

2 m 加速管冷却系统的数值模拟和优化设计

李绍青¹ 沈连娣² 裴元吉³

1 (安徽建筑工业学院机械与电气工程系 合肥 230022)

2 (中国科学技术大学精密机械与精密仪器系 合肥 230026)

3 (中国科学技术大学国家同步辐射实验室 合肥 230029)

摘要 描述了利用工程设计分析软件 I-DEAS 对高功率直线加速管的冷却系统进行的 CAD 分析研究过程。通过对不同冷却条件下加速管温度场、冷却系统的冷却效果进行的数值模拟分析对比,实现了对加速管冷却系统的优化设计。这可为类似的高功率直线加速器的设计提供参考。

关键词 加速管, 冷却系统, 高频腔, 数值模拟, 优化设计

中图分类号 TL594

直线加速管是辐照加速器的核心部件。在运行过程中, 高频微波能量的耗散导致的热变形会引起其工作频率的变化, 有可能使加速器无法正常工作。因此, 恒温冷却系统成了加速器结构中的一个重要组成部分。对于高功率加速器其地位更为重要。精确的温度场分析是设计冷却系统的关键^[1-5]。由于加速管结构复杂, 能量耗散分布又是非线性的, 传统的解析法对这样复杂问题的求解无能为力。有限元理论及工程设计分析软件的不断完善使加速管的温度场数值模拟成为可能^[6-8], 这大大提高了设计的速度和可靠性, 还可实现对系统的优化设计^[6,9-10]。我们利用工程设计分析软件 I-DEAS 对高功率辐照加速器加速管的冷却系统进行计算机辅助设计, 并通过对系统温度场的有限元分析, 实现了冷却系统结构及参数的优化设计。

1 加速管介绍和冷却系统设计指标

这是一个长 1.88 m、外径 100 mm、由 54 个完整的加速腔体 (RF cavity) 组成的等阻抗加速管, 加速管前后还分别有一个输入耦合腔和输出耦合腔, 如图 1 所示。加速管的材料都是无氧铜。

加速管的能量耗散不是常值: 起动时为 16 kW, 工作过程中沿加速腔轴向如图 2 所示的曲线分布。计入输入输出耦合腔的能耗, 加速管总能耗在没有束流时约为 11.146 kW, 有束流时约为 6.368 kW。

冷却系统的设计指标是使加速管在运行过程中温度保持在 $(30\pm 3)^{\circ}\text{C}$ 内。冷却介质用水。同时为了满足其它构件安装和使用的方便, 要求结构紧凑,

水路用单进单出结构, 且要求水路的出入口不在同一端。水流量尽可能小, 最好不超过 $6\text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

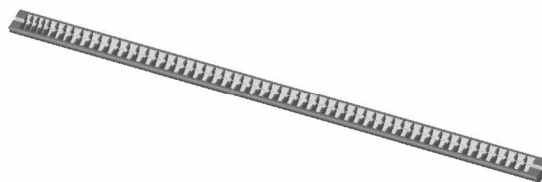


图 1 2 m 加速管结构
Fig.1 Structure of the 2 m accelerating tube

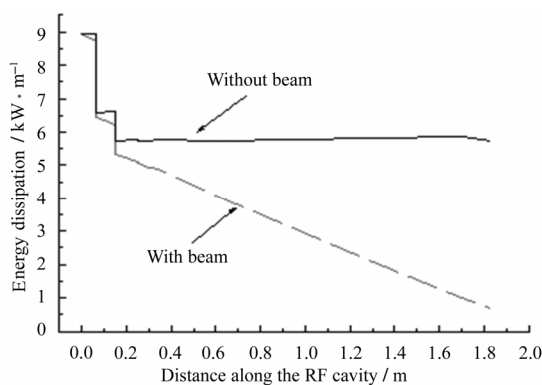


图 2 加速管载荷分布曲线
Fig.2 Energy dissipation on the RF cavity

2 冷却系统结构的初步设计

加速管常用的冷却系统结构有两种^[1-2]: 水管式和水套式, 水管式结构是直接加在加速管外壁焊接水管; 水套式结构则是做一个与加速管同轴的水套, 用隔板将加速管与水套间的空间隔成若干水路。

这是个高功率加速管, 为了提高冷却效率, 水

第一作者: 李绍青, 男, 1972 年出生, 2003 年于中国科学技术大学精密机械与仪器系获硕士学位, 从事利用有限元法进行结构数值模拟和优化设计的研究, 现为安徽建筑工业学院机电系讲师

收稿日期: 2005-06-09, 修回日期: 2005-08-10

与加速管的接触面积越大越好^[1-2]。对比以上两种结构可知水套式结构较为理想。另外，由于加速器的运行环境温度随季节有较大浮动，因此，要求系统对环境有较强的鲁棒性（robustness），就这一点而言，水套式结构也较好。再综合考虑设计指标中对冷却系统结构的要求、加速管的安装条件、结构刚度、加工工艺性、材料导热性等因素，初步设计本系统采用水套式单水路冷却结构，如图 3 所示。水套材料采用不锈钢，内径 166 mm，厚 5 mm；隔板用铸铝，厚 5 mm。水套的展开图如图 4 所示。

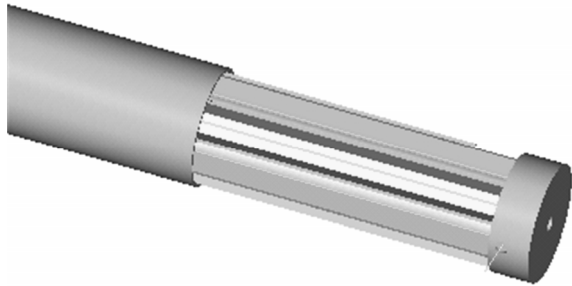


图 3 水套式冷却
Fig.3 Water jacket cooling structure

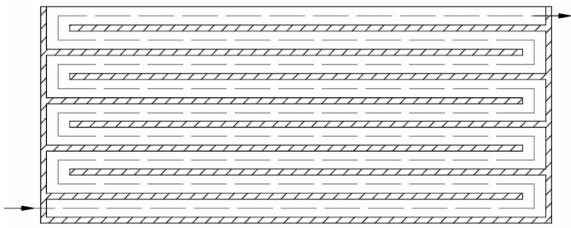


图 4 水套展开图（虚线为水路）
Fig.4 Unfolding diagram of the water jacket where the dotted line indicates the route of cooling water

3 数值模拟和优化设计

3.1 往复路数的选择

为了确定水在水套中的往返路数，这里对往复七路和九路（以下简称为七路结构、九路结构）的情况做了模拟对比（用的是启动时载荷，设能量耗散沿轴向均匀分布），如表 1、表 2 所示。结果显示九路结构冷却效果明显好于七路结构。对五路、十一路等结构也做了简单模拟，结果很不理想，没做进一步探讨。所以最后取单水路九路结构。

表 1 七路结构冷却模拟结果（环境温度 25℃，入水温度 23℃，载荷 16 kW）
Table 1 Simulation result of the seven-way cooling structure (ambient 25℃, inlet water 23℃, total load 16 kW)

冷却水质量流速 Mass flux of water /kg•s ⁻¹	出水温度 Water temperature at outlet /℃	加速管温度 Temperature of accelerating tube /℃			冷却水带走的能量 Energy carried by water /W
		Max.	Min.	ΔT	
1.0	26.81	37.90	28.30	9.60	15981
2.0	24.91	35.20	26.64	8.54	15992
3.0	24.27	34.17	26.08	8.09	15994

表 2 九路结构冷却模拟结果（环境 25℃，入水 23℃，载荷 16 kW）
Table 2 Simulation result of the nine-way cooling structure (ambient 25℃, inlet water 23℃, total load 16 kW)

冷却水质量流速 Mass flux of water/ kg•s ⁻¹	出水温度 Water temperature at outlet /℃	加速管温度 Temperature of accelerating tube /℃			冷却水带走的能量 Energy carried by water /W
		Max.	Min.	ΔT	
1.0	26.82	36.20	27.52	8.68	15979
1.7	25.25	33.93	26.45	7.48	15989
2.0	24.91	33.50	26.22	7.28	15990
3.0	24.27	32.66	25.80	6.86	15993
4.0	23.96	32.20	25.60	6.61	15995

3.2 流量的确定

优化设计的另一个目的是降低冷却系统的运行成本，即在满足加速管整体温度离散度前提下尽可能减小水流量。图 5 为由表 2 得到的九路结构水流量和加速管温度离散度（以下简称温差）的关系图，图 5 显示：水的流量越大，温差越小，冷却效果越好。但这一趋势是逐渐减小的。图 6 为由表 2 得到的冷却水流量与加速管温度最大值、最小值、中心

值之间的关系图。图 6 显示：水流量的波动会引起加速管温度的浮动，流量越大，曲线斜率的绝对值越小，加速管温度受流量波动的影响越小。

只从表 2 和图 5 还无法确定流速的大小，因为上面数据是用启动载荷模拟的，而设计要求的指标是加速管运行条件下须满足的指标。表 3、表 4 分别给出了加速管运行时有束流和无束流情况下九路结构的冷却结果，由这两组数据得到加速管在运行状态下的流量—温差图，如图 7 所示。

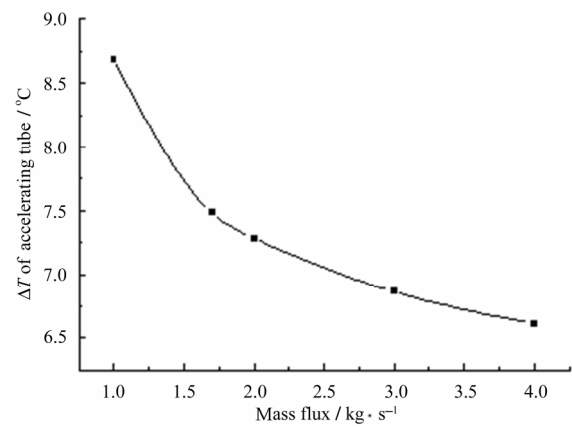


图 5 流量—温差图

Fig.5 Influence of mass flux of cooling water on temperature distribution of accelerating tube

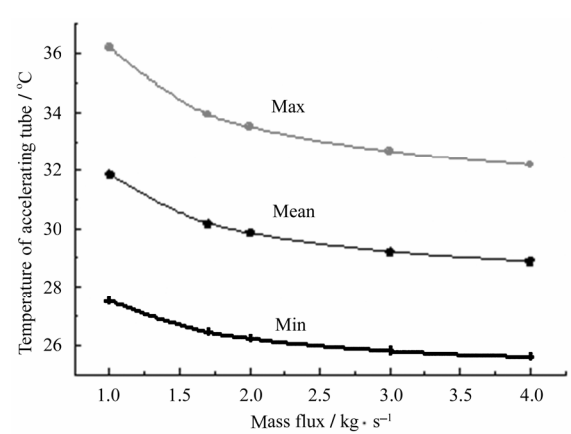


图 6 流量—温度图

Fig.6 Various temperatures of accelerating tube vs. mass flux of cooling water

表 3 无束流时九路结构冷却结果（环境 25℃，入水 23℃，能耗总计 11.146 kW）

Table 3 Simulation result of the nine-way cooling structure in without-beam state (ambient 25℃, inlet water 23℃, total load 11.146 kW)

冷却水质量流速 Mass flux of water / kg·s ⁻¹	出水温度 Water temperature at outlet /℃	加速管温度 Temperature of accelerating tube /℃			冷却水带走的能量 Energy carried by water /W
		Max.	Min.	ΔT	
1.0	25.66	33.48	26.73	6.75	11132
1.75	24.52	31.56	25.96	5.61	11139
2.0	24.33	31.21	25.83	5.38	11140
2.5	24.06	30.70	25.66	4.95	11141
3.0	23.89	30.34	25.54	4.80	11142

表 4 有束流时九路结构冷却结果（环境 25℃，入水 23℃，能耗总计 6.368 kW）

Table 4 Simulation result of the nine-way cooling structure in with-normal-beam state (ambient 25℃, inlet water 23℃, total load 6.368 kW)

冷却水质量流速 Mass flux of water / kg·s ⁻¹	出水温度 Water temperature at outlet /℃	加速管温度 Temperature of accelerating tube /℃			冷却水带走的能量 Energy carried by water /W
		Max.	Min.	ΔT	
1.0	24.52	32.60	25.55	7.06	6361
1.75	23.87	31.11	25.36	5.76	6364
2.0	23.76	30.76	25.23	5.53	6365
2.5	23.61	30.33	25.18	5.15	6366
3.0	23.51	30.05	25.14	4.91	6366

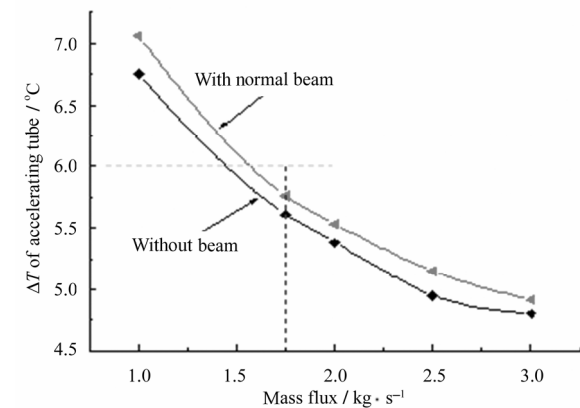


图 7 工作状态下加速管流量—温差图

Fig.7 Influence of mass flux of cooling water on temperature distribution of accelerating tube in running states

为满足 6 t·h⁻¹ 的流量要求，冷却水流速应小于 1.67 kg·s⁻¹。图 7 显示，当冷却水流速为 1.67 kg·s⁻¹ 时温差能满足要求。但考虑到各种可能的误差，如数值模拟的计算误差、边界条件简化带来的误差、入水温度不能完全一致（见下文）以及环境、流速波动等对冷却效果的影响等，这里我们推荐流速采用较保守的值 1.75 kg·s⁻¹，即 6.3 t·h⁻¹，略高于设计指标。此时温度的离散度可保证在±3℃ 以内。

表 3、4 和图 7 还显示，虽然有束流时加速管热载荷偏低，但冷却效果还不如无束流的情况。这是由于载荷沿轴向分布不均匀所致（见图 2）。有束流时载荷分布均匀性不如无束流情况，导致温度一头

偏高一头偏低,温差反而偏大。

3.3 入水温度的确定

通过模拟计算,得到图 8 所示流速恒定(这里为 $1.75 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$)时加速管中心温度随入水温度的变化图。图 8 中显示加速管中心温度随入水温度的变化几乎是等值线性的。由这一性质和表 3、表 4 容易得出如下结果:当流速为 $1.75 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,使得加速管温度中心为 30°C 时所需的入水温度为 24.24°C (无束流时); 24.76°C (有束流时)。这两者不相等,不能同时满足,建议取二者的平均值 24.5°C 。

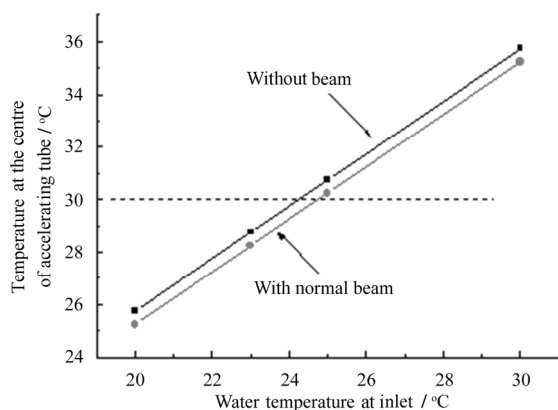


图 8 入水温度对加速管温度的影响

Fig.8 Influence of water temperature at inlet on temperature at the centre of accelerating tube

3.4 环境温度的要求

数值模拟结果还表明,在上面推荐的冷却条件下,当环境温度在 10°C — 30°C 间变动时,加速管的温度浮动小于 0.1°C ,完全可以忽略不计。可见此冷却系统使得加速系统对环境有很强的鲁棒性。

这一点也可从表 3、表 4 中的数据得到解释说明:加速管的大部分能耗(98%以上)都由冷却水带走,因此,空气冷却在这里的作用很小。图 8 的现象也可由此来解释。这些也体现了结构设计的合理性。

4 冷却系统的最终设计参数和冷却效果

根据上述数值计算结果,最终采用了单输入单输出、往复九路的不锈钢外套的水套式冷却结构。推荐冷却的运行参数是:冷却水流速 $1.75 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$,入水温度 24.5°C ,对运行环境无特殊要求。在推荐的冷却条件下,加速管温度分布如图 9 所示。图 9 中显示无束流时加速管温度分布(左图)比有束流时(右图)均匀,原因前面已经提及。其实,冷却水沿轴向往复流动的过程不仅是带走热量的冷却过

程,同时也是使得加速管轴向温度均匀化的过程——在载荷高的地方,管壁与水流的温差大,水带走的热量多;相反,载荷低的地方水带走的热量少。这样轴向温差就减小了。

带有冷却系统的加速管的结构外观如图 10 所示。此加速管作为加速器的重要组成部分现已交付使用,运行良好,客户满意。

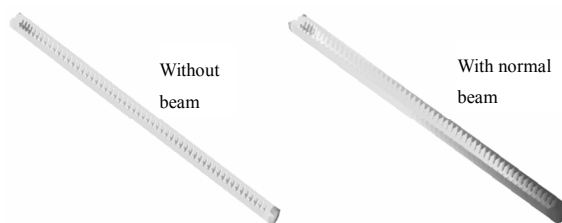


图 9 推荐运行条件下加速管温度分布图

Fig.9 Map of the temperature distribution on the RF cavity in recommended running state

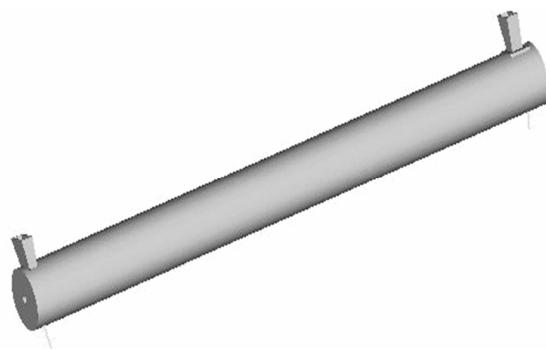


图 10 加速管的最终结构

Fig.10 Final structure of the accelerating tube

参考文献

- 1 李绍青, 沈连娟, 姚建平, 等. 强激光与粒子束, 2003, **15**(12): 1241—1244
LI Shaoqing, SHEN Lianguan, YAO Jianping, *et al.* High Power Laser Part Beams, 2003, **15**(12): 1241—1244
- 2 SHEN Lianguan, LI Shaoqing. Numerical design and optimization of cooling system for 2 MeV traveling wave accelerator. Proceedings of 2003 Particle Accelerator Conference. May12-1
- 3 田忠, 裴元吉. 核技术, 1999, **22**(2): 107—113
TIAN Zhong, PEI Yuanji. Nucl Tech, 1999, **22**(2): 107—113
- 4 PEI Yuanji, WANG Defang, HE Duohui. Rev Sci Instrum, 1989, **60**(7): 1701—1704
- 5 马毅勇, 程祖海, 张耀宁. 强激光与粒子束, 1999, **1**: 6—10
MA Yiyong, CHENG Zuhai, ZHANG Yaoning. High Power Laser Part Beams, 1999, **1**: 6—10
- 6 沈连娟, 钱晓宝. HLS 储存环高频腔的结构有限元分析.

- 第二届全国加速器技术学术交流会论文集, 1998
- SHEN Lianguan, QIAN Xiaobao. Finite element analysis of RF cavity for HLS storage ring. Proceedings of the Second Conference on Technology of Accelerator, 1998
- 7 HU Defang, TIAN Baoying, OUYANG Xiaotao, *et al.* The MACSYM-350 computer system for thermal parameters measurement and control for HESYRL. Proceedings of the International Conference on Synchrotron Radiation Application, May 9-1, 1989, Hefei, China.
- 8 Parietti L, Bultman N K, Chen Z. Thermal/structural analysis and frequency shift studies for the spallation neutron source (SNS) drift tube linac. Proceedings of Particle Accelerator Conference, 1999. 3591—3593
- 9 Konecni S, Bultman N K. Analysis of the slot heating of the coupled cavity linac cavity. Proceedings of Particle Accelerator Conference, 2001. 900—902
- 10 Campbell B, Ranganathan R. An experimental and analytical study of a buoyancy driven cooling system for a particle accelerator. Proceedings of Particle Accelerator Conference. May 17-20, 1993. 1402—1404

Numerical simulation and optimization of cooling system for 2 m accelerating tube

LI Shaoqing¹ SHEN Lianguan² Pei Yuanji³

1 (Department of Machinery & Electricity, Anhui Institute of Architecture & Industry, Hefei 230022)

2 (Department of Precision Machinery & Precision Instrumentation, USTC, Hefei 230026)

3 (Hefei National Synchrotron Radiation Lab., USTC, Hefei 230029)

Abstract Numerical simulation and optimization in the design of a cooling system for a 2 m long accelerating tube are introduced. Some parameters of the cooling system are calculated and optimized by means of Finite Element Analysis. The work is done with the CAD/CAM/CAE software I-DEAS. As a result, a compact jacket style structure of stainless steel is chosen and employed in the accelerator. The system is very robust against surrounding temperature change. Now the facility is running well.

Key words FEM, CAD, Cooling system, Accelerator, Optimization, Simulation

CLC TL594