. Soc.* **38** 879 (in Chinese) [陈顺中, 王秋良, 孙万硕, 孙金水, 程军胜 2023 电工技术学报 **38** 879]
[8] Hao G J, Zhu Y F, Fan J P, He K, Xie J, Liu P, Zhang Y, Xi W B 2024 *Cryog. Supercond.* **52** 6 (in Chinese) [郝国健, 朱银锋, 范吉鹏, 何坤, 谢杰, 刘鹏, 张玉, 奚维斌 2024 低温与超导 **52** 6]
[9] Wu J R 2023 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: University of Science and Technology of China) (in Chinese) [吴军荣 2023 博士学位论文 (合肥: 中国科学技术大学)]
[10] Liu Y Y 2018 *Ph. D. Dissertation* (Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [刘以勇 2018 博士学位论文 (上海: 中国科学院上海应用物理研究所)]
[11] Dai Z 2017 *M. S. Thesis* (Beijing: Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [戴忠 2017 硕士学位论文 (北京: 中国科学院高能物理研究所)]
[12] Li L K, Wang Q L, Zhao B Z, Ni Z P, Cui C Y, Wang H S 2011 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **21** 3640
[13] Zhang K, Zhu Z, Zhao L, Hou Z L, Wang M F, Zhang G Q, Yao W C, Ning F P, Wang Z J, Zhang X T 2014 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **25** 1
[14] Zhang K, Zhu Z, Zhang G Q, Dai Z, Mu Z H, Wang M F, Zhao L 2016 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **26** 1
[15] Huang L K, Wang Q L, Zhao B Z, Wang H, Li L K, Li Y 2011 *Cryog. Supercond.* **39** 22 (in Chinese) [黄礼凯, 王秋良, 赵保志, 王晖, 李兰凯, 李毅 2011 低温与超导 **39** 22]
[16] Xu C, Liu H, Liu J H, Dai Y M, Chen S Z, Cheng J S, Wang Q L, Huo S F, Shi Y C, Huang H J 2024 *High Power Laser Part. Beams* **36** 013013 (in Chinese) [徐策, 刘辉, 刘建华, 戴银

- 明, 陈顺中, 程军胜, 王秋良, 霍少飞, 史彦超, 黄慧杰 2024 *强激光与粒子束* **36** 013013]
- [17] Hopkins R A, Payne D A 1987 *Cryogenics* **27** 209
- [18] Fan Z D, Xu C, Zou W, Wang H, Zheng Y C, Chen S Z, Cheng J S, Wang Q L 2025 *Physica C* **634** 1354700
- [19] Zhang K 2014 *M. S. Thesis* (Beijing: Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [张恺 2014 硕士学位论文 (北京: 中国科学院高能物理研究所)]
- [20] Wang X W, Zhu Z A, Wang M L, Zhao L, Liu X Y, Xie Z T, Sun L T, Zhang G Q 2020 *Cryogenics* **2020** 11 (in Chinese) [王校威, 朱自安, 王梦琳, 赵玲, 刘旭洋, 谢宗泰, 孙丽婷, 张国庆 2020 *低温工程* **2020** 11]
- [21] Yin J 2012 *M. S. Thesis* (Harbin: Harbin Institute of Technology) (in Chinese) [殷赳 2012 硕士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]
- [22] Chen Y X 2024 *ANSYS Workbench 2024 Finite Element Analysis: From Beginner to Expert* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) p274 (in Chinese) [陈艳霞 2024 *ANSYS Workbench 2024 有限元分析从入门到精通* (北京: 电子工业出版社) 第 274 页]
- [23] Li Y T 2020 *Mechanical Vibration Theory and Applications* (Beijing: Science Press) p413 (in Chinese) [李有堂 2020 *机械振动理论与应用* (北京: 科学出版社) 第 413 页]

Spatial attitude optimisation of three-dimensional cold mass support system for superconducting magnets for vehicular transport environments*

ZHENG Yichuan¹⁾²⁾ XU Ce^{1)†} WANG Hui¹⁾ CHEN Shunzhong¹⁾

CHENG Junsheng¹⁾³⁾ WANG Qiuliang¹⁾

1) (*Key Laboratory of Applied Superconductivity, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

2) (*School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China*)

3) (*Institute of Electrical Engineering and Advanced Electromagnetic Drive Technology, Qilu Zhongke, Jinan 250102, China*)

(Received 9 July 2025; revised manuscript received 2 September 2025)

Abstract

The spatial attitude and dynamic performance of the cold mass support system for superconducting magnets are critical for engineering applications. This study aims to develop a design method for the spatial attitude of tie rods through a series of theoretical derivations and simulations, enabling superconducting magnets to possess a certain degree of dynamic environmental adaptability. This paper first constructs a mathematical model of the three-dimensional cold mass support system under impact loads. Stress formulas for the tie rod under vertical $5g$, axial $3g$, and lateral $3g$ impact loads are derived. Based on this, a penalty term for stress differences is introduced to construct the objective function, and the spatial inclination angle of the tie rod is optimised. After determining the acute angle between the tie rod and the coordinate axis, the cold mass support structure exhibits four different attitudes. In order to keep the natural frequency of the magnet away from the main excitation frequency band of vehicle transportation, this study uses the finite element method to perform modal analysis and proposes a method for posture design based on the principle of maximising the first-order natural frequency. Finally, random vibration simulations are conducted for the vibration environment of highway transportation. Reference points are established at both ends of the axis of the magnet body components and the room-temperature tube axis. The displacement response power spectral density (PSD) curves and root mean square values of the reference points during vibration are analysed. The conclusions of this study are as follows. 1) When the acute angles α , β , and γ included between the tie rod and the vertical, axial, and lateral directions are 31.22° , 68.50° , and 68.50° , respectively, the mechanical performance of the three-dimensional cold mass support system reaches its optimal state. 2) When the tie rod is installed in the spatial attitude configuration, the first-order natural frequency of the cold mass system is the highest, with a value of 125.99 Hz. 3) During long-distance integrated vehicle transportation, the maximum values of the vertical and lateral displacements of the magnet assembly axis relative to the room-temperature tube axis are both less than 0.1 mm. The maximum stress locations are both at the root of the carbon fibre tie rod, far below the strength limit of carbon fibre composite materials, indicating that the superconducting magnet possesses a certain degree of dynamic environmental adaptability. These analysis results provide theoretical guidance and data support for the structural safety and stability of this type of superconducting magnet during long-distance integrated vehicle transportation.

Keywords: superconducting magnet, cold mass support system, spatial attitude, random vibration

DOI: [10.7498/aps.75.20250894](https://doi.org/10.7498/aps.75.20250894)

CSTR: [32037.14.aps.75.20250894](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20250894)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 52325701, 52293421, 52293422) and the Research Funds of Qilu Zhongke Advanced Electromagnetic Drive Technology Institute, China.

† Corresponding author. E-mail: xc@mail.iee.ac.cn

面向车载运输环境的超导磁体三维冷质量支撑系统空间姿态优化

郑义川 徐策 王晖 陈顺中 程军胜 王秋良

Spatial attitude optimisation of three-dimensional cold mass support system for superconducting magnets for vehicular transport environments

ZHENG Yichuan XU Ce WANG Hui CHEN Shunzhong CHENG Junsheng WANG Qiuliang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 010801 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20250894

CSTR: 32037.14.aps.75.20250894

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20250894>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

14 T全身超导MRI磁体的技术挑战——大规模应用强场超导磁体未来十年的发展目标之一

Technology challenges of 14 T whole-body superconducting MRI magnets —A target of high-field superconducting magnet technology for large scale applications in next decade

物理学报. 2021, 70(1): 018401 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202042>

光晶格作用下里德伯冷原子系统中的二维空间光孤子

Two-dimensional spatial optical solitons in Rydberg cold atomic system under the action of optical lattice

物理学报. 2023, 72(10): 104202 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230096>

超导-冷原子复合系统的研究进展

Research progress of superconductor and cold atoms hybrid quantum system

物理学报. 2023, 72(20): 200306 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230985>

大尺寸三维超声振动系统的智能优化设计

Intelligent optimization design of large-scale three-dimensional ultrasonic vibration system

物理学报. 2024, 73(8): 084304 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240006>

三维空间轨道角动量全息

Three-dimensional spatial orbital angular momentum holography

物理学报. 2024, 73(9): 094202 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231822>

中国空间站冷原子光钟激光系统

Laser system of cold atom optical clock in China Space Station

物理学报. 2023, 72(18): 184202 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230412>